

DISKUSE O ZKUŠEBNĚ-TECHNICKÝCH PROBLÉMECH ODOLNOSTI ASFALTOVÝCH SMĚSÍ PROTI ÚNAVĚ – ČÁST 2

*Univ. prof. Dr. Wolfgang Arand,
Institut pro silniční stavitelství, Technická univerzita Braunschweig*

Bitumen 2004, č. 2, str. 70

4. Namáhání asfaltových směsí v konstrukcích dopravních ploch

Pokud máme řešit problematiku odolnosti asfaltových směsí proti únavě, musíme mít jasno v otázce, zda lze poznatky o chování **stavebního materiálu** „asfaltová směs“ za působení opakovaného namáhání nebo poznatky o chování **systemu** „konstrukce asfaltových dopravních ploch“ získat za současného působení klimatických podmínek a dopravního zatížení. Jako první možnost mohla být použita zkušební metoda popsaná v návrhu normy EN 12697-24 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 24: Odolnost vůči únavě; tuto zkušební metodu lze považovat za dostatečnou, pokud se podaří upravit podmínky zkoušky tak, že pochybnosti vyjádřené v předcházejících kapitolách této studie by byly bezpředmětné. Ovšem ani volba nižších zkušebních teplot a vyšších frekvencí zatěžování nemůže odstranit námitku, že zkouškami popsanými v návrhu evropské normy nelze dosáhnout homogenity stavu namáhání ve smyslu, který definoval P. Des Croix [11].

Pokud máme pomocí zkoušek únavy prováděných na asfaltových směsích odhadnout nejen vlastnosti zkoušeného materiálu, nýbrž i pravděpodobné chování konstrukcí dopravních ploch vystavených vlivům klimatických podmínek a dopravního zatížení, nezbyvá nic jiného, než se zásadně vypořádat s problémem namáhání, která v těchto případech vznikají.

Namáhání konstrukce asfaltové dopravní plochy vlivy klimatických podmínek a dopravního zatížení je znázorněno na obrázku 5 v podobě náčrtu podstaty problému. Ještě před zahájením silničního provozu existují v konstrukci vozovky za nízkých teplot tahová napětí podmíněná ochlazováním, tzv. kryogenní tahová napětí. Tato napětí vykazují (podle teplotních gradientů) svoje nejvyšší hodnoty na povrchu vozovky (viz obrázek 5, řádek (1)). Tato napětí překrývají ohybová napětí podmíněná dopravním zatížením, která lze vypočítat pomocí známých algoritmů – například programu BISAR [18]. Ve stopě kol vykazují tato ohybová napětí na povrchu konstrukce vozovky tlakové složky a na spodní straně tahové složky. Jiná situace je v oblasti mimo působení zatížení nápravy ve vzdálenosti 40 cm až 90 cm od stopy kol (viz obrázek 5, řádek (2)). Tam je povrch vozovky namáhán tahem a spodní strana vozovky tlakem.

Pokud jsou tahová a tlaková napětí, působená dopravním zatížením, překrývána kryogenními tahovými napětími, vede to v oblasti stopy kol k výraznému snížení tahových napětí, která se vyskytují na povrchu vozovky; ve vzdálenosti 40 cm až 90 cm vedle stopy kol (v závislosti na teplotě) však k jejich nepřehlédnutelnému zvětšení (viz obrázek 5, řádek (3)), ačkoliv ohybová napětí podmíněná dopravním zatížením mimo stopu kol dosahují jen nižších hodnot než ve stopě kol. Za dostatečně nízkých teplot, které jsou předpokladem pro vznik únavových trhlin (za vysokých teplot se úrava projevuje jako trvalé deformace), se tedy tahová napětí pozorovaná na povrchu vozovky v oblasti kryogenních tahových napětí projevují jako dolní maximální hodnota a v oblasti součtu kryogenních tahových napětí a tahových napětí podmíněných dopravním zatížením jako horní maximální hodnota.

K vyjádření únavy asfaltových směsí v konstrukcích vozovek musí být tedy provedeny místo zkoušek střídavým namáháním tzv. zkoušky míjivým tahovým namáháním, u nichž se veličina namáhání střídavě pohybuje mezi dolní a horní hodnotou, aniž by bylo nutno měnit kladná nebo záporná znaménka (viz obrázek 6, [3] a [4]).

Tyto úvahy o nutnosti provádění zkoušek odolnosti proti únavě asfaltových směsí míjivým tahovým namáháním byly v rámci diskuse o zkušebně-technických problémech podnětem k vývoji tohoto typu zkoušky a k jejímu provádění na asfaltových betonech 0/11 s asfaltem B 65 při systematické obměně zkušební teploty T a tahových namáhání podmíněných dopravním zatížením. Proto byla nejdříve ve zkouškách ochlazování s teplotními kroky $T = -10$ K/h zjištěna kryogenní tahová napětí v závislosti na teplotě a stanovena jako dolní maximální hodnota míjivého tahového namáhání. Namáhání podmíněná dopravním zatížením byla vypočtena pomocí programu BISAR a stanovena jako hodnota kvantilu $\alpha = 25\%$, $\alpha = 50\%$, $\alpha = 75\%$, $\alpha = 100\%$ tahových napětí, zjištěných pod kolem o hmotnosti

5,75 t. Výsledek zkoušky je znázorněn na obrázku 7. Lze poznat, že asfaltové betony při teplotě $T = -10\text{ °C}$ dosahují velmi vysokého počtu zatěžovacích cyklů na mezi porušení, zatímco oba poslední sloupce vykazují při nižších i vyšších teplotách výrazně nižší hodnoty.

Nepřihlížíme-li k souvislostem mezi počtem zatěžovacích cyklů na mezi porušení a zkušební teplotou, znázorněným na obrázku 7 a počítáme s normovanými, tj. na konkrétní maximum vztaženými hodnotami pro tahová napětí podmíněná dopravním zatížením, obdržíme křivku, znázorněnou na obrázku 8 (dolní křivka). Při zohlednění kryogenních tahových napětí se tedy počet aplikovatelných zatěžovacích cyklů až do porušení (na rozdíl od kryogenních tahových napětí, u kterých se nepřihlíží k závěrům Saala a Pella [19]) po dosažení maxima s dalším poklesem teplot výrazně snižuje.

K podobným výsledkům dospěl Guericke [20] již v roce 1970, i když s jiným odůvodněním.

Legenda

Fall

In der Rollspur

40 cm – 80 cm neben der Rollspur

(1) Kryogenne Zugspannung $\sigma_z(T)$ [MPa]

(2) Verkehrslastbedingte Zugspannung $\sigma_z(V)$ [MPa]

(3) Superposition $\sigma_z(T) + \sigma_z(V)$ [MPa]

Fahrbahnoberfläche – FO

případ

ve stopě kol

40 cm – 80 cm vedle stopy kol

kryogenní tahové napětí $\sigma_z(T)$ [MPa]

tahové napětí podmíněné dopravním zatížením $\sigma_z(V)$ [MPa]

superpozice $\sigma_z(T) + \sigma_z(V)$ [MPa]

povrch vozovky – FO

Obrázek 5: Kryogenní napětí $\sigma_z(T)$, tahové napětí podmíněné dopravním zatížením $\sigma_z(V)$, v asfaltové konstrukci vozovky v závislosti na hloubce pod povrchem vozovky FO (náskres podstaty problému)

Legenda

Kraftgeregelter Wechselfersuch
Weggeregelter Schwellversuch
Kraftgeregelter Wechselfersuch
Weggeregelter Schwellversuch

zkouška únavy při střídavém namáhání s řízením síly
zkouška únavy při mříjivém namáhání s řízením dráhy
zkouška únavy při střídavém namáhání s řízením síly
zkouška únavy při mříjivém namáhání s řízením dráhy

Obrázek 6: Konvenční zkoušky (1 a 2) a zkoušky odpovídající praxi (3 a 4) v rámci zkušební-technické diskuse o odolnosti asfaltových směsí proti únavě

Legenda

Bruchlastwechselzahl
Prüftemperatur

počet zatěžovacích cyklů na mezi pevnosti
zkušební teplota T [$^{\circ}\text{C}$]

Obrázek 7: Počet zatěžovacích cyklů na mezi pevnosti N asfaltového betonu 0/11 s asfaltem B 65 v závislosti na zkušební teplotě T a hodnotě kvantilu α tahových napětí podmíněných dopravním zatížením; max. $\alpha = 100\%$

Legenda

Asphalttemperatur [$^{\circ}\text{C}$]
Anzahl der Lastwechsel bis zum Versagen [-]

teplota asfaltové směsi [$^{\circ}\text{C}$]
počet zatěžovacích cyklů do porušení [-]

Obrázek 8: Počet zatěžovacích cyklů do porušení v důsledku působení výlučně mechanických tahových napětí (horní křivka) a mechanických a kryogenních tahových napětí (dolní křivka) asfaltové směsi v závislosti na teplotě

5. Technický zkušební předpis

Problémem únavy asfaltových směsí se po teoretické stránce zabývají odborníci z Institutu pro silniční stavitelství technické univerzity v Braunschweigu již od roku 1983 [21]; na výsledky teoretického výzkumu navázaly praktické zkoušky v laboratoři od začátku 90. let [22 až 26]. Proto mohly být shromážděny zkušenosti se zkouškou míjivým tahovým napětím při systematické obměně návrhu asfaltové směsi a jejích vlastností – druhu a gradace pojiva, viskozity pojiva, zrnitosti (vyjádřené pomocí obsahu fileru) a mezerovitosti. Jednoznačně pozitivní zkušenosti z praxe, které potvrdily závěry teoretických úvah, byly pro autora této studie podnětem, aby v únoru roku 2003 předložil německé Výzkumné společnosti pro silniční stavitelství a dopravu (FGSV) návrh technického

zkušební předpisu pro zkoušku odolnosti proti únavě míjivým tahovým napětím [27] k odborné diskusi v příslušných pracovních skupinách a výborech. V dalším textu budou vysvětleny nejdůležitější body návrhu tohoto předpisu.

Při zkoušce míjivým tahovým napětím byla trámečková zkušební tělesa namáhána za konstantní teploty při jednoosém napětí v podélném směru zkušební tělesa sinusovým tahovým namáháním, jehož dolní maximální hodnota odpovídala kryogenním tahovým napětím přiměřeným zkušební teplotě a horní maximální hodnota odpovídala součtu kryogenních a mechanických tahových napětí.

U asfaltových směsí s maximální velikostí zrna $D = 11,2$ mm mají trámečková zkušební tělesa šířku a tloušťku (40 ± 1) mm a délku $l = (160 \pm 2)$ mm. Pro zkoušení asfaltových směsí s maximální velikostí zrna větší než $D = 11,2$ mm má šířka a tloušťka zkušební tělesa činit (55 ± 1) mm. Pro asfaltové směsi se středně tvrdými asfalty se doporučují zkušební teploty $T = +10$ °C, $T = \pm 0$ °C, $T = -10$ °C a $T = -20$ °C. Tvrdší asfaltová pojiva mohou vyžadovat vyšší zkušební teploty, měkčí pojiva nižší.

Zkušební tělesa jsou pro dosažení trvalého pevného spojení za vysokých i nízkých teplot nalepena pomocí dvousložkového lepidla z epoxidové pryskyřice na adaptér, který je spojen s elektrohydraulickým zkušebním zařízením pomocí kardanového kloubu. Během zkoušky jsou zkušební tělesa umístěna v temperovací komoře, ve které je možno udržovat zvolenou konstantní zkušební teplotu s přesností $\Delta T = \pm 0,3$ K. Ve fázi temperování je zkušební těleso udržováno bez napětí pomocí programu pro řízení zkoušky, instalovaného v osobním počítači.

Pro sinusové míjivé tahové napětí se dolní maximální hodnota stanovuje ve zkoušce ochlazování [28]. Odpovídá kryogennímu tahovému napětí při zkušební teplotě zvolené pro zkoušku míjivým tahovým napětím $\sigma_{\mu} = \sigma_z (T = T_{Pr})$. Horní maximální hodnota sinusového míjivého tahového napětí odpovídá součtu kryogenních a mechanických tahových napětí a z ekonomických důvodů byla při provádění zkoušky jednotně stanovena na $\sigma_m = 1,6$ MPa. Frekvence zatěžování byla podle požadavků uvedených v [6] stanovena jednotně na $f = 10$ Hz.

Zkoušky byly zásadně prováděny až do porušení zkušební tělesa. Tím se stal počet zatěžovacích cyklů na mezi porušení N kritériem pro posouzení odolnosti asfaltových směsí proti únavě. Podle současného stavu znalostí může být přesnost metody za podmínek opakovatelnosti odhadnuta pomocí variačních koeficientů zatěžovacích cyklů na mezi porušení N , přičemž se přesnost za poklesu teplot zlepšuje a pro zkušební teplotu $T_{Pr} \leq -10$ °C, dosahuje hodnoty $V = 15$ %.

V protokolu o zkoušce jsou uvedeny dolní maximální hodnota míjivého tahového napětí σ_{μ} , horní maximální hodnota σ_0 , frekvence zatěžování f , zkušební teplota T a počet zatěžovacích cyklů na mezi porušení N .

6. Algoritmy pro odhad počtu zatěžovacích cyklů na mezi porušení

Již výzkumné práce citované v kapitole 5 [22 až 26] nabízejí příležitost provedení zkoušky, která experimentálně zjištěné výsledky matematicky aproximuje pomocí vhodných algoritmů. Jako výsledek této zkoušky byla definována rovnice uvedená v tabulce 2, ve které lze zcela jasně rozlišit pět různých členů.

Konstanta K (člen 1) slouží kromě koeficientů a exponentů kvantitativnímu přizpůsobení zvolené funkce experimentálně zjištěným údajům, což se děje účelněji pomocí evoluční strategie.

Druhý člen (uvedený v kulatých závorkách) charakterizuje vliv obsahu filerů F a obsahu pojiva B na počet aplikovatelných zatěžovacích cyklů do porušení. Koeficienty c_2 a c_3 byly definovány po četných zkouškách, vždy s kladným znaménkem. To znamená: vyšší obsahy filerů a vyšší obsahy pojiva působí příznivě na odolnost hutněných asfaltových vrstev proti únavě. Avšak pozor: vysoký relativní poměr asfaltové malty může negativně ovlivnit odolnost proti trvalým deformacím. Z důvodů těchto protichůdných vlivů složek směsi je nezbytná další optimalizace.

Třetí člen s horní maximální hodnotou míjivých tahových napětí σ_0 jako základ s exponenty v hranatých závorkách popisuje vliv součtu kryogenních napětí a tahových napětí podmíněných dopravním zatížením. Protože parametr c_4 je vždy záporný, vyrovná se zvětšení tahového napětí σ_0 nadměrnému snížení počtu zatěžovacích cyklů na mezi porušení; zejména absolutní hodnota všech exponentů vždy předpokládá hodnoty výrazně větší než 1. Při teplotách kolem $T = +60$ °C dosahuje úplný exponent hodnoty přibližně $c_4 = -2,0$; při teplotách kolem $T = -30$ °C již hodnot výrazně nižších – $c_4 = -5,0$. Citlivost asfaltových směsí vůči únavě tedy vzrůstá s poklesem teplot.

Tabulka 2: Počet zatěžovacích cyklů do porušení – Počet zatěžovacích cyklů na mezi porušení N u asfaltových betonů 0/11 v závislosti na obsahu fileru, obsahu pojiva, bodu měknutí metodou kroužek a kulička, mezerovitosti, teplotě a horní maximální hodnotě míjivého tahového napětí

$$N = \underbrace{K}_1 \times \underbrace{(c_1 + c_2 \times F + c_3 \times B)}_2 \times \underbrace{\sigma_0^{[c_4 \times e^{(c_5 \times T)}]}}_3 \times \underbrace{(c_6 + T + c_7 \times EP)^{c_8} \times e^{[c_9 \times (c_6 + T + c_7 \times EP)]}}_4 \times \underbrace{(H_{bit} - c_{10})^{c_{11}}}_5$$

kde	K	je	konstanta
	c_i		součinitel, případně exponent
	F		obsah fileru
	B		obsah pojiva
	EP		bod měknutí metodou kroužek a kulička
	H_{bit}		mezerovitost [% objemu]
	T		teplota [°C]
	σ_0		horní maximální hodnota míjivého tahového napětí [MPa]

Čtvrtý člen rovnice – tj. součin obou následujících členů popisuje dále (nyní ovšem bezprostředně) vzájemný vliv viskozity asfaltu (pomocí bodu měknutí metodou kroužek a kulička) a teploty na počet zatěžovacích cyklů na mezi porušení. Zde má vzájemný vliv teploty a viskozity pojiva kvantitativně hodnocené pomocí bodu měknutí metodou kroužek a kulička význam, protože umožní vytvoření maxima počtu zatěžovacích cyklů na mezi porušení při stanovené teplotě.

Pátý a poslední člen rovnice umožňuje zohlednění rozdílů u mezerovitosti H_{bit} asfaltových betonů při zjišťování počtu zatěžovacích cyklů na mezi porušení, přičemž hodnota parametru c_{10} se předpokládá mezi $c_{10} = 1,0$ až $c_{10} = 2,2$, tj. průměrně $c_{10} = 1,5$. Skutečnost, že exponent c_{11} je vždy záporný a nachází se u $c_{11} = -2$, znamená, že vysoké procento mezerovitosti má na odolnost vůči únavě negativní vliv.

Pokud nejsou všechny veličiny, ovlivňující vlastnosti asfaltových směsí (obsah fileru, obsah pojiva, bod měknutí metodou kroužek a kulička a mezerovitost) současně systematicky obměňovány, mohou/mají být odpovídající členy rovnice v tabulce 2 s konstantou K shrnuty do konstanty K' . Na základě této možnosti byly při analytickém popisu pravidelně používány výsledky získané experimentálně v rámci výzkumného úkolu. Součinitele korelační závislosti zjištěné při této aproximaci jako míra kvality přiblížení se nacházely bez výjimky mezi $r = 0,91$ až $r = 1,00$, nejčastěji mezi $r = 0,98$ až $r = 1,00$. Tuto skutečnost lze interpretovat jako důkaz, že zkušební metoda popsaná v kapitole 5 je vhodná, aby vyjádřila ze zkušebně-technického hlediska charakteristiky únavy asfaltových směsí s vysokou přesností.

$$N = a \times \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^b \text{ nebo } N = a \times \left(\frac{E^*}{\sigma}\right)^b \quad [-]$$

kde	N	je	počet aplikovatelných zatěžovacích cyklů do porušení	[-]
	a		součinitel závislý na teplotě	[-]
	b		exponent závislý na teplotě	[-]
	E^*		komplexní modul tuhosti	[MPa]
	σ		napětí	[MPa]
	ε		protažení	[-]

Minerova hypotéza

První kumulované poruchy v důsledku únavy se objeví, když:

$$\sum \frac{n_i}{N_i} = 1 [-]$$

kde	n_i/N_i	je	vypočítaná hodnota únavy ve třídě zatížení i	[-]
	n_i		počet aplikovaných zatěžovacích cyklů ve třídě zatížení i	[-]
	N_i		počet aplikovatelných zatěžovacích cyklů do porušení ve třídě zatížení i	[-]

Obrázek 9: Podstata únavy

7. Ověření a platnost metody

Na základě potvrzení předem teoreticky zpracovaných poznatků o problematice únavy asfaltových směsí [21] zkouškami míjivého tahového napětí byl vypracován výpočetní program, který umožnil odhadnout vliv gradace asfaltového pojiva na únavu asfaltových konstrukcí vozovek různé skladby a různé tloušťky v závislosti na únosnosti podkladu, dopravním zatížení a teplotě konstrukce vozovky formou stanovení teoretické doby životnosti [29, 30]. Vstupy modulárně řešeného výpočetního programu tvoří globální záření, teploty vzduchu, relativní vlhkosti a rychlosti větru, měřené v hodinových intervalech, dále teploty v konstrukci vozovky, vypočtené z teplotně-technických charakteristik asfaltových směsí a z nich odvozená kryogenní tahová napětí i tahová napětí podmíněná dopravou, vypočtená pomocí programu BISAR. Výpočet teoretické doby životnosti vyjádřené „v letech“ byl proveden podle Minerovy hypotézy (viz obrázek 9).

Použití modelu únavy na jedenácti pozemních komunikacích ve spolkové zemi Hesensko prokázalo v deseti případech shodu výsledků výpočtů s výsledky pozorování v praxi, zejména v případě tvorby trhlin (příklad jedné ze sledovaných pozemních komunikací je znázorněn na obrázku 10). V posledním jedenáctém případě se dodatečně ukázalo, že údaje o dopravním zatížení byly chybné: silnice vedla do kamenolomu, do kterého vjížděly kamiony prázdné a vyjížděly plně naložené, takže jízdní pruhy v obou směrech vykazovaly zcela rozdílné dopravní zatížení. Za tohoto předpokladu **musel** být výpočet odhadu pravděpodobné doby životnosti chybný.

Obrázek 10: Součet vypočítaných hodnot únavy za rok n_i/N_i pro pozemní komunikaci v Německu a okamžik zjištění první viditelné trhliny

n_i počet aplikovaných zatěžovacích cyklů ve třídě zatížení i

N_i počet aplikovatelných zatěžovacích cyklů do porušení ve třídě zatížení i

8. Vliv viskozity asfaltu a mezerovitosti asfaltové směsi

Je vhodné doplnit ještě některé závěry o závislosti počtu zatěžovacích cyklů na mezi porušení na viskozitě asfaltového pojiva a na mezerovitosti asfaltové směsi. Jak je znázorněno na obrázku 11, vykazují asfaltové betony s asfaltem běžné gradace a běžnou mezerovitostí za stanovené zkušební teploty T_1 pod bodem mrazu schopnost přenášet maximální počet zatěžovacích cyklů. Při tzv. teplotě porušení T_{Br} klesá počet aplikovatelných zatěžovacích cyklů na mezi porušení na nulu (viz obrázek 11, řádek (1)). Pokud asfaltové pojivo mírně ztvrdne, posune se maximum počtu zatěžovacích cyklů na mezi porušení N do oblasti poněkud vyšších teplot a současně se poněkud zmenší – z důvodů mírně vyšší mezerovitosti asfaltové směsi, která je v důsledku ztvrdnutí asfaltového pojiva hůře zhutnitelná (viz obrázek 11, řádek (2)).

Pokud je ztvrdnutí asfaltu velmi značné, posune se maximum počtu aplikovatelných zatěžovacích cyklů dokonce do oblasti teplot nad bodem mrazu. Při teplotě T_1 – tedy takové teplotě, při které asfaltová směs s asfaltem běžné gradace a s běžnou mezerovitostí může přenášet nejvyšší počet zatěžovacích cyklů na mezi porušení N – dochází u asfaltové směsi se značně ztvrdlým pojivem a velmi zvýšenou mezerovitostí k porušení (tvorba trhlin) již spontánně při první aplikaci zatížení. Kromě toho je maximum počtu zatěžovacích cyklů na mezi porušení N v porovnání s hodnotou zjištěnou u asfaltového betonu s asfaltovým pojivem běžné gradace výrazně menší z důvodu vyšší mezerovitosti asfaltové směsi, podmíněné horší zhutnitelností (viz obrázek 11, řádek (3)). Tento příklad ukazuje, že spolehlivá predikce provozních vlastností bezpodmínečně vyžaduje zkoumání odolnosti asfaltových směsí proti únavě za různých teplot. Tento požadavek je nutný zejména proto, aby viskozita asfaltu mohla být optimálně přizpůsobena klimatickým podmínkám konkrétní oblasti; nezbytné předpoklady jsou definovány v pracích [29 a 30].

Legenda

Bitumenviskosität	viskozita asfaltu
Hohlraumgehalt	mezerovitost asfaltové směsi
Prinzipiskizze	nákres podstaty problému
Temperatur [°C]	teplota [°C]
normal	normální
mäßig verhärtet	mírně ztvrdlé asfaltové pojivo
stark verhärtet	silně ztvrdlé asfaltové pojivo
mäßig vergrößert	mírně zvýšená
stark vergrößert	silně zvýšená

Obrázek 11: Počet střídavých zatížení do porušení asfaltového betonu v závislosti na gradaci asfaltového pojiva a mezerovitosti asfaltové směsi

9. Shrnutí a výhledy

Vydání návrhu normy zkoušení odolnosti asfaltových směsí proti únavě (EN 12697-24) bylo v diskusi o zkušební-technické problematice zkušební metody podnětem ke kritickému posouzení čtyř dynamických zkoušek ohybem a dynamické zkoušky příčným tahem popsanych v návrhu normy podle přesných principů technické mechaniky.

U zkoušek ohybem bylo konstatováno, že délka zkušebních těles je v poměru k rozměrům průřezu zčásti příliš malá a pro všechny čtyři zkoušky nemůže být spolehlivě prokázána Bernoulliho hypotéza o zachování stejných průřezů, Hookův zákon proporcionality mezi napětími a protaženími a požadavek rovnosti modulů pružnosti asfaltových směsí v tlaku a v tahu. Kromě toho nesplňují zkoušky ohybem požadavek homogenity stavu namáhání, která je dána pouze tehdy, když na každém místě zkušebního tělesa existuje tentýž stav napětí-protahování. Poslední závěr platí i pro dynamickou zkoušku příčným tahem. Tato zkouška se kromě toho provádí za zkušebních teplot, za nichž podle teoretických předpokladů není možné porušení v důsledku dosažení meze pevnosti v tahu.

Již před patnácti lety byl v Institutu pro silniční stavitelství Technické univerzity v Braunschweigu zahájen vývoj zkoušky míjivým tahovým napětím, která měla představovat vhodný nástroj pro diskusi o zkušební-technické problematice odolnosti asfaltových směsí proti únavě. Při vývojových pracích na této zkoušce byla zejména zkoumána namáhání asfaltových směsí klimatickými podmínkami

a dopravním zatížením v konstrukcích dopravních ploch v oblasti nacházející se mimo stopy kol vozidel.

Jednoznačně pozitivní a teoretickými studii potvrzené zkušenosti se zkouškou míjivým tahovým napětím byly podnětem k vypracování návrhu technického předpisu pro zkoušku míjivým tahovým napětím a k předložení tohoto návrhu pracovním skupinám a výborům německé Výzkumné společnosti pro silniční stavitelství a dopravu (FGSV). Zdůvodnění vypracování návrhu tohoto předpisu vychází ze skutečnosti, že u všech zkoušek míjivým tahovým napětím mohly být systematickým obměňováním ovlivňujících faktorů zjištěny algoritmy pro odhad počtu zatěžovacích cyklů na mezi porušení s velmi dobrou kvalitou přiblížení experimentálně zjištěným údajům a že teoretické úvahy, které byly základem zkoušek míjivým tahovým napětím, byly ověřeny a jejich platnost byla prokázána v praxi.

Příspěvek uzavírá výklad o vlivu viskozity asfaltového pojiva a mezerovitosti asfaltové směsi, ve kterém je vysvětleno, že je naprosto nutné provádět zkoušky odolnosti proti únavě za zcela odlišných zkušebních teplot, aby bylo možno odhadnout, jaká viskozita asfaltového pojiva nejlépe odpovídá klimatickým podmínkám oblasti, ve které má být asfaltová směs použita.

Svým výkladem uvedené problematiky zamýšlel autor článku předložit odborníkům, kteří se zabývají normalizací odolnosti asfaltových směsí proti únavě, odborné podněty k vyřešení otázky, jakým způsobem musí být zkoušky popsány v uvedené normě formulovány, aby mohly být považovány za vědecky potvrzené. Kromě toho by bylo velmi žádoucí, aby při příští revizi EN 12697-24 byla do normy zařazena i zkouška míjivým tahovým napětím.

10. Poděkování

Autoři odborné literatury, jejichž práce jsou uvedeny v seznamu použité literatury, jsou vědeckými a technickými pracovníky Institutu pro silniční stavitelství Technické univerzity v Braunschweigu a jsou spoluautory této studie. Ve všech citovaných pracích odvedli vysoce odbornou a angažovanou práci. Výzkumné práce uvedené v seznamu použité literatury byly vypracovány s finanční podporou Německé společnosti pro výzkum, spolkového ministra dopravy, infrastruktury a bytové výstavby a spolkového ministra hospodářství. Administrativní otázky převzala Výzkumná společnost pro silniční stavitelství a dopravu, Německý institut pro asfaltové vozovky ve spolupráci s pracovní skupinou průmyslových výzkumných sdružení. Všem zúčastněným vyslovuje autor studie nejupřímnější díky.

Literatura

- [18] BISAR Computer Program (**Bitumen Structures Analysis in Roads**), Koninklijke Shell Laboratorium Amsterdam 1972
(*Výpočetní program BISAR (Bitumen Structures Analysis in Roads), Koninklijke Shell Laboratorium Amsterdam 1972*)
- [19] Saal, R. N. J.; Pell, P. S.: Fatigue of Bituminous Road Mixes, *Kolloidzeitschrift* 171 (1960) 1, 61 – 71
(*Saal, R. N. J.; Pell, P. S.: Únava asfaltových silničních směsí, Kolloidzeitschrift 171 (1960), č. 1, str. 61 – 71*)
- [20] Guericke, R.: Neue Ergebnisse von Dauerbiegeprüfungen an bituminösen Gemischen. *Die Straße* 10 (1970) 7, 396 ff.
(*Guericke, R.: Nové výsledky zkoušek únavy při kmitavém napětí v ohybu na asfaltových směsích. Die Straße, ročník 10 (1970), str. 396 a následující*)
- [21] Arand, W.: Zum Einfluß tiefer Temperaturen auf das Ermüdungsverhalten von Asphalten. Schriftenreihe der Arbeitsgruppe „Asphalt- und Teerstraßen“ der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Heft 26, 28 – 35, Köln 1983
(*Arand, W.: Vliv nízkých teplot na únavu asfaltových směsí. Soubor publikací pracovní skupiny „Asfaltové a dehtové vozovky“ Výzkumné společnosti pro silniční stavitelství a dopravu (FGSV), sešit 26, str. 28 – 35, Kolín 1983*)
- [22] Arand, W.; v. d. Decken, St.; Hase, M.; Rubach, K.: Ermüdungsverhalten von Asphalten bei tiefen Temperaturen auf unter Last und Zwang. Schlussbericht zum DFG-Forschungsvorhaben Nr. Ar 168/2-1, Braunschweig 1991
(*Arand, W.; v. d. Decken, St.; Hase, M.; Rubach, K.: Únava asfaltových směsí za nízkých teplot při zatížení a příslušné závislosti. Závěrečná zpráva výzkumného úkolu Německé společnosti pro výzkum č. Ar 168/2-1, Braunschweig 1991*)
- [23] Arand, W.; Rubach, K.: Grundlegende Untersuchungen über den Einfluß der Zusammensetzung auf die Ermüdungsbeständigkeit von Walzasphalten mittels systematischer Variation kompositionellen Merkmale zur Schaffung quantitative bewertungsmaßstäbe, Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“ des Bundesministerium für Verkehr, Heft 717, Bonn-Bad Godesberg 1996
(*Arand, W.; Rubach, K.: Základní výzkumy vlivu návrhu asfaltové směsi na odolnost hutněných asfaltových vrstev proti únavě pomocí systematické obměny charakteristik návrhu směsi pro vytvoření kvantitativních měřítek hodnocení, Soubor publikací „Silniční stavitelství a dopravní inženýrství“ Spolkového ministerstva dopravy, sešit 717, Bonn-Bad Godesberg 1996*)
- [24] Arand, W.: Asphalt Roads under the Influence of Weather and Traffic. Proceedings of the EURASPHALT-EUROBITUME-Symposium, Strasbourg 1996, Volume 2, Paper 4.059, 14 pages
(*Arand, W.: Vliv klimatických podmínek a dopravy na asfaltové vozovky. Metody představené na kongresu EURASPHALT-EUROBITUME, Štrasburk 1996, Svazek 2, List 4.059, 14 stran*)
- [25] Arand, W.: Zur Ermüdungsbeständigkeit von Asphalten, *Asphalt* 35 (2000) 1, 15 – 25
(*Arand, W.: Odolnost asfaltových směsí proti únavě, Asphalt, ročník 35, (2000), č. 1, str. 15 – 25*)
- [26] Arand, W.; Zander, U.; Büchler, St.: Schonende Wiederwärmung von Asphaltmischgut zur Herstellung von Asphaltprobekörpern für mechanisch-physikalischen Prüfungen – Festlegung der Rahmenbedingungen. Schlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben Nr. 10.276, Braunschweig im Oktober 1998
(*Arand, W.; Zander, U.; Büchler, St.: Šetrný opětný ohřev asfaltové směsi pro přípravu zkušebních těles pro zkoušky mechanických a fyzikálních vlastností – Stanovení rámcových podmínek. Závěrečná zpráva k výzkumnému úkolu AiF č. 10.276, Braunschweig, říjen 1998*)
- [27] FGSV: Technische Prüfvorschrift: Beständigkeit von Asphalt gegen Ermüdung bei mittleren und tiefen Temperaturen – Zugschwellversuch (Entwurf). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, Februar 2003

(Výzkumná společnost pro silniční stavitelství a dopravu (FGSV): Technický zkušební předpis: Odolnost asfaltových směsí proti únavě za středních a nízkých teplot – Zkouška míjivým tahovým napětím (návrh), Kolín, únor 2003)

- [28] FGSV: Technische Prüfvorschrift – Verhalten von Asphalten bei tiefen Temperaturen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln 1994
(Výzkumná společnost pro silniční stavitelství a dopravu (FGSV): Technický zkušební předpis – Chování asfaltových směsí za nízkých teplot, Kolín, 1994)
- [29] Arand, W.; Dörschlag, S.; Pohlmann, P.: Einfluß der Bitumenhärte auf das Ermüdungsverhalten von Asphaltbefestigungen unterschiedlicher Dicke in Abhängigkeit von der Tragfähigkeit der Unterlage, der Verkehrsbelastung, und der Temperatur; Teil 1. Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik des Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Heft 558, Bonn-Bad Godesberg 1989
(Arand, W.; Dörschlag, S.; Pohlmann, P.: Vliv gradace asfaltu na únavu asfaltových konstrukcí vozovek různé tloušťky v závislosti na únosnosti podkladu, dopravním zatížení a teplotě; Část 1. Soubor publikací „Silniční stavitelství a dopravní inženýrství“ Spolkového ministerstva dopravy, odbor Silniční stavitelství, sešit 558, Bonn-Bad Godesberg 1989)
- [30] Arand, W.; Lorenzel, H.: Einfluß der Bitumenhärte auf das Ermüdungsverhalten von Asphaltbefestigungen unterschiedlicher Dicke in Abhängigkeit von der Tragfähigkeit der Unterlage, der Verkehrsbelastung und der Temperatur; Teil 2. Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik des Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Heft 696, Bonn-Bad Godesberg 1995
(Arand, W.; Lorenzel, H.: Vliv gradace asfaltu na únavu asfaltových konstrukcí vozovek různé tloušťky v závislosti na únosnosti podkladu, dopravním zatížení a teplotě; Část 2. Soubor publikací „Silniční stavitelství a dopravní inženýrství“ Spolkového ministerstva dopravy, odbor Silniční stavitelství, sešit 696, Bonn-Bad Godesberg 1995)