DISKUSE O ZKUŠEBNĚ-TECHNICKÝCH PROBLÉMECH ODOLNOSTI ASFALTOVÝCH SMĚSÍ PROTI ÚNAVĚ – ČÁST 1

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

Bitumen 2004, č. 1, str. 2

1. Úvod

V květnu 2003 publikoval Evropský výbor pro normalizaci (CEN) návrh prEN 12697-24 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 24: Odolnost vůči únavě [1]. V tomto návrhu normy jsou popsány čtyři druhy dynamických ohybových zkoušek a dynamická zkouška příčným tahem.

V návrhu jsou uvedeny tyto dynamické ohybové zkoušky (obrázek 1):

- dvoubodová ohybová zkouška na zkušebních tělesech ve tvaru komolého klínu;
- dvoubodová ohybová zkouška na zkušebních tělesech ve tvaru přímého hranolu;
- tříbodová ohybová zkouška na zkušebních tělesech ve tvaru přímého hranolu;
- čtyřbodová ohybová zkouška na zkušebních tělesech ve tvaru přímého hranolu.

Za normálních okolností se dynamické ohybové zkoušky provádějí jako tzv. zkoušky s řízenou dráhou s periodicky neměnným sinusovým vychýlením zkušebního tělesa z klidové polohy při stanovené frekvenci a konstantní – avšak nepředepsané – zkušební teplotě. Obvykle se nucené vychýlení zkušebního tělesa vyjadřuje při zohlednění jeho rozměrů a uspořádání zkušebního zařízení přepočtem jako protažení.

Únava je v tomto případě dána, pokud hodnota komplexního modulu tuhosti – to znamená pokud síla, které je zapotřebí, aby zkušební těleso vykazovalo periodicky neměnná vychýlení – vykázala pokles na polovinu počáteční hodnoty. Přitom se počáteční hodnota komplexního modulu tuhosti, nezbytná k dosažení periodicky stálých odchylek, stanovuje podle určitého počtu zatěžovacích cyklů (jako aritmetický průměr).

Nejdůležitější rámcové podmínky pro provádění různých ohybových zkoušek podle prEN 12697-24 jsou uvedeny v tabulce 1. K těmto uvedeným charakteristikám a hodnotám se později ještě vrátíme, po podrobném pojednání o základních předpokladech pro provádění vědecky bezchybných ohybových zkoušek podle zásad technické mechaniky.

Kromě čtyř ohybových zkoušek se v prEN 12697-24 uvádí i pátá zkouška – dynamická zkouška příčným tahem na válcových zkušebních tělesech. Zkouška se provádí ve zkušební komoře s možností střídání zkušebních teplot (*T* = +2 °C a *T* = 20 °C) při frekvenci zatěžování minimálně *f* = 10 Hz. Zkušební tělesa o průměru 100 mm, případně 150 mm jsou přes svůj plášť namáhána ve svislé rovině procházející osou jejich rotace dvěma zatěžovacími pásy ve vertikálním směru, sinusovou míjivou tlakovou silou. Tato síla vytváří uvnitř zkušebního tělesa poměrně rovnoměrně rozložené tahové napětí, působící kolmo na směr tlakové síly (obrázek 2). Toto tahové napětí, aplikované trvale nebo periodicky na asfaltová zkušební tělesa, vede po určitém počtu zatěžovacích cyklů k porušení lomem (teoreticky) v důsledku účinku tahové síly. Počet zatěžovacích cyklů až do porušení zkušebního tělesa představuje charakteristiku pro kvantitativní hodnocení odolnosti proti únavě.

2. Ohybové zkoušky pod zorným úhlem přesných principů technické mechaniky

2.1 Malé historické ohlédnutí

První systematické výzkumy v oblasti nauky o pevnosti prováděl již Galileo Galilei (1564 – 1642) [2], který řešil problém nosníku pravoúhlého průřezu, na jednom konci upnutého a na druhém zatěžovaného osamělou silou. Dospěl k závěru, že namáhání nosníku napětími je přímo úměrné součinu osamělé síly a ramene páky (tedy ohybovému momentu) a nepřímo úměrné součinu šířky a čtverce výšky průřezu (tedy momentu průřezu modulu). Protože – z důvodů neznalosti úměrnosti mezi napětím a protažením – předpokládal tahové napětí a tlakové napětí vždy jako rovnoměrně rozložená v horní a dolní polovině průřezu, zjistil chybně součinitel úměrnosti pro moment průřezu modulu (1/2 místo 1/6). Teprve další objev, nezávislý na těchto závěrech a zohlednění nauky o pružnosti, speciálně úměrnosti mezi napětím a protažením, za který vděčíme (což je méně známé) Edme Mariottovi (1628 – 1684), který společně s Robertem Boylem (1627 – 1691) formuloval stavovou rovnici plynů (plynový zákon) a práce Roberta Hooka (1635 – 1703) umožnily, že Galileova představa o rovnoměrném rozložení napětí v částech průřezu nosníku namáhaných tahem, případně tlakem byla opuštěna a nahrazena úvahou o napětích rostoucích od neutrálních vrstev ke krajním vrstvám. Jacob Bernoulli (1654 – 1705) formuloval potom hypotézu o plošném momentu setrvačnosti průřezu nosníku (nejjednodušeji si lze tento jev představit na nosníku, namáhaném v celé délce konstantním ohybovým momentem s konstantním zakřivením); ještě v současné době představuje tato teorie základ pro výpočet ohybových napětí pomocí rovnice

$\sigma = M/W$

(napětí σ v krajních vrstvách = ohybový moment M dělený momentem průřezu modulu W).

C. L. M. H. Navier (1785 až 1835) konečně formuloval všeobecné rovnice pružnosti, vycházející z rovnováhy na prvku tělesa. Poznatek, že plošné momenty setrvačnosti průřezů nosníků namáhaných ohybem nejsou potom zaručeny a že průřezy se deformují, pokud se objeví značné deformace smykem, nebo pokud moduly pružnosti v tlaku a tahu nejsou stejné, formuloval A. Barré de Saint-Venant (1797 – 1886), žák C. L. M. H. Naviera.

Tabulka 1: Důležité charakteristiky pro ohybové zkoušky podle prEN 12697-24 k diskusi o odolnosti asfaltových směsí proti únavě

Druh zkoušky / **Charakteristika**	**Dvoubodová ohybová zkouška na zkušebních tělesech ve tvaru komolého klínu**	**Dvoubodová ohybová zkouška na zkušebních tělesech ve tvaru přímého hranolu**	**Tříbodová ohybová zkouška na zkušebních tělesech ve tvaru přímého hranolu**	**Čtyřbodová ohybová zkouška na zkušebních tělesech ve tvaru přímého hranolu**
Rozměry zkušebního tělesa – výška *h* [mm] – šířka *b* [mm] – délka *l* [mm] Hodnoty v závorkách platí pouze pro asfaltové směsi s maximální velikostí zrna D_{max} větší než 14 mm*, případně pro frakci 20/22 mm**	25/56 (70) * 25 (50)** 250	40 (80) * 40 (80) ** 160 (320) **	50 50 300	$\geq 3 \times D_{max}$ $\geq 3 \times D_{max}$ $\geq 8 \times$ *h, případně b* U této zkoušky znamená *l* vzdálenost pevných podpor
Způsob ohybových zkoušek	řízení dráhy	řízení dráhy	řízení dráhy	řízení dráhy nebo řízení síly
Frekvence [Hz]	normálně 25 ±1	normálně 25 ±1	10	1 až 60 ±0,1
Zkušební teplota [°C]	x ±1	x ±1	20 ±1	0 až 20 ±1
Počet zatěžovacích cyklů pro stanovení počáteční hodnoty (jako aritmetický průměr)	100 až 500	hodnota vodorovné souřadnice lineární regrese	200	100
Počet různých podmínek zkoušky: odchylka (dráha), síla, teplota a/nebo frekvence	≥ 3	≥ 3	≥ 10	≥ 3
Počet zkoušených zkušebních těles	≥ 18	≥ 18	≥ 18	≥ 18
Výpočet rozptýlené energie: ano nebo ne?	ne	ne	ano	ano

* Část 2 s kapitolami
4 Namáhání asfaltových směsí v konstrukcích dopravních ploch,
5 Technické zkušební předpisy
6 Algoritmy pro odhad počtu cyklů zatížení na mezi porušení
7 Ověření a platnost metody
8 Vliv viskozity asfaltu a mezerovitosti
9 Shrnutí a výhledy
10 Poděkování – bude uveřejněna v dalším čísle časopisu BITUMEN.

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

Obrázek 1: Zkoušky únavy podle prEN 12697-24 na asfaltových směsích – dynamické ohybové zkoušky

(1) Dvoubodová ohybová zkouška na zkušebních tělesech ve tvaru komolého klínu
(2) Dvoubodová ohybová zkouška na zkušebních tělesech ve tvaru přímého hranolu
(3) Tříbodová ohybová zkouška na zkušebních tělesech ve tvaru přímého hranolu
(4) Čtyřbodová ohybová zkouška na zkušebních tělesech ve tvaru přímého hranolu

maximální tlakové napětí σ_D:

$$\sigma_D = -\frac{6 \cdot F}{\pi \cdot d \cdot b} \qquad [\mathrm{MPa}]$$

maximální tahové napětí σ_Z:

$$\sigma_Z = +\frac{2 \cdot F}{\pi \cdot d \cdot b} \qquad [\mathrm{MPa}]$$

kde F je síla [N]
d průměr zkušebního tělesa [mm]
b šířka (tloušťka) zkušebního tělesa [mm]

Platí:

$$|\sigma_D| = 3 \cdot |\sigma_Z| \qquad [-]$$

Obrázek 2: Zkouška příčným tahem

2.2 *Matematický výklad problému ohybu a jeho fyzikální předpoklady*

V rámci výše uvedeného historického vývoje byla definována – jak bylo již připomenuto – podstata problému v poměrně jednoduchém vzorci pro výpočet napětí v krajních vrstvách σ u nosníku pravoúhlého průřezu namáhaného ohybem. Toto napětí lze jednoduše vypočítat jako podíl ohybového momentu M a momentu průřezu modulu W [3, 4]:

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{6 \times M}{b \times h^2} \text{ [MPa].}$$

Tento vztah byl rovněž použit v normě prEN 12697-24 v poněkud upravené podobě – např. v článku C.5.1.

Kritický čtenář této normy se pouze zeptá, zda předpoklady technické mechaniky, odvozené z historického vývoje, pro použití výše popsaného jednoduchého algoritmu pro výpočet napětí v krajních vrstvách jsou splněny i při zkoušení asfaltových směsí. Abychom tuto otázku mohli s konečnou platností zodpovědět, je nutno si ještě jednou připomenout předpoklady pro použití jednoduché teorie ohybu. Podle přísných měřítek je provádění bezchybných ohybových zkoušek na asfaltových zkušebních tělesech spojeno s předpoklady uvedenými dále (V1 až V5) [3]; požaduje se:

(V1) Osa zkušebních těles musí být lineární;

(V2) Rozměry průřezu zkušebního tělesa v porovnání s délkou zkušebního tělesa musí být malé (podle názoru, který sdílí většina kompetentních odborníků musí být délka zkušebního tělesa při namáhání upnutého nosníku ohybem činit minimálně čtyřnásobek výšky zkušebního tělesa [5] a u nosníku na dvou podporách minimálně osminásobek;

(V3) Průřezy kolmo k ose zkušebního tělesa zůstávají rovné (Bernoulliho hypotéza) a kolmé k zakřivené ose;

(V4) Hookův zákon úměrnosti mezi napětími a protaženími platí; napětí v krajních vrstvách nesmějí být vyšší než meze úměrnosti;

(V5) Moduly pružnosti v tlaku a v tahu se neliší.

Při splnění výše uvedených předpokladů prochází v případě výlučného ohybu osa neutrálních vrstev – zvaná rovněž nulová osa napětí – vždy těžištěm namáhané plochy. Přitom jsou zkušební tělesa namáhaná ohybem vystavena na straně namáhané napětím v tlaku poměrnému zkrácení a na straně namáhané napětím v tahu protažení. Míra poměrného zkrácení a protažení vzrůstá úměrně ke vzdálenosti od neutrálních vrstev, ve kterých se nevyskytují ani tlaková, ani tahová napětí.

Je nutno položit si otázku, zda ohybové zkoušky, popsané v návrhu normy, splňují výše uvedené podmínky nebo nikoliv.

2.3 *Kritický rozbor ohybových zkoušek*

Při kritickém rozboru ohybových zkoušek je nutno mít na zřeteli fyzikální předpoklady vysvětlené v odstavci 2.2 pro provádění a vyhodnocení vědecky bezchybných zkoušek a rovněž nedůležitější charakteristiky a hodnoty pro ohybové zkoušky, shrnuté v tabulce 1 podle prEN 12697-24, což je pro diskusi o odolnosti asfaltových směsí proti únavě nezbytné.

2.3.1 *Dvoubodová ohybová zkouška na zkušebních tělesech ve tvaru komolého klínu*

Úvodem několik poznámek k otázce, proč vůbec bylo zvoleno zkušební těleso s lineárně proměnlivou výškou průřezu, které sice splňuje podmínku lineární osy zkušebního tělesa (V1), avšak v porovnání se zkušebními tělesy ve tvaru přímého hranolu je jeho zhotovení obtížnější. Nuže, odpověď je poměrně jednoduchá. Jak je zřejmé z rovnice pro napětí σ v krajních vrstvách (obrázek 3), závisí jeho velikost na poloze x – to znamená na vzdálenosti od místa upnutí. Derivuje-li se tato rovnice podle x a dosadí-li se první derivace rovná nule, lze snadno zjistit maximální napětí v krajních vrstvách σ na místě x_0:

$$x_0 = l \times \frac{h_2 - 2 \times h_1}{h_2 - h_1} \qquad \text{[mm].}$$

Dosadí-li se pro výšku dolní základny komolého klínu hodnota h_2 = 56 mm pro asfaltové směsi s maximální velikostí zrna D_{max} = 14 mm a pro výšku horní základny komolého klínu hodnota h_1 = 25 mm, obdržíme geometrické místo pro maximální napětí v krajních vrstvách ve vzdálenosti x_0 = 48,4 mm od místa upnutí. V místě x_0 = 48,4 mm má zkušební těleso výšku h_0 = 50 mm. Jestliže při nezměněné výšce horní základny komolého klínu h_1 = 25 mm jako výšku dolní základny použijeme nejvyšší hodnotu h_2 = 70 mm pro asfalty s maximální velikostí zrna větší než 14 mm, zjistíme maximální napětí v krajních vrstvách při x_0 = 111,1 mm. I v tomto případě činí výška zkušebního tělesa na místě největšího napětí v krajních vrstvách opět h_0 = 50,0 mm.

Všeobecně:

$$\sigma = \cdot \frac{M}{W};\ M = F \cdot (l - x);\ W = \ \cdot \frac{b \cdot h^2}{6}$$

Speciálně:

$$W = \cdot \frac{b}{6} \cdot \left(h_2 - \frac{h_2 - h_1}{l} \cdot x \right)^2$$

$$\sigma = \cdot \frac{6 \cdot F}{b} \cdot \frac{l - x}{\left(h_2 - \frac{h_2 - h_1}{l} \cdot x \right)^2}$$

kde	σ	je	napětí v krajních vrstvách	[MPa]
	M		ohybový moment	[Nmm]
	W		moment průřezu modulu	[mm^3]
	b		šířka zkušebního tělesa	[mm]
	h_1		výška zkušebního tělesa v místě působení zatížení	[mm]
	h_2		výška zkušebního tělesa v místě upnutí	[mm]
	l		délka zkušebního tělesa	[mm]
	x		vzdálenost od místa upnutí	[mm]

Obrázek 3: Upnuté zkušební těleso s lineárně proměnlivou výškou pravoúhlého průřezu

Maximální napětí v krajních vrstvách se tedy nevyskytují v místě upnutí, nýbrž v různých polohách mezi místem upnutí a bodem působení zatížení. V důsledku toho dochází k porušení zkušebního tělesa nikoli v místě upnutí, nýbrž v blízkosti největšího napětí v krajních vrstvách, což je bezpochyby přínosem, protože zkoušená asfaltová směs může/musí být porušena na svém nejslabším místě a nikoli na místě nejvyššího aplikovaného ohybového napětí.

Protože maximální napětí v krajních vrstvách se nezávisle na výšce dolní základny zkušebního tělesa ve tvaru komolého klínu vyskytuje vždy na místě, kde výška zkušebního tělesa činí h_0 = 50,0 mm, jsou i momenty průřezu modulu W stejné. Z této skutečnosti však nelze vyvodit, že jsou stejná i namáhání. Většinou tomu tak není, a to proto, že vzdálenost od bodu působení zatížení ke geometrickému místu maximálního napětí v krajních vrstvách u zkušebních těles pro jemnozrnné asfaltové směsi činí $(l - x_0)$ = (250,0 – 48,4) = 201,6 mm a u zkušebních těles pro hrubozrnné asfaltové směsi $(l - x_0)$ = (250,0 – 111,1) = 138,9 mm. Ohybové momenty v obou odlišně navrhovaných zkušebních tělesech se tedy liší při působení stejné síly F v poměru délky ramene páky 201,6/138,9 = 1,45 poměrně značně, a to přibližně o 45 % (vztaženo na ohybový moment zkušebního tělesa pro hrubozrnné asfaltové směsi). Zda je tato skutečnost záměrná, nelze z návrhu normy posoudit.

V každém případě je však možno konstatovat, že u upnutého nosníku je podmínka, že bod působení zatížení musí být vzdálen nejméně o čtyřnásobek relevantní výšky zkušebního tělesa od místa největšího namáhání, ještě splněna u zkušebních těles pro jemnozrnné asfaltové směsi; u zkušebních těles pro hrubozrnné asfaltové směsi však nikoliv (V2).

A nyní několik poznámek k Bernoulliho hypotéze (V3). U šedé litiny je známo, že její pevnost v tlaku je třikrát až čtyřikrát vyšší než pevnost v tahu [3]. Proto se posunují také neutrální vrstvy s rostoucím napětím stále více ke straně namáhané tlakem, což je spojeno s deformací průřezu. O asfaltové směsi pro podkladní vrstvy, stmelené asfaltem gradace 80 je známo [6], že její pevnost v tlaku je výrazně vyšší, než pevnost v tahu. Přitom existuje výrazná závislost na teplotě. Zatímco pevnost v tlaku při teplotě T = +20 °C je o faktor 2,4 vyšší než pevnost v tahu, vzrůstá podíl pevnosti v tlaku k pevnosti v tahu při teplotě T = –10 °C již na hodnotu 5,8. Lze vzhledem k těmto faktům – které v podobném řádovém uspořádání mohou být zcela jistě přeneseny i na asfaltové směsi pro ložní a obrusné vrstvy – vůbec počítat s plošným momentem setrvačnosti průřezu nosníku, jak ho zjistil Jacob Bernoulli?

Aplikace klasické teorie ohybu je v přísném pojetí spojena i s platností Hookova zákona (V4). Tento zákon platí bez výhrad pouze pro výlučně elastické materiály. Je však známo, že asfaltová směs je viskoelastický stavební materiál, u kterého se protažení způsobená vnějšími zatíženími po odbourání zatížení v závislosti na teplotě a době pouze větší nebo menší měrou a neúplně navracejí do původního stavu. Viskózní vlastnosti asfaltové směsi se ovšem ztrácejí ve prospěch elastických vlastností tím více, čím nižší jsou teploty a/nebo čím kratší je doba zatěžování. Za dostatečně nízkých teplot a/nebo dostatečně vysokých frekvencí se tedy může počítat s elastickým chováním asfaltové směsi (přinejmenším kvazielastickým). Existují však vážné pochybnosti, zda zkušební teplotu nad bodem mrazu nebo vyšší lze vůbec pokládat za dostatečně nízkou. Zcela určitě nikoliv!

I když se odvoláme dokonce na princip ekvivalence teploty a doby – který to umožňuje, když provedeme odpovídající přepočet pomocí rovnice WLF (WLF = Williams, Landel, Ferry) nebo pomocí Arrheniovy rovnice [7] a užití ohybové zkoušky se zkušebními tělesy ve tvaru komolého klínu ke zkoumání únavy asfaltových směsí zásadně pokládáme za přípustné, vždy zůstává ještě otázka, zda moduly pružnosti v tlaku a v tahu jsou stejné a zda je tedy provádění výpočtů se vzorci klasické teorie ohybu vůbec oprávněné (V5).

2.3.2 Dvoubodová ohybová zkouška na zkušebních tělesech ve tvaru přímého hranolu

Pro ohybovou zkoušku na zkušebních tělesech ve tvaru přímého hranolu se zachováním stálého průřezu po celé délce zkušebního tělesa musí být nejdříve zjištěno, že osa zkušebních těles je lineární (V1) a že délka zkušebního tělesa odpovídá čtyřnásobku jeho výšky (V2). Této zkoušce lze vytknout jen skutečnost, že největší ohybový moment se vyskytuje na místě, kde je zkušební těleso svou čelní plochou spojeno přilepením se zkušebním zařízením. Procesem přilepení se zkušební těleso přirozeně zpevní, pročež k porušení zkušebního tělesa nedochází bezprostředně na přilepené ploše, nýbrž v malé, i když nezanedbatelné vzdálenosti od ní. Přísně vzato je na tomto místě ohybový moment již poněkud menší.

Pro plošný moment setrvačnosti průřezu nosníku (V3), platnost Hookova zákona (V4) a stejnou hodnotu modulů pružnosti v tlaku a tahu (V5) platí v podstatě článek 2.3.1, ve kterém se konstatuje: O splnění těchto předpokladů je nutno pochybovat.

2.3.3 Tříbodová ohybová zkouška na zkušebních tělesech ve tvaru přímého hranolu

Podstata zkoušky je znázorněna na obrázku 1, další podmínky zkoušky jsou uvedeny v tabulce 1. Při lineární ose (V1) vykazuje zkušební těleso výšku h = 50 mm a celkovou délku l = 300 mm. Podmínka, že vzdálenost podpor musí být nejméně osminásobkem výšky zkušebního tělesa (V2) tedy není splněna. Jako důsledek této skutečnosti se objevují nezanedbatelné deformace smykem, podmíněné příčnými silami, které ovlivňují výsledek zkoušky, avšak podle stavu znalostí autora tohoto pojednání nejsou zahrnuty do interpretace výsledků zkoušky. Tento problém je nutno vysvětlit, zvláště proto, že napětí a protažení, zjištěná případně nespolehlivým způsobem za využití klasické teorie ohybu se používají k výpočtu rozptýlené energie.

S ohledem na výskyt nezanedbatelných deformací smykem ve zkušebních tělesech jsou oprávněné zesílené pochybnosti o plošném momentu setrvačnosti průřezu nosníku (V3). Kromě toho je více než pochybné, zda při předepsané frekvenci f = 10 Hz při zkušební teplotě T_{pr} = (20 ±1) °C lze počítat s platností Hookova zákona (V4). Bylo by nutno rovněž prokázat stejné hodnoty modulů pružnosti v tlaku a v tahu (V5).

2.3.4 Čtyřbodová ohybová zkouška na zkušebních tělesech ve tvaru přímého hranolu

I v tomto případě odkazujeme na obrázek 1 a tabulku 1. U čtyřbodové ohybové zkoušky na zkušebních tělesech ve tvaru přímého hranolu s lineární osou (V1) se požaduje, aby vzdálenost pevných podpor odpovídala minimálně osminásobku většího rozměru zkušebního tělesa v průřezu (*h* nebo *b*) (V2). Tento požadavek odpovídá teoretickým zásadám. Pomocí symetrického uspořádání dvou bodů působení zatížení mezi pevnými podporami je zaručeno, že mezi těmito oběma body působení zatížení ve zkušebním tělese existuje při zatížení konstantní ohybový moment. Porušení zkušebního tělesa se tedy prejudikuje pomocí vlastností materiálů a nikoli pomocí geometrie zkoušek. Je nutno rovněž zdůraznit, že rozměry průřezu zkušebního tělesa musí odpovídat nejméně trojnásobku maximální velikosti zrna, čímž se vychází vstříc požadavku na „homogenitu“ zkoušené asfaltové směsi. Pokud jde o geometrii zkušebních těles a konfiguraci zatížení, liší se tedy čtyřbodová ohybová zkouška ke svému prospěchu od většiny jiných ohybových zkoušek.

Pokud jde o plošný moment setrvačnosti průřezu nosníku (V3), platnost Hookova zákona (V4) a požadavek stejných hodnot modulu pružnosti v tlaku a tahu (V5), platí rovněž pochybnosti uvedené výše.

2.3.5 Doplňující poznámky

Zkušební tělesa pro ohybové zkoušky mohou být podle prEN 12697-24 zhotovena řezáním ze zkušebních desek zhutněných v laboratoři nebo z výseků z asfaltové vozovky [1]. V souvislosti s výrobou zkušebních desek z asfaltových směsí v laboratoři jsou v prEN 12697-33 z ledna 2003 uvedeny tři metody:

- metoda hutnění jedním nebo dvěma koly s pneumatikami;
- metoda hutnění hladkým ocelovým válcem;
- metoda hutnění lamelovým zhutňovačem.

Již v roce 1980 prokázali S. Huschek a Ch. Angst zkouškami dotvarování na zkušebních tělesech, která byla vyrobena alternativně zhutňováním ručním válcem, rázovým (Marshallovým) zhutňovačem a/nebo vibračním zhutňovačem, že mechanické vlastnosti asfaltových směsí značně závisejí na zvolené metodě zhutňování [8]. Příčinu různých mechanických vlastností zkušebních těles z asfaltových směsí, zhotovených různými metodami zhutňování, spatřují autoři v uspořádání zrn plochého a ostrohranného tvaru ve směsi kameniva příslušné asfaltové směsi, které vede k anizotropnímu chování.

Výzkumy realizované ve Švýcarsku a potvrzené dalšími autory, byly pro Institut pro silniční stavitelství Technické univerzity v Braunschweigu podnětem pro vývoj laboratorního zhutňovače desek (na principu válce s hladkými ocelovými běhouny) a optimalizaci zkušebně-technických rámcových podmínek – předhutnění s řízením dráhy, vlastní hutnění s řízením síly. Tak mohly být vyrobeny zkušební desky z asfaltových směsí, jejichž mechanické vlastnosti za vyšších i nižších teplot a rovněž při opakovaném namáhání odpovídaly spolehlivě vlastnostem směsí, hutněných ve vozovkách [9]. Rozsáhlé porovnávací výzkumy se zkušebními tělesy vyrobenými různými metodami hutnění prokázaly, že s tímto laboratorním zhutňovačem desek a příslušnou metodou zhutňování na rozdíl od jiných metod zhutňování (jako např. lamelovým zhutňovačem) se podařila příprava zhutněných vzorků asfaltových směsí s mechanickými vlastnostmi, odpovídajícími asfaltovým směsím ve vozovkách [10]. Jestliže návrh normy umožňuje použití asfaltových zkušebních těles připravených z desek vyrobených v laboratoři, potom by měla být předepsána i ověřená a osvědčená metoda hutnění, která prokazatelně umožňuje přípravu asfaltových zkušebních těles s mechanickými vlastnostmi, odpovídajícími co nejvěrněji podmínkám praxe.

V souvislosti s ohybovými zkouškami se v návrhu normy hovoří pouze o sinusových impulzech dráhy nebo zatížení. Pojem "**haversine** load signal" („kvadratický vázaný sinusový pulz“) se objevuje pouze u dynamické zkoušky příčným tahem. Z toho lze vyvodit, že ohybové zkoušky jsou koncipovány nikoli jako zkoušky únavy při míjivém napětí, nýbrž jako zkoušky střídavým namáháním, při nichž jsou plochy průřezu na obou stranách neutrálních vrstev periodicky střídavě namáhány tahem a tlakem, což – jak bude vysvětleno v kapitole 4 tohoto pojednání, nemusí nutně odpovídat namáhání asfaltových směsí v konstrukcích dopravních ploch. Při střídavých namáháních se mohou – zejména za vyšších teplot – objevit efekty samoregenerace. Výsledky střídavých (ohybových) zkoušek lze tedy přímo přenést na chování asfaltových směsí v konstrukcích pozemních komunikací a letištních ploch jen obtížně, protože jsou v důsledku svého umístění v konstrukcích dopravních ploch namáhány pouze míjivými namáháními. Proto nezávisle na otázce **míjivého** nebo **střídavého** namáhání neodpovídá střídavé namáhání ohybem požadavku homogenity stavu namáhání. Tato homogenita je dána pouze tehdy [11], pokud na každém místě zkušebního tělesa existuje tentýž stav napětí-protažení. Je proto zřejmé, že pouze zkoušky v tlaku s přenášením tlaku prakticky bez tření na koncových plochách zkušebních těles a/nebo zkoušky v tahu na dostatečně dlouhých zkušebních tělesech ve tvaru přímého hranolu nebo na válcových zkušebních tělesech, u nichž zůstává zpevnění v důsledku přilepení zanedbatelné, se blíží těmto představám.

V německém znění návrhu normy z listopadu 1999, které je vydáním návrhu normy v květnu 2003 přirozeně dávno překonáno, je ještě uvedeno, že rozptýlená energie v okamžiku porušení zkušebního tělesa ve dvoubodové ohybové zkoušce s frekvencí f = 30 Hz při zkušební teplotě T = +20 °C je o faktor 1,24 větší, než při zkušební teplotě T = $\pm$0 °C. Tato skutečnost neudivuje, protože jednak rozložení napětí ve zkušebním tělese závisí na poměru pevnosti v tlaku k pevnosti v tahu a jednak tento poměr závisí na zkušební teplotě. Pokud se potom přesto používají k výpočtům napětí a protažení a jimi rozptýlené energie vzorce klasické teorie ohybu, musí to nutně vést k systematickým chybám, jak ukazuje faktor 1,24.

I když se přes výklad uvedený výše budou i nadále používat ohybové zkoušky pro zkušebně-technické vyjádření odolnosti asfaltových směsí proti únavě – což je bezpochyby možné, když v návrhu normy v kapitole 1 Předmět normy se konstatuje, že výsledky různých typů zkoušek nemusí být nutně opakovatelné a že mohou proto sloužit pouze ke klasifikaci – potom by měly být přinejmenším výpočty napětí a protažení prováděny metodou konečných prvků (**F**inite **E**lemente – FE), aby bylo možno použít spolehlivé vstupní veličiny pro odhad rozptýlené energie [12]. Metoda konečných prvků nabízí kromě toho fascinující možnost modelovat individuálně látkové vlastnosti každého jednotlivého prvku a tak se při výpočtu přiblížit co nejvíce skutečnosti.

3. Dynamická zkouška příčným tahem

3.1 Rozložení napětí

Nejdůležitější předpoklady pro dynamickou zkoušku příčným tahem, týkající se tvaru a rozměrů zkušebních těles, zkušební teploty a frekvence zatěžování, byly již vysvětleny v kapitole 1. Podle této zkoušky vyvíjejí dva zatěžovací pásy, působící na zkušební těleso ve svislé rovině procházející osou jeho rotace, vertikální tlakovou sílu, jejímž výsledkem jsou podle Föppla [13] v horizontálním směru v bezprostřední blízkosti zatěžovacích pásů tlaková napětí a ve střední části zkušebního tělesa poměrně rovnoměrně rozložená tahová napětí (obrázek 2, kapitola 1). Jak je z výpočtu rovněž zřejmé, je maximum tlakového napětí třikrát tak velké jako maximum tahového napětí. Aby tedy vůbec mohlo tahové napětí vzniknout, musí být pevnost v tlaku materiálu nejméně třikrát větší než pevnost v tahu; pokud tomu tak není, zkušební těleso se nekontrolovaně poruší. Jak vysvětlíme v dalším odstavci, je požadavek, že podíl pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu musí dosáhnout nejméně hodnotu 3 sice nezbytnou, avšak v žádném případě postačující podmínkou.

3.2 Kritické poznámky

Spontánní porušení stavebních materiálů nebo stavebních prvků vychází, jak známo, ze skutečnosti, že namáhání dosahují buď meze pevnosti ve smyku nebo meze pevnosti v tahu. Leonovi [14] vděčíme za to, že obě formy porušení lze zachytit jedinou hypotézou pevnosti [6, 15]. Parabola, která nese jeho jméno (obrázek 4) popisuje na jedné straně látku s rostoucí pevností ve smyku při vzrůstajícím namáhání tlakem, na druhé straně však vykazuje rovněž průsečík s pozitivní osou normálového napětí a může proto při určitých konstelacích namáhání vysvětlit i výlučné porušení tahem. Na obrázku 4 je znázorněna Leonova parabola graficky a je v něm uvedena i její rovnice. Obsahuje faktor p, který sám o sobě závisí na pevnosti v tahu β_Z i na poměru c pevnosti v tlaku β_D k pevnosti v tahu β_Z. Pro stav namáhání, při kterém tahové napětí σ_Z dosahuje hodnoty pevnosti v tahu β_Z a tlakové napětí σ_D předpokládá proto trojnásobek pevnosti v tahu β_Z ,obdržíme poloměr r Mohrovy kružnice napětí jako dvojnásobnou hodnotu pevnosti v tahu: $r = 2\ \beta_Z$.

Tento poloměr *r* smí být nejvýše přesně tak velký nebo malý, jako poloměr křivosti ρ Leonovy paraboly v jejím vrcholovém bodě. Přitom je nutno uvážit, že Leonova parabola ve svém vrcholovém bodě vykazuje i svůj nejmenší poloměr křivosti. Již v [16] bylo za pomoci všeobecně platné diferenciální rovnice pro poloměr nepravidelné kružnice libovolné funkce prokázáno, že poloměr křivosti ρ Leonovy paraboly v jejím vrcholovém bodě přesně odpovídá faktoru *p*, přičemž poloměr křivosti ρ Leonovy paraboly, jak bylo již řečeno, musí být větší nebo minimálně stejný jako poloměr *r* Mohrovy kružnice napětí, aby obě geometrické křivky mohly mít společnou tečnu. Z této podmínky lze snadno odvodit, že porušení tahem při zkoušce příčným tahem může nastat pouze tehdy, když podíl pevnosti v tlaku β_D a pevnosti v tahu β_Z předpokládá hodnotu $c \geq 8$ [17]. Jestliže pevnost v tlaku není minimálně osmkrát větší než pevnost v tahu, nedochází při zkoušce příčným tahem k výlučnému porušení tahem (obrázek 4).

Již v odstavci 2.3.1 bylo poukázáno na skutečnost, že podíl pevnosti v tlaku k pevnosti v tahu u asfaltových směsí ve velké míře závisí na teplotě. Podle této zásady by měla pevnost v tlaku dosáhnout osminásobku hodnoty pevnosti v tahu teprve při teplotě T = –25 °C a teplotách nižších. V současné době platí tento požadavek v přísném smyslu slova pouze pro statické zkoušky. Při dynamických zkouškách lze využít ekvivalenční (Einsteinův) princip viskoelasticity pro dobu a teplotu [7], který naznačuje, že nepřítomnost nízkých teplot může být pro dosažení stejných mechanických účinků vyrovnána vyššími frekvencemi. I když je tato zásada respektována, nezaručují zkoušky příčným tahem za zkušebních teplot vyšších než bod mrazu splnění požadavků na fyzikálně korektní provedení zkoušky. Je velmi prospěšné mít tuto okolnost na zřeteli.

Legenda:

Mor'sher Spannungskreis	Mohrova kružnice napětí
Leon'sche Parabel	Leonova parabola
Schubspannung τ	smykové napětí τ
Zugspannung σ_Z	tahové napětí σ_Z
Druckspannung σ_D	tlakové napětí σ_D
Normalspannung σ	normálové napětí σ
Zugfestigkeit β_Z	pevnost v tahu β_Z

Leonova parabola:

$\tau^2 = 2 \cdot p \cdot (\beta_Z - \sigma)$

kde: $p = 0{,}5 \cdot \left[(c+2) - 2 \cdot \sqrt{c+1}\right] \cdot \beta_Z$

kde: $c = \beta_D \;/\; B_Z$

Mohrova kružnice napětí:

$r = 2 \cdot \beta_Z$

poloměr křivosti ρ Leonovy paraboly v jejím vrcholovém bodě [16]:

$\rho = p$

kde: $\rho = p = 0{,}5 \cdot \left[(c+2) - 2 \cdot \sqrt{c+1}\right] \cdot \beta_Z \geq 2 \cdot \beta_Z = r$

$(c+2) - 2 \cdot \sqrt{c+1} \geq 4$

$(c+1) - 2 \cdot \sqrt{c+1} - 3 \geq 0$

s: $x = \sqrt{c+1}$

vyplývá: $x^2 + a \cdot x + b \geq 0$ (rovnice paraboly)

řešení: $x_1 = -1$; $x_2 = +3$

z: $x_2 = +3$ vyplývá: $\sqrt{c+1} \geq 3$ a **$c \geq 8$!!**

Obrázek 4: Leonova parabola

Literatura:

[**1**] prEN 12697-24 Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 24: Resistance to fatigue
(prEN 12697-24 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 24: Odolnost vůči únavě)

[**2**] Szabo, I.: Einführung in die Technische Mechanik. Springer-Verlag, Berlin – Heidelberg – New York – Tokyo 1984
(*Szabo, I.: Úvod do technické mechaniky. Nakladatelství Springer, Berlin – Heidelberg – New York – Tokyo 1984)*

[**3**] Meyers Lexikon der Technik und der exakten Naturwissenschaften, Bibliographisches Institut, Mannheim/Wien/Zürich 1969, str. 323
(Meyerův lexikon techniky a exaktních přírodních věd, Bibliografický institut Mannheim/Wien/Zürich 1969, str. 323)

[**4**] Hütte: Die Grundlagen der Ingenieurwisseschaften. 29 Auflage. Springer-Verlag, Berlin – Heidelberg – New York – London – Paris – Tokyo – Hongkong 1989, E 76 a 77
(Hütte: Základy inženýrských věd. 29. vydání. Nakladatelství Springer, Berlin – Heidelberg – New York – London – Paris – Tokyo – Hongkong 1989, E 76 a 77)

[**5**] Duddeck, H.: Persönliche Mitteilung. Institut für Statik der Technischen Universität Braunschweig, November 2003
(Duddeck, H.: Osobní zpráva. Institut pro statiku Technické univerzity Braunschweig, listopad 2003)

[**6**] FGSV: Merkblatt über die mechanischen Eigenschaften von Asphalt, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln 1985
(FGSV: Informační list o mechanických vlastnostech asfaltových směsí, Výzkumné společnost pro silniční stavitelství a dopravu, Köln 1985)

[**7**] European Bitumen Association: Rheology of bituminous binders – Glossary of Rheological Terms
(Evropská asociace pro asfaltová pojiva: Reologie asfaltových pojiv – Slovník reologických termínů)

[**8**] Huschek, S.; Angst, CH.: Einfluss der Verdichtungsart auf die mechanischen Eigenschaften von Asphaltprüfkörpern. Mitteilung Nr. 44 des Instituts für Straßen-, Eisenbahn und Felsbau an der Eidgenössischen Technischen Hochschule ETH, Zürich 1980
(Huschek, S.; Angst, CH.: Vliv metody hutnění na mechanické vlastnosti asfaltových zkušebních těles. Zpráva č. 44 Institutu pro silniční a železniční stavitelství a práce v horninách Švýcarské technické vysoké školy ETH, Zürich 1980)

[**9**] Arand, W.; Renken P.: Labor-Walzenverdichtungs-Gerät zur Herstellung verdichteter Asphaltproben mit praxisadäquaten mechanischen Eigenschaften. Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik" des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Heft 771, Bonn-Bad Godesberg 1999
(Arand, W.; Renken P.: Laboratorní zhutňovač pro přípravu zhutněných asfaltových desek s mechanickými vlastnostmi odpovídajícími praxi na stavbách. Edice "Výzkum v silničním stavitelství a v silničním zařízení" Spolkového ministerstva dopravy, stavebnictví a bydlení, sešit 771, Bonn-Bad Godesberg 1999)

[**10**] Renken, P.: Vergleich der mechanischen Eigenschaften von mittels Walzsektor-Verdichtungsgerät und Lamellen-Verdichtungsgerät hergestellten Asphaltprobeplatten. Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik" des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Heft 821, Bonn-Bad Godesberg 2001
(Renken, P.: Srovnání mechanických vlastností asfaltových desek připravených pomocí segmentového a lamelového zhutňovače. Edice "Výzkum v silničním stavitelství a v silničním zařízení" Spolkového ministerstva dopravy, stavebnictví a bydlení, sešit 821, Bonn-Bad Godesberg 2001)

[**11**] Des Croix, P.: New evaluation performance through mechanical fatigue testing. Ninth International Conference of Asphalt Pavements, Copenhagen 2002, St. Paul, MN: International Society for Asphalt Pavements. 2003, Paper No. 3:3-8, 10 pages
(Des Croix, P.: Nové hodnocení funkčních charakteristik pomocí zkoušek mechanické únavy. Devátá Mezinárodní konference Asfaltové vozovky, Copenhagen 2002, St. Paul, MN: International Society for Asphalt Pavements. 2003, Paper No. 3:3-8, 10 stran)

[**12**] Molenaar, J.M.M.; Liu, X; Molenaar, A.A.A.: Resistance to crack-groth and fracture of asphalt mixture. 6 th RILEM Symposium, Zürich 2003, 618 – 625
(Molenaar, J.M.M.; Liu, X; Molenaar, A.A.A.: Odolnost proti tvoření trhlin a porušení asfaltových směsí. 6. sympozium RILEM, Zürich 2003, 618 – 625)

[**13**] Föppl, L.: Drang und Zwang, Band 3. Oldenburg-Verlag 1947
(Föppl, L:.: Tlak a závislosti, Svazek 3. Nakladatelství Oldenburg 1947)

[**14**] Leon: Über das Maß der Anstrengung bei Beton. Ingenieur-Archiv, IV. Band, 1933
(Leon: Míra namáhání u betonu. Inženýrský archiv, IV. svazek, 1933)

[**15**] Hagemann, R.: Ein Verfahren zur Beurteilung flexibler Fahrbahnbefestigungen unter Berücksichtigung von Festigkeitshypothesen für Asphalte. Mitteilungen aus dem Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung der Universität Hannover, Heft 44, Hannover 1980
(*Hagemann, R.: Metoda pro posouzení netuhých konstrukcí vozovek se zohledněním hypotéz pevnosti pro asfaltové směsi. Zprávy Institutu pro nauku o stavebních materiálech a zkoušení materiálů, Univerzita Hannover, sešit 44, Hannover 1980)*

[**16**] Arand, W.: Überlegungen zur Andwendbarkeit des Spaltzugversuches auf Asphalte. Die Asphaltstraße – Das stationare Mischwerk 20 (1986) 1, S. 15 – 19
(Arand, W.: Úvahy o použitelnosti zkoušky příčným tahem pro asfaltové směsi. Die Asphaltstraße – Das stationare Mischwerk 20 (1986) 1, strana 15 – 19)

[**17**] Arand, W.: Neue Überlegungen zur Andwendbarkeit des Spaltzugversuches auf Asphalte. Die Asphaltstraße – Das stationare Mischwerk 20 (1986) 1, S. 15 – 19
(Arand, W.: Nové úvahy o použitelnosti zkoušky příčným tahem pro asfaltové směsi. Die Asphaltstraße – Das stationare Mischwerk 24 (1990) 6, strana 41 – 43)