

PRÍLOHA D (informatívna)

METODIKA MERANIA A HODNOTENIA ÚNOSNOSTI ASFALTOVEJ VOZOVKY INÝM TYPOM DEFLEKTOMETRA FWD

D.1 Účel metodiky

Účelom metodiky je určiť všeobecné technické požiadavky na iné typy deflektometrov FWD (nielen od firmy KUAB), ktoré sa môžu používať pri diagnostike únosnosti asfaltovej vozovky a definovať požiadavky a postupy na hodnotenie únosnosti a stanovenie hrúbky zosilnenia pre asfaltové vozovky s nestmelenými alebo hydraulicky stmelenými podkladovými vrstvami.

D.2 Diagnostika únosnosti

D.2.1 Všeobecne

Veličiny potrebné na hodnotenie únosnosti je možné získavať rôznymi metódami a merať rôznymi zariadeniami. Pre postupy uvedené v tejto metodike je možné využívať iba priehybovú krivku povrchu vozovky. Táto krivka sa musí namerať iba deflektometrom typu FWD, pričom použitý deflektometer musí vyhovovať technickým požiadavkám uvedeným v nasledujúcich častiach metodiky a musí umožňovať záznam požadovaných veličín.

D.2.2 Požiadavky na diagnostické zariadenie

D.2.2.1 Na meranie únosnosti sa používajú iba deflektometry typu FWD, ktorých technické vybavenie vyhovuje nasledovným požiadavkám:

- a) sila pôsobiaca na povrch vozovky v rozsahu $50 \text{ kN} \pm 5 \text{ kN}$,
- b) doba pôsobenia zaťaženia v rozsahu 20 ms – 60 ms,
- c) delená alebo tuhá zaťažovacia doska s priemerom 300 mm, majúca na spodnej strane tenkú gumovú vrstvu,
- d) minimálne 7 snímačov priehybu s presnosťou min 2% a rozlišovacou schopnosťou min. 1 mikrometer umiestnených vo vzdialenostiach 0, 300, 450, 600, 900, 1200 a 1500 mm od osi zaťažovacej dosky,
- e) teplomer na meranie teploty vzduchu,
- f) infračervený teplomer na meranie teploty povrchu vozovky,
- g) merač dĺžok.

D.2.2.2 Použitý deflektometer FWD musí spĺňať požiadavky z hľadiska opakovateľnosti merania zaťaženia aj priehybov.

Podmienka opakovateľnosti zaťaženia je splnená, ak variačný koeficient je $\leq 2\%$. Na výpočet variačného koeficientu sa použije 10 hodnôt zaťažovacej sily zaznamenaných pri 10-tich úderoch na úrovni cca 50 kN. Pred týmito desiatimi hodnotami sa musia vykonať minimálne dva údery, ktoré sa však do výpočtu opakovateľnosti zaťaženia nepoužívajú.

Pri analýze opakovateľnosti priehybov sú všetky priehyby najskôr prepočítané na porovnávaciu hodnotu zaťažovacej sily 50 kN. Kritérium opakovateľnosti na meranie priehybov je splnené, ak smerodajná odchýlka vypočítaná z priehybov prepočítaných na silu 50 kN pri sérii desiatich úderov je $\leq 2 \mu\text{m}$. Toto kritérium platí vtedy, ak je priemerná hodnota vypočítaná z priehybov prepočítaných na silu 50 kN $\leq 40 \mu\text{m}$. Ak

je priemerná hodnota z prepočítaných priehybov väčšia ako $40\mu\text{m}$, kritérium opakovateľnosti merania priehybov je splnené vtedy, ak smerodajná odchýlka priehybov prepočítaných na silu 50 kN pri sérii desiatich úderov je menšia alebo rovná hodnote 1,25 % priemernej hodnoty priehybov pri desiatich zaťažovacích úderoch zväčšenej o $1,5\mu\text{m}$. Ak na jednom alebo viacerých snímačoch nie sú splnené predchádzajúce podmienky, kritérium opakovateľnosti merania priehybov nie je splnené.

- D.2.2.3 Záznamové zariadenie deflektometra musí umožňovať záznam údajov potrebných na následné hodnotenie únosnosti vozovky a stanovenie potrebnej hrúbky jej zosilnenia. Tieto údaje sú uvedené v kap. 6 týchto TP..
- D.2.2.4 Odporúča sa, aby záznamové zariadenie deflektometra umožňovalo záznam priebehu zaťažovacej sily a hodnôt priehybov na jednotlivých snímačoch v čase.

D.2.3 Podmienky merania

Musia byť splnené podmienky uvedené v kap. 2.4 týchto TP.

D.2.4 Príprava merania a postup merania na meracom bode

Musia byť splnené podmienky uvedené v kap. 2.5 týchto TP .

D.2.5 Požadované výstupy z merania

Výstupy z meraní musia byť uložené do súborov umožňujúcich ich počítačové spracovanie pri hodnotení únosnosti vozovky.

Pre každý diagnostikovaný úsek je zo všetkých meraní na jednotlivých meracích miestach vytvorený jeden výstupný súbor, ktorý musí obsahovať všetky údaje uvedené v kap. 2.6 týchto TP .

D.3 Hodnotenie únosnosti

D.3.1 Všeobecne

Pre hodnotenie únosnosti sa používajú rôzne metódy. Postupy uvedené v tejto metodike využívajú pre hodnotenie únosnosti vozovky porovnanie vypočítanej zvyškovej životnosti vozovky s požadovanou životnosťou. Zvyšková životnosť vozovky sa určuje z hodnôt napätí vypočítaných v modeli vozovky, pričom sa využívajú moduly pružnosti vrstiev modelu určené spätným výpočtom z priehybovej krivky nameranej na povrchu vozovky deflektometrom typu FWD, zohľadňuje sa únava materiálu a dopravné zaťaženie vozovky.

Ak je vozovka hodnotená ako neúnosná, navrhuje sa jej zosilnenie asfaltovou vrstvou, pričom jej hrúbka sa navrhuje s prihliadnutím na výhľadové dopravné zaťaženie, kvalitu materiálu zosilňujúcej vrstvy, únavové procesy a stupeň využitia materiálov jednotlivých vrstiev konštrukcie vozovky.

D.3.2 Postup hodnotenia únosnosti a návrhu zosilnenia

Na splnenie uvedeného cieľa je potrebné v celom hodnotiacom procese postupne obsahovo naplniť a vykonať nasledujúce parciálne úlohy:

- skompletizovať vstupné údaje potrebné na hodnotenie únosnosti a stanovenie hrúbky zosilnenia,
- zostaviť zjednodušený fyzikálny model konštrukcie vozovky zlúčením materiálovo príbuzných vrstiev,

- c) z nameranej priehybovej krivky povrchu vozovky určiť hodnoty modulov pružnosti vrstiev zjednodušeného modelu (tzv. spätný výpočet),
- d) vypočítať radiálne a zvislé napätia v kritických miestach modelu konštrukcie vozovky,
- e) vypočítať zvyškovú prevádzkovú výkonnosť jednotlivých vrstiev modelu a určiť kritickú vrstvu,
- f) pre kritickú vrstvu vypočítať zvyškovú životnosť a porovnať ju s požadovanou hodnotou,
- g) ak je vozovka hodnotená ako neúnosná (vypočítaná zvyšková životnosť je menšia ako požadovaná), vypočítať zvislé a radiálne napätia v upravenom modeli vozovky, ktorý vznikne po pridaní zosilňujúcej vrstvy,
- h) výpočty opakovať pre rôzne hrúbky zosilnenia dovtedy, kým nie sú splnené definované kritéria využitia najviac namáhanej vrstvy modelu vozovky.

D.3.3 Vstupné údaje na hodnotenie

D.3.3.1 Na hodnotenie únosnosti vozovky a stanovenie hrúbky zosilnenia sú potrebné nasledovné údaje:

- a) polomer zaťažovacej dosky,
- b) vzdialenosť snímačov od osi zaťaženia,
- c) namerané údaje pre každé merané miesto,
 - staničenie jednotlivých meracích bodov (buď ako lokálne v rámci diagnostikovaného úseku, alebo uzlové vo vzťahu k uzlovému úseku),
 - veľkosť zaťažovacej sily a hodnoty priehybov namerané pri tejto zaťažovacej sile na každom zo snímačov,
 - teplotu vzduchu a vozovky pre každý meraný bod,
 - čas v rámci dňa, v ktorom sa meranie na meracom mieste vykonalo.
- d) počet asfaltových vrstiev konštrukcie vozovky, ich druh (ABI, ABII, ABIII, AKM, AKT, OKI, OKII, OKIII, LA, ACB, PAH a pod),
- e) hrúbku každej asfaltovej vrstvy,
- f) Poissonove čísla každej asfaltovej vrstvy zodpovedajúce teplote + 11⁰ C a Poissonove číslo podložia vozovky,
- g) výpočtové hodnoty pevnosti v ťahu pri ohybe pre všetky stmelené vrstvy vozovky (asfaltové aj hydraulicky stmelené),
- h) druh podkladovej vrstvy (nestmelený, stmelený cementom, stmelený asfaltom) a hrúbku každej podkladovej vrstvy,
- i) počet ťažkých nákladných vozidiel na sledovanom úseku v oboch smeroch, rok pre ktorý sa tento počet určil a predpokladaný medziročný nárast intenzity dopravy na sledovanom úseku,
- j) požadovaná zvyšková životnosť vozovky.

D.3.3.2 Okrem údajov potrebných na výpočty musia vstupy obsahovať aj identifikačné a doplňujúce údaje, z ktorých najdôležitejšie sú:

- a) identifikačné údaje meraného úseku - okres, triedu a číslo cesty, počiatkový a koncový uzlový bod v rámci uzlového lokalizačného systému, staničenie začiatku úseku v rámci uzlového úseku,
- b) dátum merania,
- c) smer merania, meraný jazdný pruh,
- d) druh povrchu vozovky,
- e) typ použitého meracieho zariadenia,
- f) meno osoby, ktorá vykonala meranie,
- g) všetky okolnosti, ktoré by mohli ovplyvniť namerané výsledky (počasie, poruchy vozovky, a pod.).
- h) povinné komentáre popisujúce meraný smer, uzlový úsek a dĺžku merania.

D.3.4 Vytvorenie výpočtového modelu konštrukcie vozovky

- D.3.4.1 Skutočná konštrukcia vozovky sa pre potreby výpočtu modulov pružnosti z priehybovej krivky nameranej deflektometrom FWD a následného určenia zvyškovej životnosti a výpočtu hrúbky zosilnenia zjednodušuje do 3-vrstvového systému (2 vrstvy na podloží s nekonečnou hrúbkou).
- D.3.4.2 Pri zjednodušovaní sa asfaltové vrstvy (obvykle obrusná, ložná a horná podkladová vrstva konštrukcie vozovky) spájajú do jednej vrstvy, ktorej hrúbka sa rovná súčtu hrúbok jednotlivých spojených vrstiev. Poissonove číslo spojenej vrstvy sa volí s prihliadnutím na podiel daných vrstiev v celkovej hrúbke spojenej vrstvy. Takto vytvorená vrstva tvorí vrchnú vrstvu zjednodušeného modelu vozovky pri netuhých aj polotuhých vozovkách.
- D.3.4.3 Ak je spodná podkladová vrstva vozovky z nestmelených materiálov (netuhá vozovka), druhú vrstvu modelu vozovky (nachádzajúcu sa pod zlúčenou asfaltovou vrstvou) tvorí vrstva vytvorená spojením spodnej podkladovej vrstvy vozovky a ochrannej vrstvy vozovky do jednej vrstvy. Hrúbka spojenej vrstvy sa rovná súčtu hrúbok jednotlivých spojených vrstiev. Poissonove číslo spojenej vrstvy sa volí s prihliadnutím na podiel daných vrstiev v celkovej hrúbke spojenej vrstvy.
- D.3.4.4 Ak je spodná podkladová vrstva z materiálu stmeleného hydraulickým alebo bitúmenovým spojivom (polotuhá alebo celoasfaltová vozovka), druhú vrstvu modelu vozovky (nachádzajúcu sa pod zlúčenou asfaltovou vrstvou) tvorí iba táto samotná vrstva. Hrúbka vrstvy a Poissonove číslo v modeli vozovky sú rovnaké ako hrúbka a Poissonove číslo danej vrstvy. Nestmelená ochranná vrstva, ktorá sa nachádza pod stmelenou podkladovou vrstvou je v tomto prípade uvažovaná ako súčasť podložia.
- D.3.4.5 Tretiu (najnižšiu) vrstvu modelu s nekonečnou hrúbkou tvorí v prípade netuhej vozovky jej podložie. V prípade vozovky s podkladovou vrstvou stmelenou hydraulickým alebo bitúmenovým spojivom je ako súčasť podložia uvažovaná aj ochranná vrstva vozovky z nestmeleného materiálu. V oboch prípadoch sa Poissonove číslo tejto vrstvy rovná Poissonovemu číslu podložia.

D.3.5 Určenie hodnôt modulov pružnosti vrstiev zjednodušeného modelu vozovky (spätný výpočet)

- D.3.5.1 Princípom výpočtu je postupné približovanie vypočítanej priehybovej krivky ku nameranej krivke v meracom bode dovedy, pokiaľ nie sú splnené kritéria povoleného rozdielu medzi nameranou a vypočítanou priehybovou krivkou.
- D.3.5.2 Vypočítanú krivku tvoria priehyby povrchu modelu vozovky, ktorý sa vytvoril zo skutočnej konštrukcie vozovky podľa postupu uvedeného v bode 4. Na výpočet priehybov povrchu je možné použiť niektorý z výpočtových programov pracujúcich na základe riešenia viacvrstvého lineárne pružného polpriestoru (napr. OPMEKO, LAYMED, BISAR apod.). Priehyby povrchu modelu sa musia vypočítať v tých vzdialenostiach od osi zaťaženia, v ktorých sa merali priehyby.
- D.3.5.3 Kritéria povoleného rozdielu medzi nameranou a vypočítanou priehybovou krivkou musia zvoliť tak, aby nepresnosť pri výpočte modulov pružnosti vrstiev modelu vozovky neovplyvnila vypočítané hodnoty napätí v modeli vozovky do tej miery, že by v konečnom dôsledku došlo k rozdielom vo vypočítanej zvyškovej životnosti vozovky.
- D.3.5.4 Zaťaženie povrchu modelu musí zodpovedať parametrom zaťaženia pri meraní priehybu deflektometrom FWD. Polomer zaťažovacej plochy v modeli vozovky sa musí rovnať polomeru zaťažovacej dosky deflektometra. Veľkosť zaťažovacieho tlaku

v modeli sa vypočíta z podielu zaťažovacej sily pri meraní a plochy zaťažovacej dosky.

- D.3.5.5 Moduly vrstiev zjednodušeného modelu konštrukcie vozovky sa určujú spätným výpočtom v každom meranom bode. Nie je možné vytvoriť „priemernú priehybovú krivku“ na celý diagnostikovaný úsek a hodnoty modulov vrstiev určovať iba pre túto jednu krivku.
- D.3.5.6 Moduly pružnosti určené spätným výpočtom z nameranej priehybovej krivky sa vzťahujú na teplotu vozovky, pri ktorej sa meranie vykonalo. Pre potreby výpočtu zvyškovej životnosti sa vypočítaná hodnota modulu pružnosti asfaltových vrstiev prepočítava na vzťažnú teplotu +11°C. Prepočet sa vykonáva podľa rovnice odvodennej z grafu závislosti modulov pružnosti asfaltových zmesí na teplote, ktorej tvar je

$$E = 7717,04 - 225,29 \cdot T + 1,94 \cdot T^2$$

D.3.6 Výpočet zvyškovej životnosti vozovky

- D.3.6.1 Metodika výpočtu zvyškovej životnosti vozovky využíva zjednodušený model vozovky vytvorený pri spätnom výpočte modulov pružnosti z nameranej priehybovej krivky podľa postupu uvedeného v bode 4. Tento model je doplnený číselnými hodnotami modulov pružnosti podloža a podkladu určenými spätným výpočtom a číselnou hodnotou modulu pružnosti asfaltovej vrstvy po prepočítaní na teplotu +11°C v zmysle bodu 5.6. Tým vzniká sústava so všetkými parametrami potrebnými pre výpočet radiálnych napätí na spodnej hrane oboch vrstiev modelu a vertikálnych napätí na podloží.
- D.3.6.2 Na výpočet napätí v jednotlivých miestach modelu vozovky je možné použiť niektorý z výpočtových programov pracujúcich na základe riešenia viacvrstvového lineárne pružného polpriestoru (napr. OPMEKO, LAYMED, BISAR a pod.).
- D.3.6.3 Zvyšková prevádzková výkonnosť asfaltovej vrstvy modelu vozovky v návrhových nápravách sa vypočíta zo vzťahu

$$\log N = \frac{0,95 \cdot R_{i,bit} - \sigma_{r,bit}}{0,12 \cdot R_{i,bit}}$$

kde je: $\sigma_{r,bit}$ - radiálne napätie v ťahu pri ohybe na spodnom okraji asfaltovej vrstvy modelu vozovky [MPa]

$R_{i,bit}$ - hodnota pevnosti materiálu asfaltovej vrstvy [MPa]

- D.3.6.4 Zvyšková prevádzková výkonnosť hydraulicky stmelenej vrstvy modelu vozovky v návrhových nápravách sa vypočíta zo vzťahu

$$\log N = \frac{R_{i,podkl} - \sigma_{r,podkl}}{0,07 \cdot R_{i,podkl}}$$

kde je: $\sigma_{r,podkl}$ - radiálne napätie v ťahu pri ohybe na spodnom okraji hydraulicky stmelenej podkladovej vrstvy modelu vozovky [MPa]

$R_{i,podkl}$ - hodnota pevnosti materiálu podkladovej vrstvy [MPa]

- D.3.6.5 Zvyšková prevádzková výkonnosť podloža modelu vozovky v návrhových nápravách sa vypočíta zo vzťahu

$$\log N = \frac{0,00346 \times E_p - \sigma_z}{0,7 \times \sigma_z}$$

kde je: σ_z - zvislé napätie na povrchu podložia modelu vozovky [MPa]
 E_p - modul pružnosti podložia určený spätným výpočtom [MPa]

D.3.6.6 Najmenšia hodnota N vypočítaná pre asfaltovú, podkladovú vrstvu a pre podložie určuje *kritickú vrstvu*, pre ktorú sa vypočíta zvyšková prevádzková výkonnosť v jednotlivých nasledujúcich rokoch zo vzťahu:

$$N_{czvys, i} = N - \sum_{i=1}^k N_n \cdot \delta_i$$

kde je: $N_{czvys, i}$ - zvyšková prevádzková výkonnosť v i -tom roku v návrhových nápravách. Pre rok merania $i=1$
 N_n - ročný počet návrhových náprav v danom úseku v roku sčítania dopravy
 N - počet návrhových náprav, ktorý je schopná preniesť kritická vrstva do konca životnosti
 δ_i - výhľadový koeficient medziročného nárastu intenzity dopravy

Pre prvú hodnotu $N_{czvys, i}$ menšiu ako nula je hodnota zvyškovej životnosti

$$ZZ = i - 1 \text{ [roky]}$$

D.3.6.7 V prípade, že zvyšková životnosť kritickej vrstvy je menšia ako požadovaná zvyšková životnosť, vypočítava sa potrebná hrúbka zosilnenia.

D.3.6.8 Výpočet zvyškovej životnosti vozovky sa vykonáva v každom meranom bode.

D.3.7 Stanovenie hrúbky zosilnenia vozovky

D.3.7.1 Metodika výpočtu potrebnej hrúbky využíva zjednodušený model konštrukcie vozovky použitý v etape určenia zvyškovej životnosti vozovky, ktorý je však doplnený o ďalšiu (zosilňujúcu) vrstvu, ktorá sa v modeli umiestňuje nad asfaltovú vrstvu modelu vozovky.

D.3.7.2 Modul pružnosti a Poissonove číslo zosilňujúcej vrstvy sa určuje podľa návrhových hodnôt materiálu zosilňujúcej vrstvy zodpovedajúcich teplote $+11^{\circ}\text{C}$.

D.3.7.3 Hrúbka zosilňujúcej vrstvy sa v prvej etape navrhuje odhadom a potom je upravovaná tak, aby vyhovela kritériám využitia kritickej vrstvy podľa hodnoty súčiniteľa využitia.

Ak je kritickou vrstvou asfaltová vrstva modelu vozovky nachádzajúca sa pod zosilňujúcou vrstvou, alebo asfaltová podkladová vrstva v prípade celoasfaltových vozoviek, súčiniteľ využitia tejto vrstvy po pridaní zosilňujúcej vrstvy by mal byť v rozsahu $S_v = 0,85 - 0,95$.

Ak je kritickou vrstvou hydraulicky stmelená podkladová vrstva modelu vozovky, súčiniteľ využitia tejto vrstvy po pridaní zosilňujúcej vrstvy by mal byť v rozsahu $S_v = 0,92 - 0,95$.

Ak je kritickou vrstvou podložie vozovky, súčiniteľ využitia podložia po pridaní zosilňujúcej vrstvy musí byť $S_v \leq 1$.

D.3.7.4 Súčiniteľ využitia asfaltovej vrstvy modelu zosilnenej vozovky sa vypočíta zo vzťahu

$$S_v = \frac{\sigma_{r,bit}}{S_{N,bit} \cdot R_{i,bit}}$$

kde je: $\sigma_{r,bit}$ - radiálne napätie v ťahu pri ohybe na spodnom okraji asfaltovej vrstvy modelu zosilnenej vozovky [MPa]

$R_{i,bit}$ - hodnota pevnosti materiálu asfaltovej vrstvy [MPa]

$S_{N,bit}$ - súčiniteľ únavy materiálu vrstvy vypočítaný zo vzťahu

$$S_{N,bit} = 0,95 - 0,12 \cdot \log N_v$$

kde N_v je počet návrhových náprav, ktoré musí zosilnená vozovka prenieť počas návrhového obdobia

D.3.7.5 Súčiniteľ využitia hydraulicky stmelenej podkladovej vrstvy modelu zosilnenej vozovky sa vypočíta zo vzťahu

$$S_v = \frac{\sigma_{r,podkl}}{S_{N,podkl} \cdot R_{i,podkl}}$$

kde je: $\sigma_{r,podkl}$ - radiálne napätie v ťahu pri ohybe na spodnom okraji hydraulicky stmelenej podkladovej vrstvy modelu zosilnenej vozovky [MPa]

$R_{i,podkl}$ - hodnota pevnosti materiálu hydraulicky stmelenej podkladovej vrstvy [MPa]

$S_{N,podkl}$ - súčiniteľ únavy materiálu vrstvy vypočítaný zo vzťahu

$$S_{N,podkl} = 1 - 0,07 \cdot \log N_v$$

kde N_v je počet návrhových náprav, ktoré musí zosilnená vozovka prenieť počas návrhového obdobia

D.3.7.6 Súčiniteľ využitia podložia modelu vozovky sa vypočíta zo vzťahu

$$S_{v,p} = \frac{\sigma_z}{\sigma_{z,dov}} \leq 1$$

kde je: σ_z - zvislé napätie na povrchu podložia modelu zosilnenej vozovky [MPa]

$\sigma_{z,dov}$ - dovolené napätie na podloží vypočítané zo vzťahu

$$\sigma_{z,dov} = \frac{0,00346 \cdot E_p}{1 + 0,7 \cdot \log N_v}$$

kde je: E_p - je modul pružnosti podložia určený spätným výpočtom v modle vozovky [MPa]

N_v - počet návrhových náprav, ktoré musí zosilnená vozovka prenieť počas návrhového obdobia

D.3.7.7 Pre výpočet napätí v jednotlivých miestach modelu zosilnenej vozovky potrebných pre výpočet súčiniteľa využitia vrstvy je možné použiť niektorý z výpočtových programov pracujúcich na základe riešenia viacvrstvového lineárne pružného polpriestoru (napr. OPMEKO, LAYMED, BISAR a pod.).

D.3.8 Výpočtové programy

- D.3.8.1 Na hodnotenie únosnosti vozovky a stanovenia hrúbky zosilnenia je možné použiť komplexné výpočtové programy vyhovujúce požiadavkám uvedeným v tejto metodike. V súčasnosti je k dispozícii program CANUV, ktorého užívateľský manuál tvorí prílohu C tejto metodiky.