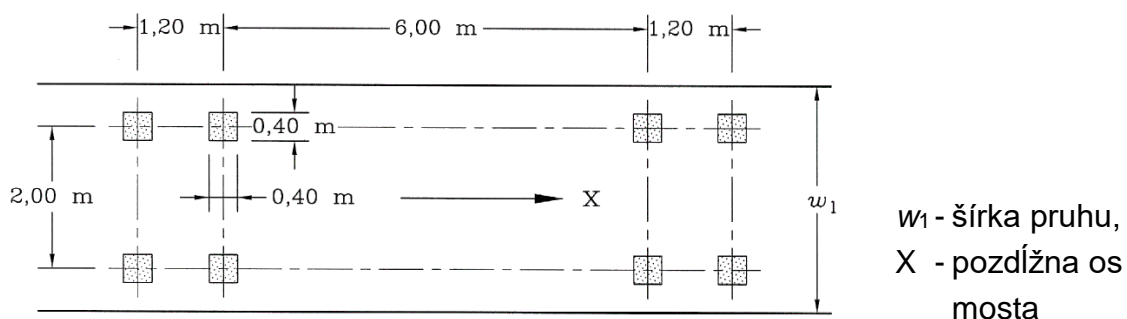


ÚNAVOVÁ ODOLNOSŤ SPRIAHNUTÉHO NOSNÍKA

Únavové zaťaženie

Konštrukcie vystavené počas svojej životnosti premenným účinkom zaťaženia je potrebné overiť aj z hľadiska ich odolnosti proti únavovému poškodeniu. Vznik a následné šírenie únavových trhlin je dlhodobý proces, ktorý nastáva v dôsledku mnohokrát opakovaného cyklického namáhania nosnej konštrukcie v kritických konštrukčných detailoch v mieste koncentrácie napätí vyvolaných pôsobiacim premenným zaťažením. Z toho dôvodu, hoci medzný stav únavy sa zaraďuje k medzným stavom únosnosti, napätosť vo vytypovaných konštrukčných detailoch náchylných na únavové poškodenie sa stanovuje od účinkov bežného prevádzkového zaťaženia na moste. Najvýstižnejší model únavového zaťaženia je možné získať vyhodnotením skutočne zameraných priebehov napäťovej odozvy konštrukcie na reálne prevádzkové zaťaženie, ktoré sa spracujú do formy tzv. spektra rozkmitov napätí postupmi špecifikovanými v STN EN 1993-1-9. Alternatívne je možné takéto spektrum rozkmitov napätí stanoviť pomocou únavových zaťažovacích modelov definovaných v STN EN 1991-2. Následné posúdenie únavovej odolnosti sledovaného detailu je potom založené na kumulácii únavového poškodenia od jednotlivých rozkmitov návrhového spektra. Tento postup je však veľmi prácny a časovo náročný, preto sa využíva len v špeciálnych prípadoch.

V bežných prípadoch sa na overenie únavovej odolnosti mostov na pozemných komunikáciách používa zjednodušená metóda podľa STN EN 1992-2 a EN 1993-2 založená na únavovom zaťažovacom modeli 3 (UZM 3) podľa STN EN 1991-2. Tento zaťažovací model je tvorený samostatným vozidlom, pozostávajúcim zo štyroch náprav, z ktorých každá má dve rovnaké kolesá. Geometrický tvar a rozmery vozidla sú uvedené na obr. 1. Tiaž každej nápravy má hodnotu 120 kN a kontaktná plocha každého kolesa je štvorcová so stranou 0,40 m.



Obrázok 1: Únavový zaťažovací model 3

Podpora edukačných aktivít pre výchovu mladých odborníkov v oblasti mostného staviteľstva v cezhraničnom regióne (ITMS kód projektu 304010U647)

Projekt je podporovaný z programu Interreg V-A Slovenská republika – Česká republika a spolufinancovaný z Európskeho fondu regionálneho rozvoja

Na overenie účinkov zaťaženia na konštrukciu ako celok (napr. na hlavné nosníky) sa má únavový zaťažovací model umiestniť na osi zaťažovacích pruhov. Na overenie lokálnych účinkov zaťaženia (napr. na dosky) sa UZM 3 umiestni na os zaťažovacieho pruhu umiestneného v ľubovoľnej polohe na vozovke. V odôvodnených prípadoch sa na základe dohody medzi projektantom a budúcim správcom mostného objektu použijú dve vozidlá v tom istom zaťažovacom pruhu. V tom prípade je geometria druhého vozidla rovnaká ako na obr. 1, avšak tiaž každej nápravy má hodnotu 36 kN. Vzďialenosť medzi dvoma vozidlami, meraná od stredu jedného po stred druhého vozidla, nemá byť menej ako 40 m.

Výpočet vnútorných síl na spriahnutých nosníkoch

Zaťaženie od nápravových síl U_{ZM3} na jednotlivé spriahnuté nosníky určíme opäť najskôr ručným výpočtom pomocou vplyvových čiar priečného roznosu. Keďže rozstupy kolesových síl v priečnom smere v jednotlivých zaťažovacích pruhoch sú rovnaké ako u $ZM1$, využijeme príslušné súradnice vplyvových čiar priečného roznosu na vyhodnotenie účinku nápravových síl v poli, resp. v nadpodporovej oblasti.

Zaťaženie od nápravových síl v polohe pre max M_y uprostred rozpätia:

Na nosník „a“:

$$F_{UZM3} = 120/2 \cdot (\eta_{11} + \eta_{12} + \eta_{21} + \eta_{22}) = 120/2 \cdot (0,6619 + 0,4625 + 0,3567 + 0,133) = 96,85 \text{ kN}$$

Na nosník „b“:

$$F_{UZM3} = 120/2 \cdot (\eta_{11} + \eta_{12} + \eta_{21} + \eta_{22}) = 120/2 \cdot (0,3842 + 0,3234 + 0,2896 + 0,215) = 72,73 \text{ kN}$$

Zaťaženie od nápravových síl v polohe pre max. V_z silu nad podporou:

Na nosník „a“:

$$\text{- od náprav 1 a 2: } F_{UZM3_{1,2}} = 120/2 \cdot (0,8929 + 0,1786) = 64,29 \text{ kN}$$

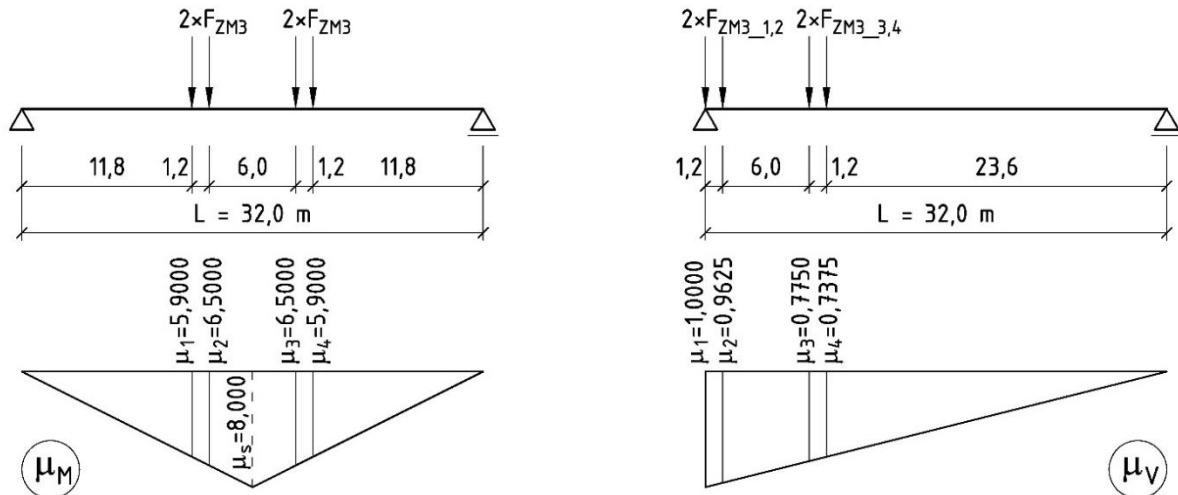
$$\text{- od náprav 3 a 4: } F_{UZM3_{3,4}} = 120/2 \cdot (0,6619 + 0,4625 + 0,3567 + 0,133) = 96,85 \text{ kN}$$

Na nosník „b“:

$$\text{- od náprav 1 a 2: } F_{UZM3_{1,2}} = 120/2 \cdot (0,2832 + 1,0 + 0,6454 - 0,0632) = 111,92 \text{ kN}$$

$$\text{- od náprav 3 a 4: } F_{UZM3_{3,4}} = 120/2 \cdot (0,3842 + 0,3234 + 0,2896 + 0,215) = 72,73 \text{ kN}$$

Maximálny ohybový moment uprostred rozpätia, resp. maximálnu priečnu silu nad podporou od UZM 3 na spriahnutých nosníkoch stanovíme pomocou vplyvových čiar (obr. 2).



Obrázok 2: Výpočet vnútorných síl od ZM3 pomocou vplyvových čiar

Charakteristické hodnoty vnútorných síl od UZM3 na krajnom nosníku „a“:

$$M_{UZM3,k} = F_{UZM3} \cdot \sum \mu_i = 96,85 \cdot (2 \cdot 5,900 + 2 \cdot 6,500) = 2\,401,88 \text{ kNm}$$

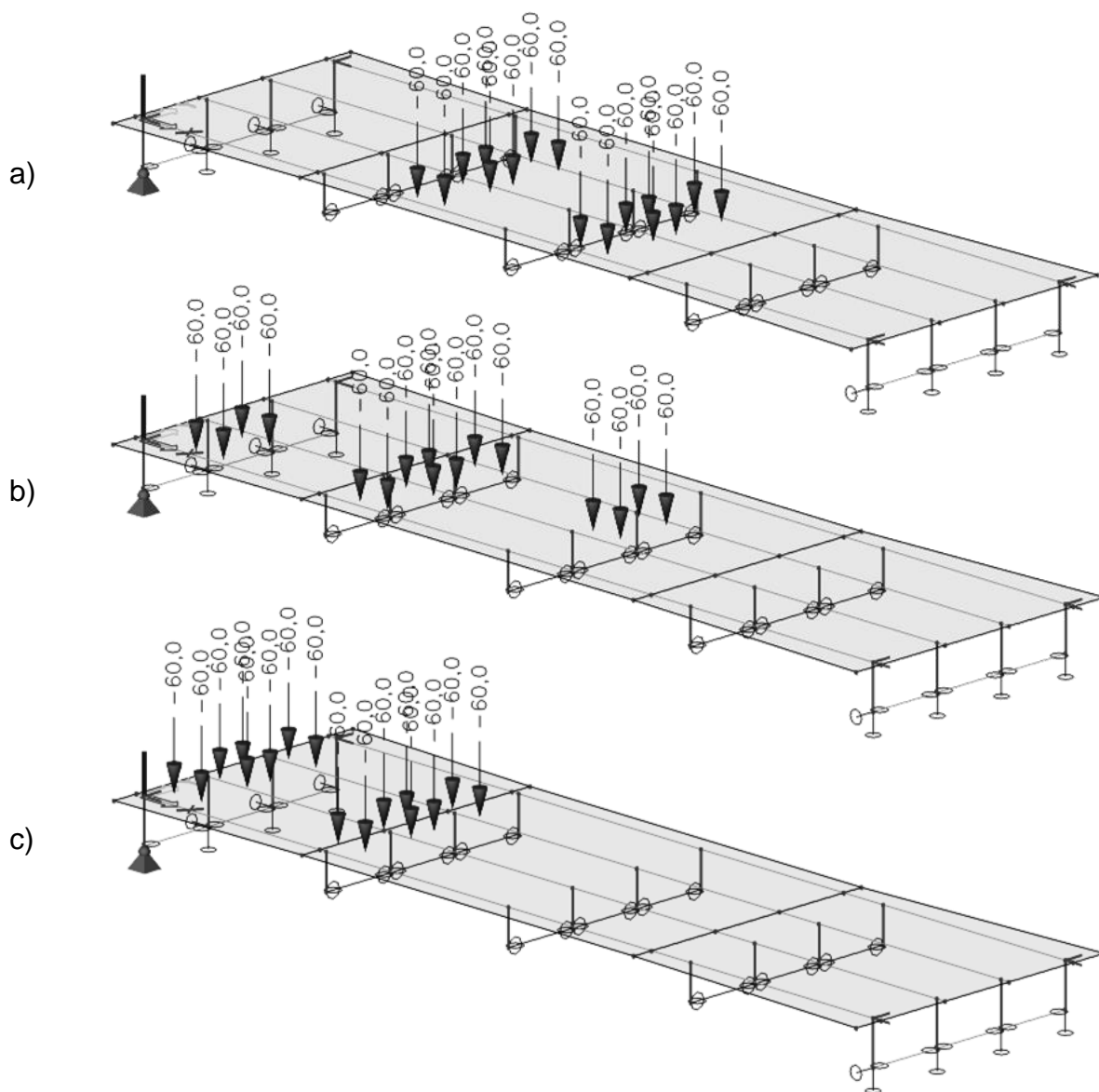
$$\begin{aligned} V_{UZM3,k} &= F_{UZM3_1,2} \cdot (\mu_1 + \mu_2) + F_{UZM3_3,4} \cdot (\mu_3 + \mu_4) = \\ &= 64,29 \cdot (1,000 + 0,9625) + 96,85 \cdot (0,7750 + 0,7375) = 272,65 \text{ kN} \end{aligned}$$

Charakteristické hodnoty vnútorných síl od ZM3 na vnútornom nosníku „b“:

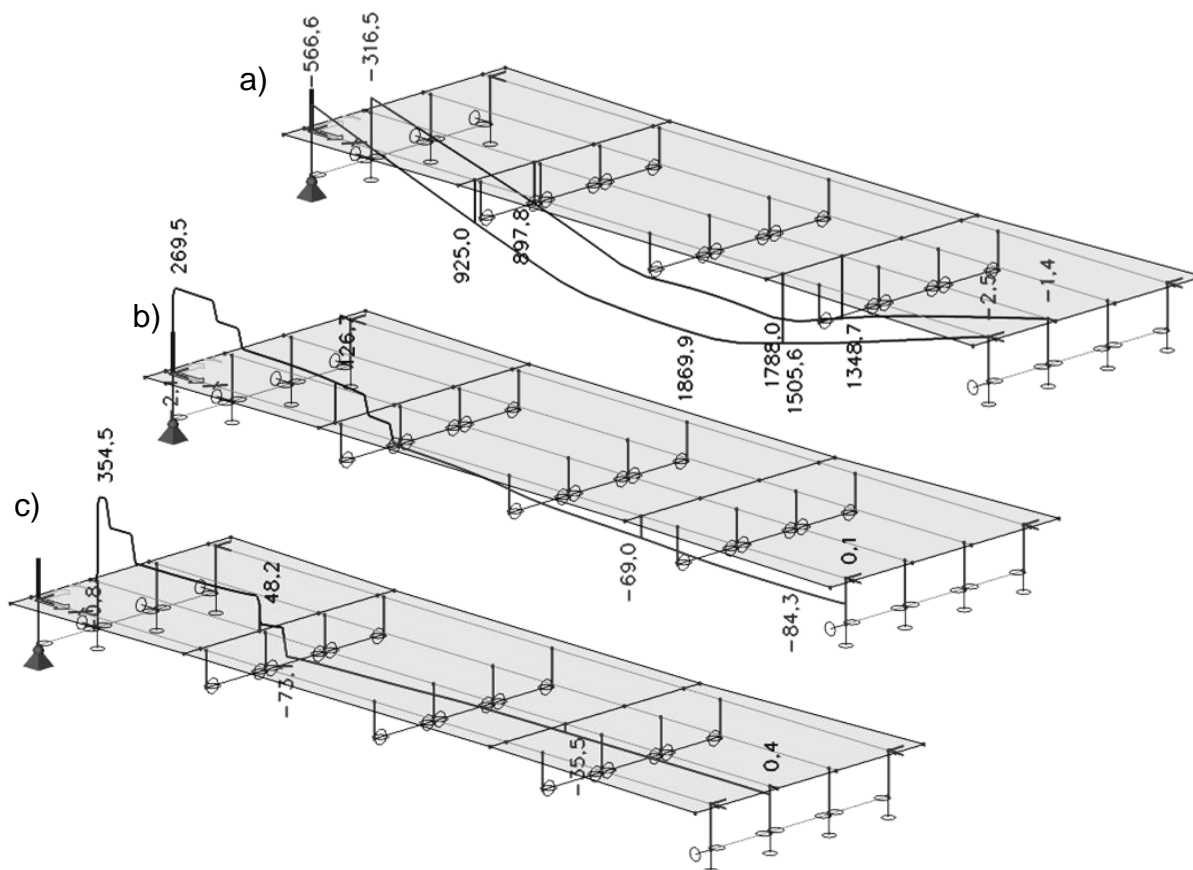
$$M_{UZM3,k} = F_{UZM3} \cdot \sum \mu_i = 72,73 \cdot (2 \cdot 5,900 + 2 \cdot 6,500) = 1\,803,70 \text{ kNm}$$

$$\begin{aligned} V_{UZM3,k} &= F_{UZM3_1,2} \cdot (\mu_1 + \mu_2) + F_{UZM3_3,4} \cdot (\mu_3 + \mu_4) = \\ &= 111,92 \cdot (1,000 + 0,9625) + 72,73 \cdot (0,7750 + 0,7375) = 329,65 \text{ kN} \end{aligned}$$

Presnejšie stanovíme hodnotu prierečnej sily na nosníku „b“ v štvrtine rozpätia opäť s využitím priestorového výpočtového modelu. Polohy UZM 3 zodpovedajúce príslušným vplyvovým plochám sú znázornené na obr. 3. Priebehy vnútorných síl od UZM 3 sú znázornené na obr. 4.



Obrázok 3: Poloha UZM 3 pre a) $\max M_y$ uprostred rozpätia na nosníkoch „a“ aj „b“, b) $\max V_z$ nad podporou na nosníku „a“, c) $\max V_z$ nad podporou na nosníku „b“

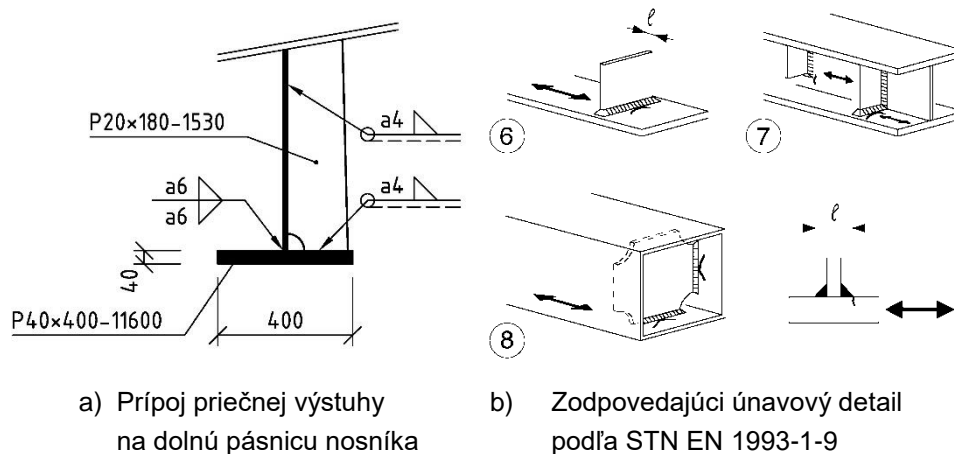


Obrázok 4: Vnútorne sily od UZM 3: a) ohybové momenty $M_{y,k}$ (kNm) na nosníkoch „a“ a „b“, b) priečne sily $V_{z,k}$ (kN) na nosníku „a“, c) priečne sily $V_{z,k}$ (kN) na nosníku „b“

Posúdenie únavovej odolnosti ocelového nosníka

Rozhodujúci únavový detail je prípoj priečnej výstuhy k dolnej pásnici ocelového nosníka uprostred rozpätia (obr. 5a). V závislosti od celkovej hrúbky priečnej výstuhy vrátane pripájajúcich kútových zvarov (na obr. 5b je tento rozmer označený ako ℓ) je možné v zmysle STN EN 1993-1-9 tento detail klasifikovať nasledovne:

- ak je $\ell \leq 50$ mm \Rightarrow kategória detailu 80;
- ak je $50 < \ell \leq 80$ mm \Rightarrow kategória detailu 71.



Obrázok 5: Posudzovaný únavový konštrukčný detail na ocelovom nosníku

V našom prípade platí: $\ell = 2 \cdot 4 \cdot \sqrt{2} + 20 = 31,3$ mm $<$ 50 mm

\Rightarrow Detail je možné klasifikovať do kategórie detailu 80.

Vzhľadom na hodnoty ohybových momentov uprostred rozpätia je zrejmé, že z hľadiska únavovej odolnosti je rozhodujúci krajný nosník „a“. S použitím príslušných efektívnych prierezových charakteristík spriahnutého prierezu pre krátkodobé zaťaženie stanovíme maximálne normálové napätie v úrovni hornej hrany dolnej pásnice:

$$\sigma_{p,\max} = \sigma_{UZM3,k} = \frac{M_{UZM3,k}}{I_{y,ef}} \cdot (z_{e4} - t_f) = \frac{1869,90}{53,670} \cdot (1,428 - 0,040) = 48,36 \text{ MPa}$$

Referenčný rozkmit napätia pre určenie účinkov poškodenia od spektra rozkmitov napätí je:

$$\Delta\sigma_p = |\sigma_{p,\max} - \sigma_{p,\min}| = |48,36 - 0| = 48,36 \text{ MPa}$$

Súčiniteľ ekvivalentného poškodenia je definovaný v STN EN 1993-2 vzťahom:

$$\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4 < \lambda_{\max}$$

kde:

Podpora edukačných aktivít pre výchovu mladých odborníkov v oblasti mostného staviteľstva v cezhraničnom regióne (ITMS kód projektu 304010U647)

Projekt je podporovaný z programu Interreg V-A Slovenská republika – Česká republika a spolufinancovaný z Európskeho fondu regionálneho rozvoja

λ_1 je faktor účinku poškodenia od dopravy závislý od dĺžky vplyvovej čiary alebo plochy. Pre rozpätie 32 m a oblasť uprostred rozpätia platí

$$\lambda_1 = 2,55 - 0,7 \cdot \frac{L-10}{70} = 2,55 - 0,7 \cdot \frac{32-10}{70} = 2,33$$

λ_2 je faktor vyjadrujúci objem dopravy. Pre odporúčanú priemernú intenzitu 50 tis. ťažkých vozidiel za rok podľa tab. 4.5(n) v STN EN 1991-2 pre miestne pozemné komunikácie s nízkou intenzitou dopravného prúdu nákladných vozidiel a pre odhadnutú priemernú celkovú hmotnosť nákladných vozidiel $Q_{m1} = 240$ kN platí

$$\lambda_2 = \frac{Q_{m1}}{Q_0} \cdot \left(\frac{N_{obs}}{N_0} \right)^{1/5} = \frac{240}{480} \cdot \left(\frac{0,05 \cdot 10^6}{0,5 \cdot 10^6} \right)^{1/5} = 0,315$$

λ_3 je faktor závislý od návrhovej životnosti mosta. Pre návrhovú životnosť 100 rokov je $\lambda_3 = 1,0$.

λ_4 je faktor závislý od dopravy v ďalších jazdných pruhoch. Pre komunikáciu bez ďalších jazdných pruhov pre ťažkú dopravu je $\lambda_4 = 1,0$.

λ_{max} je maximálna hodnota faktora λ , ktorá zohľadňuje medzu únavy. Pre oblasť uprostred rozpätia a dĺžku poľa $L \geq 25$ m je $\lambda_{max} = 2,0$.

Výsledná hodnota súčiniteľa ekvivalentného poškodenia teda je:

$$\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4 = 2,33 \cdot 0,315 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 0,73 < \lambda_{max} = 2,0$$

Ekvivalentný rozkmit napätia vzťahnutý k 2×10^6 kmitov je definovaný vzťahom:

$$\Delta\sigma_{E2} = \lambda \cdot \phi_2 \cdot \Delta\sigma_p$$

kde ϕ_2 je dynamický súčiniteľ ekvivalentného poškodenia, ktorý je pre mosty pozemných komunikácií možné uvažovať hodnotou $\phi_2 = 1,0$, pretože je zahrnutý do modelu únavového zaťaženia. Hodnota ekvivalentného rozkmitu napätia teda je:

$$\Delta\sigma_{E2} = \lambda \cdot \phi_2 \cdot \Delta\sigma_p = 0,73 \cdot 1,0 \cdot 48,36 = 35,30 \text{ MPa}$$

Únavová odolnosť sa posúdi podľa vzťahu:

$$\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E2} \leq \frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf}}$$

kde $\Delta\sigma_c$ je únavová pevnosť posudzovaného detailu, ktorá je priamo daná kategóriou detailu. Pre náš prípad zodpovedajúci kategórii detailu 80 teda platí:

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E2} = 1,0 \cdot 35,30 = 35,30 \text{ MPa} < \frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf}} = \frac{80}{1,15} = 69,57 \text{ MPa} \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Posúdenie únavovej odolnosti prvkov spriahnutia

Rozhodujúce je posúdenie zvarového prípoja trňov na hornú pásnicu vnútorného oceľového nosníka „b“ v oblasti nad podporou. Únavová pevnosť pri 2×10^6 kmitoch sa má v zmysle STN EN 1994-2 uvažovať hodnotou $\Delta\sigma_c = 90$ MPa. Šmykový tok na rozhraní medzi betónovou doskou a hornou pásnicou oceľového nosníka od priechnej sily $V_{UZM3,k} = 354,5$ kN je

$$V_{L,UZM3,k} = \frac{V_{ZM3,k} \cdot S_{y,c,ef}}{I_{y,ef}} = \frac{354,5 \cdot 34,7685}{56,3147} = 218,87 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$$

Rozkmit šmykového napätia v priereze krajnej trojice trňov je:

$$\Delta\tau = \tau_{\max} - \tau_{\min} = \tau_{\max} = \frac{v_p \cdot e_1}{3 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}} = \frac{218,87 \cdot 10^{-3} \cdot 0,32}{3 \cdot \frac{\pi \cdot 0,022^2}{4}} = 61,41 \text{ MPa}$$

Súčiniteľ ekvivalentného poškodenia: $\lambda_v = \lambda_{v,1} \cdot \lambda_{v,2} \cdot \lambda_{v,3} \cdot \lambda_{v,4}$

$\lambda_{v,1}$: pre rozpätie < 100 m $\Rightarrow \lambda_{v,1} = 1,55$

$\lambda_{v,2}$: pre priemernú intenzitu 50 tis. ťažkých vozidiel za rok a hmotnosť vozidla 240 kN

$$\lambda_{v,2} = \frac{Q_{m1}}{Q_0} \cdot \left(\frac{N_{obs}}{N_0} \right)^{1/8} = \frac{240}{480} \cdot \left(\frac{0,05 \cdot 10^6}{0,5 \cdot 10^6} \right)^{1/8} = 0,375$$

$\lambda_{v,3} = 1,00$ pre návrhovú životnosť 100 rokov

$\lambda_{v,4} = 1,00$ pre komunikáciu bez ďalších jazdných pruhov pre ťažkú dopravu

$$\lambda_v = 1,55 \cdot 0,375 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 0,58$$

Ekvivalentný rozkmit šmykového napätia:

$$\Delta\tau_{E2} = \lambda_v \cdot \Delta\tau_p = 0,58 \cdot 61,41 = 35,62 \text{ MPa}$$

Posúdenie

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\tau_{E,2} = 1,0 \cdot 35,62 = 35,62 \text{ MPa} < \frac{\Delta\tau_c}{\gamma_{Mf}} = \frac{90}{1,15} = 78,26 \text{ MPa} \Rightarrow \text{vyhovuje}$$