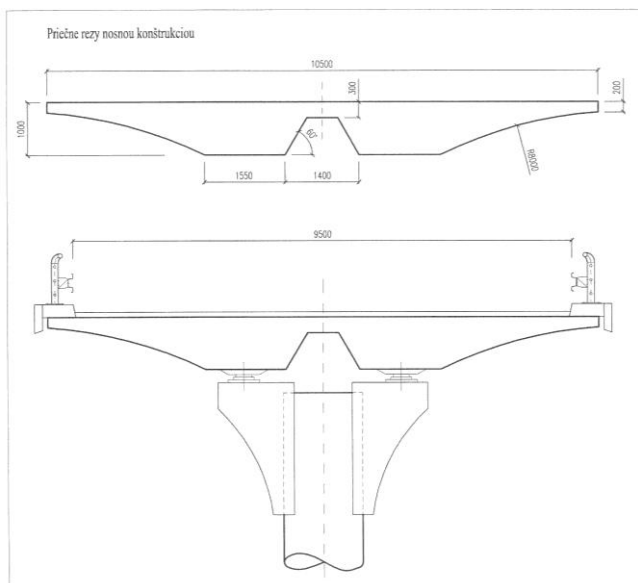


Porovnávací výpočet betónového mostu podľa slovenských a českých noriem a Eurokódu

Pri prechode na európske normy sa nevyhneme určitému prehodnoteniu zaužívaných postupov a zvyklostí.

V nasledujúcom článku je prezentovaný výpočet mostu s danou geometriou prierezu, danými rozponmi a materiálmi. Pre iný typ mostu a iné rozpony by mohli byť výsledky porovnania odlišné.

Predpätý betónový most je v prvej časti vypočítaný podľa zásad českej normy ČSN 73 6207 *Navrhování mostních konstrukcí z předpjatého betonu*, ktorá sa opiera o československú normu ČSN 73 6203 *Zatížení mostů*, prevzatou aj do systému slovenských noriem. Normy sú uvádzané podľa znenia v pôvodnom vydaní, tak ako je uvedené na titulnej strane normy.



Obr.1

Výpočet podľa týchto noriem používa dovolené namáhania a stupne bezpečnosti, čiže pomerne zastaralý spôsob výpočtu. Medzné stavy zavedené v ČSN 73 1201 *Navrhování betonových konstrukcí* sa pre mostné staviteľstvo nepresadili, resp. nebola dostatočná vôľa vypracovať normu navrhovania mostných konštrukcií, ktorá by sa dôsledne opierala o túto kmeňovú normu, hoci v ČSN 73 6203 *Zatížení mostů* boli predpoklady pre zavedenie výpočtu podľa medzných stavov vytvorené.

Výpočet podľa Eurokódov zavádza dôsledne medzné stavy do výpočtov betónových mostných konštrukcií, špecializované časti Eurokódov sa na kmeňové normy odvolávajú a sú navzájom zosúladené. V príspevku boli použité časti z týchto noriem :

EN 1990 Príloha 2: Mosty

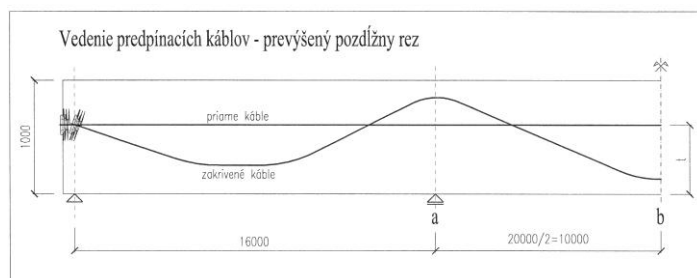
STN P ENV 1991-3 Zaťaženie mostov dopravou

EN 1992-1-1 Navrhovanie betónových konštrukcií. Obecné pravidlá

STN P ENV 1992-2 Navrhovanie betónových konštrukcií. Mosty

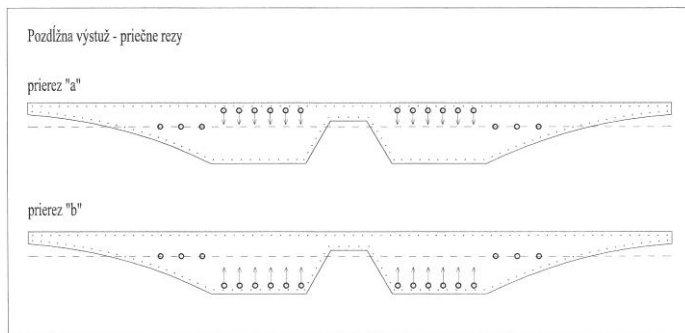
V podstate je však možné sledovať určitú paralelu v jednotlivých posúdeniach, platných pre mosty, napr. posúdenie konštrukcie podľa stupňa bezpečnosti v ČSN a posúdenie na medzný stav únosnosti podľa EN, alebo časť posúdenia na medzný stav použiteľnosti podľa EN používa obmedzenie napätí podobné dovoleným napätiam podľa ČSN.

Nakoľko spôsob definície zaťaženia a zostava kombinácií, ako aj definovanie materiálových charakteristík sú značne odlišné, zvolili sme postup, pri ktorom sme vypočítali most podľa jedného systému noriem (ČSN) za určitých zadefinovaných podmienok a vypočítaný tvar a výstuž sme podľa druhého systému noriem (EN) posúdili a zadefinovali do príslušnej kategórie, ktorá vyhovovala vypočítanému tvaru a výstuži. Kategóriu konštrukcie v systéme EN by mal zadefinovať, resp. odsúhlasiť investor podľa požadovanej kvality, kladenej na nosnú konštrukciu, prípadne podľa tried prostredia (stupňa agresivity), v ktorom sa konštrukcia bude nachádzať.



Obr.2

Pretože priestor pre článok je kapacitne obmedzený, konštrukcia bola posudzovaná len v dvoch rozhodujúcich rezoch a posúdenia sa obmedzili len na návrh pozdĺžnej výstuže. Zo zaťaženia boli uvažované tie účinky, ktoré majú priamy vplyv na návrh pozdĺžnej výstuže v priečnom reze, a to vlastné ťažie, predpätie, premenné zaťaženia od dopravy a teplotný spád po hrúbke konštrukcie. Neboli zohľadňované poklesy podpier a mimoriadne zaťaženia.



Obr.3

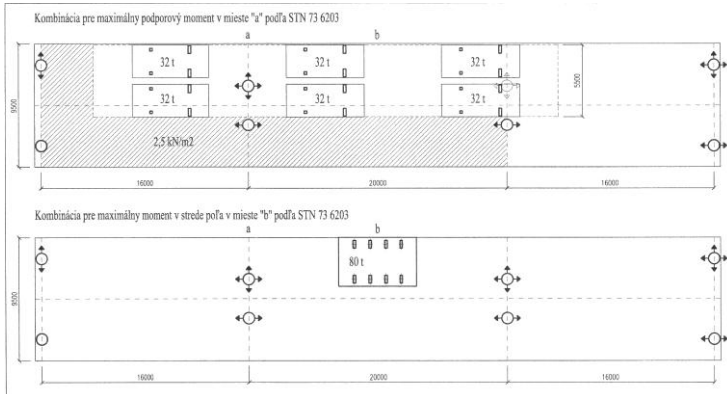
Na výpočet vnútorných síl bol použitý programový systém STRAP. Roznos zaťaženia bol namodelovaný na roštovej sústave a zároveň overovaný aj na doskovej sústave. Dimenzovanie prierezov prebiehalo za pomoci programu PRECON.

Popis konštrukcie

Betónový monolitický predpätý most tvorí trojpoľový spojený nosník o rozpätiach 16 + 20 + 16 m z betónu B 400 (v EN C30/37). Priečný rez je zrejmy z obr.1, kde cesta medzi zvodidlami má 9,5 m, vlastná nosná konštrukcia má šírku 10,5 m. Nosná konštrukcia je uložená na hrncových ložiskách, ktorých pôsobenie je vidieť

napr. na **obr. 4**. Vylahčený doskový (polotrámový) prierez má výšku 1 m a pomer L/H vzhľadom na stredné pole má hodnotu 20. Most je kolmý.

Obr.4



Predpínacia výstuž je koncentrovaná do káblov s deviatimi lanami Ls 15,5/1800. Každý kábel je vedený pozdĺž celej konštrukcie a je predpínaný z oboch strán. Káble sa delia na priame (P) a zakrivené (Z) v počte 2x (3P + 6Z) = 18. Priame káble sú vedené v ťažiskovej osi prierezu.

Betonárska výstuž z ocele 10 505 (R) prierezu $\phi 12$ je rozmiestnená po obvode prierezu vo vzájomnej vzdialenosti 150 mm.

Výstuž je znázornená na **obr.2** a na **obr.3**.

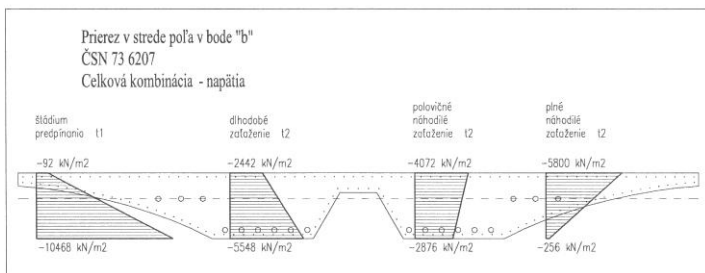
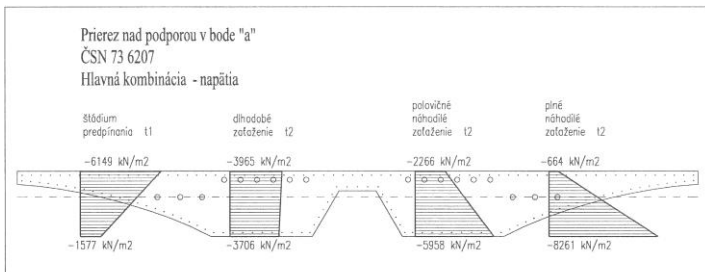
Ukazovatele spotreby materiálov nosnej konštrukcie :

Predpínacia výstuž : 17,2 kg/m²

Betonárska výstuž : 46 kg/m²

Betón : 0,646 m³/m²

Obr.5



Obr.6

Zaťaženia a výpočet podľa ČSN

Cieľom návrhu podľa ČSN 73 6207 je plne predpätý betón.

Rozhodujúca zostava premenného zaťaženia pre podporový prierez „a“ je šesťica tridsaťdva tonových vozidiel znázornená na **obr.4** hore. Pre prierez v strede stredného poľa „b“ je rozhodujúca krajná poloha osemdesiat tonového vozidla v strede rozpätia (**obr.4** dole).

Napätie pri predpínaní je

$$\sigma_{in} = 0,935 \times (\text{medza } 0,2) = 0,935 \times 1530 = 1430 \text{ MPa}$$

Teplotný spád bol uvažovaný lineárny $\pm 10^\circ\text{C}$.

Dynamický súčiniteľ sme započítali hodnotou 1,25.

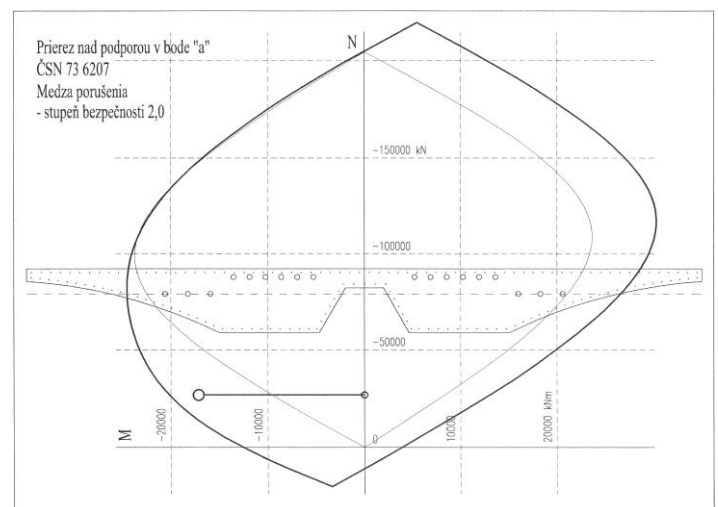
Niektoré vybrané výsledky posúdenia konštrukcie sú znázornené na **obr.5** a **obr.6**, ktoré ukazujú napätosť betónového prierezu v čase t_1 , ktorý bol zvolený ako štádium predpínania a v čase $t_2 = 100$ rokov pre tri stavy : dlhodobé zaťaženie, stále a polovičné náhodilé zaťaženie a stále a plné náhodilé zaťaženie.

Obr.7 prezentuje posúdenie prierezu v bode „a“ na medzu porušenia pre stupeň bezpečnosti 2,0.

Rozhodujúce je posúdenie podľa dovolených namáhání.

Konštrukcia je navrhnutá a optimalizovaná tak, aby všetky káble prebiehali priebežne pozdĺž celej konštrukcie a aby nemuseli byť kotvené mimo čelných koncových prierezov.

Obr.7



Prehľad koeficientov strát predpätia pre čas t_1 a t_2 :

	λ_1	λ_2
Káble „Z“ bod „a“	0,88	0,80
Káble „Z“ bod „b“	0,81	0,74
Káble „P“ bod „a“	0,94	0,86
Káble „P“ bod „b“	0,91	0,83

Zaťaženia a výpočet podľa EN

Nosná konštrukcia bola posudzovaná na

- medzný stav únosnosti (MSÚ)
- medzný stav použiteľnosti (MSP)

Pri **MSÚ** boli splnené podmienky pre posúdenie na únavu tak, aby nebol nutný priamy výpočet na únavu podľa S-N kriviek. Tieto podmienky sa formulujú pri posúdeniach MSP.

Napätie v predpínacej výstuži nesmie presiahnuť

$$f_{pd} = f_{p0,1k} / \gamma_s = 1526 / 1,15 = 1327 \text{ MPa}$$

v betonárskej výstuži

$$f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s = 500 / 1,15 = 435 \text{ MPa}$$

a v betóne

$$f_{cd} = \alpha \cdot f_{ck} / \gamma_c = 1 \times 30 / 1,5 = 20 \text{ MPa}$$

Všeobecne sa pre MSÚ nevyžaduje brať do úvahy účinky teploty.

Pre náš konkrétny prípad potom môžeme sformulovať kombinačnú podmienku pre maximálny moment v čase t_2

$$M_d = \gamma_G (M_{G0} + M_{G1}) + \gamma_P \cdot M_p + \gamma_N \cdot M_N$$

$$M_d = 1,35 (M_{G0} + M_{G1}) + 1,0 \cdot M_p + 1,35 \cdot M_N$$

kde M_{G0} je moment od vlastnej tiaže

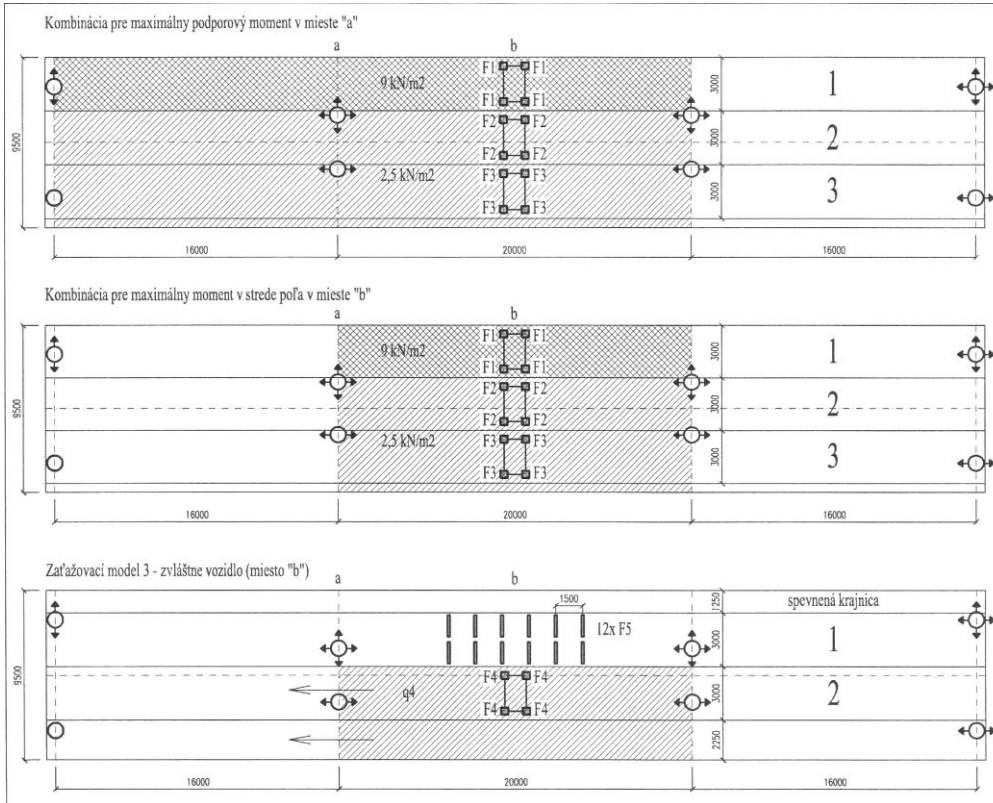
M_{G1} je moment od tiaže zvršku a príslušenstva

M_p je moment od predpätia (vrátane podielu staticky neurčitých

Horná aj dolná charakteristická hodnota predpätia sa násobí koeficientom 1,0.

Pri **MSP** bolo zohľadnené

- obmedzenie napätí
- posúdenie trhlín a dekompresie



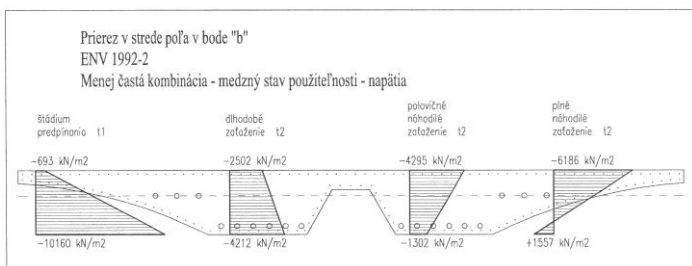
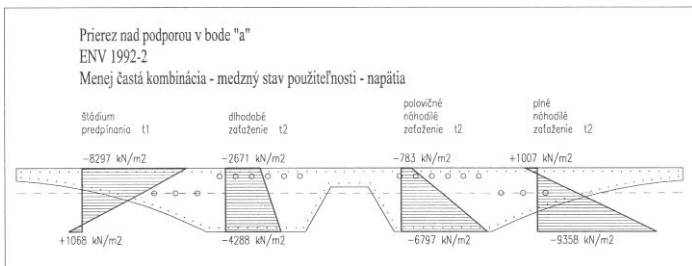
Obr.8

momentov)

M_N je náhodilé resp. premenné zaťaženie.

Kombinácia v čase t_1 sa javí v MSÚ oproti t_2 ako irelevantná.

Obr.9



Obr.10

Napätie pri predpínaní je minimum z hodnôt $0,8 f_{pk}$ alebo

$$0,9 f_{p0,1k} \text{ a vychádza } \sigma_{in} = 0,9 \times 1526 = 1373 \text{ MPa.}$$

Napätie v betóne pri menej častej kombinácii nesmie presiahnuť $0,6 f_{ck} = 0,6 \times 30 = 18 \text{ MPa}$ a v betonárskej výstuži $0,8 f_{yk} = 0,8 \times 500 = 400 \text{ MPa}$.

Horná a dolná charakteristická hodnota predpätia sa upravuje koeficientmi

$$P_{k,sup} = 1,1 \cdot P_{m,t}$$

$$P_{k,inf} = 0,9 \cdot P_{m,t}$$

Zaťaženie mostovky teplotným gradientom (lineárnym) bolo zavedené ako $15^\circ\text{C} \rightarrow 0^\circ\text{C}$ pre horné oteplenie povrchu upravené pre 100 mm-ový zvršok na $15 \times 0,7 = 10,5^\circ\text{C}$ a $0^\circ\text{C} \rightarrow 8^\circ\text{C}$ pre dolné oteplenie bez úpravy.

K **MSP** boli zostavené nasledovné kombinácie :

- charakteristická
- častá
- kvázi-stála
- menej častá

Súčiniteľ zaťaženia $\gamma_f = 1,0$.

Kombinačné súčinitele sú použité v zmysle EN 1991-2.

Konstrukcia bola zaťažovaná hlavným zaťažovacím systémom (zaťažovací model 1) a zostavou zaťažovacích modelov pre zvláštne vozidlá (zaťažovací model 3), ktorým sme sa chceli priblížiť čo najviac 80 tonovému vozidlu ako pri ČSN. Zaťažovacie stavy sú znázornené na **obr.8**, pričom relevantné sú prvé dva obrázky zhora, pri zaťažovacom modeli 3 (ZM 3) nebola dosiahnutá žiadna poloha bremien, ktorá by ovplyvnila dimenzovanie prierezov „a“ a „b“.

Kategorizačné súčinitele boli uvažované $\alpha_Q = 0,9$ a $\alpha_Q = 1,0$.

Potom pre jednotlivé kolesové sily vychádzali tieto hodnoty :

$$F1 = 0,9 \times 300 / 2 = 135 \text{ kN}$$

$$F2 = 0,9 \times 200 / 2 = 90 \text{ kN}$$

$$F3 = 0,9 \times 100 / 2 = 45 \text{ kN}$$

Pre silu $F4$ pribudne kombinačný súčiniteľ pre častú hodnotu $\psi_1 = 0,75$ pre TS (tandem systém) a $\psi_1 = 0,4$ pre UDL (rovnorné spojité zaťaženie)

$$F4 = 0,9 \times 200 / 2 \times 0,75 = 67,5 \text{ kN}$$

$$q4 = 1,0 \times 2,5 \text{ kN/m}^2 \times 0,4 = 1 \text{ kN/m}^2$$

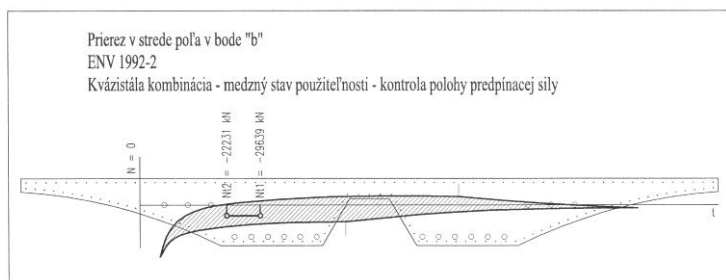
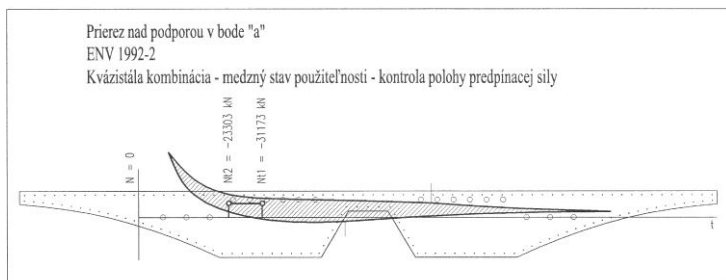
$F5 = 150 / 2 = 75 \text{ kN}$ pre triedu zvláštnych vozidiel 900 kN, ktorá sa z daných možností najviac približuje vozidlu 80 t vynásobenému dynamickým súčiniteľom.

Pokiaľ teda neuvažujeme vyššie kategórie zvláštnych vozidiel, vystačíme pri danej konfigurácii mosta so zaťažovacím modelom 1 (ZM 1) pre prierezy „a“ a „b“. Pri lokálnych posúdeniach sa potom určite presadí ZM 2.

Pri porovnaní relatívnych účinkov zaťažovacích modelov sa modely EN pri konkrétnom moste presadzovali asi o 25% viac v poli ako nad podporou (pri premennom zaťažení) oproti modelom ČSN.

Obr.9 a obr.10 znázorňujú napätia pri menej častej kombinácii. Prierezy sú zaťažené aj ťahovými napätiami, ktoré však nepresiahnu hodnotu $f_{ctm}=2900$ kN/m², trhliny teda nevzniknú. Táto kombinácia však nevyhovuje kritériu dekompresie, pri ktorej musí byť kábel 25 mm vo vnútri tlačenej oblasti. Pri porovnaní všetkých zostavených kombinácií je možné zaradiť konštrukciu podľa tabuľky kritérií pre zatriedenie mosta do kategórie „C“.

Obr.11



Obr.12

Obr.11 a obr.12 názorne graficky vyjadruje polohu výslednice predpinacej sily v čase t_1 a t_2 vzhľadom na materiállové, geometrické a zaťažovacie podmienky v priereze v mieste „a“ a v mieste „b“ pre kvázistálu kombináciu na základe štyroch nerovnic predpätého prierezu. Prierez vyhovuje, pokiaľ sa body výsledníc nachádzajú vo vnútri vyšrafovaného obrazca.

Ak by sme chceli zvýšiť kategóriu mosta na kategóriu „B“, dosiahli by sme to napríklad pridaním štyroch priamych káblov do úrovne ťažiskovej osi, samozrejme ale za cenu zvýšenia nákladov na predpináciu výstuž a príslušenstvo (kotvy atď.), to všetko pri zložitejších detailoch kotvenia v čelách nosníkov. Potom by sme mali celkom $2 \times (5P + 6Z) = 22$ káblov. Tým by sme sa dostali častou kombináciou do úrovne dekompresie, ako to požaduje kategória „B“.

Záver

Pri navrhovaní podľa EN musíme venovať viac úsilia zostaveniu zaťažovacích kombinácií na základe príslušných výpočtových, kategorizačných a kombinačných súčiniteľov. Most alebo jeho časti musia byť zaradené do tried prostredia. Cieľom výpočtu je dosiahnuť na základe normových kritérií zaradenie mosta do kategórie požadovanej investorom, prípadne táto kategória vyplýva priamo z umiestnenia konštrukcie v danom prostredí.

Výsledky posúdení prezentované v článku nie je možné zovšeobecniť pre inú geometrickú a materiállovú zostavu mosta.

Literatúra

- [1] ČSN 73 6207 Navrhování mostních konstrukcí z předpjatého betonu 1993
- [2] ČSN 73 6203 Zatížení mostů 1989
- [3] Eurocode 1 – Action on structures, Part 2: Traffic loads on bridges 2003
- [4] Eurocode 2 – Design of Concrete Structures, Part 1: General Rules and Rules for Buildings
- [5] Eurocode 2 – Design of Concrete Structures, Part 2: Concrete bridges
- [6] Beton-Kalender 2004 Brücken und Parkhäuser, Ernst & Sohn

Poznámka

V dobe po napísaní článku nastali určité zmeny medzi *STN P ENV 1991-3 Zaťaženie mostov dopravou*, *STN P ENV 1992-2 Betónové mosty* a medzi teraz platnými *STN EN 1991-2 Zaťaženie mostov dopravou*, *STN EN 1992-2 Betónové mosty*, ktoré je nutné zohľadniť pri aplikácii záverov článku.