

Miroslav SÝKORA¹, Michal DRAHORÁD²

STANOVENÍ DÍLČÍCH SOUČINITELŮ PRO HODNOCENÍ ZATÍŽITELNOSTI
EXISTUJÍCÍCH MOSTŮ

PARTIAL FACTORS FOR THE ASSESSMENT OF LOAD-BEARING CAPACITY
OF EXISTING BRIDGES

Abstrakt

Rostoucí zatížení dopravou, stárnutí existujících mostů a nákladnost jejich modernizací zvyšují význam metod hodnocení spolehlivosti, které umožní přihlídnout k různým faktorům specifickým pro existující most. Článek vysvětluje postupy úprav dílčích součinitelů v závislosti na znalostech o materiálech a zatížení, zvolené směrné úrovni spolehlivosti a plánované zbytkové životnosti mostu. Praktický příklad ilustruje aplikaci teoretických postupů.

Klíčová slova

Dílčí součinitele, zatížitelnost, hodnocení spolehlivosti, existující mosty, železobeton.

Abstract

Ever-increasing traffic actions, degradation of bridges and immense costs of their rehabilitations imply needs for the methods of reliability assessment that allow accounting for specific conditions of an existing bridge. The study clarifies the procedures of modifications of partial factors considering knowledge and uncertainties in materials and actions, selected target reliability and required remaining working life of the bridge. A case study indicates the applications of theoretical procedures.

Keywords

Partial factors, load-bearing capacity, reliability assessment, existing bridges, reinforced concrete.

1 ÚVOD

Rostoucí zatížení dopravou, stárnutí existujících mostů a nákladnost jejich modernizací zvyšují význam metod hodnocení spolehlivosti, které umožní přihlídnout k různým faktorům specifickým pro existující most. Současně platné předpisy pro navrhování a posuzování stavebních konstrukcí (ČSN EN a ČSN ISO) jsou založeny na pravděpodobnostním přístupu jak ke stanovení zatížení, tak k odolnosti. Tento postup umožňuje zohlednit znalosti i nejistoty související s působením existující konstrukce [1].

¹ Ing. Miroslav Sýkora, Ph.D., Oddělení spolehlivosti konstrukcí, Kloknerův ústav, České vysoké učení technické v Praze, Šolínova 7, 16608 Praha, e-mail: miroslav.sykora@klok.cvut.cz.

² Ing. Michal Drahorád, Ph.D., Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze, Tháškova 7/2077, 166 29 Praha, e-mail: michal.drahorad@fsv.cvut.cz.

2 ZÁSADY METODY DÍLČÍCH SOUČINITELŮ

Základním parametrem pro hodnocení stavebních konstrukcí je pravděpodobnost poruchy konstrukce během referenční doby, zpravidla životnosti konstrukce. Pro běžné konstrukce se požaduje pravděpodobnost poruchy konstrukce přibližně 10^{-6} za rok. Základním prostředkem používaným v soustavě platných norem pro stanovení spolehlivosti konstrukce je potom index spolehlivosti β odvozený z pravděpodobnosti poruchy konstrukce v závislosti na nejistotách v zatížení, odolnosti konstrukce a použitých modelech. Směrná úroveň spolehlivosti vychází z rozsahu (třídy) následků poruchy dané konstrukce a je definována v ČSN EN 1990:2011 pro zásady navrhování konstrukcí a ČSN ISO 13822:2005 pro hodnocení existujících konstrukcí. Doplňující pokyny pro mosty lze nalézt v TP 224:2010 pro ověřování existujících betonových mostů pozemních komunikací. Podrobný rozbor postupů pro stanovení směrných úrovní spolehlivosti pro existující konstrukce lze nalézt v [2-5]. Index spolehlivosti β pak přímo ovlivňuje hodnotu dílčích součinitelů.

Základní metodou používanou pro ověřování spolehlivosti stavebních konstrukcí je metoda dílčích součinitelů implementovaná v soustavě norem ČSN EN. Předpokládá se, že dílčí součinitele uvažované v této studii se použijí ve vhodné zvolené podmínce spolehlivosti. Příkladem je kombinační pravidlo (6.10a,b) podle ČSN EN 1990; pokud nepůsobí síla od předpětí, rozhoduje méně příznivý z následujících vztahů:

$$R_d \geq E_d = \sum_j \gamma_{G,j} G_{k,j} \text{ "+" } \sum_i \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}; \quad j \geq 1, i \geq 1$$
$$R_d \geq E_d = \sum_j \xi_j \gamma_{G,j} G_{k,j} \text{ "+" } \gamma_{Q,1} Q_{k,1} \text{ "+" } \sum_i \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}; \quad j \geq 1, i > 1 \quad (1)$$

kde R značí odolnost, E účinek zatížení, γ dílčí součinitel, G účinek stálého zatížení, Q účinek proměnného zatížení, ξ redukční součinitel pro nepříznivé účinky stálých zatížení a ψ_0 kombinační součinitel pro proměnná zatížení. Indexy "d" and "k" označují návrhové a charakteristické hodnoty. Symbol "+" znamená "v kombinaci s" a \sum "kombinovaný účinek". Poznamenejme, že příznivé účinky proměnných zatížení se při ověřování spolehlivosti metodou dílčích součinitelů neuvažují.

V závislosti na směrné úrovni spolehlivosti jsou hodnoty dílčích součinitelů zatížení γ_F a součinitelů kombinace ψ specifikovány v ČSN EN 1990, hodnoty dílčích součinitelů materiálů jsou potom uvedeny v jednotlivých návrhových normách pro příslušné stavební materiály ČSN EN 1992 až 1999. Charakteristické hodnoty X_k jsou definovány v ČSN EN 1990 a měly by vycházet ze skutečných materiálových vlastností a účinků zatížení. Jejich odvození je mimo rámec tohoto příspěvku, stanovení charakteristické hodnoty pevnosti betonu u existující konstrukce se popisuje např. v [6]. Hodnoty součinitelů ξ a ψ_0 se převezmou z příslušných norem (např. z ČSN EN 1990).

Je nutné si uvědomit, že hodnoty dílčích součinitelů (zatížení i odolnosti) uvedené v ČSN EN 1990 jsou stanoveny pro nové konstrukce s předpokládanou životností 50 až 100 let (podle typu konstrukce), navíc se středními následky poruchy (CC2). Při posuzování existujících konstrukcí (např. při stanovení zatížitelnosti) je proto vhodné aktualizovat hodnoty všech dílčích součinitelů zaváděných do výpočtu na základě:

- skutečné geometrie mostu,
- skutečných vlastností použitých stavebních materiálů,
- plánované zbytkové životnosti mostu,
- požadované směrné úrovní spolehlivosti.

Aktualizaci hodnot dílčích součinitelů lze provádět podle zásad uvedených v ČSN ISO 13822 a TP 224. ČSN ISO 13822 obsahuje navíc vlastnosti dříve používaných stavebních materiálů pro ověřování existujících konstrukcí. Poznamenejme, že v současné době se připravuje revize ČSN ISO 13822 a vydání zbytkové normy ČSN 73 0038, do které po revizi přejdou národní přílohy z normy ISO. Detailní informace pro hodnocení existujících konstrukcí jsou uvedeny v příručce [7]. Poznamenejme, že příspěvek se zaměřuje ověřování mezních stavů únosnosti. Hodnocení mezních stavů použitelnosti (např. z hlediska šířky trhlin nebo průhybů) je mimo rámec této studie.

3 AKTUALIZACE DÍLČÍCH SOUČINITELŮ

Aktualizací hodnot se pro účely tohoto článku rozumí stanovení hodnot dílčích součinitelů zatížení γ_F a materiálu γ_M s ohledem na skutečný stav, požadovanou zbytkovou životnost mostu a zvolenou směrnou úroveň spolehlivosti. Možnosti aktualizace dílčích součinitelů vycházejí zejména z míry znalosti konstrukce mostu, tedy zejména z rozsahu diagnostického průzkumu nebo prohlídky.

Pokud nejsou o mostu známy žádné podrobnější údaje kromě geometrie (např. z prohlídky mostu) a doby výstavby (např. z BMS), doporučuje se zatížitelnost stanovit kombinovaným statickým výpočtem podle ČSN 73 6222:2013 s hodnotami dílčích součinitelů materiálu a stálých zatížení uvedených v předpisech pro navrhování konstrukcí. Dílčí součinitele proměnných zatížení lze v tomto případě aktualizovat podle požadované nebo předpokládané zbytkové životnosti mostu N (viz další text – předpokládá se, že referenční doba pro hodnocení spolehlivosti se rovná zbytkové životnosti).

Na základě reálného projektu železobetonového mostu s předpokládanou zbytkovou životností $N = 20$ let se dále ukazuje aktualizace hodnot dílčích součinitelů γ pro materiály a zatížení.

3.1 Dílčí součinitele materiálu

Pro materiálové vlastnosti a odolnost konstrukce se obvykle předpokládá dvouparametrické lognormální rozdělení s počátkem v nule (viz ČSN ISO 13822 a TP 224). Pro stanovení dílčího součinitele materiálu se použije vztah:

$$\gamma_M = f_k / f_d = f_k / [\mu_f \exp(-\alpha_R \beta V_R)], \quad (2)$$

kde:

- f_k je charakteristická hodnota odolnosti materiálu (obvykle 5% kvantil) stanovená např. podle článku 4.3 v TP 224: $f_k = \mu_f \exp(-k_n V_f)$,
- μ_f je průměrná hodnota pevnosti materiálu,
- k_n je součinitel pro stanovení požadovaného kvantilu charakteristické odolnosti závislý na počtu zkoušek n – podrobnosti jsou uvedeny v ČSN EN 1990,
- α_R je součinitel citlivosti, pro odolnost materiálů uvažovaný zpravidla hodnotou $\alpha_R = 0,8$ (ČSN EN 1990),
- β je požadovaný směrný index spolehlivosti (např. podle ČSN EN 1990, ČSN ISO 13822 nebo TP 224),
- V_R je variační koeficient odolnosti, který v sobě zahrnuje nejen variační koeficient materiálu V_f , ale i nejistotu v geometrických vlastnostech V_{geo} a nejistotu modelových nejistot V_θ . Výslednou hodnotu V_R lze stanovit např. ze vztahu (TP 224):

$$V_R = \sqrt{(V_f^2 + V_{geo}^2 + V_\theta^2)} \quad (3)$$

Pro stanovení hodnoty dílčího součinitele materiálu lze využít různé způsoby, vždy v závislosti na charakteru a podrobnostech vstupních informací. Obvykle se vychází buď z hodnot normových vlastností materiálu (pevnost, apod.) a ověřených rozměrů mostu, nebo z vlastností materiálů stanovených diagnostickým průzkumem. Tomu odpovídají různé způsoby stanovení dílčích součinitelů materiálu, resp. charakteristických vlastností použitých materiálů a jejich variačních koeficientů vstupujících do vztahů pro jejich stanovení.

Pokud jsou pro stanovení návrhové pevnosti materiálu použity charakteristické hodnoty podle norem, doporučuje se použít variační koeficienty podle tab. 1 převzaté z TP 224. V případě stanovení charakteristik materiálu a geometrie přímým měřením se variační koeficient stanoví klasickými statistickými metodami.

Tab. 1: Informativní hodnoty variačních koeficientů pro stavební materiály existujících konstrukcí podle *TP 224*

Materiál	V_X	V_{geo}	V_θ	V_R
Beton	0,15	0,05	0,05	0,166
Betonářská výztuž	0,05	0,05	0,05	0,087
Konstrukční ocel	0,05	0,01	0,05	0,071

Poznamenáme, že při stanovení dílčího součinitele materiálu pro konstrukční ocel γ_S je potřebné uvážit, že hodnota dílčího součinitele bude obvykle větší než 1,0, tj. než hodnota uváděná v předpisech pro navrhování. To je důsledek materiálových předpokladů přijatých v současné platných ČSN EN pro navrhování ocelových konstrukcí a jejich neplatnosti pro existující konstrukce.

Betonářská a konstrukční ocel

V případě betonářské nebo konstrukční oceli je obvykle třeba aktualizovat součinitel materiálu pro stanovení návrhové meze kluzu γ_S . Pro ilustraci jsou uvedeny dva příklady stanovení dílčího součinitele pro betonářskou výztuž v závislosti na míře znalostí o konstrukci.

a) Materiálové charakteristiky výztuže stanoveny podle ČSN ISO 13822. V příkladu se uvažuje železobetonový trémový most z roku 1940. Je známa poloha hlavní nosné výztuže a její množství. Na základě těchto údajů, tvaru výztuže a ověřovacího výpočtu s využitím předpisů platných v době výstavby mostu se předpokládá třída (kvalita) výztuže C52. Pro tuto výztuž se podle ČSN ISO 13822 uvažuje charakteristická hodnota meze kluzu $f_{yk} = 340$ MPa.

Aktualizovaný součinitel γ_S lze stanovit ze vztahu (4.22) v *TP 224* s využitím upřesněného variačního koeficientu V_R podle tab. 1. Přitom lze s ohledem na realizovaná měření polohy betonářské výztuže a ověření skutečné plochy výztuže předpokládat, že variační koeficient V_{geo} je roven hodnotě 0,025:

$$V_R = \sqrt{(0,05^2 + 0,025^2 + 0,05^2)} = 0,075$$

$$\gamma_S = \exp(-k_n V_{fy}) / \exp(-\alpha_R \beta V_R) = \exp(-1,645 \times 0,05) / \exp(-0,8 \times 3,8 \times 0,075) = 1,16$$

Poznamenáme, že součinitel k_n se uvažuje podle tabulky A.2 *TP 224* pro nekonečný počet vzorků. Důvodem je předpoklad stanovení hodnoty f_{yk} v ČSN ISO 13822 na základě dostatečně širokého statistického souboru.

b) Materiálové charakteristiky výztuže získány měřením. Uvažujme nyní, že v rámci diagnostického průzkumu byly na mostní konstrukci provedeny materiálové zkoušky betonářské výztuže tvrdoměrem s následujícími výsledky (součinitel konverze již uplatněn):

$$f_{yi} = \{370, 391, 402, 396, 409\} \text{ (v MPa); počet měření } n = 5$$

Statistickým vyhodnocením souboru výsledků byly získány charakteristiky uvedené v tab. 2 (při stanovení součinitele $k_n = 2,33$ se uvažuje neznámá směrodatná odchylka σ_X a postupuje se podle tab. A.2 v *TP 224*).

Aktualizovaný součinitel γ_S se potom stanoví ze vztahu (4.21) v *TP 224* s využitím upřesněného variačního koeficientu V_R . Takto stanovený součinitel γ_S se vztahuje k výše uvedené charakteristické hodnotě meze kluzu f_{yk} .

$$V_R = \sqrt{(0,038^2 + 0,025^2 + 0,05^2)} = 0,068$$

$$\gamma_S = f_{yk} / [\mu_{fy} \exp(-\alpha_R \beta V_R)] = 360 / [394 \exp(-0,8 \times 3,8 \times 0,068)] = 1,12$$

Tab. 2: Statistické charakteristiky meze kluzu výztuže

Charakteristika	Symbol	Hodnota	Poznámka
Průměrná hodnota	μ_{fy}	394 MPa	-
Směrodatná odchylka	s_{fy}	14,8 MPa	-
Variační koeficient	V_{fy}	0,038	-
Charakteristická hodnota	f_{yk}	$= \exp(m_Y - k_n s_Y) =$ 360 MPa	kde $m_Y = \Sigma(\ln f_{yi}) / n = 5,975$; $s_Y^2 = \Sigma[(\ln f_{yi} - m_Y)^2] / (n - 1) =$ 0,0381 ²

Tab. 3: Statistické charakteristiky pevnosti betonu v tlaku

Charakteristika	Symbol	Hodnota	Poznámka
Průměrná hodnota	μ_{fc}	35,1 MPa	-
Směrodatná odchylka	s_{fc}	1,58 MPa	-
Variační koeficient	V_{fc}	0,045	-
Charakteristická hodnota	f_{ck}	$= \exp(m_Y - k_n s_Y) =$ 32,3 MPa	kde $m_Y = \Sigma(\ln f_{ci}) / n = 3,557$; $s_Y^2 = \Sigma[(\ln f_{ci} - m_Y)^2] / (n - 1) =$ 0,0440 ²

Beton

Aktualizace součinitele materiálu γ_C je v tomto článku uvedena pouze pro případ vyhodnocení zkoušek materiálu. Pokud by byla známa pouze geometrie konstrukce a materiálové zkoušky by nebyly provedeny, postupuje se obdobně jako v případě a) u betonářské výztuže a vychází $\gamma_C = 1,27$. U existujících monolitických konstrukcích se však doporučuje vždy ověřit pevnost betonu alespoň pomocí nedestruktivních zkoušek.

b) Materiálové charakteristiky betonu získány měřením. V rámci diagnostického průzkumu byly provedeny materiálové zkoušky betonu Schmidovým kladívkem. Kalibrace konverzních součinitelů použité metody byla provedena na základě tří destruktivních zkoušek na válcových vývrtech. Měřením byly získány následující hodnoty pevností:

$$f_{ci} = \{35,5; 35,4; 33,8; 33,9; 33,2; 35,9; 35,0; 34,5; 39,4; 34,3; 34,9; 33,2; 36,9; 35,9; 34,5\} \text{ (v MPa); počet měření } n = 15$$

Statistickým vyhodnocením souboru byly získány charakteristiky uvedené v tab. 3 (při stanovení součinitele $k_n = 1,84$ se uvažuje neznámá směrodatná odchylka σ_X a postupuje se podle Tab. A.2 v TP 224).

Aktualizovaný součinitel γ_C se potom stanoví ze vztahu (4.21) v TP 224 s využitím upřesněného variačního koeficientu V_R . Při jeho stanovení se uvažuje nejistota měření $V_\varepsilon = 0,1$ pro stanovení pevnosti Schmidovým kladívkem a nízká hodnota V_{geo} uvažovaná pro rozměry existující konstrukce stanovené na základě měření.

$$V_R = \sqrt{(0,045^2 + 0,1^2 + 0,025^2 + 0,05^2)} = 0,12$$

$$\gamma_C = f_{ck} / [\mu_{fc} \exp(-\alpha_R \beta V_R)] = 32,3 / [35,1 \exp(-0,8 \times 3,8 \times 0,12)] = 1,32$$

Zdůrazníme, že hodnotu $V_\varepsilon = 0,1$ lze uvažovat pouze pro měření Schmidovým kladívkem kalibrovaná s využitím jádrových vývrťů na sledované konstrukci a pro homogenní betony [8].

Tab. 4: Pravděpodobnostní rozdělení a obvyklé hodnoty variačních součinitelů a součinitelů modelových nejistot pro nejčastější typy zatížení

Druh zatížení	Obvyklé pravděpodobnostní rozdělení	Součinitel citlivosti α_E pro dominantní zatížení	V	γ_{sd}
Vlastní tíha	Normální	-0,7	0,05	1,05
Ostatní stálé			0,10	
Teplota – účinek ročního maxima	Gumbelovo		0,07	1,10

3.2 Dílčí součinitele zatížení

Pro popis zatížení se používají různá pravděpodobnostní rozdělení podle charakteru zatížení (viz např. TP 224). Pro stálá zatížení se zpravidla používá normální rozdělení, pro zatížení proměnná potom rozdělení Gumbelovo nebo Weibullovo (viz např. TP 224). Obvyklá pravděpodobnostní rozdělení pro nejčastější druhy zatížení jsou uvedeny v tab. 4.

Pro stanovení dílčího součinitele zatížení se použije vztah:

$$\gamma_F = F_d / F_k \quad (4)$$

kde:

F_d – je návrhová hodnota zatížení nebo jeho účinku,

F_k – je charakteristická hodnota zatížení nebo jeho účinku.

Pokud jsou při ověření odolnosti konstrukce použity hodnoty zatížení z norem (např. převzaté z návrhových předpisů), doporučuje se použít variační koeficienty podle tab. 4 sestavené na základě TP 224 a dalších podkladových materiálů. V případě stanovení zatížení přímým měřením (např. vlastní tíha materiálů) se variační koeficient stanoví klasickými statistickými metodami. Vliv nejistoty při stanovení účinků zatížení lze zjednodušeně vyjádřit součinitelem modelových nejistot γ_{sd} .

Stálá zatížení

Charakteristickou hodnotu stálého zatížení lze obvykle uvážit jako hodnotu stanovenou na základě průměrné objemové tíhy použitého materiálu a průměrných rozměrů konstrukce, tedy $G_k = \mu_G$. Za předpokladu normálního rozdělení se dílčí součinitel zatížení γ_G stanoví ze vztahu (4.4) v TP 224:

$$\gamma_G = G_d / G_k = 1 - \alpha_E \beta V_G \quad (5)$$

Při stanovení součinitelů pro stálé zatížení je třeba rozlišovat, zda je zatížení stálé dominantní (vztah 6.10a) nebo vedlejší (vztah 6.10b) podle ČSN EN 1990 – viz také vztah (1). V závislosti na tom se pak mohou uvážit rozdílné součinitele citlivosti α_E (viz ČSN EN 1990). Pro zjednodušení se v dalším textu uvažuje vždy $\alpha_E = -0,7$. Odvozený součinitel se pak u vedlejších zatížení přenásobí redukčním součinitelem (ζ u stálých, ψ_0 u proměnných zatížení).

Hodnota variačního koeficientu V_G je závislá na vstupních parametrech a je ji možno stanovit buď odhadem (tab. 4) nebo výpočtem, tedy obdobně jako při stanovení dílčích součinitelů materiálu. Níže uvedené příklady pro stanovení hodnot stálých zatížení jsou zpracovány pouze pro vlastní tíhu nosné konstrukce, v případě ostatního stálého zatížení se postupuje obdobně s uvážením příslušných vstupních údajů podle tab. 4.

Tab. 5: Statistické charakteristiky vlastní tíhy

Charakteristika	Symbol	Hodnota
Průměrná hodnota (= charakteristická)	μ_{gc}	23,0 kN/m ³
Směrodatná odchylka	s_{gc}	0,43 kN/m ³
Variační koeficient	V_{gc}	0,43 / 23,0 = 0,02

a) Geometrie konstrukce známa, objemová tíha stanovena podle ČSN EN 1991-1-1:2004.

Na konstrukci bylo provedeno zaměření geometrie, rozměry se uváží průměrnými hodnotami a objemová hmotnost tabulkovou hodnotou ($g = 25 \text{ kN/m}^3$). Pro výpočet součinitele zatížení vlastní tíhou se uváží variační koeficient objemové tíhy $V_G = 0,05$ vycházející z tab. 4. Součinitele zatížení jsou:

$$\gamma_g = 1 - \alpha_E \beta V_G = 1 - (-0,7) \times 3,8 \times 0,05 = 1,13$$

Při uvážení součinitele modelových nejistot γ_{sd} : $\gamma_G = 1,13 \times 1,05 = 1,19$.

b) Geometrie konstrukce známa, objemová tíha stanovena zkouškami. Objemová hmotnost betonu byla stanovena zkouškami s těmito výsledky:

$$g_{ci} = \{23,5; 23,1; 22,9; 23,2; 23; 22,5; 22,6; 23,6; 22,3; 23,3\} \text{ v kN/m}^3, n = 10$$

Statistickým vyhodnocením souboru výsledků zkoušek byly za předpokladu normálního rozdělení získány charakteristiky uvedené v tab. 5. Součinitele zatížení pro vlastní tíhu jsou:

$$\gamma_g = 1 - \alpha_E \beta V_{gc} = 1 - (-0,7) \times 3,8 \times 0,02 = 1,05$$

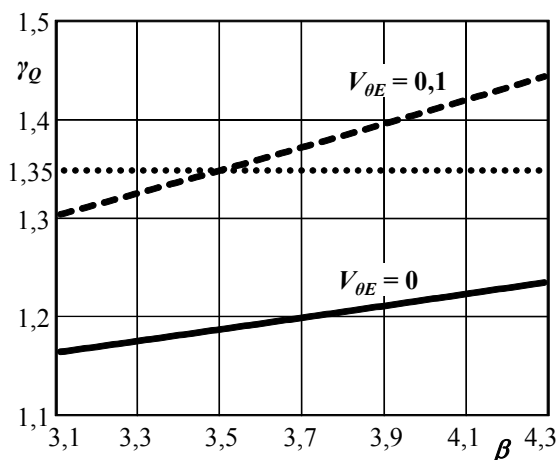
Při uvážení γ_{sd} : $\gamma_G = 1,05 \times 1,05 = 1,10$.

Zatížení dopravou

Charakteristické hodnoty zatížení dopravou stanovuje ČSN 73 6222 jako nominální hodnoty tíhy (zatížitelnosti) vozidel příslušného schématu zatížitelnosti (normální, výhradní, výjimečná) s uvážením vlivu dynamických účinků. Při výpočtu zatížitelnosti se uvažuje, že během zbytkové životnosti mostu může běžně docházet k přejezdu vozidel stanovené tíhy (zatížitelnosti). Oproti schématu zatížení dopravou (LM1) definovaném v ČSN EN 1991-2:2005 (s dobou návratu charakteristického zatížení 1000 let) se tedy jedná o „skutečné“ zatížení, u kterého se očekává doba návratu kratší než referenční doba pro ověření spolehlivosti.

S ohledem na výše uvedené skutečnosti lze konstatovat, že součinitel zatížení dopravou γ_Q závisí zejména na výstížitosti stanovení modelu zatížení a skutečných hmotnostech vozidel pohybujících se na mostě. Protože současné předpisy prozatím neposkytují návod pro stanovení součinitele zatížení dopravou, je použito závěrů článku [9]. V uvedeném článku jsou odvozeny součinitele zatížení pro dobře definovaná zatížení dopravou (zatížení vojenskými vozidly), které lze s jistou mírou obezřetnosti převzít i do výpočtu zatížitelnosti.

Na obr. 1 je uvedena závislost hodnot součinitele zatížení dopravou γ_Q v závislosti na indexu spolehlivosti β pro dobře definovaná zatížení s různými variačními koeficienty modelových nejistot $V_{\theta E}$ a pro variační koeficient dynamického součinitele 0,05 [9]. Důležitým předpokladem odvození je, že povolená hmotnost vozidla nebude na mostě nikdy překročena. Zvláště pro nižší hodnoty zatížitelnosti (zejména $V_n \leq 16 \text{ t}$) lze však očekávat, že tento předpoklad nebude splněn.



Obr. 1: Hodnota součinitele zatížení dopravou γ_Q v závislosti na indexu spolehlivosti β a variačním koeficientu zatížení $V_{\theta E}$ podle [9]

Pro hodnotu součinitele zatížení γ_Q lze tedy bezpečně doporučit hodnoty vycházející z hodnoty $V_{\theta E} = 0,1$. Pro požadovaný index spolehlivosti $\beta = 3,8$ vychází podle obr. 1 hodnota $\gamma_Q = 1,38$, tedy téměř shodná s hodnotou $\gamma_Q = 1,35$ uváděnou v ČSN EN 1990. Zdůrazníme, že při navrhování se dílčí součinitel používá v kombinaci s „bezpečnou“ charakteristickou hodnotou (~1000-letá doba návratu), zatímco při výpočtu zatížitelnosti odpovídá charakteristická hodnota přibližně průměru.

Zatížení teplotou

TP 224 doporučuje pro stanovení účinků teploty využít statisticky vyhodnocené meteorologické údaje. Pokud nejsou k dispozici, uvažují se hodnoty zatížení teplotou podle ČSN EN 1991-1-5:2005. Aktualizace součinitele zatížení teplotou je potom založena na zohlednění požadované doby životnosti mostu, v uvažovaném případě $N = 20$ let.

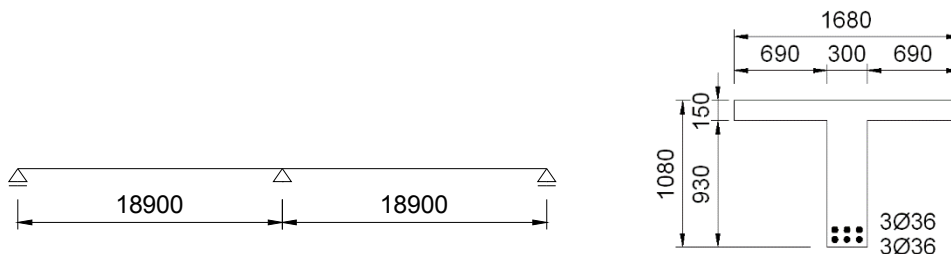
Pro roční maxima zatížení teplotou se zjednodušeně uvažuje Gumbelovo rozdělení, navíc s apriorním poměrem $\mu_T / T_k \approx 0,9$ (viz [10]) a variačním koeficientem $V_T = 0,07$ (viz tab. 4). Aktualizovaný dílčí součinitel γ_T lze potom stanovit na základě vztahu (4.9) v TP 224 (Φ je distribuční funkce normovaného normálního rozdělení):

$$\begin{aligned} \gamma_t = T_d / T_k &= 0,9 T_d / \mu_T = 0,9 \{1 - V_T [0,45 - 0,78 \ln N + 0,78 \ln(-\ln(\Phi(-\alpha_E \beta_t)))]\} = \\ &= 0,9 \{1 - 0,07 [0,45 - 0,78 \ln(20) + 0,78 \ln(-\ln(\Phi(-(-0,7) \times 3,8)))]\} = 1,29 \end{aligned}$$

Při uvážení součinitele γ_{sd} : $\gamma_{sd} = 1,29 \times 1,1 = 1,42$

4 APLIKACE ZÍSKANÝCH VÝSLEDKŮ

Aktualizované součinitele materiálu a zatížení byly využity pro stanovení zatížitelnosti uvažovaného železobetonového trámového mostu o dvou polích s rozpětím $2 \times 18,5$ m (obr. 2). Pro přehlednost jsou výsledky stanovení zatížitelnosti v závislosti na vstupních parametrech uspořádány do tab. 6.



Obr. 2: Schéma konstrukce a příčného řezu, včetně vyztužení

Tab. 6: Porovnání vlivu aktualizace dílčích součinitelů podle míry znalostí o konstrukci

Charakteristika vstupních dat	Dílčí součinitel					Zatížitelnost [t]		
	γ_s	γ_c	γ_G	γ_Q	γ_T	V_n	V_r	V_e
Odolnost i zatížení podle ČSN EN pro navrhování, geometrie podle projektu	1,15	1,50	1,35	1,35	1,5	12	26	97
Upřesnění podle zbytkové životnosti a měření geometrie	1,16	1,27	1,19	1,35*	1,42	16	34	130
Vlastnosti materiálů získány experimentálními zkouškami	1,12	1,32	1,10	1,38	1,42	21	45	169
* Nebylo stanoveno, přejímá se z ČSN EN 1990								
Pozn.: Výsledné zatížitelnosti jsou získány na základě již neplatné ČSN 73 6222:2009, která byla nahrazena ČSN 73 6222:2013. Zásadní změnou mezi předpisy je úprava schémat zatížení pro stanovení výhradní a výjimečné zatížitelnosti. Podle ČSN 73 6222:2013 budou hodnoty výhradní zažitelnosti vyšší, zatímco výjimečná zatížitelnost mírně poklesne.								

Pokud je zatížitelnost mostu nedostatečná, může investor zvážit snížení požadované zbytkové životnosti mostu nebo snížení požadované spolehlivosti (součinitel β). Snížení zbytkové životnosti na $N = 5$ let přitom ovlivní pouze dílčí součinitel pro zatížení teplotou. Pro $N = 5$ dostaneme $\gamma_T = 1,22$ a s uvažáním modelových nejistot potom $\gamma_T = 1,1 \times 1,22 = 1,34$.

Naproti tomu volba nižší požadované spolehlivosti vyjádřené pomocí indexu spolehlivosti β ovlivní hodnoty všech dílčích součinitelů. Pokud například uvažíme $\beta = 3,1$ (pro CC1b, mosty malých rozpětí na silnicích II. a III. tř. podle TP 224), klesnou dílčí součinitele v průměru přibližně o 5 %. To lze považovat za dobrou shodu s doporučeními uvedenými v ČSN EN 1990, která při snížení spolehlivosti o jednu třídu (v našem případě z CC2 na CC1b) doporučuje redukovat součinitele nepříznivě působících zatížení o 10 % a původní hodnoty dílčích součinitelů materiálu ponechat.

5 ZÁVĚR

V článku byly popsány a na příkladech vysvětleny současné možnosti úprav dílčích součinitelů materiálu a zatížení při ověření existujících konstrukcí (výpočtu zatížitelnosti), včetně možností zavedení skutečných vlastností použitých materiálů a geometrie zjištěných diagnostickým průzkumem. Z výsledků aplikace aktualizovaných dílčích součinitelů je patrný významný vliv znalosti vstupních parametrů na hodnoty dílčích součinitelů, a to především u materiálových vlastností a stálých zatížení. Vyšší míra znalostí konstrukce je však vyvážena vyšším rozsahem a cenou diagnostického průzkumu. Tím se ale jen potvrzuje zásadní význam vhodně navrženého, správně provedeného a kompetentně vyhodnoceného diagnostického průzkumu na zatížitelnost

konstrukce. Na základě získaných výsledků lze předpokládat, že náklady investované do diagnostického průzkumu se významně promítnou do stanovené zatížitelnosti mostu.

PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek vznikl v rámci řešení projektu VG20122015089 podporovaného Ministerstvem vnitra ČR a projektu TA03031099 podporovaného Technologickou agenturou ČR.

LITERATURA

- [1] JCSS. *Probabilistic Assessment of Existing Structures*. 1st ed. Joint Committee on Structural Safety, RILEM Publications S.A.R.L., 2001.
- [2] Vrouwenvelder, ACWM, Scholten, N. Assessment Criteria for Existing Structures. *Struct Eng Int*. 2010, roč. 20, s. 62-65.
- [3] Steenbergen, RDJM, Vrouwenvelder, ACWM. Safety philosophy for existing structures and partial factors for traffic loads on bridges. *Heron*. 2010, roč. 55, s. 123-39.
- [4] Holický, M. Optimisation of the target reliability for temporary structures. *Civ Eng Environ Syst*. 2013, roč. 30, s. 87-96.
- [5] Sykora, M, Holicky, M. Target reliability levels for the assessment of existing structures - case study, In *Proc. IALCCE 2012*, Leiden: CRC Press/Balkema, 2012, p. 813-20.
- [6] HOLICKÝ, M., JUNG, K. a SÝKORA, M. Stanovení charakteristické pevnosti konstrukcí z betonu na základě zkoušek. *Stavebnictví*. Brno: EXPO DATA, 2009, roč. 2009, č. 03, s. 53-57. ISSN 1802-2030.
- [7] DIAMANTIDIS, D., HOLICKÝ, M. a další. *Innovative Methods for the Assessment of Existing Structures*. 1. vydání. Praha: ČVUT v Praze, Kloknerův ústav, 2012. s. 148. ISBN 978-80-01-05115-3.
- [8] Breyse, D. Nondestructive evaluation of concrete strength: An historical review and a new perspective by combining NDT methods. *Construction and Building Materials* 2012, roč. 33, s. 139-163.
- [9] Lenner, R., Keuser, M., Sýkora, M. Safety Concept and Partial Factors for Bridge Assessment under Military Loading (in press). *Advances in Military Technology* 2014, ISSN 1802-2308.
- [10] Sýkora M., Holický M., Marková J. Verification of Existing Reinforced Concrete Bridges using a Semi-Probabilistic Approach; In: *Engineering Structures* 56 (November 2013): 1419-1426.

Oponentní posudek vypracoval:

Prof. Ing. Břetislav Teplý, CSc., Ústav stavební mechaniky, Fakulta stavební, VUT v Brně.

Roman Lenner, MSc., Ph.D., Department of Civil Engineering, University of Stellenbosch, South Africa.