

Stavební obzor 2001, to be published

VLIV ALTERNATIVNÍCH POSTUPŮ V EN 1990 NA SPOLEHLIVOST KONSTRUKCÍ

Doc.Ing. Milan Holický, DrSc., PhD., Ing. Jana Marková, PhD.
ČVUT v Praze, Kloknerův ústav

Souhrn

Základní evropská norma pro navrhování stavebních konstrukcí prEN 1990 uvádí alternativní postupy pro stanovení účinku zatížení, o nichž se má rozhodnout v národních přílohách jednotlivých členských zemí CEN. Jednou z důležitých otázek je stanovení základní kombinace zatížení a dílčích součinitelů zatížení pro trvalou i dočasnou návrhovou situaci, pro kterou se v prEN 1990 uvádějí tři alternativní postupy. Příklady železobetonové desky a ocelového táhla naznačují, že postupy doporučené v prEN 1990 vedou k rozdílným úrovním spolehlivosti konstrukcí, které jsou však vyšší než spolehlivost při postupu podle současné ČSN P ENV 1991-1. Ukazuje se, že pro zpracování národní přílohy k prEN 1990 jsou nezbytné další kalibrační studie.

1 Úvod

Nové operativní Eurokódy pro navrhování stavebních konstrukcí budou již od příštího roku postupně nahrazovat předběžné normy ENV. V současnosti jsou již dokončeny dva základní dokumenty prEN 1990 [1] a prEN 1991-1-1 [2] a probíhá transformace dalších norem. Během několika příštích let by tedy měla téměř celá Evropa navrhovat konstrukce podle jednotných metodických předpisů. Nové Eurokódy budou zavedeny s doplňujícími národními přílohami jako platné národní normy (u nás jako normy ČSN EN). Dosud platné předpisy, které jsou v rozporu s dokumenty CEN, se budou postupně měnit nebo rušit. Prostřednictvím národních příloh bude umožněna národní volba numerických hodnot řady ukazatelů spolehlivosti, hodnot některých druhů zatížení a také výběr z alternativních postupů výpočtu. Půjde tedy o závažná rozhodnutí, na která je zapotřebí se dobře připravit.

Proto se v současné době u nás i v dalších evropských zemích CEN zpracovávají podkladové materiály, na jejichž základě bude možno doporučit do národních příloh alternativní postup výpočtu a stanovit ukazatele spolehlivosti. Porovnáním spolehlivosti konstrukcí navržených podle předběžných Eurokódů a kalibrací dílčích součinitelů spolehlivosti se v rozboru [3] zabývají severské země CEN. Na rozbor pak navazuje studie [4] alternativních postupů kombinace zatížení podle prEN 1990 [1].

V současné době uvádí norma prEN 1990 [1] tři alternativní postupy kombinace zatížení pro trvalou i dočasnou návrhovou situaci. První dva postupy jsou převzaty z předběžné normy ENV 1991-1 [5], třetí alternativa je doporučena na základě rozboru [4]. Zjednodušenou kombinaci zatížení pro budovy již norma prEN 1990 [1] neuvádí. V české národní příloze k prEN 1990 [1] bude tedy zapotřebí zvolit vhodný postup kombinace stálých a nahodilých zatížení pro trvalou i dočasnou návrhovou situaci a

ověřit hodnoty dílčích součinitelů spolehlivosti doporučených v [1]. Předmětem tohoto článku, který navazuje na předchozí studie [6 až 9], je ukázat vliv výběru alternativní kombinace zatížení a volby hladiny součinitelů stálých a nahodilých zatížení γ_G a γ_Q na ukazatele spolehlivosti dvou základních konstrukčních prvků, železobetonové desky a ocelového táhla.

2 Základní kombinace zatížení

V následujícím rozboru se uvažuje kombinace zatížení stálého G , užitého Q a větru W . Zatížení větrem se zde předpokládá jako zatížení nedominantní. Konečné znění prEN 1990 [1] uvádí pro základní kombinaci těchto tří zatížení v trvalé i dočasné návrhové situaci tři alternativní postupy:

A. Podle vztahu (6.10) v prEN 1990 [1] se návrhová hodnota E_d účinku zatížení stanoví ze vztahu

$$E_d = \gamma_G G_k + \gamma_Q Q_k + \gamma_W \psi_W W_k \quad (1)$$

B. Podle dvojice rovnic (6.10a) a (6.10b) v prEN 1990 [1] je možno alternativně použít výrazů

$$E_d = \gamma_G G_k + \gamma_Q \psi_Q Q_k + \gamma_W \psi_W W_k \quad (2)$$

$$E_d = \xi \gamma_G G_k + \gamma_Q Q_k + \gamma_W \psi_W W_k \quad (3)$$

Při výpočtu rozhoduje méně příznivý ze vztahů (2) a (3).

C. Alternativní postup se liší od postupu B pouze tím, že se v rovnici (2) uvažuje pouze stálé zatížení a zjednoduší se tedy na tvar

$$E_d = \gamma_G G_k \quad (4)$$

Při výpočtu pak rozhoduje méně příznivý ze vztahů (3) a (4).

Jestliže by byl dominantní vítr W , pak se v rovnicích (1) a (2) zatížení větrem neredukuje a uplatní se redukce užitého zatížení Q součinitelem ψ_Q .

Pro stanovení vlivu nahodilých zatížení na spolehlivost desky a táhla jsou charakteristické hodnoty G_k , Q_k , W_k vyjádřeny prostřednictvím poměru χ nahodilých zatížení $Q_k + W_k$ k celkovému zatížení $G_k + Q_k + W_k$ a poměrem nahodilých zatížení k

$$\chi = (Q_k + W_k) / (G_k + Q_k + W_k), \quad k = W_k / Q_k \quad (5)$$

Pro danou hodnotu účinku návrhových hodnot zatížení E_d lze charakteristické hodnoty zatížení G_k , Q_k , W_k vyjádřit na základě veličin χ a k

$$G_k = \frac{E_d}{(\xi) \gamma_G + \frac{((\psi_Q) \gamma_Q + k(\psi_W) \gamma_W) \chi}{(1+k)(1-\chi)}}, \quad Q_k = \frac{\chi G_k}{(1+k)(1-\chi)}, \quad W_k = k Q_k \quad (6)$$

Veličiny v závorce se v prvním vztahu rovnice (6) uplatňují v souladu s jejich užitím v rovnicích (1) až (4) pro postupy A, B a C.

Při postupu A platí rovnice (1) v celém oboru poměru zatížení χ , $0 \leq \chi \leq 1$, zatímco při postupu B je rovnice (2) rozhodující v části intervalu $0 \leq \chi \leq \chi_{\text{lim,B}}$ a rovnice (3) v intervalu $\chi_{\text{lim,B}} \leq \chi \leq 1$. Hodnota $\chi_{\text{lim,B}}$ vyplývá ze vztahů (2), (3) a (5)

$$\chi_{\text{lim,B}} = \frac{\tilde{\alpha}_G (1 - \xi)(1 + k)}{\tilde{\alpha}_G (1 - \xi)(1 + k) + \tilde{\alpha}_Q (a - \psi_Q) + \tilde{\alpha}_W k(b - \psi_W)} \quad (7)$$

kde pro poměr $k \leq (1 - \psi_Q)/(1 - \psi_W)$ pomocná veličina $a = 1$ a $b = \psi_W$ (zatížení Q dominantní) a pro $k > (1 - \psi_Q)/(1 - \psi_W)$ jsou veličiny $a = \psi_Q$ a $b = 1$ (W dominantní).

Rozbory spolehlivosti konstrukcí navržených postupem C ukazují, že při nižších poměrech zatížení χ jsou výsledné hodnoty indexů spolehlivosti výrazně nižší, než je doporučená hodnota $\beta = 3,8$. Proto se v tomto příspěvku alternativa C neuvažuje, příklad rozboru spolehlivosti železobetonové desky a sloupu navržených postupem C je uvedený v příspěvku [9].

3 Odolnost konstrukčních prvků

Návrhová hodnota R_d odolnosti ohýbané železobetonové desky se uvažuje podle vztahu

$$R_d = A_s f_{yk} / \gamma_s [1 - 0,5 A_s (f_{yk} / \gamma_s) / (\alpha f_{ck} / \gamma_c)] \quad (8)$$

kde A_s je plocha výztuže, f_{yk} a f_{ck} charakteristické pevnosti výztuže a betonu, h výška průřezu, a osová vzdálenost výztuže od tažených vláken, α součinitel dlouhodobých vlivů na pevnost betonu v tlaku, γ_s a γ_c součinitele materiálových vlastností podle ČSN P ENV 1992-1-1 [10], γ_G , γ_Q a γ_W součinitele zatížení G , Q a W . Při návrhu výztuže desky se předpokládají dva poměry zatížení $k_1 = 0$ (působí pouze stálé a užité zatížení) a $k_2 = 1$ (působí všechna zatížení G , Q a W , vítr je nedominantní).

Při rozboru spolehlivosti desky se vychází z podmínky, že odolnost desky R je větší než jsou účinky vnějších sil E

$$K_{R1} A_s f_y (h - a - 0,5 A_s f_y / f_c) > K_{E1} (G + Q + W) \quad (9)$$

kde K_{R1} a K_{E1} jsou součinitele modelových nejistot odolnosti R a účinku zatížení E .

Návrhovou hodnotu R_d odolnosti ocelového táhla o průřezové ploše A lze stanovit jako $R_d = A f_{yk} / \gamma_s$. Součinitel γ_s se uvažuje doporučenou hodnotou 1,1, resp. 1,15 podle ENV 1993-1-1 [11], resp. českého národního aplikačního dokumentu k [11]. Při rozboru spolehlivosti táhla se vychází z podmínky

$$K_{R2} A f_{yk} / \gamma_s > K_{E2} (G + Q + W) \quad (10)$$

Při rozboru spolehlivosti se zjišťuje pravděpodobnost poruchy P_f , že podmínky (9) a (10) nejsou splněny. Místo pravděpodobnosti P_f se však v dalším rozboru uplatňuje běžně používaný index spolehlivosti β definovaný na základě pravděpodobnosti P_f

$$\beta = \Phi^{-1}(1 - P_f) \quad (11)$$

kde Φ je distribuční funkce normálního rozdělení. Doporučená hodnota indexu spolehlivosti $\beta = 3,8$ odpovídá pravděpodobnosti poruchy $P_f = 7,24 \times 10^{-5}$.

4 Modely základních veličin

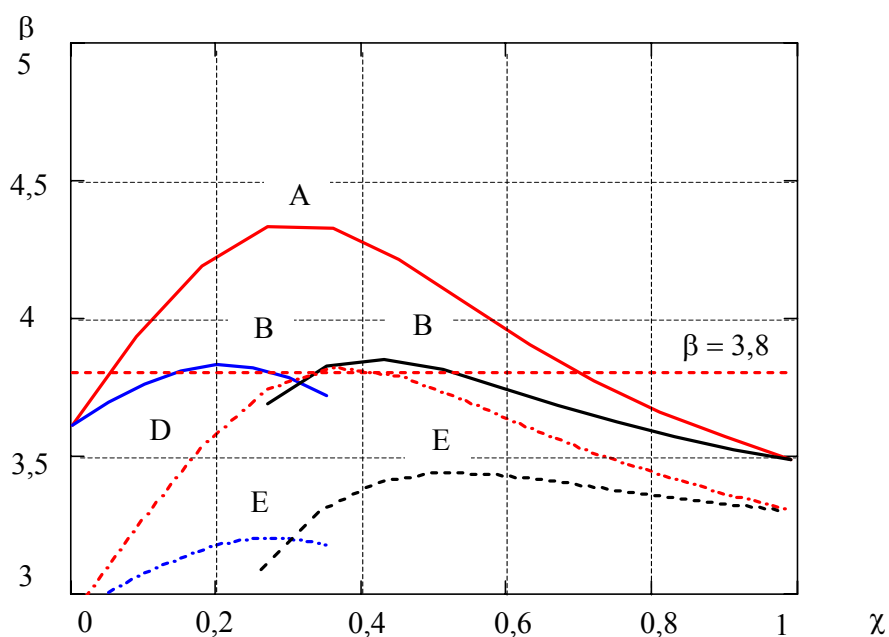
Pravděpodobnostní modely základních veličin jsou souhrnně uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1. Pravděpodobnostní modely základních veličin.

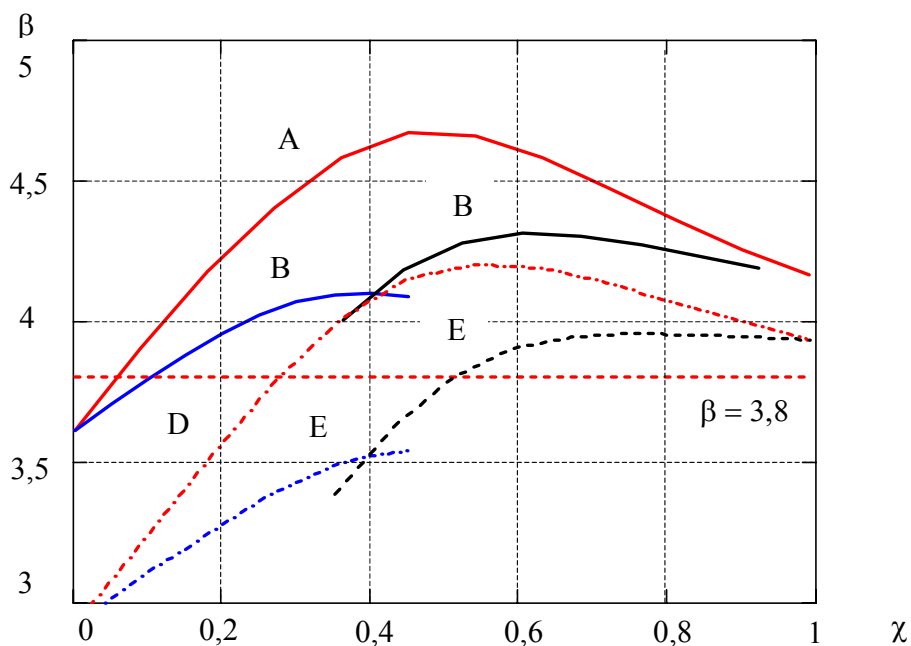
Druh	Značka	Základní veličina	Rozd.	Jedn.	Char. h.	Průměr	S. odch.
Zatížení	G	Stálé zatížení	N	MN/m ²	G_k	G_k	$0,1 G_k$
	Q	Užitné (50 let)	GUM	MN/m ²	Q_k	$0,6 Q_k$	$0,21 Q_k$
	W	Vítr (1 rok)	GUM	MN/m ²	W_k	$0,4 W_k$	$0,2 W_k$
	W	Vítr (50 let)	GUM	MN/m ²	W_k	$0,7 W_k$	$0,245 W_k$
Materiálové vlastnosti	A_s	Plocha výztuže	DET	m ²	nom	nom	0
	f_c	Pevnost betonu	LN	MPa	20	30	5
	f_y	Pevnost výztuže	LN	MPa	435	560	30
	f_{yt}	Pevnost táhla	LN	MPa	235	280	$0,08 \mu_y$
Geometrické údaje	h	Výška desky	N	m	0,2	0,2	0,005
	A	Průř. plocha táhla	N	m	nom	nom	$0,01 \mu_y$
	a	Vzdál. výztuže	GAM	m	0,03	0,03	0,01
Modelové nejistoty	K_{E1}	Nejistoty zatíž. desky	N	-	1,0	1,0	0,05
	K_{E2}	Nejistoty zatíž. táhla	N	-	1,0	1,0	0,10
	K_{R1}	Nejistoty odol. desky	N	-	1,0	1,0	0,10
	K_{R2}	Nejistoty odol. táhla	N	-	1,0	1,1	0,10

5 Výsledky rozboru spolehlivosti

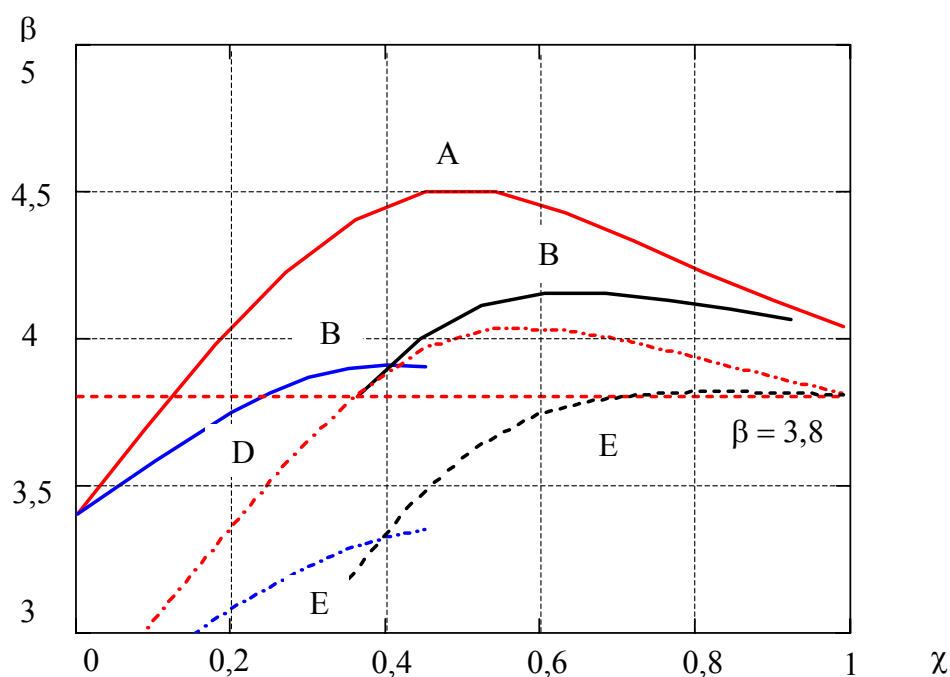
Spolehlivost železobetonové desky a ocelového táhla byla stanovena na základě zjednodušených časově nezávislých modelů zatížení s využitím Turkstrova pravidla (pro užitné zatížení se uvažuje rozdělení extrémních hodnot po dobu předpokládané životnosti 50 let, pro zatížení větrem rozdělení ročních maxim). Výsledky rozboru spolehlivosti vyjádřené prostřednictvím indexu spolehlivosti β (rovnice (11)) jsou zachyceny pro železobetonovou desku na obrázcích 1 až 3, pro ocelové táhlo na obrázcích 4 a 5. Pro oba prvky se uvažují dva poměry zatížení $k_1 = 0$ a $k_2 = 1$, stupeň vyztužení desky ρ hodnotou 0,5, popř. 1. Na obrázcích jsou v závislosti na poměru zatížení χ znázorněny indexy spolehlivosti β pro alternativní postupy A, B a pro doporučené hodnoty dílčích součinitelů $\gamma_G = 1,35$ a $\gamma_Q = 1,5$ podle prEN 1990 [1]. Obrázky dále ukazují alternativu D odpovídající postupu A a alternativu E odpovídající postupu B, jestliže se při návrhu uplatní snížené hodnoty dílčích součinitelů $\gamma_G = 1,2$, $\gamma_Q = 1,4$ podle Změny 1 k ČSN P ENV 1991-1 [5] a zvýšený součinitel pro ocel $\gamma_s = 1,15$.



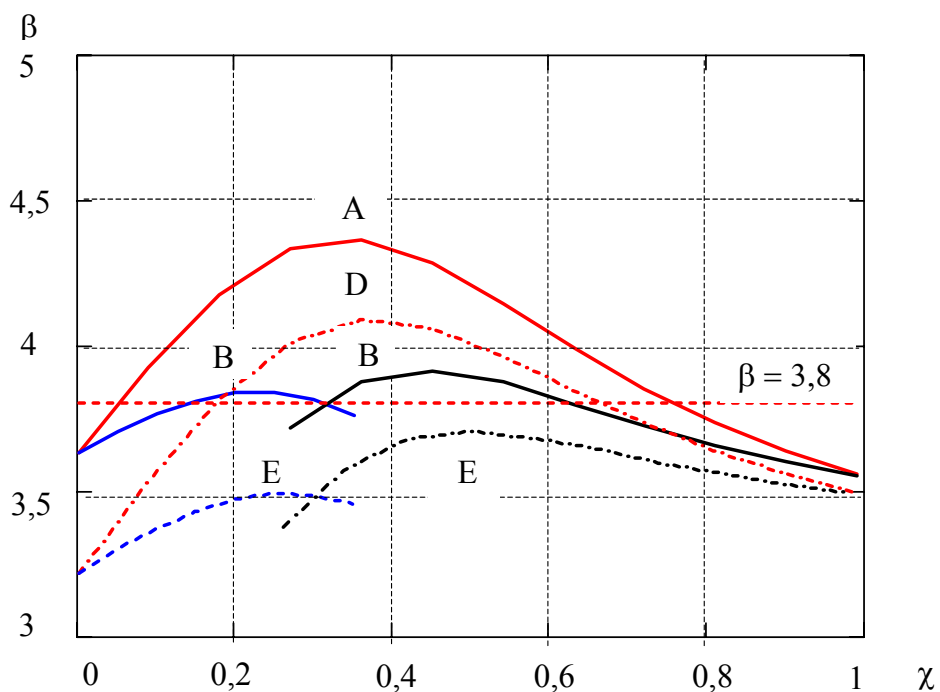
Obrázek 1. Index spolehlivosti β pro desku (stupeň vyztužení $\rho = 1$) vzhledem k poměru zatížení χ a pro poměr $k_1 = 0$; A,B - kombinace podle prEN 1990 [1] ($\gamma_G = 1,35, \gamma_Q = 1,5$), D,E - kombinace podle ČSN P ENV 1991-1 [5] ($\gamma_G = 1,2, \gamma_Q = 1,4$).



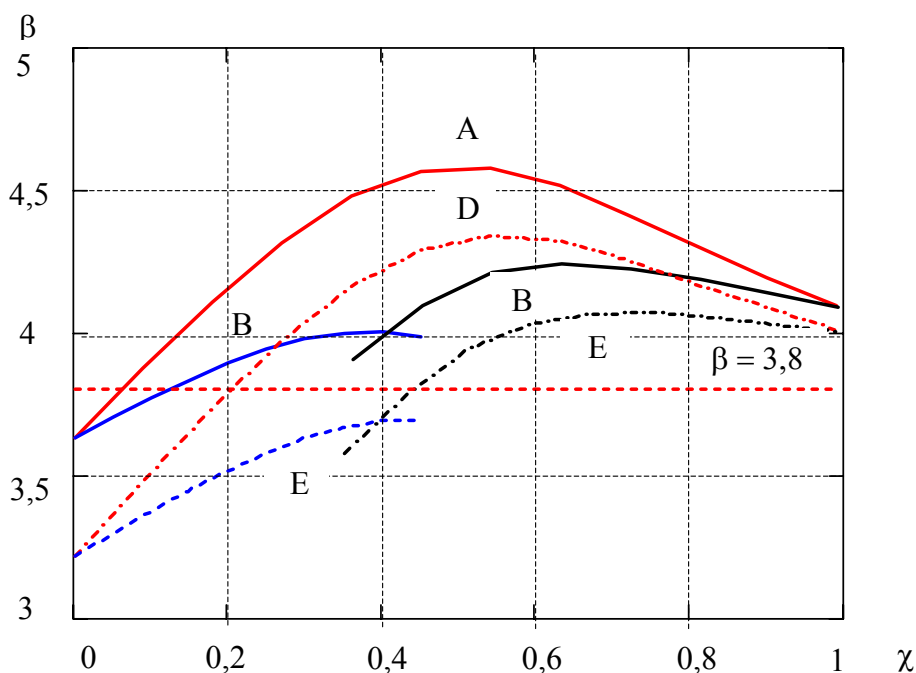
Obrázek 2. Index spolehlivosti β pro desku (stupeň vyztužení $\rho = 1$) vzhledem k poměru zatížení χ a pro poměr $k_2 = 1$; A,B - kombinace podle prEN 1990 [1] ($\gamma_G = 1,35, \gamma_Q = 1,5$), D,E - kombinace podle ČSN P ENV 1991-1 [5] ($\gamma_G = 1,2, \gamma_Q = 1,4$).



Obrázek 3. Index spolehlivosti β pro desku s nižším stupněm vyztužení ($\rho = 0,5$) vzhledem k poměru χ a pro poměr $k_2 = 1$; A,B - kombinace podle prEN 1990 [1] ($\gamma_G = 1,35, \gamma_Q = 1,5$), D,E - kombinace podle ČSN P ENV 1991-1 [5] ($\gamma_G = 1,2, \gamma_Q = 1,4$).



Obrázek 4. Index spolehlivosti β pro ocelové táhlo vzhledem k poměru zatížení χ a pro poměr $k_1 = 0$; A,B - kombinace podle prEN 1990 [1] ($\gamma_G = 1,35, \gamma_Q = 1,5$ a $\gamma_s = 1,1$), D,E - kombinace podle ČSN P ENV 1991-1 [5] ($\gamma_G = 1,2, \gamma_Q = 1,4$ a $\gamma_s = 1,15$).



Obrázek 5. Index spolehlivosti β pro ocelové táhlo vzhledem k poměru zatížení χ a poměr $k_2 = 1$; A,B - kombinace podle prEN 1990 [1] ($\gamma_G = 1,35$, $\gamma_Q = 1,5$ a $\gamma_s = 1,1$), D,E - kombinace podle ČSN P ENV 1991-1 [3] ($\gamma_G = 1,2$, $\gamma_Q = 1,4$ a $\gamma_s = 1,15$).

Spolehlivost desky i táhla ovlivňuje poměr nahodilých a celkových zatížení χ a poměr nahodilých zatížení k , u desky má také vliv stupeň vyztužení. Oba konstrukční prvky navržené podle alternativy A, popř. B mají pro stejné poměry zatížení χ a k téměř shodnou spolehlivost. Ve všech případech je spolehlivost obou prvků navržených postupem A větší než při postupu B. Národně doporučené snížení hodnot dílčích součinitelů zatížení ($\gamma_G = 1,2$, $\gamma_Q = 1,4$) vede však u postupů podle D a E k nepřiměřeně nízkým indexům spolehlivosti β , a to jak pro nízké hodnoty poměru χ (převažující stálá zatížení), tak pro vysoké hodnoty poměru χ (převažující nahodilá zatížení). Je zřejmé, že použití alternativ D a E při návrhu desky i táhla je nevhodné.

Postupem A lze dosáhnout nejvyšší spolehlivosti konstrukčních prvků, v některých případech podstatně vyšší, než je doporučená hodnota 3,8 podle prEN 1990 [1]. Návrh konstrukce postupem A může být tedy v těchto případech neekonomický.

Ukazuje se, že nejvyrovnanější indexy spolehlivosti β pro běžné hodnoty poměru χ (v rozmezí poměru zatížení od 0,1 do 0,6) poskytuje postup B.

6 Závěrečná poznámka

Rozbory spolehlivosti konstrukcí navržených z různých materiálů a kalibrací ukazatelů spolehlivosti v národních normách se nyní nezabývají jen členské země CEN, avšak provádějí se i v dalších mimoevropských státech [12]. Je zřejmé, že zpracování soustavy operativních evropských norem EN, jež se budou používat pro navrhování konstrukcí

téměř v celé Evropě, je velmi složité. Při probíhající transformaci přednorem ENV na operativní evropské předpisy EN se totiž uplatňují národní tradice, nové poznatky a také zájmy jednotlivých členských zemí CEN. Ukazuje se, že si bude moci každá země stanovit národní úroveň spolehlivosti konstrukcí navrhovaných podle Eurokódů prostřednictvím svých národních příloh, a to na základě výběru z alternativních postupů, doporučením hodnot různých druhů zatížení a ukazatelů spolehlivosti. Dosud provedené národní i mezinárodní rozbory však naznačují, že by se hodnoty různých druhů zatížení a ukazatelů spolehlivosti, jež doporučuje nová generace Eurokódů, měly národně měnit teprve po pečlivých rozborech. Nové Eurokódy totiž poskytují v mnoha případech vyšší úroveň spolehlivosti konstrukcí, než národní normy.

Uvedené příklady dvou prvků vyrobených z betonu a oceli potvrzují výsledky předchozích studií [7,8,9], že spolehlivost konstrukcí navržených podle norem EN je vyšší než spolehlivost při návrhu podle stávajících českých norem ČSN i přednorem ČSN P ENV. Očekávaný národní výběr základní kombinace zatížení, dílčích součinitelů a charakteristických hodnot některých druhů zatížení pro trvalou a dočasnou návrhovou situaci může však tuto okolnost změnit. Jde o náročné rozhodnutí, které může mít také širší obchodní a ekonomické důsledky [8]. Proto je třeba dosud provedené rozbory doplnit o další studie spolehlivosti složitějších konstrukčních prvků vyrobených z různých materiálů a získané výsledky porovnat s dostupnými mezinárodními poznatky. Cílem těchto rozborů je připravit potřebné podklady pro zpracování národní přílohy k normě EN 1990 [1], jejíž zavedení do soustavy ČSN EN lze očekávat již v příštím roce.

Literatura

- [1] Final Draft prEN 1990 Eurocode - Basis of Structural Design (Zásady navrhování konstrukcí). Pracovní materiál CEN/TC 250, červenec 2001.
- [2] Final Draft prEN 1991-1-1 Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-1: General Actions - Densities, self-weight, and imposed loads for buildings (Objemové tíhy, vlastní tíhy a užitná zatížení budov). Pracovní materiál CEN/TC 250/SC1, červenec 2001.
- [3] NKB Committee and Work Reports. Basis of Design of Structures. Proposal for modification of partial Safety Factors in Eurocodes. 1999
- [4] Basis of Design of Structures. Proposal for Modification of Partial Safety Factors in Eurocodes, SAKO; Joint Committee of NKB and INSTA-B.
- [5] ČSN P ENV 1991-1. Zásady navrhování a zatížení konstrukcí. Část 1: Zásady navrhování. ČSN, 1996 a Změna 1, 1997.
- [6] Holický M. a Marková J.: Spolehlivost betonových konstrukcí podle ČSN a Eurokódů. Betonářské dny, Pardubice 2000, str. 327 až 332.
- [7] Holický M. a Holická N.: Očekávané důsledky zavádění nových evropských předpisů v České republice. Ocelové konstrukce 3/2000, str. 30 až 32.
- [8] Holický M.: Vliv dílčích součinitelů na spolehlivost ocelového táhla, Stavební obzor, 2/2001.
- [9] Holický M. a Marková J.: Zásady navrhování podle nových evropských předpisů – alternativní postupy v EN 1990, Betonářské dny, Pardubice, 2001.

- [10] ČSN P ENV 1992-1-1 Navrhování betonových konstrukcí Část 1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. ČSNi, 1994.
- [11] ČSN P ENV 1993-1-1 Navrhování ocelových konstrukcí Část 1.1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. ČSNi, 1994.
- [12] Haar T.R. and Retief J.V.: Development of a Methodology for Structural Code Calibration, University of Stellenbosch, 2000.

Uznání. Tato studie vznikla jako součást řešení výzkumného záměru CEZ: J04/98:210000029 "Rizikové inženýrství a spolehlivost technických systémů" podporovaného z prostředků MŠMT.