NAVRHOVÁNÍ NA MEZNÍ STAV PORUŠENÍ PROTLAČENÍM – 2. ČÁST ▮ PUNCHING SHEAR DESIGN – 2ND PART

Jiří Šmejkal, Jaroslav Procházka, Hana Hanzlová

Mezní stav protlačení se posuzuje podle ČSN EN 1992-1-1, kde návrh pro tuto oblast vychází z modelu náhradní příhradoviny. V současné době se často navrhují smykové trny jako smyková výztuž této oblasti, přitom návrh smykových trnů se obvykle provádí podle metodiky DIN 1045-1 a dalších předpisů, které uvažují náhradní příhradovinu odlišně od ČSN EN 1992-1-1. Celý článek byl vzhledem ke své délce rozdělen do dvou částí, které jsou publikovány ve dvou po sobě následujících číslech časopisu. V první části byl prezentován návrh mezního stavu protlačení podle ČSN EN 1992-1-1, ve druhé části článku je provedeno srovnání uvedených metodik a upozorněno na rozdíly v návrhu oblasti. V závěru druhé části je uvedena metodika MC2010 pro návrh desek namáhaných protlačením. ▮ The principles of punching shear design are given in ČSN EN 19922-I-1, where the strut and tie model is used for design of this area. At present, studs are frequently used as punching shear reinforcement. For these studs design the standard DIN 1045-1 is often used, where a different strut and tie model than in ČSN EN 1992-1-1 is used. The whole article was divided in two parts with regard to its length. In the first part, punching shear design according ČSN EN 1992-1-1 was presented, the second part of the article shows the confrontation of these procedures of punching shear design and draws attention to differences in the design of studs as punching shear reinforcement. At the end of the second part of the article, we show the procedure of punching shear according to MC 2010.

ÚNOSNOST V MEZNÍM STAVU PROTLAČENÍ PODLE DIN EN 1992-1-1 [14]

Posouzení únosnosti v protlačení podle EC2 v porovnání s německou národní přílohou (NA) je částečně odlišné. Ve srovnání s ČSN EN 1992-1-1 [1], která respektuje ustanovení EC2, jsou v německé NA (při uvažované vzdálenosti prvního kritického obvodu od líce podpory $2d$) následující odlišnosti:

- omezení obvodu u_o hodnotou $u_o \le 12d$ a poměrem stran obdélníkové styčné plochy $a/b \le 2$, pro větší styčné plochy je nutno obvod rozdělit na dílčí obvody v oblasti rohů styčné plochy (v délce $1{,}5d$ od rohu);
- u základových desek a poddajných patek je možné zjednodušeně uvažovat kontrolovaný obvod ve vzdálenosti $1{,}0d$, pro základy se uvažuje $C_{Rd,c} = 0{,}15/\gamma_c$, u stropních desek se uvažuje standardní hodnota $C_{Rd,c} = 0{,}18/\gamma_c$, přitom u vnitřních sloupů stropních desek lze za určitých podmínek $u_o/d < 4$ hodnotu $C_{Rd,c}$ zvýšit na $C_{Rd,c} = 0{,}18/\gamma_c\ (0{,}1u_o/d + 0{,}6)$;
- procento vyztužení tahovou výztuží v průřezu je navíc omezeno podle vztahu $\rho_l = 0{,}5f_{cd}/f_{yd}$;
- redukovaná posouvající síla podle vztahu 6.48 EC2 [1] se má zvětšit součinitelem excentrického zatížení β s minimální hodnotou $\beta \ge 1{,}0$;
- pokud je v průřezu nutná smyková výztuž A_{sw} podle 6.4.5 [1], potom musí být její plocha v prvních dvou řadách od styčné plochy zvýšena součinitelem $\kappa_{sw,1}$ a $\kappa_{sw,2}$, přitom pro první řadu, která je ve vzdálenosti $0{,}3d$ až $0{,}5d$ od styčné plochy platí $\kappa_{sw,1} = 2{,}5$, pro druhou řadu ($s_r \le 0{,}75d$) platí $\kappa_{sw,2} = 1{,}4$;
- nejdůležitější změna je v omezení maximální únosnosti průřezu na hodnotu danou vztahem $\upsilon_{Ed,u1} \le \upsilon_{Rd,max} = 1{,}4\upsilon_{Rd,c,u1}$.

Obdobně jako německá NA omezuje maximální únosnost průřezu v protlačení i rakouská NA [15], a to hodnotou podle vztahu

$$V_{Rd,max} = \kappa\, \upsilon_{Rd,c}\, u_1\, d\ ,$$

kde κ je součinitel závislý na účinné výšce deskového prvku; $\kappa = 1{,}4$ pro desky s účinnou výškou $d \le 200$ mm a $\kappa = 1{,}6$ pro desky s účinnou výškou $d \ge 700$ mm. Mezilehlé hodnoty lze interpolovat.

MEZNÍ STAV PROTLAČENÍ PODLE DIN 1045-1 [2]

Posouzení únosnosti v protlačení vychází z modelu příhradové analogie na obr. 2b (v první části článku [16]). Jedná se o jednodušší model, než uvažuje metodika EC2. Na rozdíl od ČSN EN 1992-1-1 [1] je základní kontrolovaný průřez veden ve vzdálenosti $1{,}5d$ od líce sloupu, nebo stěny (obr. 13). Vzdálenost $1{,}5d$ vychází ze sklonu smykové trhliny $\beta_r = 33{,}70^o$. Kontrolované průřezy velkých styčných ploch jsou navíc omezeny podle obr. 14 maximálním styčným obvodem $11d$. Dalším rozdílem je posuzování posouvající síly na běžný metr kontrolovaného obvodu, zatímco v EC2 [1] se posuzuje smykové napětí. Předpis DIN 1045-1 [2] uvažuje o 40 % větší únosnost betonu ve smyku v protlačení ve srovnání se smykem u liniového uložení, zatímco EC2 [1] uvažuje v obou případech stejnou únosnost. Vliv okraje desky se uvažuje u smykově nevyztužených oblastí namáhaných na protlačení do vzdálenosti $3d$. Pokud je nutná smyková výztuž, zvětšuje se vliv okraje na vzdálenost $6d$ (obr. 15).

Smyková únosnost v protlačení se posuzuje s přihlédnutím k posouvající síle υ_{Ed} vztažené na 1 m kontrolovaného průřezu a nikoliv s přihlédnutím k napětí υ_{Ed} jako v [1]:

- u desek bez smykové výztuže $\upsilon_{Ed} \le \upsilon_{Rd,ct}$ ve vzdálenosti $1{,}5d$ od styčné plochy,
- u desek se smykovou výztuží:
  - $\upsilon_{Ed} \le \upsilon_{Rd,max}$ posouzení maximální únosnosti betonových diagonál,
  - $\upsilon_{Ed} \le \upsilon_{Rd,sy}$ posouzení v každém kontrolovaném obvodu,
  - $\upsilon_{Ed} \le \upsilon_{Rd,ct,a}$ posouzení v posledním kontrolovaném obvodu, ve kterém již není nutná smyková výztuž,

kde υ_{Ed} je síla od zatížení na 1 m kontrolovaného obvodu u_i, která se stanoví podle vztahu

$$\upsilon_{Ed} \le \beta\, V_{Ed} / u_i\ , \qquad (26)$$

kde β je součinitel vyjadřující vliv excentrického zatížení styčné plochy. Pro ztužený nosný systém s poměrem rozpětí jednotlivých polí v rozsahu $0{,}8 < l_{eff,1} / l_{eff,2} < 1{,}25$ lze použít hodnoty podle obr. 6 [16] s tím, že se od [1] liší pouze hodnota pro vnitřní sloup – platí $\beta = 1{,}05$. Přesnější vyjádření součinitele β lze nalézt v [11].

Maximální únosnost průřezu bez smykové výztuže (při namáhání protlačením) se stanoví podle vztahu

$$\upsilon_{Rd,ct} = [0{,}14\eta\, \kappa\, (100\, \rho_l\, f_{ck})^{1/3} - 0{,}12\sigma_{cd}]d \qquad (27)$$

kde $\eta = 1$ pro běžné betony do třídy C50/60, σ_{cd} je průměrné normálové napětí v průřezu ($\sigma_{cd} \le 0{,}0$ MPa pro tlak), d průměrná účinná výška průřezu [m], $d = \dfrac{d_x + d_y}{2}$, κ vyjadřuje vliv výšky průřezu $\kappa = 1 + \sqrt{200/d} \le 2{,}0$ (d [mm]), ρ_l stupeň vyztužení podélnou výztuží, $\rho_l = \sqrt{\rho_{ly}\ \rho_{lz}} \le 0{,}5f_{cd}/f_{yd}$,

resp. ≤ 0,02, ρ_{ly} ρ_{lz} se vztahují k tahové výztuži ve směrech *y* a *z* dostatečně zakotvené za posuzovaným kontrolovaným obvodem, šířka desky se ve výpočtu uvažuje rovná tloušťce sloupu plus 3*d* po každé straně sloupu; σ_{cp} normálové napětí v betonu v kritickém průřezu $\sigma_{cp} = (\sigma_{cy} + \sigma_{cz})/2$ a σ_{cy}, σ_{cz} jsou normálová napětí v kritickém průřezu ve směru os *y* a *z* ($\sigma_{cd} \le 0$ pro tlak);

$$\sigma_{cy} = \frac{N_{Ed,y}}{A_{cy}} \text{ a } \sigma_{cz} = \frac{N_{Ed,z}}{A_{cz}} .$$

Maximální únosnost v kontrolovaném obvodu u_o (v líci styčné plochy) je definována vztahem

$$\upsilon_{Rd,max} = 1{,}5\ \upsilon_{Rd,ct} \text{ [kN/m]} . \quad (28)$$

Posouzení smykové výztuže v prvním kontrolovaném obvodu u_1

V první řadě svislé smykové výztuže ve vzdálenosti 0,5*d* od líce styčné plochy se stanoví únosnost podle vztahu

$$\upsilon_{Rd,sy} = \upsilon_{Rd,ct} + \frac{\kappa_s A_{sw} f_{yd}}{u_1} , \quad (29)$$

kde κ_s je součinitel vyjadřující vliv účinné výšky průřezu na spolupůsobení smykové výztuže

$$\kappa_s = 0{,}7 + 0{,}3\,\frac{d - 400}{400} \ge 0{,}7 \quad resp. \ge 1{,}0 , \quad (30)$$

kde *d* se dosazuje v mm, A_{sw} je celková plocha smykové výztuže ve sledované řadě a u_1 délka prvního kontrolovaného obvodu ve vzdálenosti 0,5*d* od líce styčné plochy.

Staticky nutná smyková výztuž v prvním obvodu u_1 se stanoví podle vztahu:

$$\min A_{sw} = (\upsilon_{Rd,sy} - \upsilon_{Rd,ct})\,\frac{u_1}{\kappa_s f_{yd}}$$

V následujících krocích se stanoví vždy kontrolovaný obvod u_n ve vzdálenosti od líce styčné plochy $(0{,}5 + (n - 1)\ 0{,}75)d$. Předpokládá se, že smyková výztuž je v radiálním směru umístěna ve vzdálenostech 0,75*d*. Pro menší vzdálenosti smykové výztuže se musí upravit vzdálenosti kontrolovaných obvodů od líce styčné plochy. Pro všechny tyto obvody se stanoví únosnost podle vztahu

$$\upsilon_{Rd,sy} = \upsilon_{Rd,ct} + \frac{\kappa_s A_{sw} f_{yd}\, d}{u_n s_w} . \quad (31)$$

Pro šikmé pruty se sklonem v rozsahu $45° \le \alpha \le 60°$ platí únosnost v průřezu ve vzdálenosti 0,5*d* od kraje styčné plochy podle vztahu

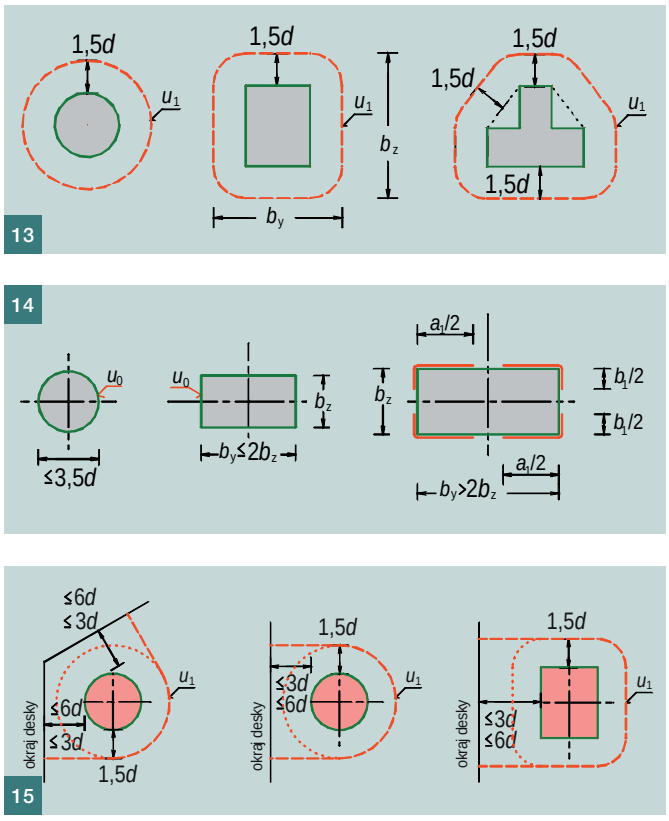
$$\upsilon_{Rd,sy} = \upsilon_{Rd,ct} + \frac{1{,}3 A_s \sin\alpha\, f_{yd}}{u} . \quad (32)$$

Pokud jsou navrženy pouze ohyby jako smyková výztuž, musí být šikmá část ohybu umístěna ve vzdálenosti do 1,5*d* od líce styčné plochy. Ohyby mohou být započteny do smykové výztuže, pokud šikmá část ohybu nezačíná dále než 0,25*d* od styčné plochy.

Pro posouzení v posledním kontrolovaném obvodu u_{out}, ležícím ve vzdálenosti maximálně 1,5*d* od poslední řady smykové výztuže platí vztah

$$\upsilon_{Rd,ct,a} = \kappa_a\ \upsilon_{Rd,ct} , \quad (33)$$

kde κ_a je součinitel přechodu smykové únosnosti desek oblasti protlačení do oblasti normálního smykového namáhání desky (např. u liniového podepření), který se uvažuje hodnotou $\kappa_a = 1 - \frac{0{,}29\, l_w}{3{,}5\, d} \ge 0{,}714$ a l_w je délka smykově vyztužené oblasti (od líce styčné plochy k poslední řadě smykové výztuže).



Obr. 13 První kontrolovaný průřez podle DIN 1045-1 ▮ Fig. 13 First monitored perimeter according to DIN 1045-1

Obr. 14 Omezení délky kontrolovaného průřezu u velkých styčných ploch ▮ Fig. 14 Limitation of controlled perimeter length in case of large contact area

Obr. 15 Vliv okraje stropní desky podle DIN 1045-1 (≤ 3*d* platí pro smykově nevyztužené oblasti a hodnota ≤ 6*d* platí pro smykově vyztužené oblasti) ▮ Fig. 15 Influence of slab edge according to DIN 1045-1 (≤ 3*d* is valid for areas without shear reinforcement and value ≤ 6*d* is valid for areas with shear reinforcement)

V konstrukčních zásadách je definován maximální průřez smykové výztuže podle vztahu

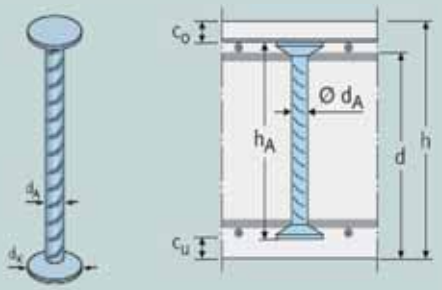
- pro svislou výztuž $d_s \le 0{,}05\ d$,
- pro ohyby $d_s \le 0{,}08\ d$.

Po stanovení staticky nutné smykové výztuže se musí kontrolovat zásady konstrukčního uspořádání smykové výztuže a překontrolovat minimální plocha smykové výztuže. Při návrhu stropní desky je nutné překontrolovat také konstrukční zásady pro tahovou výztuž (minimální množství a dostatečné zakotvení za posledním kontrolovaným obvodem) a výztuž proti havárii konstrukce. Minimálně musí být dvě řady svislé smykové výztuže. Pokud by postačovala jedna řada svislé smykové výztuže, je nutné konstrukčně doplnit druhou řadu s minimálním množstvím smykové výztuže.

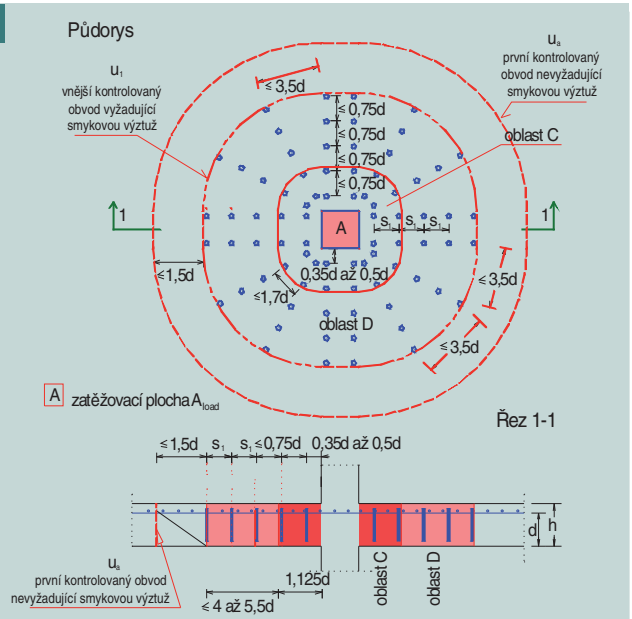
ÚNOSNOST SMYKOVÝCH TRNŮ V MEZNÍM STAVU PROTLAČENÍ

Posouzení smykových trnů (obr. 16, 19 a 20) vychází z předpisu DIN 1045-1 [2], které se liší oproti EC2 [1] v některých vztazích.

16



17



Tab. 3 Stanovení součinitele β (β_{red}) vlivu excentrického zatížení ▮
Tab. 3 Values of coefficient β (β_{red}) of influence of eccentric load

Součinitel	Vnitřní sloupy	Sloupy v rohu	Sloupy u kraje
β	1,05	$1{,}17 \cdot \sqrt[5]{1+\left(\frac{e}{1{,}09c}\right)^5}\left(\frac{c_x}{c_y}\right)^{0{,}15\cdot e/c}$	$1{,}17 \cdot \sqrt[5]{1+\left(\frac{e}{1{,}25c}\right)^5}\left(\frac{c_x}{c_y}\right)^{0{,}15\cdot e/c}$
β_{red}	1,05	$\frac{1{,}17\beta}{1+0{,}2 l_s / d} \geq 1{,}0$	$\frac{1{,}17\beta}{1+0{,}15 l_s / d} \geq 1{,}0$

l_s je délka smykově vyztužené oblasti
e excentricita působící síly – pro jednoosé ohybové namáhání $e = M_{Ed} / V_{Ed}$
pro dvouosé ohybové namáhání $e = \sqrt{(M_{Ed,x}^2 + M_{Ed,y}^2)} / V_{ED}$
M_{Ed} ($M_{Ed,x}$, $M_{Ed,y}$) je výsledný ohybový moment ve vetknutí sloupu do desky
c_x délka styčné plochy kolmo k okraji desky u krajního sloupu a u rohového sloupu se uvažuje větší z rozměrů styčné plochy
c_y délka styčné plochy rovnoběžná s okrajem desky u krajního sloupu a u rohového sloupu se uvažuje menší z rozměrů styčné plochy
c pro čtvercové styčné plochy $c = c_x$, pro obdélníkové styčné plochy
$c = \sqrt{0{,}5(c_x^2 + c_y^2)}$, pro kruhové sloupy u okraje nebo v rohu desky $c = 0{,}9 l_c$
(l_c je průměr sloupu)
β_{red} součinitel zvýšení zatížení pro poslední kontrolovaný obvod

Obr. 16 Typický smykový trn ▮ Fig. 16 Typical shear stud

Obr. 17 Půdorysné uspořádání oblastí C a D a schéma umístění smykových trnů; m je počet radiálních paprsků s trny; (pro vnitřní sloupy je $m \geq 8$); n je počet trnů v radiálním směru do vzdálenosti d ▮
Fig. 17 Layout of area C and D and scheme of arrangement of shear studs; m is number of radial line with studs; (for inner columns is $m \geq 8$); n is number of studs in radial direction to the distance d

Posouzení smykových trnů se často provádí podle stavebně technického osvědčení příslušného k danému typu smykového trnu (obvykle podle výrobce smykového trnu) – např. [5]. Všechna stavebně technická osvědčení pro použití smykových trnů mají stejnou metodiku návrhu i stejné konstrukční zásady. Oblast deskového prvku namáhaná protlačením je rozdělena do dvou oblastí C a D. Oblast C je do vzdálenosti 1d (někdy se uvádí 1,125d) od líce styčné plochy. Oblast D navazuje na oblast C a představuje zbývající smykově vyztuženou oblast desky (její maximální délka je 4d, obr. 17). Označení oblasti C a D vychází z předcházejícího předpisu pro protlačení uvedeného v normě DIN 1045 (1988), která připouštěla pouze smykově vyztuženou oblast C, oblast D byla rozšířením pouze pro smykové trny. Oblast C nepředstavuje oblast ohraničenou poruchovou trhlinou v taženém líci deskového prvku jako u současně platných předpisů EC2 [1] a DIN 1045-1 [2]. Proto lze do oblasti C zahrnout i smykové trny, které leží přímo na hranici oblasti C (smyková výztuž, která leží v blízkosti kontrolovaného obvodu, se nemůže zahrnout do posouzení daného obvodu, protože ji nelze dostatečně účinně zakotvit na obou stranách poruchové smykové plochy – viz [16]). Největším rozdílem oproti DIN 1045-1 a EC2 je, že v oblasti C se neuvažuje se spolupůsobením betonu na přenášení smyku. Při návrhu smykových trnů podle [5] se neuvažuje s normálovým napětím σ_{cd} ve vztahu (27). Návrh smykových trnů podle [5] je platný pro betony třídy C20/25 až C50/60 při minimální tloušťce deskového prvku 180 mm. Vliv okraje se uvažuje obdobně jako v EC2 [1] (obr. 8), [16].

Při posouzení únosnosti průřezu bez smykové výztuže se postupuje podle stejných vztahů jako u předpisu DIN 1045-1 [2]. Na rozdíl od [2] lze upřesnit součinitel β zvýšení zatížení vlivem excentricity podle tab. 3.

Únosnost v mezním stavu protlačení v oblasti C je dána vztahem

$$V_{Rd,sy} = \sum A_{sw} \frac{f_{yd}}{\eta} = m_c\, n_c\, A_{si} \frac{f_{yd}}{\eta} , \qquad (34)$$

kde m_c je počet smykových trnů v oblasti C – jedná se o počet radiálních paprsků; n_c počet smykových trnů v radiálním směru v oblasti C; A_{si} jmenovitá průřezová plocha smykového trnu, η součinitel vlivu tloušťky desky, η = 1,0 pro $d \leq$ 200 mm a η = 1,6 pro $d \geq$ 800 mm (mezilehlé hodnoty lze interpolovat).

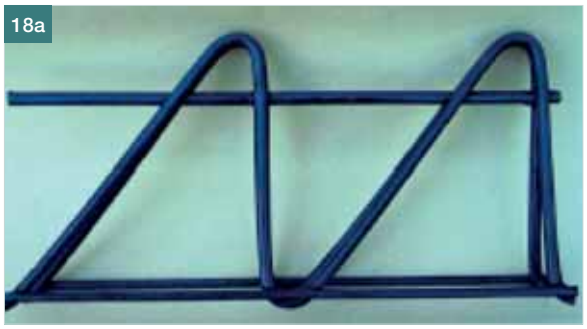
V posledním kontrolovaném obvodu – v obvodu nevyžadujícím smykovou výztuž ve vzdálenosti 1,5d od poslední smykové výztuže (hranice D oblasti) je nutné posoudit únosnost na rozdíl od [2] podle vztahu

$$\beta_{red}\, V_{Ed} = V_{Rd,ct,a} = \kappa_a\, V_{Rd,ct}\, u_a , \qquad (35)$$

kde κ_a je upravený součinitel přechodu smyku v protlačení na smyk v desce podle vztahu $\kappa_a = \frac{1}{1+0{,}1 l_s / d} \geq 0{,}71$ (význam proměnných viz předchozí vztahy), u_a je první kontrolovaný obvod nevyžadující smykovou výztuž (obr. 17).

Dále se liší od metodiky [2] maximální únosnost v protlačení, protože smykové trny lze lépe zakotvit. Maximální únosnost je oproti [2] zvýšena podle výrazu:

$$v_{Rd,max} = 1{,}9\, v_{Rd,ct} . \qquad (36)$$


18a

18b

18c

Při návrhu smykových trnů jako smykové výztuže na protlačení je nutné dodržet následující konstrukční zásady:

- v celé smykově vyztužené oblasti (tedy v obou oblastech C a D) musí být smykové trny jednoho průměru (především z důvodu možné chyby při realizaci),
- první smykový trn má být umístěn ve vzdálenosti 0,35*d* až 0,5*d* od líce styčné plochy,
- minimálně se musí navrhnout v radiálním směru dva smykové trny ve vzdálenosti ≤ 0,75*d*,
- tangenciální vzdálenost mezi smykovými trny na hranici oblasti C musí být ≤ 1,7*d*,
- maximální vzdálenost v tangenciálním směru u vnější řady smykových trnů je ≤ 3,5*d*.

Pokud se navrhují smykové trny jako smyková výztuž na protlačení, pro spřažené stropní desky je nutné navíc k výše uvedenému postupu posoudit smyk v pracovní spáře mezi prefabrikátem a monolitickou částí konstrukce. Posouzení se provádí standardním způsobem podle DIN 1045-1 [2] nebo EC2 [1]. Při posouzení je doporučené uvažovat vodorovnou pracovní spáru s hladkým povrchem.

Obr. 18 a) Speciální příhradová výztuž pro smykovou výztuž při protlačení, b) příklad použití speciální příhradové výztuže jako smykové výztuže při protlačení, c) příklad použití smykových trnů HDB ve stropní desce ▮ Fig 18 a) Special framework for punching shear reinforcement, b) example of using special framework as punching reinforcement, c) example of using shear studs HDB in slab

Obr. 19 Výsledky typové zkoušky smykových trnů HDB ▮ Fig. 19 Results of shear studs HDB type experiment

Obr. 20 Příklad aplikace smykových trnů HDB ▮ Fig. 20 Example of shear stud HDB application

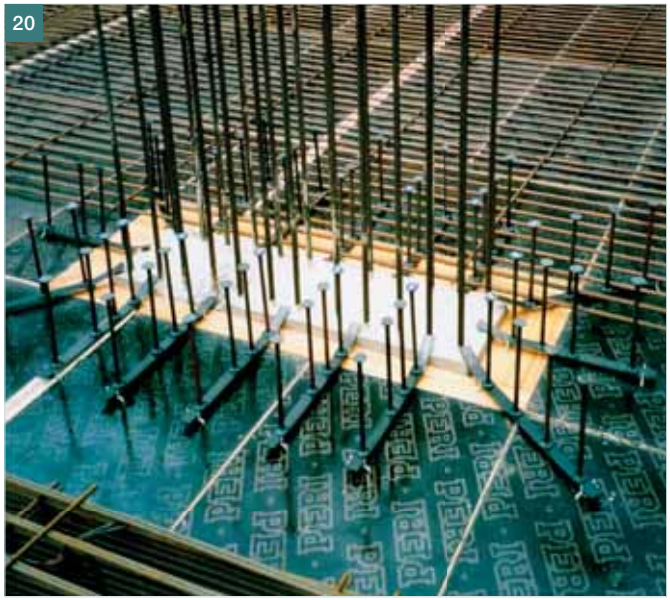
19

ÚNOSNOST PŘÍHRADOVÉ VÝZTUŽE V MEZNÍM STAVU PROTLAČENÍ

Jako smykovou výztuž na mezní stav protlačení lze použít i příhradovou výztuž vyrobenou v souladu s [10]. Jedná se o příhradovou výztuž se skloněnými diagonálami o průměru 9 mm, dolní pas příhradové výztuže tvoří dva pruty o průměru 7 mm a horní pas prut o průměru 10 mm (betonářská výztuž BSt 500G) (obr. 18). Posouzení speciální příhradové výztuže vychází z metodiky uvedené v [5] a doplněné pro použití příhradové výztuže. Příhradová výztuž navržená pro oblast C musí procházet celou oblastí D. V obou oblastech, C a D, se uvažuje s tím, že veškeré namáhání přenáší pouze smyková výztuž. Diagonály příhradové výztuže jsou svislé a skloněné, do výpočtu v radiálním směru lze započítat jak svislé (A_{si}), tak i skloněné diagonály ($\sin\alpha\, A_{si}$). V tangenciálním směru lze započítat pouze svislé diagonály.

Posouzení únosnosti v mezním stavu protlačení:

- v oblasti C: $\beta\, \upsilon_{Ed} \le \upsilon_{Rd,sy} = f_{yd}\, A_{sy}/l$ (A_{sy} je celková plocha všech započitatelných diagonál na 1 m délky kontrolovaného obvodu),
- v oblasti D: $0{,}5\, \beta\, \upsilon_{Ed} \le \upsilon_{Rd,sy} = f_{yd}\, A_{sy}/l$.


20

Důležité je konstrukční uspořádání speciální příhradové výztuže:

- v radiálním i tangenciálním směru musí být první osa speciální prostorové výztuže ve vzdálenosti 0,35*d*;
- v oblasti C je maximální osová vzdálenost příhradové výztuže v radiálním směru 0,5*d*;
- v oblasti D je maximální osová vzdálenost příhradové výztuže v radiálním směru 0,75*d* nejvýše však 150 mm;
- v oblasti C je maximální osová vzdálenost příhradové výztuže v tangenciálním směru 1,7*d*;
- v oblasti D je maximální osová vzdálenost příhradové výztuže v tangenciálním směru 3,5*d*.

Prvek příhradové výztuže musí mít minimálně dva svislé diagonální prvky.

Maximální únosnost v protlačení při použití speciální příhradové smykové výztuže je:

$$\upsilon_{Rd,max} = 1{,}7\ \upsilon_{Rd,ct}\ . \qquad (37)$$

ÚNOSNOST V MEZNÍM STAVU PROTLAČENÍ PODLE MC 2010 [4]

Podle metodiky Model Code 2010 je kontrolovaný obvod b_1 ve vzdálenosti $0{,}5d_v$ (d_v je průměrná účinná výška deskového prvku) (obr. 21). Pro rohy a konce stěn se uvažuje délka oblasti $1{,}5d_v$ (obr. 22).

Při posouzení protlačení musí být splněna podmínka pro posouvající síly (na rozdíl od předchozích předpisů nikoliv napětí jako v [1] nebo síly vztažené na 1 m kontrolovaného obvodu jako v [2])

$$V_{Ed} \le V_{Rd}, \qquad (38)$$

kde V_{Ed} je návrhová posouvající síla vypočtená jakou součet všech návrhových posouvajících sil působících v základním kontrolovaném obvodu podle obr. 21. Zatěžovací účinky se stanoví stejně jako podle ČSN EN 1990 a navazujících norem.

Na rozdíl od návrhového postupu EC2 a DIN 1045-1, kde se vlivem excentricity zatížení zvětšuje součinitelem β zatěžující síla V_{Ed}, u návrhu podle MC 2010 se vlivem excentrického zatížení redukuje délka kontrolovaného obvodu součinitelem k_e. Součinitel k_e zohledňuje část ohybového momentu přenášeného z desky do sloupu smykem. Pro ztužené nosné systémy s pravidelným půdorysem (sousední rozpětí se neliší více než 25 % kratšího rozpětí) lze použít součinitel k_e z tab. 4. Přesněji lze součinitel k_e vyjádřit podle vztahu

$$k_e = \frac{1}{1+e/b}\ , \qquad (39)$$

kde $e = |M_{Ed}/V_{Ed}|$ je excentricita působící síly, b průměr kruhu o stejné ploše jako styčná plocha.

Oblast protlačení je ovlivněna prostupy do vzdálenosti $5d_v$ od líce styčné plochy (obr. 23). Pokud je styčná plocha velká ve srovnání s účinnou výškou deskového prvku (obr. 22), uvažuje se kontrolovaný obvod pouze v délce $3d_v$ kolem každého rohu styčné plochy. Délka kontrolovaného obvodu se redukuje o část ovlivněnou prostupy.

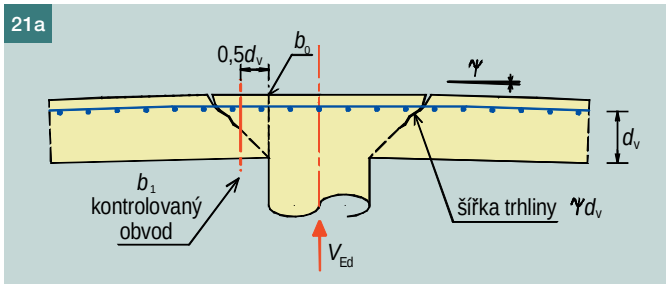
Únosnost v protlačení je definována rovnicí (40)

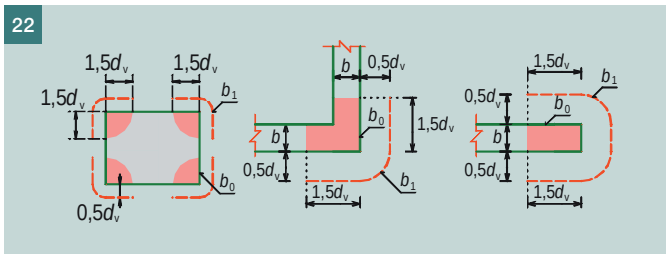
$$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,s}\ , \qquad (40)$$

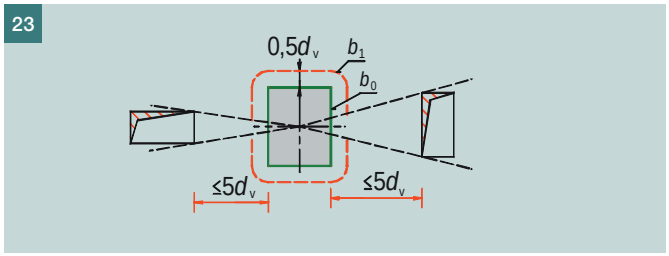
kde $V_{Rd,c}$ je smyková únosnost betonu, která se stanoví podle vztahu:

$$V_{Rd,c} = k_\psi \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} b_0\, d_v\ , \qquad (41)$$

kde f_{ck} je cylindrická pevnost betonu v tlaku [MPa]; k_ψ součinitel závisející na deformační kapacitě (pootočení) deskového prvku v oblasti styčné plochy, součinitel lze stanovit podle vztahu (42). Součinitel v sobě zahrnuje rozměrový efekt a vliv vyztužení průřezu tahovou výztuží.







Tab. 4 Součinitel k_e vlivu excentrického zatížení styčné plochy ▮ Tab. 4 Coefficient k_e of influence of eccentric loaded area

Součinitel k_e	Umístění sloupu
0,90	Vnitřní sloup
0,70	Sloup u okraje
0,65	Sloup v rohu desky

Obr. 21 První kontrolovaný obvod b_1 podle MC2010, a) řez, b) půdorys ▮ Fig. 21 First monitored perimeter b_1 according to MC2010, a) cross section, b) plain view

Obr. 22 Omezení délky kontrolovaného obvodu u velké styčné plochy nebo u konce a rohu stěny podle MC2010 ▮ Fig. 22 Limitation of monitored perimeter at large contact area or at the end and edge of the wall according to MC2010

Obr. 23 Zmenšení délky kontrolovaného obvodu vlivem prostupů v blízkosti styčné plochy podle MC2010 ▮ Fig. 23 Reduction of monitored perimeter owing to holes near the contact area according to M2010

$$k_\psi = \frac{1}{1{,}5 + 0{,}6\psi\, d_v\, k_{dg}} \le 0{,}6\ , \qquad (42)$$

kde k_{dg} je součinitel velikosti maximálního zrna kameniva, $k_{dg} = 48/(16 + d_g) \ge 1{,}15$ (d_g je velikost zrna kameniva [mm]), ψ úhel natočení deskového prvku v oblasti styčné plochy vně poruchové smykové plochy (obr. 21a); b_o délka základního kontrolovaného obvodu podle obr. 21 včetně redukce vlivu excentrického zatížení k_e a vlivu blízkých prostupů; d_v průměrná účinná výška deskového prvku – ve vztahu (42) dosazujeme výšku [mm]; $V_{Rd,s}$ únosnost smykové výztuže, která se stanoví podle vztahu:

$$V_{Rd,s} = \Sigma A_{sw}\, k_e\, \sigma_{sd}\, \sin\alpha\ , \qquad (43)$$

kde ΣA_{sw} je celková plocha smykové výztuže dostatečně zakotvené, která prochází potenciální poruchovou plochou (kuželová plocha pod úhlem 45°) v oblasti ohraničené vzdáleností od $0{,}35d_v$ až po d_v od líce styčné plochy; α úhel mezi smykovou výztuží a rovinou deskového prvku; σ_{sd} napětí ve smykové výztuži, které lze uvažovat podle vzorce:

$$\sigma_{sd} = \frac{E_s \psi}{6} \le f_{ywd}\ , \qquad (44)$$

f_{ywd} je návrhová pevnost smykové výztuže a E_s modul pružnosti smykové výztuže.

Pro stanovení natočení deskového prvku za poruchovou trhlinou lze v MC2010 [4] použít čtyři základní úrovně přesnosti výpočtu:

Úroveň I – pro pravidelné desky navržené pomocí lineárně pružné analýzy bez významné redistribuce vnitřních sil (např. metodou náhradních rámů):

$$\psi = 1{,}5\, \frac{r_s}{d_v}\, \frac{f_{yd}}{E_s}\ , \qquad (45)$$

kde r_s je vzdálenost místa nulového momentu v radiálním směru od osy sloupu (obr. 1) [1]. Hodnotu r_s lze stanovit pro pravidelná rozpětí (s poměrem rozpětí ve směru x a y $0{,}5 \le L_x / L_y \le 2$ a pro horizontálně ztužený nosný systém) přibližně podle vztahu:

$$r_s = 0{,}22 / L_x \text{ nebo } r_s = 0{,}22 / L_y\ . \qquad (46)$$

Provádíme-li návrh na této úrovni, nezohledňuje se vliv vyztužení průřezu, proto je vhodné postupovat podle následující návrhové úrovně II.

Úroveň II – pro pravidelné desky navržené pomocí lineárně pružné analýzy (např. metodou náhradních rámů) s využitím významné redistribuce vnitřních sil:

$$\psi = 1{,}5\, \frac{r_s}{d_v}\, \frac{f_{yd}}{E_s} \left(\frac{m_{Sd}}{m_{Rd}} \right)^{1{,}5}\ , \qquad (47)$$

kde m_{Sd} je průměrný ohybový moment v sloupovém pruhu – uvažován na jednotku délky:

- pro vnitřní sloupy $m_{Sd} = V_{Ed}/8$;
- pro sloupy u okraje $m_{Sd} = V_{Ed}/4$ pro směr rovnoběžný s okrajem a $m_{Sd} = V_{Ed}/8$ pro výztuž kolmou k okraji;
- pro rohové sloupy $m_{Sd} = V_{Ed}/2$ v každém směru,

m_{Rd} je návrhová únosnost v ohybu v sloupovém pruhu; r_s lze uvažovat stejně jako v úrovni I – vzdálenost místa nulového momentu v radiálním směru od osy sloupu.

Úroveň III – přesnější výpočet. Pokud se při výpočtu r_s desky použije lineárně pružný model MKP (MKP – rovinný nebo prostorový výpočet metodou konečných prvků, výpočet bez vlivu trhlin) a je-li m_{Sd} stanoveno jako průměrná hodnota ohybového momentu ve sloupovém pruhu na základě lineárně pružného modelu MKP (bez vlivu trhlin):

$$\psi = 1{,}2\, \frac{r_s}{d_v}\, \frac{f_{yd}}{E_s} \left(\frac{m_{Sd}}{m_{Rd}} \right)^{1{,}5}\ . \qquad (48)$$

Úroveň IV – nejpřesnější výpočet. Výpočet předpokládá nelineární analýzu MKP se zahrnutím vlivu trhlin, vlivu zpevnění tažené výztuže (a jiných nelineárních vlivů na chování železobetonové deskové konstrukce) – bližší viz MC2010 [4].

Maximální únosnost v protlačení s příčnou smykovou výztuží představuje porušení tlačených betonových diagonál a lze vyjádřit

$$V_{Rd,max} = k_{sys} k_\psi \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} b_0\, d_v \le \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} b_0\, d_v\ , \qquad (49)$$

kde k_{sys} je součinitel účinnosti smykové výztuže. Pokud nejsou bližší data, lze uvažovat hodnotou $k_{sys} = 2$. Přesnější hodnoty lze získat z experimentů. k_ψ součinitel stanovený pro smykově nevyztuženou oblast.

Vztah (49) omezuje smykovou únosnost na maximálně dvojnásobek smykové únosnosti nevyztuženého průřezu na líci styčné plochy b_0.

Pro zajištění dostatečné deformační kapacity průřezu je nezbytné, aby smyková výztuž, pokud je nutná, přenesla více než 50 % celkového zatížení ($V_{Rd,s} \ge 0{,}5V_{Ed}$). Pro zajištění konstrukce proti progresivnímu kolapsu je nutné navrhnou výztuž podle MC2010 [4] obdobně jako u výše uvedených předpisů.

MAXIMÁLNÍ ÚNOSNOST PRŮŘEZU V PROTLAČENÍ – SOUHRN

Při omezení maximálního napětí podle vztahu (8) (viz první část článku [16]) nemusí být zajištěna dostatečná hladina spolehlivosti konstrukce. Ve vztahu (8) omezujícím maximální únosnost v protlačení není zohledněn způsob zakotvení smykové výztuže a množství tahové výztuže v průřezu, proto je doporučné vztah (8) považovat spíše za informativní, udávající maximální únosnost tlačené diagonály, kterou by bylo možné využít pouze při spolehlivě zajištěném zakotvení smykové výztuže na protlačení.

Pro návrh průřezu byla v předchozím čísle [16] uvedena maximální únosnost vztažená na první kontrolovaný obvod u_1, obdobně, jako je to uvažováno v DIN 1045-1 nebo v národních přílohách k EN 1992-1-1 v Německu a Rakousku. Uvedené omezení únosnosti je vhodné, neboť zohledňuje možnosti spolehlivého zakotvení smykové výztuže na protlačení rozhodující o únosnosti průřezu v protlačení. Maximální únosnost je omezena α_{max}-násobkem návrhové únosnosti v protlačení bez smykové výztuže.

$$\begin{aligned} &\beta V_{Ed} \le V_{Rd,max} = \alpha_{max}\, \upsilon_{Rd,c}\, u_1\, d \\ &\text{resp. } \upsilon_{Ed,1} = \beta V_{Ed}\,/(u_1 d) = \alpha_{max}\, \upsilon_{Rd,c}\ , \end{aligned} \qquad (50)$$

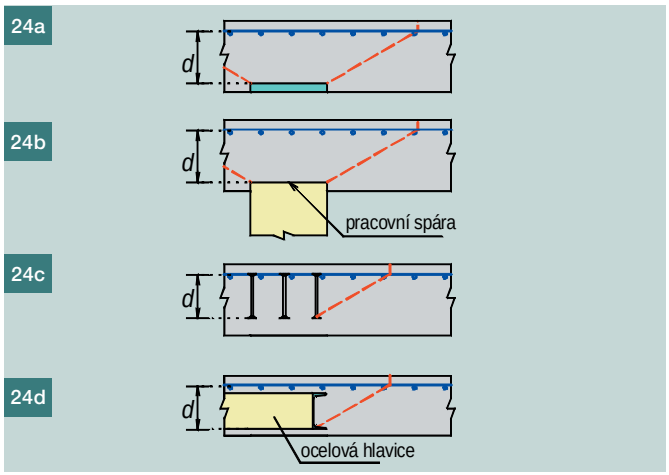
kde $\upsilon_{Rd,c}$ je návrhová únosnost betonového průřezu v protlačení bez smykové výztuže, α_{max} součinitel maximální únosnosti, jehož hodnota závisí na typu smykové výztuže a způsobu jejího zakotvení.

Pro třmínkovou výztuž kotvenou pouze háky podle článku 8.5 [1] se uvažuje součinitel α_{max} hodnotou (zakotvení háky není v tomto případě dostatečně účinné):

- $\alpha_{max} = 1{,}25$ pro účinnou výšku desky $d \le 200$ mm,
- $\alpha_{max} = 1{,}50$ pro účinnou výšku desky $d \ge 700$ mm.

mezilehlé hodnoty lze interpolovat.

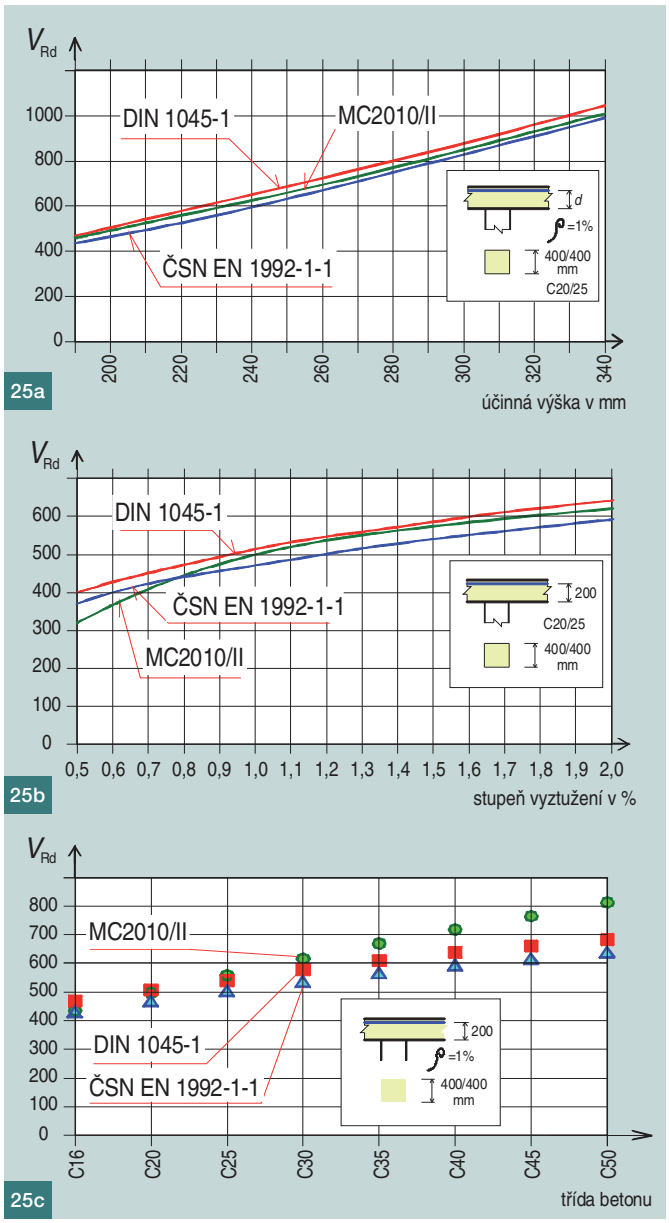
Pro smykovou výztuž spolehlivě kotvenou v úrovni horní i dolní výztuže a svařované smykové mřížky dostatečně za-

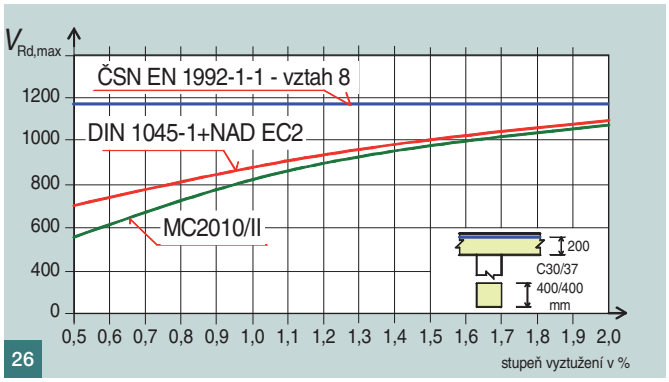


Obr. 24 Zmenšení účinné výšky, a) při ocelové roznášecí desce, b) zvednuté pracovní spáře u sloupu, c) při nedostatečně dlouhé smykové výztuži, d) při ocelové hlavici ▮ Fig. 24 Reduction of effective depth, a) by steel spread plate, b) by raised horizontal joint of column, c) by unsatisfactory height of vertical shear reinforcement, d) by steel head

Obr. 25 Srovnání únosnosti v protlačení desky bez smykové výztuže dle jednotlivých návrhových metodik (příklady), a) v závislosti na změně účinné výšky průřezu, b) v závislosti na stupni vyztužení tahovou výztuží, c) v závislosti na třídě betonu ▮ Fig. 25 Comparison of shear punching capacity of slab without shear punching reinforcement according to different design procedures (examples), a) depending on effective depth of cross section, b) depending on reinforcement ratio of tension longitudinal reinforcement, c) depending on strength class of concrete

Obr. 26 Příklad srovnání maximální únosnosti v protlačení dle jednotlivých návrhových metodik – v závislosti na vyztužení tahovou výztuží ▮ Fig. 26 Comparison of maximum shear capacity of slab according to different design procedures – depending on reinforcement ratio of tension longitudinal reinforcement





kotvené v úrovni výztuže při obou lících deskového prvku lze uvažovat součinitel α_{max} hodnotou:

- α_{max} = 1,40 pro účinnou výšku desky $d \leq 200$ mm,
- α_{max} = 1,65 pro účinnou výšku desky $d \geq 700$ mm .

Pro smykové trny lze uvažovat součinitel až hodnotou α_{max} = 1,90.

Pro zajištění spolehlivého zapojení smykové výztuže je nutné její spolehlivé zakotvení. Smyková výztuž musí obepínat alespoň jednu vrstvu dolní a horní výztuže (musí být dostatečně zakotvena v úrovni druhé vrstvy dolní a horní výztuže). Smykové trny musí být umístěny tak, aby jejich rozkovaná hlava byla v úrovni první vrstvy výztuže při každém líci deskové konstrukce (obr. 16).

ZÁVĚR

Správný návrh oblasti namáhané protlačením obvykle rozhoduje o správné funkci nosné lokálně podepřené deskové konstrukce. Návrh vychází z modelů náhradní příhradoviny, v metodice jednotlivých návrhů podle různých předpisů a norem jsou definovány návrhové vzorce a není nutné řešit vlastní model náhradní příhradoviny. Správný návrh popřípadě posouzení protlačení má přihlížet i k vlastní realizaci. Na obr. 24 jsou příklady, kdy je negativně ovlivněna účinná výška průřezu, která je rozhodující pro návrh, popřípadě posouzení oblasti. Účinná výška je mimo jiné ovlivněna i polohou pracovní spáry mezi sloupem a vlastní deskou.

V současné době se jako výztuž na protlačení používají nejčastěji smykové trny, které mají částečně odlišnou metodiku návrhu než je definována ČSN EN 1992-1-1 [1]. Při návrhu smykových trnů jako smykové výztuže oblasti namáhané protlačením je nutné znát principy návrhu a jeho odlišnosti. Návrh celé konstrukce včetně všech detailů musí být proveden v souladu s ČSN EN 1990 a navazujícími technickými předpisy.

Literatura:
[1] ČSN EN 1992-1-1 Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby, ČNI 2006
[2] DIN 1045-1(08/2008) Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 1: Bemessung und Konstruktion. DIN Deutsches Institut für Normung s. V. Beuth Verlag GmbH, Berlin
[3] *Zilch K., Zehetmaie G.:* Bemessung im konstruktiven Betonbau. Sprinter-Verlag Berlin Heidelberg 2010. ISBN 978-3-540-70637-3
[4] Model code 2010, *fib* Bulletin 55, First Komplete draft, DCC Dokument Kompetence Center Siegmar Kästl e.K. Germany. ISBN 978-2-88394-095-6
[5] Zulassung Z-15.1-213, Deutsches Institut für Bautechnik, 04/2008
[6] *Šmejkal J., Procházka J.:* Navrhování základových konstrukcí s použitím modelů náhradní příhradoviny, Beton TKS 2/2011
[7] *Šmejkal J., Procházka J.:* Navrhování s použitím modelů náhradní příhradoviny. Beton TKS 6/2009
[8] *Šmejkal J., Procházka J.:* Discontinuity Regions Design Experiences with Strut-and-Tie Models according to EN 1992-1-1, Design of concrete structure using EN 1992-1-1, Workshop CVUT Praha 2010, ISBN 978-80-01-04581-7
[9] *Siburg C., Hegger J.:* Punching of flat slabs – comparison of models. *fib* Symposium Prague 2011
[10] Zulassung Z-15.1-217, Deutsches Institut für Bautechnik, 08/2009
[11] DAfStB 525 – Erläuterung zu DIN 1045-1. 09/2003. Beuth Verlag GmbH Berlin
[12] *Muttoni A., Guandalini S.:* Kommentar zum Durchstanzen nach Norm SIA 262, Ecole Polytechnice Fédérale de Lausanne. 2006, *http://is-beton.epfl.ch/Public*
[13] ČSN 73 1201 Navrhování betonových konstrukcí pozemních staveb, 09/2010, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha
[14] DIN EC 1992-1-1 včetně německé NA:2011-01. DIN Deutsches Institut für Normmung e.V. Technische Baubestimmungen 2011
[15] *Feix J., Häusler F., Walkner R.:* Necesary amendments to the rules for punching design according to EN 1992-1-1, In Design of concrete structures and bridges using eurocodes. 2nd inter. workshop 2011, Bratislava
[16] *Šmejkal J., Procházka J., Hanzlová H.:* Navrhování na mezní stav porušení protlačením, Beton TKS 5/2011

Pro mezní stav protlačení u prvků bez smykové výztuže vychází únosnost podle EC2 [1], DIN 1045-1 [2] a MC2010 [4] má přibližně stejnou úroveň spolehlivosti, jak dokazují experimenty publikované v [9]. Příklady srovnání únosností v protlačení dle jednotlivých metodik jsou na obr. 25. Na obr. 26 je příklad srovnání maximální únosnosti podle výše uvedených metodik. Při smykovém vyztužení oblasti **maximální únosnost tlakové diagonály podle EC2** (vztah (8) [16]) **nezohledňuje možnosti účinného zakotvení navržené smykové výztuže** [9], zatímco návrh podle DIN 1045-1 [2] jakož i národní přílohy EN 1992-1-1 Německa a Rakouska k tomuto přihlížejí. **Proto je doporučeno při stanovení maximální smykové únosnosti splnit podmínku definovanou vztahem (50).**

Model Code 2010 má jiný přístup k řešení oblasti namáhané protlačením [12]. Tento přístup vychází ze Švýcarské normy SIA 262 a zohledňuje nejnovějších zkušenosti s navrhováním těchto konstrukcí.

Příspěvek byl vypracován za podpory výzkumného záměru MŠM 684077001.

Ing. Jiří Šmejkal, CSc.
ŠPS statická kancelář
332 01 Tymákov 353
tel.: 608 548 788
e-mail: jiri.smejkal@email.cz

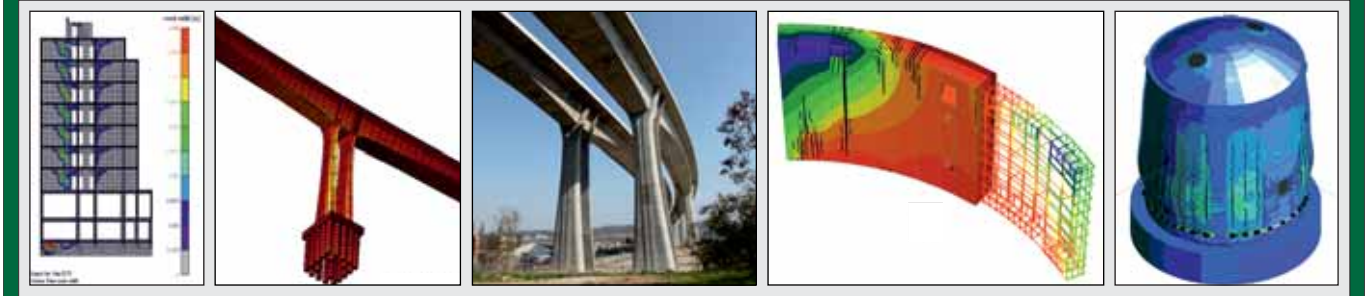
Prof. Ing. Jaroslav Procházka, CSc.
tel.: 222 938 907, 602 825 789
e-mail: jaroslav.prochazka@fsv.cvut.cz

Ing. Hana Hanzlová, CSc.
tel.: 224 354 634, 728 066 300
e-mail: hana.hanzlova@fsv.cvut.cz

oba: Katedra betonových a zděných konstrukcí
FSv ČVUT v Praze
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

Ověřte Vaši konstrukci programem ATENA!

Připojte se ke špičkovým inženýrům, kteří používají počítačovou simulaci pro kontrolu a navrhování bezpečných a spolehlivých staveb.



Nabízíme:
- jedinečný software pro nelineární analýzu a hodnocení bezpečnosti - programy ATENA Engineering, ATENA Science, SARA, RLACS
- uživatelskou podporu a údržbu
- poradenství v oblasti nelineárních výpočtů a spolehlivosti konstrukcí

Použití pro:
- mostní konstrukce, dopravní stavby, tunely, budovy, elektrárny
- prostý a vyztužený beton, drátkobeton, vláknobeton
- stanovení šířky trhlin, průhybů, optimalizaci výztuže
- ověření únosnosti, odolnosti, spolehlivosti, zesilování konstrukcí

ČERVENKA CONSULTING

Na Hřebenkách 55 • 150 00 Praha 5
Tel: **+420 220 610 018** • E-mail**: cervenka@cervenka.cz** • Web**: www.cervenka.cz**