

Ověření únosnosti drátkobetonové desky v protlačení dle FprEN 1992-1-1:2023

Kryštof Toman¹
Iva Broukalová²

¹ ČVUT v Praze, Fakulta stavební; Thákurova 2077, 166 29 Praha 6; krystof.toman@fsv.cvut.cz

² ČVUT v Praze, Fakulta stavební; Thákurova 2077, 166 29 Praha 6; iva.broukalova@fsv.cvut.cz

Grant: SGS24/040/OHK1/1T/11

Název grantu: Moderní cementové kompozity a jejich efektivní použití v konstrukcích

Oborové zaměření: JN – Stavebnictví

© GRANT Journal, MAGNANIMITAS Assn.

Abstrakt Tento článek popisuje výpočet únosnosti betonové desky s rozptýlenou ocelovou výztuží v protlačení podle aktuálně zpracovávané 2. generace návrhových norem, konkrétně dle dostupného návrhu normy FprEN 1992-1-1:2023. Výpočet je proveden na vzorovém modelovém příkladu, který byl v roce 2023 ověřen experimentálně. V závěru článku je vypočtená únosnost porovnána s výsledky experimentu a je provedeno zhodnocení předkládaného výpočetního postupu.

Klíčová slova Beton s rozptýlenou ocelovou výztuží, Drátkobeton, Protlačení, FprEN 1992-1-1:2023

1. ÚVOD

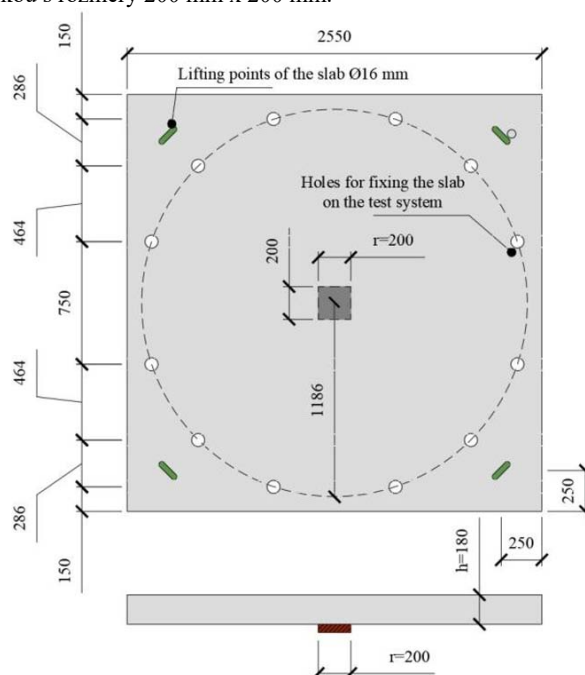
S betonovými konstrukcemi vyztuženými pouze rozptýlenou ocelovou výztuží se lze v praxi běžně setkat – jedná se o průmyslové podlahy na terénu, primární ostění tunelů, případně se rozptýlená ocelová výztuž používá jako doplněk ke klasické betonářské výztuži. V českém prostředí však stále chybí platný normový předpis, který by poskytoval pravidla pro návrh konstrukčních prvků z betonu s rozptýlenou ocelovou výztuží. To se má změnit s příchodem 2. generace návrhových norem známých pod pojmem „Eurokód“. V současnosti je k dispozici návrh normy pro betonové konstrukce s označením FprEN 1992-1-1:2023 [1]. Tento předpis uvádí požadavky pro návrh jak běžných železobetonových konstrukcí, tak i pro betonové konstrukce s rozptýlenou ocelovou výztuží. Lze předpokládat, že schválení této normy přispěje k rozšíření používání drátkobetonových konstrukcí v praxi.

Jednou z možných oblastí aplikace drátkobetonu je zvýšení únosnosti konstrukce ve smyku při protlačení. Jedná se o oblasti soustředěného namáhání desky pod lokálně působící silou nebo v místě bodového podepření. V těchto místech dochází ke koncentraci smykových sil do malé oblasti a únosnost těchto míst je nutno ověřit výpočtem. Pokud je únosnost desky nedostatečná, lze únosnost průřezu zvýšit použitím rozptýlené ocelové výztuže. Postup výpočtu únosnosti v protlačení betonové desky s rozptýlenou výztuží je uveden v FprEN 1992-1-1:2023 [1] a detailně je rozebrán v tomto článku. Samotný výpočet je aplikován na modelový příklad, který byl experimentálně ověřen v rámci 3. ročníku mezinárodní soutěže „Blind Simulation Competition“ pořádanou organizací fib (Fédération Internationale du Béton).

2. MODELOVÝ PŘÍKLAD

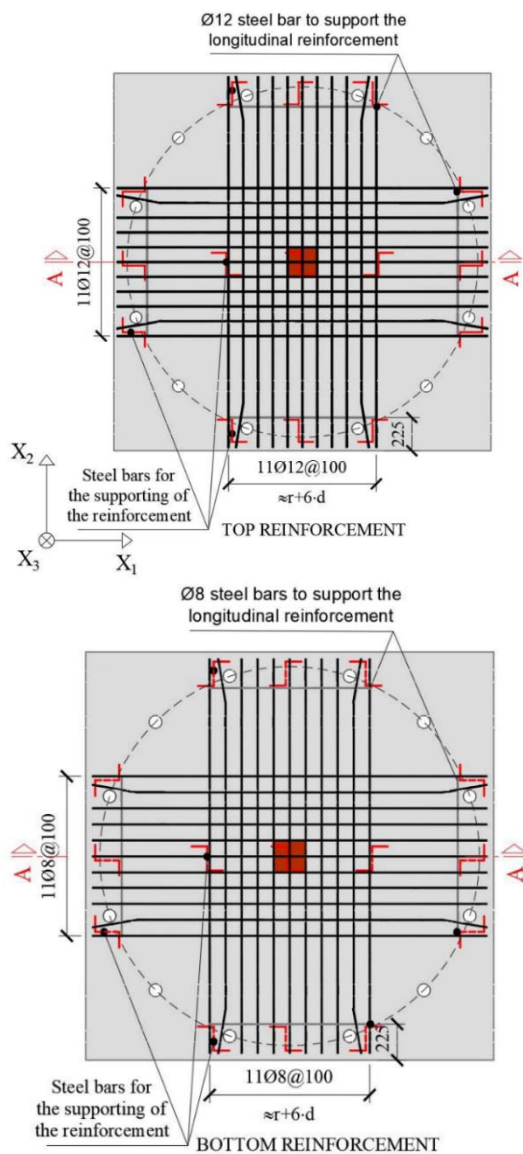
V průběhu roku 2023 se konal 3. ročník mezinárodní soutěže „Blind Simulation Competition“ s cílem ověřit schopnost současných numerických modelů predikovat chování drátkobetonové konstrukce při zatěžovací zkoušce. V rámci soutěže byly uskutečněny reálné zatěžovací experimenty dvou drátkobetonových desek zatížených bodovou silou. Na základě tohoto experimentu je proveden výpočet únosnosti drátkobetonové konstrukce v protlačení dle FprEN 1992-1-1:2023 [1] a výsledky jsou v závěru porovnány.

Uspořádání zatěžovací zkoušky bylo určeno pořadatelem soutěže. Zkoušeny byly dva vzorky shodné betonové desky půdorysných rozměrů 2,55 m x 2,55 m a tloušťky 180 mm. Každá z desek byla ukotvena k základu po obvodu kruhu o poloměru 1,186 m pomocí 12 svislých tyčí Dywidag. Střed desky byl vůči základu rozpírán zatěžovacím pístem. Konec pístu byl opatřen roznášecí ocelovou deskou s rozměry 200 mm x 200 mm.



Obrázek 1: Geometrie ověřovaného experimentu [2]

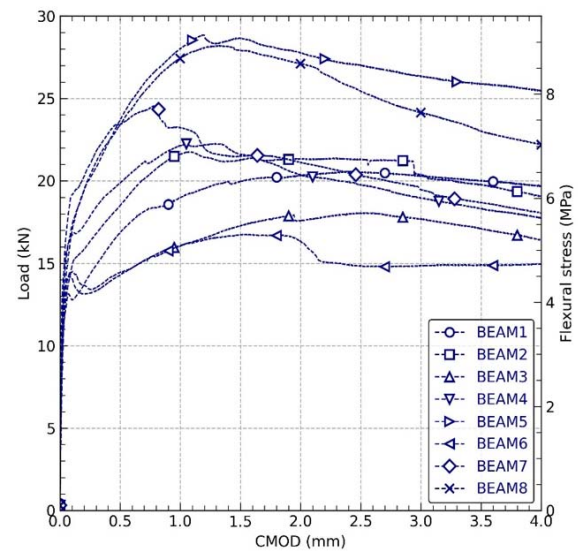
Betonová deska byla ve středních pruzích vyztužena klasikou ohybovou výztuží. Na horním taženém povrchu bylo v obou směrech umístěno 11 prutů o průměru 12 mm ve středovém pruhu v rozteči 100 mm. Na spodním tlaceném povrchu bylo ve stejných pozicích umístěno 11 prutů o průměru 8 mm v každém směru. Krytí výztuže bylo 20 mm.



Obrázek 2: Vyztužení desky [2]

Desky byly provedeny z betonu třídy C50/60-XD3(P) CL0,20-D_{max} 14 S5. Pro namíchání betonové směsi bylo použito kamenivo největší frakce 6/14 mm. Materiálové parametry byly ověřeny na zkušebních vzorcích. Sečnový modul pružnosti v tlaku po 22 dnech je 26,35 GPa. Průměrná pevnost v tlaku stanovená na válcích dle NP EN 12390-13:2014 ve stejné době je 50,15 MPa. Beton je vyztužen rozptýlenou výztuží z ocelových vláken HE ++ 90/60 s pevností v tahu 1900 MPa. Obsah vláken ve směsi je 60 kg/m³. Na osmi vzorcích byla změřena zbytková pevnost v tahu za ohybu stanovená podle doporučení fib Model Code 2010. Jedná se o zkoušku dle EN 14651 [3] v tříbodovém ohybu na trámcích s vrubem. Výsledkem těchto zkoušek jsou diagramy závislosti působící síly a rozevření trhliny (CMOD) na spodním taženém povrchu trámce. K dispozici bylo 8 zatěžovacích diagramů. Střední hodnota CMOD₃ = 2,5mm

činní $f_{R,3mean} = 6,59$ MPa. Dále byly provedeny pevnostní zkoušky betonářské výztuže. Mez kluzu se pohybuje kolem 600 MPa.



Obrázek 3: Zatěžovací diagramy L-CMOD zkušebních vzorků dle EN 14651 ze zadání soutěže [2]

3. POSTUP VÝPOČTU DLE FprEN 1992-1-1:2023

Návrhu betonových konstrukcí s rozptýlenou ocelovou výztuží je v nové generaci eurokódu vyčleněna samostatná informativní příloha L [1]. V této příloze jsou shrnuty všechny podstatné body návrhu: od dílčích součinitelů bezpečnosti, přes stanovení pevnostních tříd, po jednotlivé posudky a konstrukční zásady. Výpočetní postup únosnosti v protlačení je uveden v kapitole L.8.4. Návrhová únosnost drátkobetonové desky v protlačení vztažená na plochu kontrolovaného průřezu se stanoví dle následujícího vzorce:

$$\tau_{Rd,cf} = \eta_c \cdot \tau_{Rd,c} + \eta_F \cdot f_{Ftud} \geq \eta_c \cdot \tau_{Rd,c,min} + f_{Ftud},$$

kde

$$\eta_c = \tau_{Rd,c} / \tau_{Ed} \leq 1,0;$$

$\tau_{Rd,c}$ je stanoveno dle 8.4.3(1) stejného předpisu;

$$\eta_F = 0,4;$$

$\tau_{Rd,c,min}$ je stanoveno dle 8.2.1(4) stejného předpisu.

Výše uvedený vzorec přičítá k únosnosti průřezu bez smykové a rozptýlené výztuže ($\eta_c \cdot \tau_{Rd,c}$) další člen zohledňující zvýšení únosnosti přidáním rozptýlené ocelové výztuže ($\eta_F \cdot f_{Ftud}$). A to konkrétně ve výši 40 % f_{Ftud} . V kapitole L.5.5.1 *Návrhové zbytkové pevnosti v tahu* je návrhová hodnota zbytkové pevnosti v tahu zohledňující vliv vláken f_{Ftud} definována následujícími vztahy:

$$f_{Ftud} = f_{Ftu,ef} / \gamma_{SF};$$

$$f_{Ftu,ef} = \kappa_0 \cdot \kappa_G \cdot 0,33 \cdot f_{R,3k}.$$

Součinitel κ_0 zohledňující orientaci ocelových vláken je definován ve stejné kapitole v odstavci 4. Pro smyková namáhání při protlačení je jeho bezpečná hodnota stanovena jako 1,0. Alternativně lze použít hodnotu vyšší, tu je však nutné stanovit na základě informací o způsobu výroby drátkobetonu a ověřených teoretických postupech. Součinitel κ_G zohledňující velikost tahové zóny, která se podílí na porušení, je stanoven v intervalu mezi 1,0 a 1,5. Pro konzervativní výpočetní postup bez dalšího podrobného zkoumání lze pro součinitel uvážit hodnotu 1,0. Charakteristická hodnota zbytkové pevnosti v tahu za ohybu $f_{R,3k}$ při CMOD₃ = 2,5mm se stanoví dle EN 14651 [3] na základě zkoušky v tříbodovém ohybu na trámcích s vrubem. Součinitel spolehlivosti drátkobetonových konstrukcí γ_{SF} je pro trvalé a dočasné návrhové situace stanoven na hodnotu 1,5.

Únosnost průřezu bez smykové a rozptýlené výztuže $\tau_{Rd,c}$ vychází z aktuálně platného postupu dle EN 1992-1-1 [5] s dílčími úpravami. Nově do výpočtu vstupuje parametr popisující drsnost smykové trhliny závisící na typu betonu a velikosti kameniva. Některé další součinitele jsou upraveny nebo stanoveny jinak. Konkrétně se tedy únosnost průřezu bez smykové výztuže při protlačení $\tau_{Rd,c}$ stanoví následujícím způsobem:

$$\tau_{Rd,c} = \frac{0,6}{\gamma_v} \cdot k_{pb} \cdot \left(100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck} \cdot \frac{d_{dg}}{d_v}\right)^{\frac{1}{3}} \leq \frac{0,5}{\gamma_v} \cdot \sqrt{f_{ck}},$$

kde

γ_v je dílčí součinitel spolehlivosti pro namáhání smykem a protlačení (hodnota bude upřesněna v národní příloze, výchozí hodnota pro trvalé a dočasné situace činní 1,40),

k_{pb} je součinitel smykového gradientu při protlačení, který lze vypočítat jako: $1 \leq k_{pb} = 3,6 \cdot \sqrt{1 - \frac{b_0}{b_{0,5}}} \leq 2,5$,

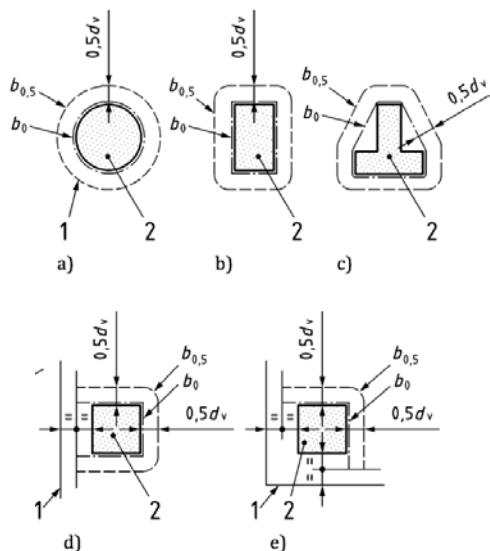
$\rho_l = \sqrt{\rho_{l,x} \cdot \rho_{l,y}}$, kde $\rho_{l,x}$ a $\rho_{l,y}$ je stupeň vyztužení podélnou výztuží v příslušném směru,

f_{ck} je charakteristická válcová pevnost betonu v tlaku ve stáří 28 dní,

d_{dg} je parametr popisující drsnost smykové trhliny, který je pro betonu $f_{ck} \leq 60 \text{ MPa}$ stanoven jako $16 \text{ mm} + D_{lower} \leq 40 \text{ mm}$ (D_{lower} je nejnižší hodnota velikosti kameniva pro nejvyšší použitou frakci v betonové směsi),

$d_v = \frac{d_{vx} + d_{vy}}{2}$, kde d_{vx} a d_{vy} je účinná výška průřezu pro příslušný směr.

Poloha kontrovaného obvodu $b_{0,5}$ kolem lokální podpory, kde se provádí posouzení na smyk při protlačení, je posunuta do vzdálenosti $0,5 \cdot d_v$ dle schématu níže. Dále do výpočtu vstupuje délka obvodu na lici podpory b_0 .



Obrázek 4: Poloha kontrovaného obvodu b_0 (1 – kontrovaný obvod, 2 – podpora) [1]

4. VÝPOČET ÚNOSNOSTI DRÁTKOBETONOVÉ DESKY VE SMYKU PŘI PROTŘAČENÍ

Zde je uveden konkrétní výpočet únosnosti drátkobetonové desky ve smyku při protlačení na modelovém příkladu, který byl ověřen experimentálně. Pro porovnatelnost výpočtu dle FprEN 1992-1-1:2023 [1] s výsledky experimentu jsou výpočty provedeny s dílčími

součiniteli bezpečnosti odpovídajícími hodnotě 1,0 a pro střední hodnoty pevnosti materiálu.

V prvním kroku je stanovena hodnota únosnosti průřezu bez smykové výztuže a bez rozptýlené ocelové výztuže. Tato únosnost se při zkoušce do porušení vzorku vyčerpá v celé své výši a parametr η_c je pro výpočet roven maximální hodnotě 1,0.

Vstupní hodnoty: $d_v = \frac{0,154 + 0,142}{2} = 0,148 \text{ m}$, $b_0 = 4 \cdot 0,2 = 0,8 \text{ m}$, $b_{0,5} = 4 \cdot 0,2 + 2 \cdot \pi \cdot (0,5 \cdot 0,148) = 1,265 \text{ m}$, $f_{cm} = 50,15 \text{ MPa}$, $D_{lower} = 6 \text{ mm}$,

$$\rho_l = \sqrt{(10 \cdot (\frac{12}{2})^2 \cdot \pi) / (1000 \cdot 148) \cdot (10 \cdot (\frac{12}{2})^2 \cdot \pi) / (1000 \cdot 148)} = 0,00764.$$

Výpočet:

$$k_{pb} = 3,6 \cdot \sqrt{1 - \frac{b_0}{b_{0,5}}} = 3,6 \cdot \sqrt{1 - \frac{0,8}{1,265}} = 2,183 \leq 2,5$$

$$d_{dg} = 16 + 6 = 22 \text{ mm}$$

$$\tau_{Rd,c} = \frac{0,6}{\gamma_v} \cdot k_{pb} \cdot \left(100 \cdot \rho_l \cdot f_{cm} \cdot \frac{d_{dg}}{d_v}\right)^{\frac{1}{3}} = \frac{0,6}{1,0} \cdot 2,183 \cdot \left(100 \cdot 0,00764 \cdot 50,15 \cdot 2214813\right)^{\frac{1}{3}} = 2,339 \text{ MPa}$$

$$\leq \frac{0,5}{\gamma_v} \cdot \sqrt{f_{cm}} = \frac{0,5}{1,0} \cdot \sqrt{50,15} = 3,541 \text{ MPa}$$

Únosnost kontrovaného obvodu $b_{0,5}$ bez smykové výztuže a bez rozptýlené ocelové výztuže (předpokládá se, že v experimentu je deska zatížena symetricky a součinitel zohledňující vliv nesymetrického zatížení β_e je tedy roven 1,0) činní:

$$V_{Rd,c} = \frac{\tau_{Rd,c} \cdot b_{0,5} \cdot d_v}{\beta_e} = \frac{2,339 \cdot 10^3 \cdot 1,265 \cdot 0,148}{1,0} = 437,91 \text{ kN}$$

V dalším kroku je určen příspěvek k únosnosti ve smyku v protlačení od rozptýlené ocelové výztuže.

Vstupní hodnoty: $f_{R,3\text{mean}} = 6,59 \text{ MPa}$

Výpočet:

$$f_{Ftu,ef} = \kappa_O \cdot \kappa_G \cdot 0,33 \cdot f_{R,3\text{mean}} = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,33 \cdot 6,59 = 2,175 \text{ MPa}$$

$$V_{Ftu} \cdot \eta_F = \frac{f_{Ftud} \cdot b_{0,5} \cdot d_v}{\beta_e} \cdot \eta_F = \frac{2,175 \cdot 10^3 \cdot 1,265 \cdot 0,148}{1,0} \cdot 0,4 = 162,88 \text{ kN}$$

Celková únosnost ve smyku v protlačení modelového příkladu dle výpočtu FprEN 1992-1-1:2023 tedy činní $437,91 + 162,88 = 600,79 \text{ kN}$.

K výpočtu je nutno poznamenat, že všechny volitelné koeficienty, které lze nějakým způsobem upravovat podle přesnějších informací o způsobu výroby a ověřených teoretických postupech, jsou voleny konzervativně na své dolní mezi. Celková stanovená únosnost je nejnižší možná hodnota uvedeného výpočetního postupu.

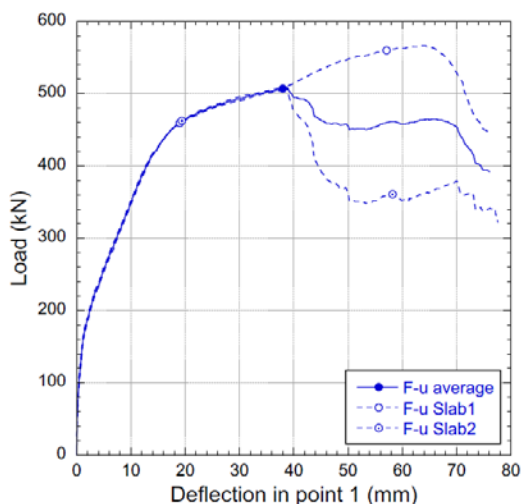
5. VÝSLEDKY EXPERIMENTU A POROVNÁNÍ S VÝPOČTEM

V rámci experimentu se provedly zatěžovací zkoušky dvou drátkobetonových desek [4]. Deska 1 se porušila předpokládaným způsobem – k rozvoji trhlin došlo po celém obvodu v blízkosti bodového zatížení. Maximální dosažená síla činila 565,88 kN. Deska 2 se porušila pouze na části obvodu a při dalším zatěžování nastalo rozevírání trhlin v porušeném místě bez vyčerpání únosnosti ve zbývajících částí obvodu. Dosažená maximální síla byla v tomto případě nižší, konkrétně činila 507,96 kN. Na následujících

obrázcích je zachycen způsob porušení a dále je přiložen zatěžovací diagram vyjadřující posun zatěžovaného bodu na dosažené síle v lisu pro obě zkoušené desky.



Obrázek 4: Nahoře – symetrické porušení desky 1; dole – nesymetrické porušení desky 2 [4]



Obrázek 4: Záznam průběhu zatěžovací zkoušky – závislost dosažené síly v lisu na posunu zatěžovaného bodu [4]

Výpočetním postupem dle FprEN 1992-1-1:2023 byla stanovena únosnost takovéto desky na hodnotě 600,79 kN, což je o 6,2 % více než maximální dosažená síla pro desku 1, respektive o 18,3 % více než v případě desky 2. Za relevantnější srovnání lze považovat případ desky 1, kdy došlo ke standardnímu způsobu porušení.

deska 1		
experiment	výpočet dle FprEN 1992-1-1:2023	rozdíl
565,88 kN	600,79 kN	6,2 %

deska 2		
experiment	výpočet dle FprEN 1992-1-1:2023	rozdíl
507,96 kN	600,79 kN	18,3 %

Tabulka 1: Porovnání únosností

V tomto případě tedy výpočetní postup únosnosti betonové desky s rozptýlenou ocelovou výztuží při namáhání protlačením dle FprEN 1992-1-1:2023 nadhodnocuje očekávanou únosnost pro průměrné materiálové charakteristiky. Porovnání vychází pouze ze dvou experimentálních vzorků a jeho platnost je tak značně omezená.

Vliv rozptýlené ocelové výztuže je do výpočtu zahrnut pomocí pevnosti betonu v tahu za ohybu odpovídající rozevření vrubu $CMOD_3 = 2,5\text{mm}$. Tato pevnost se měří při zkoušce v třibodovém ohybu a místo porušení je předem vymezeno. Naměřená pevnost tak odpovídá konkrétnímu průřezu, který nemusí být a zpravidla není na zkoušeném vzorku tím nejslabším. Vstupní hodnota pevnosti v tahu za ohybu drátkobetonu je z tohoto měření nadhodnocena, a to je jedním z důvodů rozdílu mezi výpočtem a experimentem. Navíc tato pevnost vykazuje značný rozptyl – z experimentálního měření 8 trámeců činní nejnižší hodnota pevnosti v tahu za ohybu 4,7 MPa a nejvyšší 8,6 MPa (viz obrázek 3). Pro průměrnou hodnotu 6,59 MPa činí směrodatná odchylka 1,22 MPa a variační koeficient je 18,51 %. Při uvážení pevnosti v tahu za ohybu na dolní hranici měření 4,7 MPa je hodnota únosnosti v protlačení modelového příkladu 554,06 kN, což lépe odpovídá experimentálním výsledkům. Použití průměrné hodnoty tak není pro tento případ zcela výstižné. V běžné aplikaci normového přístupu budou použity charakteristické hodnoty materiálových vlastností, které jsou odvozeny na základě statistického zpracování. Vliv velkého rozptylu pevnosti v tahu za ohybu tak bude do výpočtu zahrnut.

6. ZÁVĚR

Nová generace eurokódů přinese do českého prostředí možnost navrhovat konstrukce z betonu s rozptýlenou ocelovou výztuží podle platného normového předpisu. Aktuálně je dostupný návrh této normy s označením FprEN 1992-1-1:2023 a je možné ověřit předkládané výpočetní postupy na experimentálních datech. V tomto článku byl konkrétně ověřen postup posouzení drátkobetonové desky při namáhání v protlačení. Výsledek je porovnán s experimentálními daty. Při použití průměrných hodnot materiálových pevností výpočet v tomto případě nadhodnocuje celkovou únosnost, konkrétně o 6,2 % a 18,3 %. Hodnota pevnosti drátkobetonu v tahu za ohybu však vykazuje značný rozptyl a je nadhodnocena zkušební postupem dle EN 14651 [3]. Vhodnost zkušebního postupu pevnosti v tahu za ohybu dle EN 14651 byla rozebírána odbornou veřejností již několikrát, avšak stále převažuje jako doporučený postup na základě jednoduché interpretace výsledků. V reálném použití výpočetního postupu bude vysoký rozptyl materiálových pevností do výpočtu zahrnut pomocí statistického zpracování s výslednou charakteristickou hodnotou pevnosti a hodnota pevnosti v tahu za ohybu bude upravena dílčím součinitelem bezpečnosti. Předkládaný výpočetní postup dle FprEN 1992-1-1:2023 se tedy jeví jako bezpečný.

Zdroje

1. Final draft FprEN 1992-1-1:2023. *Eurocode 2 - Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures*. ICS 91.010.30; 91.080.40. Brusel: CEN, 2023.
2. Barros, J., Sanz, B. *Rules of 3rd Blind Simulation Competition*. Madrid, 2023.
3. EN 14651:2007+A1:2008. *Test method for metallic fibre concrete – Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual)*. ICS 91.100.30. Brusel: CEN, 2007
4. Barros, J., Sanz, B. *Report of 3rd Blind Simulation Competition*. Madrid, 2023.
5. ČSN EN 1992-1-1 ed. 2. *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. ICS 91.010.30; 91.080.40. Praha: ÚNMZ, 2019.