

SPOLUPŮSOBENÍ KLASICKÉ A ROZPTÝLENÉ VÝZTUŽE ■ INTERACTION OF CLASSIC AND FIBRE REINFORCEMENT

Jan L. Vítek, Stanislav Smiřinský

Betonové prvky vyztužené ocelovými pruty působí staticky vynikajícím způsobem. V některých případech však ocelové pruty způsobují problémy při výrobě. Použití vláknové výztuže umožňuje zjednodušení výroby, ale statické působení není již tak dobré. Kombinované vyztužení může přispět k lepšímu statickému působení při současném zjednodušení výroby. Experimentální studie, kde byla zkoušena řada trámů na ohyb, ukázala rozdíly v statickém působení při různých kombinacích vyztužení. Diagramy zobrazující závislost zatížení na průhybu ukazují únosnost jednotlivých trámů, vývoj trhlin a průhybů. ■ Concrete elements reinforced with steel bars exhibit excellent structural performance. However, in some cases steel bars make troubles during production. Application of fibre reinforced concrete provides easier production, but its structural performance is not so good. The combined reinforcement may contribute to both, easy production and good structural performance. An experimental study, where a number of beams were tested in bending, showed the differences in structural response, when different combinations of reinforcement were applied. The load deflection diagrams show the load carrying capacity of different beams, development of cracks and deflections.

Betony vyztužené rozptýlenou výztuží jsou často využívány pro konstrukce, kde vyztužení přímo nerozhoduje o únosnosti konstrukčního systému. Jde např. o průmyslové podlahy nebo o dopravní svodidla, tunelová ostění a jiné konstrukce, kde při deformaci konstrukce dojde k odlehčení zatížení, a tím k omezení nárůstu vznikající trhliny. Např. u podlah se při přetížení betonová deska prohne a působící zatížení ve větší míře přenáší podloží a vlastní deska se odlehčí. U běžných nosných konstrukcí k takovému jevu nedochází, konstrukce musí přenášet při rostoucím zatížení stále jeho plnou hodnotu. Proto je nutné, aby i po vzniku trhliny měla konstrukce stále schopnost přenášet rostoucí zatížení až do meze únosnosti konstrukce. Mez únosnosti musí být značně výše, než je mez vzniku trhlin, aby konstrukce byla ekonomická. Prakticky toto znamená, že tahová síla přenášená betonem před vznikem trhliny, musí být převzata výztuží (v tomto případě vlákny) a navíc rozptýlená výztuž musí mít schopnost přenést i větší tahovou sílu, aby nedošlo ihned po vzniku trhliny ke kolapsu konstrukce. V názvosloví betonových konstrukcí to znamená, že stupeň vyztužení rozptýlenou výztuží musí být vyšší než tzv. minimální stupeň vyztužení průřezu.

Řada experimentů s vláknobetonu ukazuje, že po vzniku první trhliny v ohybaných prvcích i při poměrně vysokém vyztužení nedojde k vzniku další trhliny, ale první trhlina se stále rozšiřuje, až dojde ke kolapsu prvku. Takové působení je značně nepříznivé, neboť dochází k velké šířce trhliny i relativně velkým deformacím konstrukce. Též ohybová čára není plynulá, ale spíše polygonální, což též není příznivé. Vznik velkých natočení v trhlíně vede ke koncentracím napětí v tlačené oblasti betonu a ke snížení únosnosti tlačené oblasti tím, že se vlivem jejího přetváření zmenšuje její výška. Pak často nastane porušení tlakem při horním okraji průřezu, a tím dojde ke kolapsu ohybaného prvku.

Naopak porušování konstrukcí vyztužených klasickou výztuží probíhá tak, že po vzniku první trhliny poměrně rych-

le vznikají trhliny další. Jejich šířka je poměrně malá a pak se řada z nich postupně rozšiřuje a teprve v poslední fázi před kolapsem dojde k většímu rozšíření jedné nebo dvou trhlin a většinou k rozdrčení betonu v jedné z nich. Tvar ohybové čáry je stále spíše obloukový a teprve bezprostředně před kolapsem se mění v polygonální. To je samozřejmě příznivější než situace u prvků vyztužených jen vlákny. Nakonec i únosnost bývá dosažena při větším průhybu, neboť nedochází k tak velkým koncentracím tlakového napětí u horních vláken kritického průřezu, protože při stejném průhybu je natočení sousedních průřezů menší.

Důvody popisovaného působení jsou patrně v množství výztuže působící ve směru rozhodujících zatížení. Zatímco vlákna (obvykle ocelové drátky) jsou umístěna všesměrně, klasická výztuž je navržena ve směru hlavních napětí. Její účinnost je poměrně velká. Uvážíme-li, že u prvků vyztužených vlákny pouze cca 1/3 vláken působí ve směru hlavních napětí, a to ještě jen část z vhodně usměrněných vláken je v trhlíně aktivní, neboť ostatní nemusejí mít potřebnou kotevní délku, je účinnost vláknové výztuže poměrně menší. Např. vlákno o délce cca 50 mm nepřetíná trhlinu vždy tak, aby po obou stranách vznikla dostatečně dlouhá kotevní délka, která by zajistila jeho plnou účinnost.

Z uvedeného plyne, že i relativně silně vyztužené vláknobetonové prvky se porušují spíše křehkým způsobem, zatímco klasicky vyztužené prvky mají porušování bližší plastickému charakteru.

Statické výhody klasicky vyztužených prvků tvoří jednu stránku posuzování konstrukcí. Druhou stranou jsou hlediska technologická. Příprava a ukládání výztuže jsou náročné operace, které v mnohých případech zpomalují a komplikují výrobní proces. To je patrně jedním z podstatných důvodů, proč je snaha vlákna aplikovat.

Současné trendy v navrhování konstrukcí požadují, aby konstrukce byly robustní. Tím se myslí, že mají být málo citlivé na možné odchylky v podmínkách jejich působení, které je nutné předpokládat, ale nelze je přesně kvantifikovat. Z uvedeného plyne, že vláknobetonové prvky jsou více citlivé na mechanické zatěžování, zatímco klasicky vyztužené prvky jsou robustnější. Důvodem není jen výše uvedený způsob porušování, ale též fakt, že rozdělení vláken (drátků) po průřezu je náhodné a též někdy citlivé na způsob výroby a ukládání betonu. Proto bylo rozhodnuto provést pilotní testy s výztuží, která by kombinovala vlákna a klasické pruty tak, aby se dosáhlo na jedné straně zlepšení působení vláknobetonu a na druhé straně, aby prutová výztuž byla co nej-jednodušší a její výroba co nejméně pracná.

EXPERIMENTÁLNÍ PROGRAM

Působení vláknobetonu se nejčastěji zkouší na trácích zatížených čtyřbodovým ohybem. Sleduje se nárůst průhybu při rostoucím zatížení a měří se též šířka vznikající trhliny. V některých případech se i trámec oslabuje vrubem, aby se pozice trhliny definovala předem. Navržený a realizovaný experimentální program vycházel z těchto zvyklostí. Byly vyrobeny trávce o rozměrech 150 × 150 × 700 mm. Ty byly vyztuženy různým způsobem, varianty jsou uvedeny

Tab. 1 Varianty vyztužení trámů ■ Tab. 1 Alternative reinforcement of tested beams

Množství rozptýlené výztuže [kg/m ³]	Počet prutů betonářské výztuže o průměru R 8 mm			
0	0	1	2	3
40	0	1	2	3
60	0	1	2	3

Tab. 2 Složení referenční betonové směsi (bez drátků) ■ Tab. 2 Composition of the reference concrete mix (without fibres)

Složky betonu	Množství
CEM II 32,5 (B-S) R Hranice [kg/m ³]	400
DTK frakce 0/4 mm Tovačov [kg/m ³]	805
HTK frakce 4/8 mm Tovačov [kg/m ³]	150
HTK frakce 8/16 mm Hrabůvka [kg/m ³]	685
elektrárenský popílek Dětmorovice [kg/m ³]	80
přísada BASF Glenium 110 [kg/m ³]	3
voda [kg/m ³]	172

Tab. 3 Výsledky zkoušek na laboratorních tělesech u jednotlivých záměsů

■ Tab. 4 Average number of cracks and average crack width at the average loading level inducing deflection of 3 mm

Technický parametr	Označení záměsí					
	refer./1	40/1	60/1	refer./2	40/2	60/2
zjištěné množství rozptýlené výztuže [kg/m ³]		41,76	61,45		40,65	58,16
konzistence rozlítím po 10 min. [mm]	500	410	350	480	410	360
obsah vzduchu [%]	2,3	2,2	2,1	2	2	2,1
objemová hmotnost čerstvého betonu [kg/m ³]	2320	2360	2344	2296	2316	2340
krychelná pevnost v tlaku (f_{ck}) [Mpa] po:	2 dnech	17	18	19	16	16,5
	28 dnech	50	53	54	46	50
statický modul pružnosti [GPa]	30,5	30,5	31,5	30	32	31

v tab. 1. Vyztužení drátky se uvažovalo ve dvou množstvích 40 a 60 kg/m³ a klasické vyztužení se měnilo od jednoho do tří prutů. K tomu se zkoušely trámkové vyztužené pouze drátky nebo pouze klasicky.

Byla použita ocelová vlákna typu Arcelor HE 75/50 a prutová výztuž profilu 8 mm z oceli 10 505. Trámkové byly zatěžovány dvěma břemeny umístěnými ve třetinách rozpětí konstantní rychlostí 0,05 mm/min do vzniku první mikrotrhliny a pak rychlostí 0,2 mm/min do dosažení průhybu cca 6,5 mm.

BETON A JEHO VLASTNOSTI

Návrh betonové směsi vycházel ze zkušeností realizačního týmu s cílem navrhnout beton, který je vyrobitelný v reálných podmínkách (tzn. v běžné výrobě, nikoliv pouze v laboratoři) a kde je možné bez problémů dávkovat až 60 kg vláken na 1 m³ betonu. Složení směsi je uvedeno v tab. 2.

Výroba vzorků byla rozdělena do dvou dnů, aby bylo možné ověřit, zda výroba není příliš citlivá na konkrétní podmínky jednoho dne.

Dosažené parametry jednotlivých záměsů jsou uvedeny v tab. 3. Referenční beton je prostý bez drátkové výztuže. Další sloupce označené 40 resp. 60 patří k betonu s 40 resp. 60 kg drátků na 1 m³ betonu. Číslo pod lomítkem (1 nebo 2) znamená záměs z prvního nebo druhého dne.

Z výsledků plyne, že jednotlivé sledované parametry, zejména pevnosti a moduly pružnosti, vykazují malé odchylky a že tedy směs je dostatečně homogenní. U referenční směsi bez drátků je patrná největší odchylka, pevnost 46 MPa ve stáří 28 dnů je nejnižší dosažená hodnota vůbec. Je patrný menší vliv drátků na nárůst pevnosti v tlaku, rozdíly u směsí s 40 a 60 kg drátků jsou minimální. U modulu pružnosti se vliv drátků prakticky neprojevuje.

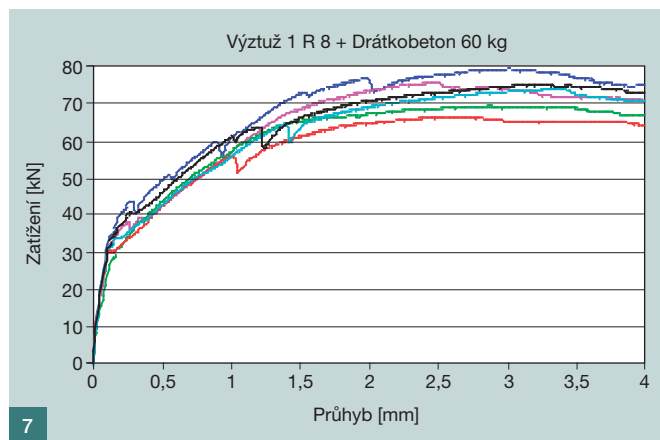
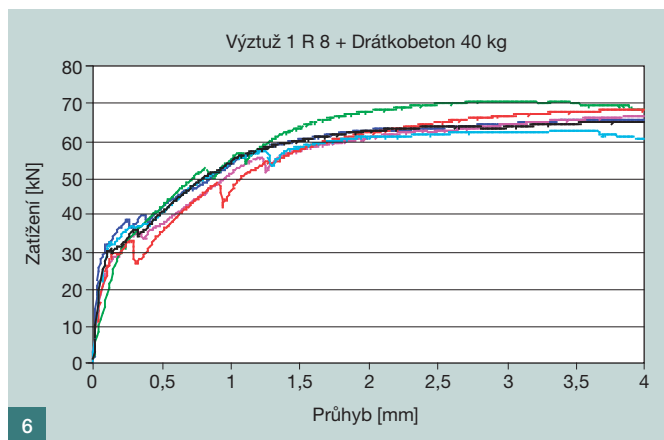
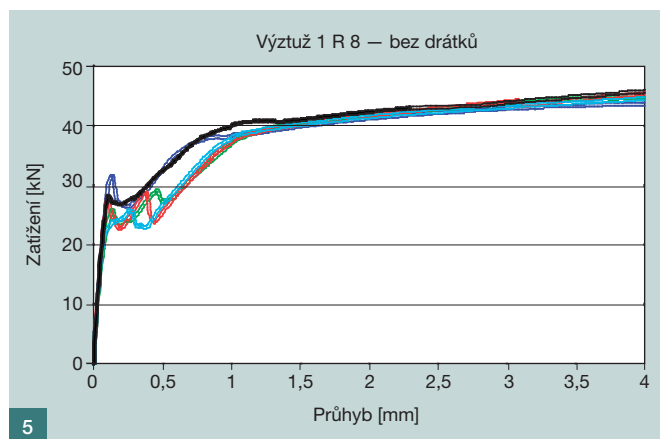
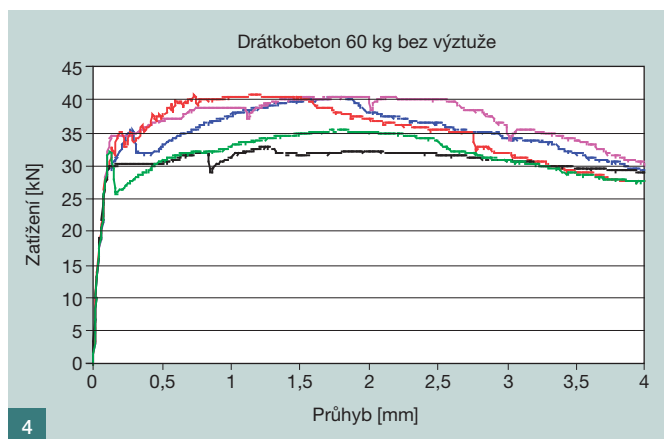
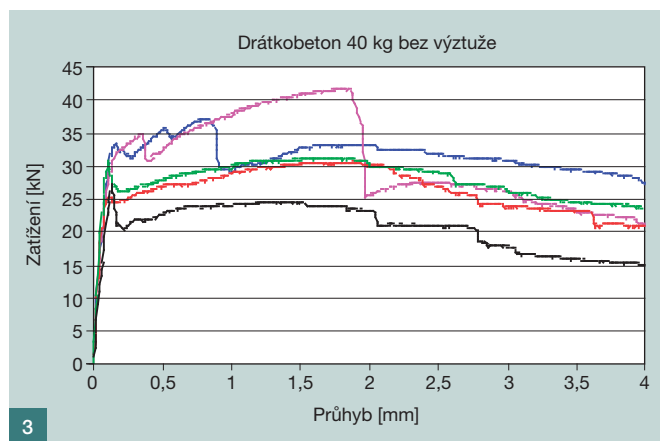
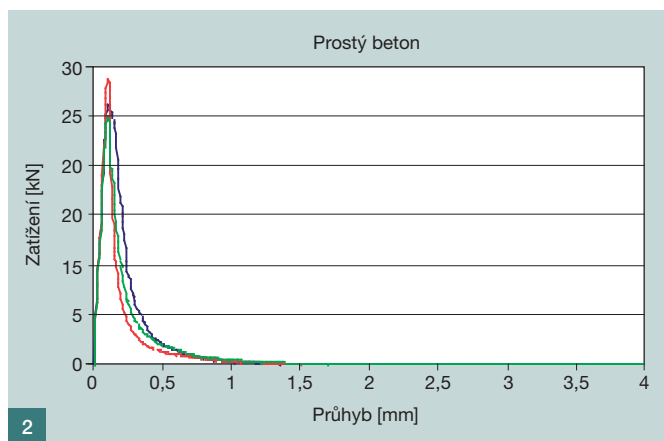
VÝSLEDKY EXPERIMENTŮ

Trámkové o standardních rozměrech, které byly použity i v popisovaném experimentálním programu představují minimální zkušební tělesa. Rozměr příčného řezu (150 mm) je volen s ohledem na velikost zrn kameniva betonu. Při menších roz-

Obr. 1 Test trámku čtyřbodovým ohybem ■ Fig. 1 Four point bending test of the beam



měrech by již materiál nebylo možné považovat za homogenní, významně by vzrostl vliv rozmístění hrubých zrn kameniva. Délka trámů je dána možnostmi manipulace a jejich tíhou. Poměr výšky a rozpětí trámů $150/600 = 1/4$ je považován za hraniční s ohledem na trámkové působení prvku. Zkušební trámkové jsou podstatně vyšší vzhledem k rozpětí než běžné betonové konstrukce, kde je tento poměr 1/10 až 1/30. Proto se stává, že porušení relativně vysokých zkušebních trámů může nastat jiným způsobem než čistým ohybem, např. kombinací ohybu a smyku, nebo účinkem hlavních napětí v místech s menším ohybovým momentem, což



není typické pro běžné trémové prvky. Dále výsledky zkoušek závisí na rychlosti zatěžování. Poměrně pomalé zatěžování na realizovaných experimentech vedlo k zdánlivě vyšší účinnosti vláknové výztuže.

Obr. 1 ukazuje zkoušený vzorek v zatěžovacím stroji. Zkouška je řízena rychlostí průhybu, je proto možné sledovat i sestupnou větev pracovních diagramů. Stroj přitom redukuje zatížení, aby nedošlo k náhlému kolapsu trémku.

Následující diagramy ilustrují působení jednotlivých trémků při postupném zatěžování.

Obr. 2 odpovídá trémku, který je vyroben pouze z prostého betonu. Únosnost trémku při porušení čistým ohybem se pohybuje od 25 do 28 kN. Je patrné, že neexistuje prakticky žádná sestupná větev, což odpovídá křehkému porušení prvku.

Obr. 3 a 4 znázorňují působení betonu vyztuženého pouze drátky a to v množství 40 a 60 kg/m³. Trémek se 40 kg drátků vykazuje značný rozptyl. Tento rozptyl je mimo jiné

Obr. 2 Diagram prostého betonu ■ Fig. 2 Load – deflection diagram of the plain concrete

Obr. 3 Diagram drátkobetonu 40 kg ■ Fig. 3 Load – deflection diagram of FRC 40 kg

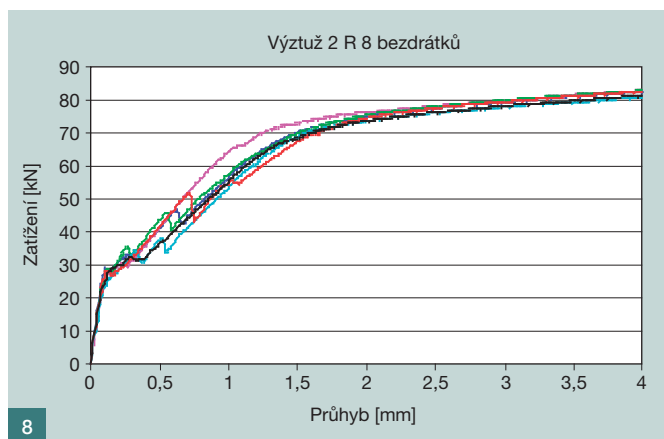
Obr. 4 Diagram drátkobetonu 60 kg ■ Fig. 4 Load – deflection diagram of FRC 60 kg

Obr. 5 Diagram železobetonu 1 prut R 8 ■ Fig. 5 Load – deflection diagram of RC reinforced with 1 R 8

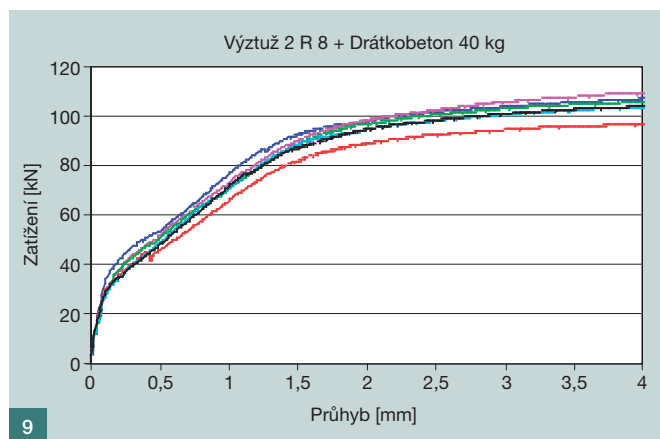
Obr. 6 Kombinované vyztužení 1 + 40 ■ Fig. 6 Combined reinforcement 1 + 40

Obr. 7 Kombinované vyztužení 1 + 60 ■ Fig. 7 Combined reinforcement 1 + 60

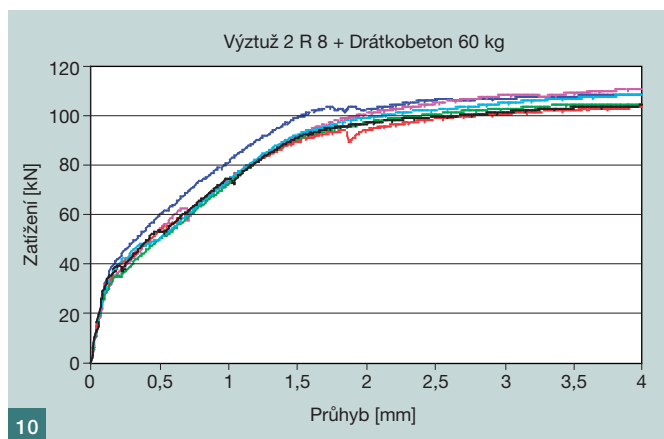
těž ovlivněn rozdělením drátků v objemu prvku. Homogenita rozptýlené výztuže je faktor, který závisí na kvalitě provádění a představuje jedno z běžných rizik, která se objevují při výstavbě. Průměrná únosnost na mezi vzniku trhlin je vyšší než u trémku z prostého betonu, asi 30 kN, je patr-



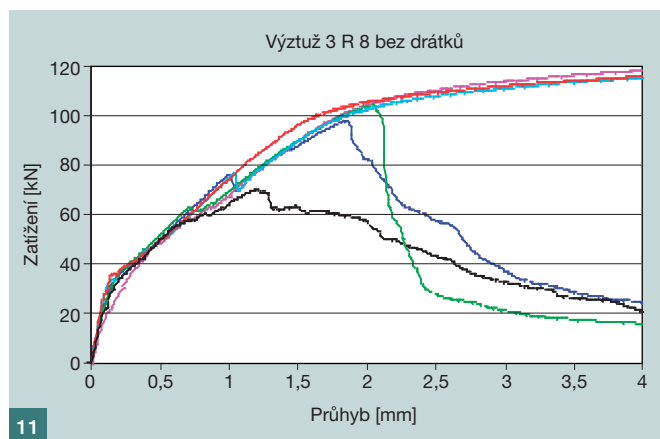
8



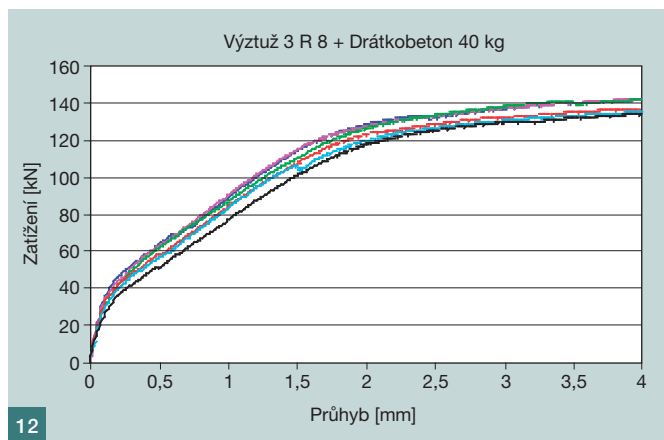
9



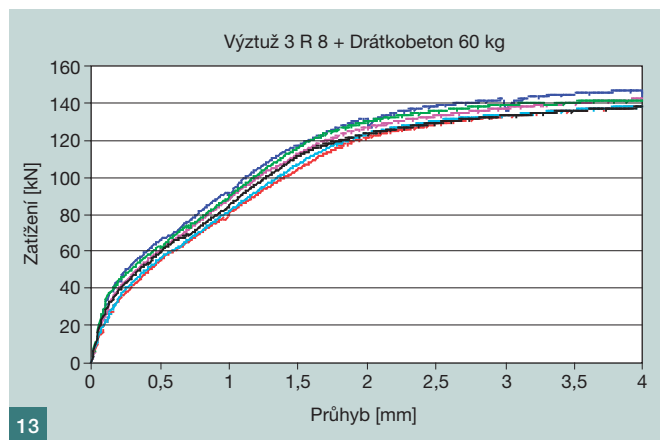
10



11



12



13

Obr. 8 Diagram železobetonu 2 R 8 ■ Fig. 8 Load deflection diagram of RC reinforce d with 2 R 8

Obr. 9 Kombinované vyztužení 2 + 40 ■ Fig. 9 Combined reinforcement 2 + 40

Obr. 10 Kombinované vyztužení 2 + 60 ■ Fig. 10 Combined reinforcement 2 + 60

Obr. 11 Diagram železobetonu 3 R 8 ■ Fig. 11 Load – deflection diagram of RC reinforced with 3 R 8

Obr. 12 Kombinované vyztužení 3 + 40 ■ Fig. 12 Combined reinforcement 3 + 40

Obr. 13 Kombinované vyztužení 3 + 60 ■ Fig. 13 Combined reinforcement 3 + 60

ný menší vliv drátků. U trámku č. 2 (fialová čára na obr. 3) došlo opět ke vzniku trhliny mimo oblast mezi břemeny, což vyústilo v skokový průběh diagramu. U trámků s 60 kg drátků je únosnost při vzniku trhlin ještě mírně vyšší, cca 33 kN. U některých prvků je patrné zpevnění při přitížení nad mez

vzniku trhlin. Rozptyl křivek je menší než u trámků se 40 kg drátků.

Na obr. 5 je odezva trámku bez drátků s jedním výztužným profilem 8 mm. Rozptyl výsledků je malý až na oblast kolem vzniku první trhliny. Tam je odezva závislá na vlastnostech betonu včetně vlivů imperfekcí. Jsou jasně patrné jednotlivé fáze porušování prvku, působení výztuže v betonu s trhlínami a dále zlom ukazující postupnou plastifikaci výztuže. V oblasti velkých průhybů je již svazek křivek velmi úzký, neboť jejich rozptyl je dán převážně tuhostí tlačенého betonu. Na konci diagramu ještě není dosaženo pevnosti betonu a vlastnosti oceli jsou velmi rovnoměrné.

Obr. 6 a 7 ukazují působení drátkobetonu se 40 a 60 kg drátků při současném vyztužení jedním prutem profilu 8 mm. Prut má velký význam v tom, že jednoznačně působí na snížení rozptylu dosažených výsledků. Pásmo křivek se výrazně zúžilo. V případě obou dávkování drátků je patrné zpevnění po vzniku trhliny. Úroveň zatížení při vzniku trh-

lin je přibližně stejná jako v případě drátkobetonových trámů bez výztužného prutu. Je zřejmý jednoznačný přínos doplnění jednoho prutu pro odezvu trámů. Další obrázky 8 až 10 ukazují příznivý vliv dalšího prutu v trácích. Svazek křivek se zužuje, tj. rozptyl odezvy jednotlivých trámů je minimální. Současně se zvyšuje celková únosnost.

Obr. 11 až 13 dokumentují poslední sérii trámů se třemi pruty profilu 8 mm. Na obr. 11 je vidět, že tři trámy vykazují ztrátu únosnosti výrazně dříve než zbývající tři trámy. Ztráta únosnosti byla způsobena porušením trámů smykovou trhlinou v místech mezi podporou a břemenem. To bylo možné proto, že trámy mají pouze ohybovou výztuž a žádnou smykovou. Při vyšších úrovních zatížení umožněných silnějším vyztužením na ohyb takové porušení lze očekávat.

Obr. 12 a 13 pak dokazují, že drátky porušení smykem vyloučily, neboť působí též jako smyková výztuž, přestože zatížení na mezi únosnosti se zvýšilo ze 118 kN u klasicky vyztuženého trámku na cca 140 kN u trámku se 40 kg drátků a u trámku s 60 kg drátků. Při velkých deformacích a silnějším vyztužení je ale již význam drátků pro zvýšení únosnosti minimální.

Při experimentech byl též sledován vliv počtu trhlin při určitých stadiích porušení trámů. V tab. 4 je zaznamenán průměrný počet trhlin v trámku, průměrná šířka trhlin v trámku a zatížení při průhybu 3 mm. Průhyb 3 mm odpovídá sice 1/200 rozpětí, ale je to relativně velký průhyb, který by se neměl objevit v mezním stavu použitelnosti. To je zřejmé i z šířky trhlin, která dosahuje 2 až 3 mm, což je cca 10x více než připouští návrhové normy. Z tabulky plyne jasný přínos prutové výztuže. Zatímco v trácích vyztužených pouze drátky byly pozorovány jen dvě trhliny, přidáním jednoho prutu se jejich počet zvedl na pět až sedm. Jejich šířka se příliš nemění, ale možné zatížení výrazně vzroste. Málo ovlivněná šířka největší trhliny je dána tím, že se trámy posuzují při stejném průhybu. Podstatnější snížení šířky trhlin lze pozorovat až při vyšších stupních vyztužení prutovou výztuží (tři profily). Stupeň vyztužení prutovou výztuží je při jednom prutu 0,22 %, při dvou prutech 0,44 % a při třech profilech 0,67 %, tj. velmi malý. Vyztužení jedním prutem odpovídá 17,3 kg výztuže na 1 m³ betonu. Výztuž ze tří prutů pak činí 52 kg výztuže na 1 m³ betonu.

ZÁVĚR

V rámci studie byly zkoumány případy trámů zatížených čtyřbodovým ohybem při různém způsobu vyztužení. Od prostého betonu až po trámy vyztužené třemi pruty a 60 kg drátků (na 1 m³ betonu). Zatímco drátková výztuž má značný rozptyl v odezvě identických trámů, přidáním malého množství prutové výztuže se tento rozptyl velmi redukuje. Zároveň se zvyšuje počet trhlin, což je příznivější z hlediska postupného porušování konstrukce, a dále se významně zvyšuje únosnost, tj. bezpečnost konstrukce.

Tab. 4 Průměrný počet a šířka trhlin a průměrné zatížení trámku při průhybu 3 mm ■ Tab. 4 Average number of cracks and average crack width at the average loading level inducing deflection of 3 mm

Vyztužení trámku	Průměrný počet trhlin	Průměrná šířka trhliny [mm]	Průměrné zatížení [kN]
Prostý beton	1	Průhyb 3 mm nebyl dosažen	0
Drátky 40 kg	2	3,64	25
Drátky 60 kg	2	2,7	32,5
1 Ø 8	2	2,94	43,5
1 Ø 8 + 40 kg drátků	5	2,78	65,2
1 Ø 8 + 60 kg drátků	7	2,9	72,6
2 Ø 8	4	2,94	79,4
2 Ø 8 + 40 kg drátků	6	2,88	101,7
2 Ø 8 + 60 kg drátků	6	2,27	104,2
3 Ø 8	5	3,08	112,2
3 Ø 8 + 40 kg drátků	7	2,39	134,4
3 Ø 8 + 60 kg drátků	8	2,3	135,2

U trámů více vyztužených klasickou ohybovou výztuží došlo k porušení smykem. Přidaná drátková výztuž toto porušení eliminuje. Přestože odezva trámů s prutovou výztuží se ukazuje jako velmi příznivá, uvážíme-li spotřebované množství oceli a únosnost trámů, má drátková výztuž své opodstatnění. Technologické důvody při výrobě konstrukcí vedou k dalším úsporám, které pak zvýhodňují rozptýlenou výztuž.

Cílem článku je upozornit na kladné přínosy i malého množství prutové výztuže v drátkobetonovém prvku. Přidáním malého množství prutů do nejvíce namáhané části konstrukce se dá využít drátkobeton a zároveň získat podstatné zjednodušení výroby. Takto navržená konstrukce umožňuje získat technologické výhody při současně příznivém statickém působení.

Experimenty byly provedeny za podpory MŠMT ČR v rámci Výzkumného centra CIDEAS (Projekt č. 1M0579).

Prof. Ing. Jan L. Vítek, CSc.

Metrostav, a. s.

Koželužská 2246, 180 00 Praha 8

tel.: 266 709 317, fax: 266 709 193

e-mail: vitek@metrostav.cz



Ing. Stanislav Smiřinský

Betotech, s. r. o.

Beroun 660, 266 01 Beroun

tel.: 311 644 783, fax: 311 644 780

e-mail: smirinsky@betotech.cz



VÍTE, ŽE

Vlákna používali k vyztužení křehkých materiálů již staří Egypťané a Babyloňané. Nepálené cihly byly vyráběny z nilského bláta a sekané slámy. Slaměná vlákna měla i funkci chemickou – tlení vylepšovalo vazebné vlastnosti směsi. Přidání slámy do hlíny pro výrobu cihel vylepšilo až třikrát pevnost cihel. Nepálené cihly z hlíny mají pevnosti cca 0,5 MPa, cihly se slámou až 2 MPa.

V historii se vyztužování kompozitů vlákny používalo v mnoha obměnách. Například omítky bývaly vyztužovány koňskými žíněmi.

Problémy návrhu betonové směsi a možnostmi vyztužení rozptýlenou výztuží se zabývají i umělci. Sochař Vladimír Preclík prý vyztužil svůj betonový portrét Vladislava Vančury ocelovými pilinami.