

**České vysoké učení technické v Praze
Fakulta stavební**

**Czech Technical University in Prague
Faculty of Civil Engineering**

Ing. Jitka Vašková, CSc.

**Faktory ovlivňující charakter porušení betonových prvků při
namáhání ohybem**

Failure mode of bended concrete members

Summary

Appropriate reliability is one of the essential requirements in design of load-bearing structures. Structures and structural members are controlled in terms of load-carrying capacity and serviceability reliability conditions according to design specifications. However an important factor is a failure mode in case of over-loading or accidental load. Sudden failure without previous announcing of coming failure is unallowable.

The essay is focused on bended concrete members (beams, one-way slabs), where failure is caused predominantly by bending moments. Failure of plain un-reinforced concrete member is brittle; designing of those members is not allowed according to principles of current European codes. The forthcoming failure shall be noticed by pronounced deformations. In addition the codes give principles that prevent progressive failure of the structure in case of failure of structural parts.

Failure of unreinforced elements is described in particular chapters of the essay. Methods of preventing of sudden failure without previous marked deformations and wide cracks are presented.

Principles of reinforcing with classical rebar reinforcement are described. Significant effect on ductility have besides amount and layout of reinforcement also ductility class of rebar reinforcement. The essay introduces advantages of utilisation of fibre concrete including examples of results of experimental research. Aspects of application of other new materials for concrete structures and importance of durability are mentioned in conclusion.

Souhrn

Dostatečná spolehlivost nosných konstrukcí je jedním ze základních požadavků při navrhování. V souladu s předpisy pro navrhování se posuzují podmínky spolehlivosti z hlediska únosnosti a použitelnosti. Důležitým faktorem je i však i charakter porušení při přetížení nebo mimořádné situaci, nežádoucí je porušení náhlé, bez předchozího varování.

Práce je zaměřena na betonové ohýbané prvky (nosníky, nosníkové desky), kde porušení je vyvoláno převážně účinkem ohybových momentů. Porušení prvku z obyčejného nevyztuženého betonu ohybem je křehké, podle zásad současných evropských norem je nepřijatelné takové prvky navrhovat. Kládn je důraz na navrhování takových prvků, které před ztrátou únosnosti varují výraznými deformacemi. Kromě charakteru porušení jednotlivých prvků jsou sledovány i zásady pro zabránění progresivnímu kolapsu konstrukce po selhání dílčích částí.

V jednotlivých kapitolách předložené práce je popsáno porušení nevyztužených prvků a dále jsou uvedeny způsoby, jak bránit náhlému porušení betonových nosníků bez předchozích výrazných deformací a širokých trhlin.

Uvedeny jsou zásady pro vyztužování tradiční betonářskou výztuží. Kromě množství a uspořádání výztuže má významný vliv na duktilitu ohýbaných prvků a charakter porušení též třída tažnosti výztužné oceli. Práce dále uvádí přínosy využití vláknobetonu včetně příkladů výsledků experimentálního výzkumu. V závěru jsou zmíněny i aspekty aplikace dalších nových materiálů pro betonové konstrukce a důležitost faktoru trvanlivosti.

Klíčová slova:

beton, betonové konstrukce, železobeton, výztužná ocel, vláknobeton, ohyb, smyk, charakter porušení, experimentální ověřování

Keywords:

Concrete, concrete structures, reinforced concrete, reinforcing steel, fibre reinforced concrete, bending, shear, failure mode, testing

Obsah:

| | | |
|-----|---|----|
| 1 | Úvod | 6 |
| 2 | Porušení betonu | 6 |
| 3 | Vyztužené prvky | 9 |
| 3.1 | Ohybové a smykové porušení | 9 |
| 3.2 | Vliv množství tahové výztuže | 11 |
| 3.3 | Vliv tlakové výztuže | 12 |
| 3.4 | Vliv typu výztuže | 13 |
| 4 | Využití konstrukčního vláknobetonu | 17 |
| 4.1 | Prvky z vláknobetonu bez betonářské výztuže | 18 |
| 4.2 | Prvky z vyztuženého vláknobetonu | 19 |
| 5 | Vysokohodnotný beton | 22 |
| 6 | Závěr | 23 |
| | Literatura | 24 |
| | Ing. Jitka Vašková, CSc. | 26 |

1 Úvod

Beton je v současné době je jedním z nejužívanějších stavebních materiálů pro nosné konstrukce. Je to tradiční konstrukční materiál, novodobé aplikace i vývoj teorie navrhování betonových konstrukcí se datují již od poloviny 19.století. Ovšem v posledních několika desetiletích vlivem využití stavební chemie pro aplikace nových komponent ve složení betonu a též nových technologií jsou beton a betonové konstrukce stále předmětem základního výzkumu v oblasti materiálů i analýzy chování konstrukčních prvků. Tím se mění i tradiční pohled a zásady pro navrhování konstrukcí.

Při navrhování konstrukčních prvků bývá dominantním kritériem jejich únosnost – odpor konstrukce proti kolapsu. Ovšem z hlediska bezpečnosti je v současných předpisech kladen důraz též na způsob porušení při přetížení – zda ke kolapsu konstrukce dojde náhle, bez předchozího varování nebo až po vzniku zřetelných deformací, trhlin apod. Prvně uvedený způsob – křehké porušení – je nežádoucí, ohrožuje zdraví a životy uživatelů i ekonomické ztráty,.

Práce je zaměřena na ohýbané betonové prvky (nosníky, nosníkové desky), kde porušení je vyvoláno převážně účinkem ohybových momentů. Porušení prvku z obyčejného nevyztuženého betonu ohybem je křehké. Proto již od počátku rozvoje novodobých betonových konstrukcí je uplatňován beton vyztužený, kde výztuž nejen zvyšuje únosnost v ohybu, ale při dodržení zásad navrhování odstraní nebezpečí křehkého porušení.

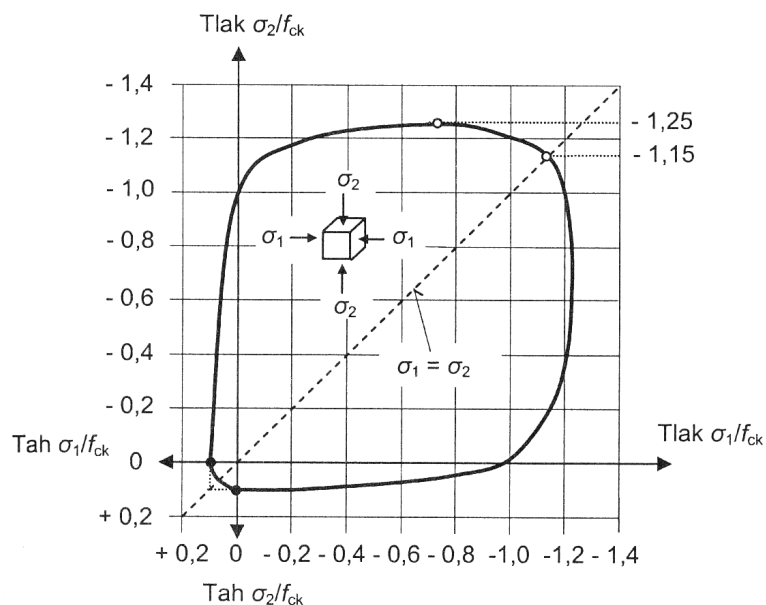
Charakter porušení kromě různých typů vyztužení ovlivňují i aplikace nových materiálů pro betonové konstrukce (vláknobeton, vysokohodnotné a ultravysokopevnostní betony), významný je též faktor trvanlivosti.

2 Porušení betonu

Beton je kompozitní materiál, plnivem je kamenivo (přírodní nebo umělé), pojivem nejčastěji cement. Ve struktuře ztvrdlého betonu jsou tedy zrna kameniva, ztvrdlý cementový tmel (cementový kámen) a póry. Porušování nastává vzájemným posouváním částic až dojde k selhání soudržnosti. Porušení je proto závislé na současném působení normálových a tangenciálních napětí (Mohr - Guestova teorie).

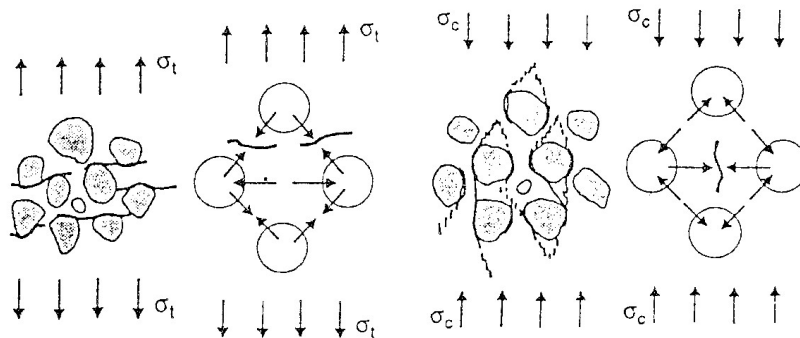
Pevností betonu se označuje mezní napětí, při kterém dojde ke globálnímu porušení soudržnosti.

V konstrukčních prvcích vzniká víceosý stav napjatosti, pevnost při víceosé napjatosti se znázorňuje plochou porušení, pevnost při dvojosém namáhání ukazuje obr.2.1.



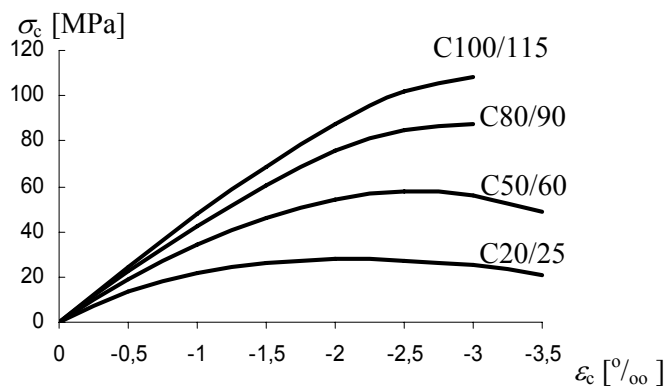
Obr. 2.1 Pevnost betonu při dvojosém namáhání [Bilčík a kol.,2008]

Výsledné pevnosti betonu pro jednotlivé typy namáhání (jednoosý i víceosý tlak, tah, smyk) nejsou závislé jednoduchým způsobem pouze na vlastnostech jednotlivých složek a jejich objemového podílu v kompozitu, významný vliv má vzájemné interaktivní působení složek, mechanické vlastnosti rozhraní. Beton má většinou nižší pevnost než jsou pevnosti kameniva a cementového kamene. Působení obou složek závisí na vzájemné přilnavosti a soudržnosti. Jedná se o mechanickou přilnavost, přímou vazbu v krystalických mřížkách, kapilární a chemické vazby. Působení tlakových a tahových napětí vyvolává rozdílnou orientaci trhlinek (obr.2.2). Defekty struktury vedou k tvorbě mikrotrhlinek a jejich šíření. Spojením mikrotrhlin vzniká makrotrhlina (šíře cca 0,1mm) a dojde ke zlomu [Pytlík, 2000].



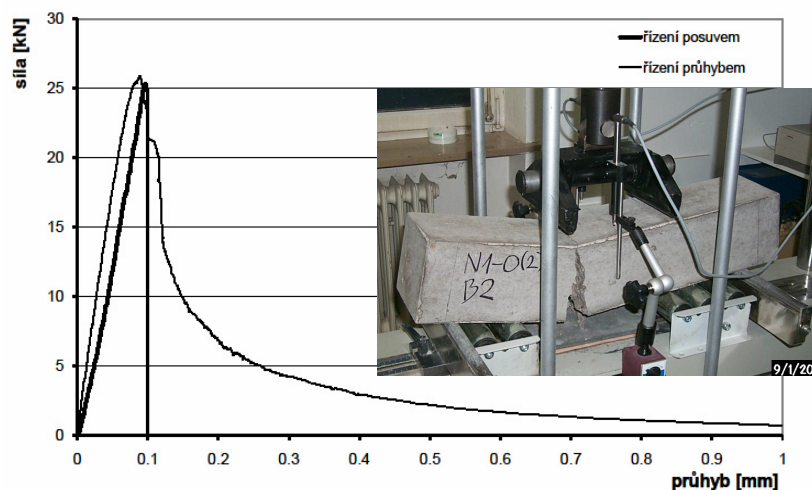
Obr.2.2 Mikromechanismus porušení betonu účinkem namáhání tahem σ_t a tlakem σ_c [Pytlík, 2000]

Přilnavost i soudržnost obou základních složek ztvrdlého betonu a tím i jeho výsledné pevnostní charakteristiky jsou závislé na mnoha faktorech – vlastnostech a množství složek v receptuře, technologii zpracování i ošetřování. Ovšem u běžného betonu obecně platí, že pevnost v osovém tahu je oproti pevnosti v tlaku malá (cca 1/20 až 1/10 pevnosti v tlaku). Betony obvyklého složení (s cementovým pojivem a běžným kamenivem) jsou velmi křehké, deformace před porušením jsou malé. Hodnota mezního poměrného přetvoření při namáhání osovým tlakem je u běžných betonů cca 3 až 4 ‰ (obr.2.3), při tahovém namáhání ještě řádově nižší.



Obr.2.3 Pracovní diagramy betonu v tlaku

Z uvedeného vyplývá, že pokud je při zatěžování betonového prvku dosaženo mezních hodnot přetvoření a napětí (pevnosti betonu), dochází k náhlému porušení. U ohýbaných prvků (nosníky, nosníkové desky) dochází při zvyšování zatížení ke vzniku tahové makrotrhliny, u nevyztuženého prvku k okamžité destrukci křehkým lomem. U nosníků běžných průřezů, štíhlostí a zatížení je rozhodující dosažení pevnosti betonu v tahu v tažených vláknech průřezu s maximálním ohybovým momentem. Porušení při zkoušce betonového trámku ohybem (obr.2.4) je ovlivněno též rychlostí a režimem zatěžování. Ze záznamu závislosti zatížení – průhyb na obrázku je patrný rozdíl podle řízení zkoušky průhybem nebo posunem pístu zatěžovacího zařízení.



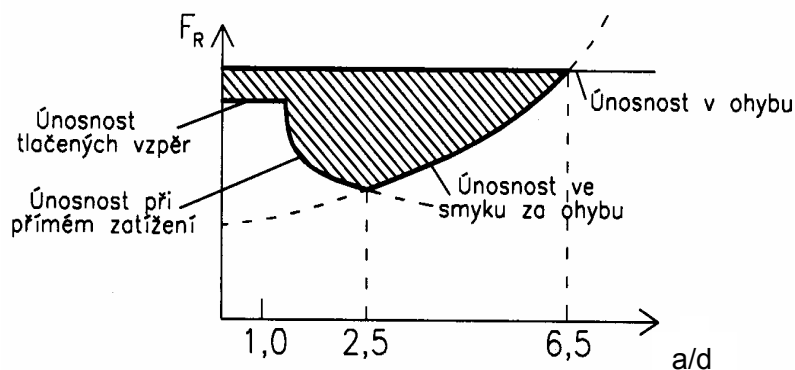
Obr.2.4 Zkouška betonového trámku ohybem – porušení po vzniku makrotrhliny [Petřík, 2004]

3 Vyztužené prvky

3.1 Ohybové a smykové porušení

U vyztužených ohýbaných prvků přenáší po vzniku makrotrhliny v tažené části kritického průřezu tahové síly podélná výztuž., obvykle pruty z betonářské oceli. Při dalším zvyšování zatížení po

vzniku první trhliny vznikají další trhliny ohybové a rozvíjejí se trhliny smykové. Tažený beton je prakticky vyloučen ze spolupůsobení, tahovou sílu přebírá výztuž. Spolupůsobení tahové výztuže s betonem je zajištěno neporušeným betonem v tažené části nosníku mezi trhlinami. U betonových prvků vyztužených pouze podélnou tahovou výztuží může rozhodovat smykové nebo ohybové porušení. Pro způsob porušení je rozhodující hodnota tzv. **smykové štíhlosti**, závislá na způsobu zatížení prvku a geometrii (účinné výšce průřezu d). Smyková štíhlost prostého nosníku zatíženého symetricky dvěma silami ve vzdálenostech a od podpor (obr. 3.1) smykovou štíhlost vyjadřuje poměr a/d [Procházka a kol.2009]. Typ porušení prvků bez smykové výztuže v závislosti na smykové štíhlosti uvádí obr.3.1.



Obr.3.1 Únosnost betonového prvku bez smykové výztuže v závislosti na smykové štíhlosti a/d [Procházka a kol.2009]

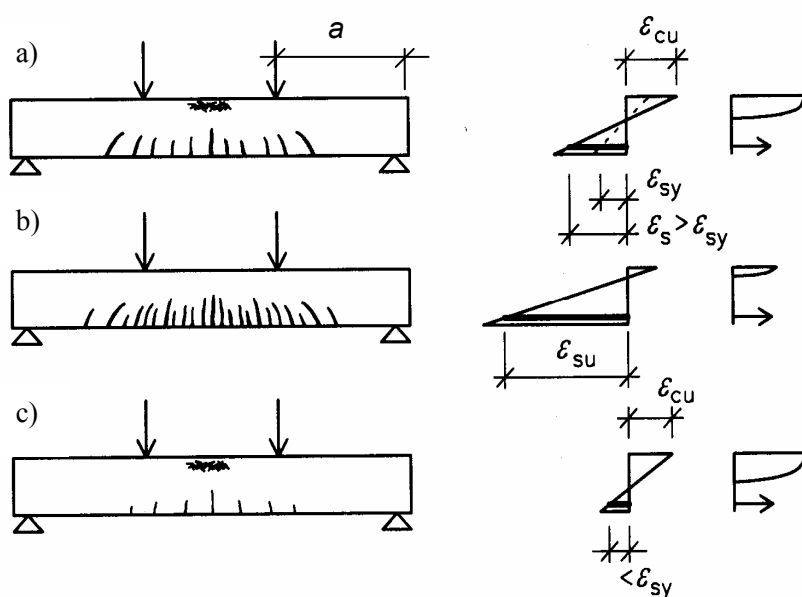
Smykové porušení prvků bez smykového vyztužení (ve smyku za ohybu na konci smykové trhliny i drcení tlačných vzpěr) je křehké. Proto se prvky s výjimkou desek navrhují alespoň s konstrukční smykovou výztuží. Alternativou může být využití vláknobetonu (kap.4).

Mez **porušení ohybem** (únosnost v ohybu) nastane při dosažení mezního přetvoření alespoň v jednom z materiálů, betonu v tlaku a/nebo oceli v tahu). Chování prvku a způsob porušení ohybem závisí na množství tahové výztuže.

3.2 Vliv množství tahové výztuže

U vyztužených ohýbaných prvků přenáší po vzniku makrotrhliny v tažené části kritického průřezu tahové síly podélná výztuž. Pro vyztužení jsou obvykle užívány pruty z betonářské oceli. K náhlému porušení ohýbaného prvku nedojde, pokud je plocha tahové výztuže vyšší než minimální hodnota. Minimální výztuž musí spolehlivě převzít tahové síly, které před vznikem trhliny přenášel tažený beton. Proto **minimální plocha tahové výztuže** $A_{s,min}$ závisí na hodnotách tahové pevnosti betonu f_{ct} , meze kluzu výztužné oceli f_y a geometrii průřezu.

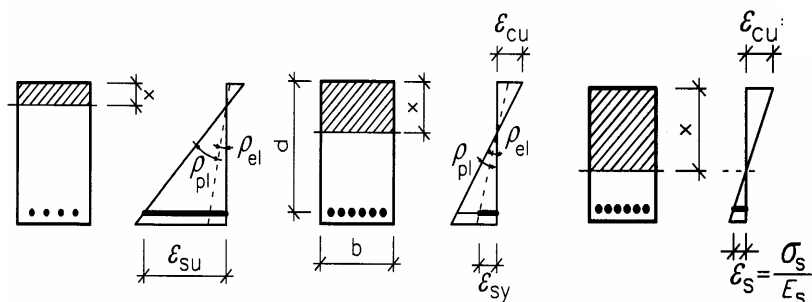
U prvků s běžným vyztužením dochází při zvyšování zatížení k dosažení meze kluzu výztužné oceli v kritickém průřezu dříve než je dosaženo mezního přetvoření v tlačeném betonu. Tahová výztuž vykazuje tedy plastické protažení, v kritické oblasti se objeví široké trhliny a průhyb nosníku je před porušením zřetelný. K porušení tlačeného betonu nebo přetržení ocelových prutů dochází po předchozím plastickém protažení výztuže a je porušení označováno jako **tahové porušení** (obr.3.2 a,b)



Obr.3.2 Typy porušení železobetonového nosníku ohybem
a,b) tahové (ocel za meze kluzu) c) tlakové (nedosaženo meze kluzu)

Příčinou porušení silně vyztužených prvků je dosažení mezního přetvoření v krajních vláknech tlačného betonu bez předchozího dosažení meze kluzu ve výztuži (obr.3.2c). K porušení dochází drcením tlačného betonu bez plastického protažení výztuže, konstrukce před kolapsem nevaruje výraznými průhyby a trhlinami. Uvedený typ porušení je označován jako **tlakové porušení**.

Pro případ nosníku stejné geometrie a kvality betonu i oceli rozhoduje o charakteru porušení množství tahové výztuže a tomu odpovídající výška tlačné oblasti na mezi únosnosti (obr.3.3). Navrhovat silně vyztužené prvky (s porušením bez předchozích zřetelných průhybů a širokých trhlin) se nedoporučuje, omezující podmínky jsou v normě formulovány jako omezení poměrné výšky tlačné oblasti x/d .



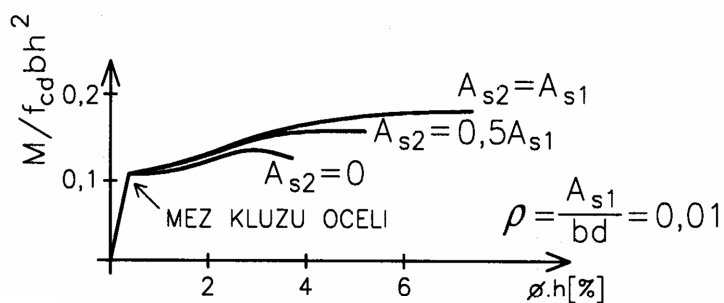
Obr.3.3 Přetvoření v MSÚ průřezů s různým stupněm vyztužení

Z obr. 3.3 je patrné, že na výšce tlačné oblasti průřezu při dosažení MSÚ je přímo závislá **schopnost plastického natočení** ρ_{pl} v oblastech vznikajících plastických kloubů staticky neurčitých konstrukcí. Při využití předpokladů plastického chování železobetonového prvku pro analýzu konstrukce nebo redistribuce účinků zatížení zjištěných lineární analýzou lze tedy dostatečnou rotační kapacitu oblastí plastických kloubů prokazovat též omezením hodnoty x/d .

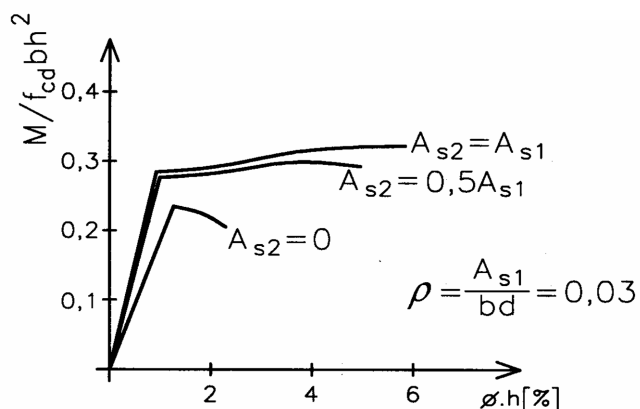
3.3 Vliv tlakové výztuže

Návrh výztuže do tlačné oblasti ohýbaných prvků snižuje výšku tlačné oblasti vyztuženého průřezu v MSÚ a tím příznivě ovlivňuje přetvoření (duktilitu) i schopnost plastického natočení (rotační kapacitu). U prvku běžně vyztuženého se zvyšuje přetvoření před

dosažením MSÚ (obr. 3.4), u prvků silně vyztužených se návrhem tlačené výztuže může změnit charakter porušení z tlakového na tahové (obr.3.5). Obr.3.4 a 3.5 podle [Wight, MacGregor 2009].



Obr.3.4 Vliv množství tlakové výztuže A_{s2} na duktilitu nosníku běžně vyztuženého (stupeň vyztužení tahovou výztuží $\rho = 1\%$)

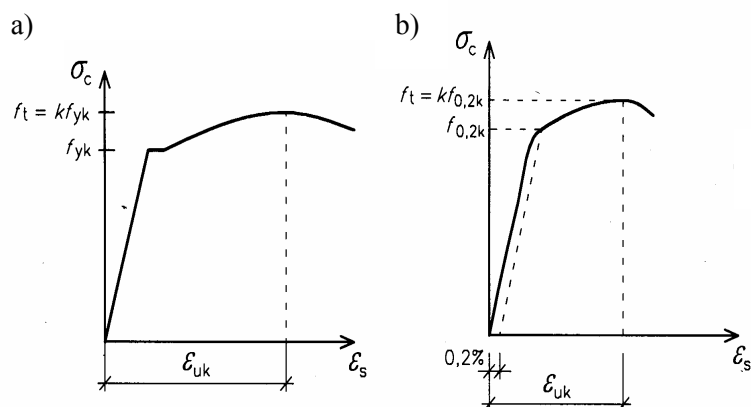


Obr.3.5 Vliv množství tlakové výztuže A_{s2} na charakter porušení a duktilitu u nosníku silně vyztuženého (stupeň vyztužení tahovou výztuží $\rho = 3\%$)

3.4 Vliv typu výztuže

Skutečnosti, uvedené v předchozích odstavcích, jsou zakotveny v ustanoveních norem pro navrhování. Na tato pravidla se však v praxi nelze zcela spolehnout. Tradičně byla pro vyztužování betonových konstrukcí aplikována měkká uhlíková ocel za tepla

tvářená s vyznačenou mezí kluzu, jejíž přetvoření je výrazné (obr.3.6a). V poslední době je však jako betonářská výztuž hojně používána ocel za studena tvářená, bez vyznačené meze kluzu (obr.3.6b). Při zatěžování prvku pak může dojít k náhlému přetržení ocelových prutů bez výrazného varování i v případě dodržení zásad minimálního vyztužení.



Obr. 3.6 Pracovní diagramy ocelí a) s vyznačenou mezí kluzu b) s mezí 0,2

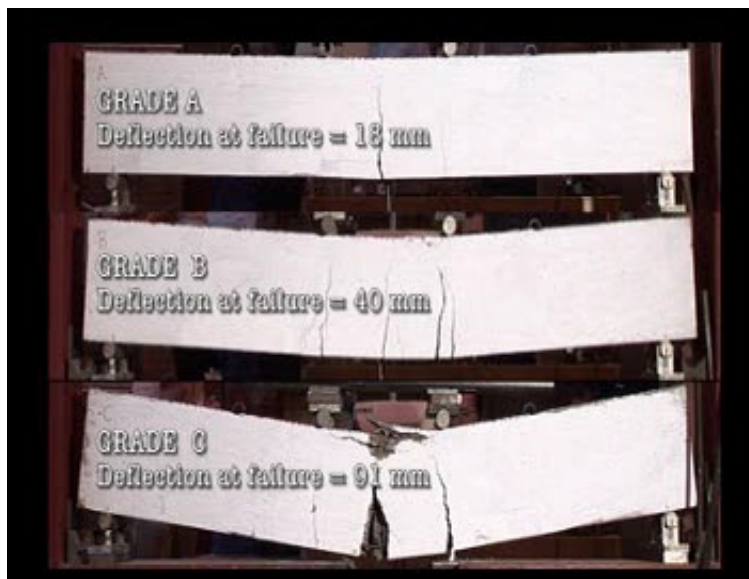
Evropské normy uvádějí **třídy tažnosti ocelí**, zatřídění podle ČSN EN 1992-1-1 je patrné z tabulky 3.1. Kromě hodnot poměrného protažení ϵ_{uk} je významný i poměr k hodnot pevnosti a meze kluzu.

Tab.3.1 Třídy tažnosti výztužných ocelí podle ČSN EN 1992-1-1

| Třída tažnosti | A | B | C |
|---|-------------|-------------|-------------------------|
| Charakteristická mez kluzu f_{yk} , popř. $f_{0,2k}$ v MPa | 400 až 600 | | |
| Minimální hodnota $k=(f_t/f_y)_k$ | $\geq 1,05$ | $\geq 1,08$ | $\geq 1,15$ $< 1,35$ |
| Charakteristická hodnota ϵ_{uk} (%) | $\geq 2,5$ | $\geq 5,0$ | $\geq 7,5$ |

Ocel třídy A má smluvní mez kluzu, ocel třídy B má vyznačenou mez kluzu. Podle normy ČSN 42 0139 Ocel pro výztuž do betonu z r.2007 je ocel B500B srovnatelná s ocelí dříve označovanou 10505.9. Ocel třídy C není u nás běžně používána, není ani uvedena v přehledu citované normy. Přínosy vysoce tažné oceli třídy C prokazují např. podklady polské instituce CPJS (Centrum Promocji

Jakosti Stali), které dokladují výsledky z experimentů a praktického uplatnění betonářské výztuže Epstal. Příkladem je obr.3.7, který ukazuje výsledné průhyby po zkoušce ohybem trámů stejné geometrie, kvality betonu a výztuže shodné plochy, ovšem z oceli různé třídy tažnosti.



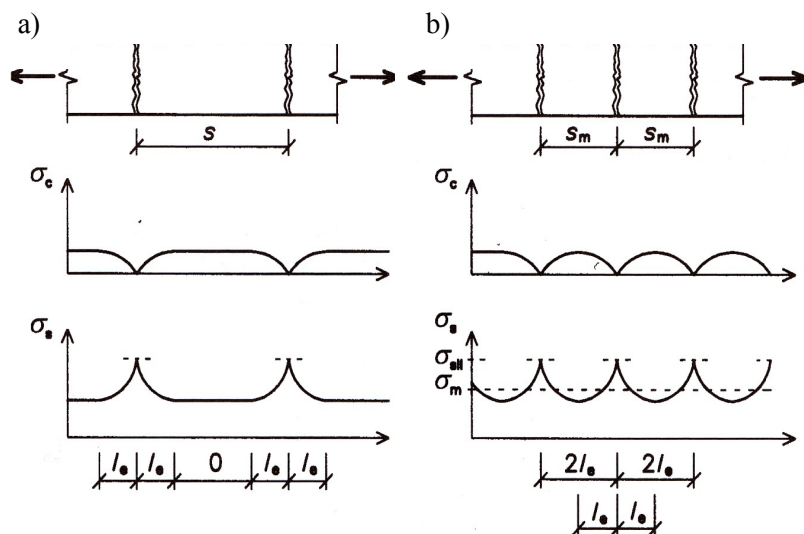
Obr.3.7 Trámky vyztužené ocelí B500 různé třídy tažnosti (A, B, C) po zkoušce ohybem s výslednými hodnotami průhybu [CPJS Warszawa]

Podstatný vliv tažnosti oceli byl prokázán i při zkouškách trámů z vyztuženého vláknobetonu v rámci výzkumných grantů GAČR 103/03/0837, 103/07/1275. Zkoušeny byly prvky vyztužené různými typy ocelí včetně polské oceli třídy C Epstal – např. obr.4.6 [Vašková 2010].

Při prováděných experimentech došlo v několika případech k neočekávaným výsledkům. Jednou z příčin při zkouškách trámů s ocelí za studena tvářenou byla skutečnost, že užitá ocel výztužných prutů nespĺňovala kritérium ani pro ocel třídy A $(f_i / f_y)_k \geq 1,05$. K porušení došlo tedy odlišně oproti teoretickým předpokladům.

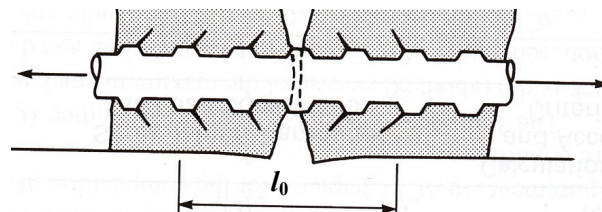
Dalším faktorem, ovlivňujícím charakter porušení, může být délka oblasti přenosu napětí soudržností mezi betonem a tahovou

výztuží v okolí trhlin. Vliv má povrch i průměr výztuže. Obvyklé návrhové předpoklady vzniku a rozvoje trhlin v tažené oblasti betonového prvku tradiční betonářskou výztuží jsou na obr. 3.8.



Obr. 3.8 Trhliny v tažené oblasti betonového prvku a) stav po vzniku primárních trhlin b) stadium ukončeného rozvoje trhlin

Při zkouškách trámů ohybem vyztužených žebírkovou ocelí $\phi 6$ však po vzniku několika prvních trhlin došlo k otvírání pouze jedné trhliny a porušení náhlým přetržením prutů výztuže v této trhlíně. Pruty malých průměrů mají relativně vysoká žebírka a tím je výraznější efekt koncentrace namáhání ve velmi krátké oblasti kolem trhliny l_0 (obr.3.9). To vede ke zplastizování výztuže, projeví se vliv odtržení výztuže od betonu.

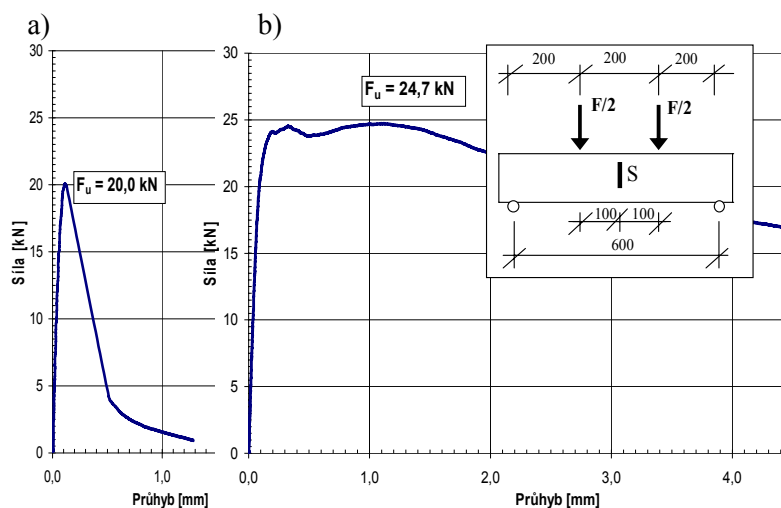


Obr. 3.9 Oblast poklesu soudržnosti tažené žebírkové výztuže [Wight, MacGregor 2009].

4 Využití konstrukčního vláknobetonu

Pod pojem vláknobeton se obecně řadí kompozitní materiály s cementovou matricí a vlákny náhodně rozptýlenými v matrici. Jako konstrukční vláknobeton lze označit homogenní materiál se zaručenými vlastnostmi, vhodný pro užití v nosných konstrukčních prvcích. Vlastnosti vláknobetonu, a to jak základní pevnostní a přetvárné charakteristiky v tlaku i tahu, tak jeho chování po vzniku trhlin v tahové oblasti, ovlivňuje mnoho faktorů. Údaje pro různé typy vláknobetonů uvádí např. [Kováč, Balázs 2003], [Wietek, 2010]. Aplikace vláknobetonu v konstrukčních prvcích vyžadují přípravu z hlediska návrhu receptury, tak technologie výroby a zpracování. Materiálové vlastnosti vláknobetonu je třeba vždy určit zkouškami. Charakteristické a návrhové hodnoty jsou významně ovlivněny rozptylem výsledků zkoušek, proto nezbytnou podmínkou praktického využití předností vláknobetonu je výroba homogenního materiálu a dodržení technologických zásad výroby i zkoušení.

Pevnost v tahu a duktilita při tahovém namáhání jsou vlastnosti, které nejvíce odlišují vláknobeton od běžného betonu bez vláken (obr. 4.1). V nejvyšší míře se vliv vláken na tyto vlastnosti kompozitu projeví při užití vhodných ocelových vláken (drátků), případně konstrukčních polymerových makrovláken (obr.4.2, 4.3).



Obr. 4.1 Průběhy síla – průhyb ze zkoušek trámů ohybem a) beton bez vláken b) vláknobeton s ocelovými vlákny Dramix RC80/60BN 0,75%



Obr. 4.2 Zkouška trámku ohybem – vláknobeton s ocelovými vlákny [Petřík, 2004]



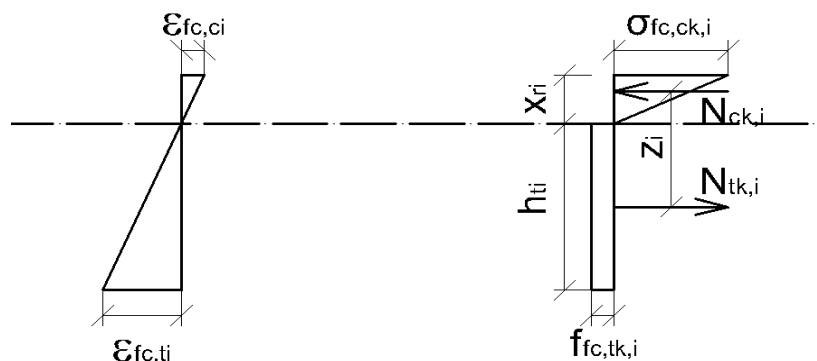
Obr. 4.3 Zkouška trámku ohybem - vláknobeton s polymerovými vlákny

Vlastnosti vláknobetonu ve srovnání s betonem bez vláken mají pro konstrukce přínos též z hlediska **trvanlivosti**. Významný je dále účinek vláken při působení vysokých teplot, zabezpečuje odolnost proti nebezpečnému odprýskávání povrchových vrstev konstrukce např. při požáru [Štefan, Procházka, 2009].

4.1 Prvky z vláknobetonu bez betonářské výztuže

Vláknobeton se v současné době používají ve větší míře jako prosté vláknobeton (bez vyztužení betonářskou prutovou výztuží). Efekt vláken v kompozitu se zde uplatňuje zmenšením objemových změn a schopností vláknobetonu působit v tahové oblasti i po vzniku trhlin.

U homogenního vláknobetonu lze s ohledem na jeho tahovou duktilitu počítat při navrhování vláknobetonové konstrukce i s tahovým namáháním. Mezní stav vzniku tahové trhliny lze zavést jako mezní stav únosnosti, porušení prvku není křehké, ovšem, návrh není obvykle příliš hospodárný. U vláknobetonů s dostatečnou duktilitou nemusí být vznik trhlin uvažován jako mez únosnosti [Krátký a kol. 2010]. Při posouzení únosnosti pro stav po vzniku makrotrhliny se uvažuje kvaziplastické (QPL) chování konstrukčního prvku ve vznikajícím plastickém kloubu v místě makrotrhliny. V tom případě lze uvažovat ekvivalentní pevnosti vláknobetonu v tahu $f_{fc,td,i}$ odvozené z pevností reziduálních $f_{fc,tk,i}$ a odpovídající $\varepsilon_{fc,ti}$ v tažené oblasti kritického průřezu, zpravidla při pružném chování tlačené oblasti (obr. 4.4).



Obr. 4.4 Předpoklad o napjatosti v průřezu vláknobetonového prvku po vzniku makrotrhliny

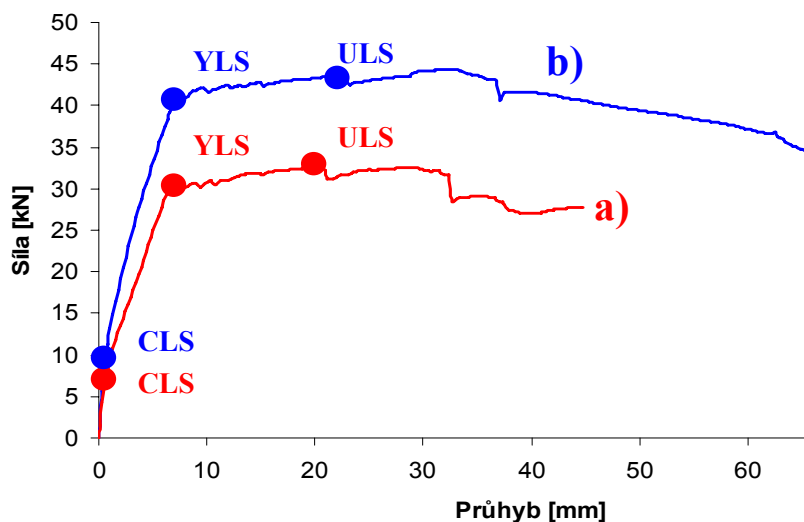
Podstatnou nevýhodou ohýbaných prvků z nevytuzeného vláknobetonu v porovnání s prvky s tradiční prutovou výztuží je, že porušení nastává obvykle po rozšiřování jedné (často i jediné) tahové trhliny. Vlastnosti vláknobetonu je tedy výhodné využít v prvcích z vláknobetonu vyztužených tradiční prutovou výztuží. [Vítek, Smiřinský 2010].

4.2 Prvky z vyztuženého vláknobetonu

U konstrukcí z konstrukčního vláknobetonu vyztužených klasickou prutovou výztuží se vliv vláken může projevit výrazněji než u prvků

nevztyžených. Při spolupůsobení s prutovou výztuží se po vzniku trhlin vláknobetonu uplatní se vysoká deformační schopnost vláknobetonu.

Přínos vláken u ohýbaných prvků se výrazně projevuje až po vzniku tahových trhlin. Chování prvku závisí na typu a množství vláken, významný je i vliv množství a kvality oceli prutové výztuže. Ukázkou jsou výsledky zkoušek trámů 100/150/1800mm (rozpětí 1500mm) z vyztuženého vláknobetonu s ocelovými vlákny a srovnávacího železobetonu (bez vláken) na obr. 4.4. a 4.5. Jedná se o vláknobeton s kvalitní matricí s vysokopevnostními drátky s dávkou 1% objemu a srovnávací beton obdobného složení bez vláken, užitá prutová výztuž z oceli B500C (Epstal).

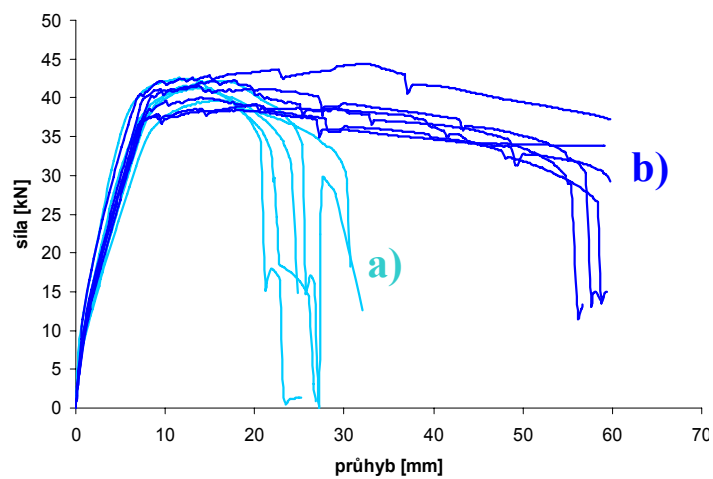


Obr. 4.4 Průběhy síla - průhyb ze zkoušek ohybem trámů 100/150/1800mm, výztuž $2\phi 10$ z oceli B500C (Epstal):
CLS-mez vzniku trhlin YLS-mez kluzu výztuže ULS-mez únosnosti
a) železobeton b) vyztužený vláknobeton – DramixRC80/30BP 1%

Rozdíl v charakteru porušení je patrný z obr. 4.5. Zkoušky trámů s výztuží různé tažnosti (B500A, B500C) prokázaly význam tažnosti oceli zvláště u vysokopevnostního vláknobetonu (obr.4.6).



Obr. 4.5 Porovnání porušení trámů po zkoušce ohybem (popis viz obr.4.4)



Obr. 4.6 Průběhy síla - průhyb ze zkoušek ohybem trámů 100/150/1800mm z vláknobetonu – ocelová vlákna DramixRC80/30BP 1%, výztuž 2 ϕ 10 a) z oceli B500A b) z oceli B500C (Epstal)

Vláknobeton lze uplatnit jako zajištění proti křehkému porušení v mnoha případech betonových prvků. Příkladem je využití vláknobetonu jako náhrada smykové výztuže v trámech z obyčejného i lehkého betonu (obr. 4.7).



Obr. 4.7 Charakter porušení trámů 100/150/1800mm z hutného betonu s pórovitým kamenivem Liapor s prutovou výztuží $2\phi 6$ z oceli B500A
a) bez vláken - porušení smykem b) vlákna Forta Ferro 0,5% - ohybem
[Kohoutková a kol. 2006]

Vláknobeton se využívá i v předpjatých prvcích jako náhrada části betonářské výztuže [Petřík, Philipp 2010] a též v prefabrikátech v oblastech nebezpečí porušení při dočasných a mimořádných návrhových situacích [Kohoutková 2007].

5 Vysokohodnotný beton

Technologii betonu v posledních desetiletích zcela změnil vývoj nových přísad a příměsí. Plastifikátory umožňují snižovat vodní součinitel a přitom zvyšovat zpracovatelnost. Výsledný kompozit má

velmi kompaktní mikrostrukturu, **zvýšenou pevnost a trvanlivost**. Proto jsou uvedené betony označovány jako vysokohodnotné, nikoliv jen jako vysokopevnostní [Aitcin 2005]. Trvanlivost je významným požadavkem při navrhování betonových konstrukcí. Poznatky o korozi materiálů jsou předmětem výzkumu – např. [Collepari 2009]. Degradace povrchových vrstev betonu a následná koroze oceli může snížit životnost konstrukce a k porušení může dojít i náhle např. následkem koroze oceli vlivem karbonatace betonu.

Betony vyšších pevností (pevnost v tlaku cca nad 100MPa) a zejména betony s **mimořádně vysokými pevnostmi** (Ultra High Performance Concrete - UHPC) jsou relativně křehké. Dosažení velmi vysokých pevností betonu je spojeno se značným snížením duktility a křehkým porušením, přidaná vlákna tato negativa eliminují.

Aplikace vysokohodnotných vláknobetonů (Ultra High Performance Fibre Concrete - UHPFC) umožňuje vytvoření výjimečných prvků po stránce konstrukční i architektonické. Subtilnost konstrukcí neznamená zvýšení rizika náhlého křehkého porušení.

Příkladem je materiál označovaný jako Ductal - kompozit s objemovým podílem 2 až 4% ocelových nebo organických vláken. Vykazuje vysoké hodnoty pevností v tlaku (kolem 200MPa) i tahu a zejména vysokou schopnost přetvoření před porušením - duktilitu. Speciální úpravou se zlepšují mechanické vlastnosti a trvanlivost, materiál má minimální dotvarování a smršťování [Rebentrost, Smíšek 2007].

6 Závěr

Teorie i praxe v navrhování betonových konstrukcí prochází v posledních desetiletích změnami. Jedná se o rozvoj nových materiálů vyšších pevností i dalších vlastností, vývojem procházejí i předpisy o navrhování.

Důležitou vlastností konstrukčních prvků je schopnost přetvoření před porušením - duktilita. Práce popisuje jednotlivé faktory, které příznivě ovlivňují duktilitu a tím zabraňují nežádoucímu křehkému porušení konstrukce. Kromě již tradičních poznatků jsou ukázány nové pohledy dané vlivem rozvoje materiálů a technologií.

Literatura:

- Aitcin, P. C.: Vysokohodnotný beton. ČKAIT a ČBS. Praha 2005. 320s. ISBN 80-86769-39-9
- Bilčík, J. – Fillo, L. - Benko, V. - Halvoník, J.: Betónové konštrukcie. STU Bratislava 2008. 374s. ISBN 978-80-2940-6
- Collepari, M.: Moderní beton. ČKAIT a ČBS. Praha 2009. 344s. ISBN 978-80-87093-75-7
- CPJS: Podklady o vlastnostech betonářské oceli B500SP- Epstal. Centrum Promocji Jakosci Stali Warszawa
- Kohoutková, A.: Betony s rozptýlenou výztuží. In: Sborník kolokvia Světový beton 2002-2006. ČBS ČSSI, Praha 2007, s.115-122.
- Kohoutková, A. - Broukalová, I. - Vodička, J.: Aplikace vláknobetonu v prefabrikaci. In: Sborník konference Betonářské dny. Hradec Králové. ČBS ČSSI 2006, s.189-194. ISBN 80-903807-2-7
- Kovácz, I. - Balázs, G.L.: Structural performance of steel fibre reinforced concrete. Budapest University of Technology and Economics, Budapest 2004, p.233, ISBN 963 420 822 3
- Krátký, J. - Vodička, J. - Vašková, J.: Navrhování konstrukčních prvků z vláknobetonu. In: BETON - technologie, konstrukce, sanace 2010, roč.10, č.2, s.87-89. ISSN 1213-3116
- Petřík, V.: Materiálové modely a výpočtové analýzy vláknobetonových konstrukcí. Disertační práce, ČVUT v Praze, Fakulta stavební, 2004
- Petřík, V. - Philipp, N.: Aplikace předpjatého vláknobetonu. In: BETON - technologie, konstrukce, sanace 2010, roč. 10, č. 2, s.32-34. ISSN 1213-3116
- Procházka, J. - Štěpánek, P. - Kohoutková, A. - Krátký, J. - Vašková, J.: Navrhování betonových konstrukcí 1. Prvky z prostého a železového betonu. ČBS ČSSI Praha 2009. 316s. ISBN 978-80-903807-5-2
- Pytlík, P.: Technologie betonu. VUT v Brně, nakladatelství VUTIUM. Brno, 2000. 390s. ISBN 80-214-1647-5

- Rebentrost, M. – Smíšek, P.: Reaktivní jemnozrnný beton Ductal. In: BETON - technologie, konstrukce, sanace 2007, roč. 7, č. 5, s.22-23. ISSN 1213-3116
- Štefan, R. – Procházka, J.: Effect of fibres on fire resistance of concrete structures. In: Proceedings of the 5th International Conference Fibre Concrete 2009. ČVUT v Praze, Fakulta stavební, 2009, p. 237-242. ISBN 978-80-01-04381-3.
- Vašková, J.: Konstrukční prvky z vyztuženého vláknobetonu – experiment a analýza. Habilitační práce. ČVUT v Praze, Fakulta stavební. 2010
- Vítek, J. L. - Smiřinský, S.: Spolupůsobení klasické a rozptýlené výztuže. In: BETON - technologie, konstrukce, sanace 2010, roč. 10, č. 2, s.48-52. ISSN 1213-3116
- Wietek, B.: Stahlfaserbeton. Vieweg + Teubner, Wiesbaden 2010. 269s. ISBN 978-3-8348-0872-1
- Wight, J.K. - MacGregor, J.G.: Reinforced Concrete. Mechanics & Design. Pearson Education, Inc. New Jersey 2009. ISBN 978-0-13-228141-6

Ing. Jitka Vašková, CSc.

Osobní údaje

Narozena: 18.4.1953 v Praze

Rodné příjmení: Hupková, (1976 – 2003 příjmení Filipová)

Národnost: česká

Státní občanství: Česká republika

Pracoviště: ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra betonových a zděných konstrukcí

Kontakt: tel: +420 224 354 636, e-mail: jitka.vaskova@fsv.cvut.cz

Vzdělání:

VŠ studium ČVUT v Praze, Fakulta stavební, obor Pozemní stavby (Ing. - 1976)

vědecká příprava ČVUT v Praze, Fakulta stavební (CSc. - 1987)
v oboru Teorie a konstrukce inženýrských staveb, disertační práce
Montované skelety se ztužujícími výplněmi

Zaměstnání:

1976-1979 pedagogická asistentka na katedře betonových konstrukcí a mostů FSv ČVUT v Praze

od r. 1979 odborná asistentka na katedře betonových a zděných konstrukcí FSv ČVUT v Praze

od r. 2009 zástupce vedoucí katedry

v průběhu: 1977 - 1978 částečný úvazek v STÚ Praha (projektant)

1988 - 1989 odborná stáž v Kovoprojektě Praha

Odborná činnost:

Spolupráce na projektech a znaleckých posudcích v oblasti navrhování betonových a zděných konstrukcí

Vyzvané přednášky, příprava a přednášky na školeních pro odbornou veřejnost - školení ČBS, ČKAIT, pro odborné firmy

Činnost v oblasti normalizace

Členství: Česká betonářská společnost ČSSI

Technická normalizační komise 119 – Betonové dílce

Pedagogická činnost:

od r.1976 vedení cvičení, konzultace v projektech

od r.1990 přednášky předmětů Betonové a zděné konstrukce

- od r.1993 vedení diplomových prací, celkem 72 obhájených prací, z toho 3 oceněné
- od r.2003 vedení studentů doktorského studia, 1 úspěšně obhájená práce, v současné době vedení 2 studentů
- od r.2007 po zavedení strukturovaného studia vedení bakalářských prací, celkem 27 obhájených prací, z toho 2 oceněné

Aktivity na fakultě:

- od r.1990 členka pedagogické rady a studijní poradce pro obor Pozemní stavby a konstrukce
- 1998-2006 členka AS FSv ČVUT, vedení pedagogické komise
- od r.2003 zástupce pedagogického proděkana, členka pedagogických rad oborů, předsedkyně pedagogické rady pro obor KPS
- 2006 řešitelka rozvojového projektu MŠMT 35 „Vstup absolventů bakalářského studia do magisterských programů“, spolupráce v dalších projektech

Výzkumná a vědecká činnost:

Oblasti zájmu:

Navrhování betonových a zděných konstrukcí - metody výpočtu, zavádění evropských norem, navrhování na účinky požáru:

- účast na řešení výzkumného záměru MSM 6840770001 Spolehlivost, optimalizace a trvanlivost stavebních materiálů a konstrukcí
- spoluřešitelka projektu Celoživotního vzdělávání v požární ochraně (podpora Evropského strukturálního fondu - ESF)
- spoluřešitelka projektu Další vzdělávání pedagogů v oblasti navrhování stavebních konstrukcí podle EN (podpora ESF)

Vláknobeton - analýza chování konstrukčního vláknobetonu a uplatnění pro nosné konstrukce

- řešitelka grantového projektu GAČR 103/07/1275 Plastické chování vláknobetonových konstrukcí vyztužených tradiční betonářskou výztuží
- členka řešitelského kolektivu výzkumných grantů GAČR (od roku 2001 v 6 projektech), účast v projektech MPO

Publikační činnost:

Publikace v oblasti navrhování betonových a zděných konstrukcí včetně navrhování na účinky požáru a v oblasti experimentálního

ověřování a analýzy konstrukčního vláknobetonu. Za posledních 5 let 6 článků v odborných časopisech a více než 30 příspěvků ve sbornících konferencí, z toho 12 zahraničních. Vyzvané přednášky při zahraničních pobytech (1996 – University of Pittsburgh, 2007 a 2008 – Workshop CPJS Warsaw). Spoluautorství monografií - výstupů projektů podporovaných ESF. Spoluautorství publikace „Navrhování betonových konstrukcí“, nakladatel Informační centrum ČKAIT (2010). Podíl na publikacích ke školení ČBS ČSSI a ČKAIT. Podíl na přípravě norem a Technických podmínek. Tvorba vysokoškolských skript (5 titulů) a výukových pomůcek.

Vybrané publikace:

Procházka, J. - Vašková, J. - Kohoutková, A. - Krátký, J. - Štěpánek, P.: Navrhování betonových konstrukcí 1. Prvky z prostého a železového betonu. Praha: ČBS ČSSI, 2006. 316 s. ISBN 80-903807-1-9

Vašková, J.: Zděné konstrukce v ČSN EN 1996-1-2. In: Navrhování konstrukcí na účinky požáru podle evropských norem. ČVUT v Praze, 2007, s. 102-122. ISBN 978-80-01-03580-1.

Vašková, J. - Števula, M. - Veselý, V.: Modul pružnosti automaticky? In: BETON - technologie, konstrukce, sanace 2007, roč. 7, č. 6, s. 57-59. ISSN 1213-3116.

Vašková, J.: Železobetonové trámy In: Betonové konstrukce - Textové materiály. ČVUT v Praze, 2008, s.60-81. ISBN 978-80-01-04131-4.

Vašková, J. - Košatka, P.: Zděné konstrukce - Textové materiály. ČVUT v Praze, 2008. 59s. ISBN 978-80-01-04130-7.

Vašková, J.: MSÚ - prvky namáhané ohybem a smykem. In: Navrhování betonových konstrukcí. Informační středisko ČKAIT Praha 2010.

Vašková, J. - Vodička, J. Experimental Research on Fibre-concrete Structures Reinforced with Conventional Steel Bars (vyzvaná přednáška). Workshop CPJS (Centrum Promocji Jakosti Stali). Warsaw 2007

Vodička, J. - Kohoutková, A. - Krátký, J. - Vašková, J. - Kolář, K.: Influence of FRC Properties on Design and Behaviour of Structural Concrete Members In: Harnessing Fibres for Concrete Construction.

- Bracknell: IHS BRE Press, 2008, p.187-194. ISBN 978-1-84806-042-5.
- Vašková, J. - Vodička, J. - Krátký, J.: Behaviour of FC Beams Reinforced with Steel Bars of Various Ductility. In: Proceedings of LC 2008. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008, p.285-290. ISBN 978-80-214-3773-9.
- Krátký, J. - Vodička, J. - Vašková, J.: Determination of Tensile Part of Fibre Concrete Stress - Strain Diagram from Bending Test Measurements In: Proceedings of Fibre Concrete 2009. ČVUT v Praze, Fakulta stavební, p.167-174. ISBN 978-80-01-04381-3.
- Vašková, J. - Krátký, J. - Vodička, J. : Flexural Behaviour of Fibre Concrete and Design Models Compatible with Experiments. In: Proceedings of 5th International Conference Concrete and Concrete Structures. Žilinská univerzita, Stavebná fakulta, 2009, p.175-180. ISBN 978-80-554-0100-3.
- Veselý, V. - Vodička, J. - Vašková, J. - Krátký, J.: Zkoušky konstrukčního vláknobetonu. In: BETON - technologie, konstrukce, sanace. 2010, roč. 10, č. 2, s. 43-47. ISSN 1213-3116.
- Vašková, J.: Experimentální ověření chování vláknobetonových prvků. In: BETON - technologie, konstrukce, sanace 2010, roč. 10, č. 2, s. 74-78. ISSN 1213-3116.
- Krátký, J. - Vodička, J. - Vašková, J.: Navrhování konstrukčních prvků z vláknobetonu. In: BETON-TKS 2010, roč. 10, č. 2, s. 87-89. ISSN 1213-3116.
- Krátký, J.-Vodička, J. - Vašková, J. - Hanzlová, H.: Navrhování konstrukčních prvků z vláknobetonu vyztuženého betonářskou výztuží. In: BETON- technologie, konstrukce, sanace. 2010, roč. 10, č. 2, s. 84-86. ISSN 1213-3116.
- Broukalová, I. - Vašková, J.: Application of Numerical Analysis to Behaviour of Fibre Concrete Elements. In: Proceedings of Int.Conference Modelling and Simulation 2010 in Prague, AMSE and CTU. ISBN: 978-80-01-04574-9
- Krátký, J. - Vašková, J. - Hanzlová, H. - Vodička, J.: Assumptions for Design of Fibre Concrete Structural Elements.: In: Proceedings of 12th Intern.Conference on Inspection, Appraisal, Repairs & Maintenance of Structures. 2010 Yantai