



Vysokohodnotný beton: Návrhové postupy

Petr Bílý

kancelář B731

e-mail: petr.bily@fsv.cvut.cz

web: people.fsv.cvut.cz/www/bilypet1

concrete.fsv.cvut.cz/~bily

Charakteristika materiálu

Materiál

- Budeme se zabývat materiálem „Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC)“



Materiál

- Charakteristiky UHPFRC
 - Tlaková pevnost na krychlích min. 150 MPa
 - Pevnost v osovém tahu min. 7 MPa
 - Typicky $E = 50 \text{ GPa}$
 - Alespoň 2 % hm. drátků
 - Vysoká hutnost => nízká porozita => vysoká trvanlivost
 - Objemová hmotnost je vyšší (cca 2800 kg/m^3)
 - Pouze staticky nutná výztuž (betonářská či předpjatá)
 - Eliminace minimální výztuže
 - Redukce konstrukční výztuže (povrchy desek, smyková výztuž...)

Materiál

- Příklady UHPFRC
 - DUCTAL (Lafarge)
 - BSI/Ceracem (Eiffage a Sika)
 - BCV (Vicat a Vinci)
 - FSv ČVUT – charakteristiky pro výpočet viz web



Navrhování

- Neexistují obecně platné normy
- Existující směrnice
 - Německá směrnice pro návrh UHPFRC (dále DE)
 - UHPFRC Recommendations vydané Association Française de Génie Civil (dále AFGC)
 - *fib* Model Code 2010 – část 7.7 „Verification of safety and serviceability of FRC structures“ (dále *fib*)
 - Tyto předpisy jsou ve stádiu vývoje => v literatuře jistě někdy narazíte i na jiné přístupy k výpočtům

U N I K A S S E L
V E R S I T Ä T



Navrhování

- V prezentaci budou zdůrazněny pouze odlišnosti od klasického návrhu dle EC2
- MSÚ – prvky namáhané tlakem, ohybem, smykem, protlačením
- MSP – omezení šířky trhlin, omezení napětí, omezení deformací

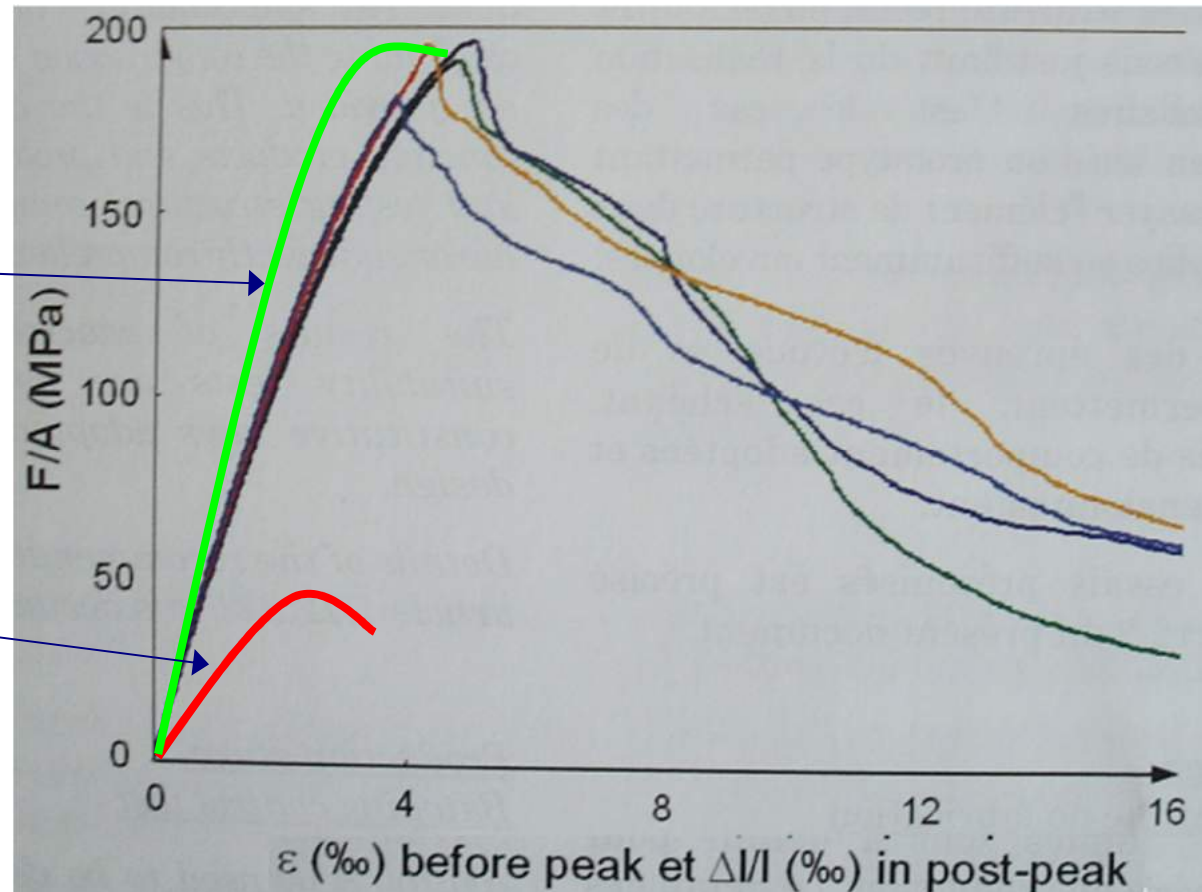


Chování v tlaku

- Beton = pevnost
- Drátky = duktilita

UHPC nez drátků -
křehkost

Běžný beton



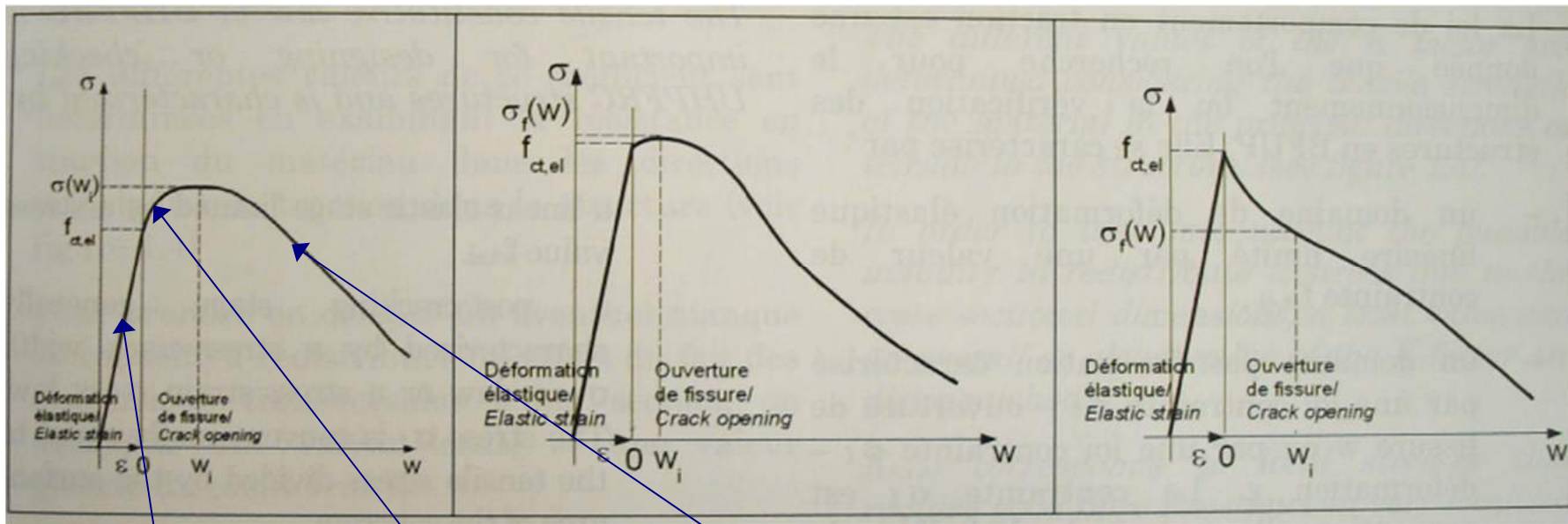
Chování v tahu

- Závisí na typu a množství drátků

Vysoké % drátků pevně zakotvených ve struktuře – materiál s tahovým zpevněním (strain hardening)

Nižší % drátků a/nebo méně pevné zakotvení ve struktuře – materiál s částečným tahovým zpevněním (low strain hardening)

Nízké % drátků a/nebo horší zakotvení ve struktuře – materiál s tahovým změkčením (strain softening)



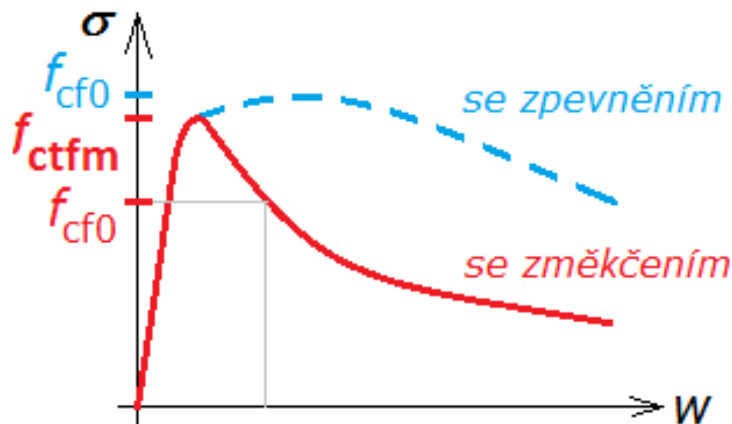
Fáze do vzniku makrotrhliny

Fáze protahování vláken v trhlině

Fáze vytahování vláken ze struktury

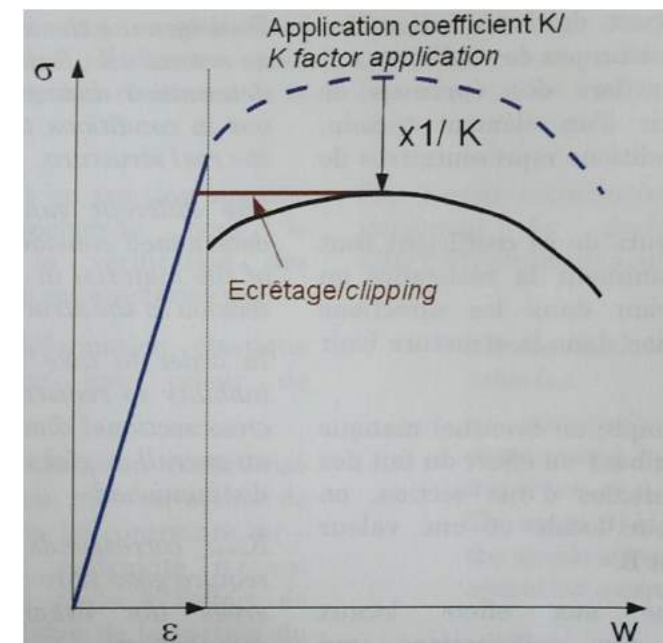
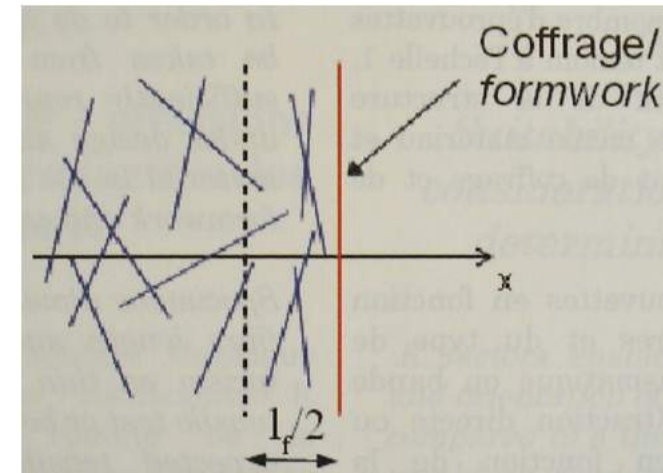
Chování v tahu

- Střední hodnota elastické tahové pevnosti vláknobetonu f_{ctfm} – bez trhlin
- Reziduální pevnost vláknobetonu f_{cf0} – maximální tahové napětí přenesené vlákny po vzniku trhlin vztažené na plochu tažené části vláknobetonového průřezu *(při chování se změkčením: napětí při definované šířce trhliny – dle AFGC 0,3 mm)*



Vliv orientace vláken

- Různé části prvku – různá orientace a hustota vláken (směr betonáže, vliv bednění, vliv gravitace...) => různá pevnost
- K = součinitel zohledňující vliv odlišné distribuce a orientace vláken ve zkušebním vzorku a v reálné konstrukci => redukce pevnosti



Vliv orientace vláken

- Stanovení K :

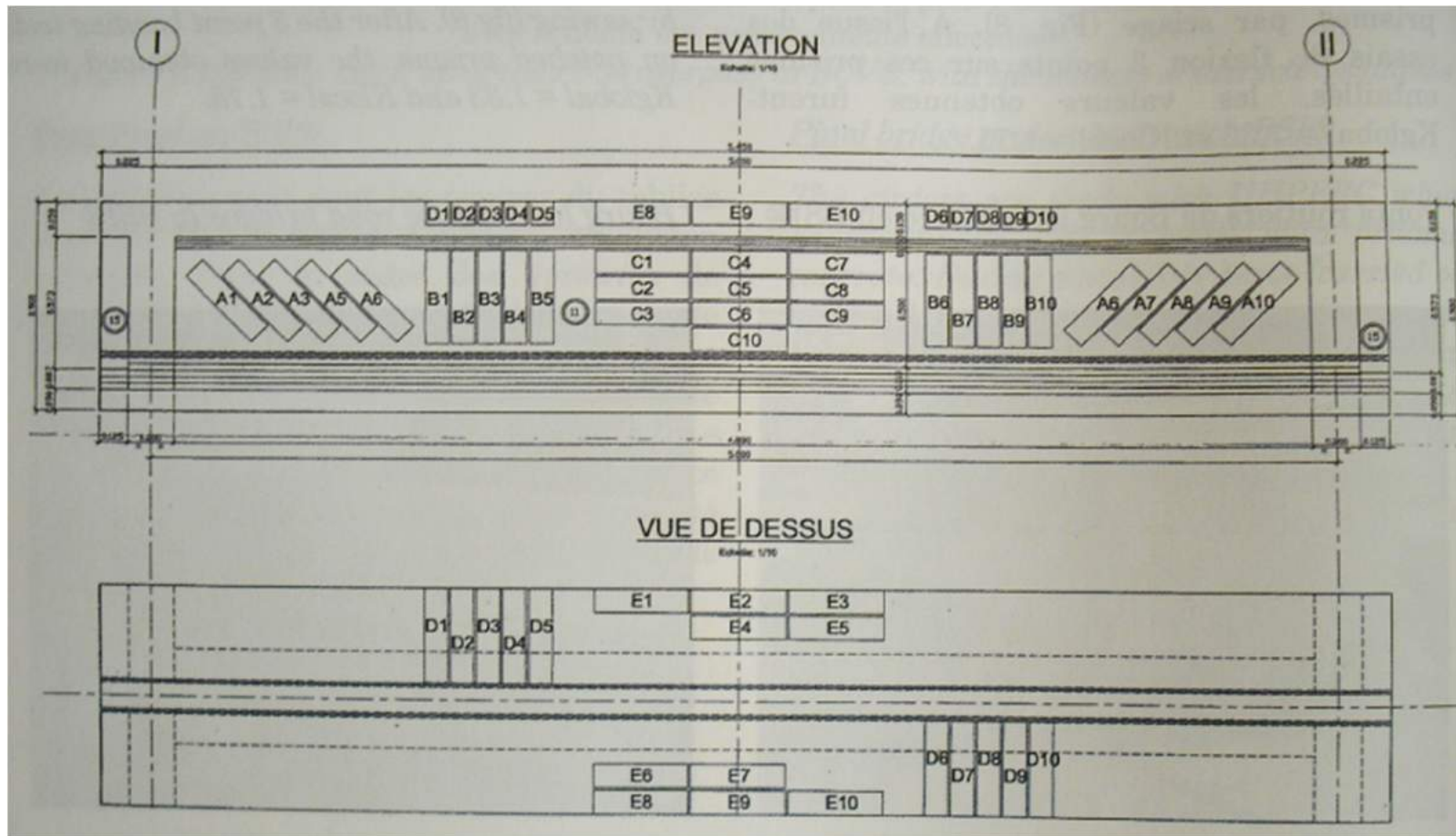
$$K = \frac{f_{lab}}{f_{cut}} \geq 1,00$$

f_{lab} je hodnota pevnosti stanovená na zkušebním tělese z laboratoře,

f_{cut} je hodnota pevnosti stanovená na tělese vyříznutém z velkorozměrového prvku

Vliv orientace vláken

- Příklad odběru těles ze zkušebního nosníku



Vliv orientace vláken

- K_{global} – pro celkové účinky na konstrukci; průměrná hodnota f_{cut}
- K_{local} – pro lokální účinky; min. hodnota f_{cut}
- Typicky $K_{\text{global}} = 1,1 - 1,4$;
- K_{local} – někdy i více než 2,1

	Zone A	Zone B	Zone C	Zone D	Zone E	Valeur choisie/ Chosen value
Effets globaux/ Global effects	1.025	0.832 -> 1	1.247	1.089	0.882 -> 1	K = 1.25
Effets locaux/ Local effects	1.456	1.221	1.722	1.340	1.135	K = 1.75

- Německá směrnice stanovuje pevně $K = 1,25$

Dílčí součinitele bezpečnosti [DE]

- Základní hodnoty závisí na úrovni kontroly kvality:

Veličina	Vysoká	Normální
Tlaková pevnost betonu f_{ck}	$\gamma_c = 1,3$	$\gamma_c = 1,5$
Reziduální pevnost f_{cf0k}	$\gamma_{cf} = 1,3$	neuvažovat

- Součinitel γ_c by se navíc měl vynásobit součinitelem $\gamma_c' = 1,2$, pokud materiál nesplňuje podmínku dostatečné duktility:

$$f_{cf0k} \geq 0,4 f_{ctfm}$$

- Součinitel γ_{cf} by se navíc měl vynásobit součinitelem $\gamma_{cf}^{loc} = 1,5$, pokud posuzujeme lokální účinky zatížení

Pevnost materiálu [DE]

- Reziduální pevnost stanovenou na zkušebních tělesech je potřeba upravit součinitelem K:

$$f_{cf0k} = \frac{f_{cf0k}^{\text{test}}}{K}$$

- Návrhová hodnota reziduální pevnosti:

$$f_{cf0d} \geq \alpha_{ct} \frac{f_{cf0k}}{\gamma_{cf}}$$

- α_{ct} – součinitel zohledňující dlouhodobé účinky na pevnost v tahu
 - Běžně podle ČSN EN 1992-1-1 (EC2) $\alpha_{ct} = 1,00$
 - Zde $\alpha_{ct} = 0,90$

Pevnost materiálu [DE]

- Tlaková pevnost betonu:

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

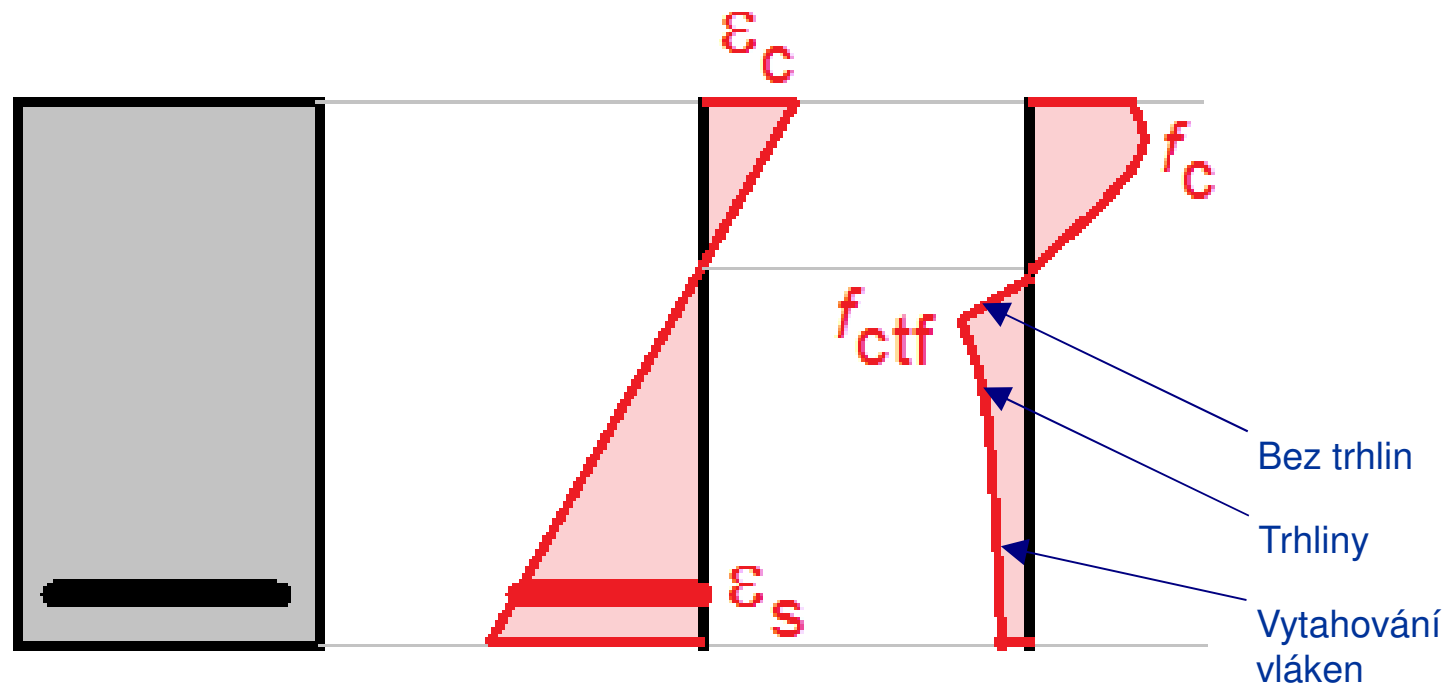
- α_{cc} – součinitel zohledňující dlouhodobé účinky na pevnost v tlaku
 - Běžně podle ČSN EN 1992-1-1 (EC2) $\alpha_{cc} = 1,00$
 - Zde $\alpha_{cc} = 0,85$



Mezní stavy únosnosti

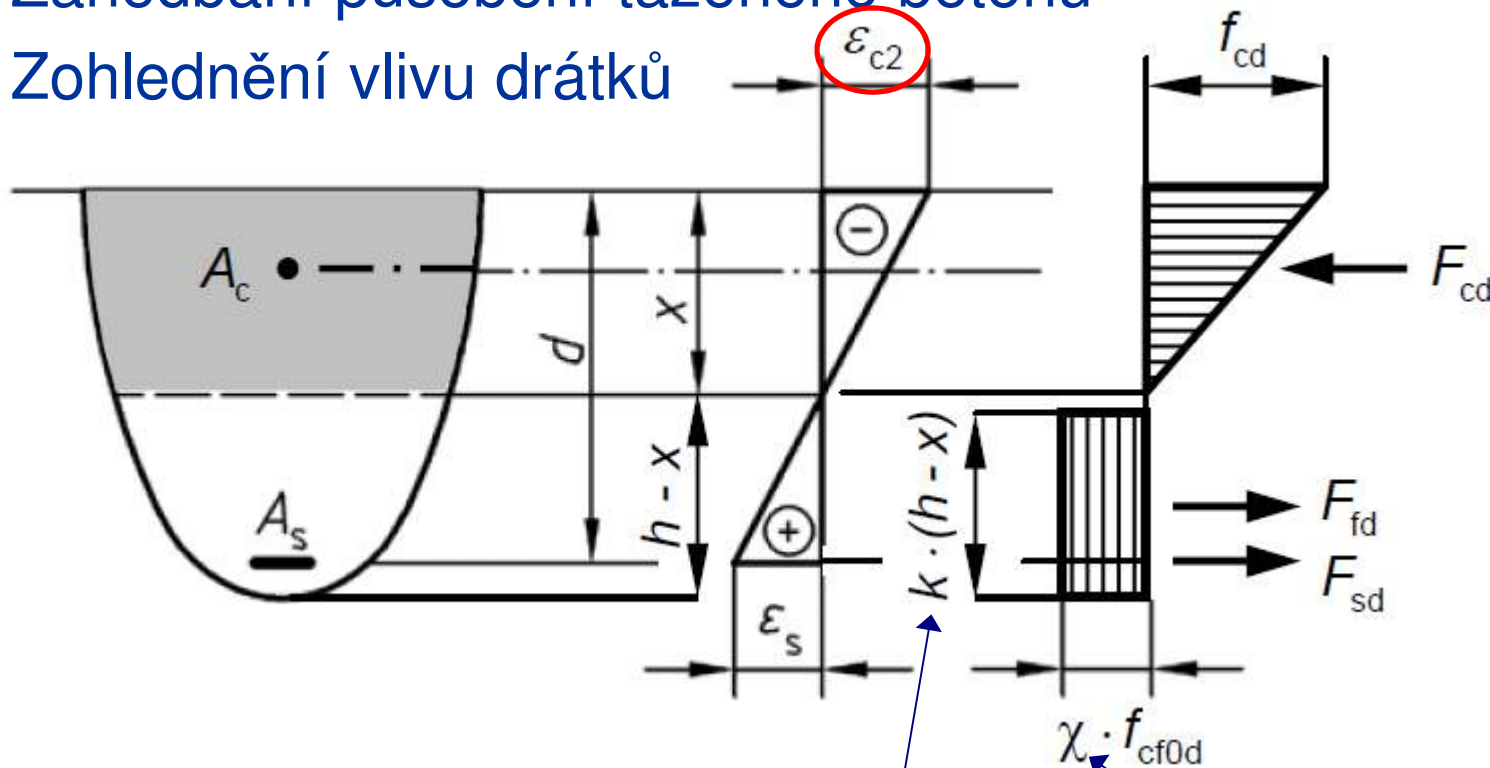
Ohyb

- Reálné rozdělení napětí v průřezu



Ohyb [DE]

- Idealizace:
 - Lineární průběh napětí v tlačném betonu
 - Zanedbání působení taženého betonu
 - Zohlednění vlivu drátků



Ohyb [DE]

- Odhad potřebné plochy prutové výztuže:

$$A_{s,req} = \frac{M_{Ed} - 0,45\chi f_{cf0d}kbh^2}{0,9df_{yd}}$$

← Vyjde-li $A_{s,req} < 0$, stačí pouze minimální výztuž

- Výška tlačené oblasti:

$$F_{cd} = F_{sd} + F_{fd} \Rightarrow x = \frac{A_s f_{yd} + \chi f_{cf0d}kbh}{\frac{1}{2}bf_{cd} + \chi f_{cf0d}kb}$$

← Šířka průřezu, u desky 1000 mm

- Únosnost průřezu:

$$\begin{aligned} M_{Rd} &= F_{sd}z_s + F_{fd}z_f = \\ &= A_s f_{yd} \left(d - \frac{x}{3} \right) + \chi f_{cf0d}kb(h-x) \left(h - \frac{x}{3} - \frac{k(h-x)}{2} \right) \end{aligned}$$

Tlačené prvky

- Jako EC2
- Vyšší pevnost HPC => menší potřebné rozměry
=> štíhlé sloupy
- Návrh štíhlého sloupu
 - Nutno zahrnout účinky druhého řádu
 - Např. metoda založená na jmenovité křivosti – viz skriptum *Procházka, Kohoutková, Vašková: Příklady navrhování betonových konstrukcí 1* – příklad 6.2 a příloha 13

Tlačené prvky

- Posouzení sloupu z UHPFRC
 - V principu klasický interakční diagram
 - ALE: Měl by se zahrnout vliv rozptýlené výztuže v tažené oblasti
 - Pro zjednodušení je možno jej bezpečně zanedbat
 - ALE: je potřeba zohlednit jiný průběh napětí v tlačené oblasti při kombinaci N+M
 - Vodítko dává schéma průběhu napětí v ohýbaném prvku – odvodit body ID se zahnutím vlivu drátků (příklad viz web)

Smyk [DE]

- Prvky nevyžadující návrh smykové výztuže:

$$V_{Rd,c}^f = V_{Rd,c} + V_{Rd,cf}$$

Únosnost bez smykové výztuže dle EC2

- Prvky vyžadující návrh smykové výztuže:

$$V_{Rd,s}^f = V_{Rd,s} + V_{Rd,cf} \leq V_{Rd,max}$$

Únosnost třmínkové smykové výztuže dle EC2

Únosnost tlačené diagonály dle EC2

- Příspěvek vláken ke smykové únosnosti:

$$V_{Rd,cf} = f_{cf0d} b_w h$$

Rozměry průřezu

Smyk [DE]

- Je-li potřeba navrhnout třmínky, lze uvažovat:

$$V_{Rd,s} \geq V_{Ed} - V_{Rd,cf} \Rightarrow s_i \leq \frac{A_{sw} f_{yd}}{V_{Ed,i} - V_{Rd,cf}} z_s \cot \theta$$

- Minimální stupeň smykového vyztužení třmínky po zohlednění vlivu drátků je:

$$\rho_{w,min}^f = \frac{0,16 f_{ctfm} - f_{cf0k}}{f_{yk}}$$

- Vyjde-li z předchozího vztahu záporná hodnota, není minimální stupeň smykového vyztužení definován

Smyk [*fib*]

- Alternativní přístup
- Prvky nevyžadující návrh smykové výztuže:

$$V_{Rd,c}^f = C_{Rd,c} \cdot k \cdot b_w \cdot d \cdot \sqrt[3]{100 \rho_l f_{ck} \left(1 + 7,5 \cdot \frac{f_{Ftuk}}{f_{ctk,0.05}} \right)}$$

Únosnost bez smykové výztuže dle EC2 ($V_{Rd,c}$) Vliv drátků

- Prvky vyžadující návrh smykové výztuže:

$$V_{Rd,s}^f = V_{Rd,s} + V_{Rd,c}^f \leq V_{Rd,max}$$

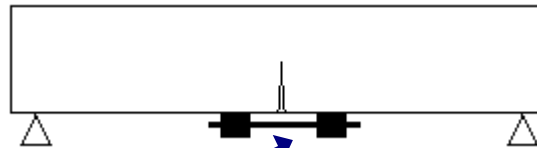
Únosnost třmínkové smykové výztuže dle EC2 Únosnost tlačené diagonály dle EC2

Smyk [*fib*]

- Od použití třmínek lze upustit, jestliže $V_{Rd,c}^f \geq V_{Ed}$ a je splněna podmínka:

$$f_{Ftuk} \geq 0,08\sqrt{f_{ck}}$$

- Hodnota f_{Ftuk} je reziduální napětí ve vláknobetonu při šířce trhliny $w = 1,5$ mm (jiná hodnota než reziduální pevnost f_{cf0k})



Extensometr pro měření šířky trhliny při zkoušce
CMOD (Crack Mouth Opening Displacement)

Protlačení [*fib*]

- Únosnost bez výztuže na protlačení:

$$v_{Rd,c}^f = v_{Rd,c} + v_{Rd,f}$$

Únosnost bez výztuže
na protlačení dle EC2

- Příspěvek vláken k únosnosti v protlačení:

$$v_{Rd,f} = \frac{f_{Ftuk}}{\gamma_F} \cdot u_1 \cdot d$$

1,5

- Vztah pro $v_{Rd,max}$ se nemění
- Ve vztazích pro $v_{Rd,cs}$
a u_{out} záměna $v_{Rd,c}$
za $v_{Rd,c}^f$



Mezní stavy použitelnosti

Mezní stav přetvoření

- Žádný z dostupných předpisů neupravuje speciálně pro UHPFRC – viz EC2
- Posouzení mezního stavu přetvoření
 - viz BK02
 - viz skriptum *Procházka, Kohoutková, Vašková: Příklady navrhování betonových konstrukcí 1* – příklad 9.2 a příloha 14
- Vliv drátků v tažené oblasti možno bezpečně zanedbat (ale v MSÚ jsme drátky uvažovali => málo prutové výztuže?) nebo se pokusit o jeho zahrnutí (tahová pevnost UHPFRC) – viz příklad web

Mezní stav omezení napětí

- Žádný z dostupných předpisů neupravuje speciálně pro UHPFRC – viz EC2
- Posouzení mezního stavu omezení napětí
 - viz BK02
 - viz skriptum *Procházka, Kohoutková, Vašková: Příklady navrhování betonových konstrukcí 1* – příklad 7.1 a příloha 14
- Průřezové charakteristiky převzít z přetvoření
 - Průřez bez trhlin nebo s trhlinou – podle toho, zda trhlina vznikne
 - Každopádně uvažovat dlouhodobě působící zatížení

Mezní stav šířky trhlin

- Počítat přímo šířku trhlin je velice složité, „nejisté“ a není to ani nutné
- Stačí prokázat, že $w \leq w_{\max}$
- Doporučení pro $w_{\max}$, pokud není požadována vodotěsnost betonu:

Stupeň vlivu prostředí	Železobetonové prvky a prvky předpjaté nesoudržnou výztuží	Prvky předpjaté soudržnou výztuží
	Kvazi-stálá kombinace zatížení	Častá kombinace zatížení
X0, XC1	0,4 ¹⁾	0,2
XC2, XC3, XC4	0,3	0,2 ²⁾
XD1, XD2, XS1, XS2, XS3		Dekomprese
¹⁾ Pro stupně vlivu prostředí X0, XC1 nemá šířka trhliny vliv na trvanlivost a uvedená hodnota má zajistit přijatelný vzhled. Pokud nejsou kladeny požadavky na vzhled, lze uvedenou hodnotu zvětšit.		
²⁾ Pro tyto stupně vlivu prostředí má být kromě toho posouzena dekomprese při kvazi-stálé kombinaci zatížení.		

Mezní stav šířky trhlin [DE]

- Kritérium $w \leq w_{\max}$ je splněno, pokud:

$$A_{s,\text{prov}} \geq A_{s,\text{min}} = \frac{(k_c f_{\text{ctfm}} - \sigma_{\text{cf}}) \cdot A_{\text{ct}}}{\sigma_{\text{s2}}^{\text{f}}}$$

Součinitel zohledňující
rozdělení tahových napětí

$$k_c = 0,4 \left[1 + \frac{\sigma_c}{\frac{2}{3} f_{\text{ctfm}}} \right] \leq 1,0$$

Napětí v betonu na úrovni
střednice průřezu těsně před
vznikem trhlin, zjednodušeně
 $\sigma_c \approx 0$ a tedy $k_c = 0,4$

Napětí přenesené
vlákny v trhlině,
uvažujeme $\sigma_{\text{cf}} = f_{\text{cf0k}}$

$\sigma_{\text{s2}}^{\text{f}}$

Plocha tažené části betonového
průřezu těsně před vznikem trhlin.
Stanoví se podle polohy neutrálné osy
průřezu bez trhlin stanovené v mezním
stavu přetvoření.

Napětí ve výztuži v okamžiku po vzniku trhlin se
zohledněním působení vláken. Uvažovat hodnotu
napětí v oceli stanovenou v mezním stavu omezení
napětí.

Mezní stav šířky trhlin

- Navržená výztuž musí mít určité maximální průměry a rozteče:

Tabulka 7.2N – Maximální průměry prutů ϕ_s pro omezení šířky trhlin¹⁾

Napětí ve výztuži ²⁾ [MPa]	Maximální průměr prutu [mm]		
	$w_k = 0,4$ mm	$w_k = 0,3$ mm	$w_k = 0,2$ mm
160	40	32	25
200	32	25	16
240	20	16	12
280	16	12	8
320	12	10	6
360	10	8	5
400	8	6	4
450	6	5	-

¹⁾ Hodnoty v tabulce vycházejí z následujících předpokladů:
 $c = 25$ mm; $f_{ct,eff} = 2,9$ MPa; $h_{cr} = 0,5$; $(h-d) = 0,1h$; $k_1 = 0,8$;

$k_2 = 0,5$; $k_3 = 0,4$; $k = 1,0$; $k_t = 0,4$ a $k' = 1,0$

²⁾ Při odpovídající kombinaci účinků zatížení.

Tabulka 7.3N – Maximální vzdálenost prutů pro omezení šířky trhliny¹

Napětí ve výztuži ²⁾ [MPa]	Maximální vzdálenost prutů [mm]		
	$w_k = 0,4$ mm	$w_k = 0,3$ mm	$w_k = 0,2$ mm
160	300	300	200
200	300	250	150
240	250	200	100
280	200	150	50
320	150	100	-
360	100	50	-

POZNÁMKY jsou vysvětleny v tabulce 7.2N

Trvanlivost

Obecně

- Vyšší hutnost materiálu, nižší porozita, vyšší pevnost
- Odolnější vůči průniku vody a chemikálií
- Odolnější vůči účinkům zmrazovacích cyklů



Porozita materiálu

- Nižší díky optimalizované zrnitosti kameniva, nižšímu w/c a mikrofillerům
- OC = běžný beton
- HPC = vysokohodnotný beton
- V = very, U = ultra

	BO/OC	BHP/HPC	BTHP/VHPC	BFUP/UHPFRC
porosité à l'eau (%) water porosity (%)	14 - 20	10 - 13	6 - 9	1,5 - 5

Tableau 3.1 : Porosité accessible à l'eau
Table 3.1 : Water porosity

Permeabilita, difúze chloridů

	BO/OC	BHP/HPC	BTHP/VHPC	BFUP/UHPFRC
Perméabilité à l'oxygène (m ²) <i>Oxygen permeability (m²)</i>	10 ⁻¹⁶	10 ⁻¹⁷	10 ⁻¹⁸	<10 ⁻¹⁹

Tableau 3.2 : Perméabilité à l'oxygène
Table 3.2 : Oxygen permeability

	BO/OC	BHP/HPC	BTHP/VHPC	BFUP/UHPFRC
Coefficient de diffusion des ions chlorure (m ² /s) <i>Chloride diffusion coefficient (m²/s)</i>	> 10 ⁻¹¹	10 ⁻¹² à 10 ⁻¹¹	10 ⁻¹³ à 10 ⁻¹²	10 ⁻¹³

Tableau 3.3 : Coefficient de diffusion des ions chlore
Table 3.3 : Chloride diffusion coefficient

Koroze výztuže, mrazuvzdornost

	C30/37	C80/95	BFUP/UHPFRC
Vitesse de corrosion des armatures ($\mu\text{m}/\text{an}$) <i>Corrosion rate of passive reinforcements ($\mu\text{m}/\text{year}$)</i>	1,2	0,25	<0,01
Résistivité ($\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$) <i>Resistivity ($\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$)</i>	16	96	1133

Tableau 3.5 : Exemples de résistivités électriques mesurées pour différents types de béton [ROUX, 96b]

Table 3.5 Examples of electrical resistivity measured for different types of concrete [ROUX, 96b]

	C45	C105	BFUP 1 UHPFRC 1	BFUP 2 UHPFRC 2	BFUP 3 UHPFRC 3	BFUP 4 UHPFRC 4
Perte de masse (kg/m^2) <i>Loss of mass (kg/m^2)</i>	3,12 – 3,32	0,12	0,004	0,006	0,003	0,007

Tableau 3.7 : perte de masse résultant d'un essai de résistance au gel/dégel [BRAA, 06]

Table 3.7: loss of mass resulting from a freeze/thaw resistance test [BRAA, 06]

Odolnost vůči abrazi

- Materiál otryskáván pískem pod tlakem 2,5 atm.
- Součinitel CNR = srovnání množství otryskaného materiálu (1,0 = skleněná deska)

	BO <i>OC</i>	BHP <i>HPC</i>	BFUP <i>UHPFRC</i>
Coefficient CNR CNR coefficient	4	2,8	0,8 à 1,3 <i>0,8 to 1,3</i>

Tableau 3.8 : résultat essai d'abrasion [Rapport d'essais de la Compagnie Nationale du Rhône, Laboratoire d'essais Mesures Contrôles, rapport n°94-461]

Table 3.8: results of abrasion test (test report of Compagnie Nationale du Rhone, measures and controls test laboratory, report n° 94-461)

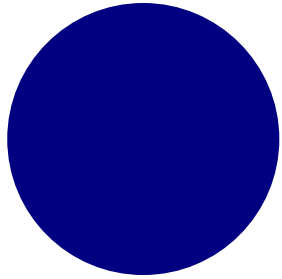
Krytí [AFGC]

Exigence environnementale pour $c_{min,dur}$ (mm) / Environmental requirement for $c_{min,dur}$ (mm)							
Classe structurale Structural class	Classe d'exposition suivant le tableau 4.1 / Exposure class according to Table 4.1						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
S1	5	5	5	10	10	15	15
S2	5	5	10	10	15	15	20
S3	5	5	10	15	15	20	20
S4	5	10	15	15	20	20	20
S5	10	10	15	20	20	20	25
S6	10	15	20	20	20	25	25

- UHPFRC dle AFGC

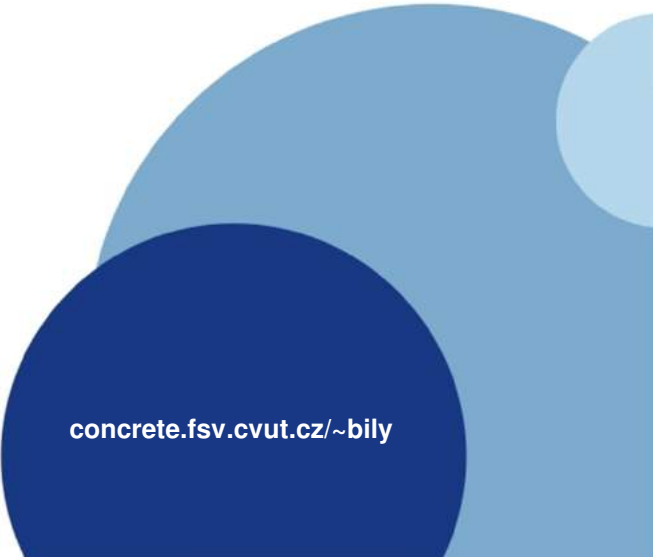
hodnoty $c_{min,dur}$ [mm] (požadavek prostředí)							
Konstrukční třída	Stupeň prostředí podle Tab. 6.1						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4 (pro 50 let)	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

- Běžný beton dle EC2



Děkuji Vám za pozornost

Dotazy, náměty, připomínky?



concrete.fsv.cvut.cz/~bily