



Vysokohodnotný beton: Úvod, složení

Petr Bílý

kancelář B731

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

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

konzultace: Út a Pá od 9:00

concrete.fsv.cvut.cz/~bily

Organizace předmětu

- 1x za 14 dní přednáška – odborníci z akademické sféry i z praxe
- 1x za 14 dní cvičení – konzultace seminárních prací, výpočtů nebo pomoc s výzkumem HPC v laboratoři
- Podmínky pro získání zápočtu
 - Vypracování cvičení (seminárka, výpočet, pomoc v laboratoři)
 - Docházka na přednášky (1 absence ze 6)
 - Složení závěrečného testu (?)

Obsah úvodní přednášky

- Definice pojmu vysokohodnotný beton (HPC)
- Terminologie
- Počátky vývoje HPC
- Důvody použití HPC
- Složky HPC



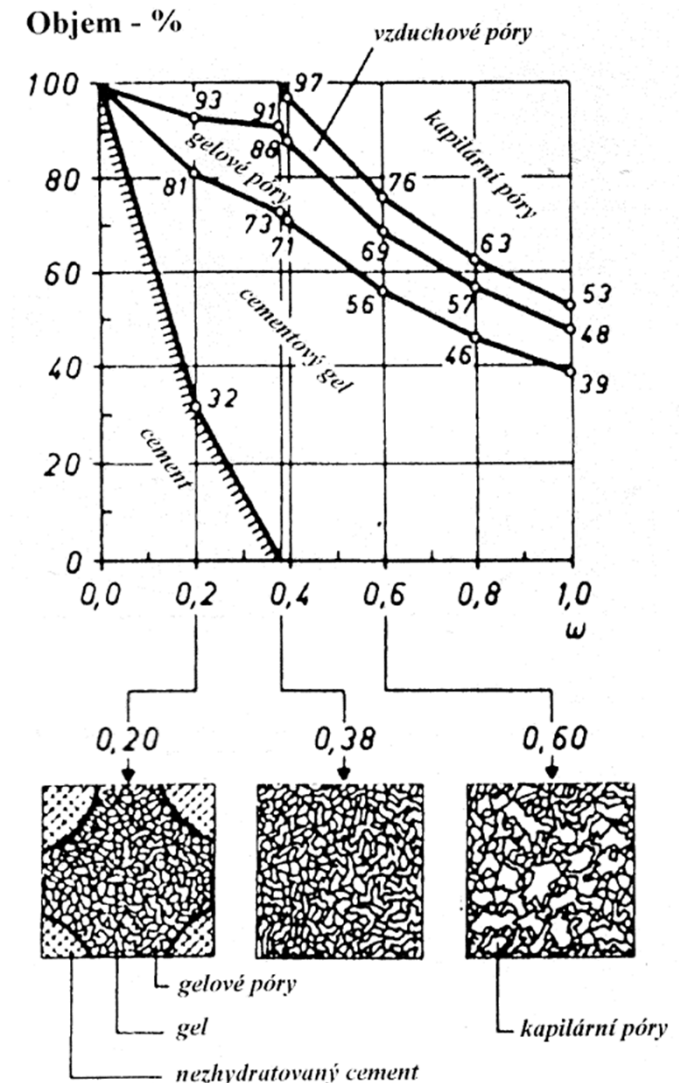
The Arch. Montréal, Canada, 2009.

Definice HPC

- HPC = High Performance Concrete
- **Beton s některou nebo některými vylepšenými vlastnostmi oproti běžnému betonu**
- Vylepšenou vlastností může být
 - Pevnost
 - Trvanlivost
 - Zpracovatelnost
 - Kvalita povrchu ... atd.

Definice HPC

- V podstatě se jedná o beton, který má **velmi nízký vodní součinitel** ($w/c < 0,4$)
- Beton s $w/c < 0,4$ bez plastifikačních přísad
 - Špatná zpracovatelnost
 - Velké autogenní smršťování



Terminologie HPC

- HPC = High Performance Concrete
 - HSC = High Strength Concrete
 - FRC = Fibre Reinforced Concrete
 - SCC = Self Compacting Concrete
 - UHPC = Ultra-High Performance Concrete
 - UHSC = Ultra-High Strength Concrete
 - HDC = High Durability Concrete
 - ECC = Engineered Cementitious Composite
 - APC = Advanced Cementitious Composite
 - RPC = Reactive Powder Concrete
 - ... atd.

Terminologie HPC

- w/c = water to cement ratio = vodní součinitel
- w/b = water to binder ratio = poměr vody a pojiva
- Příměs = náhrada cementu
- Přísada = upravuje vlastnosti směsi
- Běžný beton
 - bez významného množství přísad, příměsí, s hrubozrnným kamenivem
 - w/c typicky 0,45 – 0,65
 - pevnostní třída max. C50/60

Počátky vývoje HPC

- 60. léta 20. století, USA - HSC
 - 50-60 MPa (tehdy běžně 15-20)
 - První plastifikátory => snížení w/c
 - Příměs popílku pro zachování konzistence
 - Nejprve ojedinělé prvky (sloupy)
 - 1965 – Lake Point Tower, Chicago ($f_c = 53$ MPa)
 - Menší rozměry sloupů => větší podlahová plocha



Počátky vývoje HPC

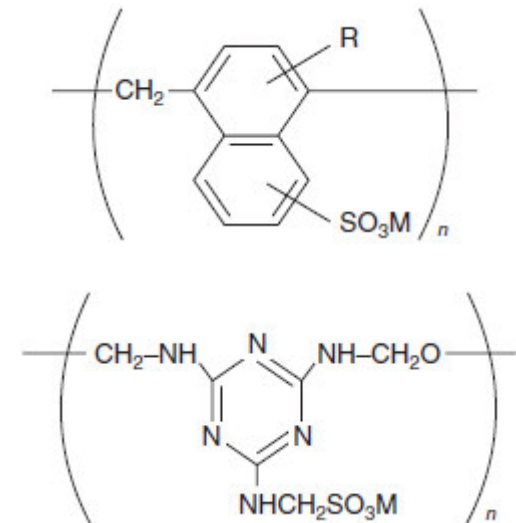
- 70. léta 20. století, Japonsko a Německo – Superplastifikátory (SPF)
 - 60. léta – plastifikátory na bázi lignosulfonátů
 - Okolo 1970 – první generace SPF – sulfonované naftalen-formaldehydové a melamin-formaldehydové kondenzáty (SNF, resp. SMF)



concrete.fsv.cvut.cz/~bily



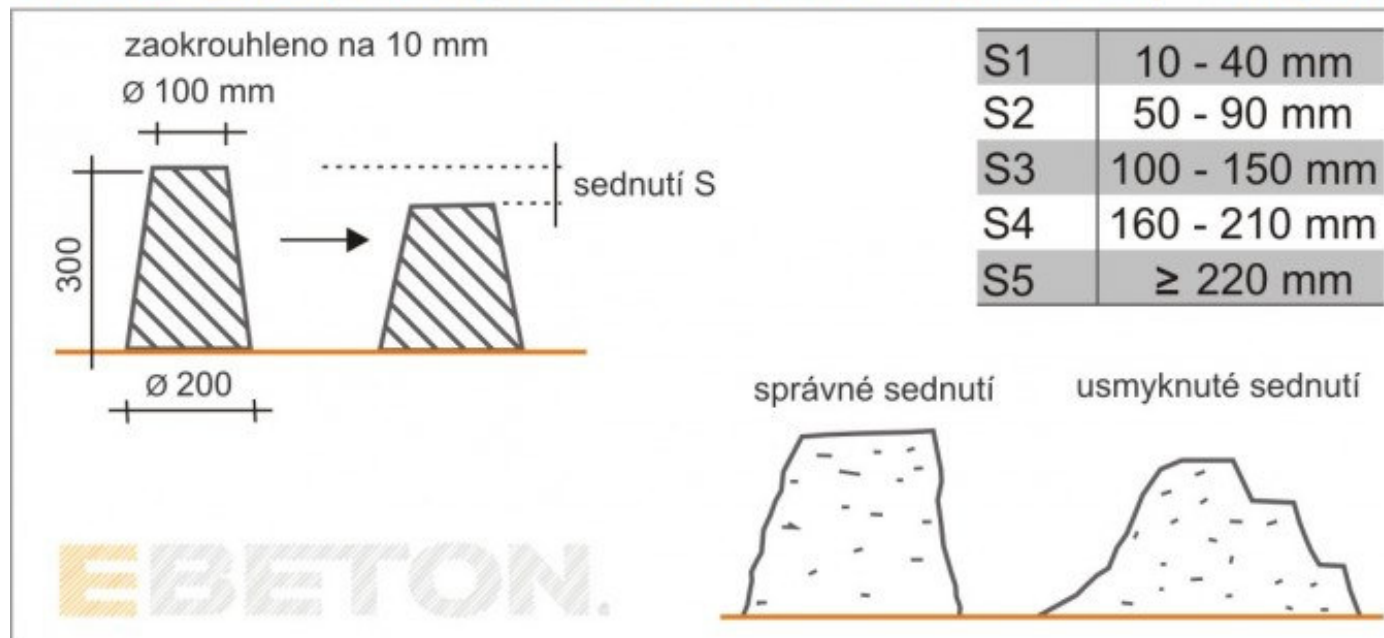
SNF a SMF



Počátky vývoje HPC

- 70. léta 20. století, Jap. a Něm. – SPF
 - Původní účel: ztekucení směsi na stavbě
 - Pak vyšší dávky SPF => redukce w/c až na 0,3

Sednutí kužele (Abrams), ČSN EN 12350-2, označení S (= Slump test)



Počátky vývoje HPC

- 70. léta 20. století, Skandinávie – křemičitý úlet
 - Náhrada části cementu, mikrofiller => zvýšení pevnosti
 - Zlepšení zpracovatelnosti
 - Eliminace segregace a krvácení betonu



Důvody použití HPC

- Řada faktorů PROTI návrhu HPC
 - Absence norem
 - Technologie méně prověřená časem
 - Křehkost materiálu
 - Obvykle vyšší autogenní smršťování
 - Vyšší cena – orientační ceny složek:

CEM I 42,5 R – 2700 Kč/t	Drátky – 25 - 75 000 Kč/t
Písek – 300 Kč/t	Superplastifikátor – 50 000 Kč/t
Štěrka netříd. – 300 Kč/t	Mikrosilika, Metakaolin – 10 000 - 20 000 Kč/t
Štěrka tříděný – 700 Kč/t	Struska, popílek – 100 - 250 Kč/t

- *Proč jej tedy používáme???*

Důvody použití HPC

- Důvody na straně investora
 - Snížení objemu použitého materiálu
 - Zkrácení doby výstavby
 - Zvětšení podlahové plochy k pronájmu
 - Vyšší odolnost vůči vlivům prostředí
 - Estetická kvalita => eliminace povrchových úprav



Důvody použití HPC

- Důvody na straně architekta
 - Umožněna větší tvarová rozmanitost
 - Větší možnosti povrchových úprav
 - „Odvážnější“ konstrukce



Vila v La Baule, Loire-Atlantique, Francie



Návrh lavičky z DUCTALu



Shawnessy Station, Calgary, Alberta, Kanada. Tloušťka skořepiny 20 mm, rozpon 6 m

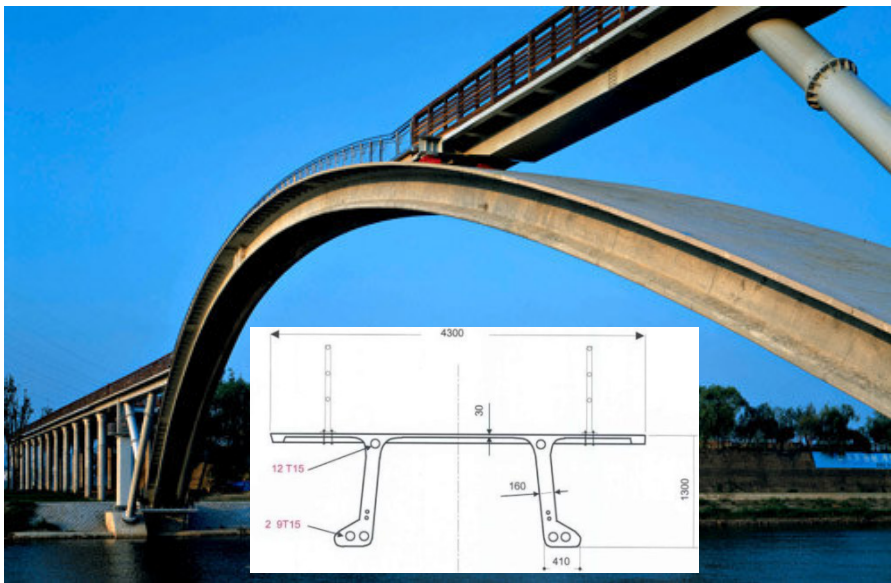
Důvody použití HPC

- Důvody na straně projektanta
 - Lepší vlastnosti materiálu

Možné „přidané hodnoty“ HPC	
Vyšší pevnost	Nižší permeabilita
Vyšší počáteční pevnost	Rázová houževnatost
Vyšší modul pružnosti	Snadné ukládání do bednění
Odolnost vůči abrazi	Odolnost vůči segregaci při hutnění
Delší životnost v agresiv. prostředí	Baktericidní účinky
Mrazuvzdornost	Fungicidní účinky
Odolnost vůči chemikáliím	...

Důvody použití HPC

- Důvody na straně projektanta
 - Větší variabilita konstrukčních řešení

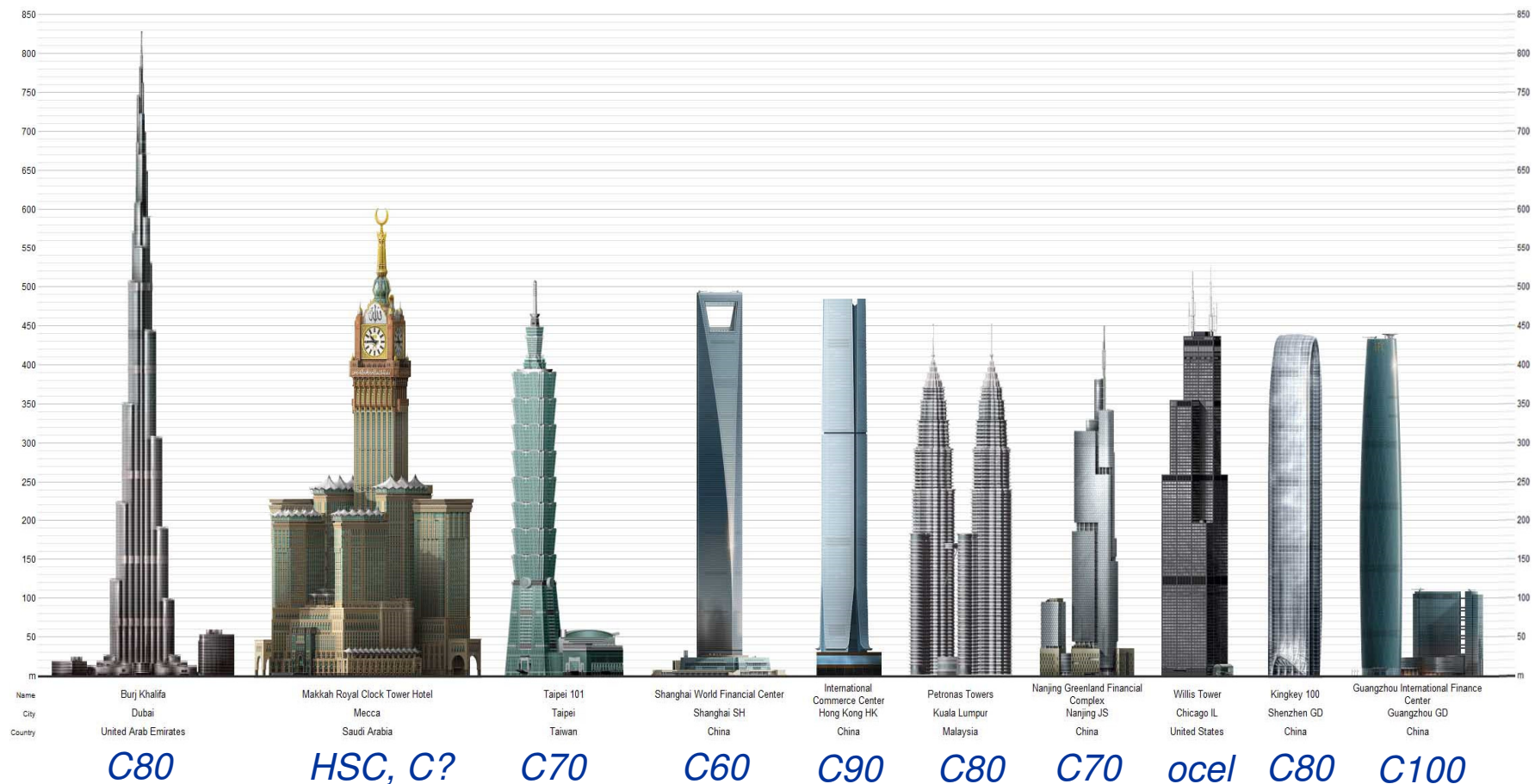


Footbridge of Peace, Soul, Jižní Korea. Rozpětí oblouku 120 m, vzdálenost žeber cca 2 m. Tloušťka desky 30 mm.



Mýtná brána viaduktu Millau, Francie. Rozměry 98x28 m, plášť segmentů z UHPC 2x10 cm, střed vyplněn polystyrenem (celková výška 20 – 85 cm)

Nejvyšší budovy světa – užití HPC

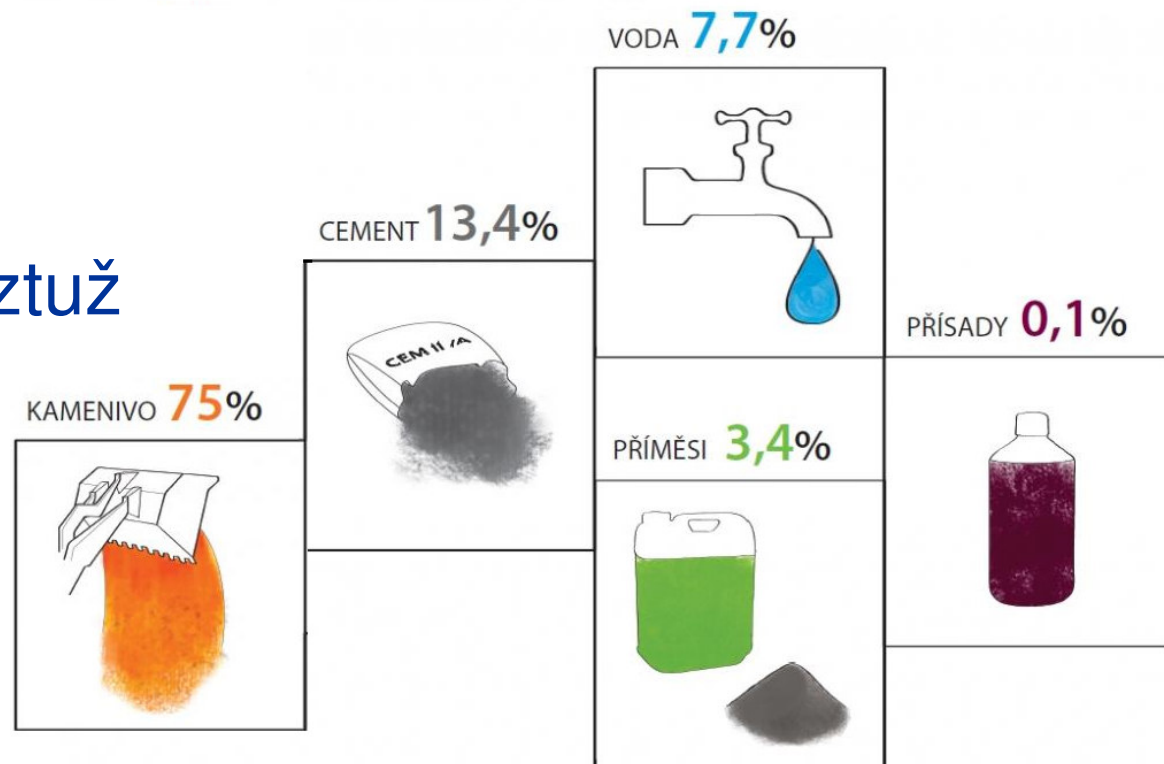


Pozn.: Burj Khalifa je do výšky cca 600 čistě betonová, špička je čistě ocelová. Sears Tower má ocelovou nosnou konstrukci. Konstrukce zbylých budov jsou kompozitní (beton + ocel)

Složky HPC

- Cement
- Voda
- Kamenivo
- Příměsi
- Přísky
- Rozptýlená výztuž

Příklad složení běžného betonu



Cement v HPC

- Vaznost 42,5 nebo 52,5
- Obvykle portlandský CEM I
- Při požadavku na vysokou počáteční pevnost rychlovazný (R)
- Dávka (350) 450 – 600 (900) kg/m³
- Vyšší dávky už nezvyšují pevnost, nadbytečný cement plní funkci mikrofilleru



Portlandský slínek

Voda v HPC

- Pitná voda je vždy vyhovující
- „Nepitná“: nesmí obsahovat velké množství organických látek, rozpuštěné soli, kyseliny, cukry
- Funkce vody
 - Chemická – hydratace směsi
 - Fyzikální – zpracovatelnost směsi
- Vodní součinitel
 - Stechiometricky min. 0,23
 - Pro zpracovatelnost min. 0,38
 - SPF i pod 0,20 (běžně 0,25 – 0,35)



Kamenivo HPC

- Klasický beton – kamenivo tvoří nosnou kostru
- HPC – cementový kámen + kamenivo tvoří n.k.
- Čím pevnější, tím lepší



Čedič



Žula

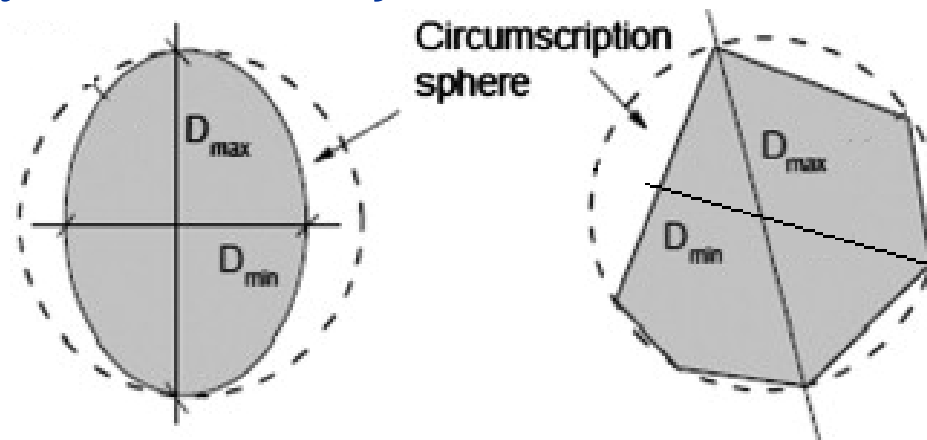


Vápenec

- $D_{\max}$ pro HPC 16 mm, lépe 8 mm

Kamenivo HPC

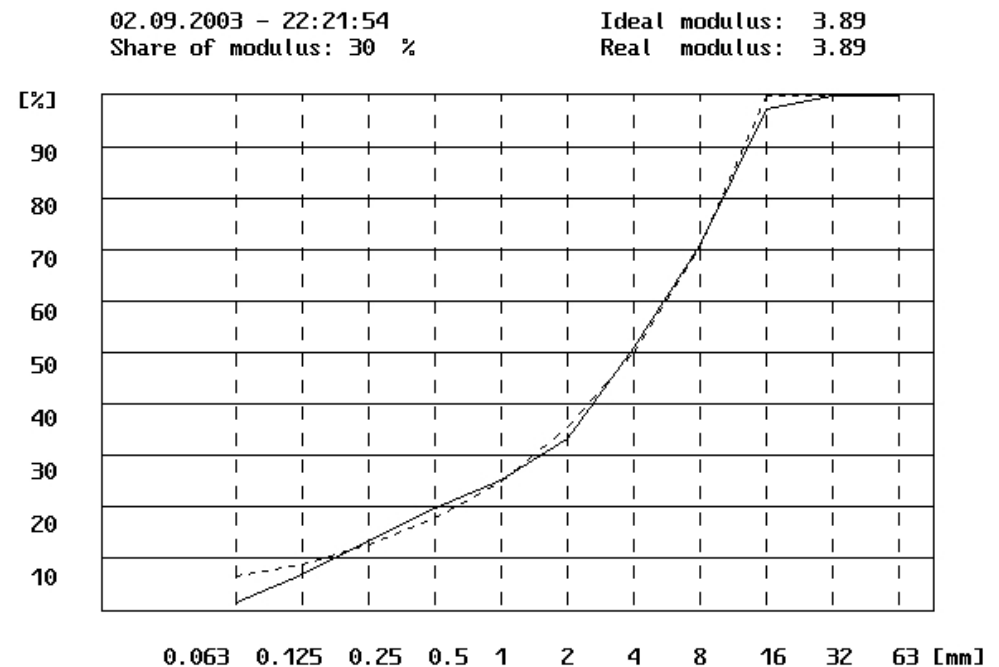
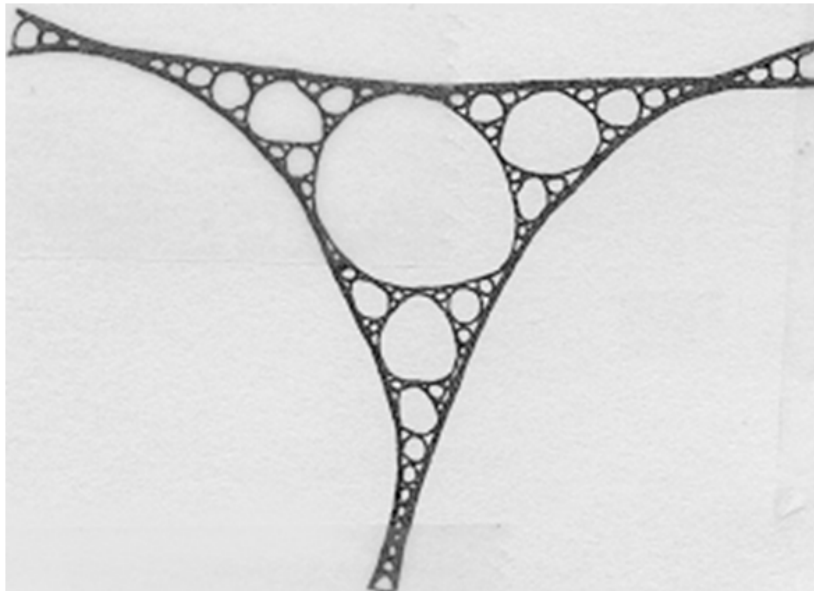
- Důležitý je tvar zrn
 - Ideální jsou kulová nebo kubická
 - Nevhodná jsou zrna destičková nebo jehlicová
 - Tvarový index co nejbližší 1



- Vhodnější jsou kameniva těžená než drcená
- Drcená nemají mít ostré hrany (koncentrace napětí)

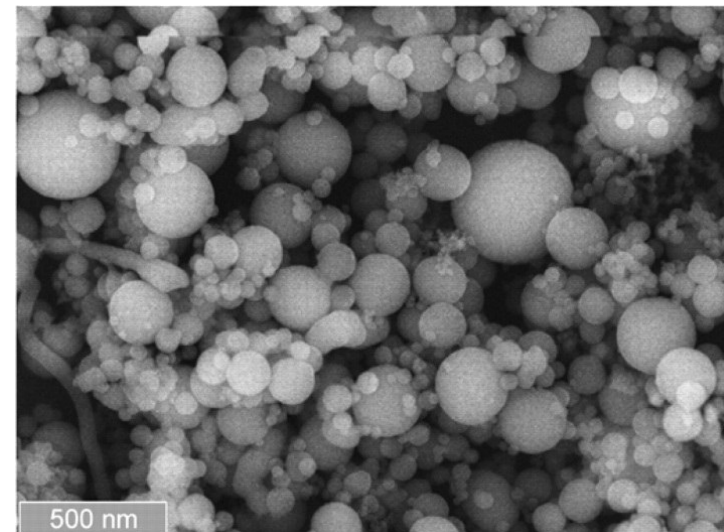
Kamenivo HPC

- Vhodná zrnitostní křivka
 - Úspora cementu
 - Rovnoměrnější rozdělení napjatosti ve struktuře



Příměsi HPC – Křemičitý úlet

- Též mikrosilika, SiO_2
- Pro dané vstupy stabilní složení
- Prášek nebo vodní suspenze
- Kulovité částice 0,1 – 0,2 μm
 - Nukleační efekt
 - Mikrofiller
 - Hutnost => nízká permeabilita
 - Zvýšení pevnosti
 - Ztekucující účinky
 - Prevence krvácení betonu



Příměsi HPC – Křemičitý úlet

- Latentně hydraulické => úspora cementu
$$SiO_2 + Ca(OH)_2 + H_2O \rightarrow CSH$$
- Velký měrný povrch (až 30 000 m²/kg) => roste spotřeba vody až o 1 / na 1 kg příměsi
- Teoreticky až 30 % cementu, prakticky většinou do 10 %



Příměsi HPC – Struska

- Mletá vysokopecní granulovaná struska
- SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 , MgO , S^-
- Stabilní složení (kontrolováno)
- Latentně hydraulická => pevnost
- Pomalejší hydratace => snížení počátečních pevností, ale také hydratačního tepla
- Hutnost => trvanlivost
- HPC do 30 % cementu (jinak i přes 65 %)



Příměsi HPC – Popílek

- Složení variabilní – dle paliva, spalovacího zařízení
- SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 , MgO , alkálie, C, SO_3^- ,...
- Ne všechny jsou latentně hydraulické
- Kontrola:
 - Obsah SO_3^- a volné síry
 - Obsah Cl^-
 - Obsah volného CaO
 - Obsah alkálií
- Velikost zrn desítky μm



Příměsi HPC – Popílek

- Pomalejší hydratace => snížení počátečních pevností, ale také hydratačního tepla
- Hutnost => nižší permeabilita
- Odolnost vůči krvácení
- Hladší výsledný povrch
- Zlepšení čerpatelnosti
- HPC 10 – 30 % cementu



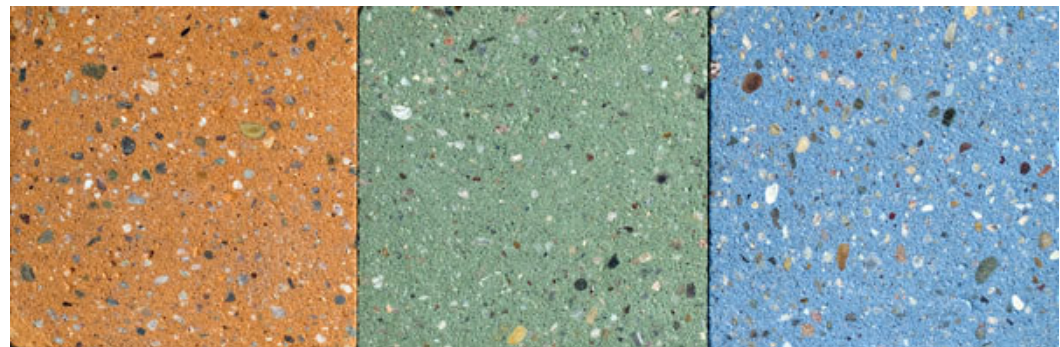
Příměsi HPC – Metakaolin

- Není odpad – cílený výrobek
- SiO_2 , Al_2O_3
- Nejúčinnější lat. hydraulická přísada => pevnost
- Velikost zrn 1 – 10 μm
- Hutnost => nižší permeabilita
- Pozitivní vliv na reologii
- Rychlý nárůst E
- Cca 10 % cementu



Inertní příměsi v HPC

- Slouží jako mikrofillery
 - Optimalizují křivku zrnitosti
 - Mohou urychlovat počáteční nárůst pevností
 - Mikromletý vápenec
 - Křemenná moučka
 - Čedičový prach
-
- Práškové pigmenty



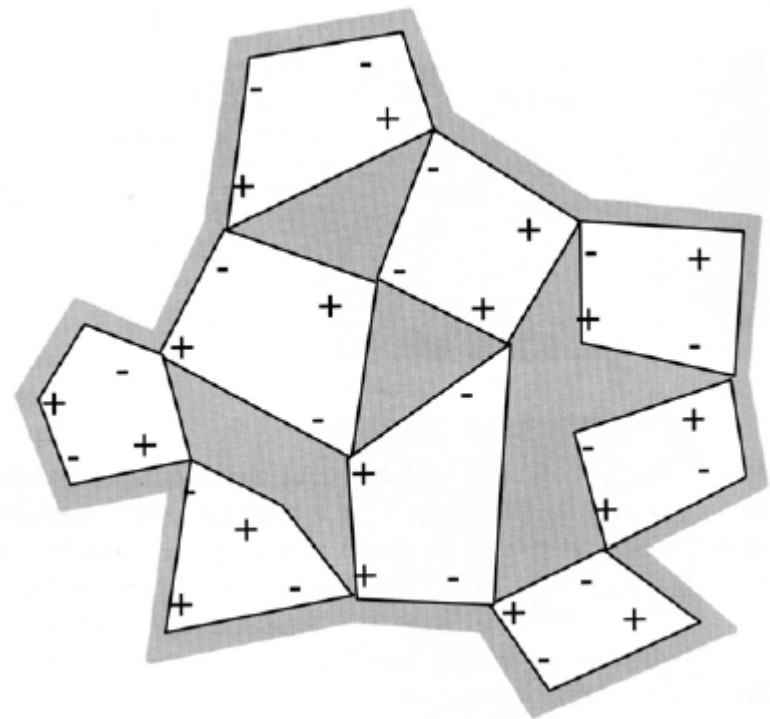
Přísady HPC

Plastifikační	Proti smršťování
Superplastifikační	Stabilizační
Provzdušňující	Těsnící (vodotěsnící)
Retardéry tuhnutí	Hydrofobizační
Akcelerátory tuhnutí	Biocidní
Adhezní	Fungicidní
Protikorozní	... atd.



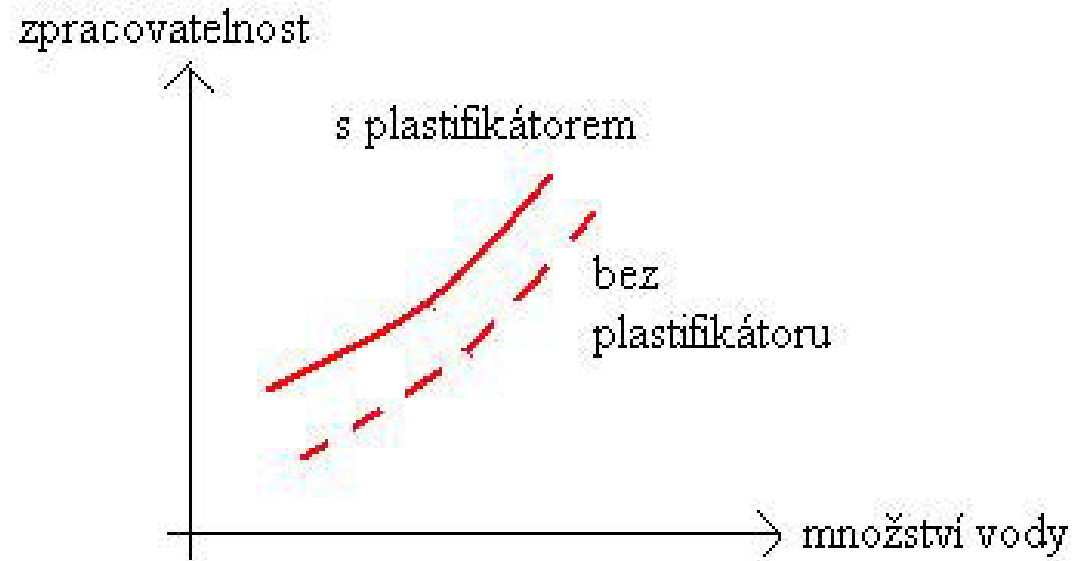
Superplastifikátory

- Zrna cementu jsou na povrchu nabitá => tendence k flokulaci při kontaktu s vodou
- Voda uvnitř flokulí nepřispívá ke zpracovatelnosti => nutno přidat více vody kvůli zpracovatelnosti
- ALE: tato voda nereaguje => poréznost => pokles pevnosti, trvanlivosti



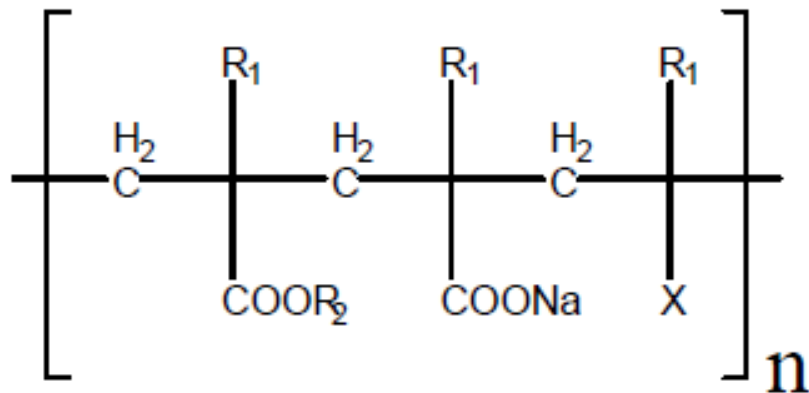
Superplastifikátory

- (Super)plastifikátor neutralizuje povrchové náboje
- Účinné již při dávce v řádu desetin % obsahu cementu, UHPC až 5 %
- Zvýšení pevnosti a/nebo zpracovatelnosti



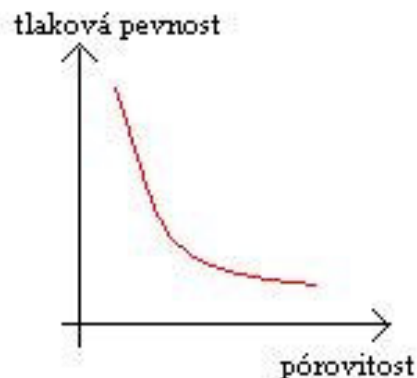
Superplastifikátory

- Druhá/třetí generace SPF – na bázi polykarboxyláteterů
- Nutno nalézt „bod nasycení“
- Nutno odzkoušet kompatibilitu cementu a SPF
 - Dobrá konzistence
 - Dostatečně dlouhá doba zpracovatelnosti



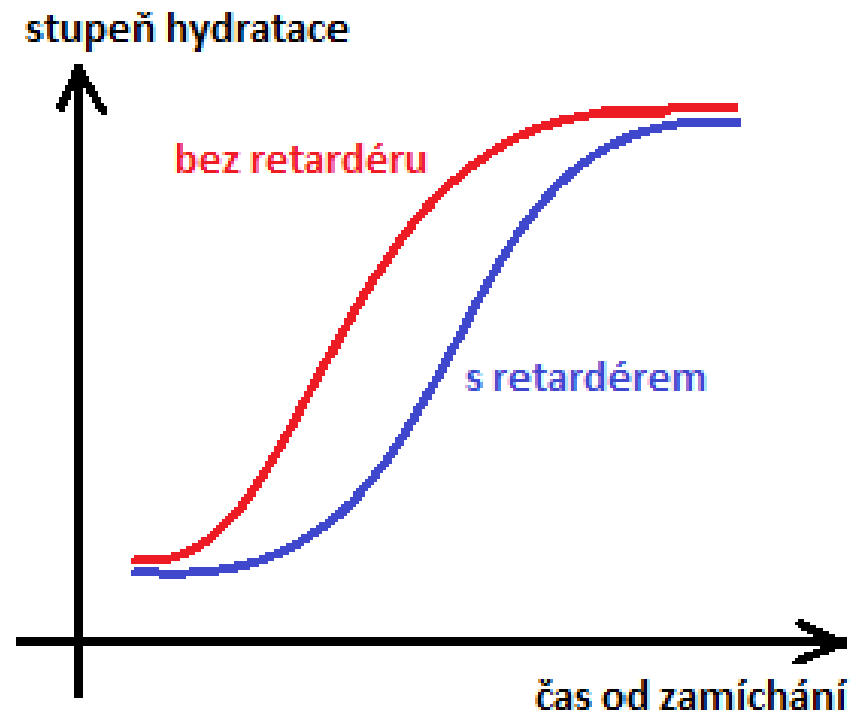
Provzdušňovací přísady

- Mýdla pryskyřic, tenzidy
- Uzavřené póry, rovnoměrně distribuované ve struktuře (průměr 50 – 300 μm)
- Mrazuvzdornost
- Provzdušnění max. 10 %
- výrazně klesá pevnost
- Max. 0,3 % cementu



Retardéry tuhnutí

- Cukry, fosfáty, hydroxylované karboxylové kyseliny
- Prodloužení doby zpracovatelnosti
- Snížení vývinu hydratačního tepla
- Max. 1 % dávky cementu



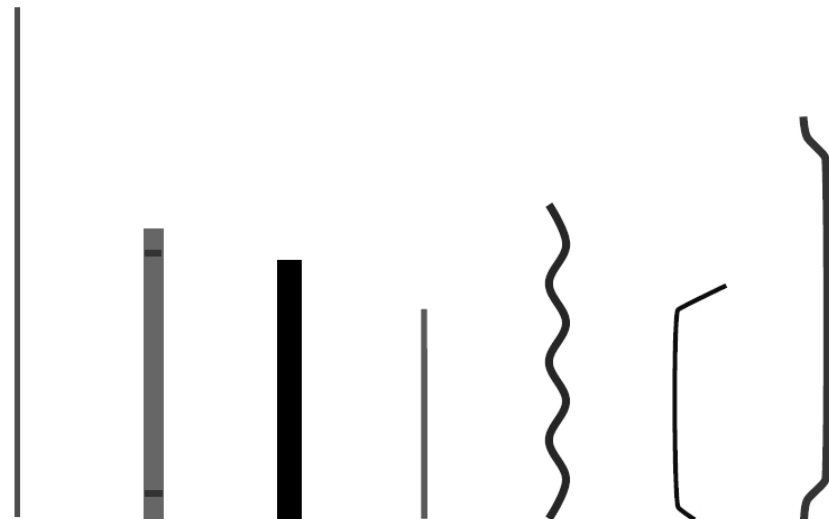
Polymerní rozptýlená výztuž v HPC

- PP, PE, PET, PVA, nylon, polyakrylát...
- Různé délky, průměry, tvary
- Dávka do 1 kg/m³
- Výhody
 - Rozdělení trhlin
 - Kompaktnost materiálu
 - Odolné vůči korozi
- Dobře dispergovat!



Ocelová rozptýlená výztuž v HPC

- Různé délky, průměry, tvary
- Dávka 30 – 200 kg/m³
- Výhody
 - Pevnost v tahu a tahu za ohybu (až 15 MPa)
 - Houževnatost (duktilita)
 - Rozdělení trhlin
- Koroze ???
- Disperze !!!

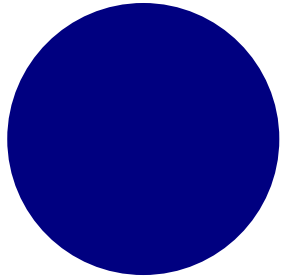


Příklady receptur HPC použitých v reálných konstrukcích

Mixture number	1	2	3	4	5	6
Water, kg/m ³	151	145	135	145	130	130
Cement, kg/m ³	311	398*	500	335*	513	315
Fly ash, kg/m ³	31	45	—	—	—	40
Slag, kg/m ³	47	—	—	125	—	—
Silica fume, kg/m ³	16	32*	30	40*	43	23
Coarse aggregate, kg/m ³	1068	1030	1100	1130	1080	1140
Fine aggregate, kg/m ³	676	705	700	695	685	710
Water reducer, L/m ³	1.6	1.7	—	1.0	—	1.5
Retarder, L/m ³	—	—	1.8	—	—	—
Air, %	7 ± 1.5	5 – 8	—	—	—	5.5
HRWR or plasticizer, L/m ³	2.1	3	14	6.5	15.7	5.0
Water to cementing materials ratio	0.37	0.30	0.27	0.29	0.25	0.34
Comp. strength at 28 days, MPa	59	—	93	99	119	—
Comp. strength at 91 days, MPa	—	60	107	104	145	—

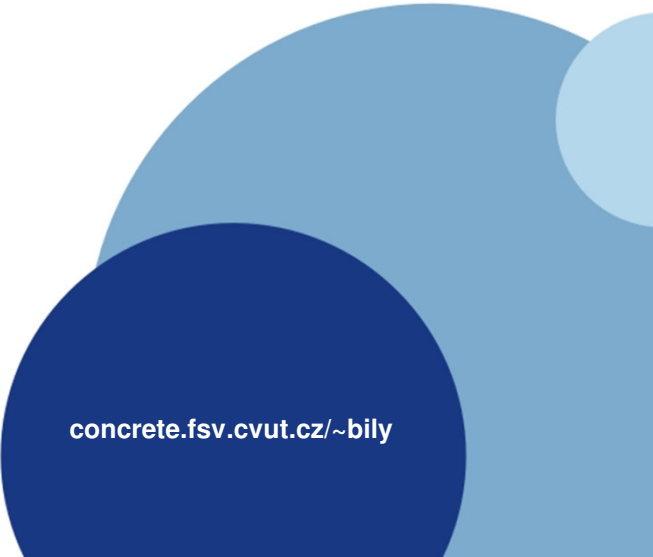
ZÁSADA

*Každou novou recepturu
betonu je nutno
důkladně odzkoušet*



Děkuji Vám za pozornost

Dotazy, náměty, připomínky?



concrete.fsv.cvut.cz/~bily