



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

FAST VŠB - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

Fakulta stavební

Stavební hmoty 1

BETON

Jiří Ščučka, Petr Martinec

2013

1	ÚVOD	3
2	charakteristika a rozdělení betonů	4
3	Složky betonu	10
3.1	Cement	10
3.1.1	Výroba silikátových cementů	10
3.1.2	Složení portlandského slínku	14
3.1.3	Hydratace cementu	15
3.1.4	Cementy pro obecné použití	18
3.1.5	Speciální cementy	22
3.1.6	Cementy pro zdění	23
3.1.7	Hlinitanový cement	24
3.2	Kamenivo	26
3.3	Voda	32
3.4	Příspěvy	36
3.4.1	Plastifikátory a superplastifikátory	36
3.4.2	Provzdušňovací příspěvy	38
3.4.3	Urychlovací příspěvy	39
3.4.4	Retardační příspěvy	39
3.4.5	Hydrofobizační příspěvy	40
3.5	Příměsi	40
4	návrh složení betonu	41
4.1	Návrh složení betonu podle Bolomeye	43
4.2	Návrh složení betonu podle empirického množství vody	45
5	speciální betony	47
5.1	Lehké betony	47
5.1.1	Polystyrenbeton	49
5.1.2	Autoklávovaný pórobeton	52
5.1.3	Pěnobeton	55
5.2	Těžké betony	57
5.3	Vysokohodnotné betony	58
5.4	Vodostavební betony	59
5.5	Silniční betony	60

5.6	Vláknobetony.....	62
5.7	Samozhutnitelné betony	65
5.8	Polymerbetony.....	67
6	zpracování čerstvého betonu	70
6.1	Mísení složek.....	70
6.2	Doprava betonu	71
6.3	Ukládání betonu	74
6.4	Zhutňování betonu.....	76
7	ošetřování betonu.....	79
8	korozí betonu.....	83
8.1	Fyzikální korozí betonu.....	83
8.2	Chemická korozí betonu	86
8.2.1	Chemická korozí I. typu.....	86
8.2.2	Chemická korozí II. typu.....	87
8.2.3	Chemická korozí III. typu.....	88
8.3	Biologická korozí betonu	89
8.4	Korozí výztuže	89

1 ÚVOD

Učební texty jsou určeny jako studijní opora k předmětu Stavební hmoty I. v 1. ročníku studijního programu Stavební inženýrství na FAST VŠB-TU Ostrava.

Cílem předmětu je seznámit studenty s vlastnostmi, použitím, výrobou a sortimentem základních stavebních materiálů. Předmět poskytuje základní informace o strukturách a fyzikálních a mechanických vlastnostech stavebních hmot a o metodách zjišťování těchto vlastností. Dále je zaměřen na konkrétní stavební hmoty, zejména na problematiku kameniva pro stavební účely, keramických hmot, dřeva, kovů, skla, pojiv, malt a izolačních materiálů.

Hlavní náplní těchto textů je problematika betonů. Těm je v rámci předmětu věnována, vzhledem k jejich důležitosti, zvýšená pozornost. V sedmi hlavních kapitolách jsou popsány klasifikace betonů podle různých hledisek, výroba a vlastnosti jejich složek s podrobněji zpracovanou částí věnovanou cementům, principy a metody návrhu složení betonu, speciální betony, způsoby zpracování betonu a jeho ošetřování a korozní jevy, které způsobují degradaci betonu v konstrukcích.

Na konci textu je uveden přehled použité odborné literatury. Citované práce doporučujeme studentům ke studiu, především knihu *SVOBODA a kol. Stavební hmoty*, která obsahuje nejen problematiku betonů, ale jsou v ní přehledným způsobem zpracována i další výše uvedená témata.

Příjemné studium stavebních hmot přejí

autoři

2 CHARAKTERISTIKA A ROZDĚLENÍ BETONŮ

Beton je kompozitní stavební materiál vzniklý ztvrdnutím směsi základních a doplňkových složek:

- pojiva,
- plniva,
- vody,
- přísad,
- příměsí.

Pojivo, plnivo a voda jsou základní složky betonu. Přísady a příměsí jsou složky doplňkové, které v betonu mohou být, ale nemusí.

Pokud se jedná o beton vyztužený, obsahuje také betonářskou ocel (železobeton), předpínací ocel (předpínaný beton) nebo rozptýlenou výztuž (vláknobeton).

Pojivem (viz kap. 3.1) je v betonu nejčastěji cement, může to být ale také asfalt (asfaltobeton), syntetická pryskyřice (polymerbeton), sádra (sádrobeton) nebo síra (sírobeton).

Kamenivo (viz kap. 3.2) je sypký zrnitý anorganický materiál (písek, šterk, drť, granule), vyrobený z přírodních hornin a zemin nebo z různých průmyslových odpadů (např. strusky, popílku, škváry, skla nebo polystyrenové drti).

Přísady (viz kap. 3.4) jsou chemikálie (většinou kapalné), přidávané do betonu pro zlepšení některých jeho vlastností v čerstvém nebo ztvrdlém vztahu (např. pro zpomalení nebo urychlení tuhnutí betonu, ztekucení čerstvého betonu, zvýšení mrazuvzdornosti ztvrdlého betonu, snížení jeho propustnosti pro kapaliny a plyny apod.).

Příměsí (viz kap. 3.5) jsou jemně mleté práškovité minerální látky, které slouží k zlepšení zpracovatelnosti betonu (kamenné moučky - filery), k jeho probarvení (práškové pigmenty) nebo k zlepšení zpracovatelnosti betonu a současně zvýšení jeho pevnosti a trvanlivosti (vysokopeční struska a pucolány).

Plastická betonová směs, vzniklá smícháním uvedených složek, je schopna přijmout libovolný tvar a po jejím zatvrdnutí vzniká výrobek požadovaného tvaru, který dalším ztvrdnutím získává na pevnosti.

Hlavními výhodami betonu jsou:

- vysoká pevnost v tlaku,
- odolnost proti negativním vlivům prostředí,
- nepropustnost pro vodu,
- ohnivzdornost,
- možnost vytvořit konstrukce různých tvarů.

K nevýhodám betonu patří:

- vysoká objemová hmotnost,
- špatná opracovatelnost,
- vysoká tepelná a zvuková vodivost,
- malá pevnost v tahu.

Technická norma ČSN EN 206-1 [11] definuje pojmy čerstvý a ztvrdlý beton.

Čerstvý beton je beton, který je zcela zamíchán a je ještě v takovém stavu, že ho lze hutnit zvoleným způsobem.

Ztvrdlý beton je beton v pevném stavu, který má již určitou pevnost.

Výše uvedená norma obsahuje také základní **klasifikaci betonů**. Betony se dělí podle různých hledisek. Prioritním způsobem klasifikace je rozdělení betonů podle stupně vlivu prostředí, které vychází z typu a stupně chemického a fyzikálního působení, kterému bude beton vystaven (viz tab. 1).

Podle objemové hmotnosti ρ_o se betony dělí na:

- lehké ($\rho_o < 2000 \text{ kg.m}^{-3}$),
- obyčejné ($\rho_o = 2000 - 2600 \text{ kg.m}^{-3}$),
- těžké ($\rho_o > 2600 \text{ kg.m}^{-3}$).

Podle místa výroby rozlišujeme:

- beton vyráběný přímo na staveništi,
- transportbeton - beton dodávaný na stavbu v čerstvém stavu většinou z centrální betonárny.

Podle účelu použití se betony dělí na:

- konstrukční (prostý beton, železobeton nebo předpjatý beton do nosných konstrukcí),
- výplňové - nemají nosnou funkci.

Podle způsobu uložení do konstrukce:

- monolitický beton- beton ukládaný na stavbě do bednění,
- prefabrikovaný beton - betonový výrobek je zhotoven a ošetřován na jiném místě, než je jeho konečné použití.

Podle vyztužení:

- prostý beton - nevyztužený nebo s pomocnou výztuží bez statické funkce,
- železobeton - vyztužený ocelovými pruty nebo svařovanými sítěmi,
- předpjatý beton - beton, do kterého se předpínací výztuží záměrně vnáší předpětí (beton

PROJEKT INOVACE PROGRAMU STAVEBNÍ INŽENÝRSTVÍ

může být předem předpjatý nebo dodatečně předpjatý),

- vláknobeton - beton obsahující rozptýlenou výztuž z krátkých vláken z oceli, skla, polypropylenu, uhlíku, apod.

Tab. 1 Stupně vlivu prostředí - doporučené mezní hodnoty pro složení a vlastnosti betonu

Stupeň	Popis prostředí	Max. v/c	Min. tř. betonu	Min. množství cementu [kg.m ⁻³]
X0	Bez nebezpečí koroze nebo narušení	...	C 12/15	...
XC	Koroze vlivem karbonatace			
XC1	suché nebo stále mokré	0,65	C 20/25	260
XC2	mokré, občas suché	0,60	C 25/30	280
XC3	středně mokré, vlhké	0,55	C 30/37	280
XC4	střídavě mokré a suché	0,50	C 30/37	300
XD	Koroze způsobená chloridy jinými než z mořské vody			
XD1	středně mokré, vlhké	0,55	C 30/37	300
XD2	mokré, občas suché	0,55	C 30/37	300
XD3	střídavě mokré a suché	0,45	C 35/45	320
XS	Koroze způsobená chloridy z mořské vody			
XS1	vystaven slanámu vzduchu, ale ne v přímém styku s mořskou vodou	0,50	C 30/37	300
XS2	trvale ponořen ve vodě	0,45	C 35/45	320
XS3	smáčený a ostříkovaný přílivem	0,45	C 35/45	340
XF	Střídavé působení mrazu a rozmrazování (mrazové cykly), s rozmrazovacími prostředky nebo bez nich			
XF1	mírně nasycen vodou, bez rozmrazovacích prostředků	0,55	C 30/37	300
XF2 ^{a)}	mírně nasycen vodou, s rozmrazovacími prostředky	0,55	C 25/30	300
XF3 ^{a)}	značně nasycen vodou, bez rozmrazovacích prostředků	0,50	C 30/37	320
XF4 ^{a)}	značně nasycen vodou, s rozmrazovacími prostředky nebo mořskou vodou	0,45	C 30/37	340
XA	Chemicky agresivní prostředí			
XA1	slabě agresivní chemické prostředí	0,55	C 30/37	300
XA2 ^{b)}	středně agresivní chemické prostředí	0,50	C 30/37	320
XA3 ^{b)}	vysoce agresivní chemické prostředí	0,45	C 35/45	360

PROJEKT INOVACE PROGRAMU STAVEBNÍ INŽENÝRSTVÍ

Poznámky:

a) Minimální obsah vzduchu 4 %. Pokud není beton provzdušněn, mají se vlastnosti betonu zkoušet podle příslušné zkušební metody ve srovnání s betonem, u kterého byla prokázána odolnost proti mrazu a rozmrazování (mrazovým cyklům), pro příslušný stupeň vlivu prostředí.

b) Pokud množství SO_4^{2-} vyvolává stupeň vlivu prostředí XA2 a XA3, je nezbytné použít síranovzdorný cement.

Podle konzistence čerstvého betonu se beton klasifikuje do stupňů podle jednotlivých zkušebních metod doporučených normou ČSN EN 12350 [16,17,18,19]:

- podle sednutí kužele (tab. 2),

Tab. 2 Rozdělení čerstvého betonu podle konzistence na základě zkoušky sednutím

Stupeň	Směs	Sednutí [mm]
S1	tuhá	10 až 40
S2	plastická	50 až 90
S3	měkká	100 až 150
S4	velmi měkká	160 až 210
S5	tekutá	≥220

- podle Vebe (tab. 3),

Tab. 3 Rozdělení čerstvého betonu podle konzistence na základě zkoušky Vebe

Stupeň	Směs	Vebe čas [s]
V0	velmi tuhá	≥ 31
V1	tuhá	30 až 21
V2	plastická	20 až 11
V3	měkká	10 až 6
V4	velmi měkká	5 až 3

- podle rozlití (tab. 4),

Tab. 4 Rozdělení čerstvého betonu podle konzistence na základě zkoušky rozlitím

Stupeň	Směs	Průměr rozlití [mm]
F1	tuhá	≤ 340
F2	plastická	350 až 410
F3	měkká	420 až 480
F4	velmi měkká	490 až 550
F5	tekutá	560 až 620
F6	velmi tekutá	≥ 630

- podle zhutnitelnosti (tab. 5).

Tab. 5 Rozdělení čerstvého betonu podle konzistence na základě stanovení stupně zhutnitelnosti

Stupeň	Směs	Stupeň zhutnitelnosti
--------	------	-----------------------

PROJEKT INOVACE PROGRAMU STAVEBNÍ INŽENÝRSTVÍ

C0	velmi tuhá	$\geq 1,46$
C1	tuhá	1,45 až 1,26
C2	plastická	1,25 až 1,11
C3	měkká	1,10 až 1,04

Podle pevnosti v tlaku se betony dělí do pevnostních tříd. Pro obyčejné a těžké betony je rozdělení uvedeno v tab. 6, pro lehké betony v tab. 7.

Tab. 6 Pevnostní třídy obyčejných a těžkých betonů

Pevnostní třída v tlaku	$f_{ck,cyl}$ (válec) [MPa]	$f_{ck,cube}$ (krychle) [MPa]
C 8/10	8	10
C 12/15	12	15
C 16/20	16	20
C 20/25	20	25
C 25/30	25	30
C 30/37	30	37
C 35/45	35	45
C 40/50	40	50
C 45/55	45	55
C 50/60	50	60
C 55/67	55	67
C 60/75	60	75
C 70/85	70	85
C 80/95	80	95
C 90/105	90	105
C 100/115	100	115

Tab. 7 Pevnostní třídy lehkých betonů

Pevnostní třída v tlaku	Minimální charakteristická válcová pevnost $f_{ck,cyl}$ [MPa]	Minimální charakteristická krychelná pevnost $f_{ck,cube}$ [MPa]
LC 8/9	8	9
LC 12/13	12	13
LC 16/18	16	18
LC 20/22	20	22
LC 25/28	25	28
LC 30/33	30	33
LC 35/38	35	38
LC 40/44	40	44
LC 45/50	45	50

LC 50/55	50	55
LC 55/60	55	60
LC 60/66	60	66
LC 70/77	70	77
LC 80/88	80	88

Písmeno C v označení pevnostní třídy znamená beton (z anglického *concrete*). Písmena LC znamenají lehký beton (z anglického *light weight concrete*). První číslo udává pevnost v tlaku stanovenou na *válcovém* zkušebním tělese (betonový válec o průměru 150 mm a výšce 300 mm), druhé číslo udává pevnost v tlaku stanovenou na *krychlovém* tělese (betonová krychle o hraně 150 mm). V obou případech se jedná o pevnost betonu v jednotkách MPa (megapascal) po 28 dnech zrání.

Betony pevnostních tříd C 55/67 a výše, resp. LC 55/60 a výše, jsou označovány jako *vysokopevnostní betony*.

Podle funkce betonové konstrukce rozlišujeme např. beton:

- vodostavební,
- silniční,
- konstrukčně-izolační,
- masivní,
- žáruvzdorný,
- dekorační, apod.



KONTROLNÍ OTÁZKY

1. Vyjmenujte základní a doplňkové složky betonu!
2. Vysvětlete pojmy čerstvý beton a ztvrdlý beton!
3. Podle jakých kritérií rozdělujeme betony?
4. Vysvětlete označení betonů v pevnostních třídách!
5. Které betony označujeme jako vysokopevnostní?

3 SLOŽKY BETONU

3.1 Cement

Funkci pojiva v betonu plní nejčastěji **cement** - jemně mleté práškové hydraulické pojivo, které po smíchání s vodou tuhne a tvrdne na vzduchu i ve vodě a po zatvrdnutí si také na vzduchu i ve vodě zachovává svoji pevnost a stálost. Cement se získává společným mletím tzv. **slínku** s různými přísadami. Slínek se vyrábí pálením vhodných surovin při teplotách kolem 1450 °C (tj. nad mezí slinutí).

Cementy se dělí do následujících skupin:

- Cementy silikátové,
 - *cementy pro obecné použití,*
 - *cementy speciální,*
 - *cementy pro zdění,*
- Cementy hlinitanové.

3.1.1 Výroba silikátových cementů

Výroba silikátových cementů spočívá v jemném semletí tzv. **portlandského slínku** s různými přísadami. Celý výrobní proces lze rozdělit do tří základních etap:

- příprava surovin,
- pálení slínku,
- mletí cementu.

Suroviny pro výrobu portlandského slínku lze rozdělit na základní a pomocné. **Základní suroviny** jsou potřebné pro vznik hlavních slínkových minerálů a dělí se dále na **hlavní** a **vedlejší**. **Pomocné suroviny** se přidávají do surovinové směsi pro usnadnění výrobního procesu. Přehled surovin pro výrobu portlandského slínku je uveden v tabulce 8.

V etapě přípravy surovin se hlavní suroviny (kde nejvyšší podíl tvoří vápence - až 80% směsi) po vytěžení **podrtí, předsuší a deponují v homogenizačním silu**. Poté se jednotlivé složky homogenizují a podle chemického složení se smíchají a doplní korekčními surovinami. Připravená směs se **dávkuje** do surovinového mlýna, kde se **mele a dosušuje**. Vzniklá surovinová moučka se ukládá do sil, kde se dále homogenizuje.

V etapě pálení slínku se surovinová moučka nejprve přehřívá ve **výměníku tepla**, který je

umístěn před **rotační pecí** (obr. 1). V rotační peci se pak provádí pálení přehřáté moučky při teplotách kolem **1450 °C**. Rozžhavené částice moučky pomalu prochází rotující pecí a dochází k jejich **slinování** (spékání) a postupnému nabalování do podoby tvrdých hrudek - **slínku** - o velikosti až několika centimetrů (obr. 2). Vzniklý slínek se chladí v **chladičích**. Režim chlazení má významný vliv na vlastnosti výsledného cementu. Při **rychlém chlazení** vzniká ve slínku **vyšší podíl sklovité (amorfní) fáze**. Takový slínek se sice obtížněji mele, vzniklý cement má ale vyšší pevnost a také větší hydratační teplo, menší smršťování a vyšší odolnost proti síranovým vodám, než cementy z pomalu chlazených slínků. **Pomalé chlazení** způsobuje ve slínku vznik fáze γ -C₂S, která nemá hydraulické vlastnosti a vzniklý cement pak vykazuje nižší kvalitu. Nejvyšší cement získáme, chladíme-li slínek **do 1250 °C pomalu a poté rychle**. Po vypálení a ochlazení se slínek uskladní ve slínkových sílech, kde se nechá odležet.

Tab. 8 Suroviny pro výrobu portlandského slínku

Suroviny pro výrobu portlandského slínku			
Základní	Hlavní	vápence (cca 80% směsi)	dodávají do směsi CaO
		slíny, jíly, jílovce, hlíny	dodávají do směsi CaO, Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , Fe ₂ O ₃
	Vedlejší (korekční)	křemičitý písek	korekce obsahu SiO ₂
		bauxit	korekce obsahu Al ₂ O ₃
		železná ruda, kyzové výpražky*	korekce obsahu Fe ₂ O ₃
Pomocné	černé uhlí, sulfítové výluhy**, etylénglykol, ...	usnadňují mletí surovinové směsi	
	kazivec***, fluorokřemičitany	snižují teplotu výpalu (usnadňují výpal)	

*... odpad po pražení pyritu v chemickém průmyslu při výrobě kyseliny sírové, **...odpad při výrobě celulózy ze dřeva, ***... kazivec = minerál fluorit CaF₂



Obr. 1 Rotační pece pro výpal portlandského slínku (převzato z [29])



Obr. 2 Vzorek portlandského slínku

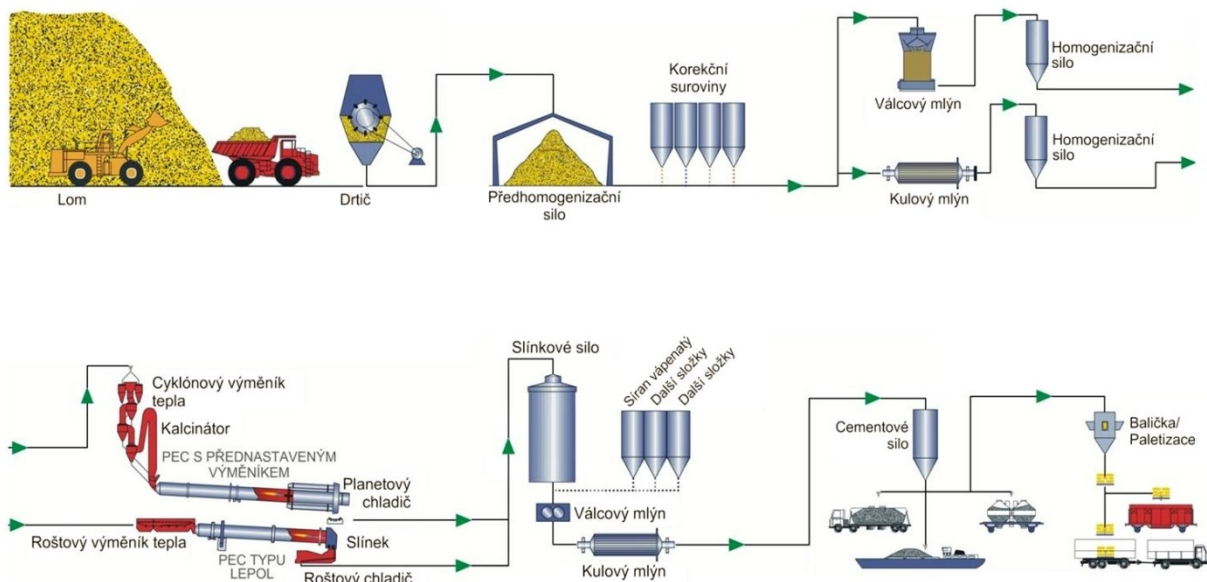
V etapě výroby cementu se slínek mele v cementových mlýnech (obr. 3) na jemný prášek - *cement*. Slínek se mele společně s 3 až 5 % sádrovce, který se do cementu přidává jako zpomalovač tuhnutí, případně s dalšími přísadami (viz dále). Velikost částic cementu se pohybuje *od 1 do 250 μm* (většina zrněk má velikost od 5 do 50 μm). Jemnost mletí cementu se posuzuje podle měrného povrchu částic. Cementy nižších tříd mají měrný povrch v rozmezí **280 až 350 m².kg⁻¹**, u cementů vyšších tříd se hodnoty měrného povrchu pohybují **od 350 do 500 m².kg⁻¹**.



Obr. 3 Pohled do nitra cementového mlýna s ocelovými mlecími tělesy (převzato z [29])

Pomletý cement se skladuje v cementových silech, kde se čeří vzduchem. Dochází tím k jeho homogenizaci a zvyšování objemové stálosti. Expeduje se buď jako **volně sypaný** ve speciálních vagonech a cisternách, nebo jako **pytlovaný**.

Celý proces výroby cementu je schematicky znázorněn na obr. 4.



Obr. 4 Schéma výroby cementu (převzato z <http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny>)

3.1.2 Složení portlandského slínku

Portlandský slínek obsahuje více než 20 druhů minerálních složek, z nich největší vliv na vlastnosti výsledného cementu mají **4 hlavní slínkové minerály**, viz tab. 9 a obr. 5.

Tab. 9 Hlavní slínkové minerály

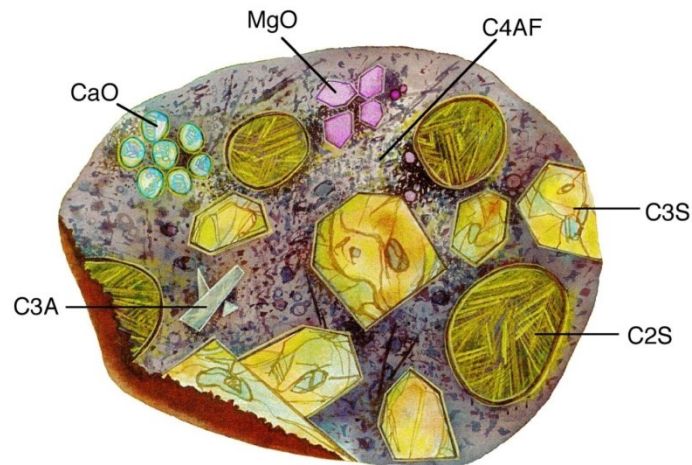
Slovní označení	Zkrácený vzorec	Chemický vzorec a název	Podíl minerálu ve slínku
Alit	C ₃ S	3CaO.SiO ₂ - trikalciumsilikát (křemičitan trojvápenatý)	45 až 60 %
Belit	C ₂ S	2CaO.SiO ₂ - dikalciumsilikát (křemičitan dvojvápenatý)	15 až 30 %
Amorfnní fáze	C ₃ A	3CaO.Al ₂ O ₃ - trikalciumaluminát (hlinitan trojvápenatý)	5 až 12 %
Celit	C ₄ AF	4CaO.Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃ - tetrakalciumaluminátferit (hlinitoželezitan čtyřvápenatý)	10 až 20 %

Portlandský slínek obsahuje také malé množství volných oxidů **CaO** (tzv. volné vápno) a **MgO** (periklas). CaO je v podstatě mrtvě pálené vápno, které velmi špatně reaguje s vodou a v cementovém kameni se dohašuje až s velkým zpožděním. Přeměna CaO na Ca(OH)₂ při dohašování je spojená se zvětšováním objemu a může vést k vzniku trhlin. Přípustné množství CaO ve slínku je proto max. 4%. Podobně nežádoucí je přítomnost MgO, z kterého při reakci s vodou vzniká objemnější Mg(OH)₂. Max. přípustné množství MgO ve slínku je 6 %. Limitované je také množství oxidů Na₂O + K₂O ve slínku. Jejich obsah nad 1 % způsobuje nerovnoměrné tuhnutí a tvorbu výkvětů na povrchu betonů a malt.

Zkrácené formy zápisu chemických vzorců, používané v cementářské praxi, uvádí tab. 10.

Tab. 10 Zjednodušené formy zápisu chemických vzorců v cementářské notaci

Chem. vzorec	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	H ₂ O	CO ₂	SO ₃
Zkratka	C	S	A	F	T	M	K	N	H	Ĉ	Ŝ



Obr. 5 Schematické znázornění řezu zrnkem portlandského cementu (převzato z [38])

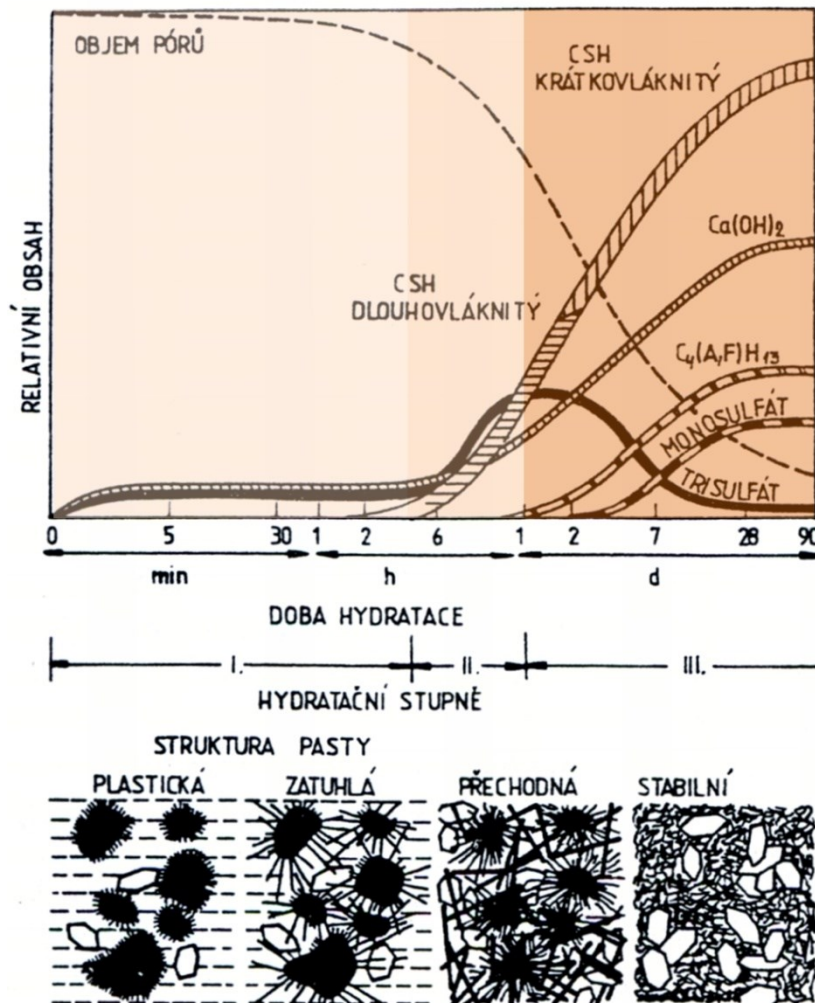
3.1.3 Hydratace cementu

Po smíchání s vodou začne cement hydratovat. **Hydratace cementu** je složitá fyzikálně-chemická reakce, při které reagují slínkové minerály cementu s vodou za vzniku málo rozpustných sloučenin. Ty se vzájemně pevně spojují a vytváří mikrostrukturu ztvrdlého cementového kamene. Hydratace cementu je reakce exotermní - uvolňuje se při ní tzv. **hydratační teplo**.

Hydratace začíná probíhat hned po prvním kontaktu cementových zrněk s vodou, jednotlivé složky slínku však nereagují stejnou rychlostí. První hydratuje C_3A (trikalciumaluminát). Jeho rychlá hydratace musí být zpomalena přidáním retardéru, jinak by připravený beton ztuhl ještě před začátkem betonáže. Jako retardér se používá **sádrovec**, který se do cementu přidává v množství max. 5 % již během mletí slínku. Na druhém místě z hlediska rychlosti hydratace je C_4AF (tetrakalciumaluminátferit) spolu s C_3S (trikalciumpilikát) a nejpomaleji hydratuje C_2S (dikalciumsilikát).

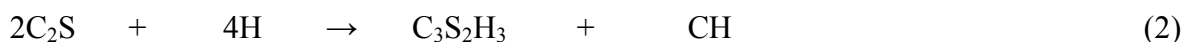
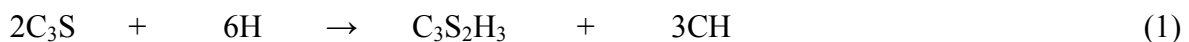
Proces hydratace cementu lze zjednodušeně rozdělit do **tří fází** (viz obr. 6).

V **první fázi** (cca 0 až 1 hodina), po smíchání cementu s vodou, vzniká přesycený roztok $Ca(OH)_2$ obsahující ionty Ca^{2+} a SO_4^{2-} . V tomto roztoku začínají vznikat jehličkovité krystaly minerálu **ettringitu** ($C_6A\hat{S}_3H_{32}$) a destičkovité krystaly minerálu **portlanditu** ($Ca(OH)_2$) (obr. 7). Tyto krystaly se usazují na povrchu částecek C_3A a vytváří kolem nich hutný, jemně krystalický obal. Voda a ionty Ca^{2+} a SO_4^{2-} mohou přes vzniklý obal jen velmi pomalu difundovat k ještě nehydratovaným slínkovým minerálům a proces hydratace se tak zpomaluje. Obal na povrchu zrněk se vlivem krystalizačních tlaků postupně porušuje a opět zaceluje novými krystalky, tak dlouho, dokud koncentrace iontů SO_4^{2-} v roztoku neklesne pod hodnotu potřebnou pro vznik ettringitu. V první fázi hydratace probíhají reakce pouze na povrchu cementových zrn. Velikost zrn a prostory mezi nimi se významně nemění.



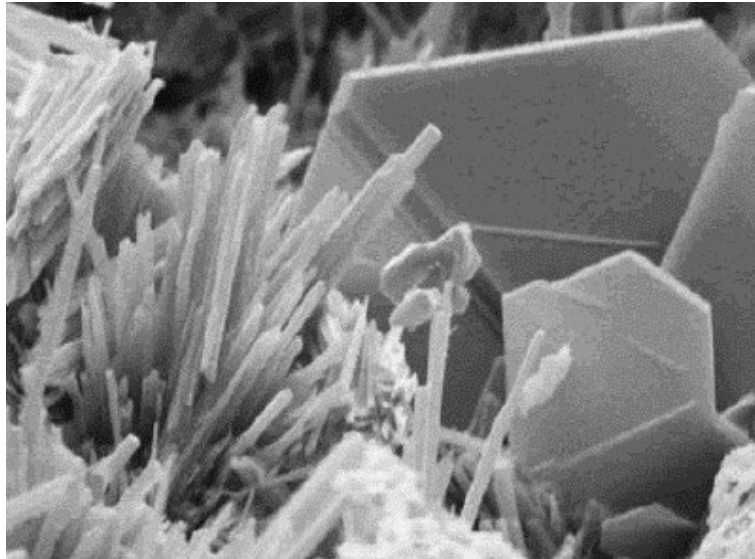
Obr. 6 Schematické znázornění mechanismu hydratace a vývin struktury cementového tmele [37]

V druhé fázi hydratace (cca 1 až 24 hodin) začínají vznikat vláknité gelovité krystalky CSH (kalciumsilikáthydrátů neboli vodnatých křemičitanů vápenatých). Protože prostory mezi cementovými zrny zatím nejsou vyplněny hydratačními produkty, mohou krystaly CSH volně růst do podoby vláken o délce cca 100 nm (dlouhovláknitý CSH, viz obr. 6). Tato vlákna spolu s dlouhými krystaly ettringitu přemostňují póry a vytváří prostorové vazby, které se postupně zahušťují (zhutňují) a cementový tmel tak začíná tuhnout. S přibýváním hydratačních produktů a zhutňováním struktury přestává vznikat dlouhovláknitý CSH a jeho nové krystaly dostávají kratší lístkovitý (fóliovitý) tvar (obr. 8). CSH vzniká hydratací kalciumsilikátů C_2S a C_3S . Složení CSH se pohybuje v poměrně širokém rozmezí a závisí významně především na vodním součiniteli, teplotě a stáří betonu. Přibližně lze hydrataci kalciumsilikátů popsat rovnicemi:



kalciumsilikát voda kalciumsilikáthydrát hydroxid vápenatý

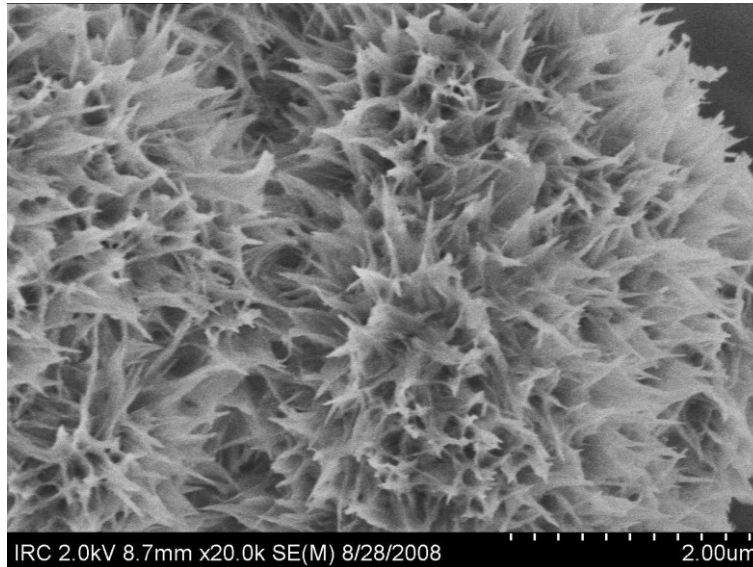
Z uvedených rovnic je zřejmé, že kromě CSH vzniká hydratací kalciumsilikátů také portlandit (hydroxid vápenatý). Portlandit je zde důležitou složkou, protože ve vytvrzeném cementovém kameni vytváří alkalické prostředí (pH kolem 12,5). V betonu s $\text{pH} > 11,5$ je dobře chráněna ocelová výztuž proti korozi. Dostatečný obsah portlanditu v cementovém kameni je proto známkou kvalitního "zdravého" betonu.



Obr. 7 Jehlicovité krystaly ettringitu a destičkovité krystaly portlanditu. Snímek z elektronového mikroskopu; velikost objektů v mikrometrech (převzato z <http://en.wikipedia.org/wiki/Ettringite>)

Na konci druhé fáze, tj. po cca 24 hodinách, se přestává tvořit ettringit, neboť již zreagoval všechny přidaný sádrovec a koncentrace iontů SO_4^{2-} klesla pod hodnotu potřebnou k tvorbě ettringitu.

V třetí fázi hydratace cement tvrdne. Objevují se nové hydratační produkty, pórový prostor se jimi postupně zaplňuje a zhutňuje. V tomto stádiu začíná klesat obsah ettringitu (trisulfátu), neboť se mění na monosulfát. Velikost vláken vznikajících CSH se stále zmenšuje a na konci hydratace je 10 až 100 × menší než na konci druhé fáze (krátkovláknitý CSH, viz obr. 6).



Obr. 8 Krystalky krátkovláknitého (lístkovitého) CSH (převzato z <http://cementlab.com>)

3.1.4 Cementy pro obecné použití

Cementy pro obecné použití se rozdělují do *pěti hlavních skupin* [10]:

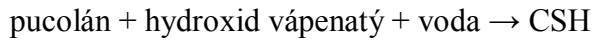
CEM I	portlandský cement,
CEM II	portlandský cement směsný,
CEM III	vysokopeční cement,
CEM IV	pucolánový cement,
CEM V	směsný cement.

Portlandský cement (CEM I) je cement *jednosložkový*, obsahující pouze mletý portlandský slínek s přidavkem sádrovce. Ostatní cementy (CEM II až CEM V) jsou *vícesložkové* - část slínku je v nich nahrazena hydraulicky aktivní látkou jiného původu. Látky nahrazující slínek se melou v cementárně společně se slínkem a sádrovcem na konci výrobního procesu. Přehled cementů pro obecné použití a jejich složení uvádí tabulka 11. Nejběžnější hydraulicky aktivní náhradou cementu je mletá *vysokopeční struska*. Dále se používají přírodní a průmyslové pucolány (hlavně křemičitý úlet a popílký) a vápenec.

Vysokopeční struska je vedlejší produkt z výroby surového železa ve vysoké peci. Je-li žhavá tekutá struska (o teplotě cca 1400 °C) prudce zchlazena vodou, nedochází ke krystalizaci a vzniká granulát (tzv. granulovaná VPS), vykazující *latentně hydraulické vlastnosti*. To znamená, že po rozemletí na jemný prášek reaguje s vodou a chová se jako hydraulické pojivo. Potřebuje k tomu ale přítomnost budiče (aktivátoru). Tím je např. **CaO**, přítomný ve slínku.

Pucolány jsou přírodní nebo průmyslové anorganické látky (křemičité nebo hlinitokřemičité), které samy o sobě s vodou nereagují. Jsou-li však jemně rozemleté, reagují ve vodě s rozpuštěným hydroxidem vápenatým (Ca(OH)_2) a vytváří kalcium-silikát-hydráty (CSH)

podobného typu, jaký vzniká při hydrataci portlandského cementu. Pucolánovou reakci lze zjednodušeně vyjádřit takto:

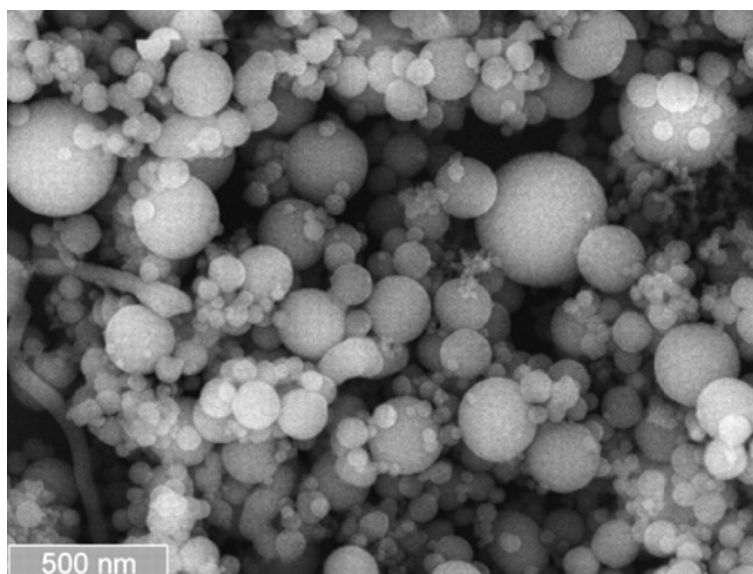


K **přírodním pucolánům** patří např.: pemza, sopečné tufy a tufity (horniny vzniklé usazením a zpevněním sopečného popela), diatomit (křemelina) a spongility (druh opuky). K **průmyslovým pucolánům** pak náleží: mikrosilika (křemičité úlety), popílky a kalcinované břidlice, hlíny nebo popely. Na rozdíl od čistých pucolánů (jako mikrosilika nebo popílek) se u průmyslových pucolánů v tab. 11 jedná o materiál hromadného substrátu z průmyslové výroby s variabilním mineralogickým a chemickým složením.

Křemičité úlet (tzv. mikrosilika) jsou velmi jemné částice (obr. 9), vznikající při výrobě křemíku a jeho slitin v obloukové elektrické peci. Jedná se o částice vzniklé kondenzací a oxidací plynného SiO, zachycené v odlučovacím systému elektrické pece. Částice mají kulovitý tvar a velikost $0,1 \div 2 \mu\text{m}$. Mikrosilika obsahuje 85 až 99 % amorfního, velmi reaktivního SiO₂ s **pucolánovými vlastnostmi**.

Popílky jsou malé částice (obr. 10), které vznikají při spalování práškového uhlí v tepelných elektrárnách a shromažďují se v jejich odlučovacích systémech. Částice mají většinou kulovitý tvar a jsou plné nebo duté. Velikost částic se pohybuje mezi 0,001 a 0,1 mm. Popílky se skládají převážně z SiO₂ (cca 40 až 50 %) a Al₂O₃ (19 až 30 %). Podmínkou pro použití popílku jako hydraulicky aktivní náhrady cementu je podíl aktivního SiO₂ min. 25 %, což zajistí jeho pucolánovou aktivitu. Obecně je chemické složení elektrárenských popílků značně proměnlivé, neboť závisí na typu spalovacího systému, na druhu spalovaného uhlí a množství nečistot v něm obsažených. Většina popílků vykazuje pucolánové vlastnosti, některé je však mít nemusí. Pucolánová aktivita popílku významně závisí na obsahu sklovité fáze.

Křemičité popílky vznikají při spalování černých a hnědých uhlí, vápenaté popílky vznikají spalováním těchto uhlí s přidavkem vápence nebo dolomitu, pro usnadnění procesu odsíření spalin.



Obr. 9 Částice mikrosiliky v elektronovém mikroskopu (převzato z [35])

PROJEKT INOVACE PROGRAMU STAVEBNÍ INŽENÝRSTVÍ

Tab. 11 Cementy pro obecné použití

Hlavní druhy	Druh cementu	Označení cementu	Složení ¹⁾										Doplňující složky	
			Hlavní složky											
			Slínek	Vysokopepnicí struska	Křemičitý úlet	Pucolán		Popílek		Kalcinovaná břidlice	Vápenec			
						Přírodní	Průmyslový	Křemičitý	Vápenatý		L	LL		
K	S	D	P	Q	V	W	T	L	LL					
CEM I	Portlandský cement	CEM I	95 - 100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5
CEM II	Portlandský síťkový cement	CEM II/A-S	80 - 94	6 - 20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5
		CEM II/B-S	65 - 79	21 - 35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5
	Portlandský cement s křemičitým úletem	CEM II/A-D	90 - 94	-	6 - 10	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5
	Portlandský pucolánový cement	CEM II/A-P	80 - 94	-	-	6 - 20	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5
		CEM II/B-P	65 - 79	-	-	21 - 35	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5
		CEM II/A-Q	80 - 94	-	-	-	6 - 20	-	-	-	-	-	-	0 - 50
		CEM II/B-Q	65 - 79	-	-	-	21 - 35	-	-	-	-	-	-	0 - 50
	Portlandský popílkový cement	CEM II/A-V	80 - 94	-	-	-	-	6 - 20	-	-	-	-	-	0 - 50
		CEM II/B-V	65 - 79	-	-	-	-	21 - 35	-	-	-	-	-	0 - 50
		CEM II/A-W	80 - 94	-	-	-	-	-	6 - 20	-	-	-	-	0 - 50
		CEM II/B-W	65 - 79	-	-	-	-	-	21 - 35	-	-	-	-	0 - 50
	Portlandský cement s kalcinovanou břidlicí	CEM II/A-T	80 - 94	-	-	-	-	-	-	6 - 20	-	-	-	0 - 50
		CEM II/B-T	65 - 79	-	-	-	-	-	-	21 - 35	-	-	-	0 - 50
	Portlandský cement s vápencem	CEM II/A-L	80 - 94	-	-	-	-	-	-	-	6 - 20	-	-	0 - 50
		CEM II/B-L	65 - 79	-	-	-	-	-	-	-	21 - 35	-	-	0 - 50
		CEM II/A-LL	80 - 94	-	-	-	-	-	-	-	-	6 - 20	-	0 - 50
		CEM II/A-LL	65 - 79	-	-	-	-	-	-	-	-	21 - 35	-	0 - 50
	Portlandský směsný cement	CEM II/A-M	80 - 94	6 - 20	0 - 50									
		CEM II/B-M	65 - 79	21 - 35	0 - 50									

Tab. 11 Cementy pro obecné použití - pokračování

Hlavní druhy	Druh cementu	Označení cementu	Složení ¹⁾										Doplňující složky
			Hlavní složky										
			Slínek	Vysokopec- ní struska	Křemičitý úlet	Pucolán		Popílek		Kalcino- vaná břidlice	Vápenec		
						Přírodní	Průmys- lový	Křemi- čitý	Vápe- natý		L	LL	
K	S	D	P	Q	V	W	T	L	LL				
CEM III	Vysokopecní cement	CEM III/A	35 – 64	36 – 65	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 50
		CEM III/B	20 – 34	66 – 80	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 50
		CEM III/C	5 – 19	81 – 95	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 50
CEM IV	Puzolánový cement	CEM IV/A	65 – 89	-	11 – 35				0 - 50				
		CEM IV/B	45 - 64	-	36 – 55				0 - 50				
CEM V	Smíšený cement	CEM V/A	40 – 64	18 – 30	-	18 – 30	-	-	-	-	0 - 50		
		CEM V/B	20 - 38	31 - 50	-	31 - 50	-	-	-	-	0 - 50		

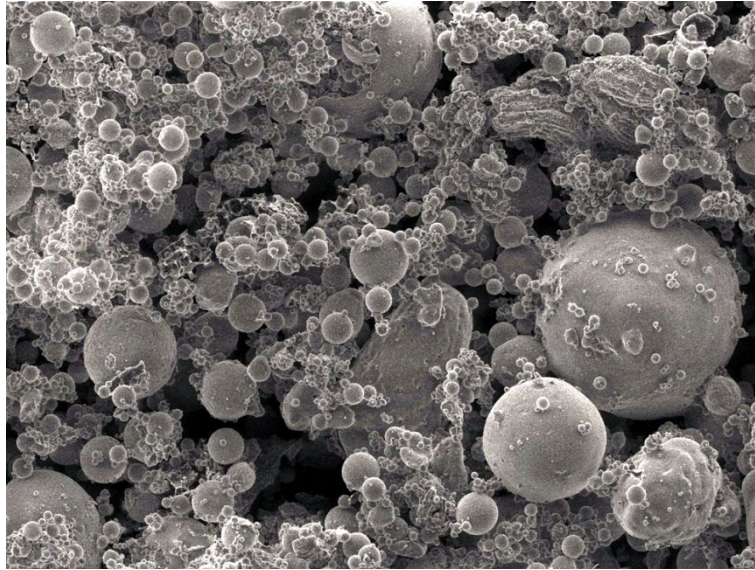
¹⁾ Hodnoty v tabulce se vztahují k součtu hlavních a doplňujících složek

Cement po smíchání s vodou vytvoří **cementový tmel** (někdy se používá také označení cementová pasta), který postupně tuhne a tvrdne v **cementový kámen**. Cement je pojivo hydraulické, a tudíž tuhne a tvrdne na vzduchu i ve vodě a po zatvrdnutí si také na vzduchu i ve vodě zachovává svoji pevnost a stálost.

Cementy se vyrábí v třídách 32,5, 42,5 a 52,5 ve variantách N a R (viz tab. 12). Označení **N** mají cementy normálně tuhnoucí, označení **R** nesou cementy tzv. rychlovazné, s vysokou počáteční pevností. Každá třída cementu má předepsány hodnoty **pevnosti v tlaku** po 2, 7 a 28 dnech, minimální **dobu začátku tuhnutí** a také **objemovou stálost**. Hodnota objemové stálosti se u všech cementů stanoví v tzv. Le Chatelierově objímce, postupem podle [9], a musí být pro všechny třídy cementu < 10 mm (rozevření hrotů objímky).

Tab. 12 Požadavky na mechanické a fyzikální vlastnosti cementů podle ČSN EN 197-1 [10].

Pevnostní třída	Pevnost v tlaku [MPa]			Počátek tuhnutí [min]
	Počáteční pevnost		Normalizovaná pevnost 28 dnů	
	2 dny	7 dnů		
32,5 N	-	≥ 16,0	≥ 32,5 ≤ 52,5	≥ 75
32,5 R	≥ 10,0	-		
42,5 N	≥ 10,0	-	≥ 42,5 ≤ 62,5	≥ 60
42,5 R	≥ 20,0	-		
52,5 N	≥ 20,0	-	≥ 52,5 -	≥ 45
52,5 R	≥ 30,0	-		



Obr. 10 Kulovitá zrna popílku v elektronovém mikroskopu; šířka obrazu 212 μm (převzato a upraveno z <http://www.tescan.com>)

Pro výrobu betonu lze použít pouze cementy, které splňují požadavky dané technickou normou [10]. Druh a třída cementu se volí podle konkrétního použití betonu a technologie betonáže, podle stupně vlivu prostředí, kterému bude beton vystaven (viz tab. 1), podle podmínek ošetřování, podle rozměrů konstrukce a také s ohledem na nebezpečí reakce kameniva s alkáliemi v cementu (alkalicko-křemičitá reakce).

3.1.5 Speciální cementy

Pro zvláštní účely byla vyvinuta celá řada cementů *se speciálními vlastnostmi*. Tyto vlastnosti se týkají zejména pevnostních parametrů ztvrdlého cementu, vývinu hydratačního tepla, smršťování cementu a jeho odolnosti v agresivním prostředí. Do kategorie speciálních cementů patří např. cementy síranovzdorné, silniční, bílé nebo rozpínavé.

Síranovzdorný cement se vyrábí ze speciálně připraveného portlandského slínku (se záměrně upraveným mineralogickým složením), který má obsah C_3A *max. 3 %* a obsah SO_3 *max. 2,5 %*. Snížený obsah C_3A v cementu způsobuje, že ztvrdlý cementový kámen obsahuje pouze malé množství zásaditých hydratovaných kalciumaluminátů. Při působení síranových vod na beton proto nevzniká tolik nebezpečného *ettringitu* (viz kap. 8.2.3), jako u běžných cementů. Ve srovnání s běžným portlandským cementem mají síranovzdorné cementy také nižší vývoj hydratačního tepla a vyšší objemovou stálost. Síranovzdorné cementy se vyrábí v pevnostních třídách 32,5, 42,5 i 52,5, buď jako portlandské, s označením CEM I SV, nebo jako vysokopecní, s označením CEM III SV. Používají se do betonů dlouhodobě vystavených agresivním síranovým vodám a plynům, např. v zemědělských stavbách, čistírnách odpadních vod nebo skládkách odpadů a také do základových a jiných konstrukcí v agresivním půdním prostředí. Základní požadavky na složení síranovzdorných cementů uvádí tab. 13.

Tab. 13 Složení síranovzdorných cementů

Označení síranovzdorného cementu		Složení (poměry složek podle hmotnosti) ¹⁾		
		Hlavní složky		Doplňující složky
		Slínek	Vysokopeční struska	
Portlandský cement síranovzdorný	CEM I SV	95 - 100	-	0 - 5
Vysokopeční cement síranovzdorný	CEM III/ B SV	20 - 34	66 - 80	-
	CEM III/ C SV	5 - 19	81 - 95	-

¹⁾ Hodnoty v tabulce se vztahují k součtu hlavních a doplňujících složek

Silniční cement se také vyrábí z upraveného portlandského slínku. Obsah C_3A ve slínku má být **max. 8 %** a obsah chloridů **max. 0,1 %**. Předepsána je také **jemnost mletí** (měrný povrch cementu do $350 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$), počátek tuhnutí (nejdříve za 90 minut) a doba tuhnutí (do 12 hodin). Cement má **zvýšenou pevnost v ohybu** (min. 7 MPa po 28 dnech) a ve srovnání s běžným portlandským cementem má nižší hydratační teplo, minimální objemové změny, zvýšenou odolnost proti agresivním vodám a vysokou mrazuvzdornost. Silniční cement se vyrábí s označením CEM I 42,5 R-SC. Používá se pro výstavbu cementobetonových krytů vozovek a letištních ploch, a je vhodný také do tlakových betonových rour, železničních pražců, mostních konstrukcí, ad.

Bílý cement vzniká mletím bílého portlandského slínku, který se pálí z vybraných surovin. Vápenatou složku surovinové směsi tvoří **čistý vápenec** nebo křída a hlinitokřemičitou složku zajišťuje **kaolín**, případně jiná surovina s **nízkým obsahem barvicích oxidů Fe_2O_3 a MnO** . Složení suroviny vyžaduje vyšší teplotu pálení (kolem $1600 \text{ }^\circ\text{C}$) než u běžného slínku. Bílý cement se vyrábí v třídách 52,5 N a 52,5 R. Používá se především pro výrobu pohledového betonu a architektonických betonových prvků, a také do suchých omítkových směsí. Přidáním anorganických pigmentů do bílých cementů lze připravovat i **cementy barevné** do barevných dekorativních betonů.

Rozpínavý cement obsahuje složky, z kterých se v prvních dnech hydratace tvoří velké množství ettringitu. Tím se zmenšuje nebo úplně kompenzuje smršťování cementu při vysušování - jedna z nevýhod běžného portlandského cementu. Rozpínavé cementy se používají na utěšňování styků montovaných staveb, opravy poškozených konstrukcí, bezspáré podlahy, piloty, vodotěsné omítky, při stavbě koupališť, zásobníků na vodu apod.

3.1.6 Cementy pro zdění

Cementy pro zdění jsou cementy nižších tříd, než předepisuje norma ČSN EN 197-1 [10] (viz tab. 12). Vyrábí se ve třech pevnostních třídách (tab. 14) a norma připouští ve složení kromě portlandského slínku i hydraulické vápno a další hydraulické příměsi. Přidávají se do nich i přísady zlepšující vaznost, především vzdušné vápno.

Tab. 14 Pevnost v tlaku cementů pro zdění

Třída	Pevnost v tlaku po 7 dnech [MPa]	Pevnost v tlaku po 28 dnech [MPa]
MC 5	-	min. 5 - max. 15
MC 12,5	min. 7	min. 12,5 - 32,5
MC 22,5	min. 10	min. 22,5 - max. 42,5

3.1.7 Hlinitanový cement

Hlinitanový cement je rychle tvrdnoucí hydraulické pojivo, vyráběné mletím **hlinitanového slínku**. Surovinová směs pro výrobu slínku obsahuje **bauxit** (sedimentární hornina s vysokým obsahem Al_2O_3) a **vápenec**, zhruba v poměru 1:1.

Hlinitanový slínek lze pálit dvěma způsoby. Prvním a nejčastějším způsobem je **tavení** surovin v elektrické obloukové peci při teplotách **1800 až 2000 °C**. Druhým způsobem pálení je **slinování** v rotační peci při teplotách **1150 až 1250 °C**.

Surovina musí být připravena tak, aby vypálený slínek splňoval následující požadavky na chemické složení:

Al_2O_3	36 až 58 %,
sulfidy	max. 0,1 %,
chloridy	max. 0,1 %,
alkálie ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)	max. 0,4 %,
sírany	max. 0,5 %.

Hlavními slínkovými minerály hlinitanového slínku jsou **méně zásadité kalciumalumináty** (především **CA**). V závislosti na složení surovin se v něm mohou vyskytovat, kromě CA, také C_{12}A_7 , C_2S , C_2AS , případně C_2A , CA_2 a další složky.

Problémem hlinitanového cementu je, že produkty vzniklé hydratací kalciumaluminátů jsou **nestabilní**. Probíhá-li hydratace cementu za normálních teplot (do 25 °C), vzniká směs kalciumalumináthydrátů CAH_{10} a C_2AH_8 . Tyto metastabilní látky se ale s časem, nebo při zvýšených teplotách (v letních měsících), samovolně mění na stabilní C_3AH_6 . Krystaly C_3AH_6 mají **menší objem** než krystaly CAH_{10} a C_2AH_8 . Při přeměně proto dojde k **zvýšení pórovitosti** cementového kamene a tím také k snížení jeho pevnosti a trvanlivosti. Hydratuje-ji cement při teplotách nad 25 °C, vzniká přímo nežádoucí C_3AH_6 . Proces přeměny v hlinitanovém betonu je pomalý a může trvat řadu let. V minulosti došlo vlivem těchto procesů k poruchám staveb s tragickými následky a bylo proto **zakázáno používat hlinitanový cement do nosných betonových konstrukcí**.

Výhody hlinitanového cementu, ve srovnání s portlandskými cementy, jsou zejména tyto:

- **rychlý nárůst počáteční pevnosti** - hlinitanový cement hydratuje poměrně rychle a za 24 hodin může dosáhnout až 70% konečné pevnosti. Cement nesmí začít tuhnout dříve než po 60 minutách; doba tuhnutí bývá 4 až 6 hodin.

- **malá citlivost na nízké teploty** - s hlinitanovým cementem lze betonovat i při teplotách pod bodem mrazu (do - 6 °C). Souvisí to s rychlým vývinem velkého množství hydratačního tepla v procesu hydratace.
- **absence Ca(OH)_2** - při hydrataci hlinitanového cementu se neuvolňuje žádný Ca(OH)_2 (portlandit). Cement má proto vyšší odolnost proti působení kyselých a síranových vod a mořské vody. Absence Ca(OH)_2 přispívá také k vysoké odolnosti cementu proti vysokým teplotám (viz níže).
- **žáruvzdornost** - hlinitanový cement s vysokým obsahem Al_2O_3 (nad 60 %) dobře odolává vysokým teplotám (i nad 1500 °C). Pálením technického Al_2O_3 s vápencem se vyrábí také tzv. **vysokohlinitanový cement**, který obsahuje až 75 % Al_2O_3 a je žáruvzdorný až do teploty 1750 °C.

Z výše uvedených vlastností hlinitanových cementů vyplývá jejich specifické využití. Lze je použít např. při betonování **za nízkých teplot**, do konstrukcí, které je třeba **rychle odbednit**, nebo do betonů vystavených chemicky **agresivnímu prostředí**. V současnosti se ale hlinitanové cementy používají hlavně pro přípravu **žáruvzdorných betonů a malt** pro vyzdívky různých pecí, sušáren a jiných tepelných agregátů.



KONTROLNÍ OTÁZKY

1. Co je slínek? Z čeho a jakým způsobem se vyrábí?
2. Vyjmenujte hlavní slínekové minerály a uveďte zkrácené formy zápisu jejich chemických vzorců!
3. Popište tři hlavní fáze hydratace portlandského cementu!
4. Jak rozdělujeme a označujeme cementy pro obecné použití?
5. Vyjmenujte hydraulicky aktivní náhrady cementu a popište jejich původ a vlastnosti!
6. V kterých pevnostních třídách se vyrábí cementy pro obecné použití?
7. Jak je upraveno mineralogické složení slínku pro výrobu síranovzdorného cementu a proč?
8. Čím se liší hlinitanový cement od silikátových cementů?

3.2 Kamenivo

Plnivem v betonu je **kamenivo** - zrnitý, sypký, většinou anorganický, přírodní nebo umělý materiál. Kamenivo zaujímá 70 až 80 % objemu betonu a jeho funkcí je vytvořit v betonu pevnou kostru s co nejnižší mezerovitostí.

Kamenivo se podle původu dělí na **přírodní, umělé a recyklované**.

Přírodní kamenivo se získává zpracováním hornin, minerálů a zemin, a to pouze pomocí mechanických procesů. Dělí se dále na kamenivo:

- těžené - vznikající přirozeným rozpadem hornin a těžené z vodních toků a náplavů; typickým znakem těžného kameniva **je zaoblený tvar zrn s ohlazeným povrchem**,
- drcené - vyráběné drcením velkých kusů hornin, vytěžených v lomech, a tříděním do rozměrových frakcí; typickým znakem drceného kameniva **je nepravidelný, ostrohranný tvar zrn s drsným povrchem**,
- předdrcené - získávané drcením větších zrn těžného kameniva; podíl předdrcených zrn (s nejméně jednou lomovou plochou) je $> 40 \%$.

Umělé kamenivo je při výrobě vystaveno především tepelným procesům. Vyrábí se z průmyslových odpadů (např. strusky, popílku, škváry, skleněných střeptů) nebo z upravených hornin či zemin (např. kamenivo liapor, experlit nebo siopor).

Recyklované kamenivo se vyrábí z materiálů, které již předtím byly použity ve stavební konstrukci. Jedná se především drcený beton a cihly.

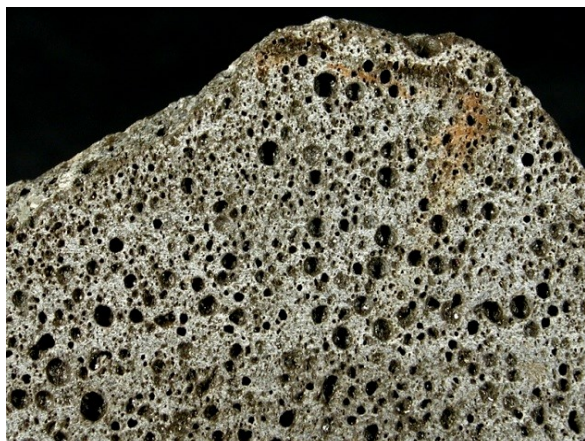
Kamenivo se dělí také **podle objemové hmotnosti** ρ_0 na:

- pórovité - $\rho_0 < 2000 \text{ kg.m}^{-3}$,
- hutné - $\rho_0 = 2000 \text{ až } 3000 \text{ kg.m}^{-3}$,
- těžké - $\rho_0 > 3000 \text{ kg.m}^{-3}$.

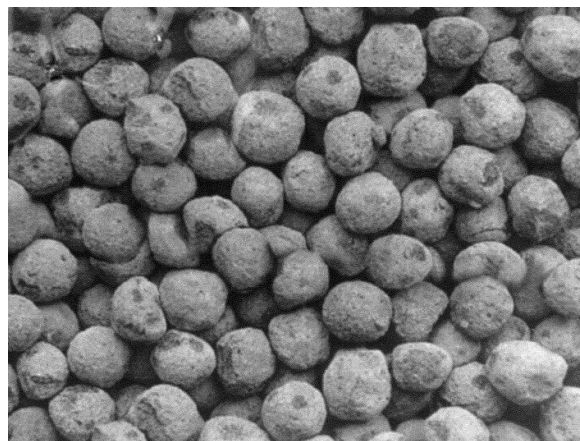
Pórovité (lehké) kamenivo se používá pro výrobu lehkých betonů s tepelně izolačními vlastnostmi. Kamenivo se získává **drcením lehkých pórovitých hornin** (např. tufy, tufity, křemelina, pemza) nebo se vyrábí **uměle z průmyslových odpadů** (např. popílkové sbalky, škvára, vysokopeční struska, skleněný granulát) či **tepelnou úpravou hornin a zemin** (např. liapor, expandovaný perlit, vermikulit). Příklady pórovitých kameniv jsou uvedeny na obr. 11 až 16.

Hutné kamenivo je nejběžnějším kamenivem pro výrobu betonů. Získává se především **drcením přírodních hornin**. Z umělých kameniv patří do této skupiny hutná (pomalu chlazená) vysokopeční struska. Z recyklovaných kameniv je to betonový recyklát. Příklady hutných kameniv jsou uvedeny na obr. 17 až 22.

Těžké kamenivo se využívá ve speciálních konstrukcích z těžkých betonů (kap. 5.2), sloužících jako **ochrana před radioaktivním, rentgenovým a neutronovým zářením**, nebo **v těžkých konstrukčních prvcích**. Kamenivo se vyrábí drcením přírodních materiálů s vysokou objemovou hmotností, zejména železných rud (např. magnetit, hematit, limonit, ilmenit), barytu nebo korundu a také z uměle připravených materiálů jako je ferosilicium, ferofosfor,



Obr. 11 Zpěněná vysokopecní struska



Obr. 12 Popílkové sbalky - Agloporit
(převzato z [39])



Obr. 13 Skleněný granulát Liaver



Obr. 14 Liapor (převzato z
<http://www.liapor.cz>)



Obr. 15 Expandovaný perlit (převzato z
<http://www.fireprotection-klein.com>)



Obr. 16 Expandovaný vermikulit (převzato z
<http://www.atticare.com>)



Obr. 17 Těžené drobné kamenivo frakce 0 - 4, Staré Ždánice



Obr. 18 Těžené hrubé kamenivo frakce 4 - 8 (převzato z <http://www.betonarna-k-most.cz>)



Obr. 19 Drcené hrubé čedičové kamenivo frakce 4 - 8, Bílčice



Obr. 20 Drcené hrubé granodioritové kamenivo frakce 8 - 16, Litice nad Orlicí



Obr. 21 Drcené hrubé drobné kamenivo frakce 16 - 32, Bohučovice



Obr. 22 Betonový recyklát frakce 0 - 8 (převzato z <http://www.resta-dakon.cz>)



Obr. 23 Baryt z lokality Dědova hora u Hořovic (převzato <http://geologie.vsb.cz/>, foto J. Jirásek)



Obr. 24 Hematit z lokality Krušná hora u Berouna (převzato z <http://www.natur.cuni.cz/ugmnz/mineral>)



Obr. 25 Magnetit, Rumunsko (převzato <http://geologie.vsb.cz/>, foto J. Jirásek)



Obr. 26 Ilmenit, Kanada (převzato z <http://rruff.info>)



Obr. 27 Limonit z lokality Nevid u Mirošova (převzato z <http://www.natur.cuni.cz/ugmnz/mineral>)



Obr. 28 Ferosilicium (převzato z <http://cs.wikipedia.org/wiki/Ferosilicium>)

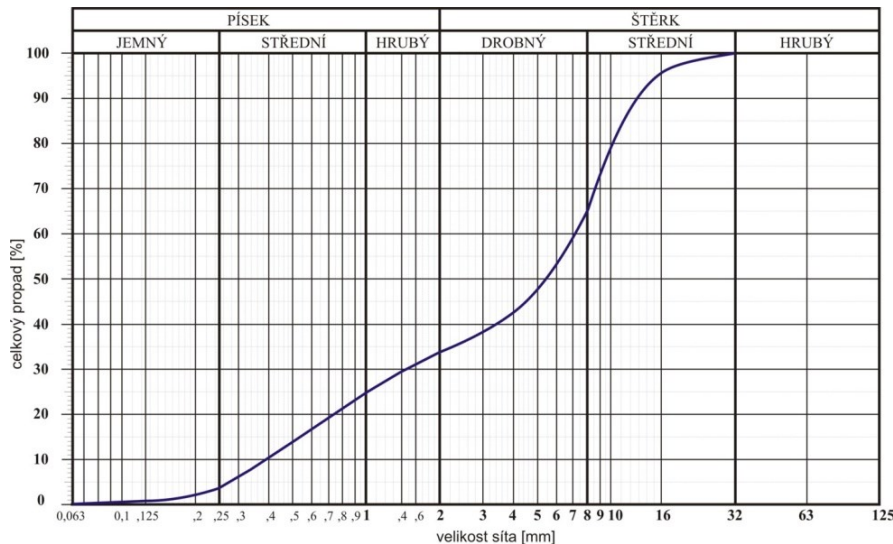
ocelové koule a broky nebo umělý korund. Těžké betony s korundovým kamenivem se používají také do průmyslových betonových podlah s vysokou odolností proti obrusu. Příklady těžkých kameniv jsou uvedeny na obr. 23 až 28.

Kamenivo se **podle velikosti zrn** dělí na:

- hrubé kamenivo - velikost zrn **od 4 do 125 mm**,
- drobné kamenivo - velikost zrn **do 4 mm**,
- jemné částice - zrna, která propadnou sítím o velikosti oka **0,063 mm**,
- směs kameniva - (šterkopísek, šterkodrt') směs drobného a hrubého kameniva.

Zastoupení zrn v kamenivu podle velikosti (zrnitost) se stanovuje normativním postupem, tzv. **sítovým rozborem** [13], na kruhových sítích s oky čtvercového tvaru. Síta jsou v základním uspořádání sestavena do sloupce tak, že dole je miska, nad ní nejmenší síto 0,063 mm a směrem nahoru následují síta 0,125 - 0,250 - 0,500 - 1 - 2 - 4 - 8 - 16 - 32 - 63 mm. Sloupec sítí je umístěn na síťovací stroji, který vibracemi prosévá vzorek kameniva od horního síta ke spodní misce. Zrna, zachycená v rozmezí dvou sítí (horním propadnou a na spodním se zachytí), tvoří tzv. **frakci kameniva**. Frakce jsou označovány čísly a pomlčkou. Např. frakce 4 - 8 mm znamená, že se jedná o zrna propadlá sítím o velikosti oka 8 mm a zachycená na sítím o velikosti oka 4 mm. Jiným způsobem značení frakcí jsou čísla oddělená lomítkem, např. 4/8, 8/16, 16/32.

Zůstatky na jednotlivých sítích se váží a vyjadřují v procentech celkové hmotnosti síťovaného vzorku. Na základě síťové zkoušky pak můžeme sestavit tzv. **křivku zrnitosti kameniva** (obr. 29). Tato křivka se často využívá k hodnocení kameniva (a obecně sypaných materiálů) z hlediska jeho zrnitosti.



Obr. 29 Příklad zrnitostní křivky kameniva

Zrnitost kameniva lze definovat jako procentuální hmotnostní zastoupení zrn jednotlivých velikostních frakcí v kamenivu. Zrnitost kameniva významně ovlivňuje jeho sypanou hmotnost, mezerovitost, propustnost, stlačitelnost, měrný povrch, množství povrchově vázané vody a další vlastnosti.

Obsahuje-li kamenivo zrna přibližně stejné velikosti, je objem mezer mezi zrny větší, než u zrn různých velikostí. Jsou-li v kamenivu optimálně zastoupeny zrna různých velikostí, pak menší zrna zapadají mezi větší a vyplňují objem mezer. Snižuje se mezerovitost kameniva. **Nízká mezerovitost** kameniva znamená nejen **dobré pevnostní a trvanlivostní vlastnosti** betonu, ale také **úsporu cementu**, který je v betonu nejdražší složkou.

Významný vliv na vlastnosti betonu v čerstvém i ztvrdlém stavu má také **tvár zrn kameniva**. Kulovitá nebo křehlovitá zrna se lépe uloží v objemu betonu než zrna podlouhlá nebo plochá a vykazují výrazně menší mezerovitost. Beton obsahující **zrna nevhodného tvaru** (plochá, podlouhlá, jehlicovitá nebo šupinovitá) se obtížně zpracovává; zrna po sobě špatně kloužou a mají tendenci se vzpříčovat, čímž podporují vznik dutin a pórů v betonu. Nepříznivý poměr plochy k objemu u tvarově nevhodných zrn navíc vyžaduje vyšší spotřebu záměsové vody pro smáčení jejich povrchu a vyšší spotřebu cementu pro obalení zrn. Na zpracovatelnost čerstvého betonu má vliv i **charakter povrchu zrn**, který také ovlivňuje přilnavost cementového tmele k povrchu zrn a tudíž soudržnost kameniva s tmelem, hutnost, pevnost, trvanlivost a další vlastnosti betonu. Zrna s hladkým povrchem zajistí lepší zpracovatelnost čerstvého betonu, ale jsou výhodná pouze tehdy, zajistí-li také dostatečné přilnutí cementového tmele. Drsný povrch zrn kameniva znamená dobrou přilnavost cementového tmele, zhoršuje ale zpracovatelnost betonu.

Hodnocení tvaru zrn kameniva se provádí normativním postupem [14] na základě tzv. tvarového indexu a indexu plochosti. **Tvarový index** je podíl nekubických zrn (zrna s poměrem délky k tloušťce > 3) ve vzorku kameniva, vyjádřený v hmotnostních procentech. **Index plochosti** je podíl plochých zrn v kamenivu, stanovený proséváním frakcí kameniva na tyčových sítích a vyjádřený rovněž v procentech hmotnosti zkoušeného vzorku.

Kamenivo do betonu nesmí obsahovat **škodlivé látky**, tj. látky, které mohou negativně ovlivňovat tuhnutí a tvrdnutí betonu, způsobovat vnitřní pnutí a objemové změny, snižovat pevnost a nepropustnost betonu a zhoršovat trvanlivost betonu nebo odolnost výztuže proti korozi, atd. Mezi škodlivé látky patří zejména:

- **jemné částice $< 0,063 \text{ mm}$** - hlinité, jílovité nebo prachovité částice mohou vytvářet tenké povlaky na povrchu zrn kameniva, které brání vytvoření pevného spojení mezi kamenivem a cementovým kamenem; jemné částice jsou považovány za neškodné, pokud je jejich celkový obsah v kamenivu menší než 3 %,
- **humusovité látky a látky obsahující cukry** - mohou zpomalovat tuhnutí a tvrdnutí betonu,
- **bobtnající organické látky** (zbytky dřeva, uhlí, rašelina apod.),
- **schránky živočichů** - jejich obsah v hrubém kamenivu nesmí přesáhnout 10 % hmotnostních,
- **sírany** - mohou způsobit porušení betonu rozpínáním,
- **chloridy** (ve formě sodných a draselných solí) - způsobují korozi výztuže,
- zrna kameniva podléhajícího **tzv. alkalicko-křemičité reakci** (tj. kameniva obsahujícího amorfní oxid křemičitý, opál, rohovec, droby, opuky a další).

Kromě povolených limitů na obsah škodlivých látek, musí kamenivo do betonu vyhovovat z hlediska:

- *zrnitosti* (zrnitostní křivka, modul zrnitosti, podíl jemných částic),
- *tvaru a povrchu zrn* (tvarový index, index plochosti, kvalita povrchu),
- *fyzikálních vlastností* (odolnost proti zmrazování a rozmrazování, zkouška síranem hořečnatým, odolnost proti drčení, drtitelnost rázem, přípustná radioaktivita),
- *objemové hmotnosti* (kamenivo pórovité, hutné nebo těžké).



KONTROLNÍ OTÁZKY

1. Podle jakých kritérií rozdělujeme kamenivo do betonu?
2. Uveďte 5 příkladů pórovitých kameniv!
3. Co je to frakce kameniva?
4. Jaké kamenivo je vhodné do betonu z hlediska tvaru zrn a proč je tvar zrn důležitý?
5. Které škodlivé látky nesmí kamenivo obsahovat?
6. Jaké jsou požadavky na kamenivo do betonů?

3.3 Voda

Betonářská voda (tj. voda, používaná při výrobě betonu) se z technologického hlediska dělí na vodu *záměsovou* a *ošetřovací*.

Záměsová voda je jednou ze základních složek betonu a dávkuje se při míchání čerstvého betonu. *Ošetřovací* vodou se po určitou dobu vlhčí (ošetřuje) tvrdnoucí beton, aby mohl cement nerušeně hydratovat.

Záměsová voda plní v betonu dvě základní funkce - *hydratační* a *reologickou*. Voda je nezbytná pro hydrataci cementu jako pojiva v betonu, tj. pro tuhnutí a tvrdnutí betonu - v tom spočívá její hydratační funkce. Množství vody, dávkované do čerstvého betonu, ovlivňuje reologické vlastnosti tvárné betonové směsi, jako jsou: konzistence, pohyblivost, soudržnost, čerpatelnost, apod. - v tom spočívá reologická funkce vody.

Množství záměsové vody v betonu se vyjadřuje tzv. *vodním součinitelem*, což je poměr hmotnosti vody k hmotnosti cementu v čerstvém betonu:

$$v/c = \frac{\text{hmotnost vody}}{\text{hmotnost cementu}} \quad [-] \quad (3)$$

Teoreticky stačí pro hydrataci cementu voda v množství 23 až 25 % z hmotnosti cementu, tedy $v/c = 0,23$ až $0,25$. Takový beton by však byl příliš tuhý na to, aby ho bylo možné zpracovat. V praxi proto musí být hodnoty vodního součinitele podstatně vyšší. U většiny druhů betonu se v/c pohybuje mezi **0,45 až 0,70**. Do tzv. vysokohodnotných betonů se

dávkuje menší množství vody; hodnoty v/c se pohybují pouze mezi **0,27 až 0,35** a potřebné konzistence betonu se dosahuje použitím superplastifikátorů.

Čím více záměsové vody do betonu použijeme, tím vyšší bude pórovitost výsledného ztvrdlého betonu. Vyšší pórovitost znamená vyšší nasákavost, **nižší pevnost** (obr. 34) **a nižší trvanlivost betonu**. Požadovanou konzistenci betonu nelze tedy řešit pouze přidáním většího množství vody, ale zejména použitím vhodné plastifikační přísady. Vliv vodního součinitele na hydrataci cementu schematicky ukazuje obr. 30

Záměsová voda se v betonu, v průběhu jeho tuhnutí a tvrdnutí, vyskytuje ve třech formách - jako voda **chemicky vázaná, fyzikálně vázaná** a jako voda **volná**. Podíl vody v betonu v jednotlivých formách se s časem mění. Rozdělení vody v betonu během tuhnutí a tvrdnutí je schematicky znázorněno na obr. 31.

Chemicky je voda vázaná v produktech, vznikajících hydratací cementu; její podíl s časem narůstá (viz spodní křivka grafu). Chemicky vázanou vodu je možné z betonu uvolnit pouze při vyšších teplotách (200 až 700 °C).

Fyzikálně vázaná voda je adsorbovaná na povrchu jemných částic a v kapilárách.

Volná voda vyplňuje větší dutiny a póry a nejsnadněji se z betonu odpařuje. Její podíl v betonu se s časem snižuje. Po odpaření volné vody po ní zůstávají póry, které zvyšují pórovitost ztvrdlého betonu a snižují jeho pevnost a trvanlivost.

Pokud se z betonu odpaří část volné vody a ta není včas nahrazena ošetřovací vodou, začne se odpařovat i voda fyzikálně vázaná. To způsobí vznik kapilárních napětí a **smršťování** betonu, a to v době, kdy beton ještě nemá dostatečnou pevnost v tahu. V důsledku toho mohou vznikat v betonu **trhliny**, které snižují jeho dlouhodobou pevnost a trvanlivost.

Vhodnost vody pro použití do betonu závisí na jejím původu, přičemž voda musí vždy vyhovovat požadavkům technické normy [15].

Pitná voda z vodovodního řadu je považována za vhodnou pro výrobu betonu a nemusí se testovat.

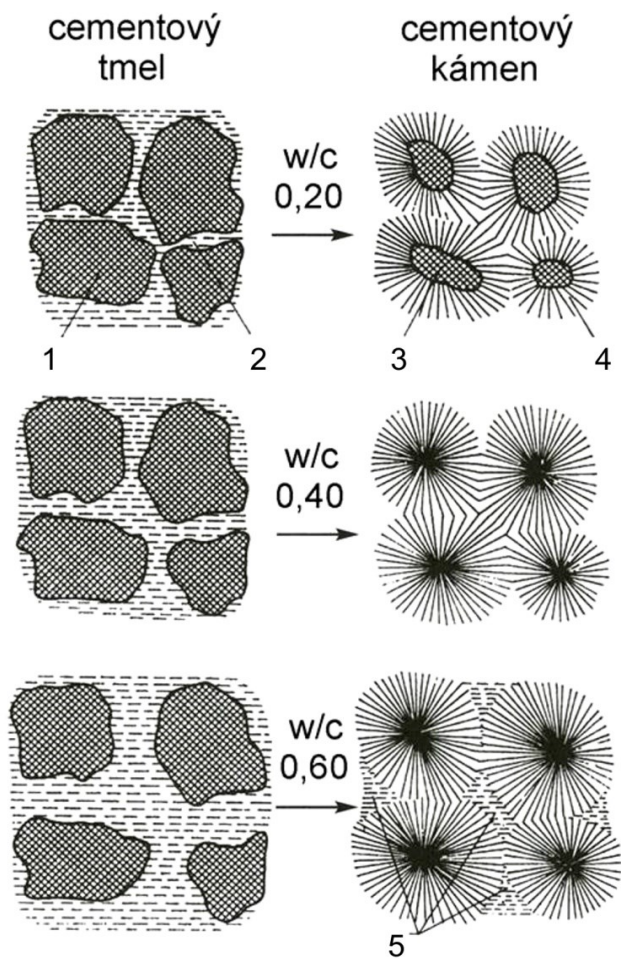
Užitková voda (podzemní nebo povrchová) může být do betonu vhodná, musí se však před prvním použitím otestovat, především na přítomnost nežádoucích solí, organických látek, tuků a olejů.

Voda **mořská** nebo **brakická** (poloslaná) je použitelná do prostého betonu. Není vhodná do železobetonu a předpjatého betonu.

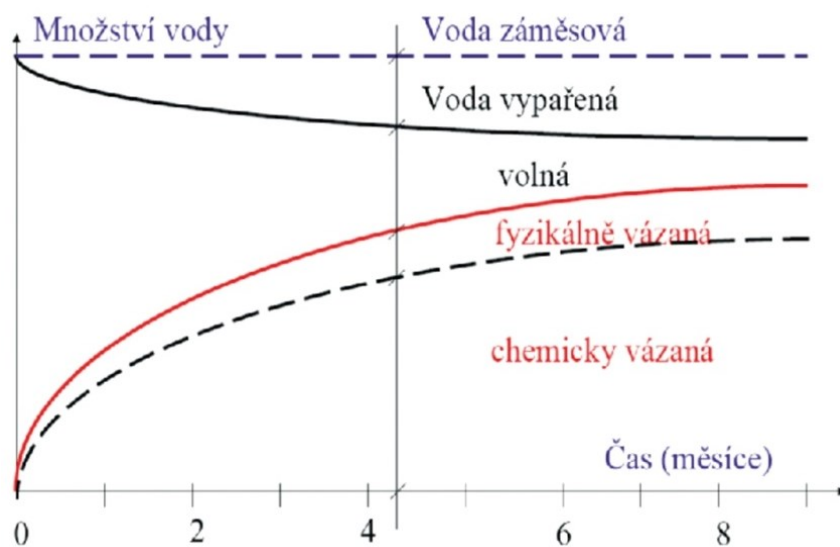
Recyklovaná voda (z betonářské výroby) se může do betonu použít, obsahuje však pevné částice a denně se proto musí kontrolovat její objemová hmotnost, která nesmí přesáhnout 1010 kg.m⁻³. Recyklovaná voda se nesmí používat do betonů pevnostních tříd C 50/60 a výše nebo LC 50/55 a výše.

Splašková nebo odpadní voda je do betonu nepoužitelná.

Před použitím vody z neověřeného zdroje se nejprve provádí **předběžná zkouška**. Vzorek vody o objemu min. 5 litrů se odebere do čisté nádoby s těsným uzávěrem. Voda v nádobě se prudce protřepe po dobu 30 sekund. Po odzátkování se k vodě přičichne, zda nevydává zápach odlišný od zápachu čisté vody. Další postup zkoušení naznačuje tab. 15.



Obr. 30 Hydratace cementových zrn při různém vodním součiniteli: 1 - cementové zrno, 2 - voda, 3 - nezhydratovaný cement, 4 - hydratovaný cement, 5 - kapilární póry (převzato a upraveno z [34,36])



Obr. 31 Schéma rozdělení vody v betonu v závislosti na čase (převzato z [26])

Tab. 15 Požadavky na vlastnosti záměsové vody při předběžné kontrole (převzato z [32])

Vlastnost	Požadavek	Ověření
oleje a tuky	ne více než viditelné stopy	vizuálně, po 2 minutách
čisticí prostředky	jakákoli pěna zmizí do 2 min.	protřepáním 80 ml vody
barva	bledě žlutá nebo světlejší	vizuálně ve válci
rozptýlené látky	usazenina ≤ 4 ml	80 ml vody odstavené po 30 minut
zápach	bez zápachu nebo jako pitná voda	čichem, zda zápach je jiný než pro pitnou vodu
kyselost	$\text{pH} \geq 4$	indikátorovým papírkem, pH metrem
humusovité látky	barva jako světle žlutá nebo světlejší po přidání NaOH	5 ml vody a 5 ml 3 % NaOH protřepat, 1 hodinu nechat stát a vizuálně posoudit

Pokud zkoušený vzorek vody nesplní jeden z uvedených požadavků, je nutno provést *zkoušku chemických vlastností*. Povolené limity obsahu škodlivých látek, které musí záměsová voda do betonu splňovat, jsou uvedeny v tab. 16.

Tab. 16 Přípustná množství škodlivých látek v záměsové vodě do betonu (převzato z [32])

Vlastnost	Požadavek	Ověření
obsah chloridů (Cl⁻) – předpjatý beton nebo injektážní malta – beton s výztuží – beton bez výztuže	500 mg/litr 1000 mg/litr 4500 mg/litr	pokud vyhovuje ČSN EN 206-1, lze použít pro vyztužený i předpjatý beton
obsah síranů (SO₄²⁻)	< 2000 mg/litr	
obsah alkálií (Na⁺ a K⁺)	< 1500 mg/litr	ekvivalent NaOH
škodlivé znečištění – cukry – fosfáty (jako P ₂ O ₅) – dusičnany (jako NO ₃ ⁻) – olovo (jako Pb ²⁺) – zinek (jako Zn ²⁺)	100 mg/litr 100 mg/litr 500 mg/litr 100 mg/litr 100 mg/litr	

Kvalita ošetřovací vody (na rozdíl od vody záměsové) není normativně předepsána, je však neméně důležitá. Pokud se např. v záměsové vodě vyskytují síranové ionty (SO₄²⁻), nejsou pro beton tak nebezpečné, protože ettringit, jehož vznik způsobují, krystalizuje v ještě nezatvrdlém betonu. Pokud jsou ale síranové ionty obsaženy v ošetřovací vodě, ettringit vzniká již v tvrdnoucím nebo ztvrdlém betonu a rostoucí krystaly mohou způsobit vnitřní napětí vedoucí až porušení betonu.



KONTROLNÍ OTÁZKY

1. Vysvětlete co je vodní součinitel a jak jeho hodnota ovlivňuje vlastnosti betonu!
2. V jakých formách se vyskytuje voda v betonu během jeho tuhnutí a tvrdnutí?
3. Jaké jsou možnosti a podmínky používání zdrojů vody do betonu?

3.4 Přísady

Přísady do betonu jsou chemické látky (většinou kapalné), které se do betonu přidávají pro úpravu jeho vlastností v čerstvém nebo ztvrdlém stavu. Přidávají se v malém množství (většinou do 5 % hmotnosti cementu) před anebo během míchání betonu. Je-li množství přísady menší než 2 g.kg^{-1} cementu, musí být rozptýleno v části záměsové vody. Je-li množství přísady větší než 3 l.m^{-3} betonu, musí být při návrhu betonu toto množství započteno do záměsové vody.

K nejčastěji používaným přísadám do betonu patří:

- plastifikátory a superplastifikátory,
- provzdušňovací přísady,
- urychlovače tuhnutí a tvrdnutí betonu,
- retardační přísady (zpomalující tuhnutí betonu),
- hydrofobizační přísady (odpužující vodu).

Kromě uvedených přísad existuje celá řada dalších typů, jako např.: přísady protikorozi (inhibitory koroze), biocidní (omezující biologickou korozi betonu), protizmrazovací, expanzní, adhezní, ad.

3.4.1 Plastifikátory a superplastifikátory

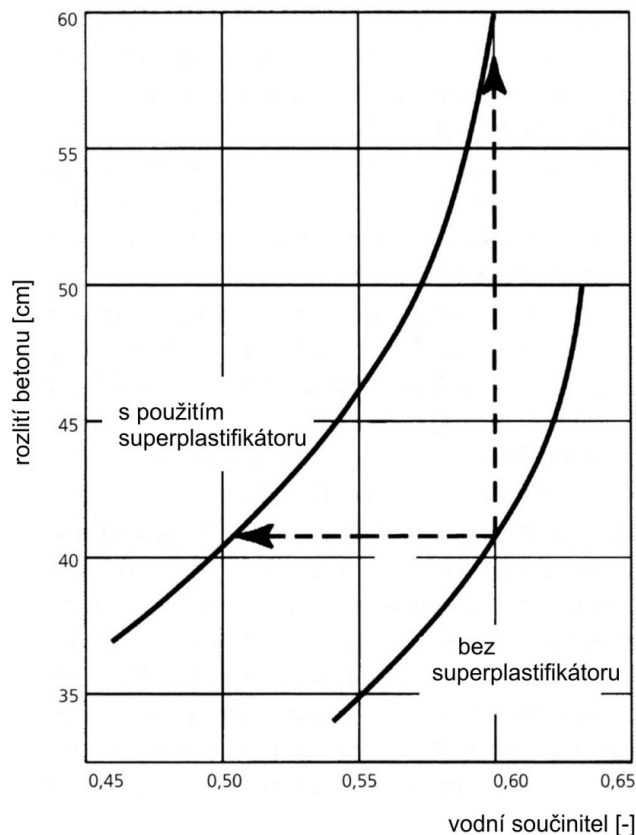
Plastifikátory umožňují *snížit množství potřebné záměsové vody* při zachování stejné zpracovatelnosti (konzistence) čerstvého betonu nebo naopak *zlepšit zpracovatelnost čerstvého betonu* při zachování stejného množství vody. Superplastifikátory jsou látky, které mají tyto účinky ještě výraznější. Plastifikátory umožňují snížit dávku záměsové vody o 5 až 15 %, superplastifikátory o 15 až 30 %. Obecně platí, že čím menší množství záměsové vody do betonu použijeme, tím nižší bude pórovitost ztvrdlého betonu a tím vyšší jeho pevnost a trvanlivost (viz také kap. 3.3).

Plastifikátory se ve vodném roztoku adsorbují na povrchu cementových zrněk a způsobí, že se na všech površích vytvoří stejný elektrický náboj. Zrnka cementu se začnou elektrostaticky odpuzovat, čímž se sníží tření mezi zrny a zvýší se pohyblivost cementové kaše. Látky, které tvoří základ pro výrobu obyčejných plastifikátorů, jsou především tyto:

- ***lignosulfonany*** - látky obsažené v sulfitových výluzích, což je odpadní produkt při papírenském zpracování dřeva. Tyto látky jsou v cementové kaši stálé a bez vedlejších účinků, je ale obtížné (vzhledem k tomu, že se jedná o odpad) udržet jejich stálou kvalitu. Mohou také obsahovat sacharidy (vznikající hydrolyzou dřevné hmoty), které mají zpomalující účinky na tuhnutí cementu. V moderních výrobcích se proto sacharidy odstraňují kvasnými procesy.
- ***solí hydroxykarboxylových kyselin*** - především sodné soli kyseliny glukonové a heptonové. Jsou to krystalické látky, které se aplikují ve formě vodného roztoku s 30 % účinné látky.
- ***hydrolyzovaný škrob*** - hlavně škrob kukuřičný.

Plastifikátory zlepšují zpracovatelnost betonu, mohou mít ale i vedlejší účinky. Látky na bázi lignosulfonanů beton i částečně provzdušňují, což je účinek pozitivní. Hydroxykarboxylové kyseliny mohou ale zvyšovat nežádoucí pocení betonu (odlučování vody na povrchu betonu), tedy negativně ovlivňovat jeho soudržnost. Při vyšších dávkách přísad na bázi solí těchto kyselin je také nutno počítat s mírným zpomalením tuhnutí cementu.

Superplastifikátory jsou organické polymery s dlouhými řetězci molekul. Princip plastifikace je v podstatě stejný jako u obyčejných plastifikátorů, ztekucující účinek je ale výrazně silnější. Obr. 32 ukazuje závislost konzistence čerstvého betonu na vodním součiniteli s použitím a bez použití superplastifikátoru.



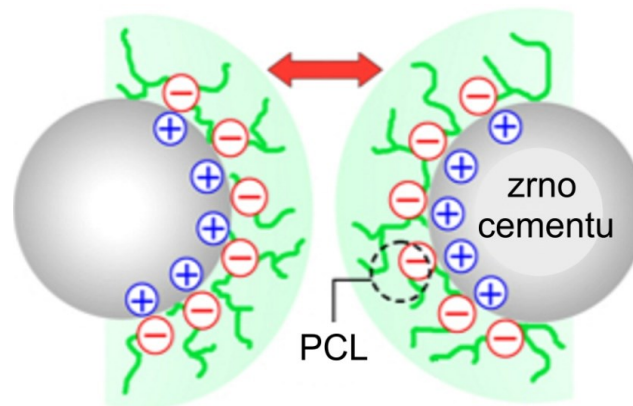
Obr. 32 Závislost rozliti čerstvého betonu na vodním součiniteli s použitím a bez použití superplastifikátoru (převzato a upraveno z [34,36])

Existují tři hlavní typy superplastifikátorů:

- **SNF** - na bázi sulfonovaných naftalen-formaldehydových kondenzátů,
- **SMF** - na bázi sulfonovaných melamin-formaldehydových pryskyřic,
- **PCL** - na bázi polykarboxylových esterů.

Polykarboxyláty (PCL) jsou neúčinnějšími plastifikačními přísadami a bývají často označovány jako hyperplastifikátory nebo superplastifikátory nové generace. Mají dlouhé rozvětvené řetězce molekul, které na povrchu cementového zrna vytvoří prostorovou strukturu, jako překážku zabráňující vzájemnému přiblížení cementových zrn. U látek na bázi PCL tedy k elektrostatickému odpuzování přistupuje navíc i prostorový (tzv. sterický) dispergační efekt (obr. 33). PCL umožňují snížit dávku záměsové vody i o více než 30 %.

S použitím superplastifikátorů je možné vyrobit speciální samozhutitelné, vysokopevnostní nebo vysokohodnotné betony (viz kap. 5)



Obr. 33 Elektrostaticko-sterická dispergace cementu (převzato a upraveno z <http://www.takemoto.co.jp/en/>)

3.4.2 Provdzušňovací přísady

Provdzušňovací přísady zvyšují **odolnost betonu proti střídavému zmrazování a rozmrazování** a také proti růstu krystalů solí z chemických rozmrazovacích látek nebo mořské vody. Voda při změně skupenství z kapaliny v led zvětší objem o cca **9 %**. Zmrzne-li voda nasáklá do kapilárních pórů v cementovém kameni, způsobí tyto objemové změny tlak na stěny pórů a napětí vedoucí ke vzniku trhlin a poškození betonu.

Přidání provdzušňovací přísady do čerstvého betonu způsobí, že se v něm během míchání vytvoří velké množství drobných bublinek, které v betonu zůstanou i po jeho zatvrdnutí. Kulovité bublinové póry přeruší kanálky kapilárních pórů a vytvoří tak záložní prostor, do kterého může mrznoucí voda expandovat. Důležitá je velikost vytvořených bublinek, která se má pohybovat **od 10 do 300 μm**, a tzv. součinitel prostorového rozložení vzduchových pórů **L**, neboli **spacing factor**. Spacing factor je definován jako průměrná maximální vzdálenost kteréhokoliv bodu v cementovém kameni od okraje pórů. Tento parametr se stanovuje mikroskopickým měřením na naleštěném a obarveném povrchu betonové destičky, postupem

podle technické normy [12]. Pro vzdušný beton by měl mít spacing factor $L < 0,25 \text{ mm}$. Celkový obsah vzduchu v provzdušněném betonu má být **4 až 6 %** objemu betonu.

Pro vzdušněním se zlepšuje také zpracovatelnost a soudržnost betonu. Negativním účinkem je snížení pevnosti betonu. Na každé procento provzdušnění betonu připadá snížení jeho pevnosti o 4 až 5 %.

Pro vzdušňovací činidla se vyrábí většinou ze solí přírodních pryskyřičných a mastných kyselin, nebo na bázi syntetických sulfonanových tenzidů. K provzdušnění betonu lze použít také duté tenkostěnné polymerní mikro dutinky o velikosti setin mm, které se do betonu přimíchávají v podobě vodní pasty.

3.4.3 Urychlovací přísady

Urychlovací přísady do betonu můžeme rozdělit do dvou skupin, na:

- urychlovače tuhnutí cementu,
- urychlovače tuhnutí a tvrdnutí cementu.

Urychlovače tuhnutí cementu zkracují dobu přechodu čerstvého betonu z plastického do tuhého stavu. Jsou to většinou látky na bázi hydroxidů, uhličitánů, hlinitanů nebo křemičitanů alkalických kovů. Tyto přísady **urychlují hydrataci trikalciomaluminátu (C_3A)**. Při ní se uvolňuje značné množství tepla, které vede ke zrychlení hydratace dikalciumsilikátu (C_2S) a tím ke zvýšení počátečních pevností betonu.

V praxi se tyto přísady používají do stříkaného betonu nebo do cementových kaší a malt pro utěšňování průniků vody v suterénních částech stavebních objektů, v tunelech, šachticích apod.

Urychlovače tuhnutí a tvrdnutí cementu urychlují vývoj počátečních pevností betonu, přičemž mohou a nemusí urychlovat tuhnutí betonu. Jedná se o látky na bázi rozpustných halogenidů, dusitanů, dusičnanů, mravenčanů, tiosíranů nebo tiokyanatanů alkalických kovů nebo kovů alkalických zemin. Tyto přísady **urychlují hydrataci trikalciumsilikátu (C_3S)**. To vede k zvýšenému vývinu hydratačního tepla a k tvorbě CSH gelu v počáteční fázi hydratace.

Přísady urychlující tuhnutí a tvrdnutí se používají v případech, kdy je potřeba rychleji odbednit stavební konstrukci nebo odformovat betonové dílce. Tyto látky je vhodné používat také při betonování v zimních měsících, kdy slouží ke kompenzaci zpomaleného tuhnutí vlivem nízkých teplot a ke zkrácení doby, po kterou je beton nutné chránit před promrznutím.

3.4.4 Retardační přísady

Retardační přísady **zpomalují tuhnutí cementu** (brzdí proces hydratace) a prodlužují tak dobu přechodu čerstvého betonu z plastického do tuhého stavu. Většinou se jedná o látky na bázi solí hydroxykarboxylových kyselin nebo na bázi cukrů a jejich derivátů. Přísady z hydroxykarboxylových kyselin mají současně i plastifikační účinky. Retardační přísady **zpomalují hydrataci C_3S** (kterého je v portlandském cementu nejvíce) **a C_3A** (který ze slínkových minerálů tuhne nejrychleji).

Retardační přísady se používají v případech, kdy je třeba prodloužit dobu zpracovatelnosti čerstvého betonu (např. při dopravě transportbetonu na velké vzdálenosti). Dále se používají pro kompenzaci vlivu vysokých teplot zkracujících dobu tuhnutí betonu (v letních měsících, kdy hrozí nadměrné vysychání a vznik trhlin v betonu při jeho nedostatečném ošetřování) a při betonáži masivních konstrukcí (kdy je nutno eliminovat zahřívání konstrukce vlivem hydratačního tepla, které způsobuje teplotní dilatace a vznik trhlin). U masivních konstrukcí, kde je ukládáno velké množství betonu, také přidáním retardéru zabráníme nedokonalému spojení následujících vrstev betonu (omezíme množství pracovních spár).

3.4.5 Hydrofobizační přísady

Úkolem hydrofobizačních přísad je vytvořit na povrchu betonu a na vnitřních stěnách kapilárních pórů tenký film, který *odpuzuje vodu a zabraňuje tak navlhnutí* betonu. Tyto přísady obsahují mýdla mastných kyselin, hydrolyzovatelné oleje (butylstearát), minerální oleje, parafinové disperze a asfaltové emulze.

Použitím hydrofobizačních přísad lze významně snížit pohyb vlhkosti v pórech betonu a omezit tvorbu výkvětů na povrchu konstrukce. Tyto látky současně provzdušňují beton a zlepšují jeho zpracovatelnost. Při dávkování se však doporučuje nepřekračovat množství 0,2 % hmotnosti cementu, neboť vyšší dávky mohou způsobit významný pokles pevnosti betonu.

3.5 Příměsi

Příměsi jsou jemně práškovité minerální látky, které se přidávají do čerstvého betonu pro zlepšení některých jeho vlastností v čerstvém nebo ztvrdlém stavu nebo pro docílení speciálních vlastností betonu. Příměsi se dělí na dva typy:

- typ I - inertní příměsi,
- typ II - pucolány nebo latentně hydraulické látky.

Příměsi typu I jsou látky téměř inertní, které se v betonu neúčastní hydratačních reakcí. Patří sem kamenné moučky (filery) a práškové pigmenty. Filery jsou jemně mleté horniny a minerály (např. vápenec, dolomit, křemen, bentonit) s velikostí zrn do 0,25 mm. Tyto příměsi se používají především pro zlepšení zpracovatelnosti čerstvého betonu. Beton s nedostatečným množstvím jemných částic je málo odolný proti segregaci (odměšování hrubých zrn kameniva) a pocení po ztuhnutí, nelze ho dopravovat čerpáním, ukládat pomocí skluzů a obtížně se dokončuje jeho povrch. Příměsi typu I zvyšují přídržnost betonu k podkladu (např. ke starému betonu) a zvyšují soudržnost čerstvého betonu. Vyžadují ale zvýšené množství vody a tím částečně snižují pevnost betonu a zvyšují jeho smrštění. Používají se proto hlavně tehdy, není-li požadována vysoká pevnost betonu (např. při výrobě betonových bloků).

Příměsi typu II jsou látky, které vykazují pucolánové nebo latentně hydraulické vlastnosti. Z pucolánů se nejčastěji používají popílký a mikrosilika, z latentně hydraulických látek vysokopeční struska. Tyto příměsi zlepšují zpracovatelnost betonu a navíc přispívají ke zvýšení pevnosti a trvanlivosti betonu, protože vstupují do hydratačního procesu.



KONTROLNÍ OTÁZKY

1. Popište funkci plastifikátorů a princip jejich plastifikačního účinku!
2. Proč provzdušňujeme beton a co je spacing factor?
3. V kterých případech je vhodné použít retardační přísady do betonu?
4. Které látky se používají jako příměsi do betonu a které vlastnosti betonu ovlivňují?

4 NÁVRH SLOŽENÍ BETONU

Při návrhu složení (receptury) čerstvého betonu je cílem ***zvolit složky vhodných vlastností a stanovit jejich podíly v betonu***, tak aby navržený beton byl kvalitní a jeho vlastnosti odpovídaly požadavkům projektanta i příslušných technických norem. Současně musí beton splňovat také požadavky ekonomické, kde je hlavním kritériem minimální spotřeba cementu, jako nejdražší a energeticky nejnáročnější složky betonu.

Návrh složení betonu zahrnuje **4 hlavní fáze**:

- A. posouzení vstupních dat,
- B. volba složek betonu,
- C. výpočet receptury,
- D. průkazní zkoušky.

A. Posouzení vstupních dat

V této fázi vycházíme především z níže uvedených požadavků.

- Požadavky na konstrukci, v které bude beton použit:
 - druh stavby a typ konstrukce,
 - stavební postup,
 - agresivita prostředí (stupně vlivu prostředí definují informativní hodnoty pro max. vodní součinitel, min. množství cementu, stupeň provzdušnění a min. pevnostní třídu betonu - viz tab. 1),
 - požadavky statika na pevnost betonu, způsob vyztužení betonu (prostý, železový, předpjatý), vzdálenost mezi výztuží a její krytí, ad.
- Technologické požadavky:
 - způsob zpracování, dopravy a ukládání čerstvého betonu, možnosti zhutňování,
 - konzistence,
 - podmínky tuhnutí a tvrdnutí, doba zpracování čerstvého betonu, počáteční nárůst pevnosti, ad.

- Zvláštní požadavky (týkají se jen některých betonů):
 - objemová hmotnost (lehký a těžký beton),
 - vodotěsnost, mrazuvzdornost, odolnost proti chem. a rozmrazovacím látkám, ap.,
 - organizační podmínky výroby betonu (staveništní beton, transportbeton, typový beton, beton předepsaného složení, ad.)

B. Volba složek betonu

- Kamenivo:
 - ekonomické hledisko (dostupnost, cena, dopravní vzdálenost),
 - technologické hledisko (zrnitostní skladba, max. velikost zrna, mezerovitost, tvar zrn, objemová hmotnost, mechanické vlastnosti, chemické složení, ad.).
- Cement:
 - pevnostní třída cementu,
 - speciální druhy.
- Přísady - druh přísady (plastifikační, provzdušňovací, urychlující tuhnutí, atd.).
- Příměsi - druh a množství.

C. Výpočet receptury

Pro návrh složení betonu existuje řada výpočetních, empirických a kombinovaných metod (např. podle Kenedyho, Bolomeye nebo Pavlíka). V kapitolách 4.1 a 4.2 jsou popsány postupy dvou metod - podle Bolomeye a podle empirického množství vody.

D. Průkazní zkoušky

To, zda navržený beton vyhovuje všem požadavkům na čerstvý a ztvrdlý beton, je nutno před začátkem výroby ověřit průkazními zkouškami. Postup je následující:

1. vypočtení dávek na zkušební záměs,
2. stanovení konzistence čerstvého betonu,
3. úprava složení na požadovanou konzistenci,
4. zhotovení krychlových zkušebních těles a stanovení pevnosti v tlaku po 28 dnech zrání,
5. úprava složení na potřebnou pevnost při zachování konzistence,
6. určení definitivního složení betonu.

V betonářské normě ČSN EN 206-1 [11] jsou specifikovány základní a doplňující požadavky pro tzv. **typový beton** a **beton předepsaného složení**.

Typový beton je beton, pro který **jsou výrobci specifikovány požadované vlastnosti a doplňující charakteristiky betonu a výrobce zodpovídá za dodání betonu** vyhovujícího požadovaným vlastnostem a doplňujícím charakteristikám.

Základní specifikace: pevnostní třída, stupeň vlivu prostředí, maximální velikost kameniva,

obsah chloridů, stupeň konzistence, objemová hmotnost.

Doplňující charakteristiky: zvláštní druh nebo třída cementu či kameniva, mrazuvzdornost, rychlost tuhnutí, nárůst pevnosti, vývin hydratačního tepla apod.

Beton předepsaného složení je beton, pro který je výrobcí předepsáno složení betonu včetně používaných složek a výrobce zodpovídá za dodání betonu předepsaného složení.

Základní povinné údaje: obsah, druh a třída cementu, vodní součinitel nebo konzistence, druh a kategorie kameniva + maximální velikost zrn a maximální obsah chloridů, druh a množství přísady nebo příměsi.

Dodatečné údaje: původ složek, doplňující požadavky na kamenivo, požadavky na teplotu čerstvého betonu, apod.

4.1 Návrh složení betonu podle Bolomeye

Bolomeyova metoda spočívá ve výpočtu vodního součinitele k dosažení požadované návrhové pevnosti betonu, ve výpočtu množství vody potřebného k hydrataci cementu a k ovlhčení zrn kameniva, a v uplatnění rovnice absolutních objemů.

Schéma výpočtu je následující:

1. Výpočet vodního součinitele (V/C) z Bolomeyovy rovnice

$$f_c = a_k \cdot R_c \cdot \left(\frac{C}{V} - 0,5\right) \rightarrow C = \left(\frac{f_c}{a_k \cdot R_c} + 0,5\right) \cdot V \quad (4)$$

kde

f_c ... pevnost betonu po 28 dnech normálního zrání [MPa],

a_k ... koeficient podle druhu kameniva,

$a_k = 0,55$ pro těžené kamenivo prvotřídní kvality,

$a_k = 0,50$ pro drcené nebo těžené kamenivo průměrné kvality,

$a_k = 0,40$ pro méně hodnotné kamenivo,

R_c ... výpočtová pevnost cementu (tab. 17),

C ... dávka cementu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$],

V ... dávka vody [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$].

Tab. 17 hodnoty výpočtové pevnosti cementu R_c

Třída cementu	Výpočtová pevnost
32,5	38,5
42,5	45,8
52,5	53,3

2. **Výpočet potřebného množství vody** pro ovlhčení kameniva, hydrataci cementu a dosažení požadované konzistence betonu

$$V = V_k + V_c \quad (5)$$

kde

$V...$ celkové množství vody na 1 m³ hotového betonu,

$V_k...$ množství vody na ovlhčení kameniva a dosažení požadované konzistence [kg.m⁻³],

$V_c...$ množství vody potřebné k hydrataci cementu [kg.m⁻³].

Pro zrna o velikosti > 0,25 mm se množství vody k ovlhčení 100 kg kameniva určí ze vztahu

$$V_k = \sum \frac{p \cdot n}{\sqrt[3]{d_1 \cdot d_2}} \quad (6)$$

kde

$p...$ množství kameniva mezi sítý o velikosti d_1 a d_2 [kg],

$d_1, d_2...$ velikost ok sít [mm],

$n...$ koeficient zvolený podle druhu kameniva, tvaru zrn kameniva a konzistence čerstvého betonu (tab. 18).

Pro jemné **těžené kamenivo o velikosti zrn < 0,25 mm** počítáme s potřebným množstvím vody 23 litrů na 100 kg kameniva.

Pro **kamennou moučku o velikosti zrn < 0,25 mm** počítáme s potřebným množstvím vody 35 litrů na 100 kg kameniva.

Množství vody potřebné k hydrataci cementu se spočítá ze vztahu

$$V_c = 0,23 C \quad (7)$$

kde $C...$ dávka cementu [kg],

Tab. 18 Koeficient n podle Bolomeye

Konzistence čerstvého betonu	Těžené kamenivo s kulovitými zrny	Drcené kamenivo s hranatými zrny
zavhlá	0,08	0,085 - 0,095
měkká	0,085 - 0,095	0,100 - 0,110
tekutá	0,100 - 0,110	0,120 - 0,130

3. Dosazením do **rovnice absolutních objemů** vypočteme množství kameniva a dopočítáme

množství ostatních složek. Rovnice absolutních objemů vyjadřuje vztah mezi jednotlivými složkami betonu a obsaženými vzduchovými póry v 1 m³ zhutněného betonu.

$$\frac{c}{\rho_c} + \frac{v}{\rho_v} + \frac{k}{\rho_k} + \varepsilon = 1 \quad (8)$$

$$c + v + k + \varepsilon = 1 \quad (9)$$

kde

C, V, K ...dávký cementu, vody a kameniva [kg],

c, v, k ...absolutní objem cementu, vody a kameniva [m³],

ρ_c ... objemová hmotnost cementu [kg.m⁻³],

ρ_v ... objemová hmotnost vody [kg.m⁻³],

ρ_k ... objemová hmotnost zrn [kg.m⁻³],

ε ... objem vzduchu [m³],

1... 1 m³ zhutněného betonu.

4.2 Návrh složení betonu podle empirického množství vody

Princip tohoto jednoduchého empiricko-výpočetního návrhu spočívá v určení vodního součinitele z nomogramu, určení množství záměsové vody z tabulek pro různé zrnitostní křivky kameniva a podle požadované konzistence čerstvého betonu, dále ve vypočtení množství cementu z vodního součinitele a vypočtení množství kameniva z rovnice absolutních objemů.

Schéma výpočtu je následující:

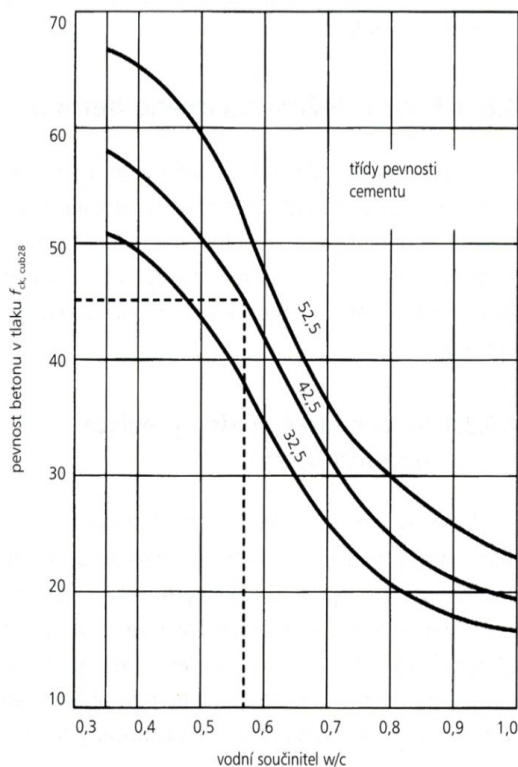
1. **Určení vodního součinitele (V/C)** z nomogramu, pro požadovanou pevnost betonu a zvolenou pevnostní třídu cementu. Jedná s o tzv. Walzovy závislosti mezi pevností betonu v tlaku a vodním součinitelem pro dané 28-denní pevnosti cementu (obr. 34).

2. **Určení množství záměsové vody z tabulky.** Z tabulky 19 zjistíme potřebné množství vody pro zvolenou konzistenci betonu a granulometrii kameniva (podle zvolené křivky zrnitosti) pro beton bez přísad. Pokud chceme použít plastifikátor nebo superplastifikátor se známým účinkem na snížení dávky vody, provedeme korekci dávky vody pro danou konzistenci. Daný typ křivky zrnitosti kameniva je zde vyjádřen písmenem A, B nebo C a číselným indexem. Označení odpovídá hodnotám modulu zrnitosti k , D - modulu a F - hodnoty. Indexové číslo udává max. velikost zrn kameniva D_{max} .

Modul zrnitosti k (podle Abramse) je součet procentních zůstatků směsi kameniva stanovených na rozšířené základní sadě síť dělený 100.

D - modul (podle Rothfuchse) je součet procentních propadů směsi kameniva stanovených na rozšířené základní sadě síť.

F - hodnota (podle Hummela) je popisná charakteristika tvaru křivky zrnitosti (podrobněji viz např. [32]).



Obr. 34 Nomogram závislosti pevnosti betonu na vodním součiniteli a pevnosti cementu podle Walze [34,36]

Tab. 19 Množství záměsové vody v litrech na 1 m³ betonu s různou konzistencí v závislosti na zrnitostní křivce kameniva [32]

konzistence	křivka zrnitosti											
	wA ₈	B ₈	C ₈	A ₁₆	B ₁₆	C ₁₆	A ₃₂	B ₃₂	C ₃₂	A ₆₃	B ₆₃	C ₆₃
C 0	160	178	197	139	160	183	133	152	171	123	139	163
S 1	166	184	205	145	166	189	137	158	177	127	145	169
S 2	176	194	217	155	176	200	145	167	188	135	155	180
S 3	192	212	235	170	192	217	159	181	207	148	170	197
S 4	204	227	250	181	204	232	171	197	223	159	181	211
čára zrnitosti	modul zrnitosti k			D - součet			F - hodnota					
A ₈	3,64			536			134					
B ₈	2,89			611			111					
C ₈	2,27			673			92					
A ₁₆	4,61			439			163					
B ₁₆	3,66			534			134					
C ₁₆	2,75			625			107					
A ₃₂	5,48			352			189					
B ₃₂	4,20			480			151					
C ₃₂	3,30			570			123					

3. Výpočet množství cementu z vodního součinitele.

$$V/C = \frac{V}{C} \quad \rightarrow \quad C = \frac{V}{V/C} \quad (10)$$

kde

C ...dávka cementu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ hotového betonu],

V ...dávka vody [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ hotového betonu],

V/C ...vodní součinitel.

4. Výpočet množství kameniva z rovnice absolutních objemů (podle vztahu 8).



KONTROLNÍ OTÁZKY

1. Popište 4 hlavní fáze návrhu složení betonu!
2. Vysvětlete rozdíl mezi typovým betonem a betonem předepsaného složení!
3. Napište a vysvětlete rovnici absolutních objemů!

5 SPECIÁLNÍ BETONY

Speciální betony jsou betony, u nichž některý z klíčových parametrů nabývá neobvyklých hodnot ve srovnání s běžnými betony. Mají tedy určité specifické vlastnosti a jsou určeny pro zvláštní použití. K nejvýznamnějším speciálním betonům patří:

- lehké a těžké betony,
- vysokohodnotné betony,
- vodostavební betony,
- silniční betony,
- vláknobetony,
- samozhutnitelné betony,
- polymerbetony.

5.1 Lehké betony

Lehké betony *jsou vylehčeny* dutinami a póry, vytvořenými buď použitím pórovitého kameniva, nebo pomocí plynotvorných a pěnотvorných přísad. Objemová hmotnost lehkých

betonů se pohybuje **od 200 do 2000 kg.m⁻³**. I přes nízkou objemovou hmotnost lze u lehkých betonů dosáhnout pevnosti v tlaku až 90 MPa. Používají se pro snížení hmotnosti konstrukce a pro zlepšení jejich tepelně izolačních vlastností.

Podle použití dělíme lehké betony na:

- **konstrukční** - tam, kde vlastní hmotnost konstrukce představuje její rozhodující zatížení; mohou být ukládané do bednění nebo prefabrikované, prosté nebo vyztužené,
- **konstrukčně-tepelněizolační** - především tvárnice a dílce z pórobetonu a liaporbetonu,
- **tepelně izolační** - především pórobeton, pěnobeton nebo polystyrenbeton s velmi nízkou objemovou hmotností (pod 400 kg.m⁻³).

Podle způsobu vylehčení dělíme lehké betony na:

- **mezerovité** - k vylehčení je využito mezer mezi většími zrny kameniva,
- **nepřímo lehčené** - hutné betony s pórovitým kamenivem (přírodním, ale hlavně umělým),
- **přímo lehčené** - s vytvořenými póry v cementovém kameni.

U **mezerovitých betonů** je snížení objemové hmotnosti (vylehčení) dosaženo vynecháním některých drobných frakcí kameniva (hutného nebo pórovitého) a snížením obsahu cementového tmele. Výsledkem je beton s mezerovitou strukturou, kde hrubá zrna kameniva jsou obalena tenkou vrstvou cementového tmele, který je spojuje v místech jejich dotyku (obr. 35). Pevnost v tlaku mezerovitých betonů se, při objemové hmotnosti **900 až 1400 kg.m⁻³**, pohybuje **od 1 do 10 MPa**. Pevnost mezerovitého betonu závisí především na smykové pevnosti cementového tmele obalujícího zrna kameniva. Jejího zvýšení lze dosáhnout použitím polymercementů. Mezerovité betony se používají pro podkladní vrstvy vozovek s drenážním účinkem, a s použitím polymercementů také pro pojízdné vrstvy vozovek (zde se používají mezerovité betony monofrakční, které mají nejvyšší mezerovitost). Otevřená struktura povrchu takového betonu rychle vysychá po dešti a dobře tlumí hluk od pneumatik dopravních prostředků. Pro příznivé akustické vlastnosti se mezerovité betony používají také pro budování protihlukových stěn. Dále mohou být použity jako drenážní výplně za rubem opěrných zdí a mostních opěr nebo v kombinaci s pórovitým kamenivem pro výrobu tepelně a zvukově izolačních zdicích prvků.

U **nepřímo lehčených betonů** je snížení objemové hmotnosti dosaženo pouze pórovitostí kameniva (obr. 36). Příklady používaných pórovitých kameniv jsou uvedeny v kap. 3.2. Tyto lehké betony se vyrábí podobně jako obyčejný beton, je však obvykle nutné zohlednit vysokou nasákavost zrn kameniva. To znamená buď zvýšení dávky záměsové vody nebo zpracování kameniva ve stavu nasycení vodou. Nepřímo lehčené betony se používají na monolitické konstrukce i prefabrikované dílce. Běžně dosahují pevnosti v tlaku do 45 MPa při objemové hmotnosti 1000 až 2000 kg.m⁻³. Při použití kvalitních složek a technologických postupů lze ale vyrobit i lehké betony vysokopevnostní. Označují se LWAC (Light-weight-aggregate concrete) a dosahují pevnosti v tlaku 70 až 90 MPa, při objemové hmotnosti do 2000 kg.m⁻³.

U **přímo lehčených betonů** je snížení objemové hmotnosti dosaženo záměrným vytvořením pórů v čerstvé maltě z křemičitého písku nebo elektrárenského popílku (jako plniva) a

cementu nebo směsi cementu s vápnem (jako pojiva). Póry v pojivu jsou vytvořeny buď chemickou reakcí pojiva s přidaným hliníkovým práškem - vzniká **pórobeton** (viz kap. 5.1.2), nebo přimícháním pěny - vzniká **pěnobeton** (viz kap. 5.1.3).



Obr. 35 Řez vzorkem mezerovitého betonu.



Obr. 36 Řez vzorkem liaporbetonu - nepřímě lehčeného lehkého betonu s pórovitým kamenivem Liapor

5.1.1 Polystyrenbeton

Polystyrenbeton (PSB) je druh nepřímě lehčeného lehkého betonu, v kterém se jako plnivo používají **granule z expandovaného polystyrenu** (obr. 37).

Hlavními složkami PSB jsou:

- **cement** - CEM I nebo CEM II ve třídách 32,5 a 42,5,
- **plnivo** - polystyrenové granule (recyklát),
- **minerální příměsi** - jemné odprašky, popílek,
- **přísady pro snížení lepivosti** polystyrenového plniva, vyvolané elektrostatickým nábojem. Bývá používáno také plnivo opatřené speciální povrchovou úpravou - tzv. ekostyren (obr. 38).
- **voda**.



Obr. 37 Řez vzorkem polystyrenbetonu o objemové hmotnosti 500 kg.m^{-3}



Obr. 38 Ekostyren - polystyrenové plnivo s povrchovou úpravou pro snížení lepivosti

Mohou být použity také plastifikační přísady pro zlepšení konzistence betonu.

Objemová hmotnost PSB se pohybuje *mezi 200 a 900 kg.m^{-3}* , podle obsahu polystyrenového plniva a minerálních příměsí. Pevnost v tlaku dosahuje cca *od 0,5 do 3 MPa*, někteří dodavatelé uvádí až 7 MPa. Součinitel tepelné vodivosti λ má hodnoty *0,08 $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ a více*.

Čerstvý PSB je hustá kašovitá hmota (obr. 39, 40). Při vyšších objemových hmotnostech ho lze vyrábět v betonárně jako transportbeton a ukládat čerpáním. Betony s nižší objemovou hmotností se vyrábí ve speciálním mobilním zařízení (obr. 41), nejlépe přímo na místě zpracování. Uložený čerstvý PCB se zarovnává pomocí latí.

PCB se používá jako vynikající tepelněizolační materiál především pro izolaci podlah, střeš a obvodových plášťů budov.



Obr. 39 Čerstvý polystyrenbeton (převzato z <http://www.enroll.cz>)



Obr. 40 Ukládání čerstvého polystyrenbetonu čerpáním (převzato z <http://www.sircontec.com>)



Obr. 41 Zařízení pro výrobu polystyrenbetonu a pěnobetonu (převzato z <http://www.sircontec.com>)

5.1.2 Autoklávovaný pórobeton

Autoklávovaný pórobeton (dále jen APB) je nejvýznamnějším zástupcem přímo lehčených betonů. Výrobky z APB mají *bílou* nebo *šedou* barvu. V bílém pórobetonu je plnivem jemný *křemičitý písek* (pískový pórobeton, obr. 44, 45), v šedém je plnivem *elektrárenský popílek* (popílkový pórobeton, obr. 46). V současné době výrazně převažuje výroba bílého pórobetonu.

V obou případech se jedná o lehký pórovitý materiál, u kterého až 80% objemu tvoří uzavřené makropóry o velikosti od 0,1 do několika mm (obr. 42).

Pro výrobu APB se používají čtyři základní druhy surovin:

- *vápno a cement*,
- *křemičité látky* - křemičitý písek nebo popílek,
- *plynotvorná látka* - hliník v podobě prášku nebo pasty,
- *pomocné látky* - sádrovec, sádra, anhydrit.

Vápno musí to být čisté vzdušné pálené nehašené vápno s obsahem $\text{CaO} > 90\%$ a $\text{MgO} < 3\%$. Vápno musí být středně až tvrdě pálené a nesmí obsahovat přepal a siřičkovou síru.

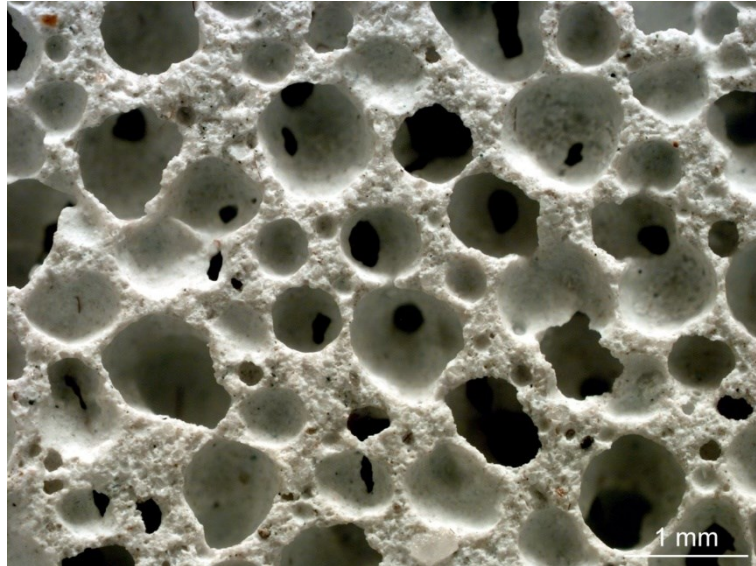
Z *cementů* lze použít téměř všechny druhy na bázi portlandského slínku. Především jsou to CEM I a CEM II v třídách 32,5 a 42,5.

Křemičitý písek má být jemnozrný, čistý, s obsahem $\text{SiO}_2 > 90\%$. Musí mít co nejnižší obsah odplavitelných částic, humusových látek, síranů a alkálií. Písek musí být co nejjemnější, proto se ve výrobě domílá, aby byl jeho měrný povrch min. $200 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$.

Popílek musí obsahovat min. 45% SiO_2 a splňovat přípustné limity pro obsah škodlivých látek: max. 2 % MgO , max. 35 % Al_2O_3 , max. 18 % Fe_2O_3 .

Hliník se přidává v podobě prášku nebo pasty. Částičky mají mít šupinkovitý tvar, prášek má

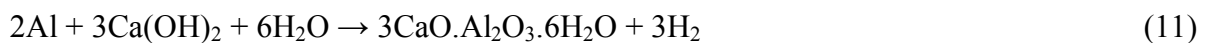
mít rovnoměrnou zrnitost a měrný povrch mezi 700 a 1200 m².kg⁻¹. Prášek musí obsahovat min. 94 % aktivního hliníku, nesmí obsahovat slepené hrudky, tuky a jeho vlhkost nemá být vyšší než 0,2 %.



Obr. 42 Pórovitá struktura pórobetonu

Sádrovec zpožďuje průběh hašení vápna a používá se proto jako regulátor tuhnutí směsi. Zlepšuje také pevnost APB a jeho mrazuvzdornost. Regulační účinky na tuhnutí APB má také jemně mletá sádra nebo anhydrit.

Výroba APB začíná **jemným mletím** křemičitých látek. Ty se (podle použité výrobní technologie) melou buď samostatně, nebo společně s páleným vápnem (případně i s cementem). Připravená surovinová směs se pak ve speciálních míchačkách **rozmíchá** s vodou, hliníkovým práškem a přísadami. Vzniklá tekutá kaše se vlévá do forem, kde dojde k jejímu **nakypření** a **zatuhnutí**. Nakypření způsobí **plynný vodík**, vznikající reakcí hliníku s hydroxidem vápenatým (portlanditem) ve vyhašeném vápně, která probíhá podle rovnice:



Povrch směsi ve formách se pak srovná, seříznutím tzv. **přerostu** (hmoty přesahující přes okraj formy). Přerost se upravuje (rozplavuje) a vrací zpět do výroby.

Výrobky vyjmuté z forem se podle potřeby rozřežou, umístí na rošty, a vloží do autoklávu, kde probíhá tzv. **hydrotermální vytvrzování**. Autoklávy jsou válcovité nádoby o průměru 2,4 až 3,6 m a délce 15 až 40 m (obr. 43). V autoklávu jsou výrobky vystaveny působení teploty (cca 190 °C) a tlaku nasycené vodní páry (0,9 až 1,3 MPa), po dobu 11 až 16 hodin. V tomto prostředí vznikají v APB (na rozdíl od obyčejného betonu), kromě fyzikálních vazeb, také **chemické vazby** mezi alkalickým pojivem a kyselým plnivem.

Z pórobetonových prvků lze vyzdít téměř celou hrubou stavbu. Nejrozšířenějším výrobkem jsou **tvárnice** (obr. 44) různých rozměrů, používané pro suché zdění. K dalším pórobetonovým výrobkům patří bloky, příčkovky, překlady, schodišťové stupně, komínové dílce, stropní vložky (obr. 45), příčkové, stěnové a stropní panely a tepelně izolační desky.

Většina výrobků je nevyztužených, v menším množství se vyrábí i prvky vyztužené, a to zejména stěnové, stropní a střešní dílce. *Výztuž* v APB je méně chráněna proti korozi, než u běžných cementových betonů. Musí se proto chránit antikorozní vrstvou (většinou na bázi vodní akrylátové disperze), nanášenou před uložením výztuže do pórobetonu.



Obr. 43 Autoklávy pro vytvrzování tvárnic a příčekvek z pórobetonu (převzato z <http://www.porfix.sk>)

Výrobky z APB jsou lehké, snadno manipulovatelné a opracovatelné. Dají se snadno brousit a řezat (i obyčejnou ruční pilkou). Objemová hmotnost materiálu se pohybuje *od 300 do 1000 kg.m⁻³*. Pevnost v tlaku dosahuje hodnot *od 1,5 do 7 MPa*. Součinitel tepelné vodivosti λ má hodnoty v rozmezí *0,1 až 0,2 W.m⁻¹.K⁻¹*.

APB je odolný proti ohni a za normálních podmínek je mrazuvzdorný. Vzhledem k značné nasákavosti (až 80 %) se ale nehodí do stále vlhkého nebo mokrého prostředí, nebo tam kde může dojít k jeho trvalému navlhnutí.

Z autoklávovaného pórobetonu se, díky jeho univerzálnosti a vynikajícím vlastnostem, stal velmi rozšířený moderní stavební materiál.



Obr. 44 Přesná tvárnice z bílého pískového pórobetonu Ytong (převzato z <http://www.ytong.cz>)



Obr. 45 Stropní vložky z bílého pískového pórobetonu Ytong (převzato z <http://stavba.tzb-info.cz>)



Obr. 46 Rodinný dům postavený z tvárnic ze šedého popílkového pórobetonu [4]

5.1.3 Pěnobeton

Pěnobeton patří mezi přímo lehčené betony. Vylehčení se provádí vmíšením dostatečně stabilní *technické pěny*.

Hlavními složkami pěnobetonu jsou:

- *cement* - CEM I nebo CEM II,
- *křemičitý písek*,
- *technická pěna* - na bázi hydrolyzovaných proteinů (vypadá podobně jako našlehaný vaječný bílek, obr. 47),

- *příměsi* (jemné odprašky, popílek),
- *přísady* (superplastifikátor),
- *voda*.

Fyzikální a mechanické vlastnosti jsou podobné jako u polystyrenbetonů (viz kap. 5.1.1). Objemová hmotnost se pohybuje *mezi 300 a 900 kg.m⁻³*, pevnost v tlaku je v rozmezí *0,3 až 3 MPa*. Součinitel tepelné vodivosti λ má hodnoty *0,09 W.m⁻¹.K⁻¹ a více*.



Obr. 47 Technická pěna používaná pro vylehčení pěnobetonu (převzato z <http://www.bvgroup.cz>)



Obr. 48 Aplikace pěnobetonu při realizaci půdní vestavby (převzato z <http://www.bvgroup.cz>)

Výrobní zařízení a použití jsou rovněž obdobné jako u polystyrenbetonu. Tyto materiály slouží především jako výplňové a vyrovnávací vrstvy podlah (obr. 48), tepelněizolační vrstvy střešního pláště a také jako tepelná izolace kanálů a šachet.

Pěnobeton se od polystyrenbetonu liší tím, že je *samonivelační*. Díky tomu je jeho aplikace podstatně rychlejší a vytvořené plochy vykazují lepší rovinnost, než u polystyrenbetonů.

Vzhledem k samonivelační schopnosti ho však nelze použít jako spádovou vrstvu plochých střech. V těchto případech a také tam, kde by hrozilo zatečení nebo protečení stropů betonem, se dává přednost polystyrenbetonu.

5.2 Těžké betony

Těžké betony jsou charakterizovány objemovou hmotností **nad 2600 kg.m⁻³** (až do cca 6000 kg.m⁻³). Používají se ve speciálních konstrukcích, sloužících jako biologická **ochrana před radioaktivním, rentgenovým a neutronovým zářením** (jaderná energetika, radiodiagnostické laboratoře, místnosti s rentgeny) nebo **v těžkých konstrukčních prvcích** (betonové základy těžkých strojů, protizávaží). Těžké betony s korundovým kamenivem se používají také do průmyslových betonových podlah s vysokou odolností proti obrusu. Vysoké objemové hmotnosti betonu je dosahováno použitím **těžkých kameniv**. Příklady kameniv do těžkých betonů jsou uvedeny v kap. 3.2. Chemické složení a objemová hmotnost některých druhů těžkého kameniva, spolu s objemovou hmotností příslušných betonů, jsou uvedeny v tab. 20.

Těžký beton se obtížně zpracovává, neboť v důsledku vysoké objemové hmotnosti kameniva dochází k **odměšování hrubých zrn**. Vodní součinitel se omezuje na hodnotu 0,6 a pro úpravu konzistence lze používat běžné plastifikační přísady (kap. 3.4.1). Ukládání obzvláště těžkých betonů lze provádět **dvoufázově** - bednění se nejprve vyplní hrubým kamenivem s malým podílem jemných frakcí, kamenivo se zhutní a poté se do něj vhná přetlakem cementová malta. Jsou používány metody Prepacet nebo Colcrete, které se v zásadě liší poměrem složek a způsobem míchání cementové malty. Jiným způsobem dvoufázového ukládání těžkého betonu je metoda Puddel, kdy se těžké kamenivo klade do vrstvy jemnozrného betonu s následným hutněním.

Tab. 20 Chemické složení a objemová hmotnost některých druhů těžkého kameniva a objemová hmotnost těžkých betonů [3,32].

Materiál	Chemické složení	Zastoupení složek	Objemová hm. kameniva [kg.m ⁻³]	Objemová hm. betonu [kg.m ⁻³]
Baryt	BaSO ₄	obsah BaSO ₄ ≥ 85 %	4000 – 4600	3350 – 3700
Limonit	Fe ₂ O ₃ .nH ₂ O	obsah krystalické vody cca 11 %	3400 – 4000	2900 – 3350
Ilmenit	FeTiO ₃	obsah Fe 35–40 %	4300 – 4800	3500 – 3700
Magnetit	Fe ₃ O ₄	obsah Fe 60–70 %	4200 – 5200	3350 – 4150
Hematit	Fe ₂ O ₃	obsah Fe 60–70 %	4900 – 5300	3850 – 4150
Ferofosfor	Fe _n P	obsah Fe 65–70 %	5800 – 6800	4100 – 5150
Ferosilicium		obsah Fe 80–85 %	5800 – 6200	4000 – 5000
Ocelové granule		obsah Fe 90–95 %	6800 – 7500	4650 – 6100
Ocelový písek		obsah Fe cca 95 %	7500	

5.3 Vysokohodnotné betony

Vysokohodnotné betony jsou označovány zkratkou **HPC** (High Performance Concrete). Jedná se o betony s vysokou pevností v tlaku (nad 65 MPa) a vysokou trvanlivostí. Tyto vlastnosti znamenají splnění především následujících požadavků:

- vysoká počáteční a dlouhodobá pevnost,
- optimální konzistence (180÷200 mm podle sednutí kužele, viz tab. 2),
- dobrá čerpatelnost, dobrá adheze k podkladu, malé pocení,
- vysoká objemová hmotnost, tvrdost a odolnost proti opotřebení,
- nízká propustnost pro kapaliny a plyny,
- vysoká odolnost proti působení chloridů, síranů, dusičnanů, kyselin, apod.,
- vysoká mrazuvzdornost.

Definice vysokohodnotného betonu bývá specifikována také hodnotami konkrétních parametrů:

- vodní součinitel $w/c < 0,35$,
- pevnost v tlaku **min. 21 MPa po 4 hodinách** od uložení, **min. 34 MPa po 24 hodinách** od uložení a **min. 69 MPa po 28 dnech** od uložení,
- koeficient trvanlivosti **min. 80%** (při stanovení metodou ASTM [2], kdy se hodnotí změna dynamického modulu pružnosti betonu po 300 cyklech zmrazování a rozmrazování).

Trvanlivost betonu se rozumí jeho schopnost odolávat degradaci dané působením chemických, fyzikálních a biologických vlivů. Je to doba, po kterou i přes působení těchto vlivů, vykazuje beton v konstrukci vlastnosti nezbytné k jeho stabilitě.

Vlastností vysokohodnotného betonu lze dosáhnout pouze:

- výběrem těch nejkvalitnějších složek a vzájemně kompatibilních složek,
- redukcí vodního součinitele,
- použitím vhodných přísad a příměsí,
- kvalitními postupy zpracování, ukládání a ošetřování.

Nejvíce se používá *portlandský cement vyšších tříd*, který musí mít **co nejnižší obsah C₃A**. Čím nižší je obsah C₃A v cementu, tím snadněji se dá regulovat reologie vyrobeného betonu (tuhnutí a změny konzistence v čase) a tím odolnější je ztvrdlý beton proti síranové korozi. Abychom dosáhli vysoké pevnosti betonu, musí být cement **co nejjemněji mletý** a musí mít **vyšší obsah C₃S**. Pokud žádný z dostupných cementů nepřináší požadované výsledky, musí být do betonu přidány vhodné minerální příměsi - mikrosilika, elektrárenský popílek, vysokopecní struska nebo jejich kombinace.

Minerální příměsi (fillery) jsou ve vysokohodnotných betonech velmi důležitou složkou. Jednak zlepšují zpracovatelnost betonu (viz kap. 3.5), jednak zhutňují strukturu cementového kamene, a to i v zóně jeho kontaktu s povrchem zrn kameniva nebo ocelové výztuže (v tzv. přechodové zóně), která jinak představuje mechanicky nejslabší článek betonu.

Kamenivo musí být nereaktivní a velmi pevné. Cementový kámen i přechodová zóna ve vysokohodnotném betonu mohou být totiž tak pevné, že nedostatečně pevné kamenivo by se mohlo stát v betonu tím nejslabším článkem. Nejvhodnější je kamenivo těžené nebo drcené z pevných, kompaktních, jemně zrnitých hornin (nap. žuly, syenitu, gabra nebo dioritu), aby vzniklá zrna kameniva nebyla vlivem drcení uvnitř rozpukaná mikrotrhlinami. Zrna kameniva musí mít vhodný tvarový index (kap. 3.2). Nejvhodnější maximální velikost kameniva je $D_{\max} = 10$ až 12 mm. Většina hornin má menší zrna pevnější a navíc, čím větší je zrno kameniva, tím větší a heterogennější je přechodová zóna v betonu. Je např. velmi obtížné vyrobit vysokohodnotný beton s pevností v tlaku nad 100 MPa s kamenivem s $D_{\max} > 25$ mm.

Vodní součinitel pod 0,35 vyžaduje **použití vysoce účinného superplastifikátoru** (viz kap. 3.4.1). Je třeba vždy ověřit laboratorními zkouškami, zda je plastifikátor kompatibilní a cementem.

Vysokohodnotné betony se používají především pro stavbu významných výškových budov, mostů s velkým rozpětím, těžebních plošin pro těžbu ropy a zemního plynu, vodojemů a chladičích věží.

5.4 Vodostavební betony

Vodostavební beton je beton **s dostatečnou vodotěsností a trvanlivostí**, zaručující jeho dlouhodobou odolnost proti účinkům tlakové nebo proudící vody. Odolnost proti účinkům tlakové vody (vodotěsnost) znamená, že na vodou nezátíženě straně konstrukce nevznikají viditelné průsaky ani vlhké skvrny.

Z vodostavebních betonů se budují především konstrukce, které jsou dlouhodobě jednostranně vystaveny působení vody a vodního tlaku, příp. proudící vodě, a musí odolávat působení agresivního prostředí, střídavému působení mrazu a abrazivnímu působení vodou unášených splavenin (kap. 8.1).

Tyto betony se používají při výstavbě např.:

- vodních děl a gravitačních přehrad,
- vodojemů a jiných zásobníků (např. na motorová paliva),
- čistíren odpadních vod,
- úpraven vody,
- podzemních objektů nebo jejich částí, vystavených účinkům vody, které nemají běžnou hydroizolaci, (tzv. "bílé vany"),
- tlakových betonových trub,
- betonových trupů lodí.

Doporučení pro **výběr složek** vodostavebního betonu jsou dána řadou technických norem.

Cement se volí podle typu konstrukce a prostředí, které na ni bude působit:

- portlandský struskový CEM II/A-S nebo CEM II/B-S v případech, kdy je požadována vyšší odolnost betonu proti agresivnímu prostředí,

- vysokopecní CEM III/A, CEM III/B nebo CEM III/C do betonů na středně masivní konstrukce (tloušťka 1 až 2 m) a masivní konstrukce (tloušťka nad 2 m),
- vysokopecní CEM III/B nebo CEM III/C do betonů vystavených působení síranů,
- portlandský CEM I při betonování v zimě a do tenkostěnných konstrukcí (tloušťka do 0,6 m) vystavených střídavému zmrazování a rozmrazování.

Obecně platí, že do masivních konstrukcí je nutno používat cementy s nízkým hydratačním teplem, neboť velké množství hydratačního tepla nadměrně ohřívá konstrukci a způsobuje poškození struktury betonu. Z masivních konstrukcí se toto teplo obtížně odvádí.

Kamenivo do vodostavebních betonů musí být **hutné** a **nesmí reagovat s alkáliemi** v cementovém kameni. Velikost maximálního zrna kameniva se doporučuje $D_{max} \leq 35 \text{ mm}$. Kamenivo musí mít vhodnou zrnitost a tvar zrn. Aby byl beton dobře zpracovatelný a nepropustný, musí kamenivo obsahovat **optimální množství částic o velikosti $\leq 0,25 \text{ mm}$** . Nedostatek těchto částic se řeší přidáním vhodných minerálních příměsí (viz kap. 3.5).

Vodotěsnost a nasákavost betonu závisí především na obsahu kapilárních pórů v cementovém kameni. Jsou to otevřené (propojené) póry, spojené s povrchem betonu, umožňující transport vody v betonu. Nejdůležitějším technologickým opatřením, jak snížit podíl těchto pórů v betonu je snížení dávky záměsové vody. Z toho důvodu je předepsán max. vodní součinitel ve vodotěsných a vodostavebních betonech ($v/c \leq 0,55$). Pro dosažení vhodné konzistence čerstvého betonu je třeba použít vhodný **plastifikátor**. Kromě plastifikátorů se používají také **těsnící přísady** pro zvýšení vodotěsnosti a **provzdušňovací přísady** pro zvýšení mrazuvzdornosti.

Vodotěsnost betonu se zkouší normativním postupem [20], při kterém se zjišťuje tzv. **hloubka průsaku tlakovou vodou**. Tlaková voda se nechá působit na povrch zkušebního tělesa ztvrdlého betonu (po dobu 72 hod. tlakem 0,5 MPa). Zkušební těleso se pak rozlomí a změří se hloubka průsaku vody v mm. Pro vodotěsný beton v prostředí XA2 (viz tab. 1) je maximální dovolená hloubka průsaku **35 mm**, v prostředí XA3 je to **max. 20 mm**.

Vodotěsnost samotného betonu, jako materiálu, však ještě nezaručuje, že i zbudovaná betonová konstrukce bude vodotěsná. Ve ztvrdlém betonu se nesmí vyskytovat trhliny a musí být správně navrženy dilatační a pracovní spáry, aby byly vodotěsné. Beton musí být kvalitně zhutněn a hned po dokončení řádně a dlouhodobě ošetřován, aby nedocházelo k vysušování povrchu betonu a vzniku smršťovacích trhlin.

Pro vodní stavby vystavené dlouhodobým účinkům proudící vody je třeba volit betony s minimální pevností **C 20/25**. Aby beton odolával obrušování a otloukání pevnými částicemi, unášenými vodou, musí být betonová konstrukce chráněna **min. 300 mm** silnou vrstvou z houževnatého betonu třídy **min. C 35/45**.

5.5 Silniční betony

Silniční betony se používají pro budování cementobetonových krytů silnic, dálnic, letištních drah a ploch, parkovišť a různých účelových komunikací. **Cementobetonové kryty** (CB)

PROJEKT INOVACE PROGRAMU STAVEBNÍ INŽENÝRSTVÍ

mohou být z prostého nebo vyztuženého betonu, jednovrstvé nebo dvouvrstvé. Kladení CB se provádí mechanizovaně, zejména pomocí tzv. *finišeru* (obr. 49).

Tyto betony musí mít *zvýšenou pevnost v tahu ohybem* (min. 4 až 4,5 MPa podle typu vozovky), musí být dostatečně *mrazuvzdorné* a *odolné proti účinkům rozmrazovacích solí*. Povrch vozovky musí mít dobrou *odolnost proti obrusu*, dobré *protismykové vlastnosti* a *minimální hlučnost*, způsobenou dotykem pneumatik dopravních prostředků s povrchem vozovky.

Technická norma [8] dělí a označuje cementobetonové kryty podle dopravního významu. Rozdělení je uvedeno v tabulce 21. Pro každou skupinu CB jsou také normativně [22] doporučeny minimální kvalitativní parametry ztvrdlého betonu (viz tab. 22).

Tab. 21 Označení cementobetonových krytů podle dopravního významu

Doporučená nejnižší skupina	Specifikace komunikace	Třída dopravního zatížení dle [16]*
CB I	letištní dráhy a plochy, dálnice, rychlostní komunikace, rychlostní místní komunikace, silnice I. tř.	S, I-III
CB II	silnice II. a III. třídy, sběrné místní komunikace, obslužné místní komunikace, odstavné a parkovací plochy	III-V
CB III	obslužné místní komunikace, odstavné a parkovací plochy, dočasné komunikace a účelové komunikace	IV-VI

* ...netýká se letištních drah a ploch

Tab. 22 Kvalitativní parametry ztvrdlého betonu podle [14]

Skupiny vozovek	CB I	CB II	CB III
Pevnostní třída	C 30/37	C 30/37	C 25/30
Pevnost v tahu ohybem [MPa]	4,5	4,5	4,0
Stupeň vlivu prostředí	XF4	XF4	- *
Min. počet cyklů působení vody a rozmrazovacích solí **	100/75	75/50	- *
Max. součinitel prostorového rozložení vzduchových pórů [mm]	0,24	0,24***	-

*... pokud je požadováno v dokumentaci stavby

**...zkušební metoda A, C podle [6]

***...doporučená hodnota

Pro skupinu CB I se používá *cement* CEM I 42,5 s obsahem C₃A max. 8 %, s počátkem tuhnutí min. 1,5 hodiny a s obsahem MgO max 5% hm. slínku. Pro skupiny CB II a CB III lze

použit cementy CEM I 42,5, CEM I 32,5 a CEM II/A-S 32,5. Nejmenší množství cementu je pro CB I a CB II 350 kg.m⁻³ a pro CB III 330 kg.m⁻³ hotového betonu.

Kamenivo musí být trvanlivé a mrazuvzdorné, odolné proti alkalicko-křemičité reakci, s nasákavostí max. 1,5 % a s obsahem jemných částic max. 3 % hm. Maximální velikost zrn kameniva může být nejvíce do 1/4 tloušťky vrstvy, u spojitě vyztužených max. do 1/3 vzdálenosti mezi podélnými výztuhami. Tvarový index SI má být max. 40 %.

Používaný vodní součinitel pro silniční beton je $v/c = \text{max. } 0,45 \text{ až } 0,50$, obsah vzduchových pórů je min. 4 % pro kamenivo s $D_{\text{max}} = 32 \text{ mm}$ a 5 % pro kamenivo s $D_{\text{max}} = 16 \text{ mm}$.



Obr. 49 Pokládka cementobetonového krytu dálnice moderními finišery (převzato z <http://www.dalnice.com>)

5.6 Vláknobetony

Vláknobetony jsou konstrukční betony, do kterých jsou při výrobě přidávána, kromě běžných složek, také vhodná vlákna jako **rozptýlená všesměrně orientovaná výztuž**. Vlákna mohou být ocelová, skleněná, nebo syntetická (polypropylenová, polyetylenová, polyesterová, akrylátová). Vynikající vlastnosti mají vlákna uhlíková a aramidová, která se však vzhledem k vysoké ceně zatím používají jen ve speciálních případech.

Hlavní účinek vláken v betonu je dvojitý:

- všechny typy vláken **zvyšují odolnost betonu proti objemovým změnám** vlivem smršťování a okolní teploty, a zamezují tak vzniku smršťovacích trhlin,
- ocelová, skleněná a uhlíková vlákna **zlepšují odolnost proti tahovému namáhání** (zvyšují pevnost v tahu a mírně i pevnost v tlaku) a křehkému porušování betonu.

Vláknobetony s ocelovými vlákny (neboli drátkobeton) jsou nejpoužívanějším typem vláknobetónů. Ocelová vlákna (drátky) jsou vyrobena z uhlíkové oceli, mají zdrsněný, zvlněný nebo profilovaný povrch, na koncích bývají ohnutá nebo zploštělá kvůli

dostatečnému zakotvení v cementovém kameni (obr. 50). Jejich průměr je **0,15 až 2 mm** a délka **7 až 75 mm**. Obsah drátků v betonu se většinou pohybuje **od 0,25 do 2 %** objemových.



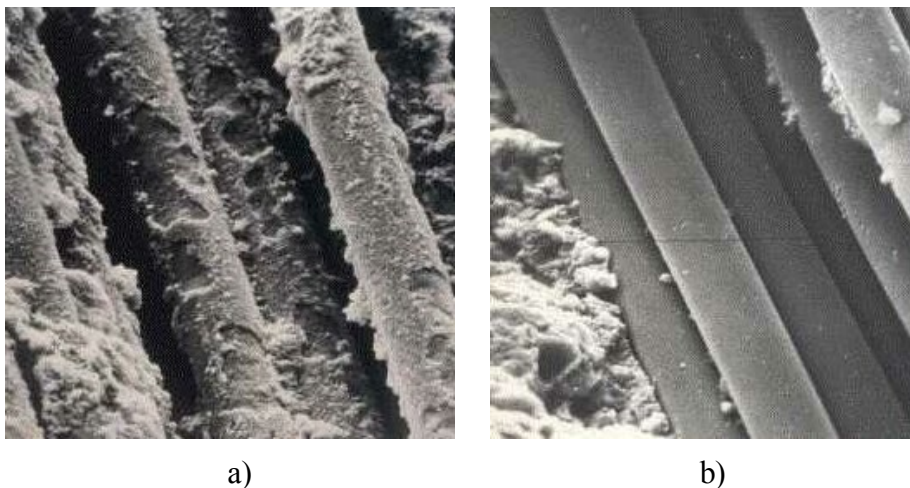
Obr. 50 Různé typy ocelových vláken do betonu (převzato z <http://www.arcelormittal.com>)

Betony s obsahem drátků do 2 % lze aplikovat jako stříkaný beton. Pro výrobu konstrukčních betonů a prefabrikátů se používají drátkobetony s vyšším obsahem drátků, **6 až 10 %** objemových. Vyšší podíl drátků však vede ke zhoršování zpracovatelnosti betonu.

Ocelová vlákna v betonu mohou **zvýšit jeho pevnost v tahu o 50 až 100 %**, přičemž **pevnost v tlaku se zvýší o 10 až 20 %**. Současně se zvyšuje odolnost betonu proti účinkům smršťování a působení teploty.

Prosté drátkobetony se používají např. na průmyslové podlahy, cesty, letištní plochy, opěrné stěny, základy nebo stříkaný beton. Z vyztužených drátkobetonů se zhotovují stropní desky, nosné stěny, roury, základové desky, tunelové skruže, železniční pražce a další.

Vláknobetony se skleněnými vlákny. Skleněná vlákna do betonu (obr. 51, 53a) se vyrábí ze skla, obsahujícího ZrO_2 v množství do 20 %. Toto sklo je, na rozdíl od běžných skel, odolné proti alkáliím v betonu (obr. 51). Vlákna bývají pro vyšší odolnost v alkalickém prostředí navíc opatřena speciální ochrannou lubrikací (velmi tenkým povlakem na povrchu vláken).



Obr. 51 Vlákno z běžného skla po několika týdnech v betonu (a) a alkalivzdorné vlákno po několika letech expozice v betonu (b) (převzato z <http://www.sklocement.cz>)

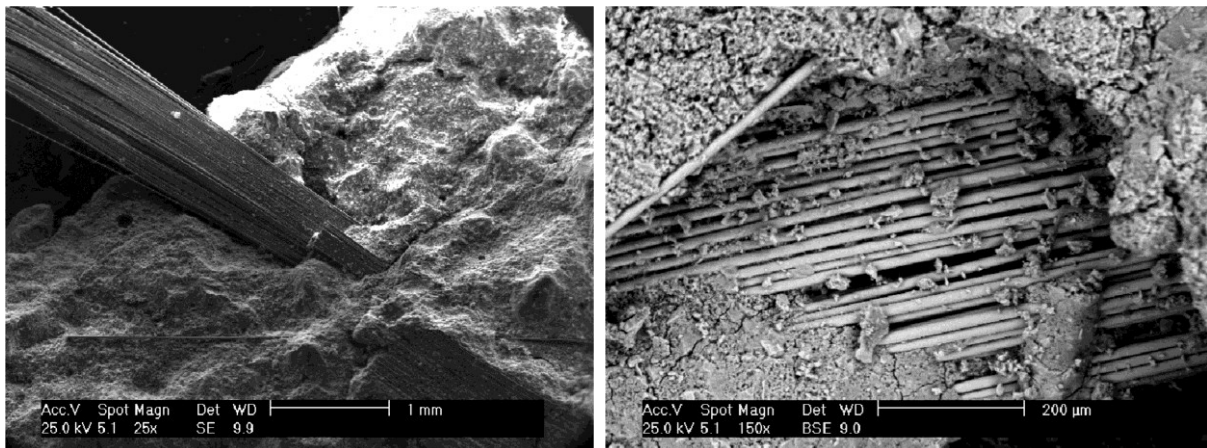
Skleněná vlákna s délkou do 35 mm se používají do stříkaných betonů, vlákna s délkou do 25 mm (obvykle do 12 mm) se přidávají do betonů, míchaných v míchačce. Vlákna lze do betonu dávkovat v množství až **do 5 %** objemových, aniž by docházelo k jejich shlukování. Při obsahu vláken do 1 kg/m^3 hotového betonu, přispívají vlákna ke zvýšení odolnosti betonu proti objemovým změnám a vzniku smršťovacích trhlin během tuhnutí. Vyšší obsah vláken zvyšuje i pevnost v tahu betonu a jeho houževnatost.

Stříkáním vláknobetonu na podklad nebo do formy se vyrábí především tenkostěnné ploché výrobky (např. obkladové panely, okenní parapety, římsy, prahy) nebo také kanalizační roury a sloupy. **Z vláknobetonů míchaných v míchačce** lze vyrábět velkorozměrové, členité prostorové prvky (např. velkoplošné prefabrikáty, kontejnery na domovní odpad, transformátory nebo drobnou zahradní architekturu). Lisováním se vyrábí také malorozměrové prvky, jako jsou dlaždice do exteriéru nebo různé poklady.

Vláknobeton s polymerovými vlákny. Běžná polymerová vlákna používaná do betonu jsou polypropylenová (obr. 52, 53b,c), polyetylenová (také ze směsi polypropylenu a polyetyleny), polyvinylalkoholová, akrylátová nebo polyesterová. Vyrábí se jako nekonečná vlákna s kruhovým průřezem a sekají se na požadovanou délku.

Dávkuje se v desetinách objemových procent, většinou jen v množství 0,1 %. Lze používat jednotlivá (monofilní) vlákna nebo vlákna ve svazcích (fibrilovaná). Výhodnější jsou svazky vláken, které mají vyšší tahovou pevnost než jednotlivá vlákna, vytváří síť v cementové matici a mají s ní dobrou soudržnost (obr. 52).

Běžná polymerová vlákna se používají k zamezení vzniku smršťovacích trhlin během tuhnutí. Vzhledem k tomu, že mají poměrně nízkou tahovou pevnost a nízký modul pružnosti, neplní ve ztvrdlém betonu statickou funkci.

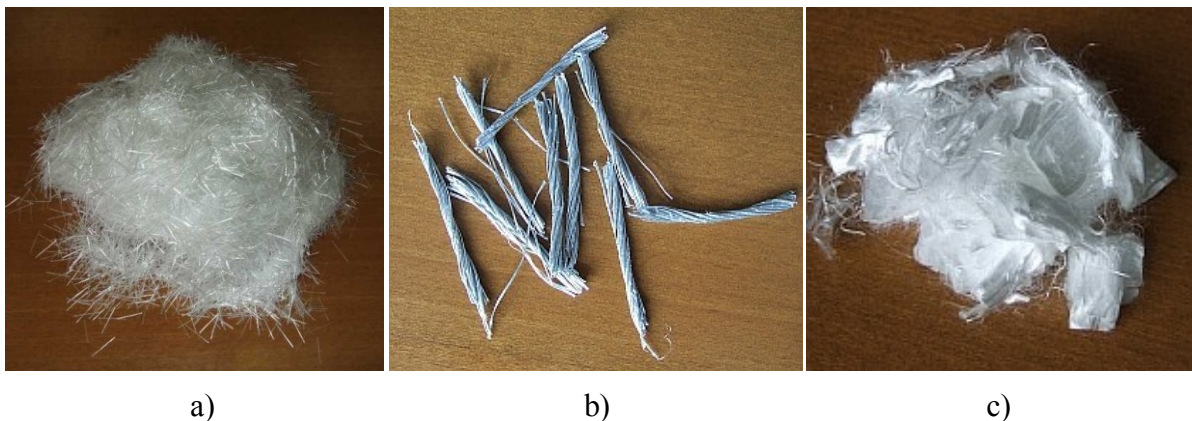


Obr. 52 Svazky polypropylenových vláken v cementové matici betonu (snímky z elektronového mikroskopu)

Výrazně lepší vlastnosti než běžná polymerová vlákna, mají tzv. **konstrukční syntetická vlákna SSF** (Structural Synthetic Fibers), vyvíjená v posledních cca 15 letech. Mají vysokou pevnost v tahu (přes 700 MPa) a délku až 60 mm. Vyrábí se z nejčastěji ze speciálních polyolefinů nebo polyvinylalkoholů. Vlákna jsou schopna přenášet velká namáhání v tahu, nenahrazují ale nosnou tahovou betonářskou výztuž. Snižují riziko vzniku a rozvoje trhlin v betonu, zvyšují odolnost betonu proti nárazu a únavě. Jsou odolná proti korozi a agresivním látkám a beton s těmito vlákny je poměrně dobře zpracovatelný. Vlákna se vyrábí v různých variantách, jako individuální, mnohoprámenná, ve svazcích, a také se speciálně upraveným povrchem.

Betony vyztužené konstrukčními syntetickými vlákny se používají např. na průmyslové podlahy, cesty, letištní plochy, opěrné stěny, primární ostění tunelů, kanalizační roury a nejrůznější prefabrikáty.

Polypropylenová vlákna (běžná i konstrukční) slouží také ke **zvýšení odolnosti betonu proti vysokým teplotám** (nad 1000 °C), např. betonových ostění v silničních nebo železničních tunelech při požárech. Z betonu se při požáru uvolňuje chemicky vázaná voda. Díky hutné struktuře cementového kamene je ale odpařování vody pomalé. Tlak vodní páry uvnitř betonu narůstá a současně se vlivem vysoké teploty zvyšuje tlakové napětí v okrajových vrstvách betonu. Výsledkem je explozivní oddělení vnějších vrstev betonu. Jsou-li v betonu rozptýlena polypropylenová vlákna, dojde při teplotě cca 160 °C k jejich roztavení. Vznikne tak hustá síť kanálků, která zvýší propustnost betonu a umožní vodní páře snadněji unikat. K tomuto účelu se nejlépe osvědčila monofilní vlákna o průměru 18 µm.



Obr. 53 Různé typy vláken do betonu: a) skleněná vlákna délky 12 mm, b) polymerová makrovlákna délky 55 m, c) jemná polymerová mikrovlákna délky 12 mm (převzato z <http://www.vlaknadobetonu.cz>)

5.7 Samozhutnitelné betony

Samozhutnitelné betony jsou označovány zkratkou **SCC** (Self-Compacting Concrete). Jedná se o extrémně tekuté betony, které dokážou vlastní tíhou zcela vyplnit prostor bednění nebo formy a ztuhnout se bez použití vibrací nebo jiného způsobu hutnění. Jsou tedy schopné tečení bez působení vnějších dynamických sil.

Základní požadavky na vlastnosti, které samozhutnitelný beton musí splňovat, jsou následující:

- **vysoká tekutost** - beton musí dokonale vyplnit formu nebo bednění, i složitěho tvaru a s vysokou hustotou výztuže, bez vzniku dutin a velkých pórů. Současně musí být beton natolik soudržný, aby nevytéká z bednění v případě jeho netěsnosti.
- **nízké blokování** - čerstvý beton musí snadno protéci mezi pruty výztuže. Nesmí docházet k nahromadění hrubého kameniva v úzkém prostoru mezi pruty výztuže.
- **odolnost proti rozměšování** - čerstvý beton musí být natolik soudržný, aby při jeho dopravě a ukládání nedocházelo k segregaci hrubých zrn kameniva a zůstalo zachováno homogenní složení betonu.
- **odolnost proti pocení** (krvácení, bleeding) - nesmí docházet k odlučování vody na povrchu betonu, způsobenému sedimentací zrn cementu a kameniva.

- **dobrá pohyblivost a čerpatelnost** - dobře čerpatelný beton musí být tekutý a pohyblivý, nesmí se při čerpání rozměšovat a usazovat nebo zachytávat v potrubí.

Aby byl čerstvý beton samozhutnitelný, musí výše uvedené podmínky splňovat po dobu alespoň **90 minut** od jeho zamíchání.

Hlavní i vedlejší složky samozhutnitelného betonu musí být vybrány tak, aby byly **kompatibilní** a jejich vzájemné interakce neovlivňovaly negativně vlastnosti betonu. Kompatibilitu složek je třeba předem ověřovat. Složky musí být přesně dávkovány, jejich vlastnosti a kvalita nesmí kolísat.

Cementy se do samozhutnitelných betonů používají běžné, především CEM I 42,5 N a CEM II/B-S 32,5 N. Pokud se jedná o masivní konstrukce, je vhodnější použít cement s nízkým hydratačním teplem.

Kamenivo je nejvhodnější tříděné těžené s plynulou zrnitostní křivkou a vhodným tvarem zrn. Ve srovnání s běžnými betony se dávkuje vyšší obsah drobného a nižší obsah hrubého kameniva. Optimální maximální velikost zrn D_{max} je **16 mm**. U tenkostěnných, tvarově komplikovaných a hustě vyztužených konstrukcí se D_{max} snižuje na **8 mm**.

Pro zvýšení soudržnosti čerstvého betonu a snížení blokování zrn kameniva při ukládání do bednění s výztuží, se přidává poměrně **velké množství minerálních příměsí** (částic o velikosti $\leq 0,25$ mm). Vyšší dávka příměsí však zvyšuje potřebné množství záměsové vody, čímž se částečně snižuje pevnost betonu a zvyšuje jeho náchylnost ke smršťování. Optimální množství částic pod 0,25 mm (částice cementu + příměsí) při $D_{max} = 16$ mm je cca 500 kg/m^3 betonu. Používanými příměsemi jsou kamenné moučky, elektrárenský popílek, vysokopecní struska nebo mikrosilika (kap. 3.1.4 a 3.5)

Optimální hodnoty **vodního součinitele** se pohybují v rozmezí **0,4 až 0,5**. Potřebné konzistence a pohyblivosti je dosahováno použitím superplastifikátorů na bázi polykarboxylátů (kap. 3.4.1).

Samozhutnitelné betony mají ve srovnání s běžnými betony zpravidla vyšší pevnost a trvanlivost. Dosahované pevnosti se při objemové hmotnosti $2200 \div 2400 \text{ kg.m}^{-3}$ pohybují od 30 do 60 MPa. Povrch konstrukce má dobrý vzhled, bez dutinek a kaveren.

Z technologického a ekonomického hlediska umožňují tyto betony:

- snížit počet pracovníků na stavbě,
- zrychlit betonářské práce, zvýšit produktivitu práce a zkrátit dobu výstavby,
- snížit celkovou energetickou náročnost stavby (tekutá konzistence betonu a jeho stabilita umožňují jednodušší čerpání; ušetří se energie na vibrační hutnění),
- snížit počet míst s nedostatečně zhutněným betonem a množství dodatečných oprav pohledových konstrukcí,
- vyloučit vliv vibrací na životnost bednění a forem.

Samozhutnitelné betony se používají obecně tam, kde nelze použít vibrační hutnění:

- do tenkostěnných, tvarově komplikovaných konstrukcí,
- do silně vyztužených konstrukcí, kde hustota výztuže brání kvalitnímu vibračnímu hutnění

(mosty, tunely),

- pro výrobu tvarově komplikovaných betonových prvků,
- tam kde je požadavek na hutný, hladký a homogenní povrch (např. architektonický beton),
- při zakládání staveb (podzemní stěny, vrtané piloty, opěrné stěny),
- pro betonování průmyslových podlah, a v dalších aplikacích.

5.8 Polymerbetony

Polymerbetony, označované zkratkou **PC** (Polymer Concrete), se od ostatních speciálních betonů výrazně odlišují svým složením i vlastnostmi. Jedná se o betony, v nichž pojivo tvoří organická makromolekulární látka - **syntetická pryskyřice**. K tuhnutí a tvrdnutí pojiva tedy nedochází hydratací cementu, jako u cementových betonů, ale **polymerní reakcí** (polymerací, polyadící nebo polykondenzací) pryskyřice, dodávané do systému v monomerním stavu.

Nejvhodnější jsou pryskyřice, které tvrdnou při normálním tlaku a normální nebo mírně zvýšené teplotě, a mají vhodnou viskozitu. Nejčastěji se používají pryskyřice **epoxidové, polyesterové, metylmetakrylátové, polyuretanové** a **furanové**. Uvedených pryskyřic se na trhu vyskytuje velké množství typů od různých výrobců. Do polymerbetonů lze použít pouze pryskyřice, které jsou pro tento účel výrobcem doporučeny.

Jako **plnivo** se používá přírodní kamenivo těžené nebo drcené (např. žula, korund, vápenec, mramor), křemičitý písek a také struska, perlit, liapor, apod. Kamenivo musí být **absolutně suché**. Musí být proto před zahájením výroby betonu vysušeno, vychlazen a uskladněno tak, aby opět nenavlhlo. Vlhkost v kamenivu může negativně ovlivnit nebo i zcela zabránit vytvrzení pryskyřice. Kamenivo musí být chemicky **kompatibilní** s ostatními složkami polymerbetonu, zejména s tvrdidlem pro vytvrzování pryskyřice, které bývá poměrně silným korozivním činidlem (kyselým nebo alkalickým). Pozornost je třeba věnovat také zrnitostnímu složení kameniva. Max. velikost zrn D_{max} by měla být menší než 1/3 nejmenšího rozměru vrstvy, konstrukce nebo prefabrikátu. Kamenivo má mít co nejnižší mezerovitost (vždy méně než 20%) a malý měrný povrch.

Kromě kameniva a pryskyřice se do polymerbetonů přidávají také **tvrdidla, urychlovače polymerních reakcí, katalyzátory** nebo **barviva**.

Oproti cementovým betonům mají polymerbetony **řadu výhodných vlastností** (tab. 23), zejména:

- rychlý nárůst pevnosti,
- velmi vysoké hodnoty pevnosti v tlaku a současně pevnosti v tahu, ohybu a smyku,
- výbornou soudržnost s jinými materiály (cementovým betonem, kamenem, keramikou),
- vysokou odolnost proti obrusu, vysokou trvanlivost,
- bezprašnost,
- odolnost proti většině chemických činidel,
- téměř nulovou nasákavost, dobrou mrazuvzdornost, vysokou elektroizolační schopnost,

- snadnou údržbu; široké možnosti estetických úprav.

Fyzikální a chemické vlastnosti polymerbetonu lze navíc podle použitého pojiva měnit v poměrně širokých mezích.

Tab. 23 Srovnání vlastností cementového betonu a polymerbetonu [36]

Vlastnost	Cementový beton	Polymerbeton
Měrná hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	2500 - 2700	1900 - 2400
Nasákavost hmotnostní [%]	6 - 13	0,02 - 1
Pevnost v tlaku [MPa]	6 - 60	50 - 210
Pevnost v tahu [MPa]	1 - 5	4 - 25
Modul pružnosti [GPa]	15 - 40	10 - 40
Součinitel lineární teplotní roztažnosti [10^6 K^{-1}]	9 - 12	10 - 50

Nevýhodou polymerbetonů je větší dotvarování při dlouhodobém zatížení a vyšší součinitel teplotní roztažnosti. Nejsou žáruvzdorné, a proto se nehodí např. do hutnických provozů.

Polymerbetony jsou vhodné především na:

- **průmyslové podlahy** mechanicky namáhané (v hutním, strojírenském a sklářském průmyslu, v obchodních domech), chemicky namáhané (v chemickém, textilním a potravinářském průmyslu), tam kde je vyžadována zvýšená hygiena nebo sterilní prostředí (v nemocnicích, ve farmaceutickém průmyslu, v atomových elektrárnách) a na různých veřejných prostranstvích (v nádražních halách, nástupištích, parkovištích, hotelech, apod., obr. 54),
- **různé technické prefabrikáty** (mostní dílce, piloty, obrubníky, dlaždice, dlažební kostky, obkladové desky, kanalizační roury, odvodňovací žlaby (obr. 55), krmné žlaby pro dobytek, atd.),
- **sanitární techniku** (umývadla, vany, záchodové mísy, atd.),
- **opravy poškozených dílců, vozovek a letištních ploch** z cementového betonu,
- ztracené bednění,
- **ochranu** betonových konstrukcí, cihelného zdiva a základů staveb proti chemicky agresivnímu prostředí (např. povrchu betonových nádrží na benzín a oleje),
- **zhotovování horizontálních dopravních značek.**



Obr. 54 Dekorativní podlaha z polymerbetonu, tzv. syntetické teraco (převzato z <http://www.trey.cz>)



Obr. 55 Odvodňovací žlaby z polymerbetonu (převzato z <http://www.zetr.cz>)



KONTROLNÍ OTÁZKY

1. Popište způsoby vylehčování betonů!
2. Kde používáme polystyrenbeton a pěnobeton?
3. Popište postup výroby autoklávovaného pórobetonu!
4. Uveďte 5 příkladů kameniv do těžkých betonů!
5. Jakými parametry a složením se vyznačuje vysokohodnotný beton?
6. Jak zkoušíme vodotěsnost betonu?
7. Jaké vlastnosti musí mít silniční betony a jaké parametry musí splňovat složky pro jejich výrobu?

8. Které vlastnosti betonu ovlivňuje rozptýlená výztuž?
9. Uveďte základní požadavky na vlastnosti samozhutnitelných betonů!
10. Čím se liší polymerbetony od cementových betonů?

6 ZPRACOVÁNÍ ČERSTVÉHO BETONU

Zpracování čerstvého betonu lze rozdělit do čtyř hlavních fází:

- mísení složek,
- doprava (primární a sekundární),
- ukládání do bednění nebo do forem,
- zhutňování.

6.1 Mísení složek

Mísení složek betonu se provádí v míchačkách různého typu a jeho cílem je **rovnoměrně rozmístit** všechny složky v objemu betonu a zajistit **dokonalé obalení** povrchu zrn kameniva cementovým tmelem. Míchání lze provádět **jednofázově**, tj. všechny složky vkládáme do míchačky najednou, nebo **vícefázově**, tj. složky vkládáme do míchačky postupně.

Míchačky na beton se podle systému míchání dělí na:

- **míchačky gravitační** (samospádové) - používají se většinou pro výrobu menšího množství betonu přímo na staveništi. Mají z vnitřní strany bubnu namontovány lopatky, které vynášejí složky do horní polohy, odkud přepadávají volným pádem. Tyto míchačky míchají **přesypáváním**. Do bubnu se většinou dávkuje nejprve suché složky (kamenivo a cement) a po jejich promíchání se přidává voda.
- **míchačky s nuceným mícháním** - používají se pro výrobu většího množství betonu v betonárnách. Míchání probíhá nuceným **přehrabáváním** betonu soustavou rotujících lopatek, namontovaných na jedné nebo více hřídelích. Míchačky s nuceným mícháním mohou být **talířové** nebo **žlabové**. Talířové se dále dělí na protiproudové, planetové a rotorové. Do míchaček s nuceným mícháním je při vyšších rychlostech míchání vhodné vkládat nejprve cement, vodu a jemné frakce kameniva. Po jejich promíchání se pak (již při nižších otáčkách) přidává hrubé kamenivo. Takto zamíchaný beton je odolnější proti segregaci.

Oba druhy míchaček mohou být řešeny jako **cyklické** (pracující přerušovaně) nebo **kontinuální** (pracující nepřetržitě). U cyklických míchaček se buben střídavě plní a vyprazdňuje, u kontinuálních se průběžně dávkuje složky a odebírá čerstvý beton.

Množství čerstvého betonu, vyrobené během jednoho míchacího cyklu, nebo množství vyrobené za 1 minutu v kontinuální míchačce, se označuje termínem **záměs**. U transportbetonu se jako záměs označuje také obsah jednoho bubnu autodomíchače.

6.2 Doprava betonu

Doprava čerstvého betonu se dělí na primární a sekundární. **Primární** dopravou se rozumí doprava betonu ze vzdálené betonárny na staveniště, **sekundární** doprava je doprava betonu po staveništi na místo jeho uložení do bednění.

Primární doprava betonu (z betonárny na staveniště) může být realizována:

- na **ocelových vyklápěcích korbách** nákladních automobilů - takto lze dopravovat pouze betony tuhé a velmi tuhé konzistence, které nejsou náchylné k segregaci, a to pouze na krátkou vzdálenost a po kvalitních cestách. Hrozí také znehodnocení betonu povětrnostními vlivy.
- ve **vanových přepravnících** - jsou to ležaté nádoby bez domíchávacího zařízení, v nichž lze opět přepravovat pouze tuhé a velmi tuhé betony na krátké vzdálenosti. Přepravníky jsou opatřeny poklopy, které chrání beton před povětrnostními vlivy. Vozidla bez domíchávacího zařízení se musí vyprázdnit do 45 minut od prvního přidání vody k cementu.
- ve **vanových domíchávačích** - přepravní nádoba, umístěná na podvozku automobilu, má podobu vodorovné kuželovité vany, zúžené směrem k výsypnému otvoru. Středem nádoby prochází hřídel s míchacími lopatkami, které kývavým pohybem promíchávají beton během dopravy.
- v **autodomíchávačích** - otočná přepravní nádoba (buben) má hruškovitý tvar a je osazená v rámu pevně spojeném s podvozkem automobilu. Na vnitřních stěnách bubnu jsou stabilní lopatky, které během jízdy promíchávají beton přesypáváním. Dopravní prostředky s domíchávacím zařízením musí být vyprázdněny do 90 minut od prvního přidání vody k cementu.

Sekundární doprava betonu (po staveništi) může být realizována:

- **skluzy a rourami** - lze použít pouze tehdy, je-li místo uložení čerstvého betonu níže než výsypka autodomíchávače a má-li autodomíchávač k betonované konstrukci dobrý přístup (obr. 56).
- v **nádobách jeřábem nebo výtahem** - jeřábové nádoby jsou stojaté (tzv. koše, obr. 57) nebo ležaté kontejnery (tzv. badie). Mohou být vybaveny obslužnou plošinou a výpustnou hadicí pro betonáž úzkého a hlubokého bednění. Jejich objem je omezen nosností jeřábu.
- **pásovými dopravníky** - používají se pro horizontální dopravu tužšího betonu při velkoobjemových betonážích, např. vodních staveb nebo silnic (obr. 58).
- **potrubím pomocí čerpadel** - nejčastější způsob sekundární dopravy čerstvého betonu, používaný při středně a velkoobjemových betonážích. Používají se především výkonná pístová čerpadla, díky kterým lze beton dopravovat horizontálně až do vzdálenosti 1000 m a vertikálně do vzdálenosti stovek metrů (rekord v čerpání betonu do výšky drží hydroelektrárna v indickém Parbati, kde byl beton tímto způsobem dopraven až do výšky 715 m). Čerpadla mohou být stabilní (upevněná na rámové konstrukci a používaná na velkých stavbách) nebo mobilní (upevněná na podvozku automobilu, obr. 59). Betonářské potrubí má průměr 80 až 200 mm, spojuje se rychlospojkami s těsněním a jeho směr se mění pomocí kolen. Potrubí je zakončeno gumovou hadicí. Doprava potrubím je vhodná

pro betony měkké a velmi měkké konzistence.

- **motorovými přepravňky** - používají se pro horizontální dopravu čerstvého betonu. Výhodou je, že mohou být použity i pro dopravu jiných materiálů, než betonu, musí však být udržovány v čistotě. Nevýhodou je potřeba samostatné obsluhy pro každý přepravňk.
- **podvěsnými vozíky** na jednokolejových drážkách - vozíky mají obvykle objem 0,75 m³ a používají se především ve výrobních prefabrikátů (obr. 60). Výhodou je, že mohou přepravovat beton s jakoukoliv konzistencí. Nevýhodou je relativně nízký výkon a krátká přepravní vzdálenost.



Obr. 56 Sekundární doprava samozhutitelného betonu z autodomíchávače pomocí skluzu (převzato z <http://blog.highconcrete.com>)



Obr. 57 Sekundární doprava betonu jeřábem v koši (převzato z <http://www.pontcornwallbridge.ca>)



Obr. 58 Sekundární doprava betonu pásovým dopravníkem (převzato z [28])



Obr. 59 Sekundární doprava betonu čerpáním (převzato z <http://www.lite-smesi.cz>)



Obr. 60 Sekundární doprava betonu podvěsnými vozíky ve výrobě prefabrikátů (převzato z <http://www.prefa.cz>)

6.3 Ukládání betonu

Čerstvý beton se na stavbě ukládá do předem zhotoveného *bednění*, které dává betonové konstrukci nebo prvku požadovaný tvar. Bednění (stejně jako formy pro výrobu prefabrikátů) dělíme na bednění pro *jednorázové* a *vícenásobné* použití.

Bednění pro jednorázové použití může být tesařské nebo tzv. ztracené.

Tesařské bednění se zhotovuje obvykle přímo na stavbě, ze smrkových desek, fošen a hranolů. Používá se na konstrukce složitých tvarů, které se budují jednotlivě nebo v malých sériích, takže se nevyplatí vyrábět drahé ocelové vícenásobně použitelné systémové bednění. Tesařské bednění se používá také pro "dobednění" částí konstrukce, které nelze vyskládat z prvků systémového bednění.

Ztracené bednění zůstává trvale zabudované v konstrukci a stává se její součástí (obr. 61). Vyrábí se z nejrůznějších materiálů (beton, kámen, keramika, ocelový plech, cementotřískové desky, polystyren) a může plnit v konstrukci různé funkce, např. tvořit lícovou plochu konstrukce, plnit nosnou nebo izolační funkci. Pro výrobu železobetonových stropů u staveb z ocelového skeletu se např. používají jako ztracené bednění profilované ocelové plechy, které pak plní funkci výztuže. Podobně slouží také např. ocelové trubky, používané při betonáži sloupů s kruhovým průřezem. Ztracené bednění může být i součástí vícevrstevných konstrukcí, kde vnitřní betonová vrstva plní nosnou funkci a vnější vrstva plní funkci tepelněizolační. Příkladem je bednění z cementotřískových desek, kde na desce obrácené do exteriéru je nalepena polystyrenová deska.



Obr. 61 Ztracené bednění (z betonu) vyplněné betonem (převzato z <http://www.domeceksnu.cz>)

Bednění pro vícenásobné použití se dělí na systémové a speciální.

Systémové bednění je průmyslově vyráběný systém prvků a dílců (které jsou vzájemně kompatibilní) zahrnující i opěrný a podpěrný systém, včetně ochranného lešení a pracovních plošin. Umožňuje bednění jednoho nebo více typů konstrukce s různými rozměry. Systémové bednění je kvalitní, rozměrově přesné, jednoduše a bezpečně smontovatelné, poskytuje kvalitní povrch betonu, snižuje pracnost na staveništi a je opakovaně použitelné 200 až 400 krát.

Podle rozměrů se systémová bednění dělí na maloplošná a velkoplošná. **Maloplošná** bednění se skládají z panelů o ploše **do 2 m²** a hmotnosti 30 až 40 kg. S panely lze manipulovat ručně a montáž jsou schopni provést jeden nebo dva pracovníci. **Velkoplošná** bednění mají panely o ploše až **nad 10 m²**. Umožňují poměrně rychle betonovat stěny až do výšky cca 4 m.

Speciální bednění se používají pro betonování konstrukcí speciálních tvarů. Patří sem např. bednění posuvné, šplhavé, pojízdné nebo nafukovací.

Posuvné bednění se používá při kontinuální betonáži vysokých vertikálních konstrukcí (např. věží, komínů, sil, nádrží, chladicích věží, apod.). Bednění je pomocí hydraulických zvedáků nepřetržitě, po malých krocích, zvedáno na podpůrných tyčích. Konstrukce nemusí mít konstantní průřez, neboť moderní systémy bednění jsou poměrně flexibilní a umožňují měnit rozměry betonovaného průřezu.

Šplhavá bednění (obr. 62) se používají pro betonáž velmi vysokých konstrukcí (mostních pilířů, výškových budov, věží, apod.). K již hotovému betonu se přikotvují šplhací "botky". Do těchto botek se vkládají vodící lišty, po kterých se pomocí hydraulického zařízení zvedá systém pracovních plošin s bedněním, ochranným zábradlím, žebříky a betonářskými lávkami. Princip šplhání bednění po konstrukci bývá přirovnáván k charakteristickému pohybu píďalky.



Obr. 62 Betonáž mostního pylonu pomocí šplhavého bednění (převzato z <http://www.peri.cz>)

Pojízdné bednění (obr. 63) je používáno hlavně při betonáži průběžných horizontálních konstrukcí s konstantním příčným průřezem a staví se většinou na kolejích.

Nafukovací bednění se vyrábí z pryže nebo PVC vyztuženého syntetickou tkaninou a uplatňuje se při betonáži kanalizačních stok a šachet nebo podobných konstrukcí s kruhovým průřezem.

Obecně platí, že aby nedocházelo k segregaci betonu, má být tekutý beton spouštěn do bednění maximálně z **výšky 0,5 m**, ostatní čerstvé betony z **výšky max. 1,5 m**. Čerstvý beton musí být uložen do bednění a ztuhnutí dřív, než začne tuhnout. Ukládání musí být dostatečně rychlé, aby nedocházelo k špatnému spojení jednotlivých vrstev, a dostatečně pomalé, aby nedocházelo k nadměrnému sedání a přetěžování bednění a podpěrného systému.



Obr. 63 Pojízdné bednění pro betonáž tunelového ostění (převzato z <http://www.marquel.net>)

6.4 Zhutňování betonu

Cílem zhutňování čerstvého betonu je snížení objemu vzduchových pórů v betonu, tj. získání betonu s co nejhutnější strukturou. Metody zhutňování betonu dělíme na:

- *statické* (lisování, válcování, protlačování),
- *dynamické* (dusání, střešání, vibrování),
- *kombinované* (vibrolisování, vibroválcování),
- *zvláštní* (vakuování, plastifikace, ad.).

Statické metody zhutňování se používají při průmyslové výrobě betonových prefabrikátů.

Lisováním se zhutňují měkké až tuhé betony např. při výrobě plochých desek, tyčových prvků a trub. Tato metoda není vhodná pro lehké betony s pórovitým kamenivem, protože lisovací tlaky mohou v betonu způsobit vnitřní tření přesahující pevnost kameniva.

Válcováním se zhutňují velmi měkké až měkké betony. Tato metoda se používá např. při výrobě profilů ve tvaru písmene I, vlnitých nebo žebrových desek.

Protlačování se používá pro hutnění plastických, měkkých a velmi měkkých betonů. Beton se plynule *protlačuje přes upravené ústí* pomocí závitovky nebo pístu. Tato metoda se používá např. při výrobě nosníků s průřezem ve tvaru obdélníka, písmene I nebo U.

Dynamické metody zhutňování se používají jak při výrobě betonových prefabrikovaných dílců, tak při zhutňování čerstvého betonu na staveništi.

Dusání se používá pro betony tuhé a velmi tuhé konzistence. Provádí se *ručně nebo strojně* (pomocí pneumatických nebo elektrických dusadel). Výška dusaného betonu je omezena na pětinasobek maximálního zrna kameniva. Při vyšších tloušťkách se účinnost dusání snižuje. Dusání se ukončuje, jakmile se na povrchu betonu objeví voda nebo cementový tmel. Dusání

není vhodné pro lehké betony s pórovitým kamenivem.

Střásání se metoda používaná pro hutnění tužších betonů při výrobě prefabrikovaných stavebních dílců. Střásání se provádí **úderem na formu** nebo jejím **zdvíháním a volným pádem** na pevný podklad. Střásání je účinným způsobem hutnění, nevýhodou je ale velká hlučnost.

Vibrování je univerzální metoda, kterou lze zhutňovat všechny druhy betonu. Používá se ve více než 90 % případů zhutňování. Podle způsobu předávání vibrační energie se vibrování dělí na:

- **přímé** (vnitřní nebo povrchové) - vibrační energie se betonu předává přímým dotykem s vibrátorem,
- **nepřímé** - vibrační energie se betonu předává dnem nebo bočnicemi formy.

Pro **přímé vibrování** se používají ponorné nebo povrchové vibrátory. **Ponorné vibrátory** (obr. 64) jsou nejpoužívanějším zhutňovacím zařízením. Používají se jak na staveništi, tak při výrobě prefabrikátů. Beton je zhutňován pomocí **vibrační hlavice**, ponořené do betonu. Ponorné vibrátory nejsou vhodné pro hutnění tuhých betonů; po vyjmutí hlavice po ní v tuhém betonu zůstávají otvory. **Povrchové vibrátory** (vibrační lišty a vibrační desky) se používají při zhutňování plošných vodorovných konstrukcí nebo plošných dílců, vyráběných v horizontálních formách (obr. 65). Nejlépe se hodí pro plastické, tuhé až velmi tuhé betony.

Nepřímé vibrování se provádí **příložnými vibrátory**, které přenáší zhutňovací energii do čerstvého betonu přes bočnice nebo dno formy. Vibrátory mohou být elektrické nebo pneumatické (obr. 66). Boční vibrátory se používají při průmyslové výrobě tyčových prvků a různých dílců vyráběných ve svislé poloze (roury, desky, apod.) nebo při betonáži svislých konstrukcí na staveništi. Spodní vibrátory (vibrující přes dno formy) lze použít pouze ve výrobních stavebních dílců.

Kombinované metody zhutňování jsou založeny na kombinaci dvou nebo více způsobů zhutňování. Patří sem např. vibrolisování, vibroválcování, vibrovakuování, vibroelektroosmóza, apod.

Mezi **zvláštní metody** zhutňování patří např. vakuování (z betonu se odsává vzduch a část záměsové vody), odstředování nebo elektroosmóza.



Obr. 64 Ponorný vibrátor (převzato z <http://www.ntc.cz>)



Obr. 65 Povrchový vibrátor - vibrační lišta (převzato z <http://www.ntc.cz>)



Obr. 66 Pneumatický příložný vibrátor (převzato z <http://www.ulma.cz>)



KONTROLNÍ OTÁZKY

1. Popište základní typy míchaček na beton a princip jejich míchání.
2. Vyjmenujte prostředky primární a sekundární dopravy betonu a popište jejich možnosti a omezení!
3. Popište rozdělení zhutňovacích metod a jejich použití?
4. Rozdělte a popište používané typy bednění!

7 OŠETŘOVÁNÍ BETONU

Povrch betonu je nutno během tuhnutí a na počátku tvrdnutí **udržovat ve vlhkém stavu** a vhodným způsobem chránit proti odpařování vody z jeho povrchu. Dostatečná vlhkost je nezbytná proto, aby cement mohl **nerušeně hydratovat** a vytvořit pevnou a hutnou mikrostrukturu, která zajistí dlouhodobou pevnost a trvanlivost vyzrálého betonu. Pokud se odpaří nadměrné množství vody z betonu a není včas nahrazeno ošetřovací vodou, dochází ve struktuře betonu ke vzniku nežádoucích **tahových napětí** a k **smršťování betonu**. Důsledkem je **vznik smršťovacích trhlin**, neboť beton v té době ještě nemá dostatečnou pevnost v tahu. Takový beton pak nemá požadovanou pevnost, má vyšší propustnost a nižší trvanlivost.

Teoreticky je v betonu dostatek vody na hydrataci cementu (bez potřeby dodatečně dodávat vodu) vždy, je-li vodní součinitel vyšší než 0,42. V praxi se z betonu vždy část vody ztratí. Část se odpaří, část vsákne do kameniva, část odebere bednění nebo podloží.

Není-li povrch betonu chráněn, odpařuje se z něho voda. Množství odpařené vody závisí na okolních podmínkách - relativní vlhkosti vzduchu, teplotě vzduchu a betonu, rychlosti proudění vzduchu (rychlosti větru). V letním období se mohou z 1 m² plochy betonu odpařit až 2 kg vody za hodinu.

Na obr. 67 je uveden Schulzeho nomogram pro odhad odpařování vody z povrchu betonu v závislosti na počasí. V obrázku je naznačen příklad odečtu pravděpodobného odparu při podmínkách: teplota vzduchu 20 °C, relativní vlhkost vzduchu 50 %, teplota betonu 20 °C a rychlost větru 20 km.h⁻¹. Za těchto podmínek se z 1 m² povrchu betonu odpaří cca 0,6 kg vody za hodinu.

S ošetřováním betonu je třeba **začít co nejdříve** po jeho uložení a ztuhnutí. Ošetřovat beton lze různými metodami:

- ponecháním betonu **delší dobu v bednění** (zvláště v horkém počasí),
- pravidelným **mlžením nebo skrápěním** vodou v krátkých intervalech (povrch betonu nemá být vystaven přímému proudu vody a je nutno zamezit možnému vymývání pojiva z povrchové vrstvy),
- **překrytí povrchu** betonu foliemi nebo vlhkými či vodu zadržujícími textiliemi,
- **nástřikem parotěsné látky** - obvykle se používá emulze na bázi parafínu, která vytvoří na povrchu betonu ochranný film zamezující odpařování vody. Film se po několika týdnech rozpadne vlivem UV záření.

Betony, které budou umístěny v prostředí se stupněm vlivu X0 nebo XC1, musí být (podle normy [21]) ošetřovány minimálně 12 hod, je-li teplota povrchu betonu $t \geq +5^{\circ}\text{C}$. Pro stupněm vlivu prostředí jiné než X0 a XC1 ošetřujeme tak dlouho, dokud pevnost povrchové vrstvy betonu nedosáhne 50% stanovené pevnosti v tlaku. Můžeme se také řídit normativní tabulkou 24.

Praktická doporučení pro ošetřování betonu podle povětrnostních podmínek jsou následující [32]:

1. **Běžné počasí s teplotou $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$, relativní vlhkost nad 50 %, střední sluneční svit nebo střední vítr.** Po dobu tuhnutí asi 12 až 24 hodin, ale minimálně 6 hodin, zakrýt povrch betonu vodozadržující textilií. Při tvrdnutí betonu udržovat povrch vlhký nejméně 3 dny nebo

nastříkat parotěsnou látku.

2. Studené a vlhké počasí s teplotami kolem 15 °C, vysoká relativní vlhkost vzduchu (přes 80 %), slunce nesvítí a je většinou bezvětří. Po dobu nejméně 3 dnů zakrýt povrch plastovými fóliemi nebo světlým nepropustným papírem. Další možností je nástřik povrchu parotěsnou látkou.

3. Horké počasí s teplotami nad 25 °C, relativní vlhkost do 50 %, intenzivní sluneční svit nebo větrné počasí. Po dobu tuhnutí ošetřovat stejně jako při běžném počasí (viz bod 1). Při tvrdnutí betonu udržovat povrch betonu stále vlhký nebo zakrytý fóliemi, lze také nasypat na povrch 5 cm silnou vrstvu vlhkého písku. Doba ošetřování nejméně 4–7 dnů, betonové desky až 14 dnů, 10 dnů je postříkávat mlhovinou vody.



DŮLEŽITÉ!

Při vyšších teplotách v letním období beton tuhne a tvrdne rychleji (doba zpracování se zkracuje) a odpařování vody z povrchu betonu je intenzivnější. Pro samotné betonování v letních měsících platí následující doporučení a opatření, prováděná buď jednotlivě, nebo ve vzájemné kombinaci:

- zajistit, aby teplota ukládaného betonu nepřekročila 27 °C (pokud není zkouškami ověřeno, že daný beton dosahuje požadovaných vlastností i za vyšších teplot),
- omezit působení přímých slunečních paprsků na kamenivo, strojní zařízení a beton,
- dávkovat do míchačky studené kamenivo (uložené ve stínu) a studenou vodu,
- používat cementy s nízkým hydratačním teplem (např. CEM II a CEM III),
- používat zpomalovací přísady,
- posunout betonáž do časných ranních hodin nebo betonovat v noci,
- upravit technologický postup ukládání betonu tak, aby byl vystaven slunečnímu záření a účinkům teplého vzduchu co nejmenší povrch,
- v krajních případech betonáž odložit.

4. Mrazivé počasí s teplotami -5 až 5 °C. Doba ošetřování minimálně týden. Zabránit vzniku kaluží vody na povrchu betonu.



DŮLEŽITÉ!

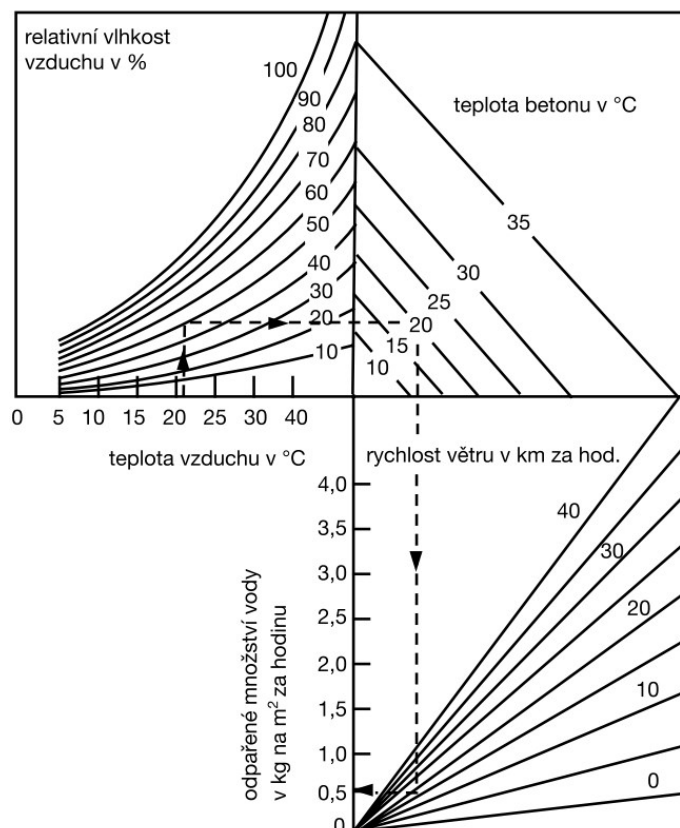
Nízké teploty v zimním období jsou pro betonování rovněž problematické. Při teplotách pod 5 °C se výrazně zpomaluje hydratace cementu a pod 0 °C se téměř zastavuje. Beton se musí v počátečním stádiu tuhnutí chránit proti zmrznutí, minimálně do té doby, než dosáhne tzv. **zmrazovací pevnosti R_z** (R_z se doporučuje se v mezích 5 až 15 MPa). Při této pevnosti

může beton i jedenkrát zmrznout bez výraznějšího porušení struktury nebo snížení konečné pevnosti, beton však není odolný proti opakovanému zmrazování a rozmrazování. Zmrzne-li beton dříve než dosáhne zmrazovací pevnosti, poruší se vytvořením ledu struktura cementového kamene, vzniknou trhliny a betonová konstrukce je znehodnocena a nedosáhne požadované pevnosti ani v budoucnu.

Pro betonování v zimě se dále doporučuje:

- zvýšit obsah cementu, použít cement CEM I vyšší pevnostní třídy (42,5 R; 52,5 R),
- snížit vodní součinitel použitím plastifikátorů,
- použít přísady urychlujících tvrdnutí betonu,
- udržet teplotu čerstvého betonu po uložení alespoň +5 °C po dobu 72 hod. (do teploty prostředí -3 °C) resp. 10 °C (při teplotách prostředí pod -3 °C),
- u transportbetonu dodržet teplotu čerstvého betonu v okamžiku dodávky na stavbu nejméně 10 °C.

Teplotu betonu lze zvýšit použitím *teplé záměsové vody*, případně *ohřátého kameniva*. Není-li teplota okolí příliš nízká, stačí obvykle *hydratační teplo* cementu spolu s vhodnou *izolací bednění* na ochranu betonu před zmrznutím v počátečním stádiu ošetřování. Jsou-li však velké mrazy, nemusí uvedená opatření stačit. V takových případech je nutno *ohřívat beton přímo přes bednění*, nebo *vyhřívat obal konstrukce* vodní párou či horkým vzduchem.



Obr. 67 Odpařování vody z povrchu betonu v závislosti na relativní vlhkosti vzduchu, teplotě vzduchu a betonu a rychlosti větru [32].

Tab. 24 Nejkratší doba ošetřování betonu pro stupně vlivu prostředí jiné než X0 a XC1

Teplota povrchu betonu t [°C]	Nejkratší doba ošetřování ve dnech ^{1), 2)} Vývoj pevnosti betonu (f_{cm2}/f_{cm28}) ⁴⁾			
	rychlý r ≥ 0,5	střední r = 0,3	pomalý r = 0,15	velmi pomalý r < 0,15
t ≥ 25	1,0	1,5	2,0	3,0
25 > t ≥ 15	1,0	2,0	3,0	5
15 > t ≥ 10	2,0	4,0	7	10
10 > t ≥ 5 ³⁾	3,0	6	10	15

¹⁾ ... plus doba tuhnutí přesahující 5 hodin

²⁾ ... mezi hodnotami v rádcích je přípustná lineární interpolace

³⁾ ... pro teploty nižší než 5 °C se může doba ošetřování prodloužit o dobu rovnou trvání teploty nižší než 5 °C

⁴⁾ ... vývoj pevnosti betonu je poměr průměrné pevnosti v tlaku po 2 dnech k průměrné pevnosti v tlaku po 28 dnech



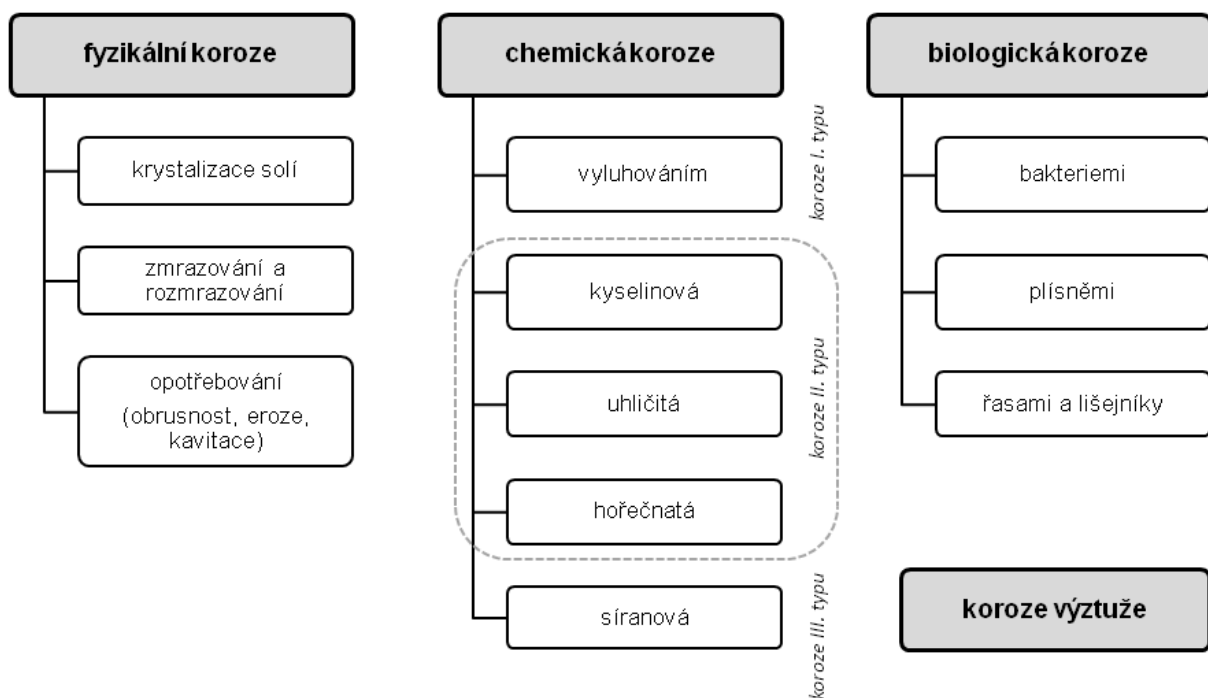
KONTROLNÍ OTÁZKY

1. Proč ošetřujeme beton?
2. Jakými metodami lze provádět ošetřování betonu?
3. Jaká jsou praktická doporučení pro ošetřování betonu za různých klimatických podmínek?
4. Jaká opatření se doporučuje provádět při betonování za vyšších teplot v letním období?
5. Jaká opatření se doporučuje provádět při betonování za nízkých teplot v zimních měsících?

8 KOROZE BETONU

Korozí betonu jsou nazývány *degradační procesy*, probíhající v betonu vlivem fyzikálního, chemického a biologického působení okolního prostředí. Dlouhodobá schopnost betonové konstrukce odolávat těmto vlivům je označována jako *trvanlivost betonu*. Trvanlivost je tedy určité časové období, v kterém i přes působení vlivů prostředí vykazuje beton v konstrukci vlastnosti nezbytné k jeho stabilitě.

Základní druhy koroze betonu jsou uvedeny na obr. 68. Jednotlivé typy korozních procesů jsou podrobněji popsány v kap. 8.1 až 8.3. Samostatný problém představuje koroze ocelové výztuže v betonu, které je věnována kap. 8.4.



Obr. 68 Základní druhy koroze betonu

8.1 Fyzikální koroze betonu

Fyzikální koroze betonu souvisí zejména s krystalizací solí usazených v pórech betonu, se střídavým zmrazováním a rozmrazováním a s mechanickým opotřebováním povrchu betonu.

Krystalizace solí

Je-li beton v kontaktu s vodou, obsahující větší množství rozpuštěných solí, pronikají tyto soli s vodou do pórového systému cementového kamene. Při odpařování vody z betonu pak dochází ke zvyšování koncentrace solného roztoku, a jakmile roztok dosáhne nasyceného stavu, začnou v něm vznikat solné krystalky, které vyplňují póry. Jedná se většinou o velké jehlicovité krystaly, které narůstají a tlačí na stěny pórů a kapilár (krystalizační tlak může dosahovat až desítek MPa). Tím vzniká v cementovém kameni vnitřní pnutí, které může vést ke vzniku trhlin a následnému porušení betonu.

K tomuto typu koroze dochází zejména u betonových konstrukcí, které jsou v kontaktu s kolísající hladinou spodní vody, která díky kapilární vzlinavosti vystupuje do vyšších partií konstrukce.

Obecně platí, že čím nižší je pórovitost a vyšší pevnost betonu, tím lepší je jeho odolnost proti korozi od krystalizujících solí. Nejvhodnější z hlediska odolnosti proti korozi krystalizací jsou portlandské síranovzdorné cementy, naopak nejméně vhodné jsou cementy pucolánové.

Zmrazování a rozmrazování

Voda při zmrznutí na led zvětší svůj objem o cca 9%. Zmrzne-li voda nasáklá do kapilárních pórů v cementovém kameni betonu a led nemá kam expandovat, vznikne vnitřní napětí vedoucí ke vzniku trhlin. Mrazuvzdornost betonu lze zvýšit provzdušňujícími přísadami. Princip jejich působení je popsán v kap. 3.4.2.

Opotřebování povrchu betonu

Na mechanickém opotřebení povrchu betonu se podílí tři hlavní korozní procesy: **obrus** (otěr), **eroze** a **kavitace**.

K postupnému **obrusu** nebo **otěru** povrchu betonu dochází především na dopravních komunikacích, letištních plochách, průmyslových podlahách, apod. Proti obrusu a otěru jsou obecně nejméně odolné betony s vysokou pórovitostí a nízkou pevností, obsahující kamenivo s nízkou odolností proti opotřebení.

Beton s povrchem odolným proti obrusu má splňovat následující základní parametry:

- pevnost min. 28 MPa,
- nízký vodní součinitel,
- optimální zrnitostní složení kameniva,
- kamenivo s max. velikostí zrna 25 mm,
- konzistenci umožňující kvalitní uložení a zhutnění betonu (sednutí kužele max. 80 mm),
- minimální obsah vzduchu (provzdušnění) odpovídající stupni vlivu daného prostředí.

Odolnost betonu proti obrusu se zkouší podle ČSN 73 1324 [5] na Böhmově zkušebním přístroji.

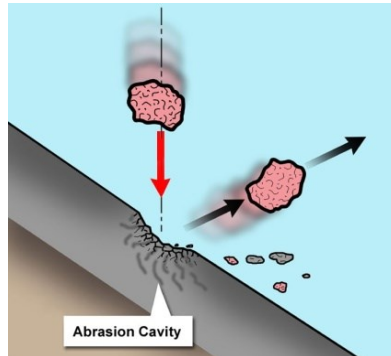
Poškození povrchu betonu **erozí** vzniká působením pohybujících se kapalin obsahujících pevné částice (obr. 69). Dochází k němu hlavně u vodních staveb - v různých kanálech, potrubích, přepadech, atd. Míra opotřebení povrchu betonu závisí zejména na:

- vlastnostech betonu (pevnost a pórovitost),
- množství a vlastnostech pevných částic v kapalině (velikost, tvar, hustota, tvrdost),
- rychlosti pohybu částic.

V konstrukcích, kde hrozí degradace betonu erozí, je při výrobě betonu třeba používat tvrdé kamenivo a beton by měl mít pevnost v tlaku min. 40 MPa.

Kavitace je poškození povrchu betonu opakovaným nárazem rychle proudící kapaliny, která

náhle mění směr. Ke kavitaci dochází hlavně v přehradních přepadech a zavodňovacích systémech (obr. 70).

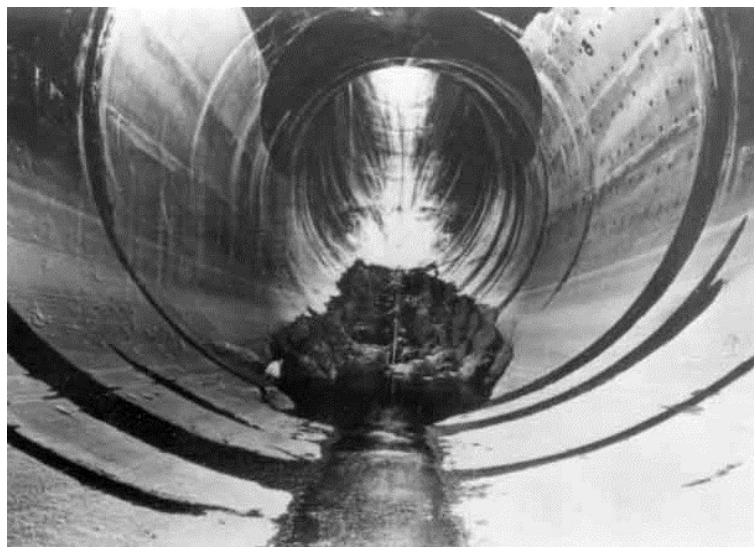


Obr. 69 Princip eroze povrchu betonu pevnými částicemi v pohybující se kapalině (převzato a upraveno z <http://www.vaw.ethz.ch>)

Beton odolný proti kavitaci musí splňovat tyto parametry:

- vysoká pevnost,
- velikost kameniva v povrchové vrstvě betonu max. 16 mm (při kavitaci se obvykle uvolňují velká zrna kameniva),
- nízký vodní součinitel.

Tvrдость kameniva zde není důležitá. Je však třeba zajistit dobré spolupůsobení kameniva s cementovým kamenem. K zlepšení odolnosti betonu proti kavitaci přispívá také zvýšení pevnosti betonu polymerní impregnací, vyztužení betonu vlákny (zvýšení odolnosti proti nárazu) nebo aplikace pružné povrchové vrstvy. Preventivním opatřením proti vzniku kavitačního poškození betonu je, již při návrhu konstrukce, zajištění hladkého a rovného povrchu betonu bez náhlých změn ve spádu a zakřivení.



Obr. 70 Kavitační poškození betonu na přepadu přehrady Hoover Dam v Arizoně (převzato z [40])

8.2 Chemická koroze betonu

Chemická koroze betonu probíhá vždy za přítomnosti vody (ve formě kapaliny nebo vodní páry) a představuje pro beton nejnebezpečnější druh koroze. Chemické korozní (degradační) procesy v betonu lze rozdělit do tří skupin - na *korozí I., II. a III. typu* (viz obr. 68).

8.2.1 Chemická koroze I. typu

Koroze I. typu (*koroze vyluhováním*) vzniká tak, že *voda* proniká do betonu, rozpouští některé jeho složky a ty jsou pak vyluhovány a z betonu vyplavovány. Rozpouští se především *portlandit* Ca(OH)_2 , ale také hydroxidy alkalických kovů a jejich sírany a uhličitany. Rozpuštěním a vyluhováním složek betonu se porušuje jeho struktura, snižuje se jeho hutnost a pevnost (obr. 71). Při snížení koncentrace Ca(OH)_2 pod určité mezní hodnoty pak začíná *rozklad i dalších složek* cementového kamene (kalcium-silikát-hydrátů, kalcium-aluminát-hydrátů, kalcium-ferit-hydrátů).

Korozi vyluhováním způsobují *vody s nízkou přechodnou tvrdostí* (měkké vody, tzv. hladové). Jsou to vody z řek a rybníků a vody srážkové. Tento typ koroze postihuje především vodní stavby a také betonové části střešních konstrukcí.

Může-li voda pronikat betonem, nebo beton střídavě nasakuje vodu a vysušuje se, mohou na povrchu konstrukce vznikat tzv. *výkvěty* (obr. 72, 73). Jsou to povlaky tvořené solemi, které se vyluhovaly z betonu a po odpaření vody na povrchu vykrytalizovaly nebo vznikly reakcí se vzdušným CO_2 . Výkvěty obsahují nejčastěji uhličitán vápenatý (hlavně kalcit), NaCl, vápenaté sírany (sádrovec, bassanit, anhydrit) a sírany a uhličitany sodné.

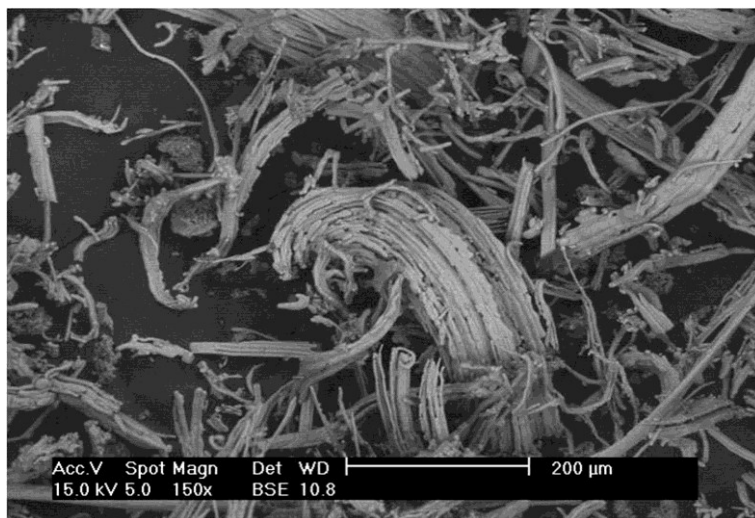
Odolnost betonu proti vyluhování portlanditu lze zvýšit použitím směsných portlandských cementů, nebo přidáním příměsí pucolánů či vysokopecní strusky do portlandského cementu. Při použití cementu s příměsí pucolánu je však třeba počítat s částečným snížením mrazuvzdornosti.



Obr. 71 Vzorek betonu postiženého korozí vyluhováním (část vrtného jádra z inspekčního vrtu provedeného do konstrukce)



Obr. 72 Sádrovcové výkvěty na povrchu betonové konstrukce



Obr. 73 Krystaly sádrovce ve výkvětu na povrchu betonové konstrukce (snímek z elektronového mikroskopu)

8.2.2 Chemická koroze II. typu

Koroze II. typu vzniká tak, že *voda obsahující rozpuštěné agresivní látky* proniká do betonu, tyto látky reagují s některými složkami betonu *za vzniku rozpustných solí* a ty se pak rozpouští a jsou z betonu vyplavovány, což vede k snižování jeho hutnosti a pevnosti. Do této kategorie patří koroze kyselinová, uhličitá a hořečnatá.

Kyselinová koroze vzniká působením anorganických nebo organických kyselin (chlorovodíkové, sírové, dusičné, octové, mléčné a dalších) na zásaditý cementový kámen. Kyseliny reagují s Ca(OH)_2 a dalšími složkami cementového kamene, nebo i kameniva a příměsí. Výsledkem reakce je *vápenatá sůl* působící kyseliny, která se rozpouští ve vodě a

vyplavuje z betonu. Tento proces může vést k výraznému poklesu pevnosti betonu, až k jeho úplnému rozpadu. Se silně kyselým prostředím se setkáváme hlavně v zemědělství (při chovu zvířat), v chemickém a potravinářském průmyslu.

Uhličitá koroze neboli **karbonatace** je reakce portlanditu Ca(OH)_2 v betonu se vzdušným CO_2 za vzniku uhličitanu vápenatého CaCO_3 . Karbonatace postupuje od povrchu konstrukce do hloubky, rychlostí cca 1 mm za rok. Zpočátku sice dochází k zpevnění povrchové vrstvy betonu, s postupem karbonatace do hloubky se však snižuje množství portlanditu v betonu a klesá pH. Pokles pH znamená korozi výztuže a destabilizaci hydrátů vedoucí ke snížení pevnosti betonu.

Karbonatace může probíhat i reakcí Ca(OH)_2 s tzv. agresivním CO_2 , obsaženým v **uhličitých vodách**. Tyto reakce i jejich korozní účinky jsou složitější než při karbonataci vzdušným CO_2 , výsledkem je ale opět pokles pH pod bezpečnou hranici, rozklad složek cementového kamene a porušování struktury betonu.

Hořečnatá koroze betonu vzniká působením hořečnatých solí (kromě MgSO_4) na cementový kámen. Mezi Ca(OH)_2 v cementovém kameni a hořečnatou solí (např. chloridem hořečnatým), proběhne reakce:



Vzniká rozpustná sůl (CaCl_2), která se může vyluhovat z cementového kamene, a Mg(OH)_2 ve formě pórovité fáze, která nemá vazebné účinky. Spotřebovává se Ca(OH)_2 , porušuje se struktura betonu, se snižováním obsahu Ca(OH)_2 klesá pH (vznikají podmínky pro korozi výztuže) a nastává rozklad dalších složek cementového kamene.

8.2.3 Chemická koroze III. typu

Koroze III. typu vzniká tak, že **voda obsahující rozpuštěné agresivní látky** proniká do betonu a tyto látky se hromadí a **krystalizují v pórech betonu**. Rostoucí krystaly s velkým objemem vyvolávají tlak na stěny pórů, který vede k rozrušování struktury betonu a snižování jeho pevnosti.

Nejčastěji se setkáváme se **síranovou korozí**, u které dále rozlišujeme korozi síranhlinitanovou, sádrovcovou a síranuhličitanovou.

Síranhlinitanová koroze spočívá ve tvorbě minerálu **etringitu**. V počáteční fázi hydratace cementu v čerstvém betonu reaguje sádrovec (přidávaný do cementu pro zpomalení tuhnutí) s C_3A (trikalciumpulminát). Tvoří se trisulfát etringit, který se ale později, kdy klesne koncentrace síranových iontů, mění na monosulfát. Pokud se monosulfát v již ztvrdlém betonu dostane po čase do kontaktu s novým zdrojem síranových iontů, vzniknou opět podmínky pro tvorbu nového etringitu. Vznikající etringit má cca **2,2 × větší objem** než monosulfát. Objemová expanze vytváří vnitřní napětí v cementovém kameni vedoucí ke vzniku trhlin.

K **sádrovcové korozi** dochází při vysokém obsahu alkalických síranů Na_2SO_4 a K_2SO_4 v agresivních roztocích. Tyto sírany reagují s portlanditem Ca(OH)_2 za vzniku sádrovce ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), jehož objemné krystaly rozrušují strukturu betonu.

Síranuhličitanová koroze souvisí se vznikem minerálu *taumazitu*. Taumazit vzniká reakcí kalciumsilikáthydrátů a přítomnými sírany a uhličitanu a má podobnou krystalickou strukturu jako etringit.

8.3 Biologická koroze betonu

Biologická koroze je méně častým způsobem degradace betonu. Způsobují ji *baktérie, plísně, řasy a lišejníky*.

Korozi betonu způsobují především *baktérie sirné* a *nitrifikační*. Sirné bakterie způsobují biochemickou oxidaci sirovodíku (H_2S) kterou vzniká kyselina sírová (H_2SO_4), nitrifikační bakterie oxidují čpavku (NH_3) kterou vzniká kyselina dusičná (HNO_3). Vzniklé kyseliny reagují s vápenatými složkami cementového kamene za vzniku vápenatých solí. Dochází k porušování struktury betonu, které může vést až k jeho rozpadání.

Plísně způsobují pouze estetické znehodnocení povrchu betonu. K rozrušení dochází pouze výjimečně.

Řasy se vyskytují na konstrukcích, které jsou dlouhodobě pod vodou, nebo v prostředí s vysokou vlhkostí. Beton mohou rozrušovat mechanicky nebo chemicky - tvorbou organických kyselin.

Lišejníky korodují beton obdobným způsobem jako řasy.

8.4 Koroze výztuže

Ocelová výztuž v alkalickém prostředí betonu (při $pH > 11,5$) je tzv. *pasivována* tenkou nepropustnou vrstvou korozních produktů (zejména Fe_2O_3), které brání přístupu kyslíku k oceli a tím zabraňují další korozi. pH čerstvého betonu je díky vysokému obsahu $Ca(OH)_2$ 12 až 13. Postupem času dochází, vlivem karbonatace a dalších korozních procesů, k poklesu pH betonu až na kritickou hodnotu 11,5, kdy pasivační vrstva na povrchu oceli ztrácí svoji účinnost a nastává koroze výztuže. Karbonatace postupuje od povrchu betonu relativně pomalu a je-li beton dobře zhutněný a nepopraskaný, představuje krycí vrstva 3 a 5 cm dostatečnou ochranu výztuže proti korozi.

Pokud do betonu pronikají *chloridy* a *sírany*, způsobují porušení pasivační vrstvy na výztuži, bez ohledu na hodnotu pH . Z nerozpustného Fe_2O_3 vznikají $FeCl_3$ a $Fe_2(SO_4)_3$, které jsou dobře rozpustné a nemají tedy pasivační účinky.

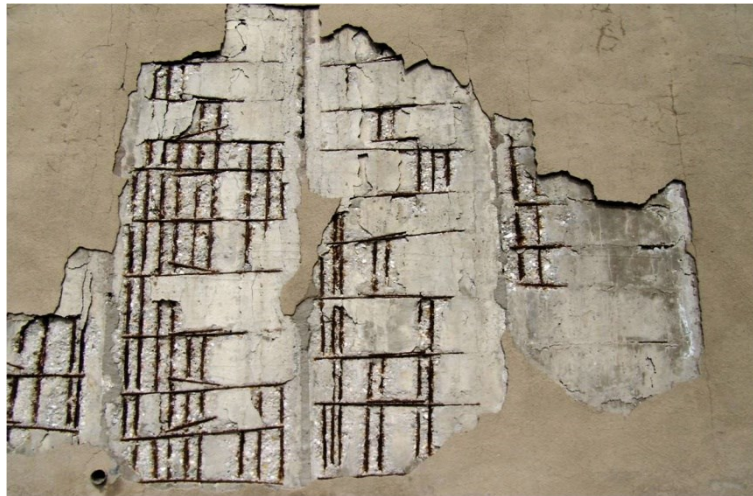
Dojde-li ke korozi ocelové výztuže v betonu, vznikající *korozní produkty (rez) jsou objemnější* než původní kov, což vede ke vzniku tlakových napětí, která způsobují *vznik trhlin* v betonu a odpadávání krycí vrstvy výztuže (obr. 74).

Nebezpečí koroze ocelové výztuže v betonu lze snížit:

- použitím *kvalitního nepropustného betonu* s nízkým vodním součinitelem a odpovídající krycí vrstvou,
- aplikací *ochranného nátěru na výztuž* - nejčastěji se používají hmoty na bázi epoxidových pryskyřic, akrylátových disperzí, nebo látky na minerální bázi s přísadami

speciálních antikoročních pigmentů a plniv,

- použitím *výztuže z nerezové oceli*,
- použitím *protikoročních přísad* (inhibitorů koroze) do betonu - kapalné nebo práškové chemické látky, které oddalují nebo zpomalují korozi výztuže, nebo jí zcela zabraňují.
- použitím *sekundární ochrany* betonu - povrchová úprava betonu impregnací nebo nátěrem (např. nízkoviskózními epoxidovými pryskyřicemi, akrylátovými roztoky, silikony, polyuretany).



Obr. 74 Příklad odpadnutí krycí vrstvy v důsledku koroze výztuže v betonu



KONTROLNÍ OTÁZKY

1. Uveďte základní druhy koroze, kterým podléhá beton!
2. Popište degradační procesy způsobující opotřebování povrchu betonu!
3. Vysvětlete rozdíly mezi chemickou korozi I., II. a III. typu !
4. Popište procesy vedoucí k síranové korozi betonu!
5. Jak vzniká biologická koroze betonu?
6. Za jakých podmínek dochází ke korozi ocelové výztuže v betonu a jak lze výztuž proti korozi chránit?



LITERATURA

- [1] AĪTCIN, P.-C. *Vysokohodnotný beton*. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2005. 320 s. ISBN 80-86769-39-9.
- [2] ASTM C666 M-03:2008 *Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing*. ASTM International, 2008.
- [3] BAJZA, A., ROUSEKOVÁ, I. *Technológia betónu*. Bratislava: Jaga Group, 2006. 190 s. ISBN 80-8076-032-2.
- [4] BALKOVIC, S. *Šedý pórobeton: zhodnocení odpadových produktů z procesu spalování uhlí*. Stavebnictví 2009, č. 4. Dostupné z <http://www.casopisstavebnictvi.cz>
- [5] ČSN 73 1324: 1972. *Stanovení obrusnosti betonu*. Praha: Vydavatelství ÚNM, 1972.
- [6] ČSN 73 1326:1985 *Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek*. Vydavatelství ÚNM, 1985
- [7] ČSN 73 6114:1995 *Vozovky pozemních komunikací - Základní ustanovení pro navrhování*. Český normalizační institut, 1995.
- [8] ČSN 73 6123-1:2006 *Stavba vozovek - Cementobetonové kryty - Část 1: Provádění a kontrola shody*. Český normalizační institut, 2006.
- [9] ČSN EN 196-3:2009 *Metody zkoušení cementu – Část 3: Stanovení dob tuhnutí a objemové stálosti*. Český normalizační institut, 2009.
- [10] ČSN EN 197-1: 2001. *Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [11] ČSN EN 206-1:2001 *Beton – Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Český normalizační institut, 2001.
- [12] ČSN EN 480-11: 2006 *Přísady do betonu, malty a injektážní malty - Zkušební metody - Část 11: Stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [13] ČSN EN 933-1:2012 *Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Síťový rozbor*. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [14] ČSN EN 933-4:2008 *Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 4: Stanovení tvaru zrn - Tvarový index*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [15] ČSN EN 1008:2003 *Záměsová voda do betonu - Specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně, jako záměsové vody do betonu*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [16] ČSN EN 12350-2:2009 *Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím*. Praha: Český normalizační institut, 2009.
- [17] ČSN EN 12350-3:2009 *Zkoušení čerstvého betonu – Část 3: Zkouška Vebe*. Praha: Český normalizační institut, 2009.

- [18] ČSN EN 12350-4:2009 Zkoušení čerstvého betonu – Část 4: Stupeň zhutnitelnosti. Praha: Český normalizační institut, 2009.
- [19] ČSN EN 12350-5:2009 Zkoušení čerstvého betonu - Část 5: Zkouška rozlitem. Praha: Český normalizační institut, 2009.
- [20] ČSN EN 12390-8:2001 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [21] ČSN EN 13670:2010 *Provádění betonových konstrukcí*. Český normalizační institut, 2010.
- [22] ČSN EN 13877-1:2006 *Cementobetonové kryty - Část 1: Materiály*. Český normalizační institut, 2006.
- [23] DOMONE, P., ILLSTON, J. Eds. *Construction materials - their nature and behaviour*. 4th ed. London and New York: Spon Press, 2010. 567 p. ISBN 0-415-46516-8.
- [24] DROCHYTKA, R., a kol. *Pórobeton*. Brno: Vutium, 1999. 156 s. ISBN 80-214-1476-6
- [25] HUDOBA, I. *Vysokohodnotný betón - materiály, vlastnosti, výroba, využitie*. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2009. 157 s. ISBN 978-80-227-2836-2.
- [26] JÍLEK, A. a kol. *Betonové konstrukce I*. Praha: SNTL, 1985. 519 s.
- [27] LEDEREROVÁ, J. a kol. *Biokorozní vlivy na stavební díla*. Praha: Silikátový svaz, 2009. 273 s. ISBN 978-80-86821-50-4.
- [28] MAJBA, M. Mobilné čerpadlá betónu. Dostupné z <http://www.asb.sk/stavebnictvo>
- [29] MATĚJKA, O. *Cement a jeho současné podoby*. Realizace staveb 2009, č. 6-7.
- [30] PAVLÍKOVÁ, M., KEPPERT, M. *Chemie. Chemie stavebních materiálů*. Praha: ČVUT, 2009. 197 s.
- [31] PYTLÍK, P. *Technologie betonu*. Brno: VUT, 1997. 346 s. ISBN 80-214-0779-4.
- [32] *Průručka technologa - Beton - suroviny, výroba, vlastnosti*. Českomoravský beton, a.s., 2013
- [33] ROUSEKOVÁ, I. a kol. *Stavebné materiály*. Bratislava: Jaga Group, 2000. 261 s. ISBN 80-88905-21-4.
- [34] SCHULZE, W. *Der Baustoff Beton. Band 1, Zementgebundene Mörtel und Betone*. Leipzig: VEB Verlag für Bauwesen, 1984. 320 s.
- [35] SNELLINGS, R., MERTENS, G., ELSSEN, J. *Supplementary cementitious materials*. Reviews in Mineralogy & Chemistry 2012, vol. 74. pp 211-278
- [36] SVOBODA, L. a kol. *Stavební hmoty*. Bratislava: Jaga Group, 2004. 471 s. ISBN 80-8076-007-1.
- [37] ŠAUMAN, Z. *Maltoviny I*. Brno: VUT, 1993. 198 s. ISBN 8021405090.
- [38] TAYLOR, H. F. W. *Cement Chemistry*, 2nd Ed., London: Academic Press, 1997.
- [39] VERMA, C.L., HANDA, S.K., JAIN, S.K., YADAV, R.K. Techno-commercial perspective study for sintered fly ash light-weight aggregates in India. *Construction and Building Materials* 1998, Vol. 12, No. 6-7, pp 341-346.

[40] WARNOCK, J. E. Experiences of the Bureau of Reclamation. *Proc. Amer. Soc. Civil Eng.*, Vol. 71, No. 7, 1945, pp. 1041-1056.



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ