

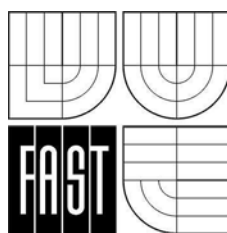
VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ

DOC. ING. RUDOLF HELA, CSc.

TECHNOLOGIE BETONU

MODUL M01

BJ 04 TECHNOLOGIE BETONU I



STUDIJNÍ OPORY
PRO STUDIJNÍ PROGRAMY S KOMBINOVANOU FORMOU STUDIA

© Doc. Ing. Rudolf Hela, CSc., Brno 2005

OBSAH

1 Úvod.....	7
1.1 Cíle.....	7
1.2 Požadované znalosti.....	8
1.3 Doba potřebná ke studiu.....	8
1.4 Klíčová slova.....	8
1.5 Použitá terminologie (nepovinné).....	8
2 Technologie betonu.....	11
2.1 Význam betonu, rozdělení a značení.....	12
2.1.1 Základní požadavky.....	13
2.1.2 Stupně vlivu prostředí.....	14
2.1.3 Třídy pevnosti betonu.....	15
2.1.4 Základní složky betonu.....	16
2.2 Kamenivo.....	17
2.2.1 Petrografie.....	18
2.2.2 Granulometrie.....	18
2.2.3 Technologické požadavky.....	22
2.2.4 Alkalicko-křemičitá reakce.....	24
2.2.5 Pórovité kamenivo.....	24
2.3 Cement a voda.....	25
2.3.1 Druhy cementů.....	26
2.3.2 Mineralogie cementů.....	27
2.3.3 Technologické požadavky.....	28
2.3.4 Voda.....	30
2.4 Přísady.....	30
2.4.1 Fyzikálně chemické procesy působení chemických přísad ..	31
2.4.2 Plastifikátory a superplastifikátory.....	33
2.4.3 Provzdušňovací přísady.....	36
2.4.4 Stabilizační a těsnící přísady.....	36
2.4.5 Přísady urychlující tuhnutí a tvrdnutí cementu.....	37
2.4.6 Retardační přísady.....	38
2.5 Příměsy a vyztužování betonu.....	38
2.5.1 Latentní hydraulická.....	39
2.5.2 Křemičité úlety, mikrosilika.....	40
2.5.3 Létavý popílek.....	41
2.5.4 Jemné podíly tuhých částic.....	42
2.5.5 Barevné pigmenty.....	43
2.5.6 Vyztužování betonu.....	43
2.5.6.1 Vlastnosti ocele.....	44
2.5.6.2 Betonářská ocel.....	45
2.5.6.3 Předpínací výztuž.....	45
2.5.6.4 Krytí výztuže betonem.....	46

2.5.6.5	Rozptýlená vlákna	46
2.6	Složení betonu	48
2.6.1	Návrh složení betonu.....	48
	Výsledná specifikace a ověření návrhu složení betonu musí obsahovat kromě komerčních a provozních údajů následující technická data:	50
2.6.2	Technologické závislosti složení betonu.....	50
2.7	Druhy betonů	55
2.7.1	Silniční beton.....	55
2.7.2	Vodostavební beton.....	57
2.7.3	Těžký beton	57
2.7.4	Lehký beton.....	58
2.7.5	Beton pro masivní konstrukce.....	60
2.7.6	Čerpaný čerstvý beton.....	61
2.7.7	Pohledový beton	61
2.7.8	Architektonický beton	62
2.7.9	Recyklovaný beton	63
2.7.10	Pěnobeton	63
2.8	Reologie čerstvého betonu	64
2.9	Vysokohodnotné a samozhutňující betony.....	69
2.9.1	Vysokohodnotné (vysokopevnostní) betony	69
2.9.2	Samozhutnitelný beton	71
2.10	Technologie zpracování čerstvého betonu	73
2.10.1	Zpracování čerstvého betonu	73
2.10.2	Zvláštní způsoby betonování.....	75
	Do této skupiny operací zařazujeme stříkání betonu (torkretování), injektování, betonování pod vodou a dvoufázové betonování.....	75
2.10.3	Zhutňování čerstvého betonu	77
2.10.4	Zhutňování vibrací	78
2.10.5	Systémové bednění.....	81
2.10.6	Separáční přípravky.....	81
2.11	Tvrdnutí betonu	82
2.11.1	Hydratace cementu	83
2.11.2	Tvrdnutí betonu za vyšších teplot	85
2.11.3	Betonování v zimě.....	87
2.11.4	Ošetřování betonu	88
2.11.5	Povrchová ochrana betonu	89
2.12	Vlastnosti a zkoušení betonu	91
2.12.1	Vlastnosti betonu.....	91
2.12.2	Pórovitá struktura cementového kamene	92
2.12.3	Mikromechanika betonu.....	92
2.12.4	Pevnost betonu	93
2.12.5	Deformace betonu	95
2.12.6	Trvanlivost betonu.....	97

2.12.7	Chemická koroze betonu.....	99
2.12.8	Koroze ocele v betonu	101
2.13	Hodnocení kvality a vliv na životní prostředí.....	102
2.13.1	Kontrola a kvality betonu.....	102
2.13.2	Systemy jakosti	105
2.13.3	Ochrana životního prostředí.....	106
2.13.4	Reklace.....	107
3	Závěr.....	109
3.1	Shrnutí.....	109
3.2	Studijní prameny	110
3.2.1	Seznam použité literatury	110
3.2.2	Seznam doplňkové studijní literatury	110
3.2.3	Odkazy na další studijní zdroje a prameny	110
3.3	Klíč.....	Chyba! Záložka není definována.

1 Úvod

1.1 Cíle

Beton je základním materiálem soudobého stavebnictví a proto technologie betonu je nezbytnou znalostí stavebního inženýra. Technologie betonu je vědní a technická disciplína, která se zabývá složením, výrobou a vlastnostmi betonu s cílem dosažení potřebných vlastností s minimální energetickou náročností (úsporou cementu) a minimálním zatížením životního prostředí. Postupně se přechází od empirického poznání a pozorování k obecné formulaci problémů jazykem matematiky, zvyšuje se stupeň matematizace oboru.



Technologie betonu má v technické praxi některá specifika, které ji odlišují od jiných oborů materiálového inženýrství:

- **Značná hmotnost betonových konstrukcí** vyvolává vysoké nároky na dopravní zatížení území a dopravní vzdálenosti i velký objem přepravované hmoty zatěžují životní prostředí také značným objemem těžby surovin.
- **Stochastický charakter vlastností betonu** vyžaduje hodnotit všechny výsledky zkoušení betonu pomocí matematické statistiky. S tím souvisí hospodárnost konstrukcí, neboť při velkém rozptylu hodnot mechanických vlastností zavádíme do statických výpočtů konstrukcí různé opravné součinitele.
- **Dlouhá trvanlivost betonu**, která výrazně překonává většinu známých umělých materiálů a stavby z betonu ovlivňují život čtyřem i více generacím. Beton dlouhodobě plní svou statickou funkci a ocelová výztuž v betonu většinou nekoroduje.
- **Beton je křehký**, jeho pevnost v tahu je pouze zlomkem pevnosti v tlaku, vykazuje malou duktilitu, proto se vyztužuje pruty a vlákny vyšší pevností v tahu (většinou ocelí).
- **Vlastnosti betonu jsou funkcí času**, tuto závislost sledujeme ve třech horizontech:
 - a) čerstvý beton tuhne a tvrdne v měřítku hodin, proto musí být rychle zpracován,
 - b) skutečné pevnosti betonu stanovujeme za 28 dní od zamíchání čerstvého betonu, proto se hledají cesty jak tuto "čekací dobu" v měřítku dnů zkrátit,
 - c) tvrdnutí betonu probíhá trvale (v přirozených teplotních a vlhkostních poměrech), měřítkem jsou zde měsíce.

Přesné definování vlastností betonu jako funkce jeho složek naráží na potíže vyvolané mnohoznačnou závislostí vlastností na složení a technologii betonu. Počet nezávisle proměnných pevnosti betonu je více jako 20 a některé z nich jsou ještě časově závislé, také nelze považovat cementový kámen (= zatvrdlý cementový tmel, sestávající z cementu a vody) a kamenivo za homogenní. Seskupení zrn kameniva je náhodným stavem, dávkování složek betonu se děje v určitých tolerancích a proto nelze žádné závislosti považovat za determinované, ale pouze pravděpodobné s rozdílnou mírou korelace. Závislosti

získané mezi jednotlivými veličinami jsou závislostmi stochastickými (statistickými), které jsou platné v určitých mezích a s určitou pravděpodobností.

Cílem studia je získání znalostí základních složek betonu (kameniva, cementu a vody), doplňujících složek (chemických přísad a příměsí). Během studia jsou procvičeny skladby jednotlivých složek a jejich vzájemná interakce podle potřebných výsledných vlastností betonu. Nezbytným výsledkem studia je návrh, odzkoušení a užití příslušného druhu betonu pro konkrétní konstrukci

1.2 Požadované znalosti

Základní orientace ve stavebních materiálech a konstrukcích. Základní znalosti z matematiky, fyziky tuhé fáze, anorganické a fyzikální chemie.



1.3 Doba potřebná ke studiu

Celkem 13 dvouhodinových přednášek a stejný počet laboratorních a výpočetních cvičení



1.4 Klíčová slova

Kamenivo, voda, cement, přísady, příměsí, výztuž betonu, čerstvý beton, silniční beton, vodostavební beton, těžký beton, lehký beton, vysokohodnotný beton, samozhutňující beton, beton pro masivní konstrukce, čerpání čerstvého betonu, pohledový beton, konzistence čerstvého betonu, zhutňování čerstvého betonu, zhutňování vibrací, systémové bednění, separační přípravky, hydratace cementu, ošetřování betonu, pórovitá struktura, pevnost betonu, soudržnost ocele s betonem, zkoušení betonu, deformace betonu, permeabilita betonu, trvanlivost betonu, mrazuvzdornost betonu, odolnost proti chemickým rozmrazovacím látkám.



1.5 Použitá terminologie (nepovinné)

Terminologie je převzata z evropských technických norem ČSN EN 206-1 a EN 1992-1-1,



Beton (concrete) materiál ze směsi cementu, hrubého a drobného kameniva a vody, s přísadami nebo příměsemi nebo bez nich, který získá své vlastnosti hydratací cementu. **Čerstvý beton (fresh concrete)** beton, který je zcela zamíchán a je ještě v takovém stavu, který umožňuje jeho zhutnění zvoleným způsobem.

Ztvrdlý beton (hardened concrete) beton, který je v pevném stavu a má již určitou pevnost.

Transportbeton (ready-mixed concrete) beton, dodávaný z výroby mimo staveniště.

Obyčejný beton (normal-weight concrete) s objemovou hmotností 2000 – 2600 kg.m⁻³,

Lehký beton (light-weight concrete) s objemovou hmotností 800 – 2000 g.m⁻³.

Těžký beton (heavy-weight concrete) s objemovou hmotností nad 2600 kg.m⁻³.

Vysokopevnostní beton (high-strength concrete) beton pevnostní třídy vyšší než C 50/60 nebo pro lehký beton vyšší než LC 50/55.

Vodní součinitel (water/cement ratio) poměr účinného obsahu vody k hmotnosti cementu v čerstvém betonu.

Stupeň vlivu prostředí (exposure class) klasifikuje vliv prostředí na beton ve stupních.

Anglická terminologie:

Přísada – admixture, přísada – addition, kamenivo – aggregate, pórovité kamenivo (s objemovou hmotností nad 2000 kg.m⁻³) – light-weight aggregate, průkazní zkouška – initial test, zkouška identity – identity test, zkouška shody – conformity test.

Stavební objekt – construction work, provádění – execution, konstrukce – structure



2 Technologie betonu

Beton je kompozitní materiál.



Kompozit je každý materiálový systém, který je složen z více (nejméně dvou) fází, z nichž alespoň jedna je pevná s makroskopicky rozeznatelným rozhraním mezi fázemi. Má vlastnosti, jež nemohou být dosaženy kteroukoli složkou (fází) samostatně, ani prostou sumací (Bareš).

Hlavní parametry kompozitů:

- a) vlastnosti fází (včetně tekuté a plynné fáze v pórech), tj. mechanické vlastnosti (pevnost, modul pružnosti, pracovní diagram, mezní přetvoření) a anizotropie vlastností jednotlivých fází,
- b) objemové zastoupení fází, jejich geometrický tvar a geometrické uspořádání v systému včetně pórů (množství, orientace a průměrné vzdálenosti dispergované fáze),
- c) interakce jednotlivých fází a vlastností styku, tj. schopnost přenosu zatížení z matrice do vyztužujících částic a naopak (soudržnost na kontaktu fází),
- d) interakce s okolním prostředím,
- e) historie materiálu i fází od jejich vzniku; zahrnuje vliv času, technologie zpracování, rychlost změn vnějšího namáhání a okolních podmínek.

Převážnou část objemu konstrukčního materiálu zaujímají tuhé fáze. Nejčastěji jsou tyto fáze dvě, v druhé části jsou částice rozptýleny. Fáze, která tvoří rozptýlené částice, se označuje fází dispergovanou, a druhá fáze, která tyto částice nese, je fáze disperzní, častěji označovaná jako **matrice**.

Pro stavební materiály má především význam minerální matrice a částečně i polymerní a smíšená matrice. Nejrozšířenější matricí je **cementový kámen**. Existuje téměř nekonečné množství různých kompozic pojivých složek, množství vody v kompozitu, druhů a velikosti plniva (kameniva) a objemového podílu plniva. Tyto parametry jsou příčinou stochastických (pravděpodobných) vlastností cementového tmele (plastický stav suspenze před zatuhnutím) a cementového kamene. Cement je polydisperzní partikulární látka, která ve vodní suspenzi má newtonské chování a jejíž vlastnosti jsou funkcí času (postupná hydratace). Cementový kámen je pórovitá látka s měrným povrchem $210 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ (cement má měrný povrch kolem $0,3 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$). Z 1 cm^3 cementu se vytvoří $2,2 \text{ cm}^3$ cementového gelu s póry o velikosti asi 2 nm a velikosti částic hydratovaných slínkových minerálů $1,0$ až 10^3 nm . Vlastnosti cementového kamene jsou především závislé na množství vody přidané k cementu (vodní součinitel je poměr hmotnosti vody k cementu). Čím větší je vodní součinitel, tím horší vlastnosti cementový kámen vykazuje. Přidáním kameniva k cementovému tmelu vzniká čerstvý beton a tvrdnutím pak konstrukční stavební materiál – **beton**. Beton je mnohofázová látka složená z různě velikých zrn kameniva, ze zrn nezhydratovaného cementu, cementového gelu a různě velikých pórů. Proto je prakticky přesný strukturní popis vyloučen a používá se třífázový model: kamenivo - cementový kámen - póry. Model je relativně složitý, neboť na něj působí vnější prostředí (zatížení, teplota, vlhkost aj.) a dochází k rozdílným deformacím fází.

2.1 Význam betonu, rozdělení a značení

Každá vědní i technická disciplína má svůj historický vývoj. Historie praktických aplikací technologie betonu sahá až do roku asi 3600 let př.n.l., kdy Plinius st. zaznamenal sloupy v Egyptě postavené z umělého kamene. Vzácný doklad nám zanechal Marcus Vitruvius Pollio ve své knize Deset knih o architektuře, kde popisuje užití sopečného tufu, který smíchan s vápnem tvrdne i pod vodou (=latentně hydraulická látka). Ve středověku byla tato kniha učebnicí řady stavitelů. Příkladem antické betonové stavby je římský Pantheon (120 - 125 n.l.), který má kopuly z lehkého betonu o průměru 49 m a středový otvor o průměru 9 m. Konstrukce je kasetově vylehčená a objemová hmotnost betonu je stupňovitě vylehčena z 1750 na 1350 kg.m⁻³. Další zmínka o užití betonu po zániku Říma je až v roce 1756 v Anglii. V letech 1756 - 1759 postavil Smeaton (1724 - 1792) v Edystonu betonový maják a v roce 1791 vyšla první kniha o betonu (Smeaton's Book). Velký rozmach používání betonu ve všech formách se datuje od počátku našeho století a dnes v ekonomicky vyspělých zemích představuje beton dvě třetiny spotřeby veškerých stavebních materiálů pro stavební konstrukce.

Beton chápeme jako kompozitní látku a tak v širším slova smyslu lze mezi betony zařadit řadu stavebních látek složených z plniva a pojiva. Obecně lze tudíž beton rozdělit podle chemického charakteru plniva a pojiva: anorganické a organické. Podle původu se dále kamenivo dělí na přírodní a umělé. Podle velikosti pórů a dutin lze beton rozdělit na hutný, mezerovitý, pórobeton a pěnobeton.

V užším slova smyslu rozumíme betonem takové stavivo, které je složené z anorganického kameniva a hydratovaného cementu. Tento beton rozdělujeme podle různých hledisek:

Vyztužení charakterizuje beton: prostý (neobsahuje výztuž se statickou funkcí), železobeton (vyztužený ocelovými pruty nebo sítěmi), předpjatý beton (ocelové dráty jsou předepnuté), vláknobeton (obsahuje ocelová, skelná nebo polymerová vlákna), síťobeton (drobnozrnný beton vyztužený drátěnou sítí).

Objemová hmotnost je kritériem pro rozdělení betonů na:

- lehký beton (Light-weight concrete), označovaný LC a rozdělený podle skupin objemové hmotnosti v suchém stavu (označení D) od 800 až do 2000 kg.m⁻³.

- těžký beton, označený HC s objemovou hmotností betonu nad 2600 kg.m⁻³ s objemovou hmotností kameniva ≥ 3000 kg.m⁻³.

Pevnost v tlaku rozděluje betony podle tříd pevnosti s označením na př.: **C 30/37**

První číslo je údaj o pevnosti betonu v tlaku zkoušeném na válci o průměru 150 mm a výšce 300 mm a druhé číslo udává pevnost v tlaku stanovené na krychli o hraně 150 mm, oba údaje jsou v MPa, stanovené za 28 dnů normového zrání.

Třídy pevnosti betonu podle EN 206-1 jsou odstupňovány od C 8/10 do C 100/115 a lehkého betonu od LC 8/9 do LC 80/88.

Vysokohodnotný (vysokopevnostní) beton se označuje obyčejný a těžký beton pevnostní třídy nad C 50/60 a lehký beton pevnostní třídy nad LC 50/55.

Technologie rozděluje betony na staveništní (vyrobený v bezprostřední blízkosti stavby) a na transportbeton (od míchačky do bednění je dopraven autodomíchávači).

Komerce dovoluje objednat transportbeton ve složení typovém (standardně předepsaném složení betonu odpovídá požadovaným vlastnostem betonu) nebo předepsaném (odběratel předepisuje složení betonu).

Agresivita prostředí je rozdělena do pěti stupňů vlivu prostředí nazývané v ČSN EN 206 - 1 **expoziční stupně** se stanovenými požadavky na minimální trvanlivost betonu 50 roků.

Funkce betonové konstrukce popisuje použití betonu pro různé konstrukce a pak hovoříme o betonu vodostavebním, konstrukčně izolačním, silničním, masivním, dekoračním a pod.

Výrobky (beton a betonové konstrukce) musí být při respektování hospodárnosti vhodné pro zamýšlené použití ve stavbě. Beton musí mít takové vlastnosti, aby stavby, pokud byly řádně projektovány, postaveny a udržovány splňovaly tyto požadavky na stavby:

2.1.1 Základní požadavky

1. **Mechanická pevnost a stabilita.** Stavba musí být navržena a postavena takovým způsobem, aby zatížení, která na ni budou pravděpodobně působit v průběhu stavění a užívání, neměla za následek:

- zřícení celé stavby nebo její části,
- větší stupeň nepřípustného přetvoření,
- poškození jiných částí stavby nebo zařízení připojených ke konstrukci nebo instalovaného zařízení následkem deformace nosné konstrukce,
- poškození událostí v rozsahu neúměrném příčině.

2. **Požární bezpečnost.** Stavba musí být navržena a postavena takovým způsobem, aby v případě požáru:

- byla po určitou dobu zachována nosnost a stabilita konstrukce,
- byl omezen rozvoj a šíření požáru a kouře ve stavebním objektu,
- bylo omezeno šíření požáru na sousední objekty,
- mohly osoby a evakuovatelná zvířata opustit stavbu nebo být zachráněny jiným způsobem,
- byla brána v úvahu bezpečnost záchranných jednotek.

3. **Hygiena, ochrana zdraví a životního prostředí.** Stavba musí být navržena a postavena takovým způsobem, aby neohrožovala hygienu nebo zdraví jejích uživatelů nebo sousedů, především v důsledku:

- vypouštění toxických plynů,
- přítomnosti nebezpečných částic nebo plynů v ovzduší,

- emise nebezpečného záření,
- znečištění nebo zamoření vody nebo půdy,
- nedostatečného zneškodňování odpadních vod, kouře a tuhých nebo kapalných odpadů,
- výskytu vlhkosti ve stavebních konstrukcích nebo na površích uvnitř stavby.

4. **Bezpečnost při užívání.** Stavba musí být navržena a postavena takovým způsobem, aby při jejím užívání nebo provozu nevzniklo nepřijatelné nebezpečí úrazu, např. uklouznutím, smykem, pádem, nárazem, popálením, elektrickým proudem, výbuchem.

5. **Ochrana proti hluku.** Stavba musí být navržena a postavena takovým způsobem, aby hluk vnímaný obyvateli nebo osobami poblíž stavby byl udržován na úrovni, která neohroží jejich zdraví a dovolí jim spát, odpočívat a pracovat v uspokojivých podmínkách.

6. **Úspora energie a ochrana tepla.** Stavba a její zařízení pro vytápění, chlazení a větrání musí být navrženy a postaveny takovým způsobem, aby objem energie spotřebovaný při provozu byl nízký s ohledem na klimatické podmínky místa a požadavky uživatelů.

2.1.2 Stupně vlivu prostředí

Tab.1 Stupně vlivu prostředí dle EN 206-1

Označení Stupně	Popis prostředí	Příklady pro zařazení do stupňů vlivu prostředí
1. Žádné riziko koroze a napadení		
X0	velmi suché	vnitřní konstrukce s velmi malou vlhkostí vzduchu
2. Koroze betonu vyvolaná karbonatácí		
XC1	suché	vnitřní konstrukce s malou vlhkostí vzduchu,
XC2	vlhké, zřídka suché	konstrukce s možností nasycení vodou, základy,
XC3	mírně vlhké	interiéry s vysokou vlhkostí vzduchu, vnější konstrukce chráněné před deštěm,
XC4	střídavě vlhké a suché	povrchy vystavené působení vody, nejsou-li v XC2,
3. Koroze způsobená chloridy		
XD1	mírně vlhké	povrchy vystavené ostřikovacímu mlžení,
XD2	mokrý, zřídka suché	plovárny, působení průmyslových

		odpadních vod,
XD3	střídavě vlhké a suché	části mostů, dlažby, kryty vozovek, parkoviště
4. Koroze vyvolaná chloridy z mořské vody		
XS1	s obsahem solí ve vzduchu	konstrukce na mořském pobřeží nebo blízko
XS2	ponořeno do vody	části námořních betonových konstrukcí
XS3	postřiková zóna, mlžení, oblast přílivu a odlivu	
5. Napadení mrazem a táním (bez i s rozmrazovacími solí)		
XF1	mírné nasycení vodou, bez rozmrazovacích látek	svislé povrchy vystavené dešti a mrazu
XF2	mírné nasycení vodou s rozmrazovacími látkami	svislé povrchy vozovek vystavené mrazu a vzduchem naneseným rozmrazovacími solí
XF3	silné nasycení vodou bez rozmrazovacích solí	vodorovné povrchy vystavené dešti a mrazu
XF4	vyšší nasycení vodou s rozmrazovacími látkami	vozovky a mostovky, svislé povrchy betonu vystavené postřiku rozmrazovacími solemi a mrazu
6. Chemická agresivita (limitní obsah chemických látek je uveden v tab.31.)		
XA1	slabá chemická agresivita	
XA2	mírně chemická agresivita a působení mořské vody	
XA3	vyšší chemická agresivita	

2.1.3 Třídy pevnosti betonu

Tab.2 Třídy pevnosti v tlaku podle ČSN EN 206-1

Obyčejný a těžký beton			Lehký beton		
Třída pevnosti	$f_{Ck,cyl}$ [MPa]	$f_{Ck,cube}$ [MPa]	Třída pevnosti	$f_{Ck,cyl}$ [MPa]	$f_{Ck,cube}$ [MPa]
C 8/10	8	10	LC 8/9	8	9
C 12/15	12	15	LC 12/13	12	13
C 16/20	16	20	LC 16/18	16	18
C 20/25	20	25	LC 20/22	20	22
C 25/30	25	30	LC 25/28	25	28
C 30/37	30	37	LC 30/33	30	33

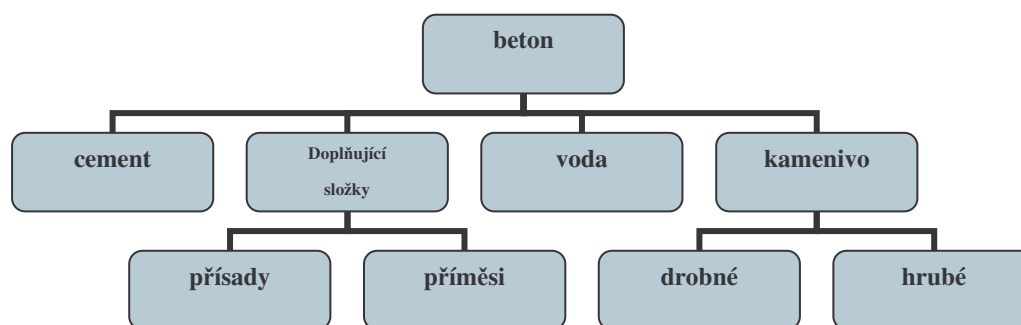
C 35/45	35	45	LC 35/38	35	38
C 40/50	40	50	LC 40/44	40	44
C 45/55	45	55	LC 45/50	45	50
C 50/60	50	60	LC 50/55	50	55
C 55/67	55	67	LC 55/60	55	60
C 60/75	60	75	LC 60/66	60	66
C 70/85	70	85	LC 70/77	70	77
C 80/95	80	95	LC 80/88	80	88
C 90/105	90	105			
C 100/115	100	115			

$f_{Ck,cyl}$ - minimální charakteristická válcová pevnost v tlaku
 $f_{Ck,cube}$ - minimální charakteristická krychelná pevnost v tlaku

Tab.3 Třídy objemové hmotnosti lehkého betonu podle ČSN EN 206-1

Označení	LC 1,0	LC 1,2	LC 1,4	LC 1,6	LC 1,8	LC 2,0
Objemová hmotnost od do	≥ 800	< 1000	< 1200	< 1400	< 1600	< 1800
[kg.m ⁻³]	≤ 1000	≤ 1200	≤ 1400	≤ 1600	≤ 1800	≤ 2000

2.1.4 Základní složky betonu



Kamenivo zaujímá 75 až 80 % objemu betonu a jeho hlavní funkcí je vytvoření pevné kostry v betonu s minimální mezerovitostí. Proto obsahuje různě veliká zrna ve vhodném poměru.

Cement je polydisperzní partikulární anorganická látka s hydraulickými vlastnostmi. Po smíchání s vodou postupně tuhne a tvrdne. Po zatvrdnutí zachovává svoji pevnost a stálost ve vodě. Hydraulické tvrdnutí je důsledkem hydratace vápenatých silikátů a aluminátů.

Voda v betonářské technologii plní dvě funkce, jednak hydratační (voda podmiňuje hydrataci cementu a tak spolu s cementem vytváří tuhou strukturu cementového kamene) a jednak reologickou (voda umožňuje vytvoření tvárného čerstvého betonu ve spojení s jeho složkami; kapilárními silami je zajišťována koheze a viskozitou plastičnost čerstvého betonu).

Přísady jsou chemické sloučeniny, které se přidávají během míchání do betonu v množství do 5 % hmotnosti cementu za účelem modifikace vlastností čerstvého nebo ztvrdlého betonu. Přísady se rozdělují na typy, které charakterizují jejich hlavní funkci.

Příměsi jsou většinou práškovité látky přidávané do čerstvého betonu za účelem zlepšení některých vlastností nebo k docílení zvláštních vlastností. Dělí se na dva typy: inertní příměsi (typ I) a pucolány nebo latentně hydraulické látky (typ II).

Úkol

Regresní analýzou vypočítejte stochastickou závislost pevnosti v tlaku stavenou na válci na krychelné pevnosti betonu (viz tabulka).



Kontrolní otázky

1. Jak a podle jakých kritérií rozdělujeme beton?
2. Vyjmenujte šest základních požadavků na stavební materiály a konstrukce.
3. Definiujte částicový kompozit a jeho závislosti na složkách..



Cvičení

Školení bezpečnosti práce, laboratorní řád.

Užívaná terminologie a definice dle ČSN EN 206-1.



Korespondenční úkol



Porovnejte vlastnosti betonu s ostatními konstrukčními materiály ve stavebnictví podle šesti základních požadavků. V kterých vlastnostech musí být beton doplňován jinými materiály ?

2.2 Kamenivo

Kamenivo je přírodní nebo umělá, převážně anorganická, zrnitá látka, určená pro stavební účely do velikosti zrna do 63 mm. Využívá se také recyklované kamenivo, které je nerostného původu a bylo dříve použito v konstrukci. Kamenivo rozdělujeme podle petrografie, frakce (kameniva označeného podle velikosti dolního d a horního síta D v množině zrn), vzniku (těžené a drcené) a podle objemové hmotnosti (pórovité, hutné, těžké). Drcené kamenivo vzniklo drcením lomového kamene. Těžené kamenivo vzniklo přirozeným rozpadem hornin, zrna má zaoblena transportem zvětralé horniny. Podle velikosti zrn a jejich skladby rozdělujeme:

Evropská norma dělí kamenivo (D = horní a d = dolní síto frakce kameniva):

- a) **hrubé**, je-li $D > 11,2$ mm a $D / d > 2$ nebo $D \leq 11,2$ mm a $D / d \leq 2$.
- b) **směs kameniva** (šterkopísek a šterkodrt'), je-li $D \leq 63$ mm a $d = 0$.
- c) **drobné** (písek), je-li $D \leq 4$ mm a $d = 0$.

d) **filer** jsou zrna do 0,125 mm, (max. nadsítné 15 % zrn do 2 mm, propad sítem 0,063 mm je 70 až 95 %).

Evropské normy v systému ČSN definují druhy a základní požadavky na kamenivo:

ČSN EN 12620 Kamenivo do betonu. Stanovuje požadavky na vlastnosti přírodního, umělého i recyklovaného kameniva do betonu. ČSN EN 13055-1 Pórovité kamenivo. Kamenivo nerostného původu, přírodní, průmyslově upravené, recyklované s objemovou hmotností do $2000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a sypanou hmotností do $1200 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. ČSN EN 13139 Kamenivo pro malty. Norma doporučuje frakce zrnitosti: 0/1, 0/2, 0/4, 0/8, 2/4, 2/8 mm. Druhy malt: zdící, vnitřní, vnější a omítky podkladové, sanační, injektáží. EN 13242 Kamenivo nestmelené a stmelené hydraulickým pojivem pro inženýrské stavby a silnice. EN 13043 Kamenivo pro asfaltové směsi, EN 13383 Kamenivo pro vodní stavby. V navržené evropské normě je také zahrnuta vysokopecní struska a recyklát (drcený beton).

2.2.1 Petrografie

Horniny se skládají z minerálů a jejich vlastnosti i podíl v hornině určuje tvrdost, barvu, trvanlivost a ostatní vlastnosti horniny. Charakteristické, určené vlastnosti minerálů jsou: chemické chování, tvrdost, lom světla, tepelná vodivost, teplotní roztažnost, elektrická vodivost. Barva je proměnnou vlastností. Tvrdost obvyklých minerálů se vyjadřuje Mohsovou stupnicí: vápenec 3, kazivec 4, apatit 5, živec 6, křemen 7. Struktura a složení minerálů výrazně ovlivňuje vlastnosti horniny. Čím více minerálů je nepravidelně vzájemně uspořádáno, tím větší je pevnost horniny (žula, křemenec, čedič). Zpevněné sedimenty vykazují technickou použitelnost druhem tmelu (pískovec s jílovitým nebo vápencovým tmelem). Pravidelné uspořádání minerálů ve struktuře horniny způsobuje větší nebo menší štěpnost horniny (rula, břidlice aj.). Vyvřelé horniny jsou nejtvrdějším a nejlepším kamenivem do betonu.

2.2.2 Granulometrie

Kamenivo je polydispersní partikulární látka. Zrnitost kameniva vyjadřuje skladbu různě velikých zrn a různého tvaru. Cílem je dosažení nejhutnější skladby s minimálním objemem dutin - mezer. Velikost zrn a jejich podílové zastoupení v množině se stanovuje síťovým rozborem. Množina zrn zachycená na síti se nazývá frakcí. Množina zrn mezi síty, která mají poměr velikosti otvorů 1:2 se nazývá úzká, pokud je poměr vyšší hovoříme o frakci široké. Normová, základní sada sít se čtvercovými otvory (poměry velikosti otvorů 1:2): 0,063 - 0,125 - 0,5 - 1 - 2 - 4 - 8 - 16 - 32 - 63 - 125 [mm]. ČSN EN 12620 rozšiřuje základní varianty.

Pro výběr plynulé čáry zrnitosti je uváděno několik “ideálních křivek” zrnitosti, které vycházejí ze skladby koulí a jsou upraveny empirickými koeficienty. Ideální proto, že nelze současně minimalizovat objem dutin a mezer v nasypáném kamenivu a minimalizovat povrch kameniva. Tyto parametry určují nejnižší dávky cementu, dobrou zpracovatelnost a vysokou pevnost betonu.

Zrnitost se vyjadřuje čarou zrnitosti, která má tyto tvary

$$y = \left(\frac{d}{D_{\max}} \right)^n \cdot 100 \quad [\%]$$

y - propad sítem o velikosti otvoru d [mm]

n - exponent (dle Fullera n = 0,5; dle Hummela pro těžené kamenivo n = 0,4 a pro drcené n = 0,3).

Čára zrnitosti EMPA použitelná do $D_{\max} < 32$ mm

$$y = 50 \cdot \left(\frac{d}{D_{\max}} + \sqrt{\frac{d}{D_{\max}}} \right) \quad [\%]$$

Čáry zrnitosti popisujeme pomocí **modulů**, které vyjadřují jemnost kameniva. Tyto moduly rovněž slouží k výpočtu poměrů míšení dvou frakcí kameniva rozdílné zrnitosti.

Číslo zrnitosti (Abrams), zrna do 0,25 mm

$$k = \frac{\sum (100 - y_i)}{100} = m - \frac{D}{100} \quad D = \sum y_i = (m - k) \cdot 100$$

y_i = propad sítem o velikosti i [% hm.], zůstatek na síte v % je = 100 - y_i

m_i = podíl zrn frakce o průměrné velikosti zrna $d_i = \frac{d_1 + d_2}{2}$

Podle čáry zrnitosti je vypočítáno číslo zrnitosti k: 3,64 (A₈), 2,89 (B₈), 2,27 (C₈), 4,61 (A₁₆), 3,66 (B₁₆), 2,75 (C₁₆), 5,48 (A₃₂), 4,20 (B₃₂), 3,30 (C₃₂).

Cílem skladby zrn kameniva je minimální podíl dutin a mezer mezi jednotlivými zrny k celkovému objemu kameniva. Tento parametr nazýváme **mezerovitostí** M a vypočteme ji z rovnice

$$M = 1 - \frac{\rho_s}{\rho_k}$$

ρ_s = sytná hmotnost a ρ_k = objemová hmotnost kameniva [kg.m⁻³]

Mezerovitost kameniva dobré zrnitosti v setřeseném stavu bývá 0,16 až 0,24 , tj. podíl dutin činí 16 až 24 % . **Sytná hmotnost kameniva** v setřeseném stavu 1400 až 2000 kg.m⁻³ a ve volně nasypáném stavu 1250 až 1850 kg.m⁻³. Sytná hmotnost je také ovlivněna vlhkostí. Při měření sytné hmotnosti musíme respektovat stěnový účinek podél stěn zkušební nádoby. ISO 6782 předepisuje podle velikosti maximálního zrna potřebný objem nádoby a poměr výšky k průměru válcové nádoby 1 až 1,5. **Tvarový index** vyjadřuje poměr největšího l

k nejmenšímu h rozměru jednotlivých zrn. Měří se nejméně 10 větších zrn a tvarový index se vypočítá

$$b_1 = \frac{\sum l_i}{\sum h_i}$$

Zrna s indexem větším jak 3 jsou z technologického hlediska nevhodná. U drčeného kameniva se připouští polovina zrn v mezích indexu od 3 do 5. Pro měření se používá dvoučelistového posuvného měřidla nebo prostrkovací šablony.

Úkol

Zadání. Vypočítejte modul k kameniva dle síťového rozboru uvedeného v tabulce. Vypočítejte poměr míšení těchto kameniv tak, aby směs měla modul $k = 4,5$. Jaká bude výsledná zrnitost?



Síto [mm]	Kamenivo X		Kamenivo Y	
	Propad %	Zůstatek %	Propad %	Zůstatek %
0,25	15	85	1	99
0,50	30	70	4	96
1,0	45	55	10	90
2,0	55	45	15	85
4,0	70	30	20	80
8,0	80	20	35	65
16	90	10	60	40
32	100	0	100	0
63	100	0	100	0
suma	585	315	345	555
k		$315/100=3,15$		$555/100=5,5$

Postup výpočtu

Poměr míšení ($mx + my = 1$) : $mx \cdot k_x + (1 - mx) \cdot k_y = k$



$$m_x = \frac{k - k_y}{k_x - k_y} = \frac{4,50 - 5,55}{3,15 - 5,55} = 0,4375$$

Smísíme 44 % kameniva X a 56 % kameniva Y (% hmotnosti).

Výsledná zrnitost smíšeného kameniva (% zůstatku na síti):

síto 0,25 mm: $85 \cdot 0,44 + 99 \cdot 0,56 = 92,9$ % síto 0,5 mm: $70 \cdot 0,44 + 96 \cdot 0,56 = 84,6$ %

1,0 mm: $55 \cdot 0,44 + 90 \cdot 0,56 = 74,7$ % 2,0 mm: $45 \cdot 0,44 + 85 \cdot 0,56 = 67,5$ %

4,0 mm: $30 \cdot 0,44 + 80 \cdot 0,56 = 58,1$ % 8,0 mm: $20 \cdot 0,44 + 65 \cdot 0,56 = 45,3$ %

$$16 \text{ mm: } 10,0,44 + 40,0,56 = 26,9 \%$$

$$\Sigma = 100 \%$$

Úkol

Zadání. Vypočítejte potřebné podíly tří frakcí kameniva, jejich dílčí výsledky síťového rozboru jsou uvedeny v tabulce. Největší zrna $D_{\max} = 16 \text{ mm}$.



Podíly hodnotíme podle čáry zrnitosti EMPA (vzorec 3)

Síto	Celkový propad sítem v %		
Frakce kameniva	A 0 - 4 mm	B 4 - 8 mm	C 8 - 16 mm
16 mm	100	98	90
8 mm	99	89	12
4 mm	91	11	2

Postup výpočtu

Řešíme soustavu tří lineárních rovnic pomocí inverzní matice. Nezávislé proměnnými jsou celkové propady sítem x_{ij} (i - síto, j - frakce). Vstupní matice je v tabulce. Ideální podíly celkového propadu sítem 16, 8 a 4 mm jsou

$$x_{16A} + x_{16B} + x_{16C} = 50 \left(\frac{16}{16} + \sqrt{\frac{16}{16}} \right) = 100$$

$$x_{8A} + x_{8B} + x_{8C} = 50 \left(\frac{8}{16} + \sqrt{\frac{8}{16}} \right) = 60,36$$

$$x_{4A} + x_{4B} + x_{4C} = 50 \left(\frac{4}{16} + \sqrt{\frac{4}{16}} \right) = 37,5$$

Výpočet.

Vstupní matice
čin matic

Inverzní matice

Vektor

Sou-

$$\begin{vmatrix} 100 & 98 & 90 \\ 99 & 89 & 12 \\ 91 & 11 & 2 \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} -0,0001 & -0,0015 & 0,0127 \\ -0,0017 & 0,0148 & -0,0143 \\ 0,0130 & -0,0145 & 0,0015 \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} 100,00 \\ 60,36 \\ 37,50 \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} 0,38 \\ 0,19 \\ 0,48 \end{vmatrix}$$

součet 1,05

Výsledné hodnoty součinu matic upravíme na součtovou hodnotu 100% tím, že je násobíme 100 a dělíme součtem 1,05. Podíly frakcí jsou:

$$\text{Frakce A (0/4 mm)} = 0,38 \cdot 100 / 1,05 = 36 \%,$$

$$\text{Frakce B (4/8 mm)} = 0,19 \cdot 100 / 1,05 = 18 \%,$$

$$\text{Frakce C (8/16 mm)} = 0,48 \cdot 100 / 1,05 = 46 \%.$$

Úkol

Zadání. Vypočítejte objemovou a sypanou hmotnost, mezerovitost a nasákavost šterkopísku frakce 0 - 8 mm. Objemová hmotnost byla stanovena pyknometricky a bylo zvaženo:



$$\text{hmotnost nasáklého kameniva za 24 hodin} \quad m_l = 2165 \text{ g}$$

hmotnost pyknometru, šterkopísku a vody $m_5 = 3715,5 \text{ g}$

hmotnost pyknometru (2 l) s vodou $m_6 = 2352 \text{ g}$

hmotnost vysušeného kameniva $m_4 = 2148 \text{ g}$

Sypná hmotnost byla stanovena ve zhutněném stavu v nádobě o objemu 5 l a hmotnosti 1,12 kg. Nádoba se šterkopískem vážila 10,22 kg. Objemová hmotnost vody $\rho_V = 998,2 \text{ kg.m}^{-3}$.

Postup výpočtu

Objemová hmotnost podle vzorce (14)

$$\rho_K = \frac{m_4 \cdot \rho_V}{m_1 - m_5 + m_6} = \frac{2148 \cdot 998,2}{2165 - 3715,5 + 2352} = 2675 \text{ kg.m}^{-3}$$

Nasákavost vypočítáme podle vzorce (15)

$$N = 100 \cdot \frac{m_1 - m_4}{m_4} = 100 \cdot \frac{2165 - 2148}{2148} = 0,8 \quad \% \text{ hmotnosti}$$

Sypná hmotnost se vypočítá dělením hmotnosti vzorku v nádobě (hmotnost celkem minus hmotnost nádoby), při respektování rozměrů

$$\rho_s = \frac{10,22 - 1,12}{0,005} = 1820 \quad \text{kg.m}^{-3}$$

Mezerovitost se vypočítá podle vzorce (8) a násobeno stem se udává v %

$$M = 100 \cdot \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_K}\right) = 100 \cdot \left(1 - \frac{1820}{2675}\right) = 32 \quad \%$$

2.2.3 Technologické požadavky

Kvalitativní požadavky na kamenivo definuje ČSN EN 12620, která kamenivo nerozděluje pouze podle frakcí, druhu, ale také kategorií jakosti kameniva. Každá vlastnost je označena kategorií (úroveň vlastnosti kameniva, vyjádřené rozsahem hodnot nebo mezní hodnotou). Označení je číselné nebo deklarované nebo není požadováno.

Tab.4 Kategorie vlastností podle ČSN EN 12620

Vlastnost	Kategorie	Parametr	Rozsah	Zkušební EN
Tvar zrn	F1	Index plochosti	≤ 15 až > 50	933-3
	S1	Tvar zrn	≤ 15 až > 55	933-4
Schránky	SC	Obsah živoč. schrán	$< 10 \%$ až $> 10 \%$	933-7
Jemné částice	f _{síto}	Do 0,063 mm	Hrubé $\leq 1,5$ až $> 4\%$	933-10
			Drobné ≤ 3 až $> 22\%$	
Drcení	LA	Zkouška Los Angeles	< 15 až > 50	1097-2
Ráz	SZ	Odolnost proti rázu	≤ 18 až > 32	1097-2

Otěr	M _{DE}	Zkouška mikro Dev	≤ 10 až > 35	1097-1
Ohladitelnost	PSV	Odolnost proti ohlad	≤ 68 až ≤ 44 %	1097-8
Obrus	AAV	Povrchový obrus	≤10 až ≤ 20	1097-8
Obrus pneu- matikami s hr	A _N	Nordická zkouška	≤ 7 až ≤ 30	1097-9
Mrazuvzdorn	F	Hrubé kamenivo		1367-1, 1367-2
Zdravost	MS	Podle MgSO ₄	≤ 18 až > 35 %	1367-2
Sírany - strus	AS	SO ₄ ⁻ rozp. v kyselin	≤ 0,2 až .1,0	1744-1

Dále je požadováno:

Objemová stálost , max 0,075 % (zkoušeno dle ČSN EN 1367-4).

Celkový obsah síry do 1 % (vzduchem chlazená struska do 2 %).

Vliv na dobu tuhnutí a tvrdnutí (prodloužení u malty o 120 minut, pevnost za 28 dnů může klesnout až o 20 %).

Vzduchem chlazená struska je zkoušena na rozpadavost C₂S (γ C₂S) a na železitý rozpad

(FeO⇒Fe₂O₃).

Za neškodné se považují jemné částice pokud je jedna vyhovující vlastnost:

- obsah do 3 %,
- ekvivalent písku SE (ČSN EN 983-8) je menší než spodní mez (vzorek se protřepává s CaCl₂), glycerinem a formaldehydem),
- zkouška metylenovou modří MB (ČSN EN 983-9) je pod spodní mezí,
- vyhovující ostatní vlastnosti.

Významné je **zkoušení odolnosti kameniva vůči teplotě a zvětrávání** podle řady ČSN EN 1367. Odolnost hrubého kameniva (4 – 63 mm) proti cyklickému zmrazování a rozmrazování se zkouší zmrazováním vodou nasyceného vzorku úzké frakce pod vodou na -17,5°C a pak rozmrazování na vodní lázni při 20°C. Cykly se opakují 10 krát stanoví se úbytek hmotnosti anebo úbytek pevnosti podle ČSN EN 1097-2. Zkouška síranem hořečnatým ověřuje porušení struktury vlivem krystalizace a dehydratace MgSO₄ v pórech kameniva. Vzorek frakce 10 – 14 mm se pětkrát ponoří do standardního roztoku MgSO₄ a vysuší při 110°C. Stanoví se množství odpadlého materiálu velikosti do 10 mm. Zkouška rozpadavosti čediče se provádí varem 36 hodin vzorků, které mají alespoň jednu plochu velikou nejméně 0,005 m². Potom se vzorky posoudí vizuálně a zaznamená se tvorba šedobílých míst ve tvaru hvězdiček či radiálních vlasových trhlinek nebo větších trhlin. Stanoví se také ztráta hmotnosti a případně ztráta pevnosti. ČSN EN 1367-4 určuje postup pro posouzení vlivu kameniva na smršťování betonu, měří se délkové změny betonových hranolů ve vlhkém a vysušeném stavu.

Kamenivo používané pro povrchové vrstvy vozovek se zkouší stanovením hodnoty odladitelnosti (PSV) nebo doplňující zkouškou stanovení hodnoty obrusnosti kameniva (AAV). Metodou PSV se zjišťuje odolnost hrubého ka-

meniva vůči ohlazování koly aut za podmínek podobných, které se vyskytují na povrchu vozovky. Podobně metoda AAV stanovuje hodnoty obrusnosti, která charakterizuje obrus způsobený dopravou na povrchu vozovky. Nordická zkouška podle ČSN EN 1097-9 simuluje obrusné činnosti pneumatik s hroty na hrubé kamenivo používané do obrusných vrstev vozovek.

2.2.4 Alkalicko-křemičitá reakce

Dlouhodobým působením alkálií z cementu, z příměsí, z vody i z kameniva na aktivní SiO_2 . Rhyolity, dacity, andezity, křemičité břidlice, flint mohou obsahovat minerály opál, tridymit, chalcedon, cristobalit a nebo krypto-krytalinnická skla, které jsou velmi reaktivní v alkalickém prostředí. Dlouhodobě dochází k reakcím doprovázených objemovými změnami, které způsobují postupnou destrukci betonu. Reakci lze zjednodušeně popsat



Alkálie obsažené v cementu se hodnotí alkaliovým ekvivalentem $\text{A.E.} = \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \cdot \text{K}_2\text{O}$, nemají v v portlandském cementu překročit hodnotu 0,6 % A.E. a v CEM II maximálně 0,8 % A.E. Rovněž je limitován obsah alkálií v přísadách celkem maximální obsah alkálií $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ v betonu má být nižší než $3,0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. V kamenivu je do 2 % omezován obsah křemitého rohovce, pazourku, chalcedonu. Alkalické rozpínání se výrazně snižuje příměsemi (vysokopeční struskou, popílkem, mikrosilikou), ale také přísadou 0,1 % LiF na hmotnost cementu. Za odolné horniny se považují: andezit, čedič, diorit, gabro, granodiorit, mikrogranit, krystalické břidlice, rula, syenit, trachyt, vápenec bez rohovců. V ČR bylo zjištěny poruchy desítky dopravních staveb a byly vydány Regionální specifikace k zamezení poškození betonu v důsledku alkalicko-křemičité reakce (CR 1901). Základní podmínky pro vznik reakce kameniva s alkáliemi:

1. přítomnost reaktivní formy SiO_2 , záleží rovněž na velikosti a množství reaktivních částic,
2. vyšší množství obsahu alkálií v betonu, více jako $3,0 \text{ kg A.E. na m}^{-3}$, vysoká vlhkost betonu.

2.2.5 Pórovité kamenivo

Keramzit (v ČR je označen jako **Liapor**) se vyrábí ze snadněji tavitelných jíílů, které v žáru nadýmají. Plyny vzniklé uvnitř granule nemohou uniknout přes slinutý, zatavený povrch granule, který se nachází v pyroplastickém stavu a svou teplotní roztažností zvětšují objem granulí, tj. zvyšují pórovitost střepu. Měrná hmotnost $1800 - 2400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, objemová hmotnost $1200 - 1350 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, pórovitost 35 - 60 %, nasákavost 10 - 14 %. Jediným zástupcem pórovitého kameniva v ČR je **LIAPOR**, který se vyrábí s různou objemovou hmotností a ve frakcích 1 - 4, 4 - 8 a 8 - 16 mm, drcený Liapor 0 - 4 a 0 - 1 mm. Vlastnosti Liaporu:

- sypaná hmotnost ve volně nasypaném stavu $250 \text{ až } 900 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,
- objemová hmotnost $500 \text{ až } 1500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,
- mezerovitost volně sypaného Liaporu je 40 - 50 %, setřesitelnost 2 - 13 % a drceného Liaporu je mezerovitost 55 - 65 %, setřesitelnost 8 - 20 %,

-pevnost stlačením ve válci R_{LV} je závislá na sypné hmotnosti ρ_s [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] (index korelace 0,997)

$$R_{LV} = 7,668 \cdot \text{LN}\rho_s - 42,462 \text{ [MPa]}$$


- tepelná vodivost λ souvisí se sypnou hmotností Liaporu dle vztahu (index korelace 0,9835)

$$\lambda = 0,051 \cdot \exp(0,0016 \cdot \rho_s) \text{ [W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}\text{]}$$


- chemické složení: 52 % SiO_2 , 23 % Al_2O_3 , 10 % Fe_2O_3 , celková síra 0,2 - 0,5 %, chloridy 0,005 až 0,01 %,

- úbytek hmotnosti po 25 zmrazovacích cyklech je do 2 %, je objemově stálý do 1050 °C.

Kontrolní otázky

1. Nakreslete čáry zrnitosti pro $D_{\max} = 16 \text{ mm}$ dle Hummela pro těžené i drčené kamenivo. 
2. Pomocí tabulkového procesoru EXCEL vypracujte program pro míšení tří frakcí kameniva pro $D_{\max} = 22 \text{ mm}$.
3. Vyjmenujte technologické požadavky na kamenivo.
4. Které vlastnosti zkusíme u kameniva a jaké metody používáme pro stanovení objemové hmotnosti kameniva ?
5. Popište alkalicko-křemičitou reakci. Jak lze ji zabránit?
6. Jaké znáte pórovitá kamenina a čím se vyznačují ?
7. Které průmyslové odpady lze využít jako kamenivo (hutné i pórovité) do betonu ?

Cvičení

Doporučená pásma zrnitosti, číslo zrnitosti, sestavení předepsané zrnitosti kameniva, neupravené kamenivo, míšení dvou frakcí (početní způsob, křížové pravidlo). 

Výpočet podle Hrubana, (individuální zadání), přetržitá zrnitost s prodlevou, míšení více frakcí, prolínání frakcí, výpočet modulů kameniva.

Míšení tří frakcí kameniva (výpočet se provede bez ohledu na prolínání frakcí a s ohledem na prolínání frakcí) - individuální zadání.

Technologické zkoušky kameniva – postupy, praktické cvičení.

2.3 Cement a voda

Pro cementy platí předběžná evropská norma ČSN P ENV 197-1. Cement. Složení, jakostní požadavky a kritéria pro stanovení shody. Část 1. Cementy pro obecné použití. Další části ENV 197 budou zahrnovat speciální cementy. Cementy označujeme zkratkou CEM.

2.3.1 Druhy cementů

Cementy pro obecné použití dle ENV 197-1 se dělí podle směsnosti (tab. 13.).

Tab.5 Druhy cementů dle směsnosti (ENV 197-1).

Druh ce- mentu	Název cemen- tu	Označení	Obsah složek v % hmotnosti		
			slinek	složka	plnivo
I.	Portlandský	I	95 - 100	-	0 - 5
II.	Portlandský	II / A - X	80 - 94	6 - 20	0 - 5
		II / B - X	65 - 79	21 - 35	0 - 5
III.	Vysokopecní	III / A	33 - 64	36 - 65	0 - 5
		III / B	20 - 34	66 - 80	0 - 5
		III / C	5 - 19	81 - 95	0 - 5
IV.	Pucolánový	IV / A	65 - 89	11 - 35	0 - 5
		IV / B	45 - 64	36 - 55	0 - 5
V.	Směsný	V / A	40 - 64	18 - 30	0 - 5
		V / B	20 - 39	30 - 50	0 - 5

Označení složek X (místo X se uvede písmeno):

CEM II.: S = struska, D = křemičitý úlet (max 10 %), P = přírodní a

Q = průmyslový pucolán, V = křemičitý a W = vápenatý popílek,

T = kalcinovaná břidlice, L = vápenec

CEM IV.: složky tvoří křemičitý úlet D, přírodní a průmyslový pucolán P, Q a křemičitý popílek V

CEM V.: složka je z poloviny tvořena vysokopecní struskou S a z poloviny P,Q,V.

Cementy se dále dělí na tři **třídy normalizované pevnosti** (= pevnost v tlaku v MPa):

32,5 42,5 52,5

a národním dodatkem normy ENV 197-1 (po dobu platnosti ENV) ještě v ČR 22,5 MPa.

Cementy s vysokými počátečními pevnostmi se označují R.

Označování cementů:

1. Cement ENV 197-1 CEM II/A - S 42,5 R nebo ČSN P ENV 197-1 CEM II/A - S 42,5 R

Je směsný portlandský struskový (S) cement (II.) s množstvím vysokopecní strusky (A) 6 až 20 %, s pevností v tlaku 42,5 MPa s rychlým nárůstem počátečních pevností (R).

2. Cement ENV 197-1 CEM III/B 32,5 nebo ČSN P ENV 197-1 CEM III/B 32,5

Je vysokopecní cement (III) s 66 - 80 % strusky (S), pevnostní třídy 32,5 MPa.

3. Cement ČSN P ENV 197-1 ND V/B 22,5 Je směsný cement (V) dle národního dodatku normy (ND) s 20 - 39 % slinku a zbytku strusky s pucolánem, včetně křemičitého popílku, s pevností v tlaku 22,5 MPa.

Bílý cement se používá pro dekorativní prvky a pro povrchové úpravy. Vyznačuje se nízkým obsahem $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0.15 \%$ a $\text{MnO} < 0.015 \%$. Barvicí oxidy nesmí do cementu vniknout ani během mletí slinku.

Síranovzdorný vysokopecní cement CEM III/A 32,5 R-SV (Prachovice) má měrný povrch $346 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$, počátek a dobu tuhnutí 210 a 330 minut, pevnost v tlaku za 2 dny 15,6 MPa a za 28 dnů 47,7 MPa, objemovou stálost 1 mm.

Silniční cement se vyznačuje vysokou pevností v tahu ohybem, malými objemovými změnami, dlouhodobou trvanlivostí ve třídě agresivity XF, nízkým hydratačním teplem a vysokými počátečními pevnostmi.

Hlinitanový cement se vyrábí ze speciálního slinku. Podle chemického složení se obsah hlavních oxidů pohybuje v těchto mezích: 35 - 52 % Al_2O_3 , 35 - 45 % CaO , 3 - 10 % SiO_2 , 1 - 15 % Fe_2O_3 . Vyznačuje se rychlým průběhem tuhnutí a tvrdnutí, vysokým hydratačním teplem, zvýšenou odolností v agresivním prostředí (SO_4^{2-} , Cl^-). Hydratované slínkové minerály jsou metastabilní, dochází k jejich konverzi, zvyšuje se dlouhodobě pórovitost cementového kamene a tím dochází ke ztrátě pevnosti betonu. Proces probíhá řadu let a tak **hlinitanové cementy se nesmí používat v konstrukčních betonech**. Používají se do žárobetonů nebo pro speciální práce, kde se od betonu neočekává dlouhodobá stabilní pevnost.

2.3.2 Mineralogie cementů

Chemické složení portlandského slinku se pohybuje v mezích: 61 - 68 % CaO , 20 - 24 % SiO_2 , 4 - 8 % Al_2O_3 , 2 - 4 % Fe_2O_3 , 0,1 - 0,3 % P_2O_5 , 0,5 - 6 % MgO , 0,2 až 1 % SO_3 , 0,8 - 1,5 % $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$, 0,1 - 0,5 % TiO_2 . Celkový obsah aktivního CaO a SiO_2 musí být vyšší jak 50 %. Obsah oxidů ovlivňuje vlastnosti cementů a některé oxidy působí i nepříznivě a jsou limitovány: MgO max. 5 % (objemové změny při hydrataci), alkálie při vyšším obsahu jak 2 % (zvláště při výrobě cementu suchým způsobem) mohou způsobit alkalické rozpínání betonu ve spojení s aktivním SiO_2 obsaženým v kamenivu. Chemizmus tvorby slínkových minerálů je velmi složitý a většinou se zjednodušuje na popis základních slínkových minerálů:

- alit - trikalciumsilikát - C_3S , v průměru 63 %, v mezích od 45 do 80 %,

- belit - dikalciumsilikát - C_2S , v průměru 20 % v mezích od 5 do 32 %,
- trikalciumaluminát - C_3A , obvykle asi 8 %, v mezích 4 - 16 %,
- brownmillerit - kalciumaluminátferit - $C_2(AF)$ nebo C_4AF , v průměru 7 %, od 3 do 12 %,
- volné CaO - C_V , v průměru 1 %, v mezích od 0,1 do 3 %,
- volné MgO (periklas) - M_V , v průměru 1,5 % od 0,5 do 4,5 %.

Tab.6 Vlastnosti hydratovaných slinkových minerálů.

Slinkový minerál	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
Počátek reakce po zamíchání s vodou	2 - 4 hodin	14- 16 dnů	ihned	5-10 minut
Objemová stálost	stálý	stálý	nestálý	stálý
Smrštění	střední	malé	výrazné	malé
Chemická odolnost	úměrná	úměrná	malá	dobrá
Hydratační teplo kJ.kg^{-1}	500	250	1350	420
Pevnost v tlaku v MPa za 28 dní	50	10	5	3
za 180 dní	65	50	8	5
Stupeň hydratace v % za 3 dni	61	18	56	31
(Baženov) za 7 dní	69	30	62	44
za 28 dní	73	48	82	66
za 180 dní	74	66	96	91

2.3.3 Technologické požadavky

Technická norma ENV 197-1 definuje požadavky na normalizovanou (28 dní) a počáteční (2 a 7 dnů) pevnost v tlaku, počátek tuhnutí a objemovou stálost (tab.7.).

Tab. 7. Mechanické a fyzikální požadavky dle ENV 197-1

Pevnostní třída	Počáteční pevnost [MPa]	Normalizovaná pevnost [MPa]	Počátek tuhnutí v minutách	objemová stálost [mm]
22,5	.> 13 (7 dnů)	od 22.5 do 42.5	> 60	< 10
32.5	> 16 (7 dnů)	od 32.5 do 52.5	> 60	<10
32.5 R	> 10 (2 dny)	od 32.5 do 52.5	> 60	<10
42.5	> 10 (2 dny)	od 42.5 do 62.5	> 60	< 10
42.5 R	> 20 (2 dny)	od 42.5 do 62.5	> 60	< 10
52.5	> 20 (2 dny)	> 52.5	> 45	< 10
52.5 R	> 30 (2 dny)	> 52.5	> 45	< 10

Počátek a doba tuhnutí cementu je konvenční veličinou zjišťovanou Vicatovým přístrojem. Počátek tuhnutí je minimálně 45 až 60 min a obvykle bývá 3 až 5 hodin, doba tuhnutí maximálně 12 hodin (bývá 4 až 6 hodin). Doba tuhnutí se prodlužuje s rostoucím obsahem vody a zkracuje se zvýšením teploty.

Objemová stálost se prokazuje za 24 hodin při 20 °C pomocí Le Chatelierovy objímky a její roztažení nesmí být větší jak 10 mm, bývá často pouze 1 mm. Cementový kámen nesmí vykazat žádné nepřiměřené objemové změny, trhlinky a odštěpky. Rozpínání způsobuje nadměrný obsah volného CaO, MgO a síranu vápenatého. Smrštění cementového kamene za 28 dní je 0,5 až 0,8 mm.m⁻¹.

Objemová a sypaná hmotnost cementů: portlandský cement má objemovou hmotnost 3050 až 3150 kg.m⁻³, pro betonářské výpočty se užívá hodnota 3100 kg.m⁻³, cement obsahující více strusky pak 3000 kg.m⁻³. Sypaná hmotnost volně loženého cementu je 900 až 1300 kg.m⁻³, pytlovaného cementu nebo uloženého v silech 1200 - 1700 kg.m⁻³.

Měrný povrch cementu. Souvisí s velikostí částic (bývají od 1 do 250 μm) a zrnitostí. Běžný cement, obvyklého měrného povrchu 300 m².kg⁻¹ má tuto zrnitost: 17 % zrn větších 50 μm, 23 % zrn menších 10 μm, 27 % zrn od 10 do 25 μm. Měrný povrch cementů bývá 250 až 400 m².kg⁻¹, požadovaná minimální hodnota je 225 a doporučená maximální jemnost mletí je 600 m².kg⁻¹. Čím má cement větší měrný povrch, tím rychleji a úplněji hydratuje, ale jeho výroba je energeticky náročnější. Cementový kámen má však větší smrštění a pro smáčení zrn cementu je třeba větší množství vody.

Hydratační teplo je tepelným projevem hydratace cementu, závisí na obsahu jednotlivých slínekových minerálů a tím na druhu cementu. V průběhu hydratace se vyvíjí teplo rozdílnou intenzitou, idealizovaný vývin tepla je uveden na obr.4. a tab. 18. Portlandské cementy uvolní při hydrataci teplo takto: 8 hod. - 35 až 100, za 24 hod. - 130 až 280, za 28 dní 330 až 550 kJ.kg⁻¹.

Hygienické vlastnosti. Cement reaguje s vodou velmi alkalicky a je označen jako dráždivá látka Xi (Zákon č. 356/2003 Sb.) a **chromany** obsažené v cementu mohou při dlouhodobém působení na pokožku vyvolat alergii. Přípustný expoziční limit pro cementový prach je 10 mg.m⁻³. Cement a přípravky obsahující cement se nesmí používat ani uvádět na trh, jestliže po smíchání s vodou obsahují více než 0,0002 % šestimocného chromu, vztaženo na celkovou hmotnost suchého cementu (vyhláška č. 221/2004 Sb.). Toto ustanovení neplatí při používání cementu v kontrolovaných uzavřených a plně automatizovaných procesech, v nichž s cementem manipulují pouze strojní zařízení a v nichž není možný styk s pokožkou. Při ruční manipulaci s cementem se musí používat přiléhavý pracovní oděv, ochranné nepropustné rukavice, ochranné brýle a případně respirátor.

Kontrolní otázky

1. *Popište rozdělení cementů podle směsnosti a pevnosti.*
2. *Jak ovlivňují jednotlivé slínekové minerály vlastnosti cementů?*
3. *Popište fyzikální vlastnosti cementů.*



4. Jak se stanovuje pevnost, doba tuhnutí a objemová stálost cementu?
5. Co představuje označení: ENV 197-1 CEM II/B - D 42,5 R ?
6. Jaké vlastnosti a složení má hlinitanový cement?

2.3.4 Voda

Technologicky vodu rozdělujeme na **záměsovou** (dávkovanou při míšení čerstvého betonu) a na **ošetřovací** (voda dodávaná po zatuhnutí betonu po několik dnů pro udržení betonu ve vlhkém stavu). Oba druhy vody musí vyhovovat kvalitativním požadavkům. Vhodnost vody pro výrobu betonu obecně závisí na jejím zdroji a z toho vyplývá i použitelnost. Zdroje vody mohou být:

- pitná voda je použitelná bez jejího zkoušení,

- **recyklovaná voda**, používaná v uzavřeném technologickém cyklu při výrobě transportbetonu běžně vyhovuje, denně je třeba měřit její objemovou hmotnost, která má být do 1010 kg.m⁻³. Vyšší objemová hmotnost ukazuje na vyšší podíl pevných látek, které v betonu nemají překročit podíl 1 % z hmotnosti kameniva. Při dávkce recyklované vody 100 litrů na 1 m³ betonu a objemové hmotnosti vody 1050 kg.m⁻³ to je 9 kg a při 1100 kg.m⁻³ 17 kg. Chemické složení této vody se hodnotí týdně po dobu prvního měsíce používání, později jen jednou měsíčně. Pro stupně vlivu prostředí XF1 – XF4 (působení mrazu) nelze použít recyklovanou vodu jako záměsovou.

- přírodní podzemní a povrchová voda musí být vyzkoušena před jejím prvním použitím.

- průmyslovou odpadní vodu lze použít, ale musí splňovat kriteria, analyza se provede před prvním jejím použitím a potom pravidelně během používání, tak často, jak to vyžadují proměnné její vlastnosti,

- mořská voda je použitelná pro prostý beton, ale není vhodná pro železový a předpjatý beton (hlavním determinujícím faktorem je celkový obsah iontů Cl⁻ v betonu, tj. součet obsahu chloridových iontů ve vodě, v cementu a v kamenivu, který nesmí překročit požadovanou hodnotu),

- splašková voda je nepoužitelná.

Požadavky na kvalitu vody a její zkoušení jsou uvedeny v předběžné evropské normě prEN 1008:1993 Specifikace a zkoušení, která dosud není zahrnuta do soustavy ČSN.

Kontrolní otázka

Jaké jsou možnosti a podmínky používání zdrojů vod do betonu?



2.4 Přísady

Moderní technologie betonu se orientuje na využívání těchto přísad a často se hovoří o “chemizaci technologie betonu“. ČSN EN 934-2 Přísady do betonu, malty a injektážní malty. Část 2. Přísady do betonu - definice, specifikace a kriteria shody. Tato norma uvádí **typy přísad**:

- plastifikační (redukující vodu),

- superplastifikační (velmi redukující vodu),
- stabilizační (zadržující vodu),
- provzdušňující,
- urychlující tuhnutí cementu,
- urychlující tvrdnutí cementu,
- zpomalující tuhnutí,
- hydrofobizační (odpužující vodu).

Výčet lze doplnit ještě o přísady: plynotvorné, pěnotvorné, odpěňovací, expanzní, adhezní, protikorozní a biocidní. Dále jsou normovány ČSN EN 934-3 Přísady do zdící malty, ČSN EN 934-4 Přísady do injektáží malty pro přepínací kabely, ČSN EN 934-5 Přísady do stříkaného betonu, ČSN EN 934-6 Odběr vzorků, kontrola shody a hodnocení shody.

Přísady především působí na cementovou suspenzi a jejich působení je závislé na druhu cementu. Vyšší měrný povrch cementu vytváří větší reakční plochu a tím usnadňuje chemickou a případně fyzikálně-chemickou reakci. Naproti tomu však zrna cementu snadněji agregují, flokulují. Na účinnost přísad má vliv mineralogické složení, zejména obsah alkálií, C_3A , $CaSO_4$ a minerálů strusky, popílku, pucolánů (na př. strusky vyžadují silné alkalické prostředí pro vybuzení hydraulicity), vyšší obsah $CaSO_4$ ovlivňuje rozpustnost slínekových minerálů a tvorbu trisulfátu (ettringitu) v počátečním stadiu tuhnutí cementu. Rovněž koncentrace přísady, vztažená na hmotnost cementu, ovlivňuje chování a reakci se zrny cementu. Minimální dávka přísady je 2 g.kg^{-1} a maximální je 50 g.kg^{-1} cementu.

2.4.1 Fyzikálně chemické procesy působení chemických přísad

Kinetika rozpouštění a difúze. Rozpouštění minerálů v cementu je charakterizováno procesem difúze (kinetika) a chemické rovnováhy reagujících látek. Rozpustností rozumíme maximální možnou koncentraci, která odpovídá nasycení roztoku v poměru k cementu. Rozpouštění základních fází slínku je uvedeno v tab.9. a tyto monominerální látky se svým chováním odlišují od polyminerálního cementu.

Smáčení, solvatace, dispergace a flokulace. Jsou procesy, které se odehrávají na rozhraní fází, na povrchu zrn cementu ve styku s vodou, přesněji roztokem. Smáčení a solvatace (vytvoření vodní obálky na zrnech cementu) povrchu dispergovaných částic nastane, roztírá-li se kapalina na povrchu tuhých částic.

Odlučování vody (bleeding a nevhodný český překlad krvácení) nastává v cementové suspenzi (zejména v čerstvém betonu) při přebytku vody a celý proces způsobuje rozměšování suspenze a je nežádoucí. Největší význam má objem vody v suspenzi a měrného povrchu částic v suspenzi (čím větší povrch, tím menší odlučivost vody).

Dispergace (deflokulace) zrn cementu je závislá na vytvoření dostatečně tlusté solvatační obálky. Solvatační obálka, pokud je dostatečně velká, vytváří jakousi ochrannou prostorovou bariéru proti flokulaci. Nastává změna elektrické

dvojrstvy, zvyšuje se záporný ζ -potenciál. K flokulaci dochází tehdy, jestliže se zkrátí vzdálenost mezi dispergovanými částicemi pod určitou kritickou hodnotu. Solvatované obálky na zrnech cementu zajišťují soudržnost suspenze, tj. způsobují odpor vnějším silám a také zabezpečují fluiditu (tekutost = zvrtná hodnota viskozity) suspenze. Efekt spolupůsobení částic je závislý na velikosti částic d a jejich disperzity $D = d^{-1}$:

- mechanické síly působí při velikosti částic $d > 1 \text{ mm}$,
- kapilární síly vyvolávají soudržnost v rozmezí velikosti zrn od 10^{-3} do 10^{-4} m , kapilární síly jsou v podstatě povrchovým napětím, které působí v rovině povrchu vždy takovým směrem, že klade odpor všem snahám zvětšit plochu povrchu,
- největší flokulaci mají částice velikosti od 10^{-4} do $2 \cdot 10^{-7} \text{ m}$, tyto částice nejvíce ovlivňují soudržnost suspenze,
- koloidy velikosti $d < 2 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ se nejvíce uplatňují při zvyšování fluidity suspenze.

Elektrostatické síly chemických látek v kapalném prostředí jsou vysvětlením chování některých přísad, zejména přísad, které snižují viskozitu cementové suspenze. Elektrická orientace (dipólový moment molekuly vody) a celkový tlak vody, vznikající v zóně působení molekulárních sil, vede k tomu, že voda v adsorbované obálce je nepohyblivá a má některé vlastnosti tuhé látky - pružnost, pevnost a snížený bod tání. Voda ve vrstvě 90 nm vykazuje modul pružnosti 0,19 Pa. Se vzdáleností od povrchu tuhé látky se snižuje působení molekulárních sil. Tloušťka vrstvy orientovaných molekul vody, která ztrácí vlastnosti kapaliny, bývá v průměru 0,15 μm . Na hranici orientované vody vzniká ϕ -potenciál (termodynamický, úplný potenciál) a v difúzní dvojrstvě pak **elektrokinetický ζ -potenciál**, který má významný vliv na stabilitu koloidů (obr.8.). Hodnota zeta-potenciálu (ζ -potenciálu) je závislá na druhu tuhé částice a na vlastnostech kapaliny - vody. Na povrchu tuhých látek se adsorbují ionty Ca^{2+} a tak se vytváří elektrický náboj, formuje se dvojrstva s elektrokinetickým ζ -potenciálem. ζ -potenciál je důsledkem adsorpce a chemisorpce na tuhých částicích a vytvořený záporný náboj vede k odpuzování částic. Elektrostatické chování plastifikačních přísad nevysvětluje fyzikálně chemické působení nových typů superplastifikátorů na bázi akrylátových polymerů a polyhydroxylátů, které vykazují relativně malý ζ -potenciál a vyšší podíl adsorpce polymeru na povrchu zrn cementu. Rozdílná struktura makromolekuly způsobuje oddalování částic cementu, sulfonovaný naftalenformaldehydový (SNF) vytváří elektrostatické pole a hydroxylátový polymer (PC) disperguje částice dlouhým konjugovaným řetězcem. Hovoří se o sférickém efektu částic hydroxylátového polymeru. Aniontová skupina $-\text{COO}^-$ se adsorbuje na povrchu částic a reagují s kationy na povrchu (Ca^{2+} , Al^{3+} aj.) za tvorby komplexních sloučenin, postranní řetězce jsou orientovány do vodného roztoku, vytváří tak prostorovou překážku mezi zrny cementu, způsobují sférické bránění. Část polykarboxylátu (asi 20 až do 80 %) se neadsorbuje.

Povrchově aktivní látky (tenzidy) snižují povrchové napětí vody. Při 20 °C má voda povrchové napětí 72,8 $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$, cementová suspenze 60 - 70 $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$, tato suspenze s plastifikátorem 50 - 57 $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ a se superplastifikátorem jen 40 $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$. Povrchově aktivní látky jsou chemické sloučeniny, jejichž molekula je

tvořena polární hydrofilní částí (-COOH, -SO₃H, -NH₂ a j.) a hydrofobní, nepolární částí (nazývá se také lipofilní částí), kterou představuje alifatický uhlíkatý řetězec s 10 až 18 atomy uhlíku. Tenzidy se hodnotí hydrofilní - lipofilní rovnováhou, t.j. poměrem polární (hydrofilní) části k lipofilní (hydrofobní, nepolární), označovanou HLB, která má hodnotu od 1 do 40 podle disperzity sloučeniny ve vodě. Podle HLB rozdělujeme povrchově aktivní látky na málo dispergované, vesměs hydrofobní s HLB od 1 do 4, látky dobře dispergované s HLB od 9 do 12 a na látky velmi dispergované, tvořící ve vodě téměř čirý roztok a mající HLB > 12. Zvláštností tenzidů je schopnost adsorpce na povrchu tuhých látek a tak vytvářet prostorovou koagulační strukturu.

Pro zkoušení přísad do betonu, malt a injektážních malt platí normy řady ČSN EN 480 Metody zkoušení. Norma je rozdělena na tyto části:

- 480-1 Referenční beton a malta prozkoušení
- 480-2 Stanovení doby tuhnutí
- 480-4 Stanovení odlučování vody v betonu
- 480-5 Stanovení kapilární absorpce
- 480-6 Infračervená analýza
- 480-7 Stanovení hustoty kapalné přísady.
- 480-8 Stanovení obsahu sušiny
- 480-9 Stanovení pH.
- 480-10 Stanovení obsahu ve vodě rozpustných chloridů
- 480-11 Stanovení charakteristiky vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu
- 480-12 Stanovení obsahu alkálií v přísadách.

Pro zkoušení vlastností přísad a jejich účinnosti se používají **referenční**, definované složky, malta a beton.

2.4.2 Plastifikátory a superplastifikátory

Moderní betonářská technologie vyžaduje pravidelné používání těchto přísad. Používají se s následujícími záměry:

- 1 zlepšování zpracovatelnosti čerstvého betonu a tím omezení použití intenzivní vibrace při zhutňování betonu,
- 2 snížení množství záměsové vody a tím redukování vodního součinitele, tak se zvyšuje pevnost a trvanlivost betonu,
- 3 snížení množství vody i cementu a tak při dobré zpracovatelnosti je předpoklad snížení dotvarování, smrštění.

Plastifikační přísady redukují potřebné množství vody pro dosažení stejné zpracovatelnosti čerstvého betonu. Superplastifikačními přísadami jsou látky, které výrazně redukují potřebné množství vody při stejné zpracovatelnosti čerstvého betonu.

Kromě obecných požadavků musí být plastifikační přísadou sníženo množství vody o více jak 5 % při stejné konzistenci stanovené sednutím nebo rozlitím a u superplastifikátoru o více jak 12 %. Většina superplastifikačních přísad redu-

kuje množství alespoň o 30 %, při dlouhodobém zachování zpracovatelnosti. Pevnost v tlaku přidáním plastifikační přísady má vzrůst za 7 a 28 dní nejméně na 110 % proti referenčnímu betonu. Superplastifikátorem v důsledku redukce množství vody při stejné zpracovatelnosti má vzrůst pevnost v tlaku betonu za 1 den nejméně na 140 % a za 28 dní nejméně na 115 % proti referenčnímu betonu. Konzistence čerstvého betonu se superplastifikátorem se nesmí za 30 min po přidání přísady změnit proti původnímu stavu a vzrůst konzistence proti referenčnímu betonu přidáním superplastifikátoru má být o 160 mm (rozlitím proti 350 ± 20 mm) nebo o 120 mm (sednutím proti 30 ± 10 mm).

Z chemického hlediska se používají tyto skupiny organických sloučenin:

LS - soli nebo deriváty ligninsulfonanů,

PC - polykarboxyláty. (PCE – polykarboxylether),

SNF - sulfonované naftalenformaldehydové kondenzáty,

SMF - sulfonované melaminformaldehydové kondenzáty,

CAE - kopolymery karboxyakrylové kyseliny s akrylesterem,

Chemické vzorce jsou uvedeny na obr.13. a infračervená spektra pro posouzení obsahu složení přísady na obr.14.

Povrchově aktivní jsou lignosulfonáty a naftalensulfonáty. Čerstvý beton dobře plastifikují, ale mohou provzdušňovat beton. Lignosulfonáty jsou odpadními látkami z celulózek, proto jsou laciné. Dispergující účinek mají melaminové pryskyřice, které jsou vhodné pro provzdušňované betony, nezpomalují hydrataci a při vyšších dávkách dobře plastifikují. SMF zpomaluje hydrataci C₃A a přechod trisulfátu (ettringitu) na monosulfát, avšak zvyšuje stupeň hydratace cementu.

Běžné plastifikační přísady (sulfonované deriváty) vykazují **zhoršování zpracovatelnosti s postupující dobou** od zamíchání přísady. Snížení hodnoty sednutí kužele čerstvého betonu je poměrně značné, jak dokumentuje obr.15. Příklad na bázi SNF sníží sednutí kužele za 1 hodinu více než na polovinu původní hodnoty v čase zamíchání. Zcela odlišně se chová přísada na bázi CAE. K odstranění tohoto nedostatku se doporučuje přidávat přísadu (SMF, SNF) asi za 1 minutu po zamíchání čerstvého betonu. Sednutí kužele se opožděným dávkováním výrazně zvýší ze 100 mm asi na 220 mm. Hlavními přísadami používanými nyní a v budoucnu budou **polykarboxyláty**, u nichž lze měnit strukturu a tím regulovat jejich vlastnosti podle jejich aplikace. Vyznačují se nižšími dávkami, zpravidla delší dobou působení, ale jsou nákladnější. Struktura molekuly polymeru rozhoduje o vlastnostech přísady, které se navzájem liší a různě ovlivňují reologické chování cementového tmele, ale také ovlivňují dobu tuhnutí i morfologii hydratačních produktů. K hlavním znakům struktury polykarboxylátů patří:

- Druh polymeru, jenž tvoří hlavní řetězec (např. kyselina metakrylová, maleinová).
- Délka postranního řetězce, resp. jeho molekulová hmotnost.
- Počet funkčních skupin (poměr aniontových skupin molekuly k její neutrální části, tj. poměr kyselina / ester).
- Stupeň polymerizace hlavního řetězce.
- Čistota polymeru.

- Molekulová hmotnost polymeru.

Vyššího plastifikačního účinku je dosaženo u polykarboxylátů s delším postranním řetězcem, s nižším stupněm jeho polymerizace a s vyšším obsahem SO_3^{2-} . Sníží-li se adsorpce přísady na povrchu cementového zrna, prodlouží se plastifikační účinek a oddálí se počátek a doba tuhnutí. Čím je postranní řetězec polakarboxylátu delší, tím je kratší doba tuhnutí i doba působení přísady. Molekula PC adsorbovaná na povrchu zrn cementu způsobuje ztuhnutí cementového tmele.

Tab.8 Vliv struktury molekuly polykarboxylátu na reologii cementového tmele.

	Délka kmenového řetězce	Délka pobočného řetězce	Počet pobočných řetězců
Menší ztuhnutí a krátká doba zpracovatelnosti	dlouhý	krátký	velký
Vysoké ztuhnutí	krátký	dlouhý	malý
Dlouhá doba zpracovatelnosti	kratší	dlouhý	velký

Superplastifikátory se složením upravují pro výrobu prefabrikátů (nízký vodní součinitel, rychlý nárůst počátečních pevností bez působení tepla), pro transportbeton (prodloužená doba zpracování), pro vysokohodnotné betony (výrazné snížení vodního součinitele) a samozhutňující betony (vysoká tekutost čerstvého betonu a vyloučení segregace). Na spolehlivou funkci superplastifikátoru působí řada činitelů a proto je nutné odzkoušení jeho vlivu na příslušné složení betonu. Vedle struktury a složení superplastifikátoru ovlivňuje chování složení a vlastnosti složek betonu, měrný povrch jednotlivých složek, přítomnost některých minoritních složek (např. mlecí přísady v cementárně), jako oxidy kovů a alkálií v cementu.

Doporučované dávkování je 0,4 až 3 % hmotnosti cementu podle konzistence a užití betonu. Obsah sušiny bývá od 20 do 40 %. Je proto nutné experimentálně ověřit vhodnost příslušného druhu přísady.

Úkol

Vypočítejte předpokládané zvýšení pevnosti betonu v tlaku použitím plastifikátoru. Při stejné hodnotě konzistence S2 (sednutí kužele 60 mm) bylo sníženo množství vody o 10 % proti čerstvému betonu, kde nebyl použit plastifikátor. Složení betonu: 320 kg.m⁻³ CEM 32,5, vodní součinitel $w = 0,55$. Pro výpočet použijeme Bolomeyova vztahu.



$$R_B = a \cdot R_C \cdot \left(\frac{m_C}{m_V} - 0,5 \right) = 0,60 \cdot 32,5 \cdot \left(\frac{320}{0,55 \cdot 320} - 0,5 \right) = 25,7$$

MPa

Beton

s

plastifikátorem:

$$R_B = 0,60 \cdot 32,5 \cdot \left(\frac{320}{0,9 \cdot 0,55 \cdot 320} - 0,5 \right) = 29,6$$

MPa

$$\text{Zvýšení pevnosti betonu o } 100 \cdot \frac{29,6 - 25,7}{25,7} = 15,2 \%$$

2.4.3 Provzdušňovací přísady

Látky, které po přidání během míšení čerstvého betonu, vytváří ve velkém počtu uzavřené vzduchové póry jemně distribuované v betonu. Již před padesáti léty se zjistilo, že betony obsahující jemně rozptýlené vzduchové póry lépe odolávají působení mrazu a agresivitě mořské vody. Tyto póry mění pórovitou strukturu cementového kamene, porušují síť kapilár. Vzduch uzavřený v pórech zlepšuje chování betonu proti účinkům ledu vznikajícího zmrznutím vody v kapilárách i proti růstu krystalů chemických solí (rozmrazovací soli, mořská voda). Provzdušněním vytvořené vzduchové póry jsou expansním prostorem pro zvětšující se objem krystalů ledu a solí, póry snižují hydrostatický tlak v pórovité struktuře, zvyšují propustnost betonu. Kriteřiem účinnosti provzdušňovací přísady na trvanlivost betonu je vzdálenost pórů od sebe navzájem, označovaný jako součinitel prostorového rozložení vzduchových pórů L , který má být menší než 0,250 mm (spacing factor) a velikost vytvořených pórů bývá o průměru 25 až 300 μm (celý rozsah pórů je od 10 μm do 1 mm). Účinnost provzdušňovací přísady má být prokázána součinitelem prostorového rozložení pórů (spacing faktor AF) $L \leq 0,2$ mm a obsahem mikropórů 300 $\mu\text{m} \geq 1,5$ %. **Součinitel prostorového rozložení vzduchových pórů L** je vypočítaný parametr vyjadřující maximální vzdálenost jakéhokoliv bodu v cementovém tmelu od okraje vzduchového póru měřenou v cementovém tmelu v mm.

Většinou se používají tenzidy, jako mýdla přírodních pryskyřic, syntetické neionogenní a anionogenní tenzidy (např. alkylnpolyglykoléter, alkylarylnpolyglykoléter, alkylsulfát) a sloučeniny

Provzdušnění vyvolávají i pěnotvorné přísady a některé plastifikační přísady. Odpěnění se provádí nepatrnou dávkou (do 0,5 % hmotnosti přísady) etanolu nebo tributylfosfátu nebo organo-křemičité sloučeniny. Odpěňovače jsou povrchově aktivní látky, přidané v nepatrném přebytku, takže lamela pěny ztratí svoji stabilitu.

2.4.4 Stabilizační a těsnící přísady

Stabilizační přísady redukují odmísení vody v suspenzi (bleeding), které nastává sedimentací tuhých částic. Kromě obecných požadavků na stabilizační přísady, požaduje se také, aby pevnost betonu s přísadou klesla nejvíce na 80% pevnosti betonu bez přísady a současně musí být dosaženo nejméně 50 % redukce odlučování vody.

Hydrofobní přísady jsou chemické látky, které omezují kapilární kondenzaci ve ztvrdlém betonu. Posuzování těchto přísad, vedle obecných požadavků, se děje podle jednoho ze dvou kriterií kapilární kondenzace.

Mezi hydrofobní přísady lze také zařadit **těsnící přísady**, které zvyšují hutnost cementového kamene, snižují jeho pórovitost, zejména objem makropórů. V průběhu hydratace vytváří nerozpustné sloučeniny, které zmenšují průřez kapilár, případně kapiláry zcela zaplní. Pórovitou strukturu cementového kamene

také utěsňují provzdušňující přísady tím, že přerušují souvislé, otevřené kapiláry a tak zamezují vztlínání a nasáknutí vody.

2.4.5 Přísady urychlující tuhnutí a tvrdnutí cementu

Tyto přísady rozdělujeme do dvou skupin, na urychlovače tuhnutí (zkracují dobu přechodu čerstvého betonu z plastického do tuhého stavu) a na urychlovače tvrdnutí (urychlují vývoj počátečních pevností betonu), které mohou a nemusí urychlovat tuhnutí betonu. Vedle obecných požadavků musí urychlovače také splňovat další požadavky dle ČSN EN 934.

1. Urychlovače tuhnutí nesmí způsobit pokles pevnosti v tlaku za 28 dní pod 80 % pevnosti referenčního betonu a za 90 dnů musí být pevnost v tlaku nejméně stejná, jako 28 denní pevnost referenčního betonu. Doba tuhnutí má být delší než 30 min při 20 °C a při +5 °C je doba tuhnutí do 60 % tuhnutí referenčního betonu.

2. Urychlovače tvrdnutí se posuzují podle pevnosti v tlaku a požaduje se minimálně 120 % pevnosti referenčního betonu za 24 hod a nejméně 90 % pevnosti, kterou referenční beton dosáhne za 28 dní, dále musí urychlovač za 48 hod při + 5 °C zajistit nejméně 130 % pevnosti referenčního betonu, který tvrdne v normových podmínkách.

Dřívější, velmi běžnou přísadou urychlující kinetiku hydratace cementu byl chlorid vápenatý anebo různé chloridové urychlovače. V současné době není jejich používání dovoleno, neboť ČSN EN 206-1 omezuje obsah chloridových iontů v betonu, které jsou velmi vážnou hrozbou koroze oceli v betonu. Platí následující limity v obsahu chloridových iontů vztaženo na hmotnost cementu:

- v prostém betonu max. 1,0 %,
- v železobetonu max. 0,4 %,
- v předpjatém betonu max. 0,2 %.

Hydrataci cementu dále urychlují alkalické urychlovače, zejména vodní sklo, uhličitan sodný nebo draselný. Alkalické urychlovače působí jako budiče latentní hydraulicity a jsou proto vhodné pro urychlování tvrdnutí směsných cementů, ale vyžadují vyšší dávky. Dalšími urychlovači jsou dusitany a dusičnany sodné, draselné i vápenaté, alumináty, amorfni $\text{Al}(\text{OH})_3$ a sloučeniny obsahující radikál rhodanid (-SCN). Z organických látek lze mezi urychlovače zařadit: trietanolamin (dávka 0,5 % CEM, vyšší dávka prodlužuje dobu tuhnutí), močovina (z betonu se však uvolňuje čpavek), mravenčan vápenatý. Nedoporučuje se používat sírany Na a K, neboť snižují dlouhodobé pevnosti. Většina těchto přísad je doprovázena nežádoucími synergickými efekty.

Mezi přísady urychlující tvrdnutí cementu zařazujeme také **protizmrazovací přísady**, které zamezují při záporných teplotách zmrznutí vody v pórech cementového kamene. Tyto látky snižují bod tuhnutí vody (přechod kapaliny v tuhoun látku - led) ve smyslu Roaltova zákona o snížení parciálního tlaku vodních par nad roztokem proti parciálnímu tlaku par nad vodní hladinou.

2.4.6 Retardační přísady

Přísady zpomalující tuhnutí cementu prodlužují dobu přechodu čerstvého betonu z plastického stavu do stavu tuhé látky. Obsah chloridů je v těchto látkách omezen do 0,1 %, tyto látky mohou provzdušňovat beton nejvýše do 2 % a především pevnost v tlaku betonu za 7 dní musí být vyšší jak 80 % a za 28 dní vyšší jak 90 % pevnosti v tlaku referenčního betonu. Počátek doby tuhnutí má být o více jak 90 minut delší a konec tuhnutí nejvíce o 360 minut delší než referenční čerstvý beton. Retardační přísady se používají k prodloužení doby manipulace s čerstvým betonem. Pomalé tuhnutí cementu omezuje vznik trhlinek a obvykle je 28 denní pevnost betonu v tlaku vyšší, než betonu bez přísady, pokud se nepřekročí kritická koncentrace přísady. Překročí-li se kritická dávka některých retarderů může dojít k úplnému zastavení hydratace cementu. Zvláště účinný je **cukr** (sacharóza, rafinóza), který tvoří s ionty Ca^{2+} sacharát vápenatý. Cukr je dobře rozpustný a je schopen vázat všechny uvolňovaný Ca^{2+} a omezovat tuhnutí cementu tím, že znemožňuje vytvoření přesyceného roztoku $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Retardačně také působí látky: humínové kyseliny, škrob, celulóza, glukóza, glycerin, a ionty: Mg^{2+} , Pb^{2+} , Cu^+ , Cd^{2+} , BO_3^- , SiF_6^{2-} , fosfáty (tetrakalciumfosfát). Retardační přísady často tvoří monomolekulární vrstvu na povrchu zrn cementu, proto postačuje velmi malé dávkování přísady, asi do 0,5 % hmotnosti cementu.

Kontrolní otázky

Co jsou tenzidy a jak se projevují v cementovém tmelu?

Které sloučeniny jsou hlavním činitelem v plastifikačních a ztekucujících přísadách?

Popište chování superplastifikátorů na bázi polykarboxylátů.

Proč provzdušňujeme beton a jaká je velikost pórů a co je součinitel prostorového rozložení vzduchových pórů ?

Které sloučeniny se nesmí používat jako přísady do betonu a jak je jejich obsah v betonu limitován v různě vyztuženém betonu ?

Která sloučenina nejvýrazněji zpomaluje tuhnutí a tvrdnutí cementu ?

Vyjmenujte všechny druhy přísad a jejich funkce v betonu.

Které vlastnosti přísad zkusíme a jak hodnotíme jejich účinnost ?



2.5 Příměsi a vyztužování betonu

Definice

Příměsi jsou většinou práškovité látky přidávané do čerstvého betonu za účelem zlepšení některých vlastností nebo k docílení zvláštních vlastností.



Dělí se na dva typy: inertní příměsi (typ I) a pucolány nebo latentně hydraulické látky (typ II). Dále k příměsím řadíme barevné pigmenty a organické polymery, přidávané do polymercementových betonů (PCC - Polymer Cement

Concrete). Příměsi se přidávají v takovém množství, které nepříznivě neovlivní vlastnosti betonu, zejména jeho trvanlivost nebo nezpůsobí korozi ocele.

2.5.1 Latentní hydraulická

Definice

Hydraulická aktivita je schopnost látky tvrdnout ve vodním prostředí za normální teploty. Latentní hydraulická (pucolánová vlastnost) je schopnost látky reakcí s $\text{Ca}(\text{OH})_2$ za normální teploty ve vodném prostředí tvrdnout.



Podobné vlastnosti mají pucolánové látky, které se vyznačují vysokým obsahem aktivního SiO_2 . Podmínkou chemické reakce je alkalické prostředí vytvářené v roztoku i jinými chemickými sloučeninami, které nazýváme budiče hydraulicity. Ve svých technologických důsledcích je pucolanita i latentní hydraulická totožná, rozdíly jsou pouze v obsahu rozdílných minerálů. Latentně hydraulické příměsi se přidávají jako složky do cementu při mletí slinku nebo do čerstvého betonu při jeho míchání. Z chemického hlediska je lze rozdělit do tří skupin:

1. Látky obsahující amorfni SiO_2 , v množství nad 47 %, rozpustný v kyselém i v alkalickém prostředí, vykazují pucolánové vlastnosti. Patří sem diatomity, opál, křemičité úlety a uměle vyráběné křemičité látky. Opál $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ je s $\text{Ca}(\text{OH})_2$ velmi reaktivní a vytváří ve vodě C-S-H II. Aktivní Al_2O_3 tvoří ve vodě s $\text{Ca}(\text{OH})_2$ stabilní C_3AH_6 .

2. Pálené hlíny, popílky, struska vykazují latentně hydraulické vlastnosti. Rozemletím málo pálených jílových zemin (pálených nejvýše do teploty 600 - 800 °C), které obsahují amorfni metakaolinit $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, reakcí s $\text{Ca}(\text{OH})_2$ vznikají C-S-H II a C-S-H I. Tyto látky obsahují od 16 % do 53 % CaO. Jako budiče (iniciatory) hydraulicity lze použít: cement, vápno, NaOH, CaSO_4 , Na_2SO_4 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$. Popílky vykazují tím větší reaktivitu, čím více obsahují SiO_2 ve sklovité fázi a málo mullitu $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$. Reaktivitu negativně ovlivňuje větší množství spalitelných látek (= ztráta žháním). Fázové složení popílků v ČR bývá: 4,5 - 23 % $\beta\text{-SiO}_2$, 3,0 - 27 % mullit, 3 - 7 % hematit Fe_2O_3 , 0,3 - 3 % rutíl TiO_2 (anatas), CaO do 1 %, cristobalit 0,6 %, uhlík 0,6 - 2,5 % a skla bývá od 63 do 71 %.

3. Látky obsahující sopečné sklo vzniklé rychlým ochlazením magmatu. Jsou to právě pucolány (podle městečka Pozzuoli na úpatí Vesuvu, kde těžili již Římané před naším letopočtem), jako tufy, trasy, sopečné sklo. Látky sopečného původu (rýnský tras, bavorský a římský tras, neapolský tras, řecký santorin) obsahují 45 - 70 % SiO_2 , 10 - 20 % Al_2O_3 , 3 - 10 % Fe_2O_3 , 2 - 12 % CaO, do 2 % MgO, 3 - 10 % $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$. Vulkanické horniny většinou obsahují 50 - 80 % amorfni sklovité fáze a 50 - 20 % krystalické fáze. Velmi reaktivní jsou vulkanická skla a zeolity (vodnaté hlinito-silikáty, zejména analcin $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

Chemické složení látek s hydraulickými vlastnostmi znázornil Rankin v potrojném diagramu CaO - SiO_2 - Al_2O_3 (Fe_2O_3), kde jsou rozdělené látky na:

- hydraulické s obsahem CaO > 53 % (cementy),

- pucolánové látky s obsahem amorfního, aktivního $\text{SiO}_2 > 47 \%$,
- latentně hydraulické látky s obsahem CaO od 16% do 53% .

Hydraulické vlastnosti se také hodnotí podle modulů, tj. poměry obsahu jednotlivých oxidů

$$\frac{C}{S + A} \geq 1; \frac{C}{S} > 1; \frac{S}{C + M} < 1 \quad \text{Symboly: C - CaO, M - MgO, S - SiO}_2, \\ \text{A - Al}_2\text{O}_3.$$

Podmínkou aktivity těchto látek je velký měrný povrch, který bývá přibližně stejný jako měrný povrch cementu. Velmi reaktivní křemičité látky však mají měrný povrch i více jako $15000 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$.

2.5.2 Křemičité úlety, mikrosilika

Křemičité úlety jsou odpadem některých hutnických provozů (výroba ferrosilicia) nebo jsou vyráběny uměle s označením mikrosilika, případně nanosilika. Jejich název napovídá o velikosti částic křemene. Jejich užití v betonu je známo již asi 70 roků. Vyznačují se mimořádně velkým měrným povrchem a dobrými pucolánovými vlastnostmi. Obsahují $80 - 98 \%$ amorfního SiO_2 ve tvaru kulatých zrn o průměru asi $(1 - 2) \cdot 10^{-7} \text{ m}$, při měrném povrchu 15000 až $25000 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ a měrné hmotnosti $2120 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Požaduje se ztráta žíháním do 4% . Křemičité látky jsou aktivní příměsí do cementu i betonu, mají charakter pucolánových přísad (typ II). Zlepšují vlastnosti čerstvého betonu, jako je odměsení, bleeding, čerpatelnost, avšak zvyšují potřebné množství vody asi o 1 litr na 1 kg křemičitých látek pro dosažení stejné zpracovatelnosti. Platí EN 13263.

Tab.10. Vlastnosti mikrosiliky a nanosiliky srovnáním s cementem a s popílkem

	Cement	Popílek	Mikrosilika	Nanosilika
SiO_2 [%]	18 – 24	40 – 60	80 – 99	100
Al_2O_3 [%]	4 – 8	23 – 24	0,5 – 3,0	-
Fe_2O_3 [%]	1 – 5	2 – 16	0,1 – 5,0	-
CaO [%]	61 – 69	0,6 – 8,5	0,7 – 2,5	-
Střední průměr zrn [μm]	10 – 20	10 – 30	0,1 – 0,3	0,007 – 0,04
Měrný povrch [$\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$]	0,3 – 0,6	0,3 – 0,8	16 – 22	30 - 300
Měrná hmotnost [$\text{kg} \cdot \text{dm}^{-3}$]	3,1 – 3,13	2,15 – 2,45	2,22 – 2,40	2,20

Mikrosilika v betonu vyplňuje prostor mezi zrny cementu a zhutňuje cementový kámen a také tím, že zpevňuje kontaktní zónu na povrchu zrn kameniva (omezení stěnového efektu a snížení pórovitosti na povrchu betonu). Pucolánovou reakcí snižuje pH tmele podle reakce $\text{SiO}_2 + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CSH}$ fáze, ale maximální dávka mikrosiliky je omezena poměrem k hmotnosti cementu na hodnotu $\leq 0,11$, aby nedošlo ke snížení pH cementového tmele a tím k depasivaci ocelové výztuže. Roztok $\text{Ca}(\text{OH})_2$ má $\text{pH} \approx 12,5$ a ocel je pasivo-

vána do pH = 11,5. Příměs mikrosiliky ovlivňuje pórovitou strukturu a tím také zvyšuje trvanlivost betonu, zvýšením odolnosti proti mrazu a působení rozmrazovacích látek, omezením vlivu chloridových iontů na korozi ocelové výztuže, snížením roztažnosti při alkalicko křemičité reakci s kamenivem a omezením hloubky a rychlosti karbonatace betonu.

Optimální dávka je dána účelem požití. Obvykle se uvádí dávka 5 až 10% hmotnosti cementu. Dávka nemá překročit 11 % hmotnosti cementu a jsou komerčně dodávány v práškovém i v kapalném stavu. Pro zvýšení mechanických vlastností lze dávkovat 5 – 10 % hmotnosti cementu a prozvučení trvanlivosti asi 8 – 11 % hmotnosti cementu.

Příměs velmi jemných částic vyžaduje pro zachování stejné konzistence zvýšit množství vody a při respektování požadavku na minimální množství cementu lze použít upravený vodní součinitel w_c se vypočítá z rovnice (tzv. koncepce k – hodnoty podle ČSN EN 206-1)

$$w_c = \frac{m_v}{m_c + k \cdot m_p}$$

m_c , m_v , m_p – hmotnosti cementu, vody a příměsi (mikrosiliky) v kg na m^3 betonu,

$k = 2,0$ s výjimkou pro stupně vlivu prostředí XC a XF, kdy $k = 1,0$.

Množství (cement + k x mikrosilika) nesmí být menší než minimální množství cementu požadovaného podle tab.32 a při $m_c \leq 300 \text{ kg.m}^{-3}$ nesmí být snížen max. o 30 kg.m^{-3}

2.5.3 Létavý popílek

Popílek vzniká spalováním uhlí v práškovém stavu a je zachycován v odlučovačích. V energetice představuje značný objem odpadu a z ekologického hlediska je žádoucí jeho využívání. Popílký, jako každý odpad, mají proměnlivé chemické, mineralogické i granulometrické složení podle druhu spalovaného uhlí, lokality (technické řešení spalovacího procesu) a způsobu odlučování z exhalátů. Popílek z černého uhlí má menší variabilitu vlastností a je vhodnější příměsí do betonu, než popílek z hnědého uhlí (v ČR je 80 % popílků z hnědého uhlí). Fluidní spalování uhlí spolu s odsiřováním, kde směsným reakčním produktem je fluidní popel, který představuje směs popela, anhydritu vápenatého, volného vápna a případně i uhličitán vápenatý. Tento fluidní popílek je pro beton nepřijatelný, neboť obsahuje asi 20 % SO_3^{2-} , až 15 % volného reaktivního CaO a někdy až 15 % ztráty žháním.

Popílký bohaté na SiO_2 působí jako pucolány. Pucolanita se projevuje velmi pomalu a je prakticky zjistitelná za 90 dnů a v jistých případech nebyla ukončena ani za 14 let. Černouhelné popílký většinou obsahují skelné kuličky velikostí blízké zrnům cementu, hnědouhelné popílký mají nepravidelný tvar zrn (obr.19.). Samotný hnědouhelný popílek potřebuje pro iniciaci hydratace 18 - 20 % CaO, avšak překročení této hodnoty vyvolá nebezpečí rozpadu.

Popílký mají vyšší pravděpodobnost překročení limitu měrné aktivity, který je stanoven pro stavební látky 150 Bq.kg^{-1} (ČSN uvádí 75 Bq.kg^{-1}). Popílký obsahují podíly prvků těžkých kovů, které vyluhováním se stávají poten-

ciálními nebezpečnými kontaminace spodních vod. Limitní hodnoty jejich obsahu ve výluhu v $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$: 250 Cr, 290 V, 240 Zn, 50 As, 30 Pb a po 10 mg Cd, Ni, Se, Te, Th.

Zrnitost popílků je závislá na použitých odlučovačích, z mechanických odlučovačů je popílek hrubší (zrna větší než 0,09 mm jsou obsaženy nad 20 %, sypná hmotnost je 900 - 1200 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), než z elektrostatických odlučovačů (zrna nad 0,09 mm do 20 %, sypná hmotnost asi 800 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$). Popílků lze použít jako aktivní příměs (typ II) a pak požadované vlastnosti jsou definovány ČSN EN 450 Popílek do betonu - Definice, požadavky a kontrola jakosti. Pokud se použijí jako jemné částice bez pučolánové funkce (typ I) řídí se ustanovením normy pro kamenivo, jako filer (ČSN EN 12620), kde je limitován obsah celkové síry na 1,0 % a obsah rozpustných chloridů pro prostý beton 0,15 %, pro železobeton 0,06 % a pro předpjatý 0,03 %. Propad sítem 0,063 mm popílku typu I se požaduje 70 – 100 %. Aktivní je většinou popílek z černého uhlí nebo z antracitu. Popílek z hnědého uhlí má obsahovat nejvýše 10 % CaO.

Popílek zlepšuje zpracovatelnost čerstvého betonu, ale zvyšuje potřebný vodní součinitel, neboť část vody se spotřebuje k adsorpci na povrchu zrn popílku. Hydraulicky aktivní popílek zvyšuje dlouhodobé pevnosti betonu. Příměs popílku snižuje hloubku karbonatice betonu a reversibilní smrštění.

Maximální množství aktivního popílku (typ II) se omezuje podílem: (popílek / cement) $\leq 0,33$ hmotnosti. Popílek zvyšuje potřebné množství vody. Součet množství cementu a popílku nesmí klesnout pod požadované minimální množství cementu určené podle stupně vlivu prostředí (ČSN EN 206-1).

2.5.4 Jemné podíly tuhých částic

Příměsi jsou práškovité látky omezené velikostí zrn do 0,25 mm, ale vhodnější je omezení velikostí zrn cementu, tj. do 0,125 mm. Do jemných podílů částic v betonu zařazujeme:

- cement,
- podíl jemných zrn kameniva do 0,125 mm, který bývá v kamenivu s $D_{\text{max}} = 16$ mm asi 2 až 4 %, filer,
- hydraulicky aktivní i inaktivní příměsi,
- barevné pigmenty,
- jemné částice obsažené v cementovém kalu, v recyklované vodě.

Uvedené jemné podíly se účastní tvorby cementového kamene, který musí dokonale obalit zrna kameniva a povrch ocelové výztuže. Technologicky je důležitý dostatečný podíl jemných částic pro čerpaný beton, pro samozhutňující beton, pro tenkostěnné konstrukce a vodotěsný beton. Jemné podíly kameniva zvyšují přídržnost k podkladu (na př. ke starému betonu), zvyšují soudržnost čerstvého betonu, ale zvyšují množství vody a tím částečně snižují pevnost betonu a zvyšují jeho smrštění. Proto jsou limitovány max. množstvím dávky do betonu podle velikosti maximálního zrna kameniva. Většinou se používají odpady, buď přímo nebo upravené drcením a mletím (na př. mletá struska do 150 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ betonu).

2.5.5 Barevné pigmenty

Platí ČSN EN 12878 Pigmenty pro vybarvování stavebních materiálů na bázi cementu a vápna. Specifikace a zkušební postupy. K probarvení betonu se používají trvanlivé, anorganické barevné pigmenty. Organické pigmenty sice vytvoří brilantní barevný tón, ale pro svou malou alkalickou a klimatickou stabilitu jsou pro beton nepoužitelné, neboť vyblednou asi za 1 rok. Anorganické pigmenty do betonu mají mít následující vlastnosti:

- barevná stálost ve styku s cementem a na povětrnosti,
- minimální vliv na pevnost betonu a na dobu tuhnutí a tvrdnutí betonu,
- tepelná stálost,
- dobrá krycí schopnost, vyjádřenou granulometrií a omezenou agregací částic,
- minimální obsah rozpustných solí (SO_4^{2-} , Cl^- , SiO_3^{2-}),
- omezený obsah SiO_2 , Al_2O_3 (tyto oxidy znehodnocují barevnost),
- hodnota pH má být vyšší jak 7, ale lze připustit i slabě kyselé,
- dobrá dispergace o velikosti částic 0,1 až 0,2 μm .

Částice často flokulují, vytváří shluky o velikosti 30 až 50 μm a tím se snižuje barevná krycí schopnost pigmentu. Intenzita barvy je závislá na dávce pigmentu, jejichž cena je relativně vysoká (3 - 4 DEM za kg), ale nad 6 - 9 % dávky pigmentu, vztaženo na hmotnost cementu, se již intenzita barvy nezlepšuje. Obvykle se dává do 5 % hmotnosti cementu. Dobrá barevnost betonu se získá použitím bílého cementu a praného, světlého kamenina s vyloučením zrn do 0,01 mm a omezením frakce do 1 mm na 20 %. Důležitá je technologie přípravy čerstvého barevného betonu, který lze připravit dvěma variantami:

1. obě složky cement a pigment dávkujeme v suchém, sypkém stavu do míchačky,

2. pigment rozplavíme ve vodě a vzniklou suspenzi dávkujeme do rozmíchaného čerstvého betonu (tento způsob je vhodnější, neboť umožňuje větší flexibilitu dávkování a vylučuje prašnost).

Ze zkušeností se doporučuje pro červenou barvu syntetický oxid železitý (90 % Fe_2O_3) nebo minerální španělský oxid železitý. Dále se používá syntetický hnědý a černý oxid ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO}$). Jako žluté pigmenty se doporučují syntetické pigmenty: žlutý oxid železitý, nikl-titanivá žluť (Ti, Ni, Sb) O_2 , a chróm-titanová žluť (Ti, Cr, Sb) O_2 . Nesmí se používat žluť chrómová, zinková, barytová a CdS. Z modrých pigmentů $\text{Cr}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ a čistý Cr_2O_3 . Nesmějí se používat zeleně chromová, kobaltová, ultramarinová. se doporučují dihlinitan kobaltnatý CoAl_2O_4 a dihlinitan chróm-kobaltnatý $\text{Co}(\text{Cr, Al})_2\text{O}_4$. Nesmí se používat modř pařížská, berlínská, pruská, manganová. Velmi dobré zelené pigmenty jsou hydrát chrómoxid.

2.5.6 Vyztužování betonu

Beton je konstrukční materiál, relativně křehký, která se vyznačuje nízkou pevností v tahu proti pevnosti v tlaku. Pevnost betonu v tahu je asi 8 % až 10 % pevnosti v tlaku. Všeobecně vyztužujeme látky s malou pevností v tahu a

látky křehké takovými látkami, které mají vysokou pevnost v tahu a tím v konstrukci přebírají převážnou část tahových napětí. Vyztužovat lze povrchově (laminováním) nebo vnitřně. Beton téměř výhradně vyztužujeme vnitřně, ocelovými pruty nebo sítěmi, předpjatou výztuží a také rozptýlenou výztuží ocelovými drátky, skelnými nebo polymerovými i přírodními vlákny. Výztužná látka především přebírá tahová napětí vznikající v konstrukci a pro splnění této funkce platí následující předpoklady:

1. Tažnost výztuže musí být větší než matrice (= betonu), tj. výztuž musí mít vyšší modul pružnosti.
2. Plastická (trvalá) deformace výztuže musí být menší a tažnost při zlomu větší než betonu.
3. Pevnost v tahu výztuže musí být větší než matrice.
4. Soudržnost výztuže a matrice má být co největší.
5. Výztuž nesmí být v matrici korodována.
6. Teplotní roztažnost výztuže a matrice musí být přibližně stejná.

Podmínkou spolupůsobení výztuže a betonu je dobrá jejich soudržnost, která je zajišťována příslušnou kotevní délkou (statické zajištění), profilovaným povrchem výztuže (zajištění úpravou povrchu ocele) a velmi hutným betonem (zajištění technologií betonu).

Vyztužování betonu popisuje a definuje požadavky norma ČSN EN 1992-1-1 Navrhování betonových konstrukcí, část 1.1. Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby.

2.5.6.1 Vlastnosti ocele

Ocel dělíme podle chemického složení na uhlíkatou (obsahuje 0,05 až 1,7 % uhlíku) a legovanou, která obsahuje legující prvky (Mn, Si, Ni, Cr, W, Ti, Mg) v množství, buď do 2,5 % (nizkolegovaná ocel) nebo více jak 10 % (vysokolegovaná). Podle účelu použití dělíme ocel na konstrukční - stavební (obsah uhlíku 0,06 až 2 %, max. obsah fosforu 0,07 % a max. obsah síry 0,06 %), dále na konstrukční - strojní, konstrukční ušlechtilou, nástrojovou a speciální.

Vlastnosti ocele rozdělujeme na málo závislé a nezávislé na chemickém složení. Mechanické vlastnosti jsou závislé na chemickém složení, hlavně na obsahu uhlíku, a také je upravujeme tvářením a tepelným zpracováním.

Závislost napětí - deformace vyjadřuje pracovní diagram ocele, který je rozdílný pro betonářskou ocel tvářenou za tepla a předpínací ocel taženou za studena. Významné vlastnosti: **mez kluzu** f_y je napětí, při němž se tyč začne výrazně prodlužovat, aniž by se zvětšilo napětí; smluvní mez kluzu $f_{y0,2}$ je napětí, které vyvolá trvalou deformaci 0,2 % ; **mez pevnosti** f_t je napětí dané podílem max síly dosažené při zkoušce pevnosti v tahu a původního průřezu zkušební tyče; ϵ_u je poměrné protažení při pevnosti v tahu f_t . Předpínací výztuž je definována pevností v tahu f_p a odpovídající deformací ϵ_u a smluvní mezí pevnosti $f_{p0,1}$ při protažení 0,1 %. **Tažnost** v prostém tahu je rozdělena na vysokou duktilitou H (prakticky ocelové pruty tažené za tepla), kde $\epsilon_u > 5 \%$ a poměr $f_t/f_y > 1,08$ a na normální N (za studena tažené dráty, kde $\epsilon_u > 2,5 \%$ a poměr $f_t/f_y > 1,05$).

Stavební ocele mají obsah uhlíku od 0,1 do 0,55%, mez kluzu 200 až 590 MPa při pevnosti v tahu 270 až 850 MPa. Pro stavební ocele je dále důležitá i **svaři-**

telnost ocele, která je možná při obsahu uhlíku do 0,22% a zaručených hranicích obsahu prvků P, S, N. Ocele s vyšším obsahem uhlíku vyžadují zvláštní tepelné ošetřování před i po svařování. Nízkolegované ocele jsou svařitelné jen při určitém složení. Svařovat předpínací výztuž není dovoleno.

2.5.6.2 Betonářská ocel

Používá se pro vyztužování konstrukcí a dílců, kde výztuž je namáhána působením vnějších sil. Je zpracována evropská norma ČSN EN 10080 Betonářská ocel zahrnuje pruty s jmenovitou mezí kluzu od 400 N.mm^{-2} (= MPa) a a třídí se podle:

- značky, která vyjadřuje charakteristickou hodnotu meze kluzu f_{yk} v N.mm^{-2} ,
- třídy označující charakteristiku tažnosti,
- rozměru (průměru) v mm,
- charakteristik povrchu,
- svařitelnosti.

Pro zvýšení soudržnosti betonu s ocelí je povrch oceli upraven výstupky. Vlastnosti oceli podle ČSN EN 10080 Ocel pro betonářskou výztuž. Svařitelné žebrové druhy betonářské ocele B500.

Velmi používanou a výhodnou výztužnou vložkou jsou **svařované sítě**. Jsou to výztužné prvky tvořené dvěma soustavami navzájem kolmých drátů, které jsou v místě křížení spojené odporovým svarem, požadované únosnosti. Na rozdíl od rohoží, u kterých se nedefinuje únosnost spojení. Dráty plní nosnou funkci buď v jednom nebo v obou směrech, druhá osnova drátů má pak rozdělovací funkci. Nosné dráty mají zpravidla větší průměr, než dráty rozdělovací. Hromadně vyráběné svařované sítě mají rozměry: šířka až 2600 mm, délka až 8000 mm, rozteče podélných drátů 100 - 250 mm a příčných 100 - 300 s možností změny po 50 mm. Průměry drátů jsou od 4 do 8,5 mm.

2.5.6.3 Předpínací výztuž

Definice

Předpínací výztuž vnáší do betonu síly omezující napětí v betonu v tahu, které je vyvoláno působením vnějších sil.



Používá se patentovaného drátu. Patentování je hutnická úprava drátů tažených za studena, které po tažení ohřejí asi na $800 \text{ }^\circ\text{C}$ a pak se ochladí v olovené nebo v solné lázni na $400 - 500 \text{ }^\circ\text{C}$ a následně na vzduchu. Tímto se odstraňují důsledky tváření za studena, zejména textura ocele a zmenšuje se tvrdost, pevnost a křehkost, drát je schopen dalšího tažení za studena (předpínání). Výrobky užívané jako předpínací výztuž, tj. dráty, lana a pruty se třídí podle:

- značky, která vyjadřuje charakteristickou hodnotu meze 0,1 ($f_{p0,1k}$) a meze pevnosti v tahu (f_{pk})
- třídy relaxačního chování (maximální procento ztráty napětí, v ČR se dráty a lana dělí s velkou a nízkou relaxací a na třídu 3. = pruty),
- rozměru (průměru),

- charakteristiky povrchu.

Norma ČSN EN 10138 Předpínací ocel rozděluje: Za studena tažené **dráty** s odstraněným pnutím, hladké a profilované různé pevnostní třídy od 1570 do 1860 MPa. **Pramence** (Třídrátové a sedmidrátové). Předpínací **lano** je jedno-pramenné lano svinuté ze 7 hladkých drátů (1 + 6) kruhového průřezu. Předpínací **kabely** jsou souběžně sdružené vložky předpínací výztuže. **Tyče** za tepla válcované, hladké a profilované.

ČSN P ENV 1992 definuje rovněž požadavky na **kotevní zařízení** (kotvy přenášející síly působící v předpínací výztuži do betonu kotevní oblasti) a spojovací zařízení (spojky spojující jednotlivé úseky předpínací výztuže do spojitých předpínacích vložek) používaná v dodatečně předpjatých konstrukcích.

2.5.6.4 Krytí výztuže betonem

Ochrana výztuže proti korozi je vedle požadovaných vlastností betonu také zajišťována krytím výztuže. Tloušťka krycí vrstvy je dána vzdáleností vnějšího povrchu výztuže (včetně spon a třmínek) nebo povrchu kanálku u dodatečně předpínaných konstrukcí od nejbližšího povrchu betonu. Minimální tloušťka krycí vrstvy musí také zajistit spolehlivé přenesení sil v soudržnosti mezi betonem a výztuží, vyloučení odlupování betonu, přijatelnou požární odolnost. Minimální tloušťky krycí vrstvy výztuže jsou uvedeny podle stupně vlivu prostředí od 15 mm do 40 mm a pro předpínací výztuž jsou zvětšeny o 10 mm.

Distanční tělíska slouží k fixování výztuže v poloze stanovené statickým výpočtem a zajišťují příslušné krytí výztuže. Výztuž uložená do bednění nebo formy musí zůstat v příslušné poloze a nesmí být posunuta během ukládání čerstvého betonu a při zhutňování.

2.5.6.5 Rozptýlená vlákna

Definice

Je to systém náhodně prostorově rozmístěných vláken v betonu. Úlohou vláknové výztuže je změna křehkého charakteru betonu a vytvoření duktilního konstrukčního materiálu s omezenými deformacemi smrštěním. Nejedná se o nahrazování ocelové výztuže v betonu, ale o rozšíření možností uplatnění betonu, neboť vláknovou výztuží se zlepšují některé vlastnosti betonu.



Vlákna se běžně dávkuje od 0,1 do 2 % objemu matrice a v takovém podílu jen omezeně zlepšují pevnost v tahu, ale především se užívají pro omezení objemových změn v ranném stadiu tuhnutí a tvrdnutí betonu. Nejvíce se uplatňují v konstrukcích, kde dochází ke koncentraci všesměrného namáhání (podlahy, desky), dále při náhradě smykové výztuže a v různých tenkostěnných deskových prvcích. Vlákna zvyšují odolnost proti mechanickému namáhání dynamickými rázy, obrusem. Omezují křehkost betonu, zvyšují jeho houževnatost a pevnost v rázu. Zvyšují únavovou pevnost (vlákna přenáší sílu přes případnou trhlinu) a zvyšují odolnost k prudkým teplotním změnám.

Ocelové drátky jsou nejčastěji používány v délkách od 12 do 60 mm, tloušťky od 0,25 do 1,0 mm, štíhlostního poměru (poměr délky k tloušťce) 50 až 100. Rozdílná úprava drátků má zajistit dostatečné kotvení v cemento-

vém kameni, drátky jsou zalomeny, na koncích zploštělé, ohnuté, profilované nebo lze použít ocelových třísek z obrábění oceli.

Skelná vlákna musí být upravena pro vyšší odolnost v alkalickém prostředí cementového kamene, jednak úpravou chemického složení sklářského kmene a jednak lubrikací (velmi tenkým povlakem na povrchu vláken). Příkladem jsou alkali-rezistentní skelná vlákna Cem-Fil s pevností v tahu 1,7 GPa, modulem pružnosti 72 GPa. Průměr vlákna je 14 μm a délka 12 mm.

Polypropylenová vlákna především zamezují vzniku trhlin při smršťování betonu jak v ranném stadiu tuhnutí a tvrdnutí, tak ve ztvrdlém betonu a současně zvyšují pevnost v rázu. Vlastnosti běžně užívaných typů vláken jsou uvedeny v tab.11

Tab.11 Vlastnosti vláken do betonu

Materiál a typ vlákna	Modul pružnosti v tahu [GPa]	Mez pevnosti v tahu [MPa]	Měrná hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
Ocelová	210	1500 – 3600	7850
Skleněná (ARS)	70	1500 – 3800	2500
Polypropylénová (PP)	3 – 18	200 – 800	910
Polyvinilalkoholová (PVA)	40 – 60	1600 – 2500	1300
Uhlíková (vysokopevnostní)	200 – 250	2000 – 3100	1900
Uhlíková (vysokomodulová)	400 – 700	1700 – 2100	1900
Wolframová	414	4200	1930
Beryliová	240	1300	1830

Kontrolní otázky

Popište latentně hydraulické vlastnosti přírodních i odpadních látek. Které látky působí jako budiče hydraulicity ?



Které látky používáme jako příměsi do betonu a jaké jsou základní požadavky na jejich vlastnosti ?

Čím se vyznačují barevné pigmenty používané do barevných dekoračních betonů ?

Proč beton vyztužujeme a jaké jsou požadavky na výztužné prvky ?

Nakreslete pracovní diagram ocele a definujte pojmy mez kluzu a poměrné přetvoření. Co je to duktilita ocele ?

Podle jakých parametrů třídíme betonářskou a předpínací výztuž ?

Podle jakých kritérií a proč je normováno krytí výztuže betonem ?

Jaké vlastnosti betonu ovlivňuje rozptýlená výztuž ? Vyjmenujte alespoň tři používané druhy a vlastnosti rozptýlené výztuže. V jakém množství se dávkuje ?

2.6 Složení betonu

Definice

Vlastnosti složek a jejich podíly v betonu rozhodují o jeho vlastnostech. Požadované vlastnosti vyplývají z druhu pozemní nebo inženýrské stavby (vliv stupně vlivu prostředí a namáhání), z typu konstrukce (charakterizuje uspořádání konstrukčních prvků), ze stavebního postupu (jak bude konstrukce prováděna) a ze způsobu vyztužení.



Ekonomickým kritériem kvality složení betonu je **minimální spotřeba cementu**, který je nejdražší a energeticky nejnáročnější složkou betonu.

2.6.1 Návrh složení betonu

Návrh složení musí respektovat stochastický charakter vlastností betonu, to znamená že navrhujeme složení s určitou mírou spolehlivosti. Při návrhu neznáme směrodatnou odchylku souboru, proto obecně zvyšujeme požadovanou pevnost v tlaku o 4 až 5 MPa.

Stupeň vlivu prostředí (stupně agresivity prostředí) charakterizují prostředí využívání betonové konstrukce, označují se X a písmenem a číslem.. Definování prostředí užívání betonu má význam pro jeho trvanlivost minimálně 50 let a s tím souvisí složení betonu, jeho vlastnosti a provádění potřebných zkoušek.

Třída pevnosti betonu f_c vyplývá ze statického výpočtu podle zatížení konstrukce a u obyčejného betonu z hutného kameniva je základním kritériem návrhu, vedle uvedení způsobu vyztužení (prostý, železový, předpjatý beton). Návrh musí respektovat požadavek, aby 95 % všech vzorků betonu vyhovovalo statickému výpočtu. Třída pevnosti betonu je dána poměrem **charakteristických pevností v tlaku stanovené na válcích a krychlích**.

Technologické požadavky definují způsob zpracování čerstvého betonu, jeho konzistenci, způsob dopravy a ukládání čerstvého betonu, možnosti zhutňování. Současně musí být stanoveny podmínky tuhnutí a tvrdnutí betonu, teplotní pole, počáteční nárůst pevnosti, doba zpracování čerstvého betonu.

Zvláštní požadavky se týkají jen některých druhů betonů a zahrnují: objemovou hmotnost betonu (lehký a těžký beton), recyklovaný beton, silniční beton, vláknobeton, organizační podmínky výroby betonu (transportbeton, staveništní beton typový nebo předepsaný).

Uvedené údaje jsou nezbytná vstupní data návrhu složení betonu a představují první fázi. V druhé fázi návrhu složení se provádí volba složek betonu. Cílem je kvalitní beton odpovídající požadavkům nejen projektanta stavby, ale příslušným technickým normám (EN 206-1).

Kamenivo vybíráme jednak podle ekonomických hledisek (dostupnost, cena, dopravní vzdálenost), jednak podle technických a technologických hledisek. Kamenivo sestavujeme alespoň ze dvou frakcí (drobné a hrubé) v podílech odpovídající křivce zrnitosti s maximálním zrnem D_{\max} nejvýše možným. Pro běžné železobetonu, předpjaté betony a dílce se většinou volí $D_{\max} = 16, 22$ a 32 mm. Drobné kamenivo je těžené, hrubé kamenivo buď drcené nebo těžené. Cílem skladby kameniva je dosažení jeho minimální mezerovitosti v setřeseném stavu.

Cement je především charakterizován pevnostní třídou, která se použije stejná nebo vyšší než pevnostní třída betonu. Pro rychlejší nárůst pevnosti betonu (např. betonování v zimě) volíme cement R (rapid), případně podle druhu a použití konstrukce vybíráme směsnost cementu nebo speciální druh (silniční, síranovzdorný, aj.).

Přísady jsou nutné pro některé druhy a užití betonů, jako např. pro vzdušňovací přísada pro expoziční třídy XF2 až XF4 nebo plastifikační přísady (včetně superplastifikátorů) pro betony s dobrou zpracovatelností při vodním součiniteli $w \leq 0,5$. Ostatní přísady se používají jen v některých zvláštních případech a některé přísady mají omezenou mísitelnost navzájem.

Příměsi ovlivňují množství cementového tmele v čerstvém betonu a pokud vykazují latentní hydraulicitu, mohou i snížit potřebné množství cementu, ale vždy zvyšují množství záměsové vody. Charakterizují se druhem a množstvím v $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ betonu. Křemičité látky je nutné přidávat do vysokohodnotných betonů, popílek se používá ke stabilizaci čerstvého betonu, k zamezení odměšování.

Rozptýlená výztuž má specifické použití, např. stříkaný beton, podlahy apod. Drátky se používají pro zvýšení pevnosti betonu v tahu, skelná a polypropylenová vlákna především k zamezení vzniku smršťovacích trhlinek.

Obsah chloridů (součtově ve všech složkách betonu) je vyjádřen procentním podílem chloridových iontů k hmotnosti cementu a nesmí překročit hodnoty pro prostý beton 1,0 % (kategorie Cl 1,0), železový beton do 0,2 % nebo 0,4 % (kategorie Cl 0,2 a CL 0,4), beton s předpjatou výztuží do 0,1 % až 0,2 % (kategorie Cl 0,1 a Cl 0,2).

Tab.12 Schéma návrhu složení betonu

1. fáze: Definování požadavků - zadání výpočtu
1.1. Projektant - druh stavby a typ konstrukce, expoziční třída, pevnostní třída betonu, uložení výztuže (stanovení maximálního zrna kameniva),
1.2. Technolog - konzistence (způsob dopravy a hutnění), rychlost tuhnutí a tvrdnutí, vodotěsnost, případně objemová hmotnost (lehký nebo těžký beton),
1.3. Provozní podmínky - doba betonáže (např. v zimě), vzdálenost dopravy transportbetonu.

2. fáze: **Výběr složek betonu podle druhu betonu:** hutný, mezerovitý, lehký, těžký, silniční, pohledový, architektonický, barevný, čerpaný, stříkaný, s rozptýlenou výztuží, vodostavební, masivní.

2.1. Kamenivo: druh, maximální zrno, počet frakcí.

2.2. Cement: směsnost, pevnostní třída, zvláštní požadavky.

2.3. Přísady: ano - ne, druh a dávka. Druhy přísad: plastifikátor, superplastifikátor, urychlovač, tuhnutí a tvrdnutí, zpomalovač tuhnutí, stabilizační, provzdušňovací a případně další.

2.4. Příměsi: ano - ne, druh- popílek, křemičité látky, ostatní.

2.5. Rozptýlená výztuž: ano - ne, druh: drátky, skelná nebo polypropylenová vlákna.

3. fáze: **Návrh složení betonu podle vybraného algoritmu**

Výpočet: množství kameniva a podíly frakcí, množství cementu, vody, přísad a příměsí.

4. fáze: **Experimentální ověření složení betonu**

1. výpočet dávky na zkušební záměs, tj. 11 dm³ čerstvého betonu

2. stanovení konzistence čerstvého betonu

3. úprava složení na požadovanou konzistenci

4. úprava složení na potřebnou pevnost při zachování konzistence

5. zhotovení zkušebních krychlí a normální tvrdnutí 28 dní

6. přepočítání složení betonu podle skutečné objemové hmotnosti čerstvého betonu

Výsledná specifikace a ověření návrhu složení betonu musí obsahovat kromě komerčních a provozních údajů následující technická data:

1. Složení betonu podle druhu složek betonu (kamenivo v jednotlivých frakcích) v kg.m⁻³.
2. Vodní součinitel čerstvého betonu.
3. Třídu pevnosti betonu .
4. Stupeň vlivu prostředí.
5. Kategorie obsahu chloridů.
6. Konzistenci čerstvého betonu označenou hodnotou podle zkušební metody.
7. Druh a pevnostní třídu cementu.
8. Druh přísad a příměsí, včetně jejich dávek v % hmotnosti cementu.
9. Maximální zrno kameniva.
10. Lehký a těžký beton s udáním objemové hmotnosti betonu

2.6.2 Technologické závislosti složení betonu

Návrh složení betonu upravujeme na základní konstrukční parametr - pevnost betonu v tlaku f_C , který je závislý na mnoha proměnných. Nejvýznamnější jsou uvedeny ve tvaru funkce

$$f_C = f_1 (R_C , a_K , D_{\max} , w , c_{Pi} , m_C , m_P , m_j , V_Z) \cdot f_2 (t , T , \phi , Z_T , Z_L)$$

Druhá funkce f_2 charakterizuje parametry metody zkoušení pevnosti betonu a pro reprodukovatelnost výsledků jsou zkušební postupy a příprava vzorků normovány. Pevnost betonu se zkouší za $t = 28$ dnů (při zkoušení za jiné období musí být časový údaj uveden), uložení vzorků při teplotě $T = 20 \pm 2$ °C ve vodě ($\phi = 1$) nebo při relativní vlhkosti vzduchu $\phi > 90$ %. Tvar a velikost zkušební vzorku Z_T je určen krychlí o hraně 150 mm a rovněž je normována rychlost zatěžování krychle ve zkušebním lisu Z_L . Dodržením normových podmínek zkoušení získává funkce f_2 hodnotu konstanty.

První funkce f_1 zahrnuje rozhodující technologické proměnné, jejichž změnami ovlivňujeme pevnost betonu.

Pevnostní třída cementu R_C se doporučuje stejná nebo vyšší, než je pevnostní třída betonu. Předpokládá se, že zvýšením pevnostní třídy cementu o jednu třídu (z CEM 32,5 na CEM 42,5) se zvýší o jednu třídu pevnost betonu.

Kvalita kameniva a_K je vyjádřena druhem horniny, tvarem zrn, charakterem povrchu zrn, a technologickou úpravou kameniva (na př. praním drceného kameniva).

Největší zrno kameniva D_{max} se volí podle betonové konstrukce se snahou použít co největšího zrna. Požaduje se největší zrno:

- menší než 1/4 nejmenšího rozměru konstrukce,
- menší o 5 mm než nejmenší vzdálenost mezi pruty výztuže,
- menší než 1,3 násobek krycí vrstvy výztuže.

Vodní součinitel w (v ČSN EN 206-1 je označen w/c), tj. poměr hmotnosti účinného obsahu vody k hmotnosti cementu. Používáme-li aktivní příměsi (typ II) uplatňuje se vodní součinitel podle k – koncepce. Účinný obsah vody je rozdíl mezi celkovým obsahem vody přítomným v čerstvém betonu a vodou nasáknutou kamenivem. Voda adsorbovaná kamenivem se stanovuje podle ČSN EN 1097-6 pro normální a těžké kamenivo za dobu 30 minut a pro lehké kamenivo za 60 minut. Vodní součinitel má rozhodující význam pro pevnost a trvanlivost betonu. Proto je základní vztah pevnosti betonu často definován různými empirickými závislostmi v určitých mezích platnosti a pro určité parametry složení betonu. Vyšší vodní součinitel snižuje pevnost betonu a současně zlepšuje zpracovatelnost čerstvého betonu. Matematicky vyjádřená závislost pevnosti betonu na vodním součiniteli je pouze pravděpodobná, avšak s technickou přesností často vyhovující při relativně vysokém indexu korelace. Jednoznačně je prokázáno, že největší vliv na pevnost betonu má pórovitost cementového kamene, která je tvořena

- množstvím vody, která není potřebná pro hydrataci cementu, tj. $w > 0,23$,
- vzduchovými póry, které vznikly nedokonalým zhutněním čerstvého betonu,
- provzdušněním betonu použitím provzdušňovacích přísad,
- trhlinkami o větší šířce než 10-4 m vznikající při tvrdnutí betonu.

Druh i a koncentrace přísady c_{PI} ovlivňuje chování čerstvého i ztvrdlého betonu. V případě dávky kapalné přísady větší jako 3 litry, připočítává se tato kapalina k množství vody ve směsi a tím se zvyšuje vodní součinitel.

Množství cementu m_C je důležitým technologickým i ekonomickým ukazatelem složení betonu. Minimální množství je definováno třídou agresivity a maximální množství pak hospodárností složení. Množství cementu se posuzuje v objemu cementového tmele, který musí být vždy vyšší, než mezerovitost kameniva. **Nadbytek cementového tmele v** je koeficient, kterým násobíme mezerovitost kameniva pro stanovení objemu cementového tmele. Jeho hodnota je minimálně $v = 1,05$ a maximálně $v = 1,4$ až výjimečně 1,5. Na objemu tmele se také podílí objem příměsí a jemných podílů kameniva v betonu.

Množství jemných podílů m_j je hmotnost příměsí (popílek, silika aj.) a jemných podílů kameniva do velikosti zrna 0,25 mm, někde se uvádí do 0,125 mm. Příměsí zvyšují potřebné množství vody při zachování stejné konzistence čerstvého betonu, zvýšení množství vody pro stejný vodní součinitel w se vypočítá z rovnice (23), kde jsou uvedeny hodnoty koeficientu k pro létavý popílek a mikrosiliku. Obecně lze přijmout hodnotu $k = 0,25$. Částice do 0,25 mm zlepšují vodotěsnost betonu, zlepšují zpracovatelnost čerstvého betonu, ale zvyšují deformace betonu (smrštění a dotvarování), proto je jejich maximální množství omezováno. Schulze navrhuje **limity maximálního obsahu tuhých částic** do velikosti 0,125 mm (cement, příměsí, jemné podíly kameniva) pro kamenivo s $D_{\max} = 16$ mm do $530 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $D_{\max} = 32$ mm do 460 a pro $D_{\max} = 63$ mm do $430 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Pro samozhutňující betony obsah jemných částic je $600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Množství vzduchových pórů V_Z se udává v % objemu betonu. Čerstvý beton bez provzdušňovacích přísad lze prakticky ztuhnout až do minimální hodnoty asi 2 %. Beton pro stupně agresivity XF (působení mrazu) má předepsané provzdušnění použitím provzdušňovacích přísad v množství nejméně 4 % objemu betonu.

Složení betonu většinou ověřujeme v laboratoři a upravujeme pro potřebnou konzistenci čerstvého betonu a dosažení potřebné 28 denní pevnosti.

Zpracovatelnost zlepšíme (větší sednutí kužele nebo rozlítí, kratší doba Vebe):

- zvýšením vodního součinitele,
- použitím plastifikátorů a superplastifikátorů potřebné koncentrace,
- částečně zvýšením množství cementu a příměsí,
- kamenivem s větší mezerovitostí a menším měrným povrchem (snížíme podíl frakce 0/4 mm).

Výslednou pevnost betonu zvýšíme:

- snížením vodního součinitele,
- cementem vyšší pevnostní třídy,
- vyšším množstvím cementu, ale pouze po určitou hranici,
- kamenivem s menší mezerovitostí,
- snížením podílu vzduchových pórů v betonu.

Základním vztahem pro výpočet složení betonu je **rovnice absolutních objemů**

$$\frac{m_C}{\rho_C} + \frac{m_V}{\rho_V} + \frac{m_K}{\rho_K} + \frac{m_P}{\rho_P} = 1 - \frac{V_z}{100}$$

V rovnici lze substituovat $m_V = w \cdot m_C$

Pro technické předběžné výpočty používáme objemové hmotnosti složek ρ_i : cementu, $\rho_C = 3100 \text{ kg.m}^{-3}$, vody $\rho_V = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$ a kameniva $\rho_K = 2650 \text{ kg.m}^{-3}$. Hmotnosti složek betonu jsou označeny písmenem m s indexy: C - cement, V - voda, K - kamenivo, P - příměsi v kg.m^{-3} betonu.

Objem cementového tmele V_{CT} je v - násobkem mezerovitosti kameniva M (ρ_s - sypaná hmotnost kameniva v setřeseném stavu v kg.m^{-3} , p_{025} - podíl zrn kameniva pod 0,25 mm v %)

$$V_{CT} = v \cdot M = v \cdot \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_K} \right) = \frac{m_C}{\rho_C} + \frac{w \cdot m_C}{\rho_V} + \frac{m_P}{\rho_P} + \frac{p_{025} \cdot m_K}{100 \cdot \rho_K}$$

Při výpočtu zkontrolujeme, zda hodnota vodního součinitele je menší než požadovaná, množství cementu větší než požadované a množství tuhých částic do 0,25 mm menší než požadované hodnoty (pro $D_{\max} = 16 \text{ mm}$ max 530 kg.m^{-3} a $D_{\max} = 32 \text{ mm}$ nejvýše 460 kg.m^{-3} , množství se rozumí včetně cementu a příměsí).

Úkol

Pomocí programu EXCEL zpracujte regresní analýzu závislosti pevnosti v tlaku mezerovitého betonu z Liaporu na jeho objemové hmotnosti. Soubor (fLC, ρ_{LC}): 2, 550; 2, 600; 2,5, 650; 3,5, 650; 3,5, 750; 5, 850; 5, 900; 7,5, 975; 7,5, 1100; 10, 1200; 15, 1400. Výsledek je uveden na obr.27. Nejtěsnější je závislost s koeficientem korelace $R = \sqrt{R^2} = 0,984$ ve tvaru

$$f_{LC} = 3 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_{LC}^{2,1442}$$

Příklad

Návrh složení podle odhadu přebytku cementového tmele.

Princip: Cementový tmel vyplňuje mezerovitost kameniva a také obaluje povrch zrn kameniva. Objem cementového tmele potřebný na obalení zrn se nazývá nadbytkem cementového tmele $v \in (1,1; 1,5)$.

Schéma výpočtu:

1. Výpočtem z Bolomeyovy rovnice stanovíme vodní součinitel w , který zkontrolujeme zda odpovídá požadavkům podle tab.32. Volíme menší hodnotu w .
2. Množství cementu m_C vypočítáme pomocí rovnice, jemnou frakci v kamenivu zatím zanedbáváme.
3. Množství kameniva m_K vypočítáme z rovnice, podle křivky zrnitosti rozdělíme jednotlivé frakce.

Zkontrolujeme obsah tuhých částic do 0,25 mm (cement, příměsí a zrna kameniva do 0,25 mm), který pro $D_{\max} = 16 \text{ mm}$ je doporučován nejvýše do 530 kg.m^{-3} .



Příklad*Metoda Ch.T. Kenedyho*

Princip: Vypočítáme obálku cementového tmele na povrchu zrn kameniva a z tohoto výpočtu odvozujeme složení betonu.



Schéma výpočtu:

1. Stanoví se vodní součinitel w
2. Vypočítá seměrný povrch kameniva sK [$m^2 \cdot kg^{-1}$], (od velikosti zrn 0,25 mm).
3. Množství kameniva mK se rovná sypané hmotnosti kameniva v setřeseném stavu ρS .
4. Pro stanovení tloušťky obálky cementového tmele δ [m] se vypočítá objem cementového tmele VCT [$m^3 \cdot m^{-3}$] a z něho množství cementu mC .

$$\delta = 10 \cdot 10^{-6} \text{ m pro } w \text{ nad } 0,53$$

$$\delta = 15 \cdot 10^{-6} \text{ m pro } w \in (0,45; 0,53)$$

$$\delta = 30 \cdot 10^{-6} \text{ m pro } w \in (0,35; 0,45)$$

5. Pokud přidáváme příměsi vypočítáme zvýšené množství vody. Pře-kontrolujeme nadbytek cementového tmele v , množství tuhých částic do 0,25 mm a vodního součinitele w .
6. Vypočítáme objem složek betonu a množství složek vynásobíme koefi-cientem k_k .

$$k_k = \frac{1}{\Sigma V_i}; \Sigma V_i = \frac{m_C}{\rho_C} + \frac{w \cdot m_C}{\rho_V} + \frac{m_P}{\rho_P} + \frac{m_K}{\rho_K} + \frac{V_Z}{100}$$

Příklad*Metoda podle Bolomeye*

Princip: Metoda vychází z výpočtu potřebného množství vody, která je potřebná k hydrataci cementu a na smáčení zrn kameniva podle potřebné konzistence.



Schéma výpočtu:

1. Vypočítáme poměr hmotnosti cementu k množství vody z Bolomeyovy rovnice

$$R_B = a_K \cdot R_C \cdot \left(\frac{1}{w} - 0,5 \right)$$

2. Množství vody potřebné k hydrataci cementu a smáčení kameniva se vypočítá z rovnice

$$m_V = 0,23 \cdot m_C + 0,35 \cdot m_P + m_K \cdot \Sigma m_{VVi} \dots m_{VVi} = \frac{p_i \cdot n}{100} \sqrt[3]{d_i \cdot d_{i+1}}$$

m_P = hmotnost příměsí v $kg \cdot m^{-3}$, p_i = podíl frakcí v % mezi síty d_i a d_{i+1} v mm

n = potřeba vody na ovlhčení kameniva v kg na kg kameniva., platí pro kamenivo nad 0,25 mm, ovlhčení jemného kameniva do 0,25 mm se počítá 0,23 kg.kg-1; ovlhčení popílku 0,30 kg.kg-1

Tab. Součinitel n k výpočtu rovnice

Kamenivo	těžené	drcené
Konzistence: zavlhlá	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. Z rovnice absolutních objemů vypočteme množství kameniva.
4. Přepočítáme poměry složek betonu podle bodů 1. a 2. na skutečná množství.
5. Zkontrolujeme vodní součinitel, hmotnost částic do 0,25 mm a nadbytek cementového tmele

Cvičení

1. Návrh složení betonu – postupy, individuální zadání (početní cvičení).
2. Návrh složení betonu – složení dle výpočtu a výroba zkušebních vzorků v laboratoři



Kontrolní otázky

1. Vypočítejte návrh složení betonu C 30/37 (návrhová pevnost $37 + 5 = 42$ MPa) s použitím cementu CEM II/A - S 42,5 pro stupeň agresivity XF3. Sypná hmotnost kameniva je 1990 kg.m-3.
2. Vypočítejte návrh složení betonu C 20/25 (návrhová pevnost $25 + 5 = 30$ MPa) s $D_{max} = 16$ mm, CEM I 32,5 pro stupeň agresivity XC1 ($\rho_S = 1960$ kg.m-3) metodami:
 - a) podle odhadu nadbytku cementového tmele,
 - b) podle Kenedyho,
 - c) podle Bolomeye,
 Zpracujte program výpočtu složení betonu v EXCELU pro kombinovanou metodu empirického množství vody a odhadu nadbytku cementového tmele.



2.7 Druhy betonů

2.7.1 Silniční beton

Vozovky se provádějí z několika vrstev, jak z cementového betonu, tak z asfaltobetonu. Nejnáročnější jsou letištní plochy L a dálnice I, pak náročnost postupně u dalších typů vozovek klesá. Používá se cementobetonový kryt jednovrstvý nebo dvouvrstvý (tj. dvoufázově betonovaný kryt, kde horní obrusná vrstva se pokládá na čerstvý beton spodní vrstvy). Kryt se mechanicky ukládá na podkladní vrstvy.

Povrch vozovky má mít dobrou odolnost proti obrusu, dobré protismykové vlastnosti, minimální hlučnost způsobenou unikáním (syčením) vzduchu

z dezénu pneumatiky při dotyku s povrchem vozovky. Pro snížení hladiny hluku se používá dvouvrstvý cementobetonový kryt s horní obrusnou vrstvou z vymývaného betonu. Šířka betonových desek je 4,25 m a délka dilatačního celku nemá být delší jak 25 násobek tloušťky desky. Nejmenší tloušťka desky je 100 mm, u dvouvrstvých pak jednotlivá vrstva má minimální tloušťku 50 mm (70 mm u skupin L, I až III). Tloušťky jsou odstupňovány podle zatížení: skupina L od 220 do 400 mm nebo skupina IV od 100 do 180 mm. Vzniklé podélné spáry mohou být jednoduché, s ozubem, s kotvením desek, popřípadě s kluznými trny. Příčné spáry jsou smršťovací (kontrakční) nebo prostorové (dilatační).

Složení betonu. Používá se kamenivo s max. zrnem 32 mm i s přetržitou křivkou zrnitosti. Obsah jemných tuhých částic (cement a kamenivo do 0,25 mm) je omezen na 350 až 450 kg.m⁻³.

Tab.13 Kvalitativní požadavky ztvrdlého silničního betonu.

Skupiny vozovek	L	I	II	III	IV
Pevnost v tahu ohybem [MPa]	4,5	4,5	4,5	4,0	3,5
Maximální variační koeficient [%]	10	10	12	13,5	15
Pevnost v tlaku na zlomcích trámek [MPa]	32	32	32	28	25
Mín. počet cyklů působení vody a rozmraz. solí	100-75	100-75	100-75	75-50	75-50
Největší součinitel prostorového rozložení vzduchových pórů [mm]	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Minimální součinitel mrazuvzdornosti po 300 cyklech [%]	80	80	80	-	-
Pevnost v tlaku na válkách [MPa]	24	24	24	21	19
Pevnost v prostém tahu na válkách [MPa]	2,3	2,3	2,3	-	-

Pokládka a ošetřování. Optimální podmínky pro betonování jsou při teplotě ovzduší + 5 až + 25 °C a relativní vlhkosti vzduchu 70 % s maximální denní teplotní diferencí 10 °C. Teplota betonu nemá být nižší jako + 5 °C. Dopravní doba čerstvého betonu nemá být při teplotě betonu + 20 °C delší jako 45 minut, zvýšením teploty betonu o 10 °C se tato doba musí zkrátit na polovinu. Při hutnění čerstvého betonu finišery s vnitřní vibrací má být čerstvý beton zpracován do 30 minut. Doba se vždy měří od přidání záměsové vody do zpracování finišerem. Cementobetonový kryt se musí ihned po dohotovení chránit proti rychlému odparu vody, překrytím folií nebo ochranným postříkem parotěsnými látkami. Postříkové látky vytvářejí na matném povrchu čerstvého betonu souvislý, poddajný a parotěsný film.

2.7.2 Vodostavební beton

Požadavky na vodostavební beton vyplývají z polohy betonu v konstrukci s ohledem na hladinu omývající vody, z rozměru konstrukce a statické funkce. Podle účelu použití se požadují vlastnosti: vodotěsnost, odolnost proti korozi, mrazuvzdornost a odolnost proti abrasivním účinkům splavením.

Vodotěsnost se zkouší podle EN 12364 a požaduje se jednotný tlak vody 500 ± 50 kPa po dobu 72 ± 2 hodiny. Beton je vodotěsný, jestliže průměrná hloubka průsaku je menší než 20 mm a maximální hloubka průsaku není větší než 50 mm.

Protikorozivní ochrana betonu se zajišťuje podle agresivity prostředí. Pro slabě agresivní prostředí postačuje primární ochrana (složení betonu), pro středně a silně agresivní prostředí je potřeba jak primární, tak sekundární (povrchová úprava konstrukce) ochrana. Mrazuvzdornost se posuzuje počtem zmrazovacích cyklů a beton musí být odolný při 100 cyklech (územní oblasti s počtem 55 - 65 klimatických cyklů - mrazu a oblevy - a místa s nižším počtem ledových dnů v roce s celodenní teplotou do $-0,1$ °C, tj. 28 - 33 dní) a v ostatních oblastech pak 150 cyklů. Abrasivní odolnost vyžaduje vyšší pevnost betonu, alespoň C 35/45.

Složení betonu. Nepropustný a vodotěsný beton se požaduje podle stupňů agresivity. Vyrábí se s vodním součinitelem $w \leq 0,55$ a podle velikosti maximálního zrna D_{max} (obvykle do 32 mm). Konzistence se volí podle druhu konstrukce a možností zpracování čerstvého betonu S2 nebo V3, V2. Druh cementu podle použití betonu. Množství cementu nemá převýšit u konstrukcí tloušťky do 60 cm 400 kg.m^{-3} a u masivních konstrukcí (tloušťka nad 1 m) nejvýše 320 kg.m^{-3} .

2.7.3 Těžký beton

Podle EN 206 se označuje HC. Používá se ku stínění rentgenového záření (pro napětí 60 až 400 kV postačí tloušťka betonu 300 mm a objemová hmotnost 3000 kg.m^{-3}) a radioaktivního záření. α - a β - záření má malou vzdálenost doletu, proto stačí na stínění jen tloušťka několika mm. Pronikavé γ - záření se absorbuje látkami s vysokou hmotností a intenzita rychlého neutronové záření se tlumí sloučeninami obsahující vodík (nejčastěji vodou), kde dochází k absorpci neutronů atomy vodíku za vzniku γ - záření. Těžký beton se obtížně zpracovává, dochází k odměšování v důsledku velmi těžkých zrn, zejména hrubého kameniva. Proto se často volí dvoufázové betonování.

Složení některých těžkých betonů je uvedeno v tabulce (m_C - množství cementu, ρ_{HC} - objemová hmotnost těžkého betonu v kg.m^{-3} , m_V - množství vody, m_{VHC} - množství vody ve ztvrdlém betonu v kg.m^{-3}). Kamenivem je ocel (nařezané a zaoblené ocelové pruty), limonit (obsahuje asi 8 % krystalické vody), $\text{H}_2\text{O-FeO}$ označuje hydratované železité oxidy s obsahem asi 6 % krystalické vody.

Tab.14 Složení těžkých betonů v kg.m^{-3} .

Betono- vání	m_C	m_V	Drobné kamenivo	Hrubé kamenivo	ρ_{HC}	m_{VHC}

prepect	333	180	magnetit 710	ocel 4350	5600	126
normální	390	200	ferrofosfor 1480	ferrofosfor 2750	4800	148
prepect	360	200	limonit 450	limonit 970	4200	250
				ocel 2250		
normální	390	190	magnetit 1380	magnetit 1770	3700	148
prepect	310	170	baryt 470	baryt 2700	3600	118
normální	400	190	H ₂ O-FeO 1320	H ₂ O-FeO 1610	3500	328
normální	500	250	limonit 1000	limonit 1220	3000	368
normální	500	190	písek 800	štěrk 980	2450	140

2.7.4 Lehký beton

Lehké betony označované LC jsou vylehčeny dutinami a póry v textuře betonu. Používají se do konstrukčně-izolačních, izolačních konstrukcí a někdy i ke konstrukčním účelům, pokud vlastní hmotnost konstrukce představuje rozhodující její zatížení. Mezerovité betony také mohou sloužit jako drenáže. Obvykle při nízké objemové hmotnosti nelze dosáhnout i vysoké pevnosti. V ČR je jediným reprezentantem pórovitého kameniva do lehkých betonů Liapor. Pro lehké betony platí ČSN 73 2402 - Provádění a kontrola konstrukcí z lehkého betonu z umělého pórovitého kameniva a EN 1520 - Prefabrikované vyztužené dílce z lehkého betonu s mezerovitou strukturou.

Mezerovitý beton se vyznačuje použitím úzké frakce pórovitého kameniva s nízkou objemovou hmotností, případně dvou frakcí hrubého kameniva bez obsahu drobné frakce. Pokud zůstane prostor mezi zrny Liaporu nevyplněný maltou, hovoříme o betonu s přirozenou mezerovitou strukturou. Je-li zaplněn provzdušněnou maltou (pomocí napěňovací přísady), hovoříme o lehkém betonu s napěněnou strukturou.

Příklad

Složení mezerovitého betonu z Liaporu

Princip: Podle požadované objemové hmotnosti volíme druh Liaporu s potřebnou sypanou hmotností a množství cementu vypočítáme z tloušťky obálky cementového tmele na povrchu zrn kameniva.



Schéma výpočtu:

- 1. Definujeme žádanou objemovou hmotnost mezerovitého betonu ρ_{MLC} a dle toho volíme sypanou hmotnost Liaporu s tolerancí $\pm 15\%$.*
- 2. Množství kameniva vypočítáme z 1,1 násobku sypané hmotnosti použité frakce.*
- 3. Vodní součinitel volíme $w = 0,6$ a množství vody zvýšíme o 6 % hmotnosti kameniva (nasákavost za 30 minut).*
- 4. Množství cementu vypočítáme z tloušťky obálky cementového tmele δ podle povrchu zrn kameniva SK: pro $SK < 500 \text{ m}^2$ $\delta = 0,5 \text{ mm}$; $SK < 1000 \text{ m}^2$ $\delta = 0,4 \text{ mm}$; $SK > 1000 \text{ m}^2$ je $\delta = 0,3 \text{ mm}$.*

5. Vypočítáme objemovou hmotnost mezerovitého betonu, odhad jeho pevnosti a mezerovitosti betonu.

Zadání: Mezerovitý beton objemové hmotnosti $\rho_{MLC} = 800 \text{ kg.m}^{-3}$ z frakce 4 - 8 mm Liaporu, cement CEM I 42,5, měrný povrch (vzorec 7) $sK = 2,0254 \text{ m}^2.\text{kg}^{-1}$, $p_{025} = 0,55 \%$.

Hutné lehké betony snižují objemovou hmotnost betonu pouze pórovitostí kameniva. Lehké betony navrhujeme s cílem minimální objemové hmotnosti nebo s cílem zaručené pevnosti při minimální objemové hmotnosti. Hutné lehké betony mají objemovou hmotnost 800 až 2000 kg.m^{-3} , pevnost v tlaku 10 až 80 MPa (pevnost je nepřímo úměrná objemové hmotnosti), modul pružnosti 3 - 33 GPa, tepelnou vodivost 0,4 - 1,5 $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, teplotní roztažnost 8.10^{-6} K^{-1} , smrštění je závislé na objemové hmotnosti hutného lehkého betonu, vlhkosti prostředí a tloušťce konstrukce a pohybuje se od $3,4.10^{-4}$ do $9.10^{-4} \text{ m.m}^{-1}$. Byly vyrobeny také vysokohodnotné hutné lehké betony z Liaporu s pevností v tlaku 65 až 100 MPa a s objemovou hmotností 1700 až 2000 kg.m^{-3} . Složení se vyznačovalo velmi nízkým efektivním vodním součinitelem, použitím mikrosiliky a velmi účinných plastifikátorů.

Příklad

Výpočet hutného lehkého betonu z Liaporu

Princip: Výpočet je založen na závislosti pevnosti na podílu a pevnosti malty a hrubého kameniva. Poměr pevnosti lehkého hutného betonu k jeho objemové hmotnosti k jeho objemové hmotnosti vychází z regresní analýzy praktických hodnot betonů z Liaporu. Regresní závislosti jsou rozlišeny podle druhu drobného kameniva



$$\text{- drobné kamenivo je drcený Liapor 0 - 4/D} \quad \rho_{LC} = 409,9 \cdot R_{LC}^{0,32}$$

$$\text{- drobné kamenivo je přírodní písek 0 - 4 mm} \quad \rho_{LC} = 711,5 \cdot R_{LC}^{0,213}$$

Schéma výpočtu:

1. Volíme vhodný druh Liaporu pro zadanou objemovou hmotnost nebo vypočítáme objemovou hmotnost z rovnic (43), (44). Sypná hmotnost Liaporu nad 4 mm má být nižší než polovina zvolené objemové hmotnosti betonu.

2. Vypočítáme podíl frakcí kameniva a podíly frakcí vynásobíme sypné hmotnosti frakcí Liaporu zvýšené o 10 %. Stanovíme sypnou hmotnost směsi Liaporu a vypočítáme váženým průměrem objemovou hmotnost a mezerovitost kameniva.

3. Množství cementu se vypočítá podle nadbytku cementového tmele $v = 1,1$ při vodním součiniteli $w = 0,6$.

4. Množství vody je zvýšeno o nasákavost Liaporu za 30 minut ($N_{30} = 6 \%$).

5. Přepočítáme složení na 1 m³ betonu koeficientem k_{LC}

$$k_{LC} = \frac{1 - \frac{V_z}{100}}{m_c \cdot \left(\frac{1}{3100} + \frac{w}{1000} \right) + \sum_i \frac{m_{Ki}}{\rho_{Ki}}}$$

6. Vypočítáme objemový podíl malty VM, objemovou hmotnost malty ρ_M a podle korelačních vztahů vypočítáme pevnosti malty R_M (46) i kameniva R_K (42)

$$R_M = 1,426 \cdot 10^{-9} \cdot \rho_M^{2,75} \cdot R_C \cdot \left(\frac{1}{w} - 0,5 \right) \text{ MPa}$$

7. Posoudíme pevnost betonu podle rovnice (41) a vypočítáme objemovou hmotnost betonu.

Zadání: Hutný lehký beton z Liaporu s objemovou hmotností 1200 kg.m-3, cement CEM I 42,5, maximální zrno 8 mm. Drobná frakce je drcený Liapor 0-4/D o sypné hmotnosti ve volně sypaném stavu 500 kg.m-3 a objemové hmotnosti 1150 kg.m-3 s podílem zrn do 0,25 mm 10 %. Číslo zrnitosti $k = 1,7$.

2.7.5 Beton pro masivní konstrukce

Složení tohoto betonu vyžaduje **snížení hydratačního tepla** a zejména omezení vzrůstu teploty betonu. Používá se cementů s nízkým hydratačním teplem, tj. směsných cementů s minimálním množstvím slinku a pro zajištění potřebné pevnosti se uplatňují latentně hydraulické příměsi. Volí se co největší maximální zrno kameniva, pokud to konstrukce dovoluje. Při tvrdnutí betonu dochází ke zvyšování jeho teploty, což má vliv na objemové změny v mikrostruktuře betonu, vznikají rozdílná tahová napětí vedoucí k tvorbě trhlinek. Masivní konstrukce (nad 1 m tloušťky) vyžadují opatření ke snížení teplotních gradientů:

- používat cementy s nízkým hydratačním teplem,
- minimalizovat obsah cementu,
- snížením teploty čerstvého betonu, na př. chlazením hrubého kameniva a vody,
- stavebním postupem (pracovní spáry rozdělené na lamely),
- chlazením čerstvého betonu cirkulací chladícího media v zabudovaných trubkách.

Příklad

Složení betonu pro masivní konstrukci

Princip: Složení betonu posuzujeme na vývin hydratačního tepla a na maximální zvýšení teploty.

Schéma výpočtu:

1. Volíme D_{max} , druh a množství cementu m_C pro stupeň agresivity XF, tj. minimálně $m_C = 300 \text{ kg.m-3}$ a maximální $w = 0,55$



2. Stanovíme sypanou hmotnost kameniva ρ_S a vypočítáme mezerovitost kameniva M ; zvolený nadbytek cementového tmele nám umožní vypočítat potřebné množství jemných podílů.
3. Vypočítáme vývin hydratačního tepla za 7 dní, který má být nižší než 290 kJ.kg⁻¹ cementu.
4. Z rovnice absolutních objemů vypočteme množství kameniva a maximální zvýšení teploty, sestavíme recepturu.

Zadání: Betonová konstrukce tloušťky větší než 1 m, kamenivo s $D_{\max} = 63$ mm, cement CEM III/A 32,5 v množství $m_C = 300$ kg.m⁻³, $V_Z = 4$ %

2.7.6 Čerpaný čerstvý beton

Čerpání čerstvého betonu je součástí moderní technologie monolitických železobetonových konstrukcí (transportbeton, systémové bednění, centrální armovna a doprava čerpáním čerstvého betonu). Tato technologie vyžaduje úpravu reologických vlastností: konzistence a soudržnosti. Především musíme vhodným složením zajistit dobrou čerpatelnost. Technologické požadavky souvisí s druhem cementu, zrnitostí kameniva, obsahem jemných podílů, vodním součinitelem a zpracovatelností. Největší zrno kameniva se řídí použitým druhem potrubí. Pro průměr 100 mm je $D_{\max} = 32$ mm těžného kameniva a. Podíl zrn do 1 mm je vhodné zvýšit o 10 % proti hodnotám křivky zrnitosti. Jemné frakce zrn do 0,25 mm zajišťují přenos čerpacího tlaku, tvoří vrstvu na stěnách potrubí a tím snižují vnitřní tření čerstvého betonu, omezují odlučování a zvyšují soudržnost čerstvého betonu. Obsah jemných podílů do 0,25 mm má být do 8 % a jejich množství spolu s cementem se limituje podle maximálního zrna kameniva (tab.53.). K doplnění jemných podílů se používají příměsi: popílek, mletý vápenec.

. Nejvhodnější je konzistence měřená rozlitím F od 360 do 400 mm a tomu odpovídá vodní součinitel $w = 0,45$ až $0,55$. Množství vody nutno vztahovat na množství všech tuhých látek s velikostí do 0,25 mm. Při $w = 0,3$ nastává vystřelování čerstvého betonu tím, že v potrubí se komprimuje vzduch, také je potřeba velkého tlaku čerpadla, neboť čerstvý beton je lepkavý. Při $w \geq 0,5$ se zase snižuje soudržnost čerstvého betonu, dochází k segregaci, ztrácí se mazací účinek cementového tmele u vnitřních stěn potrubí, potrubí se může ucpat. Zásadně je účelné používat vhodnou plastifikační přísadu. Zlepšení čerpatelnosti čerstvého betonu lze dosáhnout:

- zvýšením podílu částic do 0,25 mm,
- příměsemi s větším měrným povrchem,
- vyšší podíl drobného kameniva 0 - 4 mm,
- konzistencí s větším sednutím kužele , avšak nejvýše do $S \leq 150$ mm,
- náhradou drceného kameniva, kamenivem těžným,
- účelnou koncentrací vhodné plastifikační přísady.

2.7.7 Pohledový beton

Dobře provedená betonová konstrukce a její povrch působí esteticky a přijatelně. Povrchy betonů lze rozdělit na několik typů:

- betonové plochy bez zvláštních požadavků,
- betonové plochy s technickými požadavky (vodotěsnost, obrusnost aj.),
- betonové povrchy s estetickými požadavky, které lze docílit buď kvalitním povrchem betonové konstrukce anebo architektonickým betonem (kap.3.1.14.).

Podmínkou kvalitního povrchu je vyloučení závad, které vznikají na povrchu betonu (dílce i monolitické konstrukce). Příčinou těchto závad jsou nedostatky ve složení betonu nebo v jeho zpracování. Závady se projevují v tvorbě povrchových dutin, zabarvení povrchu, organickými vměstkami a pod.

Technologie pohledového betonu. Prvním předpokladem úhledné a stejnoměrně zbarvené pohledové plochy betonové konstrukce je stejnorodost a "homogenita" čerstvého betonu vyplývající z elementárních požadavků:

1. Pro jednu konstrukci používat cement jedné pevnostní třídy a stejné směsnosti (CEM I nebo CEM II/A) z jedné cementárny.
2. Kamenivo je nutné používat z jedné lokality, zejména drobné kamenivo do 4 mm, stejné skladby frakcí a zrnitosti.
3. Dodržovat přesnost dávkování složek betonu, tj. hlavních složek $\pm 3 \%$ a přísad $\pm 5 \%$ (požadavek ČSN EN 206-1).
4. Během betonování jedné konstrukce dodržovat stejný vodní součinitel a z toho vyplývající konzistenci čerstvého betonu. Na závadu vzhledu povrchu betonové konstrukce není vyšší vodní součinitel a tím i velmi měkká konzistence čerstvého betonu.
5. Na kvalitě povrchu betonu se výrazně podílí jemná frakce kameniva (do 1 mm), její vyšší podíl vytváří hladký povrch betonu, ale tato frakce zvyšuje množství potřebné vody a zvyšuje soudržnost čerstvého betonu. Doporučený obsah zrn do 1 mm v písku (ve frakci 0 - 4 mm) je 20 %.

Používané přísady (provzdušňovací, plastifikační a ostatní) musí být odzkoušeny a certifikovány, neboť součástí jejich průkazných zkoušek jsou také vedlejší účinky, včetně případných chemických reakcí, které mají za následek barevné změny povrchu betonu.

2.7.8 Architektonický beton

Architektonickým nebo dekorativním označujeme betony s estetickou funkcí a většinou se jedná o povrchové vrstvy konstrukce nebo výrobku, ztvárněné mnoha možnostmi:

- barevným nebo bílým betonem,
- strukturovaným (plastickým) povrchem vytvořeným maticí vloženou do formy nebo do bednění,
- opracováním povrchu broušením, permlováním, vymýváním, kartáčováním, pískováním, plamenem,
- dodatečným pojednáním, jako obkladem, omítkou, nástřikem.

Podmínkou kvalitního povrchu je vyloučení závad, které vznikají na povrchu betonu (dílce i monolitické konstrukce) jak bylo uvedeno v předchozí kapitole. Obecně lze říci, že šedivý povrch betonu u exponovaných konstrukcí je nahrazován barevně nebo plasticky ztvárněným po-

vrchem. Beton je velmi trvanlivý, betonové povrchy mají dlouhou životnost a tudíž jsou i ekonomicky a esteticky vhodné.

2.7.9 Recyklovaný beton

Uzavřený oběh materiálového procesu, běžný v přírodě, je nezbytnou součástí udržitelného rozvoje společnosti. Ochrana životního prostředí je legislativně zajišťována zákonem č. 125/1997 Sb., kde je zakotvena povinnost původce odpadů v posloupnosti:

- * odpady využívat sám ve výrobním procesu,
- * odpady nabídnout k využití jiné právnické nebo fyzické osobě,
- * zneškodnit odpady.

Prvořadým zájmem je využívání odpadů, což jest činnost vedoucí k získávání druhotných surovin, k recyklaci odpadů. Tímto se omezují skládky odpadů a současně se omezuje těžba přírodních surovin. Myšlenka recyklace betonu z asanovaných staveb je stará několik desetiletí, avšak praktická realizace se uskutečňuje v posledních letech. Využíváme drceného betonu z asanovaných betonových konstrukcí. Ze zahraničních prací vyplývají následující obecné poznatky pro složení recyklovaného betonu:

- a) Zrna drceného betonu mají poměrně dobrý tvar, nižší objemovou hmotnost a vyšší nasákavost.
- b) Hrubá frakce drceného betonu prakticky neovlivní zpracovatelnost čerstvého betonu ve srovnání s přírodním kamenivem, ale drobná a jemná frakce zpracovatelnost zhorší.
- c) Nedoporučuje se používat drcený beton s obsahem více jako 1 % SO_3 .
- d) Doporučuje se omezit max zrno drceného betonu na 16 - 22 mm, jinak mohou vznikat trhliny v betonu.
- e) Pevnost v tlaku recyklovaného betonu ve srovnání s tradičním betonem tlaku je nižší o 4 %, případně až o 20 % (byly zjištěny i případy mírně zvýšené pevnosti).
- h) Modul pružnosti recyklovaného betonu je o 10 - 30 % nižší, než betonu z přírodního kameniva.

2.7.10 Pěnobeton

Snížení objemové hmotnosti betonu lze docílit několika způsoby:

- Použitím pórovitého kameniva pro mezerovitý nebo hutný lehký beton.
- Provzdušněním s použitím provzdušňovací přísady, za účelem zvýšení mrazuvzdornosti betonu a současně se sníží objemová hmotnost betonu jen asi o 4 až 6 %.
- Vytvořením pěny pomocí pěnotvorné přísady a zamícháním s ostatními složkami betonu vznikne pěnobeton.

Používají se dva technologické postupy výroby pěnobetonu:

- pěnotvorná přísada se dávkuje přímo do míchačky s nuceným oběhem a tak se vytvoří až 20 % objemu pórů,

-pěna se vyrobí ve zvláštní míchačce a zamíchá se do čerstvého betonu až na staveništi, tak lze dosáhnout více než 20 % objemu pórů v betonu.

Kontrolní otázky

1. Vypočítejte objemovou hmotnost a pevnost lehkého betonu z Liaporu. Množství cementu 370 kg.m⁻³, vodní součinitel $w = 0,53$. Kamenivo: 40 % říčního písku 0 - 4 mm s objemovou hmotností 2650 kg.m⁻³, nasákavosti 0,5 % a 60 % Liaporu frakce 4 - 16 mm s objemovou hmotností zrn 1150 kg.m⁻³ a nasákavosti 6 %. Sestavte recepturu betonu.
2. Vypočítejte návrh složení betonu pro stěnu 1 m tlustou a vypočítejte maximální zvýšení teploty betonu. Vstupní data: $D_{max} = 63$ mm, sytná hmotnost kameniva $\rho_S = 1890$ kg.m⁻³, objemová hmotnost popílku $\rho_P = 2000$ kg.m⁻³.
3. Jaké kamenivo používáme pro těžký beton a jaké jeho parametry sledujeme pro stínění γ -záření a neutronů ?
4. Jak upravíme složení čerstvého betonu, aby byl dobře čerpatelný ?
5. Popište tři druhy úprav architektonického betonu a uveďte příklady.
6. Popište zvláštnosti recyklovaného betonu.
7. Popište podmínky zhotovení kvalitní pohledové plochy monolitické betonové konstrukce.
8. Popište výrobu a složení pěnobetonu



2.8 Reologie čerstvého betonu

Definice

Reologie je věda o deformacích a toku hmoty, nebo-li fyzika deformací. Objasňuje vztahy mezi strukturou, chemickým složením a mechanickými vlastnostmi látky. Řeší vztahy mezi napětím, přetvořením a časem, dále napjatost viskózních kapalin.



Cementový tmel (tuhé částice do 0,25mm, voda a chemické přísady) rozhodujícím způsobem ovlivňuje reologické chování čerstvého betonu. Viskozita cementového tmele η je obecně funkcí následujících proměnných

$$\eta = \eta (D, w, t, T, c_{pi}, s_j, E_M) \text{ [Pa.s]}$$

D - gradient rychlosti deformace [s^{-1}], vyjadřuje vliv vnějších sil působících na tok suspenze (cementového tmele)

w - vodní součinitel popisuje koncentraci suspenze

t - čas měřený od počátku smísení vody s cementem ($t_0 = 0$) až do doby měření t [min]

T - teplota suspenze [$^{\circ}C$]

c_{pi} - koncentrace chemické přísady i (plastifikátorů), vztažené v % na hmotnost cementu

s_j - měrný povrch jemných částic j (cementu a příměsí) v $m^2.kg^{-1}$, tím se popisuje vnitřní povrch kompozitního systému (rozhraní tuhé a kapalné fáze)

E_M - energie vložená do přípravy suspenze (intenzita míchání).

Cementový tmel je newtonovskou kapalinou s časovou závislostí reologických vlastností, tj. závislost tečného napětí τ na gradientu rychlosti D není lineární a viskozita η těchto kapalin není látkovou konstantou, ale je funkcí gradientu rychlosti D . K vyjádření reologických vlastností se užívají tři tvary tokové rovnice.

1. Mocninová rovnice toku se nejčastěji používá pro svůj jednoduchý tvar

$$\tau = K \cdot D^n \Rightarrow \eta = \frac{d\tau}{dD} = n \cdot K \cdot D^{n-1}$$

2. Binghamova rovnice toku (je nepřesná při nízkém D)

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \cdot D$$

Voda má v cementovém tmelu rozhodující význam a má několik funkcí:

1. Chemickou, přítomnost vody je podmínkou hydratace cementu. Na počátku procesu hydratace se účastní asi 1 - 2 % vody, v době tuhnutí 4 - 5 % a na celkovou hydrataci je potřeba asi 23 % vody, vztaženo na hmotnost cementu.

2. Fyzikálně - chemickou, na rozhraní dvou fází (cementu a vody) dochází k **solvataci** (adsorpce vodní obálky na povrchu částic), při které se uplatňuje adsorpce, povrchové napětí,

smáčení a drsnost povrchu částic. Zrna cementu adsorbují většinou Ca^{2+} ionty a na jejich povrchu vznikne pozitivní ζ -potenciál (elektrokinetický potenciál jako rozdíl mezi potenciály elektrické dvojvrstvy částice a obklopující kapaliny). Povrch kapaliny se snaží dosáhnout co nejmenšího povrchu prostřednictvím **povrchového napětí**, které klade odpor všem snahám zvětšit plochu povrchu. Povrchové napětí ovlivňuje i **smáčení** povrchu, dané adhezním napětím, tj. rozdílem povrchového napětí tuhé fáze a kapaliny. Smáčení povrchu je také ovlivněno drsností povrchu reálných částic (drsnost se definuje jako rozdíl mezi nejnižším a nejvyšším vrcholem nerovnosti povrchu), který má rozměr řádu 10^{-6} m. Uvedené fyzikálně-chemické jevy dovolují vysvětlit některé procesy v cementové suspenzi , jako jsou:

- **flokulace** částic, zvláště velikosti částic 10^{-4} až $2 \cdot 10^{-7}$ m (= velikosti zrn cementu), nastává při vyšší koncentraci suspenze (nižším vodním součiniteli) a je způsobena rozdílným ζ -potenciálem,

- **koheze** (soudržnost) disperze je vyvolána solvatovanou obálkou zrn, která má tloušťku asi 10^{-7} až 10^{-6} m (vrstva molekulární adsorpce je tlustá $9 \cdot 10^{-8}$ m),

- **stabilita** disperze je umožněna elektrickou dvouvrstvou a zvětšenou tloušťkou solvatované obálky.

3. Mechanickou; voda vyplňuje kapiláry a póry a vzniklými kapilárními silami se stává soudržnou. Partikulární látka (= cement), smíšená s vodou, má různou úroveň soudržnosti (koheze), vyjádřenou tečným napětím τ podle koncentrace, tj. podle vodního součinitele w (obr.44.). Při nízkém vodním součiniteli se chová jako sypká, partikulární látka s malou soudržností, v níž je rozhodující tření částic, nejdříve suché a při vyšším w kapalinové tření. Nejmenší

kapilární síly způsobující soudržnost částic jsou v látce obsahující vzduchové dutiny a největší soudržnost nastává, když částice jsou propojeny v nejužším místě menisky vody. Se zvyšujícím se vodním součinitelem se všechny dutiny mezi zrna cementu vyplňují vodou, snižují se kapilární síly a suspenze je pohyblivější, má nižší viskozitu. Uvedené chování suspenze s různým vodním součinitelem je také závislé na velikosti částic. Čím větší zrna, tím menší kohezní síly. Při stejném vodním součiniteli vzrůstá viskozita cementového tmele se zvyšujícím se měrným povrchem částic. Snižování viskozity cementového tmele lze provést:

- zvýšením vodního součinitele (snížením koncentrace suspenze),
- aktivačním míšením, kterým rozrušíme cementové flokuly,
- působením dynamických kmitů (vibrací), neboť se zvyšuje gradient rychlosti,
- přísadami, které se adsorbují na povrchu zrn a omezí jejich flokulaci,
- přísadami, které zvyšují kladný ζ - potenciál (plastifikační přísady),
- přísadami, které snižují povrchové napětí vody,
- přísadami, které ovlivní totální smáčení zrn (provzdušňující přísady),
- tenzidy navzájem odpuzující částice.

Cementová zrna ve vodní suspenzi sedimentují a na povrchu látky se po určité době objeví vodní hladina relativně čisté vody. V praxi hovoříme o pocení betonu, ale přijatelnější je anglický název **bleeding**. Sedimentace cementových zrn je způsobena jednak flokulací zrn cementu (zrna se vlivem přitažlivých sil a polarit vody spojují do větších celků a pak rychleji sedimentují) a jednak nadměrným množstvím vody v suspenzi (se zvyšujícím se vodním součinitelem vzrůstá míra bleedingu).

Změnami kapilárních sil lze také teoreticky zdůvodnit **zhutňování vakování**. Snižováním vnějšího tlaku vzduchu se porušuje rovnovážný stav, zvyšuje se odpařování vody a při stejném povrchovém napětí vody se zvyšují kapilární síly, což vede ke zmenšování velikosti kapilár. Kapiláry se zmenšují také tím, že s vodou uniká především vzduch obsažený v pórech a tak se zvyšují kapilární síly a koheze částic cementu.

Pole kmitavých pohybů při působení vibrace je různorodé. Vznikající rázy jsou směrově odlišné a udělují zrnům rozdílnou hybnost. Vzniká chaotický pohyb zrn vůči sobě navzájem a četnost srážek částic je stochastický jev. V suspenzi se vytvoří široké spektrum rychlosti pohybu částic, většinou translačního. Zvýšení gradientu rychlosti D působením vibrace je příčinou intenzity zhutňování čerstvého betonu. **Vyšší gradient D snižuje viskozitu cementového tmele a tak mohou zrna disperze rychleji sedimentovat v gravitačním poli zemské přitažlivosti.**

Čerstvý beton je polydisperzní kompozitní látkou, která je tvořena dispergovanou fází (kamenivem) a disperzní fází (cementovým tmelem). Celý systém má omezenou soudržnost, neboť vazby mezi zrny jsou velmi slabé. Vlastnosti systému závisí na vlastnostech fází, objemovém zastoupení těchto fází, mezerovitosti dispergované fáze, na interakcích mezi dispergovanou a disperzní fází a na působení vnějších sil. Celý systém je ovlivňován na vnějších

podmínkách prostředí, teplotě a času. Aplikace fyzikálních zákonů na reologické chování čerstvého betonu je značně obtížná, vzhledem ke stochastickým závislostem vlastností a jednotlivých fází navzájem.

Příčiny stochastického charakteru systému jsou:

- velikost částic jednotlivých fází je řádově odlišná (zrna kameniva 10^{-2} - 10^{-4} m, zrna cementu a příměsí 10^{-4} - 10^{-6} m, přísady, často koloidy 10^{-7} - 10^{-8} m),
- časová závislost reologického chování cementového tmelu v důsledku hydratace cementu,
- nahodilé rozložení tangenciálních a normálních sil na rozhraní kapalně a tuhé fáze, tím se v systému vytváří rozdílné gradienty rychlosti částic proti sobě navzájem,
- různý tvar zrn, charakter povrchu zrn a tím nelze definovat stykové třecí plochy zrn,
- rozdílná relaxační doba parciálních částí systému,
- heterogenita a anizotropie systému se projevuje rozdílnou koncentrací fází v systému,
- neurčité rozložení vzduchových dutin a pórů v systému,
- empirické zkušební metody s poměrně nízkou přesností měření s ohledem na subjektivní indikace některých parametrů.

Konzistence vyjadřuje odpor proti přetváření, je to zvláštní technologická vlastnost, která je definována použitou zkušební metodou. "V praxi, více jak 50 let, používaný termín - zpracovatelnost čerstvého betonu - je pojmem, který obecně zakrývá naši nevědomost o reologii čerstvého betonu" (Blombled). Konzistence K je obecně závislá

$$K = K(\eta, V_{CT}, a_K)$$

η = viskozita cementového tmelu [Pa.s] je stanovena pro předpokládaný gradient rychlosti D [s^{-1}] (podle intenzity působení vnějších sil), pro daný vodní součinitel w , koncentraci a druh plastifikační přísady c_p a pro množství m_p i měrný povrch s_p příměsí v příslušném času a při konkrétní teplotě.

V_{CT} = objem cementového tmelu [$m^3 \cdot m^{-3}$], jako součet absolutních objemů cementu, vody, příměsí, včetně zahrnutí množství pórů v betonu V_Z [%].

a_K = kvalita kameniva, vyjádřená měrným povrchem kameniva s_K , který je závislý na granulometrii a tvaru zrn.

Vodní součinitel vyjadřuje koncentraci cementového tmelu a řadou experimentů bylo potvrzeno, že se cementový tmel při stejném vodním součiniteli chová odlišně, hodnotíme-li ho samostatně anebo v čerstvém betonu. Pravděpodobné příčiny odlišného chování:

Část vody obsažená v cementovém tmelu je potřebná na vytvoření solvační obálky na zrnech kameniva a část je potřebná k nasáknutí suchého kameniva. Jestliže se zvyšuje obsah tuhých částic v cementové suspenzi o jemné podíly kameniva, snižuje se poměr vody k tuhým částicím, tj. vodní součinitel se snižuje.

2. Mění se tloušťka obálky cementového tmelu na zrnech kameniva, která je řádově 10^{-5} až 10^{-4} m, což ovlivňuje viskozitu čerstvého betonu, smýkající se vrstvy mají rozdílnou relaxační dobu a proto se cementový tmel chová odlišně.

3. Platí zákonitost konstantní potřeby vody. Při dávkování cementu $m_C \in (200;400) \text{ kg.m}^{-3}$ a konstantním množstvím vody se mění konzistence jen nepatrně a lze ji považovat za konstantní. Vodní součinitel se zvyšující dávkou cementu snižuje. Množství vody potřebné na smáčení cementu eliminuje zvyšující se podíl cementového tmelu.

Měření konzistence čerstvého betonu lze provádět čtyřmi metodami dle EN 206-1. Verbální popis konzistence: 0 - velmi tuhá, 1 - tuhá, 2 - plastická, 3 - měkká, 4 - velmi měkká, 5 - tekutá, 6 - velmi tekutá. Konzistenci měříme:

- zkouškou sednutím s označením S1(10 mm) – S4 (210 mm) podle ČSN EN 12350-2,
 - zkouškou rozlitím s označením F1 (< 340 mm) – F6 (>630 mm) dle ČSN EN 12350-5,
 - zkouškou Vebe označované V0 (> 31s) – V4 (3s) podle ČSN EN 12350-3,
- zkouškou dle stupně zhutnitelnosti s označením C0 (> 1,46) – C3 (1,04) podle ČSN EN 12350-4.

Cvičení

1. Stanovení konzistence betonu – všechny metody.
2. Vliv různé dávky záměsové vody na zpracovatelnost čerstvého betonu, pevnosti po sedmi dnech normálního zrání.
3. Měření vlivu plastifikačních přísad na zpracovatelnost a pevnost betonu po sedmi dnech normálního zrání.
Měření obsahu vzduchu v čerstvém betonu.



Kontrolní otázky

1. Co je reologie a popište reologické vlastnosti : viskozita, mez toku, thixotropie, dilatance ?
2. Nakreslete tokovou křivku cementového tmele podle mocninové a Binghamové rovnice.
3. Vypočítejte změnu viskozity η cementového tmele při různém gradientu rychlosti D a vodním součiniteli w z rovnice

$$\eta = 0,06 \cdot w^{-4,8} \cdot D^{-05}$$
4. Popište vliv vodního součinitele w , objemu cementového tmele VCT a povrchu kameniva SK na konzistenci čerstvého betonu.
5. Vyjmenujte a popište čtyři metody zkoušení konzistence čerstvého betonu. Co je označení konzistence S1, F1, C1, V1 ?
6. Jak se změní konzistence čerstvého betonu z příkladu 18., změní-li se měrný povrch kameniva na $3 \text{ m}^2.\text{kg}^{-1}$?



7. Vypočítejte závislost konzistence $K [s]$ Vebe na zdánlivé tloušťce obálky cementového tmele na povrchu kameniva $\delta \in (15;50)\mu m$; viskozita cementového tmele $\eta = 0,133 Pa.s$.
8. Nakreslete prostorový graf závislosti (74) pomocí tabulkového procesoru EXCEL .
9. Vypracujte program odhadu konzistence čerstvého betonu.
10. Navrhněte složení vysokohodnotného betonu.

2.9 Vysokohodnotné a samozhutňující betony

2.9.1 Vysokohodnotné (vysokopevnostní) betony

Tímto pojmem se rozumí betony pevnostní třídy od 65 MPa pevnosti v tlaku a označují se symbolem HSC (High Strength Concrete). Tento beton dosahuje za 24 hodin asi 50 MPa pevnosti v tlaku a v normových podmínkách za 28 dní 80 až 120 MPa. Beton vyniká hutností a tím je částečně odolný v mírně kyselém prostředí, odolný proti mrazu a je ideálním konstrukčním materiálem jak pro dílce (na př. betonové roury k protlačování světlosti 2,6 m), tak pro monolitické konstrukce (na př. mrakodrapy o výšce 200 - 300 m, těžební plošiny pro těžbu ropy v moři výšky 300 m). Přednosti vysokohodnotného betonu lze formulovat:

- zvýšení staticky účinného průřezu a tím zmenšení objemu konstrukcí,
- jednodušší betonování vlivem zmenšení stupně vyztužení,
- zvýšená trvanlivost v důsledku zvýšení hutnosti cementového kamene a tím i snížení rychlosti karbonatace, sulfatace a působení korozivního prostředí a zvýšená mrazuvzdornost,
- snížení nákladů, neboť se snižuje objem konstrukce i když se mírně zvyšují měrné materiálové náklady.

Všeobecné požadavky na složení betonu lze shrnout následovně:

Vodní součinitel w je třeba snížit na hodnotu 0,20 až 0,35 použitím účinných superplastifikátorů. Snížení w pod hranici $w = 0,35$ dokazuje, že veškerý cement zcela nezhydratuje. Nezhydratované části zrn cementu působí v cementovém kameni jako plnivo, s velmi dobrou soudržností a zvyšují tak pevnost cementového kamene, neboť zrna slinku mají pevnost 200 - 400 MPa.

Superplastifikátor je nutný k dosažení dobré zpracovatelnosti čerstvého betonu při nízkém vodním součiniteli. Používají se sulfonované melamin- nebo naftalen-formaldehydové kondenzáty (SMF, SNF) v dávkách nad 1,5 % hmotnosti cementu, ale hlavně polykarboxylové sloučeniny. Při $w \in (0,20;0,35)$ se dosahuje konzistence měřené rozlitím od 50 do 60 cm. Často se přísady dávkuje až na staveništi. Doporučuje se dávkování za 1/2 až 3 minuty po přidání vody do míchačky, aby se část přísady nevsákla do suchých zrn kameniva a tím se snížila účinnost superplastifikátoru.

Křemičité látky (silica fume, mikrosilika, silika) vznikají při výrobě ferosilicia, ferosilikochromu, ferosilikomanganu, krystalického křemíku, siliko-

kalcia a vyrábí se také uměle. Obsahují 80 až 98% amorfního křemene s vysokým měrným povrchem $15\text{-}30\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$

(stanovené metodou BET) s velikostí částic $0,1$ až $0,2\ \mu\text{m}$ (stanovené pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu). Technickým parametrem je sypaná hmotnost, která činí 150 až $250\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, pro srovnání cement 1200 a popílek asi 700 . Vyráběná monosilica s měrným povrchem $180 - 230\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ a velikosti částic $0,015\ \mu\text{m}$ (pro srovnání cement $0,3\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ a $10 - 150\ \mu\text{m}$). Působení křemičitých látek v betonu lze shrnout:

a) Jsou účinným plnidlem cementového kamene

b) Zvyšují pevnost v důsledku pucolánové reakce za tvorby kalciumpohydrátů (CSH)



Úplnou hydratací portlandského cementu vzniká asi 24% $\text{Ca}(\text{OH})_2$, pro potřebnou imunitu ocele ($\text{pH} = 12$) je potřeba 4% $\text{Ca}(\text{OH})_2$; maximální dávka křemičitých úletů je pak určena



proto se doporučuje největší dávka do 11% hmotnosti cementu.

c) Výrazně se zvyšuje soudržnost cementového kamene s povrchem zrn kameniva. Slabým místem v betonu není pouze cementový kámen, ale také kontaktní zóna na povrchu kameniva obalená relativně málo pevným portlanditem nebo ettringitem. Přidáním úletů se situace výrazně mění. Vytvořená kontaktní zóna je velmi pevnou, což dokazuje lom betonu přes zrna kameniva a nikoliv jako u obvyklého betonu přes kontaktní plochy.

d) Křemičité látky se nejlépe dávkují ve vodní suspenzi (1:1), tím se vytvoří shluky zrn.

Druh a množství cementu. Používá se portlandský cement CEM I 52,5 v množství asi $450\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ($400 - 500\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$). V USA se dávkuje od 400 do $600\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Vyšší dávky cementu však zvyšují smrštění betonu.

Tab.15 Návrh třídění vysokohodnotných betonů.

Třída HSC	I.	II.	III.
Pevnost v tlaku [MPa]	$75 \pm 12,5$	$100 \pm 12,5$	$125 \pm 12,5$
Vodní součinitel	0,30 - 0,35	0,25 - 0,30	0,20 - 0,25
CEM I	37,5	37,5 - 47,5	47,5
Množství cementu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	350 - 450	400 - 500	450 - 550
Plastifikátor [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	5 - 20	10 - 25	15 - 30
Pevnost kameniva [MPa]	> 100	> 150	> 150
Max. zrno kameniva [mm]	22	16	12
Mikrosilika SiO ₂ [% CEM]	0	5 / 10	10 / 15
Konzistence, rozlití [cm]	42 - 48	49 - 60	49 - 60

Kamenivo. Vyžaduje se prané kamenivo, většinou s maximálním zrnem 16 mm. Vzhledem k použití křemičitých úletů je třeba omezit obsah zrn do 0,25 mm. Volí se křivka zrnitosti B₁₆.

Pevnost. Vysokohodnotný beton je velmi křehký, má malou duktilitu a při zkoušení dochází až k explozivnímu porušení při lomovém stlačení 0,3 % (výpočtová pevnost se uvažuje hodnota při stlačení 0,21 %). Smyková pevnost je ≥ 5 MPa a pevnost v tahu ohybem ≥ 8 MPa.

Navrhuje se i určité třídění vysokohodnotných betonů podle pevnosti v tlaku. Pro zvýšení duktility a snížení křehkosti se používá rozptýlená výztuž. V praxi byla ověřena vlákna ocelová, lubrikovaná skelná a polypropylenová.

Tyto betony se vyznačují menším dotvarováním, vyšším hydratačním smrštěním a menším smrštěním způsobeným migrací vlhkosti. Mají vysokou trvanlivost, vyšší vodotěsnost a odolnost proti korozi, zejména karbonataci. Uvedené vlastnosti souvisí se změnou pórovité struktury a zvýšením hutnosti v důsledku velmi nízkého vodního součinitele.

Kontrolní otázka

Jakými parametry a složením se vyznačuje vysokohodnotný beton?



2.9.2 Samozhutnitelný beton

Od osmdesátých let se v Japonsku rozvíjí výzkum a užití betonu označovaného SCC (Self Compacting Concrete), který svým složením vyloučí některé problémy související se zpracováním čerstvého betonu. **V principu se řeší reologické chování čerstvého betonu.** Přednosti samozhutňujícího betonu lze formulovat následovně:

1. Zlepšení pracovních podmínek vyloučením vibrace ponornými vibrátory, které poškozují zdraví pracovníků, popisované lakonicky jako tvorba "bí-lých prstů".
2. Snížení hladiny hluku na staveništi (v mnoha městech není dovoleno zhutňovat beton vibrací po šesté večerní hodině), proto je také SCC nazýván "tichý beton".
3. Zvýšení homogenity tvrdnoucího betonu i při hustém vyztužení konstrukce, která pak nezávisí na schopnostech pracovníků, proto se hovoří o "tolerantním betonu". Čerstvý beton je dobře čerpatelný, snižují se náklady na jeho zpracování.
4. Čerstvý beton dobře vyplní i obtížně dostupná místa v bednění, která jsou nedostupná ponornými vibrátory. Takže lze realizovat i architektonicky komplikované tvary konstrukce.
5. Samozhutňující beton vytváří velmi dobrou kvalitu povrchu betonové konstrukce a má dobrou soudržnost. Kontaktní zóna cementového kamene a povrchu kameniva je méně pórovitá, tím je zvýšena soudržnost a trvanlivost betonu.
6. Čerstvý SCC beton má velmi dobré tokové vlastnosti, tj. příznivou viskozitu a dobrou soudržnost. Nedochozí k segregaci čerstvého betonu, nevyskytuje se bleeding.

Návrh složení (Okamura): Zvolíme obsah vzduchu v čerstvém betonu. Množství hrubého kameniva je 50 % celkového objemu kameniva. Maximální zrno je většinou 16 mm, případně 22 mm. Drobné kamenivo do 4 mm tvoří 40 % objemu malty v betonu (zrna do 0,09 mm se do tohoto množství nezahrnují). Optimální poměr vody k jemným podílům tuhých částic (cement, příměsi do 0,09 mm - popílek, vápencová moučka atd.) se stanovuje experimentálně na zvláštní výtokové nádobce a rozlitém. Optimální rozlité čerstvého betonu je asi 650 mm (Bartoš). Pro omezení odměšování a bleedingu se používá ve vodě rozpustný mikrobiologický polysacharid v dávce 0,2 - 0,5 kg.m⁻³ betonu.

Reologické vlastnosti čerstvého samozhutňujícího betonu se ověřují na přístrojích různého principu posouzení toku. Používají se superplastifikátory na bázi polykarboxilových eterů. Pro zpracovatelnost čerstvého betonu má význam tekutost (zvratná hodnota viskozity), doba neměnnosti vlastností toku čerstvého betonu (doba zpracování čerstvého betonu bez změny jeho konzistence za 1,5 hodiny), soudržnost (nesmí dojít k odměšování vody a hrubých zrn kameniva) a průtokovost (nesmí docházet k blokování hrubého kameniva v mezerách mezi pruty výztuže). Nejčastěji se k měření uvedených vlastností používají různé typy přístrojů, které napodobují tok čerstvého betonu v bedně.

Některá publikovaná složení samozhutňujícího betonu jsou uvedena v tabulce. Beton (Bartoš) měl pevnost v tlaku za 28 dní 68,3 MPa a čerstvý beton vykázal rozlité 720 mm za 5 minut a 715 mm za 90 minut.

Tab.16 Složení samozhutnitelných betonů

Autor	Okamura	Bartoš
Cement	341 kg CEM II 42,5	330 kg CEM I 42,5
Voda	165 dm ³	185 dm ³ (efektivní)
Příměsi	180 kg popílek	174 kg mletá struska
Písek	642 kg (0 - 4 mm)	895 kg (0-5 mm), 6,6 % do 150 μm
Hrubé kamenivo	949 kg (4 - 16 mm, šterk)	750 kg (5 - 20 mm, žulová drť)
Přísady	2,1 kg komplex polykarboxilový ether 0,08 kg polysacharid	8,46 kg Sikament 10

Samozhutnitelný beton musí vyhovovat všem technickým požadavkům podle deklaráce a především se kontrolují jeho reologické vlastnosti. Tento beton má schopnost téci a vyplnit prostor v bedně nebo ve formě působením vlastní hmotnosti. Musí být schopen protéci mezi malými otvory (mezi pruty výztuže) a nesmí nastat segregace, tj. musí zůstat stále homogenní.

Samozhutnitelný beton se označuje podle zkoušek reologického chování:

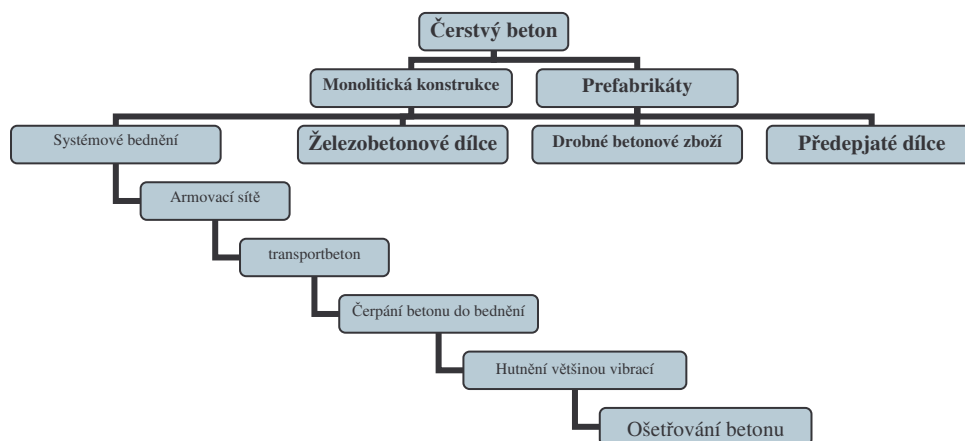
1. Stupně rozlité SF1 (550-650)mm do SF 3 (760-850)mm.

2. Stupně viskozity. Čas výtoku do koláče 500 mm VS1 ($< 2s$) a VS2 nebo dobou výtoku z nádoby VF1 ($< 8s$) a VF 2 (9-25)s.
3. Stupně schopnosti protéci L- formou. PA1 a PA2, podle poměru výšek hladiny pro 2 nebo 3 tyče.

Sítová zkouška odolnosti proti segregaci, se označuje stupni SR1 a SR 2.

2.10 Technologie zpracování čerstvého betonu

Zpracování čerstvého betonu se rozděluje na fázi míšení složek čerstvého betonu, fázi dopravy a ukládání do bednění nebo do forem a fázi zhutňování. Cílem je dosažení stejnorodosti (homogenity) složení betonu, který se při dopravě a ukládání nerozmísí a také v poslední fázi dostatečně zhutní, tj. bude obsahovat jen minimální množství vzduchových dutin (kromě provzdušněného betonu). Výrobu betonu, dopravu a ukládání musí zajišťovat pracovníci s odpovídajícími vlastnostmi a zkušenostmi. Odpovědní pracovníci musí být přítomni po celou dobu tohoto procesu (nebo vyškolený zástupce).



2.10.1 Zpracování čerstvého betonu

Příjem a **skladování složek** betonu.

- **Dávkování** složek do míchačky.
- **Míšení** složek betonu je určeno dobou míšení, typem míchačky a požadovanou konzistencí čerstvého betonu.

V současné době se téměř všeobecně používá **transportbeton**, který se vyrábí v centrálních betonárnách.

Bezodpadová technologie betonu. V centrálních betonárnách vzniká asi 2 - 4 % zbytků čerstvého betonu (v autodomíchavačích a z mytí míchačky a pod.). Jejich ukládání na skládku je nevhodné a především nežádoucí z hlediska životního prostředí. Skládka betonu zabírá půdu, ohrožuje samočisticí schopnost vodotečí, ucpávají kanalizaci, zvyšují pH půdy. Vzniklé zbytky lze

opět využít k výrobě čerstvého betonu, ale je třeba oddělit kamenivo od cementového kalu a případně sedimentaci oddělit jemné podíly od vody.

V této fázi zpracování čerstvého betonu se musí provádět inspekce (vizuální kontrola) před betonováním, která sestává z kontrol: rozměrů bednění a umístění výztuže, odstranění prachu, pilin, sněhu, ledu a zbytků vazacího drátu z bednění nebo z podkladu, úpravy pracovní spáry, tuhosti bednění, umístění distančních tělísek a přípravy kompetentních a vyškolených pracovníků. Další inspekce se provádí během betonáže, kdy se zejména kontroluje: dodržení stejnorodosti betonu během dopravy a ukládání, stejnoměrné rozprostírání a zhuňování, maximální výšky volně shazovaného čerstvého betonu, dobu zpracování betonu od jeho zamíchání, rychlost zaplňování bednění, zvláštní opatření v zimě nebo při betonování pod vodou nebo v horkém podnebí.

Dopravu čerstvého betonu rozdělujeme podle kontinuity materiálového toku na kontinuální (dopravní pásy, šnekové dopravníky, pneumatická nebo hydraulická doprava) a na přetržitou (doprava kontejnery, vozíky, automíchávači). Podle výškové polohy dopravní cesty se dělí na pozemní, závěsnou (ve výrobnách) a nadzemní (jeřáby). Také podle pohybu jednotlivých částí čerstvého betonu během dopravy, kdy je čerstvý beton v relativním klidu nebo je během cesty promícháván nebo proudí v potrubí.

Transportbeton je čerstvý beton, který je zamíchán v centrální betonárně a dodán na staveniště automíchávači, tj. autem s vestavbou otáčivého bubnu obsahu 6 - 12 m³ čerstvého betonu. Maximální doba dopravy se uvádí 90 minut při asi 20 °C nebo nejdelší dopravní vzdálenost 25 - 30 km. Prodloužení této doby vyžaduje použití retardačních přísad. K dopravě čerstvého betonu od automíchávače do bednění se používá:

Hydraulická doprava čerpadly. Používá se dvou válcový pístový systém poháněný olejem vysokotlakového čerpadla (schéma je na obr.61.). Válce jsou ve střední komoře oplachovány vodou. Hydraulický olej vyvozuje vyšší tlak a umožňuje kratší válce. Jiný princip používá odstředivé čerpadlo s tlakovou vodou, které však vyvodí menší provozní tlak, ale změnou otáček čerpadla se reguluje rychlost pístu a pohyb čerstvého betonu v potrubí je klidnější a pravidelnější. Potrubí je unifikováno vnitřním průměrem 100 a 125 mm.

Ukládání čerstvého betonu. Před uložením se musí zkontrolovat uložení výztuže, svázání křížujících prutů ocele (obr.64.) a polohu distančních tělísek (obr.65.), které jsou z plastů nebo z drobnozrnného betonu. Ukládání čerstvého betonu se děje gravitačním způsobem, při kterém často dochází k rozmíšení, segregaci. Základním požadavkem této operace je nutnost zamezit odmíšení čerstvého betonu během dopravy a ukládky do bednění. Možnosti rozmíšení a správné způsoby ukládání jsou znázorněny na obr.66. Platí obecný princip, že všechna stejně velká zrna musí získat při pádu přibližně stejně velkou kinetickou energii. Odmíšení lze omezit vhodným složením betonu (dobrá zrnitost kameniva, dostatečný objem cementového tmele a nižší vodní součinitel), úpravou násypky a snížením výšky padajícího čerstvého betonu. Doporučují se **maximální výšky** volného pádu H (vzdálenost mezi výpustným otvorem a povrchem betonu v bednění):

- sloupy s průřezem nad 0,4 m, stěny s tloušťkou nad 15 cm H = 3 m,
- sloupy s průřezem do 0,4 m, stěny s tloušťkou do 15 cm H = 2 m,

- velmi vyztužené konstrukce s křížující výztuží H = 1 m,
- desky, plochy H = 1 m.

Pracovní a dilatační spáry. Deformační spáry vznikají sedáním konstrukcí (rozdílné založení stavby, rozdílné zatížení konstrukce), teplotní roztažností a smršťováním betonu. Vzdálenost deformačních spár je všeobecně 25 - 35 m, ale konstrukční prvky vlivem klimatických změn často vyžadují snížení na 10 - 15 m. Těsnění dilatačních spár se provádí licími živičnými látkami nebo elastickými pásy z polymerů (obr.67.). Pracovní spáry vzniknou přerušáním betonování na více jako 2 hodiny.

2.10.2 Zvláštní způsoby betonování

Do této skupiny operací zařazujeme stříkání betonu (torkretování), injektování, betonování pod vodou a dvoufázové betonování.

Stříkaný beton. Principem technologie je vrhání čerstvého betonu na tuhý podklad. Od běžných technologií se liší složením betonu, způsobem provádění a ekonomii, která je charakterizována množstvím odpadu odrazem. Kamenivo se používá do zrna 16 mm (většinou do 11 mm) s vyšším podílem

Při stříkání betonu vzniká určité množství **odpadu odrazem**. Největší podíl odpadu vzniká na počátku stříkání (až 50 %), který se postupně snižuje až pod hranici 10 %. Nejdříve se na tuhém podkladu udrží jen malá zrna a jakmile se tloušťka nastříkané vrstvy zvýší, zrna se zabořují a klesá podíl odpadu. Z hlediska techniky provádění je množství odpadu závislé:

Injektování. Používá se jednak k zpevnování podloží základů a k utěšňování spár a jednak k vyplňování kabelových kanálů dodatečně předpínaných konstrukcí. Vysoké požadavky se kladou na injektážní maltu pro předpínané konstrukce, která musí zajistit dokonalé a trvanlivé obalení předepjaté výztuže, udržení předpjetí a spojení napětí v oceli s celou konstrukcí. Z kanálků musí být vytěsněny veškeré vzduchové dutiny, proto se vyžadují dobré reologické vlastnosti injektážní malty, která nesmí segregovat sedimentací cementu. Minimální pórovitost malty omezuje vznik trhlinek a zamezuje korozi oceli. Obsah chloridů je limitován 0,1 % nebo 0,2 % hmotnosti cementu. Cementová injektážní malta musí mít vysokou tekutost a přilnavost v plastickém stavu, malé smršťování při tvrdnutí, dostatečnou pevnost a mrazuvzdornost a nemá být náchylná k vyplavování jemných částic.

Dvoufázové betonování. Bednění nebo vymezený prostor se vyplní hrubozrnným štěrkem s malým podílem jemných frakcí, štěrk se zhutní a pak se do něj vhání přetlakem cementová malta. Podmínkou dvoufázového betonování je dostatečně čisté kamenivo s poměrem velikosti zrna největšího k nejmenšímu 6 : 1 až 10 : 1. Výsledný beton může dosáhnout pevnosti v tlaku 14 - 40 MPa při množství cementu od 100 do 290 kg.m⁻³. Výhodami dvoufázového betonování jsou úspory při míchání (kamenivo, které tvoří asi 70 % hmoty se nedávkuje do míchačky, ale přímo do bednění), lze betonovat i těžko přístupná místa, vylučuje se segregace kameniva. Nevýhodami jsou jednak potřeba kvalitního a vytříbeného štěrku a jednak potřeba zvláštního zařízení a speciální míchačky.

Betonování pod vodou. Vyžaduje zvláštní opatření při ukládání čerstvého betonu do vody. Především v místě ukládání **voda nesmí proudit**, ale musí být v klidu, aby nedocházelo k vyplavování cementu vodou. V žádném případě se nesmí čerstvý beton volně sypat vodou. Metody betonování jsou

Betonové plochy lze rozdělit na potěry a podlahy v pozemních stavbách a na betony vozovek.

Potěry jsou betonové plochy v budovách prováděné jako podkladní (vyrovnání povrchu, řešení spádu, vrstva pod nebo nad izolací). **Podlahy** (průmyslové) jsou povrchové vrstvy vyžadující vyšší odolnost proti obrusu. Podkladní betony mohou být jednovrstvé tloušťky 25 - 40 mm s požadovanou pevností v tahu ohybem 1,5 - 4,5 MPa nebo jako plovoucí potěry na dělicích, uzavíracích nebo těsnících vrstvách tloušťky 35 mm (na měkké izolaci až 40 mm) s pevností v tahu ohybem 2,5 - 3,5 MPa. Čím nižší dynamická tuhost izolace, tím vyšší požadavek na pevnost v tahu ohybem. Podlahy (obrusné vrstvy) mají tloušťku 35 - 80 mm, pevnost v tahu ohybem 2,5 - 4,5 MPa. Pro zvlášť namáhané obrusné vrstvy se používá vláknobeton, polymercementové a polymerové betony. Také se provádí impregnace povrchu betonu polymery a lze dosáhnout až 110 MPa pevnosti v tahu ohybem.

Podlahy z betonu vyztuženého ocelovými vlákny. Ocelová vlákna eliminují vývoj vlasových trhlin. Koncentrace napětí v blízkosti vlasových trhlin je vlákny redukována díky vyššímu modulu přetvárnosti ocele. Betonové desky vyztužené ocelovými vlákny vykazují vyšší pevnost v tahu ohybem i v tlaku, sníženou deformaci i vyšší modul pružnosti, vyšší rázovou pevnost a odolnost proti teplotním změnám. Doporučené složení betonu: 320 -380 kg.m⁻³

Podkladní vrstvy vozovek se provádí několika technologiemi (nejsou uváděny asfaltobeton). Budují se z několika vrstev za použití asfaltového nebo cementového betonu. Každá vrstva konstrukce vozovky má svou funkci (podkladní, obrusnou, drenážní aj.).

Některé technologie lze použít i pro obrusné vrstvy méně zatížených vozovek.

a) Kamenivo stmelené hydraulickým pojivem (ČSN 73 6124). Technologie je rozdělena na podkladový beton (hutněný povrchovou vibrací), na válcovaný beton (hutněný válcováním), na mezerovitý beton (tvoří plošnou drenáž) a na kamenivo zpevněné cementem nebo pomalu tuhoucím pojivem (mletá struska s budičem hydraulicity). Tloušťky vrstev jsou 100 - 300 mm, s maximálním zrnem kameniva 22 - 63 mm. Množství cementu pro podkladní beton 330-400 kg.m⁻³, w = 0,4, pro válcovaný beton 250 - 280 kg.m⁻³, w = 0,35, pro mezerovitý beton 220 kg.m⁻³, w = 0,41 a pro zpevněné kamenivo 90 - 100 kg.m⁻³, w = 1. Pevnosti v tlaku 15 - 25 MPa, mezerovitý beton 8 MPa.

Cementobetonové kryty vozovek (ČSN 73 6123). jsou z nevyztuženého nebo vyztuženého betonu, pokládáné v jedné nebo ve dvou vrstvách (spodní konstrukční a vrchní obrusná). Cementobetonové kryty se člení podle dopravního zatížení (ČSN 73 6114) na skupiny vozovek s předepsanými parametry (tab. 17.). Minimální tloušťka vrstvy u dvouvrstvých krytů je předepsána 70 mm pro skupinu L,I. až III. a pro ostatní 50 mm.

Tab.17 Členění cementobetonových krytů vozovek.

Skupina	Specifikace komunikace	Třída dopravního zatížení	Tloušťka [mm] Min - max
L	letištní dráhy a plochy delší 1200 m	-	220 - 400
I.	dálnice a rychlostní silnice, rychlostní tř. A1	I - II	220 - 260
II.	silnice I. tř. a komunikace rychlostní tř. A2	II - III	200 - 240
III.	silnice II. a III. tř., parkoviště nákladních aut	III - IV	150 - 220
IV.	místní a účelové komunikace, parkoviště osobních aut	IV - VI	100 - 180

Konstrukční zásady. Šířka desky do 4,5 m u komunikací a 8,5 m na letištních drahách, pokud kryt nemá příčnou výztuž. Délka desky do 25 násobku tloušťky desky u nevyztuženého krytu nebo krytu s kluznými trny v příčných spárách. Krytí výztuže minimálně 40 mm a jmenovité krytí u horního povrchu min 50 mm. Příčné spáry jsou smršťovací (kontrakční) a prostorové (dilatační) zhotovené s kluznými trny nebo bez těchto trnů a pracovní (jednoduché, s ozubem nebo s kotvením desek). Podélné spáry smršťovací a pracovní a kloubové. Smršťovací spáry se zřizují nejvhodněji řezáním ztvrdlého betonu kotoučovými pilami s tloušťkou max 4 mm; hloubka řezu příčných spár je 0,25 - 0,30 násobku tloušťky cementobetonového krytu a podélných spár 0,30 - 0,35 násobku tloušťky krytu. Pro potřebné utěsnění spár se v horní části rozšiřují na 8 mm podélné a nad 10 mm příčné spáry. Prostorové spáry se vytvářejí přerušením cementobetonového krytu na celou tloušťku oddělovacími vložkami (vložka se před utěsněním spáry odstraňuje do hloubky 35 mm), pokud se používají trny nebo kotvy lze prostorovou spáru řešit prořezáním na celou tloušťku desky. Kluzné ocelové trny se ukládají uprostřed tloušťky desky v jedné rovině, rovnoběžně s povrchem vozovky a kolmo na spáru, zpravidla ve vzájemné vzdálenosti 250 mm; v příčných spárách se používají kluzné trny z hladké oceli o průměru 25 mm a délky 500 mm, které jsou na celém svém povrchu opatřeny plastovým povlakem minimální tloušťky 0,3 mm a konce trnů nesmí být zdeformovány, aby byl umožněn prokluz trnu. Pro kotvení podélných spár skupiny vozovek L,I. až III. se užívá hřebínkové oceli o průměru 20 mm a délky min 800 mm nebo průměru 16 mm a délky min 600 mm. Kotevní tyče jsou ve své střední části opatřeny plastovým povlakem v délce 200 mm min tloušťky 0,3 mm.

2.10.3 Zhutňování čerstvého betonu

Zhutňování je technologický proces, kterým porušujeme rovnováhu vnitřních sil čerstvého betonu a vnějších působících sil. Cílem zhutňování je snížení objemu vzduchových pórů v betonu, tj. získat beton s maximální hutností. V procesu zhutňování nesmí nastat odmíšení čerstvého betonu, nesmí nastat jeho segregace a odlučování cementového tmelu. Vnitřními silami jsou kapilární síly, povrchové napětí, vnitřní tření kameniva a fyzikálně-chemické

vlivy. Vnějšími silami jsou vedle zemského gravitačního pole všechna působící zatížení. Porušení rovnováhy vyvoláme vnějšími silami, které působí buď staticky (lisování) anebo dynamicky (dusání, vibrování).

Tab.18 Rozdělení zhutňovacích způsobů (A - působením vnějších sil, B - vnitřními silami)

Zhutňovací způsob	Konzistence	Použití
A. impuls - dusání odstřed'ování strásání	mechanicky C0, ručně C2 C1 C1, V1	základy, monolitické konstrukce trouby, stožáry velmi vyztužené dílce
A. síla lisování válcování extrudování	C1, V1 C2 C1, V1	betonové zboží dílce do C 20/25 výrobky z prostého betonu
B. dynamické kmity- vibrování	C0 - C2, V1 - V3	universální použití
B. fyzikálně chemicky plastifikační přísady vakuování	S4, F4 S1, S2	universální snížení vodního souč. zvláštní případy
B. kombinace vibrolisování vibrovalcování	V0, C0 C1	betonové zboží betonové plochy, masivní beton

2.10.4 Zhutňování vibrací

Vibrace je univerzální zhutňovací metoda a užívá se ve více jak 90 % případů zhutňování. Na čerstvý beton se působí kmitavými pohyby, čímž se uvedou jednotlivé částice do vzájemného pohybu. Rozdílné rychlosti částic vůči sobě navzájem v gravitačním poli zemské přitažlivosti vyvolají změnu soudržných sil v čerstvém betonu a tak umožní sedimentaci zrn kameniva i cementových zrn. Zvyšuje se **gradient rychlosti D** a tím se snižuje viskozita cementového tmele. Zvýšení rychlosti kmitání, tj. zvýšením gradientu rychlosti D, je příčinou sedimentace částic, tj. zhutňování. Gradient rychlosti je nahodilou veličinou a má rozdílnou velikost v různých místech zhutňovaného čerstvého betonu. V procesu kmitání celé soustavy se projevují velikost amplitudy a frekvence, rezonanční jevy, útlum kmitavých pohybů uvnitř systému. Význam **amplitudy** lze popsat rázem koulí, které představují zrna kameniva. Koule dostane impuls od budiče vibrace, narazí na druhou kouli a udělí jí větší rychlost. Druhá koule část svého impulsu předá třetí kouli a odrazí se zpět k první kouli. První koule mezitím dostane další impuls a tak dochází ke složitě-

mu, chaotickému procesu narážení jednotlivých částic do sebe a tím porušování soudržné struktury čerstvého betonu. Působení rázů je podmíněno takovým seskupením částic, aby amplituda byla větší, než vzdálenost částic od sebe. Čerstvý beton tuhé konzistence má velkou mezerovitost, částice jsou od sebe více vzdálena a proto je potřeba na počátku vibrace větší amplitudy. Srážkami zrn se snižuje kinetická energie, která se transformuje na energii potenciální a na tepelnou. Snížení je tím větší, čím je frekvence vibrace menší a amplituda větší. Snižování kinetické energie, překonávání pružného odporu systému (stlačování a roztahování vzduchových dutin) a odporu kapilárních sil i tření zrn o sebe způsobuje **útlum kmitavých pohybů**. Útlum je tím větší, čím je vyšší amplituda a nižší frekvence. Periodický kmitavý pohyb množiny bodů (hmotných elementů) se vyznačuje **rezonančními jevy**. Pohyb zrn a jejich rázy vytvářejí situace, že se zrna pohybují souhlasným směrem rozdílnou rychlostí nebo navzájem proti sobě. Záleží na fázovém posunu jednotlivých kmitavých pohybů a při určité frekvenci nastanou shodné rázy částic, čím se amplitudy sčítají a nastává jev - rezonance. Z technologického hlediska je rezonance nejúčinnější efekt zhutňování. Rezonance se objevuje vždy u zhruba stejně velikých zrn při určité frekvenci. Závislost rezonanční frekvence f_R [Hz] na velikosti částic d [mm] lze vyjádřit empirickým vztahem

Ponorná vibrace se většinou používá na stavbách pro svou univerzálnost a přímým kontaktem s čerstvým betonem. Je méně hlučná, ale vyžaduje ruční obsluhu. Vibrátory (Wacker) se **zabudovaným vysokofrekvenčním elektromotorkem** o napětí 220 V nebo 42 V, s délkou kabelu 15 - 20 m (s ochranným kabelem až 25 m). Jsou vyráběny s tradičním excentrem na hřídeli, ložiska jsou velmi zatěžována a vibrátory po vytažení z čerstvého betonu se zahřejí až na 140 - 150 °C. Dále se vyrábí odvalovaný excentr na vnitřní stěně hrušky, excentr je uložený na hřídeli motorku se zabudovaným měničem frekvence. Průměr hrušky je 30 - 80 mm a odstředivá síla od 17 do 70 N.

Provádění hutnění pomocí ponorného vibrátoru vyžaduje vhodnou konzistenci. Příliš tuhá konzistence způsobí, že otvory po vytažení hrušky se nezačelí a naopak velmi měkká konzistence umožní odmíšení a při dlouhé době vibrace i nasávání vzduchu do směsi. V čerstvém betonu dochází k tlumení amplitudy, která klesne ponořením na 70 - 75 % amplitudy bez ponoření. Akční rádius vibrátoru r se s dobou vibrace prodlužuje. Rychlost ponořování a vytahování vibrátoru má být 5 - 8 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, z toho lze odvodit i dobu hutnění. Nasypaná vrstva čerstvého betonu 300 - 500 mm, ponoření do předcházející, již zhutněné vrstvy, asi 100 - 150 mm, nejbližší vzdálenost od bednění 200 mm, takové jsou provozní požadavky. Akční okruhy se musí vzájemně překrývat.

Povrchová vibrace. Tato přímá vibrace se používá pro málo měkké až tuhé konzistence čerstvého betonu, **povrchový vibrátor** se nemá bořit a tím by rozměšoval měkký čerstvý beton. Kmitavé pohyby jsou usměrněné, upravené synchronním chodem dvou vibrátorů. Hmotnost celého systému má být vyšší, než je odstředivá síla. Posun vibračního systému je ulehčen, když jsou vibrátory umístěny za těžištěm ve směru posunu a usměrněné kmity směřují šikmo vpřed. Obvykle se volí nejmenší vrstva asi pětinasobek největšího zrna kameňiva a největší vrstva podle polohy výztuže. Povrchová vibrace s použitím **vibračních válců** se uplatňuje v technologii válcovaného betonu (RCC) při betonování ploch a masivního betonu na přehradách. Ke zhutňování potěrů a betonových ploch se často používají **vibrační lišty**, které zhutňují čerstvý beton do

největší hloubky 200 mm. Lišty se ručně posouvají po znivelizovaném bočním vedení.

Nepřímou (vnější) vibraci lze rozdělit na příložnou (horizontální), většinou používanou na staveništích a na vertikální (spodní) využívanou při výrobě dílců.

Příložná (horizontální) vibrace. Její užití vyžaduje dostatečnou tuhost bednění a dobré utěsnění jednotlivých dílů. Nerovnoměrným kmitáním při netěsnosti bednění se nasává vzduch a tvoří se povrchové póry a dutiny, rovněž dochází k oddělování cementového tmele a jeho vytékání štěrbinami. Používají se málo měkké až měkké čerstvé betony.

Vertikální (spodní) vibrace. Používá se v průmyslové výrobě dílců a betonových výrobků. Uplatňuje se usměrněná vibrace (neusměrněná způsobuje cirkulaci čerstvého betonu) se zrychlením 5 g - 10 g (před zaplněním formy), aby po zaplnění bylo zrychlení 2 g - 4 g. Optimální frekvence je 100 - 150 Hz. Dostatečná amplituda je pro dokonalé zhutnění významnější, než směrodatné zrychlení. Doba zhutňování tuhých směsí se pohybuje od 10 do 100 s. Používají se vibrátory s příkonem 0,4 - 2 kW odstředivé síly 0,6 - 15 kN, s amplitudou od 0,1 do 2,6 mm a s frekvencí od 25 do 250 Hz. Pro dokonale a nezávadné zhutnění čerstvého betonu jsou vhodné vibrátory s otáčkami hřídele 4500, 6000 a 9000 za minutu. Tato velká frekvence souvisí s malou amplitudou a s velkým zrychlením, které snižují viskozitu cementového tmele, proti normální frekvenci nejméně na polovinu.

Vibrace je nejrozšířenějším způsobem zhutňování. Výhodami vibrace jsou: dokonale zhutnění čerstvého betonu, universální použití na stavbách i ve výrobnách, lze zhutňovat i velmi vyztužené konstrukce a dílce, doba zhutňování je relativně krátká, přilnavost betonu k výztuži je velmi dobrá. Nevýhodami jsou: nestejnomyšlnost zhutnění po výšce vlivem samozhutňujícího tlaku, značný útlum energie uvnitř čerstvého betonu, velké opotřebení forem a bednění, zejména ve spojích a především **velká hlučnost**. Hladina hluku většinou převyšuje hygienickou hranici 85 dB. V mnohých evropských městech není dovoleno na staveništích používat vibrátory po šesté hodině večerní.

Cvičení

Exkurze na výrobu transportbetonu.



Příklad

Zadání: Vypočítejte potřebnou odstředivou sílu vibrátorů pro zhutnění železobetonového dílce s rozměry 2000×1500×250 mm (objemová hmotnost betonu 2400 kg.m⁻³) při použití vibrátorů o síle 15 kN. Hmotnost vibračního stolu 1200 kg. Stanovte počet vibrátorů a vypočítejte změnu odstředivé síly, změnil-li se frekvence z 100 na 150 Hz.



Postup výpočtu:

1. *Podle vzorce vypočítáme potřebnou odstředivou sílu.*
2. *Z rovnováhy plyne, že nejméně stejnou odstředivou sílu musí vyvodit i potřebný počet vibrátorů o příkonu 15 kN.*
Konstrukce vibrátoru se nezmění, pouze se zvýší frekvence vstupního elektrického proudu. Z rovnice plyne

$$\frac{F_1}{(2 \cdot \pi \cdot f_1)^2} = m_U \cdot r_U = \frac{F_2}{(2 \cdot \pi \cdot f_2)^2} \Rightarrow \frac{F_1}{f_1^2} = \frac{F_2}{f_2^2} \Rightarrow F_2 = F_1 \cdot \left(\frac{f_2}{f_1}\right)^2$$

2.10.5 Systémové bednění

Monolitické železobetonové konstrukce mají většinou následující skladbu nákladů: výztuž 32 %, beton 28 % a bednění 40 %. Tradičním tesařským bedněním lze vytvořit jakoukoliv konstrukci, ale pouze pro jedno použití při značné spotřebě dřeva (0,1 m³ na 1 m² zabetonované plochy). V současném stavebnictví stále více převládá používání systémového bednění, tj. průmyslově vyráběný soubor prvků a dílců, zahrnující i opěrný a podpěrný systém, včetně ochranného lešení a pracovních plošin. Systémové bednění lze rozdělit na několik typů použitelných pro různé stavby i konstrukce. Systémové bednění je charakterizováno:

- velkou variabilitou a universálností použití,
- nízkou staveništní pracností (0,2 - 0,7 hod na m²),
- velkou obrátkovostí (200 - 400 krát),
- , dostatečnou tuhostí a pevností, umožňující vyšší rychlost betonáže,
- kvalitou povrchu betonu, malými rozměrovými tolerancemi, jednoduchou a bezpečnou montáží.

Poměrně vysoké pořizovací náklady se řeší leasingem a zapůjčováním bednění, ale i toto vyžaduje rychlé odbedňování a ekonomickou stimulaci účelné organizace práce při zhotovování monolitických konstrukcí. Systémové bednění rozdělujeme na bednění stěn a sloupů, horizontálních konstrukcí, posuvné a šplhací bednění, nafukovací bednění, tunelové bednění. Výčet lze doplnit ztraceným bedněním a bedněním se strukturovaným povrchem.

2.10.6 Separační přípravky

Soudržnost betonu s ocelí (nebo i jinými materiály) je dobrá, což je podmínkou funkce železobetonu. Podobnou soudržnost vykazuje beton i s bedněním a s formou, kde je zájem, aby beton nepřilnul, dobře se odbednil - odformoval (dřívější názvy separačních přípravků - odbedňovací, - odformovací). Přilnavost betonu k bednění a k formám závisí na:

- hladkosti povrchu a druhu materiálu bednění (používají se hladké povrchy),
- druhu, složení a zhutňování betonu (málo soudržný čerstvý beton má nižší přilnavost),
- druhu a tvaru betonové konstrukce nebo dílce (složitě profilované konstrukce se obtížněji odbedňují a dílce s ostrými hranami i členitým čelem potřebují gumovou vložku formy),
- použitím separačním přípravku.

Kontrolní otázky

1. Popište typy míchaček a jejich vhodné použití. Vypočítejte výkon míchačky o obsahu $V_M = 0,25 \text{ m}^3$.



2. *Jak zamezit odmíšení čerstvého betonu během dopravy? Jaké znáte způsoby dopravy čerstvého betonu ?*
3. *Rozdělte zhutňovací způsoby a jejich použití. Rozdělte vibrační způsoby a popište jejich funkci.*
4. *Jak a proč vibrace zhutňuje čerstvý beton? Jaké hodnoty a_g , A , f se používají ? Co je samozhutňující a expanzní tlak ?*
5. *Popište střešení, lisování, extrudování a vakuování, jako metody zhutňování čerstvého betonu.*
6. *Popište zvláštnosti stříkaného betonu, injektování, dvoufázového betonování, betonování vozovek a provádění potěrů.*
7. *Jaké znáte systémová bednění ? Uveďte jejich vhodné použití.*

2.11 Tvrdnutí betonu

Tvrdnutí betonu je způsobeno hydratací cementu, které se projevuje nabýváním pevnosti betonu v závislosti na technologických parametrech a podmínkách prostředí, v kterém tvrdnutí probíhá. Určujícím faktorem je časová závislost hydratace cementu, tuhnutí a tvrdnutí cementového tmele, který přechází v cementový kámen. Obecně lze nárůst pevnosti betonu v čase vyjádřit vztahem

$$R_B = A \cdot C \cdot B \cdot t_n = f_1 (m_C, w, c_{pi}, z_i) \cdot C \cdot f_2 (T, \varphi, p) \cdot t_n$$

A - vyjadřuje technologické parametry betonu: m_C - množství cementu, w - vodní součinitel, c_{pi} - druh a koncentrace přísady, z_i - zpracování čerstvého betonu (aktivace, stupeň zhutnění aj.).

B - charakterizuje vnější podmínky tvrdnutí betonu: T - teplota, φ - relativní vlhkost vzduchu, p - vnější tlak (např. autoklávování).

C - popisuje druh cementu (mineralogické složení, měrný povrch aj.), zejména z hlediska vývoje pevnosti v čase (např. cement označený R - rapid, s urychleným nárůstem počátečních pevností).

t_n - doba výsledné pevnosti betonu, měří se od doby kontaktu cementu s vodou (normalizovaná doba je 28 dní, jiné doby se musí označit počtem dní).

V technologické praxi rozlišujeme tři rozdílné rychlosti nárůstu počátečních pevností betonu:

1. normové podmínky tvrdnutí betonu při 20 ± 2 °C, relativní vlhkosti $\varphi > 0,9$ nebo uložení ve vodě,
2. zpomalené tvrdnutí s použitím retardačních přísad nebo tvrdnutí při nižší teplotě jako 15 °C,
3. urychlené tvrdnutí betonu (označované UTB), které lze docílit některým opatřením:
 - zvýšenou teplotou
 - chemickými přísadami
 - urychlovači tvrdnutí,

- použitím cementu s označením R - rapid,
- složením betonu a jeho zpracováním (nízký vodní součinitel, tuhá konzistence čerstvého betonu),
- aktivací, buď aktivačním mletím cementové suspenze nebo revibrací ztuhlého betonu.

Předpokládaný vývoj pevnosti betonu podle ČSN EN EN 206-1 je uveden v tabulce 19.

Tab.19 Předpokládaný vývoj pevnosti betonu.

Vývoj pevnosti	Poměr f_{C2}/f_{C28}
rychlý	$\geq 0,5$
střední	$\geq 0,3$ až $< 0,5$
pomalý	$\geq 0,15$ až $< 0,3$
velmi pomalý	$< 0,15$
f_{C2}/f_{C28} - poměr pevností za 2 a 28 dnů	

2.11.1 Hydratace cementu

Silikátový slínek obsahuje minerály, které reakcí s vodou tvoří tuhou strukturu cementového kamene. Reakce slínekových minerálů s vodou probíhají v alkalickém prostředí vlivem rozpuštěného $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a případně alkálií. Vzniká nasycený roztok $\text{Ca}(\text{OH})_2$, který vznikl hydratací 0,3 - 1 % C_3S (rozpuštěnost CaO je velmi malá $1,2 \text{ g.l}^{-1}$). Obecně reakci C_3S a $\beta\text{-C}_2\text{S}$ lze vyjádřit



Tab.20. Obsah hlavních minerálů v portlandském slínku.

Minerál	Vzorec	Obsah ve slínku [% hm.]	
		průměrně	min. - max.
trikalcium silikát (alít)	$3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$ C_3S	63	45 - 80
dikalcium silikát (belít)	$2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$ C_2S	20	5 - 32
trikalcium aluminát	$3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ C_3A	8	4 - 16
kalcium aluminát ferit	$2 \text{ CaO} \cdot (\text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3)$ $\text{C}_2(\text{A}, \text{F})$	7	3 - 12
volné CaO	CaO C_V	1	0,1 - 3
volné MgO	MgO M_V	1,5	0,5 - 4,5

$a = 2$ nebo 3 ; je-li $y = 1$, $x = 0,5 - 1,5$ a $z = 0,5 - 2,5$ vznikají kalcium hydrosilikáty typu C-S-H I (nedokonale krystalické, zkroucené lístečky) a je-li $z = 1$, $x = 1,5 - 2,0$ a $z = 1,0 - 4,0$ vzniká typ C-S-H II (ještě méně krystalicky vyvinutý, nejčastěji vlákna). Hlavní složkou portlandského cementu je C_3S , který reaguje s vodou při vzniku kubicky krystalického portlanditu CH a amorfního kalcium hydrosilikátového gelu (obr.105.). Podstatná část alitu zhydratuje do jednoho měsíce na rozdíl od belitu (prakticky pouze modifikace $\beta - C_2S$), který reaguje značně pomalu a podílí se pevnosti cementového kamene až po 30 dnech. Reakcí belitu vznikají shodné fáze jako u alitu.

Rychlost hydratace je také ovlivňována velikostí krystalů, druhem a množstvím iontů v krystalové struktuře, stupněm a druhem krystalových poruch a závislostí na fázovém složení slínku (např. rychlost hydratace belitu je vyšší v přítomnosti alitu). Rychlost hydratace je časově závislý proces a vedle chemického složení je také určována jemností mletí cementu, vodním součinitelem a vnějšími podmínkami (teplotou a vlhkostí).

1. Měrný povrch cementu. Rychlost hydratace je přímo úměrná povrchu cementu, jeho jemnosti mletí. Uvádí se hloubka hydratace cementového zrna za 6 měsíců 3 až 15 μm , velikost zrn cementu bývá 8 až 120 μm , takže k úplné hydrataci velkých zrn cementu vůbec nedojde a jejich jádra jsou vlastně plnivem v cementovém kameni. Zvýšení měrného povrchu cementu je účinný způsob zrychlení procesu hydratace, který se uplatňuje zejména ve stadiu rozpouštění slínkových minerálů, tvorbě přesyceného roztoku a nukleí (krystalických zárodků). Během míchání se může projevit i agregace zrn cementu, vyvolaná elektrostatickými náboji na nerovnosti povrchu zrn cementu, které se někdy ve vodní suspenzi projeví přitažlivými silami vážící zrnka k sobě a dojde ke zdánlivému zatuhnutí cementového tmele.

2. Vodní součinitel. Zvyšováním vodního součinitele nad $w > 0,3$ se prodlužuje doba tuhnutí. Množství vody ovlivňuje velikost hydratačních produktů, při nízkém w jsou malé, při vyšším w nabývají větších rozměrů. Powers uvádí i vliv na stupeň hydratace $\alpha = 0,9\sqrt{w}$.

3. Teplota. Zvyšující teplota cementového kamene zrychluje proces hydratace. Při teplotách pod 20 °C nastává zpomalování hydratace a při + 5 °C je již rychlost hydratace velmi malá a lze říci, že při teplotách pod 0 °C se téměř zastaví i když voda ještě nezměnila skupenství v led. Při teplotách nad 20 °C se hydratace urychluje a teploty nad 30 °C představují proces tepelného urychlování tvrdnutí betonu (UTB). Urychlování procesu hydratace vede k tvorbě hrubé krystalické struktury, srůsty a spojení mezi krystaly jsou menší a tak dochází ke snížení výsledných pevností cementového kamene, který se také stává křehčím.

Mikrostruktura cementového kamene. Přechodem cementového tmele ze suspenze do tuhého skupenství se vytváří pórovitá struktura cementového kamene. Cementový kámen definujeme jako kapilárně pórovitou látku složenou ze tří fází: tuhé, kapalně a plynné. Tuhou fází představují amorfní, nedokonale krystalické a krystalické novotvary hydratovaných slínkových minerálů (tab. 21.).

Tab. 21. Složení tuhé fáze cementového kamene.

Novotvar	Měrná hmotnost [g.cm ³]	Velikost částic [μm]	Podíl objemu [%]	Morfologie
C-S-H	2,1 - 2,6	0,005	50	amorfní stav, velmi variabilní jehličky až síťová struktura
CH	2,24	10 - 100	12	krystalky, tabulkové částice
AFm	1,95	0,1 - 1	13	tenké hexagonální krystalky
AFt	1,75	1 - 10	-	jehličky, tyčinkovité krystaly

Póry v cementovém kameni vznikají přebytečnou vodou (pro úplnou hydrataci cementu je potřeba asi 25 % vody, nevypařitelná voda vázaná v gelové pórovitosti je asi 13 %) při vodním součiniteli $w \geq 0,38$ a také provzdušňovacími přísadami i kontrakcí objemu systému cement - voda (kontrakční pórovitost bývá asi 80 cm³ na 1 kg cementu). Množství a distribuce pórů je závislé na technologických faktorech a na vnějších podmínkách tvrdnutí betonu. Nejmenší póry tvoří vláknité C-S-H a největší kubické hydrogranáty vznikající z C₃A. Se vzrůstajícím měrným povrchem cementu, roste stupeň hydratace, snižuje se celková pórovitost a vzrůstá podíl pórů velikosti 10⁻⁶-10⁻⁸ m. Zvyšováním vodního součinitele roste pórovitost cementového kamene a podíl pórů 10⁻⁶-10⁻⁷ m. Čím je menší vodní součinitel, tím je i menší vzdálenost mezi zrny cementu. Při tvrdnutí v prostředí s relativní vlhkostí vzduchu $\varphi > 0,9$ se pórovitost snižuje, klesá podíl pórů s velikostí do 5.10⁻⁸ m. Tvrdnutím ve vodě klesá nejen celková pórovitost, ale také podíl kapilárních pórů do 10⁻⁶ m. S kapilární pórovitostí úzce souvisí vlastnosti cementového kamene a betonu.

Kapilární pórovitost vytvořená přebytečnou vodou a vzduchovými póry je postupně zaplňována hydratačními produkty, které jsou 2,1 až 2,2 krát objemnější, než je objem cementu před hydratací. Stupeň vyplnění kapilár α_{KP} vyjadřuje rovnice.

2.11.2 Tvrdnutí betonu za vyšších teplot

Vyšší teploty při tvrdnutí betonu používáme k urychlování tvrdnutí betonu (UTB), zejména při výrobě dílců a betonového zboží. Za vyšší teploty se považují teploty nad 30 °C. Vyšší teplota urychluje hydrataci cementu a ovlivňuje pórovitou strukturu cementového kamene, která je způsobena obsahem vody a vzduchu. Voda a vzduch se zvyšováním teploty rozdílně roztahují a tak vzniká různé napětí, které může být příčinou vzniku trhlinek. V teplotním poli pórovitého prostředí migruje vlhkost a nerovnoměrné rozdělení vody vede k rozdílným stupňům hydratace na povrchu částic cementu. Celý proces ohřívání a ochlazování betonu je doprovázen teplotní roztažností, která při rozdílných součinitelích teplotní roztažnosti složek betonu ovlivňuje výsledné pevnosti betonu.

Vlastnosti protěplování betonu jsou ovlivněny částečným porušením struktury. Většinou dochází ke snížení pevnosti proti betonu tvrdnoucím v normálních podmínkách. Snížení pevnosti se výrazněji projevuje u pevnosti v tahu, než u pevnosti v tlaku a zejména při rychlých změnách teploty (více jak $20 \text{ K}\cdot\text{h}^{-1}$) a vyšších teplotách protěplování (nad $60 \text{ }^\circ\text{C}$). Poměr pevnosti v tahu k pevnosti v tlaku může klesnout z 1:10 až na 1:20. Na soudržnost betonu s ocelí může působit rozdílná teplota, ocel je tepelně vodivější, rychleji se roztahuje a tím nastává prokluz (tento stav se nevyskytuje u profilované ocele).

Technologie tepelného urychlování tvrdnutí betonu (UTB) si kladou za cíl, dosáhnout v krátkém čase potřebných manipulačních pevností dílců s minimální spotřebou tepelné energie. Technologie stanovuje režim protěplování s parametry teploty, času, vlhkosti a přestupu tepla z prostředí do betonu. Podle technologického zařízení se volí příslušné tepelné medium.

Režim protěplování je předepsaná a vyzkoušená závislost regulované teploty betonu (většinou však prostředí) v čase. Rozděluje se do čtyř period, které jsou definovány teplotou T [$^\circ\text{C}$] a dobou t [hod.] a zapisuje se

$$t_{UTB} = t_0(T_0) + t_n + t_i(T_i) + t_{ch}(T_{ch}) \text{ [hod.]}$$

1. perioda - odležení po dobu t_0 s teplotou T_0
2. perioda - nárůst teploty v době t_n z teploty T_0 na teplotu T_i
3. perioda - isotermický ohřev při teplotě T_i po dobu t_i
4. perioda - chladnutí po dobu t_{ch} z teploty T_i na teplotu T_{ch} , případně T_0

Doporučený režim protěplování platí pro betony umístěné v jakémkoli prostředí, kromě suchého prostředí (stupeň agresivity 1):

- * teplota do 3 hodin od zamíchání nesmí překročit $30 \text{ }^\circ\text{C}$,
- * teplota do 4 hodin nemá překročit $40 \text{ }^\circ\text{C}$,
- * maximální teplota izotermického ohřevu nesmí překročit $60 \text{ }^\circ\text{C}$,
- * dovolený nárůst teploty je maximálně $20 \text{ }^\circ\text{C}$ za hodinu,
dovolený pokles teploty při chladnutí nejvýše rychlostí $10 \text{ }^\circ\text{C}$ za hodinu.

Příklad

Zadání. Vypočítejte počet dnů potřebných k dosažení 28 - denní pevnosti betonu při teplotním režimu: 1 den při $20 \text{ }^\circ\text{C}$, ostatní dny při $30 \text{ }^\circ\text{C}$.



Postup výpočtu.

1. Hodnota normového zrání dle vzorce

$$M_Z = \sum (T + a)^n \cdot \Delta t \text{ [K}\cdot\text{h]} \text{ nebo [K}\cdot\text{d]}$$

Δt - doba [h] nebo ve dnech [d], kdy působí teplota T [$^\circ\text{C}$]

Pro teploty v mezích $0 - 30 \text{ }^\circ\text{C}$ stanovil Saul-Bergström konstanty $a = 10$, $n = 1$. Pro teploty nad $30 \text{ }^\circ\text{C}$ pak Mironov-Ganin uvádí hodnoty konstant $a = 30$, $n = 2$.

Vypočítanou hodnotu M_Z dosadíme do vzorce a úpravou rovnice získáme neznámou dobu t ve dnech.

Výpočet:

$$M_z = \sum (T + 10) \cdot \Delta t = (20 + 10) \cdot 28 = 840 \text{ K.d}$$

$$840 = (20 + 10) \cdot 1 + (30 + 10) \cdot (t - 1) \Rightarrow t = \frac{840 - 30}{40} + 1 = 21,25$$

V uvedeném teplotním režimu dosáhne beton 28 denní pevnosti za asi 21 dnů.

Vzhledem k rostoucí ceně energií se proteplování betonu v současné době omezuje a urychlování tvrdnutí betonu se řeší použitím cementů vyšších pevnostních tříd a cementů Rapid. Taková technologie je finančně výhodnější.

2.11.3 Betonování v zimě

Z hlediska klimatu rozlišujeme počasí se silnými mrazy ($< -10 \text{ }^\circ\text{C}$) a dlouhým mrazivým obdobím a počasí s mírnými, krátce trvajícím mrazy ($0 \text{ }^\circ\text{C}$ až $-10 \text{ }^\circ\text{C}$). V prvním případě je nutno vedle aktivní ochrany provádět ještě intenzivní pasivní ochranu betonové konstrukce anebo, pokud je to možné, betonáž neprovádět. V druhém případě postačují aktivní metody ochrany a ochránit beton před ztrátami hydratačního tepla.

Příčiny problémů zimního betonování:

1. Zpomalený vývoj pevnosti betonu. Hydratace se výrazně zpomaluje při teplotě nižší než $+5 \text{ }^\circ\text{C}$ a při teplotách pod $0 \text{ }^\circ\text{C}$ se téměř zastavuje. S tím souvisí i nabývání pevnosti betonu.

2. Tvorba ledu ve struktuře betonu. Objem vody přechodem do tuhého skupenství se zvětšuje o 9 %. Tím se vytváří v pórové mikrostruktuře hydraulický tlak a nemá-li beton dostatečnou pevnost dochází vlivem napětí v tahu k místnímu porušení struktury. Snižuje se pevnost betonu, soudržnost cementového kamene s povrchem kameniva i s ocelovou výztuží. Proto je třeba beton v raném stadiu tvrdnutí chránit do té doby, než dosáhne minimální pevnosti. Tuto minimální pevnost nazýváme **zmrazovací pevností R_z** a její velikost se uvádí hodnotou 5 MPa, ale také v mezích od 2,5 do 15 MPa.

Tato minimální pevnost R_z je nedostatečná pro vícenásobné zmrazování a rozmrazování, neboť vzniklé mikrotrhlínky se opakovaným zmrazováním rozšiřují i prodlužují a po několika cyklech nastává viditelné porušení betonu. Pro odolnost betonu proti 25 zmrazovacím cyklům je potřeba minimální pevnosti v tlaku 12 - 15 MPa (pro předpjatý beton min 20 MPa).

3. Sníh a led v bednění a na výztuži. Před betonáží je nutné velmi pečlivě odstranit případný do bednění napadaný sníh a led, nejlépe vysušením horkým vzduchem (méně vhodná je pára). Ocelovou výztuž (pruty $\geq \phi 25 \text{ mm}$ a zámečnické vložky) rovněž očistit od ledu a zahřát ji na teplotu alespoň $0 \text{ }^\circ\text{C}$. V žádném případě nebetonovat na zmrzlou a zledovatělou pracovní spáru.

4. Teplotní diference v průřezu konstrukce. Velmi účinnou ochranou betonu před zmrznutím je využívání hydratačního tepla cementu. Využití hydratačního tepla je velmi účinné u masivních konstrukcí, ale na povrchu betonu dochází k ochlazení venkovním chladným vzduchem a vznikají velké teplotní diference mezi středem konstrukce a jeho povrchem. Teplotní gradienty jsou doprovázeny rozdílnou teplotní roztažností a důsledkem jsou trhlinky betonu.

Příklad

Zadání. Vypočítejte teplotu horké vody k ohřátí čerstvého betonu na $T_{CB} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Uvažujeme adiabatický proces, tj. bez tepelných ztrát. Složení betonu v $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$: $m_C = 320$, $m_K = 1820$, $m_V = 180$. Vstupní teploty složek v $^{\circ}\text{C}$: $T_C = 5$, $T_K = 3$, $T_V = 10$. Sytá pára má tlak 150 kPa a tomu odpovídá teplota $T_P = 110,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ a výparné teplo $r = 2,23\text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.



Postup výpočtu. Ze zákona o zachování energie, neuvažujeme-li tepelné ztráty, součet tepelného obsahu všech složek betonu se rovná nule a z této rovnice vypočítáme T_{CB} .

$$\sum \{ m_i \cdot c_i \cdot (T_{CB} - T_i) \} = 0$$

Výpočet.

$$320 \cdot 750 \cdot (20 - 5) + 1820 \cdot 850 \cdot (20 - 3) + 180 \cdot 4190 \cdot (20 - T_V) = 0 \text{ a úpravou}$$

$$T_V = \frac{320 \cdot 750 \cdot 15 + 1820 \cdot 850 \cdot 17 + 180 \cdot 4190 \cdot 20}{180 \cdot 4190} = 59,6$$

$^{\circ}\text{C}$

Záměsovou vodu musíme ohřát na $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, abychom splnily zadané podmínky výpočtu.

Příklad

Zadání. Vypočítejte množství páry k ohřátí čerstvého betonu na teplotu $T_{CB} = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Vstupní parametry jsou uvedeny v příkladu 13.

Postup výpočtu. Do vzorce dosadíme zadané parametry. O množství páry musí být snížena spotřeba záměsové vody, neboť pára zkondenzuje v míchačce.

Výpočet.

$$m_p = \frac{m_C \cdot c_C (T_{CB} - T_C) + m_K \cdot c_K (T_{CB} - T_K) + (m_V - m_p) \cdot c_V \cdot (T_{CB} - T_V)}{r} =$$

$$= \frac{320 \cdot 750(55 - 5) + 1820 \cdot 850(55 - 3) + (180 - m_p) \cdot 4190 \cdot (55 - 10)}{2,23 \cdot 10^6} =$$

$$= 56,674 - 0,08455 \cdot m_p \Rightarrow m_p = 52,3\text{ kg}$$

Na ohřátí 1 m^3 čerstvého betonu je třeba asi 52 kg páry.

2.11.4 Ošetřování betonu

Cílem ošetřování betonu je dosažení co největší pevnosti betonu, využitím hydratace cementu a nerušené tvorby struktury cementového kamene. Je nutno omezit nežádoucí tahová nebo tlaková napětí ve struktuře betonu, která mohou vzniknout rychlým vysušením povrchu betonu nebo jeho zmrznutím. Zhoršení kvality konstrukce může nastat také předčasným odbedněním nebo odformováním. Ošetřování a ochrana povrchu betonu začíná co nejdříve po vytvarování a zhutnění betonu.

1. Vlhké ošetřování zajišťuje dostatečnou hydrataci cementu na povrchu betonu. Vysušení povrchu snižuje pevnost betonu, způsobuje smršťovací trh-

linky, vznikají deformace, které snižují trvanlivost betonu. Povrch betonu musí být udržován vlhký nebo se musí zamezit odpařování vody z jeho povrchu. Ochrana se provádí metodami:

- ponecháním betonu v bednění delší dobu, zvláště v horkém počasí,
- pravidelným, v krátkých intervalech, stříkáním vodou,
- překrytím povrchu betonu foliemi nebo vlhkými tkaninami,
- nástřikem parotěsnou látkou (většinou emulze na bázi parafinů), která vytvoří ochranný obal zamezující odpařování vody; povlak se po několika týdnech deštěm smyje.

3. Teplota betonu i prostředí má rozhodující vliv na dobu tvrdnutí i dobu ošetřování. Pro betonování při nízkých teplotách nebo mrazu platí zvláštní podmínky, podobně pro betonování v horkém létě.

Řádným ošetřováním betonu lze uspořit až 5 - 10 % cementu, proti neošetřovanému betonu. Naproti tomu vlastnosti betonu negativně ovlivňuje:

- vysoušení povrchu betonu větrem a teplem,
- mechanické působení na tvrdnoucí beton rázy, třesením, vibrací,
- předčasné odbednění nebo odformování a předčasné zatížení nedostatečně pevného betonu,
- působení agresivních medií,
- silný déšť nebo proudící voda,
- výrazné ochlazení pod 0 °C.

2.11.5 Povrchová ochrana betonu

Beton je dlouhodobě poškozován fyzikálními (obrus, mráz ve spojení s vlhkostí) a chemickými (agresivní kapaliny a plyny) vlivy vnějšího prostředí. Většinou intenzivnímu působení agresivních medií nestačí aktivní ochrana, tj. složení a zpracování betonu, ale je nutná i pasivní ochrana spočívající v povrchové úpravě betonu. K ochraně proti korozi se povrch betonu impregnuje penetračními prostředky (hydrofobizace, fluátování) nebo vytvrzuje. Impregnace omezuje nasávání vody kapilárami, povrch betonu se hydrofobizuje, ale difúze vodních par se neomezuje. Vytvrzování zabraňuje pronikání vody i vodních par do pórovité struktury betonu a provádí se nátěry nebo povlaky na povrchu betonu. Stupeň zaplnění pórů je schematicky znázorněn na obr.112. Mezi pasivní ochranu povrchu betonu lze také zařadit sanační metody a povrchové úpravy monolitického betonu i železobetonových dílců, u kterých ještě požadujeme vedle trvanlivosti i estetický vzhled.

Podle tloušťky ochranné vrstvy rozlišujeme

- hydrofobní impregnaci, která neomezuje difúzi vodních par a vytváří neuzavřený povrchový film s nedefinovatelnou tloušťkou,
- povlaky (nátěry) do tloušťky asi 0,3 mm, které zaplňují povrchové póry a na povrchu vytváří tenkou vrstvu omezující difúzi CO₂ do betonu a současně umožňující difúzi vodních par do ovzduší,

- povrchové vrstvy (stěrky) v tloušťkách větších jak 0,3 mm (0,5 - 5 mm), které vytvářejí uzavřený povrch a zabraňují pronikání kapalin i plynů do pórovité struktury cementového kamene.

Sanace betonu. Beton je dlouhodobě poškozován mechanicky (zatížení, obrus, eroze), fyzikálně (teplo, sníh, mráz, vlhkost, voda) a chemicky (karbonatace, sulfatace, agresivní chemické látky organické i anorganické). Současně je snížena imunita ocelové výztuže proti korozi. Dochází k porušení rovnovážného vztahu mezi silami působícími na betonovou konstrukci a silami odporujícími, vzdorujícími vnějším silám.

Technologie sanace uplatňuje následující postup opravy poškozené betonové konstrukce, u které byla odstraněna zkorodovaná vrstva. Na obnaženou ocelovou výztuž se nanáší nejdříve ochranná antikorozi vrstva, následuje adhezní můstek (zajišťuje soudržnost se starým betonem), potom reprofilační malta (obnoví původní vrstvu betonu) a nakonec egalizace (povrchové sjednocení vzhledu konstrukce).

Sanace trhlin. Trhliny v betonu mohou být opraveny v případě, že napětí, která je způsobují, jsou eliminována. Jinak se objeví trhlina opět vedle opravovaného místa. Technologie oprav se řídí šířkou trhlin. Trhliny šířky 0,1 až 0,5 mm se nepropustně uzavírají natíráním nízkoviskozní epoxidovou pryskyřicí bez rozpouštědel po dobu 3 - 5 minut. Epoxidová pryskyřice vnikne hlouběji do pórů, než cementový tmel. Trhliny do 1 mm v betonových konstrukcích, kde působí hydrostatický tlak (nádrže, vodní díla) se vyplňují působením přtlaku. Používá se nízkoviskozní kombinace epoxidových pryskyřic s thioplasty, většinou 20% thioplastu. Elastické těsnění se provádí pouze thioplasty (polysulfidkaučuk). Trhliny větší jak 1 mm se těsní podobně, avšak je vhodné vyztužovat těsnící látku skelnými vlákny nebo tkaninou ze skelných vláken a opět používat epoxidové pryskyřice s thioplasty.

Kontrolní otázky

1. *Popište technologická opatření pro zpomalené a pro urychlené tvrdnutí betonu.*
2. *Jaké jsou periody hydratace cementu a jaké se tvoří minerály ?*
3. *Na čem závisí kinetika hydratace cementu ?*
4. *Jak zvýšení teploty ovlivňuje hydrataci cementu a pórovitost cementového kamene ?*
5. *Nakreslete křivku doporučeného režimu proteplování betonu.*
6. *Popište čtyři periody režimu proteplování betonu.*
7. *Popište a technicky zdůvodněte opatření k betonování v zimních podmínkách.*
8. *Vypočítejte potřebnou teplotu horké vody pro zahřátí čerstvého betonu v míchačce na teplotu 40 °C při teplotě kamenina $T_K = 7\text{ °C}$, cementu $T_C = 8\text{ °C}$ a vody $T_V = 10\text{ °C}$. Kolik spotřebujeme páry ($p = 150\text{ kPa}$, $T = 110,8\text{ °C}$, $r = 2,23\text{ MJ.kg}^{-1}$)? Složení betonu: $m_C = 350\text{ kg.m}^{-3}$, $m_K = 1800\text{ kg.m}^{-3}$, $m_V = 180\text{ kg.m}^{-3}$.*
9. *Čerstvý beton 20 °C teplý se během doby (60 min) dopravy a ukládání při venkovní teplotě - 5 °C ochladí na teplotu T_B . Čerstvý beton se ukládá do bednění chráněné izolací z pěnového polystyrenu tloušťky 4 cm ($\lambda = 0,04\text{ W.m}^{-1}.K^{-1}$). Tloušťka betonované stěny je 20 cm. Používá se CEM I 42,5 s hydratačním*



teplem 200 kJ.kg^{-1} ($m_C = 320 \text{ kg.m}^{-3}$). Vypočítejte T_B a posuďte kdy teplota betonu klesne na teplotu okolí.

10. Proč beton ošetřujeme, čeho musíme dosáhnout v kvalitě betonu při ošetřování ?

11. Jaké technologie se používají k sanacím povrchu betonu ?

12. Jaké vlastnosti zkoušíme u povrchových úprav ?

2.12 Vlastnosti a zkoušení betonu

2.12.1 Vlastnosti betonu

Vlastnosti betonu lze rozdělit do čtyř skupin podle společných znaků:

- mechanické vlastnosti, nebo-li pevnosti betonu v tlaku, v příčném tahu, v tahu ohybem a ve smyku,
- deformační vlastnosti, tj. vlastnosti související se změnou objemu, působením vnějších sil (modul pružnosti, dotvarování betonu) nebo působením vnitřních sil (smrštění),
- permeabilita betonu, která popisuje pohyb media nebo toku energie (vodotěsnost, vztlínavost, nasákavost, provzdušnost, tepelná a elektrická vodivost),
- trvanlivost betonu, tj. odolnost proti působení vnějších sil, polí a chemických látek (ohnivzdornost, mrazuvzdornost, chemická odolnost, obrusnost, odolnost proti korozi betonu a oceli).

V technologii betonu platí obecné zásady:

1. **Vlastnosti betonu mají empirický charakter** a zjištěné veličiny jsou podmíněny použitou zkušební metodou. Provádí-li se zkoušení na jiných zkušebních tělesech nebo jiným postupem nebo v jiném prostředí výsledky nejsou srovnatelné. Reprodukovatelnost výsledků zkoušek je vázána na uvedení příslušné technické normy (ČSN, EN, ENV, ISO), podle které byly vzorky betonu zkoušeny.

2. **Vlastnosti betonu mají stochastický charakter**, výsledky musíme posoudit ze souboru nahodile vybraných vzorků pomocí matematické statistiky. Jeden výsledek nemůže definovat vlastnosti betonu, vždy jsou nutné tři vyzkoušené vzorky.

3. **Zkoušení vlastností je ireversibilní**. Na stejném vzorku nelze vícekrát zkoušet jednu nebo i další vlastnosti. Výjimku tvoří nedestruktivní metody zkoušení. Nedestruktivní metody zkoušení však vyžadují hodnocení pomocí kalibračních vztahů (závislost veličin vlastností destruktivních a nedestruktivních metod).

4. **Vlastnosti betonu jsou funkcí času (stáří betonu)**. Každá veličina charakterizující vlastnost betonu souvisí se stářím betonu (doba od přidání vody k cementu do doby měření). Doba musí být u vlastnosti betonu uvedena. Základní dobou, která nemusí být uváděna, je 28 dnů.

Rozhodující význam pro vlastnosti betonu má cementový kámen, jako nejslabší článek betonu. Cementový kámen má pórovitou strukturu a během tvrdnutí a zatěžování v něm vznikají rozdílná napětí, která jsou příčinou

vzniku trhlinek. Poznání vlastností betonu proto vychází ze znalostí pórovité struktury cementového kamene a znalostí mikromechaniky (vznik napětí a trhlinek v tuhé látce krystalických kalciumhydrosilikátů).

2.12.2 Pórovitá struktura cementového kamene

Póry slouží jako cenný zdroj informací o mnohých vlastnostech látky. Informují o deformacích struktury, stupni mechanických napětí a o technologických důsledcích pórovité látky (pevnost, vodotěsnost, mrazuvzdornost, smrštění aj.). Pórovitost vyjadřujeme celkovou pórovitostí P_{CK} (podílem pórů z celkového objemu látky), tvarem pórů, velikostí a distribucí pórů (zastoupením různě velikých pórů v celkové pórovitosti). Celková pórovitost se vypočte z rovnice

$$P_{CK} = 1 - \frac{\rho_{CK}}{\rho} \quad [-]$$

ρ - měrná hmotnost cementového kamene (bez pórů) a ρ_{CK} - objemová hmotnost (včetně pórů) v kg na m³.

Tvar pórů souvisí s průchodem kapaliny nebo plynů pórovitým prostředím. Rozeznáváme póry otevřené i průchodné (odpovídají nasákavosti stanovené při 20 °C), otevřené, neprůchodné (pro úplné vyplnění kapalinou vyžadují značný tlak kapaliny) a uzavřené (nezaplňitelné kapalinou). Póry lze rozdělit podle velikosti, podle jejich vzniku a podle jejich vlivu na vlastnosti cementového kamene a tím i betonu. Distribuce pórů vyjadřuje závislost velikosti pórů na jejich objemovém zastoupení celkové otevřené pórovitosti. Nejrozšířenější metodou stanovení distribuce pórů je rtuťová pórozimetrie (MIP - mercury intrusion porosimetry), kdy tlakem rtuti až 10³ MPa vyplňujeme póry od 0,1 mm až do průměru 2.10⁻⁹ m (poloměr kapiláry je nepřímě úměrný tlaku rtuti).

2.12.3 Mikromechanika betonu

Definice

Mechanika kontinua, nebo mikromechanika, hledá teoretická zdůvodnění pevnosti materiálů v závislosti na jeho struktuře. Zejména se jedná o rozdělení napětí v látce, vznik a rozvoj trhlin, defektů struktury, jinak nazývaná lomovou mechanikou.



Výsledkem je neustálý “boj” s trhlinkami. “ Čím více se ponořujeme do mikroskopické oblasti a sledujeme vnitřní vazby elementů materiálu, tím více se oddalujeme od klasických představ deformovatelného homogenního prostředí. Tím více vystupují defekty struktury a vliv hranic složek a tím více se uplatňují mikronapětí, vliv reálné technologie a vliv přirozených bariér materiálu proti poškození.” (Němec, 1986).

V křehkém materiálu (betonu) vznikají velká lokální, nelineární deformace, které vedou k ukládání deformační práce a vznikají dvě protichůdné tendence:

- snaha uvolnit vnitřně nahromaděnou energii tvorbou trhlinek,

- snaha směřující k lokálnímu zvýšení odolnosti proti nevratnému přetvoření deformačním zpevněním a odklánění silového toku z exponované oblasti.

Pevnost křehké a pórovité látky, jakým je cementový kámen, je závislá nejen na množství a distribuci pórů, ale také na velikosti a množství trhlinek. Trhlinky vznikají vnitřním napětím na mikroskopické i makroskopické úrovni, když napětí překročí mez pevnosti tuhé látky v daném místě. Trhlinky mají většinou rozměr řádově 10^{-6} m = 1 μ m, ale stačí jedna vhodně orientovaná trhlina a pevnost látky se sníží. Porušování struktury látky je heterogenní proces, neboť překročí-li napětí v jakémkoliv místě tělesa kritickou hodnotu, vzniká lom (= destrukce). Lom začíná na defektním místě a od něho se šíří, proto lom se projevuje ve stádiích: nukleace trhliny - rozšiřování trhliny - lom. Kritická velikost napětí se rozšiřováním trhlinek snižuje.

Pole deformací a napětí je závislé na hodnotě objemových deformací tvrdnoucího cementového kamene, kinetice hydratace, velikosti a kvalitě povrchu kameniva. Zvýšení vazby **rozhraní kamenivo - cementový kámen** je základním problémem zvyšování mechanických vlastností betonu. Tato kontaktní zóna je běžně bohatší na Ca-hydroxid, je pórovitá a heterogenní než ostatní struktura cementového kamene. V kontaktu s povrchem kameniva je kompaktní tenká vrstva portlanditu ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) následována pórovitou vrstvou s plochými krystalky a jehličkami ettringitu, včetně gelu C-S-H. Pórovitá vrstva má hloubku asi 50 μ m. Příměsí křemičité látky (Silica Fume) dochází ke zřetelné změně mikrostruktury kontaktní zóny, která získává stejné vlastnosti jako ostatní zóny cementového kamene. Výrazně se zvýší vazba mezi povrchem kameniva a cementovým kamenem, což dokazuje zlom takového betonu, který často prochází přes zrna kameniva (u betonu bez příměsí SiO_2 - látky probíhá lomová plocha na povrchu zrn kameniva).

2.12.4 Pevnost betonu

Definice

Beton je konstrukční materiál, proto pevnost je hlavním kritériem posuzování jeho vlastností. Obecně pevnost posuzujeme jako schopnost vzdorovat vzniklým napětím. Pevností betonu rozumíme mezní napětí v betonu, při které dojde ke zlomu, tj. globálnímu porušení soudržnosti.



Většina konstrukcí je namáhána kombinací tlakových, tahových a smykových napětí, a to přímo zatížením nebo vlivem vetknutí (podepření) do okolních částí konstrukcí. V průřezu konstrukce vznikají různě velká napětí, různě lokalizovaná a rozdílného smyslu působení. V určitém místě konstrukce vznikají hlavní napětí, které mají maximální absolutní hodnotu. Překročí-li některá hlavní napětí mez pevnosti betonu, nastane porušení soudržnosti. Porušení může být pouze lokální, nezasahující celý průřez, a pak vznikne trhlina. Nastane-li však porušení v celém průřezu, dochází ke zlomu - destrukci - celé konstrukce. Zvyšováním napětí v betonu dochází k porušení soudržnosti již při překročení 40 - 50 % lomové pevnosti a vznikají malé trhliny, jejich počet i rozměr se zvětšuje zvyšujícím se napětím až do překročení mezní hodnoty hlavního napětí - pevnosti betonu. Nastává náhle globální porušení soudržnosti vedoucí k destrukci konstrukce.

Beton vzdoruje rozdílnou měrou všem druhům napětí, která v betonové konstrukci vznikají. Beton je křehkou látkou, která vzdoruje napětím v tahu a ve smyku podstatně méně, než pevnosti v tlaku. Podle statického působení zatížení rozeznáváme pevnosti betonu:

- pevnost v tlaku (prostém, v sevřeném stavu, v soustředěném),
- pevnost v tahu (prostém, ohybem, příčném),
- pevnost ve smyku (stříhu, propichování) a v kroucení.

Vzájemné vztahy mezi druhy pevností betonu mají empirický charakter a vyplývají z regresní analýzy mnoha výsledků. Hodnoty koeficientů mohou být pro jiné soubory výsledků odlišné, proto jsou uvedené závislosti pouze přibližné.

$$\text{Pevnost v prostém tahu} \quad R_T \cong 0,232 \cdot R_B^{2/3} \quad [\text{MPa}]$$

$$\text{Pevnost v příčném tahu} \quad R_{PT} \cong 0,255 \cdot R_B^{2/3} \quad [\text{MPa}]$$

$$\text{Pro vysokohodnotné betony} \quad R_{PT} = 0,61 \cdot \sqrt{R_B} \quad [\text{MPa}] \text{ pro } R_B (85, 130) \text{ MPa}$$

$$\text{Pevnost v tahu ohybem} \quad R_{TO} \cong 0,371 \cdot R_B^{2/3} \quad [\text{MPa}]$$

$$\text{Pevnost ve smyku} \quad R_\tau \cong 0,38 \cdot R_B \quad [\text{MPa}]$$

R_B - pevnost betonu v tlaku [MPa] na krychlích o hraně 150 mm.

Zkoušení betonu je normováno pro jednotlivé zkoušky a fáze zkoušení. Platí následující evropské normy převzaté do systému českých technických norem:

ČSN EN 12390-1 Zkoušení ztvrdlého betonu. Tvar, rozměry a jiné požadavky na zkušební tělesa a formy

ČSN EN 12390-2 Zkoušení ztvrdlého betonu. Výroba a ošetřování zkušebních těles pro zkoušky pevnosti v tlaku.

ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu. Pevnost v tlaku zkušebních těles.

ČSN EN 12390-4 Zkoušení ztvrdlého betonu. Pevnost v tlaku – požadavky na zkušební lisy

ČSN EN 12390-5 Zkoušení ztvrdlého betonu. Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles.

ČSN EN 12390-6 Zkoušení ztvrdlého betonu. Pevnost v příčném tahu zkušebních těles.

ČSN EN 12390-7 Zkoušení ztvrdlého betonu. Objemová hmotnost ztvrdlého betonu.

ČSN EN 12390-8 Zkoušení ztvrdlého betonu. Hloubka průsaku tlakovou vodou.

ČSN EN 12504-1 Zkoušení betonu v konstrukcích. Vývrty – odběr, vyšetření a zkoušení v tlaku.

ČSN EN 12504-2 Zkoušení betonu v konstrukcích. Nedestruktivní zkoušení – Stanovení tvrdosti odrazovým tvrdoměrem.

ČSN EN 12504-3 Zkoušení betonu v konstrukcích. Stanovení síly na vytržení.

ČSN EN 12504-4 Zkoušení betonu v konstrukcích. Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu.

Soudržnost ocele s betonem (ČSN 73 1328). Zkouška stanovuje soudržnost na hranolech vytahováním zabetonovaného ocelového prutu. Zkušební vzorek je betonový hranol o základně 150×150 mm a výšky $5D + 5$ cm (D - průměr ocelového prutu v cm, obvykle se používá $D = 14$ mm), který je opatřen třmínky $\phi = 5$ mm, vzdálenými od sebe 60 mm. Soudržnost se vyjadřuje smykovým napětím na obvodu zabetonovaného ocelového prutu namáhaného na vytažení z betonu.

Nedestruktivní zkoušky betonu nejsou náhradními metodami zkoušení pevnosti betonu. Pevnost však může být odhadována, pokud se dostatečně stanoví vztahy mezi pevností a výslednými hodnotami nedestruktivní metody (stupnicí na tvrdoměru, rychlost impulsu ultrazvukové metody). Určování přesných hodnot pevnosti betonu z tvrdosti se nedoporučuje. Odhad pevnosti na základě měření rychlosti impulsu se rovněž nedoporučuje.

Stanovení tvrdosti použitím odrazového tvrdoměru. Tvrdoměr sestává z ocelového úderného zařízení a pružiny, která vymršťuje ocelový razník proti povrchu betonu. Pružinové kladívko se pohybuje stanovenou a reprodukovatelnou rychlostí. Velikost odrazu razníku se měří na stupnici umístěné v pouzdru tvrdoměru. Zkušební postup. Tvrdoměr se přiloží kolmo na povrch betonu, plynule se zvyšuje tlak na razník až do úderu kladívka. Po úderu se zaznamená odraz s přesností na dvě platné číslice. Na každém zkušebním místě se provede min 9 měření, která jsou od sebe vzdálena min 25 mm a jsou vzdáleny od hran min 30 mm. Ze všech měření se vypočte aritmetický průměr a výsledek se vyjádří na 3 platné číslice. Jestliže více než 20% všech měření se liší od průměru o více jak 6 jednotek, všechna měření se vyloučí a nevyhodnocují se.

2.12.5 Deformace betonu

Definice

Deformace betonu dělíme na reversibilní (vratné) a irreversibilní (plastické, nevratné). Vratnými jsou pružné deformace charakterizované modulem pružnosti, teplotní roztažností a částečně i smrštěním betonu, způsobeným migrací vlhkosti. Plastickými deformacemi jsou dotvarování betonu, způsobené dlouhodobým zatížením a částečně smrštění, které vyvolává hydratace a karbonatace.



Deformace se projevuje stlačením a protažením tělesa. Poměr příčné a podélné deformace charakterizuje Poissonovo číslo, které pro poměr příčného roztažení ku podélnému stlačení má u betonu hodnotu 0,16 až 0,20 a pro poměr příčného stlačení ku podélnému roztažení betonu asi 0,125 - 0,08. Pružné deformace se posuzují při napětí do 30 % napětí při zlomu (f_c = pevnosti betonu)

podle Hookeova zákona a podle pevnosti betonu dosahují hodnot uvedených v tab. 80.

Modul pružnosti. Závislost napětí na přetvoření je lineární jen v počátku zatěžování, při vyšším napětí není modul pružnosti konstantní, ale klesá. Při napětí asi 30 % zlomového napětí začínají vznikat trhlinky a projevují se trvalé (plastické) deformace. Modul pružnosti E je směrnicí tečny křivky napětí σ - deformace ε , která má rozdílné hodnoty:

- počáteční modul pružnosti vychází z bodu $\sigma = 0, \varepsilon = 0$,
- normový modul pružnosti je směrnice spojnice bodu ε_1, σ_1 (základní stupeň zatížení) a bodu $\varepsilon_{0,3}, \sigma_{0,3}$ na deformační křivce po několikanásobném zatížení a odtížení.

Teplotní roztažnost betonu. Zvýšením teploty narůstá energie molekul a změna jejich pohybu je spojena s nárůstem objemu látky. Pravá teplotní roztažnost je součtem změn vzdáleností molekul v důsledku kinetiky pohybu molekul. Kapilárně pórovité a gelové látky (= cementový kámen) působením tepla se objemově přetvařují vlivem změny povrchového napětí fyzikálně vázané vody v kapilárách a vlivem bobtnání gelu. Zdánlivá teplotní roztažnost je součet objemových změn koloidní látky vlivem migrace fyzikálně vázané vody mezi kapilárami a gelovými póry, bez změny celkového obsahu vody. Teplotní roztažnost je pak součtem pravé a zdánlivé teplotní roztažnosti. Rozeznáváme lineární a objemovou teplotní roztažnost. Směrné součinitele teplotní roztažnosti pro 1 rok staré betony, vysušené a vodou nasycené jsou uvedené v tab.82.

Dotvarování betonu (creep). Dotvarováním betonu rozumíme trvale změny objemu nebo tvaru betonu způsobené dlouhodobým zatížením. Trvale změny objemu betonu způsobuje rovněž smršťování, které je však vyvoláno migrací vlhkosti, tj. vnitřními silami v betonu. Obě trvale deformace vznikají současně a je velmi obtížné určit velikost jednotlivých deformací. Zatěžováním betonové konstrukce dochází k pružným deformacím a k trvalým deformacím dotvarováním a smrštěním. Beton zatížený v čase t_0 , které vyvolá napětí v betonu σ , se ihned deformuje hodnotou ε_{do} ($= \varepsilon_e$ - pružná deformace od krátkodobého zatížení) a tato deformace postupně vzrůstá, až v čase t dosáhne hodnoty

$$\varepsilon_c = \varepsilon_s + \varepsilon_{do} + \varepsilon_d$$

(ε_s - deformace smrštěním, ε_d - deformace dotvarováním dlouhodobým zatížením, ε_c - deformace celková).

Smršťování betonu. Podstata smršťování není jednoduchá, neboť vedle kapilárních jevů působí úbytek vody v krystalové mřížce, migrace vlhkosti mezi různě velikými kapilárami, podle napětí vodních par okolního prostředí. Současně působí napětí na rozhraní cementový kámen a povrch kameniva. Experimentálně bylo ověřeno, že cementový kámen zpočátku tvrdnutí stlačuje povrch kameniva silou v radiálním směru. Předpokládá se snížení hutnosti cementového kamene na povrchu kameniva. Vlivem kapilárních sil dochází ke smršťování cementového kamene a stlačování povrchu zrn kameniva. Inflexní bod této závislosti zhruba odpovídá změně pružné deformace na trvalou - plastickou. Zmenšení deformace na povrchu zrn kameniva nejen snižuje smrštění,

ale také zvyšuje mechanické vlastnosti betonu. Smrštění betonu je ovlivňováno technologickými faktory:

- smršťování cementového kamene, závisle na jeho pórovitosti,
- druh a vlastnosti cementového kamene,
- složení betonu,
- rozměr a tvar betonové konstrukce a její vyztužení,
- vnější podmínky (teplota a vlhkost) a čas.

2.12.6 Trvanlivost betonu

Definice

Trvanlivost je časově omezený, relativní pojem, který závisí na době působení fyzikálních a chemických vlivů. Hovoříme o korozi betonu, čímž rozumíme děje, vedoucí k jeho rozrušování cestou chemických pochodů nebo fyzikálními vlivy.



V betonu nebo na jeho povrchu a povrchu ocelové výztuže vznikají různé závady (lom, trhlinky, deformace, odprýskávání, výkvěty, skvrny a pod.), způsobené korozivními procesy:

- chemickými vlivy (roztoky kyselin a solí, organické sloučeniny, plyny, znečištěné ovzduší, tuhé škodlivé látky),
- fyzikální pochody (teploty pod bodem mrazu, vysoké teploty, mechanický otěr aj.),
- biologické působení organismů (plísně, mikroorganismy).

Intenzita působení těchto vlivů závisí na vlastnostech betonu a betonové konstrukce (povrchu a pórovitosti cementového kamene) a na agresivitě prostředí (druhu a koncentraci agresivních látek, teplotě a relativní vlhkosti prostředí a na ostatních vlivech působících na rozhraní beton - prostředí).

V betonu se většinou vyskytují trhlinky, které zvyšují rychlost působení agresivního prostředí. Proto statickým a technologickým návrhem dbáme, aby tyto defekty nevznikaly. Trhlinky vznikají všude tam, kde lokální napětí v mikrostruktuře betonu překročilo pevnost betonu (cementového kamene). Lokální stav napjatosti je vyvolán vnějšími silami (zatížení, teplota) a vnitřními účinky (smršťování, teplotní roztažnost aj.). Trhlinky o velikosti do 100 μm většinou nesnižují únosnost konstrukce, trhlinky do 50 μm nezhoršují ani vodotěsnost, ale vždy každá trhlina snižuje trvanlivost betonu. Trhlinky vznikají již při tuhnutí betonu a především po jeho zatvrdnutí, na příklad teplotní gradient 25 až 30 $^{\circ}\text{C}$ vytváří trhlinky.

Mrazuvzdornost betonu. Mrazuvzdorností se rozumí schopnost betonu ve vodou nasyceném stavu odolávat opakovanému zmrazování a rozmrazování. Chemicky vázaná voda nikdy v led nepřechází. Gélová voda přechází v led až při velmi nízkých teplotách (úplně zmrzne při - 73 $^{\circ}\text{C}$). V kapilárách voda přechází v led nejdříve při teplotách asi - 0,5 $^{\circ}\text{C}$, neboť v kapilárách se nachází roztok. Teplota tvorby ledu závisí na velikosti kapilár. Snižováním teploty se podle velikosti kapilár vytváří ledová tříšť, která se z větších kapilár tlačí do

kapilár menších. Postupně se zvětšuje objem, neboť led má objem o 1/11 (9 %) větší než voda. Vznikající krystalický tlak ledu překračuje až 200 MPa. Led nejdříve vzniká na povrchu betonu a podle rychlosti ochlazování se tlačí do středu betonu a způsobuje objemový nárůst. Když led roztaje zůstává až 1/3 celkového roztažení .

Zkoušení mrazuvzdornosti betonu se provádí podle ČSN 73 1322 Stanovení mrazuvzdornosti betonu. Zkouší se střídavým zmrazováním a rozmrazováním zkušebních trámců, které jsou vodou nasycené, určeným počtem cyklů. Zmrazování a rozmrazování zkušebních těles se koná ve zmrazovacích cyklech při teplotě mrazícího prostředí mezi $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jeden zmrazovací cyklus se skládá ze 4 hodin zmrazování a 2 h rozmrazování ve vodě $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ teplé. V druhé metodě je podstatou zkoušky střídavé zmrazování a rozmrazování vzorků při tak dlouhé době trvání cyklu, aby jádro těles při ochlazování dosáhlo teploty $-5\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ a při ohřívání $+4\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Zkušební tělesa se vkládají do mrazícího prostoru s teplotou $-20 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ a vody $+20 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ a zjištěná doba ochlazení a oteplení středu vzorku slouží k časovému definování cyklu. Jinak se postupuje shodně dle ČSN 73 1322.

ČSN 73 1326 - Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek. Norma rozlišuje metodu automatického cyklování (KD - 20) a metodu ruční manipulace se vzorky. Metoda A používá přístroj schopný ochladit povrch vzorku z $+20$ na $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ za 45 až 50 minut. Vzorky nasáklého betonu (obvykle krychle o hraně 150 mm) se uloží do misky s roztokem 3 % NaCl tak, aby byly ponořeny na výšku $5 \pm 1\text{ mm}$. Ve zkušebním prostoru se podrobí střídavému zmrazování na povrchu $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu 15 min a rozmrazování $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu 15 min (teploty na povrchu vzorků). Po každém 25 cyklu se vzorky vyjmou a pomocí vody se stanoví množství odpadlých částic (částice se vysuší a zváží s přesností 0,1 g, při odpadu větším než $500\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ se provede síťový rozbor na sítích 0,5, 1, 2, 4 mm). Zkouška se ukončí po dosažení předepsaného počtu cyklů nebo po překročení velikosti odpadu. Výsledek zkoušky se udává číslem (odpad v $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) a za pomlčkou se uvede počet cyklů, při kterém bylo dosaženo uvedeného odpadu. Zatřídění povrchů se provede dle tab. 87. Metoda B používá na povrchu krychle rámeček přesahující plochu strany o 5 mm, do které se nalije voda a po vytvoření ledu se na ledový povrch nasype $270\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ sůl (NaCl).

Tab.22 Zatřídění povrchů betonu podle ČSN 73 1326.

Stupeň porušení	Odpad [$\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$]	Charakter odpadu
1 - neporušený	do 50	velmi jemné prachovité částice do 1 mm
2 - slabě narušený	50 - 500	více částic do 1 mm, méně jak 1/2 částice do 2 mm
3 - narušený	500 - 1000	podíl částic nad 2 mm přes $500\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$
4 - silně narušený	1000 - 3000	podíl částic nad 2 mm přes $500\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$
5 - rozpadlý	přes 3000	podíl částic nad 4 mm více jak 20% hmotnosti

Vodotěsnost betonu. Pro vodotěsnost betonu jsou rozhodující otevřené kapiláry velikosti větší než 10^{-7} m, kterými prochází voda působením tlakového gradientu. Menší póry (mikropóry) průchod vody neumožňují. Proto vodopropustnost betonu je závislá na objemu a distribuci makropórů a kapilár v cementovém kameni. Vodotěsnost lze vyjádřit součinitelem propustnosti (permeability) k_p , který se vypočítá podle objemu vody v m^3 , který projde plochou S v m^2 za dobu t v hodinách při tlakovém gradientu 10^5 Pa. Součinitel k_p je vztažen na jednotku tlaku 100 kPa a tloušťku vzorku 200 mm. Množství makropórů v betonu závisí rozhodující měrou na vodním součiniteli. Stářím betonu, jak se kapiláry zaplňují hydratovanými slínkovými minerály, vodotěsnost vzrůstá. Čerstvý beton má součinitel propustnosti $k_p = 2 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, za 7 dní již 10^{-11} a za 28 dní je $k_p = 10^{-12} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, která stářím betonu limituje k hodnotě $k_p = 10^{-13} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

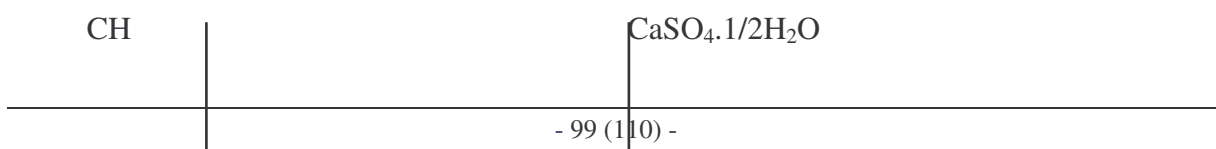
2.12.7 Chemická koroze betonu

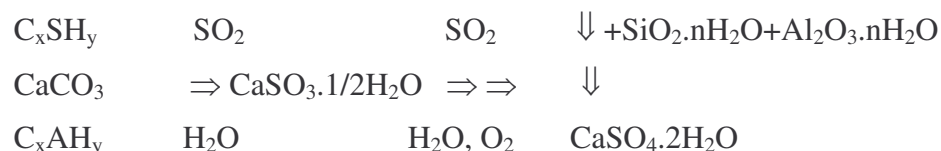
Beton je chemicky korodován kyselými agenciemi podle jejich koncentrace a skupenství. Podle stupně agresivity se má navrhovat i složení betonu betonu, jak předepisuje ČSN EN 206-1. Agresivně působí plyny podle složení a vlhkosti vzduchu, kapaliny (roztoky a voda obsahující agresivní CO_2) a tuhé látky, které jsou vyluhovány kapalným prostředím.

Mezi karbonátovou tvrdostí a **agresivitou vody** existuje nepřímá závislost. Korozí betonu způsobují “měkké” vody, s nízkou karbonátovou (přechodnou) tvrdostí do 6°dH ($1^\circ\text{dH} = 10 \text{ mg CaO/l}$). Rovnovážná koncentrace CO_2 vzrůstá se stoupající karbonátovou tvrdostí vody. Čím je vyšší karbonátová tvrdost vody, tím více může být přítomno CO_3^{2-} , aniž by korozně ohrožovalo beton. Ve stojatých vodách rychlost koroze “hladovou vodou” postupně klesá. **Tvrdost vody** je tvořena karbonátovou (přechodnou) tvrdostí ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ a $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$), která se varem odstraní, neboť se vytvoří těžce rozpustné uhličitany a trvalou tvrdostí (ostatní rozpustné soli). Tvrdost vody se vyjadřuje v mmol/l ($0,179 \text{ mmol/l} = 10 \text{ mg CaO/l} = 1^\circ\text{dH}$ - německý stupeň tvrdosti vody, dřívější označování). Měkkou vodou se označuje voda s tvrdostí do $1,5 \text{ mmol/l}$ a tvrdou vodou nad $3,3 \text{ mmol/l}$.

Beton také **korodují látky tvořící těžce rozpustné**, mýdelnaté vápenaté sloučeniny. Působí-li na beton vysokomolekulární organické kyseliny, mastné kyseliny, ale také nízkomolekulární kyseliny (octová, mléčná, máselná), místo krystalických a pevných vápenatých látek se tvoří soli s malou vlastní pevností, hydroxid vápenatý zmýdelnatí. Škodlivé účinky mají také alkoholické komponenty tuků a glycerinu (tvoří se Ca- glycerid).

Koroze betonu vyvolaná objemovými změnami novotvarů vede k tvorbě trhlinek v důsledku vysokého natětí, které vytváří nově krystalující sloučeniny. Dochází k odprýskávání povrchu betonu a ke snižování jeho pevnosti. Působením sulfátových roztoků tvoří se s minerálem C_3A velmi objemný ettringit (objem molu se zvětší z $88,8$ na $714,7 \text{ cm}^3$), toto osminásobné zvětšení objemu způsobí lokální destrukci struktury cementového kamene (proto se v síranovzdorných cementech omezuje obsah C_3A). Při vysokých koncentracích síranů ($> 1200 \text{ mg SO}_4^{2-}$ na litr) vzniká sádra a způsobuje sádrové rozpínání. **Sulfatace betonu** probíhá podle schéma za tvorby sádry

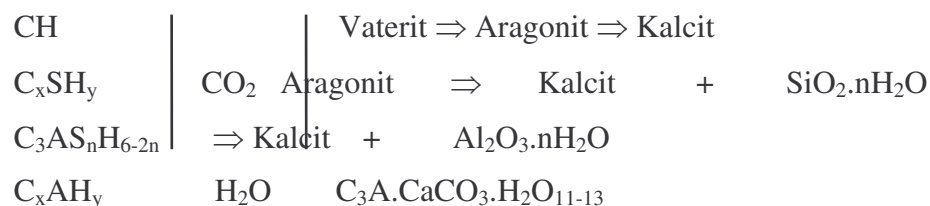




Vápenné rozpínání je způsobeno obsahem volného, nezreagovaného, vysoce páleného CaO, který velmi pomalu hydratuje a po hydrataci ve ztvrdlém cementu zvětší svůj objem 1,7×, tím porušuje strukturu betonu (objemová hmotnost CaO je 3400 a Ca(OH)₂ 2230 kg.m⁻³). Podobně se chová i MgO ve formě periklasu. Asi 2,5 % MgO je v cementu obsaženo v tuhém roztoku, zbytek je periklas, který velmi pomalu hydratuje na Mg(OH)₂, ale zvětšuje svůj objem 2,2 × (objemová hmotnost MgO je 3850 a hydroxidu 2400 kg.m⁻³).

Chemická koroze se vyskytuje všude tam, kde beton přichází do styku s agresivním vodním prostředím anebo agresivní látky v ovzduší působí spolu s vlhkostí vzduchu (CO₂, SO₂). Beton je napadán a korodován tím více, čím má vyšší pórovitost, tj. byl vyroben s vysokým vodním součinitelem, obsahuje otevřené kapiláry a byl nedostatečně zhutněn.

Karbonatace betonu je projevem “stárnutí” betonu, který je soustavně napadán oxidem uhličitým z ovzduší. Obvyklý obsah CO₂ ve vzduchu je 0,03 % objemu (60 mg.m⁻³), ale v průmyslových oblastech bývá násobně vyšší. Rozklad probíhá na povrchu betonu a časem postupně proniká otevřenou pórovitostí do hloubky, napadá korozně ocelovou výztuž v železobetonu a konečným produktem je karbonát a především výrazné snížení pH betonu. Chemismus karbonatace probíhá dle schéma:



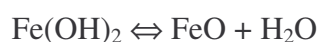
Proces karbonatace probíhá v několika časových úsecích na sebe navazujících, s rozdílným stupněm karbonatace a s rozdílnou intenzitou působení na beton. Současně se snižuje hodnota pH, což má mimořádný význam pro korozi ocele (proto je také předepsáno minimální krytí výztuže betonem 20 až 50 mm).

Výkvěty. Objevují se na pórovitých látkách tehdy, obsahují-li rozpustné soli nebo rozpustné soli vznikají chemickou reakcí v konstrukci nebo je látka napadána roztokem solí. Difúzí roztoku k povrchu konstrukce, voda se na povrchu odpaří a rozpuštěné soli na povrchu vykristalizují, většinou jako sloučeniny s mnoha molekulami vody. Tím zvětšují svůj objem a mohou, v ojedinělých případech, způsobit destrukci skeletu pórovité látky.

Podle doby vzniku rozdělujeme výkvěty na primární (vznikající v procesu tvrdnutí betonu) a sekundární, které se objeví až při užívání betonu, např. dekorativního. Výkvěty jsou především estetickou závadou na povrchu dekoračního nebo barevného betonu. Často se objeví za 4 týdny až 4 měsíce po betonáži a vlivem povětrnosti - deště - se postupně smývají. Úplné odstranění výkvětů závisí na intenzitě dešťů a trvá několik měsíců až 3 roky

2.12.8 Koroze ocele v betonu

Korozi kovů definujeme jako nežádoucí poruchy na povrchu kovu (tvorba rží, zmenšování průřezu bodovou nebo plošnou korozí), chemickými a elektrochemickými reakcemi s okolím. Ze všech stavebních materiálů , nejvíce podléhá korozi nechráněná ocel. Ztráty oceli působením SO₂ je v přírodních podmínkách do 20 mg.m⁻².d⁻¹, v atmosféře města 20 - 40 mg.m⁻².d⁻¹ a v průmyslové atmosféře ještě více. V betonu je povrch ocele obalen cementovým kamenem, jehož pórová voda obsahuje nasycený roztok Ca(OH)₂ s pH = 12,6. Tato vysoká alkalita, pokud nepůsobí jiné agresivní ionty (např. Cl⁻), zajišťuje pasivitu povrchu ocele ochranou vrstvou



Koroze ocele v betonu nastává snížením koncentrace iontů OH⁻ (pH < 11,5) nebo zvýšením koncentrace OH⁻ (pH > 13,8) nebo působením chloridových iontů. Podmínkou koroze jsou rozdíly potenciálů na povrchu kovu dané heterogenitou. Elektrochemická reakce předpokládá existenci rozdílu potenciálů a skládá se z anodické reakce (elektrony předává) a katodické reakce (elektrony spotřebovává). Anoda a katoda se při této elektrochemické reakci vytvoří heterogenitou kovu, heterogenitou elektrolytu anebo rozdíly ve fyzikálních podmínkách.

Cvičení

1. Měření vlivu plastifikačních přísad na zpracovatelnost a pevnost betonu po sedmi dnech tvrdnutí.
2. Průkazní zkoušky betonu po 28-mi dnech tvrdnutí.
3. Kontrola kvality betonu, kontrola shody – praktické příklady.
4. Vliv množství cementového tmele v betonu při konstantním vodním součiniteli na zpracovatelnost a pevnost betonu po sedmi dnech tvrdnutí.
5. Stanovení vlivu poměru drobného a hrubého kameniva na konzistenci čerstvého betonu a na pevnost po sedmi dnech tvrdnutí.



Kontrolní otázky

1. Vysvětlete hygroskopičnost, nasákavost, vzlínavost, vodotěsnost a provzdušnost cementového kamene.
2. Popište vnitřní napětí v cementovém kameni při jeho tvrdnutí v okolí zrn kameniva a vzdušných pórů.
3. Jaké technologické faktory ovlivňují soudržnost cementového kamene s povrchem kameniva ? Jakými technologickými opatřeními lze zvýšit pevnost betonu v tlaku ? Čím se zajišťuje dobrá soudržnost ocele s betonem ?
4. Nakreslete závislosti pevnosti v tahu, v příčném tahu, v tahu ohybem a ve smyku na pevnosti betonu v tlaku od C 12/15 až do C 90/105.
5. Jaké zkušební postupy umožňují hodnotit pevnosti betonu ?
6. Popište fyzikálně - chemické pochody smršťování betonu. Jak smrštění betonu technologicky ovlivňujeme ?
7. Jak technologicky ovlivňujeme dotvarování ?



8. Na jakých technologických parametrech závisí vodotěsnost, propustnost plynů a tepelná vodivost betonu ?
9. Na čem závisí dobrá mrazuvzdornost betonu ?
10. Popište stadia karbonatace betonu.
11. Proč jsou ionty Cl^- v železobetonu nebezpečné ? Jaká omezení v tomto směru platí ?
12. Nakreslete časovou (do 30 roků) závislost hloubky karbonatace betonu ($\mu = 200$, $m_C = 400 \text{ kg.m}^{-3}$).
13. Za jakých podmínek nastává koroze ocele v betonu ?

2.13 Hodnocení kvality a vliv na životní prostředí

2.13.1 Kontrola a kvality betonu

Beton představuje rozhodující spotřebu ze všech stavebních materiálů hrubé stavby a především jako konstrukční materiál zajišťuje statickou bezpečnost staveb s dlouhodobou trvanlivostí. Proto kontrola jeho kvality musí být pravidelná, dostatečně četná a respektující stochastický charakter betonu, tj. používat pro hodnocení matematické statistiky. Kvalitu nelze dnes chápat jen z hlediska výrobce (kvalitní je takový materiál, který splňuje požadavky příslušných technických norem a předpisů), ale i z hlediska spotřebitele - uživatele (kvalitní je to, co splňuje představy spotřebitele a ještě tyto představy předčí). Základním opatřením je trvale ověřování shody vlastností betonu s technickými specifikacemi, které jsou formulovány v evropské normě ČSN EN 206-1 Beton. Vlastnosti, výroba, ukládání a kritéria hodnocení.

Stochastický charakter vlastností vyžaduje užití **matematické statistiky** při hodnocení výsledku zkoušek betonu. Statická bezpečnost staveb musí být zajištěna s vysokou pravděpodobností. Základními charakteristikami statistického souboru jsou aritmetický průměr, rozptyl, směrodatná odchylka, variační koeficient a koeficient šikmosti.

Statistická bezpečnost je vyjádřena částí plochy pod křivkou normálního rozdělení pro určitou pravděpodobnost omylu α . Přijímáme $\alpha = 0,05$, tzn. že připouštíme 5 % chybných výsledků ve zkoumaném souboru.

Výroba betonu, ukládání a ošetřování je předmětem **kontroly jakosti**. Kontrolou se rozumí kombinace činností a rozhodnutí v souladu se specifikacemi a kontrolami k získání jistoty, že požadavky jsou splněny. Kontrola jakosti sestává ze dvou odlišných, ale vzájemně propojených činností - kontroly výroby a - kontroly shody. Podle způsobu dodávek betonu ENV 206 rozlišuje:

- transportbeton (ready-mixed concrete) je beton nadávkovaný a zamíchán ve stabilní míchačce nebo v automíchači a dodáván odběrateli v čerstvém stavu k použití na staveništi nebo dodán do dopravního prostředku odběratele,
- beton vyráběný na staveništi stejným výrobcem i zpracovatelem.

Kontrola výroby. Kontrola výroby zahrnuje všechna opatření k dodržení a usměrňování jakosti betonu v souladu se stanovenými požadavky. Zahrnují inspekce (vizuální kontrola) a zkoušky, při čemž se využívají výsledky ověřování zařízení a zkoušek vstupních materiálů. Zahrnují inspekce před betonováním, dopravy, ukládání, hutnění a ošetřování čerstvého betonu. Všechny údaje

z kontrol výroby na staveništi, ve výrobně transportbetonu a ve výrobě dílců musí být zaznamenány ve stavebním deníku nebo v jiném dokumentu. Provádění kontroly výroby v souladu s normou ČSN EN 206-1 může být ověřováno odsouhlaseným certifikačním orgánem jako část kontroly shody.

Kontrola betonu. U výrobce transportbetonu nebo výrobce stavebních dílců sestává z kontroly složek betonu (předpokládá se přiměřená kontrola výrobcem a dodavatelem), z kontroly zařízení, z kontroly výrobního postupu a vlastností betonu. Kontrola na staveništi při používání transportbetonu je převážně vizuální kontrolou, jen v případě pochybností se zkouší konzistence čerstvého betonu, stejnorodost betonu, obsah vzduchu v čerstvém betonu s předepsaným provzdušněním. Vždy se však zhotoví zkušební vzorky pro zkoušení pevnosti betonu v tlaku podle požadavků kontroly shody. Odběr vzorků se provádí z celého objemu vyráběného druhu betonu.

Výroba betonu musí být kontrolována v těchto fázích: Kontrola vstupních složek betonu zahrnuje inspekci každé dodávky, případné zkoušky první dodávky. Kontrola zařízení obsahuje inspekci zásob složek betonu, vázící zařízení, dávkovače přísad a vody, míchačky, autodomíchávačů. Kontrola výrobního procesu a vlastností betonu.

Inspekce před betonováním. Sestává z následujících inspekci: rozměrů bednění a umístění výztuže, vyčištění bednění a podkladu, úprava pracovních spár, kontrola tuhosti, těsnosti bednění a kontrolních otvorů, distančních vložek, výkonu dopravy, způsobu hutnění, ošetřování betonu a kompetentnosti pracovníků.

Inspekce během dopravy, ukládání, zhutňování a ošetřování betonu. Během betonáže se provádí nejméně tyto inspekce: stejnorodost betonu během dopravy, ukládání, rozprostírání a zhutňování betonu, betonáž (výška shozu, tloušťka vrstev, rychlost zaplňování formy, doba od zamíchání), speciální opatření při extrémních klimatických podmínkách, úprava pracovních spár, způsob betonování a ošetřování betonu.

Každý beton je nutno hodnotit na pevnost v tlaku. Podle užití betonu se doporučují další nezbytné zkoušky.

Třída	Doporučená zkouška	Norma ČSN
XC2	vodotěsnost min. V4	ISO 7031
XC4	vodotěsnost min. V4	ISO 7031
XD1	vodotěsnost min. V4, odolnost povrchů 50 cyklů v NaCl	ISO 7031, 73 1326
XD2	vodotěsnost min. V8	ISO 7031
XD3	vodotěsnost min. V4, odolnost povrchů 50 cyklů v NaCl	ISO 7031, 73 1326
XF1	vodotěsnost min. V4, odolnost povrchů 100 cyklů ve vodě	ISO 7031, 73 1326
XF2	vodotěsnost min. V4, odolnost povrchů 100 cyklů v NaCl	ISO 7031, 73 1326

XF3	vodotěsnost min. V8, odolnost povrchů 100 cyklů ve vodě, mrazuvzdornost T ,	ISO 7031, 73 1326, 73 1322
XF4	vodotěsnost min. V8, odolnost povrchů 100 cyklů ve vodě, mrazuvzdornost T 100	ISO 7031, 73 1326, 73 1322
XA1	vodotěsnost min. V4, směsný portlandský cement II/B-S	ISO 7031
XA2	vodotěsnost min. V4, síranovzdorný cement, hydrofobní přísady	ISO 7031
XA3	nutno pečlivě posoudit a zajistit sekundární ochranu	

Kontrola shody. Shoda vlastností betonu s požadavky normy ČSN EN 206-1 se kontroluje a sestává z kombinace činností a rozhodnutí, která jsou prováděna v souladu s předem přijatými pravidly pro kontrolu shody se specifikacemi pro předem definovaný hodnocený celek. Shoda nebo neshoda se posuzuje na základě kritéria shody. Je-li shoda, znamená to přijetí, neshoda může vést k další činnosti. Jestliže výsledky zkoušek na vyrobených vzorcích nesplňují požadavky shody nebo jestliže nejsou k dispozici a vznikne pochybnost o pevnosti, trvanlivosti a bezpečnosti konstrukce, mohou být požadovány dodatečné zkoušky na vývrtech.

Kritéria shody pevnosti betonu. Četnost odběru vzorků a hodnocení podle kritérií shody je rozděleno na 3 skupiny výroby betonu, jak je patrné z tabulky.

Tab.23 Četnost zkoušek pro kontrolu shody pevnosti betonu

Výroba betonu	Minimální četnost zkoušek	
	Certifikovaný beton	Beton bez certifikace
prvních 50 m ³	3 zkoušky	3 zkoušky
počáteční	1 zkouška na 200 m ³ minimálně 2 zkoušky za týden	1 zkouška na 150 m ³ minimálně 1 zkouška denně
další plynulá	1 zkouška na 400 m ³ minimálně 1 zkouška za týden	

Kritéria kontroly shody pevnosti betonu na staveništi, u výrobce transportbetonu i dílců.

Kontrola shody	Počet zkoušek	Kritérium 1	Kritérium 2
pevnosti v tlaku počáteční výroby a další výroby	3 minimálně 15	$f_{cm} \geq f_{CK} + 4$ $f_{cm} \geq f_{CK} + 1,48 \cdot s$	$f_{ci} \geq f_{CK} - 4$
pevnosti v tlaku při přejímce na	1	-	

místě	2 - 4 5 - 6	$f_{cm} \geq f_{CK} + 1$ $f_{cm} \geq f_{CK} + 2$	$f_{ci} \geq f_{CK} - 4$
pevnosti v příčném tahu počáteční výroby a další výroby	3 minimálně 15	$f_{tm} \geq f_{TK} + 0,5$ $f_{tm} \geq f_{TK} + 1,48 \cdot s$	$f_{ti} \geq f_{TK} - 0,5$
f_{cm}, f_{tm} - aritmetický průměr pevnosti v tlaku a v příčném tahu souboru [N.mm ⁻²] ≡ [MPa] f_{CK} - charakteristická pevnost betonu v tlaku (třída pevnosti) [MPa] f_{TK} - charakteristická pevnost betonu v příčném tahu [MPa] f_{ci}, f_{ti} - jednotlivá hodnota pevnosti v tlaku a v příčném tahu ověřovaného souboru [MPa] s - směrodatná odchylka souboru [MPa]			

2.13.2 Systémy jakosti

V celosvětovém měřítku lze pozorovat stále rostoucí požadavky na jakost. Zvyšování jakosti je nezbytné k dosažení a udržení dobrých výsledků ekonomické činnosti organizace. Uživatel považuje za kvalitní pouze takový výrobek, který splní nebo předčí jeho očekávání. Pro výrobce je kvalita souhrnem určitých vlastností výrobku, které odpovídají příslušným normám a standardům. V současné době se většina výrobců snaží, vybavit výrobek takovými vlastnostmi, které co nejvíce odpovídají požadavkům uživatelů, konzumentů. Hledisko jakosti je pro posouzení výrobku zásadní a jakost se většinou projeví až při použití výrobku.

Stavební výrobek je každý výrobek určený pro trvalé zabudování do staveb. Výrobce, dovozce i distributor je povinen uvádět na trh **bezpečné výrobky**, u kterých se podle povahy výrobku sledují: vlastnosti výrobku, vlivu výrobku na další výrobky, návody na použití a na likvidaci výrobku. Za bezpečný se považuje výrobek, který splňuje požadavky příslušné ČSN nebo vlastnosti odpovídají stavu vědeckých a technických poznatků známých v době jeho uvedení na trh. **Certifikace** je činnost nezávislé autorizované nebo akreditované osoby, která vydáním certifikátu osvědčí, že výrobek nebo činnosti s výrobou související jsou v souladu s technickými požadavky na výrobky. **Autorizace** je pověření právnické osoby k činnostem při posuzování shody výrobků. **Akreditace** je postup, na jehož základě se vydává osvědčení, že právnická nebo fyzická osoba, která o ni požádala, je způsobilá ve vymezeném rozsahu provádět zkoušky výrobků, kalibraci měřidel a certifikační činnost.

Obecně hovoříme o **jakosti stavebního materiálu**. Jakost nelze vztahovat pouze na výrobek, ale také na jeho užití, na funkci, jakou plní ve stavební konstrukci. **Posuzování shody stavebních výrobků** je konkretizováno v Nařízení vlády č. 178/1997 ve znění č. 81/1999 Sb., ve kterém jsou taxativně vyjmenovány **stanovené výrobky**, tj. výrobky představující zvýšenou míru ohrožení oprávněného zájmu a u kterých musí být posouzena shody jejich vlastností s požadavky ČSN.

Systém jakosti. Jednotlivé prvky systému zabezpečování jakosti u výrobce jsou podrobně rozvedeny v ISO 9004. Prvořadým zájmem podniku nebo organizace musí být jakost jeho výrobků. Má-li být podnik úspěšný musí nabízet výrobky, které

- splňují dobře stanovenou potřebu, použití nebo účel
- uspokojují očekávání zákazníka
- jsou ve shodě s příslušnými normami a specifikacemi
- jsou ve shodě s právními požadavky společnosti
- jsou vyráběny za ceny schopné konkurence
- jsou poskytovány při nákladech, které dovolují zisk.

Hromadná výroba, která je typická pro téměř všechny stavební materiály, vyžaduje pro hodnocení jakosti používat moderních statistických metod. Matematické metody mohou sloužit pro analýzu trhu, navrhování výrobku, předpověď životnosti a trvanlivosti, operativní řízení procesů a rozbor údajů i vad. Používají se statistické metody: plánování experimentů, analýza rozptylu, analýza rizik, testy významnosti, regulační diagramy jakosti, statistická přejímka.

2.13.3 Ochrana životního prostředí

Vedle trvalého zvyšování kvality výrobků je ochrana životního prostředí prioritou každé ekonomické aktivity společnosti. Životní prostředí je trvale zatěžováno výrobou energie, průmyslovou i zemědělskou výrobou a výstavbou. Stavebnictví zatěžuje životní prostředí jednak dlouhodobě urbanismem, architekturou, ale také požadavky na suroviny i potřebou tepla na vytápění postavených objektů, jednak krátkodobě činnostmi na staveništi a výrobou stavebních materiálů. Součástí této zátěže životního prostředí je také beton. K jeho výrobě se využívá velký objem přírodních surovin (kamenivo), energeticky náročný cement a vzhledem ke značnému objemu a hmotnosti betonových konstrukcí není zanedbatelná i dopravní zátěž. Každý výrobek (podobně i stavební objekt) dříve nebo později skončí jako odpad, který přináší problémy s jeho zneškodněním. Na druhé straně je technologie betonu schopná částečně "odtížit" životní prostředí tím, že využívá některé energetické, průmyslové a stavební odpady jako sekundární suroviny náhradou za přírodní zdroje kame-niva.

Těžba surovin se děje povrchovým způsobem, tak dochází k devastaci krajiny, k dočasnému nebo trvalému záboru zemědělské půdy, případně lesa. Technologie stavebních materiálů způsobuje při mechanických procesech prašnost a hlučnost. V cementárnách jsou emise prachu limitovány maximálně 1,5 g na 1 tunu slinku. Hlučnost přesahující 85 dB se vyskytuje při primárním drcení, mechanickém třídění a zhuťování betonu vibrací. Energetická náročnost. Betonové konstrukce jsou však energeticky nejušpornější ve srovnání s ocelovými konstrukcemi (30 MJ.kg^{-1}) nebo zděnými s pálených cihel ($11,1 \text{ MJ.m}^{-3}$). Železobetonová konstrukce ve složení: 300 kg cementu, 100 kg oceli a dopravě složek 100 km a transportbetonu 12 km má spotřebu energie $6,3 \text{ MJ.m}^{-3}$ nebo $2,5 \text{ MJ.kg}^{-1}$.

Zvláštní opatření vyžadují odpady. Za perspektivní řešení rozporu mezi ekonomickou a biologickou reprodukcí lze považovat především zavádění technologií, které by imitovaly přírodní principy, zejména uzavřenost cyklu látek v přírodě. Takovými technologiemi jsou recyklace, maloodpadové technologie a některé biotechnologie. Maloodpadovou technologií při výrobě transportbetonu je opětovné využívání zbytků čerstvého betonu. Recyklací rozumíme spotřebu odpadů ve výrobním procesu jako sekundární surovinu nahrazující přírodní zdroje.

2.13.4 Recklace

Recyklací se neřeší pouze omezování skládek odpadů, ale také úspory přírodních, neobnovitelných surovin. Stavební odpad tvoří významný podíl odpadů společnosti, ale je z velké části recyklovatelný. Odhaduje se, že na jednoho obyvatele připadá 0,6 až 1 tuna stavebního odpadu ročně. Recyklací stavebních hmot rozumíme především zpracování minerálních stavebních odpadů. Anorganické látky tvoří největší podíl (pozemní stavby asi 80 - 90 %), avšak v zájmu ekonomiky recyklace je třeba se zabývat i zbytky dřeva a plastů. Principiálně jsou myslitelné tři cesty recyklace stavebního odpadu:

- přímé použití na staveništi,
- zavedením zpětně do průmyslu stavebních hmot,
- zpracování na nové stavební materiály.

Zpracování minerální stavební suti se člení obvykle do následujících kroků:

- drcení dodaného materiálu na frakci 0/32 mm, nebo podle požadavků,
- u železobetonu oddělení uvolněné výztuže, případně magnetickým separátorem,
- vybrání a vytřídění cizorodých a škodlivých příměsí,
- prosívání a vytřídění na jednotlivé frakce zrnitosti, při vyšších požadavcích na jakost je nutné promytí vodou nebo proudem vzduchu odstranit jemné částice na povrchu větších zrn.

V budoucnosti musí být středem zájmu společnosti získávat s minimálními náklady druhotné suroviny vhodné k prodeji a opětovnému využívání. Objevuje se nový termín "opětovná výstavba", což charakterizuje způsob asanace a demontáže stavebního objektu orientovaný na zhodnocení materiálů z odstraňované stavby. Realizace "**opětovné výstavby**" vyžaduje splnit vytřídění a odděleně získávat materiály, které se zhodnocují rozdílnými technologiemi, a dále oddělit látky a stavební prvky, které by mohly představovat pro jiné látkové skupiny nežádoucí nečistoty, bránící jejich zhodnocení.

Využívání odpadů v betonářské technologii lze rozdělit:

1. Kamenivo z průmyslových odpadů. Jako kameniva lze využívat různých odpadních látek, buď přímo (škvára, struska, báňské odvaly) nebo upravených (agloporit).
2. Příměsí do betonu, jako létavý popílek, křemičité úlety, prosívky z mechanických odlučovačů v lomech apod.
3. Recyklace betonu. Myšlenka recyklace betonu z asanovaných staveb je stará několik desetiletí, avšak praktická realizace se uskutečňuje v posled-

ním desetiletí. Betonová drť představuje solidní objem kameniva, kterým ovlivníme životní prostředí jednak vyloučením skládek tohoto objemu hmot a jednak omezením těžby přírodního kameniva. Odhaduje se, že vzniká v ČR asi 300 kt asanovaného betonu. Betonová drť je využitelná v betonech nižší pevnostní třídy především ve frakci nad 4 mm do 22 mm. Pevnost v tlaku recyklovaného betonu ve srovnání s tradičním betonem je nižší o 4 % případně až o 20 % (nastaly také případy zvýšené pevnosti o několik procent).

Ochrana životního prostředí je vymezena řadou legislativních předpisů, které se nově vydávají anebo často novelizují. Na zákony většinou navazují vyhlášky. Mezinárodně se prosazuje snaha řídit ekonomické činnosti z hlediska ochrany životního prostředí a byly vydány normy řady ČSN EN ISO 14 000 - Systémy environmentálního managementu.

Kontrolní otázky

1. *Které zkoušky a jak často provádíme s čerstvým i ztvrdlým betonem ?*
2. *Co je to kontrola shody ? Popište kriteria pevnosti betonu v tlaku a četnost odběru vzorků.*
3. *Vypočítejte statistické charakteristiky souboru hodnot pevnosti betonu v tlaku a posuďte shodu pro C 25/30. Zjištěné pevnosti zkušebních krychlí za 28 dnů : 31,5; 40; 39; 29,5; 30; 31; 30,5; 29,2; 29,8; 31,2; 30,8; 35; 33; 32.*
4. *Co je to certifikace a akreditace při zabezpečování jakosti?*
5. *Vyjmenujte stručně požadavky na systém jakosti.*
6. *Jak se provádí kontrola shody stavebních výrobků, co jsou stanovené výrobky ?*
7. *Jak probíhá tvorba technických norem, co musí být zabezpečeno?*
8. *Jak výroba betonu a betonové konstrukce ovlivňují životní prostředí ?*
9. *Které odpady lze využívat v technologii betonu ?*
10. *Definujte hranice rozdělení betonu podle objemové hmotnosti a vodní součinitel.*



3 Závěr

3.1 Shrnutí

Získané znalosti a procvičení na otázkách a příkladech jsou předpokladem praktického řešení problémů při navrhování složení, výrobě a zkoušení betonu včetně úspěšné realizace na konkrétní stavební konstrukci. Soubor přednášek a cvičení vychází ze složek betonu a přes návrh složení betonu se simulují vlastnosti čerstvého ztvrdlého betonu. Potřebné znalosti je třeba získat o zpracování čerstvého betonu a jeho uložení v konstrukci, včetně ošetření i za nepříznivých klimatických podmínek. Znalosti o zkoušení čerstvého i ztvrdlého betonu doplňují výčet potřebných znalostí, vedle důsledné kontroly všech výrobních fází, která vyúsťuje do kontroly shody, jak kontrolu přesně vymezují evropské normy. Přednášky jsou uzavřeny globálním pohledem na životní prostředí z hlediska technologie betonu. Současně jsou naznačeny možnosti technologie betonu, jak přispět k řešení odpadů.



Beton je významný konstrukční materiál současnosti i budoucnosti.



3.2 Studijní prameny

3.2.1 Seznam použité literatury

- [1] Pytlík, P. *Technologie betonu*. VUTIUM Brno, 2000.
- [2] Aitcin P. C. *Vysokohodnotný beton*, Informační centrum ČKAIT Praha 2005.
- [3] *Speciální betony*, Svaz výrobců betonu ČR, Praha 2001.



3.2.2 Seznam doplňkové studijní literatury

- [4] Nedbal, F. *Za betonem do Evropy*. Svaz výrobců cementu ČR, Praha 1998.
- [5] *Evropské směrnice pro samozhutnitelný beton*, 2004.
- [6] *Příručka technologa. Beton.*, Českomoravský beton, Beroun, 2005



3.2.3 Odkazy na další studijní zdroje a prameny

Soubor harmonizovaných evropských norem zařazených do systému českých norem:

- [7] EN 206-1 Beton
- [8] ENV 13670-1 Provádění betonových konstrukcí
- [9] EN 1992 Navrhování betonových konstrukcí
- [10] EN 13791 Posuzování pevnosti betonu konstrukcích
- [11] EN 12504 Zkoušení betonu v konstrukcích
- [12] EN 12350 Zkoušení čerstvého betonu
- [13] EN 12390 Zkoušení ztvrdlého betonu
- [14] EN 197 Cement (EN 196 Zkoušení cementu)
- [15] EN 450 Popílek do betonu
- [16] EN 13263 Křemičitý úlet do betonu
- [17] EN 934-2 Přísady do betonu
- [18] EN 12620 Kamenivo do betonu
- [19] EN 13055-1 Pórovité kamenivo
- [20] EN 1008 Záměsová voda do betonu rozhodujících
- [21] EN 12878 Pigmenty

