

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta stavební

Ústav technologie stavebních hmot a dílců

Ing. Rudolf Hela, CSc.

INTENZIFIKACE ZHUTŇOVÁNÍ BETONOVÝCH SMĚSÍ
COMPACTING INTENSIFICATION OF CONCRETE MIXTURES

ZKRÁCENÁ VERZE HABILITAČNÍ PRÁCE



BRNO 2002

KLÍČOVÁ SLOVA

zhutnění, vibrace, vibroaktivace, samozhutňující beton

KEY WORDS

compaction, vibration, vibroactivation, self-compacting concrete

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE

oddělení pro vědu a výzkum FAST VUT v Brně

© 2002 Rudolf Hela
ISBN 80-214-2227-0
ISSN 1213-418X

OBSAH

	PŘEDSTAVENÍ AUTORA	4
	INTENZIFIKACE ZHUTŇOVÁNÍ BETONOVÝCH SMĚSÍ	5
1	VÝZNAM ZHUTŇOVÁNÍ BETONOVÝCH SMĚSÍ	5
1.1	Parametry procesu zhutňování	5
2	REOLOGICKÉ CHOVÁNÍ CEMENTOVÝCH MALT A ČERSTVÉHO BETONU	8
3	VIBROAKTIVACE, PRINCIP METODY A DOSAŽENÉ VÝSLEDKY	10
3.1	Příklad výsledků vibroaktivace betonů	11
4	TERMOVIBRACE, PRINCIP METODY A DOSAŽENÉ VÝSLEDKY	13
4.1	Příklad výsledků termovibrace betonů	13
5	PROGRESIVNÍ SMĚR ZHUTŇOVÁNÍ BETONU – SAMOZHUTNITELNÉ BETONY (SCC)	15
5.1	Základní charakteristiky SCC	16
5.2	Vlastnosti zatvrdlých SCC	17
5.3	Experimentální část – Návrh a zkoumání vlastností samozhutnitelných betonů ...	18
5.3.1	Sledování reologických vlastností cementových malt pro SCC	18
5.3.2	Sledování vlastností samozhutnitelných betonů	19
5.3.3	Souhrn dosažených výsledků a jejich hodnocení	19
5.4	Přínosy SCC betonů	22
6	ZÁVĚREČNÉ SHRNU TÍ	22
	POUŽITÁ LITERATURA	23
	ABSTRAKT	24

PŘEDSTAVENÍ AUTORA

Rudolf Hela se narodil 28. 2. 1959 v Uherském Hradišti. Středoškolské vzdělání získal na Střední průmyslové škole strojnické v Uherském Hradišti v letech 1974 až 1978 a úspěšně je zakončil maturitní zkouškou v roce 1978. V letech 1978 až 1983 absolvoval vysokoškolské studium na Vysokém učení technickém, Fakultě stavební, obor průmyslová výroba stavebních hmot a dílců. Ihned po ukončení vysokoškolského vzdělání nastoupil v červenci 1983 na katedru technologie stavebních dílců FAST VUT jako vědecký pracovník. Od 1. 10. 1983 do 30. 9. 1984 absolvoval základní vojenskou službu ve VÚ Příbram, kde vykonával funkci stavbyvedoucího. V letech 1984–1985 absolvoval jednoroční studijní pobyt na katedře technologie stavebních dílců FAST VUT v Brně, kde od 1. 10. 1985 nastoupil do funkce asistenta. V letech 1986 až 1989 dokončil externí vědeckou aspiranturu ve vědním oboru technologie staveb. Téma závěrečné disertační práce bylo „Zákonitosti dynamických způsobů zhuťování betonových směsí“. Od 1. 9. 1987 byl zaměstnán jako odborný asistent na katedře technologie stavebních dílců. V období 1989–1990 pracoval na Ministerstvu státní kontroly ČR, obor stavebnictví. V letech 1989–1991 absolvoval postgraduální studium na FAST VUT, Ústavu soudního inženýrství pro odvětví ekonomika a stavebnictví. V roce 1992 byl jmenován znalcem v uvedených oborech. V roce 1995 se stal autorizovaným inženýrem v oboru zkoušení a diagnostika, od roku 1997 je certifikován pro nedestruktivní zkoušení ve stavebnictví. V roce 1999 absolvoval postgraduální studium organizované vzdělávacím centrem pro stavebnictví Gradua Praha v oblasti řízení systémů jakosti a v roce 2000 byl jmenován externím expertem pro certifikační orgán VUPS Praha a pravidelně se účastní auditů při zavádění systémů řízení jakosti ve stavebnictví. Od roku 1994 je členem technické normativní komise č. 17 Geometrická přesnost staveb při ČSN. Je členem Českého svazu stavebních inženýrů, Komory znalců ČR, Asociace znalců a odhadců a Sdružení pro sanace betonových konstrukcí. V roce 1999 byl zvolen do výboru České betonářské společnosti a je předsedou sekce Technologie betonu a od roku 2000 je členem Odborné sekce pro vývoj samozhutnitelných betonů při Britské betonářské společnosti (BCS).

V letech 1997–1998 byl členem výzkumného týmu FAST VUT v Brně, projekt MŠMT VS 96 107 – odpovědný řešitel prof. Ing. Z. Šauman, DrSc. – „Výzkum vybraných průmyslových odpadů ve výrobě stavebních hmot a dílců“, v současné době je členem dvou výzkumných týmů v rámci výzkumných záměrů CEZ, a to týmu vedeného prof. Ing. R. Drochytkou, CSc. a týmu vedeného prof. Ing. J. Melchrem, DrSc.

Na Ústavu technologie stavebních hmot a dílců v současné době zajišťuje výuku 3 nosných předmětů v magisterském studiu. Vytvořil a obsahově koncipoval 2 předměty doktorského studia na FAST VUT oboru MI, z nichž jednoho je v současné době garantem. Dále je garantem 3denního kurzu celoživotního vzdělávání akreditovaného ČKAIT – Technologie betonu a podílí se na dalším obdobném kurzu ČKAIT Sanace betonových konstrukcí. Na Ústavu technologie stavebních hmot a dílců je zástupcem vedoucího ústavu, současně obdobnou funkci vykonává ve znaleckém ústavu Stavexis s. r. o., který spoluzakládal v roce 1992 (jmenování ústavu pro znaleckou činnost je pro základní obory ekonomika a stavebnictví) a je technickým vedoucím akreditované zkušebny Consultest s. r. o. pro zkoušení betonu a stavebních hmot.

INTENZIFIKACE ZHUTŇOVÁNÍ BETONOVÝCH SMĚSÍ

Tato práce je zaměřena na problematiku zhutňování betonových směsí. Pro získání kvalitního a trvanlivého betonu je nutno dodržet několik kvalitativních požadavků začínajících správným výběrem vstupních surovin. Následuje provedení vhodného návrhu složení směsi, navazuje vhodně zvolený způsob ukládání a pro dané složení směsi účinný dostatečně rychlý způsob zhutňování, který má zásadní vliv na vlastnosti zatvrdlého betonu, jeho fyzikálně-mechanické vlastnosti a trvanlivost. Intenzifikace způsobů zhutňování má nejen dopady na získání kvalitních a trvanlivých betonů, ale i na ekonomiku procesu, např. úsporu času pracovních sil, investice na zařízení a v neposlední řadě i na ekologické aspekty, hygienu práce a zdraví pracovníků.

1 VÝZNAM ZHUTŇOVÁNÍ BETONOVÝCH SMĚSÍ

Každý beton uložený do formy nebo bednění vykazuje určitý stupeň nakypřenosti, který závisí na jejím složení a na způsobu dopravy a ukládání. Hlavním cílem zhutňování při výrobě hutných betonů je zmenšit objem mezer v nakypřené betonové směsi, popř. objem vzduchových pórů betonu na minimum. Ideálním stavem by bylo, kdyby objem těchto pórů byl maximálně 2 %. Přitom by zhutňovací proces měl probíhat rychle a s vynaložením co nejmenšího množství energie.

Kromě toho musí betonová směs dokonale zaplnit všechna místa formy z důvodů zachování přesných tvarů výrobků a kvality jejich povrchů. Výztuž by měla být dokonale obalená, aby se dosáhlo požadovaného spolupůsobení betonu a výztuže.

1.1 Parametry procesu zhutňování

Za hlavní parametry zhutňovacího procesu lze považovat **zhutňovací rychlost, intenzitu, odpor a zhutňovatelnost betonové směsi** [1].

Zhutňovací rychlost – je rychlost zmenšování mezerovitosti (M) betonové směsi, tzn. poměr úbytku objemu mezer v BS k okamžitému objemu zhutňované směsi za jednotku času.

Zhutňovací intenzita – je množství zhutňovací energie přicházející do betonové směsi jednotkou plochy za jednotku času zhutňování. Je to vlastně působení vnějších sil zhutňovacího zařízení (jeho účinnosti) na rychlost a průběh zhutňování.

Zhutňovací odpor – odpor, který je nutné překonat, aby zhutňování probíhalo. Je dán hodnotou zhutňovací intenzity, kterou je třeba v určité fázi zhutňování vynaložit, aby se dosáhlo určité zhutňovací rychlosti.

Zhutňovatelnost – je převrácenou hodnotou zhutňovacího odporu, je to vlastně zhutňovací rychlost, která se v určité fázi zhutňování dosáhne použitou intenzitou zhutňování. Vyjadřuje nám vliv reologického charakteru a vnitřních vlastností betonové směsi a lze ji charakterizovat jako objem mezer, o který lze zmenšit objem betonové směsi při dodání jednotkové zhutňovací energie na jednotku plochy. Zhutňovatelnost je nepřímo úměrná konzistenci – při nižší konzistenci (měkčí, pohyblivější směs) se konstantní jednotkou energie dosáhne většího objemu zmenšení mezer a naopak [1].

Pokud chceme dosáhnout určitého zhutnění betonové směsi za optimální čas, musíme dodržet tyto zásady:

- Nemá-li se příliš prodloužit doba zhutňování, je nutno zvýšit zhutňovatelnost betonové směsi (tzn. upravit konzistenci – pohyblivější betonové směsi) nebo zvětšit zhutňovací intenzitu.
- Máme-li zhutňovatelnost danou složením betonové směsi, musíme změnit intenzitu nebo dobu zhutňování.
- Máme-li daným konkrétním zhutňovacím způsobem a účinností zhutňovacího zařízení danou zhutňovací intenzitu, musíme buď změnit zhutňovatelnost (složením a konzistencí betonové směsi) nebo změnit dobu zhutňování.

Požadované zhutnění můžeme dosáhnout i kombinovanými změnami všech výše uvedených parametrů zhutňování.

Za použití uvedených hlavních parametrů zhutňování a matematických vztahů pro zákonitosti sedání v časovém průběhu zhutňování odvozených z experimentálních měření lze sestavit regresní vztahy, které stochastický proces zhutňování betonové směsi mohou popisovat přesněji a s jejichž pomocí lze dosáhnout intenzifikace procesu zhutňování hlavně při použití technologie vibrace nebo vibrolisování [2].

Při experimentálních pracích Hela odvodil a prokázal, že průběh zhutňování betonové směsi probíhá podle modelu vyjádřeného rovnicí /1/ a znázorněného na obr. č. 1.

$$M = M_1 - q \cdot \ln \tau \quad [-] \quad /1/$$

Zhutňování probíhá dle výše uvedeného vztahu až do tzv. „zlomu“, kdy se průběh změny – dojde ke změně zhutňovatelnosti betonové směsi BS danými neměnnými parametry a proces zhutňování se zpomalí. Rovnice /1/ se za „zlomem“ změnila na:

$$M' = M'_1 - q' \cdot \ln \tau \quad [-] \quad /2/$$

kde: M – okamžitá mezerovitost BS, zmenšující se od výchozí M_0 v čase $\tau = 0$ na M_h po zhutnění v čase τ_h [-]

M_1 – mezerovitost pro $\tau = 1$ s [-]

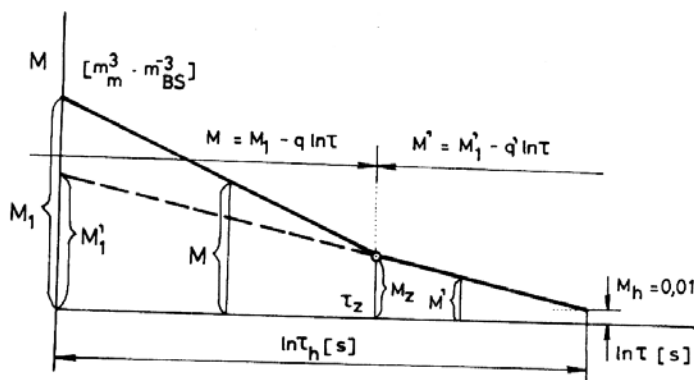
q – směrnice logaritmické přímky zhutňování do doby zlomu τ_z

M' , M'_1 a q' jsou obdobné hodnoty pro doby $\tau > \tau_z$

Derivací /1/ a /2/ získáme rychlosti zhutňování

$$\text{do zlomu} \quad v'_z = -\frac{q}{\tau} \quad [m^3 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}] \quad /3/$$

$$\text{a za zlomem} \quad v''_z = -\frac{q'}{\tau} \quad [m^3 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}] \quad /4/$$



Obr. č. 1 Grafické znázornění průběhu zhutňování

Rychlost zhutňování v_z závisí na zhutňovacím výkonu P_z , který na směs v daném stavu a okamžiku působí. Z toho pak zhutňovatelnost r_z betonové směsi je:

$$r_z = \frac{|v_z|}{P_z} = \frac{q}{\tau \cdot P_z} \quad \left[\frac{m^2}{N} = \frac{m_{BS}^3}{J} \right] \quad /5/$$

Okamžitá zhutňovatelnost r_z je okamžitá rychlost zhutňování betonové směsi dosahovaná daným měrným zhutňovacím výkonem použitého zhutňovacího zařízení.

Zhutňovací rychlost, a tedy i dobu zhutňování, lze ovlivnit nejen zhutňovatelností (složení betonové směsi, měrný objem), ale i měrným zhutňovacím výkonem daným použitým zařízením. Rozdělení zhutňovací energie v objemu betonové směsi nebývá rovnoměrné a tedy ani zhutňování nebude v celém objemu probíhat stejně a rovnoměrně.

Průběhy zhutňování lze exaktně popsat podle následujícího modelu zhutňování, který upravil a ověřil HELA. Při zanedbání přetváření zhutňované betonové směsi ve vodorovných směrech a za předpokladu jejího sedání pouze ve svislém směru lze okamžitou mezerovitost vyjádřit:

$$M = M_o \cdot e^{\left(-\int_0^{\tau} v_z \cdot d\tau \right)} = M_o \cdot e^{(-P_z \cdot \tau^{iz})} \quad [-] \quad /6/$$

Hodnota exponentu z rovnice /5/ je:

$$\int_0^{\tau} v_z \cdot d\tau = -P_z \cdot \tau^{iz} = -1n \left(\frac{M}{M_o} \right) = \beta \quad [-] \quad /7/$$

V rovnici /5/ a /6/ značí:

M_o a M $\left[m_m^3 \cdot m_{CB}^{-3} \right]$ – mezerovitost nakypřené BS před zhutňováním v čase $\tau - o$ a po době zhutňování τ .

$v_z \left[m_m^3 \cdot m_{BS}^{-3} \cdot s^{-1} \right]$ – okamžitá měrná objemová zhutňovací rychlost ve svislém směru

$P_z = \beta_1$ [-] – měrný zhutňovací výkon, případně faktor zhutnitelnosti β_1 v čase $\tau = 1$ s

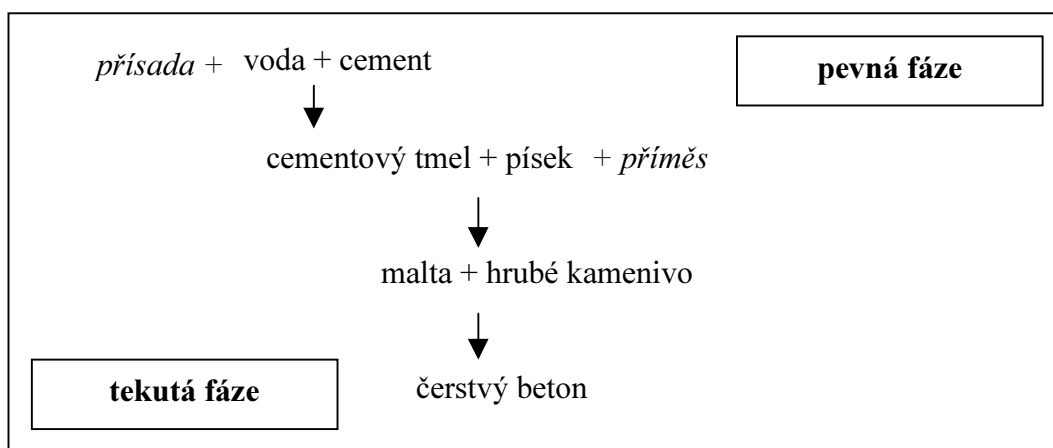
i_z [-] – index zhutňovatelnosti

β [-] – faktor okamžité zhutnitelnosti

Symbol β lze nazvat faktorem zhutnitelnosti, který zahrnuje jednak vliv charakteru betonové směsi a její zhutňovatelnosti a jednak vliv zhutňovacího způsobu a zařízení.

2 REOLOGICKÉ CHOVÁNÍ CEMENTOVÝCH MALT A ČERSTVÉHO BETONU

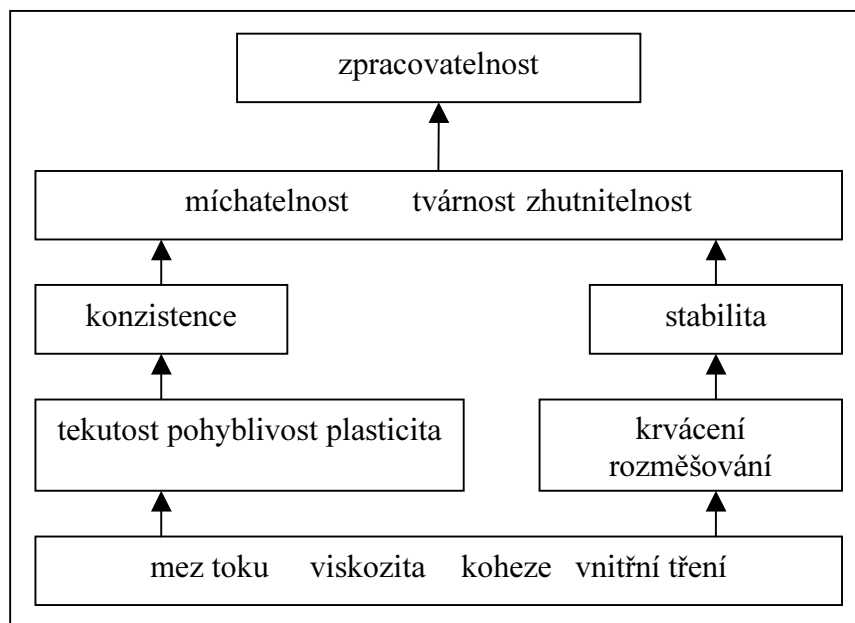
Beton lze chápat jako vícekomponentní stavební materiál skládající se z jemnozrnné matrice (malty), tj. suspenze z vody, cementu, drobného kameniva, eventuálně přísad a příměsí a v této matici pohybujícího se hrubého kameniva (viz. obr. č. 2).



Obr. č. 2 Rozdělení čerstvého betonu na pevnou a tekutou fázi

Výchozí složky betonu a jejich složení v zásadě určují reologické chování čerstvého betonu. Popisem reologického chování jemnozrnné matrice betonu, relevantních vlastností hrubého kameniva a množstvím malty je možné charakterizovat reologické vlastnosti čerstvého betonu.

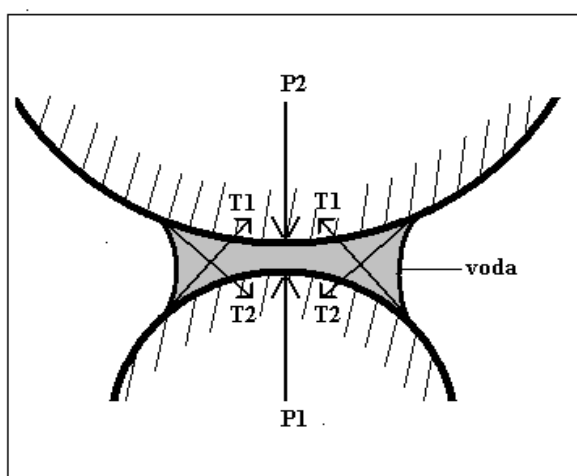
Zpracovatelnost je nejdůležitější vlastností čerstvého betonu a lze ji definovat pojmy jako např. tekutost, tvárnost, zhutnitelnost či schopnost zadržovat vodu. V širším významu představuje zpracovatelnost synonymum pro celou řadu reologických vlastností směsi, jakými jsou např. konzistence, pohyblivost, plasticita, krvácení, koheze, stabilita, tekutost, tixotropie, reopexie. Welsche [3] shrnul reologické vlastnosti čerstvého betonu v modelu, který je zobrazen na obr. č. 3.



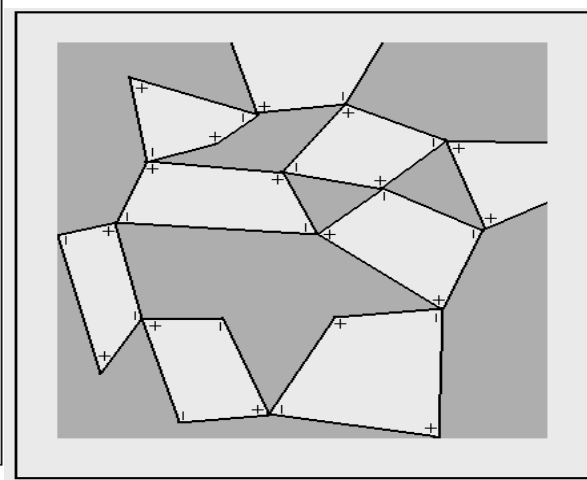
Obr. č. 3 Reologický model čerstvého betonu

Aby bylo možné popsat reologické vlastnosti malty a čerstvého betonu, je třeba přihlídnout nejprve ke zvláštnostem tekuté fáze „cementového tmele“. Reologické chování cementových suspenzí je určeno fyzikálními a chemickými vlastnostmi cementů. V cementu probíhá bezprostředně po přidání vody série komplexních chemických reakcí, při kterých např. síran vápenatý (CaSO_4) a malý podíl tricalciumaluminátu (C_3A) přechází do roztoku a vznikají první reakční produkty jako hydroxid vápenatý a trisulfát (ettringit). Vedle chemických reakcí působí mezi cementovými zrny přitažlivé a odpudivé síly.

Mezi přitažlivé síly patří síla tíhová, Van-der-Waalsovy, kapilární a elektrostatické síly. Posledně jmenované jsou tím větší, čím větší je specifický povrch částic. Odpudivé síly se vyskytují mezi částicemi se stejným nábojem. Velikost těchto sil, včetně vnitřního tření, je závislá na velikosti zrna dispergované fáze, koncentraci pevné fáze v suspenzi a na reakcích mezi tekutou a pevnou fází. Příklady jsou zobrazeny na následujících obrázcích č. 4 a 5.



Obr. č. 4 Kapilární koheze:
T1, T2: kohezivní síly kapilární vody;
P1, P2: tlakové síly působící na zrno



Obr. č. 5 Tvorba vločkové struktury vlivem elektrostatických přitažlivých sil

Podle druhu a velikosti sil se tvoří více či méně pevná struktura. Tuto strukturu, označovanou jako vložkovou strukturu, tvoří zesíťované aglomerace cementových zrn, které prostřednictvím interpartikulárních sil elasticky přejímají napětí pod hranicí meze toku. Tvorba vložkové struktury cementových zrn zapříčiňuje reologické jevy v cementové suspenzi. Tato vložková struktura cementových částic se při napětích nad hranicí meze toku vlivem vnějšího namáhání rozrušuje, což má za následek snížení tečného napětí. Stupeň rozrušení vložkové struktury závisí na velikosti a době trvání působícího vnějšího působení, tj. zhutňování betonu [4].

3 VIBROAKTIVACE, PRINCIP METODY A DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

Vibroaktivace nebo-li opakovaná vibrace je krátkodobé plánované střídání vibrace s dobou klidu.

Podle souhrnných laboratorních pozorování vykazuje čerstvý beton v průběhu vibroaktivace v různém čase od přidání záměsové vody a namíchání tři rozdílná dále popsaná stadia.

1. stadium

Čerstvý beton se pomalu v čase zahušťuje, ale působením vibrace je možné ho ještě uvést do určitého stupně plastičnosti. Současně však existuje velký počet nezávislých faktorů ovlivňujících jeho okamžitou plastičnost. Jsou to především druh cementu, jeho fázové složení a jemnost mletí, použitý intenzifikátor mletí, druh a množství přidávaných přísad a příměsí a charakter použitého kameniva. Velmi výrazný je i vliv teploty čerstvého betonu, příp. vnější teploty prostředí či intenzity proudění vzduchu. Opětovnou vibrací se čerstvý beton může dostat opět do pohyblivého plastického stavu a vlivem vnější vibrace se může zmenšovat objem uzavřeného vzduchu.

2. stadium

Při začátku skutečného tuhnutí se beton opětovnou vibrací částečně poruší trhlinami. Pokračováním vibrace se však trhliny opětovně zacelí. Toto spojení je někdy doprovázeno vystoupením vody. Při opětovné vibraci je třeba vynaložit více energie či využít delší doby vibrace než při počátečním zhutňování.

3. stadium

Beton už je v pokročilém stavu tuhnutí a dalším vibrováním může vzniknout množství širokých trhlin nebo může dojít k oddělení zrn kameniva od cementového tmele. Je těžké dosáhnout opět původní homogenní struktury a účinek vibroaktivace se může projevit v negativním smyslu [5].

Údaje o době, do které musí být vibroaktivace dokončena, jsou podle vnějších podmínek odlišné. Okamžik počátku vibroaktivace se může pohybovat od 0,5 do 4 hodin od přidání záměsové vody a namíchání.

Větší pozornost musí být ovšem věnována otázce, do jaké doby od namíchání je vibroaktivace ještě přípustná. Obvykle se udává přípustná doba od 3 do 6 hod. Autoři [6], [7] uvádějí, že by se nemělo pokračovat ve vibroaktivaci po začátku tuhnutí cementového tmele. Neméně

důležitou oblastí je počátek a délka cyklů vibroaktivace. Je velmi obtížné vyvodit obecnější závěry, protože ověřovací zkoušky probíhají ze nesterilních podmínek.

Vibroaktivace se kromě vlivu na rychlost nárůstu pevností a hutnosti projevuje i dopadem na smrštění, trvanlivost, dotvarování, vodotěsnost a mrazuvzdornost.

Při mikroskopických pozorováních se zjistilo, že zrna cementu průměru 15 až 30 μ zhydratují za 28 dní jen do hloubky asi 3,5 μ , za 90 dní do hloubky asi 5 μ a teprve za rok pronikne hydratace do středu zrna. Větší cementová zrna zůstávají pak částečně nezhydratována, a tak nejsou zcela využita.

Použitím metody řízené vibroaktivace (VA) dochází pomocí tření rozkmitávaného kamenního k postupnému otírání rozpuštěných povrchových obalů cementových zrn a voda proniká snadněji k doposud neovlhčeným jádrům cementových zrn. Tím dochází při jednotlivých vibroaktivacích k postupnému zvětšování povrchu rozpuštěných obalů zrn, které jsou základem pro vytvoření dalšího množství vazných hydratačních produktů vytvořených působením vibroaktivace. Jedná se tedy v principu o opakovanou aktivaci cementového tmele uvnitř čerstvého betonu, což je v podstatě totéž jako použití energeticky náročného a drahého jemně mletého cementu.

Řízenou vibroaktivaci lze definovat jako plánovité střídání doby vibrace s dobou klidu po přesně stanovené době odležení, a to v souladu s probíhajícím hydratačním procesem, do něhož takto účelně zasahujeme s ohledem na složení betonu, reologické vlastnosti čerstvého betonu a s ohledem na jeho teplotu po uložení do formy či bednění.

Zhutňování betonu s využitím vibroaktivace se provádí podle tzv. vibroaktivačního režimu, který lze schematicky vyznačit následovně:

$$\text{VAR} = V + O + \text{VA}_1 + I_1 + \text{VA}_2 + I_2 + \text{VA}_3 \dots + \text{VA}_n \quad /8/$$

kde značí

VAR – vibroaktivační režim [min]

V – základní vibrace [min]

O – odležení [min]

I – klidové intervaly [min]

VA – vibroaktivační intervaly [min]

Délka doby klidových (I) a vibroaktivačních intervalů je závislá na průběhu hydratačního procesu (druhu, jemnosti a dávce cementu, množství záměsové vody, konzistence, teploty apod). Důležité ovšem je, že vibroaktivace musí být ukončena do počátku tvorby strukturovaných vazeb betonu.

3.1 Příklad výsledků vibroaktivace betonů

Složení betonu na 1m³:

CEM II B/S – 32,5 Mokrý.....380 kg

Voda..... 160 kg

Kamenivo 0–4 mm Bratčice..... 864 kg

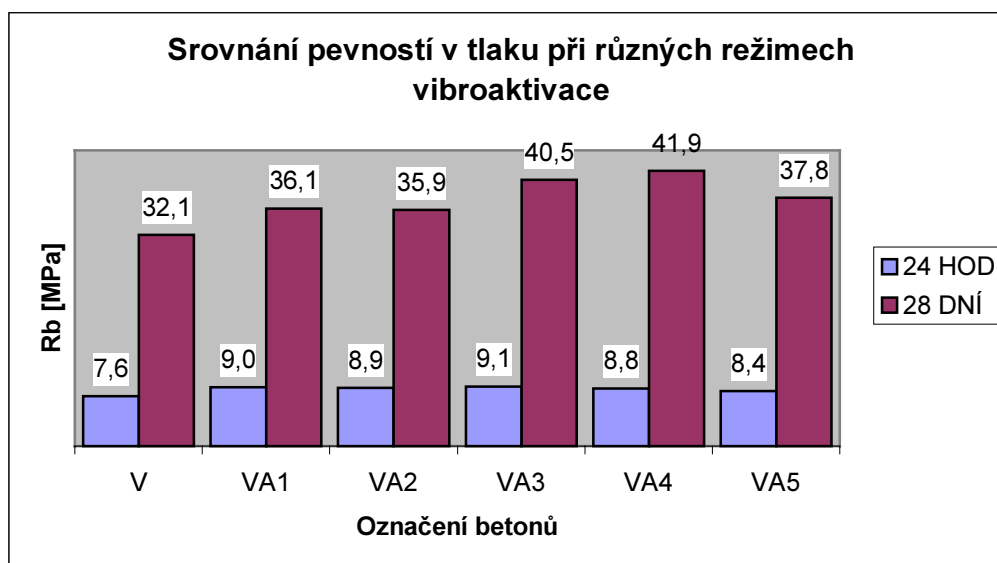
Kamenivo 8–16 mm Olbramovice..... 974 kg

Konzistence změřená ihned po namíchání byla 30 s VeBe. Teplota laboratorního prostředí, ve kterém probíhala vibroaktivace, byla 19° C. Vibroaktivace byla prováděna na 6 sadách vzorků.

Režim vibroaktivace byl následující: doba základní vibrace V byla 210 sekund, doba odležení pro jednotlivé režimy byla 1, 2, 3, 4 a 5 hodin, doba vibroaktivního intervalu VA byla vždy 120 sekund, počet intervalů 4, klidový interval I mezi vibroaktivními intervaly trval 15 minut. Výsledky zjištěných pevností v tlaku ve stáří 1 a 28 dnů jsou uvedeny v následující tabulce č. 1a na obr. č. 6.

	24 HOD					28 DNÍ				
	Ø ζ[kg m ⁻³]	ζ[kg m ⁻³]	R _b [MPa]	Ø R _b [MPa]	Vzrůst R _b [%]	ζ[kg m ⁻³]	Ø ζ[kg m ⁻³]	R _b [MPa]	Ø R _b [MPa]	Vzrůst R _b [%]
V	2395	2390	7,4	7,6	0	2318	2316	32,21	32,1	0
	2380		7,8			2325		-		
	2396		7,5			2305		32,02		
VA1	2400	2400	9,1	9,0	18,2	2306	2325	35,39	36,1	12,6
	2397		8,9			2327		36,37		
	2402		9,0			2341		36,67		
VA2	2404	2396	8,8	8,9	17,8	2333	2387	34,86	35,9	11,8
	2379		8,9			2311		37,46		
	2405		9,1			2372		35,47		
VA3	2414	2411	9,0	9,1	19,2	2347	2348	41,67	40,5	26,2
	2403		-			2351		40,63		
	2417		9,1			2345		39,12		
VA4	2392	2405	8,8	8,8	16,5	2365	2357	43,35	41,9	30,5
	2402		8,8			2342		40,55		
	2422		-			2363		41,80		
VA5	2420	2418	8,3	8,4	10,7	2316	2334	38,61	37,8	17,8
	2415		8,4			2352		39,22		
	2420		-			2335		35,75		

Tabulka č. 1 Pevnosti betonu v tlaku po 1 a 28 dnech pro různé režimy vibroaktive



Obr. č. 6 Pevnosti betonů v tlaku po 1 a 28 dnech při různých režimech vibroaktive

4 TERMOVIBRACE, PRINCIP METODY A DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

Při tepelném urychlování tvrdnutí betonu (UTB) s nepřiměřeně rychlým nárůstem a výškou teplot prohřevu dochází ke značnému zvětšování množství makropórů a technologických pórů s následným zhoršením mechanicko-fyzikálních vlastností cementového kamene betonu [8]. Proto byla ověřována správnost předpokladu, že po zahřátí betonu na 60° C a po jeho termické expanzi by buď jednou nebo vícekrát opakovanou vibrací ve vhodné fázi protěplování mělo být dosaženo značného zmenšení pórovitosti cementového kamene, nebo i při stejné pórovitosti by mělo být dosaženo zmenšení podílu technologických pórů, zvětšení podílů mikropórů a tím i zvýšení pevnosti a zlepšení mechanických vlastností hutných betonů. Jednorázově opakovaná vibrace teplého betonu po základním zhutnění byla označena názvem termovibrace TV.

Oprávněnost hypotézy byla ověřena srovnáním tlakových pevností na krychlích zhutňovacích pouze vibrací a termovibrací. Srovnány byly pevnosti ihned po provedení UTB a za 28 dnů po provedení UTB.

4.1 Příklad výsledků termovibrace betonů

Zkušební betonové směsi měly toto složení na 1 m³:

CEM I 42,5 Mokrý)	420 kg
Voda	185 kg
Kamenivo 0–4 mm Bratčice	777 kg
Kamenivo 8–16 mm Olbramovice	950 kg

W = 0,44

Konzistence změřená ihned po zamíchání byla 12 s VeBe.

Po zhutňování trvajícím vždy 120 s byly zkušební vzorky vkládány do proteplovací komory vyhřáté parovzdušnou směsí na 60° C. Tato teplota prostředí byla automaticky regulována s odchylkami ± 1° C po celou dobu UTB trvajícím vždy 5 h. Přitom byl měřen vzestup teplot také uprostřed zkušebních krychlí. Za 1,3 až 1,8 h byla t_{max} 63 až 65° C.

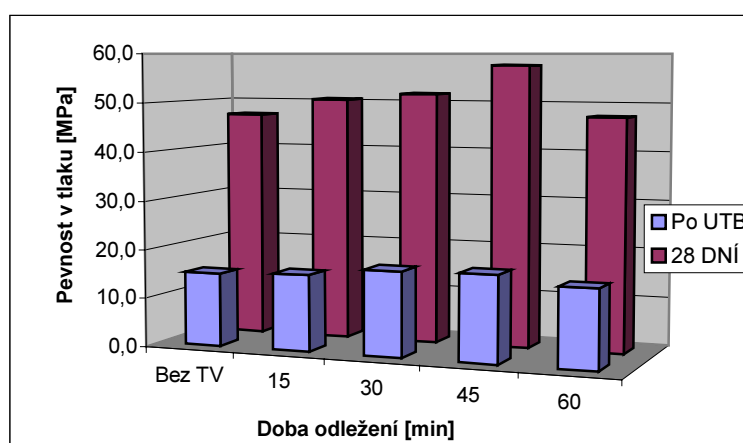
Pevnosti v tlaku byly zjišťovány do 15 až 20 min po ukončení UTB a za 28 dnů po UTB.

Vliv termovibrace byl ověřován tak, že tepelně izolované formy se zkušebními vzorky byly po vyjmutí z proteplovací komory 1 × vibrovány po dobu 2 min, a to 15, 30, 45 a 60 min od vložení do komory a zahájení tepelného UTB. Po ukončení termovibrace a po sejmutí tepelné izolace byly vzorky znovu vloženy do komory, kde tepelné UTB pokračovalo až do celkové doby UTB 5 h.

Získané výsledky zkoušek jsou shrnuty do tabulky č. 2 a grafu na obr. č. 7. Hodnoty pevností označené po UTB jsou vždy pevnosti stanovené po ukončení UTB, tj. po 5 hod proteplování.

Tabulka č. 2 Vliv termovibrace na pevnosti betonu s CEM I 42,5

Termovibrace od počátku UTB [min]	Průměrné R_b [MPa]		ΔR_b působením termovibrace [%]	
	Po UTB	Za 28 dnů	Po UTB	Za 28 dnů
Bez termovibrace	15,0	47,0	srovnávací	srovnávací
15	15,6	50,4	+ 3,98	+ 7,28
30	17,3	51,7	+ 14,88	+ 10,00
45	17,6	57,7	+ 17,31	+ 22,76
60	15,9	47,4	+ 5,58	+ 0,90



Obr. č. 7 Vliv termovibrace na pevnosti betonu s cementem CEM I 42,5

Pro posouzení efektu termovibrace byly po 28 dnech tvrdnutí odebrány vzorky a bylo na nich rtuťovým porozimetrem fy Carlo ERBA stanoveno množství a distribuce pórů.

Ze získaných výsledků je zřejmé, že působením TV a dochází ke zlepšení charakteru pórové struktury a ke snížení hodnoty mediánu pórů ze 109 nm u vzorků vibrovaných na 99 nm, u vzorků termovibrovaných po 30 minutách a na 90 nm u vzorků termovibrovaných po 45 minutách od počátku UTB.

Můžeme proto konstatovat, že termovibrací se dosahuje značného zmenšení porozity cementového kamene, zjemnění jeho pórové struktury a pravděpodobně i zvýšení soudržnosti cementového kamene s kamenivem. Růst pevností je proto přímo úměrný zlepšení charakteru pórové struktury betonu

5 PROGRESIVNÍ SMĚR ZHUTŇOVÁNÍ BETONU – SAMOZHUTNITELNÉ BETONY (SCC)

Základním požadavkem na samozhutnitelný beton je zajištění takové míry pohyblivosti a tekutosti směsi, že po uložení do formy svou vlastní tíhou vyplní prostor bednění a dosáhne běžně požadované hutnosti bez dodávání další vnější zhutňovací energie, beton tedy není nutné jakkoliv zhutňovat. Výsledné vlastnosti včetně homogenity betonu po jeho výšce jsou přinejmenším srovnatelné s běžnými betony.

Přínosem je zejména i to, že u technologie SCC jsou výrazným způsobem využívány i odpadní suroviny, např. elektrárenské popílky, vysokopeční strusky či kamenné odprašky. Postupně byly v ČR vyvinuty receptury SCC s využitím odpadních surovin.

Složení betonové směsi, která splňuje výše uvedené požadavky, bylo poprvé publikováno výzkumným kolektivem japonských pracovníků v roce 1989 pod názvem „Self Compacting Concrete“ (SCC) (v českém překladu *samozhutnitelný beton*). Samozhutnitelný beton lze definovat jako vícesložkový kompozitní silikátový systém, ve kterém hlavní složky tvoří portlandský cement, písek a kamenivo o vysoké pevnosti a vhodné distribuce velikosti zrn kameniva. Modifikujícími složkami jsou superplastifikátory, jemná plniva o vysokém specifickém povrchu částic, látky upravující viskozitu a odměšování vody cementového tmele v delším čase [9].

Po systematickém výzkumu zaměřeném na problémy zpracovatelnosti čerstvé betonové směsi byly na trh uvedeny nové typy plastifikátorů – superplastifikátory IV. generace. Z chemického hlediska se jedná o modifikované polykarboxylétery s rozvětvenou molekulou obsahující na základním řetězci pobočné kratší řetězce o různé délce. Po aplikaci do cementové suspenze (kaše) bezprostředně sféricky obklopují cementová zrna a zajišťují jejich dokonalé rozptýlení v záměsové vodě. Výsledkem je podstatné zlepšení zpracovatelnosti čerstvého betonu a z toho vyplývající možnost snížení množství záměsové vody z obvyklých $v/c = 0,50$ až na $v/c = 0,33$. Účinnost těchto superplastifikátorů umožňuje snížit dávky vody ve srovnání s dosud užívanými typy na bázi směsných kondenzátů formaldehydu s naftalenem nebo melaminsulfonáty. Dalším jejich významným přínosem pro technologii transportbetonu je prodloužení doby zpracovatelnosti při zachování výchozí konzistence.

5.1 Základní charakteristiky SCC

Čerstvá směs SCC obsahuje značný podíl jemných práškových složek. Celkový úhrn kombinace cementu, vápencového prachu, případně popílku, silica fume nebo kamenných fillerů, které propadnou sítím 0,25 mm, bývá až o 30 % vyšší než u běžných betonů. Přísada superplastifikátorů čtvrté generace upravujících viskozitu tak, aby nedošlo k odmísení záměsové vody, příznivě ovlivňuje reologické vlastnosti betonové směsi i přes podstatně vyšší podíl objemu modifikované cementové kaše, který je rozhodujícím faktorem objemových změn v průběhu tuhnutí betonu.

Pojmenování vlastností čerstvého samozhutňujícího betonu vychází z anglické terminologie, která se zdá být pro přesný význam a zachycení podstaty pojmů nejlepší. I když lze doslovně tyto pojmy do češtiny přeložit, domnívám se, že zaběhlé anglické označení je výstižnější, a proto jej spolu s překladem uvádím. Tyto charakteristiky definují požadavky na čerstvý SCC, který je musí splňovat, aby dosáhl dobré samozhutnitelnosti:

Filling ability, flow (vysoká tekutost, schopnost tečení)

Tato vlastnost zaručuje, že čerstvá samozhutňující směs zaplní veškeré části bednění, i komplikovaného tvaru, bez tvorby jakýchkoliv dutin a mezer. Směs doteče pouze pod tlakem vlastní váhy. Zároveň má mít samozhutňující beton tak vysokou vnitřní kohezi, aby nebyl náchylný na únik z bednění v případě jeho netěsnosti.

Passing ability, low blocking (nízké blokování, schopnost snadného tečení přes výztuž)

Samozhutňující směs musí být schopna protéct mezi jednotlivými prvky výztuže, aniž by se změnilo její složení a kamenivo ve směsi obsažené se nahromadilo v úzkém místě mezi výztuží, čímž by došlo k segregaci jednotlivých složek, zejména hrubých frakcí kameniva.

Segregation resistance (odolnost vůči rozměšování)

Hovoříme-li obecně o rozměšování v čerstvém betonu, většinou se to týká vystupování vody na povrch a vytváření tenké vrstvy na povrchu kaše, která jen málo přispívá k pevnosti a životnosti betonu po zatvrdnutí. Rozměšování je někdy důsledkem kavitačního působení materiálu v konstrukci.

Hlavním problémem u SCC je, že ve snaze dosáhnout vysoký stupeň tekutosti je viskozita a hustota cementové kaše nižší, než tomu je u konvenčních betonů. Chyba v sestavě směsi nebo při dávkování může způsobit, že určitá část malty ve směsi není schopna rovnoměrně obalit hrubé částičky kameniva v čerstvém betonu. Toto může způsobit, že zatvrdlý materiál je celkově ztuhlý a má vysokou hustotu, avšak má nerovnoměrně rozloženy komponenty, tj. vysokou koncentraci hrubých částic v nižších partiích a jejich nízkou koncentraci ve vyšších vrstvách. Na rozdíl od kavitace se tato závada neobjevuje viditelně na povrchu zatvrdlého betonu, nezpůsobuje zeslabení vrstvy na povrchu nebo pod pruty výztuže, nýbrž v celé struktuře.

Faktory snižující riziko segregace:

- ✓ plynulá křivka zrnitosti,
- ✓ zavedení vzduchu do směsi,
- ✓ zvýšený podíl jemných částic (zahrnuje cement a jiná jemná plniva),

- ✓ optimální poměr voda / cement a obsah cementového tmele,
- ✓ přidavek přísad (superplastifikátorů) snižujících množství kapalné fáze ve směsi.

Faktory zvyšující riziko segregace:

- ✓ přetržitá křivka zrnitosti (zejména, je-li maximální zrno kameniva ≥ 16 mm),
- ✓ nesprávný poměr mísení jednotlivých složek kameniva ve směsi,
- ✓ nesprávné množství cementového tmele, zejména je-li ve směsi nedostatek jemných podílů,
- ✓ vysoký vodní součinitel, který snižuje viskozitu cementového tmele; cementový tmel přestává být kohezní a umožňuje propadávání hrubších zrn,
- ✓ příliš nízký vodní součinitel – cementový tmel se přestává chovat jako tekutina a není schopný zajistit rovnoměrné rozmístění kameniva ve směsi,
- ✓ příliš vysoký obsah plniv s nevhodným tvarovým indexem – drcené kamenivo,
- ✓ velký rozdíl mezi objemovou hmotností hrubého kameniva a jemných podílů ve směsi,
- ✓ předávkování plastifikačních přísad.

Bleeding (krvácení betonu)

Jako bleeding označujeme stav, kdy cementová zrna sedimentují ve vodní suspenzi spolu s kamenivem a na povrchu čerstvé směsi se po určité době objeví vodní hladina relativně čisté vody. 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. Míru bleedingu lze snížit snížením vodního součinitele nebo remixováním (opakováním mísením po několikaminutové přestávce). Bleeding jako takový není žádoucím jevem, u čerstvých samozhutňujících betonů se někdy po určité době v klidu vrstvička vody vstřebává.

5.2 Vlastnosti zatvrdlých SCC

Výzkum trvanlivosti (životnosti) a mikrostruktury SCC a jejich srovnání s konvenčními vibrovanými betony o podobných pevnostech nebyl dosud ve větším měřítku prováděn.

Směsi SCC často obsahují velké množství jemných příměsí a obsah hrubých částic je mnohem nižší než u konvenčních vibrovaných betonových směsí. Uvážíme-li rozdíly v poměrech složení směsi a také vysoce tekutý a samozhutňující charakter SCC, bylo by nepřiměřené předpokládat, že SCC budou mít tytéž charakteristiky trvanlivosti a mikrostrukturu jako konvenční vibrované betony, i když hodnoty pevností budou podobné.

Možnosti, jak testovat a prognózovat trvanlivost SCC, mohou napomáhat např. zkoušky propustnosti (permeability) plynů, kapilární absorpce vody a difúze chloridů, což jsou důležité ukazatele trvanlivosti betonů. Srovnáním se stejnými zkouškami konvenčních referenčních betonů a SCC mohou být navrhovány směsi SCC s použitím optimálního množství a typu příměsí, jako např. fileru, elektrarenských popílků, jemně mleté strusky či vápence atd. Ně-

kteří dílí výsledky zkoušek ukazují, že SCC s mají významně nižší propustnost (permeabilitu) a kapilární absorpci ve srovnání s vibrovanými betony o stejné pevnosti [10].

5.3 Experimentální část – Návrh a zkoumání vlastností samozhutitelných betonů

Experimentální práce na vývoji SCC byly rozvrženy do několika etap. V úvodní etapě byly zkoumány reologické vlastnosti cementových malt modifikovaných superplastifikačními přísadami a různými typy jemnozrnných příměsí mikroplniv.

Zejména byly sledovány vlivy na tekutost a pohyblivost malt ihned po zamíchání a dále v delších časových intervalech a při různých teplotách namíchaných směsí. Na tyto práce navazovala etapa, ve které byl zkoumán vliv různých mikroplniv na objemovou stálost zatvrdlých malt. Cílem těchto prací bylo vytvořit jednoduchou a rychlou metodiku s vysokou vypovídací schopností, která by umožnila otestovat vhodnost míchání komponent systému cement – voda – příměs – přísada včetně vhodného poměru dávkování jednotlivých složek s ohledem na potřebné vlastnosti SCC. V dalších etapách byly již navrženy konkrétní receptury SCC, na kterých byly ověřovány jak vlastnosti čerstvých betonů, tak i rozsáhlý soubor vlastností zatvrdlých betonů.

5.3.1 Sledování reologických vlastností cementových malt pro SCC

Realizované zkoušky modifikovaných maltových směsí vhodných pro využití v SCC je možno rozdělit do dvou etap.

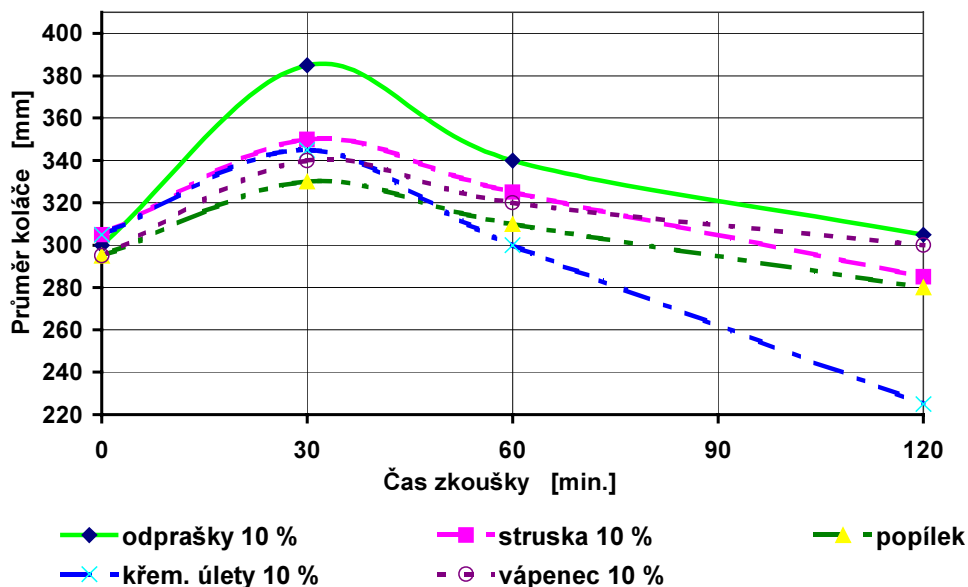
V rámci první etapy byla sledována zejména závislost pohyblivosti směsi na druhu a dávce mikroplniva. Porovnání bylo provedeno prostřednictvím změny množství záměsové vody potřebné k dosažení shodné pohyblivosti malt různého složení. Sledován byl rovněž vývoj pohyblivosti zkoušených maltových směsí v čase. Poprvé byla pohyblivost směsi stanovena ihned po zamíchání a další měření pohyblivosti malty byla provedena ve lhůtách 30, 60, 90 a 120 minut od přidání záměsové vody do směsi.

Ve druhé etapě zkoušek byla ověřována závislost pohyblivosti směsi na její teplotě a na relativní vlhkosti prostředí. Pohyblivost byla v tomto případě měřena při teplotách směsi 5, 15, 25 a 35° C a při relativních vlhkostech prostředí 50, 65, 80 a 95 %. Stanovení pohyblivosti bylo provedeno v 16 sériích pro různé kombinace uvedených hodnot teploty směsi a relativní vlhkosti prostředí. Stejně jako v první etapě byl sledován i vývoj pohyblivosti směsí v čase.

Provedený soubor měření prokázal, že k dosažení stejné pohyblivosti maltových směsí obsahujících shodné dávky jemných podílů plniva různého druhu a původu je třeba – při jinak totožném složení maltové směsi – rozdílných množství záměsové vody. V našem případě kolísal vodní součinitel nezbytný k dosažení stejné pohyblivosti malty v závislosti na druhu použitého mikroplniva v intervalu $w = (0,51 \text{ až } 0,67)$. Se zvyšujícím se obsahem jemných podílů stejného druhu a původu se hodnota vodního součinitele potřebného k dosažení shodné pohyblivosti malty snižuje. V rozsahu dávek mikroplniva 6 až 14 % z hmotnosti cementu činilo toto snížení 10 a 15 % hodnoty vodního součinitele. Zkoušky současně prokázaly, že nárůst pohyblivosti malty v době cca 30 min. od jejího namíchání je ovlivněn nejen typem použité superplastifikační přísady, ale i obsahem mikroplniva v maltové směsi. Dále byl zjištěn významný podíl typu jemných podílů na zpracovatelnost směsi i její chování v čase (viz obr. č. 8) Ověřován byl vliv 5 typů jemnozrnných příměsí. Konzistence byla měřena rozlitím kužele specifických rozměrů navržených pro takto modifikované malty.

Při zkouškách realizovaných ve druhé etapě byl zjištěn významný vliv teploty maltové směsi na počáteční pohyblivost malty i na změny její pohyblivosti v čase. Relativní vlhkostí prostředí není naopak pohyblivost cementové malty téměř vůbec ovlivněna.

Obr. č. 8 Změna pohyblivosti maltových směsí v čase - různé druhy mikroplniva



5.3.2 Sledování vlastností samozhutnitelných betonů

V první části bylo ověřováno chování čerstvých směsí (jejich reologických vlastností) upravenými zkušebními postupy. Cílem bylo navrhnout optimální složení betonů a na něm ověřit působení a vhodnost superplastifikačních přísad. Současně byly zkoumány i dopady na fyzikálně mechanické vlastnosti betonů, a to na pevnosti, případně na moduly pružnosti. V další části byl experiment rozšířen o zkoumání vlivu jemných podílů na objemové změny a trvanlivost betonů. Při těchto pracech byla navržena kompaktní metodika zkoušení vlastností čerstvých i zatvrdlých SCC betonů.

5.3.3 Souhrn dosažených výsledků a jejich hodnocení

Na sérii ověřovacích zkoušek za použití superplastifikačních přísad IV. generace na bázi polykarboxylátů od renomovaných výrobců SIKA (Švýcarsko) a CHRYSO (Francie) byly doladěny základní principy navrhování SCC směsí. Výzkum se v této fázi zabýval zejména vhodnou křivkou zrnitosti s obecnou platností pro všechny typy přírodních kameniv. Převzatá verze křivky zrnitosti doporučená laboratořemi firmy SIKA v Curychu byla upravena na možnosti tuzemských zdrojů kameniva, včetně návrhu algoritmu navrhování a výpočetního programu. Důraz byl kladen na využití přírodních kameniv těžných i drcených s běžným tvarovým indexem s tím, že důležitá oblast zrn do velikosti 0,25 mm byla upravována pomocí průmyslových odpadů. Získané výsledky potvrdily možnosti plného využití tuzemských zdrojů pro hromadnou praktickou výrobu SCC v ČR. Perspektivní je skutečnost, že navržené principy umožňují navrhovat betony s max. zrnem kameniva 8 až 16 mm z těžných i drcených kameniv. Všeobecně publikované obavy o nadměrném smršťování betonů nebyly potvrzeny. Vývoj pevností betonu v tlaku je podstatně příznivější než u běžných betonů, spíše vy-

vstává problém vyrobit kvalitní SCC s pevnostmi v tlaku do 25 MPa po 28 dnech normálního zrání. Rovněž omezené zkoušky trvanlivosti betonů (mrazuvzdornost, odolnosti povrchů proti působení CHRL a vodotěsnost) přinesly příznivé poznatky, které v žádném případě neomezují pole využití SCC v běžné praxi. Testování modulů pružnosti prokázalo, že SCC lze využívat i pro nadměrně zatěžované či předpínané konstrukce.

Bylo prokázáno, že lze využít i drcených hrubých kameniv s poměrně špatným tvarovým indexem okolo 20 %. Jako příměsí regulující obsah jemných podílů do 0,25 mm se osvědčily jak elektrárenský popílek vzniklý spalováním hnědého uhlí, tak i kamenný odprašek vzniklý drcením amfibolitu. U obou příměsí je potěšitelné to, že jsou prakticky odpadní surovinou, jejíž cena je velmi nízká (cca 20 Kč/t) a v podstatě nejsou hromadně využívány, takže současně se zlepšením kvalitativních parametrů betonu se řeší i ekologický problém. Potvrzuje se tím i možnost zavádět SCC v kterékoliv oblasti ČR, aniž by byla cena betonu zásadně ovlivňována dopravními náklady vhodných surovin, zejména mikroplniv a hrubých kameniv. Problematická zůstává otázka drobných kameniv frakce 0–4 mm, hlavně jejich znečištění odplavitelnými jílovými podíly.

Soustava běžných souvisejících českých a evropských norem navazujících na EN 206, které se týkají specifikace zkušebních postupů stanovení zpracovatelnosti čerstvého běžného vibrovaného betonu se ukazuje v současné době vzhledem k rychle se vyvíjejícím a v praxi stále více rozšiřujícím SCC jako nedostatečná a zastaralá. Historie vývoje zkušebních metod pro klíčové vlastnosti SCC je velmi krátká – cca 10 let a je neustále vyvíjena. Zkušební postupy se ovšem vyvíjejí nekoordinovaně na celém světě a způsob hodnocení vlastností čerstvých betonů je odlišný podle stupně poznání a rozvoje technologie SCC v dané zemi. Metodika praktických zkoušek pro specifikaci čerstvého SCC a spolehlivé a rychlé ověření vlastností SCC na staveništi schází i v České republice.

Chování čerstvých SCC se velmi liší od chování obyčejných vysoce ztekucených betonů. V současné době nejsou mezi evropskými nebo jinými národními standarty normy, které by byly zcela vhodné k provádění rychlé kontroly klíčových vlastností těchto betonů v čerstvém stavu na staveništi, aby se zjistilo, zda je směs samozhutňující. Kontrola jakosti běžně spočívá na různých nenormových, často jen částečně použitelných doplňkových zkouškách, a je často založena na osobní zkušenosti odborníků. Normování zkoušek klíčových vlastností SCC je tedy silně žádoucí. Je nutno zavést zkušební metody vhodné pro přijetí ve formě Evropských norem a vyvinout nové zkoušky, které zajistí přesnost, reprodukovatelnost a opakovatelnost těchto zkoušek a zabezpečit návody pro jejich interpretaci. Standardní zkoušky musí poskytnout rychlé a spolehlivé zhodnocení klíčových vlastností čerstvých SCC na staveništi. Výsledky musí být interpretovatelné s minimem zkušeností a musí být použitelné k identifikaci různých směsí SCC. Interval citlivosti těchto normových zkoušek musí být dosti široký, aby umožnil specifikaci různých SCC s parametry šitými pro specifické aplikace. Rozšíření samozhutňujících betonů do běžné betonářské praxe vyvolává požadavek na jednotný postup ověřování i vlastností zatvrdlých SCC.

Při rozsáhlých experimentálních zkouškách byly jako možné metody zkoušení reologických vlastností ověřovány následující dvě metody, které splňují většinu požadavků na rychlé, levné a relativně přesné posouzení zásadních vlastností.

Zkouška rozlívání: při této zkoušce používáme obrácený Abramsův kužel (viz obr. č. 9). Kužel je položen na hladkou desku o rozměrech min. 750 × 750 mm, naplní se SCC bez jakéhokoliv zhutňování a pak se stáhne. Sleduje se čas, za který se nám směs rozteče na koláč o průměru 500 mm, a dále měříme konečné rozlívání betonové směsi. Zkouška je velmi jednoduchá a určuje, zda je směs tekutá a zda odlučuje vodu. Částečně ukáže na případnou segregaci

kameniva. Lze ji použít na kterékoliv stavbě, je velmi rychlá a k určení základních vlastností čerstvého betonu vcelku postačující. Další měřenou charakteristikou je rychlost rozlití „koláče“ na ϕ 500 mm. Čas dává užitečnou informaci, jakou rychlostí se samozhutňující směs dostává na místo uložení v bedně. Toto měření však není spolehlivé, neboť je možné namíchat „rychlý“ beton, který se rozlije na 500 mm v čase do 1 sekundy, bohužel se nerozlije více než 500 mm a z hlediska maximálního rozlití „koláče“ tedy nevyhoví.

L-Box Test (viz obr. č. 10) je založen na průchodu betonové směsi skrz mříž simulující betonářskou výztuž. Po otevření posuvných dvířek směs volně vytéká ze svislého zásobníku skrz mříž do záchytného vodorovného zásobníku. Měříme čas, za který směs doteče do vzdálenosti 40 cm, resp. na konec L-Boxu. Dále měříme výšku hladiny na konci a těsně za posuvnými dvířky. Na rozdíl od předchozí zkoušky nám tento test již podává bližší představu o průchodu směsi skrz výztuž. Tato zkouška kromě možnosti vyhodnocení tekutosti čerstvé SCC umožňuje i posouzení blokování a segregace kameniva výztuží. Čerstvá směs musí dobře protéci mezi výztuží, aniž by změnila své složení a navíc nesmí dojít k zmíněnému blokování zrn kameniva o výztuž. Princip této zkoušky je jednoduchý – sloupec čerstvé směsi ve vertikální části „L“ je zadržován dvířky. Při otevření dvířek se začne měřit čas, který trvá přední „frontě“ betonu protékajícího mezi výztuží, než dosáhne určité vzdálenosti v horizontální části „L“. Měříme dva časové údaje. První, kdy je betonová směs ve dvou třetinách vodorovného koryta, tzv. čas T_{40} , a druhý tehdy, až se směs dostane na konec horizontální části L-boxu. Tato hodnota je označována jako čas T_{60} . Jakmile se směs přestane pohybovat, měří se výška sloupce betonové směsi na konci (H1), ve dvou třetinách koryta L-boxu a v ústí u výztuže (H2). Poměr $H1/H2$ je měřítkem blokování, hodnota 1,00 znamená, že směs má velice vysokou pohyblivost a nulové blokování. Současné informace neoznačují spolehlivě mezní hodnotu pro přijatelný stupeň blokování. Úspěšné praktické zkoušky byly docíleny s poměrem $H1/H2$ již od 0,7, doporučuje se však $H1/H2 > 0,8$. Je nutno poznamenat, že rozměry L-boxu nejsou jednotné, stejně jako není jednotné uspořádání a průměr osazené výztuže. Existují menší typy L-boxů, kde je celková délka horizontální části pouze 40 cm. Z toho vyplývá, že nejsou ani jednotné dosažené výsledky z jednotlivých výzkumných pracovišť a naměřené hodnoty jsou těžce porovnatelné. Po vyhodnocení řady experimentů, kdy byly vyměněny průměry osazené výztuže, jejich osové vzdálenosti a rozměry L-boxů bylo navrženo uspořádání, které se liší pro max. zrno 8 mm a 16 mm.



Obr. č. 9 Rozlití kužele



Obr. č. 10 pohled na L-box

5.4 Přínosy SCC betonů

Silně ztekucené samozhutňující betony mohou přinést racionalizační efekty spočívající zejména ve zrychlení betonáže, tj. v odstranění zdlouhavého zhutňovacího procesu, a dosažení rychlejšího ukládání směsi. Současně se zvyšuje kvalita betonu a mimo jiné lze docílit lepšího povrchu pohledových betonů.

Vedlejším, i když ne nepodstatným efektem, je možné využití jemnozrnných příměsí, které mají většinou charakter odpadů (popílek, jemně mletá vysokopecní struska, fillery z kameniv apod.). Celkově tato technologie povede do jisté míry k robotizaci betonářských prací a vyloučení negativního vlivu při působení lidského činitele (nedbale prováděné zhutňování na stavbě atd.).

Všeobecně publikované obavy o nadměrném smršťování betonů nebyly potvrzeny. Vývoj pevností betonu v tlaku je podstatně příznivější než u běžných betonů.

Náklady na výrobu a uložení jsou u SCC betonů mírně vyšší, ale shrneme-li jejich výhody

- snížení hlučnosti odstraněním vibrační techniky,
- méně konečných úprav povrchů betonů,
- možnost betonáže tenkostěnných konstrukcí,
- zlepšení zdravotních podmínek a bezpečnosti práce,
- minimalizace nákladů na vibrační zařízení,

rychlejší ukládání betonové směsi, snížení pracnosti, počtu pracovníků, dojdeme k závěru, že se nám tyto vyšší počáteční náklady „bohatě“ vrátí, proto vidím v těchto betonech budoucnost.

6 ZÁVĚREČNÉ SHRNU TÍ

Cílem této práce bylo shrnout současné poznatky o problematice zhutňování betonů. Úvodní spíše teoretická část je věnována dopadu hutnosti na vlastnosti zatvrdlých betonů a vůbec základním reologickým charakteristikám betonové směsi, jako je zhutnitelnost a zhutňovací rychlost, vztaheným k nejrozšířenějšímu způsobu zhutňování – vibraci. Definovány jsou i různé modely charakterizující proces zhutňování při působení vibrace na betonovou směs včetně modelu, který dopracoval autor. Tato část byla takto koncipována proto, aby nastínila možnosti současně využívaných zhutňovacích postupů. Na tuto převážně teoretickou část pak navazuje experimentální část, která je věnována intenzifikaci zhutňování. Jednou z možností pro získání kvalitativně lepších vlastností zatvrdlých betonů je využití klasické vibrace s vhodně zvolenou kombinací opakování vibrace a klidových intervalů v určitém časovém režimu (vibroaktivaci). Výsledkem experimentálních prací této etapy je vytvoření velmi účinného vibračního postupu využitelného hlavně ve stálých výrobních stavebních dílců. Dále byly experimentálně ověřeny možnosti kombinace vibroaktivace s tepelným urychlováním tvrdnutím betonů jako další možnost intenzifikace zhutňování betonů. Rovněž zde získaný soubor výsledků ukazuje široké možnosti jak ekonomických úspor, tak i možnosti jak zkvalitnit vyrábění betonové dílce. V poslední části experimentálních prací byla zkoumána možnost zcela nové technologie zhutňování betonů bez působení vnějších vlivů, která využívá pouze vlastností samotné betonové směsi, tzv. samozhutnitelné betony. Tato technologie stojí

v podstatě v protipólu proti dříve uvedeným možnostem. Ovšem získané kvalitativní vlastnosti betonů ukazují, že tato cesta je jednou z nejperspektivnějších a ve světě rychle se rozvíjející. Je potěšitelné, že tento trend byl v České republice včas zachycen a nyní je rychle rozvíjen. Výsledky uváděné v této práci nastiňují možnosti samozhutnitelných betonů jak pro oblast monolitických konstrukcí, tak i v prefabrikaci. Je ovšem nutné pokračovat ve výzkumných pracech, doplnit informace o trvanlivosti, objemových změnách a dotvarování a dopracovat jednotné zkušební postupy alespoň na evropské úrovni.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] ŘÍHA, J.: *Závěrečná zpráva DÚ – 04, HÚ základního výzkumu III – 2 – 3, E – 02*. Brno, VUT 1985, 109 s.
- [2] ŘÍHA, J.: *K otázce modelování procesu zhutňování BS*. Sborník Vědecké konference stavební fakulty SVŠT. Bratislava, 1988, s. 13–18.
- [3] WELSCHE, K.: *Baustoffe für tragende bauteile*. Teil 2 Beton und Maurwerk. Wiesbaden Bauverlag 1992.
- [4] JAMEL, A.: *Intersuchungen zum Fleissverhalten von zementmörtel und Frischveton*. Dissertation Bauhaus-Universität Weimar. 1997 p. 78–79.
- [5] AVRAM, C., VOINA, N., MIRSU, O.: *L'influen ce de la revibration sur les proprietés de la pate de ciment durcie et des bétons*. Rev. De Mat. de Const. No 619, 1967, s. 141–153.
- [6] KUCZYŃSKI, W. a kol.: *Technologia betonu, díl I, část 2*. Warszawa, ARKADY, 1972, 655 s.
- [7] STORK, J.: *Technológia betónu I a II* Bratislava, SAV 1954, 1123 s.
- [8] IOCHANSON, P. F.: *Povtornoje vibrovanie kak sredstvo uskorenija tverdenija betona při ego progreve. Isseled. Po Bet. I ŽB*. Riga, Izdat. Akad. Nauk Latvijskoj SSR, 1960, s. 91–98.
- [9] OZAWA, K., MAEKAWA, K., KUNISHIMA, M. OKAMURA, H.: *Development of high performance concrete based on the durability desing of concrete structures*. Proceedings of the 2nd East-Asia and Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-2), 1989, Vol. 1, pp. 445–450.
- [10] TAKADA, K.: *Self-compacting concrete produced by Japanese method with Dutch materials*. Sborník 12, Evropský kongres o transportbetonu, ERMCO, Lisabon 1998.

ABSTRACT

The problem of concrete mixtures compacting is a basic technological step for producing durable concrete of quality. Incorrectly selected and a little effective way of compacting has influence not only on strength values of concrete but also on its durability and esthetic appearance for instance in the case of soffit concrete. The intensification of compacting methods has influence not only on concrete quality but also on economy, for instance on saving of manpower, investments and saving of costs for repairs of badly compacted concrete.

The paper concerns the theory of compacting concrete mixtures and the possibility of elaborating mathematical models describing the compacting process. An extensive set of experimental works is concentrated on the verification of concrete mixture vibro-activation possibility i.e. repeated concrete vibration beginning with the start of cement hardening under normal temperature and under temperatures suitable for thermal acceleration of hardening (about 60°C) so-called thermovibro – activation respectively. Experimental tests have shown that these compacting methods can have a significantly positive influence on physico-mechanical properties of concrete. It was demonstrated that it is possible to increase the compression strength of concrete by 35 % without adapting the mixture composition.

The second part of experimental work describes and investigates the research of up to date technology of so-called self compacting concrete (SCC), which is able to compact only by its proper mass and by pull of gravity. The resulting qualitative properties show that this is the most perspective and even in the Czech Republic a quickly developing process.

The results presented in this paper confirm that even under conditions of the Czech Republic it is possible to propose and realize successfully from domestic raw materials self – compacting concrete with excellent properties. This concrete is in every respect equal and mostly even better than compacted concrete designed and realized in a classical way. In this paper partly the trends in design of SCC composition and partly even the proposal of methods for testing the properties of fresh concrete which basically differs from classical concrete are presented. Extensive experiments confirmed that inland raw materials are suitable for utilization in SCC and in addition as complementary components regulating the rheological properties even secondary raw materials can be used for instant power plant fly ashes, waste stone dust etc. Further it was confirmed that concerns about excessive shrinkage of very movable mixtures are not justified and that the properties of hardened concrete including durability are of high quality.