PŘÍMĚSI DŘÍVE A NYNÍ, ČÁST 1 ▮ CONCRETE ADDITIONS BEFORE AND AT PRESENT, PART 1

Alain Štěrba

Využívání příměsí a směsných cementů je v současné době stále ještě někdy ovlivňováno špatnými zkušenostmi z doby, kdy nebyly k dispozici velmi účinné superplastifikátory. Kromě zjednodušeného rozboru a historického poohlédnutí jsou v příspěvku vedle současných přínosů příměsí uvedeny i budoucí přínosy umožněné současným rozvojem nanotechnologií. V uvedeném rámci je hledáno i optimální rozdělení funkcí průmyslu cementu a průmyslu výrobců betonu. Součástí rozboru je i popis a hodnocení příměsí podle *k*-hodnoty. ▮ Utilizing additions and composite cements is still influenced by poor experience at times when very effective superplastifiers were not at disposal. This article presents not only a short view in history, but also simplified analysis, current and future benefits of current additions enabled by recent nanotechnologies development. Within this frame, we also seek optimal allocation of functions in the cement and concrete producers industries. Description and evaluation of additions according to *k*-value is part of the analysis.

Terminologická poznámka: Převážná část látek, které jsou recepturách betonu označovány jako příměsi, je používána i při výrobě cementu. Zde jsou tyto látky podle ČSN EN 197-1 zařazovány a označovány buď jako **„hlavní složka cementu“** nebo **„vedlejší složka cementu“** (když je jejich celkový podíl menší než 5 % hmotnosti součtu obou uvedených kategorií). Pro zjednodušení textu je v dalším používán obecně ne zcela korektní jednotný termín **„příměs“,** a to jak pro příměsi dávkované v betonárně, tak i pro sledované látky využívané pro výrobu cementu. Případně (při nutnosti odlišení od příměsí do betonu) bude pro všechny neslinkové hlavní i vedlejší složky cementu použit termín **„cementářská příměs“**.

Používání příměsí zdomácnělo hlavně v souvislosti se zaváděním samozhutnitelných betonů. Uvedené však neznamená, že není co řešit. V prvé řadě je třeba se **vyrovnat s nepříznivými zkušenostmi z doby, kdy nebyly k dispozici účinné plastifikační přísady** a příměsi byly využívány hlavně s cílem uspořit cement. S výjimkou některých popílků byl kladný přínos příměsí na pevnost betonu zpravidla znehodnocen zvýšenou **vodonáročností** a to se všemi jejími zápornými dopady, mino jiné i na smršťování, na ostatní objemové změny a na odolnost vůči většině vlivů prostředí, tedy i proti cyklickému zmrazování. Dříve, v době nedostatku účinných superplastifikátorů, se proto příměsi (nebo cementy s příměsmi) používaly v hubených betonech masivních konstrukcí (např. v jádrech přehradních těles) a dále tam, kde bylo možno použít intenzivní zhutňování, tedy hlavně při dřívějších technologiích výroby stavebních dílců, při výrobě betonářského zboží a při výrobě válcovaných a vibroválcovaných podkladních silničních směsí (např. kameniva stmeleného hydraulickým pojivem).

Dopad dřívějších špatných zkušeností se týká i cementářských příměsí (pucolánů, latentně hydraulických látek, vápencových mouček). Důvody, pro které byly dříve módně vyzdvihovány jednosložkové cementy CEM I již pominuly. Pro ekologické a ekonomické důvody a pro současné technické možnosti je třeba podíl jiných než portlandských cementů CEM I zvětšit [1, 2]. Podrobnější údaje budou uvedeny v kapitole „Účelné využívání směsných cementů“.

Nejnepříznivěji se nedůvěra k jiným cementům než k CEM I a CEM II/A-S projevuje v normativních ustanoveních (ČSN EN 206-1) o použitelnosti cementů pro výrobu předpjatého betonu. Této otázce bude proto věnována samostatná část příspěvku.

Tolik k využívání příměsí v minulosti a přítomnosti. Důležité jsou i budoucí možnosti. Nově vyráběné a vyvíjené plastifikační přísady (hlavně na bázi PC, PCE, polyakrylů) umožňují širší použití **příměsí se zrny řádově menšími, než jsou zrna běžných cementů.** Tyto příměsi mohou přispět ke zvýšení hutnosti kostry pevných zrn, a tím zefektivnit výrobu odolných vysokopevnostních a ultravysokopevnostních betonů. Zatím se s uvedeným cílem využívaly hlavně křemičité úlety, studijně i některé metakaoliny. V kapitole „Potenciální přínos mikronových příměsí“ bude ukázána možnost použití dalších ultrajemných příměsí, dokonce i těch zcela inertních.

Pro mnohofaktorovost problému a pro protikladnost jednotlivých vlivů bude v kapitole „Dvouoborový systém interpretace hlavních vlivů“ nastíněn i pokus o systémový přístup k technickému hodnocení přínosů příměsí v závislosti na obsahu pojiva (přesněji na zrnitosti všech pevných zrn, a tím i na jejich hutnosti). Vedle technických a provozních možností rozhodne nakonec výsledek technicko-ekomické optimalizace.

Cílem poslední kapitoly je přispět k rozhodnutí, zda má být příměs použita jako samostatná složka betonu, nebo zda (a v jaké míře) má být „příměs“ využita jako hlavní nebo vedlejší složka cementu (tím, že nebude použit portlandský cement CEM I).

PŘÍMĚSI DO BETONU, VLASTNOSTI A ČLENĚNÍ

Podle ČSN EN 206-1 je příměs „práškovitý materiál, který se přidává do betonu za účelem zlepšení určitých vlastností nebo k docílení speciálních vlastností betonu“. Pod pojmem vlastnosti betonu jsou zde míněny kromě vlastností ztvrdlého betonu (např. pevnost, nepropustnost, trvanlivost, objemové změny, barevnost) i vlastnosti čerstvého betonu (např. konzistence, čerpatelnost, rozměšování, odlučování vody).

Podle míry chemické inertnosti rozlišuje uvedená norma **ČSN EN 206-1:**

- příměsi druhu I, které jsou téměř inertní;
- příměsi druhu II, kterými jsou buď pucolány (vázající volné vápno) nebo latentně hydraulické příměsi, které ovlivňují příznivě především vlastnosti ztvrdlého betonu po delší době ošetřování (zpravidla po 28 dnech).

Podle **Teichmanna** [3] a jím citovaných zdrojů je uvedené označení přibližně charakterizováno chemickým složením uvedeným v tab. 1.

Latentně hydraulické příměsi člení **Pytlík** [4] do následujících tří skupin:

- s obsahem amorfního SiO_2 nad 47 %, rozpustné v kyselém i alkalickém prostředí (křemičité úlety, diatomity, opál);
- s obsahem 16 až 53 % CaO (popílky, struska a hlíny pálené do teploty 600 až 800 °C, obsahující amorfní metakaolinit);
- látky obsahující sopečné sklo, tedy pravé pucolány.

V [4] je uvedeno i přesnější rozčlenění hydraulických a pucolánových látek **dle Rankina**.

Tab.1 Třídění reaktivních příměsí (pojiv) [3]
Tab. 1 Classification of reactive additions

Označení příměsi	Poměr CaO/SiO_2
Hydraulické	>2
Latentně hydraulické	1 až 1,5
Pucolánové	< 0,5

Podle funkce (podle nahrazované složky betonu) se rozlišují příměsi nahrazující nebo doplňující drobné kamenivo a příměsi nahrazující určitý podíl cementu. V uvedeném druhém případě je jejich směs s cementem označována jako **pojivo**; proto je vedle termínů vodní součinitel a ekvivalentní vodní součinitel (viz část věnovaná *k*-hodnotě) používán pro hodnocení betonu i pojem vodopojivový součinitel (hmotnostní podíl účinného obsahu vody k hmotnosti pojiva).

Podle velikosti zrn lze příměsi rozdělovat do následujících čtyř kategorií:

- filery (korekční příměsi) s významným zastoupením zrn průměrů 0,04 až 0,25 mm, kterými je zlepšována zrnitost drobného kameniva;
- běžné pojivové příměsi (popílky, mleté strusky, inertní moučky), jejichž zrnitost odpovídá přibližně zrnitosti cementů;
- mikronové s převahou zrn o velikosti jednotek mikronů (některé metakaoliny);
- submikronové (křemičité úlety, některé metakaoliny), včetně příměsí se zrny v oblasti nanočástic.

Poslední dva druhy příměsí vyplňují mezery mezi zrny pojiva, a tím umožňují zvětšit hutnost cementové kaše. Tuto hutnost ovlivňuje i obsah vody. Proto se uvedené nejjemnější příměsi kladně uplatní jen při minimalizaci tloušťky vodního filmu obalujícího všechna jemná zrna. Podmínkou jejich kladného působení je proto buď spoluúčast velmi účinné plastifikační přísady, nebo použití mimořádně účinného zhutnění.

Směrné křivky zrnitosti uvedených příměsí jsou ilustrovány na obr. 1.

Podle tvaru zrn. Příměsi s nevhodným tvarem zrn se mohou projevit jako škodlivé i v případech, kdy mají vhodnou zrnitost a mohou pro své chemické nebo nukleační schopnosti přispět k hydrataci pojiva. Nevhodným tvarem zrn se nezvětšuje pouze měrný povrch. Jeho důsledkem je i zvětšení mezerovitosti, které – na rozdíl od zvětšení měrného povrchu – nelze významně omezit plastifikačními přísadami. Při dodržení požadované konzistence se pak kromě pevnosti zhoršují i další požadované vlastnosti betonu, hlavně odolnost proti vlivům prostředí.

Podle měrného povrchu, který teoreticky charakterizuje vliv velikosti a tvaru zrn.

Podle vodonáročnosti. Jí lze velikostní a tvarové vlastnosti příměsí vyjádřit praktičtěji a komplexněji než dříve uvedenými charakteristikami. Vodonáročnost samotné příměsi nebo směsi cementu a příměsi je v souhlasu se změnou Z3 ČSN EN 206-1 vodní součinitel kaše normální konzistence stanovený zkouškou používanou pro zkoušení tuhnutí cementu [5]. Tato charakteristika má velmi blízkou souvislost s těmi vlastnostmi čerstvého betonu, které nejvíce ovlivňují hlavní užitné vlastnosti ztvrdlého betonu. Modifikací uvedené zkoušky lze ověřovat i vliv plastifikační přísady, případně úhrnný vliv kombinace všech hlavních složek pojivové kaše (cementu, příměsi, přísad).

POUŽÍVANÉ A NOVÉ PŘÍMĚSI, JEJICH SPECIFICKÉ FUNKCE

V následujícím popisu budou uvedeny pouze hlavní charakteristiky jednotlivých příměsí. Vliv příměsí na vlastnosti betonu bude podrobněji popsán v později uvedené kapitole zaměřené na vliv příměsí na jednotlivé vlastnosti čerstvých a ztvrdlých betonů.

Popílky

Ve funkci pucolánové příměsi do betonu jsou v ČR nejčastěji využívány **křemičité popílky** dle ČSN EN 450-1 [6]. Podle jejího současného znění platí uvedená norma pro popílky z různých kotlů a hlavně z různých druhů uhlí. Na rozdíl od znění normy z února 1996 nejsou v novelizované normě diskriminovány vyhovující hnědouhelné popílky. Definici popílku (čl. 3.2) nevyhovují však popílky ze spaloven komunálního nebo průmyslového odpadu; proto popílky s vyšším podílem těchto popílků (čl. 4.2) uvedené normě nevyhovují.

V ČR převažují hnědouhelné popílky, podíl černouhelných popílků (z Dětmarovic) je jen 20 % [4]. Zrnitost popílků je na obr. 1 ilustrována jako oblast CP.

Přínosem popílků je především jejich pucolánová vlastnost, a tím i pokračující **růst pevnosti po 28 dnech tvrdnutí**. Dalším přínosem bývá jejich malá vodonáročnost, resp. jejich příznivý vliv na **vodonáročnost** směsi cementu a popílku [7, 8 a 9].

Hlavní nevýhodou popílků je jejich nepříznivý vliv na rychlost tvrdnutí. Také zde se příznivě uplatňují některé superplastifikátory nové generace [10], které urychlují tvrdnutí i jinak než jen redukcí obsahu vody (snížením vodního součinitele). Další nevýhodou používání popílku může být jejich nepříznivý vliv na variabilitu pevností betonu vlivem kolísání jejich vlastností [11]. Tento vliv lze omezit především volbou stálého a spolehlivého dodavatele; v některých případech může pomoci i specifikace kotle.

Velký rozsah využívání popílku v zahraničí dokumentují údaje v [12]: ročně se v SRN používá ve funkci příměsi do betonu 3 mil. t popílku. Při celkové roční spotřebě cementu 27,2 mil. t je v SRN hmotnostní podíl popílku k cementu 11 %; měrnému obsahu cementu 320 kg/m^3 odpovídá tedy měrná spotřeba popílku **35 kg/m^3**.

V zahraničí jsou používány i mleté a tříděné popílky, hlavně černouhelné. Tříděné popílky vynikají lepšími tvarovými vlastnostmi, a proto i menší vodonáročností. Publikovány [13] byly velmi kladné výsledky získané při zkouškách vysokohodnotných betonů s velmi jemnými černouhelnými tříděnými popílky **Microsit M10** a **M20** od firmy BauMineral GmbH (do ČR je dováží AVAS Export Import, s. r. o.). Křivka zrnitosti nejjemnější příměsi M10 (zrna pod 10 μm, velikost středního zrna 2 až 5 μm) se blíží křivce zrnitosti „mikronové“ příměsi MP na obr. 1. Uvedené popílky jsou samozřejmě dražší než běžné popílky. Proto připadají v úvahu jen při mimořádných nárocích. M10 může totiž poskytnout podobné výsledky jako křemičité úlety. Navíc vyniká výjimečným vztahem mezi vodonáročností (25 %, jako u nejméně vodonáročných cementů) a měrným povrchem (800 m^2/kg, směrně 2,5násobek hodnoty běžných cementů). Z uvedeného vyplývá hospodárnější spotřeba plastifikačních přísad a větší robustnost výroby betonů.

Podrobnější a souhrnné údaje o popílku jsou uvedeny ve slovenském překladu publikace D. Lutzeho a W. vom Berga „**Príručka popolček v betóne**“ [14].

Mleté granulované vysokopecní strusky

Granulovaná vysokopecní struska se uplatňuje především jako jedna z hlavních složek cementu. Pro některé specifické výhody (možnost měnit podíl strusky k portlandskému slinku v zá-

vislosti na požadovaných vlastnostech betonu a možnost použití samostatně jemně mletých popílků) se za příznivých podmínek může kladně technicky a ekonomicky uplatnit i použití strusky ve funkci příměsi do betonu. Pro použití mleté vysokopecní strusky platí **ČSN EN 15167–1** [15].

V Česku dodává velmi jemně mleté granulované vysokopecní strusky **SMŠ 350** (měrný povrch alespoň 350 m^2/kg) a **SMŠ 420** (měrný povrch alespoň 420 m^2/kg) s. r. o. Kotouč Štramberk. Tento výrobce dodává i „účinný hydraulický produkt **UHPŠ**“, který obsahuje jemně mletou vysokopecní granulovanou strusku spolu s křemičitým popílkem a dalšími složkami [16].

Křemičité úlety (silika, mikrosilika, nanosilika)

Tyto příměsi jsou využívány v souhlasu s ČSN EN [17] hlavně ve vysokohodnotných a ultravysokohodnotných betonech. Důležitým přínosem těchto nejúčinnějších pucolánů je **vázání volného vápna,** a tím omezení jeho nežádoucích vlivů, hlavně na odolnost betonu proti vlivům prostředí. Nejde jen o nepatrný obsah volného vápna obsaženého v suchém cementu. Jde o jeho významný podíl vznikající v důsledku hydratace cementu: hmotnostní podíl hydroxidu vápenatého je směrně **24 %** všech hydratačních produktů.

Dalším přínosem této jemně zrnité složky, u běžných druhů s měrným povrchem okolo **20 000 m^2/kg**, je její vliv na hutnost směsi pevných složek, a tím i na jakost pojivového tmelu obalujícího zrna kameniva. Důsledkem je významné zlepšení soudržnosti tmelu s kamenivem, a tím i zlepšení pevnosti v tahu. Výhodou jemnozrnnosti je i omezení odlučování vody. Proto je křemičitý úlet využíván i **ve stabilizačních přísadách**.

S cílem dosáhnout homogenní směs křemičitého úletu a cementu [18] je vhodné použít křemičitý úlet dodávaný ve formě **vodní suspenze** (zpravidla 50 % úletu a 50 % vody). K omezení hrudkovatění se používá i peletizace.

Potíže s homogenizací může eliminovat i použití zahraničních portlandských cementů s křemičitým úletem **CEM II/A-D**, případně obdobných speciálních cementů.

Metakaoliny

Podobně jako křemičitý úlet (viz předchozí odstavec) se pro svou jemnozrnnost (blízkost k „submikronové“ příměsi – viz obr. 1) mohou uplatnit i metakaoliny, hlavně v případech, kdy není nutno použít vysloveně pucolánovou přísadu.

Na rozdíl od mikrosiliky, kterou je nutno do Česka dovážet, je na našem území dostatek přírodních zdrojů kaolinu vhodného pro výrobu metakaolinu jako příměsi do vysokohodnotných betonů. Další výhodou metakaolinu proti černému křemičitému úletu je jeho **bílá barva,** a proto i použitelnost pro výrobu pohledových betonů. Z hlediska mikrostruktury se vyráběné metakaoliny uplatní tím, že jejich zrna jsou přibližně 10krát menší než zrna cementu. (Teoreticky připadá v úvahu i kombinace s podstatně jemnějším křemičitým úletem.)

V nedávné době byla metakaolinu věnována velká pozornost, a proto se mu věnuje i velké množství publikací. Zde budou uvedeny pouze některé výsledky z publikace [19], ve které je popsáno ověřování metakaolinu Mefisto K05, vyráběného v Českých lupkových závodech, s. r. o., v Novém Strašecí. V něm převažují zrna o velikosti **3 až 5 μm**. Ověřována byla náhrada cementu CEM I 52,5N 5, 10 a 15 % metakaolinu. Použití metakaolinu se ukázalo výhodné hlavně z hlediska pevnosti v **tahu za ohybu**. Při podílu metakaolinu **10 %** byla tato pevnost betonu o **56 %** větší než při použití samotného cementu.

Vápencové moučky

S růstem využívání samozhutnitelných betonů roste i využívání vápencových mouček. K dispozici je široký sortiment jemně mletých vápenců určených původně pro použití v jiných odvětvích, než je stavebnictví. V případě použití uvedených mouček v betonu nezáleží příliš na čistotě použitého vápence. Zvláště jemné vápence jsou dodávány pro použití ve fluidních kotlích. Mimořádně jemný je např. výrobek VZJM vápenky Vitoul, s. r. o., vyznačující se zbytkem na sítě 0,04 do 0,05 %.

Na rozdíl od inertních příměsí se vápencová příměs může uplatnit i **fyzikálně-chemicky**. Uplatní se afinita její karbonátové složky k produktům hydratace cementu. Proto zrna vápence mohou mít i **funkci nukleí**. Důsledkem je možné urychlení hydratačních pochodů, a tím i urychlení tvrdnutí betonu. Tato možnost je bohužel částečně negována protichůdným vlivem nevhodného tvaru větších zrn. Tato zrna mají nepříznivý vliv na vodonáročnost, a tím i na rychlost zpevňování.

Negativním důsledkem použití vápencové moučky může být **vznik výkvětů**. Jejich škodlivost je zpravidla jen dočasná. Po očištění povrchu zralého betonu (třeba i samovolně vlivem působení povětrnosti) je další jejich tvorba málo pravděpodobná.

Filery, inertní příměsi

Inertní příměsi jsou vhodné hlavně pro jejich nízké pořizovací náklady (včetně dopravy). Proto přichází v úvahu i použití kamenných odprachů. Na mineralogickém původu příliš nezáleží. Používají se např. následující moučky: čedičové, žulové, křemičité a břidličné. Příměsi používané pro doplnění nejjemnějších frakcí kameniva jsou označovány jako **filery**.

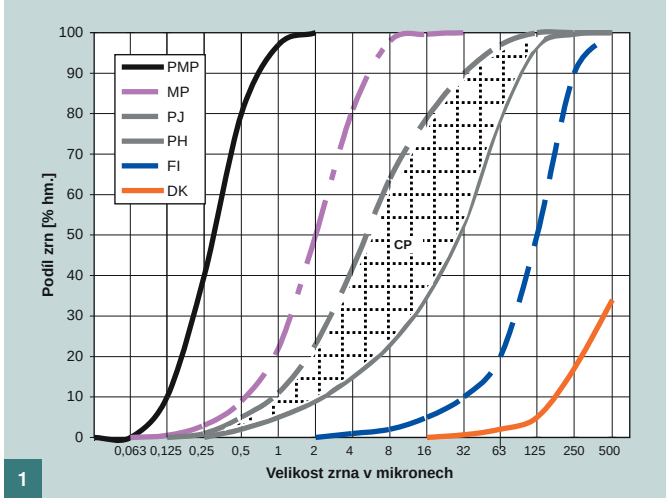
Obvyklou nevýhodou uvedených příměsí je zvýšení vodonáročnosti. Toto zvýšení je zpravidla únosné jen u hubených betonů s vyšším vodním součinitelem; přesněji tehdy, když příměs doplní nízkou dávku cementu tak, že se zlepší granulometrické složení všech pevných složek a tehdy, když celkové množství jemných zrn (směrně do 0,063 mm) nepřekročí určitou kritickou hodnotu (viz následující kapitola).

V později uvedených částech příspěvku věnovaných *k*-hodnotě a použití „submikronových“ příměsí bude ukázáno, že kladnými *k*-hodnotami lze ve výjimečných případech charakterizovat i zcela inertní příměsi. Záleží přitom nejenom na vlivu příměsí na hutnost betonu, ale i na druhu požadované vlastnosti betonu (kladně může být ovlivněna např. nepropustnost betonu).

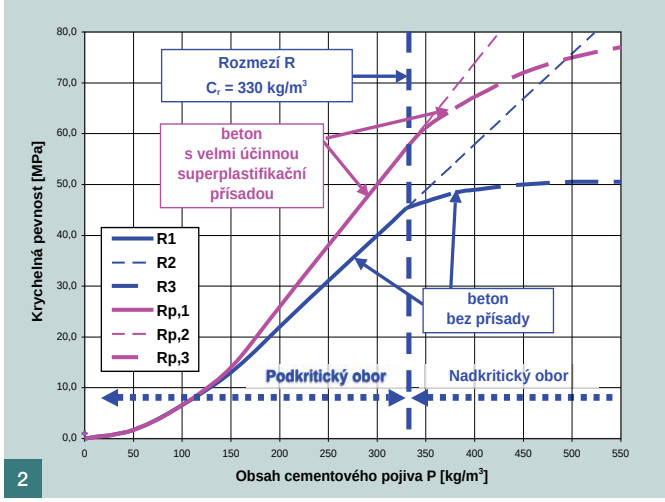
Ostatní příměsi

Existují i různé **speciální** příměsi. Jako příklad speciálních příměsí je publikován [20] kladný vliv zeolitu z Nižního Hrabovce, též v kombinaci s křemičitým úletem, případně se železným práškem. Zlepšuje se tak odolnost proti síranům, uhličitému roztoku a kyselině chlorovodíkové.

Mezi příměsi lze zařadit např. i jemnozrnné materiály, jejichž funkcí je nasytit se během míchání vodou a předávat tuto vodu cementovému pojivu v době, kdy je pro pokročilou hydrataci fyzikálně volné záměsové vody nedostatek a pro nepropustnost betonu a rozměry tělesa nelze efektivně využít ošetřování vodou zvenčí. Jsou to kulovité superabsorpční polymery **SAP**,



Obr. 1 Zrnitost vybraných příměsí a cementových pojiv; PMP podmikronové příměsi (např. křemičitý úlet); MP mikronová příměs; PJ velmi jemná příměs, horní mez oblasti cementových pojiv; PH hrubější příměs, dolní mez oblasti cementových pojiv; FI filer (příměs korigující hrubost písku); DK vhodné drobné kamenivo; CP oblast cementů a popílků ▮ Fig. 1 Particle size distribution of the chosen additions and cement-binders



Obr. 2 Schéma závislosti pevností betonů na obsahu cementu: pevnosti R betonu bez přísady a pevnosti Rp betonu s obsahem účinné superplastifikační přísady ▮ Fig. 2 Dependance of concrete strength on content of cement; strength R of concrete without admixture and strength Rp concrete with high-range superplasticizer

které mají v suchém stavu průměr 0,05 až 0,20 mm. Tyto příměsi byly v našem časopisu podrobně popsány Briatkou a Makýšem [21]. Jejich použití v betonech UHPC se věnuje článek [22] V. Mechtcherineho a jeho spolupracovníků, kteří prokázali i přínos SAP k **omezení autogenního smrštění**.

Mezi příměsi patří i **pigmenty** určené pro probarvování betonu. Podobně jako u jiných jemnozrnných příměsí je třeba při návrhu receptury a řešení technologie výroby zohlednit vliv jejich jemnosti a náchylnosti ke shlukování. S cílem zabezpečit homogenitu směsi a omezit nároky na parametry míchání jsou proto za specifikovaných podmínek používány i granulované pigmenty (granuláty) a tekuté pigmenty (suspenze, slurry). Požadavky na jakost pigmentů a na jejich kontrolu jsou dány normou ČSN EN 12878 [23].

Mezi příměsi jsou někdy zařazována i **vlákna**. Mechanicky působící vlákna (hlavně drátky a podobně působící delší vlákna) patří do výztuže betonu. U mikrovláken je to problematické; pro specifickou problematiku se tento příspěvek těmito vlákny nezabývá.

Podmínky pro používání příměsí

Vlastnosti některých z uvedených příměsí nejsou technicky normovány. Jejich vhodnost pro použití do betonu se obecně prokazuje deklarací v technické dokumentaci a příslušným **stavebně technickým osvědčením** (STO) ve smyslu platného nařízení vlády. Pro jejich použití jako příměsi druhu II musí být jejich vhodnost vždy prokázána průkazní zkouškou dle přílohy A ČSN EN 206-1.

CEMENTÁŘSKÉ PŘÍMĚSI

Tyto příměsi (neslinkové hlavní a vedlejší složky cementů) jsou dosti podrobně popsány v základní cementářské normě ČSN EN 197-1.

Již delší dobu roste snaha o jejich širší využívání, a tím o snížení podílu výroby a využívání portlandských cementů CEM I. Hlavním důvodem je kromě šetření energií celospolečenská potřeba snížit emise skleníkových plynů (hlavně CO_2) z výpalu portlandského slinku. Tento trend je prosazován i pomocí tzv. povolenek. Dalším závažným důvodem je růst cen paliv a energií, které se na ceně cementu podílejí téměř polovinou. Závažnost uvedeného trendu posiluje skutečnost, že se nejedná o nějakou českou specifičnost, naopak v uvedeném trendu spíše zaostáváme, z některých hledisek (např. nedostatek – resp. dopravní náročnost – jakostní strusky a černouhelných popílků, sezonní nedostatek vhodných hnědouhelných popílků) i pro objektivní důvody.

Poznámka k hodnocení pevnostních charakteristik portlandských a ostatních cementů: Základem dosavadní metodiky zkoušení pevnosti cementů je **konstantní vodní součinitel normové malty 0,5**. Jeho výhodou je nejen jednoduchost zkoušky, ale, jak bude ukázáno v dále uvedené části o systému hodnocení, i její výstižnost alespoň pro využití v nejběžnějších recepturách (při podkritickém obsahu pojiva – viz následující kapitolu). Vzhledem k dosavadním trendům (používání betonů vyšších pevnostních tříd, růst podílu směsných cementů, používání příměsí v betonárnách) je čím dál tím důležitější přihlížet i k výsledkům zkoušek **vodonáročnosti**, zvláště v případě betonů nejvyšších tříd.

DVOUOBOROVÁ INTERPRETACE HLAVNÍCH VLIVŮ

Tak, jak je to všeobecně obvyklé a jak to bude podrobněji ukázáno v následující části, má použití příměsí své výhody a nevýhody. S cílem usnadnit hledání technicko-ekonomicky optimálního řešení jsou v dalším uvedeny hlavní obecné rysy dále popsaného dvouoborového interpretačního systému, popsané se **záměrem specifikovat přesněji obory vhodnosti později popisovaných přínosů příměsi na jednotlivé vlastnosti čerstvého a ztvrdlého betonu**. Dále bude totiž ukázáno, že optimální podíl příměsi (např. popílku) z celkového obsahu pojiva závisí významně na celkovém obsahu pojiva. V zájmu sledované specifikace se bude tato kapitola proto zabývat i závislostmi, které zdánlivě s příměsmi nesouvisí.

Dále popsaný systém mohl být zpracován díky poznatkům získaným i při zkouškách a řešeních prováděných před rokem 2000 ve spolupráci a. s. Zapabeton a s. r. o. Loudin a spol. Hlavním cílem řešení bylo zabezpe-

čit co největší **efektivnost využití cementu**, tedy složky betonu, která je ekonomicky, energeticky a ekologicky nejnáročnější. Uvedené řešení bylo sice zaměřeno hlavně na popílky, konfrontace s jinými poznatky však ukazují na jeho širší platnost.

Optimální obsah cementového pojiva, vyjádření hlavních závislostí

Dále popsaný postup sleduje v prvé řadě obsah pojiva, tedy směsi cementu a příměsí (podíl jemných zrn kameniva – směrně pod 0,063 mm – se pro zjednodušení zanedbává). Obsah cementového pojiva bude dále (obr. 2 a další vyobrazení) v zájmu ilustrace vyjadřován běžně uváděným měrným hmotnostním obsahem **[kg/m^3]**; ve skutečnosti rozhoduje čistý objem pojiva [m^3/m^3].

Pro určité konstantní podmínky (zdroj kameniva, jeho D_{max}, nároky na konzistenci, čerpatelnost a provzdušnění) **se dosahuje nejvyšší efektivnosti využití cementu v oblasti kolem kritického obsahu pojiva**, např. obsahu pojiva **C_r** na obr. 2. Uvedený kritický obsah pojiva odpovídá přibližně obsahu pojiva, které stačí k dosažení dobré **hutnosti směsi kameniva a cementu**. Takto je specifikováno i **rozmezí** rozdělující **podkritický a nadkritický obor**. Vše uvedené platí jak pro použití samotného cementu, tak i pro směs cementu a příměsi.

Obr. 2 ilustruje závislost pevnosti v tlaku na obsahu cementu a rozdíly mezi použitím a nepoužitím účinné plastifikační přísady. **V podkritickém oboru se vodonáročnost pojiva významně neuplatňuje**. Použití plastifikační přísady je v převážné části tohoto oboru vhodné, není však zdaleka tak důležité jako v oboru C > Cr. **V nadkritickém oboru je vliv vodonáročnosti pojiva velmi významný**. Uvedené se netýká pouze pevnosti. Podobně se projevuje vliv přísady i na další důležité vlastnosti betonu, především na odolnost proti vlivům prostředí, a tím i na trvanlivosti. Vliv účinné plastifikační přísady na hodnotu rozmezí (hodnoty C_r) lze zpravidla zanedbat. Zanedbat nelze vliv plastifikační přísady na průběh vlastností v nadkritickém oboru, které se v případě pevnosti v tlaku projevuje výrazným zvětšením směrnice pevnostní křivky a jejím pomalejším poklesem. Při zvláště vhodné technologii (u velmi dobře zpracovatelných betonů, např. za použití dostatečné dávky novodobé dlouhodobě působící polyfunkční přísady) je směrnice za rozhraním téměř stejná jako směrnice v podkritickém oboru.

Uvedené **oddělení obou oborů koresponduje s obsahem [kg/m^3] vody** (s eventuální korekcí zahrnující obsah vzduchových pórů), který je třeba k dodržení požadované konzistence. **V prakticky využitelné části podkritického oboru je uvedený obsah přibližně konstantní**, tedy velmi málo závislý na obsahu pojiva. **V nadkritickém oboru obsah vody s obsahem pojiva roste**. Závislost není zcela lineární. V případě, kdy je pojivo tvořeno pouze cementem, roste za rozmezím obsah potřebné vody směrně o 0,12násobek přírůstku obsahu cementu proti hodnotě C_r, samozřejmě v závislosti na vodonáročnosti cementu. V případě použití příměsi je uvedený přírůstek závislý na vodonáročnosti příměsi. V případě směsi cementu a příměsí se pro odhad osvědčilo běžné směšovací pravidlo. Rozhodující význam má samozřejmě experiment.

Podobný vliv jako účinné plastifikační přísady má i intenzivní hutnění. V případě velmi intenzivního vibrolisování (např. u betonářských výrobků nebo při dřívějších technologiích výroby betonových dílců) nebo velmi intenzivního vibroválcování je přechod do nadkritického oboru velmi pozvolný. Podobně jako v případě účinných přísad rozhodují tloušťky vodního filmu na povrchu pevných složek betonu.

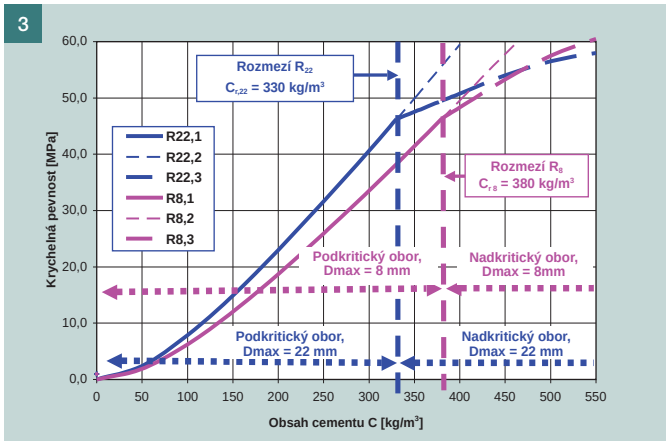
Využití dvouoborové interpretace pro vyjádření vlivu D_{max}

Vliv D_{max} kameniva na obsahu pojiva byl dříve hodnocen konstantním násobkem závislým na D_{max} (např. uváděna nepřímá závislost na páté odmocnině D_{max}). Při výrobě trezorových betonů v době neexistence novodobých plastifikačních přísad (PCE apod.) se však zjistilo, že při stejné dávce cementu a při stejné konzistenci dá beton s D_{max} = 8 mm větší pevnost než beton s D_{max} = 22 mm. Uvedená závislost byla zjištěna i v jiných souvislostech, později byla např. uvedena i v předběžné normě ČSN P 73 1309 [24].

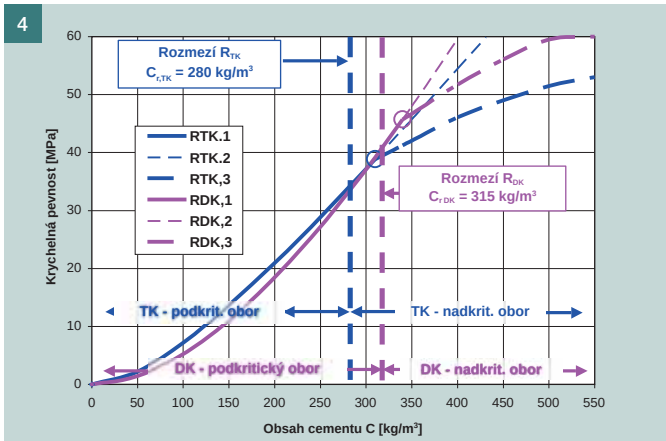
Ilustrace zhodnocení uvedených zkušeností je na obr. 3. Optimální obsahy cementu jsou zde znázorněny rozmezím $C_{r,22}$ = 330 kg/m^3 platným pro betony s D_{max} = 22 mm a rozmezím $C_{r,8}$ = 380 kg/m^3 platným pro betony s D_{max} = 8 mm.

Uvedená interpretace je použitelná i pro vyjádření zkušeností s ultravyso-

Obr. 3 Schéma závislosti pevnosti betonů na obsahu cementu a na D_{max} v podkritickém a nadkritickém oboru. Ilustrace závislosti rozmezí na D_{max} ▮ Fig. 3 Dependance of concrete strength on content of cement and D_{max} in below-critical and above-critical field; illustration of dependence of boundary line on D_{max}



Obr. 4 Ilustrace závislosti pevnosti betonů na druzích hrubého kameniva. Označení: TK pro hrubé těžené kamenivo; DK pro hrubé drcené kamenivo ▮ Fig. 4 Illustration of dependence of concrete strength on type of coarse aggregate, marked: TK for coarse gravel, DK for rough crushed coarse aggregate



kohodnotnými betony (UHPC), mimo jiné i s ultravysokopevnostním reaktivním betonem (RPC). U nich se osvědčilo i (resp. především) použití D_{max} kolem 0,5 mm. V některých případech [25] se u nich osvědčilo použití vícesložkových („ternárních“) cementů, za zmínku stojí i vhodné využití příměsí (nejen křemičitého úletu).

Využití dvouoborové interpretace pro hodnocení druhu hrubého kameniva

Uvedenou ilustrací (obr. 4) se vyjadřuje zkušenost, že při stejném nároku na konzistenci betonu závisí vhodnost druhu hrubého kameniva na obsahu pojiva. Při nízkém obsahu pojiva má zpravidla **beton s těženým hrubým kamenivem** větší pevnost než **beton s drceným hrubým kamenivem**. Důvodem je lepší zpracovatelnost betonu s těženým kamenivem. Při stejné konzistenci je těžené kamenivo méně náročné na obsah vody a vlivem nižšího vodopojivového součinitele se proto dosahuje vyšší pevnost pojivového tmelu, a tím i vyšší pevnost betonu. Při vysokém obsahu pojiva (v nadkritickém oboru) má beton s drceným hrubým kamenivem při stejné konzistenci a stejném obsahu pojiva zpravidla větší pevnost. Vedle uvedených vlivů je třeba samozřejmě brát v úvahu i další vlivy (podíl pevnosti kameniva k pevnosti pojivového tmelu, jakost kontaktních zón, hutnost směsi pevných zrn apod.).

Dvouoborová ilustrace uvedené zkušenosti je na obr. 4. Optimální obsahy pojiva jsou zde znázorněny rozmezím $C_{r,TK}$ = 280 kg/m^3, které platí pro betony s těženým hrubým kamenivem a rozmezím $C_{r,DK}$ = 315 kg/m^3 platným pro betony s drceným hrubým kamenivem.

Shrnutí specifičností „podkritického“ a nadkritického“ oboru

V prvé řadě jde o **vodonáročnost p**ojiva. Jak bylo uvedeno, **v podkritickém oboru se vodonáročnost pojiva zpravidla neuplatní**. Nevýhoda větší vodonáročnosti pojiva je prakticky eliminována kladným vlivem jemnějších zrn vodonáročnějších pojiv. Pro podobný způsob mletí pojiva se zpravidla znatelně neuplatní ani tvar zrn, zvláště při vodních součinitelích nad cca 0,55. V konečné části **nadkritického oboru** (v oblasti maximální pevnosti) má však někdy **vodonáročnost větší význam než normalizovaná pevnost cementu**, zvláště v případě malé účinnosti plastifikačních přísad. Některé cementy s velkou normalizovanou pevností (pevností po 28 d) a zvýšenou vodonáročností poskytují za jinak stejných podmínek menší extrémní pevnost než cementy se znatelně menší normalizovanou pevností a s běžnou vodonáročností. Při běžné závislosti mezi počáteční pevností (zpravidla po 2 dnech) a vodonáročností platí obdobný závěr i pro vliv počáteční pevnosti betonu: vysoká počáteční pevnost není spolehlivým ukazatelem budoucí vrcholné „konečné“ pevnosti betonu.

Použití příměsi v podkritickém oboru (např. popílku) je ve většině případů **výhodné,** někdy i nutné. Uvedené platí hlavně pro obsahy cementu znatelně menší než C_r, tedy v případech nízkých nároků na pevnost betonu nebo v případech, kdy pro provozní a jiné výhody používá betonárna jen cement vysoké pevnostní třídy. Bez příměsi, případně bez provzdušnění (viz část „*Poznámky k výše uvedené interpretaci*“) nelze pak plnit některé požadavky na jakost čerstvého betonu, např. i na jeho čerpatelnost a odlučování vody (zde v závislosti na vodním součiniteli). Pro nedostatečnou hutnost a důsledky odlučování vody nemá beton bez příměsi ani potřebnou nepropustnost. Při malém obsahu cementu se proto neprovzdušněné betony bez příměsi hodí zpravidla jen pro některé případy přepravy a ukládky betonu.

Použití příměsi v nadkritickém oboru je účelné jen za podmínek uvedených v závěru 1. části příspěvku.

Faktory ovlivňující obsah cementu na rozhraní C_r [kg/m^3], souhrn a zpřesnění

Jak je uvedeno výše, hodnota C_r nezávisí (resp. málo závisí) na **konzistenci** betonu.

Jak je ukázáno na obr. 4, je obsah C_r závislý na $\boldsymbol{D_{max}}$. Důvodem je větší hutnost směsi pevných složek při větším D_{max}. Z uvedeného důvodu je hodnota C_r částečně závislá i na dále uvedených faktorech ovlivňujích hutnost.

Nezanedbatelný vliv má **tvar zrn hrubého kameniva**. U hrubého drceného kameniva je hodnota C_r větší než v případě použití oblého těženého hrubého kameniva.

Hodnotu C_r ovlivňuje i relativní **podíl drobného kameniva**. U betonů se zvýšeným nárokem na obsah písku (např. u čerpaných, provzdušněných, nepropustných a pohledových) je proto hodnota C_r větší než u betonů, u kterých není nutné navýšení obsahu písku.

Při daných materiálových podmínkách se kritická hodnota C_r určí např. grafickým vyhodnocením výsledků zkoušek pevnosti podle cementového součinitele a stanovením meze platnosti některého ze známých vztahů. Uvedeným způsobem byly stanoveny hodnoty využité v softwarovém programu Unibet a ostatních autorem spoluřešených programů. Možné je i využití zkoušek hutnosti (třeba dle Proctora) a nalezení toho obsahu pojiva, jehož překročení má za následek snížení hutnosti směsi pevných zrn. K určení hodnoty C_r lze použít i obdobu zkoušky hutnosti zavlhlé směsi na zařízení Vebe podle Sychry [26, 27], který se jako jeden z prvních věnoval stanovení horní meze oboru s přibližně konstantním obsahem vody [kg/m^3]. Hodnota C_r odpovídá tomu obsahu pojiva, při kterém je dosažena největší hutnost a jehož překročení vede ke zvětšení obsahu vody.

Poznámky k uvedené dvouoborové interpretaci

V zájmu zaměření na nejvýznamnější závislosti byl dosavadní popis dosti zjednodušen. Proto jsou v dalším uvedeny některé zpřesňující poznámky.

Uvedené vztahy vycházejí ze základní podmínky, že způsob a jakost hutnění betonu odpovídá jeho konzistenci. Proto je úroveň hutnění charakterizována pouze charakteristikou konzistence. Za uvedené podmínky je závislost hodnoty rozmezí na konzistenci betonu zanedbatelná. Není přitom důležité, zda se zmenšení tloušťky uvedených filmů dosáhne intenzivním zhutněním nebo chemicko-fyzikálně za použití plastifikační přísady. Z uvedeného důvodu je vhodnější stanovovat (při nedostatku dostatečného počtu experimentálních podkladů odhadovat) rozmezí obsahem pojiva C_r.

V odborné literatuře jsou uvedeny i interpretace, u kterých je hranice mezi podkritickým a nadkritickým oborem závislá na vodním součiniteli. Tyto interpretace jsou výstižné jen u velmi jemnozrnných betonů. U betonu s většími zrny kameniva se uvedenou interpretací nezohlední skutečnost, že v podkritickém oboru s nedostatečným obsahem pojivových zrn se potřebná hutnost zpravidla dosahuje zvýšeným obsahem vody; obsah vo-

dy v podkritickém oboru proto téměř nezávisí na obsahu pojiva. Význam takových charakteristik, jako je vodní součinitel (resp. cementový součinitel, ekvivalentní vodní součinitel, vodopojivový součinitel), na pevnost betonu není uvedeným hodnocením samozřejmě zpochybněn; zde jde pouze o určení horní hranice platnosti obvykle používaných vztahů, např. jednoduchého lineárního Féret-Bolomeyova vztahu.

Nedostatečnou hutnost směsi pevných zrn v podkritickém oboru lze částečně eliminovat **zlepšením granulometrie kameniva**. Větší hutnost drobného kameniva lze např. dosáhnout i zvětšením podílu příměsi korigující hrubost písku (fileru – obr. 1). Vhodnější zrnitost drobného kameniva lze dosáhnou též méně obvyklým používáním dvou druhů písku, jemného a hrubého a změnami jejich vzájemného podílu v závislosti na obsahu pojiva: podíl jemného písku klesá s obsahem pojiva.

Funkci příměsí v **podkritickém oboru** může částečně nahradit **provzdušnění**. To má vedle příznivého vlivu na odolnost betonu proti cyklickému zmrazování i velmi příznivý vliv na některé požadované vlastnosti betonu s nízkým obsahem pojiva, především na odlučování vody. Požadovaná konzistence se dosahuje s menším obsahem vody. Navíc malé bublinky vzduchu (cca pod 0,3 mm) účinně brání nežádoucímu transportu vody uvnitř přepravovaného i zhutněného betonu. V podkritickém oboru je proto negativní vliv provzdušnění na pevnost betonu znatelně menší než v nadkritickém oboru. Podle Jambora [28] při obsahu cementu pod 200 kg/m^3 k poklesu pevnosti vlivem provzdušnění již nedochází, naopak dochází někdy i k mírnému zvýšení pevnosti proti neprovzdušněnému betonu. V podkritickém oboru je účelnost provzdušnění omezena jen potížemi pramenícími z nestability provzdušnění a zvýšenými nároky na kontrolní činnost.

V **nadkritickém oboru** je obecně provzdušnění nežádoucí. Je nutné jen v případech, když nelze zabezpečit odolnost betonu proti vlivům prostředí XF2 až XF4 jinými způsoby.

Z výše uvedeného je vidět, že popsané dvouoborové řešení je nutné hlavně v běžných případech, tedy při stálé zrnitostí drobného kameniva a u neprovzdušněných betonů. I při uvedené výhradě je však navržená interpretace účelná. Hlavním důvodem navržené interpretace je usnadnit rozlišování oborů vhodnosti, podmíněné vhodnosti a nevhodnosti příměsí ve vztahu k požadovaným vlastnostem betonu.

Minimalizace mezerovitosti je důležitá hlavně v nadkritickém oboru, tím i u samozhutnitelných a vysokopevnostních betonů. U nich mezerovitost velmi nepříznivě ovlivňuje i jiné vlastnosti betonu, než je pevnost. Některé technické důsledky velké mezerovitosti jsou uvedeny v publikaci [29], která je věnována i metodě navrhování samozhutnitelných betonů ICAR. Podle Koehlera a Fowlera způsobuje např. zvýšení objemu pojivové pasty z 34 na 40 % mimo jiné (např. snížení modulu pružnosti až o 7 %) i **dvojnásobné zvětšení smrštění**.

V nadkritickém oboru se negativně uplatňují **cementy s vysokým obsahem C_3A**. Jedním z důvodů je jejich vyšší vodonáročnost.

V nadkritickém oboru a při nízkém vodním součiniteli nemůže dojít k **úplné hydrataci pojiva**. Pro současný vliv fyzikálního vázání vody blíží se kritický vodní součinitel hodnotě 0,4, tedy hodnotě vyšší než 24 % udávané pro potencionálně úplnou hydrataci. Tato skutečnost je jednou z příčin, proč nadkritický obor končí poklesem pevnosti s růstem obsahu pojiva.

OBSAH PŘÍMĚSÍ V PODKRITICKÉM OBORU

Vhodný obsah příměsí u neprovzdušněných betonů je ilustrován na obr. 5 (podobně i na obr. 6 určeném pro ilustraci dávkování příměsi v nadkritickém oboru). V ilustrovaném případě je **v celém podkritickém oboru dodržen přibližně konstantní čistý objem pojiva** (směsi cementu a příměsí). Protože objemová hmotnost popílku je přibližně o 15 % menší než objemová hmotnost cementu, hmotnostní obsah pojiva [kg/m^3] v podkritickém oboru mírně roste. V nadkritickém oboru je zobrazen nulový obsah příměsi.

Zobrazený způsob dávkování platí hlavně pro popílky, případně jiné příměsi, jejichž pořizovací náklady (včetně dopravy) jsou významně nižší než u cementu. Schéma dávkování dle obr. 5 (bez příměsi v nadkritickém oboru) je u těchto málo aktivních příměsí účelné hlavně při použití cementů třídy 32,5 obsahujících i cementářské příměsi. (Schéma dávkování na obr. 5 odpovídá přibližně použití cementu CEM II/A, tím, ve shodě s ČSN EN 206-1, *k*-hodnotě 0,2). Důvody pro použití a dávkování příměsi v nadkritickém oboru jsou uvedeny v následující kapitole.

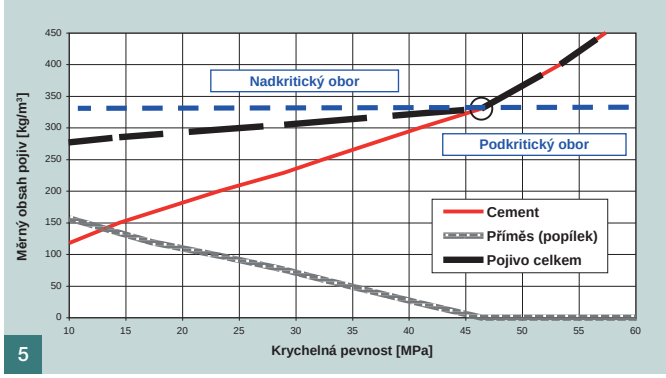
OBSAH PŘÍMĚSÍ V NADKRITICKÉM OBORU

V nadkritickém oboru je použití příměsí vhodné nebo nutné hlavně v dále uvedených případech a u následujících příměsí. Další podmínkou použití příměsí v nadkritickém oboru je zpravidla, jak již bylo vícekráte uvedeno, současné použití účinné plastifikační přísady.

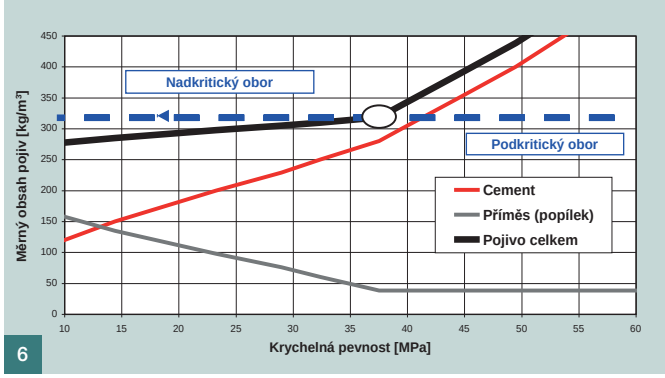
Schéma na obr. 6 odpovídá použití jakostního **popílku** (případně mleté strusky) a použití cementu s malým podílem cementářských příměsí (CEM I nebo CEM II/A). V nadkritickém oboru je obsah příměsi buď konstantní (jako na obr. 6) nebo klesající. Záleží i na vodonáročnosti obou složek. Zobrazené dávkování platí pro případy, kdy je vodonáročnost příměsi menší než vodonáročnost cementu. V zobrazovaném případě se až na výjimky požadovaná pevnost dosahuje v nadkritické oblasti při větším obsahu pojivových složek než při použití samotného cementu.

Použití vysoce aktivních **pucolánových** příměsí (křemičitého úletu, metakaolinu, upravených popílků, vybraných přírodních pucolánů) ovlivňuje příznivě hlavně **chemismus** hydratace a to tím, že tyto příměsi vážou volné vápno, a tím zvětšují odolnost proti vlivům prostředí. Většina z nich umožňuje též výrobu vysokopevnostních a ultravysokopevnostních betonů. K růstu pevnosti i dalších vlastností přispívají uvedené příměsi i jejich vysokou jemnozrnností, a tím zvětšenou hutností směsi pevných složek, zvláště na styku pojivového tmelu s kamenivem. Dávkování příměsí je závislé na vlastnostech příměsí a cementu. V případě běžného křemičitého úletu by měl být podíl přísady alespoň 5 % obsahu cementu. Z uvedeného důvodu může být dávkování i jiné, než je na obr. 6, a to s konstantním podílem příměsi k cementu (např. 8 %), tedy s rostoucím absolutním obsahem sledované příměsi.

Dávkování **vhodných filerů** (tedy s převahou zrn 0,04 až 0,25 mm a s malou vodonáročností) má naopak s rostoucím obsahem cementu v nadkritickém oboru klesat. *Poznámka k dřívějšímu normativnímu omezování obsahu „moučkových“ zrn: V současnosti, po zkušenostech s použitím účinných přísad v samozhutnitelných betonech, mohou být ta-*



Obr. 5 Schéma dávkování příměsi (popílku) pouze v podkritickém oboru ▮ Fig. 5 Scheme of addition (fly ash) dosage only in below-critical field



Obr. 6 Dávkování příměsi v podkritickém i v nadkritickém oboru ▮ Fig. 5 Addition dosage in below-critical and above-critical field

Literatura:

[1] *Števula M.*: Beton – křižovatka požadavků, Beton TKS 5/2007
[2] *Gemrich J.*: Cement – enviromentální stavební materiál současnosti i budoucnosti, Beton TKS 2/2008
[3] *Teichman T.*: Einfluss der Granulometrie und des Wassergehaltes auf die Festigkeit und Gefügedichtigkeit von Zementstein; 2008, Kassel University Press GmbH, Kassel
[4] *Pytlík P.*: Technologie betonu, VUT v Brně, Nakladatelství VUTIUM, 2000
[5] ČSN EN 196-3 Metody zkoušení cementu – Část 3: Stanovení dob tuhnutí a objemové stálosti, 2005
[6] ČSN EN 450–1 Popílek do betonu-Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody, 2005
[7] *Puntke W.*: Wasseranspruch von feinen Kornhaufwerken (Vodonáročnost jemnozrnných frakcí), Beton 5/2002
[8] Sborník: Tätigkeitsberichte des VDZ 2005–2007, Kap. III (Zprávy o činnosti VDZ 2005–2007, kap. III), 2007
[9] Sborník: Tätigkeitsberichte des VDZ 2005–2007, Kap. V (Zprávy o činnosti VDZ 2005–2007, kap. V), 2007
[10] *Ortega P.*: Přísady do betonu pro udržitelné betonové konstrukce, 8. konf. Technologie betonu, 2009
[11] *Šperger J., Mazurová M.*: Snadnohutnitelné betony SHB do speciálních geotechnických konstrukcí podzemních stěn, 8. konf. Technologie betonu 2009
[12] *Bollmann K.*: Betonfahrbahndecken – Waschbetonbauweise und Massnahmen zur Vermeidung von Schäden durch AKR (Betonové vozovky – vymývání betonu a opatření k vyloučení škod vlivem AKR), CEMEX HOZ-Seminar, 2007
[13] *Maibaum Ch., Hüttl R.*: Neuer Zusatzstoff für Hochleistungsbetone (Nová příměs pro vysokohodnotné betony), Beton 3/2004
[14] *Lutze D., vom Berg W.*: Príručka popolček v betóne, Betón Rácio, s. r. o., Trnava, 2008
[15] ČSN EN 15167–1 Mletá granulovaná vysokopecní struska pro použití do betonu, malty a injektážní malty – Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody
[16] Firemní literatura s. r. o. Kotouč Štramberk, 2007
[17] ČSN EN 13263–1 Křemičitý úlet do betonu – Část 1: Definice, požadavky a kritéria shody
[18] Ministerstvo dopravy: Vysokohodnotné betony pro mosty PK, Technické podmínky, 2010, Pontex, s. r. o.
[19] *Pavlíková M., Brtník T.*: Využití metakaolinu jako alternativního silikátového pojiva do betonu, 8. konf. Technologie betonu, 2009
[20] *Janotka I., Špaček A.*: Cementové suspenze zvýšené chemické odolnosti, Beton TKS 04/2002
[21] *Briatka P., Makýš P.*: Ošetrovanie čerstvého betónu – 2. Superabsorpčné polyméry, Beton TKS 02/2010
[22] *Mechtcherine V., Dudziak L., Arndt-Eike Brüdern, Hempel S., Schröfl Ch.*: Superabsorbierende Polymere (SAP): Innovative multifunktionale Betonzusatzmittel (Superabsorpční polymery SAP: nové multifunkční přísady do betonu), Beton 03/2011
[23] ČSN EN 12878 Pigmenty pro vybarvování stavebních materiálů na bázi cementu a/nebo vápna – Specifikace a zkušební postupy
[24] ČSN P 7313098 Použití koncepce souboru betonů při řízení výroby a kontrole shody betonu, 2002
[25] *Durand B.*: Processus itératif d´élaboration d´un mélange de béton de poudre réactive dle plus 200 Mpa a l´aide de ciments ternaires (Postup výroby reaktivní práškové betonové směsi s pevností nad 200 MPa za použití ternárních cementů), Huitiéme éd.
[26] *Bajza A., Rouseková I.*: Technológia betónu, JAGA Bratislava, 2006
[27] *Meluzin O.*: Technologie betonu, Brno, ES VUT, 1976
[28] *Jambor V.*: Prevzdušnený betón. Informativní publikace s. r. o. Stavmating, 1996
[29] *Hela R., Hubertová M.*: Novinky v navrhování a aplikacích SCC přednesené na 5. sympoziu SCC v Gentu, 7. konf. Technologie betonu, 2008

to omezení zrušena, resp. omezena na pouhé varování před použitím v nevhodných podmínkách.

V případě hodnocení betonu ve **stáří nad 28 dní** (ve stáří 90, resp. 60 dní) mohou být v nadkritickém oboru kromě pucolánových příměsí vhodné i latentně hydraulické příměsi.

Prakticky nezastupitelnou funkci v nadkritickém oboru mají příměsi u **samozhutnitelných betonů**. Alternativou vysokého obsahu příměsí je pouze použití stabilizační přísady.

Vše, co se týká uvedeného použití příměsí v nadkritickém oboru, týká se i použitého **druhu cementu**, konkrétně všech jiných cementů, než jsou portlandské cementy CEM I. Vlivem nových účinných plastifikačních přísad dochází i zde k významnému posunu ve směru širšího využívání cementů s významným obsahem neslinkových hlavních a vedlejších složek.

Pro větší objem pojivového tmelu se v nadkritickém oboru významněji a negativně uplatňují objemové změny a rozdíly v přetvárných vlastnostech jednotlivých složek betonu. Jimi vznikající napětí mohou způsobit i vnitřní trhlinky, a tím i zhoršování vlastností betonu s růstem obsahu pojiva. Proto se např. u ultravysokopevnostních betonů kladně uplatňuje i použití **vláken**.

Kladný vliv „mikronových“ příměsí (obr. 1) bude uveden ve 2. části příspěvku.

V pokračování článku v následujících číslech časopisu bude pozornost zaměřena na vliv příměsí na vlastnosti čerstvých a ztvrdlých betonů, na hospodárnost jejich použití, na potenciální přínos „mikronových“ příměsí, na hodnocení příměsí použitím *k*-hodnoty, na účelné využívání směsných cementů, na použití směsných cementů pro předpjatý beton a používání příměsí v betonárnách a v cementárnách.

Ing. Alain Štěrba
e-mail: a.sterba@volny.cz