

PŘÍMĚSI DŘÍVE A NYNÍ, ČÁST 2 ■ CONCRETE ADDITIONS BEFORE AND AT PRESENT, PART 2

Alain Štěrba

Pokračování článku o současných a možných budoucích přínosech využívání příměsí. První část článku zahrnující i zjednodušený rozbor příměsí a historické poohlédnutí byla uveřejněna v Beton TKS 6/2011. ■ In the previous issue of Beton TKS (6/2011) we published first part of an article on utilizing additives and their possible future benefits. The article included also a simplified analysis of the additives and historical view on additives. Today we continue with part 2 of the topic.

VLIV PŘÍMĚSÍ NA VLASTNOSTI ČERSTVÝCH A ZTVRDLÝCH BETONŮ A NA HOSPODÁRNOST JEJICH POUŽITÍ

Díky slovenskému vydání příručky o popílku [14] mají čeští a slovenští betonáři k dispozici velmi podrobné údaje o vlastnostech betonů s příměsí popílku a o betonech s cementy obsahujícími popílek. Z tohoto důvodu budou v dalším uváděny jen některé doplňující údaje, případně závěry z uvedené publikace [14].

Ekonomická výhodnost příměsí

Základní výhodou použití příměsí je jejich ekonomická výhodnost. Uvedené platí hlavně (někdy výhradně) pro **popílký** do betonu. V případě blízkosti zdroje od betonárny přijde jednotkový objem popílku (objemová hmotnost popílku kolem 2 200 kg/m³) někdy laciněji než stejný objem drobného kameniva (objemová hmotnost kolem 2 630 kg/m³). V některých případech, zvláště v případě používání příliš hrubého písku, lze proto příměsí **nahrazovat nejen podíl cementu, ale i podíl kameniva**. V zájmu trvalé ekonomické prospěšnosti je ovšem třeba sledovat i normami vyžadovanou jakost. Uvedené se týká i její stejnoměrnosti. **Kolísání jakosti popílku** a jím zvýšená variabilita jakosti betonu může ohrozit důvěryhodnost výrobce betonu, a tím negovat očekávané výhody použití příměsí. Proto je v některých případech účelné nespolehat jen na dodržování normové kontroly shody. Zvýšení stejnoměrnosti rozhodující vlastností betonu lze zajistit i doplňkovými ustanoveními v hospodářské smlouvě, např. specifikací používaných kotlů a zpřísněním některých požadavků (ČSN EN 450-1, část 5).

Uvedená priorita ekonomie platí pouze za předpokladu důkladného **prověření důsledků použití příměsí na všechny požadované vlastnosti** vyráběných betonů (nejenom na pevnost). Existuje však i obrácené hledisko: požadavky na některé betony nelze bez použití příměsí vůbec splnit, případně lze je plnit bez použití příměsí jen za mimořádně velkých nákladů. Proto budou v dalším uvedeny kromě běžných výhod a nevýhod i technické přínosy některých příměsí na vybrané vlastnosti betonu.

Výroba čerstvého betonu (skladování, dávkování, míchání)

Nevýhodou příměsí jsou nároky na další zásobní a provozní síla, resp. na zvětšení počtu dávkovaných složek. Zpravidla je však použití jedné soustavy sil pro jediný cement a další soustavy pro vybranou příměs výhodnější než používání dvou rozličných cementů. Tím je použití příměsí zpravidla výhodné.

Nevýhodou jemnozrnných příměsí jsou vyšší nároky na míchání (prodloužení doby míchání, případně specifické nároky

na pořadí dávkovaných složek). U nejběžnějších příměsí, jejichž křivka zrnitosti je v oblasti cementových pojiv (na obr. 1 je tato oblast označena CP), se tato nevýhoda prakticky neuplatní.

Konzistence a její časový průběh

Použití příměsí **v podkritickém oboru** má příznivý vliv na hutnost směsi pevných složek. Tím se zpravidla (např. při použití popílků) zlepšuje většina reologických vlastností čerstvého betonu. Z toho vyplývá i kladný vliv na konzistenci při požadovaném ekvivalentním vodním součiniteli. Když je vodonáročnost příměsí blízká nebo menší než vodonáročnost cementu, platí uvedené i v případě, když není efektivně využívána plastifikační přísada.

Negativně působí nevhodný tvar některých příměsí. Nežádoucí vliv mohou mít i některé velmi jemné, a proto nadměrně vodonáročné příměsí tehdy, když jejich vysoká vodonáročnost není (nebo pro ekonomické či jiné důvody nemůže být) kompenzována účinnou plastifikační přísadou.

V nadkritickém oboru může být použití příměsí nevhodné. Uvedené platí hlavně v dále uvedených třech případech (a zvláště při současném působení více negativních vlivů):

- vodonáročnost ztlačně překračuje vodonáročnost použitého cementu;
- index účinnosti je ztlačně menší než 100 %;
- nejsou efektivně využívány plastifikační přísady.

Důsledkem uvedených příčin je zvýšení obsahu vody, a tím nutnost neekonomického zvýšení obsahu pojiva, případně i nesplnitelnost některého ze specifikovaných požadavků (např. na konzistenci).

V nadkritické oblasti je nutné náhradu podílu cementu vodonáročnou příměsí kompenzovat použitím superplastifikační přísady. Při běžném požadavku na delší dobu zpracovatelnosti betonu a při použití novodobých superplastifikátorů může být účelné i neúměrně vysoké dávkování. Podle [30] se, např. při náhradě 40 kg/m³ cementu CEM I 42,5 R příměsí 40 kg/m³ metakaolinu, osvědčilo zvýšení podílu superplastifikátoru z 1 na 2 % hmotnosti cementu (8,8 kg/m³). Při původní dávce 1 % došlo k výraznému zhoršení konzistence již 6 min po zamíchání betonu.

Provzdušnění

Při jemnějším pojivu je třeba zpravidla zvyšovat dávkování provzdušňovací přísady [30]. Vzhledem k nízkým dávkám a cenám běžných provzdušňovacích přísad nemá zvětšení její dávky nepřipustný ekonomický dopad. Nepříznivěji se může uplatnit vliv nestejneměrnosti příměsí na stabilitu provzdušnění, proto i na vícenásledky spojené s potřebným zvýšením nároků na vstupní a výrobní kontrolu. Proto, s cílem umožnit regulaci všech jemných pevných složek betonu, může být účelné zvětšit počet jemných pevných složek. K umožnění regulace obsahu zrn v oblasti kolem 0,04 až 0,25 mm může k tomu přispět i použití alespoň dvou písků, hrubozrnného a jemnozrnného. V případech, kdy je k dispozici jen hrubý písek, může se kladně uplatnit použití fileru (obr. 1).

Obsah vzduchových pórů

Všeobecně platí, že při větším podílu jemných zrn je třeba zvětšovat dávkování provzdušňovací přísady.

Pro zajímavost jsou zde připojeny údaje o vlivu jemných vláken. V [31] je dokumentován vliv použití drátků na nárůst obsahu vzduchu v neprovzdušněném betonu. Přidáním drátků došlo k nárůstu obsahu vzduchu v čerstvém betonu: po zamíchání až o 150 %, po 45 min dokonce až o 250 %, v obou případech téměř nezávisle na použité plastifikační přísadě a s malou závislostí na délce použitých drátků. O tom, že uvedený vliv nemusí být způsoben jen odlišnou konzistencí a vlivem drátků na jakost zhutnění, svědčí obsahy vzduchu drátkobetonu změřené po 75 min. I při významně zhoršené zpracovatelnosti byly menší než obsahy zjištěné ihned po zamíchání. Ovlivnění obsahu vzduchu vlákny je zaznamenáno v příspěvku [32] popisujícím zkoušky velmi jemnozrného betonu obsahujícího kromě cementopopílkového pojiva i 2,25 % obj. PVA vláken délky 12 mm. O možném sledovaném vlivu fyzikálních vlastností vláken svědčí [33] následující obsahy vzduchu: beton bez vláken 2 %; beton s vlákny PP druhu A 11 %; beton s jinými vlákny PP kolem 6,5 %; beton s konopnými vlákny 5 %.

Odlučování vody

Protože odlučování vody **závisí hlavně na vodopojivovém součiniteli**, lze je omezit těž (nejenom stabilizační přísadou nebo provzdušněním) použitím příměsí, zpravidla popílkem. Uvedené platí hlavně (někdy výhradně) pro dříve uvedený podkritický obor, ve kterém nemá přidávání příměsí podstatný vliv na vztah konzistence a obsahu vody.

Odlučování vody v samotné pojivové kaši (ve směsi bez kameniva) je zanedbatelné tehdy, když vodopojivový součinitel je menší než jeho kritická hodnota; tou je přibližně **1,5násobek** experimentálně zjištěné vodonáročnosti pojiva. K vysokému a lineárnímu růstu odlučování vody dochází směrně od **1,75násobku** uvedené vodonáročnosti.

Podle nepublikovaných prací prováděných Pavlem Riegreem z a. s. ZAPAbeton lze vodonáročnost směsného cementového pojiva odhadnout ze zjištěných hodnot vodonáročností **cementu a příměsí** a to za použití **směšovacího pravidla**. U běžných pojiv s vodonáročností kolem 0,28 je uvedený kritický vodopojivový součinitel pojivové kaše kolem 0,42; prudký nárůst začíná od hodnoty kolem 0,49. První z uvedených hodnot je mírně menší než maximální vodní součinitel 0,44 povolený pro injektáž kabelů pro dodatečné předpínání [34].

U malt a betonů je třeba vzít v úvahu vliv adsorpce vody na zrnech drobného a hrubého kameniva. U běžných betonů (D_{\max} kolem 20 mm) je směrná kritická hodnota kolem 0,55. Tato hodnota odpovídá přibližně mezním vodopojivovým součinitelům, které stanovují některé normy pro vodonepropustné betony. Při zvýšených nárocích (pro vodní tlaky nad 10 m) je to např. podle rakouské normy [35] vodopojivový součinitel 0,5.

Poznámka k omezení odlučování příměsí s vyšší vodonáročností: K omezení odlučování nelze samozřejmě použít příměsí nebo jiná jemná zrna, která nepříznivě ovlivňují jiné důležité vlastnosti betonu. Např. velmi nepříznivý vliv na smrštění mají nabývavé hlinité částice (illit, chlorit). Zvýšená vodonáročnost má často (hlavně v nadkritickém oboru) nepříznivý vliv na zvýšený obsah vody, a tím na pevnost.

Rozměšování čerstvého betonu, hlavně nestejněměrnost obsahu hrubého kameniva

K tomuto rozměšování může dojít při příliš velkém obsahu pojiva, tedy v nadkritickém oboru. V uvedeném oboru je zpravidla použití příměsí s k -hodnotou pod 1 vhodné jen v některých případech, např. s cílem zlepšit odolnost proti vlivu prostředí nebo proti struskoalkalické reakci.

Čerpatelnost, betonování pod vodou

Použití příměsí je pro čerpatelnost betonu přínosné hlavně (případně jenom) v podkritickém oboru. Uvedené platí ve stejné nebo vyšší míře i pro betonování pod vodou a pro jiné způsoby přepravy a manipulace. Pro betonování pod vodou a z hlediska použití popílku je v článku 5.3.5 Změny 3 ČSN EN 206-1 [36] požadováno, aby:

- obsah cementu nebo součet obsahu cementu a popílku při $D_{\max} = 22$ mm byly alespoň 360 kg/m^3 (z tohoto znění normy vyplývá k -hodnota 1);
- ekvivalentní vodní součinitel byl nejvýše 0,6, pro popílek se v tomto případě použije zvětšená k -hodnota 0,7.

Pohledové betony

Dodržení obsahu pojiva alespoň na úrovni rozmezí C₁ je potřebné i u pohledových betonů. Realizace za použití příměsí přichází ovšem v úvahu jen tehdy, když toto použití neohroží požadavky na jejich barvu, světlost a stejnoměrnost všech požadovaných vlastností. Pro plnění uvedených požadavků může být výhodnější zabezpečení potřebného obsahu jemných částic jen cementem (případně nejnižší pevnostní třídy a s obsahem cementářské příměsí), někdy i za cenu výroby betonu s nadbytečnou pevností.

Vývin hydratačního tepla

Jedním z hlavních důvodů, proč byly příměsí využívány i v době nedostatku účinných plastifikačních příměsí, byla potřeba omezit množství hydratačního tepla a rychlosti jeho vývinu. Zde šlo hlavně o masivní konstrukce, o negativní vliv nestejněměrnosti ohřevu na jím vyvolaná teplotní napětí a o takto iniciované trhliny.

Novodobé přísady umožňují dosažení požadované pevnosti a dalších vlastností betonu při ještě nižším obsahu cementu. V zájmu požadované zpracovatelnosti a stejnoměrnosti nelze však snižovat obsah pojiva. Ze sledovaného hlediska je proto použití laciných příměsí ještě výhodnější.

Pevnost

Vliv příměsí na „konečnou“ pevnost bude podrobněji uveden v kapitole o k -hodnotě. Rozdílnost vlivu jednotlivých příměsí byla uvedena v dříve uvedeném hodnocení jednotlivých příměsí.

Ve vztahu k minulosti a budoucnosti zasluhuje pozornost vliv příměsí na **rychlost tvrdnutí** betonu. Při kombinaci s běžnými cementy se dosud uplatňují příměsí hlavně u těch betonů, jejichž receptura byla určena požadovanou pevností ve stáří 28 dní a více (s případnou kontrolou shody po 56 nebo 90 dnech). Na rychlost zpevnování má většina příměsí negativní vliv. Tento vliv byl dříve únosný jen u masivních betonů, případně u velmi intenzivně zhutňovaných betonů. Při použití novodobých účinných plastifikačních přísad může být použití příměsí únosné i při nemalých nárocích na rychlost tvrdnutí.

Pro dokumentaci uvedeného tvrzení svědčí mimo jiné i vývoj a ověřovací zkoušky prováděné cementáři s cílem plnit úkoly dané ekologickou a ekonomickou potřebou, tedy omezit podíl výroby portlandského smlínku. Podle sdělení v [37] zavedl Cemex výrobu vysokopecního síranovzdorného cementu CEM III/A 52,5 N-HS/NA obsahujícího **52 % mleté granulované vysokopecní strusky** (viz též dále uvedené odstavce věnované síranovzdornosti a dalším vlivům prostředí). Kromě velmi kladných výsledků zkoušek samotného cementu jsou pro jeho použití důležité hlavně vý-

sledky zkoušek na betonech. Po 12 h bylo dosaženo 25 % (16 MPa) 28denní pevnosti (63 MPa), **po 1 dnu pak 41 %** (26 MPa). Částečnou nevýhodou uvedeného cementu je jeho vyšší vodonáročnost 33,2 % vyplývající z vysokého měrného povrchu 581 m²/kg. O menší současné významnosti vodonáročnosti však svědčí skutečnost, že uvedená velmi vysoká rychlost tvrdnutí byla dosažena při úsporném dávkování (0,4 % hm.) přísady na bázi PCE.

Podobně vynikají i nové cementy jiných výrobců cementu (např. Buzzi Unicem-skupina Dyckerhoff, HeidelbergCement, Lafarge Cement, Schwenk Zement KG), které prokazují vhodnost cementů s cementárskými příměsmi. Otázka, zda použít obdobné cementy nebo kombinovat cement s příměsí v betonárně, bude zmíněna v samostatné, dále uvedené, kapitole.

Smrštění, trhliny

Hlavními složkami smrštění jsou **autogenní smrštění** (vlivem menšího objemu produktů hydratace než je součet objemů zhydratovaných složek, tedy pojiva a vody) a **smrštění vlivem vysychání** nezhydratované vody. Na povrchu betonu probíhá i **karbonatační smršťování**, které zvětšuje smrštění vysycháním hlavně při relativní vlhkosti vzduchu kolem 50 %.

U betonů s běžnými vodními součiniteli klesá autogenní smrštění s růstem vodního součinitele. Celkové smrštění se však příliš nemění: pokles autogenní složky se kompenzuje růstem složky vyvolané vysycháním betonu. Když má příměs vodonáročnost přibližně stejnou jako cement (vhodné popílky mají vodonáročnost dokonce menší), dojde snížením obsahu cementu ke snížení autogenního smrštění. **V podkritickém oboru** se použitím příměsí obsah vody nezmění, a proto nedojde zpravidla k růstu smrštění vlivem vysychání. V uvedeném oboru se proto vhodnými příměsmi smrštění nezmění.

Tento předpoklad je potvrzen provedenými zkouškami. V případě popílku jsou to např. zkoušky popsání v [38]; po dvaceti měsících bylo smrštění betonů s popílkem přibližně o 20 % menší než u referenčních betonů bez popílku. Podle [39] bylo dokonce zjištěno **zmenšení** o 30 %, zde ve srovnání betonů se stejnými ekvivalentními vodními součiniteli 0,4, 0,5 a 0,6.

V nadkritickém oboru a při dodržení požadované konzistence dochází vlivem příměsí k růstu obsahu vody, a tím i k **růstu celkového smrštění**. Tento nepříznivý vliv lze tlumit účinnými plastifikačními přísadami. Např. u samozhutnitelných betonů s vysokým obsahem pojiva je pak smrštění přibližně srovnatelné se smrštěním konvenčních betonů [40]. Podobné hodnocení smrštění a dotvarování je uvedeno ve [41].

V současnosti lze omezit smrštění přísadami **SRA** (Shrinkage-Reducing Admixtures) a příměsmi. Collepardi popisuje [42] kromě jiných možností i úspěšné realizace, při kterých byla použita kombinace přísady SRA a **příměsí mrtvě páleného vápna** (průmyslové betonové podlahy, pohledový beton bez dilatačních spár, opravy poškozených betonových konstrukcí).

Příměsí s pucolánovým účinkem (zvláště křemičité úlety) zvětšují podíl autogenního smrštění, a je proto třeba počítat s jejich nežádoucím vlivem na **růst smrštění** (výjimky jsou jen u některých popílků).

Malý vliv příměsí **křemičitého úletu** při obsahu cementu 450 kg/m³ a při podílu mikrosiliky 7 % je dokumentován v publikaci bývalé firmy Woermann [43]. Zde jsou uvedeny i výsledky Mannse a Neuberta, které prokazují, že u vyso-

kopevnostního betonu B85 s mikrosilikou je smrštění menší než u obyčejného betonu B45. Důvodem je pravděpodobně neúplná hydratace betonu s velmi nízkým vodním součinitelem a malý obsah vody ve vysokohodnotném betonu. Dále je v publikaci dokumentována následující významná rozdílnost vlivu ošetřování: malý vliv ošetřování na smrštění betonu bez křemičitého úletu a významný vliv ošetřování (uložení ve vodě) na beton s 10 % křemičitého úletu.

Obecně je třeba vzít v úvahu, že zjištěné malé rozdíly vlastností betonu nelze obecně přeceňovat. Platí to i pro následující hodnocení příměsí. Důkladný výzkum [44] vlivu **vápencové moučky** na vlastnosti betonů s třemi různými cementy CEM I 32,5 R s měrnými povrchy pod 283 m²/kg např. ukazuje, že vlivy této moučky jsou až na výjimky menší, než jsou vlivy rozdílnosti těchto tří zdánlivě podobných cementů.

Vliv filerových složek na smrštění a vznik trhlin popsal Manns a Bayer [45]. Zde je popsán experimentální výzkum s cílem zjistit uvedený vliv všech zrn pod 0,25 mm, tedy jak zrn v písku, tak i zrn případných filerových příměsí. Na podkladě této práce bylo zjištěno, že sledovaný **nepříznivý vliv mají jen zrna pod 0,04 mm**. Betonové směsi s malým podílem zrn do 0,04 mm daly dobré výsledky. Provedený výzkum přispěl k revizi těch dřívějších ustanovení DIN 1045-2, která významně omezovala podíl zrn do 0,25 mm.

V rámci uvedeného výzkumu bylo též zjištěno, že **vznik a rozšiřování trhlin** není závislé jen na velikosti smrštění. **Záleží i na časovém gradientu smršťování**. U betonu, u kterého probíhalo smršťování pomaleji, byly počet trhlinek a jejich šířka významně menší než u betonu s maximální rychlostí 0,9 mm/(m.h). Při pomalejším průběhu smršťování se pravděpodobně příznivě uplatní relaxace (reciprokový jev k dotvarování betonu).

Přetvárnost, modul pružnosti, dotvarování

Podle příručky [14] jsou vlivy **popílku** na modul pružnosti hodnoceny jako neutrální, případně i jako pozitivní, zvláště z hlediska hodnocení při větším stáří betonu. Vliv na dotvarování je hodnocen pozitivně, jako příčina je uvedena menší tloušťka stykové zóny mezi kamenivem a cementovým kamenem. Podobné hodnocení je v publikaci [46]. Zde je jako důvod uvedena dodatečná hydratace popílku, a tím i další zpevnění (uvedené platí samozřejmě jen pro betony, které byly dobře ošetřovány). V publikaci [46] je uveden i příznivý vliv popílku na dotvarování: pokles na 60 %.

V příspěvku Hely a Křížové [47] jsou uvedeny i příklady, kde použití příměsí působilo na modul pružnosti negativně. V případě popílku byl negativní výsledek zjištěn tehdy, když byl porovnáván jemnozrnný beton bez popílku s betonem, u kterého byl obsah popílku odvozen pomocí k -hodnoty = 1. Negativní vliv příměsí vysokopecní **strusky** byl větší (u statických modulů snížení o 30 %) a nejde plně zdůvodnit tak, jako u popílku.

Podle příručky [43] je vliv příměsí **křemičitého úletu** na modul pružnosti kontroverzní. Je zde uvedeno i pozitivní zjištění Walravena a Hana: přírůstek modulu pružnosti 1 až 3 GPa. V každém případě jde zde o významně menší vlivy než je vliv kameniva.

Vliv příměsí **metakaolinu** je popsán v příspěvku Klečky, Cirkleho a Konvalinky [48]. Proti referenčnímu betonu s nulovým obsahem metakaolinu se dobře projevila receptura s obsahem cementu (CEM I 42,5 Mokrý) 440 kg/m³, metakaolinu (a. s. Keramost) 40 kg/m³ a s vysokým obsahem (8,8 kg/m³) superplastifikační přísady Stachement 2090. Modul pružnosti

po 28 d se zvětšil o 14 %; významná je i získaná vysoká absolutní hodnota 44 GPa, dosahovaná zpravidla jen při větším stáří než 28 d. Podobné hodnocení je i v příspěvku Bílka, Juřinová a Cikrleho [49].

V některých případech, např. u betonových potěrů a obdobných betonových desek, může být účelné použití betonu s malým modulem pružnosti a s velkým dotvarováním. Důvodem je účelnost **relaxace tahových napětí**, a tím zmenšení nebezpečí vzniku trhlin, resp. omezení jejich šířky. Je možné, že takto přispívá i příměs mrtvě páleného vápna (viz dříve uvedená část věnovaná smršťení a údajům v [42]); hlavní funkcí této příměsi zůstává však pravděpodobně rozpínání.

Propustnost (permeabilita)

Propustnost betonu je závislá především na vlastnostech pojivového (cementopojivového) kamene a na vlastnostech kontaktní zóny mezi pojivovým kamenem a kamenivem, tím i na zrnitosti kameniva a na velikosti D_{max} .

Nepropustnost **pojivového kamene** je závislá na **vodopojivovém součiniteli**. Uvedená skutečnost je normativně vyjádřena pouze v rakouské betonářské normě [35]; jako mezní hodnoty jsou stanoveny vodopojivové součinitelé 0,5 pro vodní tlaky nad 10 m a 0,6 pro tlaky nižší. V základní evropské betonářské normě EN 206-1 a v navazujících normách a publikacích (např. [50] a [51]) se nepropustnost hodnotí podle **ekvivalentního vodního součinitele**, a tím i podle k -hodnoty použité příměsi. Nevhodnost tohoto postupu vyplývá ze skutečnosti, že k -hodnota je normativně určena především pro hodnocení pevnosti. Použitím této k -hodnoty se např. podhodnocuje vliv obsahu popílku, případně (při velmi malých vodních součinitelích – viz dále) i nadhodnocuje vliv křemičitého úletu. Uvedenou malou výstižnost ekvivalentního vodního součinitele lze řešit v rámci EN 206-1 využitím ekvivalentní koncepce posouzení vlastností betonu umožněnou článkem 5.2.5.3 a informativní přílohou E „Návod na použití ekvivalentní koncepce posouzení vlastností betonu“.

Nevhodnost použití jediné k -hodnoty (jak pro hodnocení pevnosti, tak i pro hodnocení ostatních požadovaných vlastností betonu) je nově prokázána i Gluthem [52]. Z jeho zkoušek vzduchopropustnosti betonu s více cementy vyplývá, že při dosti běžném ekvivalentním vodním součiniteli 0,45 je přínos běžných příměsí (popílek, křemičitý úlet) velmi významný. Naopak při ekvivalentním vodním součiniteli 0,25 byl prokázán převažující negativní vliv uvedených příměsí. Při použití portlandského cementu se kladně uplatnila jen příměs popílku. U samotných cementů a při vodním součiniteli 0,25 dal nejlepší výsledky vysokopecní cement. Z uvedeného lze částečně usuzovat na správnost předpokladu, že použití příměsí je vhodné hlavně v podkritickém oboru (tím zpravidla i při vyšším vodním součiniteli) a že v nadkritickém oboru může nevhodně volená příměs propustnost zvětšit.

Všeobecně platí, že jakost **ošetřování a doba hydratace** ovlivňuje nepropustnost výrazněji než pevnost. Uvedené platí zvláště pro betony s příměsmi, které mají nepříznivý vliv na rychlost hydratace. Jejich kladné ovlivnění nepropustnosti se proto projevuje plně až v období ukončované hydratace, tedy po jakostním ošetřování (vlhčení) a v pozdějším stáří. V zájmu účelného využití sledovaných příměsí je proto třeba provádět zkoušky propustnosti po době tvrdnutí odpovídající skutečným poměrům, zpravidla tedy později než po 28 dnech (po 56 nebo 90 dnech).

Vlastnosti **kontaktní zóny** ovlivňují příměsi svým vlivem na smršťování pojivového kamene, a tím i možnými mikrotrh-

Tab. 2 Vliv doby vlhkého ošetřování na hloubku karbonatace betonu [53] ■ Fig 2 Influence of wet curing interval on carbon depth

Doby vlhkého ošetřování při 20 °C		
1 den	3 dny	7 dní
Hloubky karbonatace betonu uloženého 1 rok při 20 °C a 65 % RV		
7,3 mm – 205 %	5,26 mm – 148 %	3,56 mm – 100 %

linami na jeho styku s kamenivem, viz proto dříve uvedené údaje o smršťování pojivového kamene a tam i údaje o možnostech jeho omezení. Navíc lze destrukce na styku s většími zrny kameniva omezit i použitím **filerové příměsi** obsahující převážně zrna od 0,04 do 0,25 mm. Tato zrna se stanou součástí pevného tmelu, který se méně smršťuje než tmel (kámen) ze samotného pojiva. Tato snaha o vysvětlení je však méně podstatná než dobré zkušenosti získané s uvedenou příměsí (např. dodávané jako slévarenský nebo jiný speciální písek) tehdy, když byl k dispozici jen písek s nedostatkem zrn pod 0,25 mm.

Nepropustnost betonů lze významně zlepšit kombinací účinné plastifikační přísady a „mikronové“ příměsi. Hlavním přínosem je zvětšení hutnosti kontaktní zóny pojivového tmelu na styku s kamenivem.

Odolnost proti karbonataci, ochrana výztuže, vliv prostředí XC

Betony považujeme za dostatečně odolné proti karbonataci, když v celém období provozní životnosti konstrukce neklesne v místě ocelové výztuže hodnota pH betonu pod 11,5 až 12, při kterých je zajištěna pasivační schopnost ochranné vrstvy betonu.

Protože jde o průnik CO_2 , je v prvé řadě rychlost karbonatace ovlivněna výše probíranou propustností betonu. Závislost odolnosti proti karbonataci na nepropustnosti je např. prokázána popisem dosavadních poznatků a novými zkouškami v publikaci [53]. Zde je mimo jiné uveden graf (Bild 5.2) prokazující lineární závislosti hloubky karbonatace na druhé odmocnině sledovaného parametru vzduchopropustnosti. Uvedené platí hlavně v podkritickém oboru, např. při vhodném dávkování příměsí (dle obr. 5 a 6).

Publikace Hilsdorfa, Schönlina a Tauscherové [53] je cená i tím, že uvádí výsledky zkoušek, které významně dokumentují vliv doby vlhkého ošetřování. Průměrné průniky [mm] CO_2 zkoušených devatenácti sérií betonu s různými cementy a různými příměsmi jsou uvedeny v tab. 2.

Na rozdíl od propustnosti nelze však hodnotit odolnost proti vlivu vzdušného oxidu uhličitého (karbonataci) podle vodopojivového součinitele (jako při výše uvedeném hodnocení vodopropustnosti betonů dle rakouské normy [35]). V knize Matouška a Drochytky [54], která se v rámci atmosférické koroze podrobně zabývá i odolností proti karbonataci, je výstižně uvedeno, že portlandský cement, obsahující větší množství CaO, bude při stejném dávkování a zhutnění poskytovat betony lépe odolné karbonataci, než betony z cementů s nižším obsahem CaO, např. z cementů obsahujících vysokopecní strusku, popílek apod.

Nepříznivý vliv některých příměsí na hloubku karbonatace vyplývá i z rozborů výsledků zkoušek uvedených v [53]. Např. u **vysokopecního cementu** s obsahem 65 % strusky byla zjištěna po jednom roce uložení betonů (20 °C, 65 % RV) přibližně 2,1násobná hloubka karbonatace, než byl průměr u betonů z portlandských cementů, z dřívějších železo-

portlandských cementů a betonů s malým obsahem popílku (směrně do 30 % všeho pojiva).

Podle článku Müllera a Severinsové [55] byly ve stáří 180 a 365 d u směsných cementů hloubky karbonatace větší než při použití portlandského cementu CEM I. U cementu CEM III/A byla hloubka větší o 40 %, u portlandských popílkových cementů byly hloubky uvnitř uvedeného intervalu. Z těchto a dalších zkoušek autoři článku odvodili, že betony obsahující **popílek** vyhovují požadavkům na odolnost proti vlivům prostředí XC, když jejich hmotnostní obsah je menší než **25 %** obsahu cementu, tedy menší než je limitní obsah 33 % stanovený článkem 5.2.5.2.2 EN 206-1.

Ve srovnání s betonem z portlandského cementu se hloubka karbonatace zvětšuje i s rostoucím obsahem **vápence**. Podrobnější výsledky jsou uvedeny např. v českém překladu článku Müllera [56], který v něm uvádí i závěry ze zkoušek portlandských směsných cementů.

Uvedené platí zčásti i pro příměs s nejsilnějším pucolánovým účinkem, tedy pro **křemičitý úlet**. Vliv této příměsi na průběh karbonatace, a tím na měřené hodnoty pH, je mimo jiné uveden ve firemní literatuře [43], kde jsou vyobrazeny (Bild 5) výsledky Goudy a Halaky získané při zkouškách cementového kamene s vodním součinitelem 0,5 a obsahy křemičitého úletu 0, 10, 20 a 30 % v průběhu 84 dní. K malé změně (do 0,5 pH, na 13,5 pH) došlo jen při obsahu křemičitého úletu 10 %. (Proto je jistě správné, že je v EN 206-1, platné pro nyní běžné betony, omezen podíl křemičitého úletu na 11 % hmotnosti cementu.) Zkoušky po třech měsících karbonatace prováděl též Obersamer [57], který zjistil, že použití křemičitého úletu (90 kg/m³ slurry s podílem 1:1) přispěje k omezení hloubky karbonatace na 25 %.

Uvedená a podobná zjištění je však třeba brát pro krátkou dobu jejich provádění s určitou rezervou. Jiná, dlouhodobější, pozorování platí jen v rámci podmínek provedených zkoušek. U betonu musí být zajištěna pasivační schopnost ochranné vrstvy betonu zpravidla alespoň na dobu padesáti let a to v nejrůznějších možných podmínkách a hlavně s vysokou **spolehlivostí**.

Uvedené i další důvody svědčí o tom, že požadavky stanovené **Změnou Z3** ČSN EN 206-1 [36] nejsou zbytečně přísné. V první řadě je tedy třeba plnit požadavky uvedené v jejich tabulkách NA.F.1 a NA.F.2. Z hlediska kontroly shody pevnostní třídy je třeba respektovat i ustanovení článku 5.3.4.1. S cílem nepřeceňovat vliv příměsí (včetně cementářských příměsí) se v něm požaduje, aby pevnostní třída v tlaku byla prokazována na zkušebních tělesech jen **ve stáří 28 d** (tedy nikoliv ve stáří 56 nebo 90 d, povolenými v případě, kdy se povoluje shoda pevnosti v tlaku v jiném stáří než po 28 d).

Dále je **tabulkou F.4** stanoveno, že při třídách odolnosti proti karbonataci XC2, XC3 a XC4 se nesmějí použít cementy CEM II/B-L, CE II/B-LL a CEM III/C. Použitelnost cementů CEM IV musí být ověřena průkaznou zkouškou. Též je třeba respektovat ustanovení o alkalické rezervě při **společném použití křemičitého úletu a popílku**, která jsou uvedena v článku 5.2.5.2.4. V tomto článku je podíl popílku k cementu limitován rovnicemi, ve kterých se bere v úvahu podíl popílku ke křemičitému úletu. Jimi je vyjádřena i závislost na druhu cementu. První z rovnic platí jen pro CEM I, druhá pro cementy CEM II/A-S, CEM II/B-S, CEM II/A-D, CEM II/A-T, CEM II/A-LL a CEM III/A. U nejmenovaných cementů je společné použití popílku a křemičitého úletu nepřipustné.

Podíl samotného popílku je zdánlivě limitován omezením podílu popílek/cement horní mezí 0,33. Je však třeba mít

na vědomí, že jde pouze o započitatelný podíl. Podíl popílku, který má funkci kameniva, není normativně omezen. V běžných podmínkách (omezená pucolanita obvyklých popílků, normativní nároky na obsah cementu při vlivech prostředí XC1 až XC4) je tedy ochranná funkce krycí vrstvy zajištěna s dostatečnou spolehlivostí.

Jak je uvedeno v úvodu této části, závisí hloubka karbonatace nejenom na složení betonu, ale i na **ošetřování** betonové konstrukce. Proto jsou v novém vydání normy pro provádění [58] zavedeny **třídy ošetřování**. Jimi se určuje, do jaké pevnosti je třeba beton ošetřovat. Např. u nejvyšší třídy 4, která by měla platit pro beton s velkým obsahem pucolánových a latentně hydraulických příměsí, se vyžaduje vlhké ošetřování do doby dosažení 70 % charakteristické pevnosti; u běžných betonů nepřilíš vysoké pevnosti je to tedy směrně doba ošetřování 7 d (tab. 2). Z uvedené normy [58] vyplývají i úkoly pro specifikátora – viz odstavce (7) a (8) článku 8.5.

Vliv chloridů na korozi výztuže, vliv prostředí XD na ochrannou vrstvu betonu

Zde působí podobné vlivy jako u nepropustnosti a karbonatace a navíc se kladně projevuje vliv pucolánových a latentně hydraulických příměsí na průniky chloridu betonem.

Významný vliv **popílku** je prokázán v první řadě v příručce [14]. Zde uvedeným obr. 4.2.9 je instruktivně dokumentován i **vliv stáří betonu**. Ve stáří betonu 28 d je koeficient migrace chloridů prakticky nezávislý na jejich podílu v pojivu. Po 91 d je při obsahu popílku 20 % uvedený součinitel třikrát menší než v betonu bez popílku, při obsahu 40 % dokonce desetinný. Uvedené významné zvětšení efektivity s růstem obsahu popílku do 40 % pokračuje až do konce publikovaných zkoušek (stáří betonu dva roky).

Podle Lichtmanna a Thama [59] je vhodnost popílku při vlivech prostředí XD3 a XS3 vyjádřena v německých směrnících DAfStb pro masivní betony zvětšením mezní hodnoty ekvivalentního vodního součinitele z 0,45 na 0,5. Zvětšená mezní hodnota 0,5 se smí používat tehdy, když obsah popílku je alespoň 20 % z celkového obsahu pojiva; při použití směsných cementů CEM II/B-V, CEM III/A a CEM III/B uvedená omezující podmínka neplatí.

Velmi kladný vliv na omezení průniku chloridů má podle Branderburgera a Hüttla [60] i jemnozrnnost, kterou vynikají kromě křemičitého úletu i upravené popílků Microsit M10 (95 % zrn pod 10 μm) a M20 (90 % zrn pod 20 μm). Průnik chloridů byl ověřován na maltách odpovídajících požadavkům na zkoušení cementu (vodní součinitel 0,5, tři díly písku na jeden díl pojiva). Kromě malt se samotným CEM I 42,5 R byly zkoušeny i malty, u kterých bylo 25 % uvedeného cementu nahrazeno výše uvedenými popílků nebo obyčejným popílkem. Malty s oběma Microsity a malta s křemičitém úletem propustily jen podíl 1/190 chloridů proniklých maltou se samotným cementem. U malty s běžným popílkem se dosáhlo podílu 1/8. Další zkoušky na betonech ukázaly, že pronikání chloridů klesá přibližně úměrně s podílem micrositových popílků. Tak byla prokázána i možnost náhrady křemičitého úletu Micrositem.

Popílkovými, vysokopecními i dalšími cementy se podrobně zabývá i dříve uvedená publikace Müllera a Severinsové [55], zaměřená převážně na zkoušení betonů s ekvivalentním vodním součinitelem 0,5 a s minimálním přípustným obsahem cementu při vlivu prostředí XD3, u betonů bez samostatně dávkované příměsi tedy 320 kg/m³. **Nejlepší výsledek dal vysokopecní cement CEM III/A**. Dobré výsledky, lepší než

referenční cement CEM I, dal dokonce i cement CEM II/M s 15 % popílku a s 20 % strusky. V rámci uvedených zkoušek byl potvrzen kladný **přínos jemnosti popílku**: u mletého popílku (440 m²/kg) byl součinitel migrace chloridů podstatně menší než při použití neupraveného popílku s měrným povrchem 370 m²/kg.

Dále byly podle [55] zkoušeny betony obsahující 270 kg/m³ ověřovaných cementů a 89,1 kg/m³ černouhelného popílku. U těchto betonů je závěr stejný jako u hodnocení karbonatace: všechny zkoušené betony vyhovují požadavkům na odolnost proti vlivům prostředí XD za předpokladu, že max. započitatelný podíl popílku je jen 25 % hmotnosti cementu.

Vliv křemičitého úletu (dále je použita zkratka pro mikrosiliku MS) na pronikání chloridů popisuje Trefil [61]. Při zkouškách betonů s vodním součinitelem 0,5 byly zjištěny následující obsahy chloridů proniklých betonem do hloubky 20 mm:

- u betonů bez MS 0,6 %,
- při obsahu 0,2 % MS jen 0,2 %,
- 0,1 % při obsahu MS 10 %.

Zvláště velký přínos obsahu křemičitého úletu 15 % je dokumentován (Bild 48) v publikaci [43].

Významně lze omezit pronikání chloridu i bez použití příměsí do betonu a to použitím vhodných cementů. Kromě speciálních cementů jsou to především portlandský cement s křemičitým úletem CEM II/A-D a vysokopecní cementy CEM III. Podle Bilgeriho [62] byly získány vynikající výsledky i s cementem CEM III/A 52,5 N-HS/NA.

Odolnost proti mrazu a rozmrazování, vlivy prostředí XF

Nejrozsáhlejší výzkum s cílem ověřit vliv **popílku** na odolnost betonů proti vlivům prostředí XF byl prováděn v ústavech Institut für Bauforschung der RWTH Aachen (IBAC) a Centrum Baustoffe und Materialprüfung der TU München (CBM). V publikaci [63], zaměřené jen na stupně vlivů prostředí XF2 a XF4, je popis a vyhodnocení dvaceti šesti betonů bez superplastifikační přísady (rozlítí 270 až 550 mm) a pět samozhutnitelných betonů se superplastifikační přísadou na bázi polykarboxylát-éteru a s celkovým obsahem pojiva 600 kg/m³. Použity byly cementy povolené pro vlivy prostředí XF2 a XF4: CEM I 32,5 R, CEM II/B-S 32,5 R (s 22,5 % hm. strusky), CEM III/A se 47 % hm. strusky, doplňkově CEM III/B.

Závěry týkající se **popílku**:

- Provozdušněné betony pro XF2 (s ekvivalentním vodním součinitelem 0,55) s popílkem, které byly standardně ošetřovány, měly při CEM I stejné a při CEM II B/S jen nepatrně větší odpady než betony bez popílku.
- Provozdušněné betony pro XF4 (s ekvivalentním vodním součinitelem 0,5) s popílkem, které byly standardně ošetřovány, měly nezávisle na druhu cementu větší odolnost než betony bez popílku.
- Standardně ošetřované neprovozdušněné betony s popílkem jsou srovnatelné s betony bez popílku, výrazně se však projevuje vliv druhu cementu.
- Po uložení na dálnici během čtyř zimních období došlo u šesti z dvanácti betonů k povrchovému poškození (odtržení od kameniva). Vliv popílku nebylo možno prokázat.
- Zkoušky prokázaly, že při dodržení požadavků norem lze popílek používat i při vlivech prostředí XF2 a XF4.

Podle [64] měly při zkouškách metodou CDF provozdušněné popílkové betony s vodním součinitelem 0,5 větší odpady než betony bez popílku, vždy však znatelně menší, než je kritériální hodnota 1 500 g/m² při počtu cyklů 28.

Výsledky výzkumu [63] a dalších prací [55, 65] umožnily, aby v roce 2007 bylo **změnou A2 německé normy DIN 1045-2 [50] povoleno používání příměsí popílku i v betonech určených pro vlivy prostředí XF2 a XF4**.

Novější (2010) a podrobnější údaje pro použití popílku v mrazuvzdorných betonech jsou uvedeny ve směrnici BVK [66] a v technicko-smluvních podmínkách ZTV-ING [67]. Větší vliv než popílek má druh použitého cementu. Z uvedeného důvodu je v obou dokumentech předepsáno, že popílek lze vždy do pojiva započítat jen při použitého cementů CEM I a CEM II/A. U ostatních cementů se vyžaduje povolení odběratele. V tabulce 2.1.2.1 [66] jsou uvedeny i podrobnější údaje o použitelnosti jednotlivých cementů a o započitatelnosti vlivu popílků. Údaje uvedené tabulky jsou v některých případech přísnější, než jsou údaje tabulky F.4 naší platné normy [36].

Dosud uvedené údaje se týkaly jen běžných popílků dle EN 450-1. Podle dříve uvedené publikace Branderburgra a Hüttla [60] byly ověřovány i **tříděné popítky** Microsit. Nejlepší výsledky mrazuvzdornosti metodou CDF dal nejjemnější popílek Microsit 10.

Zkoušky vlivu dvou set zmrazovacích cyklů (ČSN 73 1322) na mechanické vlastnosti provzdušněných a neprovzdušněných samozhutnitelných betonů s různými příměsmi popisuje velmi podrobně Bílek [68]. Na rozdíl od většiny zkoušek byly prověřovány i betony ošetřované po 28denním vlhkém ošetřování i na venkovní skládce a to ve stáří betonů 100, 180 a 365 d. V betonech s celkovým obsahem pojiva 520 kg/m³ byly např. ověřovány příměsí vysokopecní granulovaná **struska** Štramberk, hydraulické pojivo UHPŠ Štramberk (75 % popílek, 25 % struska) a mletý **vápenec**, vždy s obsahem 200 kg/m³. Další série obsahovala dokonce 240 kg/m³ příměsí, zde navíc i **filer**. Výsledky podle indexu mrazuvzdornosti, tedy poměru pevnosti zmrazovaných trámců k pevnosti srovnávacích trámců:

a) Neprovzdušněné betony, zkoušené zmrazováním ve stáří 28 d, se rozpadly; vliv příměsí proto nelze komentovat.

b) U provzdušněných betonů:

- Beton s UHPŠ (popílkem a struskou) měl index mrazuvzdornost blízký 1, podobně i beton s vápencem. U betonu se struskou a filerem byl zjištěn pokles indexu mrazuvzdornosti.
- Zajímavý byl vývoj indexu mrazuvzdornosti v čase. U betonu se struskou i u betonu s UHPŠ index mrazuvzdornosti překvapivě **klesal se stářím betonu**, zejména u betonu se samotnou struskou: po době předchozího ošetřování 28 d byl index cca 1,09, po 100 d cca 0,78. Autor vysvětluje uvedené zjištění vlivem strusky na snížení obsahu portlanditu. Tato složka, která je z hlediska pevnosti nežádoucí, váže vodu tak, že nezmrzne. Uvedená složka též zpomaluje zmrazování a rozmrazování.

Údaje o velmi příznivém vlivu **křemičitého úletu** na mrazuvzdornost, větším než na pevnost, jsou ve firemní publikaci [43] opírající se i o respektované autory.

Údaje v [43] jsou potvrzeny i publikací Fidranského, Fiedlera a Hromádky [69]. Zkouška betonu s obsahem 330 kg/m³ cementu, 16,5 kg/m³ křemičitého úletu (5 % hmotnosti cementu), **bez provozdušňovací přísady** a s účinným plastifikátorem na bázi polykarboxylátu dala po sedmdesáti pěti cyklech metodou C [70] nízký odpad 53 g/m². Uvedené výsledky naznačují, že podobný neprovzdušněný beton může vyhovět i stupni vlivu prostředí XF4.

Možnost nepoužití standardního provozdušnění v ČR byla dána i technickými a kvalitativními podmínkami [71]:

Ve zvláštních případech specifikovaných zadávací dokumentací stavby nemusí být beton v prostředích XF3 a XF4 provzdušněn na předepsanou hodnotu; může být provzdušněn částečně, anebo vůbec. Uvedené platí v případě, že beton vyhoví kritériu odolnosti a jsou provedena příslušná opatření, např. použitím příměsí křemičitého úletu současně s vodním součinitelem nižším než 0,4.

Působením mnoha faktorů lze vysvětlit, že kromě průkazů o vhodnosti křemičitého úletu existují i průkazy o **nepříznivém působení**. Feldrappe a Müller [72] uvádějí, že mrazové cykly (CIF) poškodily neprovzdušněné vysokopevnostní betony s vodními součiniteli 0,35 až 0,45 a s křemičitým úletem více než obdobné betony bez křemičitého úletu. Jako možnost nepříznivého vlivu křemičitého úletu soudí na růst nasávkivosti během zmrazovacích cyklů. Nepříznivý vliv náhrady 10 % cementu křemičitým úletem uvádí Kratochvíl [73]; podobně i Brandenburger a Hüttl [60], kteří zjistili velmi dobrý výsledek po dvaceti osmi cyklech a úplný rozpad zkušebních těles po padesáti šesti cyklech.

K negativnímu vlivu křemičitého úletu na výsledky jejich zkoušek dávají Wiens, Meng a Fontana [74] následující možné vysvětlení: křemičitý úlet reaguje velmi rychle. Během prvních 12 h vznikají křemičité gely a/nebo fáze CSH s velkým obsahem vody. V době od 12 do 24 h se obsah vody naopak snižuje. Zvláště v uvedené rané fázi způsobuje křemičitý úlet velké autogenní smršťování (až 70 % veškerého smrštění). Vlivem uvedených pochodů (též se samovyšýcháním) dochází k síti mikrotrhlin, a tím ke zhoršení užitečných vlastností betonu, kromě vodonepropustnosti i odolnosti proti cyklickému zmrazování za přítomnosti rozmrazovacích solí.

Výsledky zkoušek vlivu **metakaolinu** MEFISTO K 05 (ČLUZ, a. s., Nové Strašecí) dle ČSN 73 1326-Z1 daly podle Sedlmajera, Ondráčka a Rovnaníkové [75] následující výsledky: U betonů s pojivem obsahujícím buď 40 % strusky anebo 20 % metakaolinu byly odpady významně menší než u referenčního betonu se samotným cementem CEM I 42,5R. Beton obsahující pojivo se 40 % popílku nevyhověl i tehdy, když byl odpad po dvaceti pěti cyklech velmi malý; po sto cyklech byl totiž naměřen nepřipustný odpad 3,3 kg/m². Zdaleka nehorší výsledky byly dosaženy se 40 % metakaolinu: po dvaceti pěti cyklech 0,8 kg/m², po sto cyklech došlo k rozpadu vzorku.

Odolnost betonu proti mrazu mohou ovlivnit i vlákna. Podle výše uvedené publikace [74] daly neprovzdušněné betony s vlákny téměř stejný výsledek jako provzdušněný beton. Přijatelný výsledek dal i beton, který obsahoval jen 1,32 kg/m³ vláken PAN2.

Pozitivní vliv na odolnost betonu proti zmrazovacím a rozmrazovacím cyklům může mít podle Briatky a Makýše [76] příměs **superabsorpčního polymeru**, který působí podobně jako provzdušňovací přísada. Kromě její hlavní funkce (vnitřní ošetřování betonu) je její výhodou menší obsah vzduchových pórů, a tím méně nepříznivý vliv na pevnost betonu.

Vlivy prostředí XA, síranová koroze

O příznivém vlivu **popílku** na odolnost betonu proti síranové korozi svědčí v první řadě článek 5.2.5.2.2 DIN 1045-2 [50], který umožňuje při síranové korozi použití směsi cementu a popílku. Tuto alternativní náhradu síranovzdorného cementu lze použít jen za následujících podmínek:

- obsah síranů v agresivní vodě musí odpovídat podmínce $\text{SO}_4^{2-} \leq 1\,500 \text{ mg/l}$;

- připouštějí se jen následující cementy pro obecné použití: CEM I, CEM II/A-S, CEM II/B-S, CEM II/A-T, CEM II/B-T, CEM II/A-LL, CEM III/A;
- při použití cementů CEM I, CEM II/A-S, CEM II/B-S a CEM II/A-LL musí být obsah popílku alespoň 20 % hm. obsahu cementopopílkového pojiva;
- při použití cementů CEM II/A-T, CEM II/B-T a CEM III/A musí být obsah popílku alespoň 10 % hm. obsahu cementopopílkového pojiva.

Podle zkoušek Brandenburgera a Hüttla [60] zvětšily odolnost proti síranům nejvíce **jemnozrné popílky**, především Microsit 10.

O příznivém vlivu **vysokopecní strusky** na odolnost betonu proti síranové korozi svědčí DIN 1164-10 [77], podle které lze kromě portlandského cementu s obsahem C₃A do 3 % a s obsahem oxidu hliníku do 5 % použít i vysokopecní cement s obsahem strusky alespoň 66 %.

Cementy s výše uvedeným vysokým obsahem strusky 66 % velmi pomalu tvrdnou. Proto byl podle Bilgeriho [37] zaveden (Cemex) speciální vysokopecní cement CEM III/A 52,5 N-HS/NA s obsahem 52 % vysokopecní strusky, který vyhovuje jak požadavku na dostatečnou rychlost hydratace, tak i na síranovzdornost.

V ČR ověřovali vliv vysokopecní strusky na síranovzdornost Holešinský, Beyer a Böhm [78, 79]. Pro alternativní možnost thaumasitového rozpadu byly prováděny zkoušky jak při teplotě 20 °C, tak i při teplotě 5 °C.

Vliv popílku a strusky na thaumasitovou korozi vyšetřoval Bellmann [80]. Zaměřil se hlavně na vlhké prostředí s teplotou 8 °C, která je charakteristická pro korozi betonových základů.

Podle Janotky a Špačka [81] zvyšuje odolnost proti účinkům síranů i **zeolit** z Nižného Hrabovce.

Vliv **metakaolinu** a popílku na odolnost lehkých betonů proti působení SO₂ sledovali Hubertová, Hela a Stavinoha [82]. Velmi dobrý výsledek dalo cementové pojivo, u kterého bylo 40 % hmotnosti cementu nahrazeno 35 % černouhelného popílku z Dětmarovic a 5 % metakaolinu. Stejně dobrý výsledek dalo i pojivo obsahující jako příměs jen uvedený popílek (40 % hmotnosti pojiva).

Ostatní vlivy prostředí XA, ostatní chemická působení

Poznámka 1: Protože se většina autorů shoduje v tom, že biologická koroze betonu je specifickým druhem chemické koroze (hlavně působením kyselin) iniciované živými organismy, je v této části zahrnuta i biologické působení.

Poznámka 2: Pro výjimečnost používání hlinitanových cementů není popisován vliv příměsí na odolnost betonů vyrobených z těchto cementů.

Sledovaná odolnost betonu závisí hlavně na odolnosti pojivového kamene. Proti alkalicky reagujícím látkám je beton obsahující pojivo s portlandským slinkem zpravidla odolný. Odolnost betonu proti kyselinám a čisté (hladové) vodě lze účinně zvětšit použitím takových příměsí, které vážou neodolné zplodiny hydratace, kterými jsou hlavně hydroxid vápenatý a jeho sloučeniny. Účelnost **pucolánových příměsí** (popílku, křemičitého úletu) a **latentně hydraulických příměsí** (hlavně vysokopecní struska) je nesporná a proto zde nebude dále prokazována.

Odolnost betonu lze dále zvětšit opatřeními omezujícími propustnost betonu, tím i vznik a rozšiřování trhlin.

Informativním vodítkem pro použití příměsí je **Tabulka L.5 – Doporučená opatření na primární ochranu betonu proti jeho korozi vlivem chemicky agresivního prostředí**

(XA1, XA2, XA3), která byla s využitím SN 206-1 začleněna do ČSN EN 206-1 [36].

Ve výše uvedené tabulce jsou pro některé druhy agresivity doporučovány i železná příměs a kombinace zeolitu s křemičitým úletem. Podle Janotky a Špačka [81] se uvedené příměsi osvědčily např. ke zvýšení odolnosti proti uhlíčitému rozto-ku a kyselině chlorovodíkové, zvláště v současné kombinaci se železným práškem.

Odolnost proti alkalicko-křemičité reakci (AKR, ASR)

Při použití ne zcela vhodného nebo podezřelého kameniva může dojít k následujícím škodlivým reakcím:

- alkáliemi, které se do betonu dostanou zvenčí (např. při použití protizmrazovacích prostředků),
- alkáliemi, které jsou obsaženy v portlandském slínku nebo v příměších.

Dále bude sledován jen druhý bod.

Mnoho cenných údajů je obsaženo především v publikaci Hunkelera, Merze a Kronenberga [83]. Jejimi přílohami je kromě podrobné a ilustrativní dokumentace průzkumů a výzkumů i historický přehled zahrnující období od 1930 do 2007.

Výtah zaměřený na vliv příměsí a cementů:

Při vlastních zkouškách dala nejlepší výsledky (po 42 d délkové přetvoření hranolu 0,18 %) příměs **50 % popílku**. Vhodná byla i příměs 10 % křemičitého úletu a dále příměs s 50 % vysokopecní strusky (u ní bylo přetvoření 0,3 %). Nejhorší výsledek dal samotný cement (přetvoření 0,7 %).

Poučné jsou i následující údaje publikace [83]:

- K omezení nebezpečí AKR se musí od roku 1980 na Islandu používat cement obsahující 7,5 % křemičitého úletu a další pucolánovou příměs (1 až 3 % ryolitu).
- V Holandsku je předepisováno použití vysokopecního cementu s obsahem alespoň 65 % strusky. V dalších státech

Literatura:

- [30] Příručka technologa – Beton – suroviny – výroba – vlastnosti, 2005; Českomoravský beton, a. s., Českomoravský cement, a. s., Českomoravské šterkovny, a. s.
- [31] Válek J., Bodnárová L., Hela R.: Vliv ocelových vláken na provzdušnění drátkobetonu; 7. konf. Technologie betonu 2008
- [32] Mechtcherine V.: Hochduktiler Beton mit Kurzfaserbewehrung (Vysoceduktilní beton s krátkovláknitou výztuží); beton 03/2009
- [33] Niederegger Ch., Ding Y., Heger E.: Konfektionierte Naturfaser aus Flachs zur Erhöhung der Brandbeständigkeit von Tunnelinnenschalen und Tübbing; Tunnel 5/2007
- [34] ČSN EN 447 (73 2410) Injektážní malta pro předpínací kabely – Požadavky na běžnou maltu
- [35] ÖNORM B 4710-1/A1 Beton Teil 1: Festlegung, Herstellung, Verarbeitung und Konformitätsnachweis (Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 206-1), 2003-08-01
- [36] ČSN EN 206-1 Beton – Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda včetně Změny Z3, květen 2008
- [37] Bilgeri P.: Entwicklung und Anwendung eines Hochofenzements mit speziellen Eigenschaften (Vývoj a použití vysokopecního cementu se speciálními vlastnostmi); beton 07 + 08/2008
- [38] Schneider E., Guse U., Müller H. S.: Zur Wirksamkeit von Flugasche im Beton (K účinnosti popílku do betonu); beton 10/2005
- [39] Schwindverhalten von Flugaschenbeton (Smršťování popílkového betonu); beton 11/2004
- [40] Li, Ying Jian; Yan, Li Kuan: Verwendung von Flugasche im Beton (Použití popílku v betonu); BFT Betonwerk + Fertigteiltechnik 06/2004
- [41] von Berg W.: Flugasche im Beton – Neue Wege (Popílky v betonu – nové cesty); beton 04/2002
- [42] Collepardi M.: Moderní beton; Informační centrum ČKAIT, 2009
- [43] König R., Wagner J.-P.: Microsilica, Baustoff aus der Zukunft (Mikrosiliká, stavivo budoucnosti); Fremní literatura Woermann Bauchemie
- [44] Herold G., Müller H. S.: Dauerhaftigkeit von CEM II/A-LL-Zementen im Vergleich zu CEM I-Zementen (Porovnání trvanlivosti cementů CEM II/A-LL k cementům CEM I); beton 04/2005
- [45] Manns W., Bayer M.: Einfluss des Mehlkorns auf die Widerstandsfähigkeit von jungem Beton gegenüber Schrumpfrissbildung (Vliv moučkových zrn na odolnost betonu proti vzniku trhlin vlivem smrštění); Schriftenreihe des Bundesverbandes der deutschen Transportbetonindustrie, Heft 5, 1990
- [46] Redakční článek: Schwindverhalten von Flugaschenbeton (Smršťování popílkového betonu); beton 11/2004
- [47] Hela R., Křížová K.: Moduly pružnosti v závislosti na návrhu složení betonu; 8. konf. Technologie betonu, 2009
- [48] Klečka T., Kolář K., Konvalinka P.: Vliv aktivní příměsi na bázi metakaolinu na vlastnosti vysokohodnotných betonů; 6. konf. Technologie betonu, 2007
- [49] Bílek V., Juřinová E., Cikrle P.: Modul pružnosti vysokohodnotných betonů různého složení; 16. Betonářské dny 2009, Sb. konf., 2009
- [50] DIN 1045-2 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1 (Nosné konstrukce z betonu, železobetonu a předpjatého betonu – Část 2: Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda – Pravidla použití k DIN EN 206-1), 2001.
- [51] Bose T., Kampen R.: Wasserundurchlässige Betonbauwerke (Vodonepropustné betonové stavby); Zement-Merkblatt Hochbau, Heft 10, 2010, www.beton.org
- [52] Gluth J.G.: Die Porenstruktur von Zementstein und seine Eignung zur Gastrennung (Pórová struktura cementového kamene a jeho vhodnost k oddělování plynu, Disertační práce na TU Berlin, 2011)
- [53] Hilsdorf H. K., Schönlin K., Tauscher F.: Dauerhaftigkeit von betonen; Schriftenreihe des Bundesverbandes der deutschen Transportbetonindustrie, Heft 8, 1997
- [54] Matoušek M., Drochytka R.: Atmosférická koroze betonů; IKAS ve spolupráci s ČKAIT, Praha 1998
- [55] Müller Ch., Severins K.: Dauerhaftigkeit von Betonen mit flugaschenhaltigen Zementen (Trvanlivost betonů s popílkovými cementy); beton 3/2007
- [56] Müller Ch.: Vlastnosti portlandských cementů směsných; český překlad přednášky z r. 2005, vydaný VUM a SVC ČR
- [57] Obersamer W.: Hochfester Beton für Brückenkappen (Vysokohodnotný beton pro mostní římsy); beton 06/2006
- [58] ČSN EN 13670 Provádění betonových konstrukcí, červen 2010
- [59] Lichtmann M., Tham H.W.: Anwendung von Flugasche in Beton (Použití popílku do betonu); beton 03/2008
- [60] Brandenburger D., Hüttl R.: Hochleistungsbeton mit Feinstflugasche als Betonzusatzstoff (Vysokohodnotný beton s příměsí velmi jemného popílku); beton 05/2006
- [61] Trefil V.: Ekonomické úspory při použití betonu s mikrosilikou; Materiály pro stavbu 06/2005
- [62] Bilgeri P.: CEM III/A 52,5 N-HS/NA – der Zement mit besonderen Eigenschaften (CEM III/A 52,5 N-HS/NA – cement se zvláštními vlastnostmi); Cemex HOZ-Seminar 2007
- [63] Brameshuber W., Uebachs S., Schiessl P., Brandes Ch.: Anrechnung von Flugasche auf den Wasserzementwert bei Betonen unter Frost-Tausalzbeanspruchung (Započtení popílku do vodního součinitele u mrazu a solivzdorných betonů); beton 1 + 2/2005 a beton 3/2005
- [64] Schneider E., Guse U., Müller H. S.: Zur Wirksamkeit von Flugasche im Beton (K účinnosti popílku do betonu); beton 10/2005A
- [65] Sborník: Tätigkeitsberichte des VDZ 2005-2007, Kap. V (Zprávy o činnosti VDZ 2005-2007, kap. V), 2007, viz www.vdz-online.de/455.html
- [66] BVK – Betontechnische Empfehlungen. Optimieren von Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit Flugasche als Betonzusatzstoff Typ II (BVK – Betontechnická doporučení. Optimalizace betonu podle DIN EN 206-1 a DIN 1045-2 s popílkem jako s příměsí typu II); Bundesverband Kraftwerksnebenprodukte e.V., 2010 (nové vydání)

- [67] ZTV-ING, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten, Teil 3 Massivbau, Abschnitt 1 Beton (Doplňující technické smluvní podmínky a směrnice pro inženýrské stavby, část 3 masivní stavby); Verkehrsblatt Verlag 2010
- [68] Bílek V.: Mrazuvzdornost samozhutitelných betonů s různými příměsemi; 5. konf. Technologie, provádění a kontrola betonových konstrukcí, 2006
- [69] Fidranský P., Fiedler J., Hromádka J.: Beton se zvýšenou trvanlivostí; Beton TKS, 5/2003
- [70] Technické a kvalitativní podmínky staveb pozemních komunikací (TKP), kapitola 18 Beton pro konstrukce. MD, odb. pozemních komunikací, 2005–08, účinnost od 1. 10. 2005
- [71] Marusič J.: Důvody pro doplňkovou specifikaci kvalitativních a organizačních požadavků stávajících technických norem a předpisů. Sb. sem. „TKP staveb pozemních komunikací“, Kapitola 18, Beton pro konstrukce. Praha, 23. 2. 2005
- [72] Feldrappe V., Müller Ch.: Auswirkungen einer Frostbeanspruchung auf dichte hochfeste Betone (Působení mrazových cyklů na hutné vysokopecnostní betony); beton 11/2004
- [73] Kratochvíl A.: Samozhutitelný beton – nový trend ve stavební praxi. Materiály pro stavbu 1/2006
- [74] Wiens U., Meng B., Fontana P.: Mikrorissbildung in Hochleistungsbeton (Tvorba mikrotrhlin ve vysokohodnotném betonu); beton 06/2007
- [75] Sedlmajer M., Ondráček M., Rovnaníková P.: Odolnost proti působení chemických rozmrazovacích látek betonů s vyšším obsahem alternativních silikátových pojiv; 7. konf. Technologie betonu, 2008
- [76] Briatka P., Makýš P.: Ošetřovanie čerstvého betónu – 2. Superabsorpčné polyméry; Beton TKS 2/2010
- [77] DIN 1164-10 Zement mit besonderen Eigenschaften – Teil 10: Zusammensetzung, Anforderungen und Übereinstimmungsnachweis von Normalzement mit besonderen Eigenschaften (Cement zvláštních vlastností – Část 10: Složení, požadavky a průkaz shody normálního cementu se zvláštními vlastnostmi); 2004-08
- [78] Holešínský R., Bayer P., Böhmer J.: Zvýšení síranové odolnosti betonu použitím jemně mleté vysokopecní strusky; 8. konf. Technologie betonu, 2009
- [79] Holešínský R., Bayer P.: Skrytý potenciál jemně mleté vysokopecní strusky; Stavební ročenka 2010, 2009
- [80] Bellmann F.: Zur Bildung des Minerals Thaumazit beim Sulfatangriff auf Beton (K tvorbě minerálu thaumazitu při ohrožení betonu sírou); beton 5/2006
- [81] Janotka I., Špaček A.: Cementové suspenze zvýšené chemické odolnosti; Beton TKS 4/2002
- [82] Hubertová M., Hela R., Stavinoha R.: Odolnost lehkého samozhutitelného betonu v chemicky agresivních prostředích; 7. konf. Technologie betonu, 2008
- [83] Hunkeler F., Merz Ch., Kronenberg P.: Alkali-Aggregat Reaktion (AAR). Grundlagen und Massnahmen bei neuen und bestehenden Kunstbauten (Alkalická reakce kameniva. Základy a opatření při nových i stávajících stavbách); www.astra.admin.ch
- [84] 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
- [85] Redakční článek: Ziel: Dauerhaftigkeit und hohe Druckfestigkeit (Cíl: Trvanlivost a vysoká pevnost v tlaku); beton 07+08/2005
- [86] Nanodur – Ergebnis unserer neusten Entwicklung (Nanodur – Výsledek nejnovějšího vývoje); beton 10/2008
- [87] Deuse T., Parker F., Strunge J.: Spezialzemente zur Herstellung von Hochleistungsbetonen (Speciální cementy pro výrobu vysokohodnotných betonů); beton 10/2008
- [88] ČSN EN 13813 Potěrové materiály a podlahové potěry – Potěrové materiály – Vlastnosti a požadavky. Listopad 2003
- [89] DBV-Merkblatt Industrieböden aus Beton für Frei- und Hallenflächen, 11/2004, Deutscher Beton- und Bautechnikverein, Berlin 2005
- [90] DIN 1100: Hartstoffe für zementgebundene Hartstoff-estriche – Anforderungen und Prüfverfahren, 05/2004

jsou doporučeny cementy CEM III (A až C) nebo příměsí popílku a křemičitého úletu (s obsahem 5 až 10 %).

- Ve Velké Británii je doporučeno použití mleté vysokopecní strusky.
- Záleží na chemickém složení popílku. Nežádoucí jsou hlavně obsahy CaO a SO₃, též MgO. AKR zpomalují hlavně obsahy SiO₂ nad 30 % a Al₂O₃ nad 5 %. Kladně, ale slabě, působí i Fe₂O₃.

Výše uvedené údaje jsou potvrzovány i jinými publikovanými zkušenostmi. Řešením je i použití cementů s omezeným obsahem portlandského slínku, zvláště CEM III, případně i CEM II [84, 37].

Odolnost proti obru, vlivy XM

S uvedeným cílem mohou být příměsí využity s následujícími dvěma záměry:

Využit skutečnost, že odolnost proti obru **závisí na pevnosti betonu** [43, 61]. Proto lze v první řadě využít **křemičitý úlet**, samozřejmě spolu s účinnou superplastifikační přísadou. Tam, kde je požadována vysoká odolnost proti obru a při větším stáří betonu (po více než 90 d) lze účelně využít i další pucolánové a latentně hydraulické příměsí. Podobně lze s uvedeným cílem využít i speciální vysokopecnostní cementy s obsahem vhodných cementářských příměsí, např. CEM II/B-M (S-D) 52,5 R „Duracrete basic“ [85], který navíc příznivě ovlivňuje jakost kontaktní zóny mezi kamenivem (tím i tvrdými příměsemi uvedenými dále) a pojivovým tmelem. Se stejným cílem lze využít i další speciální vysokopecnostní cementy, např. dle [86, 87].

Zvýšení odolnosti proti obru se dosahuje především použitím příměsí látek s vysokou tvrdostí, zvláště pak při výrobě průmyslových podlah [88, 89]. V pojízdných vrstvách se s uvedeným cílem používají příměsí s tvrdými zr-

ny z elektrokorundu, karbidu křemíku (karborunda), případně i z krystalického křemene. V Německu jsou uvedené látky normovány [90].

DALŠÍ OBLASTI VHODNÉHO POUŽITÍ PŘÍMĚSÍ

Další oblasti vhodného použití příměsí ukazují následující stručný výčet požadavků na beton a jejich řešení za použití příměsí:

- zmenšení objemové hmotnosti lehkého betonu – částečným řešením je i náhrada jemného písku popílkem;
 - zlepšení samozhutitelnosti při nízkém obsahu cementu – řešení popílkem, vápencovou moučkou, kamennými moučkami;
 - omezení rychlosti vývinu hydratačního tepla prodloužením hydratačního období směrně na 90 d, a tím omezení tahových napětí a trhlin v masivních konstrukcích – hlavně použití popílku a vysokopecní strusky;
 - zlepšení vlastností drobnozrnných betonů (malt, tmeľů), zvláště při nedostatku vhodného písku – řešení především filerem a popílkem;
 - zlepšení soudržnosti cementového tmeľu s kamenivem – použití křemičitého úletu nebo metakaolinu;
 - vysokopevnostní beton, ultravysokohodnotný beton (UHPC), předpjatý beton – příměsí a směsné cementy se překvapivě dobře uplatňují i u uvedených náročných betonů, samozřejmě v kombinaci s účinnými superplastifikačními přísadami a s jejich vyšším obsahem.
- Bližší bude uvedeno v příslušných kapitolách závěrečné části tohoto pojednání.

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

