



VYSOKOHODNOTNÝ BETON – AKTUALIZACE V ROCE 2011 | HIGH PERFORMANCE CONCRETE (HPC) – REVISED IN 2011

PIERRE CLAUDE AÏTCIN, VLASTIMIL BÍLEK

Vysokohodnotný beton se v praxi uplatňuje stále významněji. Tím je získávána řada nových zkušeností a jsou korigovány i některé údaje z knihy Vysokohodnotný beton. Hlavní důraz je kladen na vysvětlení smrštění a jeho eliminace v případě vysokohodnotného betonu. Na příkladech je ukázáno, že konstrukce z vysokohodnotného betonu lépe naplňují požadavky udržitelného rozvoje. Jsou uvedeny zkušenosti z aplikací vysokohodnotného betonu v minulosti a rovněž příklady nových konstrukcí, postavených s využitím vysokohodnotného betonu. | High performance concrete is increasingly being used in practice today. This is how plenty of new experience is gained and some conclusions from the High Performance Concrete book are modified. The main focus is on explanation of shrinkage and its elimination in HPC. Examples in the paper show that HPC construction can better meet the requirements of sustainable development. The experience of the use of HPC in the past is given as well as some examples of new constructions built utilizing HPC.

Knihy High Performance Concrete vyšla v roce 1998 (v českém překladu jako „Vysokohodnotný beton“ v roce 2005). I o třináct let později je z velké části stále aktuální. Byla přeložena ve Francii, Brazílii, Česku, Španělsku a brzy by měla být k dispozici i její čínská verze. Ovšem věda a technologie týkající se vysokohodnotného betonu za těch třináct let pokročila. Záměrem tohoto článku je aktualizovat uvedenou knihu a doplnit některé nové pohledy na tuto oblast.

Pro výrobu vysokohodnotného i běžného betonu jsou používány stejné materiály. Oba typy betonů podléhají stejným fyzikálním, chemickým a termodynamickým zákonům a samozřejmě i zákonům trhu. Ovšem vysokohodnotný beton se může chovat odlišně než běžný beton, poněvadž některé vlivy, které působí na praktické vlastnosti běžného betonu pouze nepatrně, mají výrazné dopady na obdobné vlastnosti vysokohodnotného betonu.

HLAVNÍ ROZDÍL MEZI VYSOKOHODNOTNÝM A BĚŽNÝM BETONEM

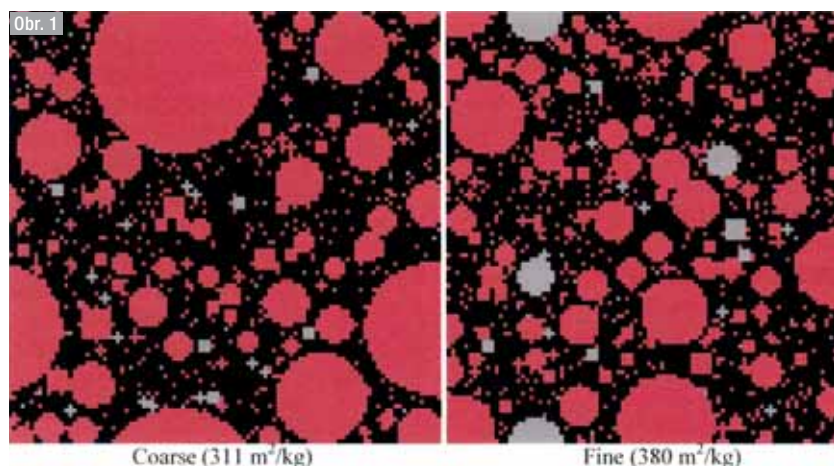
Podstatným rozdílem je vodní součinitel w/c

- v případě běžného betonu se w/c pohybuje v rozmezí zhruba 0,42 až 0,60 (nebo i ještě více), takže běžný beton obsahuje více vody, než je třeba na plnou hydrataci všech zrn cementu,
- vysokohodnotný beton se vyznačuje vodním součinitelem menším než 0,42, takže obvykle vysokohodnotný beton neobsahuje dostatek vody pro plnou hydrataci všech cementových zrn.

Vodní součinitel není jen nějaké teoretické číslo bez fyzikálního významu. Z matematického modelu hydratace cementu,

obr. 1, který vypracoval Bentz [1], plyne, že vzdálenost zrn cementu v pastě je přímo úměrná vodnímu součiniteli w/c [2]. Čím nižší je vodní součinitel, tím menší je vzdálenost mezi zrny cementu v pastě, a tím silnější vazby mezi hydratujícími zrny cementu během hydratace vznikají.

Obr. 1 Matematický model cementové pasty (Dale, Bentz) | Fig. 1 Mathematical representation of cement paste according to Bentz model



Jaké hodnoty w/c jsou obvyklé při výrobě vysokohodnotného betonu

- ▮ obvykle 0,30 až 0,40
- ▮ ve zvláštních případech 0,25 až 0,30
- ▮ v případě kompozitů ultravysokých pevností 0,18 až 0,20.

Položme si logickou otázku: *Jak to, že pevnost vysokohodnotného betonu roste přesto, že w/c je menší než 0,42 a v betonu tedy není dost vody pro úplnou hydrataci všech cementových zrn?*

Odpověď zní: **Protože pevnost betonu závisí především na vzdálenosti jednotlivých zrn cementu v pastě, méně již na počtu zrn, která zhydratovala.**

Pokud jsou zrna cementu vzájemně hodně vzdálena, musejí hydráty vyrůstající z jednoho zrna překonávat velkou vzdálenost, než se setkají s hydráty rostoucími z jiného zrna. Teprve pak vytvoří fyzikální vazbu. Ovšem tyto vazby nejsou tak pevné, jako když jsou zrna cementu blízko u sebe. V tom spočívá tajemství vysokohodnotného betonu.

Tento závěr je vlastně jen jinak řečeno to, co je uvedeno v knize Vysokohodnotný beton. Tam se zdůrazňuje menší pórovitost pasty s nízkým vodním součinitelem. Malá vzdálenost zrn a krátké hydráty mezi zrny cementu představují vlastně pouze jinou interpretaci nízké pórovitosti.

ZMENŠENÍ VZDÁLENOSTI MEZI CEMENTOVÝMI ZRNY V PASTĚ

Vzdálenost mezi cementovými zrny, tedy vodní součinitel, je samozřejmě možné zmenšit použitím superplastifikátoru, což je syntetický polymer speciálně vyvinutý k tomu, aby potlačil přirozenou tendenci cementových zrn ve vodě flokulovat.

Proč zrna cementu po tom, co přijdou do kontaktu s vodou, flokulují?

V první řadě, mletí portlandského slínku generuje velké množství kladných a záporných nábojů na povrchu cementových zrn. A za druhé, molekuly vody jsou polární, poněvadž těžiště kladných a záporných nábojů neleží v jednom bodě. Z tohoto důvodu se molekuly vody chovají jako dipóly. Tyto dipóly vytvářejí interpartikulární vazby, které jsou dostatečně silné na to, aby vytvořily shluky (flokule) cementových zrn, které vypadají podobně jako domečky z karet. Uvnitř těchto domečků je zachycen určitý podíl záměsové vody, která tak není nadále k dispozici pro zlepšení plasticity betonu a k usnadnění jeho ukládání.

K potlačení flokulace bývají používány dva typy polymerů

- ▮ polysulfonáty, působící v podstatě elektrostaticky, **obr. 2**,

- ▮ polyakryláty, působící zejména stericky, **obr. 3**.

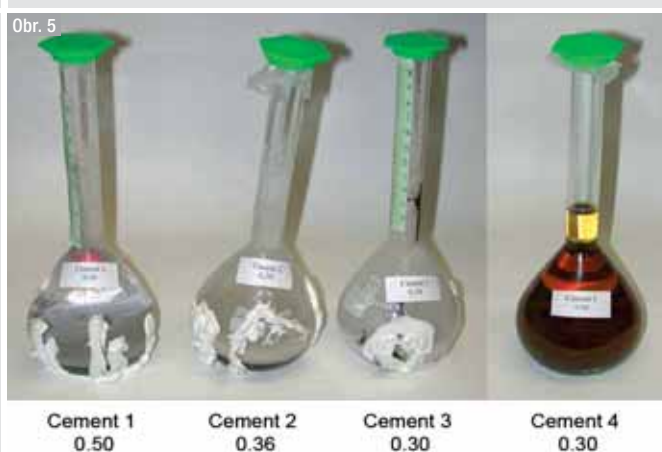
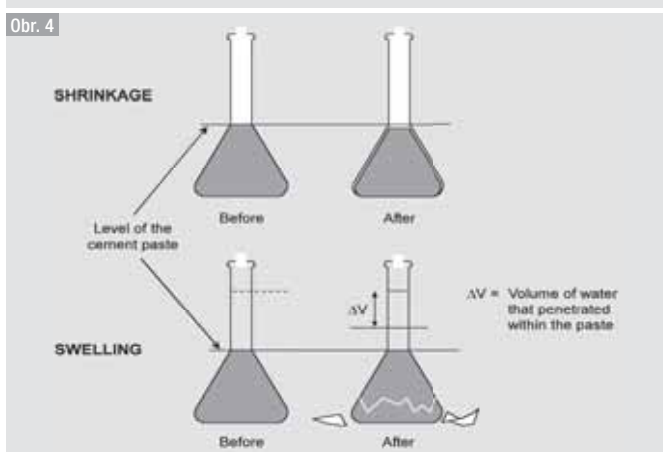
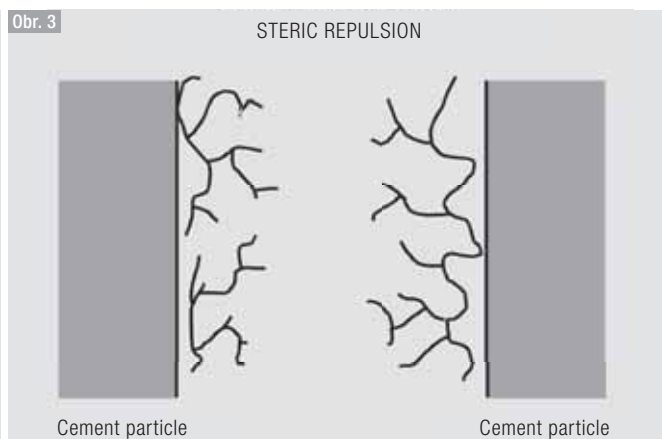
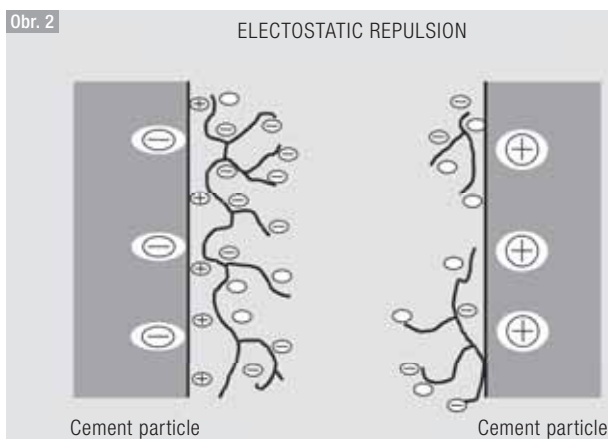
Když molekuly superplastifikátoru obalí zrna cementu, stávají se tato elektricky neutrální, a tím pádem nezachycují tolik vody, která je nyní k dispozici na zlepšení zpracovatelnosti betonu [3]. V současné době je s cementy s nízkým obsahem C_3S a C_2A možné vyrábět plastické betony s $w/c \approx 0,28$ a v některých případech i 0,25.

HYDRATACE PORTLANDSKÉHO CEMENTU

Jednoduchý experiment

Více než před sto lety provedl Henri Le Chatelier velmi jednoduchý experiment, ukazující fyzikální důsledky hydratačních reakcí [4].

Dvě baňky s úzkým vysokým hrdlem naplnil cementovou



pastou, **obr. 4**. Jednu z nich naplnil vodou až po značku, takže hydratační reakce probíhaly pod vodou. Aby zabránil odpařování, uzavřel obě baňky skleněnou zátkou.

Ani ne po 24 hodinách Le Chatelier zjistil, že hladina vody v trubici poklesla a její pokles pokračoval i během následujících dní, načež se ustálil na konstantní hodnotě. Objem vody, která penetrovala během hydratace do cementu, představoval téměř 8 % původního objemu pasty. Navíc Le Chatelier pozoroval, že baňka praskla díky rostoucímu zdánlivému objemu cementové pasty. Na rozdíl od toho současně pozoroval, že se zdánlivý objem pasty tvrdnoucí na vzduchu zmenšil – pasta už baňku zcela nevyplňovala.

Tato zjištění jsou z praktického hlediska nesmírně důležitá. Během hydratace se zdánlivý objem cementové pasty mění v souladu s podmínkami ošetřování.

Je tedy možné konstatovat, že:

- ▮ probíhá-li hydratace na vzduchu, zdánlivý objem cementové pasty klesá, i když (jako v tomto případě – uzavřená baňka) nedochází ke ztrátě hmotnosti,
- ▮ pokud hydratace probíhá pod vodou, zdánlivý objem pasty roste, zatímco určitý objem vody (roven 8 % původního objemu pasty) penetruje do pasty.

Z těchto pozorování Le Chatelier odvodil následující:

- ▮ absolutní objem cementové pasty během hydratace klesá o 8 %, protože hydráty, které vznikají, mají absolutní objem menší než součet absolutního objemu (objem pevných složek) cementu a reagující vody,
- ▮ zdánlivý objem cementové pasty roste nebo klesá podle podmínek ošetřování:
 - ▮ pokud k hydrataci dochází na vzduchu, zdánlivý objem klesá,
 - ▮ pokud hydratace probíhá ve vodě, zdánlivý objem roste.

Tato redukce absolutního objemu se nazývá **chemické smrštění** (ve francouzské literatuře také Le Chatelierovo smrštění). Zmenšení zdánlivého objemu při hydrataci na vzduchu je možné jednoduše vysvětlit. Menisky, které vznikají v pórech, vytvořených díky chemickému smrštění, vyvolávají tahové napětí v pastě, které způsobuje kontrakci zdánlivého objemu pasty. Tento mechanismus je obecně přijímán, ovšem jeden z jeho autorů, F. H. Whittmann, jej podrobil kritice a zdůrazňuje význam i jiných vlivů než pouze působení menisků [5]. Vysvětlit bobtnání pasty, která hydratuje pod vodou, není tak snadné. Může to být způsobeno preferenčním vývojem krystalů, které vykazují rychlý růst (portlandit, ettringit) a působí jako drobné zvedáky, což následně způsobuje růst zdánlivého objemu hydratující cementové pasty.

Kromě toho bylo v poslední době zjištěno, že, pokud hydratace probíhá za semiadiabatických podmínek, dochází k výraznému růstu objemu [6]. Toto výrazné zvětšování počátečního zdánlivého objemu za semiadiabatických podmínek může být velmi významné z hlediska praxe, protože by možná mohlo výrazně snižovat autogenní smrštění vysokohodnotných betonů. To by mohlo mít významný dopad na trvanlivost a následně na udržitelnost konstrukcí z vysokohodnotného betonu.

Pokles zdánlivého objemu cementové pasty ošetřované na vzduchu bez odpařování vody

Pokud neexistuje vnější zdroj vody, která by zaplňovala kapiláry vznikající v důsledku chemického smrštění, vzniknou v těchto kapilárách menisky. Čím jemnější kapiláry, tím vyšší je tahové napětí generované menisky, a tím výraznější bude kontrakce zdánlivého objemu. Tato kontrakce zdánlivého objemu se nazývá **autogenní smrštění**. Protože ve vysokohodnotném betonu je kapilární systém daleko jemnější než v běžném betonu, dochází k objemové kontrakci v důsledku autogenního smrštění dříve a probíhá velmi rychle.

K autogennímu smrštění dochází v každém betonu, protože jde o nevyhnutelný důsledek hydratačních reakcí, pokud tyto probíhají bez vnějšího zdroje vody. V běžném betonu je kontrakce příslušející autogennímu smrštění zanedbatelná, protože menisky vznikají ve velkých kapilárách, kde generují pouze slabá tahová napětí.

Naopak, ve vysokohodnotném betonu vznikají menisky ve velmi jemných kapilárách, takže tahová napětí jsou daleko silnější. Čím nižší je vodní součinitel, tím větší je autogenní smrštění. Kromě toho se autogenní smrštění vyvíjí velmi brzy během hydratačního procesu, kdy mohou tahová napětí způsobit časně popraskání pasty. Tím je snížena trvanlivost vysokohodnotného betonu. Vysokohodnotný beton je sice sám o sobě nepropustný, ale protože je protkán sítí mikrotrhlin, je nepropustný pouze mezi mikrotrhlinami. Konstrukce z vysokohodnotného betonu tedy může být propustná.

V některých betonech je generováno smrštění i menisky, které se tvoří, pokud se kapilární voda z betonu odpařuje – beton vysychá. V běžných betonech dochází k výraznějšímu smrštění od vysychání vody než ve vysokohodnotném betonu, ale toto smrštění nastává obvykle později, když beton již vykazuje významnou tahovou pevnost. Ve vysokohodnotném betonu je smrštění vysycháním nízké, protože průměr menisků v kapilárách byl již dříve zmenšen díky autogennímu smrštění a odpařování vody je tak znesnadněno.

GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ HYDRATAČNÍCH REAKCÍ

Powers [7] studoval kolem roku 1950 hydratační reakce kvantitativně. Ukázal, že, má-li dojít k úplné hydrataci, je

Obr. 2 Schematické znázornění elektrostatického odpuzování | **Fig. 2** Schematic representation of electrostatic repulsion

Obr. 3 Schematické znázornění sterického odpuzování | **Fig. 3** Schematic representation of steric repulsion

Obr. 4 Le Chatelierův experiment, schéma experimentu | **Fig. 4** Le Chatelier experiment, scheme

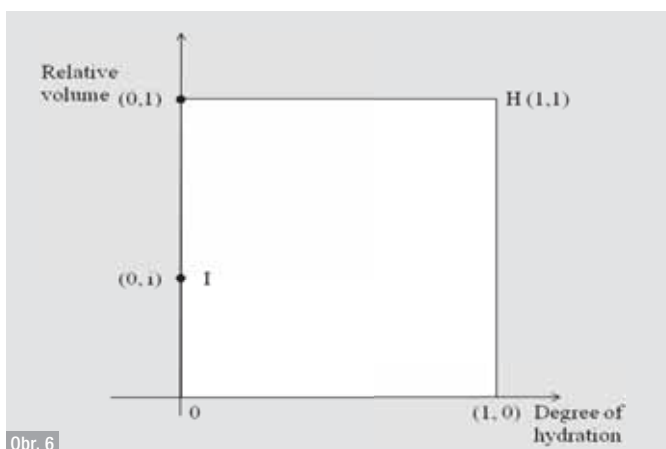
Obr. 5 Opakování Le Chatelierova experimentu | **Fig. 5** Le Chatelier experiment, repetition

nezbytné, aby byl vodní součinitel 0,42. Tato hodnota vodního součinitele je podstatně vyšší než hodnota 0,22, což je hodnota nezbytná k tomu, aby hydratační reakce proběhly z hlediska stechiometrie. Část hydratační vody je totiž pevně fyzikálně vázána na hydrátech. V roce 2001 prezentovali Jensen a Hansen [8] velmi jednoduché grafické znázornění hydratačních reakcí, **obr. 6**. Osa x představuje stupeň hydratace. Během hydratačního procesu roste stupeň hydratace od 0 do 1, kdy jsou veškerá cementová zrna zhydratovaná. Osa y znázorňuje relativní objem cementu a vody v pastě. Předpokládá se, že pasta neobsahuje žádný zachycený vzduch.

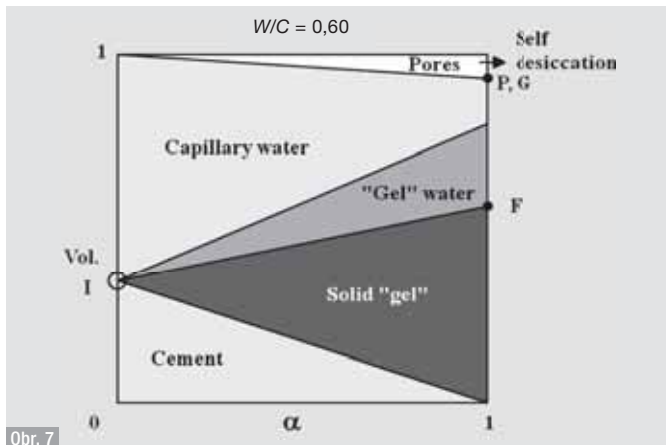
Hydratace pasty s vodním součinitelem 0,60 bez vnějšího zdroje vody

Z **obr. 7** je patrné, že na konci hydratace je zhydratovaná pasta složena ze čtyř komponent:

- I hydrátů



Obr. 6



Obr. 7

- I vody fyzikálně vázané na hydráty
- I kapilární vody (protože vodní součinitel je větší než 0,42)
- I pórů – díky chemickému smrštění je jejich objem asi 8 %

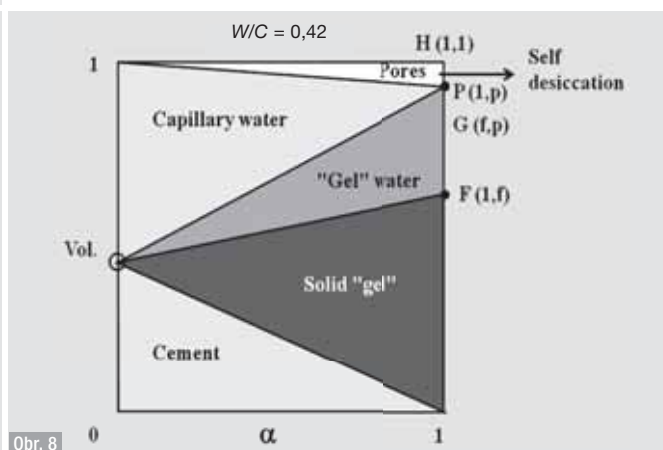
Hydratace pasty s vodním součinitelem 0,42 bez vnějšího zdroje vody

Vodní součinitel 0,42 umožňuje úplnou hydrataci cementu, takže na konci hydratačního procesu v pastě není zbytková kapilární voda, ale pasta má stále pórovitost 8 %, díky chemickému smrštění, **obr. 8**.

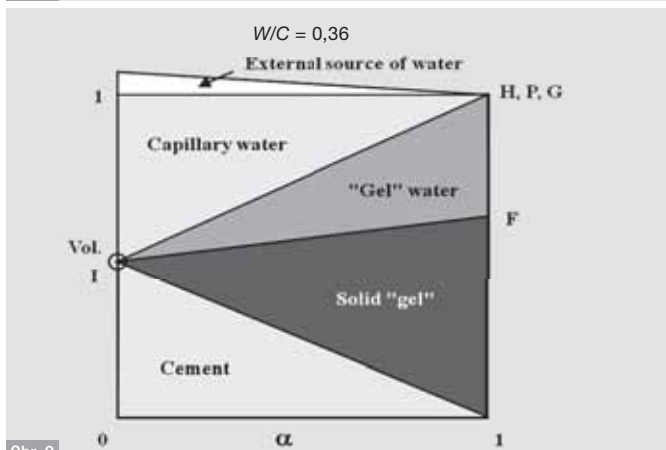
Hydratace pasty s vodním součinitelem 0,36 za přítomnosti vnějšího zdroje vody

V tomto případě Hansen a Jensen ukázali, že vnější voda je schopna podílet se dodatečně na hydrataci cementu (jako v pastě s vodním součinitelem 0,42) a zaplnit 8 % pórů, **obr. 9**. Pokud dojde k úplné hydrataci cementu, je zhydratovaná cementová pasta složena pouze z pevné fáze bez pórovitosti – tzn. pouze z hydrátů a jimi vázané fyzikální vody.

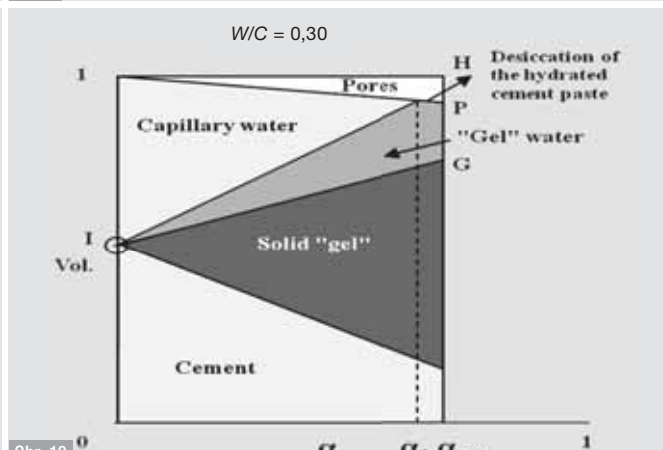
V reálných podmínkách tato situace samozřejmě nikdy nenastane, protože, za prvé, nikdy nedojde k úplné hydrataci cementových zrn (alespoň ne těch hrubších), a za druhé tím, jak se cementová pasta stává stále nepropustnější díky pokračující hydrataci, nemůže vnější voda tak snadno penetrovat do všech částí cementové pasty. V každém případě ovšem betony s vodním součinitelem 0,36, které jsou pečlivě ošetřovány vodou, vykazují velmi nízkou pórovitost, jsou nepropustnější, a tím trvanlivější a z hlediska udržitelného rozvoje výhodnější než běžné betony.



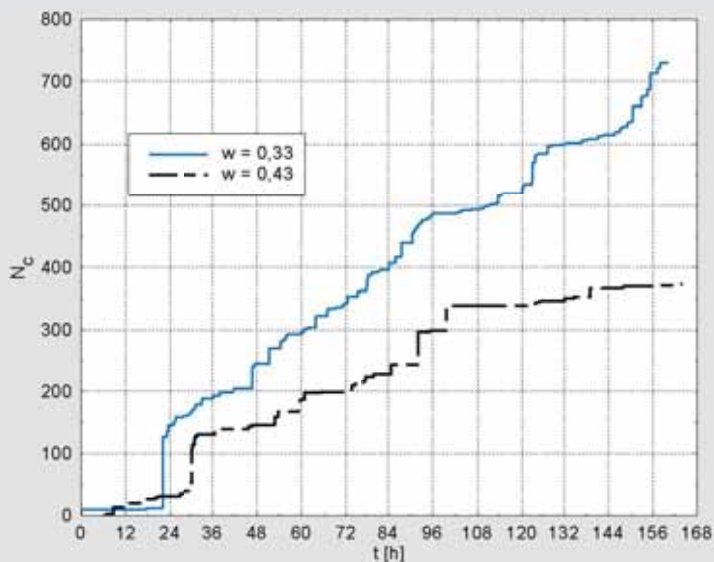
Obr. 8



Obr. 9



Obr. 10



Obr. 11a

Hydratace pasty s vodním součinitelem menším než 0,36 bez vnějšího zdroje vody

Z obr. 10 je zřejmé, že v tomto případě není v pastě dostatek vody k úplné hydrataci všech cementových zrn, takže hydratace se zastaví v důsledku nedostatku vody. Na konci hydratačního procesu je hydratovaná pasta složena z následujících složek:

- ┆ zbylých nezhydratovaných zrn
- ┆ zhydratované cementové pasty
- ┆ adsorbované vody
- ┆ pórovitosti

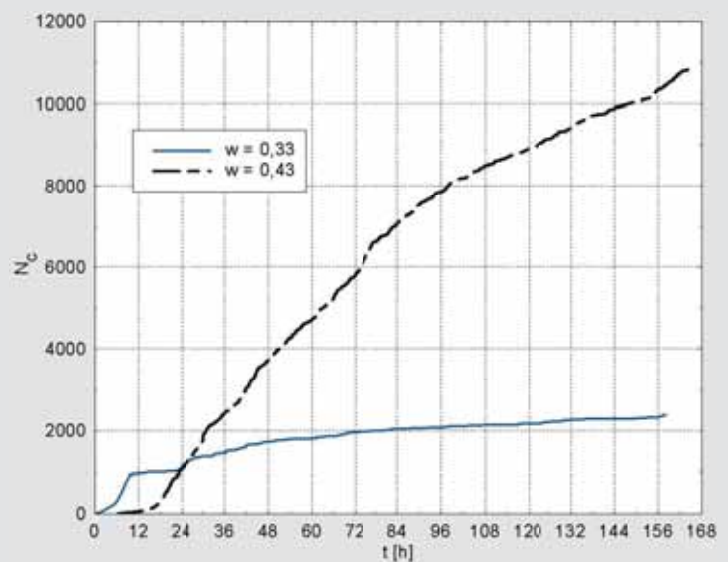
Pokud není dostatek vnější vody, pórovitost nemůže být potlačena. **Proto pro získání trvanlivého vysokohodnotného betonu je nezbytné ošetřovat jej vnější vodou (vnější vzhledem k pastě).**

DETEKCE TRHLIN BĚHEM TVRDNUTÍ BETONU PROSTŘEDNICTVÍM AKUSTICKÉ EMISE

Zajímavý náhled do dějů, které probíhají během tuhnutí a tvrdnutí betonů, poskytuje akustická emise. Tato metoda je schopna zaznamenávat vznik mikrotrhlin, protože jejich tvorba je provázána akustickými signály. Ačkoli problematika detekce signálů není jednoduchá, výsledky jsou poměrně jednoznačné [9].

Na obr. 11 je zachycen vývoj kumulativní četnosti N_c akustických signálů při tuhnutí a tvrdnutí betonů s vodním součinitelem 0,33 a 0,43. Byly sledovány trávce 100 x 100 x 400 mm obalené fólií (bez výměny vody s prostředím) a trávce zrající volně v laboratoři.

Výsledky jsou velmi přesvědčivé. Vysokohodnotný beton s vodním součinitelem 0,33 neobsahuje dostatek vody, obalení fólií není dostatečným ošetřením a díky autogennímu smrštění je během prvních sedmi dní zrání (168 hodin) detekováno velké množství mikrotrhlin. Křivka kumulativní četnosti akustických signálů má navíc stále rostoucí tendenci. Naopak, beton s vodním součinitelem 0,43 obsahuje dostatek vody a zabránění odpařování je



Obr. 11b

dostatečným ošetřováním. Mikrotrhlin vzniká podstatně méně.

Pokud jsou ale trávce ponechány tak, aby zrály volně, tedy bez ošetřování, vzniká v obou případech mikrotrhlin daleko více, zejména v betonu s vyšším vodním součinitelem. Prezentované výsledky zdůrazňují důležitost ošetřování betonu, jak to bylo diskutováno v předešlém odstavci.

OŠETŘOVÁNÍ VYSOKOHODNOTNÉHO BETONU VNITŘNÍM ZDROJEM VODY

Nejlepším způsobem ošetřování vysokohodnotného betonu vnitřním zdrojem vody je nahradit určitý objem kame-

Obr. 6 Schematické znázornění hydratace podle Jensena a Hansena |

Fig. 6 Jensen and Hansen's schematic representation

Obr. 7 Schematické znázornění cementové pasty s $w/c = 0,60$; bez vnějšího zdroje vody | Fig. 7 Schematic representation of cement paste with w/c equal to 0.60 without any external source of waterObr. 8 Schematické znázornění cementové pasty s $w/c = 0,42$; bez vnějšího zdroje vody | Fig. 8 Schematic representation of cement paste with w/c equal to 0.42 without any external source of waterObr. 9 Schematické znázornění cementové pasty s $w/c = 0,36$; s vnějším zdrojem vody | Fig. 9 Schematic representation of cement paste with w/c equal to 0.36 with an external source of waterObr. 10 Schematické znázornění cementové pasty s $w/c = 0,30$; bez vnějšího zdroje vody | Fig. 10 Schematic representation of cement paste with w/c equal to 0.30 without any external source of waterObr. 11 Kumulativní četnosti signálů akustické emise ve vzorcích z betonu s vodním součinitelem $w = 0,33$ a $w = 0,43$; a) trávce obalené fólií, b) trávce zrající volně v laboratoři | Fig. 11 Comparison of cumulative AE events of two concrete specimens with $w/c = 0.33$ and $w/c = 0.43$, a) specimen sealed in PE foil, b) specimen stored in laboratory condition without any curing

niva stejným objemem nasáklého lehkého kameniva. Je lépe použít lehkého drobného kameniva, protože je poréznější než lehké hrubé kamenivo, a to umožňuje nahradit pouze menší objem kameniva. Během míchání jsou pórovitá nasáklá zrna rovnoměrně rozptýlena v betonu, takže v pastě je vždy blízko zdroj vody k cementovým zrnům, **obr. 12**.

Jakmile započnou hydratační reakce, začnou jemné póry, vzniklé díky objemové kontrakci hydratující pasty, nasávat vodu z velkých pórů lehkého kameniva. Menisky v jemných kapilárách hydratující cementové pasty nevznikají, naopak, vznikají velké menisky v pórech lehkého kameniva, ovšem bez jakéhokoli vlivu na autogenní smrštění pasty.

Pokud v kapilárních pórech v hydratující pastě nejsou menisky, negeneruje se v pastě ani tahové napětí a nedochází k autogenní kontrakci.

Jako doplněk k vnitřnímu ošetřování betonu je vždy nezbytné ošetřovat prvky z vysokohodnotného betonu i vnější vodou

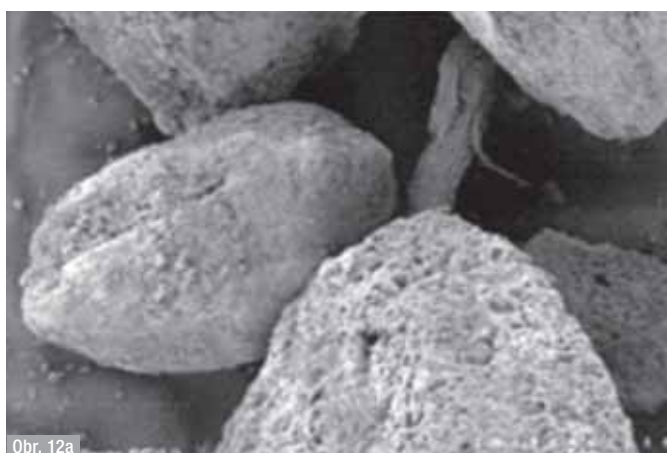
(vnější vzhledem k betonu), aby zhydratoval co nejúplněji cement na povrchu betonu – na jeho pokožce, která je první ochranou vyztužující oceli [10].

Specifikace ošetřování musí být velmi přesná a detailní a ošetřování musí být kontraktorem placeno zvlášť. Osobně se mi velmi líbí specifikace předepsaná městem Montrealem, protože zahrnuje zvláštní platbu za tuto činnost, **obr. 13**.

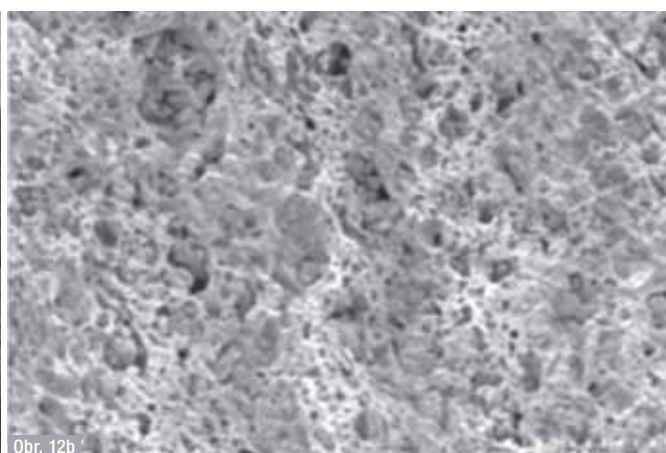
Použití rozprašovacího zařízení, které se běžně používá při péči o květiny, je velmi vhodným účinným vnějším ošetřováním betonu. Toto zařízení není drahé, dá se snadno instalovat a je velmi účinnou zbraní v boji proti různým typům smrštění (plastickému, autogennímu, smrštění vysycháním), **obr. 15**.

VYSOKOHODNOTNÝ BETON A UDRŽITELNÝ ROZVOJ

Je snadné ukázat, že vysokohodnotný beton splňuje požadavky udržitelného rozvoje lépe než běžný beton. Na **obr. 16**



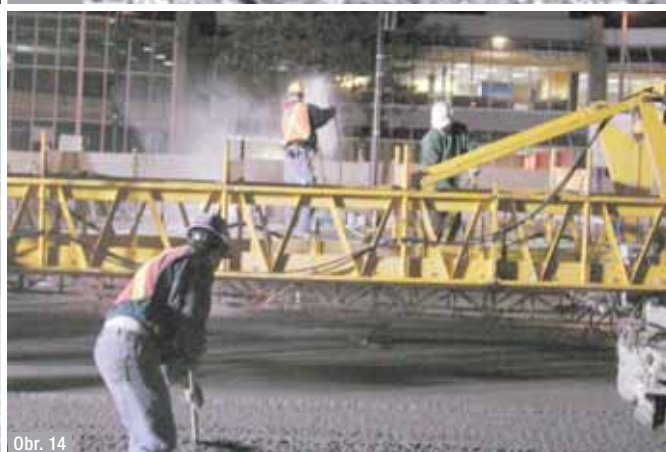
Obr. 12a



Obr. 12b



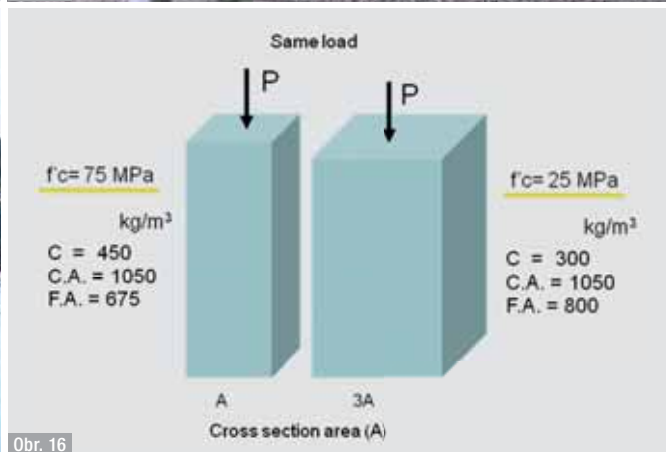
Obr. 13



Obr. 14



Obr. 15



Obr. 16

je znázorněno množství cementu a kameniva, které je použito na zhotovení nevyztužených sloupů, které by měly přenášet stejné zatížení a které jsou vybetonovány z betonů s pevností 25 a 75 MPa.

Abychom mohli oba betony srovnávat, předpokládejme, že na 1 m³ betonu s pevností 75 MPa je třeba použít 450 kg cementu, 1 050 kg hrubého kameniva a 675 kg písku, zatímco na 1 m³ betonu s pevností 25 MPa je třeba použít 300 kg cementu a přibližně stejné množství kameniva.

Protože na sloup z betonu s pevností 25 MPa je třeba třikrát více betonu pro přenesení stejného zatížení, je třeba nakonec použít třikrát více kameniva.

Na sloup z betonu 75 MPa je nakonec třeba použít dvakrát méně cementu a samozřejmě zhruba 5 až 6 l superplastifikátoru na každý m³.

Ve vysokohodnotném betonu je pojiva využito lépe, protože vodní součinitel je nižší a zrna cementu jsou blíže u sebe, takže vazby mezi nimi, které vznikají v důsledku hydratace, jsou pevnější. Kromě toho v současnosti může pojivo na výrobu betonu s pevností 75 MPa obsahovat zhruba 20 až 30 % příměsí. A technologie betonu směřuje k vyšším náhradám portlandského cementu příměsí – až 50 %. Potom by z dávky cementu potřebné na 25MPa beton mohly být vybetonovány čtyři sloupy, samozřejmě s použitím superplastifikátoru.

Při betonáži konstrukčních prvků namáhaných tahovým napětím nebude úspora portlandského cementu při použití vysokohodnotného betonu tak vysoká, ale stále bude velmi významná.

Dalším příkladem, který vyplývá přímo z praxe, může být výroba betonového zábradlí pro lodžie. Běžně se vyrábí v tloušťce 80 mm z betonu třídy C25/30 až C35/45. V rámci řešení projektů CIDEAS a FR TI 1/004 bylo vyvinuto tenké zábradlí, s tloušťkou desky jen 40 mm, s ocelovou výztuží pouze v obvodovém rámu.

Na výrobu byl vyvinut beton C60/75 s polymerními vlákny. I když tento beton obsahuje podstatně více cementu a příměsí, díky úspoře zejména cementu a ocelové výztuže vychází energetická náročnost tenkého zábradlí asi poloviční a stejně tak potenciál globálního oteplení [11]. Environmentální analýza provedená v [11] uvažuje i dopravu materiálů a hotových výrobků. Výhody vysokohodnotného betonu jsou tedy zhodnoceny velmi komplexně.

PŘÍKLADY VENKOVNÍCH KONSTRUKCÍ Z VYSOKOHODNOTNÉHO BETONU

Od vydání knihy Vysokohodnotný beton v roce 1998 byl vysokohodnotný beton použit v mnoha venkovních konstrukcích. Pro tento článek jsem vybral šest z nich, které pokládám za zvláště zajímavé z různých úhlů pohledu:

- Most konfederace v Kanadě
- viadukt v Millau ve Francii
- věž Burj Khalifat v Dubaji
- nádrže na zkapalněný plyn v Osace v Japonsku
- lávku v Sherbrooke v Kanadě
- rozšíření letiště Haneda v Tokiu v Japonsku

Most konfederace v Kanadě

V knize Vysokohodnotný beton je publikováno několik fotografií z výstavby tohoto mostu. Nyní si všimněme dvou aspektů, týkajících se jeho trvanlivosti a jeho rozměrů.

Most konfederace je 13 km dlouhý prefabrikovaný most, který byl postaven z betonu s pevností 83 MPa, s obsahem vzduchu 6 %, aby byla zabezpečena mrazuvzdornost ve zvláště tvrdých podmínkách, v kterých most stojí. Každý z prefabrikovaných nosníků vážil 7 500 t, což je o 300 t více, než kolik váží Eiffelova věž v Paříži. Po třinácti letech vystavení extrémně tvrdým podmínkám je beton stále ve výborném stavu.

Viadukt v Millau

Tento viadukt představuje kompozitní konstrukci se sloupy z vysokohodnotného betonu, ocelovou mostovkou a ocelovými lany. Nejvyšší sloup byl postaven z vysokohodnotného betonu s pevností 60 MPa a je vyšší než Eiffelova věž.

Osm týmů složených z architektů, inženýrů a dodavatelů navrhlo různé alternativy, jak most postavit. Na konci výběrového procesu to byl tým vedený sirem Fosterem a Eiffagem a dodavatelskou firmou založenou Gustavem Eiffelem, který zvítězil v soutěži. Viadukt je nepochybně praktický, splňuje požadavky udržitelného rozvoje a je i příkladem současné architektury a technického umu.

Burj Khalifat Tower v Dubaji

V současnosti 848 m vysoká věž je nejvyšší budovou na světě. Pro srovnání Eiffelovka je pouze 300 m vysoká a Petronas Towers „jen“ 450 m. Prvních 610 m této věže bylo postaveno z čerpaného vysokohodnotného betonu s pevností 80 MPa. Posledních 218 m je tvořeno ocelovou konstrukcí.

Byl to profesor Kamal Khayat a jeho asistenti z university v Sherbrooke, kteří optimalizovali složení betonu z materiálů dostupných v Dubaji. Dodavatelem byla firma Samsung Korea, čerpadlo bylo německé a inženýr zodpovědný za čerpání byl Australan. Jak hezký příklad multinárodní spolupráce!

Hmotnost 100mm hliníkového potrubí, kterým byl beton čerpán do výšky 610 m, byla 50 t a pojmul 12 m³ betonu, než bylo dosaženo horní úrovně.

Profesor Kamal Khayat a jeho asistenti optimalizují složení 80MPa samozhutnitelného vysokohodnotného betonu, který bude použit pro ještě vyšší stavbu v Jeddah v Saudské Arábii. Tato stavba má mít výšku 1 200 m a konstrukce má

Obr. 12 Vnitřní ošetřování (samoošetřování) prostřednictvím nasáklého lehkého jemného kameniva, a, b | **Fig. 12** Internal curing with a saturated lightweight sand, a, b

Obr. 13 Vnější ošetřování betonu. Dostali zvlášť zapláceno za ošetřování, takže to provádějí svědomitě | **Fig. 13** External curing – they are paid to water-cure concrete and they do it diligently

Obr. 14 Vnější ošetřování pomocí membrány nastříkané na povrch čerstvého betonu | **Fig. 14** Application of curing membrane just after concrete casting

Obr. 15 Mížení betonu kvůli zabránění plastickému smrštění | **Fig. 15** Fogging in order to avoid plastic shrinkage

Obr. 16 Vysokohodnotný beton je výhodnější než běžný beton, C – cement, C.A. – hrubé kamenivo, F.A. – jemné kamenivo | **Fig. 16** HPC is more sustainable than NSC

být výhradně z vysokohodnotného betonu. Ve skutečnosti experti z firmy Samsung nechtěli stavět z oceli ani vyšší části Burj Khalifat Tower, protože dva jeřáby byly na stavbě dva měsíce dnem i nocí vytiženy jen dopravou ocelových dílů.

Pro výstavbu 1 200 m vysoké věže v Jeddah jsou zvažovány dva scénáře:

- čerpání betonu do výšky 1 000 m prostřednictvím nového čerpadla, které je v současnosti vyvíjeno v Německu, a doplnění tohoto čerpadla dalším pro výšku mezi 1 000 a 1 200 m,
- použití dvou 600m čerpadel v řadě.

Bude to stejný australský expert, kdo bude dozorovat čerpání. V tak inovativní konstrukci není důvod úspěšný tým měnit.

Zásobník na kapalné plyny v Osace

Původně byl kapalný plyn skladován v izolovaných ocelových tancích, majících betonové krytí pro případ nehody. S tím, jak bylo na umělém ostrovu stále méně a méně prostoru pro výstavbu nových tanků, společnost Obayashi navrhla Osace Gas postavit dodatečně předeprnutý izolovaný betonový zásobník s použitím konvenčního 30MPa betonu, který může pojmout dvakrát více plynu na čtvereční metr.

První zásobník ještě ani nebyl dokončen a Osaka Gas už objednala další, ovšem během stavby druhého zásobníku navrhli inženýři z Obayashi postavit třetí dodatečně předeprnutý zásobník s použitím 60MPa samozhutnitelného betonu. Tento by měl pojmout čtyřikrát více plynu na čtvereční metr umělého ostrova a měl by být vybudován třikrát rychleji.

Při stavbě dvou prvních zásobníků z betonu s pevností 30 MPa a se sednutím kužele 100 až 150 mm bylo nutné omezit každou dodávku betonu na 1,2 m³ a využít velkého množství pracovníků na vibraci betonu. Při použití 60MPa samozhutnitelného betonu nebude nutné vibrovat. Zkrácení doby výstavby se odrazí v nižších nákladech daleko výrazněji, než vyšší cena samozhutnitelného betonu s pevností 60 MPa.

Lávka v Sherbrooke, Kanada

Beton z reaktivních práškových složek (Reactive Powder Concrete – RPC) představuje maltu či pastu s velmi nízkým vodním součinitelem a ocelovými vlákny. Pierre Richard, objevitel reactive powder concrete, pracuje s tímto typem malt podobně jako se železobetonem, protože rozměrově

Tab. 1 Složení betonu na bázi reaktivních práškových složek (RPC) pro lávku v kanadském Sherbrooke | **Tab. 1** Composition of concrete based on reactive powder components (RPC) used for the footbridge in Sherbrooke, Canada

Složky	Množství [kg/m ³]
cement (typ II dle ASTM C 150)	705
voda	195
mikrosilika	230
písek	1 010
drcený křemen	210
ocelová vlákna	190
superplastifikátor (na bázi polysulphonátů)	19,8

Literatura:

- [1] Bentz D. P. (1997): Three-dimensional Computer simulation of cement hydration and microstructure development, J. Amer. Ceram. Soc., 80 (1), 3–21
- [2] Bentz D. P., Aitcin P.-C. (2008): The hidden meaning of water-to-cement ratio, Concr. Inter., 30(5), 51–54
- [3] Aitcin P.-C. (2008): Binders for Durable and Sustainable Concrete, Taylor and Francis, London, U.K., 500 p.
- [4] Aitcin P.-C. and Mindess S. (2011): The Sustainability of Concrete, E and FN SPON, London, UK., 301 p.176
- [5] Wittmann F. H. (2009): Heresies on shrinkage and creep mechanisms, Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Concrete Structures, Tanabe et al (eds), Taylor and Francis Group, London, ISBN 978-0-415-48518-1, p. 3–10
- [6] Duran-Herrera A., Petrov N., Bonneau O., Khayat K. and Aitcin, P.-C. (2009): Autogenous Control of Autogenous Shrinkage, ACI SP 256, ACI, Farmington Hills, Michigan, pp. 1–12
- [7] Powers T. C. (1968): The properties of fresh concrete, John Wiley and Sons Inc., New York, 664 pp.
- [8] Jensen O. M., Hansen P. F. (2001): Water entrained cement based materials, Part I, Cement and Concrete Research, V.31, No.4, pp. 647–654
- [9] Topolář L., Pazdera L., Bílek V., Smutný J. (2011): Applying Acoustic Emission Method at Monitoring of Lifetime Concrete Structure, Proc. of 7th CCC (fib) Congress Innovative materials and technologies for concrete structures, Balatonfüred, Hungary, ISBN 978-963-313-036-0, pp. 167–170
- [10] Morin R., Haddad G., Aitcin P.-C. (2002): Crack-free high performance concrete structures, Concr. Inter., V. 24, No.9, pp. 43–48
- [11] Bílek V., Fiala C., Smolka H., Špalek R., Miklenda J., Horehled' J. (2011): Tenké zábradlí z vysokohodnotného vláknobetonu, Sb. konf. 18. Betonářské dny 2011, ČBS Servis, ISBN 978-80-87158-30-2, str. 369–374

relace mezi vlákny a nejhrubšími zrny písku, použitými v RPC, jsou podobné, jako poměry mezi ocelovou výztuží a nejhrubšími zrny kameniva v běžných betonech.

V **tab. 1** je uvedeno složení RPC použitého pro stavbu lávky v Sherbrooke. Je vidět, že obsahy cementu a křemičitých úletů jsou velmi vysoké ne kvůli hydrataci maximálního množství cementu ale spíše kvůli optimalizaci křivky zrnitosti různých práškových materiálů použitých pro výrobu RPC. Kromě toho vodní součinitel w/c , pokud má toto číslo v RPC smysl, je velmi nízký, aby se zmenšila vzdálenost mezi jednotlivými částicemi pojiva spojenými mechanickými vazbami, až se hydratace nedostatkem vody zastaví. Obsah ocelových vláken je také velmi vysoký a poskytuje RPC určitou pseudo-ductilitu. Ošetřování RPC je rovněž zvláštní – dva dny zral při okolní teplotě a další dva dny ve vodě teplé 90 °C pro dosažení maximální hydratace všech přísad v RPC.

Pevnost RPC byla 55 MPa po 24 h a 199 MPa po jeho ošetření ve vodě teplé 90 °C. Tlaková pevnost RPC, vtačeného do nerezových ocelových trubek použitých na diagonály, byla 350 MPa a to díky Poissonovu efektu 3D sevření (confinement) betonu. Tato tlaková pevnost je ekvivalentní pevnosti oceli.

V lávce v Sherbrooke není jen výztuž z ocelových vláken, ale i předem předeprnuté a dodatečně předeprnuté kabely. Lávka byla postavena podobně jako ocelová konstrukce.

RECKLI®

DESIGN YOUR CONCRETE



RECKLI Strukturální matrice

pro všechny oblasti betonových staveb

Jak pro prefabrikáty, tak pro monolitní stavby.

Vyžádejte si náš katalog a obrázkové publikace s referencemi.

RECKLI GmbH

Mgr. Iveta Heczková · Gewerkenstr. 9a · 44628 Herne · Germany · Tel. +49 2323 1706-26 · Fax +49 2323 1706-50
Mobile DE: +49 151 61339553 · Mobile CZ: +420 724 888 718 · www.reckli.de · iheczkova@reckli.de

Díky velmi vysoké pevnosti vysokohodnotného betonu je možné ukázat, že RPC konstrukce splňují požadavky udržitelného rozvoje lépe než podobné konstrukce z běžného nebo vysokohodnotného betonu.

Rozšíření letiště Haneda v Tokiu

Přistávací a pojezdové dráhy při rozšiřování letiště Haneda jsou vybudovány nad mořem. Nosníky přistávací dráhy byly prefabrikovány během roku a půl ze železobetonu s tlakovou pevností 30 MPa s nasazením 145 dělníků. Stejná plocha pojezdové dráhy z prefabrikovaných desek z betonu na bázi jemnozrných reaktivních složek byla vyrobena za stejnou dobu s nasazením jen 105 pracovníků s použitím Ductalu – produktu pro přípravu RPC, registrovaného pod ochrannou známkou firmou Lafarge.

Úspory plynoucí z toho, že rok a půl pracovalo o čtyřicet pracovníků méně, bohatě kompenzovaly vyšší cenu Ductalu.

VZDĚLÁVÁNÍ A TRANSFER ZNALOSTÍ

Profesor Aitcin konstatuje: „Pamatuji si, jak mi před třiceti lety lidé ze stavebních firem v Quebecu říkali, že stavební průmysl nepotřebuje pracovníky s inženýrskými nebo doktorovými tituly. Ovšem z šedesáti pěti inženýrů a doktorů, které jsem během svého třicetipětiletého působení na Universitě v Sherbrooke školil, pracují jen čtyři jako vysokoškolské učitelé

a všichni ostatní jsou v praxi. Jsou tam spokojení a úspěšní a někteří dosáhli poměrně rychle vysokých postů. V současnosti je jeden z nich ředitelem a další zástupcem ředitele ve stavebních společnostech.“

Tento trend směrem k větším technologickým znalostem v praxi bude pokračovat, protože stavební průmysl bude vyžadovat vzdělané pracovníky pro budoucí vývoj. Kromě toho přechod končících studentů do stavebních firem znamená transfer technologií mezi světem výzkumníků a světem dodavatelů. Tím roste konkurence a soutěživost a zvyšuje se udržitelnost rozvoje naší – tedy stavební infrastruktury.

Prof. Pierre-Claude Aitcin
Department of CE
Université de Sherbrooke
Canada

Ing. Vlastimil Bílek, Ph.D.
ŽPSV, a. s.
Křížkova 68, 660 90 Brno
e-mail: bilek@zpsv.cz