



Obr. 1 Letecký záběr VD Orlík [4] ■
Fig. 1 Aerial view of the Orlík dam [4]

1

ANALÝZA BETONU Z TĚLESA PŘEHRADY ORLÍK PO PADESÁTI LETECH ■ ANALYSIS OF CONCRETE FROM THE BODY OF THE ORLÍK DAM AFTER FIFTY YEARS

Ondřej Zobal, Lubomír Kopecký,
Pavel Padevět, Vít Šmilauer,
Zdeněk Bittnar

Článek pojednává o betonu tělesa přehrady vodního díla Orlík, a to více jak padesát let od dokončení. Při výstavbě se z důvodu omezení maximálních teplot při tvrdnutí betonu použil elektrérenský popílek v kombinaci se struskoportlandským cementem. Účelem zkoumání bylo odhalit a stanovit možné látkové, fázové a strukturní změny betonu, které lze po tak dlouhé době předpokládat. Charakteristická pevnost betonu v tlaku vzrostla z 10,1 MPa ve 28 dnech na 38,7 MPa po padesáti letech. ■ The paper characterizes concrete of the Orlík dam more than fifty years after construction. Fly ash in combination with slag-portland cement was used to mitigate maximum temperatures.

Concrete was analysed for potential changes in structure, phase composition and physical-mechanical properties, due to long time period after construction. The characteristic concrete compressive strength increased from 10.1 MPa at 28 days to 38.7 MPa at 50 years.

VODNÍ DÍLO ORLÍK

Vodní dílo (VD) Orlík stále náleží k nejvýznamnějším stavbám svého druhu uskutečněným na území České republiky. Jako největší vodní dílo na našem území (obr. 1) je součástí tzv. Vltavské kaskády, kam se řadí další přehradní jezera Lipno, Hněvkovice, Kořensko, Kamýk, Slapy, Štěchovice a Vrané. Nejdůležitější účely tohoto VD jsou minimalizace průtoků na Vltavě a ochrana sídel na řece před katastrofálními záplavami, dodávka elektrické energie v interva-

lech vysokých odběrů ze sítě, dodávka povrchové vody, rekreace a vodní sporty, plavba v nádrži a rybí hospodářství [1].

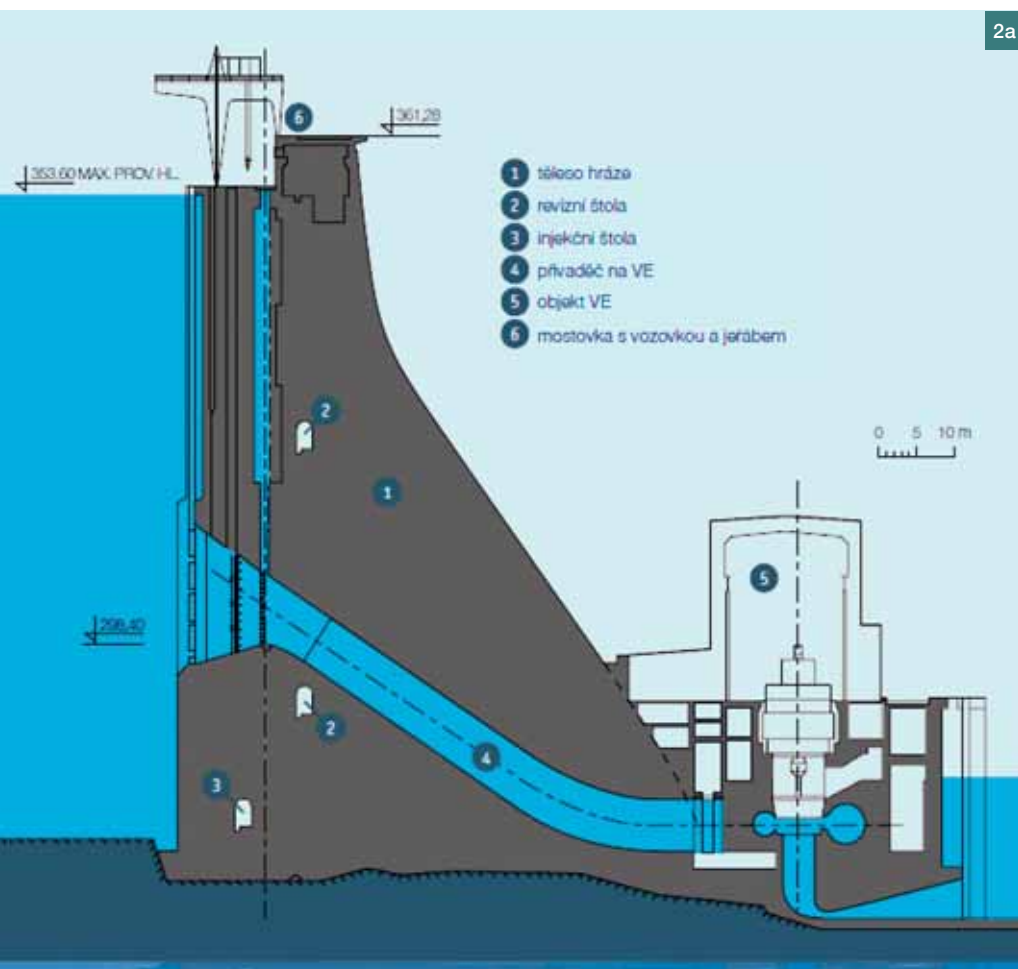
V období výstavby, mezi léty 1956 až 1961, bylo VD Orlík jednou z nejnákladnějších staveb: tehdejší cena dosahovala 1 miliardy korun. Stavba pohltila velké objemy stavebních materiálů. Návrh díla a zejména jeho prováděcí projekt byly během přípravy konzultovány též s externími specialisty, zejména z ČVUT v Praze [2, 3].

Přehradní těleso VD Orlík

Vodní dílo Orlík tvoří tři části – těleso přehrady, vodní elektrárna a plavební zařízení – zdymadlo s výtahem (obr. 2).

Těleso přehrady je přímá, tížná betonová hráz, vysoká max. 81,5 m a v ko-

Obr. 2 a) Příčný řez přehradním tělesem Orlické přehrady [1], b) pohled na těleso přehrady – vzdušná strana, v popředí těleso lodního výtahu, vpravo dole budova elektrárny, c) revizní štola v tělese přehrady ■ Fig. 2 a) Cross section of the Orlik dam [1], b) the body of the dam, – aerial side, in the front the body of the ship elevator, on the bottom right the power plant building, c) inspection gallery in the body of the dam



runě dlouhá 450 m [5]. Objem materiálu na betonáž samotného tělesa byl obrovský, jednalo se o 923 000 m³ betonu. Dokonalý harmonogram prací a promyšlená technologická řešení však umožnila vybetonovat 83 % kubatury již za třicet dva měsíců [3].

Složení betonu hráze

Během betonáže bylo složení betonu hráze upravováno (viz kapitola Omezení hydratačního tepla). Do původní receptury byl přidáván elektrárenský popílek. V tab. 1 je uvedeno složení konečných receptur betonu.

Výroba betonu pro stavbu hráze

Výroba betonu byla plně mechanizována a automatizována, pracovalo se po dvou jedenáctihodinových směnách, pět a půl dne v týdnu. Podle projektu bylo potřeba vyrábět 40 000 m³ betonu měsíčně, celkově tak bylo namícháno přes 1 mil m³ směsí pro výrobu betonu.

Protože nebyly k dispozici místní zdro-

je kameniva a ani štěrk z okolních vltavských teras nebyl vhodný (malé objemy, horší vyzrállost sedimentu), byl dovážen labský štěrkopísek, tehdy průběžně těžený při úpravách a prohlubování koryta Labe k zabezpečení říční dopravy plavidly stále větších rozměrů a ponoru. Toto kamenivo bylo vyříděné do pěti frakcí (0–3, 3–10, 10–25, 25–50, 50–100 mm) a na stavbu dopravováno po železnici. Celkem bylo dovezeno více jak 1,2 mil m³ říčních štěrků a dalšího, doplňkového kameniva.

Z cementárny v Králově Dvoře bylo na místo výstavby přepravováno 220 000 t cementu. Jeho deklarovaná kvalita však značně kolísala, proto byla v místě výstavby zřízena kontrolní laboratoř, jež provedla přes 9 000 různých zkoušek cementu a na 30 000 nedestrukčních měření vlastností betonu během hydratace, a to před i po uložení.

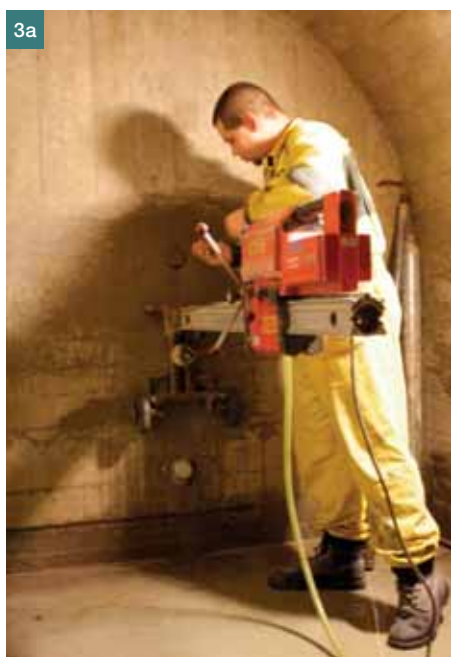
Ojedinelý byl způsob kontinuální výroby betonu ve třech horizontálních míchačkách. Na stavbu bylo třeba rych-

le dodávat velké objemy betonu, navíc v celkem deseti různých druzích. Hrázové lamely byly oddílovány po 15 m a byly široké až 30 m. Kubatura jedné lamely činila až 900 m³. Beton byl postupně zhutňován v 500 mm mocných vrstvách, pomocí „dvoumužných“ vibrátorů o váze 86 kg. Pracovaly s frekvencí 9 000 kmitů/min. [2, 3].

Omezení hydratačního tepla

Během počáteční betonáže hráze (cca pět bloků, 130 000 m³ betonu) měla směs pro výrobu betonu běžné složení, s aplikací pouze strusko-portlandského cementu. Po vybetonování a při příchodu chladnějšího období se začaly na blocích objevovat trhliny. Trhliny byly většinou 1 mm široké a zasahovaly do hloubky 1 maximálně až 3 m.

Příčinou trhlin byly rozdílné teploty mezi povrchem a vnitřní partií masivní konstrukce, kdy byl zjištěn teplotní rozdíl 22,5 °C v hloubce 6 m. Teplotními čidly byla naměřena povrchová teplota



0 °C, avšak uvnitř bloku +40 °C, a to v betonu starém 30 dní od zhotovení. Příčinou vzniku trhlin byl nadměrný vývin hydratačního tepla. Pro jeho snížení se tehdy používaly následující metody: chlazení záměsové vody, přidávání ledové krupice do betonové směsi, nebo chlazení uloženého betonu soustavou trubek s proudící studenou vodou [2, 3].

Z ekonomických, časových a zásobovacích důvodů nebyla ani jedna varianta použita. Naopak byl zvolen jiný postup, a to nahrazení části slinku elektrárenským popílkem. Tato aplikace se úspěšně používá i v současnosti pro masivní konstrukce, jak ukazují příklady z praxe i modely [6].

V počátečním stadiu hydratace po-

pílek nereaguje a nárůst teploty je dán pouze uvolňováním hydratačního tepla vlastního cementu, jehož množství v daném případě bylo redukováno ve prospěch popílku. Popílek vstupuje do děje až v etapě vývoje $\text{Ca}(\text{OH})_2$, při hydrataci alitu a belitu a vzniku prvních C-S-H gelů, formou pomalé pucolánové reakce s $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Teprve, až když se alkalinita prostředí genézí hydroxidu vápenatého výrazně zvýší ($\text{pH} > 11$), nastává částečné rozpouštění aluminátových komponent popílku – v první řadě struskovitých částic. Při této reakci se zároveň spotřebovává $\text{Ca}(\text{OH})_2$, uvolňovaný hydratací cementového slínku.

Nově vzniklé pojivo téměř neobsahuje volný $\text{Ca}(\text{OH})_2$, který by byl jinak za-

stoupen v hojném množství. Přídavek popílku má několik příznivých efektů:

- menší množství hydratačního tepla na objem betonu,
- úsporu cementu,
- spolu s hrubě mletým slinkem též přispěl k zvýšení dlouhodobé pevnosti takto připraveného betonu.

Odběry vzorků betonu pro instrumentální analýzy a měření

Ve štolě a na povrchu tělesa přehrady byly provedeny jádrové vývrty o průměru 80 mm a délce až 3 m, které odebraly 3krát jádrový a 3krát obalový beton. Na obr. 3 je ukázka odvrtávání jádrového betonu v jedné ze štol. Navíc byla získána tělesa o průměru 300 mm z jiného staršího odvrtu. Vzorky o prů-

Tab. 1 Složení pojiva betonu na VD Orlík, [2]
 ■ Tab. 1 Composition of the binder for the Orlík dam, [2]

Betón	Složení [kg/m ³]	
	Struskoportlandský cement	Popílek
B170-obalový	200	50
B80-jádrový	130	50

Obr. 3 a) Odběr jádrového vývrty o průměru 80 mm v revizní štolě přehrady, b) detail betonu vzdušné strany hráze s otvorem po odběru jádrového vývrty ■

Fig. 3 a) Core drilling of 80 mm in diameter in the gallery, b) detail of concrete from the aerial side of the dam with a hole after removing the core

Obr. 4 Jádra o průměru 80 mm

■ Fig. 4 Cores with 80 mm in diameter



měru 80 mm byly použity pro chemické a mikroskopické analýzy (obr. 4). Velké vzorky sloužily pro stanovení pevnosti betonu v tlaku a pevnosti v příčném tahu.

Mikroskopická a fázová analýza

K měření byl využit elektronový mikroskop FEI XL-30-ESEM vybavený energeticky disperzním mikroanalýzátozem s Si(Li) detektorem (EDAX). Snímání ve zpětně odražených elektronech (BSE) poskytlo důležité informace o distribuci stávajících fází, tedy potvrzení přítomnosti portlanditu, charakter a zrnitost zbytkových slinkových minerálů, obraz porozity, kvalitu stykové zóny mezi kamenivem a cementovým tmelem a indikaci reliktních částic popílku. Důležitými poznatky byly též charakter zrnitosti a složení štěrkopísků. Prvková analýza poskytla podrobnou informaci o látkovém složení, resp. její údaj v at. % pak nepřímý odhad zastoupení minerálních složek.

Na SEM-BSE mikrofotografiích nábrusů betonu z konstrukce přehrady Orlík (obr. 5) je patrný vysoký stupeň zhutnění čerstvého betonu – porozita zavlečeným vzduchem je minimální, také se nevyskytují póry po se-

gregované vodě. Velká bílá svítící zrna (v BSE) jsou zbytky nezhydratovaného slinku – většinou belitu (C_2S), podružně též alitu (C_3S) a kalcium-aluminoferitu (C_4AF). Cement byl dle dostupných informací mlet nahrubo záměrně, hrubé zrna cementu efektivně zpomaluje hydrataci.

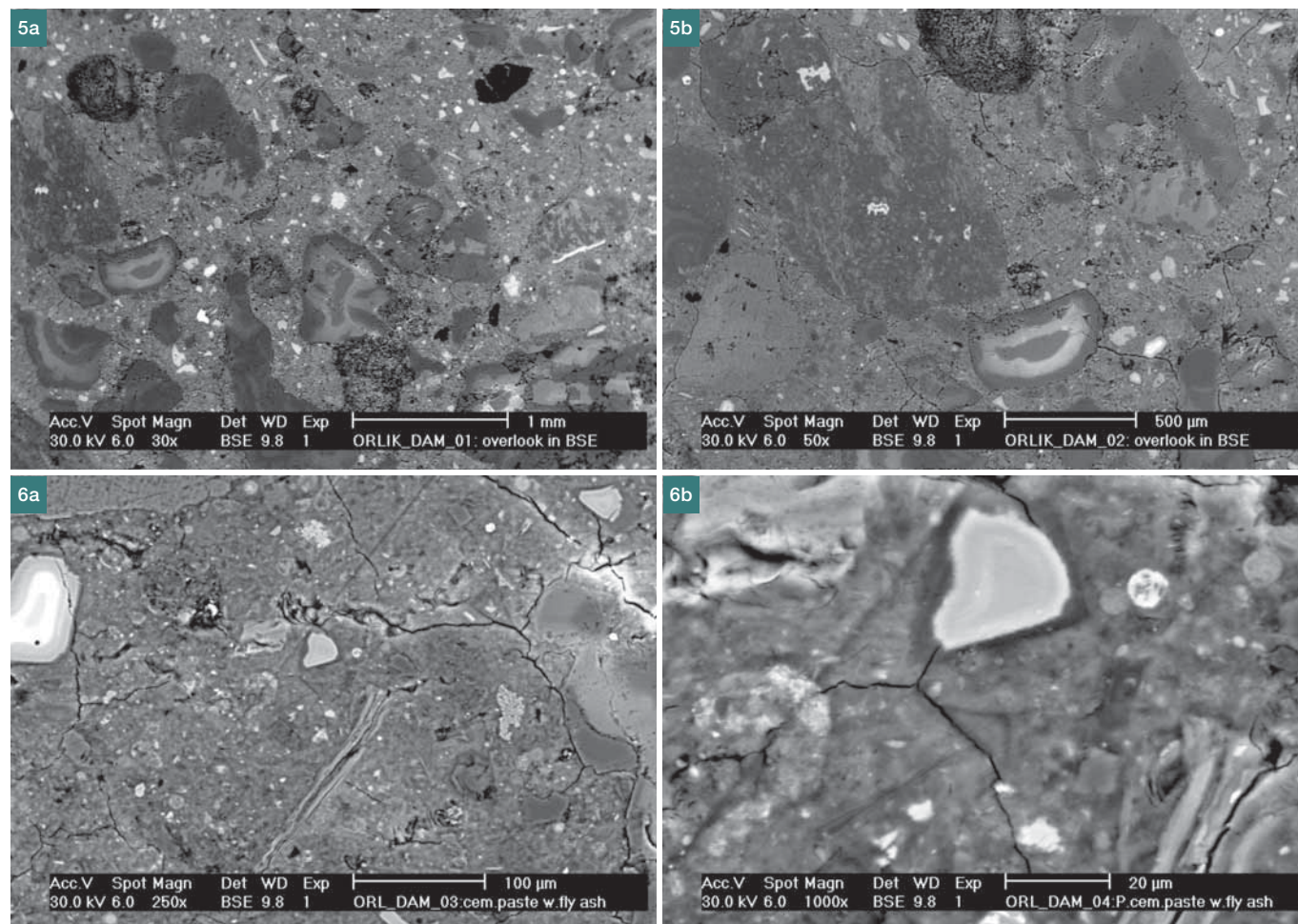
Zajímavý je též charakter kameniva – jak bylo uvedeno, byly to labské štěrky těžené přímo z říčního koryta, tedy ne tzv. „kopané“ štěrkopísky ze starších labských teras. Míra opracování je značná – převážně oválné valouny, zejména však zastoupení zrnitostních frakcí rovnoměrně vykrývá zrnitostní křivku od nejmenších zrn (pouze křemen, zirkon, monazit, ilmenit – tedy transportu odolávající minerály), v řádu setin až desetin milimetrů, až po velké valouny téměř desetimetrové. Petrografické složení štěrků (tzv. valounová analýza) prozrazuje vyzrálý sediment, tvořený dobře opracovanými valouny velice odolných hornin (kvarcitů, lyditů, metaprachovců, doleřitů, granulitů).

V případě labských štěrků, těžných v oblasti před soutokem s Vltavou, se uplatňuje ještě jeden faktor výborne vyzrálosti sedimentu – tedy, že veš-

keré toto kamenivo pochází z horních toků Labe a jeho přítoků: Úpy, Orlice, Metuje, Cidliny aj. Střední a dolní úseky těchto toků, zejména labského, totiž protékají oblastí české křídové tabule vyrovnanou spádovou křivkou a do „portfolia“ již nepřibírají další – měkké horniny.

Právě tyto dva faktory, tedy spojitá křivka zrnitosti a sedimentologicky velmi vyzrálý říční štěrk, umožnily mj. významně redukovat nutné množství cementu. Mezerovitost volně loženého štěrkopísku je tedy relativně malá. Spolu s aplikací strusko-portlandského cementu s přísadou elektrárenského popílku tak byl zpomalen proces hydratace. Produkce hydratačního tepla byla rozložena do delšího časového úseku, zejména však nenastal rychlý nárůst teploty v iniciačním stadiu. To byla nutná podmínka betonáže hráze v tak objemných segmentech.

Samostatně se cementové pojivo prakticky nevyskytuje (obr. 6). V oblastech mezi zrny štěrkopísku jsou v cementovém pojivu stále drobná zrnka křemene nejmenší zrnitostní frakce a také nezreagované částice popílku: kuličky Fe, popř. Fe-oxidů, dále mullitu, popř. křemenného skla. Zá-



sadním poznatkem je nepřítomnost portlanditu, jenž je zcela běžný v betonech na bázi portlandských cementů, bez dalších přísad. Portlandit, vznikající při hydrataci slinkových minerálů (alitu, belitu) pucolánovou reakcí, „spotřeboval“ struskové částice popílku – tedy částice s největším měrným povrchem.

„Čisté“ partie C-S-H gelu (HD-CSH) pouze lemují nezhydratované belity. Právě hydratace slinkových minerálů, a po ní, s malým časovým odstupem, následující alkalická reakce popílků v přechodně silně alkalickém prostředí (pH > 12), dala vzniknout dvěma geneticky různým typům pojiva. Tyto dva vzájemně se podmiňující procesy, které nedovolily rozvoj pórů s portlanditem a ettringitem, jsou také zdrojem poměrně vysokých pevností betonu přehradního tělesa.

Objemová hmotnost a volné otevřené póry

Pro výpočet objemové hmotnosti byly okraje jádrových vývrtů zarovnaný. Bezprostředně po vývrtu byla jádra uchovávána v uzavřených novodurových trubkách, aby nedošlo ke ztrátě původní vlhkosti.

Ze zjištěné objemové hmotnosti pů-

vodních přirozeně vlhkých vzorků vychází, že rozdíl mezi objemovou hmotností obalového betonu B170 a jádrového betonu B80 je minimální, průměrně 2 411 kg/m³. Lze konstatovat, že míra substituce slinku popílkiem neměla na objemovou hmotnost vliv.

Jádrové vývrtky o průměru 80 mm byly rozřezány diamantovou pilou na plátky o tloušťce 3 až 5 mm (obr. 4). Celkem byly zhotoveny tři skupiny vzorků po deseti kusech. Takto připravené vzorky byly po dobu deseti měsíců uloženy při stálé teplotě 20 °C ve vodě, dokud nedošlo k ustálení hmotnosti. Poté byly po dobu dvou měsíců umístěny do sušárny a při teplotě 105 °C vysušeny do ustálení hmotnosti. Přepočtem bylo zjištěno, že otevřená porozita pro vodu betonu B170 činí 5,3 % a u jádrového betonu B80 5,2 %. Z pohledu nasákavosti se jedná o velmi kvalitní beton, patrně vysoce mrazuvzdorný.

Pevnost v tlaku

Z válců o průměru 300 mm byly vyřezány vodou chlazenou diamantovou pilou krychle o hraně 200 mm a byla provedena zkouška pevnosti v tlaku jádrového betonu B80. Test byl pro-

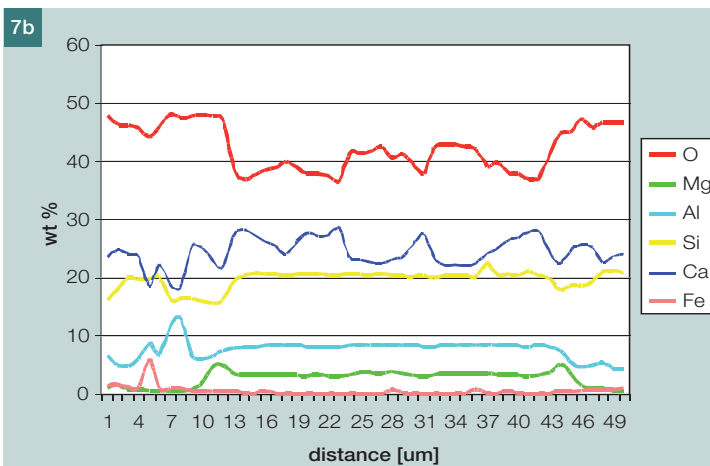
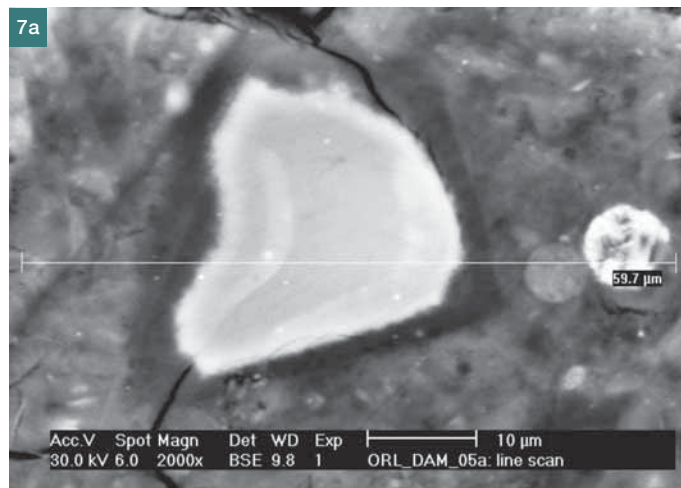
Obr. 5 Přehledné snímky nábrusů betonu z vývrtu, BSE zobrazení ve zvětšení 30krát, resp. 50krát ■ Fig. 5 Polished sections from cores in BSE, 30times and 50times magnification

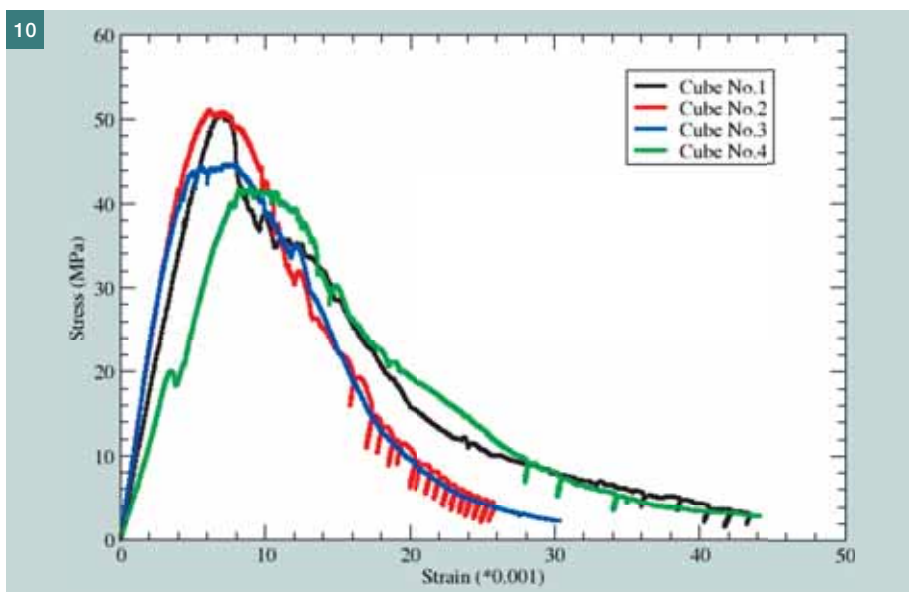
Obr. 6 Mikrostruktura cementového pojiva, BSE, zvětšení 250krát, resp. 1 000krát, trhliny jsou artefakty vysoušení vzorku při přípravě ■ Fig. 6 Microstructure of the cement binder, BSE, 250x and 1 000x magnification, cracks are artefacts from sample preparation.

Obr. 7 a) Nezhydratované zrno belitu se zónou HD-CSH, b) prvková liniová analýza EDS ■ Fig. 7 a) Unhydrated belite grain with HD-CSH rim, b) EDS line analysis of elements

Obr. 8 Krychle o hraně 200 mm před zkouškou pevnosti v tlaku ■ Fig. 8 Cube 200 mm prior to the compressive stress test

Obr. 9 Krychle po zkoušce pevnosti v tlaku ■ Fig. 9 Cube 200 mm after the compressive stress test





Obr. 10 Pracovní diagram pevnosti betonu v jednoosém tlaku ■ Fig. 10 Stress-strain diagram for the uniaxial compressive test

Obr. 11 Vývoj pevnosti betonu B80 v čase ■ Fig. 11 Evolution of the compressive strength of B80 concrete

Obr. 12 Zkušební těleso připravené na zkoušku pevnosti betonu v příčném tahu ■ Fig. 12 Specimen prior to the splitting tensile test

Obr. 13 Rozlomený zkušební vzorek po zkoušce pevnosti betonu v příčném tahu ■ Fig. 13 Specimen after the splitting tensile test

Obr. 14 Pracovní diagram zkoušky pevnosti betonu v příčném tahu ■ Fig. 14 Stress-strain diagram of the splitting tensile test

Tab. 2 Časový vývoj charakteristické pevnosti betonu z Orlické přehrady v tlaku [2] ■
Tab. 2 Time evolution of the characteristic concrete compressive strength of the concrete from the Orlik dam

Betón	Charakteristická pevnost betonu v tlaku ve dnech [MPa]					
	7	28	90	100	360	18 615
B80 (C8/10)	5,2	10,1	18,0	20,7	23,4	38,7

veden na čtyřech krychlich. Obr. 8 zachycuje těleso připravené ke zkoušce, obr. 9 ukazuje těleso zdeformované po zkoušce. Naměřené hodnoty pevnosti v tlaku se pohybovaly mezi 42 až 51 MPa. Obr. 10 znázorňuje pracovní diagramy.

Z literatury se dochovaly hodnoty pevnosti betonu v tlaku na krychlich o hraně 200 mm zkoušených při zhotovování díla [2]. V tab. 2 jsou uvedeny charakteristické pevnosti v tlaku betonu B80 (v současnosti třída C8/10) během prvního roku, které jsou doplněny o hodnotu po padesáti letech (výpočet proveden dle ČSN EN 1990).

Vývoj pevností v čase lze názorně shrnout do lineárního grafu s logaritmickou časovou osou (obr. 11). Odchylka od logaritmického průběhu je velmi malá. Graf se týká betonu B80, kde popílek představoval 28 % pojiva.

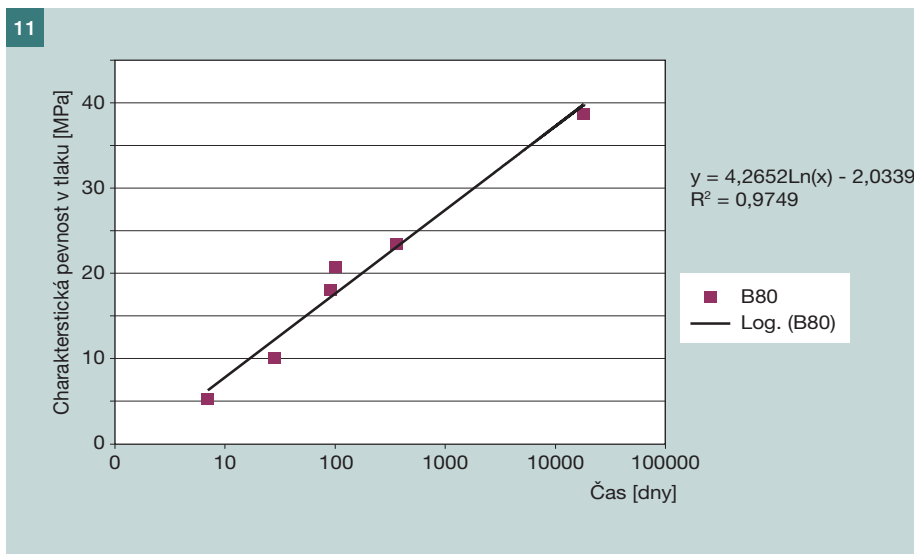
Pevnost v příčném tahu

Na válcích o průměru 300 mm a výšce 220 mm byla provedena zkouška pevnosti v příčném tahu. Celkem bylo vyzkoušeno šest těles a výsledné pevnosti se pohybovaly mezi 3 až 4,5 MPa, které odpovídají cca 10% pevnosti v tlaku. Na obr. 12 je těleso připravené ke zkoušce a na obr. 13 poškozené těleso po zkoušce. Typický průběh zkoušky je zachycen na grafu na obr. 14.

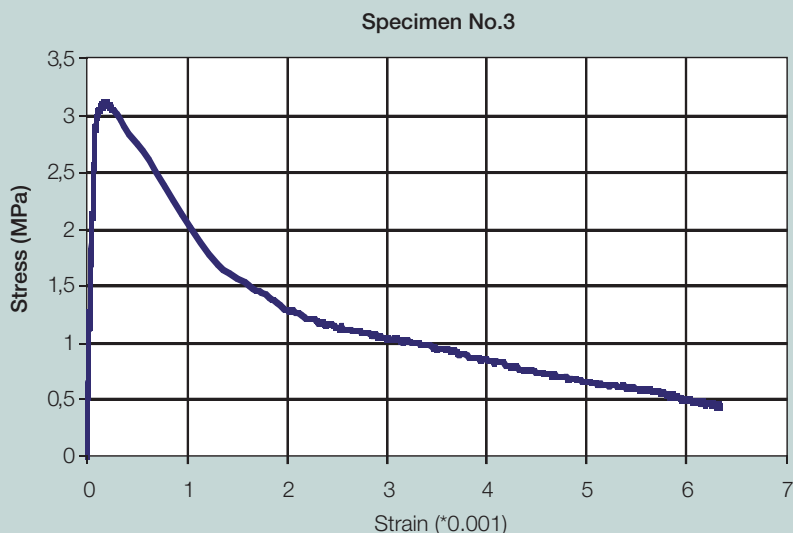
ZÁVĚR

Vodní dílo Orlik nadále plným právem náleží k nejvýznamnějším novodobým technickým stavbám v České republice.

Mechanické zkoušky a analýzy vzorků betonu, starého více jak padesát



14



Literatura:

- [1] Manipulační řád VD Orlík, vd-tbd a. s., červen 2009
- [2] Keil J. a kol.: Výstavba vodního díla Orlík – sborník statí, n. p. Vodní stavby, 1966
- [3] Hydroprojekt Praha: Vodní dílo Orlík souhrnný elaborát – textová část, 1956
- [4] FreeYacht pronájem plachetnic na Orlíku, 2014, <http://www.freeyacht.net/fotoalbum/orlik/vd-prehra-da-orlik/>
- [5] Povodí Vltavy, s. p., Vodohospodářské informace – Vodní díla a nádrže – Orlík, 2013
- [6] Šmilauer V. a kol.: Využití úletového popílku pro betonáž masivních konstrukcí, Beton TKS 2/2014, str. 60–65

let, prokázaly vysoké hodnoty měřených parametrů a spolu s instrumentální mikroanalýzou objasnily vysokou kvalitu betonu a potvrdily jeho trvanlivost. Substituce slinku popílkem se osvědčila zejména snížením prudkého nárůstu vývoje hydratačního tepla v iniciačním stadiu a rozložením jeho produkce do delšího časového intervalu. V dlouhodobém časovém vývoji popílek významně přispěl k nárůstu pevností, k nízké nasákavosti a umožnil vznik kompaktní mikrostruktury hydratovaného cementového pojiva.

Zkoušky a analýzy prokázaly ekonomickou a technologickou výhodnost aplikací elektrárenských popílků při výrobě betonu. Mělo by se tak dít větší měrou než dosud. Ve výrobě stavebních materiálů (cementu, betonu a cihlářských tovarů) se zatím využívá pouze 11 % z celkové produkce elektrárenských popílků [6]. Zbytek vesměs končí na úložištích. Je však třeba podotknout, že ne všechny typy elektrárenských po-

pílků mají vlastnosti vhodné pro aplikace ve stavebnictví. Vhodnými technologickými úpravami, např. zrnitostním, popř. magnetickým tříděním, mletím a mísením, by se využitelný potenciál popílků ve stavebnictví zvýšil.

Příspěvek vznikl za podpory projektu FR-TI3/757 „Zvýšení potenciálu elektrárenských popílků jako alternativního pojiva pro výrobu ekologicky šetrných cementových kompozitů“, Centra kompetence TAČRTE01020168 a za podpory Evropské unie, OP VaVpl. CZ.1.05/2.1.00/03.0091 – Univerzitní centrum energeticky efektivních budov.

Ing. Ondřej Zobal

e-mail: ondrej.zobal@fsv.cvut.cz

tel.: 224 354 495



RNDr. Lubomír Kopecký

e-mail: lubomir.kopecky@fsv.cvut.cz

tel.: 224 354 823



Ing. Pavel Padevět, Ph.D.

e-mail: pavel.padevet@fsv.cvut.cz

tel.: 224 354 484



doc. Ing. Vít Šmilauer, Ph.D.

e-mail: vit.smilauer@fsv.cvut.cz

tel.: 224 354 483



prof. Ing. Zdeněk Bittnar, DrSc.

e-mail: bittnar@fsv.cvut.cz

tel.: 224 353 869



všichni:

Katedra mechaniky

Fakulta stavební ČVUT v Praze

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

Text článku byl posouzen odborným lektorem.

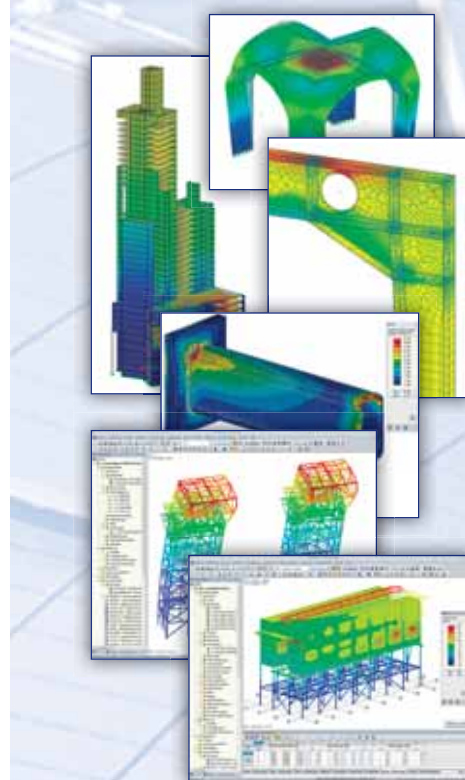


RSTAB 8

Program pro výpočet prutových konstrukcí

RFEM 5

FEM program pro výpočet 3D konstrukcí



Aktuální informace

- Podpora nových evropských norem
- Různé národní přílohy
- Cena programu již od 33 450 Kč
- Česká verze včetně manuálů

www.dlubal.cz

Dlubal Software s.r.o.
Anglická 28, 120 00 Praha 2
Tel.: +420 221 590 196
Fax: +420 222 519 218
www.dlubal.cz
info@dlubal.cz



Firemní prezentace