

ANALÝZY BETONŮ PROVOZOVANÝCH CEMENTOBETONOVÝCH KRYTŮ VOZOVEK PROVÁDĚNÉ NA VÝVRTECH - MOŽNOSTI A NOVÉ TRENDY ■ ANALYSES OF CORES FROM CONCRETE ROAD PAVEMENTS IN OPERATION – OPTIONS AND NEW TRENDS

Josef Stryk, Miroslava Gregerová,
Aleš Frýbort, Jana Štulířová,
Jiří Grošek

Příspěvek podává přehled různých alternativ posouzení míry napadení betonu cementobetonových krytů (CBK) vozovek rozpínávacími reakcemi. Příklady výsledků těchto analýz, realizovaných v Centru dopravního výzkumu, v. v. i., zahrnují vizuální makroskopické a mikroskopické posouzení vývrťů. Na základě mikroskopických a chemických analýz je provedena petrografická klasifikace použitého kameniva. Současně lze, aplikováním EDX mikrochemických analýz, metodami bodové nebo orientační plošné analýzy, odlišit např. CSH gely od novotvořených rozpínávacích fází. Pomocí liniových skenů a map prvkových distribucí je možné identifikovat rozsah a mezifázová rozhraní. Vizualizace pomocí SEM fotodokumentace dovoluje navíc zjistit pórovitost CBK, určit stupeň a typ jejich mineralizace, stanovit rozsah a typ mikrotrhlin ve zvoleném okrsku apod. ■ The paper provides an overview of different alternatives to assess the degree of presence of expansive reactions in concrete of road pavements. Examples of results of the analyses, which were performed in CDV - Transport Research Centre, (Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.), include visual macroscopic and microscopic evaluation of concrete samples. Based on microscopic and chemical analyses, petrographic classification of the used aggregates was performed. In addition, applying EDX microchemical analyses (Energy-dispersive X-ray spectroscopy), point-based or area-based methods, can help to distinguish CSH gels from newly formed expansive phases. With the use of line scans and point distribution maps, it is possible to identify their range and inter-phase interfaces. Furthermore, the visualization with the use of SEM (Scanning Electron Microscope) images allows us to determine concrete pavement porosity, degree and type of mineralization of pores, determine degree and type of microcracks in a selected region, etc.

Centrum dopravního výzkumu, v. v. i., provádělo v roce 2017 hodnocení vývrťů, odebraných z cementobetonových krytů (CBK) vozovek, v rámci projektu Státního fondu dopravní infrastruktury č. 5006210260 s názvem: Posouzení rizika vzniku a rozvoje rozpínávacích reakcí na nově budovaných a stávajících CB krytech z hlediska petrografie. Souběž-

ně s normovými zkouškami (stanovení tloušťky vrstev, pevnosti betonu v tlaku a tahu, odolnosti proti působení vody a chemickým rozmrazovacím látkám) se na vývrtech realizovaly a osvědčily i metody petrografické (optická a elektronová mikroskopie a chemická mikroanalýza). Aplikaci těchto metod si v posledních letech vyžadují studie orientované na zjištění stavu betonu z hlediska určení výskytu a typu rozpínávacích reakcí na provozovaných úsecích dálnic s CBK. Termín „rozpínávací reakce“ je nejčastěji používán v souvislosti s alkalickými reakcemi kameniva (AAR), které se rozlišují na alkalicko-křemičitou reakci (ASR) a alkalicko-karbonátovou reakci (ACR). Dalším typem jsou sekundární síranové reakce (SSR) [1], které mohou probíhat vlivem externích reagentů (obsah SO_3 v ovzduší) a jsou označovány zkratkou EEF (externí ettringitová formace), nebo vlivem interních reagentů (přítomnost sulfidů železa v kamenivu) a jsou označovány IEF (interní ettringitová formace). Krom toho bývá ve stejném smyslu v cizojazyčné literatuře používána zkratka ETF [2], [3]. Na expanzi a trhání betonu se mohou podílet i sírany uvolňující se z CSH (kalcium silikát hydrát, cementový tmel), tzv. DEF (delayed ettringite formation) [4]. Tyto sírany mohou reagovat s vodou a ze vzniklého monosulfátu vzniká ettringit [5].

Petrografické metody, zejména klasifikace kameniva (podle frakce a typu hornin), představují nepostradatelný zdroj informací při identifikaci rizikového (nebo potenciálně nebezpečného) kameniva, především v případě dvou hlavních rozpínávacích reakcí, tj. AAR a SSR. Metody

elektronové mikroskopie lze využít pro kvantifikace vzdušných pórů, výskytu trhlin (vyjádřených % nebo např. formou indexů), hodnocení obsahu vzduchu v betonu (např. spacing factor), indikaci typu a rozsahu rozpínávacích reakcí orientačně (aplikací chemických reagentů vizuálně zvýrazňujících postižené partie betonu), nebo detailně kombinací mikroskopických a mikrochemických analýz (SEM-EDX a petrografický polarizační mikroskop).

I přesto, že jde o metody destruktivní, představují nezastupitelné zdroje informací potřebné pro zhodnocení aktuálního stavu betonů různého stáří. Pozice vývrťů se volí individuálně a cíleně podle poruch viditelných na povrchu vozovky [6].

INDEXY POPISUJÍCÍ DEGRADACI

Prvotní a výchozí informaci o aktuálním stavu betonu poskytuje detailní makroskopické posouzení povrchu vývrťů. Pro komparaci výsledků se používají dohodnuté indexy, např. Cracking index (CI) a Damage rating index (DRI).

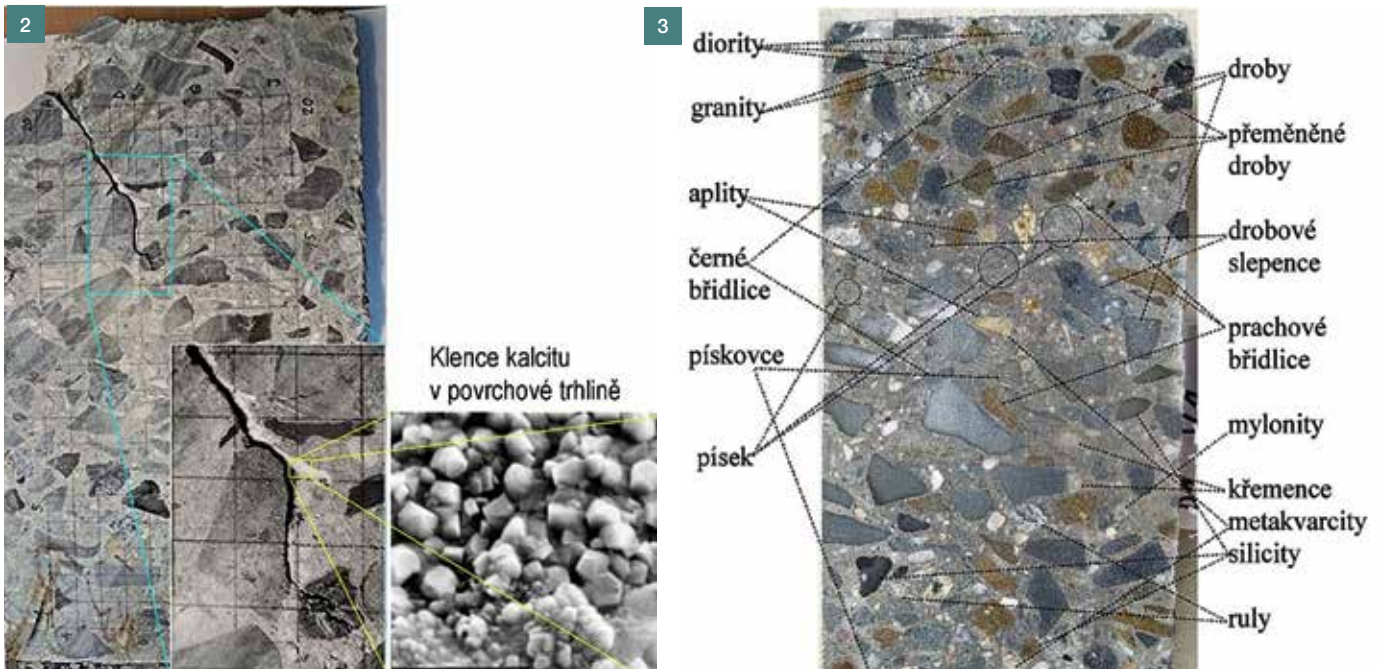
Cracking index

CI udává celkovou šířku trhlin, které protínají sledované linie vedené v různých směrech a pokrývají vymezenou plochu. Jednotkou CI je mm/m [7]. CI dovoluje

1 Rozvinutá plocha povrchu vrtného jádra; trhlinka šířky 1 mm se šíří pouze z povrchu do hloubky maximálně 45 mm, index CI pro svisle orientované trhliny v horní části vývrťů je 3,2 mm/m ■

1 Flat of the drill core surface; crack width 1 mm spreads just from the surface to max. depth 45 mm, index CI for vertical cracks in upper part of core = 3.2 mm/m





průběžně sledovat vývoj poruch na povrchu vozovek, pilířů mostů, betonových svodidel apod.

U vývrtů byl tento způsob hodnocení doplněn o záznam svisle a vodorovně orientovaných trhlin v rozdílných hloubkových úrovních vývrtu (horní – v horní čtvrtině, střední – reprezentující polovinu výšky a spodní – charakterizující spodní čtvrtinu vývrtu). Tento postup umožňuje srovnání stavu vývrtů na třech hloubkových úrovních. Současně se provádí fotodokumentace vývrtu, a to povrchové pojižděné plochy, spodní plochy a pláště. V případě zobrazení povrchu vývrtu se z osmi fotografií sestaví rozvinutá plocha válce, na které lze vhodnou metodou digitální obrazové analýzy vyhodnotit nejen trhliny, kaverny a vzdušné póry, ale i distribuce kameniva (obr. 1).

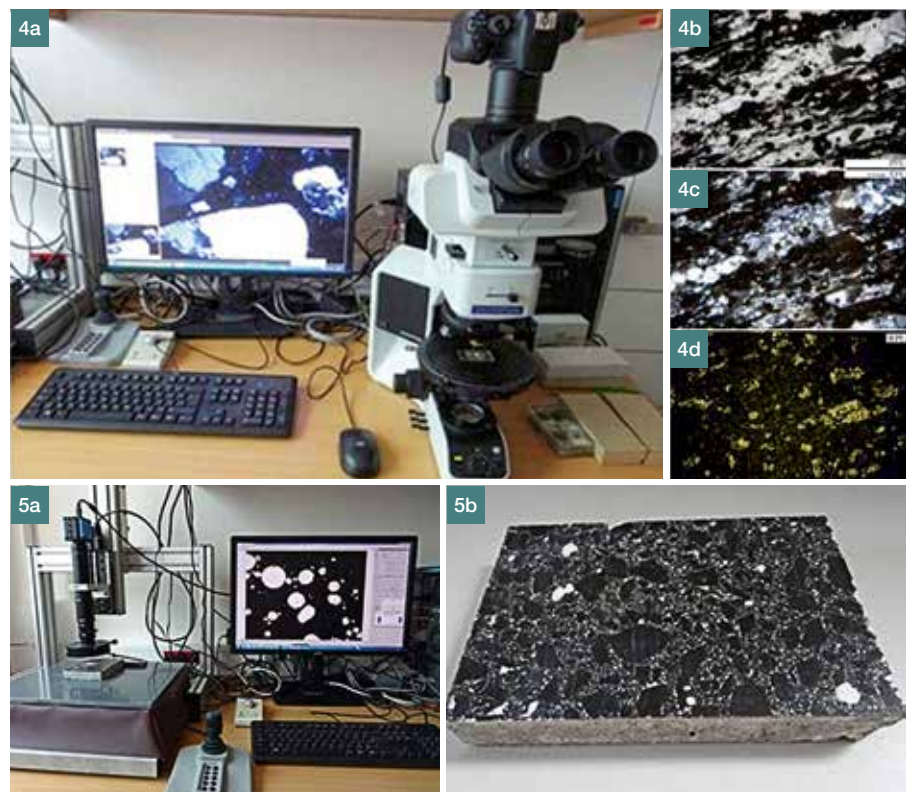
Damage rating index

Stupeň porušení DRI se používá především ve vztahu k rozpínavým reakcím betonu. Na podélně rozříznuté ploše vývrtu se zaznamenává výskyt sledovaných parametrů pro každý jednotlivý cm^2 (v našem případě 10 x 20 cm, obr. 2). Následně se počty výskytů sledovaných parametrů vynásobí jejich vahou a sečtou se. Jednotlivé sledované parametry a jejich váhy dle [8]:

- trhlina v hrubém kamenivu / 0,75,
- otevřená trhlina v hrubém kamenivu / 4,
- trhlina s reakčním produktem v hrubém kamenivu / 2,
- kamenivo nesoudržné s tmelem / 3,
- reakční lemy kolem kameniva / 0,5,
- trhlina v cementovém tmelu / 2,

2 Rozříznutý vývrt s mřížkou 100 x 200 mm pro výpočet indexu DRI s detailem trhliny; v tomto případě DRI = 47 3 Příklad makroskopické kvalitativní identifikace hrubého kameniva na řezu vývrtem 4 a) Optický polarizační (petrografický) mikroskop Olympus BX53, příklad identifikace kameniva - úlomek kyzové břidlice; b) PPL identifikace s 1 nikolem, c) XPL se zkříženými nikoly, d) RPL - snímek v odraženém polarizovaném světle 5 a) Digitální mikroskop pro kvantifikaci vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu, b) zkušební vzorek upravený pro výpočet spacing factoru

2 Cut core with grid of 100 x 200 mm for calculation of DRI index with crack detail; in this case DRI = 47 3 Example of macroscopic qualitative identification of coarse aggregates on core cut 4 a) Optical polarizing (petrographic) microscope Olympus BX53, example of aggregate identification - fragment of pyrite slate, b) PPL identification with 1 nicol, c) XPL crossed nicols, d) RPL - image in reflected polarized light 5 a) Digital microscope for quantification of air pores in hardened concrete, b) testing sample adjusted for spacing factor calculation



- trhlina s reakčním produktem v cementovém tmelu / 4,
- póry vyplněné nebo lemované reakčními produkty / 0,5.

Jednoznačná a detailní analýza produktů rozpínavých reakcí a poškození s tím související se provádí prostřednictvím mikroskopických metod.

IDENTIFIKACE KAMENIVA

Petrografické charakteristiky hornin mohou být kvalitativní nebo kvantitativní.

Pro kvalitativní určení hrubého kameniva je nejhodnější podélný řez vývrtem, v němž lze sledovat rozložení hrubého kameniva a identifikovat jeho druhy (obr. 3). Tato analýza musí být upřesněna mikropetrografickými rozbory tří (nebo více) leštěných výbrusových preparátů (rozměrů 20 x 30 mm). Mikroskopické charakteristiky horninových klastů hrubého kameniva se kvantifikují pomocí planimetrických analýz s použitím petrografického polarizačního mikroskopu, který je vybaven analyzátozem a polarizátorem pro procházející a odražené světlo (obr. 4). Pro přesnější výsledky se hodnotí výbrusy ze tří výškových úrovní vývrtní, který reprezentuje úsek s použitím stejné receptury betonu (stejných zdrojů kameniva).

Zjištěná objemová procenta minerálů a hornin je (s ohledem na velikost hodnotené plochy) nutné chápat jako semikvantitativní ukazatele. Na základě publikací, např. [8], jsou za reaktivní kamenivo, umožňující ASR, považovány úlomky vulkanických skel, chalcedonu, opálu, mikrokrytalického a kryptokrytalického

křemene, tektonicky postiženého křemene a úlomky hornin, které tyto reaktivní formy SiO_2 obsahují (např. silicity: bulžňky, lydity, rohovce, křemence, metakvarcité, mylonity, kataklazity, fylity, opuky apod.) [9], [12].

Výsledkem podrobné mikropetrografické a makropetrografické analýzy je průměrné složení kameniva studovaných vzorků, s určením podílu potenciálně reaktivního kameniva na alkalicko-křemičitou reakci a na sekundární síranové rozpínání. Mikropetrografická analýza umožňuje mj. stanovení škodlivého kameniva pro SSR. Tím jsou všechny typy kameniva obsahující zejména sulfidy (pyrit, markazit) jako např. kyzové břidlice, černé a zelené břidlice nebo slabě metamorfované vulkanosedimentární bazické horniny.

Obě výše uvedené mikroskopické metody dovolují identifikaci a rozpoznání sekundárních síranů, alkalických silikagelů, kalcitu a portlanditu, tj. novotvořených fází ve struktuře betonu se známou morfologií. V případech, kdy známe recepturu betonu a zdroj použitého kameniva, lze jeho užití potvrdit, nebo vyvrátit v odebraných betonových vývrtech.

PÓROVITOST BETONU

Obsah vzdušných pórů ve ztvrdlém betonu je důležitý parametr, který ovlivňuje odolnost a životnost betonu.

Stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu se provádí podle ČSN EN 480-11 [13]. Pro provedení této zkoušky se musí připravit

leštěné vzorky o velikosti přibližně 100 x 150 x 20 mm. Pro zvýšení kontrastu se leštěný povrch natře černou razítkovou barvou. Po vysušení se nanese bílá zinková pasta, která vyplní vzdušné póry. Upravený povrch zkušební vzorku se automaticky nasníma digitálním mikroskopem (obr. 5). Takto provedená planimetrická analýza zaznamenává počet vzduchových pórů, protnutých měřicími přímkami, a délky jejich tětív.

Metody digitální mikroskopie mají širší použití. Lze jimi ověřit nejen celkový obsah pórů, ale stanovit i součinitel prostorového rozložení vzduchových pórů, tzv. spacing factor (obsah mikroskopických vzduchových pórů průměru 300 μm a menším).

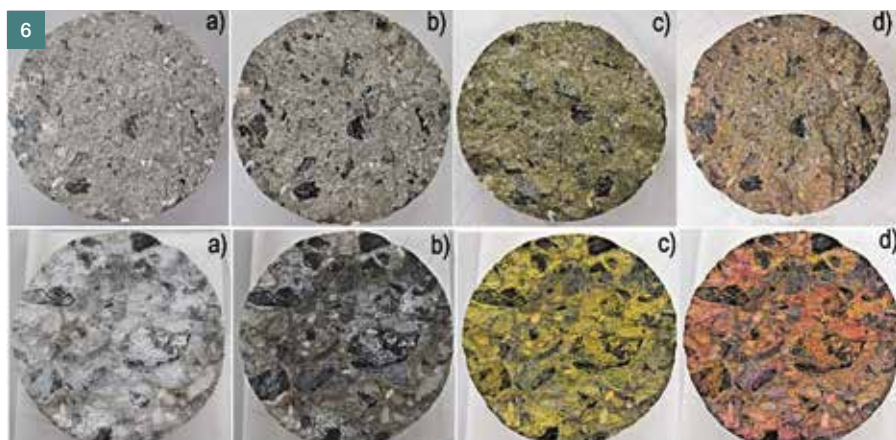
Pórovitost je možné stanovit i optickou a elektronovou mikroskopií. Procentuální obsah pórů, CSH a kameniva se určí z nasnímaných snímků použitím programů pro digitální analýzu obrazu.

ORIENTAČNÍ IDENTIFIKACE ALKALICKÝCH SILIKAGELŮ

Předběžnou informaci o přítomnosti alkalických silikagelů (ASG) lze získat z příčného nebo podélného řezu nebo z lomu vývrtní. Pro rychlou orientační identifikaci se používá aplikace chemických reagentů na čerstvou plochu, na které dojde ke zvýraznění oblastí s alkalickými silikagely (semikvantitativní metoda) [14].

Nejšetnější se zdá být výsledek reakcí dvou reagentů: hexanitrokobaltitanu sodného a rhodaminu B. Nejříve se nanáší hexanitrokobaltitan sodný $\text{Na}_3\text{Co}(\text{NO}_2)_6$, který reaguje s draslíkem v gelu za vzniku žluté, ve vodě nerozpustné sloučeniny hexanitrokobaltitanu sodno-draselného ($\text{K}_2\text{NaCo}(\text{NO}_2)_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). V místech, kde jsou přítomny ionty K^+ , se objeví žluté skvrny. Následně se aplikuje rhodamin B pro kvalitativní identifikaci obsahu vápníku v silikagelech. Výsledný barevný odstín souvisí s obsahem prvků K, Na a Ca. Přibýváním Ca v gelu se mění žlutooranžová barva na různé odstíny světle cihlově červené až světle fialově červené (obr. 6).

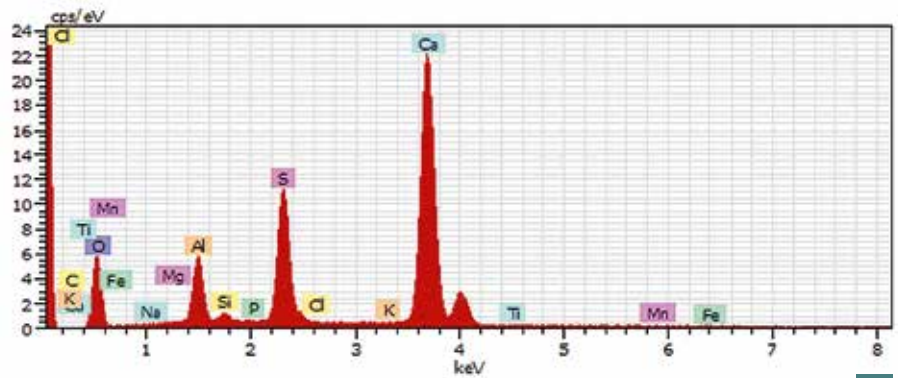
Při hodnocení snímků je potřeba zohledňovat další vlivy, které mohou mít dopad na správnou interpretaci výsledků, např. druh vyskytujícího se kameniva (např. alkalické sodné a draselné živce). Podrobný popis metody je uveden v americkém patentu z roku 1998 [14]. Její výhodou je i to, že se potřebná činidla dodávají i v přenosné sadě a v krajním případě je lze aplikovat na plášť vývrtní okamžitě po odběru.



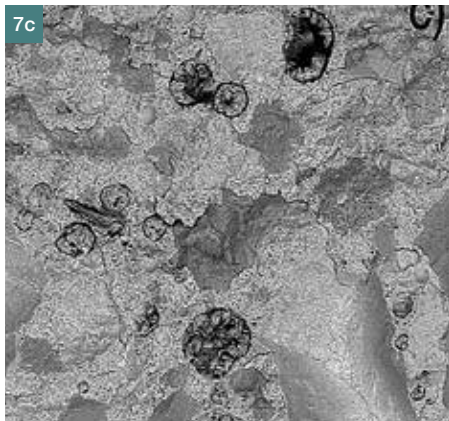
6 Snímky dvou vývrtní: a) před aplikací reagentů, b) zvlhčené, c) po aplikaci reagentů hexanitrokobaltitanu sodného, d) rhodaminu B na ploše po provedení zkoušky v prostém tahu; horní řada nízká pravděpodobnost výskytu ASG, spodní řada vysoká pravděpodobnost výskytu ASG ■ 6 Images of two cores: a) before application of reagents, b) moisture, c) after application of sodium cobaltinitrite, d) rhodamine B on concrete surface after performing tensile test; upper line - low probability of alkali-silica gel (ASG) occurrence, lower line - high probability of ASG occurrence



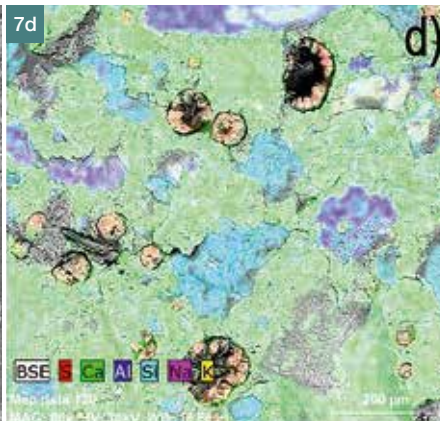
7a



7b



7c



7d

7 a) Skenovací elektronový mikroskop Tescan Vega osazený sondou pro energiově-disperzní rentgenovou spektroskopii, b) spektrum prvků – bodová analýza ettringitu, c) BSE snímek ettringitů ve výplních vzdušných pórů, d) mapa distribuce prvků zobrazená falešnými barvami ve snímku ■ 7 a) Scanning electron microscope Tescan Vega with EDX probe, b) spectrum of elements – point analysis of ettringite, c) BSE image of ettringites inside air pores, d) element distribution map

MIKROCHEMICKÉ ANALÝZY

Mikrostruktura zatvrdlého betonu se hodnotí prostřednictvím skenovacího elektronového mikroskopu (SEM – Scanning Electron Microscope). Pro účely chemických analýz je toto zařízení vybaveno sondou pro energiově-disperzní rentgenovou spektroskopii (EDX – Energy-Dispersive X-ray spectroscopy)

(obr. 7). Tuto kombinaci zařízení doporučuje např. i americká norma ASTM C1723-16 [15].

Analýzy se provádějí na čerstvých lomových nebo leštěných plochách vzorků betonu velikosti cca 20 x 20 mm. EDX analýza úlomků poskytuje orientační kvantitativní informace o prvokovém složení materiálu. Přesnější vý-

sledky lze obdržet z naleštěné plochy. K dispozici je několik možností: analýza ve zvoleném bodě, linii nebo ploše. Bodová analýza (detekce minimálně 5 x 5 μm) dovoluje provádět analýzu minerálních fází ve zvolených pozicích studovaných vzorků (např. změnu chemického složení u zonálních krystalů: okraj x střed). Liniový sken se využívá při sledování charakteristických změn chemického složení v přítomných fázích a studiu migrace prvků ve zvoleném řezu. Změna profilu – kontinuální změna koncentrace vybraných prvků podél přímky – dokládá postupný vývoj nebo změny složení v čase. Dovoluje stanovit hranice mezi alkalickými silikagely a CSH či chemickou hranici mezi kamenivem a gelem (obr. 8). Pro studium limitních rozhraní fází se osvědčily i distribuční mapy vybraných kombinací prvků.

Kombinace SEM-EDX poskytuje nejspolehlivější výsledky stanovení výskytu [16], [17], [18]:

- prostorového rozmístění alkalických silikagelů v mikrostruktuře betonu a v morfologii novotvořených krystalických fází (obr. 9),
- prostorového rozmístění sekundárních síranů v mikrostruktuře betonu – ettringitové gely – a v morfologii novotvořených krystalů (obr. 10),
- prostorového rozmístění portlanditu

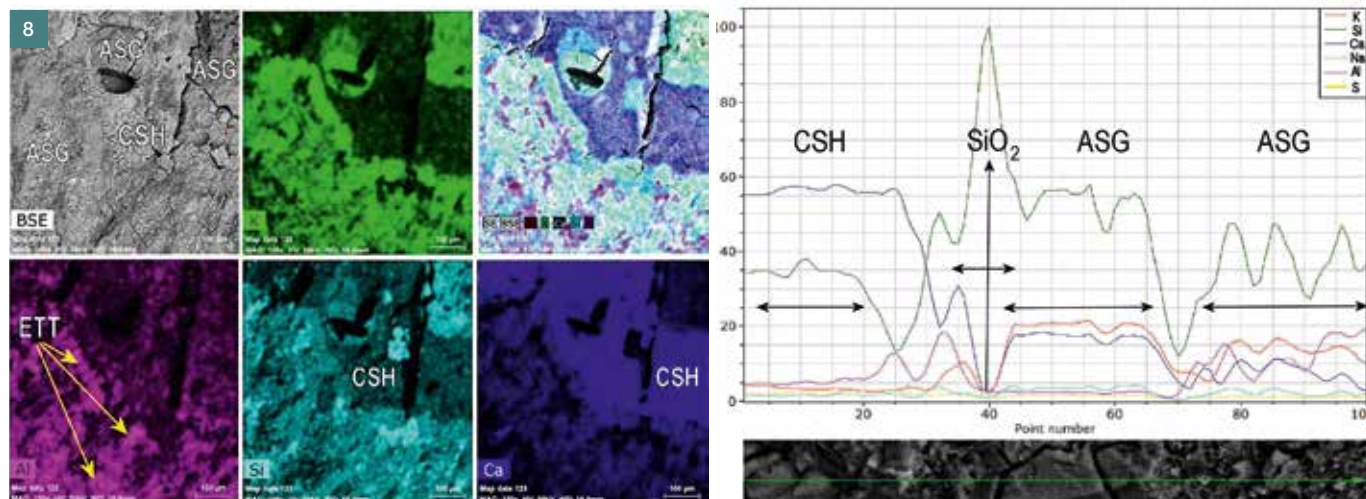
Tab. 1 Obsah prvků v ettringitu ■ Tab. 1 Content of elements in ettringite

Spectrum: Acquisition 3401							
El	unn. C	norm. C	Atom. C	Compound	Comp. C norm	Comp. C	Error (1 Sigma)
	[wt %]	[wt %]	[at %]		[wt %]	[wt %]	[wt %]
C	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00
O	35,99	39,63	59,57		0,00	0,00	6,18
Na	0,12	0,13	0,14	Na ₂ O	0,18	0,16	0,05
Mg	0,10	0,11	0,11	MgO	0,19	0,17	0,04
Al	4,76	5,24	4,67	Al ₂ O ₃	9,90	8,99	0,29
Si	4,66	5,14	4,40	SiO ₂	10,99	9,98	0,25
P	0,00	0,00	0,00	P ₂ O ₅	0,00	0,00	0,00
S	7,65	8,42	6,31	SO ₃	21,03	19,09	0,32
Cl	0,05	0,05	0,04	Cl	0,05	0,05	0,03
K	0,35	0,38	0,23	K ₂ O	0,46	0,42	0,04
Ca	37,09	40,85	24,51	CaO	57,15	51,90	1,12
Mn	0,00	0,00	0,00	MnO	0,00	0,00	0,00
Fe	0,04	0,05	0,02	FeO	0,06	0,05	0,03
Total:	90,81	100,00	100,00		100,00	90,81	

Tab. 2 Příklad vyhodnocení mikrostrukturního a petrochemického studia jádrového vývrtu ■
Tab. 2 Example of evaluation of microstructural and petrochemical study of a drill core

Typ degradace		ASR			SSR = ETF			Vápenatá			Karbonátová			
Produkt reakce		Alkalický silikagel (ASG) a jeho krystalické fáze			Sekundární sírany (ettringit a thaumasit)			Portlandit			Kalcit			
Identifikace ve třech partiích vývrtu														
Horní část (H)		x			x			x			x			
Střední část (S)		xxx			x			x			0			
Dolní část (D)		x			xx			xx			0			
Projevy deformace primární mikrostruktury betonu														
Identifikace rozpínavých reakcí		Mikrotrhliny												
		index	Exp.	Kon.	index	Exp.	Kon.	index	Exp.	Kon.	index	Exp.		
1	Intergranulární v/nebo podél kameniva	(H)	xx	ano	ano	x	ano	ano	0			x	ano	
		(S)	xx	ano	ne	x	ano	ano	0					
		(D)	x	ano	ne	x	ano	ano	0					
2	Rozpínání v CSH	(H)	x	ano	ano	x	ano	ano	x	ne	ne	x	ano	
		(S)	xx	ano	-	x	ano	ano	x	ano	ano	0	-	
		(D)	x	ano	ne	x	ano	ano	xx	ano	ano	0	-	
3	Rozpínání v pórech	Lokální výskyt	(H)	x	ne	ne	xxx	ano	ano	0			x	ano
			(S)	x	ne	ne	-	-	-	x	-	-	-	-
			(D)	x	ne	ne	xxx	ano	ano	xx	ano	ano		
	=	Lemy pórů	(H)	x	ne	ne	xx	ano	ano	0		ano	x	ano
			(S)	x	ne	ne	-	-	-	x	-	-		
			(D)	x	ne	ne	x	ano	ano	x	ano	ano		
	míra vyplnění pórů	100 %	(H)	0	ne	ne	x	ano	ano	0		ano	0	ne
			(S)	0	ne	ne				0	-	-		
			(D)	0	ne	ne	x	ano	ano	0	ano	ano		
Expanzní mikrotrhliny		ano			ano			ano						
Kontrakční mikrotrhliny		ano			ano			ano						
Mikrotrhliny krystalizační		ano			ano			ano			ano			
Petrochemické indikátory rozpínavých reakcí ve vývrtu														
Jemné kamenivo - potenciálně nebezpečné [%] [†]		pro ASR = 20 % pro SSR = 5 % sulfidů												
		Odsek z hrany			Horní část vývrtu			Střední část vývrtu			Spodní část vývrtu			
Alkálie v CSH [%]; (Na ₂ O + K ₂ O)		až 5			0,8			0,7			1			
Alkálie v ASG [%]; (Na ₂ O + K ₂ O)		silně variabilní (K ₂ O >> Na ₂ O)			4-9 (K ₂ O >> Na ₂ O)			1,2-25,7 (K ₂ O >> Na ₂ O)			-			
SO ₃ v CSH		0,2-0,5			0,1-2,4			0,4-0,7			1,3-2			
SiO ₂ v SSR		-			1,1-1,8			3,6			-			
Dopad zimní údržby Cl ⁻ [%]** (vázané na CSH)		cca 1,2-5,5			1,9			0,9-1,2			0,01			

Vysvětlivky: 0 = není přítomen, X = nízký výskyt, XX = střední výskyt, XXX = vysoký výskyt, - = neanalyzáováno; * hodnoty jsou uvedeny v případě provedení mikropetrografické analýzy na výbrusech; ** analýza musí být provedena na vývrtu odebraném nejpozději do jednoho měsíce po skončení zimní údržby; CSH = kalcium silikát hydrát; ASG = alkalický silikagel; SSR = ETF = produkty sekundární síranové reakce; ■ pole = rizikové, ■ pole = nízká pravděpodobnost pokračování degradace vlivem rozpínavé reakce.



Tab. 3 Základní informace k vývrtům z CBK vozovky ■ Tab. 3 Basic information on cores from concrete road pavement

Dálnice	Rok betonáže	Počet sledovaných desek	Pevnost v příčném tahu [MPa] min. / průměr / max.	Pevnost v prostém tahu [MPa] min. / průměr / max.
D1	2004 až 2009	32	3,8 / 4,6 / 5,7	1,3 / 1,7 / 2,8
D5	1996 až 1997	25	3,1 / 4,7 / 5,3	0,5 / 1,5 / 2,5
D35	1995 až 2008	18	3,7 / 4,5 / 6,2	-

v mikrostruktúře betonu a v morfologii a sepětí ASG s ettringity (obr. 11),
 • karbonatizace betonu s hloubkovým dosahem, v morfologii a sepětí s ASG, ettringity a portlanditem v mikrostruktúře betonu a variabilitu morfologie klencových krystalů s přihlédnutím na pozici krystalizace (obr. 12).

Pomocí SEM se vyhodnocuje míra zaplnění pórů/kapilár těmito produkty ve vazbě na vznik expanzních a/nebo kontrakčních mikrotrhlin, které generují. Pomocí EDX lze stanovit např. také procentuální obsah K_2O , Na_2O , SO_3 , Cl^- apod. Identifikaci produktu degradace lze provést na odštipnutém vzorku betonu během několika minut.

Příklad souhrnného vyhodnocení mikrochemického vyhodnocení jednoho vývrtu z CBK vozovky je uveden v tab. 2.

SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ PROVEDENÝCH ZKOUŠEK

V rámci projektu [19] byly analyzovány vývrtky odebrané na různých úsecích dálnic D1, D5 a D35. Odběru vývrtů, které zajišťovalo Ředitelství silnic a dálnic ČR, předcházelo hodnocení úseků vozovek s CBK, provedené na základě terénního vizuálního posouzení jejich povrchu, se zohledněním výskytu trhlin. Ty byly klasifikovány indexově podle jejich četnosti – zařa-

zením do stupňů 0, I, II a III. Vývrtky byly odebírány z desek s různým stupněm klasifikace. Na jednotlivých deskách se odebíraly minimálně tři vývrtky, jeden pro zkoušku pevnosti v příčném tahu, jeden pro zkoušku pevnosti v prostém tahu a jeden pro provedení detailních petrografických a mikrochemických rozborů. Přehled základních informací ze studovaných vývrtů je uveden v tab. 3.

Hodnocení vývrtů odpovídá stavu CBK v místě odběru vývrtu. Některé závěry jsou shodné – např. výskyt trhlin modifikuje téměř ve všech případech pouze horní čtvrtinu vývrtu. Jak se tento výskyt lišil v závislosti na stáří CBK, demonstruje příklad z dálnice D35 (obr. 13).

Ze souboru vybraných desek dálnic byly pro laboratorní analýzy použity reprezentativní vývrtky, u kterých byl předpokládán největší potenciál výskytu rozpínavých reakcí. Souhrn získaných poznatků laboratorního studia vývrtů z dálnice D1, D5 a D35:

Dálnice D1

- Provedené studium devíti vybraných vývrtů neprokázalo žádné markantní poškození rozpínavými reakcemi, ať posuzujeme rizika ASR (vyjma horní části jednoho vývrtu, kde byla prokázána přítomnost alkalického

silikagelu), nebo degradaci sekundárními síranými,

- potenciálně nebezpečné kamenivo:
 - o ASR cca 11 %,
 - o SSR 0,5 %,
- i přesto, že střední části vývrtů obsahují síraný, je jejich objem velmi nízký.

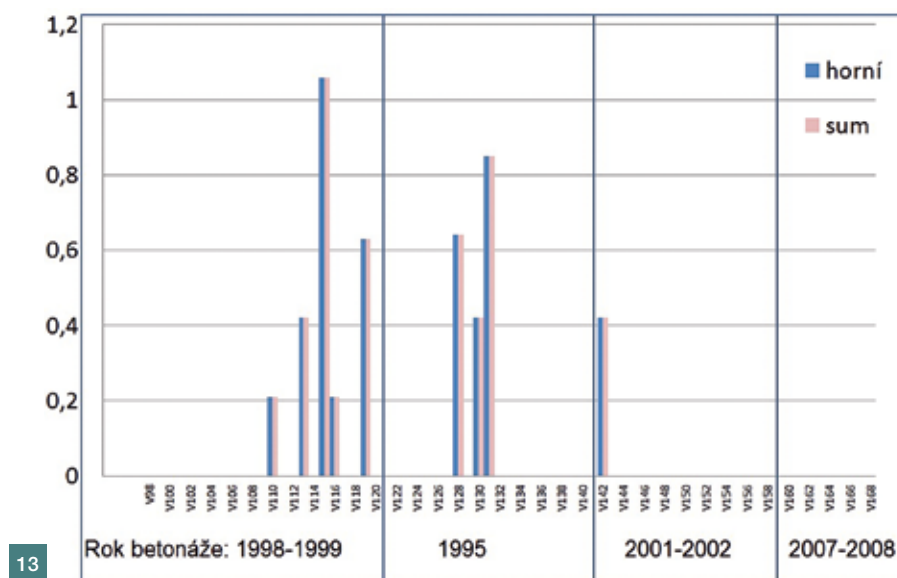
Dálnice D5

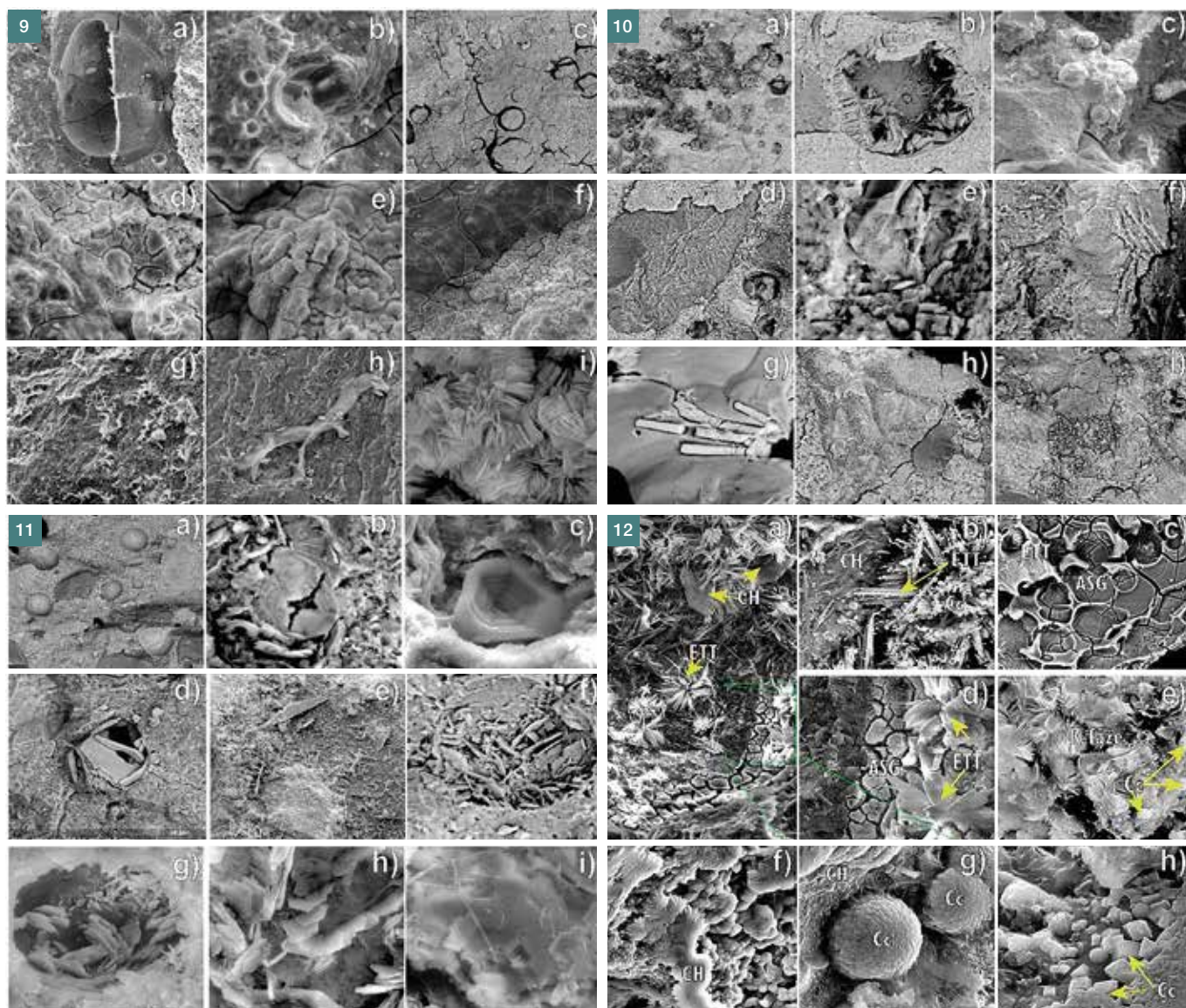
- Studium realizované na deseti vybraných vývrttech, z betonáže provedené v letech 1996 až 1997, prokázalo v šesti případech simultánní poškození produkty SSR a ASR,
- potenciálně nebezpečné kamenivo:
 - o ASR 6 až 12 %,
 - o SSR 11 až 18 %,
- výskyt alkalického silikagelu (ASG) je variabilní nejen mezi jednotlivými vývrtky, ale i v rámci jednoho vývrtu,
- střední části vývrtů mají obvykle nejvyšší obsah síranů, ale současně zde existuje dostatek volného prostoru ve vzdušných pórech,
- ASG byly u třech vývrtů rekrystalizovány ve vysoce draselné, morfologicky variabilní fáze.

Dálnice D35

- Provedené studium šesti vývrtů prokázalo u dvou vývrtů, z betonáže provedené v letech 1998 až 1999, přítomnost jak sekundárních síranů, tak alkalických silikagelů a jejich krystalických fází,

8 Liniový sken a prvková mapa dokládající ostré rozhraní mezi křemenem, CSH, ASG a ettringitem (vysvětlivky: ASG – alkalický silikagel, CSH – kalcium silikát hydrát, ETT – ettringit) 13 Výskyt trhlin na záznamech rozvinuté válcové plochy vývrtů z dálnice D35, vyhodnocení cracking indexu pro horní čtvrtinu vývrtu a celý vývrt ■ 8 Line scan and element map showing sharp interface between quartz, CSH, ASG and ettringite (abbreviations and symbols: ASG – alkali-silica gel, CSH - calcium silicate hydrate, ETT – ettringite) 13 Occurrence of cracks in records of cores taken from highway D35, evaluation of cracking index for the upper quarter of the core and for the whole core





9 Morfologie ASG: a), b) ASG lemučící povrch póru, c) expanzní trhliny v okolí ASG zcela zaplněných pórech, d) gely na rozhraní a povrchu kameniva a CSH, e) gely na povrchu alkalického živce kopírující štěpnost minerálu, f) dvě formy výskytu produktů ASR – typický ASG (mladší generace) a rekrystalizovaný ASG (starší generace), g), h) proniky ASG podél štěpnosti slídk, i) krystalická fáze pseudomorfuující ASG **10** Morfologie sekundárních síranů (ettringitu): a) izolované jehlice, vějířovité a keříčkovité agregáty na povrchu vzdušných póru, b) rekrystalizace ettringitového gelu lemučícího pór, c) kuličkovitá odlučnost ettringitem modifikovaných a oslabených zón, d) rekrystalizace ettringitového gelu vyplňujícího intergranulárú kolem zrnka křemene, e) ettringitové rozpínání na plochách štěpnosti alkalického živce, f) ettringitové rozpínání na plochách štěpnosti slídk, g) ettringit pseudomorfuující morfologii apatitu, h) odlom betonu podél proplásku sekundárních síranů, i) ettringit zatlačující CSH mezi křemennými zrny **11** Morfologie portlanditu: a) vzdušné póry s ojedinělými krystaly portlanditu a počáteční stadium vniku pseudohehexagonálních „trchtýřových“ útvarů portlanditu, b), c) morfologie „trchtýřků“, d) hexagonální tlustě tabulkovité portlandity, e), f) všesměrně orientované portlandity kolmo narůstající na stěny vzdušných póru, g), h) planparalelní orientace portlanditu v pórech, i) jehlice ettringitu orientované podél bazálních ploch portlanditů **12** Ukázka vztahů mezi fázemi rozpínavých reakcí: a) póry lemované ASG s mineralizací portlanditu (CH) a keříčkovitých agregátů ettringitu (ETT), b) povrch póru tvoří portlandit a keříčkovitými agregáty jehlic ettringitu „pocukrovaných“ kalcitem (Cc), c) pór lemovaný ASG s prostupujícími ettringitovými gely, d) detail snímku a); e), f) a g) příklady krystalizačních fází kalcitu, agregáty pseudohehexagonálních portlanditů umožňují vznik sférolitických útvarů tvořených stébelnatými kalcity, h) z izolovaných s planparalelně uspořádaných portlanditů vznikají typické kalcitové krystaly – klence (legenda: ASG - alkalický silikagel, Cc - kalcit, CH - portlandit, ETT - ettringit) ■ **9** ASG morphology: a), b) ASG lining the pore surface, c) cracks in completely filled pores, d) gels on the interface and surface of aggregates and CSH, e) gels on the surface of alkali feldspar, f) two forms of occurrence of ASR products – typical ASG (younger generation) and recrystallized ASG (older generation), g), h) penetration of ASG along mica cleavage lines, i) crystalline phase of pseudomorphing ASG **10** Morphology of secondary sulphates (ettringite): a) isolated needles and fan-shaped shapes on the surface of air pores, b) recrystallization of ettringite gel lining the pore, c) spherical jointing of ettringite modified and weakened zones, d) recrystallization of ettringite gel filling the intergranular around a quartz grain, e) ettringite expansion on alkali feldspar cleavage lines, f) ettringite expansion on mica cleavage lines, g) ettringite pseudomorphing apatite morphology, h) concrete break off along secondary sulphates formation, i) ettringite pushing CSH among quartz grains **11** Portlandite morphology: a) air pores with sporadic portlandite crystals and initial stage of intrusion pseudohehexagonal „funnel-shape“ portlandite formations, b), c) morphology of „funnels“, d) hexagonal thick tabular portlandites, e), f) all-directional portlandites growing perpendicular to walls of air pores, g), h) plan-parallel orientation of portlandite in pores, i) ettringite needles oriented along areas of portlandites **12** Example of relationships between phases of expansive reactions: a) pores lined by ASG with mineralization of portlandite (CH) dendriform shape of ettringite (ETT); b) pore surface is formed by portlandite and ettringite needles „sprinkled“ with calcite (Cc); c) pore lined with ASG with penetrating ettringite gels; d) image detail a); e), f) and g) examples of crystallization phases of calcite, pseudohehexagonal portlandites allows occurrence of spherulitic formations, formed by fibrous calcites; h) typical calcite crystals – rhombohedrons are formed from isolated and plan-parallel arranged portlandites (abbreviations and symbols: ASG – alkali-silica gel, Cc – calcite, CH – portlandite, ETT – ettringite)

Literatura:

- [1] STRYK, J., GREGEROVÁ, M., FRÝBORT, A., NEVOSÁD, Z. Rozpínávací reakce ve struktuře konstrukcí z cementového betonu. *Silniční obzor*. Říjen 2015, roč. 76, č. 10, s. 294–299.
- [2] MARCHAND, J., SKALNY, J. P. (Eds.) *Materials Science of Concrete: Sulfate Attack Mechanism*. Special Volume. Wiley, 2006. 371 p. ISBN 978-1-574-98074-5
- [3] TAYLOR, H. F. W., GOLLOP, R. S. Some Chemical and Microstructural Aspects of Concrete Durability Mechanism of Chemical Degradation of Cement-Based Systems. In: *Proceedings of the Materials Research Society's Symposium* (Boston, 1995). SCRIVENER, K. L., YOUNG, J. F. (Eds.) London: E&FN Spon, 1997. pp. 177–184.
- [4] TAYLOR, H. F. W., FAMY, C., SCRIVENER, K. L. Delayed ettringite formation. *Cement and Concrete Research*. 2001, Vol. 31, No. 5, p. 683–693.
- [5] FOLLIARD, K. J., BARBORAK, R., DRIMALAS, T., DU, L., GARBER, S., IDEKER, J., LEY, T., WILLIAMS, S., JUENGER, M., FOURNIER, B., THOMAS, M. D. A. "Preventing ASR/DEF in new concrete: final report." Report No. FHWA/TX-06/0-4085-5. Austin, TX, USA: Texas Department of Transportation, 2006.
- [6] STRYK, J., GREGEROVÁ, M., FRÝBORT, A., ŠTULÍŘOVÁ, J., GROŠEK, J. Doplnkové analýzy vlastností betonů prováděné na vývrtech z cementobetonových kryptů vozovek. *Silniční obzor*. Červen 2017, roč. 78, č. 6, s. 155–159.
- [7] THOMAS, M. D. A., FOURNIER, B., FOLLIARD, K. J. Alkali-Aggregate Reactivity (AAR) Facts Book. Report FHWA-HIF-13-019. 2013. 211 p.
- [8] FERNANDES, I., RIBEIRO, M. D. A., BROEKMANS, M. A. T. M., SIMS, I. *Petrographic Atlas: Characterisation of Aggregates Regarding Potential Reactivity to Alkalis*. Springer, 2016, 198 p.
- [9] KYNICKÝ, J., GREGEROVÁ, M., BRTNICKÝ, M. *Magmatické horniny hlubinné v kostce*. 1. vyd. Učebnice. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2015. 96 s.
- [10] KYNICKÝ, J., GREGEROVÁ, M., BRTNICKÝ, M. *Magmatické horniny výlevné v kostce*. 1. vyd. Učebnice. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2015. 96 s.
- [11] KYNICKÝ, J., GREGEROVÁ, M., BRTNICKÝ, M. *Metamorfované horniny v kostce*. 1. vyd. Učebnice. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2015. 112 s.
- [12] KYNICKÝ, J., GREGEROVÁ, M., BRTNICKÝ, M. *Sedimentární horniny v kostce*. 1. vyd. Učebnice. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2015. 112 s.
- [13] ČSN EN 480-11. *Přísady do betonu, malty a injektážní malty – Zkušební metody – Část 11: Stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu*. Praha: ČNI, 2006.
- [14] GUTHRIE, G. D. Jr., GEORGE, D., CAREY, J. W. *Detection of Alkali-Silica Reaction Swelling in Concrete by Staining* [online]. United States Patent. 1998. Dostupné z: <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/871471>
- [15] ASTM C1723-16. *Standard Guide for Examination of Hardened Concrete Using Scanning Electron Microscopy*. 2016.
- [16] STRYK, J., GREGEROVÁ, M., FRÝBORT, A., ŠTULÍŘOVÁ, J., POSPÍŠIL, K. Analysis of Expansive Reactions in Cement Concrete Pavement Structures by Microscopical Methods. In: *Sborník z konference 10th Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*. Atény, 28.–30. 6. 2017. 6 p.
- [17] STRYK, J., GREGEROVÁ, M., FRÝBORT, A., ŠTULÍŘOVÁ, J. Analysis of concrete microstructure on cores taken from motorways. In: *Sborník z konference 13th International Symposium on Concrete Roads*. Berlín, 19.–22. 6. 2018. 7 p.
- [18] FRÝBORT, A., VSIANSKY, D., ŠTULÍŘOVÁ, J., STRYK, J., GREGEROVÁ, M. Variations in the composition and relations between alkali-silica gels and calcium silicate hydrates in highway concrete. *Materials Characterization*. 2018, No. 137, p. 91–108.
- [19] Závěrečné hodnocení projektu Státního fondu dopravní infrastruktury č. 5006210260. *Posouzení rizika vzniku a rozvoje rozpínávacích reakcí na nově budovaných a stávajících CB krytech z hlediska petrografie*. CDV, 2017.

přímou souvislost s rozpínávacími reakcemi. Z příložených fotodokumentací (obr. 9 až 12) je zřejmé, že ASR a SSR představují víceúrovňové procesy, které jsou ovlivňovány okolním geochemickým prostředím a často probíhají simultánně.

Petrografická analýza kameniva použitého do betonu má samozřejmě větší význam v průběhu posuzování navrhované receptury betonu, ale je možné ji provést i dodatečně a dávat tyto výsledky do souvislosti s vyskytujícími se poruchami betonu způsobenými rozpínávacími reakcemi.

Při zjišťování výskytu rozpínávacích reakcí v betonu a kvantifikaci jejich produktů se doporučuje provádět SEM-EDX analýzu. Pro provedení této analýzy postačí odštipnuté vzorky betonu, takže není potřeba pro tyto účely odebírat samostatný vývrt, ale využít např. zbytky vývrtníku po provedení zkoušek pevnosti. Každopádně je nutné si být vědom toho, že získané informace charakterizují stav betonu v době provedení odběru vývrtníku. V případě potřeby zachycení vývoje v čase je potřeba provádět tyto analýzy opakovaně s časovým odstupem.

Tento článek byl vytvořen za finanční podpory Technologické agentury ČR v rámci programu Centra kompetence, projektu CESTI (TE01020168: Centrum pro efektivní a udržitelnou dopravní infrastrukturu) na výzkumné infrastruktuře pořízené z Operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace (CZ.1.05/2.1.00/03.0064).

Ing. Josef Stryk, Ph.D.
Centrum dopravního
výzkumu, v. v. i.
josef.stryk@cdv.cz



doc. RNDr. Miroslava Gregerová, CSc.
Masarykova univerzita Brno
Přírodovědecká fakulta
mirka@sci.muni.cz

Ing. Aleš Frýbort
Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.
ales.frybort@cdv.cz

Ing. Jana Štulířová
Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.
jana.stulirova@cdv.cz

Ing. Jiří Grošek, Ph.D.
Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.
jiri.grosek@cdv.cz

- potenciálně nebezpečné kamenivo:
 - o ASR až 28% tektonicky deformovaných hornin,
 - o SSR nebylo v petrografických charakteristikách zohledněno,
- v případě zbývajících čtyř vývrtníků nebyly identifikovány alkalické silikagely ani novotvořené krystalické fáze, a to i přesto, že zastoupení rizikového kameniva s tzv. reaktivním SiO₂ bylo ve všech vývrtech téměř shodné.

ZÁVĚR

Závěrem lze konstatovat, že při hodnocení provozovaných CBK je přínosné výsledky, vycházející z posouzení projevů poruch na povrchu CBK (zařazení do stupňů 0 až III), doplnit o detailní analýzy provedené na vývrtech. V řadě případů studium prokázalo jiný typ degradace, zásadně odlišný od předpokladů. Povrchové trhliny často zasahují do hloubky 10 až 30 mm od povrchu a nemají