

PORUCHY VOZOVKOVÉHO BETONU DÁLNICE D 11 ZPŮSOBENÉ REAKCÍ ALKÁLIÍ S KAMENIVEM (RAK) ALKALI-AGGREGATE REACTION-INDUCED DAMAGE OF CONCRETE ON THE MOTORWAY D 11

ZDENĚK PERTOLD,
MAREK CHVÁTAL,
JAROSLAVA PERTOLDOVÁ,
JIŘÍ ZACHARIÁŠ,
JAN HROMÁDKO

Břidlice, prachovce, tufy a vulkanity proterozoika jr. křídla Barrandienu reagovaly s alkáliemi v betonu za vzniku silikagelů (starší bohatší Ca, mladší K, Na). Kromě fylosilikátů, pokládaných za příčinu nedostatečně objasněné reakce alkálií se silikáty, jsme našli domény mikrokrystalických křemitých hmot, doprovázených kaolinitem, které jsou typické pro RAK. Novotvořené chloritové lemy na kontaktech kameniva s betonem považujeme za zbytek po uvolnění SiO_2 z prachovce. Většina hornin prodělala neúplné geologické alterace, jejichž výsledkem je chemická a mineralogická nehomogenita hornin a v naší interpretaci i větší náchylnost k RAK.

Late Proterozoic rocks of sedimentary, mixed volcano-sedimentary and volcanic origin reacted with alkalis in concrete to form older gels, high in Ca, and younger gels high in K and Na. Rock-forming phyllosilicates are generally suspected to be involved in alkali-silicate reaction. Besides these, we have found newly formed chlorite rims along aggregate particles, and microcrystalline highly siliceous domains accompanied by kaolinite. We suspect the former to represent a remnant after release of SiO_2 from siltstone, and the later a material likely to react with alkali solutions. Most rocks underwent partial geological alterations (carbonatization, sericitization, silicification) which enhanced the AAR in our interpretation.

Objemové změny betonu, vedoucí za vhodných podmínek k jeho úplné destrukci, mohou být způsobeny dlouhotrvající chemickou reakcí mezi kamenivem a alkáliemi z cementu a přísad. V ČR se jedná o nový, závažný typ poruchy betonu, i když je dnes již zřejmé, že k RAK na stavbách v minulosti na našem území

došlo, avšak tento fenomén nebyl zřejmě včas a správně identifikován. Trhliny v konstrukcích mohou být totiž mylně identifikovány jako mrazový rozpad betonu nebo smršťovací trhliny (s pozdějšími výluhy vápna) z doby výstavby. Dále se popisovaný druh poruchy může vyskytnout i na různých jiných inženýrských stavbách a konstrukčních prvcích z betonu, jako jsou např. mosty, přehrady, jezy, opěrné zdi, roury, bloky atd. Dosud pravděpodobně prvním důkladněji popsáním a publikovaným případem RAK v ČR se stala porucha cementobetonové vozovky.

V letech 1995 až 1999 se na dálnici D 11 (Praha – Poděbrady – Hradec Králové) začaly objevovat nepravidelné trhliny a sítě trhlin v betonu vozovky. Jejich četnost vzrůstala k okrajům desek cementobetonového krytu dálnice, největší hustoty dosahovala v rozích desek a v dolní části deskového průřezu (cca 150 až 240 mm pod povrchem vozovky), tedy v oblasti se stálou, vysokou vlhkostí betonu. U mechanicky zkoušených výtřtů klesl statický E modul betonu na třetinu a pevnost v osovém tahu téměř na nulu, pevnost v tlaku klesla jen málo. Nejvíce postižené byly úseky dálnice v km 28 až 40, betonované v r. 1989. Vzhledem k nepravidelnosti rozpuštění betonové desky a dále s ohledem na mokvající tmavé skvmy na jejich povrchu i na povrchu jádrových výtřtů, kde jsme dokonce objevili i gelové kuličky, jsme považovali za pravděpodobnou hypotézu o přítomnosti gelů, vzniklých alkalickou reakcí kameniva v betonu.

Protože se v kamenivu použitém do betonu dálnice D 11 neměly podle geologických ani technologických předpokladů vyskytovat horniny a minerály, které ČSN 72 1179 uvádí jako možnou příčinu reakce alkálií s „reaktivním“ SiO_2 (tj. amorfni a kryptokrystalické formy SiO_2 jako opál, chalcedon, tridymit, bulizník, rohovec, vulkanická skla a jiné amorfni silikáty), byly vzorky porušeného betonu podrobně zkoumány jak s ohledem na identifikaci gelů, tak i vzhledem ke složení hornin a stop po jejich případné reaktivnosti.

METODY VÝZKUMU

Jádrové výtřty byly podélně rozřezány na desky, jejichž plochy byly diagnosticky barveny na přítomnost vápenatých a draselných gelů. Z výřizných vzorků byly zhotoveny leštěné výbrusy, které byly nejprve použity k petrografické charakteristice optickou mikroskopií a dále k analýze složení jednotlivých minerálů elektronovým mikroanalýzátorem. Některé výbrusy byly také diagnosticky barveny na přítomnost silikagelů a jejich distribuci v mikroměřítku.

Ze stejných vzorků byly vyřezány destičky, které byly studovány elektronovým řádkovacím mikroskopem s připojeným energeticko-disperzním spektrometrem. Povlaky a výplně dutin a trhlin byly studovány ve formě práškových preparátů. Fázové složení některých hmot bylo dále studováno metodou rentgenové difrakce.

KAMENIVO V BETONU

Makroskopicky je kamenivo v betonu tvořeno převážně dvěma zcela odlišnými skupinami hornin: (1) sedimentárními až vulkanosedimentárními horninami, pocházejícími pravděpodobně ze svrchního proterozoika Barrandienu (oblasti tepelsko-barrandienské), a dále (2) horninami granitoidními. To je v souladu s informacemi o zdrojích kameniva použitého při stavbě betonové vozovky, tj. z lomů Zbraslav u Prahy a Olbramovice na Moravě. Velmi zřídka se vyskytují větší úlomky žlutavých jemnozmných sedimentů, které připomínají horniny svrchní křídly, a dále úlomky křemenných hornin s hrubozrnnou vnitřní stavbou. Na základě poznatků o škodách na vozovce a složení dodávaného kameniva byla největší pozornost věnována horninám z lokality Zbraslav. V drobném těženém kamenivu jsou zčásti zastoupeny úlomky stejných hornin jako v kamenivu hrubém drceném, avšak nejčastější složkou jsou oválná zrna křemene. **Mikroskopie hornin** ve výbrusech přinesla podstatné upřesnění horninových typů.

Granitoidní horniny (Olbramovice) jsou zastoupeny dvěma základními typy,

středně až hrubozrnnými granodiority a jemnozrnnými porfyrickými žulami až žulovými porfyry.

- **Granodiority** jsou tvořeny plagioklasem, K–živcem, křemenem a biotitem, většinou chloritizovaným. Struktura je většinou usměrněná, s projevy kataklastické i duktilní deformace, zejména v křemeni. Plagioklasy jsou téměř vždy částečně sericitizované. Časté jsou žilky křemene.

- **Jemnozrnné porfyrické žuly až žulové porfyry** jsou méně zastoupeny než granodiority. Odlišují se od nich zejména jemnozrnnou strukturou základní křemeno-živcové hmoty se sericitem (~ 0,001 mm) a mikroporfyrickými výrostlicemi křemene, plagioklasu a draselného živce (~ 0,1 mm). Akcesorické jsou lupínky biotitu a chloritu (0,1 až 0,05 mm).

Horniny svrchního proterozoika (Zbraslav u Prahy) tvoří škálu hornin od čistě sedimentárních (droby, prachovce, břidlice), přes horniny smíšené, vulkanosedimentární (tufity), po horniny vulkanogenní různých zrnitostí (tufy lapilové, písčové, popelové) a horniny vulkanické (ryolity až dacity). V této řadě jsou koncovými členy klastické sedimenty na jedné straně a kyselé vulkanity na straně druhé. Kromě těchto hornin však byly v hrubém kamenivu zjištěny i vulkanity bazické, reprezentované křemenným spilitem, který není s ostatními horninami spojen žádnými přechodnými členy.

- **Prachovce, prachovité břidlice a břidlice** mají velikost částic nejčastěji 0,09 až 0,001 mm, s malou příměsí zrn psamitických rozměrů. Hlavními minerálními součástmi jsou křemen, živce (albit) a sericit. Jako vedlejší součásti se uplatňují chlorit, chemickým složením na rozhraní pyknochloritu, brunswigitu a diabantitu (ve smyslu klasifikace Heye [1]), opakní pigment (pravděpodobně organická hmota), řidčeji opakní minerály (pyrit), karbonáty (kalcit a siderit) a slídy (muskovit a biotit). Výjimečně byl zjištěn apatit, epidot a blíže neurčená opticky izotropní zrna. Ve všech sedimentárních a metasedimentárních horninách jsou dosti hojné žilky, jak ložní tak i příčné, s různými minerálními výplněmi (křemenné, živcové, křemen-karbonátové a karbonátové s kalcitem a sideritem).

- **Tufy a tufity** jsou v hrubém kamenivu početně zastoupeny. Velikost zrna se pohybuje od popelových tufů k tufům

psamitické zrnitosti. Ve velmi jemně zrnité základní hmotě (0,001 až 0,1 mm), se nacházejí úlomky velikostí 0,01 až 1 mm. Nejčastější jsou úlomky živců (většinou albit, méně ortoklas) a křemene, méně často vulkanických hornin. V několika případech byly identifikovány úlomky andesitů. Dalšími součástkami tufů jsou sericit, chlorit (převažuje pyknochlorit s přesahy do brunswigitu a diabanditu), epidot, prehnit, biotit, muskovit (v tufitu) a rudní (opakní) minerály. Nejčastější alterací těchto hornin je karbonatizace, v některých případech doprovázená chloritem.

- **Kyselé vulkanity (ryolity, dacity)** jsou také častou složkou hrubého kameniva. Jejich panxenomorfní až mikroporfyrická struktura, výjimečně fluidální, se vyznačuje zrnitostí od 0,001 do 1 mm. Z minerálů se uplatňují převážně křemen a živce (albit až anortoklas, ortoklas). Z vedlejších součástí jsou nejhojnější opakní rudní minerál a karbonát. Alterace jsou hojné. Je to zejména karbonatizace horniny (kalcit a siderit, výjimečně ankerit), která dosahuje až 25 % v nepravidelných shlucích, a rozptýlená sericitizace.

- **Spility s křemenem** mají zrnitost obvykle 0,1 až 1 mm. Ve složení silně převažuje albit, křemene je většinou do 10 %. Dále jsou přítomny chlorit, pyroxen (augit), minerály zoisit-epidotové skupiny, karbonát a rudní minerál. Alterace se projevují chloritizací pyroxenů, karbonatizací a výplní mikromandlovcových dutinek křemenem, chloritem a kalcitem.

Ostatní horniny jsou vzácné. Jsou to úlomky agregátního křemene, křemence, dále pískovec s glaukonitem, pocházející z hornin svrchní křídy. Pravděpodobně se

jedná o drobné těžené kamenivo z lokality Sadská (terasy Labe).

SLOŽENÍ ZRN FRAKCE 1 AŽ 4 MM V BETONU

Ve všech vzorcích výrazně převažují zrna klastického křemene. Nejčastější zrnitost je 0,5 až 1 mm. Zrn většího průměru je méně než 10 %. Některá zrna obsahují inkluze biotitu (magmatického či metamorfního původu). Lze odlišit křemen minimálně dvou typů. Jeden reprezentuje křemen magmatického původu, druhý je pravděpodobně metamorfni.

V množství menším než 5 až 3 % jsou přítomny i monokrystalické či polykrystalické suboválné klasty živců (0,4 až 1 mm). Zcela podružnou příměs tvoří izolovaná zrna až lupínky biotitu či chloritu.

SILIKÁTOVÁ CHEMICKÁ ANALÝZA KAMENIVA

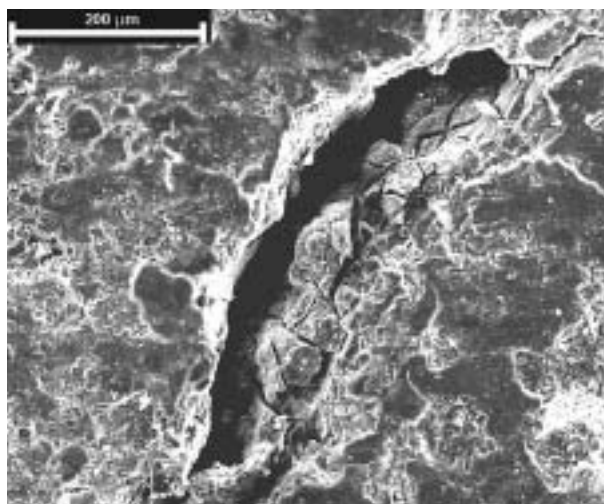
Granodiorit (Olbramovice) má relativně vysoký obsah SiO₂. Typická je převaha sodíku nad draslíkem. Nízké obsahy Fe, Mg a H₂O⁺ ukazují na nedostatek tmavých minerálů a minerálů obsahujících (OH)⁻ skupinu. Zbraslavské křemenné spility jsou z analyzovaných hornin nejchudší SiO₂ a nejbohatší CaO a FeO. Mají výraznou převahu Na₂O nad K₂O. Kyselé vulkanity ukazují převahu Na₂O nad K₂O a variabilitu chemického složení, která je ve shodě s variabilitou petrografickou. Nejvyšší obsah SiO₂ mají některé vzorky tufů a tufitů.

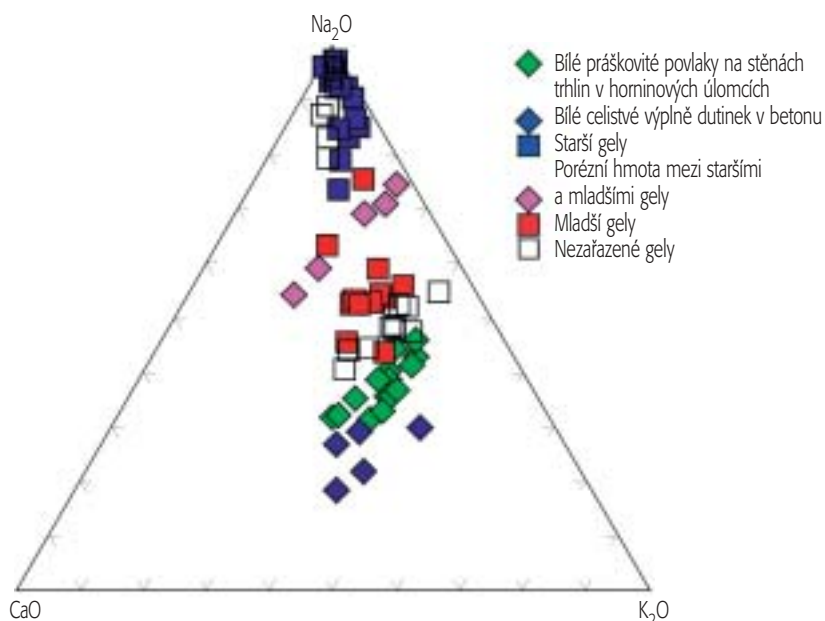
VÝPLNĚ TRHLIN V BETONU A PŘÍTOMNOST SILIKAGELŮ

Ve výplních trhlin a dutin byly zjištěny (v pořadí podle četnosti výskytu): (1) silikagely dvou typů, (2) bílé práškovité po-

Obr. 1 Otevřená trhlina v horninovém úlomku s ledvinitými povlaky dehydratovaného gelu, SEI

Fig. 1. Open crack in a rock fragment with kidney-shaped coatings of dehydrated gel, SEI





Obr. 2 Poměr $\text{CaO} / \text{Na}_2\text{O} / \text{K}_2\text{O}$ fází nalezených v dutinkách a na trhlinách betonu dálnice D11 (hmotnostní %)

Fig. 2. Ratio of $\text{CaO} / \text{Na}_2\text{O} / \text{K}_2\text{O}$ phases found in cavities and cracks in the concrete of D11 motorway (mass %)

vlačky na stěnách trhlin v horninových úlomcích, blíže neurčené, (3) ettringit, (4) bílé celistvé výplně dutinek, blíže neurčené.

Silikagely vyplňují dutinky a trhliny (obr. 1). Často jsou tvořeny starší (spodní) a mladší (svrchní) vrstvou, která bývá následkem dehydratace značně nesouvislá. Mezi nimi bývá vyvinuta porézní přechodná vrstvička. Silikagely jsou amorfni silikáty s kolísavým zastoupením CaO , K_2O a Na_2O (obr. 2) a se silně variabilním obsahem vody. Jejich analyzované složení se pohybuje v širokém rozmezí cca 20 až 70 % SiO_2 , 10 až 60 % CaO , 0 až 17 % K_2O a 0 až 15 % Na_2O (hmotnostní %). Starší gely mají zřetelně vyšší obsah vápníku (30 až 60 % CaO), nižší obsah křemíku (20 až 60 % SiO_2) a nižší obsah alkálií (2 až 15 % $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) než mladší gely (20 až 35 % CaO , 50 až 65 % SiO_2 , 15 až 25 % $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$). Průměrné složení mladších gelů je blízké poměru 5 (K, Na) : 4 Ca : 10 Si (průměr z 12 analýz), složení starších gelů je silně kolísavé. Obsahy alkálií a CaO se vzájemně zastupují. Složení starších gelů, s nižším obsahem SiO_2 a vysokými obsahy CaO , ukazuje na velký vliv betonové matrix, bohaté CaO , při tvorbě gelů. Později se uplatnily roztoky bohatší složkami vlastní alkalické reakce, tj. SiO_2 , K_2O a Na_2O .

Bílé práškovité povlaky se hojně vysky-

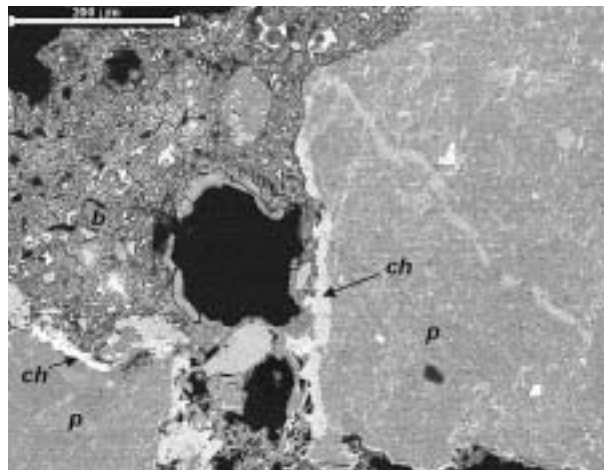
tují na povrchu trhlin v horninových úlomcích a na kontaktu s betonovou matrix, takže tvoří lemy úlomků. Průměrné složení je blízké poměru 5 (K, Na) : 2 Ca : 10 Si.

Ettringit, složitý hexagonální sulfát, tvoří velmi drobné jehlicovité krystaly na stěnách dutinek v betonu. Jeho přítomnost svědčí o existenci roztoků s $\text{pH} > 10$, jak bylo experimentálně dokázáno.

Bílé celistvé výplně dutinek v betonu, ve formě drobných (cca 10 μm) kulovitých agregátů, sestávajících z tenké tabulkovitých krystalků. Chemické složení se pohybuje v rozmezí 63,73 až 65,46 % SiO_2 , 13,15 až 17,54 % K_2O , 7,67 až 13,86 % Na_2O a 6,42 až 10,82 % CaO .

Obr. 3 Na kontaktu prachovité břidlice (p) a betonu (b) je vyvinut chloritový lem (ch), BEI

Fig. 3. Chlorite border (ch) develops on the contact of powder slate (p) and concrete (b), BEI



Vzájemný poměr alkálií je proměnlivý, s převahou K_2O . Lze předpokládat, že se jedná o silikát se stálým počtem atomů Si v mřížce a zastupováním Ca za K a Na.

KAMENIVO A JEHO SLOŽKY, ÚČASTNÍCI SE ALKALICKÉ REAKCE

Ačkoliv nelze vyloučit, že se na alkalické reakci může podílet i silně deformovaný křemen ze zm. granodioritu, je na základě makroskopického pozorování čerstvých jádrových vývrtů a barvicích zkoušek zřejmé, že silikagely přednostně vznikají v zrnech sedimentárních a vulkanických hornin svrchního proterozoika (lom Zbraslav u Prahy) a v jejich sousedství. Mikroskopickým studiem jsme našli dva druhy vysoce podezřelých situací:

- Vznik chloritového lemu na kontaktu prachovité břidlice a betonu. Tento lem, vzhledem ke své pozici a nepravidelnému průběhu (obr. 3), vznikl s největší pravděpodobností reakcí na styku těchto dvou prostředí. Pokud si jeho tvorbu představíme jako reakci alkalického roztoku s břidlicí, potom chloritový lem představuje zbytek po desilifikaci: prachovec obsahuje 65 až 68 % SiO_2 , analyzovaný chlorit pouze 25,9 až 26,4 % SiO_2 . Takto uvolněný křemík by byl k dispozici pro vznik silikagelů, které jako pohyblivější složka se vysrážely v určité vzdálenosti od úlomků horniny, kdežto chlorit jakožto alumosilikát vznikl na místě, ze složek méně mobilních.
- V řadě vulkanogenních hornin (ryolit, pískové a popelové tufy, spilit) byly nalezeny křemité hmoty, které se v mikroskopu projevují jako mikrokrytalické až kryptokrytalické a jsou ve svém okolí doprovázeny mikroporézními oblastmi. Svým chemickým složením však tyto hmoty nemají složení čistého křemene,

ale kromě Si je přítomen i Al (až do 9,7%) a alkálie (max. 5,7% Na₂O a 3,2% K₂O). Tato hmota je tvořena agregáty xenomorfně omezených zrn o velikostech nepřesahujících první desítky mikrometrů. Tyto křemité hmoty se často vyskytují společně s agregáty kaolinitu (obr. 4). Domníváme se, že se v případě společného výskytu křemítých hmot a kaolinitu může jednat o odsklenné součásti vulkanických hornin, které byly silicifikovány a mají kolísavé a proto nestabilní chemické složení. Takový agregát je velmi podobný horninám, které jsou obecně považovány za účastníky alkalické reakce, jako např. pazourek, bulžník, křemité rohovce.

Jak bylo uvedeno výše, proterozoické horniny použité jako kamenivo prodělaly řadu přeměn (alterací) již ve svém původním geologickém prostředí. Je to zejména značně rozšířená karbonatizace, dále prokřemenění, v případě vulkanických hornin chloritizace a sericitizace, a v předcházejícím odstavci uvedené odsklennění, doprovázené kaolinizací a silicifikací. Všechny tyto pochody neproběhly úplně, postihly horniny jen v částech jejich objemu. V důsledku toho jsou horniny po stránce chemické i mineralogické nehomogenní. Jejich částečná geologická přeměna je pravděpodobně také důvodem, proč v nich snáze probíhají antropogenní přeměny, kdy reagují s alkalickými roztoky za vzniku silikagelů. Další příčinou vzniku RAK v těchto horninách může být přítomnost fylosilikátů (sericit, kaolinit, chlorit).

ZÁVĚRY

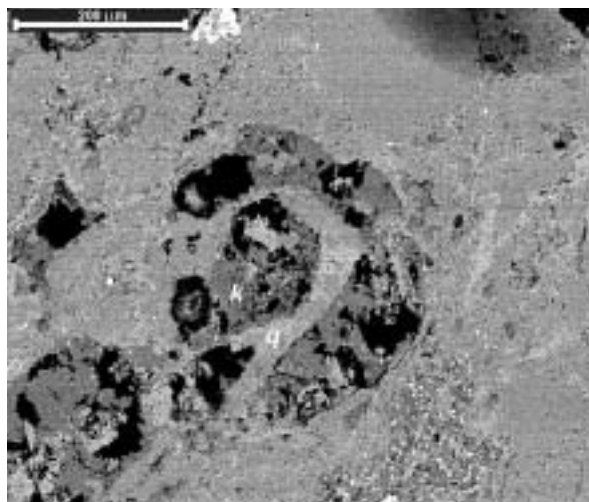
V betonu vozovky dálnice D 11 byly analyzovány křemité gely (silikagely) ve výplni trhlin, obsahující SiO₂, CaO, Na₂O a K₂O. Během jejich tvorby se chemismus měnil od SiO₂ chudších a CaO bohatších ke gelům bohatším SiO₂ a alkáliemi. Ve výplni dutin a trhlin byly nalezeny další, blíže neidentifikované hmoty, zejména bílé práškovité povlaky a drobné krystalické agregáty, a dále sulfát ettringit.

Posloupnost ve vývoji silikagelů, charakterizovaná ubýváním Ca a přibýváním Si a alkálií, ukazuje na postupně ustupující vliv betonové matrix a zvětšující se vliv migrujících produktů alkalické reakce.

Silikagely i další hmoty vznikají převážně v okolí úlomků kameniva, pocházejícího ze svrchního proterozoika Barrandienu, v tomto případě z lomu Zbraslav u Prahy. Tyto horniny jsou zastoupeny vcelku ply-

Obr. 4 Dutiny v pískovém tufu, pravděpodobně po skle, vyplněné kaolinitem (k), lemované kryptokrystalickou křemennou hmotou (q), BEI

Fig. 4 Hollows in sand tuff, probably left after glass, filled with kaolinite (k), lined with cryptocrystalline quartz material (q), BEI



nulou řadou od sedimentů (břidlic a prachovců), přes smíšené horniny tufitické a vulkanogenní tufy až po vyvěliny typu ryolitů a spilitů s křemenem.

Ostatní typy kameniva, tj. granitoidy (HDK Olbramovice) a křemenné agregáty drobného kameniva (DTK Sadská) neasociují zřetelně se silikagely.

Byly zjištěny některé struktury a minerální agregáty, které jsou pravděpodobným svědectvím nebo příčinou vzniku RAK. Je to zejména chloritový lem na kontaktu betonu a sedimentárního prachovce, který vznikl během reakce těchto dvou prostředí. Dále to jsou velmi jemnozrné agregáty křemité hmoty s podílem Al a alkálií, které jsou doprovázeny mikroporézními doménami a agregáty kaolinitu ve vulkanogenních horninách. Považujeme za pravděpodobné, že vznikly odsklenním vulkanického skla a silicifikací, a zároveň se domníváme, že představují hmoty, které jsou náchylné k RAK, podobně jako bulžník, křemítý rohovec apod.

Ve většině zkoumaných vzorků kameniva z lomu Zbraslav byly identifikovány různé alterace vzniklé geologickými procesy (karbonatizace, silicifikace, chloritizace, sericitizace), které nepostihují celou horninu. Tím vznikly nehomogenity a gradienty v chemickém a mineralogickém složení hornin, které je pravděpodobně činí náchylnějšími k reakcím typu RAK. Přítomnost silikátů s vrstevnatou vazbou tetraedrů (fylosilikátů) může být další příčinou vzniku RAK.

Vulkanické horniny a horniny s vulkanogenní příměsí v jv. křídle barrandienského svrchního proterozoika jsou potenciálně náchylné k RAK. Lze usuzovat, že zejména novotvořený chlorit na styku kameniva a betonu, dále jemnozrné až kryptokrys-

talické křemité hmoty vzniklé odsklenním vulkanického skla a částečně proběhnuvší geologické alterace hornin jsou hlavními příčinami vzniku RAK. Pro ocenění vhodnosti jednotlivých částí ložiska Zbraslav a jiných ložisek kamene v této geologické jednotce bude užitečné jejich podrobné petrografické zpracování s ohledem na uvedené a případně i dosud neznámé faktory, které vedou ke vzniku RAK.

Literatura

- [1] Hey M. H.: A new review of the chlorites, Mineralogical Magazine, V. 30, No 224, pp. 277–292
- [2] Myneni S. C. B., Traina S.J., Logan T.J.: Ettringite solubility and geochemistry of the Ca(OH)₂ – Al₂(SO₄)₃ – H₂O system at 1 atm pressure and 298 K, Chemical Geology 148 (1998), pp. 1–19

Prof. RNDr. Zdeněk Pertold, CSc.

e-mail: pertold@mail.natur.cuni.cz

Mgr. Marek Chvátal

e-mail: mchvatal@mail.natur.cuni.cz

RNDr. Jiří Zachariáš

e-mail: zachar@mail.natur.cuni.cz

všichni: Ústav geochemie, mineralogie

a nerostných zdrojů

Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy

Albertov 6, 128 43 Praha,

RNDr. Jaroslava Pertoldová, CSc.

Český geologický ústav

Klárov 3, 110 01 Praha 1

e-mail: pert@cgu.cz

Ing. Jan Hromádko

TÚ, Ředitelství silnic a dálnic ČR

Na Pankráci 56, 145 05 Praha 4

e-mail: laborator@pan.rsd.cz