

Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta,  
Ústav geochemie, mineralogie a nerostných zdrojů

# Porovnání makro- a mikroskopických projevů alkalicko-křemičité reakce v cemento- betonovém krytu vozovek

Diplomová práce

Anna Burdová



Vedoucí diplomové práce: Doc. Mgr. Richard Přikryl, Dr.  
Konzultant: Mgr. Šárka Lukschová, PhD.

Praha 2010

## ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá poruchami pozorovanými na cemento-betonových krytech (CBK) vozovek na třech vybraných úsecích dálnic v České republice. Hlavním cílem bylo zjistit, zda porušení betonu vzniklo vlivem alkalicko-křemičité reakce, či jiným mechanismem. Porušení betonu bylo zkoumáno v makroskopickém i v mikroskopickém měřítku. Mezi hlavní makroskopicky pozorované poruchy patří trhliny porušující povrch i vnitřní části betonu. V mikroměřítku byly zkoumány mikrotrhliny a alkalicko-křemičité gely. Porušení CBK dálnic bylo kvantitativně stanoveno třemi hlavními parametry: měrnou délkou trhlin na povrchu CBK dálnic, měrnou délkou mikrotrhlin ve vrtných jádrech a objemem alkalicko-křemičitých gelů a mikrotrhlin ve výbrusech. Porovnáním těchto parametrů bylo možné rozlišit dva různé mechanismy porušení CBK dálnic. (1) Degradace betonu, která byla spojena zejména s alkalicko-křemičitou reakcí, se objevila na dvou vybraných úsecích dálnic (dálnice D11- Vrbová Lhota a D1) a (2) degradace betonu spojená s jinými mechanismy (cykly mrznutí a tání, mechanická degradace), které se projevily ve třetím případě (dálnice D5).

## SUMMARY

This thesis deals with deterioration observed in cement-concrete cover (CBK) for three selected road sections of highways in the Czech Republic. The main objective was to determine whether concrete failure arose due to alkali-silica reaction, or other mechanism. The deterioration of concrete failure was observed in the macroscopic and microscopic scale. The mostly macroscopically observed deterioration of the concrete were cracks breaking the surface and inner parts of concrete. In micro-scale the microcracks and alkali-silica gels were observed. The CBK deterioration was quantitatively determined by three main parameters: specific length of microcracks on the CBK surface, specific length of microcracks in the drill cores and volume of alkali-silica gels and microcracks in thin sections. According to these indicators it was possible to distinguish two different types of CBK deteriorations. (1) Degradation mainly associated by alkali-silica reaction (observed on highways D11 – Vrbová Lhota and D1) and (2) degradation connected with another mechanism (cycles of freezing and thawing, mechanical degradation) was observed on the highway D5.

## OBSAH

1.	ÚVOD .....	1
2.	REŠERŠE.....	2
2.1	Beton.....	2
2.2	Mechanismy porušení betonu .....	3
2.3	Metody výzkumu alkalicko-křemičité reakce v betonu .....	9
3.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	11
3.1	Terénní práce .....	11
3.2	Laboratorní práce.....	14
3.2.1	Vyhodnocení makroskopických projevů ASR na CBK dálnic .....	15
3.2.2	Vyhodnocení makroskopických projevů ve vrtných jádrech.....	16
3.2.3	Vyhodnocení mikroskopických projevů ASR.....	17
4.	VÝSLEDKY .....	19
4.1	Makroskopické projevy na povrchu CBK.....	19
4.2	Makroskopické projevy ASR na vrtných jádrech.....	19
4.3	Výsledky mikroskopického výzkumu .....	24
4.4	Chemická mikroanalýza alkalicko-křemičitých gelů .....	26
5.	DISKUZE.....	30
5.1	Makroskopické projevy na povrchu a uvnitř desek CBK.....	30
5.2	Porovnání metod makroskopického a mikroskopického určení přítomnosti alkalicko-křemičitých gelů .....	34
5.3	Porovnání makroskopických a mikroskopických projevů poruch na povrchu CBK, ve vývrtech a ve výbrusech .....	34
5.4	Reaktivita kameniva .....	36
6.	ZÁVĚR.....	37
7.	LITERATURA.....	38

## SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1. Činitele nepříznivě ovlivňující životnost betonových konstrukcí.
- Obr. 2. Pozice vybraných lokalit.
- Obr. 3. Schéma členění pozorovaných ploch.
- Obr. 4. Fotodokumentace CBK vozovek.
- Obr. 5. Označení desek CBK vozovek.
- Obr. 6. Schematické znázornění metody analýzy obrazu při vyčíslení měrné délky trhlin na vozovkách.
- Obr. 7. Trhliny ve vrtném jádře VLL1.
- Obr. 8. Schéma popisující postup vyhodnocení modálního složení výbrusů pomocí analýzy obrazu.
- Obr. 9. Vrtné jádro VLP1 barvené uranyl acetátem.
- Obr. 10. Vrtné jádro VLP2 barvené uranyl acetátem.
- Obr. 11. Vrtné jádro VLL2 barvené uranyl acetátem.
- Obr. 12. Vrtné jádro D5PA2 barvené uranyl acetátem.
- Obr. 13. Vrtné jádro D5PB2 barvené uranyl acetátem.
- Obr. 14. Vrtné jádro D5PC1 barvené uranyl acetátem.
- Obr. 15. Mikrofotografie z výbrusu 37B – vrtné jádro D1PA1.
- Obr. 16. Mikrofotografie z výbrusu 8A – vrtné jádro VLL1.
- Obr. 17. Mikrofotografie z výbrusu 3A – vrtné jádro D5PB2.
- Obr. 18. (vlevo) binární graf Si – Na+K pro alkalicko-křemičité gely; (vpravo) binární graf Si – Na+K+Ca pro alkalicko-křemičité gely.
- Obr. 19. Binární graf Si+Al+Mg – Na+K+Ca pro alkalicko-křemičité gely.
- Obr. 20. Alkalicko-křemičitý gel vyplňující pór (vlevo) a mikrotrhlinu pronikající tufitickou drobou (vpravo).
- Obr. 21. Alkalicko-křemičitý gel na kontaktu s křemenným úlomkem.
- Obr. 22. Rozložení trhlin na jednotlivých částech desky D1PA.
- Obr. 23. Rozložení trhlin na jednotlivých částech desky VLP.
- Obr. 24. Rozložení trhlin na jednotlivých částech desky VLL.
- Obr. 25. Rozložení trhlin na jednotlivých částech desky D5PA.
- Obr. 26. Rozložení trhlin na jednotlivých částech desky D5PB.
- Obr. 27. Rozložení trhlin na jednotlivých částech desky D5PC.
- Obr. 28. Porovnání měrné délky trhlin na dílcích desek CBK s měrnou délkou trhlin ve vývrtech.

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Informativní rozdělení hornin podle reaktivnosti kameniva s alkáliemi.

Tab. 2. Základní údaje o úsecích dálnic, vybraných k podrobnému výzkumu.

Tab. 3. Vybrané desky k podrobnému výzkumu.

Tab. 4. Hodnoty aritmetického průměru, mediánu, minima (min), maxima (max.), směrodatné odchylky (SMODCH), variačního koeficientu, koeficientu šikmosti a koeficientu špičatosti vypočtené z hodnot měrné délky trhlin na povrchu CBK.

Tab. 5. Průměrná měrná délka trhlin na vrtných jádrech.

Tab. 6. Podíl hrubého kameniva ve vývrtech (v obj. %).

Tab. 7. Modální složení vrtných jader (v obj. %).

Tab. 8. Podíl hlavních horninových typů v kamenivu (v obj. %).

Tab. 9. Rozpětí hodnot (obj.%) analýz alkalicko-křemičitých gelů ze zkoumaných výbrusů z dálnice D5, odpočívky Vrbová Lhota a dálnice D1.

Tab. 10. Porovnání hodnot měrné délky trhlin na povrchu CBK, měrné délky trhlin ve vrtných jádrech a objemového zastoupení produktů ASR.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

AAR – Alkalicko-agregátová reakce

ACR - Alkalicko-karbonátová reakce

ASG – Alkalicko-křemičitý gel

ASR – Alkalicko-křemičitá reakce

at. % - atomová procenta

CBK – cemento-betonový kryt

obj. % - objemová procenta

Q - křemen

Q-f – křemen-živcový agregát

SEM/EDS - skenovací elektronový mikroskop kombinovaný s energiově disperzním spektrometrem

SSÚD - Středisko správy a údržby dálnic

TP – technický předpis

UGMNZ PŘF UK - Ústav geochemie, mineralogie a nerostných zdrojů Přírodovědecké fakulty  
Univerzity Karlovy v Praze

## SEZNAM PŘÍLOH ZA TEXTOVOU ČÁSTÍ

Příloha č. I. Měrné délky trhlin na deskách D1PA, VLP, VLL, D5PA, D5PB, D5PC.

Příloha č. II. Měrná délka trhlin na povrchu CBK a ve vrtných jádrech.

Příloha č. III. Chemické analýzy alkalicko-křemičitých gelů metodou SEM/EDS.



## PODĚKOVÁNÍ

Na úvod bych ráda poděkovala mému školiteli Doc. Mgr. Richardu Přikrylovi, Dr., za ochotu, podnětné připomínky a pomoc při psaní této diplomové práce. Děkuji Mgr. Šárce Lukschové, PhD a Prof. Pertoldovi z ÚGMNZ PřF UK za přínosné konzultace a rady. Dále děkuji Ing. Hromádkovi a jeho kolegům z Ředitelství silnic a dálnic České republiky za cenné informace. Děkuji pracovníkům Středisek správy a údržby dálnic (SSÚD) (SSÚD Mirošovice, SSÚD Poříčany, SSÚD Rozvadov, SSÚD Ostrov u Stříbra), za provedení uzavírek vybraných úseků dálnic. Poděkování patří také pracovníkům ze společnosti Horský s.r.o., kteří provedli vrtné práce na dálnicích, pracovníkům laboratoře společnosti Kamenický závod Oldřich Svoboda nástupci s.r.o., Pečky, kteří provedli rozřezání vrtných jader a firmě Diatech s.r.o. za tvorbu výbrusů pro potřeby mikroskopie. Dále bych ráda poděkovala provozovatelům laboratoře elektronové mikroskopie a mikroanalýzy na Ústavu petrologie a strukturní geologie, PřF UK, R. Procházkovi a K. Schlöglové, za ochotu při zpracovávání SEM/EDS analýz. Tato práce byla zpracována pod záštitou výzkumného záměru MŠM č. 0021620855 - Mechanismy transportu látek ve svrchních sférách Země a financována v rámci grantového projektu „Příčiny a rozsah poruch CBK vozovek způsobených AAR“ (č. 1F82C/054/910), podporovaného Ministerstvem dopravy České republiky. Na závěr děkuji i své rodině a přátelům za podporu při psaní této práce.

## 1. ÚVOD

Diplomová práce nazvaná „Porovnání makro- a mikroskopických projevů alkalicko-křemičité reakce v cemento-betonovém krytu vozovek“, byla zpracována v rámci grantového projektu Ministerstva dopravy České republiky „Příčiny a rozsah poruch CBK vozovek způsobených AAR“ (č. 1F82C/054/910).

V rešeršní části se práce věnuje betonu obecně, jeho složkami, vlastnostmi a využitím. Zvláštní důraz je však kladen na mechanismy porušení betonu. Mechanismy vzniku porušení betonu jsou různé, např. smrštění, rychlé vysychání, karbonatace, krystalizace solí, porušení vlivem mrznoucí vody, chybné uložení dilatačních trnů. Velmi výrazné poškození betonu může také vzniknout v důsledku alkalické reakce kameniva, na kterou se tato diplomová práce zaměřuje a popisuje metody výzkumu poškozeného cemento-betonového krytu (CBK) vozovek vybraných úseků dálnic v České republice. Tyto úseky byly vybrány na základě konzultací s pracovníky Ředitelství silnic a dálnic České republiky (Ing. Hromádko).

Hlavními cíly diplomové práce bylo:

- (1) porovnání makroskopických projevů na povrchu a uvnitř desek CBK (2D × 3D);
- (2) porovnání makroskopických a mikroskopických projevů na povrchu CBK vozovek, na vrtných jádrech a ve výbrusech;
- (3) možnosti odlišení poruch způsobených alkalicko-křemičitou reakcí a jinými mechanismy;
- (4) v případě porušení alkalicko-křemičitou reakcí určit příčiny (typ kameniva) a určit složení produktů.

V první fázi výzkumu byly provedeny terénní práce, které zahrnovaly výběr vhodných úseků dálnic a výběr desek pro detailní zpracování. Na vybraných deskách byla křídou vyznačena čtvercová síť o velikosti čtverců  $0,5 \times 0,5$  m a jednotlivé čtverce byly fotograficky zdokumentovány. Z každé vybrané desky byla odebrána dvě vrtná jádra.

Druhá fáze výzkumu, laboratorní práce, zahrnovala vyhodnocení makroskopických a mikroskopických projevů poškození CBK vozovek vlivem alkalicko-křemičité reakce.

Makroskopický výzkum zahrnoval: (1) zpracování digitálních fotografií povrchu vybraných desek a vyhodnocení měrné délky trhlin na povrchu CBK metodou analýzy obrazu ( $m/m^2$ ); (2) zhotovení digitálních fotografií rozřezaných vrtných jader, vyhodnocení měrné délky trhlin v jádrech ( $m/m^2$ ) a určení podílu hrubého kameniva metodou analýzy obrazu; (3) uranyl acetátovou metodu, která byla použita pro potvrzení přítomnosti alkalicko-křemičitých gelů ve vrtných jádrech.

Pro mikroskopický výzkum byly zhotoveny z každého vrtného jádra čtyři výbrusy. Pomocí optické mikroskopie bylo určeno petrografické složení kameniva a zjištěna přítomnost alkalicko-křemičitých gelů a mikrotrhlin. Zhotovené mikrofotografie, které byly použity pro vyhodnocení objemového zastoupení produktů alkalicko-křemičité reakce a dalších složek betonu metodou analýzy obrazu. V druhé fázi mikroskopického výzkumu byl využit skenovací elektronový mikroskop v kombinaci s energiově dispersním spektrometrem (SEM/EDS), kterým bylo možné určit chemické složení alkalicko-křemičitých gelů.

## 2. REŠERŠE

### 2.1 Beton

Beton je definován jako "materiál ze směsi cementu, hrubého a drobného kameniva a vody, s přísadami nebo příměsemi nebo bez nich, který získává své vlastnosti hydratací cementu" (ČSN EN 206-1 Beton). Beton je kompozitní materiál, který je složen z hrubého zrnitého materiálu (hrubého a jemného kameniva), který je stmelen pojivem. Jako kamenivo se užívá řada materiálů, především písky a štěrkopísky (přírodní těžené kamenivo) a vhodně upravené horniny (drcené kamenivo). Tyto zrnité složky jsou spojeny především portlandským cementem, dále hlinitanovými cementy, případně též organickými látkami jako epoxidy aj. (Škvára 1995). Beton je nejrozšířenější umělé stavivo vzhledem k dostupnosti všech složek, k jejich poměrně nízké výrobní ceně i jednoduchosti výrobního procesu (Jílek a Novák 1986).

Kamenivo tvoří přibližně  $\frac{3}{4}$  objemu betonu. Podle velikosti největších zrn se kamenivo rozlišuje na drobné, hrubé a štěrkopísek. Drobné kamenivo má průměr zrn pod 4 mm, hrubé v rozmezí 4 až 125 mm. Štěrkopísek je netříděné a neupravované kamenivo (Škvára 1995). Kamenivo do betonu se třídí na řadu frakcí, z nich nejdůležitější jsou: 0-4, 4-8, 8-16, 16-22, 32-63, 63-125 mm (Jílek a Novák 1986; Škvára 1995). Jako zdroje kameniva se používají všechny genetické typy hornin, zejména však magmatické a metamorfované, ale též sedimentární (Bérubé 2001). Nejčastěji využívané sedimentární horniny jsou droby, prachovce, vápence a dolomit. Mezi magmatické horniny používané jako kamenivo do betonu patří granit, syenit, nefelinický syenit, diorit, gabro, porfyry, ryolit, znělec, andezit, čediče, a felsické (nebo ryolitové) tufy. Nejčastěji využívané metamorfované horniny jsou křemence, krystalické vápence a dolomity, amfibolity, některé chloritem-křemenem a slídou bohaté amfibolity, a různé druhy ruly. Aby byla zajištěna pevnost a trvanlivost betonu, kamenivo musí splňovat řadu parametrů, mezi něž patří: mechanické vlastnosti (odolnost proti otluku, obrusu a drcení); odolnost vůči zvětrávacím vlivům (zmrazovací cykly, krystalizace solí); chemická stabilita (např. alkalická reakce kameniva); zamezení přítomnosti škodlivých látek (jemné a sypké částice, organická hmota); tvar částic (kulovitost a ostrohrannost) (Bérubé 2001). Tyto požadavky jsou uváděny v příslušných normových předpisech (Bérubé 2001).

Cement je práškovité pojivo s hydraulickými vlastnostmi, tj. se schopností tuhnout a tvrdnout po přidání záměsové vody v pevnou hmotu na vzduchu i ve vodě (Jílek a Novák 1986). Vyrábí se pálením surovinových směsí (obsahující základní oxidy  $\text{CaO}$  a  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) až nad mez slinutí (cca  $1450^\circ\text{C}$ ) a následujícím rozemletím získaného slínku s dalšími přísadami na velmi jemnozrný práškovitý výrobek. Hlavní přísadou je sádrovec, který působí jako regulátor tuhnutí (Škvára 1995). Různé další přísady a příměsi umožňují dosáhnout zlepšení vlastností betonu, např. zvýšení pevnosti, nepropustnosti, mrazuvzdornosti a apod. (Bilčík a Dohnálek 2003). Podle mineralogického složení se rozlišují cementy: portlandské, směsné (struskoportlandské, vysokopecní), hlinitanové, speciální (Škvára 1995). Nejčastěji používaný portlandský cement obsahuje 50% alitu -  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  (zkráceně  $\text{C}_3\text{S}$ ), který urychluje vzrůst pevnosti cementu, zejména v prvních 28 dnech tvrdnutí cementu. Druhá fáze portlandského cementu zastoupená 25%, je belit -  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  ( $\text{C}_2\text{S}$ ), který vzniká při rychlém ochlazení slínku. Další dvě hlavní složky, které obsahuje slínek portlandského cementu asi po 10%, jsou aluminoferyty vápenaté -  $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$  ( $\text{C}_4\text{AF}$ ) a alumináty vápenaté -  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\text{C}_3\text{A}$ ) (Jílek a Novák 1986). Slínek může obsahovat sádrovec a oxidy  $\text{CaO}$  a  $\text{MgO}$ , které nejsou žádoucí, jelikož mohou způsobit objemovou nestálost betonu (Škvára 1995).

Beton se vyznačuje velkou únosností, trvanlivostí a bezpečností při požáru (Jílek a Novák 1986). Beton dobře vzdoruje tlaku, ale není schopen odolávat větším napětím v tahu a ve smyku, je to křehký materiál. Pevnost betonu je závislá na několika základních faktorech. Prvním faktorem je vodní součinitel, poměr vody ku cementu. Pevnost v tlaku vzrůstá s klesajícím vodním součinitelem (Jílek a Novák 1986). Poklesem vodního součinitele pod určitou mez se však betonová směs stává hůře

zpracovatelnou, dochází ke zvětšení pórovitosti. Pro pevnost a trvanlivost betonu je rozhodující množství cementu udávané v kg na 1 m<sup>3</sup> hotového betonu. Cementová kaše má obalit zrna kameniva souvislou vrstvou a co nejdokonaleji vyplnit i mezery mezi obalenými zrny. Rozmezí množství cementu pro použitelný beton jsou široká – od 50 kg m<sup>-3</sup> pro hubený, nenosný, málo pevný výplňový beton až po 550 kg m<sup>-3</sup> pro nejjakostnější betony (Jílek a Novák 1986). Pevnost betonu dále závisí na pevnosti cementové malty (zatvrdlé); na pevnosti hrubých částic kameniva; na pevnosti rozhraní cementový kámen – kamenivo; na povrchové textuře, tvaru částic kameniva a na maximální velikosti částic kameniva. Nejslabší částí struktury betonu je vazba cementového kamene a částic kameniva. Trhliny na tomto rozhraní začínají vždy dříve než trhliny v cementovém kameni či v částicích kameniva (Škvára 1995).

Betony se dělí podle různých kritérií, např.: podle objemové hmotnosti (lehké, obyčejné a těžké betony); podle způsobu a místa uložení do konstrukce (monolitický a prefabrikovaný beton); podle způsobu využití v konstrukci (prostý, vyztužený železobetonový, nosný, nenosný, tepelně izolační beton); podle zvláštních vlastností (trvanlivé, mrazuvzdorné, vodotěsné, žáruvzdorné, odolávající agresivnímu prostředí; Škvára 1995). Kromě toho se vyrábějí betony pro zvláštní účely: vodostavební, vozovkový beton, přehradové betony, těžké, žáruvzdorné, odolné vůči agresivním vodám (Škvára 1995).

Vozovkový beton je určený pro kryty silničních vozovek a letištních ploch a jiných průmyslových ploch, které jsou mimořádně namáhány. Tento beton se vyznačuje vysokou pevností v tlaku a pevností v tahu za ohybu. Musí být odolný vůči účinkům mechanického opotřebení, vysokým teplotním změnám na povrchu, musí být vodotěsný a s malým smrštěním. Dalším specifickým požadavkem je odolnost vůči účinkům agresivních posypových rozmrazovacích solí. Pro tyto betony se volí silniční cementy s malým smrštěním a kamenivo s malou nasákavostí, malou obrusností a vysokou pevností. Jako kamenivo jsou vhodné šterky drcené z tvrdých hornin s čistým povrchem. Cílem je zpracování při nízkém vodním součiniteli (Škvára 1995).

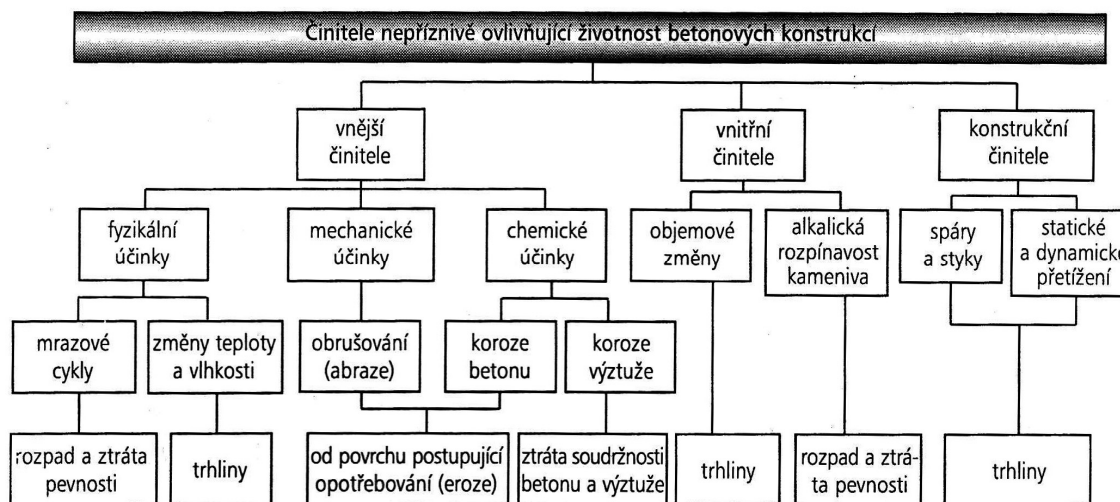
## 2.2 Mechanismy porušení betonu

Vady a poruchy betonových konstrukcí mohou vznikat v průběhu přípravy stavby (nedostatky projektu), v průběhu výstavby (nekvalitní realizace) nebo v průběhu užívání stavby (přirozené stárnutí, nedostatečná údržba, mimořádné zatížení). Spolehlivost konstrukce je ovlivněná kvalitou použitých materiálů a provedením jednotlivých technologických postupů (Bilčík a Dohnálek 2003).

Chyby při výstavbě betonových a železobetonových konstrukcí a jejich nejčastější závady se soustřeďují do těchto oblastí: zásahy do receptury betonové směsi (doplňování vody); špatné ukládání a hutnění čerstvého betonu; špatné ošetřování položeného čerstvého betonu ať při vysokých či nízkých teplotách; špatná poloha výztuže v bedněni; nedodržení geometrických rozměrů prvků (zejm. pak rovinnosti či spádů); provedení nekvalitních izolací, které se projevuje pronikáním vody betonovou konstrukcí (průsaky, výluhy); nekvalitní provedení povrchové ochrany betonu (nátěry, šterky). Všechny tyto okruhy se navzájem prolínají a ovlivňují a nelze je vždy jednoznačně oddělit (Bilčík a Dohnálek 2003).

Základním požadavkem při ukládání čerstvého betonu je, aby nedošlo k jeho rozmísení (segregaci). Nedodržením tohoto požadavku se mohou na konstrukci objevit následující vady: šterková hnízda (oslabují nejvíce namáhané průřezy), kolísavá kvalita betonu, koroze výztuže, průsak vody v pracovních spárách. Při ukládání výztuže se mohou objevit tyto chyby: nedodržení vzdálenosti mezi pruty výztuže, záměna výztuže, nesprávná poloha výztuže atd., toto může vážně ohrozit bezpečnost konstrukce. Trvanlivost železobetonových konstrukcí je výrazně omezená korozí výztuže (Bilčík a Dohnálek 2003).

Vady a poruchy, vznikající při užívání konstrukce, mají různý charakter. Souvisí nejen s přirozeným stárnutím, ale také s mimořádným zatížením nebo agresivitou okolního prostředí. Činitele, vedoucí k poruchám betonu, lze obecně rozdělit na konstrukční, vnitřní a vnější (Obr. 1). Vnější činitele jsou reprezentovány účinky okolního prostředí. Ty mají vliv i na rozsah a rychlost poškození v důsledku vnitřních činitelů. K porušení betonu dochází vlivem nepříznivých, většinou dlouhodobě působících vnějších a vnitřních činitelů (Bilčík a Dohnálek 2003).



Obr. 1. Činitele nepříznivě ovlivňující životnost betonových konstrukcí (Bilčík a Dohnálek 2003).

V následujících příkladech jsou uvedeny příčiny nejčastějších poruch betonových konstrukcí.

Objemové změny, vznikající působením mrazových cyklů, souvisí se změnou skupenství vody, doprovázeném 9% zvětšením objemu. Ve vodou naplněných pórech mohou vzniknout tahová napětí, která značně převyšují pevnost betonu v tahu. Střídavé působení mrazových cyklů způsobuje postupný rozpad struktury betonu. Objemové změny jsou vyvolávány také změnami vlhkosti betonové konstrukce. Ztráta vlhkosti vyvolává zmenšování objemu betonu (smršťování), zatímco přijímání vody vyvolává zvětšování betonu (bobtnání), tím vznikají smršťovací trhliny (Bilčík a Dohnálek 2003). Poruchy betonu mohou být způsobeny opotřebením konstrukce, a to vlivem abraze, kavítace, chemickými vlivy či atmosférickým namáháním. Opotřebením postupuje vždy od povrchu betonu, proto je důležitá kvalita horní vrstvy (Bilčík a Dohnálek 2003). Velmi důležité jsou různé typy chemické koroze betonu. Chemickou korozí betonu se rozumí poškození, ke kterému dochází při chemické reakci materiálu se složkami okolního prostředí. Intenzita vzájemného působení prostředí a materiálu závisí nejen na chemických, ale i na fyzikálních podmínkách, jako jsou např. teplota, tlak a rychlost proudění. Chemismus každého typu koroze je odlišný (Bilčík a Dohnálek 2003).

Velmi výrazné poškození betonu může vzniknout v důsledku alkalické reakce kameniva (St John a kol. 1998). Alkalická reakce kameniva (AAR – alkali-aggregate reaction) je expanzní reakce mezi alkáliemi (sodíkem a draslíkem) v pórovém roztoku betonu a mezi minerály kameniva. Podle druhu reaktivního kameniva a podle podílejících se mechanismů, lze rozlišit dva základní druhy AAR. Alkalicko-karbonátová reakce (ACR – alkali-carbonate reaction), je reakce alkálií, které se vyskytují mezi dolomitovými vápenci s příměsí jílu a alkalickými pórovými roztoky v betonu. Druhým typem AAR je alkalicko-křemičitá reakce (ASR – alkali-silica reaction), při které dochází k reakci alkálií s kamenivem obsahujícím různé reaktivní formy oxidu křemičitého (např. opál, rohovec, pazourek, chalcedon, tridymit, cristobalit, vulkanická skla) (St John a kol. 1998). Dále probíhají také pomalé typy alkalicko-křemičité reakce, kde reagují horniny, dříve pokládáné za nereaktivní (např. droby,

metamorfované horniny, vyvřeliny) (Stanton a kol. 1942). Reakce může vést k lokální objemové expanzi, tvorbě trhlin, ztrátě pevnosti, a v extrémních případech k úplné destrukci betonu (Diamond 1975). Alkalicko-křemičitá reakce byla poprvé zjištěna v betonových vozovkách v Kalifornii Stantonem a kol. (1942) z California State Division of Highways.

Alkalicko-křemičitá reakce může probíhat, pokud jsou splněny všechny následující požadavky: (1) dostatečná vlhkost, ne méně než 85% relativní vlhkosti v pórové struktuře betonu; (2) dostatečná míra alkálií v pórových roztocích obklopujících reagující částici (to má za následek vysoké pH); (3) přítomnost reaktivních minerálů v kamenivu (Bérubé 2001, St John a kol. 1998).

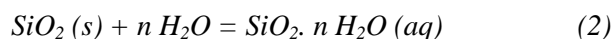
Alkalicko-křemičitá reakce vzniká působením vysoce alkalických roztoků na  $\text{SiO}_2$ , přičemž vysoké pH výrazně usnadňuje rozpustnost  $\text{SiO}_2$  (Dove 1995). Následně dochází k migraci a vysrážení ve formě  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ -křemičitých gelů. Alkalicko-křemičité gely absorbují vodu, tím se zvětšuje jejich objem a vzniká tlak. Tlaky vznikající v betonu mohou dosáhnout 6-7 MPa, zatímco pevnost v tahu je přibližně 2-3 MPa (pro obyčejný beton), tím vznikají mikrotrhliny v cementové pastě (Bérubé 2001).

Reaktivita  $\text{SiO}_2$ , jeho rozpuštění a vysrážení, je určována termodynamickými a kinetickými faktory. Různé modifikace  $\text{SiO}_2$  se rozpouštějí ve vodě podle reakce (1) (Dove 1995):



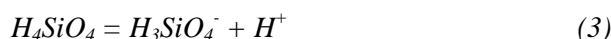
S rovnovážnou konstantou  $K = a_{\text{H}_2\text{SiO}_4} / a_{\text{SiO}_2} a_{\text{H}_2\text{O}}^2$  (2)

V obecnější formě (2):



Rozpustnost polymorfů  $\text{SiO}_2$  vzrůstá v řadě: křemen –  $\alpha$ -cristobalit –  $\beta$ -cristobalit – tridimit – amorfní  $\text{SiO}_2$ . Faktory ovlivňující rozpustnost  $\text{SiO}_2$  jsou: pH, teplota, přítomnost a koncentrace alkalických iontů v pórovém roztoku, velikost částic kameniva, přítomnost sorbovaných látek a povlaků na povrchu (Dove 1995).

Rozpustnost  $\text{SiO}_2$  je nejmenší při pH 2. Směrem k vyšším hodnotám pH se rozpustnost mírně zvyšuje do pH 8,5. Kolem pH 9 se rozpustnost prudce zvyšuje a nastává první disociace (3) (Dove 1995):



Pokud pH roztoku vzroste a zůstane vysoké, přičemž k takovému stavu v betonu dochází, začne se křemen rozpouštět podle následujících reakcí (4, 5, 6, 7) (Dove 1995):



Pokud je roztok v rovnováze s amorfním křemenem, tzn. koncentrace  $\text{SiO}_2$  v roztoku je daleko vyšší, mohou vznikat ionizované vyšší poměry, jako  $\text{H}_6\text{Si}_4\text{O}_7^{2-}$ . Rozpustnost a první disociační konstanty  $\text{SiO}_2$  se mění s teplotou. Tím vzniká poměrně složitý vztah pro chování křemene v závislosti na pH a teplotě (Dove 1995). Vliv teploty na rozpouštění modifikací  $\text{SiO}_2$  potvrzují experimenty, které ukazují, že konstanta rychlosti rozpouštění se pohybuje od  $10^{-14}$  při teplotě  $25^\circ \text{C}$  po hodnoty  $10^{-6}$  při  $300^\circ \text{C}$  a  $10^{-3}$  ( $\text{mol/m}^2 \text{-sec}$ ) při  $600^\circ \text{C}$ . Rozpustnost modifikací  $\text{SiO}_2$  je také závislá na přítomnosti a koncentraci alkalických iontů. Experimenty (Bennet 1991) při teplotách 25 až  $70^\circ \text{C}$  ukázaly, že sodné a draselné chloridy zvýšily rozpustnost 5 až 8 krát. Rozpustnost alkalicko-křemičitého gelu v alkalických podmínkách je zvýšena přítomností dalších alkalických sloučenin ( $\text{LiOH} \sim \text{CsOH}$ ) <

(RbOH ~ NaOH) < KOH. Při vyšších teplotách (100 až 300 ° C) se tento účinek zvyšuje, při čemž účinek klesá v řadě Na ~ K > Li > Mg.

Všechny tyto proměnné, teplota, koncentrace alkalických iontů a pH roztoku se kombinují do složitějšího vztahu. Celkově lze říci, že vliv pH se více uplatňuje při vyšších teplotách a vyšších koncentracích alkalických iontů (Dove 1995).

Míra rozpustnosti SiO<sub>2</sub> závisí také na velikosti povrchu, na němž se solvent (voda) stýká s pevnou fází (SiO<sub>2</sub>) a na volné energii povrchu dané látky. Čím je volná energie látky ( $\sigma$ ) vyšší a poloměr částice ( $r$ ) menší, tím je rozpustnost vyšší (Dove 1995). Rozpustnost částice ( $c$ ) vzhledem k celkové rozpustnosti ( $c^0$ ) závisí dále na tvarové konstantě ( $B$ ) a molárním objemu ( $V$ ) (8):

$$\ln(c/c^0) = (2/3 * 10^{-7} \sigma V B) / r RT \quad (8)$$

Nejen velikost, ale i tvar částic má vliv na jejich rozpustnost. Rozpustnost konvexních částic vzrůstá se zmenšující se velikostí částice, u konkávních částic je tomu opačně. Malé částice se rozpouštějí, velké částice narůstají, zejména ty, které mají hladký povrch a kulovitý tvar (Dove 1995).

Rozpustnost křemene dále ovlivňují sorbované látky a povlaky na povrchu částic. Je znám brzdící účinek Al<sup>3+</sup> na rozpustnost křemene, i když jeho mechanismus není zcela objasněn. Podobně je známo, že v přítomnosti dvojmocného železa je křemen rozpustnější v porovnání s železem trojmocným, jak v přírodních tak i laboratorních podmínkách. Experimentálně byl vyzkoušen brzdící účinek iontů Al<sup>3+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Be<sup>2+</sup>, Ga<sup>3+</sup> (Dove 1995).

Již v samotném počátku zkoumání alkalicko-křemičité reakce bylo zjištěno, že obsah alkálií v portlandském cementu má přímý vliv na sklon betonu k rozpínání (Stanton a kol. 1942). Jde o dvě složky Na<sub>2</sub>O a K<sub>2</sub>O. Alkalický ekvivalent Na<sub>2</sub>O<sub>e</sub> se vypočítá takto: Na<sub>2</sub>O + 0,658 K<sub>2</sub>O. Limitní obsah Na<sub>2</sub>O<sub>e</sub> v cementu 0,60% se často uvádí jako faktor k zjištění minimalizace porušení betonu, je-li v něm přítomno reaktivní kamenivo (TP 137, 2003). Hlavním zdrojem alkálií v betonu je portlandský cement, dalším zdrojem alkálií jsou příměsi pucolánů nebo struska. Alkalické živce v některých druzích kameniva a také kamenivo těžené z moře, mohou přispívat k obsahu alkálií v betonu (Modrý a kol. 2003). Alkálíe může beton získávat i z vnějších zdrojů, např. rozmrazovací soli, mořská voda, atd. (Jensen a kol. 1982).

Mezi reaktivní kamenivo se řadí (Tab. 1): přírodní formy SiO<sub>2</sub> - tridymit, chalcedon, cristobalit, opál nebo silikáty jako jsou průmyslová skla (Chatterji 2005, St John a kol. 1998). Alkalickou reaktivitu vykazují některé kyselé a středně kyselé vulkanické horniny, např. vulkanická skla, ryolity, dacity, latity a andesity. Tufy obsahující zlomky vulkanických hornin mohou být rovněž reaktivní. Mezi reaktivní metamorfované horniny patří především rohovec (Bulteel a kol. 2004), jemnozrnné ruly (Jensen 2004) a deformované křemenné agregáty (TP137, 2003). Dále mohou reagovat metamorfované sedimentární horniny, jako jsou jílovité břidlice, meta-droby, fylity a břidlice (Chatterji 2005). Všechny tyto reaktivní materiály mají některé charakteristiky společné. Všechny obsahují SiO<sub>2</sub> jako hlavní komponentu a povrch všech silikátových materiálů je pokryt silanolovou ( $\equiv\text{Si-OH}$ ), skupinou (Chatterji 2005).

Otázka reaktivnosti kameniva není vždy jednoznačná, jelikož příznaky alkalicko-křemičité reakce se mohou projevit v betonových konstrukcích i po 15 nebo 30 letech (Owsiak 2004). Na následujících příkladech jsou uvedeny betonové konstrukce, do kterých bylo použito kamenivo v době stavby považované za nereaktivní.

Do betonu přehrady Alto Rabago v Portugalsku, postavené na počátku 60. let 20. stol., byly použity granity a i přesto se na povrchu i uvnitř betonu objevily známky alkalicko-křemičité reakce. Detailní výzkum kameniva identifikoval v granitech silně deformovaný křemen a přítomnost mikrokrytalického křemene, které mohou být reaktivní (Fernandes a kol. 2007). Stark a kol. (2006) zkoumali dálnici v severním Německu, která byla poškozena alkalicko-křemičitou reakcí drob,

prachovců a kvarcitů, i když podle směrnic byly hodnoceny jako nereaktivní. Následující příklad také z Německa, mostní opěrný pilíř, postavený v roce 1978 vykazoval po dvaceti letech poškození, která způsobila alkalicko-křemičitá reakce. Použité kamenivo, které bylo také kvalifikováno jako nereaktivní, obsahovalo křemičité břidlice, křemité pískovce, droby a deformovaný křemen (Stark a kol. 2006). Na posledním příkladě je potvrzena možnost vzniku alkalicko-křemičité reakce průnikem alkálií z vnějšího prostředí. Do betonu letištní plochy ve středním Německu, byly použity křemenné porfyry, které také byly kvalifikovány jako nereaktivní. Po sedmiletém provozu na ploše vznikly trhliny způsobené alkáliemi obsaženými v nezamrzajících směsích (Stark a kol. 2006).

Tab. 1. Informativní rozdělení hornin podle reaktivnosti kameniva s alkáliemi (TP 137, 2003).

Reaktivnost	Skupina hornin	Petrografický druh
Nízká	Magmatické	Granit, granodiorit, gabro, čedič, melafyr, diabas, spilit, znělec
	Sedimentární - zpevněné - nezpevněné	Vápence bez přítomnosti rohovců,
		Čistý křemitý písek (z druhohorních pískovců)
Metamorfované	Granulit, amfibolit, hadec, krystalický vápenec	
Střední	Magmatické	Ryolit, porfyr, porfyrit, melafyr s mandlovci
	Sedimentární - zpevněné - nezpevněné	Droba, slepencové droby
		Písek, štěrkopísek (dle oblasti výskytu)
Metamorfované	Pararula, ortorula, rohovec, metamorfované prachovce, prachovcové břidlice	
Vysoká	Magmatické	Ryolit, porfyr, porfyrit, vulkanické sklo, sopečný tuf, andezit
	Sedimentární - zpevněné - nezpevněné	Droba, vápenec s rohovcem organického původu, křemenec, dolomit <sup>1)</sup>
		Písek, štěrkopísek (dle oblasti výskytu)
Metamorfované	Rohovec, metadroba, buližník, kvarcit, deformované křemenné agregáty, pararula, ortorula	
<b>Vysvětlivky:</b>		
<sup>1)</sup> U dolomitu se jedná o alkalicko – karbonátovou reakci - ACR (dedolomitizaci) s doprovodnou škodlivou objemovou změnou betonu, bez tvorby gelů.		

V případě, že jsou v betonu přítomny reaktivní složky, začíná reakce v místě kontaktu cementového pojiva s povrchem částic kameniva. Vznikají reakční lemy kolem zrn kameniva, které mají odlišnou barvu. Postupující tvorba alkalicko-křemičitého gelu způsobuje vznik trhlinek uvnitř zrn kameniva a ve hmotě cementové pasty obklopující zrna kameniva. Často jsou zřejmé trhliny na povrchu kameniva. Pokud alkálie působí z vnějšího prostředí, pak vznikající alkalicko-křemičité gely postupují od povrchu do nitra betonu (Modrý a kol. 2003).

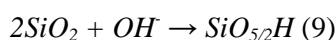
Rychlost reakce alkálií s kamenivem je často nízká a vnější průkazné znaky jako, jsou výrony gelu, odprýsknutá místa, síť trhlín a objemové změny, nemusí být zřejmé po řadu let (St John a kol. 1998). V ojedinělých případech se gely objeví, ale nejsou patrné trhliny v betonu. Ve většině případů vznik gelu vyvolává poruchy konstrukcí v důsledku expanzivních sil. Ochrana před alkalicko-křemičitou reakcí se orientuje na regulaci vlhkosti, typu a množství potenciálně reaktivních křemičitých složek



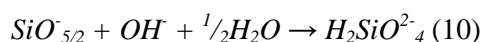
v kamenivu a snížení pH pórových roztoků v betonu (St John a kol. 1998). Pokud je beton umístěn v suchém prostředí, alkalicko-křemičitá reakce se nerozvine a to i tehdy, když je přítomen velmi reaktivní oxid křemičitý a rovněž alkálie (Modrý a kol. 2003).

Podrobné rozborů reakčních produktů alkalicko-křemičité reakce prokázaly, že se jedná o vápenato-silikátovo-alkalicko-vodný komplex variabilního složení (Chatterji 2005). Například v práci Tambelli a kol. (2006) byly analyzovány vzorky alkalicko-křemičitých gelů, které se vyskytovaly v poruchách betonu v přehradě Rio Grande, v brazilském státě Minas Gerais. Za použití moderní metody skenovacího elektronového mikroskopu kombinovaného s energiově disperzním spektrometrem (SEM/EDS), se ve složení alkalicko-křemičitých gelů se uplatňuje  $\text{SiO}_2$  v obsazích kolem 80%,  $\text{K}_2\text{O}$  kolem 14%,  $\text{Na}_2\text{O}$  3-6%,  $\text{CaO}$  1%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  0,2-0,3%.

García-Díaz a kol. (2006) studovali strukturu alkalicko-křemičitých gelů, které způsobují poruchy betonu. V první fázi z  $\text{Q}_4$  tetraedrů ( $\text{SiO}_2$ ) vznikají  $\text{Q}_3$  tetraedry ( $\text{SiO}^-_{5/2}$ ) rozrušením siloxanových vazeb hydroxylovými ionty (9):



a tím dochází ke zvětšení objemu. V druhé fázi dochází k rozpouštění těchto tetraedrů při vzniku silikátových iontů  $\text{H}_2\text{SiO}_4$  (monomerů nebo polymerů) (10):



Pozdější srážení silikátových iontů vede k tvorbě C-S-H nebo C-K-S-H a C-N-S-H fází.

K nejpatrnějším projevům alkalicko-křemičité reakce patří vznik trhlin na betonu, posun konstrukčních prvků v důsledku vnitřního rozpínání betonu a dále odprýskávání povrchu (Modrý a kol. 2003). Tyto vnější projevy nemusí být nutně specifické jen pro alkalicko-křemičitou reakci v betonových konstrukcích. Rozlišují se dvě hlavní příčiny vzniku trhlin a to jsou: (1) deformační účinky objemových změn (technologické trhliny) a (2) statické trhliny vzniklé silovými účinky zatížení. Mezi technologické trhliny patří: smršťovací trhliny; trhliny v důsledku teplotních změn; trhliny způsobené korozi výztuže; trhliny v důsledku rozpínání ledu; trhliny v důsledku alkalicko-křemičité reakce (Bilčík a Dohnálek 2003).

Vývoj trhlin v betonových konstrukcích v důsledku alkalicko-křemičité reakce je způsoben zvětšením objemu, které lze pozorovat přímo buď jako rozpínání trhlin nebo vybočení jednoho prvku s ohledem na druhý. Odprýsknutí z povrchu a výrony alkalicko-křemičitého gelu na povrch betonu mohou být rovněž příznakem alkalicko-křemičité reakce, avšak samy o sobě nedemonstrují nadměrné rozpínání betonu. I když přítomnost alkalicko-křemičitého gelu na povrchu betonu indikuje existenci alkalicko-křemičité reakce, neznamená to však, že se vytvořily trhliny v důsledku působení gelu při jeho transportu k povrchu betonu (Modrý a kol. 2003). Změna typické barvy betonu podél trhlin často doprovází alkalicko-křemičitou reakci, nicméně se může také objevit i z jiných příčin (např. při vyluhování). Nejzranitelnější části betonové konstrukce jsou ty, které jsou vystaveny působení vlhka a tepla. Praktické, ale i laboratorní případy potvrzují, že beton vystavený působení střídavého vysušování a nasycování vodou je mnohem náchylnější na nadměrné rozpínání v důsledku alkalicko-křemičité reakce, než beton vystavený setrvalé vlhku. Alkalicko-křemičitá reakce rychle postupuje všude tam, kde se může zadržovat v konstrukci voda, např. dešťová nebo z tajícího sněhu. To platí zejména pro konstrukce bez ochrany. Obvykle jde o samostatně stojící stěny, trámy nebo parapety. Porušování těchto betonových prvků zasažených alkalicko-křemičitou reakcí se zvyrazňuje při působení mrazu a tání (Modrý a kol. 2003).

Defekty na povrchu CBK vozovek jsou zpravidla prvním indikátorem změny stavu vozovky. Jejich intenzita i morfologie do jisté míry závisí na okolních klimatických podmínkách, na stupni zatížení vozovky a především na typu degradačního mechanismu v betonu. Mezi hlavní makroskopicky patrné poruchy CBK vozovek způsobené v důsledku alkalicko-křemičité reakce patří: trhliny, alkalicko-

křemičité gely tvořící světlé povlaky na konstrukcích, odprýskávání povrchových částí CBK, celkový rozpad a drolení betonových dílců (Stark 1991, St John a kol. 1998).

Trhliny způsobené alkalicko-křemičitou reakcí jsou v počátečním stadiu špatně patrné a náhodně orientované. Zpravidla se koncentrují v místech s vyšším přísunem vlhkosti (okraje betonových dílců). Na vyschlém povrchu vozovky jsou velmi špatně pozorovatelné. Na vlhkém nebo částečně vysychajícím povrchu vozovky mohou být tmavší než okolní plochy. V pokročilejším stadiu se četnost trhlin výrazně zvyšuje a jsou náhodně orientované, někdy taktéž přednostně koncentrované v rozích a okrajových částech betonových dílců. V tomto stadiu, kdy trhliny lemují okraje betonových dílců, bývá alkalicko-křemičitá reakce často zaměňována s poškozením betonu účinkem mrznoucí vody, při které trhliny procházejí souběžně s okraji betonových dílců a jsou málo rozvětvené. V případě alkalicko-křemičité reakce je možné tmavé zbarvení trhlin v důsledku zanášení nečistot. Trhliny vyplněné alkalicko-křemičítým gelem jsou naopak světlé, světle šedé nebo bílé. V případě silně poškozených CBK vozovek dochází k propojení trhlin po celém povrchu betonových dílců, trhliny vytvářejí drobné, několik centimetrů velké polygony a vytvářejí tzv. „sítě trhlin“. V tomto stadiu taktéž může docházet k odpadávání, odlupování nebo drolení některých částí betonových dílců (Stark 1991).

Nejdůležitější ukazatele poškození betonu v mikroskopickém měřítku jsou alkalicko-křemičité gely, mikrotrhliny, a okraje úlomků vykazující interakci s cementovým pojivem. Intenzita jednotlivých znaků je variabilní, závisí jak na typu vzorku, tak na typu reaktivního kameniva (Lukschová a kol. 2008). (Dále viz kapitola 2.3. Metody výzkumu alkalicko-křemičité reakce v betonu).

### 2.3 Metody výzkumu alkalicko-křemičité reakce v betonu

Trhliny makroskopicky viditelné na povrchu betonových konstrukcí patří mezi hlavní indikátory degradace betonu „in situ“ (St John a kol. 1998). Přesné mapování trhlin na povrchu betonových konstrukcí je stále předmětem výzkumu. V minulosti byla intenzita trhlin na konstrukcích hodnocena kvalitativně podle subjektivního posouzení osoby, která prohlídku prováděla (Clark a kol. 1992). V novějších publikacích je intenzita trhlin stanovována podle počtu trhlin na plochu a podle jejich šířky (Bilčík a Dohnálek 2003; Jensen 2004).

Způsob stanovení počtu trhlin na ploše betonových vzorků je možné zpřesnit a nestanovovat pouze počet trhlin na plochu, ale jejich délku vyjádřenou v mm/mm<sup>2</sup> nebo v m/m<sup>2</sup>. Tento parametr lze vyhodnotit např. pomocí vhodného počítačového programu (tzv. analýzy obrazu), který umožňuje automatické či poloautomatické měření geometrických vlastností objektů (např. délek). Princip analýzy obrazu spočívá v kvantitativním stanovení podílu jednotlivých složek zkoumaných vzorků a ve stanovení jejich tvarových parametrů. Méně obvyklé a z dostupné literatury neznámé je stanovení měrné délky trhlin ve vývrtech. Tento způsob stanovení měrné délky trhlin rozšiřuje poznatky o rozložení a četnosti trhlin nejen na povrchu vozovek, ale i směrem do hloubky CBK (Pertold a kol. 2009).

Pro správnou diagnostiku alkalicko-křemičité reakce, respektive jejího produktu, alkalicko-křemičitého gelu, lze použít uranyl acetátovou metodu (Stark 1991). Metoda spočívá v interakci roztoku uranyl acetátu, [UO<sub>2</sub>(C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>O<sub>2</sub>)<sub>2</sub>], v kyselině octové s alkalicko-křemičítým gelem. Roztok uranyl acetátu v kyselině octové se nanáší na povrch betonu, přičemž nastává sorpce UO<sub>2</sub><sup>2+</sup> na negativně nabitým povrchu alkalicko-křemičitého gelu. Přítomnost gelu lze po ozáření ošetřeného povrchu betonu UV světlem identifikovat podle fluorescenčních barev (Stark 1991). Metodiku je možné použít jak v laboratoři, tak i v terénu za použití přenosného zařízení. Uranyl acetátovou metodu lze teoreticky použít k identifikaci alkalicko-křemičitého gelu na jakémkoliv povrchu betonu. Z praxe však vyplývá, že nejvhodnější jsou nově vytvořené plochy, jako jsou čerstvé lomy, jádra a obroušené nebo odříznuté povrchy (Stark 1991).

Diagnóza alkalicko-křemičité reakce v konstrukci poškozené rozpínáním spočívající pouze na makroskopických projevech není spolehlivá. Pro hodnocení příčin porušení je nutné z příslušné konstrukce odebrat vzorky pro mikroskopický výzkum (Modrý a kol. 2003). Mikroskopický výzkum výbrusů betonu je nezbytný při stanovení podílu jemného kameniva, při určení petrografického složení hrubého i jemného kameniva, při stanovení obsahu pórů, cementového pojiva a především při určení degradačních mechanismů v betonu (St John a kol. 1998). Využívány jsou především polarizační mikroskop a skenovací elektronový mikroskop kombinovaný s energiově disperzním spektrometrem (SEM/EDS) (Clark a kol. 1992; Marfil a Maiza 2001).

Zvláštní důraz se při optické mikroskopii výbrusů klade na identifikaci alkalicko-křemičitých gelů a mikrotrhlin (Lukschová a kol. v tisku; TP 137, 2003). Alkalicko-křemičité gely se mohou vyskytovat: na kontaktech s monominerálními nebo horninovými úlomky (obzvláště na kontaktech s úlomky obsahujícími reaktivní formy  $\text{SiO}_2$  a na kontaktech s některými kyselými vulkanity), v pórech a uvnitř cementového pojiva. U vysoce reaktivních typů kameniva může docházet ke vzniku „rozlité“ formy alkalicko-křemičitých gelů, kdy se gely dotýkají většího počtu úlomků kameniva (TP 137, 2003). Vzhled gelu může být proměnlivý v závislosti na tom, zda se gel nalézá uvnitř ztvrdlé cementové pasty nebo uvnitř zrna kameniva. Uvnitř zrna kameniva může mít gel zrnitý charakter, zatímco uvnitř pasty je sklovitý (Modrý a kol. 2003). Mikrotrhliny jsou vedle alkalicko-křemičitých gelů druhým hlavním indikátorem alkalicko-křemičité reakce. Mikrotrhliny mohou být pozorovány kolem jednotlivých úlomků nebo protínající cementové pojivo. Zpravidla jsou tyto mikrotrhliny alespoň částečně vyplněny gely (TP 137, 2003). Skenovací elektronový mikroskop kombinovaný s energiově disperzním spektrometrem, SEM/EDS metoda, zvyšuje podrobnou identifikaci chemického složení a morfologie produktů alkalicko-křemičité reakce (Lukschová a kol. 2008).

### 3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část popisuje terénní a laboratorní práce. Terénní práce obsahovaly výběr úseků dálnic, výběr desek, označení desek, fotodokumentaci desek a odběr vzorků z CBK dálnic. Laboratorní práce zahrnovaly vyhodnocení makroskopických projevů alkalicko-křemičité reakce na povrchu CBK dálnic, vyhodnocení makroskopických projevů ve vrtných jádrech a vyhodnocení mikroskopických projevů alkalicko-křemičité reakce.

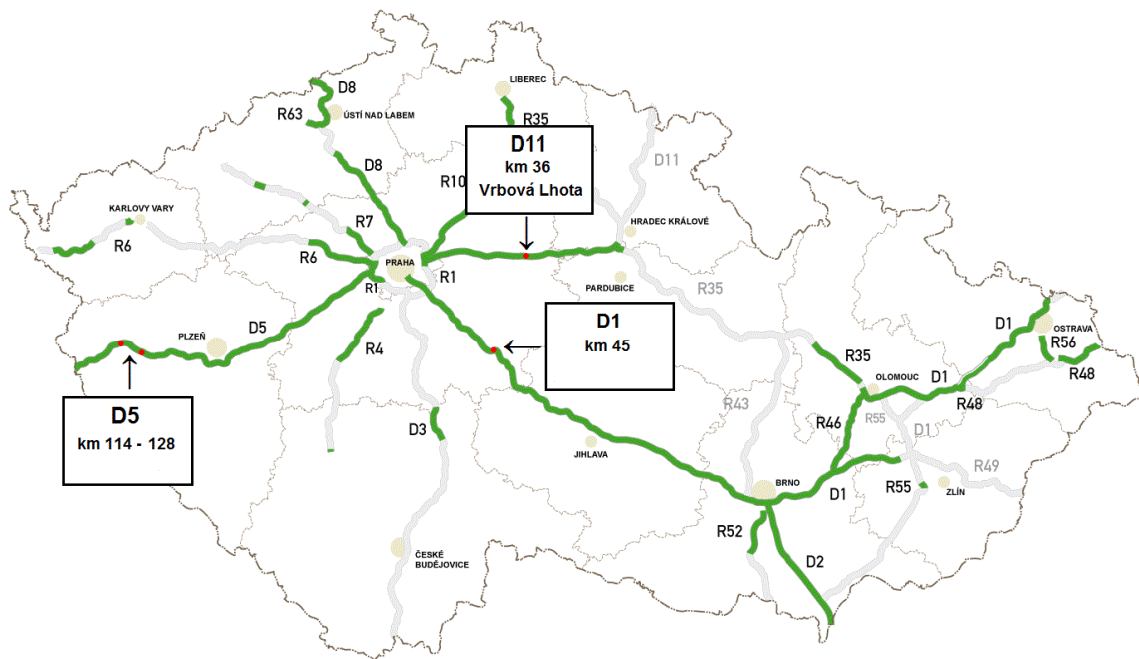
#### 3.1 Terénní práce

Výběr úseků dálnic vhodných k podrobnému makroskopickému zkoumání a odběru vzorků proběhl ve spolupráci s Ing. J. Hromádkem a jeho kolegy z Ředitelství silnic a dálnic České republiky. Uzavírka vybraných úseků dálnic byla realizována po dohodě se Středisky správy a údržby dálnic (SSÚD) spravujícími jednotlivé úseky (SSÚD Mirošovice, SSÚD Poříčany, SSÚD Rozvadov, SSÚD Ostrov u Stříbra) a za asistence jejich pracovníků (Pertold a kol. 2009). K podrobnému zkoumání bylo vybráno šest různých úseků na dálnicích D1, D5, D11, a odpočívce Vrbová Lhota (D11). V diplomové práci jsou zpracovány tři lokality, vybrané podle makroskopicky pozorovatelné četnosti poruch na povrchu CBK. Vybrány byly následující úseky dálnic (Tab. 2 a Obr. 2):

- dálnice D5 - úsek s nejvyšší četností poruch;
- odpočívka Vrbová Lhota na dálnici D11 - úsek se střední četností poruch;
- dálnice D1 – úsek s nejnižší četností poruch.

Tab. 2. Základní údaje o úsecích dálnic, vybraných k podrobnému výzkumu (podklady Hromádka ústní sdělení 2008).

Dálnice	D1	D11 odpočívka Vrbová Lhota		D5
Úsek dálnice	Brno (P), 43. – 45,5. km	Odpočívka Vrbová Lhota, Praha (L), 36. km	Odpočívka Vrbová Lhota, Poděbrady (P), 36. km	Rozvadov (P), 114. – 115,5. km, 127,5. – 128,5. km
Rok stavby	~ 1973	1989	1989	1996 - 7
Rok rekonstrukce	1992	-	-	-
Dálniční pruh	stoupací	odpočívka	odpočívka	stoupací
Použité hrubé kamenivo	Zbraslav	Zbraslav	Zbraslav	Litice u Plzně, Trnčí - Krušec
Použité jemné kamenivo	-	-	-	Vejprnice, Chlum u Třeboně, Tlučná
Předpokládané poruchy	ASR	ASR	ASR	ASR, mechanické poruchy



Obr. 2. Pozice vybraných lokalit – červené tečky a k nim vedoucí šípky; zelené čáry vyznačují dálnice a rychlostní silnice v České republice (www.ceskedalnice.cz).

Na zkoumaných úsecích dálnic byly vybrány jednotlivé desky CBK pro detailní makroskopický výzkum poruch. Přesná pozice desek, jejich rozměry a označení odebraných vrtných jader jsou uvedeny v Tab. 3. Jednotlivé desky byly označeny následujícím způsobem: D1P(ev. L)A = D1 (označení dálnice), P (ev. L, pravá nebo levá strana dálnice), A (označení desky).

In situ makroskopická pozorování se zaměřila na povrchové projevy alkalicko-křemičité reakce v CBK, tedy síť trhlin. Terénní pozorování byla doplněna o odběr vzorků pomocí vrtných jader.

Tab. 3. Vybrané desky k podrobnému výzkumu.

Název dálnice (odpočívadla)	Označení úseku (desky)	Směr, kilometráž	Dálniční pruh	Rozměry desky	Odebrané vývrty (jejich souřadnice)	Poznámky
D1	D1P	Brno (P), 45,31 km	stoupací	3 × 4,5 m	D1PA (2A-2B), D1PC (4C-4D-5C-5D)	poslední ze 6ti po sobě jdoucích desek obsahujících trhliny
D11 - Vrbová Lhota	VLP	Poděbrady (P), 36,00 km	odpočívka	5 × 5 m	VLP1 (2C), VLP2 (3E-3F)	deska u nájezdu k čerpací stanici
	VLL	Praha (L), 36,00 km	odpočívka	3,5 × 5 m	VLL1 (2B-3B), VLL2 (5E-6E)	pruh při nájezdu na parkoviště
D5	D5PA	Rozvadov (P), 114,95 km	stoupací	3,5 × 5 m	D5PA1 (3D), D5PA2 (6E)	
D5	D5PB	Rozvadov (P), 128,18 km	stoupací	3,5 × 5 m	D5PB1 (5D), D5PB2 (5F)	
D5	D5PC	Rozvadov (P), 128,23 km	stoupací	3,5 × 5 m	D5PC1 (9G), D5PC2 (6D)	

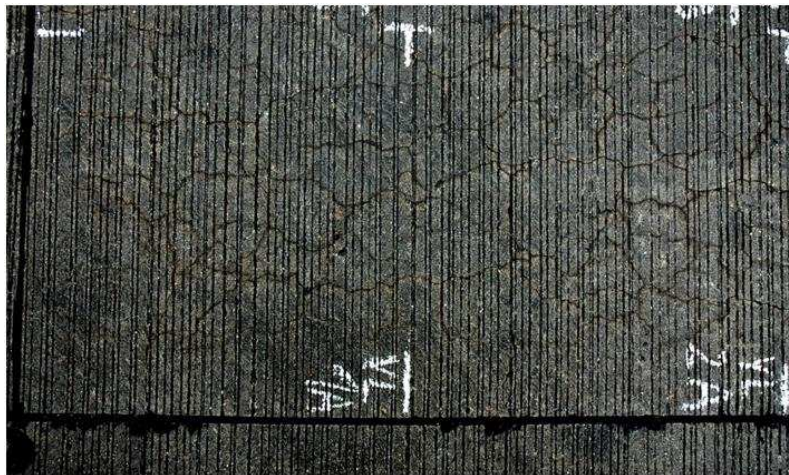
Na každé desce byla křídou za pomoci nivelační latě vyznačena čtvercová síť o stranách čtverců 50 × 50 cm. Řady čtverců byly označeny čísly a sloupce písmeny (Obr. 3). Každý čtverec byl zdokumentován digitálním fotoaparátem z výšky 1 – 1,5 m, vždy kolmo k povrchu vozovky (Obr. 4). Každá digitální fotografie tak zachycovala vždy 1 nebo 2 dílce o rozměrech 50 × 50 cm (Obr. 5). Tyto snímky byly následně analyzovány programem na analýzu obrazu s cílem kvantifikovat délku trhlin.

	A	B	C	D	E	F	G
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							

Obr. 3. Schéma členění pozorovaných ploch.



Obr. 4. Fotodokumentace CBK (dálnice D5 - 128,23. km směr Rozvadov; deska D5PC; 21.5.2008).



Obr. 5. Označení desek – dílce čtvercové sítě o stranách čtverců 50 × 50 cm; VL = Vrbova Lhota; 1A = číslo označuje řadu čtverců a písmeno označuje sloupce (odpočívka Vrbova Lhota - 36. km, směr Praha; deska VLL; 14.3.2008).

V každé zkoumané desce byly uskutečněny dva jádrové vrty. Místa pro odběr vrtných jader byla určena tak, aby jedno jádro pocházelo z málo poškozené části betonové desky a druhé z maximálně poškozené části. Místo odběru jader bylo vyznačeno voděodolným sprejem. Vrtná jádra byla označena následujícím postupem: D1P(ev. L)A1 = D1(označení dálnice), P (ev. L, pravá nebo levá strana dálnice), A (označení desky), 1 (číslo vrtného jádra). Vrtné práce byly provedeny ve spolupráci se společností Horský s.r.o. Průměr vrtných jader činil 150 (resp. 80) mm, délka se pohybovala v rozpětí 200 – 300 mm, v závislosti na celkové tloušťce CBK, aby vývrty zastihly podložní vrstvy.

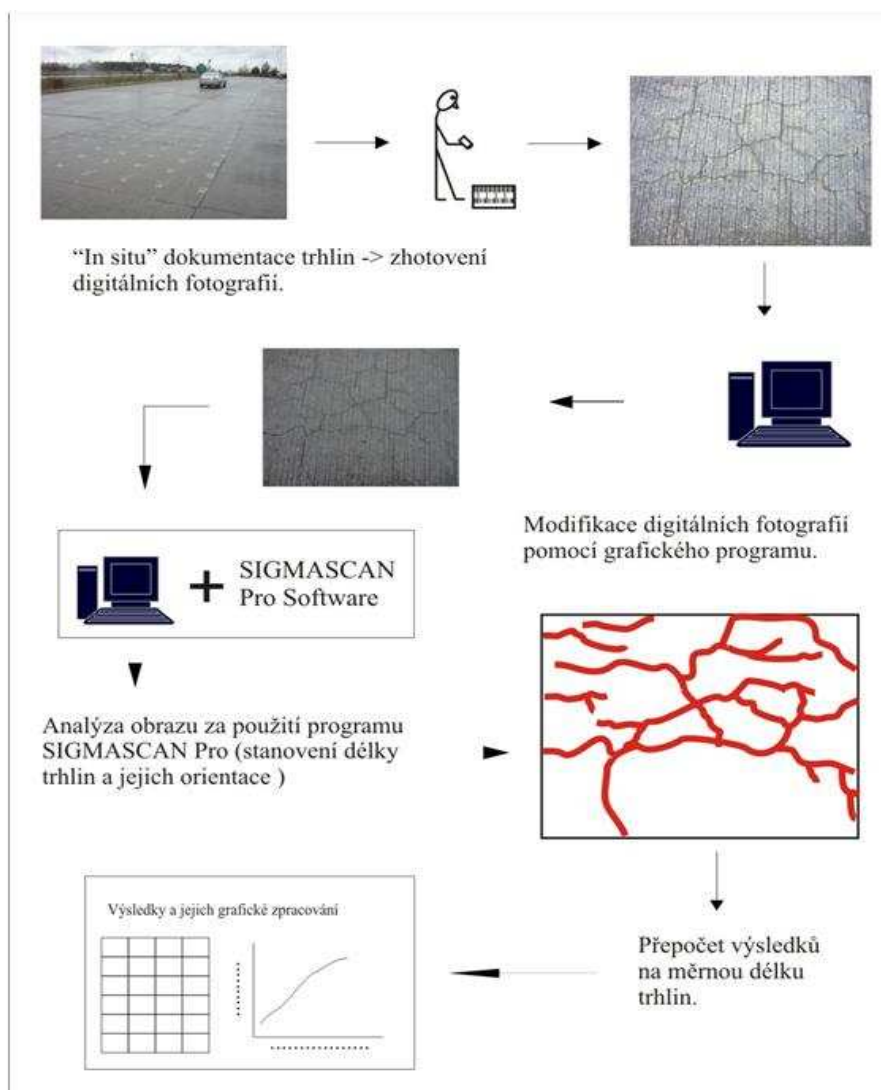
### 3.2 Laboratorní práce

Cílem laboratorních prací bylo: (1) vyhodnocení měrné délky trhlin pomocí obrazové analýzy na povrchu CBK vozovek, (2) vyhodnocení měrné délky trhlin ve vrtných jádrech, (3) ověření alkalicko-křemičité reakce uranyl acetátovou metodou na vrtných jádrech a (4) mikroskopické zpracování výbrusů z odebraných vzorků. Úkolem mikroskopického výzkumu bylo stanovení podílu jemného a

hrubého kameniva, určení petrografického složení hrubého a jemného kameniva, stanovení obsahu pórů, cementového pojiva a především potvrzení přítomnosti alkalicko-křemičité reakce.

### 3.2.1 Vyhodnocení makroskopických projevů ASR na CBK dálnic

Analýza obrazu a tím vyhodnocení měrné délky trhlin na CBK vozovek byla provedena v několika krocích. Nejdříve bylo nutné zhotovit digitální fotografie, jak je popsáno v kapitole „Terénní práce“. Následovalo grafické upravení digitálních fotografií s cílem zvýraznění kontrastu mezi trhlinami a plochou vozovky. Následujícím krokem bylo změření délky trhlin za použití příslušného počítačového programu (SigmaScan Pro 5, Jandel Scientific, USA). Před samotným měřením bylo nutné digitální fotografie kalibrovat (z pixelů na milimetry) a následně změřit délku každé trhliny. Naměřené hodnoty byly zkopírovány do programu Excel a sečetly se. Tento výsledek byl převeden příslušným vzorcem na  $\text{m/m}^2$  a zanesen do tabulky. Tímto způsobem se vyhodnotily všechny digitální fotografie z dané desky a získal se tak detailní přehled o rozložení a hodnotách měrné délky trhlin na desce CBK vozovky. Měrná délka trhlin byla vyčíslena samostatně pro každý dílec  $50 \times 50 \text{ cm}$ . Jednotlivé kroky analýzy obrazu ilustruje Obr. 6.



Obr. 6. Schematické znázornění metody analýzy obrazu při vyčíslení měrné délky trhlin na vozovkách (Pertold a kol. 2009).



### 3.2.2 Vyhodnocení makroskopických projevů ve vrtných jádrech

Na vrtných jádrech odebraných na jednotlivých dálničních úsecích byla nejprve fixem vyznačena místa, kde byla jádra rozřezána. Rozřezání vrtných jader bylo provedeno v laboratoři společnosti Kamenický závod Oldřich Svoboda nástupci s.r.o., Pečky. Jádra o průměru 150 mm byla rozříznuta nejprve podélně v polovině plochy vrtného jádra. Jedna takto vzniklá polovina jádra byla stejným způsobem rozříznuta podélně na čtvrtiny. Jádra o průměru 80 mm byla rozříznuta jednou podélně a jednou příčně na čtvrtiny. Všechny části rozřezaných vrtných jader byly fotograficky zdokumentovány. První poloviny velkých i malých jader byly uloženy k archivaci vzorků.

Pro stanovení měrné délky trhlin ve vrtných jádrech byl použit shodný postup jako u stanovení měrné délky na povrchu CBK vozovek. Použity byly fotografie řezů vrtnými jádry, na kterých byly v některých případech velmi dobře patrné trhliny procházející jádry, jak je patrné z Obr. 7. Měrná délka trhlin ve vrtných jádrech byla vyjádřena v  $m/m^2$ . Tento způsob stanovení měrné délky trhlin tak rozšiřuje poznatky o rozložení a četnosti trhlin nejen na povrchu vozovek, ale i směrem do hloubky CBK.



Obr. 7. Trhliny ve vrtném jádře (vrtné jádro VLL1 - odpočívka Vrbova Lhota - 36. km, směr Praha; deska VLL; svislá strana jádra 74 mm; fotografováno 14.3.2008).

Určení podílu kameniva v betonu je jedním z kroků stanovení modálního složení studovaných vzorků. Pro určení podílu hrubého kameniva byla použita metoda analýzy obrazu na digitálních fotografiích celých vrtných jader. Fotografie zastihují celou plochu řezu jádrem. Vyhodnocena je tak plocha 2 – 4  $dm^2$  a počet započtených úlomků hrubého kameniva činí cca 90 – 150. Pokud by na toto stanovení byly využívány výbrusy, bude postihnuta pouze malá plocha jádra (1 výbrus = 6,25  $cm^2$ ) a bude nutné navýšit počet zhotovených výbrusů. Využity byly stejné fotografie a stejný postup jako při stanovení měrné délky trhlin ve vrtných jádrech (Pertold a kol. 2009).

Uranyl acetátová metoda byla použita pro potvrzení přítomnosti alkalicko-křemičitých gelů (Stark 1991) ve vrtných jádrech z odpočívky Vrbová Lhota a v jádrech z dálnice D5. Pro zkoušku byly použity dříve archivované poloviny vrtných jader, které byly následně kladivem rozděleny na dvě části. Uranyl acetát byl nanesen na řeznou i odlomenou část jádra. Nejprve bylo nezbytné se seznámit s bezpečnostními opatřeními, aby nedošlo ke kontaminaci osob nebo okolního prostředí, jelikož se používá sloučenina, která obsahuje mírně radioaktivní izotop uranu. Povrch vybraných betonových jader byl nejprve opláchnut vodou, aby se odstranily nečistoty a povrch zůstal navlhčený. Pro další pracovní postup bylo nutné nasadit ochranné brýle a navléknout gumové rukavice. Z plastové láhve označené jako roztok uranyl acetátu byl nanesen roztok na povrch vlhkého betonu. Láhev s uranyl acetátem bylo třeba opět dobře uzavřít. Doba působení roztoku byla 3 – 5 minut, aby mohl reagovat s případně přítomným alkalicko-křemičitým gelem a poté se roztok opláchl vodou (Bartoš 2003).

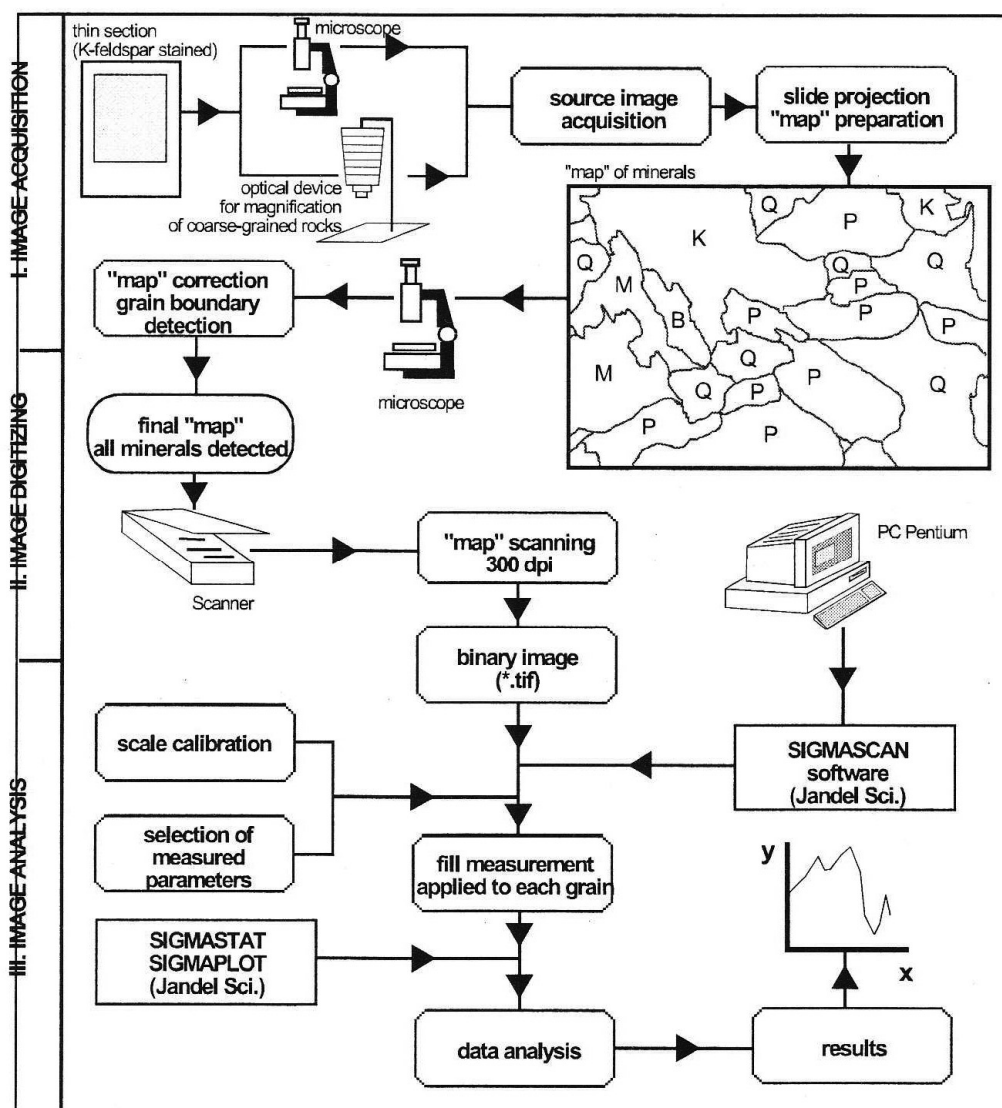
V posledním kroku se nasadí ochranné UV brýle a vlhký povrch betonu se prohlédne v UV světle v zatemnělé místnosti a následně se vyfotografuje. Po nanesení roztoku si lze povrch prohlížet kdykoli později, aniž by bylo třeba nanést další roztok, doporučuje se ovšem smočít povrch znovu vodou. Přítomnost alkalicko-křemičitého gelu se pod UV světlem projeví žlutozelenou fluorescencí. Alkalicko-křemičitý gel se může vyskytovat v trhlinách, vzduchových pórech, v zrnech kameniva a také tvoří lemy kolem kameniva (Bartoš 2003). Fotografie byly pořízeny v temné místnosti v UV světle fotoaparátem Canon 450D, objektivem Tamron 17 – 50 mm F2,8. Doba expozice se u každé fotografie nepatrně odlišovala, ale vždy byla okolo 2 minut, clona 5,6 a ISO 200.

### 3.2.3 Vyhodnocení mikroskopických projevů ASR

Z každého vrtného jádra byly připraveny 4 výbrusy tak, aby byly reprezentativní pro celý vývrt. Výbrusy zhotovil pan Letko ze společnosti Diatech s.r.o. Nejdříve byly výbrusy ponechány odkryté a neleštěné, aby se zabránilo vymývání a odlešťování alkalicko-křemičitých gelů během procesu leštění výbrusů. Identifikace produktů alkalicko-křemičité reakce a stanovení jejich podílu ve výbrusech tak probíhalo na neleštěných výbrusech. Pro upřesnění petrografického složení kameniva byly výbrusy dodatečně doleštěny.

Výzkum výbrusů byl proveden ve dvou etapách. Nejdříve pomocí optické mikroskopie bylo určeno petrografické složení hrubého a jemného kameniva. Následovalo zhotovení mikrofotografií, na kterých se metodou analýzy obrazu stanovilo modální složení výbrusů. Určoval se podíl jemného kameniva, obsah pórů, cementového pojiva a produktů alkalicko-křemičité reakce, tj. alkalicko-křemičitých gelů a mikrotrhlin. Na každý výbrus bylo zhotoveno 15 – 20 mikrofotografií jemného kameniva, tak aby jimi byla rovnoměrně pokryta celá plocha výbrusu. Mikroskopický výzkum byl proveden v laboratoři optické mikroskopie Ústavu geochemie, mineralogie a nerostných zdrojů Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy v Praze (UGMNZ PřF UK) za použití polarizačního mikroskopu Leica DMLP. Mikrofotografie byly pořízeny fotoaparátem Olympus. Pro úpravu digitálních fotografií byl využit program Corel PhotoPaint, objemový podíl jednotlivých složek byl vyčíslen programem SigmaScan Pro v.5.0 (Jandel Scientific, USA).

Určení procentuálního zastoupení jednotlivých složek, pozorovatelných ve výbrusech, pomocí analýzy obrazu (Přikryl 2001, Lukschová a Přikryl 2006) probíhá ve třech na sebe navazujících etapách (Obr. 8). První krok, získání obrazu, zahrnuje výběr studované oblasti výbrusu a přípravu „mapy“ objektů. Velikost studované plochy výbrusu závisí na průměrné velikosti objektů, kdy minimální počet vyhodnocených objektů je 500 (Přikryl 2001). Ze studované oblasti výbrusů se zhotoví mikrofotografie. Jednotlivé objekty se odliší na základě grafického zvýraznění hranic. Každý objekt je definován z hlediska svého složení (např. typ kameniva, pór, alkalicko-křemičitý gel). Druhý krok zahrnuje zpracování obrazu. Mikrofotografie obsahující zvýrazněné hranice mezi jednotlivými objekty se zpětně kontrolují v optickém mikroskopu. Pozornost se věnuje správnému zakreslení hranic objektů a přesnému popisu objektu z hlediska jeho složení. Po konečném grafickém zpracování (soubor typu \*.tif) se výsledná mapa skládá z černo-bílého obrazce, kde hranice jsou zvýrazněny černě a objekty jsou ponechány bílé. Složení objektu se zaznamená v jeho názvu nebo ve schematickém označení (např. Q – křemen, P – plagioklas, AKG – alkalicko-křemičitý gel). Posledním krokem je měření obrazu. Soubor typu \*.tif se zpracuje v počítači za pomoci příslušného programu pro měření geometrických parametrů (např. plocha). Výsledný poměr v zastoupení jednotlivých objektů vyjadřuje modální složení výbrusů.



Obr. 8. Schéma popisující postup vyhodnocení modálního složení výbrusů pomocí analýzy obrazu (Příkryl 2001).

Určení chemického složení jednotlivých fází umožňuje skenovací elektronový mikroskop v kombinaci s energiově disperzním spektrometrem (SEM/EDS). V souvislosti s alkalicko-křemičitou reakcí je SEM/EDS využíváno zejména při identifikaci alkalicko-křemičitých gelů a při studiu jejich chemismu a morfologie (Marfil a Maiza 2001). Měření vzorků z dálnic bylo provedeno na elektronovém mikroskopu Cambridge Cam Scan S4 s energiově disperzním spektrometrem Oxford instruments LINK ISIS 300 (Laborař elektronové mikroskopie a mikroanalýzy, Ústav petrologie a strukturní geologie, PŘF UK). Podmínky měření: proud svazku 3 nA, urychlovací napětí 20 kV. A SPI Supplies 53 standardizační set minerálů 02753-AB.

Pro identifikaci projevů alkalicko-křemičité reakce a zejména pro identifikaci alkalicko-křemičitých gelů byla vedle jejich chemického složení důležitá také jejich morfologie a vztah k okolním fázím. Alkalicko-křemičité gely lze pozorovat: v trhlinách procházejících úlomky a cementovým pojivem, na kontaktech některých úlomků s cementovým pojivem, jako úplné nebo částečné výplně pórů a přímo v cementovém pojivu (Pertold a kol. 2008). V některých horninových úlomcích byla metoda SEM/EDS využita k přesnému určení přítomných minerálů.

## 4. VÝSLEDKY

### 4.1 Makroskopické projevy na povrchu CBK

Měrná délka trhlin, vyjádřená v  $\text{m/m}^2$ , na povrchu CBK byla vyhodnocena pro každý dílec zvlášť. Tabulky s měrnou délkou trhlin na povrchu CBK vybraných desek uvádí Příl. I.

Z hodnot měrné délky trhlin na jednotlivých dílcích desek byly spočteny příslušné statistické veličiny (Tab. 4). Hodnoty průměru (aritmetický průměr měrné délky trhlin na desce) vypovídají o četnosti trhlin na celé desce CBK. Nejmenší četnost trhlin byla naměřena na CBK dálnice D1, s průměrem měrné délky trhlin  $8,22 \text{ m/m}^2$ . Na obou vybraných deskách na lokalitě Vrbová Lhota jsou hodnoty měrné délky vyšší než na dálnici D1. Deska VLP má hodnotu průměru  $16,49 \text{ m/m}^2$  a deska VLL  $14,05 \text{ m/m}^2$ . Naměřené hodnoty měrné délky trhlin na všech třech deskách vybraných na dálnici D5, vykazují extrémně vysokou četnost trhlin. Průměr měrné délky trhlin na desce D5PA je  $32,08 \text{ m/m}^2$ , na desce D5PB je  $38,53 \text{ m/m}^2$  a na poslední D5PC činí  $35,76 \text{ m/m}^2$ .

Tab. 4. Hodnoty aritmetického průměru, mediánu, minima (min), maxima (max.), směrodatné odchylky (SMODCH), variačního koeficientu, koeficientu šikmosti a koeficientu špičatosti vypočtené z hodnot měrné délky trhlin na povrchu CBK.

Deska č.	Průměr	Median	Min	Max	SMODCH	Variační koef.	Koeficient šikmosti (SKEW)	Koeficient špičatosti (KURT)
D1PA	8,22	6,16	2,29	19,53	4,87	59,26	1,133	0,057
D5PA	32,08	29,71	17,38	55,31	9,38	29,26	0,745	-0,299
D5PB	38,53	32,23	8,61	90,96	18,93	49,12	0,887	-0,075
D5PC	35,76	31,48	15,77	76,40	13,62	38,08	0,872	0,096
VLP	16,49	16,92	6,27	25,04	3,93	23,82	-0,372	-0,079
VLL	14,05	14,14	2,05	23,76	4,87	34,67	-0,222	-0,119

### 4.2 Makroskopické projevy ASR na vrtných jádrech

Měrná délka trhlin byla vyhodnocena na všech částech rozřezaných vrtných jader (2 – 4 části), její hodnoty vypočítané pro každou část jádra jsou uvedeny v Příl. II. Z těchto hodnot byl vypočítán průměr měrných délek trhlin na celém vrtném jádře, který je uveden v Tab. 5 (Pertold a kol. 2009). Nízké hodnoty měrné délky trhlin ve vrtných jádrech byly naměřeny na vzorcích z dálnice D5, kdy nejnižší průměr měrné délky trhlin je  $3,32 \text{ m/m}^2$  a nejvyšší činí  $8,48 \text{ m/m}^2$ . Podobně nízké hodnoty vykazují vrtná jádra z dálnice D1 s průměrem měrných délek trhlin  $6,19 \text{ m/m}^2$  a  $6,98 \text{ m/m}^2$ . Nejvyšší četnost trhlin ve vrtných jádrech byla naměřena na vzorcích z odpočívky Vrbová Lhota. Na desce VLP jsou hodnoty měrné délky trhlin ve vývrtech  $39,28 \text{ m/m}^2$ ;  $47,11 \text{ m/m}^2$  a na desce VLL hodnoty dosahují  $16,84 \text{ m/m}^2$  a  $30,15 \text{ m/m}^2$ .

Tab. 5. Průměrná měrná délka trhlin na vrtných jádrech (Pertold a kol. 2009).

Číslo vývrtu	Průměrná měrná délka trhlin na vývrtu (m/m <sup>2</sup> )	Číslo vývrtu	Průměrná měrná délka trhlin na vývrtu (m/m <sup>2</sup> )	Číslo vývrtu	Průměrná měrná délka trhlin na vývrtu (m/m <sup>2</sup> )
	D1	D11 Vrbová Lhota			D5
D1PA-1	6,19	VLP-2	39,28	D5PA-1	4,52
D1PA-2	6,98	VLP-1	47,11	D5PA-2	8,48
		VLL-2	16,84	D5PB-1	6,32
		VLL-1	30,15	D5PB-2	6,83
				D5PC-1	3,58
				D5PC-2	3,32

Pro vyčíslení podílu hrubého kameniva ve vrtných jádrech byla aplikována metoda analýzy obrazu, za použití makroskopických fotografií rozřezaných vrtných jader. Stanovení podílu hrubého kameniva na zkoumaných vzorcích zahrnovalo řezu vrtným jádrem obsahující cca 90 – 150 jasně odlišitelných úlomků kameniva. Podíl hrubého kameniva je vyjádřen v objemových procentech (Tab. 6) (Pertold a kol. 2009).

Tab. 6. Podíl hrubého kameniva ve vývrtech v obj. % (Pertold a kol. 2009).

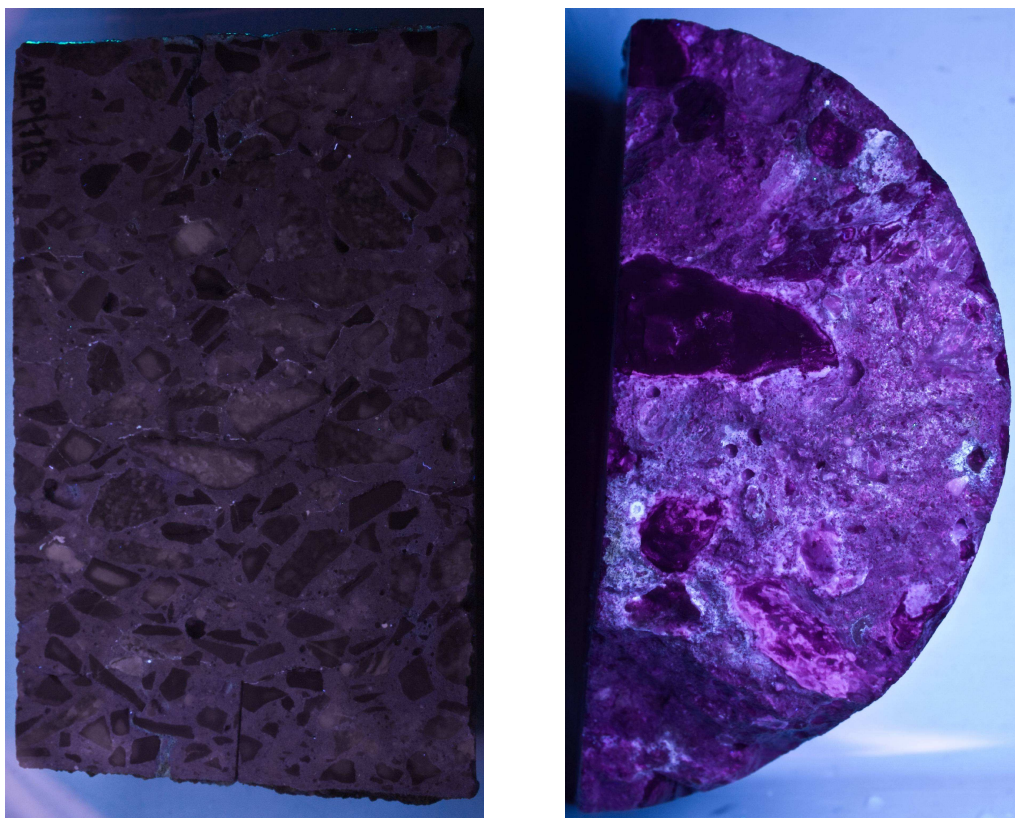
Vývrt č.	Hrubé kamenivo (obj. %)
D1PA-1	41,33
D1PA-2	43,16
VLL-1	40,55
VLL-2	38,09
VLP-1	40,45
VLP-2	42,92
D5PA-1	43,29
D5PA-2	42,83
D5PB-1	43,79
D5PB-2	41,21
D5PC-1	40,03
D5PC-2	37,15

Uranyl acetátová metoda byla použita pro potvrzení přítomnosti alkalicko-křemičitých gelů na vývrtech z odpočívky Vrbová Lhota a z dálnice D5. Celkový počet vrtných jader zpracovaných uranyl acetátovou metodou je 8 – dvě jádra z odpočívky Vrbova Lhota (vrtná jádra č. VLP1, VLL2) a šest jader z dálnice D5 (vrtná jádra č. D5PA1, D5PA2, D5PB1, D5PB2, D5PC1, D5PC2).

Ve vrtných jádrech z odpočívky Vrbova Lhota se přítomnost gelů, indikujících přítomnost alkalicko-křemičité reakce, projevila charakteristickou žlutozelenou fluorescencí v okolí trhlin, pórů a uvnitř i na okrajích některých zrn kameniva. Výraznější je přítomnost alkalicko-křemičité reakce na čerstvě odlomených částech jádra (Obr. 9, 10, 11, pravá část), kde gely tvoří lemy okolo úlomků, vyplňují póry a vytvářejí celistvé povlaky v cementovém pojivu. Na řezných plochách jader jsou alkalicko-křemičité gely patrné méně výrazně, pouze v trhlínách a na okrajích úlomků (Obr. 9, 10, 11, levá část).

Ve vrtných jádrech z dálnice D5 je reakce alkalicko-křemičitých gelů s uranyl-acetátem minimální. Alkalicko-křemičité gely jsou ve fluorescenci patrné zřídka a to i na čerstvě odlomených plochách.

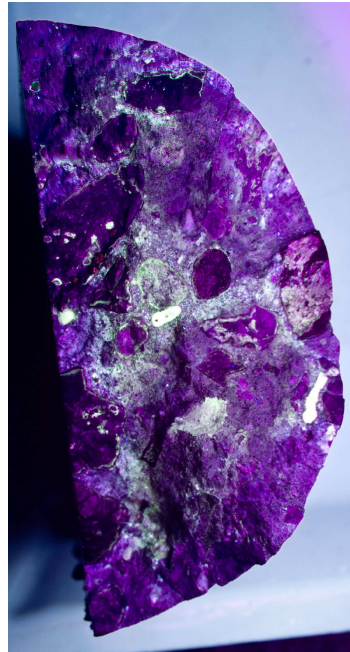
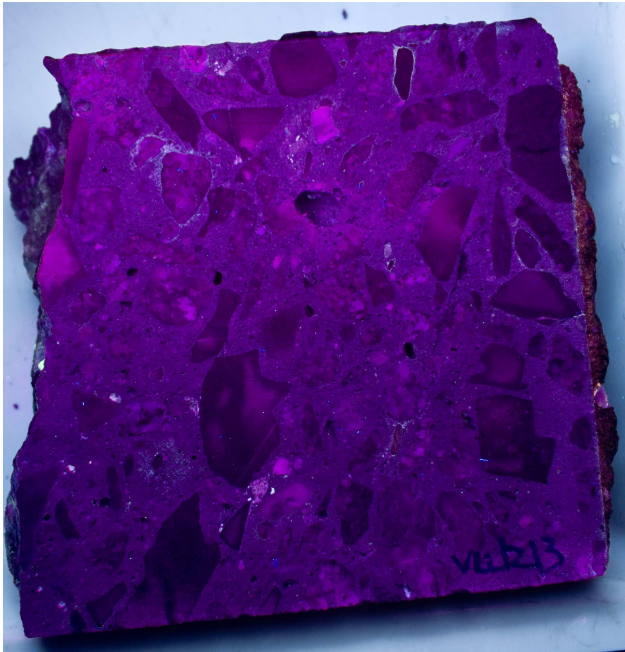
Pokud je alkalicko-křemičitý gel na řezné či odlomené části jádra patrný, vyplňuje jemné trhlinky či drobné póry v cementovém pojivu (Obr. 12, 13, 14).



Obr. 9. Vrtné jádro VLP1 (vlevo) řezná plocha - alkalicko-křemičité gely v trhlinách a pórech, vodorovná strana jádra 148 mm; (vpravo) štěpná plocha - alkalicko-křemičité gely tvoří lemy okolo úlomků, vyplňují póry a tvoří celistvý povlak v cementovém pojivu, svislá strana jádra 148 mm.



Obr. 10. Vrtné jádro VLP2 (vlevo) řezná plocha; (vpravo) štěpná plocha - alkalicko-křemičité gely tvoří lemy okolo úlomků, vyplňují póry a tvoří celistvý povlak v cementovém pojivu, svislá strana jádra 148 mm.



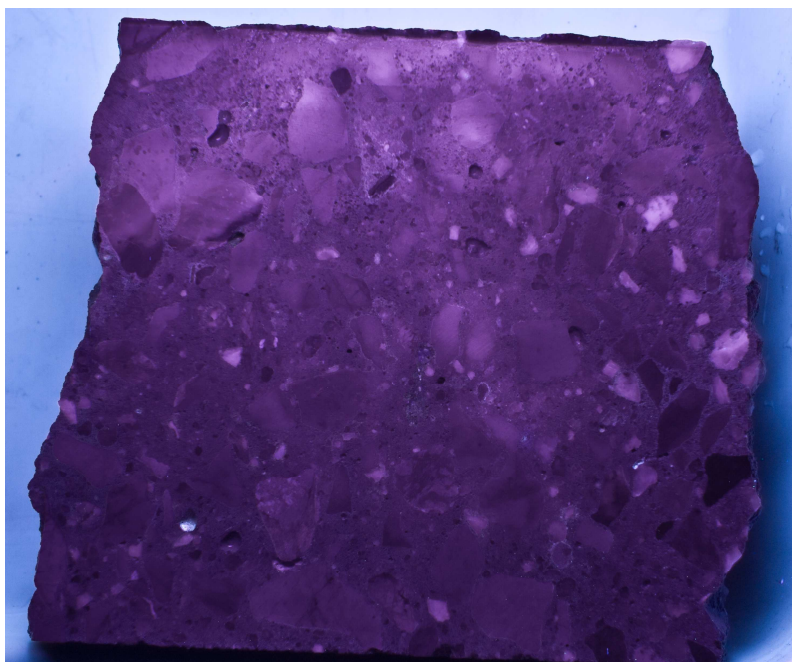
Obr. 11. Vrtné jádro VLL2 (vlevo) řezná plocha; (vpravo) štěpná plocha - alkalicko-křemičité gely tvoří lemy okolo úlomků, vyplňují póry a tvoří celistvý povlak v cementovém pojivu, svislá strana jádra 148 mm.



Obr. 12. Vrtné jádro D5PA2 (vlevo) řezná plocha; (vpravo) štěpná plocha - alkalicko-křemičité gely nejsou patrné, svislá strana jádra 148 mm.



Obr. 13. Vrtné jádro D5PB2 (vlevo) řezná plocha; (vpravo) štěpná plocha - alkalicko-křemičité gely nejsou patrné, svislá strana jádra 148 mm.



Obr. 14. Vrtné jádro D5PC1 (vlevo) řezná plocha - ojedinělé alkalicko-křemičité gely jsou vidět na kontaktech s kamenivem v pravé části fotografie; (vpravo) štěpná plocha - alkalicko-křemičité gely nejsou patrné, svislá strana jádra 148 mm.



### 4.3 Výsledky mikroskopického výzkumu

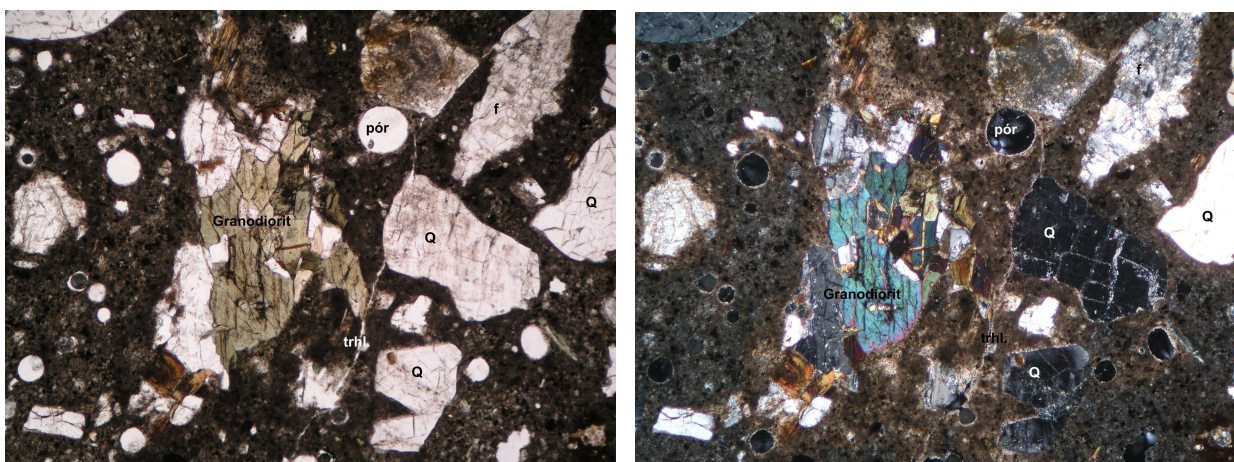
V první fázi mikroskopického výzkumu byly určeny petrografické typy hrubého kameniva, jemného kameniva a popsány produkty alkalicko-křemičité reakce. V druhé fázi byl metodou analýzy obrazu stanoven podíl jednotlivých složek kameniva a podíl cementového pojiva, drobného kameniva, pórů, mikrotrhlin i alkalicko-křemičitých gelů. Poslední fáze výzkumu zahrnovala chemické analýzy alkalicko-křemičitých gelů pomocí SEM/EDS.

Podíl hrubého kameniva kolísá v rozmezí 37,2 – 43,8 obj. %, podíl jemného kameniva je menší, pohybuje se v rozpětí 16,8 – 24,5 obj. %. Cementové pojivo vyplňuje prostor mezi úlomky kameniva, jeho hodnoty jsou mezi 28,6 a 38,3 obj. %. Mikrotrhliny se nejvíce vyskytují ve výbrusech z Vrbové Lhoty a to v rozmezí 0,4 – 3,2 obj. %, na D1P měly trhliny hodnotu 0,1 obj. % a na dálnici D5 nebyly naměřeny žádné. Obdobný trend se objevil i u hodnot objemového zastoupení alkalicko-křemičitých gelů. Nejvíce alkalicko-křemičitých gelů bylo zjištěno ve výbrusech z Vrbové Lhoty (1,5 – 1,9 obj. %). Ve výbrusech z dálnice D1 jsou hodnoty nulové a ve výbrusech z dálnice D5 hodnoty alkalicko-křemičitých gelů kolísají v rozmezí 0,0 – 0,3 obj. %. Všechny výše zmíněné hodnoty jsou uvedené v Tab. 7.

Tab. 7. Modální složení vrtných jader (v obj. %).

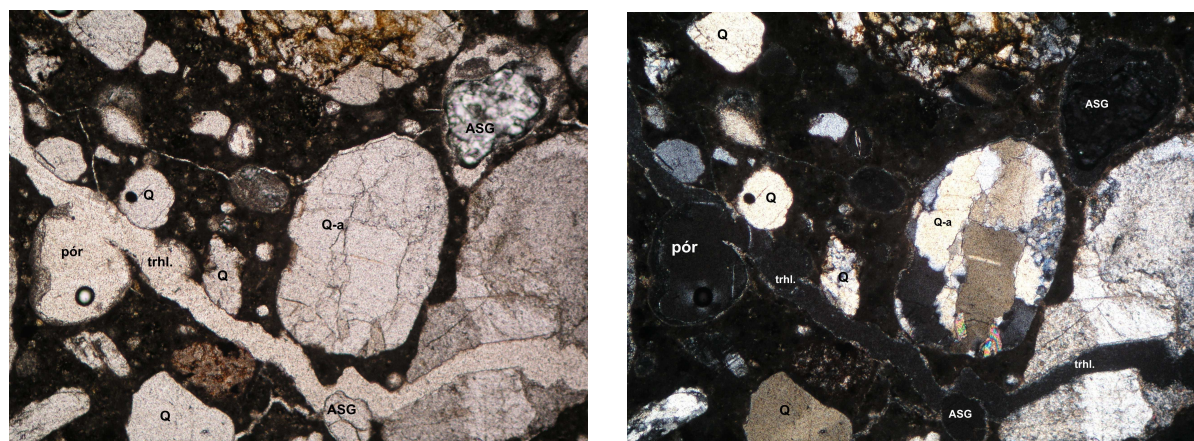
Vrtné jádro č.	hrubé kamenivo	jemné kamenivo	cementové pojivo	póry	alkalicko-křemičitý gel	mikrotrhliny
D1PA1	41,3	24,5	30,2	3,8	0,1	0,1
D1PA2	43,2	23,1	28,6	5,0	0,0	0,1
VLL1	40,5	18,5	30,7	5,5	1,6	3,2
VLL2	42,9	19,8	29,5	4,1	1,9	1,8
VLP1	40,5	21,6	29,7	4,2	1,7	2,3
VLP2	38,1	22,2	31,8	6,0	1,5	0,4
D5PA1	43,3	18,2	34,5	4,0	0,0	0,0
D5PA2	42,8	19,5	32,9	4,7	0,1	0,0
D5PB1	43,8	20,2	31,5	4,5	0,0	0,0
D5PB2	41,2	16,8	36,3	5,4	0,3	0,0
D5PC1	40,0	19,4	37,0	3,5	0,1	0,0
D5PC2	37,2	19,3	38,3	5,1	0,1	0,0

Hrubé kamenivo betonu z desky D1P se skládá především z biotit-amfibolického granitu, granitu, a biotitického granodioritu, v menším množství je zastoupen křemen-živcový agregát (Tab. 8). Jemné kamenivo (úlomky o velikosti < 4 mm) je složeno převážně z křemenných, křemen-živcových a granitických úlomků. Alkalicko-křemičité gely a trhliny se ve výbrusech téměř nevyskytují. Na Obr. 15 jsou mikrofotografie z výbrusu 37B z vrtného jádra D1PA1, které zachycují úlomek biotitického granodioritu, kolem něhož vede mikrotrhlina (trhl.) a v okolí se nacházejí křemeny (Q) a živec (f).



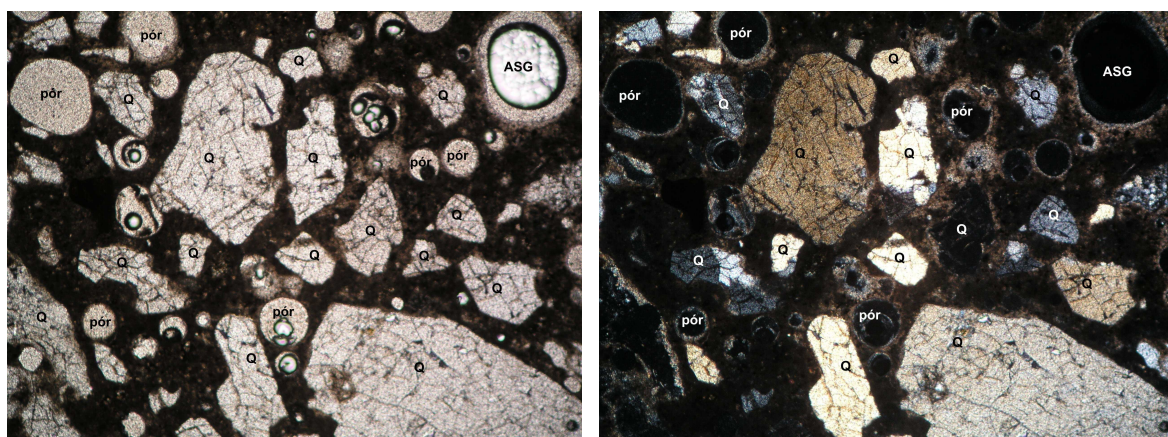
Obr. 15. Mikrofotografie z výbrusu 37B – vrtné jádro D1PA1; obsahující: úlomek biotického granodioritu; trhlinu (trhl.), křemeny (Q), živec (f), póry. Rovnoběžné nikoly (vlevo), zkřížené nikoly (vpravo); zvětšení 10x.

Desky z odpočívky Vrbová Lhota obsahují v hrubém kamenivu zejména křemen-živcové vulkanity, granity a vulkano-sedimentární horniny (Tab. 8), jako jsou křemenem a živcem bohaté tufy, tufity, tufitické droby a tufitické prachovce. Jemné kamenivo představují především křemeny, živce, křemen-živcové agregáty a méně zastoupené granitické a tufitické úlomky. Hojný výskyt trhlin a alkalicko-křemičitých gelů ve výbrusech z Vrbové Lhoty dokazuje silné poškození vlivem alkalicko-křemičité reakce. Trhliny prostupují úlomky kameniva, cementovým pojivem i podél kontaktů úlomků kameniva s cementovým pojivem (Obr. 16). Alkalicko-křemičité gely se vyskytují v pórech a trhlinách (Obr. 16).



Obr. 16. Mikrofotografie z výbrusu 8A – vrtné jádro VLL1; obsahující: alkalicko-křemičité gely (ASG) v póru i trhlině; trhliny (trhl.), křemeny (Q), křemenný agregát (Q-a), póry. Rovnoběžné nikoly (vlevo), zkřížené nikoly (vpravo); zvětšení 10x.

V hrubém kamenivu z dálnice D5 převažují bazické vulkanické horniny, jako jsou bazické spility a tufy (Tab. 8). Dále jsou zastoupeny provápnělé tufy, tufitické droby, tufy s dutinkami vyplněné kalcitem nebo chloritem. Jemné kamenivo je převážně složeno z křemene a křemen-živcových agregátů, v menším množství obsahuje úlomky hrubého kameniva. Trhliny se ve výbrusech nevyskytují a málo hojně alkalicko-křemičité gely částečně nebo úplně vyplňují póry (Obr. 17).



Obr. 17. Mikrofotografie z výbrusu 3A – vrtné jádro D5PB2; obsahující: alkalicko-křemičitý gel (ASG) v póru, křemeny (Q), póry. Rovnoběžné nikoly (vlevo), zkřížené nikoly (vpravo); zvětšení 10x.

Tab. 8. Podíl hlavních horninových typů v kamenivu (v obj. %). baz. – bazický, Q-f. – křemen-živcový, bt.-a. – biotit-amfibolický, Q – monominerální křemen, f – monominerální živec, n.a. – nebylo pozorováno.

Vrtné jádro č.	vulkanit baz.	vulkanit Q-f.	granit	bt.-a. granit	vápenec	Q-f. ag.	Q	f
D1PA1	n.a.	7,5	n.a.	32,6	n.a.	14,4	10,4	1,1
D1PA2	n.a.	15,3	n.a.	26,5	n.a.	12,8	10,9	0,8
VLL1	n.a.	33,1	17,8	n.a.	n.a.	2,1	5,9	0,0
VLL2	n.a.	24,9	6,9	n.a.	n.a.	15,0	16,0	0,0
VLP1	n.a.	38,2	4,5	n.a.	n.a.	3,4	16,0	0,0
VLP2	n.a.	28,4	7,4	n.a.	n.a.	9,7	14,7	0,0
D5PA1	34,0	n.a.	n.a.	n.a.	8,0	2,1	17,0	0,4
D5PA2	34,6	n.a.	n.a.	n.a.	0,0	0,8	26,1	0,8
D5PB1	36,2	n.a.	n.a.	n.a.	0,0	6,5	21,3	0,0
D5PB2	36,8	n.a.	n.a.	n.a.	1,2	0,5	17,6	2,0
D5PC1	35,1	n.a.	n.a.	n.a.	2,7	4,2	17,0	0,4
D5PC2	23,7	n.a.	n.a.	n.a.	0,0	5,1	27,6	0,0

#### 4.4 Chemická mikroanalýza alkalicko-křemičitých gelů

Metoda SEM/EDS byla využita k identifikaci alkalicko-křemičitých gelů a k určení jejich chemického složení. Jako doplnění k optické mikroskopii byla metoda aplikována k přesnému určení složení některých typů kameniva. Tento postup byl využit zejména u velmi jemnozrnných hornin (např. vulkano-sedimentární horniny), nebo u hornin postižených alterací.

Z každé zkoumané desky byl metodou SEM/EDS analyzován jeden výbrus, pouze v případě desky z odpočívky Vrbová Lhota (VLP) byly analyzovány dva. Dohromady tedy bylo zpracováno 7 výbrusů, přičemž v každém z nich byly nalezeny a analyzovány alkalicko-křemičité gely. Chemická analýza gelů obsahovala atomová procenta (at. %) oxidů křemíku ( $\text{SiO}_2$ ), vápníku ( $\text{CaO}$ ), hliníku ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), sodíku ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), draslíku ( $\text{K}_2\text{O}$ ), hořčíku ( $\text{MgO}$ ) a železa ( $\text{FeO}$ ). Každý nalezený gel byl analyzován alespoň dvakrát, pro potvrzení, že se jedná opravdu o alkalicko-křemičitý gel.

Převládajícím prvkem zkoumaných gelů je křemík (hodnoty 3,5 – 4,7 at. %). V podstatném množství je také zastoupen vápník (hodnoty v rozmezí 0,3 až 2,5 at. %), sodík (0 – 1,8 at. %) a ojediněle draslík

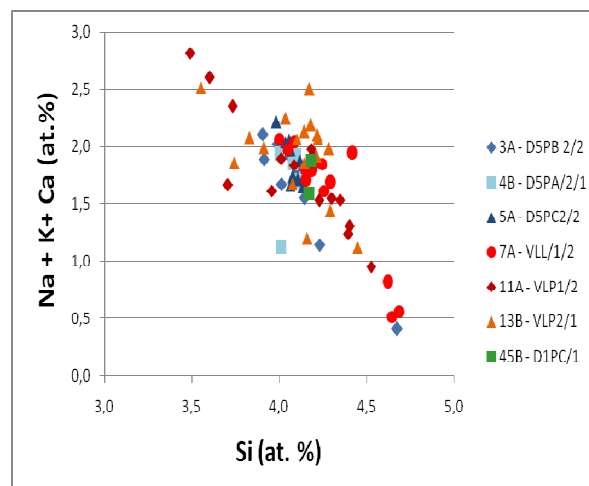
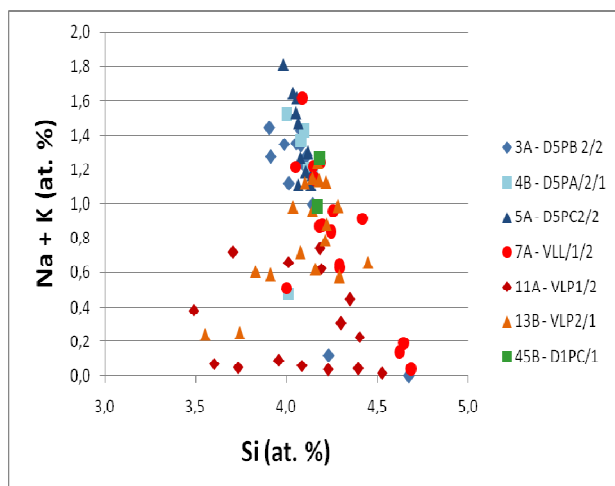
(0 – 0,9 at. %). V malém množství jsou zastoupeny hořčík (0 – 0,5 at. %), hliník (0 – 0,5 at. %) a železo (0 – 0,2 at. %). Analýzy alkalicko-křemičitých gelů ze všech zkoumaných výbrusů jsou uvedeny v Příl. III.

Při srovnání analýz alkalicko-křemičitých gelů ze všech lokalit je jejich chemické složení podobné, jak vyplývá z rozpětí hodnot uvedených v Tab. 9. Pouze v případě gelů z odpočívky Vrbová Lhota byly naměřeny výrazně vyšší hodnoty vápníku než v gelech z dálnic D5 a D1. V některých gelech z odpočívky Vrbová Lhota bylo naměřeno až 2,5 at. % vápníku, přičemž maximální hodnoty v gelech z dálnic D5 a D1 dosahovaly 1,1 at. %.

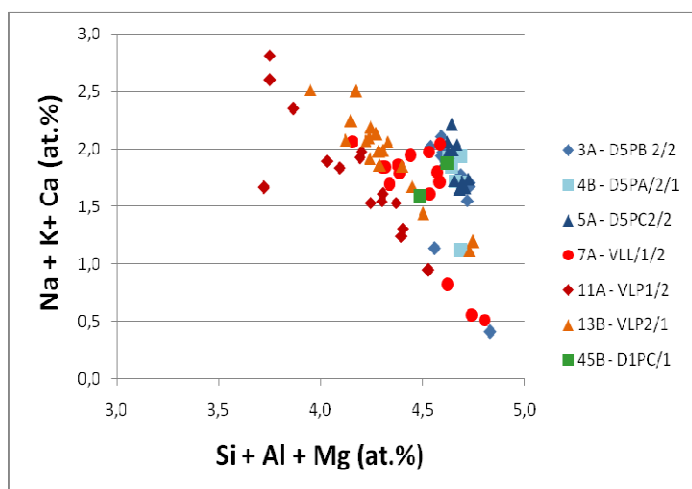
Tab. 9. Rozpětí hodnot (at. %) analýz alkalicko-křemičitých gelů ze zkoumaných výbrusů z dálnice D5, odpočívky Vrbová Lhota a dálnice D1. Hodnoty byly získané metodou SEM/EDS.

	D5PA, D5PB, D5PC	VLL, VLP	D1PC
Na <sub>2</sub> O	0,0 – 1,8	0,0 – 1,6	0,4 – 0,4
MgO	0,0 – 0,5	0,0 – 0,4	0,1 – 0,1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,1 – 0,4	0,0 – 0,5	0,0 – 0,1
SiO <sub>2</sub>	3,9 – 4,7	3,5 – 4,7	4,1 – 4,2
K <sub>2</sub> O	0,0 – 0,1	0,0 – 0,9	0,7 – 0,7
CaO	0,4 – 1,0	0,3 – 2,5	0,9 – 1,1
FeO	0,0 – 0,2	0,0 – 0,1	0,0 – 0,0

Z naměřených hodnot chemických analýz gelů byly zhotoveny binární grafy s různými proměnnými, aby bylo vidět možné zastupování výše uvedených prvků. Jak ukazují grafy na Obr. 18 a 19, nejdříve byly zadány hodnoty Si × suma alkálií (Na + K), v dalším grafu hodnoty Si × alkálie s vápníkem (Na + K + Ca) a v posledním grafu byly k hodnotám Si přidány hodnoty hliníku a hořčíku × alkálie s vápníkem.

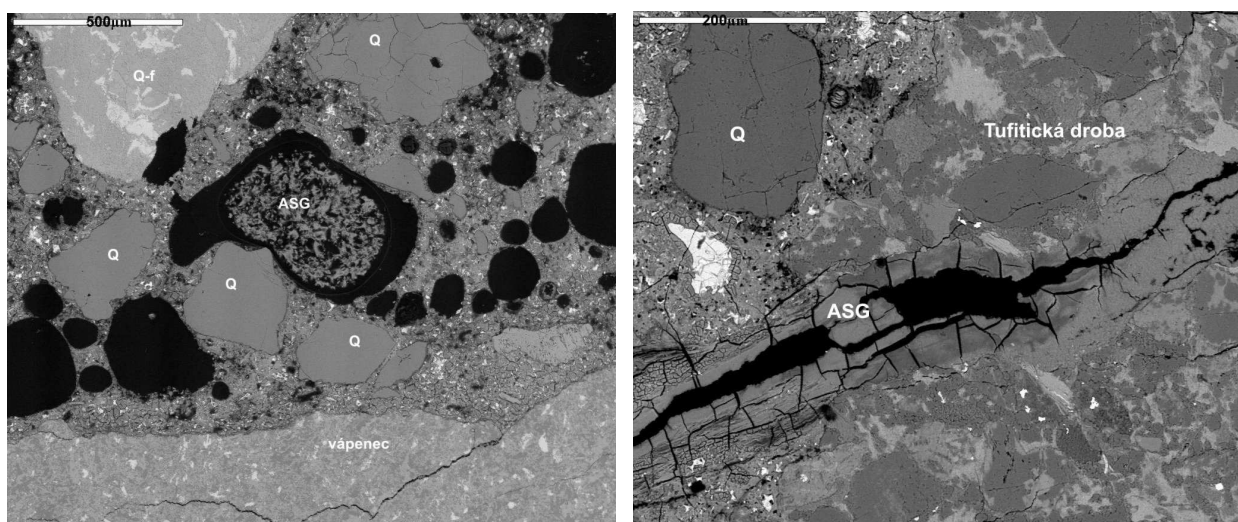


Obr. 18. (vlevo) binární graf Si – Na+K pro alkalicko-křemičité gely; (vpravo) binární graf Si – Na+K+Ca pro alkalicko-křemičité gely.

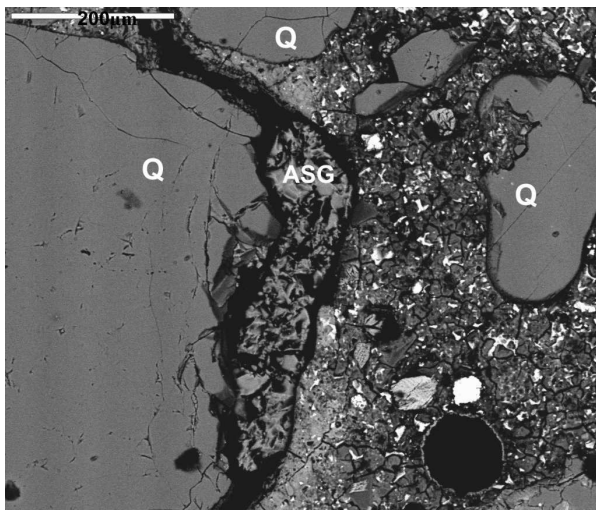


Obr. 19. Binární graf Si+Al+Mg – Na+K+Ca pro alkalicko-křemičité gely.

Metodou SEM/EDS byly kromě chemických analýz pořízeny mikrofotografie alkalicko-křemičitých gelů, které se nacházely ve výbrusech. Na mikrofotografiích je jasně patrná morfologie a vztah gelů k okolním fázím. Na Obr. 20 vlevo je patrný alkalicko-křemičitý gel (ASG) ve výbrusu z dálnice D5 (deska D5PA). Gel částečně vyplňuje pór a v jeho sousedství se nachází velké množství prázdných pórů (černá místa na obrázku). Z horninových úlomků je zastoupen křemen-živcový agregát (Q-f), vápenec a malé úlomky křemene (Q). Obr. 20 vpravo je mikrofotografie pořízená z výbrusu z odpočívky Vrbová Lhota (deska VLP). Alkalicko-křemičitý gel vyplňuje trhlinu, která prochází cementovým pojivem a tufitickou drobou. V sousedství droby se nalézají úlomky křemene. Na poslední mikrofotografii (Obr. 21) je zachycen alkalicko-křemičitý gel ve výbrusu z druhé zkoumané desky na lokalitě odpočívka (VLL). Zde se gel vyskytuje v trhlině, která prochází na kontaktu úlomku křemene a cementového pojiva. Dále jsou patrné úlomky křemene a prázdný pór.



Obr. 20. (vlevo) alkalicko-křemičitý gel v póru – vrtné jádro D5PA2, výbrus 4B (Q = křemen, Q-f = křemen-živcový agregát); (vpravo) alkalicko-křemičitý gel v trhlině procházející tufitickou drobou – vrtné jádro VLP2, výbrus 13B (Q = křemen).



Obr. 21. Alkalicko-křemičitý gel na kontaktu s křemenným (Q) úlomkem, vrtné jádro VLL1, výbrus 7A.

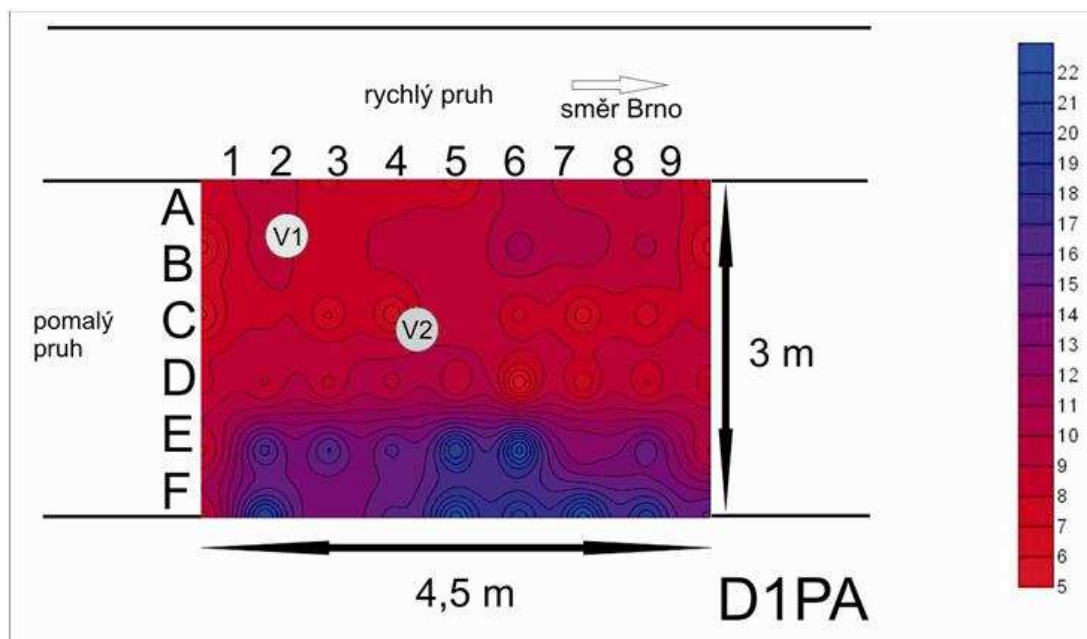
## 5. DISKUZE

### 5.1 Makroskopické projevy na povrchu a uvnitř desek CBK

Jak popsali Stark (1991) a St John a kol. (1998), jsou defekty na povrchu CBK vozovek zpravidla prvním indikátorem změny stavu vozovky. Jejich intenzita i morfologie závisí na okolních klimatických podmínkách, na stupni zatížení vozovky a především na typu degradačního mechanismu v betonu. Trhliny způsobené alkalicko-křemičitou reakcí jsou v počátečním stadiu špatně patrné a náhodně orientované. Zpravidla se koncentrují v místech s vyšším přísunem vlhkosti (okraje betonových dílců). V pokročilejším stadiu se četnost trhlin výrazně zvyšuje a jsou náhodně orientované, někdy taktéž přednostně koncentrované v rozích a okrajových částech betonových dílců. V případě silně poškozených CBK vozovek dochází k propojení trhlin po celém povrchu betonových dílců, trhliny vytvářejí drobné, několik centimetrů velké polygony a vytvářejí tzv. „sít' trhlin“. V tomto stadiu taktéž může docházet k odpaďování, odlupování nebo drolení některých částí betonových dílců (Stark 1991).

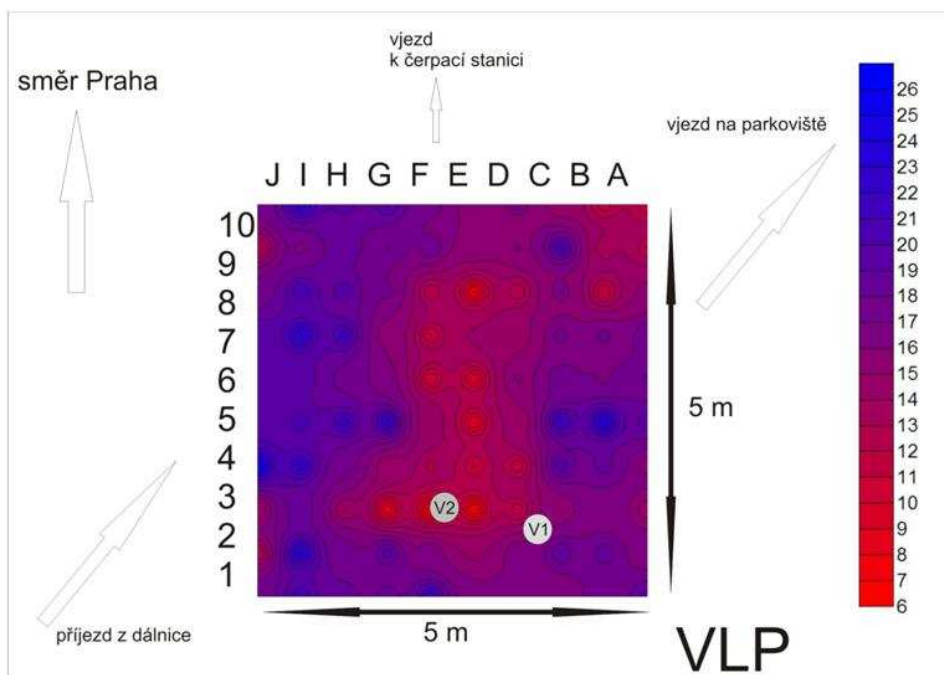
Aby bylo dobře patné rozložení trhlin na deskách CBK zkoumaných dálnic, byly pomocí počítačového programu (SigmaScan Pro5, Jandel Scientific, USA) stanoveny měrné délky trhlin v  $m/m^2$ .

Na desce D1PA (dálnice D1, směr Brno, 45,31. km) byla v porovnání s deskami z odpočívky Vrbová Lhota a z dálnice D5, naměřena nejnižší průměrná měrná délka trhlin na povrchu CBK (průměr =  $8,22 m/m^2$ ). Z Obr. 22 vyplývá, že nejvyšších hodnot (max. =  $19,53 m/m^2$ ) dosahuje měrná délka trhlin při vnějším okraji vozovky (řady E a F), nejnižších (min. =  $2,29 m/m^2$ ) pak v některých částech blíže ke středu vozovky v řadách A až C.



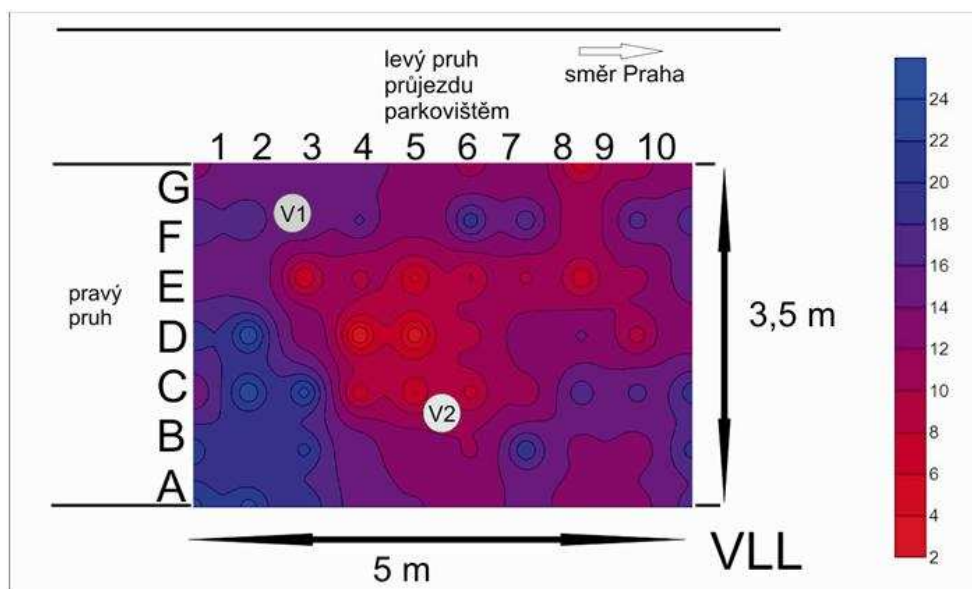
Obr. 22. Rozložení trhlin na jednotlivých částech desky D1PA. Měřítko v pravé části obrázku vyjadřuje měrnou délku trhlin v  $m/m^2$ . V1 (resp. V2) – pozice odebraných vrtných jader (Pertold a kol. 2009).

Na obou deskách z odpočívky Vrbová Lhota byla koncentrace trhlin na povrchu CBK vyšší než na desce D1PA. Deska VLP (dálnice D11, směr Poděbrady, 36. km) má průměrnou hodnotu měrné délky trhlin  $16,49 m/m^2$ . Trhliny se přednostně nacházejí na okrajových částech a v rozích desky (Obr. 23) (max. =  $25,04 m/m^2$ ), minima měrné délky trhlin se nacházejí ve středu desky (min. =  $6,27 m/m^2$ ). Takové rozložení trhlin na povrchu CBK je typické pro porušení vlivem alkalicko-křemičité reakce (Stark 1991).



Obr. 23. Rozložení trhlin na jednotlivých částech desky VLP. Měřítka v pravé části obrázku vyjadřuje měrnou délku trhlin v  $\text{m/m}^2$ . V1 (resp. V2) – pozice odebraných vrtných jader (Pertold a kol. 2009).

Druhá zkoumaná deska z odpočívky Vrbová Lhota – VLL (dálnice D11, směr Praha, 36. km), vykazuje podobné hodnoty měrné délky trhlin i jejich rozložení jako na desce VLP. Průměrná hodnota měrné délky trhlin je  $14,05 \text{ m/m}^2$ . Nejvíce poškozené jsou okraje desky (max. =  $23,76 \text{ m/m}^2$ ), nejméně poškozený pak střed desky (min. =  $2,05 \text{ m/m}^2$ ) (Obr. 24).

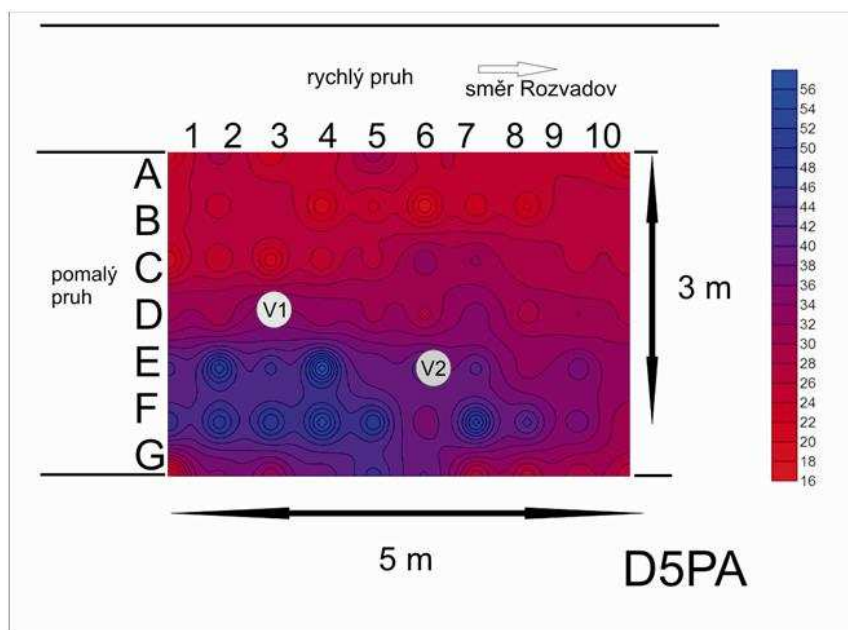


Obr. 24. Rozložení trhlin na jednotlivých částech desky VLL. Měřítka v pravé části obrázku vyjadřuje měrnou délku trhlin v  $\text{m/m}^2$ . V1 (resp. V2) – pozice odebraných vrtných jader (Pertold a kol. 2009).

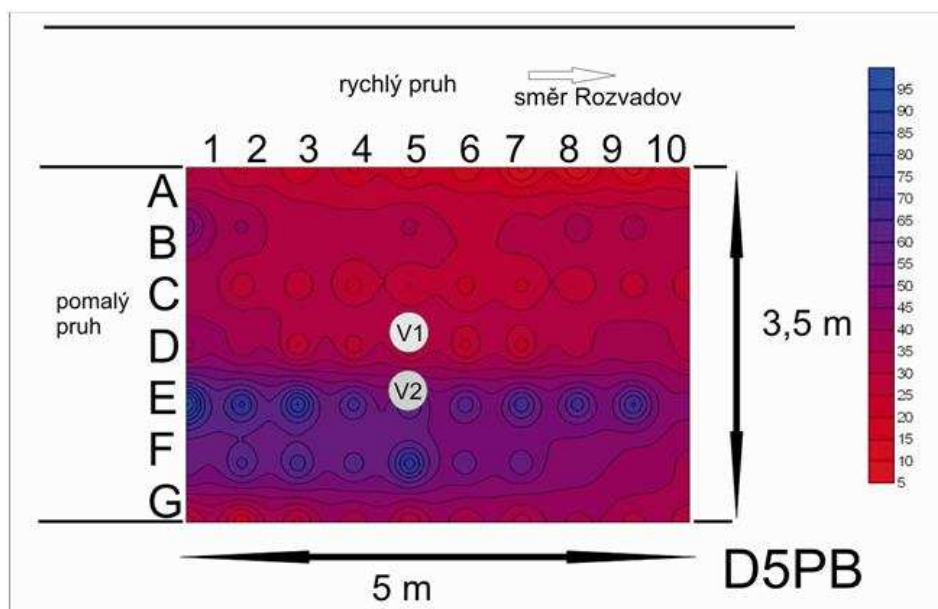
Povrch CBK na dálnici D5 (směr Rozvadov, 114,95., 128,18. a 128,23. km) se odlišoval od ostatních zkoumaných úseků. Povrch všech zkoumaných desek pokrývala velmi hustá síť trhlin. Průměrná délka trhlin na desce D5PA je  $32,08 \text{ m/m}^2$  (max. =  $55,31 \text{ m/m}^2$ ; min. =  $17,38 \text{ m/m}^2$ ) a na desce D5PB je



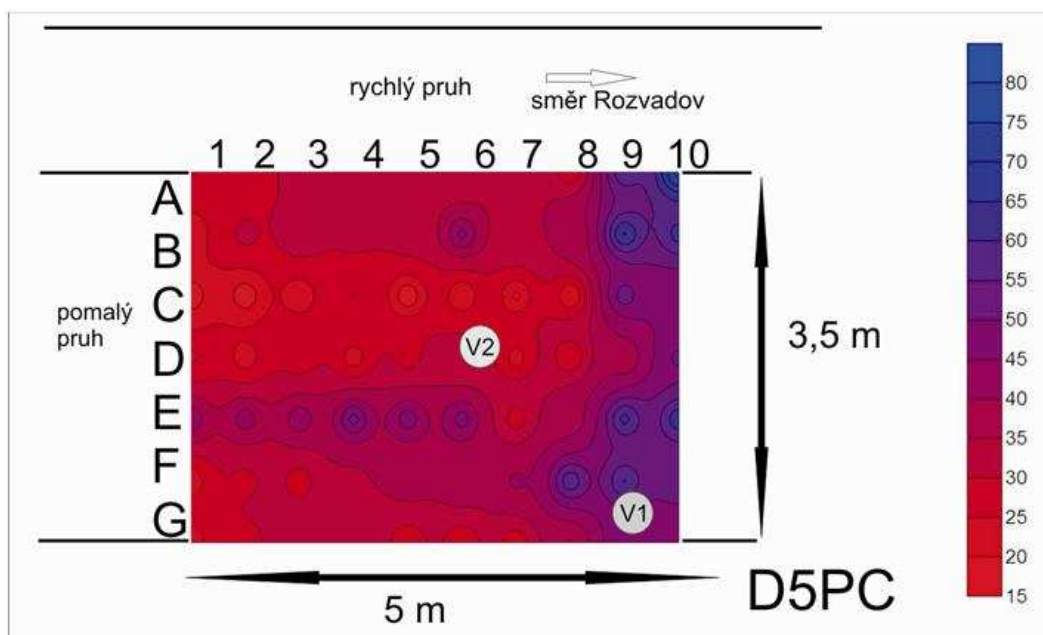
průměrná délka trhlin  $38,53 \text{ m/m}^2$  (max. =  $90,96 \text{ m/m}^2$ ; min. =  $8,61 \text{ m/m}^2$ ). Společná pro desky D5PA a D5PB je nápadně vyšší hustota trhlin v řadách E a F, představujících druhou a třetí řadu od okraje vozovky. Deska D5PC vykazuje průměrnou hodnotu měrné délky trhlin  $35,76 \text{ m/m}^2$  (max. =  $76,40 \text{ m/m}^2$ ; min. =  $15,77 \text{ m/m}^2$ ). Maxima hodnot měrné délky trhlin na desce D5PC vytvářejí písmeno T. Koncentrují se nejen v pásu E rovnoběžném s osou dálnice, ale také ve sloupcích 9 a 10, kolmých na osu dálnice. Rozložení hodnot měrné délky trhlin na všech deskách z dálnice D5 (Obr. 25 – 27) vypovídá o možnosti jiného mechanismu vzniku trhlin než vlivem alkalicko-křemičité reakce.



Obr. 25. Rozložení trhlin na jednotlivých částech desky D5PA. Měřítko v pravé části obrázku vyjadřuje měrnou délku trhlin v  $\text{m/m}^2$ . V1 (resp. V2) – pozice odebraných vrtných jader (Pertold a kol. 2009).



Obr. 26. Rozložení trhlin na jednotlivých částech desky D5PB. Měřítko v pravé části obrázku vyjadřuje měrnou délku trhlin v  $\text{m/m}^2$ . V1 (resp. V2) – pozice odebraných vrtných jader (Pertold a kol. 2009).



Obr. 27. Rozložení trhlin na jednotlivých částech desky D5PC. Měřítka v pravé části obrázku vyjadřuje měrnou délku trhlin v  $\text{m/m}^2$ . V1 (resp. V2) – pozice odebraných vrtných jader (Pertold a kol. 2009).

Podle průměrných hodnot měrné délky trhlin na povrchu CBK je možné zkoumané desky rozdělit do tří skupin:

- deska s malou četností trhlin na povrchu CBK (D1PA);
- desky se střední četností trhlin na povrchu CBK (VLP, VLL);
- desky s velkou četností trhlin na povrchu CBK (D5PA, D5PB, D5PC).

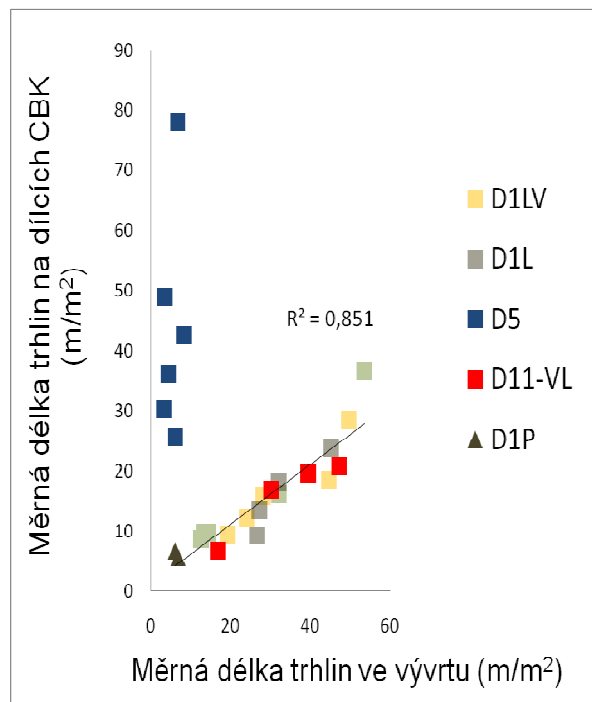
Podle prostorového rozdělení trhlin na povrchu CBK lze desky rozdělit do následujících dvou skupin:

- desky, na kterých se trhliny koncentrují přednostně do okrajových partií. Směrem do středu desek koncentrace trhlin klesá (VLP, VLL);
- desky, na kterých se trhliny koncentrují do pásů paralelních nebo kolmých na osu dálnice (D1PA, D5PA, D5PB a D5PC).

Další fáze výzkumu zahrnovala vyhodnocení měrné délky trhlin ve vrtných jádrech. Tento způsob makroskopického výzkumu vrtných jader není v současné literatuře zpracován. Vrtná jádra z desky D1PA vykazují nízkou průměrnou hodnotu měrné délky trhlin  $6,58 \text{ m/m}^2$ . Také vrtná jádra z desek dálnice D5 vykazují nízké hodnoty (průměrná měrná délka trhlin ve vrtném jádře z desky: D5PA =  $6,50 \text{ m/m}^2$ , D5PB =  $6,57 \text{ m/m}^2$ , D5PC =  $3,45 \text{ m/m}^2$ ). Oproti tomu desky z odpočívky Vrbová Lhota mají hodnoty vysoké: VLP =  $43,20 \text{ m/m}^2$  a VLL =  $23,50 \text{ m/m}^2$ .

Porovnání měrné délky trhlin na povrchu a uvnitř CBK (Obr. 28) ukázalo na:

- desky CBK, ve kterých se trhliny šíří v povrchových i vnitřních partiích desek. Měrná délka trhlin na povrchu CBK vykazuje pozitivní korelaci s měrnou délkou trhlin uvnitř vrtných jader (D1PA, VLP a VLL).
- desky CBK, ve kterých se trhliny koncentrují pouze do povrchových částí desky (pouze několik mm od povrchu desky). Vnitřní část desek je trhlinami porušená jen minimálně (D5PA, D5PB a D5PC).



Obr. 28. Porovnání měrné délky trhlin na dílcích (rozměry dílců  $0,5 \times 0,5$  m) desek CBK s měrnou délkou trhlin ve vývrtech.

## 5.2 Porovnání metod makroskopického a mikroskopického určení přítomnosti alkalicko-křemičitých gelů

Možnost makroskopického určení přítomnosti alkalicko-křemičitých gelů na povrchu betonu uranyl acetátovou metodou popsal Stark (1991). Uranyl acetátová metoda byla použita na vrtná jádra z dálnice D5 a z odpočívky Vrbová Lhota. Bylo potvrzeno tvrzení (Stark 1991), že nejvhodnější pro výzkum jsou nově vytvořené plochy. Na čerstvě odlomených částech vrtných jader z odpočívky Vrbová Lhota bylo pozorováno velké množství alkalicko-křemičitých gelů. Gely tvořily lemy okolo úlomků, vyplňovaly póry a vytvářely celistvé povlaky v cementovém pojivu. Oproti starým řezným plochám jader byly alkalicko-křemičité gely přítomné pouze v malém množství v podobě jemných trhlin. Na vrtných jádrech z dálnice D5 nebyly alkalicko-křemičité gely patrné ani na odlomených částech, ani na řezných plochách. Nevýhodou této metody je nemožnost kvantifikace gelů a nutnost bezpečnostních opatření, neboť se používá mírně radioaktivní uranyl acetát.

Určení přítomnosti alkalicko-křemičitých gelů pomocí optické mikroskopie je o mnoho přesnější (TP137, 2003). Zpracováním mikrofotografií metodou analýzy obrazu lze vyhodnotit objemové zastoupení produktů alkalicko-křemičité reakce (tj. mikrotrhlin a gelů; Příkryl 2001). Další mikroskopickou metodou pro identifikaci alkalicko-křemičitých gelů je SEM/EDS analýza, kterou lze určit přesné chemické složení gelů (Marfil a Maiza 2001). Metoda se při výzkumu výbrusů z dálnic ověřila a pomohla potvrdit či vyvrátit přítomnost alkalicko-křemičitých gelů, jelikož v optickém mikroskopu se gely v některých případech podobají bublinám a některé staré (vyschlé) křemičité gely se mohou zaměnit s cementovým pojivem.

## 5.3 Porovnání makroskopických a mikroskopických projevů poruch na povrchu CBK, ve vývrtech a ve výbrusech

Srovnání hodnot měrné délky trhlin na povrchu CBK, měrné délky trhlin ve vrtných jádrech a objemového zastoupení produktů alkalicko-křemičité reakce ukazuje Tab. 10.

Tab. 10. Porovnání hodnot měrné délky trhlin na povrchu CBK, měrné délky trhlin ve vrtných jádrech a objemového zastoupení produktů alkalicko-křemičité reakce.

	průměr měrné délky trhlin na CBK (m/m <sup>2</sup> )	průměr měrné délky trhlin na CBK na dílcích, z kterých je jádro (m/m <sup>2</sup> )	měrná délka trhlin ve vrtných jádrech (m/m <sup>2</sup> )	alkalicko-křemičité gely ve výbrusech (obj.%)	trhliny ve výbrusech (obj.%)
<b>D5</b>					
D5PA1	31,8	36,2	4,5	0,2	0,0
D5PA2		42,6	8,5	0,1	0,0
D5PB1	38,5	25,7	6,3	0,1	0,0
D5PB2		78,1	6,8	0,3	0,0
D5PC1	35,8	48,9	3,6	0,1	0,0
D5PC2		30,3	3,3	0,4	0,0
<b>VL</b>					
VLP2	16,4	19,6	39,3	1,5	0,4
VLP1		20,8	47,1	1,7	2,3
VLL2	14,0	6,6	16,8	1,9	1,8
VLL1		16,9	30,2	1,6	3,2
<b>D1</b>					
D1PA1	8,2	6,7	6,2	0,1	0,1
D1PA2		5,6	7,0	0,0	0,1

Porovnáním měrné délky trhlin na povrchu CBK s měrnou délkou trhlin ve vrtných jádrech a objemovým zastoupením produktů alkalicko-křemičité reakce se potvrzuje pozitivní korelace výsledků z odpočívky Vrbová Lhota a dálnice D1P. Opačný trend vykazují výsledky z dálnice D5.

Na vzorcích z odpočívky Vrbová Lhota byly naměřeny vysoké hodnoty měrné délky trhlin na povrchu CBK i na vrtných jádrech a objemové zastoupení alkalicko-křemičitých gelů a mikrotrhlin je velké. Tyto výsledky potvrzují silné poškození vlivem alkalicko-křemičité reakce.

Výsledky naměřené na dálnici D1P také korelují, jen jsou celkově nižší než v případě odpočívky Vrbová Lhota. Matoucí mohou být nulové hodnoty objemového zastoupení alkalicko-křemičitých gelů. Jelikož je ve výbruse obsaženo malé množství gelů, jejich hodnota se zaokrouhlila na nulu. Tudíž lze předpokládat, že v této desce je alkalicko-křemičitá reakce ve velmi raném stadiu.

Výsledky z dálnice D5 poukazují na možnost jiného mechanismu vzniku porušení CBK. Dokazuje to rozložení trhlin na povrchu (trhliny se koncentrují do pásů paralelních nebo kolmých na osu dálnice), velmi vysoké hodnoty měrné délky trhlin na povrchu CBK a naopak minimální hodnoty ve vrtných jádrech a minimální hodnoty objemového zastoupení mikrotrhlin a alkalicko-křemičitých gelů ve výbrusech. Gely vyplňují póry, ale vliv na expanzi betonu nemají, jelikož se trhliny ve výbrusech téměř nevyskytují. Pravděpodobný vznik porušení betonu na dálnici D5 je vlivem chybného uložení dilatačních trnů. Příklady dalších možných mechanismů způsobujících porušení betonu uvádí Bilčík a

Dohnálek (2003) a jsou to: smrštění, rychlé vysychání, karbonatace, krystalizace solí, porušení vlivem mrznoucí vody.

#### **5.4 Reaktivita kameniva**

Reaktivita kameniva byla posuzována podle prostorového rozložení alkalicko-křemičitých gelů a mikrotrhlin s horninovými úlomky. Jako nejvíce reaktivní byly stanoveny některé vulkano-sedimentární typy hornin, bohaté na jemnozrný křemen a alkalické živce (Bulteel a kol. 2004). Výskyt těchto hornin a velké množství alkalicko-křemičitých gelů a mikrotrhlin byl zjištěn ve výbrusech z odpočívky Vrbová Lhota. Do skupiny těchto hornin patří: křemen-živcové tufy, tufity, tufitické prachovce, tufitické droby (všechny obsahují jemnozrnou matrix bohatou na křemen).

Na druhé straně výbrusy z dálnice D5 obsahovaly bazické vulkanity a bazické vulkano-sedimentární typy hornin, které jsou pokládány za nereaktivní (TP137, 2003). Do těchto skupin patří: spility, tufy (převažují živce, chlorit, pyroxeny a epidot) a vápnité tufy. V horninách se často objevují karbonátové žilky. Některé póry jsou vyplněné alkalicko-křemičitými gely. Tyto póry se nacházejí v blízkosti vápenců, které obsahují prokřemenělé části, tím se zvyšuje reaktivita, ale expanzí těchto gelů nedochází k tvorbě trhlin.

Ve výbrusech z dálnice D1P se převážně vyskytoval biotitický granit a biotit-amfibolický granodiorit, tyto horniny jsou obecně považovány za málo reaktivní (TP 137, 2003). Přesto se ve výbrusech objevilo nepatrné množství mikrotrhlin. Příčinou vzniku alkalicko-křemičité reakce je pravděpodobně obsah deformovaného křemene v úlomcích granodioritu.

## 6. ZÁVĚR

Poruchy betonového krytu dálnic vzniklé v důsledku alkalicko-křemičité reakce lze odlišit od jiných mechanismů degradace pomocí makroskopických i mikroskopických metod. Mezi použité makroskopické metody patří: (1) určení měrné délky trhlin na povrchu CBK, (2) určení měrné délky trhlin ve vrtných jádrech (vyhodnoceny metodou analýzy obrazu) a (3) určení acetátová metoda. Pro mikroskopické studium byla využita optická mikroskopie, která umožnila určení petrografického složení kameniva a posouzení jeho reaktivnosti. Optická mikroskopie byla také aplikována pro stanovení objemového zastoupení produktů alkalicko-křemičité reakce. Optickou mikroskopii je vhodné kombinovat s SEM/EDS, která umožňuje studium chemického složení nově vzniklých alkalicko-křemičitých gelů.

Jedním z hlavních cílů diplomové práce bylo porovnat výsledky makroskopického a mikroskopického výzkumu porušení CBK dálnic. A tím získat poznatky, jak se makroskopicky pozorovatelné poruchy na povrchu CBK projeví uvnitř desky a určit, zda je deska CBK vozovky poškozená vlivem alkalicko-křemičité reakce, či jiným mechanismem.

Desky CBK, které byly poškozeny vlivem alkalicko-křemičité reakce byly rozpoznány na základě:

- rozložení trhlin na povrchu CBK, maximální hodnoty měrné délky se vyskytují na okrajích desek a do středu se jejich hodnota snižuje;
- trhliny se vyskytují na povrchu CBK i uvnitř jader (pozitivní korelace měrné délky trhlin na povrchu CBK a ve vrtných jádrech);
- mikroskopické určení přítomnosti alkalicko-křemičitých gelů a mikrotrhlin a určení jejich objemového zastoupení, které pozitivně koreluje s měrnou délkou trhlin na povrchu desek;
- desky obsahovaly reaktivní typy kameniva (některé vulkano sedimentární typy hornin bohaté na jemnozrnný křemen a alkalické živce).

Naopak desky minimálně postižené vlivem alkalicko-křemičité reakce byly rozpoznány na základě:

- rozložení měrné délky trhlin, maximální hodnoty se koncentrovaly do pásů paralelních nebo kolmých na osu dálnice;
- výskytu trhlin pouze na povrchu CBK a uvnitř vrtných jader jsou trhliny ojedinělé;
- minimální obsah nebo nepřítomnost alkalicko-křemičitých gelů a mikrotrhlin v mikroměřítku;
- přítomností nereaktivního typu kameniva (bazické vulkanity a bazické vulkano sedimentární typy hornin).

Desky poškozené vlivem alkalicko-křemičité reakce se nacházely na odpočívkách Vrbová Lhota (VLP, VLL) a deska na dálnici D1 (D1PA). Desky, které nebyly poškozeny v důsledku alkalicko-křemičité reakce, se nacházely na dálnici D5 (D5PA, D5PB, D5PC). Tyto desky vykazují poškození způsobené jinými mechanismy (např. smrštění, rychlé vysychání, karbonatace, krystalizace solí, porušení vlivem mrznoucí vody, chybné uložení dilatačních trnů).

## 7. LITERATURA

- Bartoš V., 2003. *Pracovní návod na použití detekční soupravy pro určení produktů alkaliccko-křemičité reakce* (ASR – alkali – silica reaction) v betonu. UJP Praha a.s., 5 str.
- Bennet, 1991. Quartz dissolution in organic-rich aqueous systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 55: 1781 - 1797.
- Bérubé M.A., 2001. *The mineralogical and petrographic analysis of concrete aggregates*. JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society, Springer Boston, 45 – 47.
- Bilčík J., Dohnálek J., 2003. *Sanace betonových konstrukcí*. Vydavatelství Jaga group, v. o. s., Bratislava, 151 str.
- Bulteel D., Rafai N., Degrugilliers P., Garcia-Diaz E., 2004. Petrography study on altered flint aggregate by alkali–silica reaction. *Materials Characterization* 53: 141 – 154.
- Clark B.A., Schwoeble A.J., Lee R.J. and Skalny J., 1992. Detection of ASR in opened fractures of damaged concrete. *Cement and Concrete Research* 22: 1170 - 1178.
- ČSN EN 206-1 (73 2403), 2001. Beton - Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Český normalizační institut, 67 str.
- Diamond S., 1975. A review of alkali-silica reaction and expansion mechanisms, 1. alkalies in cements and in concrete pore solutions. *Cement and Concrete Research* 5: 329 – 346.
- Dove P.M., 1995. Kinetic and thermodynamic controls on silica reactivity in weathering environments. In: White A.F., Brantley S.L. (Eds:) *Chemical weathering rates of silicate minerals. Reviews in Mineralogy* 31: 235 - 290.
- Fernandes I., Noronha F., Teles M., 2007. Examination of the concrete from an old Portuguese dam: Texture and composition of alkali-silica gel. *Materials Characterization* 58: 1160 - 1170
- Garcia-Diaz E., Riche J., Bulteel D., Vernet C., 2006. Mechanism of damage for the alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research* 36: 395 – 400.
- Chatterji S., 2005. Chemistry of alkali-silica reaction and testing of aggregates. *Cement & Concrete Composites* 27: 788-795
- Jensen V., 2004. Alkali-silica reaction damage to Elgeseter Bridge, Trondheim, Norway: a review of construction, research and repair up to 2003. *Materials Characterization* 53: 155 - 170
- Jensen A.D., Chatterji S., Christensen P., Thaulow N., Gudmundsson H., 1982. Studies of alkali-silica reaction – part I a comparison of two accelerated test methods. *Cement and Concrete Research* 12: 641 – 647.
- Jílek A., Novák V., 1986. *Betonové stavitelství I*. SNTL – Nakladatelství technické literatury, Praha, 731 str.
- Lukschová Š., Příkryl R., 2006. Quantification of reactive components in sands and gravels by petrographic image analysis (modified RILEM method). In: Grantham M.G., Jaubertie R., Lanos C. (eds.) *Concrete solutions*. BRE Press, Watford, str. 710 – 717.
- Lukschová Š., Příkryl R., Pertold Z., 2008. Identification of alkali-silica reactive fragments in sands and gravels using mortar bar method and gel pat test, modified by petrographic image analysis. In: Broekmans M.A.T.M., Wigum B.J. (eds.). *13<sup>th</sup> International Conference on Alkali Aggregate Reaction*. Trondheim (Norway), June 16 – 20, 2008. NGU, ICAAR, Trondheim, str. 368 – 380.
- Lukschová Š., Burdová A., Pertold Z., Příkryl R. (v tisku). Macro- and micro-indicators of alkali-silica reaction in concrete pavement. *Magazine of Concrete Research*.

Marfil S.A., Maiza P.J., 2001. Deteriorated pavements due to the alkali-silica reaction (A petrographic study of three cases in Argentina). *Cement and Concrete Research* 31: 1017 - 1021.

Modrý S., Dohnálek J., Gemrich J., Hörbe M., Táborský T., Dobiáš D., 2003. *Vyloučení alkalické reakce kameniva v betonu na stavbách pozemních komunikací*. Výroční zpráva projektu za r. 2003. Číslo projektu: 803/120/114, s. 73.

Owsiak Z., 2004. Alkali-aggregate reaction in concrete containing high-alkali cement and granite aggregate. *Cement and Concrete Research* 34: 7 – 11.

Pertold Z., Lukschová Š., Přikryl R., 2008. *Ověření úspěšnosti oprav a rekonstrukcí mostů. Identifikace alkalické reakce kameniva v betonu a nalezení jejích příčin*. Zpráva za rok 2007. Technická zpráva.

Pertold Z., Lukschová Š., Přikryl R., Burdová A., Seidlová Z., 2009. *Příčiny a rozsah poruch CBK vozovek způsobených AAR*. Dílčí zpráva za rok 2008. Číslo projektu: 1F82C/054/910, s. 74.

Přikryl R., 2001. Some microstructural aspects of strength variation in rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 38: 671 – 682.

St John D.A., Poole A.B., Sims I., 1998. *Concrete petrography*. A handbook of investigative techniques, Arnold, London, 450 str.

Stanton T.E., Porter O.J., Meder L.C., Nicol A., 1942. California Experience With the Expansion of Concrete Through Reaction Between Cement and Aggregate. *ACI Journal Proceedings* 38: 209 - 236.

Stark D., 1991. *Handbook for the Identification of Alkali Silica Reactivity in Highway Structures*. Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, Technical report no. SHRP-C / FR-91-101.

Stark J., Freyburg E., Giebson C., 2006. Latest insights and advances in understanding the ASR. In: Alexander M.G. (eds.) *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting*. Taylor & Francis Group, London, ISBN 0415396549, str. 35 – 36.

Škvára, F., 1995. *Technologie anorganických pojiv II.: užití maltovin, koroze cementu*. Praha: skripta Fakulty chemické technologie VŠCHT, 184 str.

Tambelli C.E., Schneider J.F., Hasparyk N.P., Monteiro P.J.M., 2006. Study of the structure of alkali-silica reaction gel by high-resolution NMR spectroscopy. *Journal of Non-Crystalline Solids* 352(32-35): 3429-3436.

TP 137, 2003. *Vyloučení alkalické reakce kameniva v betonu na stavbách pozemních komunikací*. Technický předpis Ministerstva dopravy ČR, 39 str.

Internetové stránky:

[www.ceskedalnice.cz](http://www.ceskedalnice.cz) (28.3.2010)



Příloha č. I., Anna Burdová, Porovnání makro- a mikroskopických projevů alkalicko-křemičité reakce v cemento-betonovém krytu vozovek.

Měrné délky trhlin na deskách D1PA, VLP, VLL, D5PA, D5PB, D5PC.

Měrná délka trhlin (m/m <sup>2</sup> ) D1PA (řady č. / sloupce č.)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	5,13	7,06	4,74	5,10	4,56	7,37	6,68	7,29	4,41
B	2,74	6,31	5,19	6,01	6,36	8,62	7,60	7,17	3,73
C	2,79	5,79	3,86	3,37	6,42	4,74	3,46	4,48	5,65
D	5,66	5,91	5,76	6,79	5,99	2,29	4,34	4,89	5,48
E	5,81	14,33	14,11	13,26	17,90	19,40	10,55	12,70	6,92
F	6,78	17,98	11,06	13,25	19,53	17,50	19,44	16,58	13,21

Měrná délka trhlin (m/m <sup>2</sup> ) VLP (řady č. / sloupce č.)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	17,07	22,46	19,53	20,06	17,39	15,25	16,25	14,14	11,44	11,30
B	12,32	16,79	18,68	18,05	17,70	15,93	16,05	20,60	13,52	12,47
C	16,99	20,76	19,63	17,15	12,13	7,75	12,14	16,36	10,99	15,11
D	19,95	23,18	21,49	15,19	10,92	14,00	14,20	17,42	17,23	17,86
E	19,99	19,85	17,69	16,28	9,94	9,28	16,11	17,94	16,93	18,14
F	19,92	20,60	21,47	22,74	14,05	8,94	13,97	22,13	24,13	19,49
G	25,04	22,47	17,49	14,25	12,80	10,87	11,23	19,70	18,46	15,65
H	13,82	18,62	13,90	8,07	6,27	6,94	11,38	15,33	16,46	14,40
I	13,09	23,35	17,44	19,49	16,92	14,81	16,87	19,02	18,69	16,16
J	17,36	20,74	18,53	18,37	21,63	16,27	16,84	16,08	17,90	19,30
K	17,26	24,86	17,95	15,37	18,75	12,98	11,95	12,60	13,24	7,92

Měrná délka trhlin (m/m <sup>2</sup> ) VLL (řady č. / sloupce č.)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	13,08	15,16	14,28	15,69	13,87	11,01	12,97	6,80	11,10	12,98
B	17,84	17,81	15,91	16,30	12,31	19,18	17,20	10,37	16,81	17,38
C	14,46	15,31	5,89	9,60	5,46	7,82	9,68	6,42	11,50	15,51
D	19,04	23,76	13,35	2,05	2,58	9,43	13,24	14,17	9,18	13,21
E	14,15	23,58	22,78	6,79	5,89	7,34	10,95	17,32	16,55	19,09
F	20,87	18,10	20,51	15,20	13,16	11,76	19,64	13,70	13,03	18,60
G	22,63	22,70	19,69	15,83	14,13	12,04	14,90	12,52	13,53	16,74

Měrná délka trhlin (m/m <sup>2</sup> ) D5PA (řady č. / sloupce č.)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	20,95	28,73	21,99	24,20	31,14	25,36	24,86	24,16	24,90	17,38
B	24,08	25,30	26,19	20,43	23,41	18,27	22,15	21,54	26,05	26,72
C	20,24	23,93	20,57	24,12	27,11	33,32	32,26	28,50	27,01	26,90
D	31,57	29,96	36,22	32,22	31,23	29,34	35,10	29,05	29,95	29,47
E	42,65	51,19	44,69	55,31	39,62	42,56	40,71	33,33	37,38	33,87
F	45,79	49,29	49,89	53,17	49,98	37,01	50,97	42,66	37,13	30,36
G	20,77	35,74	32,54	39,14	45,01	40,19	26,75	26,95	28,42	26,35

Měrná délka trhlin (m/m <sup>2</sup> ) D5PB (řady č. / sloupce č.)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	29,28	24,11	19,84	19,10	16,97	15,26	8,61	10,30	12,82	16,05
B	53,09	40,76	31,83	30,77	36,36	29,91	31,79	38,85	37,46	32,97
C	35,93	26,09	26,51	22,76	24,57	22,68	23,74	25,68	27,89	27,18
D	39,08	36,97	24,72	27,17	25,70	23,47	22,55	30,98	35,94	31,54
E	90,96	76,15	80,53	67,57	67,33	63,42	69,39	68,14	71,01	46,84
F	57,84	66,47	68,12	63,15	78,07	57,88	58,99	48,60	43,66	38,77
G	28,06	20,81	28,67	36,92	31,12	35,49	32,63	39,02	32,87	31,47

Měrná délka trhlin (m/m <sup>2</sup> ) D5PC (řady č. / sloupce č.)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	24,87	26,20	31,18	31,78	33,56	30,45	32,71	26,60	58,20	76,40
B	22,57	31,16	34,13	30,64	31,29	46,18	31,67	36,88	65,49	61,79
C	17,04	16,37	21,12	24,80	15,77	20,24	19,04	20,05	52,15	47,36
D	24,58	22,69	27,67	22,45	28,28	30,29	22,90	25,47	36,21	50,66
E	43,37	42,73	43,56	51,72	47,95	47,14	27,65	37,86	61,38	63,23
F	22,34	29,04	27,87	34,26	36,86	38,77	40,51	58,49	60,30	53,42
G	22,83	29,00	30,59	34,56	25,72	25,46	26,69	34,74	48,93	47,18

Příloha č. II., Anna Burdová, Porovnání makro- a mikroskopických projevů alkalicko-křemičité reakce v cemento-betonovém krytu vozovek.

Měrná délka trhlin na povrchu CBK a ve vrtných jádrech (Pertold et al. 2009).

D1 (číslo vývrtu - část vývrtu)	Trhliny - tot (m)	Plocha a (m <sup>2</sup> )	Měrná délka trhlin (m/m <sup>2</sup> )	Průměrná délka trhlin na vývrtu (m/m <sup>2</sup> )	Umístění vývrtu na desce	Průměrná délka trhlin na částech CBK (m/m <sup>2</sup> )
D1PA-1 - a	0,06	0,01	5,3689	6,1894	2a-2b	6,6877
D1PA-1 - b	0,05	0,01	4,6702			
D1PA-1 - c	0,10	0,01	9,3211			
D1PA-1 - d	0,06	0,01	5,3974			
D1PA-2 - a	0,11	0,01	10,7350	6,9756	5d-5c-4d-4c	5,6397
D1PA-2 - b	0,08	0,01	7,8465			
D1PA-2 - c	0,05	0,01	5,0323			
D1PA-2 - d	0,04	0,01	4,2885			

D11 Vrbová Lhota (číslo vývrtu - část vývrtu)	Trhliny - tot (m)	Plocha (m <sup>2</sup> )	Měrná délka trhlin (m/m <sup>2</sup> )	Průměrná délka trhlin na vývrtu (m/m <sup>2</sup> )	Umístění vývrtu na desce	Průměrná délka trhlin na částech CBK (m/m <sup>2</sup> )
VLP-2 - 3	1,43	0,03	41,2025	39,2803	3e-3f	19,5826
VLP-2 - 2	0,70	0,02	39,7135			
VLP-2 - 1	0,64	0,02	36,9248			
VLP-1 - 3	1,51	0,04	42,1372	47,1138	2c	20,7613
VLP-1 - 2	0,88	0,02	49,4563			
VLP-1 - 1	0,88	0,02	49,7478			
VLL-2 - 1	0,32	0,02	16,4964	16,8412	5e-6e	6,6182
VLL-2 - 2	0,32	0,02	16,4333			
VLL-2 - 3	0,69	0,04	17,5939			
VLL-1 - 1	0,54	0,02	32,1553	30,1516	2b-3b	16,8570
VLL-1 - 2	0,55	0,02	33,1822			
VLL-1 - 3	0,77	0,03	25,1174			

D5 (číslo vývrtní - část vývrtní)	Trhliny - tot (m)	Plocha (m <sup>2</sup> )	Měrná délka trhlin (m/m <sup>2</sup> )	Průměrná délka trhlin na vývrtní (m/m <sup>2</sup> )	Umístění vývrtní na desce	Průměrná délka trhlin na částech CBK (m/m <sup>2</sup> )
D5PA-1-1	0,10	0,02	6,1142	4,5207	3d	36,2219
D5PA-1-2	0,06	0,02	3,3433			
D5PA-1-3	0,14	0,03	4,1045			
D5PA-2 - 1	0,17	0,02	9,6150	8,4845	6e	42,5562
D5PA-2 - 2	0,15	0,02	8,6133			
D5PA-2 - 3	0,25	0,04	7,2252			
D5PB-1 - 1	0,11	0,02	7,2701	6,3177	5d	25,7019
D5PB-1 - 2	0,08	0,02	5,3767			
D5PB-1 - 3	0,19	0,03	6,3062			
D5PB-2 - 1	0,14	0,02	7,4865	6,8319	5f	78,0733
D5PB-2 - 2	0,14	0,02	7,5836			
D5PB-2 - 3	0,20	0,04	5,4256			
D5PC-1 - 1	0,07	0,02	4,3230	3,5804	9g	48,9300
D5PC-1 - 2	0,06	0,02	3,5542			
D5PC-1 - 3	0,10	0,03	2,8640			
D5PC-2 - 1	0,07	0,02	3,3036	3,3243	6d	30,2890
D5PC-2 - 2	0,06	0,02	3,1126			
D5PC-2 - 3	0,14	0,04	3,5566			

Příloha č. III., Anna Burdová, Porovnání makro- a mikroskopických projevů alkalicko-křemičité reakce v cemento-betonovém krytu vozovek.

Chemické analýzy alkalicko-křemičitých gelů (ASG) metodou SEM/EDS; BA - bodová analýza, PA - plošná analýza.

### 3A – D5PB2

	ASG	ASG	ASG	ASG	ASG	ASG	ASG	ASG	ASG	ASG	ASG	ASG	ASG
	BA	BA	BA	BA	BA	BA	BA	BA	BA	BA	BA	BA	BA
	an.1	an.3	an.4	an.5	an.6	an.7	an.9	an.10	an.11	an.12	an.14	an.20	an.21
Na <sub>2</sub> O	0,0	1,3	1,3	1,3	1,3	1,4	1,3	1,2	0,1	1,0	1,4	1,0	1,2
MgO	0,0	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,1	0,4	0,4	0,4	0,4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,2	0,2	0,3	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2
SiO <sub>2</sub>	4,7	4,0	3,9	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,2	4,0	3,9	4,1	4,1
K <sub>2</sub> O	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0
CaO	0,4	0,7	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	1,0	0,6	0,7	0,6	0,5
FeO	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

### 4B – D5PA2

	ASG	ASG	ASG	ASG	ASG	ASG
	BA	BA	BA	BA	PA	PA
	an.3	an.4	an.5	an.6	an.7	an.11
Na <sub>2</sub> O	1,4	1,5	1,1	1,2	0,4	1,4
MgO	0,4	0,5	0,4	0,4	0,2	0,4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,1	0,2	0,1	0,2	0,4	0,2
SiO <sub>2</sub>	4,1	4,0	4,1	4,1	4,0	4,1
K <sub>2</sub> O	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
CaO	0,5	0,4	0,5	0,5	0,6	0,5
FeO	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0
	10	10	10	10	10	10

### 5A – D5PC2

	ASG	ASG	ASG	ASG	ASG	ASG	ASG	ASG	ASG	ASG	ASG	ASG
	BA	BA	BA	BA	BA	BA	BA	BA	BA	BA	BA	BA
	an.1	an.2	an.3	an.4	an.5	an.6	an.7	an.8	an.9	an.10	an.11	2*
Na <sub>2</sub> O	1,5	1,8	1,6	1,2	1,5	1,2	1,3	1,1	1,1	1,1	1,3	1,6
MgO	0,4	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1
SiO <sub>2</sub>	4,1	4,0	4,0	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1
K <sub>2</sub> O	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
CaO	0,5	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,4
	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

7A – VLL1

	AS G	AS G	AS G	AS G	AS G	AS G	AS G	AS G	AS G	AS G	AS G	AS G	AS G	AS G	AS G	AS G
	PA	PA	PA	BA	BA	BA	BA	BA	BA	BA	BA	BA	BA	BA	BA	BA
	an.5	an.6	an.7	an.8	an.9	an.12	an.13	an.14	an.15	an.18	an.20	an.21	an.22	an.23	an.26	an.29
Na2O	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	1,2	1,2	1,2	1,0	0,1	0,2	0,2	0,2	1,6	1,1	0,0
MgO	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,4	0,4	0,3	0,0	0,0	0,1	0,0	0,4	0,4	0,0
Al2O3	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2
SiO2	4,2	4,2	4,3	4,7	4,6	4,2	4,0	4,1	4,3	4,6	4,4	4,2	4,3	4,1	4,2	4,0
SO3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
K2O	0,8	0,9	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,7	0,7	0,5	0,0	0,0	0,5
CaO	1,0	1,0	1,1	0,5	0,7	0,5	0,8	0,6	0,7	0,3	1,0	1,0	1,1	0,4	0,6	1,6
FeO	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

11A – VLP1

	AS G	AS G	AS G	AS G	AS G	AS G	AS G	AS G	AS G	AS G	AS G	AS G	AS G	AS G	AS G	AS G
	PA	PA	PA	PA	PA	PA	PA	BA	BA	BA	BA	BA	BA	BA	BA	BA
	an.1	an.2	an.3	an.4	an.6	an.7	an.8	an.9	an.12	an.13	an.14	an.17	an.18	an.19	an.33	
Na2O	0,1	0,2	0,4	0,4	0,2	0,3	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Al2O3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,3	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
SiO2	4,4	4,3	4,0	3,7	4,2	4,2	4,3	3,5	4,0	3,6	3,7	4,4	4,5	4,2	4,1	
K2O	0,1	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,2	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	
CaO	1,1	1,1	1,2	0,9	1,3	1,2	1,2	2,4	1,5	2,5	2,3	1,2	0,9	1,5	1,8	
	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

13B – VLP2

	AS G	AS G	AS G	AS G	AS G	AS G	AS G	AS G	AS G	AS G	AS G	AS G	AS G	AS G	AS G	AS G	AS G	AS G
	BA	BA	BA	BA	BA	BA	BA	BA	BA	BA	BA	BA	BA	BA	BA	BA	BA	BA
	an.1	an.2	an.3	an.4	an.5	an.6	an.7	an.20	an.21	an.22	an.23	an.25	an.26	an.27	an.30	an.31	an.32	an.35
Na2O	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,1	0,1	0,5	0,5	0,4	0,5	0,4	0,3	0,4	0,5	0,6	0,5	0,5
MgO	0,1	0,1	0,0	0,0	0,2	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,2	0,0
Al2O3	0,1	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	0,5	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,1	0,0	0,3	0,3	0,4	0,3
SiO2	4,1	4,2	4,2	4,2	3,9	3,6	3,7	4,2	4,3	4,2	4,0	4,1	4,3	4,1	4,1	4,4	4,2	3,8
K2O	0,7	0,7	0,7	0,9	0,3	0,1	0,1	0,4	0,5	0,4	0,5	0,5	0,3	0,8	0,2	0,1	0,1	0,1
CaO	0,9	1,1	1,0	1,3	1,4	2,3	1,6	1,2	1,0	1,1	1,3	0,9	0,9	1,0	1,0	0,5	0,6	1,5
FeO	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

## 45B – D1PC1

	ASG	ASG
	BA	BA
	an.1	an.2
Na <sub>2</sub> O	0,4	0,4
MgO	0,1	0,1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,1	0,0
SiO <sub>2</sub>	4,1	4,2
K <sub>2</sub> O	0,7	0,7
CaO	0,9	1,1
FeO	0,0	0,0
	10	10