Univerzita Karlova v Praze
Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Geologie
Studijní obor: Ložisková geologie

Bc. Markéta Kuchyňová

Reaktivnost křemene v experimentálních maltových tělesech

ASR potential of quartz in experimental mortar bar specimens

Diplomová práce

Školitel: Mgr. Aneta Kuchařová, Ph.D.
Konzultant: Mgr. Šárka Šachlová, Ph.D.

Praha, 2016

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 15.8.2016

Podpis

ABSTRAKT

Alkalicko-silikátová reakce (ASR) je jednou z nejničivějších chemických reakcí, které mohou probíhat v betonu a nenávratně jej poškodit. K ASR dochází, pokud jsou splněny následující podmínky: dostatečná vlhkost (> 80 %), dostatečné množství alkálií (Ca^{2+}, Na^{+}, K^{+}) a reaktivní kamenivo (převážně špatně krystalické, deformované až amorfní formy SiO_2). Reaktivní kamenivo, reaguje s vysoce zásaditými pórovými roztoky za vzniku hydrofilních gelů, které zvětšují svůj objem. Reaktivita kameniva je standardně testována pomocí dilatometrických zkoušek. Tyto zkoušky jsou založeny na vytvoření zkušebního tělesa, které je uloženo v prostředí urychlujícím vznik ASR. Délkové změny tělesa jsou způsobeny tvorbou a expanzí alkalicko-silikátových gelů. V rámci diplomové práce byla posouzena náchylnost křemenem bohatých typů hornin k ASR (křemenec, metadroba, kvarcit, pegmatitový křemen) za pomoci mikroskopických (optická mikroskopie, skenovací elektronová mikroskopie kombinovaná s analýzou obrazu) a dilatometrických (ASTM C1260, RILEM AAR-4.1) metod. Horniny byly zařazeny dle reaktivnosti do kategorií podle ASTM C1260 (reaktivní, potenciálně reaktivní, nereaktivní). Reaktivita hornin úzce souvisela s obsahem kryptokrystalické křemenné matrix, velikostí zrn, tvarem hranice zrn a výskytem subzrn či undulózního zhášení. Nejreaktivnější typy hornin obsahovaly až 25 obj. % matrix a obsahovaly subzrna. Nejméně reaktivní horniny se vyznačovaly undulózním zhášením křemene a omezeným výskytem subzrn. Zkouška RILEM AAR-4.1 byla doplňková k ASTM C1260 a pomohla identifikovat pomalu reagující typy kameniva. Analýza obrazu byla použita ke kvantifikaci poškození kameniva v maltových trámcích ze zkoušky ASTM C1260 způsobeného ASR. Poškození se projevuje rozšířením trhlin a rozpouštěním křemenné matrix. Nejreaktivnější horniny s největším obsahem matrix byly více poškozeny (6.3-8.1 obj. %) než horniny málo reaktivní (2.0 obj. %). Modifikovaná verze analýzy obrazu aplikovaná na polyminerální hornině (kvarcit) velmi přesně stanovila poškození křemene i živců vlivem ASR.

Klíčová slova: alkalicko-silikátová reakce, křemen, mikroskopie, analýza obrazu, dilatometrická zkouška

SUMMARY

The alkali-silica reaction is one of the most damaging chemical reactions taking place in concrete, which can cause fatal damage. ASR originates under following conditions: high moisture (> 80 %), sufficient amount of alkaline ions (Ca^{2+}, Na^{+}, K^{+}) and use of reactive aggregates (low crystaline or deformed quartz, amorphous SiO_2). Reactive aggretates react with high alkaline pore solution and produce hydrofile gels. These gels absorb water and swell. Dilatometric test methods are commonly used to evaluate the reactivity of aggregates. The principle of dilatometric test methods is simple. Mortar or concrete prisms are created in a laboratory, then they are stored in the special environment, which accelerates the inception of ASR. The creation and expansion of alkali-silica gels cause prism's length changes. The major goal of this diploma thesis was to evaluate the alkali-silica reactivity potential of quartz-rich rocks using microscopic (polarizing microscopy, scanning electron microscopy combined with SEM/BSE image analysis) and dilatometric (ASTM C1260, RILEM AAR-4.1) methods. Rocks were assessed as reactive, potentially reactive and non-reactive by the ASTM C1260 method. The reactivity of aggregates was connected with the amount of cryptocrystaline matrix, grain size, shape of grain boundaries, subgrains and undulose extinction of quartz. Rocks with the highest reactivity potential contained up to 25 % volume of cryptocrystaline matrix, and subgrains. Rocks with the lowest reactivity potential contained only undulose extincting quartz grains and few subgrains. RILEM AAR-4.1 was only supplementary method to ASTM C1260. RILEM AAR-4.1 was a suitable test method for evaulation of slowly reactive aggregates. SEM/BSE image analysis was used to quantify damage caused by ASR in mortar test prisms (ASTM C1260). ASR caused extension of natural geological and brittle cracks and dissolution of cryptocrystaline matrix. Rocks with the highest reactivity potential and high content of matrix were more damaged by ASR (6.3-8.1 vol. %) than rocks with lower reactivity potential. Modified version of SEM/BSE image analysis was applied on polymineral rock (quartzite) with satisfactory result. Modified SEM/BSE image analysis truly evaluated the damage of quartz and feldspars caused by ASR.

Key words: Alkali-silica reaction, quartz, microscopy, image analysis, mortar bar test

OBSAH

1. ÚVOD....1
2. PŘEHLED DOSAVADNÍCH VÝZKUMŮ....2
2.1 Beton....2
2.2 ASR....4
2.2.1 Historie....4
2.2.2 Škodlivé alkalické reakce....4
2.2.3 Mechanizmus vzniku ASR....5
2.3 Faktory ovlivňující ASR....7
2.3.1 Faktory okolního prostředí....7
2.3.2 Kamenivo....8
2.4 Metody testování kameniva....10
2.4.1 Petrografické metody....11
2.4.2 Chemické metody....11
2.4.3 Dilatometrické metody....12
3. EXPERIMENTÁLNÍ MATERIÁL....14
4. METODIKA....16
4.1 Mikroskopické metody....16
4.1.1 OM....16
4.1.2 SEM/EDS....16
4.2 AO....17
4.2.1 Postup AO pro 1 snímek....18
4.2.2 Postup alternativní verze AO....20
4.3 Dilatometrické zkoušky....21
4.3.1 Urychlená zkouška na maltových trámcích dle ASTM C1260....21
4.3.2 Zkouška na betonových trámcích dle RILEM AAR-4.1....23
4.3.3 RILEM AAR-4.1: Balící metoda dle Yamada et al. (2014)....24
5. VÝSLEDKY....26
5.1 OM....26
5.2 Dilatometrické zkoušky....29
5.2.1 Výsledky zkoušky ASTM C1260....29
5.2.2 Výsledky zkoušky RILEM AAR-4.1....30
5.2.3 Výsledky zkoušky RILEM AAR-4.1 balící metoda dle Yamada et al. (2014)....31
5.3 SEM....32
5.3.1 Projevy ASR v maltových a betonových trámcích....32
5.3.2 Chemické složení alkalicko-silikátových gelů....35
5.4 AO....38
6. DISKUSE....39
6.1 Zhodnocení výsledků dilatometrických zkoušek....39
6.2 Zhodnocení vlivu teploty na expanzi zkušebních těles....43
6.3 Zhodnocení chemického složení gelů....44
6.4 Zhodnocení výsledků AO....45
7. ZÁVĚR....48
8. POUŽITÁ LITERATURA....49

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Schematické znároznění alkalicko-silikátového gelu (Vayghan et al. 2016).....6
Obr. 2. Rozdílná struktura forem SiO_2; (a) dobře krystalická struktura křemene; (b) struktura amorfního SiO_2 atakovaná alkáliemi (Ca^{2+}, Na^{+}) (Rajabipour et al. 2015, upraveno).....8
Obr. 3. Stručná geologická mapa České republiky se zaznačenými zájmovými lokalitami, Q1-Sklená Huť, Q4-Jeníkov, Q5-Kublov (Chlupáč et al. 2002, upraveno).....14
Obr. 4. Stručná geologická mapa Skandinávského poloostrova se zaznačenými zájmovými lokalitami, Q7-Klövsjö, Q8-Kulbacksliden, Q9-Edsele (Lundin 2015, upraveno).....14
Obr. 5. Vlevo: SEM/BSE snímek průřezu trámcem ASTM C1260 (Q8); vpravo: schéma trasy snímkování.....17
Obr. 6. Vlevo: snímek SEM/BSE horninového výbrusu; vpravo: zvětšená oblast snímku na úroveň pixelů s hodnotami šedosti (Heilbronner a Barrett 2014, upraveno).....17
Obr. 7. Zjednodušený postup AO na SEM/BSE snímku z maltového trámce (Q7-A); (a) neupravený SEM/BSE snímek (b) odstranění legendy a úprava šedosti; (c) vymaskování kameniva; (d) výpočet kameniva a cementu; (d) výpočet projevů ASR na kamenivu; (f) manuální selekce a výpočet volných gelů; (g) stejný upravený snímek z bodu b; (h) vymaskování pórů; (i) výpočet pórů.....19
Obr. 8. Postup AO, SEM/BSE snímek horninového výbrusu (Q7-C); (a) neupravený snímek; (b) upravená šedost a odstraněná legenda; (c) výpočet geologických trhlin.....20
Obr. 9. Mikrofotografie horninových výbrusů křemenců Q1, Q4 a Q5;(a) Q1 OM/XPL, (b) Q1 OM/PPL; (c) Q4 OM/XPL, (d) Q4 OM/PPL; (e) Q5 OM/XPL, (f) Q5 OM/PPL.....27
Obr. 10. Mikrofotografie horninových výbrusů křemenné metadroby (Q7), kvarcitu (Q8) a pegmatitového křemene (Q9); (a) Q7-B OM/XPL, (b) Q7-B OM/PPL; (c) Q8 OM/XPL, (d) Q8 OM/PPL; (e) Q9 OM/XPL, (f) Q9 OM/PPL.....28
Obr. 11. Expanzní křivky studovaného kameniva ze zkoušky ASTM C1260.....29
Obr. 12. Expanzní křivky studovaného kameniva ze zkoušky RILEM AAR-4.1.....30
Obr. 13. Expanzní křivky studovaného kameniva ze zkoušky RILEM AAR-4.1 balící metoda dle Yamada et al. (2014).....31
Obr. 14. Nejčastější místa výskytu alkalicko-silikátových gelů v maltových a betonových trámcích, SEM/BSE smínky; (a) gelový lem póru (Q7-A, ASTM C1260), (b) trhlina v kamenivu vyplněná gelem (Q7-D, RILEM AAR-4.1), (c) gel na hranici kamenivo-cement (Q7-D, RILEM AAR-4.1).....32
Obr. 15. SEM/BSE snímky kameniva Q1, Q4, Q5. (a) Q1 hor., (b) Q1 astm., (c) Q1 rilem., (d) Q4 hor., (e) Q4 astm., (f) Q4 rilem., (g) Q5 hor., (h) Q5 astm., (g) Q5 rilem. Vysvětlivky: hor. - horninový výbrus, astm.- ASTM C1260, rilem.- RILEM AAR-4.1.....33
Obr. 16. SEM/BSE snímky kameniva Q7, Q8, Q9. (a) Q7-D hor., (b) Q7-D astm., (c) Q7-D rilem., (d) Q8 hor., (e) Q8 astm., (f) Q8 rilem., (g) Q9 hor., (h) Q9 astm., (g) Q9 rilem. Vysvětlivky: hor. - horninový výbrus, astm.- ASTM C1260, rilem.- RILEM AAR-4.1.....34
Obr. 17. Grafické znázornění chemického složení gelů ze zkoušky ASTM C1260, vlevo: diagram SiO_2-CaO-Na_2O+K_2O, vpravo: diagram CaO-Na_2O-K_2O.....36
Obr. 18. Grafické znázornění chemického složení gelů ze zkoušky RILEM AAR-4.1, vlevo: diagram SiO_2-CaO-Na_2O+K_2O, vpravo: diagram CaO-Na_2O-K_2O.....37
Obr. 19. Vzory rozpouštění na úlomku křemence Q5, SEM/BSE snímek ze zkoušky ASTM C1260.....39
Obr. 20. Srovnání konečných expanzí ze zkoušek ASTM C1260 a RILEM AAR-4.1.....41
Obr. 21. Srovnání expanzních křivek ze zkoušky RILEM AAR-4.1 (rovná čára) s expanzními křivkami z balící metody dle Yamada et al. (2014). Vysvětlivky: (Y) a přerušovaná čara znamená balící metodu dle Yamada et al. (2014), rovná čára představuje standardní RILEM AAR-4.1.....42
Obr. 22. Srovnání konečných expanzí ze zkoušky ASTM C1260 a balící RILEM AAR-4.1 dle Yamada et al. (2014). Proloženo lineární regresí.....43
Obr. 23. Grafické znázornění chemického složení gelů ze zkoušky ASTM C1260 a RILEM AAR-4.1, vlevo: diagram SiO_2-CaO-Na_2O+K_2O, vpravo: diagram CaO-Na_2O-K_2O.....45
Obr. 24. Srovnání konečných expanzí ze zkoušky ASTM C1260 s výsledky AO (projevy ASR), proloženo lineární regresí.....47
Obr. 25. Srovnání konečných expanzí ze zkoušky ASTM C1260 s výsledky AO (projevy ASR), proloženo lineární regresí. Modré body znamenají standardní AO. Červený bod představuje alternativní AO provedenou na vzorku Q8.....48

SEZNAM TABULEK

Tab 1. Přehled studovaných vzorků....15
Tab. 2. Receptura na 1 trámec dle zkoušky ASTM C1260....22
Tab. 3. Receptura na 1 trámec z kameniva Q7 dle zkoušky RILEM AAR-4.1....23
Tab. 4. Mikroskopická charakteristika studovaných horninových typů. Zkratky: Ap – apatit, Bt – biotit, Ilt – illit, Kfs – K-živec, Mnz – monazit, Ms – muskovit, Pl – plagioklas, Py – pyrit, Qz – křemen, Rt – rutil, Ser – sericit, Tur – turmalín, Zrn – zirkon (Whitney a Evans 2010); BLG - "bulging"; * - odhad z OM, ** - upřesněno SEM/EDS....26
Tab. 5. Hodnoty konečných expanzí ze zkoušky ASTM C1260....29
Tab. 6. Hodnoty konečných expanzí ze zkoušky RILEM AAR-4.1....30
Tab. 7. Hodnoty konečných expanzí ze zkoušky RILEM AAR-4.1 balící metoda dle Yamada et al. (2014)....31
Tab. 8. Statistické zhodnocení chemického složení alkalicko-silikátových gelů v hm. % ze zkoušky ASTM C1260. Vysvětlivky: σ – směrodatná odchylka....35
Tab. 9. Statistické zhodnocení chemického složení alkalicko-silikátových gelů ze zkoušky ASTM C1260 vyjádřené pomocí molárních poměrů. Vysvětlivky: σ – směrodatná odchylka....36
Tab. 10. Statistické zhodnocení chemického složení alkalicko-silikátových gelů v hm. % ze zkoušky RILEM AAR-4.1. Vysvětlivky: σ – směrodatná odchylka....36
Tab. 11. Statistické zhodnocení chemického složení alkalicko-silikátových gelů ze zkoušky RILEM AAR-4.1 vyjádřené pomocí molárních poměrů. Vysvětlivky: σ – směrodatná odchylka....37
Tab. 12. Výsledky AO provedené na trámcích ze zkoušky ASTM C1260....38
Tab. 13. Výsledky alternativní AO vzorku Q8, modální složení vzorku Q8....38

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha I: Receptury k přípravě 1 betonového trámce ke zkoušce RILEM AAR-4.1.
Příloha II: Výsledky měření ze zkoušky ASTM C1260.
Příloha III-a: Výsledky měření zkoušky RILEM AAR-4.1.
Příloha III-b: Výsledky měření zkoušky RILEM AAR-4.1 balící metoda dle Yamada et al. (2014).
Příloha IV-a: SEM/EDS analýzy alkalicko-silikátových gelů z maltových trámců ze zkoušky ASTM C1260, hodnoty oxidů jsou v hm. %.
Příloha IV-b: SEM/EDS analýzy alkalicko-silikátových gelů z betonových trámců ze zkoušky RILEM AAR-4.1, hodnoty oxidů jsou v hm. %.
Příloha V-a: Vybrané molární obsahy prvků a molární poměry prvků v alkalicko-silikátových gelech z maltových trámců ze zkoušky ASTM C1260, SEM/EDS.
Příloha V-b: Vybrané molární obsahy prvků a molární poměry prvků v alkalicko-silikátových gelech z betonových trámců ze zkoušky RILEM AAR-4.1, SEM/EDS.
Příloha VI a-h: Data ze zpracování analýzy obrazu vzorku v px.
Příloha VII-a: Data ze zpracování alternativní analýzy obrazu vzorku Q8 v px.
Příloha VII-b: Výpočet alternativní analýzy obrazu vzorku Q8.

SEZNAM ZKRATEK

AAR alkali-aggregate reation, alkalická reakce kameniva
ACR alkalicko-karbonátová reakce
AO analýza obrazu
ASR alkalicko-silikátová reakce
ASTM American Society for Testing and Materials, Americká společnost pro zkušebnictví a materiály
C-S-H fáze $CaO\text{-}SiO_2\text{-}H_2O$ fáze
CEM cement
hm. % hmotnostní procento
Na_2O ekv. Na_2O ekvivalent
obj. % objemové procento
OM optická mikroskopie
OM/PPL pozorování v rovnoběžných nikolech
OM/XPL pozorování ve zkřížených nikolech
PřF UK Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy
px pixel
RILEM International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures, Mezinárodní unie laboratoří pro zkoušení a výzkum materiálů a struktur
SEM skenovací elektronový mikroskop, skenovací elektronová mikroskopie
SEM/EDS skenovací elektronová mikroskopie s energiově disperzním spektrometrem
SEM/BSE skenovací elektronová mikroskopie ve zpět odražených elektronech
ÚGMNZ Ústav geochemie, mineralogie a nerostných zdrojů
ÚPSG Ústav petrologie a strukturní geologie

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych ráda poděkovala své školitelce Mgr. Anetě Kuchařové, Ph.D. za vedení této diplomové práce, podnětné připomínky, rady, pomoc, odborné zaškolení, ochotu a velkou vstřícnost po celou dobu naší spolupráce. Stejné díky patří také Mgr. Šárce Šachlové, Ph.D. s níž jsem intenzivně konzultovala a diskutovala mnohé aspekty této práce, a která mi vždy ochotně a s velkou dávkou nadšení pomohla. Dále bych ráda poděkovala paní laborantce Marii Fayadové za obětavou pomoc v laboratoři ÚGMNZ, Josefu Letkovi z firmy Diatech s.r.o. za přípravu leštěných nábrusů a Mgr. Martinu Rackovi, Ph.D za pomoc a zaučení na skenovacím elektronovém mikroskopu na ÚPSG. Mé poděkování patří všem osobám zapojeným do výzkumného projektu GAČR č. GAP104/12/0915 s jehož podporou mohla vzniknout také tato práce. Jsem vděčná za podporu Geologické sekce PřF UK a možnost zúčastnit se mezinárodní vědecké konference EGU 2016, kde jsem mohla prezentovat poster zahrnující vybraná data z této diplomové práce. V neposlední řadě bych chtěla poděkovat mým nejbližším, mé rodině, za to, že mi byli velkou podporou a povzbuzením po celou dobu mého studia.

1. ÚVOD

Alkalicko-silikátová reakce (ASR) je škodlivá chemická reakce, která probíhá řadu let až desetiletí, než se její destruktivní působení plně projeví. Ohroženým typem konstrukcí jsou zejména venkovní konstrukce vystavené povětrnostním vlivům jako jsou dálnice, mosty, chodníky, parkoviště a konstrukce ve vlhkém prostředí jako jezy, přehrady a strouhy. Do popředí zájmu odborníků se ASR dostala v roce 1940, kdy Stanton publikoval práci, ve které experimentálně prokázal schopnost amorfních a špatně krystalických forem křemene (např. opál, chalcedon, vulkanické sklo) se v zásaditém prostředí pórových roztoků rozpouštět a reagovat s alkáliemi obsaženými v cementu za vzniku hydrofilních bobtnavých gelů (Stanton 1940). Rozpínavost alkalicko-silikátových gelů způsobuje vznik trhlin, odprýskávání povrchu betonových konstrukcí a především zhoršení až úplnou ztrátu požadovaných fyzikálních vlastností betonu. ASR vzniká při splnění tří podmínek - dostatečná vlhkost, nezbytné množství alkálií a přítomnost reaktivního kameniva. Úroveň poznání se od čtyřicátých let dvacátého století zvýšila, rozšířily se znalosti o vzniku ASR, o mechanizmu způsobujícím poškození betonu a vyvinula se celá řada testovacích metod, které přispívají ke včasnému rozpoznání problematického kameniva, cementu a přísad. ASR je velice komplexní reakce, na kterou má vliv mnoho faktorů vnitřních (kamenivo, cement) i vnějších (teplota, vlhkost, chemické látky), a nadále nejsou plně objasněny všechny souvislosti jejího vzniku a rozvoje (St John et al. 1998, Rajabipour et al. 2015).

Tato diplomová práce si klade za úkol kvantifikovat náchylnost křemenem bohatých typů hornin zahrnujících křemenec, křemennou metadrobu, kvarcit a pegmatitový křemen k ASR pomocí mikroskopických metod a dilatometrických zkoušek. Mezi použité mikroskopické metody patřila optická mikroskopie v polarizovaném světle (OM), skenovací elektronová mikroskopie (SEM) a petrografická analýza obrazu (AO). Náchylnost kameniva k ASR byla kvantitativně stanovena dilatometrickými zkouškami (ASTM C1260 2014, RILEM AAR-4.1 2016). Studované horniny byly komplexně posouzeny z hlediska petrografických parametrů, výsledků dilatometrických zkoušek a podle náchylnosti kameniva k ASR stanovené AO na maltových trámcích. Součástní této práce je ohodnocení samotných dilatometrických zkoušek a jejich schopnosti prokázat reaktivitu či nereaktivitu zkoumaných hornin. Zkoumán je vliv testovacích podmínek: teplota (80 °C, 60 °C), charakter prostředí (1 M roztok NaOH, mlžná komora), délka testovacího období (2 týdny, 20 týdnů) a další parametry (odlišná receptura maltové a betonové směsi, odlišné procedury přípravy těles i jejich měření). Diskutován je i možný vliv těchto parametrů na získané hodnoty expanze.

2. PŘEHLED DOSAVADNÍCH VÝZKUMŮ

2.1 Beton

Beton je v současnosti celosvětově nejužívanějším a nejrozšířenějším kompozitním stavebním materiálem vyrobeným člověkem (Škvára 2003). Popularita betonu vychází ze dvou hlavních aspektů. Prvním aspektem je velká variabilita využití betonových konstrukcí v různorodých stavebních prostředích (přehrady, silnice, mosty, budovy, interiéry). Druhým aspektem je celosvětové rozšíření nezbytných surovinových zdrojů k výrobě cementu a kameniva (Li a Liang 2011). Z petrografického hlediska se beton nejvíce podobá slepenci či brekcii. Představuje heterogenní směs tvořenou kamenivem, cementem, vodou a dalšími přísadami (Škvára 2003).

Základní složkou betonu je pojivo. Funkcí pojiva je obalení úlomků kameniva a jejich tmelení. Po přidání vody se z cementu vytvoří plastická cementová kaše, která smáčí a tmelí úlomky kameniva (Li a Liang 2011). Dochází k chemické reakci, hydrataci slínkových fází a tím k tuhnutí a tvrdnutí cementu. Rychlost tuhnutí a tvrdnutí závisí na mnoha faktorech jako teplota, typ cementu, vodní součinitel či použité přísady. Výběr vhodného pojiva závisí na požadovaných vlastnostech betonu a podmínkách, ve kterých bude konstrukce spočívat. Základní rozdělení pojiv je na pojiva anorganická a organická. Mezi organické druhy pojiv patří např. asfalt (asfaltový beton) či organické polymery (polymerbeton). Anorganická pojiva dělíme na hydraulická, tuhnoucí na vzduchu i ve vodě, a pojiva nehydraulická tuhnoucí pouze za přístupu vzduchu (Škvára 2003). Nejvíce používaným druhem anorganického hydraulického pojiva pro obecné použití je portlandský cement. Portlandský cement se vyrábí pálením surovinových směsí v rotační peci nad mez slinutí 1450 °C. Surovinová směs se skládá z kalcitického vápence, jílovité břidlice, jílovce, křemenného písku, strusky, bauxitu a dalších složek, tak aby bylo dosaženo optimálního poměru hlavních a vedlejších oxidů ve slínku (Škvára 2003). Po výpalu se slínek mele a obohacuje o drcený sádrovec. Vzorové složení portlandského slínku činí 64.67 % CaO, 21.03 % SiO_2, 6.16 % Al_2O_3, 2.58 % Fe_2O_3, 2.62 % MgO, 0.61 % K_2O, 0.4 % Na_2O a 2.03 % SO_3 (Li a Liang 2011). ČSN 197-1 (2012) vymezuje pět skupin cementů podle složení na CEM I - portlandský cement tvořený pouze portlandským slínkem, CEM II - portlandský cement směsný s příměsí 6-35 % popílku, vápence nebo složené (směs popílku, vápence a vysokopecní strusky), CEM III - vysokopecní cement s 36-95 % podílem vysokopecní strusky, CEM IV - pucolánový cement s obsahem až 50 % látek pucolánového charakteru, křemičitého úletu a popílku, CEM V - směsný cement s podílem 18-30 % popílku a 18-30 % vysokopecní strusky.

Další nezbytnou složkou betonu je plnivo (kamenivo), které tvoří tři čtvrtiny objemu betonu a funguje jako vnitřní kostra betonu (Li a Liang 2011). Ideální kamenivo by mělo být po všech stránkách inertní. Reálné kamenivo může tuto podmínku splňovat jen částečně a za určitých okolností. Do betonu se přidává jak hrubé (> 4 mm) tak jemné kamenivo (< 4 mm), těžené (písky, štěrkopísky) i drcené kamenivo (Škvára 2003). Ve zvláštních případech lze užít i kamenivo recyklované nebo synteticky připravené (pěnové syntetické hmoty) či předzpracované (expandované jíly, granulovaná struska) (Li a Liang 2011). Kamenivo můžeme posuzovat z hlediska různých parametrů. Dle objemové hmotnosti dělíme kamenivo na ultra lehké (< 500 kg/m^3), lehké (500-1120 kg/m^3), normální (1520-1680 kg/m^3), těžké (> 2100 kg/m^3). Dle zrnitosti dělíme kamenivo do granulometrických frakcí a v případě přírodních písků hodnotíme zrnitostní vytřídění (dobře vytříděné, se zející zrnitostí, s otevřenou zrnitostí) (Škvára 2003).

Dalším důležitým parametrem je tvar a povrch zrn. Mezi upřednostňované tvary zrn patří sférický, krychlový a nepravidlený, které zvyšují pevnost betonu. Nevhodnými tvary jsou naopak ploché, podlouhlé až tence protažené tvary (Li a Liang 2011). Použití plochých či protažených zrn v betonu vede ke snazšímu poškození konstrukce. Lepší vlastnosti mají zrna ostrohranná s hrubým a členitým povrchem nežli zrna oblá s hladkým povrchem (Li a Liang 2011, Škvára 2003). V České republice se tvar zrn stanovuje dle ČSN EN 933-4 (2008).

Mezi složky betonu řadíme také speciální přísady, které mají za úkol upravit vlastnosti betonu během jeho zpracování či zlepšit jeho finální vlastnosti. Přidávají se přísady redukující množství záměsové vody, urychlující tvrdnutí, prodlužující zpracovatelnost, provzdušňující beton, redukující vliv ASR, zabraňující korozi ocelových výstuží, umožňující tuhnutí betonu v mrazech, či vodovzdorné (Rixom a Mailvaganam 1999, Li a Liang 2011). Stěžejní úlohu při přípravě betonu hraje voda. Díky vodě se z cementu stane zpracovatelná plastická cementová kaše a voda je nezbytná pro řádnou hydrataci slínkových fází. Voda se přidává zhruba v poměru 1:2 voda:cement (Škvára 2003). Obsah vody přidaný do záměsi se řídí vodním součinitelem, který představuje poměr hmotnosti vody ku hmotnosti cementu. Minimální hodnoty vodního součinitele se pohybují v rozmezí 0.36-0.42 a měly by být dostačující pro kompletní hydrataci slínkových fází. Beton s nižším vodním součinitelem má lepší mechanické vlastnosti a vyšší trvanlivost. Použití vyššího vodního součinitele vede k nárůstu kapilární porozity (0.1-10 μm), což způsobuje vyšší propustnost betonu pro kapaliny, snazší korozi, snížení pevnosti a tím nižší životnost betonové konstrukce (Li a Liang 2011).

Většina problémů a poškození betonových konstrukcí má svůj původ v nevhodném návrhu, špatném provedení či neoptimálním stavebním materiálu. Více než 80 % problémů je způsobeno nevhodným návrhem a špatným provedením. Pouze 18 % případů poškození souvisí se stavebním materiálem (Levitt 1997). Dále se omezíme pouze na problémy spjaté s betonem jakožto materiálem a vyloučíme poškození v důsledku neoptimálního řešení či užívání konstrukce (poddimenzování, přetížení, špatná údržba, mimořádné přetížení v podobě požáru, výbuchu, změna využívání či stáří konstrukce). Mezi nepříznivé faktory vnějšího prostředí patří dle Bilčíka a Dohnálka (2003) vystavení konstrukce intenzivnímu působení vody, vlhkosti a mrazu (mrazové cykly). Objemové změny spjaté s fázovými přeměnami vody vedou k narušení až rozpadu struktury betonu. Změny teploty a vlhkosti způsobují nežádoucí objemové změny. Ztráta vlhkosti vede ke smršťování a její nadbytek naopak k bobtnání. K povrchovému porušení či opotřebení betonové konstrukce dochází mechanickou cestou (abraze pevnými částicemi, vodou), ale i v součinnosti s chemickým působením vody, atmosférických plynů i dalších látek. Takto porušený povrch se stává vstupní branou k průniku vody a k hlubšímu poškození konstrukce (Bilčík a Dohnálek 2003).

Významný destruktivní faktor představuje chemická koroze betonu a ocelových výstuží. Pod pojmem chemická koroze se rozumí nezvratné poškození postupující od povrchu konstrukce do její hlubky. Jedná se o chemickou intereakci mezi složkami betonu (cement, pórové roztoky, kamenivo, výstuž) s látkami vnějšího prostředí. Intenzita chemických reakcí je často umocněna zvýšenou teplotou prostředí, vlhkostí, látkovými toky (Bilčík a Dohnálek 2003). Mezi významné škodlivé reakce v betonu patří např. ASR mezi křemenným kamenivem a zásaditými roztoky způsobujícími rozpínání, síranová reakce mezi síranovými ionty v roztoku a sádrovcem či anhydritem v betonu za vzniku krystalů ettringitu (Taylor et al. 2001), alkalicko-karbonátová reakce (ACR) neboli dedolomitizace (Katayama 2004), koroze ocelových výstuží vlivem kyselých roztoků, agresivní působení kyselých, zásaditých a solných roztoků a karbonatace vlivem CO_2 bohatých fluid (St John et al. 1998).

2.2 ASR

2.2.1 Historie

První zdokumentované případy ASR se ve světě objevily ve dvacátých a třicátých letech v Kalifornii v podobě trhlin na různých betonových konstrukcích jen pár let od jejich dokončení. Problému se věnoval Stanton z kalifornského Division of Highways a v roce 1940 experimentálně doložil a opublikoval existenci ASR a její ničivé působení v betonu (Stanton 1940). Touto publikací odstartoval celosvětový výzkum ASR. Velké množství vědců v Americe, Kanadě, Evropě, Asii i Africe se věnovalo této problematice. Bylo nezbytné reakci pochopit, poznat podmínky jejího vzniku, faktory zesilující či zeslabující její působení, podrobně prozkoumat charakter reaktivních hornin, vyvinout spolehlivé a reprodukovatelné typy testovacích metod a v neposlední řadě zanést zjištěné poznatky a varovaní do patřičných technických norem, tak aby se v budoucnosti předešlo znehodnocení betonových konstrukcí (Poole 1992).

V ČR v letech 1995-1999 se na dálnici D11 (Praha-Poděbrady) začaly objevovat trhliny v cementobetonovém krytu vozovky. Nejvíce postižené byly úseky na 28-40 km vystavěné v roce 1989. Dle tehdy platící ČSN 72 1179 nesmělo být použito kamenivo obsahující reaktivní SiO_2, aby nedocházelo ke škodlivým reakcím kameniva s alkáliemi. Avšak při bližším zkoumání jádrových vývrtů byly nalezeny partie jemnozrnných křemenných hmot, velké množství geologických alterací kameniva (karbonatizace, silicifikace, chloritizace, sericitizace) a také gelové a ettringitové útvary. Zdrojovou oblastí použitého kameniva bylo jv. křídlo svrchního proterozoika Barrandienu. Horniny použité jako kamenivo (břidlice, prachovce, tufy, vulkanity) byly postiženy sérií alterací, obsahovaly partie mikrokrystalických křemenných hmot, což vedlo ke značné nehomogenitě a potenciální reaktivnosti, která se následně destruktivním způsobem projevila na stavu dálnice D11 (Pertold et al. 2002). V dalších letech byla ASR identifikována na řadě dalších konstrukcí v České republice (dálnice, mosty, přehrada Vrané nad Vltavou, letiště Praha-Ruzyně) (např. Škarková 2000, Pertold et al. 2014, Šachlová et al. 2014).

2.2.2 Škodlivé alkalické reakce

ASR spadá do větší skupiny škodlivých reakcí kameniva s alkáliemi (alkali-aggregate reaction, AAR). Do této skupiny patří také ACR, která se často vyskytuje spolu s ASR (St John et al. 1998). Jedná se o expanzivní reakci mezi alkáliemi z cementového pojiva a nečistými dolomitickými vápenci. Dolomitický vápenec může obsahovat vedle dolomitu i jemnozrnnou kalcitovou matrix s roztroušeným křemenem a jílovými minerály jako illit, smíšené struktury a chlorit. Zásadité pórové roztoky reagují s dolomitem a dochází k jeho dedolomitizaci, tedy přeměně dolomitu ($CaMg(CO_3)_2$) na brucit ($Mg(OH)_2$) a kalcit ($CaCO_3$) (Katayama 2004). Tato přeměna nezpůsobuje expanzi, ale otevírá strukturu horniny, která se stává porézněji a propustnější pro průnik zásaditých roztoků k jílovito-křemičitým partiím. Jílové minerály nejsou za těchto podmínek stabilní a dochází k jejich expanzi (López-Buendía et al. 2006) a k částečnému rozpouštění jemnozrnných křemenných partií. Vznik alkalicko-silikátových gelů není ojedinělý. Zásadité prostředí způsobuje postupné rozpouštění kalcitu a $Ca(OH)_2$ za vzniku fáze $2CaCO_3 \cdot Ca(OH)_2 \cdot 1{,}5 \cdot H_2O$, jejíž krystalizační tlaky způsobují porušení struktury betonu v podobě trhlin (Monteiro a Mehta 1986). Grattan-Bellew et al. (2010) zjistili, že v horninách porušených ACR se mohou vyskytnout gely, jejichž složení se liší od alkalicko-silikátových gelů, jež obsahují K^+, Na^+, Ca^{2+}. Gely vznikající během ACR obsahují Ca^{2+}, Mg^{2+} a Al^{3+}.

Dále potvrdili vliv mikrokrystalického křemene na expanzivní chování. Se vzrůstajícím množstvím reaktivního křemene roste expanze experimentálních těles s nečistými dolomitickými vápenci. Z čehož vyvozují, že ACR je typ ASR.

ASR probíhá řadu let až desetiletí. Poškození způsobené ASR se tak může projevit až za 5-20 let po dokončení stavby. Na povrchu konstrukce se ASR projevuje hustou sítí všesměrných trhlin. Bezprostřední okolí trhlin je často tmavě zbarvené s tmavě šedými lemy. Na povrchu se tvoří tmavé skvrny a můžeme nalézt čiré až mléčné gelovité výpotky a gelem impregnované praskliny. Zvyšování vnitřních tlaků vlivem expanze alkalicko-silikátových gelů vede na povrchu konstrukce k uvolňování částí betonu či odprýskávání kameniva ("pop-out") (Bilčík a Dohnálek 2003, Škvára 2003). Špatný stav konstrukcí vlivem ASR nemívá náhlé katastrofické vyvrcholení. V průběhu času jsou v závislosti na typu konstrukce a rozsahu poškození podniknuty kroky k opravě či nápravě škody v horším případě se musí přistoupit k demolici. Je-li to možné, vymění se postižený prvek konstrukce za nový, povrch betonu se opatří separační vrstvou, aby nedocházelo k pronikání vlhkosti či alkálií do hlubších partií betonu, případně se porušený prvek může obstavit novou konstrukcí (St John et al. 1998).

2.2.3 Mechanizmus vzniku ASR

ASR je škodlivá chemická reakce mezi kamenivem a alkalickými pórovými roztoky. K reakci dochází, pakliže jsou splněny tři nezbytné podmínky: 1) V betonu je přítomno kamenivo obsahující reaktivní formy SiO_2. 2) Dostatečná vlhkost prostředí (relativní vlhkost betonu minimálně 85 %). 3) Dostatečné množství alkálií. Postačí, aby nebyla splněna jedna z těchto podmínek a k reakci nedojde. V opačném případě se reakce rozvine a není možné ji zcela zastavit. Pakliže se podmínky prostředí změní, vlhkost v konstrukci klesne, může se reakce dočasně zastavit. Při obnově klíčových podmínek se reakce opětovně rozvine (St John et al. 1998). K poškození betonových konstrukcí dochází následujícím mechanismem. Zásadité pórové roztoky o vysokém pH (> 13) atakují povrch SiO_2-fází a dochází k jejich rozpouštění za vzniku hydrofilního gelu. Absorbcí vody dochází ke zvětšování objemu gelů. Bobtnací tlaky způsobují tvorbu mikrotrhlin v cementovém pojivu a kamenivu. Trhliny a pórové prostory se zaplňují bobtnajícími gely a rozšiřují se, vzniká síť makrotrhlin na povrchu konstrukce (Poole 1992).

Průběh ASR můžeme rozdělit do 3 stádií (Glasser 1992). V prvním stádiu pórové roztoky o vysokém pH reagují s povrchem křemene (vazby Si-O) za vzniku silanolových skupin podle rovnice (1). Běžné pH portlandského cementu se pohybuje v rozmezí 12.5-13 a představuje tedy příhodné prostředí pro vznik reakce (Behnood et al. 2016).

$$Si\text{-}O\text{-}Si + H_2O \rightarrow Si\text{-}OH...OH\text{-}Si \qquad (1)$$

Ke tvorbě silanolových skupin dochází nejen na povrchu kameniva, ale také v jeho vnitřním prostoru. Vysoce zásaditý roztok o vysoké iontové síle dokáže pomocí volných hydroxylových iontů rozštípnout a ionizovat vnitřní Si-O-Si vazby. Schopnost pronikání hydroxylových iontů do vnitřních struktur kameniva je snížena přítomností hydratovaných kationtů v sestupném pořadí $K^+ > Na^+ > Li^+$ a $Ca^{2+} > Ba^{2+}$ (Chatterji 2005).

Ve druhém stádiu reagují silanolové skupiny s volnými hydroxylovými ionty za vzniku siloxanových skupin a uvolnění vody podle rovnice (2). Záporně nabitý povrch křemene je kompenzován kladně

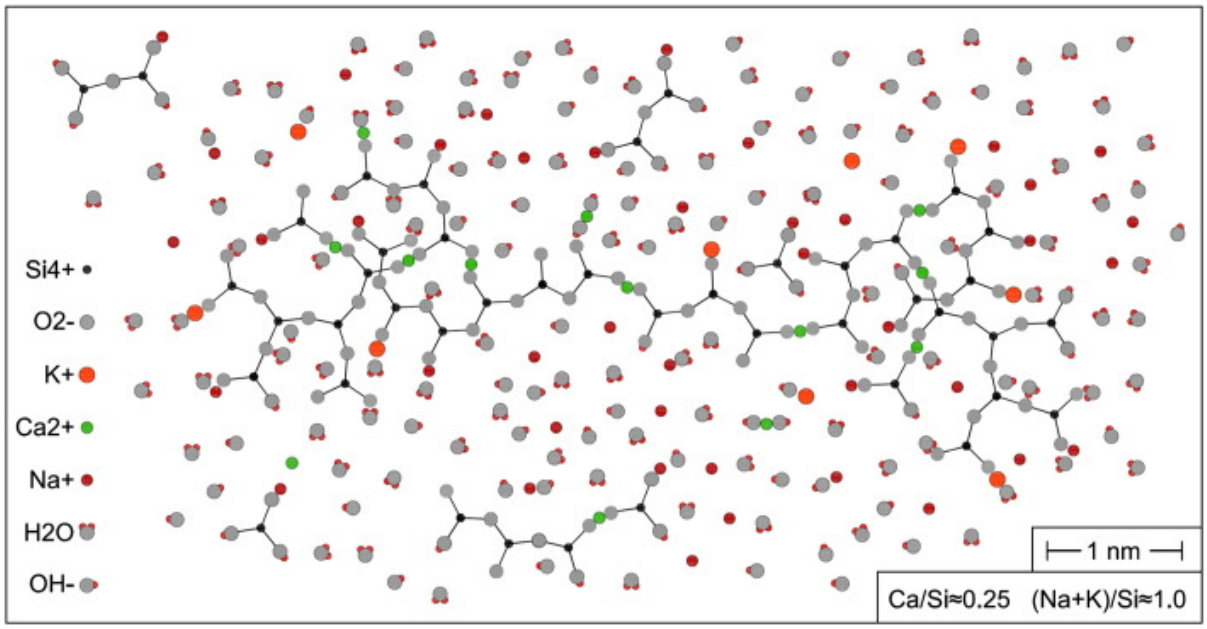
nabitými ionty Na^+, K^+, Ca^{2+} za tvorby elektronové dvouvrstvy a gelu, tak aby došlo k vyrovnání náboje (Glasser 1992). Záporné napětí na povrchu křemene způsobuje preferenční migraci dvoumocných kationtů Ca^{2+} a Ba^{2+}. Obsazení elektronové dvouvrstvy kationty Ca^{2+} a Ba^{2+} může vést ke změně náboje na pozitivní. Změny v hodnotě náboje mohou vést ke snížení rychlosti ASR a zároveň vysvětlují vysoký obsah CaO v reakčních produktech (gelech) (Chatterji 2005).

$$Si\text{-}OH + OH^- \rightarrow Si\text{-}O\text{-} + H_2O \qquad (2)$$

Rozštěpené a hydroxylované vnitřní vazby vytváří přístupovou cestu pro průnik dalších hydroxylových iontů a uvolňování Si^{4+}. Rozpouštění a uvolňování Si^{4+} z jeho původních minerálních vazeb je řízeno koncentrací hydroxylových iontů, tedy hodnotou pH. Při vyšších hodnotách pH je rozpouštění Si-O vazeb intenzivnější a uvolněné Si^{4+} má schopnost difundovat do okolí. Uvolňování Si^{4+} je kontrolováno koncentací volných Ca^{2+} kationtů v roztoku. Při vyšší koncentraci Ca^{2+} je snížena koncentrace OH^- iontů a tím i pH. Rozpouštění i uvolňování Si^{4+} je sníženo (Chatterji 2005). Ve třetím stádiu dochází k propagaci siloxanových skupin a narušování dosud nedotčených Si-O-Si vazeb podle rovnice (3) (Glasser 1992).

$$Si\text{-}O\text{-}Si + 2OH^- \rightarrow Si\text{-}O\text{-} + Si\text{-}O\text{-} + H_2O \qquad (3)$$

Alkalicko-silikátové gely mají silně variabilní složení (Ca^{2+}, Na^+, K^+, Si^{4+}), můžeme jej vyjádřit jako $(SiO_2)\cdot(Na_2O)n\cdot(K_2O)k\cdot(CaO)c\cdot(H_2O)x$ nebo také jako N-C-S-H, kde $N=Na_2O$, K_2O, $C=CaO$, $S=SiO_2$ a $H=H_2O$. Substitucí za Ca se může ve složení objevit menší množství Mg. Průměrné složení gelů v reálných konstrukcích se pohybuje v rozmezí (Na+K)/Si = 0.1-1.2 a (Ca+Mg)/Si = 0.0-0.2 (molární poměr) (Hou et al. 2005). Schématické znázornění alkalicko-silikátového gelu je popsáno na Obr. 1.



Obr. 1. Schematické znároznění alkalicko-silikátového gelu (Vayghan et al. 2016).

Morfologie a složení gelů se mění v závislosti na jejich stáří. Šachlová et al. (2010) ve svém výzkumu analyzovali chemické složení gelů a jejich morfologii ve vzorcích odebraných ze 14-ti mostních

konstrukcí rozličného stáří (10-80 let). V konstrukcích starších 50 let se nacházely gely vykrystalizované a i přes jejich proměnlivé složení byl patrný vyšší obsah CaO oproti gelům mladším, které mají nižší obsah CaO a vyznačují se amorfní strukturou. S postupujícím časem se mění chemické složení gelů, klesá obsah Na^+ a K^+ a stoupá obsah Ca^{2+}.

Taktéž se mění fyzikální a mechanické vlastnosti gelů. S rostoucím časem stoupá viskozita i mechanická odolnost gelů a naopak klesá absorbce vody i objemové změny. Ze strukturního hlediska má gel nejprve nízkou viskozitu, která se zvyšuje. Později gel krystalizuje a může se přeměnit na C-S-H fáze (Urhan 1987). Gely různého složení mají značně odlišné fyzikální vlastnosti jako je bobtnavost. Alkalicko-silikátové gely mohou zvětšit svůj objem o 0.5-81 % (Vayghan et al. 2016). Dle složení můžeme rozlišit gely škodlivé silně expandující a gely se slabou či žádnou expanzí. Gely s nízkým obsahem Ca^{2+} a vysokým obsahem alkálií (Na^+, K^+) se chovají jako proudící kapalina. Snadno pronikají pórovou strukturou cementové pasty bez způsobení škod. Největší napětí způsobují gely s nízkým poměrem Ca/Si a nízkým Na/Si. Druhým typem gelů produkujícím velká napětí jsou gely s mírně zvýšeným poměrem Ca/Si a vysokým Na/Si (Vayghan et al. 2016). Garcia-Diaz et al. (2006) popsali tři etapy vývoje alkalicko-silikátových gelů. První etapa je latentní tedy spící stádium, během kterého dochází k rozpouštění SiO_2-fází, narušování původních vazeb, uvolňování Si^{4+} do roztoku a tvorbě C-S-H, C-K-S-H a C-N-S-H gelů (zde K=K_2O, N=Na_2O). Během první etapy nedochází k expanzi. Druhá etapa je stádium bobtnání, během kterého ustává uvolňování Si^{4+} z kameniva a probíhá absorbce vody. Tato expanze způsobuje vznik mikrotrhlin v cementové pastě i kamenivu. Třetí etapa je stádium zacelení, zhojení. V tomto stádiu dochází k opětovnému uvolňování Si^{4+} a k nové tvorbě bobtnajících gelů, avšak gely zaplňují již vzniklé prostory trhlin a expanze ustává, přestože tvorba gelů pokračuje (Garcia-Diaz et al. 2006).

2.3 Faktory ovlivňující ASR

Existuje velké množství faktorů, které mají vliv na průběh ASR. Faktory můžeme rozdělit na dvě skupiny. První skupina zahrnuje parametry prostředí (teplota, vlhkost, klimatické jevy) (Fournier et al. 2009) cementu a druhá skupina se zaměřuje na vlastnosti použitého kameniva (mineralogie, strukturní defekty, velikost zrn, pessimum effekt) (St John et al. 1998, Zhang et al. 1999, Ichikawa 2009).

2.3.1 Faktory okolního prostředí

Vnitřním zdrojem alkálií pro ASR je především cement. Je-li obsah alkálií menší než 0.6 % Na_2O ekv. k reakci nedochází (Li a Liang 2011). Je tedy vhodné užít cement s nízkým obsahem alkálií. Dalším potenciálním zrojem alkálií jsou přísady do betonu v podobě plastifikátorů či drcené vysokopecní strusky (např. CEM III, V). K externím zdrojům alkálií patří mořská voda, mořský sprej či posypové soli a protimrznoucí přípravky (Giebson et al. 2010), jejichž vliv je ve většině případů menší než vliv alkálií v cementu.

Kritickým faktorem pro vznik a rozvoj reakce je vlhkost. V ohrožení jsou především stavby vodohospodářské (jezy, přehrady, splavy, mola) či stavby vystavené povětrnostním vlivům (silnice, přistávací dráhy, chodníky, mosty), ale také návětrné strany budov, špatně odizolované základy či betonové trubky. Opakovaná kondenzace vody na porvchu konstrukce je problémem především u horizontálně uložených konstrukcí (dálnice, chodníky). Stálé působení a fluktuace klimatu může mít na průběh ASR zesilující vliv. Znám je také zhoršující vliv mrazových cyklů, při kterých dochází ke

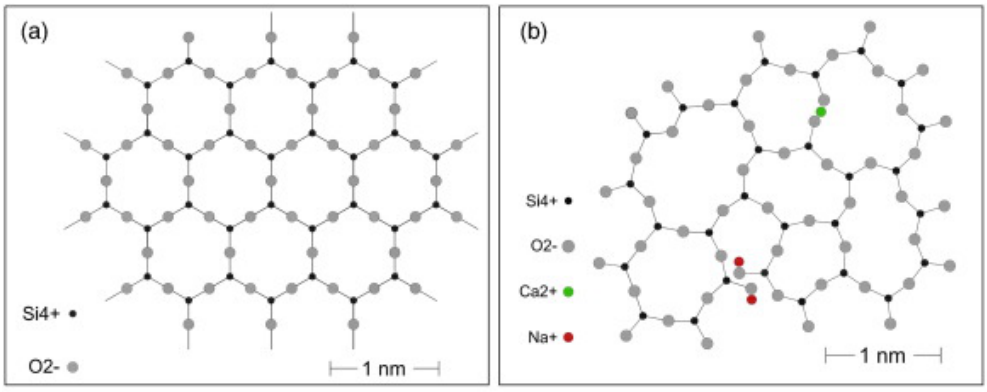
tvorbě trhlin, které usnadňují průsak vody do konstrukce (St John et al. 1998, Bilčík a Dohnálek 2003).

Tak jako u většiny chemických reakcí je i ASR silně ovlivněna teplotou. Za vyšších teplot probíhá reakce intenzivněji a proto se v teplých podmínkách projeví dříve. V terénním pokusu Fournier et al. (2009) vystavili zkušební betonová tělesa povětrnostním vlivům na dvou geograficky vzdálených místech, v chladnější Ottawě a v teplejším Austinu na severoamerickém kontinentu. V teplejším prostředí se ASR projevila 4-5 krát rychleji než v prostředí chladném. Avšak dlouhotrvající expanze způsobená ASR je větší při nižších teplotách nežli při vysokých. Vyšší teploty reakci snáze vybudí, ale nedosáhnou tak vysokých hodnot expanze jako při teplotách nižších (Chatterji 2005).

2.3.2 Kamenivo

Některé horniny jako např. andezit mohou obsahovat Na^+ a K^+, které se během ASR uvolňují a zesilují její průběh (Chatterji 2005). Při pH > 13 dochází k uvolňování alkálií z minerálů v kamenivu. Nejvíce alkálií se uvolní z těchto minerálů v sestupném pořadí dawsonit > leucit > hydratovaný analcim > paragonit > muskovit > jadeit > Na-plagioklas > K-živec (Wang et al. 2008). Schopnost K-živců a plagioklasů uvolňovat Na_2O, K_2O, SiO_2 i Al_2O_3 v prostředí pórových roztoků potvrdili Locati et al. (2010a). Přítomnost živců, plagioklasů a slíd tak může přispívat k rozvoji ASR.

Nejvýznamnějším faktorem nezbytným pro vznik ASR je přítomnost reaktivního kameniva. V kontextu ASR jsou za reaktivní považovány horniny s obsahem amorfního, kryptokrystalického či silně deformovaného SiO_2. Mezi reaktivní formy SiO_2 patří opál, chalcedon, cristobalit, tridimit, sklo. Reaktivnost těchto fází je dána především jejich dobrou rozpustností při vysokém pH. Směrem k pH 8.5 se mírně zvyšuje rozpustnost SiO_2 a od pH 9 prudce roste. Rozpustnost SiO_2 vrcholí při pH 13, tedy hodnotách běžných pro prostření betonu (Dove 1995). Špatně krystalické amorfní formy SiO_2 se rozpouštějí snáze než dobře krystalované variety (Dent Glasser a Kataoka 1981). Rozpustnost amorfního SiO_2 ve vodném roztoku je při totožném pH o řád vyšší než rozpustnost krystalického SiO_2. Špatně krystalická, neuspořádaná struktura amorfního SiO_2 je snáze napadána hydroxylovými ionty a obsahuje větší množství míst se slabými vazbami. Během tvorby silanolových a posléze siloxanových skupin se struktura amorfního SiO_2 postupně rozpadá a obnažuje další pozice pro vazbu hydroxylových iontů, jak ukazuje Obr. 2.



Obr. 2. Rozdílná struktura forem SiO_2: (a) dobře krystalická struktura křemene; (b) struktura amorfního SiO_2 atakovaná alkáliemi (Ca^{2+}, Na^+) (Rajabipour et al. 2015, upraveno).

Rozpustnost krystalových modifikací SiO_2 stoupá v řadě křemen - cristobalit - tridimit - amorfní SiO_2 (Dove a Rimstidt 1994). Dalšími faktory ovlivňujícími rozpustnost SiO_2 je teplota a specifický měrný povrch fází. Čím větší je velikost měrného povrchu, tím rychlejší je rozpouštění. Vysoký specifický měrný povrch se váže k částicím o malém poloměru, tedy s látkami jemnozrnnými. Přítomnost dalších iontů v roztoku může významně ovlivnit rozpouštění SiO_2. Experimenty provedené Bennetem (1991) při teplotách 25-70 °C ukázaly, že rozpustnost SiO_2 se zvýšila až 8 krát za přítomnosti NaCl a KCl. Zesilující účinek na rozpustnost klesá v řadě NaCl ~ KCl > LiCl > MgCl. Inhibiční účinek na rozpustnost SiO_2 projevují ionty Al^{3+}, Fe^{3+}, Zn^{2+}, Cu^{2+}, Be^{2+} a Ga^{3+} (Dove a Rimstidt 1994). Bickmore et al. (2006) provedl sérii loužících experimentů a dokázal schopnost $Al(OH)_4^-$ iontů výrazně snížit až zastavit rozpouštění amorfního SiO_2 při pH=13. Inhibiční účinek iontů Al^{3+} uvolňujících se ze slíd a dalších fylosilikátů v drobách popisuje Hünger (2007). Ionty Al^{3+} se váží s uvolněným Si^{4+} na povrchu křemene či v jeho trhlinách. Alkalicko-silikátové gely vznikají pouze z nezachyceného volného Si. Ideální chemické složení křemene je čisté SiO_2. V přírodních podmínkách je běžná malá míra substituce Si^{4+} za Al^{3+} doplněná o Li^+ nebo Na^+, tak aby bylo dosaženo elektroneutrality. Barevné variety křemene jako záhněda, růženín či ametyst jsou obohaceny o příměs Fe^{3+}, Mn^{2+} a Ti^{2+}. Další formou chemických heterogenit jsou pevné minerální či plynokapalné inkluze. Stopové množství Al v křemeni odráží Al-saturované prostření jeho vzniku a může sloužit jako geotermometr (Deer et al. 1992). Heterogenity a příměsi v křemeni mohou ovlivňovat jeho rozpustnost.

Mezi reaktivní typy hornin dle TP 137 (2015), které jsou nevhodným kamenivem do betonu, patří horniny obsahující amorfní SiO_2 a mikrokrystalický křemen jako je pazourek, buližník, droba, arkóza. U těchto sedimentárních hornin jsou reaktivní složkou jemnozrnné křemenné a opálové hmoty a křemité tmely. Postačí 1-2 % opálového materiálu v hornině, aby došlo k ASR (Stanton et al. 1942). Problematické jsou také horniny obsahující vulkanické sklo (ryolit, andezit, obsidián), vulkanické produkty (pemza, kyselý tuf), ale i průmyslové skelné hmoty jako je skelná vlna. Při použití reaktivního kameniva jako je pemza do lehkých betonů může dojít k rozvinutí ASR a tvorbě gelů. Ovšem díky extrémně pórovité struktuře pemzy nedochází ke vzniku trhlin v cementové pastě a kamenivu. Gely zaplňují pórový prostor kameniva a nedochází k ničivému rozpínání (St John et al. 1998). Významné expanzivní chování vykazují také metamorfované horniny jako kvarcity, mylonity, fylity, metadroby. Zdrojem reaktivnosti je v tomto případě deformační postižení křemenných zrn či rekrystalizace za tvorby drobných zrnek rekrystalovaného křemene. Hlavními mechanizmy dynamické rekrystalizace při nichž vznikají jemnozrnné reaktivní partie či agragáty jsou "bulging", rotace subzrn či migrace hranic zrn. Tyto deformační projevy jsou vázány na teplotně-tlakové podmínky a rychlost deformace (Blenkinsop 2000, Passchier a Trouw 2005). V případě mylonitických hornin představují reaktivní složku jemnozrnné domény, silně deformačně postižená zrna a vývoj subzrn křemene. Reaktivita křemenem bohatých mylonitů je až o 30 % vyšší nežli u stejné nemylonitizované variety (Locati et al. 2010b). Za kamenivo nereaktivní se považují především bazické vulkanické a plutonické horniny jako bazalt, gabro, ale také granit či granodiorit. Z metamorfovaných hornin se jeví nereaktivně granulit, amfibolit, serpentinit (TP 137 2015). Avšak i v případě hornin typu granitoidů není zcela vyloučena možnost reaktivního chování. Fernandes et al. (2007) zmapovali případ portugalské hráze Alto Rabagão postavené v letech 1960, na které se začaly objevovat známky poškození, trhliny, gelovité výpotky a "pop-outs" (vlivem pnutí oddělené kousky betonu na povrchu konstrukce). Jako kamenivo byl použit granit, který obsahoval mikrokrystalický a deformovaný undulózně zhášející křemen, který způsobil rozvoj ASR.

Vliv granulometrie použitého kameniva na ASR popsali Zhang et al. (1999) i Multon et al. (2010). Z jejich výzkumů shodně vyplývá, že hrubé reaktivní kamenivo vykazuje v počátečním stádiu menší expanzi než reaktivní jemné kamenivo. Avšak za delší časové údobí je expanze způsobená hrubým kamenivem větší než expanze jemného kameniva. Pro frakci kameniva pod 80 μm nebyla expanze naměřena, zatímco frakce 0.63-1.25 mm vykazovala expanzi 0.33 % (Multon et al. 2010). Lu et al. (2006) při srovnání několika dilatometrických zkoušek dospěli k poznání, že frakce 0.15-0.80 mm není významně citlivá k ASR. Naopak frakce 1.25-2.50 mm projevovala významnou expanzi během prvních 10 dnů testování.

Významný jev, který ovlivňuje vývoj ASR v betonu je tzv. "pessimum effect" či "pessimum ratio". Pessimum je opakem optima, představuje tedy nejméně příznivé okolnosti jež mohou nastat. Pessimum efekt se projevuje např. u zastoupení reaktivního kameniva v poměru k nereaktivnímu ve směsi. Existuje několik možných trendů např. trend lineární, při kterém roste expanze spolu se zastoupením reaktivního kameniva. Avšak tento trend není standardní. Častějším případem je, že větší zastoupení reaktivního kameniva ve směsi s nereaktivním může vést paradoxně k menšímu poškození nežli směs s menším množstvím reaktivního kameniva ku nereaktivnímu, které může způsobit větší poškození (Ichikawa 2009, Binal 2015).

ASR ovlivňuje široká řada faktorů a pouze některé jsme schopni správným plánováním a řádným provedením v součastnosti ovlivnit. Průzkumu ASR se věnuje a věnovalo velké množství vědeckých kapacit a poznání ASR se rozšiřuje, ale stále není konečné. Téměř všechny státy světa, které používají beton ke stavebním účelům již získaly cenné zkušenosti s touto reakcí a ve svém vlastním zájmu zavedly různá preventivní opatření ke včasnému odhalení problematického kameniva, cementu a podchycení dalších negativních vlivů. ASR většinou nekončí dramatickou destrukcí stavby, ale i zde existují jisté výjimky. Jako případ lze uvést kolaps betonového potrubí jak jej popsal Haavik a Mielenz (1991). Jednalo se o 2 roky staré průmyslové betonové potrubí, které odvádělo koncentrované kyselé, zásadité, síranové a fosfátové roztoky o vysoké teplotě (cca 80 °C) do skladovací nádrže. Agresivní roztoky intenzivně působily a korodovaly betonový materiál potrubí. Na potrubí v ústí nádrže se objevilo velké množství podlouhlých trhlin a došlo k rozpadu a zhroucení potrubí. Pozdější petrografické zkoumání ukázalo, že jako kamenivo byl použit kvarcit, chalcedonický rohovec a ryolit. Odhaduje se, že rozsah poškození betonu by odpovídal konstrukci staré 30 let nikoli 2 roky. Za extrémně rychlým rozvojem ASR stála nešťastná kombinace několika faktorů - reaktivní kamenivo, vysoká teplota a chemicky agresivní prostředí.

2.4 Metody testování kameniva

Aby se předešlo použití nevhodného reaktivního kameniva do betonu, bylo vyvinuto velké množství testovacích metod. Testovací metody musí být spolehlivé, vycházet z poznatků z reálného pozorování a jejich výsledky s ním budou v souladu. Testovací metody musí být dostatečně zrychlené, aby mohly být v praxi použitelné a mezinárodně uznávané (Nixon a Sims 2016). Na testovací metody je kladeno mnoho požadavků a ne vždy je možné je všechny splnit. V první řadě se jedná o pořadavek na co nejkratší trvání testu, nejrychlejší dosažení výsledků. ASR probíhá mnoho let (5-20 let) a je třeba ji simulovat v laboratorních podmínkách a její rozvoj tak mnohonásobně urychlit. Tohoto zrychlení se dosahuje použitím vysokých teplot (38-80 °C), agresivním prostředím (např. roztok NaOH) či jejich kombinací. Dalším požadavkem kladeným na testovací metody je stanovení striktních limitů pro odlišení reaktivního a nereaktivního kameniva, bez ohledu na možný rozvoj dlouhodobé expanze či

pessimum efekt. U pomalu reagujícího kameniva je zpočátku expanze nižší, ale za delší časový úsek předčí i kamenivo od počátku silně reaktivní a s vysokou expanzí (Chatterji 2005). Pro dosažení realistického ohodnocení určitého kameniva, není vhodné spoléhat se pouze na výsledky jedné metody. Pro komplexní poznání reaktivního chování konkrétního kameniva je nezbytné využít více metod a jejich modifikací. Existuje řada testů jak laboratorních, tak terénních i kombinovaných. Laboratorní testovací metody nemohou nikdy plně nasimulovat proměnlivé venkovní prostředí. Vždy se jedná o určitý kompromis mezi urychlením ASR a podmínkami v reálném prostředí (Levitt 1997). Testovací metody pro identifikaci potenciálně reaktivního kameniva můžeme rozdělit do tří hlavních skupin na metody petrografické, chemické a dilatometrické.

2.4.1 Petrografické metody

Petrografické metody slouží k popisu kameniva (drceného i těženého), jeho minerálního složení, porozity, velikosti zrn, alterací a k identifikaci a kvantifikaci reaktivních či potenciálně reaktivních fází. Petrografický popis kameniva je nezbytným prvním krokem k ohodnocení jeho potenciální reaktivity. Mezi petrografické metody patří OM v polarizovaném světle příp. doplněná o rentgenovou difrakci, infračervenou spektrometrii, katodovou luminiscenci, SEM kombinovanou s energiově disperzním spektrometrem (SEM/EDS) či AO. Příkladem propracované a standardizované petrografické metody je ASTM C295 (2012) nebo RILEM AAR-1.1 (Nixon a Sims 2016), která zahrnuje jak makroskopický tak mikroskopický popis a rozděluje kamenivo do tří skupin na pravděpodobně nereaktivní (Třída I), potenciálně reaktivní (Třída II) a pravděpodobně reaktivní (Třída III). Pro potvrzení získaných informací je užitečné doplnit petrografickou analýzu o některou z dilatometrických zkoušek (Modrý 2003a). Pro zpřesnění petrografické analýzy je vhodné podrobit zkoumání větší množství vzorků. Jeden vzorek není dostatečně reprazentativní pro charakterizaci kameniva.

2.4.2 Chemické metody

Chemické metody představují rychlé testovací procedury vhodné v případě, že není možné provést některou ze standardních dilatometrických zkoušek. Obecně lze říci, že chemické zkoušky nejsou zcela univerzální co se týče testovaného kameniva. Pro některé typy kameniva jsou tyto zkoušky vhodné pro jiné méně či dokonce zcela nepoužitelné (Swamy 1992). Mezi nejrozšířenější chemické zkoušky patří ASTM C289 (2007). Tato zkouška se provádí na drceném kamenivu o velikosti zrna 150-300 μm. Nadrcené kamenivo je uloženo do roztoku 1M NaOH o teplotě 80 °C po dobu 24 hodin. NaOH rozpouští křemité partie vzorku za uvolnění SiO_2 do roztoku. Předpokládá se, že uvolněné SiO_2 pochází z partií náchylných k ASR. Po 24 hodinách je roztok zfiltrován a je stanoveno množství rozpuštěného SiO_2 a obsah hydroxylových iontů, který je v důsledku reakce snížený. Na základě těchto hodnod je kamenivo zařazeno do jedné ze tří kategorií (nezávadné, potenciálně škodlivé, škodlivé). Zkouška ASTM C289 (2007) není vhodná pro horniny s obsahem karbonátů, minerálů obsahujících Fe^{2+}, Mg-silikátů (např. antigorit) jako je serpentinit (ASTM C289 2007). Na stejném principu je založena česká normovaná chemická metoda ČSN 721179 Stanovení reaktivnosti kameniva s alkáliemi. Dalším příkladem je britský Gel pat test, metoda na pomezí chemické a petrografické zkoušky. Při této metodě se vytvářejí hrudky nebo "koláčky" ze směsi kameniva o granulometrii 1.18-5 mm a 2.36-5 mm a cementu. Vytvořená hrudka nebo "koláček" se ponechá působení roztoku NaOH a KOH při teplotě 20 °C po dobu 14-28 dní. Průběžně se hrudka kontroluje zda se neobjevují alkalicko-silikátové gely na povrchu a na kontaktu kameniva a cementu (Modrý

2003b). Touto zkouškou je možné detekovat jemně rozptýlený reaktivní křemen, který je problematicky postřehnutelný v optickém mikroskopu. Přítomnost kryptokrystalického křemene či opálových hmot se projeví do 14 dnů ve formě viditelných gelů. Délka testu může být prodloužena v případě pomalu reagujícího kameniva na 28 dní. Tato verze zkoušky není vhodná k identifikaci méně reaktivních fází a povrch cementové hrudky neposkytuje dostatečný prostor pro volnou tvorbu a rozšiřování ASR gelů. Tyto nedostatky zohlednili Lanza a Alaejos (2012) a upravili tuto metodu, tak aby odhalila také další reaktivní fáze již za 3 dny. Zvýšili teplotu z 20 °C na 80 °C, aby urychlili rozvoj reakce a dále monifikovali tvar cementové hrudky, tak aby obsahovala větší póry, které mohou být osídleny případnými gely. Takto upravený Gel pat test je rychlejší a lépe identifikuje rychle i pomalu reagující fáze. Při mikroskopickém pozorování preparátu z cementové hrudky je možné sledovat vztah mezi reaktivitou kameniva a formami, ve kterých se gely vyskytují, např. v rychle reagujícím kamenivu se tvoří masivní ložiska rozptýlená po povrchu zrna a gely z pomalu reagujícího kameniva tvoří lineární útvary tence lemující zrna a vyplňující jejich vnitřní trhliny. Kromě ASTM C289 (2007) a Gel pat testu existuje velké množství různorodých chemických zkoušek často lokálního charakteru jako je Osmotický test (Osmotic cell test, USA) či Chemická smršťovací metoda (Chemical shrinkage method, Dánsko) (Swamy 1992).

2.4.3 Dilatometrické metody

Spolu s petrografickou analýzou představují dilatometrické metody stěžejní způsob testování reaktivity kameniva k ASR. Na rozdíl od metod chemických či petrografické analýzy jsou dilatometrické zkoušky založeny na chování kameniva v betonu či maltě, tedy v prostředí znatelně bližšímu realitě. Základem těchto zkoušek je vytvoření zkušebního tělesa ze směsi testovaného kameniva a cementu, nejčastěji ve formě kvádru v závislosti na konkrétní metodice. Po zatvrdutí tělesa se změří jeho délka, která poslouží jako počáteční hodnota pro další srovnávací měření. Testovací těleso se uloží do kontrolovaného prostředí (mlžná komora, vodní lázeň, lázeň NaOH) o přesně dané teplotě, vlhkosti a dalších parametrech. Výběr prostředí a teploty je důležitý, jeho cílem je urychlení rozvoje ASR v betonovém tělese. V průběhu testu se zkušební těleso pravidelně přeměřuje. Získané hodnoty se porovnají s počáteční délkou tělesa a vypočítá se délkový přírůstek v procentech. Prodlužování tělesa je způsobené tvorbou alkalicko-silikátových gelů, které ve vlhkém prostředí bobtají, tak dochází k expanzi tělesa a prodloužení jeho délky. Změna parametrů zkoušky jako je tvar tělesa, granulometrie kameniva, typ cementu, použití přísad, ale především volba testovacího prostředí, jeho teplota, vlhkost, délka testování odlišuje od sebe různé testovací procedury. Dilatometrických zkoušek existuje velké množství. Mezinárodní dilatometrické zkoušky jsou často výchozím materiálem pro řadu lokálních zkoušek. Úprava zkoušek podléhá potřebám konkrétního státu, jeho zkušenostem s ASR i místní inženýrské tradici.

Mezi celosvětově rozšířené zkoušky patří zkouška ASTM C1260 (2014), která je velice oblíbená pro svou rychlost a jasná hodnotící kritéria. Jedná se o urychlenou trámečkovou zkoušku, při které jsou zkušební maltová tělesa (velikost 25 x 25 x 285 mm) ponořena do lázně 1M NaOH o teplotě 80 °C. Celá procedura trvá 16 dní. Obdobnou zkouškou je zkouška RILEM AAR-2.1 (Nixon a Sims 2016). Kritickým bodem obou zkoušek jsou drastické zkušební podmínky, ve kterých vykazuje reaktivitu i kamenivo, u kterého nebyla v reálných konstrukcích prokázána. Z tohoto důvodu Shon et al. (2002) modifikovali parametry zkoušky jako vodní součinitel, typ cementu (s nízkým i vysokým obsahem alkálií), molární koncentrace NaOH roztoku v lázni, teplota lázně (snížení na 23 °C) a prodloužili testovací období na 28 dní. Expanze potenciálně reaktivního kameniva dosažená po 14 dnech v 1M

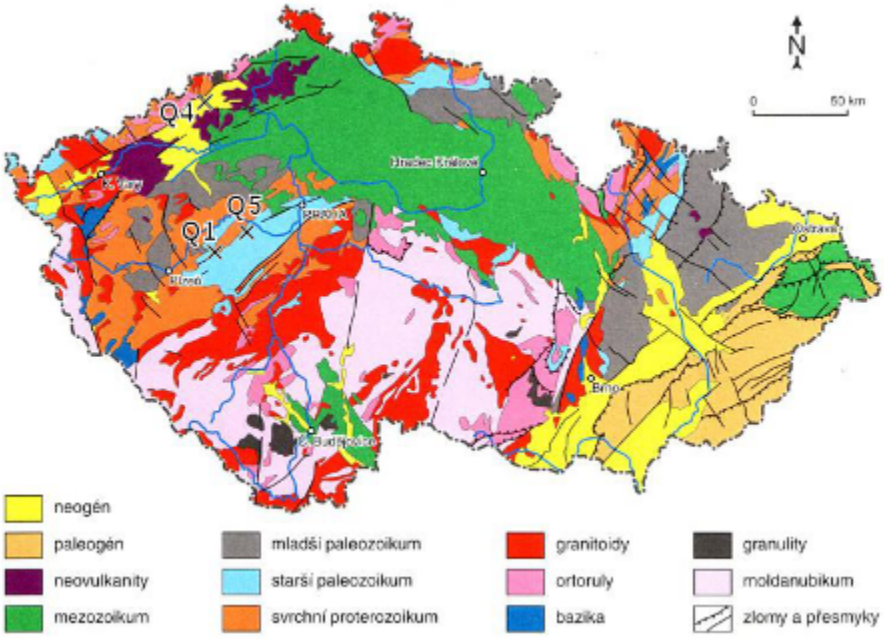
NaOH byla takřka shodná s expanzí po 28 dnech v 0.5 M NaOH bez většího vlivu obsahu alkálií v cementu. Shon et al. (2002) navrhují prodloužení testovacího období na 28 dní a snížení molární koncentrace roztoku NaOH na 0.5 M. Změněné podmínky jsou méně drastické a bližší reálným podmínkám. Islam (2015) ve své práci potvrdil pozorování Shona et al. (2002). Modifikoval molární koncentraci roztoku NaOH (1 M, 0.5 M, 0.25 M) a prodloužil čas zkoušky (14, 28, 56, 98 dní). Za pomoci rozpadového modelu ADM (ASR Decay Model) dokázal velmi dobře předpovědět konečnou maximální expanzi a určit čas potřebný k jejímu dosažení pro různé typy kameniva. Obecně platí, že pro dosažení poloviční hodnoty maximální expanze při koncetraci NaOH 0.5 M a 0.25 M je potřeba více času než při koncentraci NaOH 1 M. Islam (2015) z experimentu vyvozuje, že většinové hodnoty expanze je dosaženo v raném stádiu testu při vyšších koncentracích NaOH. Ve své práci dále stanovil expanzní kritéria při použití různých koncentrací NaOH a doporučil prodloužení testu na 28 dní stejně jako Shon et al. (2002) a Lindgård et al. (2010).

Odlišným příkladem od urychlené trámečkové zkoušky je dlouhodobá zkouška RILEM AAR-3 (Nixon a Sims 2016). Jedná se o zkoušku trvající 1 rok, při které jsou zkušební betonová tělesa (velikost 75 x 75 x 250 mm) uložena ve vlhkém prostředí o teplotě 38 °C. Před měřením jsou tělesa na 24 hodin temperována na teplotu 20 °C a poté zpět uložena do teploty 38 °C. Měření probíhají po 2, 4, 13, 26 a 52 týdnech. Lindgård et al. (2010) v rámci projektu Evropské unie "PARTNER", jehož se účastnilo 14 převážně evropských zemí, zkoumali, upravovali a ověřovali platnost testovacích metod RILEM i některých lokálních zkoušek na širokém spektru 22 potenciálně reaktivních hornin. Zkouška RILEM AAR-3 (2016) se dobře osvědčila při rozpoznání nereaktivního a středně reaktivního kameniva, jehož škodlivost se projeví do 5 až 20 let. Problém nastává u kameniva pomalu reagujícího, u kterého dochází k projevům ASR po více než 15 až 20 letech. Pro pomalu reagující kamenivo doporučují Lindgård et al. (2010) prodloužit dobu testování až na 2 roky a pozorovat vývoj expanze. Dalším problémem, který odhalil projekt PARTNER, je špatná mezilaboratorní reprodukovatelnost zkoušky RILEM AAR-3, přestože opakovatelnost v rámci jedné laboratoře je velmi dobrá.

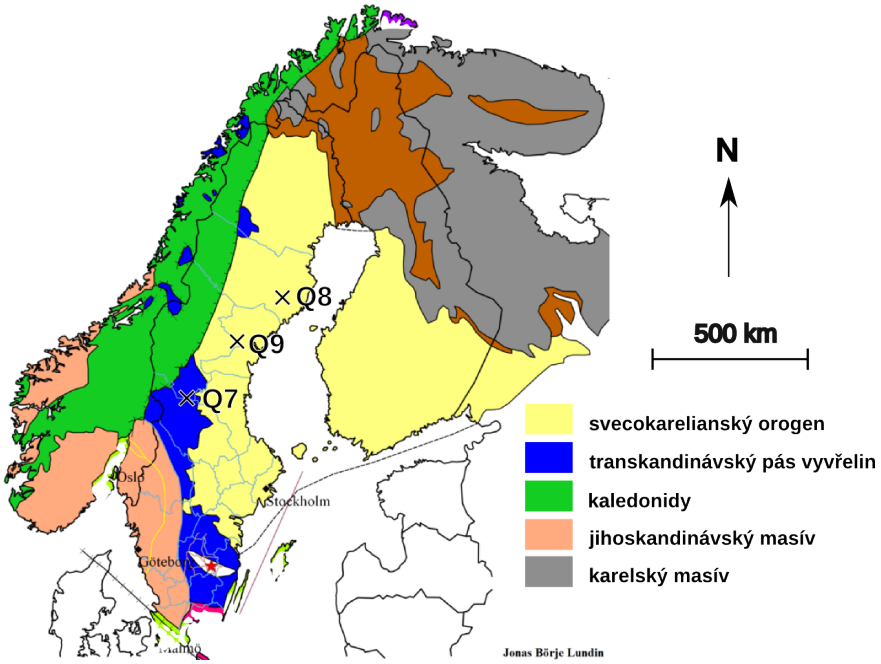
Časově přijatelnou zkouškou na pomezí urychlené a dlouhodobé zkoušky je zkouška RILEM AAR-4.1 (Nixon a Sims 2016). RILEM AAR-4.1 (2016) je urychlenou a modifikovanou verzí zkoušky RILEM AAR-3 (2016). Recepturu betonové směsi je možné upravit a zkoumat tak např. vliv poměru reaktivního a nereaktivního kameniva na expanzi zkušebního betonového tělesa (tzv. “pessimum ratio”). Zkušební betonová tělesa o rozměrech 75 x 75 x 290 mm jsou uložena do mlžné komory o teplotě 60 ˚C, kde spočívají po dobu 20ti týdnů. Vždy po 5ti týdnech probíhá měření, kterému předchází vyjmutí kontejneru či boxu s betonovými tělesy a temperování na teptotu 20 ˚C po dobu 24 hodin. RILEM AAR-4.1 (2016) je obzvláště vhodná zkouška k určení pomalu reagujího kameniva a dobře funguje také na rychle a středně reaktivní typy kameniva. Nedostatkem této metody je citlivost na vyluhování alkálií z betonových těles. Tímto problémem se zabýval Lindgård et al. (2013a).

3. EXPERIMENTÁLNÍ MATERIÁL

Studovaným materiálem byly 3 vzorky ordovických a křídových křemenců z různých lokalit (Q1, Q4, Q5), 4 vzorky křemenné metadroby z jedné lokality (Q7-A, Q7-B, Q7-C, Q7-D), 1 vzorek kvarcitu (Q8) a 1 vzorek separovaného pegmatitového křemene (Q9). Podrobnosti ke studodovaným vzorkům a lokalitám jsou shrnuty v tabulce Tab. 1. Poloha zájmových lokalit je zaznačena na Obr. 3 a 4.



Obr. 3. Stručná geologická mapa České republiky se zaznačenými zájmovými lokalitami, Q1-Sklená Huť, Q4-Jeníkov, Q5-Kublov (Chlupáč et al. 2002, upraveno).



Obr. 4. Stručná geologická mapa Skandinávského poloostrova se zaznačenými zájmovými lokalitami, Q7-Klövsjö, Q8-Kulbacksliden, Q9-Edsele (Lundin 2015, upraveno)

Tab 1. Přehled studovaných vzorků.

Vzorek	**Q1**	**Q4**	**Q5**	**Q7**	**Q8**	**Q9**
Název lokality	Sklená Huť, CZ	Jeníkov, CZ	Kublov, CZ	Klövsjö, SE	Kulbacksliden, SE	Edsele, SE
Geologická jednotka	TBO	ČKP	TBO	TPV	SO	SO
Stáří	ordovik	křída	ordovik	ordovik-silur	paleocén	paleocén
Využití lokality v minulosti	stavební, dlažební kámen, sklářská surovina	dlažební kámen, surovina pro výrobu dinasu a ferosilicia	stavební kámen	podsypový materiál vozovek	drcený kámen	těžba křemene a K-živce
Využití lokality dnes	zarostlý výchoz	zatopený lom	zarostlý výchoz	sezónní těžba	činný lom	opuštěný lom
Petrografický popis	křemenec	křemenec	křemenec	křemenná metadroba	kvarcit	pegmatitový křemen
Makropopis	světle šedá barva, všesměrná stavba, jemnozrnný	světle až středně šedá barva, všesměrná stavba, jemnozrnný	světle šedá barva, všesměrná stavba, jemnozrnný	světle šedá až světle žlutá barva, místy oranžové žilky, všesměrná stavba, jemnozrnná	světle šedá barva, všesměrná stavba, jemnozrnný	bílá barva, všesměrná stavba, hrubozrnný
Reference	Bílek et al. (1987)	Čtyroký et al. (1963)	Bílek et al. (1987)	SGU (2016)	SGU (2016)	SGU (2016)

Vysvětlivky: CZ – Česká republika, SE – Švédsko, TBO – tepelsko-barrandienská oblast, ČKP – česká křídová pánev, TPV – transcandinávský pás vyvřelin, SO – Svecokarelianský orogen, SGU – Švédská geologická služba.

4. METODIKA

4.1 Mikroskopické metody

4.1.1 OM

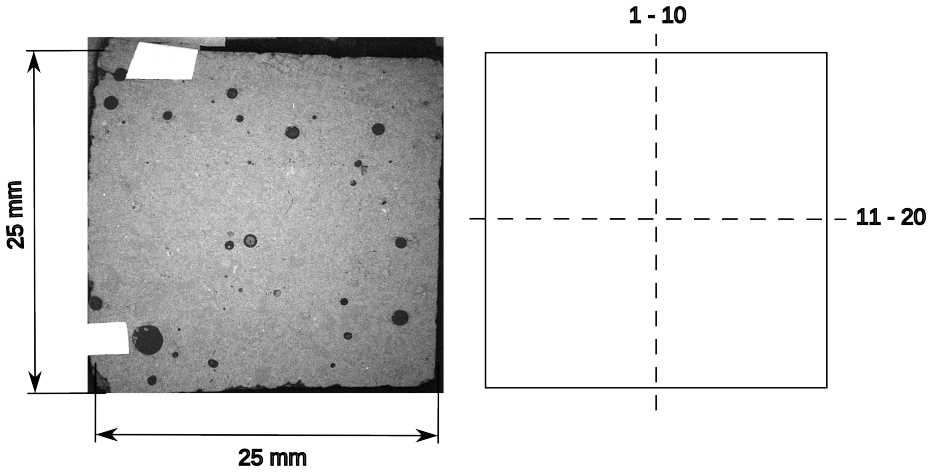
OM v procházejícím světle byla využita k popisu mineralogického složení zkoumaných hornin, vztahů mezi minerály, pozorování deformačních projevů a rekrystalizace minerálů. Výbrusy zhotovil J. Letko z firmy Diatech s.r.o. Mikroskopické zkoumání horninových výbrusů bylo provedeno na binokulárním mikroskopu Leica DMLP v Laboratoři optické mikroskopie ÚGMNZ PřF UK. Horninové výbrusy byly zkoumány v rovnoběžných (PPL) i zkřížených nikolech (XPL), při zvětšení objektivu 2.5x, 5x, příp. 10x.

4.1.2 SEM/EDS

SEM představuje jistou obdobu OM, ve které zkoumáme preparát nikoli v proudu fotonů, ale v proudu elektronů. Preparát pro elektronovou mikroskopii tvoří nezakrytý leštěný výbrus nebo nábrus s tenkou vodivou vrstvou nepařeného uhlíku nebo zlata. Přístroj se skládá z elektronového děla, elektromagnetických čoček a detektorů. Preparát se vloží do komory, která je pro potřeby měření vyvakuována. Elektrony jsou emitovány ze zdroje (wolframové vlákno, krystal LaB_6) a dále urychlovány a zaostřovány pomocí systému elektromagnetických čoček. Dopadem elektronů na povrch preparátu dochází k průchodu elektronů preparátem, absorbování elektronů, odražení elektronů nebo k vybuzení částic (sekundární elektrony, Augerovy elektrony) a záření (rentgenové záření, luminiscence) (Khursheed 2010). Tyto částice, odražené elektrony a záření jsou zachycovány detektory a poskytují informace o povrchu a složení studovaného preparátu. SEM nám umožňuje sledování a chemickou analýzu fází mikrometrických rozměrů při velkém rozlišení a zvětšení.

Pomocí SEM byly studovány a analyzovány leštěné horninové výbrusy pro účely AO (korekce geologických trhlin), ztenčené leštěné nábrusy (tloušťka nábrusu cca 3-4 mm) zhotovené z maltových těles ze zkoušek ASTM C1260 (2014) (1 nábrus od každého typu kameniva) a betonových těles ze zkoušky RILEM AAR-4.1 (2016) (2 nábrusy od každého typu kameniva). Na leštěných nábrusech z maltových a betonových trámců byly zkoumány projevy a produkty ASR. U nalezených gelů byla provedena analýza chemického složení (SEM/EDS). Dále probíhalo systematické snímkování pro následné zpracování pomocí AO. Měření probíhalo v Laboratoři skenovací mikroskopie ÚPSG PřF UK na elektronovém mikroskopu Tescan Vega s EDS detektorem X-Max 50 (výrobce Oxford Instruments) při urychlovacím napětí 15 kV a proudem svazku 1.5 nA. Ztenčené leštěné nábrusy maltových trámců zhotovil J. Letko (Diatech s.r.o.), napaření uhlíkem provedla Laboratoř skenovací elektronové mikroskopie ÚPSG PřF UK (M. Racek, R. Jedlička).

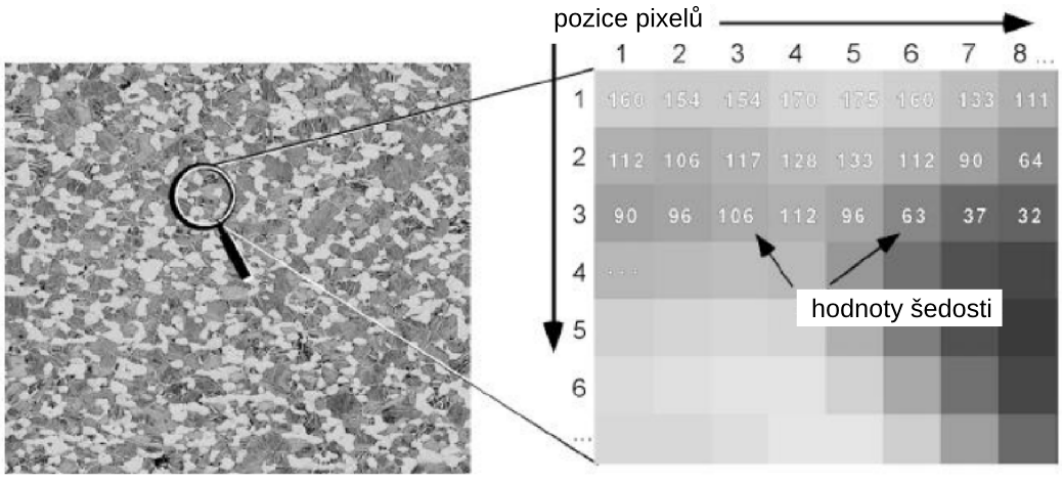
Z každého nábrusu maltového trámce ze zkoušky ASTM C1260 (2014) a horninových výbrusů bylo vytvořeno 20 snímků ve zpět odražených elektronech (SEM/BSE). Během snímkování byly dodrženy konstantní podmínky jak pro snímky nábrusů tak i horninových výbrusů. Snímky byly pořízeny při zvětšení 100x a rychlosti snímkování 7. Trasu snímkování nábrusu tvořily dvě na sebe vzájemně kolmé linie čítající 10 snímků, tak aby byl zaznamenán celý průřez trámce. Středová partie nábrusu tvořící průnik linií byla snímána pouze jednou. Nákres trasy snímkování je zobrazen na Obr. 5.



Obr. 5. Vlevo: SEM/BSE snímek průřezu trámcem ASTM C1260 (Q8); vpravo: schéma trasy snímkování.

4.2 AO

Nejčastější vstupy pro AO v geovědách tvoří mikrofotografie z polarizačního mikroskopu (PPL, XPL), snímky z elektronového mikroskopu, makrofotografie a další typy obrazového materiálu. Tyto snímky mají formát rastrové grafiky. Obraz je tvořen mřížkou barevných bodů (pixelů), které nesou informaci o své barvě. 8-bitové černobílé snímky, tak jako v našem případě, jsou tvořeny pixely o hodnotách 0 (černá barva) až 255 (bílá barva). Fotografie není objektem, který reprezentuje, ale pouze tabulkou hodnot. Tento princip názorně demonstruje Obr. 6 (Heilbronner a Barrett 2014).



Obr. 6. Vlevo: snímek SEM/BSE horninového výbrusu; vpravo: zvětšená oblast snímku na úroveň pixelů s hodnotami šedosti (Heilbronner a Barrett 2014, upraveno).

Pomocí AO je možné provádět selekci objektů, měření velikostí, ploch a mikrostrukturních parametrů (např. plocha zrn, průměr ekvivalentního kruhu, délka hlavní a vedlejší osy, obvod, tvarový faktor) objektů na snímku (Přikryl 2006). Pod pojem AO spadá široká škála dílčích úkonů zahrnující pořízení snímku, úpravu snímků, matematické a statistické operace za pomoci specializovaného softwaru. Výsledná data a výstupy z AO jsou velmi citlivé na kvalitu zpracovávaných snímků a znalosti operátora. Až 90 % problémů s AO vzniká již při samotné tvorbě snímků, např. výběrem

nereprezentativní oblasti, mechanickými vadami na preparátu (křehké porušení výbrusů při jeho okrajích, zbytky leštící pasty, nečistoty a škrábance na povrchu) či nevhodnou metodou a nastavením přístroje během snímkování (např. nedostatečný kontrast, nízké rozlišení) (Friel et al. 2000). AO je možné rozdělit na manuální a automatickou. Při manuální AO provádí selekci vybraných objektů člověk a počítač nad těmito objekty provede pouze patřičné operace. Při automatické AO provádí počítač selekci zájmových objektů na základě člověkem zadaných parametrů (např. rozsah stupňů šedi).

AO byly zpracovány SEM/BSE snímky horninových výbrusů a nábrusů maltových trámců ze zkoušky ASTM C1260 (2014). Cílem této analýzy bylo zhodnocení stavu a poškození kameniva v maltovém trámci následkem ASR po skončení testovacího období. Mezi získané parametry patřilo zastoupení kameniva, cementu, pórů, volných alkalicko-silikátových gelů a především míra poškození kameniva ASR. Toto poškození se projevuje jako rozšiřování přirozených geologických trhlin, křehkých trhlin vzniklých mechanickým drcením kameniva, dutin a pórového prostoru v úlomcích, které vzniklo rozpouštěním křemenných partií kameniva a jejich přeměnou v gely.

4.2.1 Postup AO pro 1 snímek

Postup AO vychází z metody upravené Šachlovou et al. (2015) podle práce Haha et al. (2007). SEM/BSE snímek je nejprve upraven v grafickém editoru a dále zpracován v programu SigmaScan Pro 5 (Jandel Scientific). Program SigmaScan Pro 5 na základě zadaných hodnot a rozsahů ve stupních šedi (nástroj Threshold) vyhledá ve snímku všechny pixely dané barvy, označí je a udělá jejich součet. Následuje detailní postup zpracování jednoho snímku doplněný obrázkem Obr. 7.

(a) SEM/BSE snímek maltového trámce je vytvořen za konstantních podmínek a zvětšení.

(b) Snímek je upraven v grafickém editoru (zde Corel PHOTO-PAINT X3), což zahrnuje oříznutí snímku (odstranění legendy), upravení jasu a kontrastu (stupňů šedi) na konstantní hodnoty šedosti křemene a odstranění nehomogenit negeologického původu, např. nečistot na povrchu preparátu. Ty je možno buď vyříznout nebo barevně sjednotit s podkladem, tak aby nevnášely chyby do dalšího procesu AO.

(c) Je provedeno ruční vymaskování kameniva (nástroje Mask, Magic Wand). Upravený snímek obsahuje pouze úlomky kameniva. Cementové pojivo a póry jsou zcela odstraněny a nahrazeny bílou barvou, která má ve stupních šedi hodnotu 255.

(d) Snímek je zpracován v programu SigmaScan Pro 5. Je označena (Image/Threshold/Intensity Threshold; Threshold 255-255) a vypočtena (Measurements/Measure Objects) v pixelech (px) plocha cementu a pórů. Interval stupňů šedi 255-255 dokáže zachytit také některé akcesorie v kamenivu (např. zirkon, Fe-oxidy, rutil), ty jsou z výčtu manuálně vyřazeny. Od velikosti celého snímku v px (Image/Properties...) je odečten počet px odpovídající cementu a pórům. Takto je určena plocha kameniva na snímku v px.

(e) Detekce projevů ASR (Intensity Threshold; Threshold: 0-70). Projevům ASR na kamenivu odpovídá interval stupňů šedi 0-70.

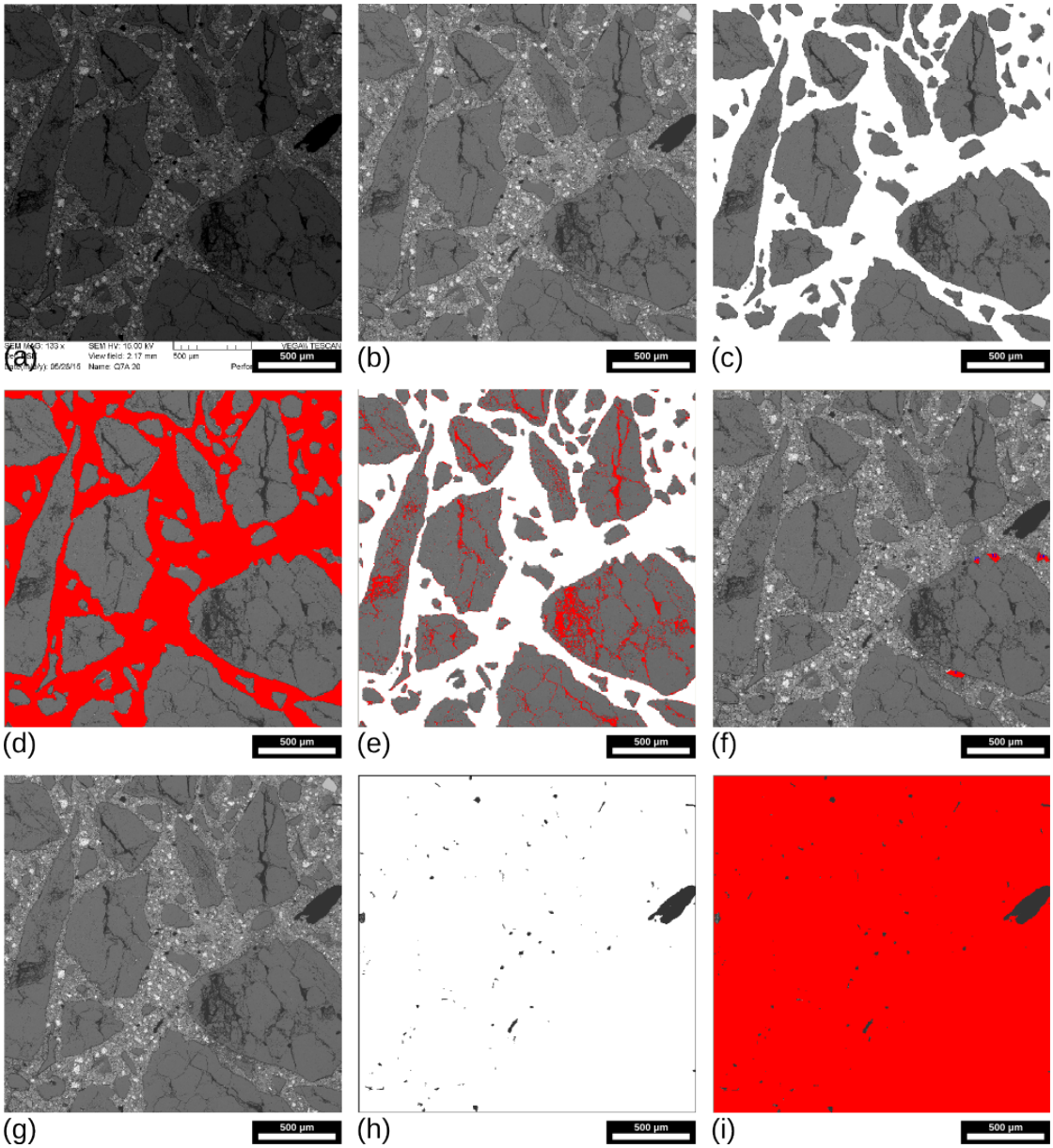
(f) Volné gely a póry s gely jsou ručně vymaskovány (Trace Mode) a vyčísleny v px

(Measurements/Measure Objects).

(g) Stejný SEM/BSE snímek jako z bodu (b).

(h) Snímek je upraven v grafickém editoru. Póry jsou ručně vymaskovány (Mask, Magic Wand), tak že snímek obsahuje pouze póry. Cementové pojivo a kamenivo je zcela odstraněno a nahrazeno bílou barvou, která má ve stupních šedi hodnotu 255.

(i) Snímek je zpracován v programu SigmaScan Pro 5. Je označena a vypočtena plocha cementu a kameniva v px (viz bod d). Kroky (a)-(i) jsou znázorněny na Obr. 7.



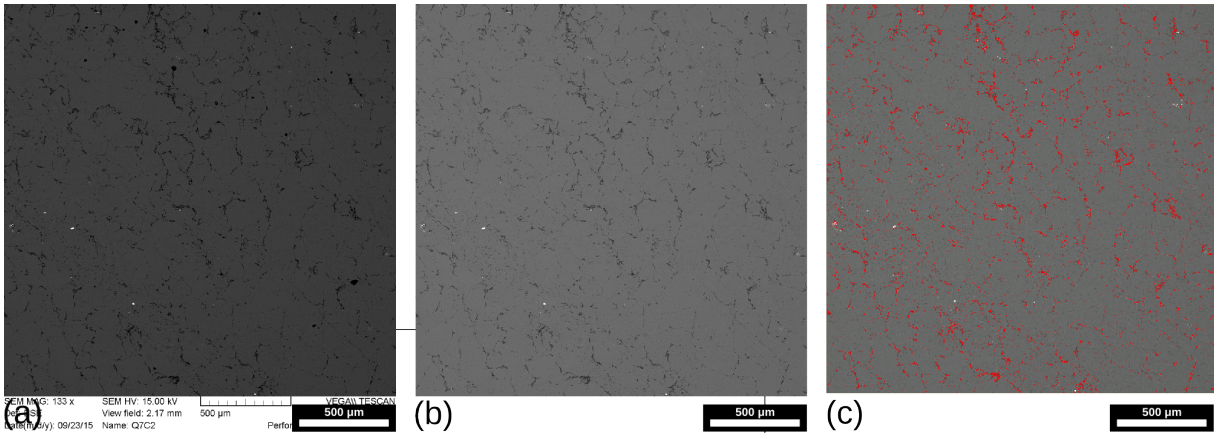
Obr. 7. Zjednodušený postup AO na SEM/BSE snímku z maltového trámce (Q7-A); (a) neupravený SEM/BSE snímek (b) odstranění legendy a úprava šedosti; (c) vymaskování kameniva; (d) výpočet kameniva a cementu; (d) výpočet projevů ASR na kamenivu; (f) manuální selekce a výpočet volných gelů; (g) stejný upravený snímek z bodu b; (h) vymaskování pórů; (i) výpočet pórů.

Takto je vyhodnoceno všech 20 snímků maltového trámce a data jsou zanesena do tabulky. Z těchto dat je možné procentuálně vyjádřit zastoupení kameniva v maltových trámcích, cementového pojiva, prázdných pórů, pórů s gely a volných gelů (dohromady 100 obj. %). Pro zjištění reálného poškození kameniva vlivem ASR je nutné provést korekci projevů ASR v AO. Korekce spočívá v zohlednení primárních geologických trhlin na horninových výbrusech, kterým také odpovídá threshold 0-70 stejně jako projevům ASR na kamenivu v maltových trámcích. Postup je následující:

(a) SEM/BSE snímek horninového výbrusu je vytvořen za konstantních podmínek a zvětšení.

(b) Snímek je upraven v grafickém editoru viz bod b výše.

(c) Snímek je zpracován v programu SigmaScan Pro 5. Geologických trhliny jsou označeny (Intensity Threshold; Threshold: 0-70) a vypčísleny v px (Measurements/Measure Objects). Kroky (a)-(c) jsou znázorněny na Obr. 8.



Obr. 8. Postup AO, SEM/BSE snímek horninového výbrusu (Q7-C); (a) neupravený snímek; (b) upravená šedost a odstraněná legenda; (c) výpočet geologických trhlin.

Takto je zpracováno všech 20 snímků horninového výbrusu. Po odečtení geologických trhlin od projevů ASR na kamenivu v maltových trámcích je stanoveno, jaký podíl z detekovaných projevů ASR na kamenivu v maltových trámcích představuje poškození vlivem ASR.

4.2.2 Postup alternativní verze AO

Ve standardní verzi AO (kapitola 4.2.1) jsou stupně šedosti na všech snímcích upravovány na stejnou hodnotu šedosti křemene, aby byly hodnoty získané pomocí AO vzájemně porovnatelné a také proto, že křemen je dominantním minerálem studovaných hornin. V případě vzorku Q8, kvarcit bohatý K-živcem, byla vedle standardní AO aplikována také její alternativní verze, která zohledňuje modální složení horniny a náchylnost minerálů k ASR. Nejprve bylo stanoveno průměrné modální složení horniny v obj. %. Na pěti snímcích z horninového výbrusu bylo stanoveno zastoupení křemene, plagioklasu, K-živce, biotitu a muskovitu. Následuje postup pro úpravu snímků a získání informací o projevech ASR na jednom minerálu.

(a) SEM/BSE snímek maltového trámce je upraven v grafickém editoru. Úprava zahrnuje odstranění legendy, upravení jasu a kontrastu (stupňů šedi) na konstantní hodnoty šedosti křemene (resp.

plagioklasu, K-živce, biotitu, muskovitu – jedná se vždy o stejné konečné hodnoty šedosti).

(b) Min. 3 zrna křemene jsou ručně vymaskovány (Mask a Magic Wand). Upravený snímek obsahuje pouze vybraná zrna křemene. Ostatní kamenivo, cementové pojivo a póry jsou zcela odstraněny a nahrazeny bílou barvou, která má ve stupních šedi hodnotu 255.

(c) Snímek je zpracován v programu SigmaScan Pro 5. Je označena (Image/Threshold/Intensity Threshold; Threshold 255-255) a vypočtena (Measurements/Measure Objects) plocha bílé barvy v px. Od velikosti celého snímku v px (Image/Properties...) je odečten počet px odpovídajících bílé ploše. Takto je určena plocha zrn křemene (nebo plagioklasu, K-živce, biotitu, muskovitu) na snímku.

(d) Detekce projevů ASR (Intensity Threshold; Threshold: 0-70) na vybraných zrnech.

(e) Stejným způsobem postupujeme u snímků z horninového výbrusu (kroky a-d) (úprava snímku, šedosti, vymaskování zrn, výpočet plochy zrn a projevů ASR).

Tímto postupem je zjištěno procentuální zastoupení ASR projevů v maltovém trámci pouze pro křemen (resp. plagioklas, K-živec, biotit, muskovit) a podíl geologických trhlin křemene (resp. plagioklasu, K-živce, biotitu, muskovitu) v horninovém výbrusu. Po odečtení geologických trhlin z horninového výbrusu od projevů ASR v nábrusu maltového trámce je stanovena přesnější hodnota projevů ASR nezvětšená o vliv geologických trhlin.

Další minerály vzorku Q8 byly zpracovány stejným způsobem. Snímky ostatních minerálů se upravují na stejné hodnoty stupňů šedosti jako křemen. V případě slíd byla vymaskována a zpracována všechna zrna nacházejících se na snímcích maltového nábrusu i horninovém výbrusu (celkem 18-47 zrn). Z hodnot projevů ASR na konkrétních minerálech a modálního složení horniny, je váženým průměrem vypočítáno poškození křemene, živců a slíd v hornině způsobené ASR. Součet těchto hodnot dává celkový stupeň poškození horniny vlivem ASR.

4.3 Dilatometrické zkoušky

4.3.1 Urychlená zkouška na maltových trámcích dle ASTM C1260

Zkouška ASTM C1260 (2014) dále jen jako ASTM C1260 patří mezi urychlené trámečkové zkoušky a slouží ke stanovení potenciální reaktivnosti kameniva s alkáliemi. Zkušební podmínky této testovací metody neodpovídají běžným podmínkám v betonových konstrukcích, ale mají za účel urychlit vznik ASR v krátkém čase působením extrémních podmínek. Postup zkoušky ASTM C1260 byl převzat z TP 137 (2015) a proveden podle předpisu ASTM C 1260-14 Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method).

Kamenivo bylo nadrceno a granulometricky roztříděno ve Zkušebně kamene a kameniva, s.r.o. v Hořicích. Zkouška ASTM C1260 byla provedena na všech typech zkoumaného kameniva. Z kameniva Q4, Q7, Q8 a Q9 byly zhotoveny 4 maltové trámce, Z kameniva Q1 a Q5 byly zhotoveny 3 trámce z důvodu omezeného množství materiálu. Příprava maltových směsí probíhala v prostorách PřF UK Albertov 6 a ve specializované laboratoři ÚGMNZ.

Postup pro přípravu jednoho trámce je následující: Nadrcené, propláchnuté, vysušené kamenivo (při

teplotě 105 +/- 5 ˚C) je roztříděno na dílčí granulometrické frakce 4-5, 2-4, 1-2, 0.5-1, 0.25-0.5, 0.125-0.25 mm skrze síta s čtvercovými oky a opětovně propláchnuto a vysušeno. Směs na výrobu jednoho trámce vychází z poměru 1 hmotnostní díl cementu ku 2.25 hmotnostním dílům kameniva, při vodním součiniteli 0.47. Přesná receptura na jeden trámec o rozměrech 25 x 25 x 285 mm je k nahlédnutí v tabulce Tab.2. Cement použitý v této zkoušce odpovídá cementu typu CEM I 42.5 R.

Tab. 2. Receptura na 1 trámec dle zkoušky ASTM C1260.

Frakce kameniva	hmotnost [g]
4 – 5	8.3
2 – 4	33.0
1 – 2	68.8
0.5 – 1	74.3
0.25 – 0.5	63.3
0.125 – 0.25	27.5
kamenivo [g]	275.0
cement [g]	122.2
destilovaná voda [ml]	57.5

Přesně odměřené množství kameniva, cementu a vody dle receptury (Tab. 2) je pečlivě promícháno. Takto vytvořenou maltou je naplněna forma. Vnitřní porvrch formy je opatřen separační vrstvou z nereaktivní TFE-fluorcarbonnové pásky, která napomáhá snazšímu vyjmutí ztuhlých maltových trámců z formy. Forma je z vnitřní strany opatřena dvěma měrnými kovovými kontakty. Malta je do formy vtláčena a hutněna ve dvou dávkách, za účelem vytvoření homogenní struktury maltového trámce. Celý proces ukládání malty do formy by neměl přesáhnout 2 minuty a 15 sekund. Naplněná forma je uložena na 24 ± 2 hodin do mlžné komory či vlhkého prostředí (relativní vlhkost > 90 %). Po 24 hodinách je z formy vyjmut zkušební maltový trámec, označen a je provedeno jeho délkové měření. Následně je maltový trámec bez prodlení uložen do nádoby s destilovanou vodou a temperován ve vodní lázni na teplotu 80 ± 2 ˚C po dobu následujících 24 hodin. Po uplynutí 24 hodin je provedeno měření délky a váhy maltového trámce, tzv. nulové čtení, značíme l_0. Po měření je maltový trámec uložen do lázně o teplotě 80 ± 1 ˚C tvořené 1 M roztokem NaOH. Trámec je v lázni zcela ponořen a spočívá ve svislé poloze po dobu následujících 14 dní. V pravidelných intervalech jsou prováděna manuální délková měření (3x týdně). Měření musí být provedeno velmi rychle vzhledem k rozdílným teplotám v lázni a laboratoři. Po měření je trámec neprodleně vložen zpět do lázně z 1 M NaOH.

Konečná a průběžná hodnota expanze Δ [%] se vypočte dle vzorce (4). Kde l znamená délku trámce během měření, l_0 počáteční délka trámce při nulovém čtení. Δ [%] se zaokrouhluje na 0.001 %. Pakliže expanze po ukončení 16ti denního testu nepřekročí hranici 0.10 % je kamenivo pokládáno za nereaktivní. Při hodnotách expanze 0.10-0.20 % je kamenivo hodnoceno jako potenciálně reaktivní a nelze vyloučit možné alkalické rozpínání. V takovém případě je vhodné doplnit zkoušku ASTM C1260 dalším zkoumáním, např. prodloužit délku testovacího období na 28 dní a sledovat vývoj expanzní křivky. Kamenivo, které dosáhne expanze větší než 0.20 % je považováno za reaktivní. V současnosti dává mnoho odborníků přednost limitu 0.10 % jako hranici mezi reaktivním a nereaktivním kamenivem (Alaejos et al. 2014). Konečné hodnoty jsou průměrem ze všech trámců.

$$\Delta = ((l - l_0) / 250) * 100 \qquad (4)$$

4.3.2 Zkouška na betonových trámcích dle RILEM AAR-4.1

Cílem zkoušky je testování kameniva z hlediska vzniku škodlivého alkalického rozpínání. Zkouška RILEM AAR-4.1 (Nixon a Sims 2016) dále jen RILEM AAR-4.1 se většinou používá ke zkoumání jednoho druhu kameniva, ale umožňuje také zkoumat vliv poměru reaktivního kameniva a nereaktivního kameniva v receptuře na konečnou expanzi, tzv. "pessimum ratio" (Binal 2015).

Zkouška RILEM AAR-4.1 byla provedena na všech typech studovaného kameniva po jednom trámci, z důvodu omezené kapacity laboratoře a množství vzorku. Postup pro přípravu jednoho betonového trámce je následující:

Kamenivo pro zkoušku RILEM AAR-4.1 bylo nadrceno a granulometricky roztříděno ve Zkušebně kamene a kameniva, s.r.o. v Hořicích a v drtírně PřF UK Albertov 6. Nadrcené, propláchnuté, vysušené kamenivo (při teplotě 105 ± 5 ˚C) je roztříděno na dílčí granulometrické frakce 4-22.4, 4-5, 2-4, 1-2, 0.5-1, 0.25-0.5, 0.125-0.25 mm skrze síta s čtvercovými oky a opětovně propláchnuto a vysušeno. Směs na výrobu jednoho trámce vychází z poměru 60 % hrubého kameniva (4-22.4 mm) ku 40 % jemného kameniva (< 4 mm). Přesný poměr dílčích frakcí jemného kameniva, cementu, přidaného NaOH, navlhčovací a záměsové vody závisí na reálné nasákavosti kameniva. Nasákavost (WA), objemová hmotnost povrchově osušeného (ρ_{ssd}) a objemová hmotnost vysušeného kameniva (ρ_{rd}) byla stanovena pomocí pyknometrické zkoušky dle ČSN EN 1097-6 (2014) v laboratoři ÚGMNZ. Konkrétní receptura na jeden trámec z kameniva Q7 o rozměrech 75 x 75 x 290 mm je k nahlédnutí v tabulce Tab. 3.

Tab. 3. Receptura na 1 trámec z kameniva Q7 dle zkoušky RILEM AAR-4.1

Kamenivo Q7		Jednotky
Hrubé kamenivo	1653.9	g
Jemné kamenivo	1090.0	g
Cement	800.0	g
Destilovaná voda	362.7	ml
Plastifikátor	2.5	ml
Přídavek NaOH	3.6	g
Celková hmotnost	3912.8	g

Frakce jemné kamenivo		
2 – 4	272.5	g
1 – 2	272.5	g
0.5 – 1	272.5	g
0.25 – 0.5	218.0	g
0.125 – 0.25	54.5	g
Celková hmotnost	1090.0	g

Voda na navlhčení	54.5	ml

Základní vlastnosti	Hrubé kamenivo	Jemné kamenivo
ρ_{ssd} [mg/m^3]	2.45	2.14
ρ_{rd} [mg/m^3]	2.45	2.23
WA [%]	0.15	1.00

Všechny receptury jsou k nahlédnutí v Příl. I. Cement použitý v této zkoušce odpovídá cementu typu CEM I 42.5 R. Hrubé a jemné kamenivo je naváženo zvlášť. Jemné kamenivo je nutno minimálně 16 hodin před umícháním betonové kaše navlčit předepsaným množství vody (5 ± 2 % z celkového množství vody v receptuře). Po 16 hodinách je možno směs umíchat. Po dobu 1 minuty je promícháváno hrubé kamenivo s jemným ovlhčených kamenivem. Poté je přidána polovina z celkového objemu vody v receptuře, ve které je rozmíchán přídavek NaOH. Tato směs je 1 minutu promíchávána. Množství Na_2O ekv. v betonu odpovídá 5.50 kg/m^3 a je nutné zohlednit příspěvek Na_2O ekv. v cementu a použitém plastifikátoru (množství Na_2O ekv. v betonu - obsah Na_2O ekv. v cementu - obsah Na_2O ekv. v plastifikátoru = množství Na_2O ekv. nutného přidat ve formě NaOH). Po promíchání se směs ponechá 1 minutu odpočívat. Následně je přidána zbylá poloviny vody, cementu a plastifikátor. Plastifikátor je přísada sloužící ke zlepšení zpracovatelnosti betonové kaše a snížení množství záměsové vody. Betonová kaše je pečlivě promíchávána 2 minuty. Vzniklou betonovou kaší je naplněna forma. Vnitřní porvrch formy je opatřen separační vrstvou nereaktivní TFE-fluorcarbonnové pásky, která napomáhá snazšímu vyjmutí ztuhlých betonových trámců z formy. Forma je z vnitřní strany opatřena dvěma měrnými kovovými kontakty. Betonová kaše je do formy vtláčena a hutněna ve dvou dávkách, za účelem vytvoření homogenní struktury betonového trámce. Naplněná forma je uložena na 24 ± 1 hodin do mlžné komory či vlhkého prostředí (relativní vlhkost > 90 %). Po 24 hodinách je z formy vyjmuto zkušební těleso, označeno a provedeno jeho délkové měření (C_0) a zvážení. Následně je betonový trámec ponořen na 30 minut do destilované vody o teplotě 20 ± 2 ˚C a následně je opět zvážen a změřen. Neprodleně po měření je betonový trámec uložen ve svislé pozici v připraveném boxu na principu mlžné komory. Box je uzavíratelná nádoba na dně opatřená roštem, na kterém spočívají testovací trámce. Na dně boxu je cca 35 mm vody a trámce spočívají nad touto hladinou, skrze rošt může volně pronikat a cirkulovat vodní pára. Uzavřený box je vložen do vodní lázně o teplotě 60 ± 2 ˚C. Měření probíhá každých 5 týdnů. Celková délka testu činí 20 týdnů. Před měřením je nutné vyjmout box z lázně a ponechat ho 24 ± 1 hodin temperovat na teplotu 20 ± 2 ˚C. Po změření délky a zvážení je betonový trámec uložen zpět do boxu a do lázně o teplotě 60 ˚C.

Konečná a průběžná hodnota expanze E_{20} [%] se vypočte dle vzorce (5). Kde C_{20} znamená délku trámce po 20 týdnech, C_0 počáteční délka trámce po odformování a před vložením do destilované vody a E_{20} [%] se zaokrouhluje na 0.001 % (Nixon a Sims 2016). Reaktivnost použitého kameniva lze posoudit již po 15 týdnech testu. Pakliže kamenivo nepřekročí hranici 0.030 % po 15 týdnech, je předpokládáno, že se kamenivo bude chovat nereaktivně (Nixon a Sims 2016). Limity expanze po 20 týdnech pro reaktivní kamenivo se pohybují od 0.030 % (Lindgård et al. 2010) do 0.040 % (Yamada et al. 2014).

$$E_{20} = ((C_{20} - C_0) / 300) * 100 \qquad (5)$$

4.3.3 RILEM AAR-4.1: Balící metoda dle Yamada et al. (2014)

Jedná se o modifikovanou metodu RILEM AAR-4.1 na způsob japonské metody JASS 5N dle Yamada et al. (2014). Balení trámců má zamezit loužení a úniku alkálií z trámce do okolního prostředí a tak snížení expanze. Metoda byla vyzkoušena na 3 typech kameniva. Z kameniva Q7-A byly zhotoveny 2 trámce, z kameniva Q8 a Q9 po jednom trámci. Receptura, příprava trámce a měření probíhá podle standardních pokynů RILEM AAR-4.1. Rozdíl spočívá v balení zkušebních betonových trámců do navlhčených laboratorních utěrek. Laboratorní papírové utěreky jsou navlhčeny roztokem NaOH

(0.253 g NaOH/100 ml vody). Zabalený trámec je zavinut do fólie a následně obalen vrstvou z tlustostěnné polypropylenové fólie. Zabalený a označený betonový trámec je uskladněn v laboratorní sušárně ve svislé poloze při teplotě 60 ˚C. Místo laboratorní sušárny lze použít testovací box a vodní lázeň. V tomto případě byla zvolena laboratorní sušárna z kapacitních důvodů. Procedura předcházející měření je zachována, stejně jako interval měření 5 týdnů. Po měření je betonový trámec opětovně zabalen do nových navlhčených utěrek a fólie. Následně je vrácen do laboratorní sušárny o teplotě 60 ˚C. Výpočet expanze je totožný jako v případě RILEM AAR-4.1. dle vzorce (2).

5. VÝSLEDKY

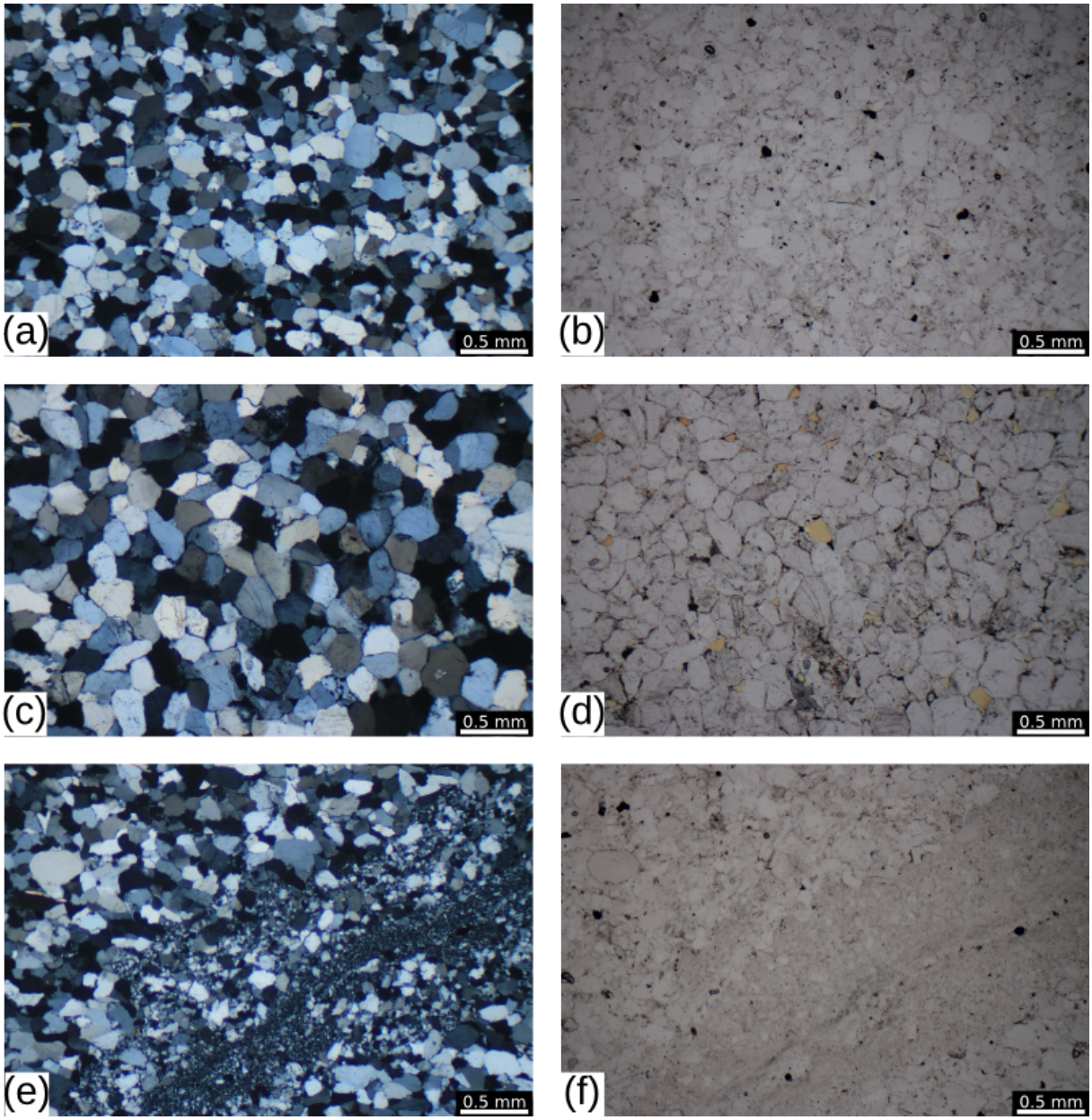
Kapitola výsledků nebude členěna shodně s kapitolou věnovanou metodice, tedy podle příbuznosti metod, nýbrž v posloupnostni, v jaké byly práce prováděny. Nejprve se bude věnovat OM, která sloužila k poznání studovaného materiálu, dále dilatometrickým zkouškám. Po dokončení dilatometrických zkoušek bylo možné studium maltových a betonových trámců pomocí SEM/EDS, pořízení chemických analýz a podkladů pro AO.

5.1 OM

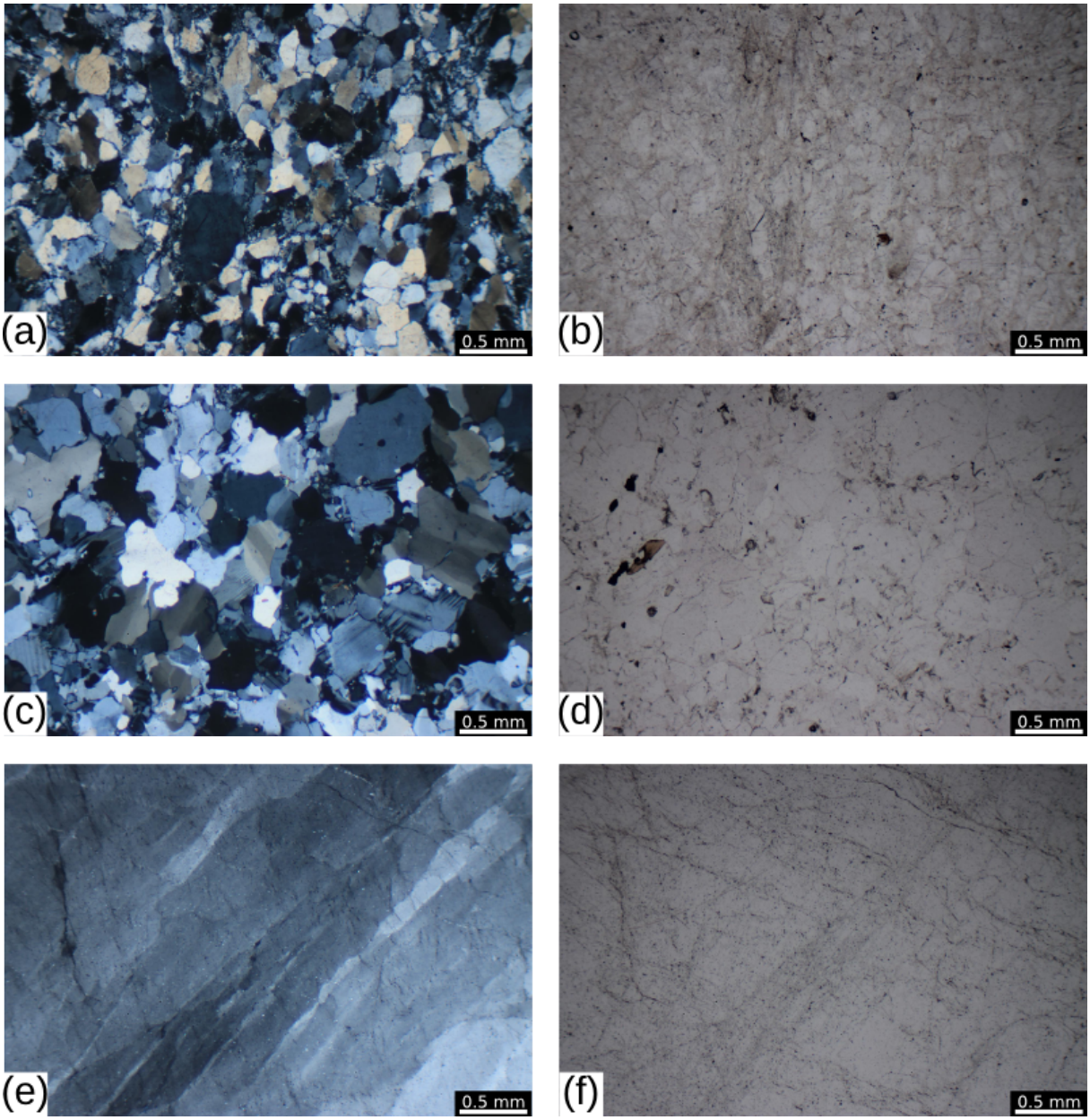
OM byly identifikovány minerální fáze nacházející se v horninových nábrusech jednotlivých vzorků a bylo přibližně stanoveno procentuální zastoupení jednotlivých fází. Informace o složení a mikrostruktuře studovaných hornin se nachází v Tab. 4. Mikrostavba zkoumaných hornin je zobrazena na obtázcích Obr. 9 a 10.

Tab. 4. Mikroskopická charakteristika studovaných horninových typů. Zkratky: Ap – apatit, Bt – biotit, Ilt – illit, Kfs – K-živec, Mnz – monazit, Ms – muskovit, Pl – plagioklas, Py – pyrit, Qz – křemen, Rt – rutil, Ser – sericit, Tur – turmalín, Zrn – zirkon (Whitney a Evans 2010); BLG - "bulging"; * - odhad z OM, ** - upřesněno SEM/EDS.

Vzorek	Horninový typ	Mineralogické složení	Obsah v obj. % *	Složení matrix **	Mikrostrukturní znaky křemene
Q1	křemenec	Qz matrix Ms, Rt, Zrn, Mnz, Py	90 10 < 1	Qz, Ser, Ilt	hranice zrn hladké až zakřivené, místy zubovité; inkluze rudního pigmentu na okrajích zrn; slabé undulózní zhášení
Q4	křemenec	Qz matrix Ms, Tur, Rt, Zrn, Py	90 5 5	Qz, Ser, FeO(OH)	hranice zrn převážně hladké až zakřivené; rudní pigmentace na hranicích zrn i uvnitř; zrna popraskaná; undulózní zhášení; místy subzrna a BLG
Q5	křemenec	Qz matrix Ms, Tur, Rt, Zrn, Py, Ap	90 5 5	Qz, Ser, Ilt	hranice zrn hladké až zakřivené, místy zubovité; inkluze rudního pigmentu na okrajích zrn; slabé undulózní zhášení
Q7	křemenná metadroba	Qz matrix Rt, Ap, Zrn	75 25 < 1	Qz, Ser, Ilt	hranice zrn zakřivené, místy zubovité; lokálně větší zrna "plavou" v matrix; subzrna a BLG; mírné undulózní zhášení
Q8	kvarcit	Qz Kfs Pl Ms, Bt, Zrn	50 25 25 < 1	-	hranice zrn zakřivené; subzrna a BLG; výrazné undulózní zhášení; myrmekytické srůsty Qz a živců
Q9	pegmatitový křemen	Qz	100	-	výrazné undulózní zhášení; místy subzrna; velké množství inkluzí



Obr. 9. Mikrofotografie horninových výbrusů křemenců Q1, Q4 a Q5;(a) Q1 OM/XPL, (b) Q1 OM/PPL; (c) Q4 OM/XPL, (d) Q4 OM/PPL; (e) Q5 OM/XPL, (f) Q5 OM/PPL.



Obr. 10. Mikrofotografie horninových výbrusů křemenné metadroby (Q7), kvarcitu (Q8) a pegmatitového křemene (Q9); (a) Q7-B OM/XPL, (b) Q7-B OM/PPL; (c) Q8 OM/XPL, (d) Q8 OM/PPL; (e) Q9 OM/XPL, (f) Q9 OM/PPL.

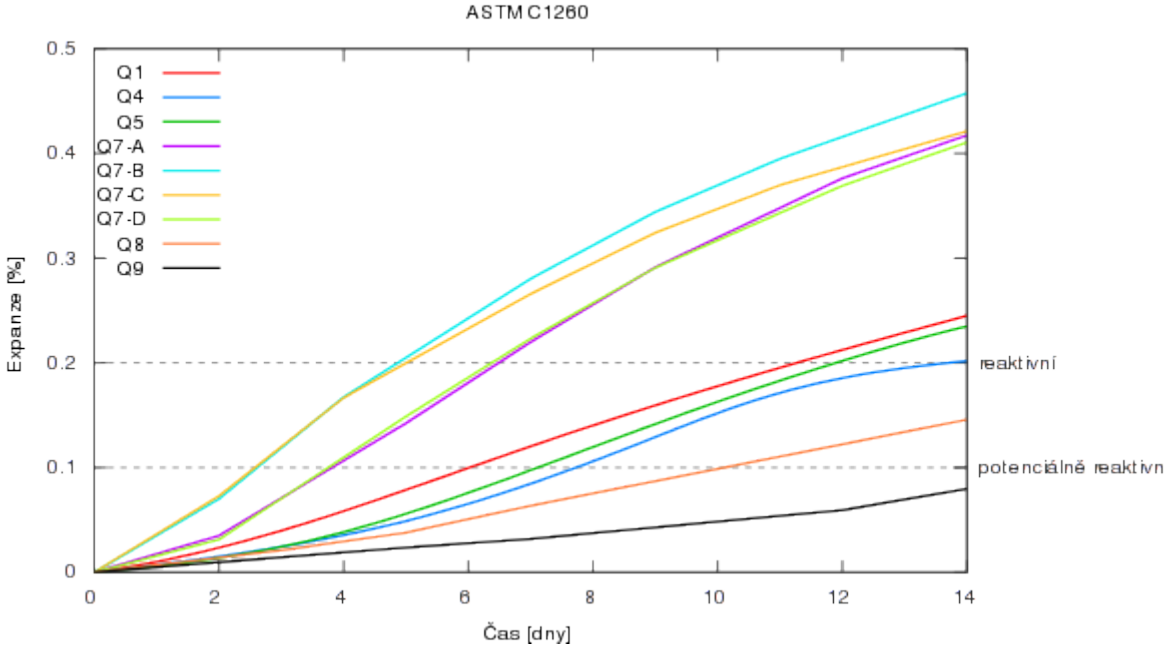
5.2 Dilatometrické zkoušky

5.2.1 Výsledky zkoušky ASTM C1260

Výsledky měření ze všech zkušebních maltových trámců jsou uvedeny v Příl. II. Hodnoty konečných expanzí dosažených poslendního 14. dne měření jsou uvedeny v tabulce Tab. 5. Jedná se o průměrné hodnoty ze všech měřených trámců z téhož kameniva zaokrouhlené na 0.001 %. Naměřené hodnoty se pohybovaly v rozmezí 0.080 % až 0.457 %. Dle klasifikačních kritérií zkoušky ASTM C1260 lze pouze jeden vzorek, Q9, označit jako nereaktivní. Vzorek Q8 lze označit za potenciálně reaktivní. Všechny ostatní vzorky překročily hranici 0.2 % délkové změny a lze je považovat za reaktivní. Vývoj expanze u jednotlivých vzorků je zobrazen pomocí expanzních křivek na Obr. 11.

Tab. 5. Hodnoty konečných expanzí ze zkoušky ASTM C1260.

Vzorek	Q1	Q4	Q5	Q7-A	Q7-B	Q7-C	Q7-D	Q8	Q9
Expanze [%]	0.245	0.202	0.235	0.417	0.457	0.421	0.411	0.146	0.080



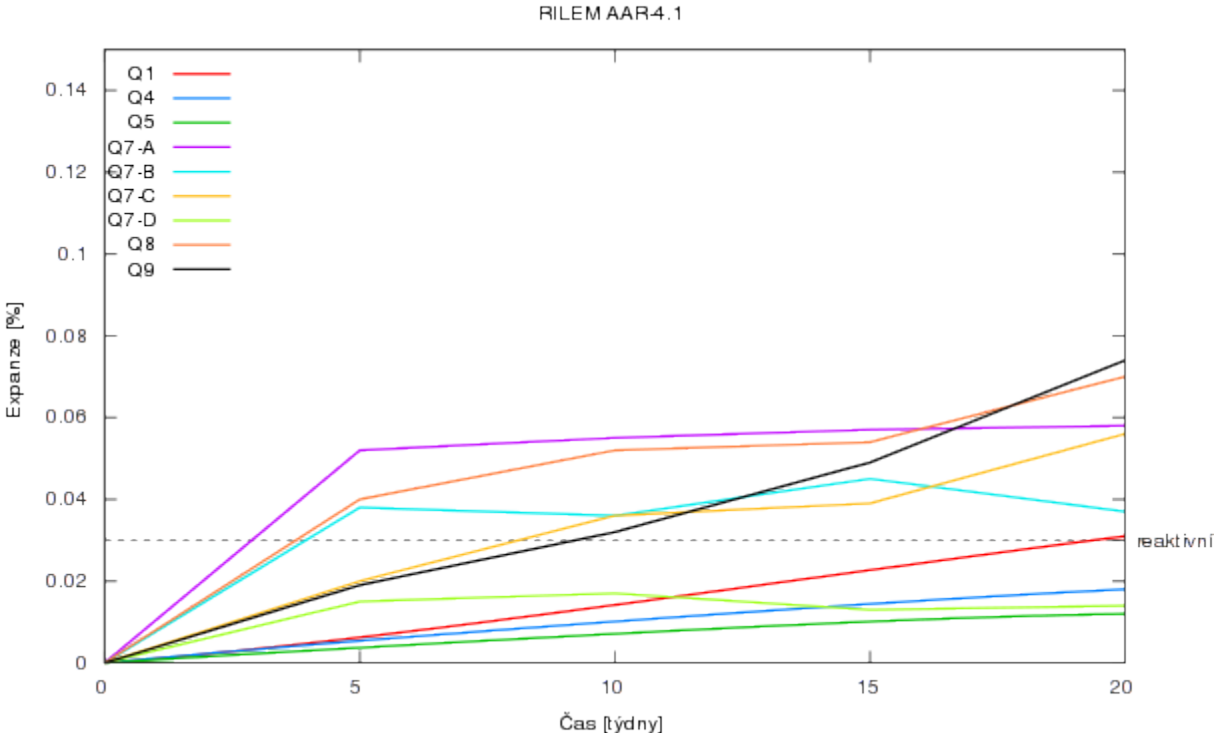
Obr. 11. Expanzní křivky studovaného kameniva ze zkoušky ASTM C1260.

5.2.2 Výsledky zkoušky RILEM AAR-4.1

Výsledky měření zkušebních betonových trámců jsou uvedeny v Příl. III-a. Hodnoty konečných expanzí dosažených po 20 týdnech měření jsou uvedeny v tabulce Tab. 6. Naměřené hodnoty se pohybovaly v rozmezí 0.012 % až 0.074 %. Dle klasifikačních kritérií zkoušky RILEM AAR-4.1 4 vzorky, Q1, Q4, Q5, Q7-D, nepřekročily hranici 0.030 % délkové změny po 15 týdnech měření, která představuje hranici nereaktivního a reaktivního kameniva. Vzorek Q1 ve 20. týdnu překročil hranici 0.030 % délkové změny a nelze jej tedy považovat za nereaktivní. Po 20. týdnu měření se jeví jako nereaktivní 3 vzorky (Q4, Q5, Q7-D) a zbylých 6 vzorků jako reaktivní. Vývoj expanze u jednotlivých vzorků je zobrazen pomocí expanzních křivek na Obr. 12.

Tab. 6. Hodnoty konečných expanzí ze zkoušky RILEM AAR-4.1.

Vzorek	Q1	Q4	Q5	Q7-A	Q7-B	Q7-C	Q7-D	Q8	Q9
Expanze [%]	0.031	0.018	0.012	0.058	0.037	0.056	0.014	0.070	0.074



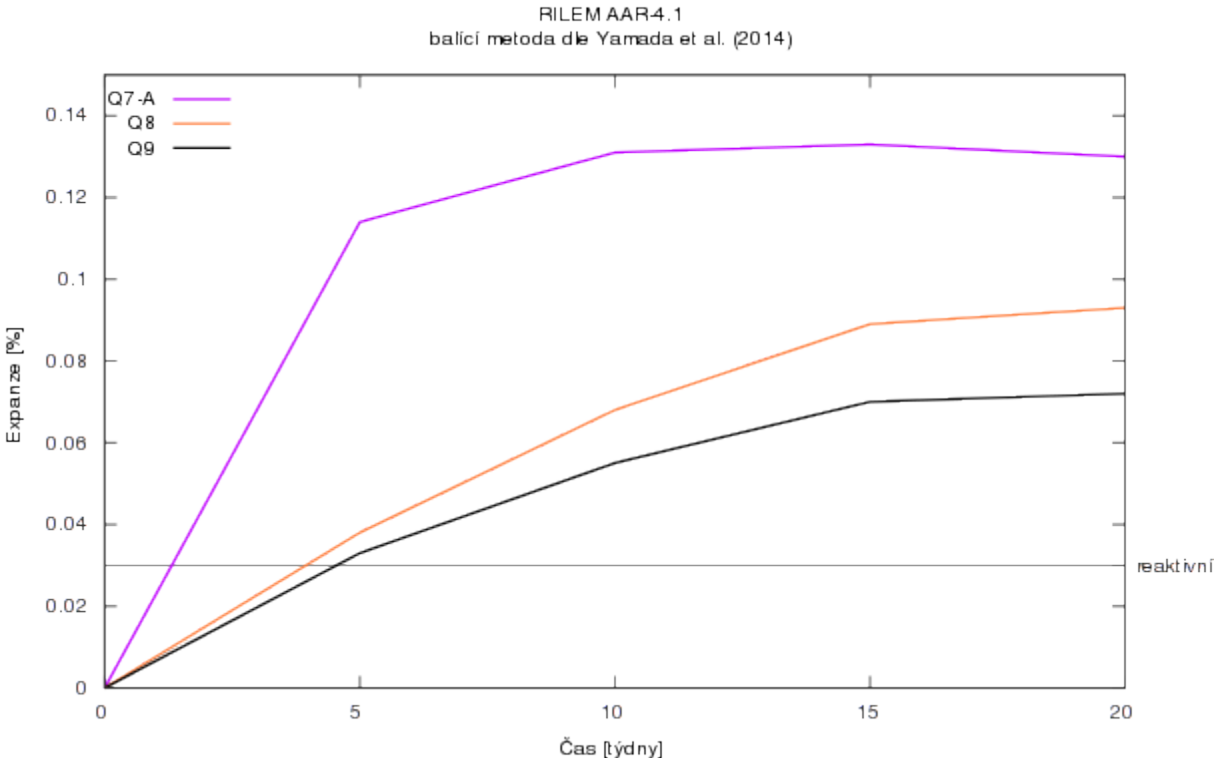
Obr. 12. Expanzní křivky studovaného kameniva ze zkoušky RILEM AAR-4.1.

5.2.3 Výsledky zkoušky RILEM AAR-4.1 balící metoda dle Yamada et al. (2014)

Výsledky měření zkušebních betonových trámců dle upravené balící metody jsou uvedeny v Příl. III-b. Hodnoty konečných expanzí dosažených po 20 týdnech měření jsou uvedeny v tabulce Tab. 7. Naměřené hodnoty se pohybovaly v rozmezí 0.072 % až 0.130 %. Dle klasifikačních kritérií zkoušky RILEM AAR-4.1 všechny testované vzorky překročily hranici 0.030 % délkové změny po 15 i 20 týdnech měření, která představuje hranici nereaktivního a reaktivního kameniva. Na základě tohoto kritéria mohou být všechny vzorky považovány za reaktivní. Vývoj expanze u jednotlivých vzorků je zobrazen pomocí expanzních křivek na Obr. 13.

Tab. 7. Hodnoty konečných expanzí ze zkoušky RILEM AAR-4.1 balící metoda dle Yamada et al. (2014)

Vzorek	Q7	Q8	Q9
Expanze [%]	0.130	0.093	0.072

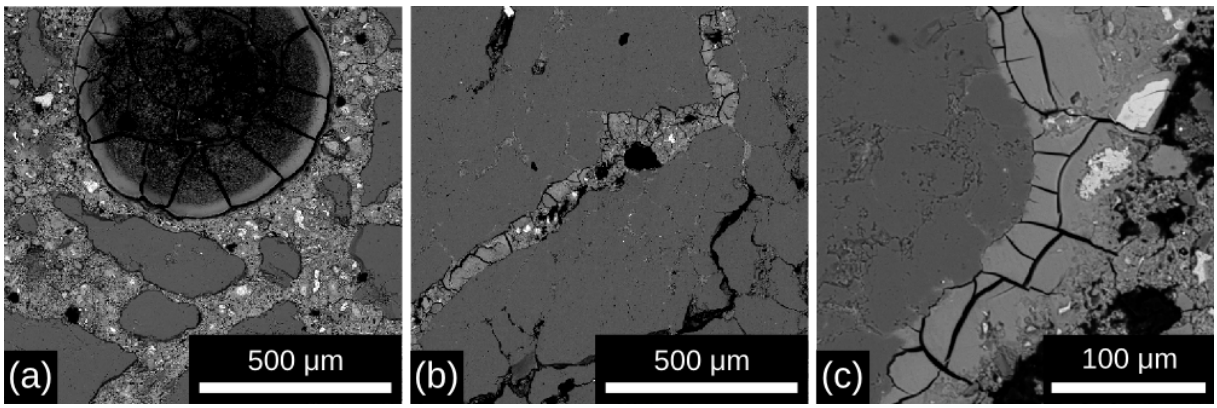


Obr. 13. Expanzní křivky studovaného kameniva ze zkoušky RILEM AAR-4.1 balící metoda dle Yamada et al. (2014).

5.3 SEM

5.3.1 Projevy ASR v maltových a betonových trámcích

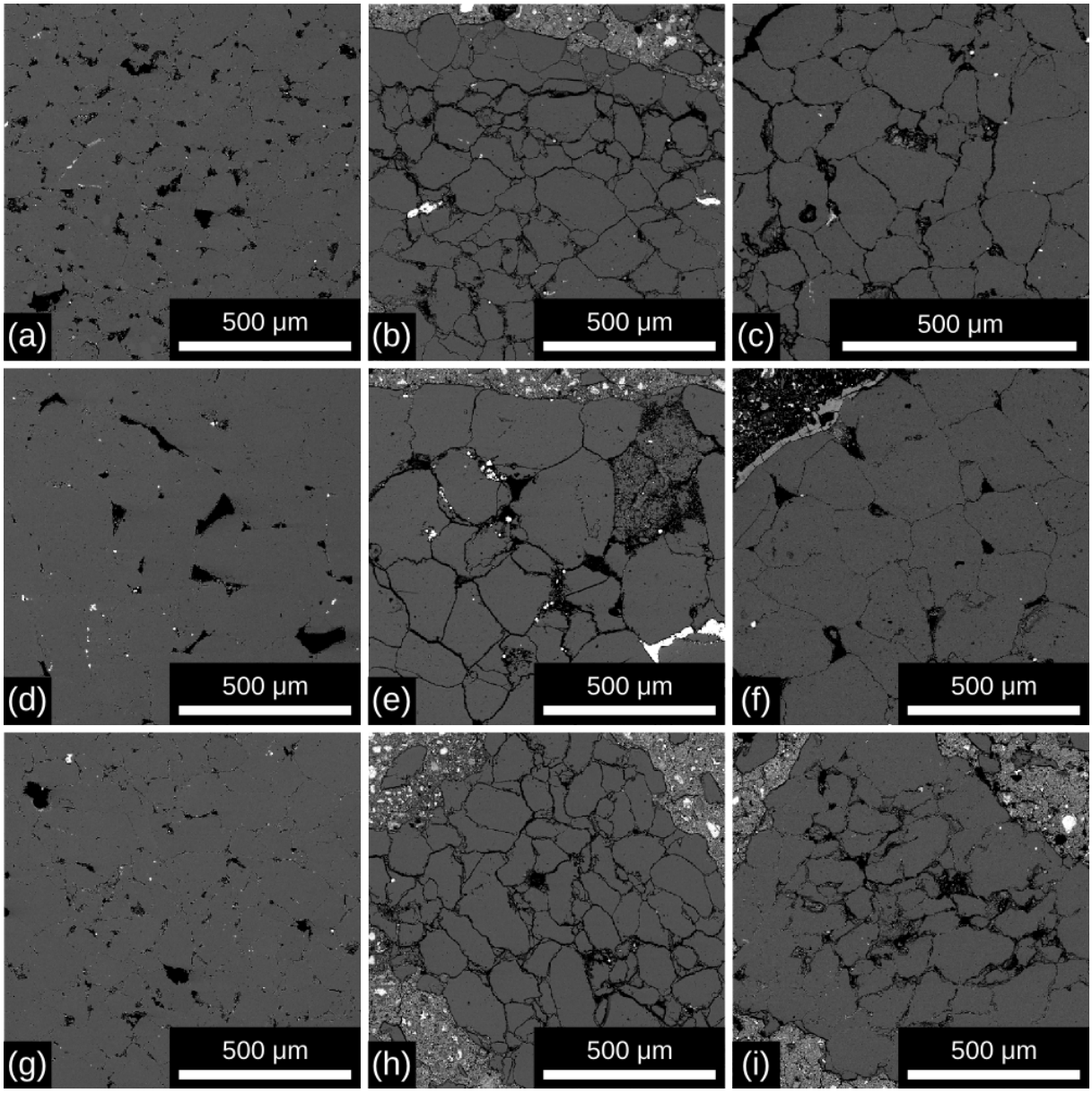
SEM byla použita ke studiu projevů a produktů ASR v trámcích ze zkoušek ASTM C1260 a RILEM AAR-4.1. V nábrusech z těchto maltových a betonových trámců byly z projevů ASR identifikovány alkalicko-silikátové gely (vyplňující póry, v trhlinách kameniva či na hranici cement-kamenivo), rozšíření přirozených geologických trhlin, rozpouštění rozsáhlých partií úlomků kameniva a trhliny prostupující cementovou pastou i kamenivem. Nejčastější místa výskytu alkalicko-silikátových gelů ukazuje obrázek Obr. 14.



Obr. 14. Nejčastější místa výskytu alkalicko-silikátových gelů v maltových a betonových trámcích, SEM/BSE smínky; (a) gelový lem póru (Q7-A, ASTM C1260), (b) trhlina v kamenivu vyplněná gelem (Q7-D, RILEM AAR-4.1), (c) gel na hranici kamenivo-cement (Q7-D, RILEM AAR-4.1).

Na obrázcích Obr. 15. a Obr. 16 jsou zobrazeny SEM/BSE snímky zkoumaných horninových typů. V řadě se postupně zleva doprava nachází snímek z horninového výbrusu nepoškozený ASR, snímek kameniva postiženého ASR z maltového trámce ze zkoušky ASTM C1260 a snímek kameniva postiženého ASR z betonového trámce ze zkoušky RILEM AAR-4.1.

U křemenců Q1, Q4 a Q5 je viditelný specifický “rozpouštěcí” vzor na povrchu kameniva v maltových trámcích (prostřední snímky na Obr. 15). V důsledku působení vysoce zásaditého prostředí zkoušky ASTM C1260 došlo k rozpuštění kryptokrystalické matrix obklopující zrna křemene. Tento “rozpouštěcí” vzor je patrný i na snímcích betonových trámců, ale není tak silně rozvinut. Na snímcích je znatelná mírně větší zrnitost křemence Q4 oproti křemencům Q1 a Q5, které pocházejí ze sblížených lokalit (ordovické křemence).

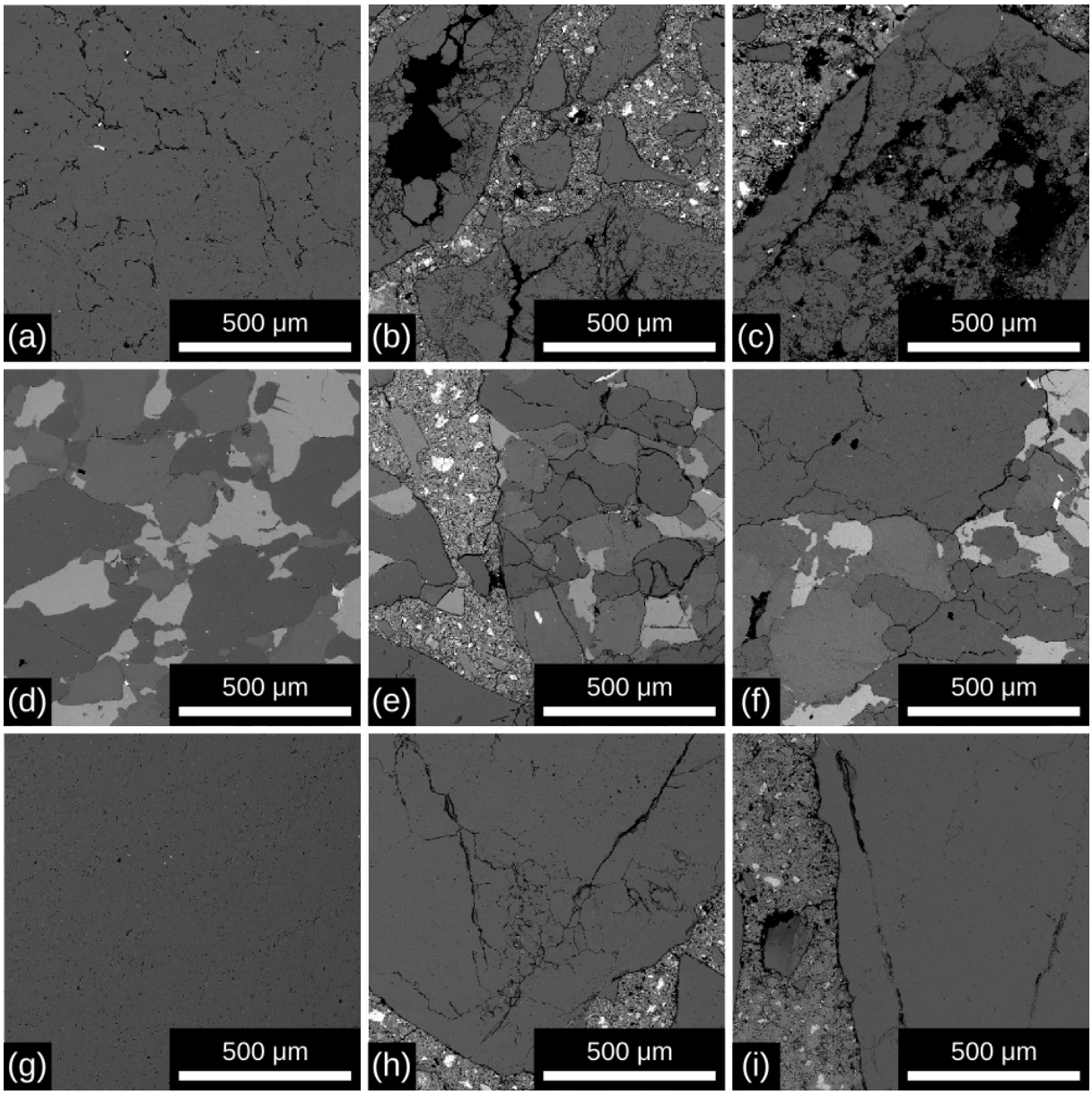


Obr. 15. SEM/BSE snímky kameniva Q1, Q4, Q5. (a) Q1 hor., (b) Q1 astm., (c) Q1 rilem., (d) Q4 hor., (e) Q4 astm., (f) Q4 rilem., (g) Q5 hor., (h) Q5 astm., (g) Q5 rilem. Vysvětlivky: hor. - horninový výbrus, astm.- ASTM C1260, rilem.- RILEM AAR-4.1.

U křemenné metadroby (Q7) docházelo v maltových i betonových trámcích k rozsáhlému rozpouštění partií kryptokrystalické matrix. Zastoupení matrix u vzorku Q7 činí až 25 obj. %. Poškození kameniva ASR v trámcích ze zkoušky ASTM C1260 bylo rozsáhlejší než u zkoušky RILEM AAR-4.1. V maltových trámcích z kameniva Q7 se místy nacházely zcela rozpuštěné úlomky kameniva a velké množství alkalicko-silikátových gelů převážně v pórech a dutinách.

Na snímcích kvarcitu (Q8) je patrné, že většina poškození kameniva vlivem ASR je situována v křemenných partiích, podél hranice zrn křemene a na hranicích s ostatními minerály. ASR se na kvarcitu (Q8) projevuje především konturací a rozšiřováním hranice zrn a geologických trhlin. Drobné

poškození je viditelné i na zrnech K-živce a plagioklasu v porovnání s neporušeným horninovým vzorkem. Také na pegmatitovém křemeni (Q9) jsou viditelné znaky působení ASR. ASR se projevuje v rozšiřováním geologických trhlin a tvorbou tenkých trhlinek pravděpodobně v místech křemenných subzrn.



Obr. 16. SEM/BSE snímky kameniva Q7, Q8, Q9. (a) Q7-D hor., (b) Q7-D astm., (c) Q7-D rilem., (d) Q8 hor., (e) Q8 astm., (f) Q8 rilem., (g) Q9 hor., (h) Q9 astm., (g) Q9 rilem. Vysvětlivky: hor. - horninový výbrus, astm.- ASTM C1260, rilem.- RILEM AAR-4.1.

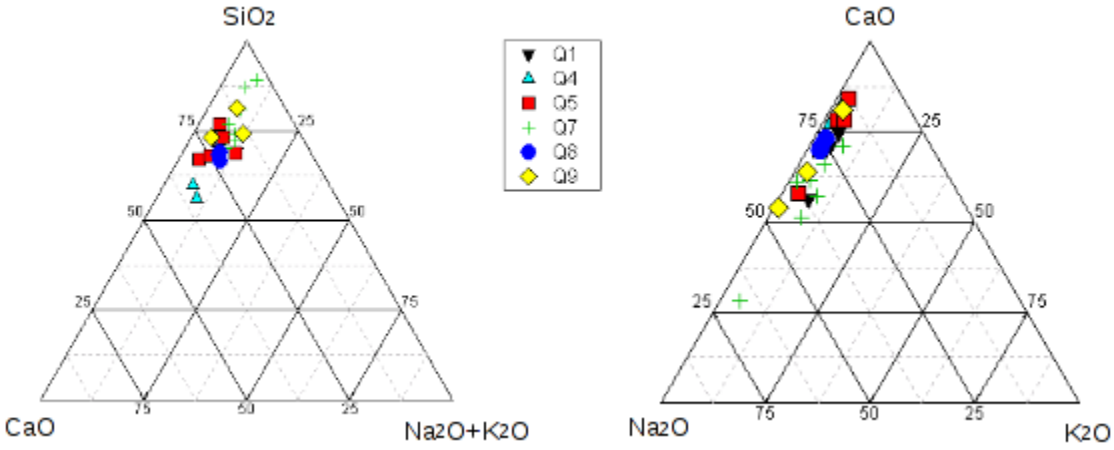
Ve všech studovaných nábrusech ze zkoušek ASTM C1260 a RILEM AAR-4.1 byly nalezeny znaky poškození kameniva ASR a alkalicko-silikátové gely, v různé míře úměrně reaktivnosti konkrétního kameniva. Projevy ASR byly u maltových trámců objemově rozsáhlejší než u betonových trámců, ale nelišily se svým charakterem. Výraznou odlišností maltových a betonových trámců byla především lokalizace alkalicko-silikátových gelů v trámcích. V maltových trámcích ze zkoušky ASTM C1260 se alkalicko-silikátové gely vyskytovaly nejvíce v okolí a v prostoru pórů a v rozšířených rozpouštěcích a geologických trhlinách v kamenivu. V betonových trámcích ze zkoušky RILEM AAR-4.1 se vyskytovalo velké množství alkalicko-silikátových gelů na hranici cement-kamenivo, v trhlinách v kamenivu, a méně v pórech.

5.3.2 Chemické složení alkalicko-silikátových gelů

Pomocí SEM/EDS detektoru bylo zkoumáno chemické složení alkalicko-silikátových gelů nacházejících se v nábrusech trámců ze zkoušek ASTM C1260 a RILEM AAR-4.1. Kompletní chemické analýzy jsou k nahlédnutí v Příl. IV. Statistické zhodnocení chemického složení gelů (minimum, maximum, medián, první a třetí kvartil, směrodatná odchylka) ze zkoušky ASTM C1260 přehledně uvádí v hm. % Tab. 8. Celková suma gelů se pohybovala v rozmezí 67.77-89.49 hm. %. Hlavní složky gelů vyjádřené ve formě oxidů tvoří SiO_2 38.86-70.29 hm. %, CaO 2.38-25.40 hm. %, Na_2O 3.04-10.48 hm. % a v menším zastoupení od 0.02-6.14 hm. % oxidy K_2O, MgO, Al_2O_3, FeO a SO_3. Vzájemný poměr hlavních složek názorně ilustrují trojúhelníkové diagramy SiO_2-CaO-Na_2O+K_2O a CaO-Na_2O-K_2O na Obr. 17. Po přepočtení hm. % oxidů na hm. % prvku lze vypočítat molární poměry prvků Ca/Si, Na/Si, (Na+K)/Si, (Ca+Mg)/Si. Statistické hodnoty těchto molárních poměrů se nachází v Tab. 9. Podrobná data ke každé analýze jsou v Příl. V-a. Stanovené molární poměry (Na+K)/Si, (Ca+Mg)/Si slouží k porovnání alkalicko-silikátových gelů z maltových trámců se složením alkalicko-silikátových gelů analyzovanými Hou et al. (2005) na reálných konstrukcích. Gely v reálných konstrukcích měly složení (Na+K)/Si = 0.1-1.2 a (Ca+Mg)/Si = 0.0-0.2.

Tab. 8. Statistické zhodnocení chemického složení alkalicko-silikátových gelů v hm. % ze zkoušky ASTM C1260. Vysvětlivky: σ – směrodatná odchylka.

	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	SO_3	K_2O	FeO	CaO	Total
minimum	3.04	0.16	0.02	38.86	0.10	0.23	0.16	2.38	67.77
maximum	10.48	6.14	1.32	70.29	0.73	1.57	0.16	25.40	89.46
1. kvartil	4.33	0.66	0.17	52.37	0.23	0.51	0.16	12.51	76.42
medián	5.81	0.87	0.26	56.11	0.38	0.77	0.16	15.07	79.06
3. kvartil	7.21	1.44	0.44	60.60	0.52	1.06	0.16	18.11	82.86
σ	2.12	1.43	0.37	7.41	0.23	0.40	-	5.24	5.49



Obr. 17. Grafické znázornění chemického složení gelů ze zkoušky ASTM C1260, vlevo: diagram SiO_2-CaO-Na_2O+K_2O, vpravo: diagram CaO-Na_2O-K_2O.

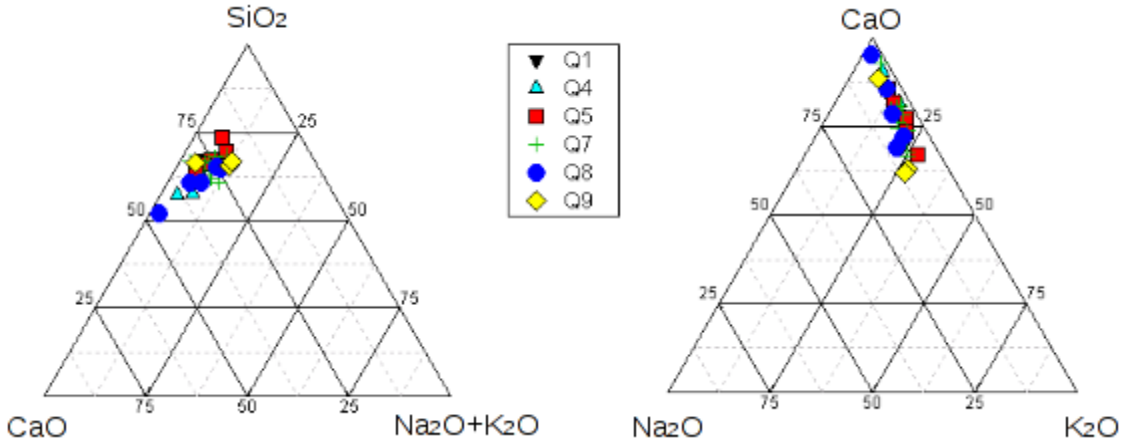
Tab. 9. Statistické zhodnocení chemického složení alkalicko-silikátových gelů ze zkoušky ASTM C1260 vyjádřené pomocí molárních poměrů. Vysvětlivky: σ – směrodatná odchylka.

	Ca/Si	Na/Si	(Na+K)/Si	(Ca+Mg)/Si
minimum	0.04	0.05	0.06	0.05
maximum	0.66	0.18	0.19	0.70
1. kvartil	0.23	0.08	0.08	0.26
medián	0.29	0.10	0.11	0.32
3. kvartil	0.36	0.13	0.14	0.44
σ	0.14	0.04	0.04	0.16
Hou et al. (2005)			0.1-1.2	0.0-0.2

Statistické zhodnocení chemického složení gelů ze zkoušky RILEM AAR-4.1 uvádí v hm. % Tab. 10. Celková suma gelů se pohybovala v rozmezí 75.30-93.71 hm. %. Hlavní složky gelů vyjádřené ve formě oxidů tvoří SiO_2 41.96-60.28 hm. %, CaO 14.46-36.75 hm. %, K_2O 0.81-8.09 hm. % a v menším zastoupení od 0.02-1.84 hm. % oxidy Na_2O, MgO, Al_2O_3, FeO a SO_3. Vzájemný poměr hlavních složek názorně ilustrují trojúhelníkové diagramy SiO_2-CaO-Na_2O+K_2O a CaO-Na_2O-K_2O na Obr. 18. Po přepočtení hm. % oxidů na hm. % prvku lze vypočítat molární poměry prvků Ca/Si, Na/Si, (Na+K)/Si, (Ca+Mg)/Si. Statistické hodnoty těchto poměrů se nachází v Tab. 11. Podrobná data ke každé analýze jsou v Příl. V-b.

Tab. 10. Statistické zhodnocení chemického složení alkalicko-silikátových gelů v hm. % ze zkoušky RILEM AAR-4.1. Vysvětlivky: σ – směrodatná odchylka.

	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	SO_3	K_2O	FeO	CaO	Total
minimum	0.45	0.07	0.02	41.96	0.84	0.81	14.46	0.12	75.30
maximum	3.39	1.84	1.78	60.28	0.84	8.09	36.75	1.18	93.71
1. kvartil	1.00	0.14	0.07	50.89	0.84	4.06	19.66	0.17	79.75
medián	1.25	0.35	0.11	53.15	0.84	5.13	22.56	0.34	83.51
3. kvartil	1.90	0.77	0.46	55.54	0.84	6.33	25.47	0.39	85.64
σ	0.71	0.50	0.58	4.30	-	1.85	4.59	0.36	4.03



Obr. 18. Grafické znázornění chemického složení gelů ze zkoušky RILEM AAR-4.1, vlevo: diagram SiO_2-CaO-Na_2O+K_2O, vpravo: diagram CaO-Na_2O-K_2O.

Tab. 11. Statistické zhodnocení chemického složení alkalicko-silikátových gelů ze zkoušky RILEM AAR-4.1 vyjádřené pomocí molárních poměrů. Vysvětlivky: σ – směrodatná odchylka.

	Ca/Si	Na/Si	(Na+K)/Si	(Ca+Mg)/Si
minimum	0.28	0.01	0.03	0.29
maximum	0.95	0.06	0.15	0.99
1. kvartil	0.39	0.02	0.07	0.39
medián	0.46	0.02	0.09	0.46
3. kvartil	0.54	0.03	0.11	0.55
σ	0.14	0.01	0.03	0.15
Hou et al. (2005)			0.1-1.2	0.0-0.2

5.4 AO

Výsledky AO provedené na snímcích maltových trámců se nacházejí v tabulce Tab. 12. Kompletní data k AO všech vzorků jsou k nahlédnutí v Příl. VI. Obsah kameniva v maltových trámcích se pohyboval v rozmezí 42-60 obj. %, cementu 35-54 obj. %, pórů 2.3-4.5 obj. % (z toho prázdných pórů 1.5-3.4 obj. % a pórů obsahujících alkalicko-silikátové gely 0.2-1.6 obj. %) a gelů 0.0-0.1 obj. %. Projevy ASR na kamenivu v nábrusu nabývaly hodnot v rozmezí 0.7-8.1 obj. %. Do výsledků AO nebyl zahrnut vzorek Q7-A, neboť při zkoumání snímků pomocí SEM byla odhalena významná heterogenita nábrusu maltového trámce.

Tab. 12. Výsledky AO provedené na trámcích ze zkoušky ASTM C1260.

[obj. %]	Q1	Q4	Q5	Q7-B	Q7-C	Q7-D	Q8	Q9
Kamenivo	52.0	54.9	58.8	60.7	55.0	52.3	57.6	42.5
Cement	43.8	42.8	37.3	35.4	42.1	43.2	39.6	55.0
Póry prázdné	3.4	2.1	2.6	2.6	1.5	2.9	2.4	2.2
Póry s gely	0.7	0.2	1.3	1.2	1.4	1.6	0.3	0.3
Gely	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0
Celkem	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Projevy ASR	0.7	1.9	5.0	8.1	6.3	7.9	3.6	2.0

V případě vzorku Q8, kvarcit bohatý K-živcem, byla vedle standardní AO zpracována také její alternativní verze, která zohledňuje modální složení horniny a vyjadřuje náchylnost minerálů k ASR. Modální složení kvarcitu Q8 se skládá ze 44.7 obj. % křemene, 28.7 obj. % plagioklasu, 26.2 obj. % K-živce a pouze 0.3 obj. % biotitu a 0.2 obj. % muskovitu. Modální složení a výsledky AO jsou uvedeny v tabulce Tab. 13. Data použitá pro výpočet modálního složení i AO jsou k nahlédnutí v Příl. VII. Celkové projevy ASR dosáhly hodnoty 2.4 obj. %, na které se z 61 % podílel křemen, 34 % plagioklas, 4 % K-živec a pouze 0.2 % připadaly muskovitu. Hodnotu příspěvku biotitu k ASR nebylo možné určit. Hodnota geologických trhlin biotitu v horninovém výbrusu byla větší než jeho měřitelné projevy ASR v maltovém trámci. Je to dáno především štěpností slíd a jejich orientací v preparátech. Snímky zachycující krystaly slíd ve směru kolmém k ose c nezachytily geologické trhliny, ale štepnost, která při vyhodnocování AO přináší nadhodnocené či zavádějící údaje o geologických trhlinách či projevech ASR.

Tab. 13. Výsledky alternativní AO vzorku Q8, modální složení vzorku Q8.

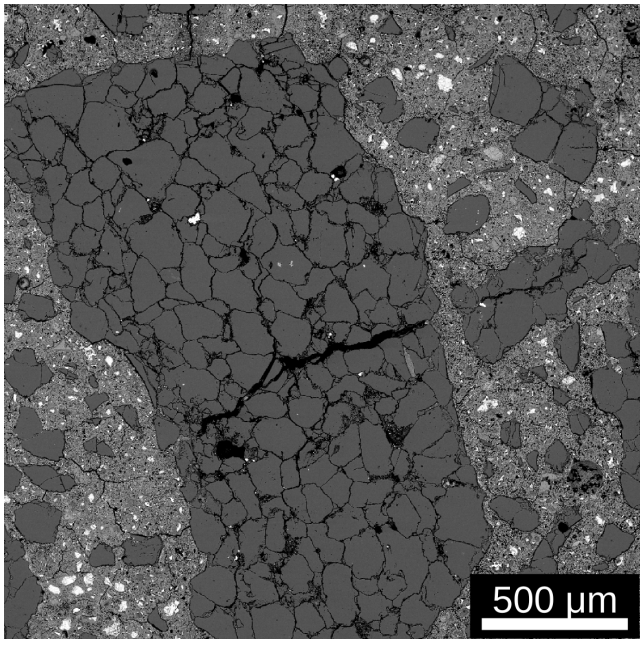
	Projevy ASR [obj. %]	Modální složení [obj. %]	Vážený průměr projevů ASR [obj. %]	Podíl minerálu na ASR [%]
Křemen	3.3	44.7	1.5	61.3
Plagioklas	2.9	28.7	0.8	34.2
K-živec	0.4	26.2	0.1	4.3
Biotit	-	0.3	0.0	0.0
Muskovit	3.0	0.2	0.0	0.2
celkem	9.6	100.0	2.4	100.0

6. DISKUSE

6.1 Zhodnocení výsledků dilatometrických zkoušek

Z výsledků zkoušky ASTM C1260 vyplývá, že nejvyšší reaktivitu 0.411-0.457 % vykazovala křemenná metadroba a všechny její testované vzorky (Q7-A, B, C, D). Další skupinu reaktivních hornin představují ordovické a křídové křemence (Q1, Q4, Q5), které nabývaly hodnot expanze 0.202-0.245 %. Po nich následuje kvarcit bohatý K-živcem (Q8) o expanzi 0.146 % a nejnižší hodnoty dosáhl pegmatitový křemen (Q9) s hodnotou expanze 0.080 %.

Křemenná metadroba (Q7) je vzorkem s největším obsahem kryprokrystalické křemenné matrix (cca 25 obj. %) ze všech testovaných hornin. Právě vysoký obsah kryptokrystalických křemenných hmot je původcem vysoké reaktivity a expanze (Wigum 1995, Lindgård et al. 2010). Rozdíly v hodnotách expanze mezi křemenci (Q1, Q4, Q5) jsou způsobeny rozdílnou zrnitostí a obsahem kryprokrystalické matrix. Křemenec Q1 o nejvyšší hodnotě expanze 0.245 % má vyšší obsah kryprokrystalické matrix a je celkově jemnozrnnější než křemence Q4 a Q5, které jsou si svou zrnitostí velmi blízké. Svou roli v reaktivitě křemenců může hrát spolu s podílem kryprokrystalické matrix také přítomnost drobných krystalků muskovitu. Vyšší reaktivnost pískovců s obsahem kryprokrystalické matrix, slíd a mikroskopických jílových minerálů popisují ve své práci Broekmans a Jansen (1998). Rozpouštění matrix je patrné také na snímcích z elektronového mikroskopu viz Obr. 19. Roztoky o vysokém pH rozpouští nejprve tmel obklopující zrna křemene a dochází ke vzniku specifických vzorů na úlomcích křemenců. Úlomky křemence se po rozpuštění tmelu stávájí snadno přístupné pro prostupování zásaditých roztoků do vnitřních partií úlomků a jejich působení na křemenná zrna (Ponce a Batic 2006). Toto měření potvrzuje výsledky ze zkoušky ASTM C1260 získané Kuchařovou et al. (2016) na křemencích z téže lokality. Vyšší reaktivitu křemence Q1 proti křemencům Q4 a Q5 potvrzuje také výsledek zkoušky RILEM AAR-4.1. Křemence dosáhly hodnot expanze 0.012-0.031 %, nejvyšší hodnota 0.031 % náleží křemenci Q1.

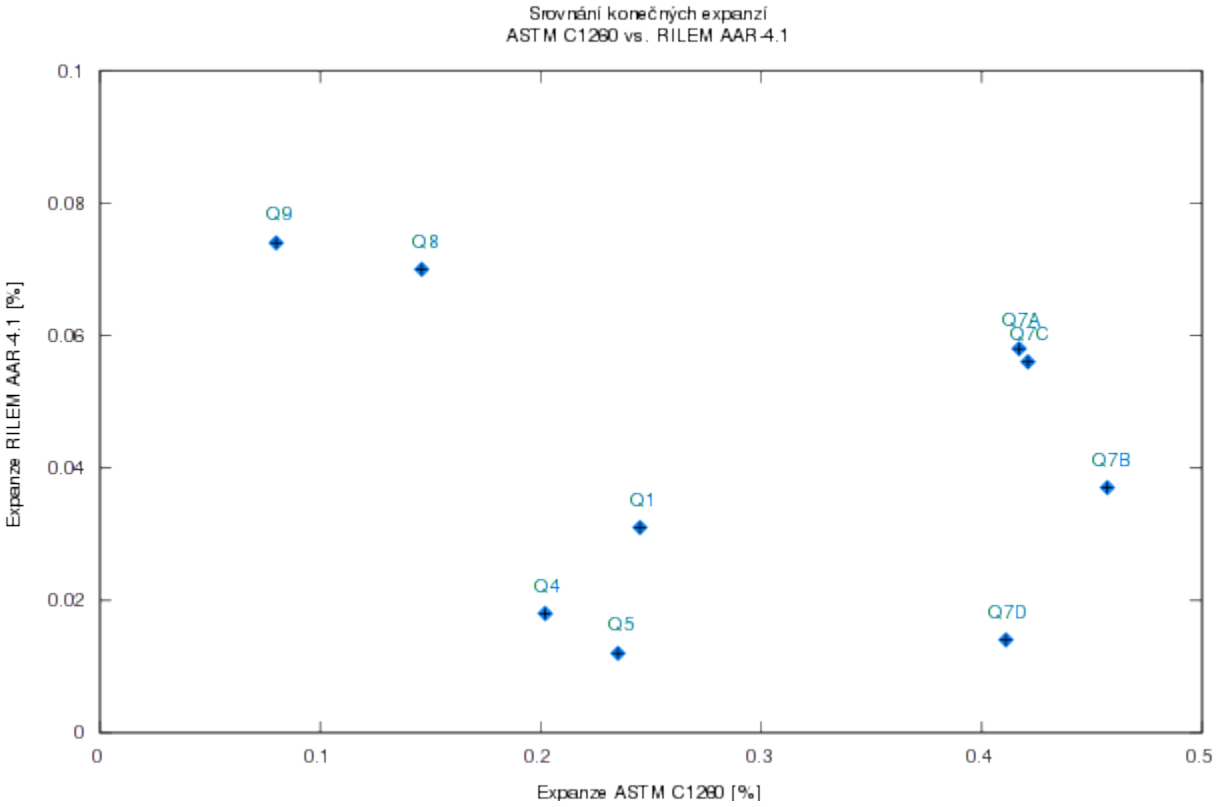


Obr. 19. Vzory rozpouštění na úlomku křemence Q5, SEM/BSE snímek ze zkoušky ASTM C1260.

Přestože je kvarcit bohatý K-živcem (Q8) horninou s nejmenším obsahem křemene (61 %), nevykazuje nejnižší expanzi. Hornina nese znaky nízce až středně teplotní dynamické rekrystalizace (undulózní zhášení, bulging, tvorba subzrn a jejich rotace) (Passchier a Trouw 2005). Poruchy krystalové mřížky a deformace křemenných zrn zvyšují rozpustnost křemene a podléhají ASR více nežli zrna nedotčená, neporušená (Broekmans 2004, Locati et al. 2010b). V simulovaném prostředí ASR dochází ke katalytickému působení dalších minerálů jako je muskovit, jílové minerály či živce. Během ASR dochází k uvolňování alkálií z živců a tak k zesílení škodlivého účinku ASR (Bérubé a Fournier 2004, Wang et al. 2008, Locati et al. 2010a, Hasdemir et al. 2012). Boles a Johnson (1983) provedli experimenty které ukazují, že jemně mletý muskovit rozptýlený ve vodě ovlivňuje pH roztoku více než biotit. Dochází k uvolňování H^+ iontů do roztoku a také k jejich absorbci. V obou případech dochází ke změnám pH. Rozpouštění plagioklasu i K-živce v kvarcitu během ASR potvrdila i alternativní AO, která zohledňuje stav nepoškozené horniny a kameniva poškozeného ASR (viz Tab. 13).

Podle výsledků zkoušky ASTM C1260 lze považovat pegmatitový křemen (Q9) za nereaktivní nebo za pomalu reagující. Avšak hodnota expanze 0.080 % je poměrně vysoká. Pro srovnání uvádím diplomovou práci Seidlové (2010), která testovala reaktivitu vulkanických hornin k ASR a mezi studovanými horninami bylo 14 vzorků bazaltu, jejichž expanze ve zkoušce ASTM C1260 se pohybovala v rozmezí 0.002-0.050 % a průměrná hodnota expanze činila 0.014 %. Bazalt je považován za horninu s nízkou reaktivitou k ASR dle TP 137 (2015). Shayan (2007) doporučuje snížení limitu zkoušky ASTM C1260 z 0.10 % na 0.080 % pro potvrzení pomalu reagujícího kameniva. V případě pegmatitového křemene představujícího pomalu reagující kamenivo by bylo vhodné prodloužit délku testovacího období. Alaejos et al. (2014) prodlužují testování pro pomalu reagující kamenivo na 90 dnů a jako limit užívají hodnotu 0.20 % dle předpisu zkoušky ASTM C1260. Mnozí odborníci (Shon et al. 2002, Lindgård et al. 2010, Islam 2015) doporučují prodloužit zkoušku na 28 dní a pozorovat vývoj expanzní křivky. Reaktivnost pegmatitového křemene je pravděpodobně způsobena deformací krystalové mřížky (undulózní zhášení) a rekrystalizací (zrna jemného rekrystalovaného křemene, subzrna) (Ponce a Batic 2006).

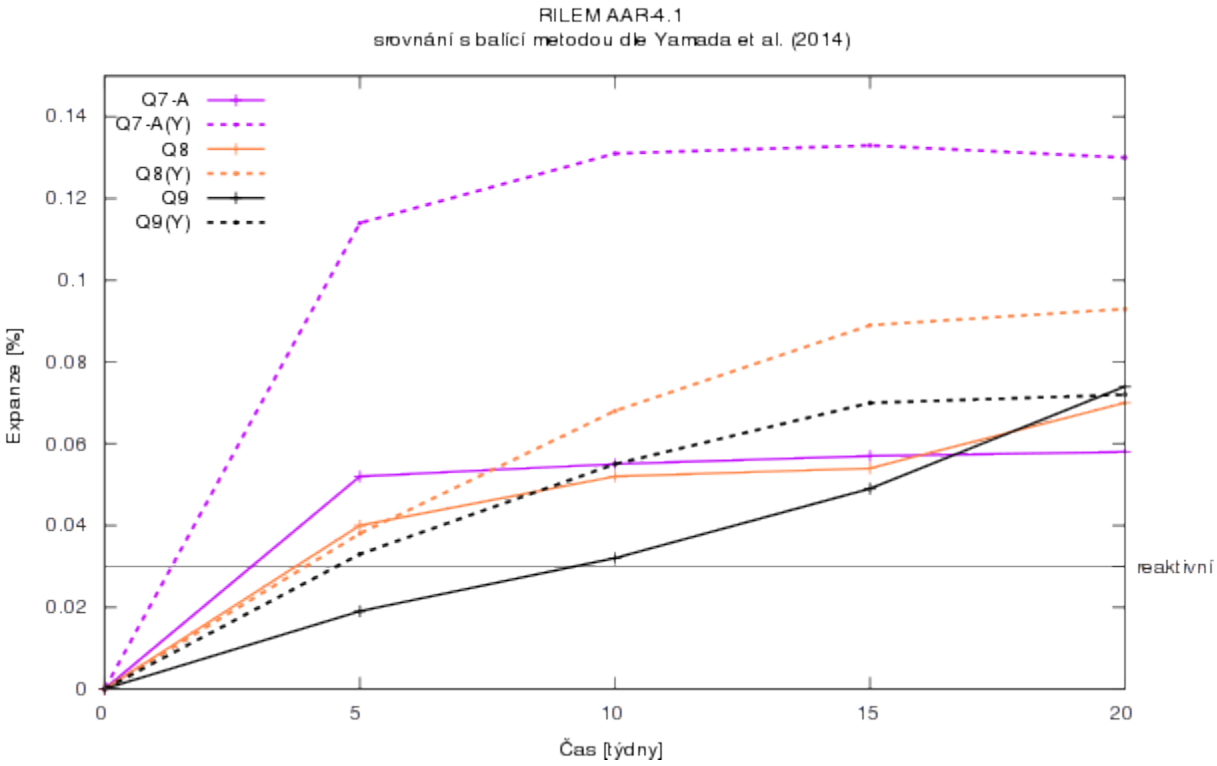
Výsledky expanzí ze zkoušky RILEM AAR-4.1 je třeba považovat pouze za orientační. Zkouška RILEM AAR-4.1 byla v rámci této diplomové práce prováděna jako doplňková a experimentální ke zkoušce ASTM C1260. Porovnání konečných expanzí dosažených ve zkoušce ASTM C1260 a RILEM AAR-4.1 je zobrazeno na Obr. 20. Stejně jako ve zkoušce ASTM C1260 dosáhl křemenec Q1 vyšší expanze než křemence Q4 a Q5. Nejvyšší hodnoty expanze ve zkoušce RILEM AAR-4.1 dosáhl pegmatitový křemen (Q9), těsně následovaný kvarcitem (Q8). Hodnoty expanze křemenné metadroby (Q7-A, B, C) dosáhly podobných hodnot. Pouze typ Q7-D se projevuje nereaktivně oproti výsledkům dosaženým ve zkoušce ASTM C1260, ve které dosáhl podobných hodnot jako vzorky Q7-A, B, C a byl klasifikován jako reaktivní.



Obr. 20. Srovnání konečných expanzí ze zkoušek ASTM C1260 a RILEM AAR-4.1.

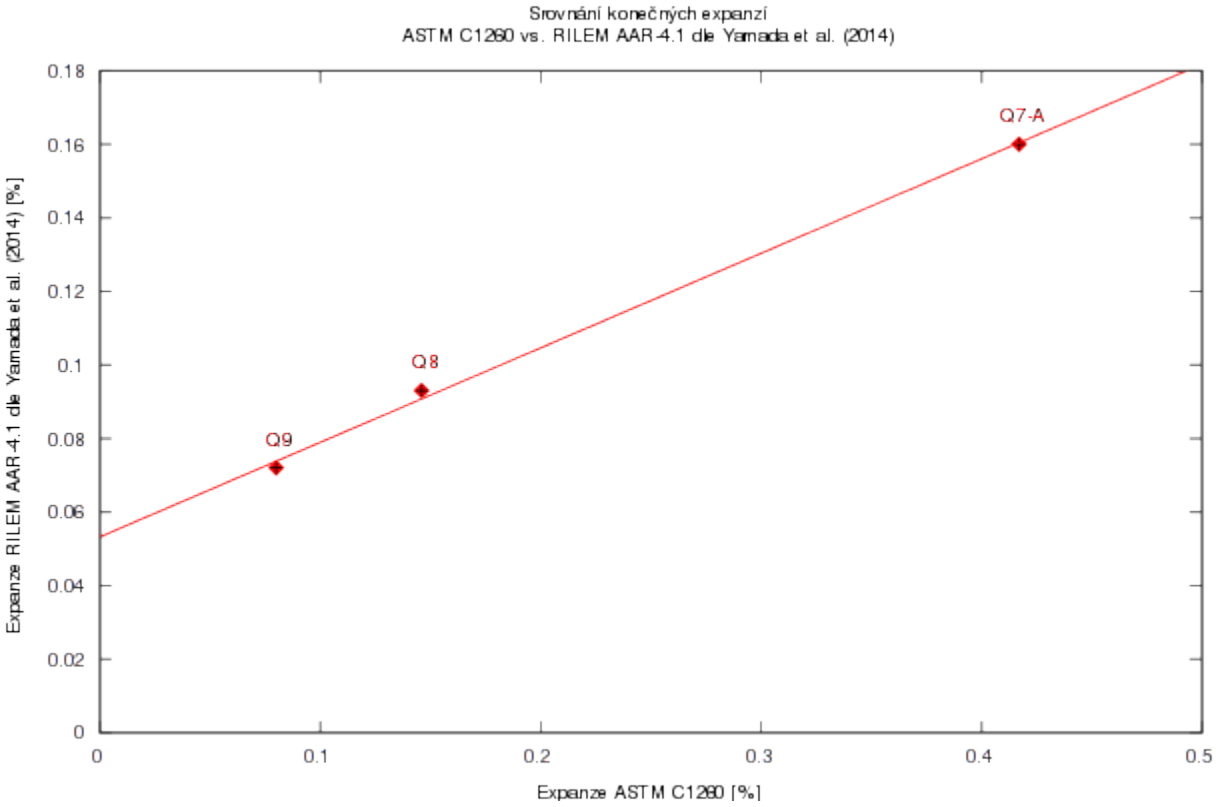
Lindgård et al. (2010) ověřovali platnost testovacích metod RILEM včetně RILEM AAR-4.1 na skupině 22 potenciálně reaktivních hornin. Vzorky hornin, které se ve zkoušce RILEM AAR-3 (roční zkouška, 38 ˚C, mlžná komora) jeví jako pomalu reagující, dosahují ve zkoušce RILEM AAR-4.1 hodnot vyšších než běžné středně reaktivní kamenivo. Toto pozorování potvrdili Ramos et al. (2016) na skupině granitoidních hornin pomocí různých dilatometrických zkoušek. Středně reaktivním (resp. pomalu reagujícím) horninám dle Lindgård et al. (2010) a Ramos et al. (2016) odpovídají vzorky Q8 a Q9. Pegmatitový křemen (Q9) dosáhl nejvyšších hodnot expanze ze všech studovaných hornin a spolu s kvarcitem (Q8) výrazně převyšují jak skupinu křemenců, tak skupinu křemenných metadrob. Křemence jsou díky přítomnosti kryptokrystalické matrix spíše rychle reaktivní, což povrzují hodnoty expanze dosažené ve zkoušce ASTM C1260 i rychlý nástup expanze (0.202-0.245 %). Pro ověření výsledků ze zkoušky RILEM AAR-4.1 je nutné otestovat větší množství betonových trámců, neboť nelze vyloučit zatížení výsledků chybou při měření či při přípravě (např. Vzorek Q7-D).

Graf na Obr. 21 ukazuje porovnání expanzních křivek vzorků Q9, Q8 a Q7-A z modifikované balící zkoušky RILEM AAR-4.1 dle Yamada et al. (2014) a jejich protějšků ze standardní RILEM AAR-4.1. Dříve platila alternativní verze RILEM AAR-4.1.



Obr. 21. Srovnání expanzních křivek ze zkoušky RILEM AAR-4.1 (rovná čára) s expanzními křivkami z balící metody dle Yamada et al. (2014). Vysvětlivky: (Y) a přerušovaná čara znamená balící metodu dle Yamada et al. (2014), rovná čára představuje standardní RILEM AAR-4.1.

Z experimentálních měření Lindgårda et al. (2013a) vyplývá, že betonové trámce zabalené do alkáliemi obohacené tkaniny dosahují hodnot expanze o 25 % vyšších než standardní RILEM AAR-4.1 nebalené trámce. Výrazné navýšení expanze a její prudký nástup u balených betonových trámců v porovnání se standardními betonovými trámci ze zkoušky RILEM AAR-4.1 je patrný z grafu na na Obr. 21. Zvýšení expanze je způsobeno tím, že obalení trámce tkaninou či papírovou utěrkou s obsahem NaOH omezuje loužení alkálií z betonového trámce. Ztráta alkálií je kritický faktor pro rozvoj expanze (Lindgårda et al. 2013a). Úbytek alkálií vede ke snížené tvorbě alkalicko-silikátových gelů v trámci a snižuje tak jeho expanzi. Při masivním úniku alkálií z betonového trámce hrozí, že výsledná expanze nemusí odpovírat reálné reaktivnosti kameniva a kamenivo může být ohodnoceno jako falešně nereaktivní. Dalším faktorem ovlivňujícím loužení alkálií z betonového trámce je namáčení čerstvě odformovaných těles do vody na 30 minut před započetím testu, jak je tomu v pokynech metody RILEM AAR-4.1. Lindgård et al. (2013a) stanovili, že v tomto kroku ztratí trámec 3-4 % alkálií. Argument, že tento krok pomáhá k dosažení dostatečné vnitřní vlhkosti trámce je nedostatečný. Větší vliv na vnitřní vlhkost má použitý vodní součinitel v receptuře. Po 30 minutách ponoření v destilované vodě nedochází k význačnějšímu nárůstu vlhkosti uvnitř trámce, avšak úbytek alkálií je zřejmý a proto Lindgårda et al. (2013a, 2013b) nedoporučují namáčení zkušebních těles nejen ve zkoušce RILEM AAR-4-1, ale ani v ostatních zkouškách zahrnujících tento krok.



Obr. 22. Srovnání konečných expanzí ze zkoušky ASTM C1260 a balící RILEM AAR-4.1 dle Yamada et al. (2014). Proloženo lineární regresí.

Balené betonové trámce dle Yamada et al. (2014) lépe korelují s hodnotami expanze dosažených ve zkoušce ASTM C1260, jak ukazuje Obr. 22, než standardní RILEM AAR-4.1. Hodnota korelačního koeficientu činí 0.999 a ilustruje dobrou korelaci hodnot expanze ze zkoušky ASTM C1260 a balené RILEM AAR-4.1 dle Yamada a kol. (2014). Tento vztah by bylo vhodné ověřit další sérií měření. Průběžná titrace vody ve zkušebním kontejneru potvrdila mírné uvolňování alkálií z betonových těles ze standardní RILEM AAR-4.1, které mohlo způsobit pokles expanze. Balení betonových trámců do papírových utěrek s obsahem NaOH pravděpodobně zpomalilo vyluhování alkálií.

6.2 Zhodnocení vlivu teploty na expanzi zkušebních těles

Vyšší teplota během testování urychluje rozvoj ASR v kratším než reálném čase (X-X0 let). Stejně jako u většiny chemických reakcí zvýšení teploty vede ke zrychlení reakce (Chatterji 2005). Zvýšení teploty se však může negativně odrazit na vyluhování alkálií z testovacích trámců. S růstem teploty dochází ke zvýšení mobility iontů v pórovém roztoku a zvyšuje se jejich difuzivita (Lindgårda et al. 2013b). Lindgård et al. (2013a) zkoumali vyluhování alkálií ze zkušebních těles ze zkoušky RILEM AAR-4.1 probíhající při teplotě 60 ˚C a RILEM AAR-3 probíhající při teplotě 38 ˚C. U obou zkoušek otestovali jak nebalené standardní verze, tak balené. Zatímco vyluhování alkálií při teplotě 60 ˚C bylo výrazné a mělo velký vliv na konečnou expanzi, u zkoušky RILEM AAR-3 bylo vyluhování nižší. Po 39 týdnech při teplotě 60 ˚C se uvolnilo 14-37 % alkálií obsažených v betonu. Pro srovnání po 112 týdnech testování při teplotě 38 ˚C se vyloužilo 10-49 % z celkového obsahu alkálií v betonu. Teplota neměla vliv na množství vyloužených alkálií v počátečním stádiu (první 4 týdny). Pravděpodobně v této době dochází ke zvýšené tvorbě alkalicko-silikátových gelů, které fixují uvolněné alkálie. Vliv teploty na vyluhování alkálií se může projevit až po delším časovém období. Lindgård et al. (2013a) shledávají vliv teploty na loužení alkálií, a tedy na redukci expanze, jako relativně nízký. Větší vliv mají faktory jako balení trámců, velikost zkušebního tělesa, charakter testovacího prostředí a namáčení trámců do destilované vody. Kim et al. (2015) provedli sérii dilatometrických zkoušek ve vlhkém prostředí při teplotách 23, 38 a 55 ˚C po dobu 130 dnů. Hodnoty expanze a trendy pro teploty 38 ˚C a 55 ˚C byl velmi podobný a vyšší než expanze dosažená při 23 ˚C. Tyto trendy korelovaly s úbytkem alkálií v pórovém roztoku, který byl spotřebován na tvorbu gelů. Při teplotě 55 ˚C a 38 ˚C byla expanze rychlejší a větší byla i spotřeba alkálií. Při teplotě 23 ˚C byla expanze pomalejší a úměrná množství zkonzumovaných alkálií. Chatterji (2005) poznamenává, že snížení teploty testování na 38 ˚C neznamená přiblížení se obvyklé teplotě betonu ve venkovních podmínkách. Teplota venkovních konstrukcí není stálá a snadno dosahuje teplot vyšších než 50˚C.

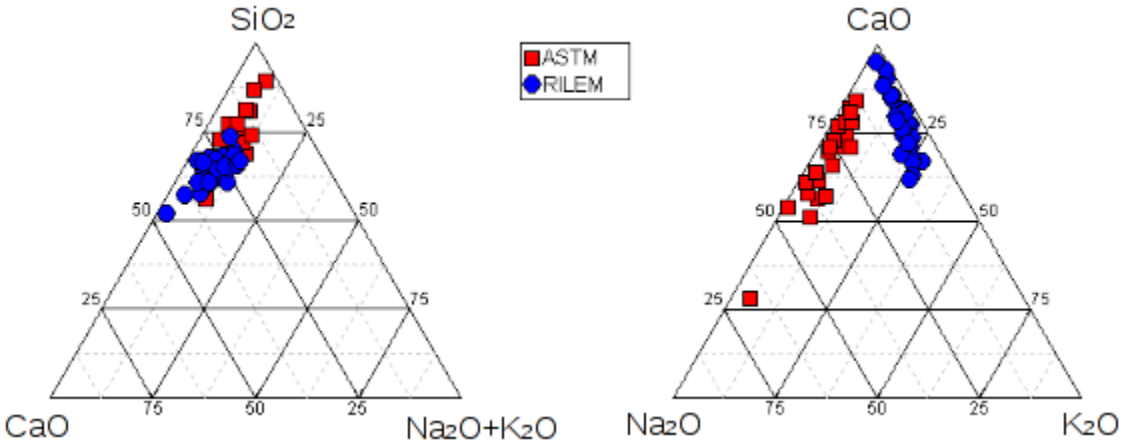
Hodnoty expanzí zkušebních betonových těles dosažené ve zkoušce RILEM AAR-4.1 probíhající při 60 ˚C jsou znatelně nižší než hodnoty expanze téhož kameniva při zkoušce ASTM C1260 probíhající při 80 ˚C. Rozdíl teploty prostředí těchto zkoušek činí 20 ˚C. Kim et al. (2015) popsali rozdíl v hodnotách expanze v rámci jedné zkoušky při teplotách 38 a 55 ˚C (rozdíl 17 ˚C) jako malý. S klesající telotou bylo potřeba prodloužit délku testování pro dosažení stejné hodnoty expanze jako při teplotě vyšší (Kim et al. 2015). Teploty 60 ˚C a 80 ˚C jsou obě velmi vysoké a dalo by se očekávat, že rozdíl v hodnotách expanze bude poměrně malý dle pozorování Kim et al. (2015). Toto očekávání se nepotvrdilo. Testovací období zkoušky RILEM AAR-4.1 je 10x delší než testovací období zkoušky ASTM C1260, a přesto jsou dosažené hodnoty expanze RILEM AAR-4.1 až 18x nižší než hodnoty expanze dosažené při zkoušce ASTM C1260. Mezi odborníky převládá názor, že větší dopad na expanzi zkušebních těles má vlhkost a charakter testovacího prostředí (Lindgård et al. 2013a, Lindgård et al. 2013b, Kim et al. 2015), které je v případě zkoušek ASTM C1260 a RILEM AAR-4.1 zásadně odlišné. Na základě výsledků expanze zkoušek ASTM C1260 a RILEM AAR-4.1 je pravděpodobné, že větší vliv na expanzi zkušebních těles mělo prostředí (1M roztok NaOH vs. mlžná komora) a množství alkálií (neomezený rezervoár vs. omezené množství alkálií příp. vyluhování alkálií).

K řádnému ohodnocení vlivu teploty na průběh ASR by bylo vhodné upravit podmínky experimentu, tak aby jedinou proměnnou byla teplota jako v práci Kim et al. (2015). Bylo by zajímavé udělat experiment se čtyřmi sériemi testovacích těles, dvě série těles ke zkoušce ASTM C1260 ve dvou

teplotách (60 ˚C, 80 ˚C), a dvě série ke zkoušce RILEM AAR-4.1 (60 ˚C, 80 ˚C), a ověřit, jakou měrou ovlivňuje teplota hodnoty expanze. Bude se lišit tvar expanzní křivky? Pakliže platí, že větší vliv na ASR má vlhkost prostředí než teplota, nemusel by být rozdíl v expanzi těchto modifikovaných zkoušek podstatný pro správnou identifikaci reaktivního a nereaktivního kameniva. Snížení teploty by se pojilo s nutností prodloužit dobu testování. Tuto hypotézu by však bylo nutné ověřit.

6.3 Zhodnocení chemického složení gelů

Rozdíly ve složení alkalicko-silikátových gelů ze zkoušek ASTM C1260 a RILEM AAR-4.1 jsou patrné na trojúhelníkových diagramech SiO_2-CaO-Na_2O+K_2O a CaO-Na_2O-K_2O na Obr. 23.



Obr. 23. Grafické znázornění chemického složení gelů ze zkoušky ASTM C1260 a RILEM AAR-4.1, vlevo: diagram SiO_2-CaO-Na_2O+K_2O, vpravo: diagram CaO-Na_2O-K_2O.

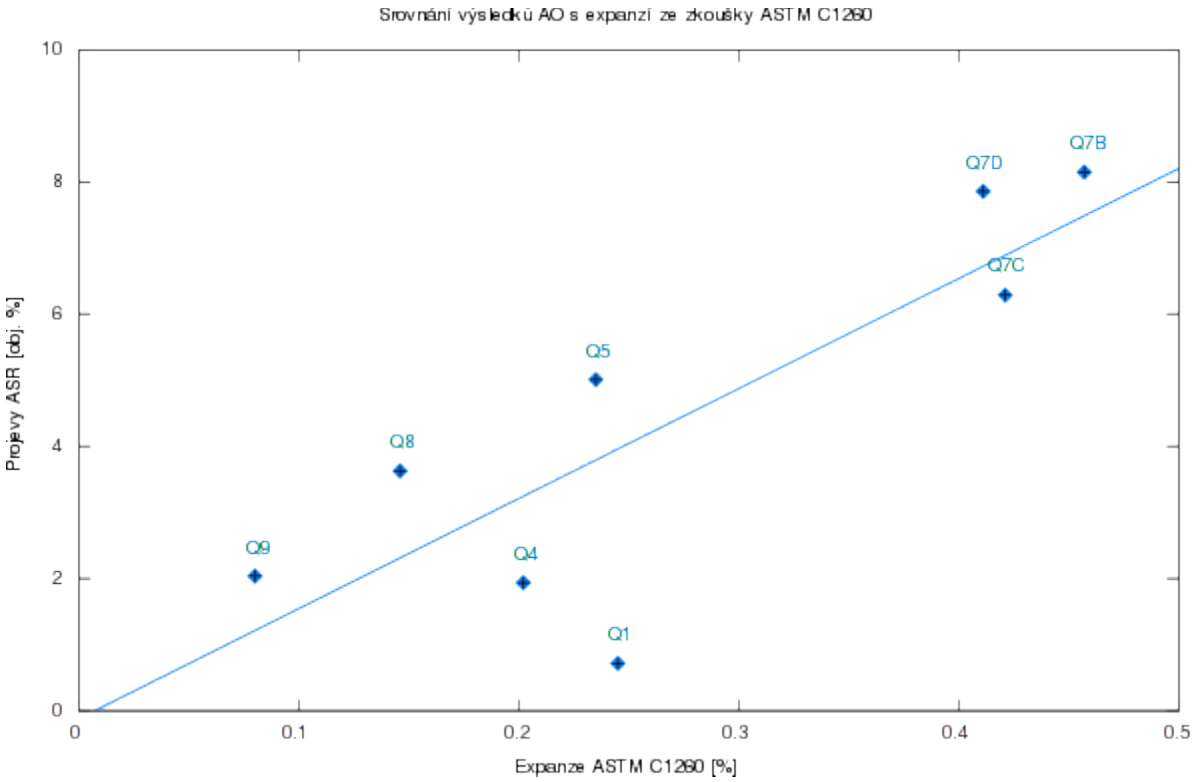
Gely ze zkoušky ASTM C1260 mají mírně větší rozptyl hodnot a větší obsah SiO_2 (38.86-70.29 hm. %) než gely ze zkoušky RILEM AAR-4.1 (41.96-60.28 hm. %). Velká část gelů má podobný obsah SiO_2. Diametrální rozdíl je v zastoupení alkálií. Gely ze zkoušky ASTM C1260 jsou převážně sodno-vápenaté s minimálním obsahem draslíku. Zato gely analyzované v betonových trámcích zkoušky RILEM AAR-4.1 jsou převážně draselno-vápenaté s minimálním obsahem sodíku. Dominantní zastoupení sodíku v gelech ze zkoušky ASTM C1260 je způsobeno ponořením trámců během testování v roztoku NaOH, který tvoří rezervoár sodných iontů. V případě vápenatých gelů ze zkoušky RILEM AAR-4.1 je zdrojem vápenatých iontů cementové pojivo a zdrojem sodných iontů může být cementové pojivo, přidaný NaOH v receptuře či plastifikátor. Brouxel (1993) provedl několik průřezových analýz gelovými lemy kolem úlomků reaktivního kameniva a popsal distribuci vybraných prvků v závislosti na jejich vzdálenosti od úlomku k cementovému pojivu. Popsal tři trendy. Obsah SiO_2 je nejvyšší nejblíže úlomku a směrem k cementovému pojivu prudce klesá. Obsah CaO se naopak směrem od úlomku k cementovému pojivu prudce zvyšuje. Obsah Na_2O a K_2O stoupá směrem do středové části gelového lemu a poté klesá směrem k cementovému pojivu. Svá pozorování prováděl Brouxel (1993) na vzorcích reálných betonů. Rozdílná distribuce prvků může vysvětlovat variace v chemickém složení měřených gelů. Vayghan et al. (2016) rolišuje tři hlavní trendy rozpínavosti alkalicko-silikátových gelů v závislosti na jejich složení. Nejvíce reaktivní gely mají nízký molární poměr Ca/Si i nízký molární poměr Na/Si. Druhý vysoce bobtnavý typ gelů má středně vysoký až zvýšený molární poměr Ca/Si a vysoký molární poměr Na/Si (Ca/Si=0.2, Na/Si ≈ 0.85). Třetí typ gelů

je málo škodlivý, méně bobtnavý, o nízké viskozitě, má vysoký molární poměr Ca/Si a nízký molární poměr Na/Si. Průměrné složení gelů ze zkoušky ASTM C1260 se pohybovalo v rozmezí (1.-3. kvartil) 0.232-0.357 molárního poměru Ca/Si a 0.077-0.127 molárního poměru Na/Si. Hodnoty molárního poměru Ca/Si jsou mírně zvýšené a vyšší je i molární poměr Na/Si. Na základě těchto hodnot můžeme gely charakterizovat jako středně bobtnavé. Průměrné složení gelů ze zkoušky RILEM AAR-4.1 se pohybovalo v rozmezí (1.-3. kvartil) 0.391-0.541 molárního poměru Ca/Si a 0.067-0.107 molárního poměru Na/Si. Hodnoty molárního poměru Ca/Si jsou vysoké a naopak molární poměr Na/Si je nízký. Tyto molární poměry naznačují, že převážná většina gelů ze zkoušky RILEM AAR-4.1 je spíše méně bobtnavá, čemuž odpovídají i výrazně nižší hodnoty rozpínání zkušebních betonových trámců v této zkoušce oproti hodnotám expanzí ze zkoušky ASTM C1260. Například expanze vzorku Q7-A dosáhla ve zkoušce RILEM AAR-4.1 hodnot 0.058 %, v modifikováné zkoušce RILEM AAR-4.1 dle Yamada et al. (2014) dosáhla 0.130 % a ve zkoušce ASTM C1260 až 0.417 %. Přestože je zde mnoho parametrů, které ovlivňují expanzi a vývoj alkalicko-silikátových gelů, je bobtnavost těchto gelů původcem rozpínání zkušebních těles. Míra bobtnavosti je určena chemickým složením těchto gelů (Vayghan et al. 2016).

6.4 Zhodnocení výsledků AO

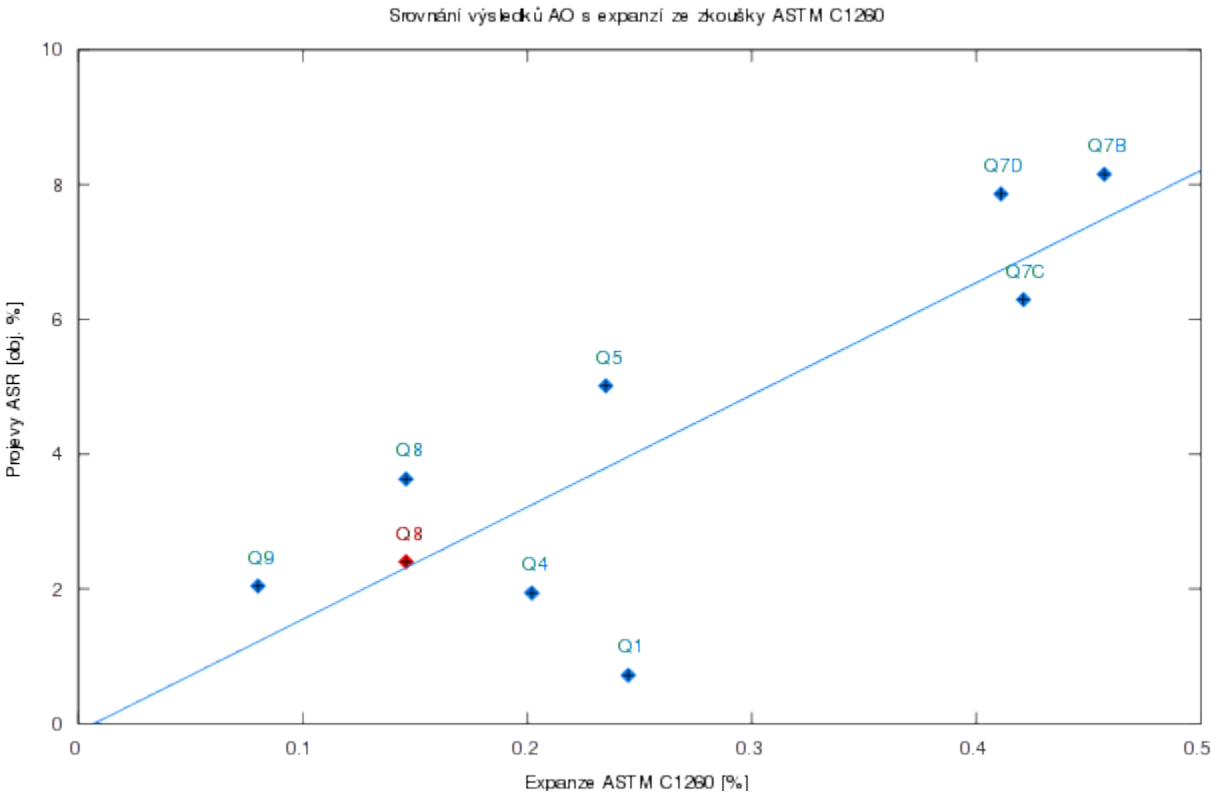
Na Obr. 24 jsou vyneseny výsledky expanze ze zkoušky ASTM C1260 a hodnota projevů ASR stanovená pomocí AO. Data jsou proložena lineární regresí a veličiny spolu velmi dobře korelují. Veličiny mají mezi sebou přímou závislost vyjádřenou korelačním koeficientem 0.814. AO se ukázala jako velmi dobrý nástroj pro kvantifikaci poškození kameniva vlivem ASR. Haha et al. (2007) došli po sérii dilatometrických zkoušek při teplotách 20, 40 a 60 ˚C k závěru, že teplota ovlivňuje pouze rychlost reakce, ale nemá vliv na hodnotu poškození získanou AO. Stupeň poškození kameniva stanovený AO závisí na parametrech jako poměr cementu ku kamenivu a na velikosti úlomků kameniva. Jak již bylo popsáno výše (kapitola 4.2 AO), je AO velice citlivá na kvalitu vstupních dat, pokud má být přesná. Na grafu Obr. 23 je vidět, že vzorek Q1 (křemenec) dosáhl překvapivě nízkých hodnot projevů ASR (výsledek AO), přestože ve dvou dilatometrických zkouškách svou expanzí překonal zbývající vzorky křemenců Q4 a Q5. Z mikroskopického studia horninových výbrusů je zřejmé, že křemenec Q1 je jemnozrnější než vzorky Q4 a Q5.

Relativně nízká konečná hodnota projevů ASR u vzorku Q1 může být způsobena několika faktory. Za prvé na SEM/BSE snímcích horninového výbrusu vzorku Q1 jsou v porovnání se vzorky Q4 a Q5 podstatně větší pórové prostory, což neodpovídá zkoumanému nábrusu v OM. Vyhodnocení geologických trhlin v horninovém výbrusu v sobě zahrnuje kromě samotných trhlin také pórový prostor. Hodnoty geologických trhlin v horninových nábrusech činí u Q1 5.48 obj. %, u Q4 3.87 obj. % a u Q5 3.10 obj. %. Z těchto hodnot jasně vyplývá, že horninový výbrus Q1 použitý k AO byl poréznější než horninové výbrusy Q4 a Q5. Konečná hodnota projevů ASR je o hodnotu geologických trhlin a pórů zkrácena. V případě Q1 tak došlo k neúměrnému zmenšení projevů ASR nereprezentativními hodnotami geologických trhlin.



Obr. 24. Srovnání konečných expanzí ze zkoušky ASTM C1260 s výsledky AO (projevy ASR), proloženo lineární regresí.

Alternativní AO zpracovaná pro vzorek Q8, kvarcit bohatý K-živcem, potvrdila výzkum Locati et al. (2010a). V zásaditém prostředí pórových roztoků dochází k rozpouštění živců i plagioklasu, které uvolňují alkálie a přispívají tak k rozvoji ASR. Výsledek standardní AO udává hodnotu projevů ASR 3.63 obj. % pro vzorek Q8. Alternativní AO zohledňující hlavní horninotvorné minerály udává celkovou hodnotu projevů ASR 2.4 obj. %. Rozdíl mezi těmito hodnotami je způsoben nadhodnocením poškození ve snímcích z maltových trámců i trhlin v horninovém výbrusu ve standardně provedené AO. K nadhodnocení poškození ve snímcích došlo díky jednotné úpravě jasu a kontrastu na hodnoty stanovené jako ideální pro AO křemene. Touto neselektivní úpravou celého snímku došlo ke ztmavení všech plagioklasů, K-živců i slíd na SEM/BSE snímcích. Program SigmaScan Pro 5 pak nalezl větší množství pixelů odpovídající intervalu šedosti 0-70 (threshold 0-70) určenému pro identifikaci projevů ASR. Součástí alternativní verze AO bylo zohlednění hlavních horninotvorných minerálů a úprava snímků vždy podle konkrétního minerálu, tak aby nedošlo k žádnému nadhodnocení. Hodnota projevů ASR této alternativní verze posunula bod představující vzorek Q8 blíže k přímce znázorňující lineární regresi jak ukazuje Obr. 25.



Obr. 25. Srovnání konečných expanzí ze zkoušky ASTM C1260 s výsledky AO (projevy ASR), proloženo lineární regresí. Modré body znamenají standardní AO. Červený bod představuje alternativní AO provedenou na vzorku Q8.

7. ZÁVĚR

Reaktivnost křemenem bohatých typů hornin byla zkoumána mikroskopicky (OM, SEM), urychlenou zkouškou ASTM C1260 na maltových trámcích, a zkouškou RILEM AAR-4.1 na betonových trámcích. Zhodnocení vzorků na základě OM a výsledků ASTM C1260 je následující: Vzorky Q9 (pegmatitový křemen) a Q7 (křemenná metadroba) představují koncové členy řady křemenem bohatých typů hornin zkoumaných v rámci diplomové práce, od nejméně reaktivních po nejvíce reaktivní. Nejvíce reaktivní křemenná metadroba (Q7) obsahovala až 25 obj. % kryptokrystalické matrix. Méně reaktivní křídové (Q4) a ordovické (Q1, Q5) křemence obsahovaly 5 až 10 obj. % kryptokrystalické matrix. Nejméně reaktivní pegmatitový křemen obsahoval pouze undulózně zhášející zrna a subzrna.

Obtížně korelovatelné byly výsledky zkoušky ASTM C1260 na maltových trámcích s výsledky zkoušky RILEM AAR-4.1 na betonových trámcích. Lépe korelovatelné byly výsledky ASTM C1260 s modifikovanou balící zkouškou RILEM AAR-4.1 dle Yamada et al. (2014). Vzhledem k omezenému počtu zkušebních betonových trámců, a osvojení si nové metodiky, jsou výsledky z této zkoušky pouze experimentální a orientační. Zkouška RILEM AAR-4.1 pomohla k identifikaci pomalu reagujícího pegmatitového křemene (Q9). Pro upřesnění výsledků bude vhodné doplnit meření větším počtem trámců.

Výrazný rozdíl byl pozorován v chemickém složení alkalicko-silikátových gelů z maltových a betonových trámců. Gely v maltových trámcích ze zkoušky ASTM C1260 byly převážně sodno-vápenaté a gely z betonových trámců ze zkoušky RILEM AAR-4.1 měly charakter draselno-vápenatý. Chemické složení alkalicko-silikátových gelů se mění v závislosti na charakteru testovacího prostředí a na místě, kde byl gel utvořen a analyzován, má vliv na bobtnavost gelů, a ovlivňuje tak expanzi zkušebních trámců.

AO provedená na SEM/BSE snímcích maltových trámců ze zkoušky ASTM C1260 výrazně zpřesnila identifikaci reaktivních typů hornin. ASR se na kamenivu projevovala v podobě rozšířených geologických trhlin či křehkých trhlin, rozpouštěním kryptokrystalické matrix, až masivním rozpouštěním rozsáhlým partií křemenných úlomků. Nejvíce reaktivní vzorky křemenné metadroby (Q7) mají hodnoty ASR projevů 6.3-8.1 obj. %. Hodnoty ASR projevů nejméně reaktivního pegmatitového křemene (Q9) dosáhly 2.0 obj. %. Modifikovaná AO byla úspěšně aplikována na polyminerální horninu (kvarcit, Q8) s výrazným zastoupením živců. Výsledky modifikované AO potvrzují použitelnost metody i pro jiné typy polyminerálních hornin, což by mohlo do budoucna výrazně zjednodušit a doplnit identifikaci potenciálně reaktivních typů hornin.

8. POUŽITÁ LITERATURA

Alaejos P., Lanza V., Bermúdez M.A., Velasco A., 2014. Effectiveness of the accelerated mortar bar tests to detect rapid reactive aggregates (including their pessimum content) and slowly reactive aggregates. *Cem. Concr. Res*., 58, str. 13-19.

ASTM C 289-07, 2007. Standard Test Method for Potential Alkali-Silica Reactivity of Aggregates (Chemical Mathod). ASTM International, 7 str.

ASTM C295/C295M-12, 2012. Standard Guid for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete. ASTM International, 9 str.

ASTM C 1260-14, 2014. Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortab-Bar Method). ASTM International, 5 str.

Behnood A., Tittelboom K.V., Belie N.D., 2016. Methods for measuring pH in concrete: A review. *Constr. Build. Mater*., 105, str. 176-188.

Bennett P.C., 1991. Quartz dissolution in organic-rich aqueous systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55, str. 1781-1797.

Bérubé M.A., Fournier B., 2004. Alkalis releasable by aggregates in concrete - significance and test methods. In: *Proceedings of the 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, Beijing (China), October 15-19, 2004, str. 17-30.

Bickmore B.R., Nagy K.L., Gray A.K., Brinkerhoff A.R., 2006. The effect of $Al(OH)_4^-$ on the dissolution rate of quartz. *Geochimica et Cosmochimica Acta,* 70, str. 290-305.

Bilčík J., Donálek J., 2003. *Sanace betonových konstrukcí.* Jaga group, v. o. s., 151 str.

Bílek P., Cmuntová M., Kautský J., Nosek P., Profeltová J., Tocháček A., 1987. *Křemenné suroviny v Barrandienu, Surovina: křemence, buližníky, Etapa průzkumu: Vyhledávací, stav ke dni 6.3.1987.* GF P069469, Geoinduatria, Závod Stříbro, 41 str., 179 příl.

Binal A., 2015. The Pessimum Ratio and Aggregate Size Effects on Alkali Silica Reaction. *Procedia Earth and Planetary Science*, 15, str. 725-731.

Blenkinsop T., 2000. *Recognition of Deformation, Microstructures and Mechanisms in Rocks*. Kluwer Academic Publishers, 163 str.

Boles J.R., Johnson K.S., 1983. Influence of mica surfaces on pore-water pH. *Chem. Geol.*, 43, str. 303-317.

Broekmans M.A.T.M, Jansen J.B.H., 1998. Silica dissolution in impure sandstone: application to concrete. *Journal of Geochemical Exploration*, 62, str. 311-318.

Broekmans M.A.T.M, 2004. Structural properties of quartz and their potential role for ASR. *Mater.*

Charact., 53, str. 129-140.

Brouxel M., 1993. The Alkali-Aggregate Reaction Rim: Na_2O, SiO_2, K_2O and CaO Chemical Distribution. *Cem. Concr. Res*., 23, str. 309-320.

Chatterji S., 2005. Chemistry of alkali-silica reaction and testing of aggregates. *Cem. Concr. Comp.,* 27 , str. 788-795.

Chlupáč I., Brzobohatý R., Kovanda J., Stráník Z., 2002. *Geologická minulost České republiky.* Academia, nakladatelství Akademie věd České republiky, 436 str.

ČSN EN 197-1 Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody pro obecné použití. Český normalizační institut, 2012, 36 str.

ČSN EN 933-4 Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 4: Stanovení tvaru zrn – Tvarový index. Český normalizační institut, 2008, 12 str.

ČSN EN 1097-6 Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti. Český normalizační institut, 2001, 40 str.

Čtyroký V., Krutský N., Michalíčková V., Tichá E., 1963. *Průzkum křemenců 1963 Mostecko 51 300 118 (Jeníkov - Lahošť)*. GF P015534, Geologický průzkum, Praha, 55 str., 34 příl.

Deer W.A., Howie R.A., Zussman J., 1992. *An Introduction to the Rock-Forming Minerals*. 2nd ed., Prentice Hall, 696 str.

Dent Glasser L.S., Kataoka N., 1981. The Chemistry of "Alkali-Aggregater" Reaction. *Cem. Concr. Res*., 11, str. 1-9.

Dove P.M., Rimstidt J.D., 1994. Silica-Water Interaction. In: Heaney P., Prewitt C., Gibbs G. (eds.) *Reviews in Mineralogy Series: The Silica Polymorphs*. Mineralogical Society os America, Volume 29, str. 259-308.

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, Volume 31, str. 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. *Mater. Charact.*, 58, str. 1160-1170.

Fournier B., Ideker J.H., Folliard K.J., Thomas M.D.A., Nkinamubanzi, Chevrier R., 2009. Effect of environmental conditions on expansion in concrete due to alkali-silica reaction (ASR). *Mater. Charact.*, 60, str. 669-679.

Friel J. J., Grande J. C., Hertzner D., 2000. *Practical Guide to Image Analysis*. ASM International, 299 str.

Garcia-Diaz E., Riche J., Bulteel D., Vernet C., 2006. Mechanism of damage for the alkali-silica

reaction. *Cem. Concr. Res*., 36, str. 395-400.

Giebson C., Seyfarth K., Stark J., 2010. Influence of acetate and formate-based deicers on ASR in airfield concrete pavements. *Cem. Concr. Res*., 40, str. 537-545.

Glasser F.P., 1992. 2 Chemistry of the alkali-aggregate reaction. In: Swamy R.N. (ed.) *The Alkali-Silica Reaction in Concrete*. 1st ed., Blackie and Son Ltd, 333 str.

Grattan-Bellew P.E., Mitchell L.D., Margeson J., Min D., 2010. Is alkali-carbonate reaction just a variant of alkali-silica reaction ACR=ASR? *Cem. Concr. Res*., 40, str. 556-562.

Haavik D.J., Meilenz R.C., 1999.Alkali-Silica Reaction Causes Concrete Pipe to Collapse. *Concrete International*, 13, issue 5, str. 54-57.

Haha M.B., Gallucci E., Guidoum A., Scrivener K.L., 2007. Relation of expansion due to alkali silica reaction to the degree of reaction measured by SEM image analysis. *Cem. Concr. Res*., 37, str. 1206-1214.

Hasdemir S., Tuğrul A., Yilmaz M., 2012. Evaluation of alkali reactivity of natural sands. *Const. Build. Mater*., 29, str. 378-385.

Heilbronner R., Barrett S., 2014. *Lecture Notes in Earth Sciences: Image Analysis in Earth Sciences: Microstructures and Textures of Earth Materials*. Springer, 520 str.

Hou X., Kirkpatrick R.J., Struble L., Monteiro P.J.M., 2005. Structural Investigation of Alkali Silicate Gels. *J. Am. Ceram. Soc.*, 88 (4), str. 943-949.

Hünger K.J., 2007. The contribution of quartz and the role of aluminum for understanding the AAR with greywacke. *Cem. Concr. Res*., 37, str. 1193-1205.

Ichikawa T., 2009. Alkali-silica reaction, pessimum effect and pozzolanic effect. *Cem. Concr. Res*., 3, str. 716-726.

Islam M.S., 2015. Prediction of ultimate expansion of ASTM C 1260 for various alkali solutions using the proposed decay model. *Const. Build. Mater*., 77, str. 317-326.

Katayama T., 2004. How to identify carbonate rock reactions in concrete. *Mater. Charact.*, 53, str. 85-104.

Khursheed A., 2010. *Scanning Electron Microscope Optics and Spectrometers*. World Scientific, 417 str.

Kim T., Olek J., Jeong H.G., 2015. Alkali-silica reaction: Kinetics of chemistry of pore solution and calcium hydroxide content in cementitious system. *Cem. Concr. Res.,* 71, str. 36-45.

Kuchařová A., Götze J., Šachlová Š., Pertold Z., Přikryl R., 2016. Microscopy and Cathodoluminescence Spectroscopy Characterisation of Quartz Exhibiting Different Alkali-Silica Reaction Potential. *Microsc. Microanal*. 22, str. 189-198.

Lanza V., Alaejos P., 2012. Optimized Gel Pat Test for Detection of Alkali-Reactive Aggregates. *ACI Materials Journal*, 109, str. 403-411.

Levitt M., 1997. *Concrete Materials: Problems and solutions.* CRC Press, , 136 str.

Li Z., Liang W., 2011. *Advanced Concrete Technology.* Wiley, 1 st ed., 522 str.

Lindgård J., Nixon P.J., Borchers I., Schouenborg B., Wigum B.J., Haugen M., Åkesson U., 2010. The EU "PARTNER" Project - European standard tests to prevent alkali reactions in aggregates: Final results and recommendations. *Cem. Concr. Res.,* 40, str. 611-635.

Lindgård J., Thomas M.D.A., Sellevold E.J., Pedersen B., Ö. Andiç-Çakir, Justnes H., Rønning T.F., 2013a. Alkali-silica reaction (ASR)-performance testing: Influence of speciment pre-treatment, exposure condition and prism size on alkali leaching and prism expansion. *Cem. Concr. Res*., 53, str. 68-90.

Lindgård J., Sellevold E.J., Thomas M.D.A., Pedersen B., Justnes H., Rønning T.F., 2013b. Alkali-silica reaction (ASR)-performance testing: Influence of speciment pre-treatment, exposure condition and prism size on concrete porosity, moisture and transport properties. *Cem. Concr. Res*., 53, str. 145-167.

Locati F., Marfil S., Baldo E., Maiza P., 2010a. Na_2O, K_2O, SiO_2 and Al_2O_3 release from potassic and calcic-sodic feldspars into alkaline solutions. *Cem. Concr. Res*., 40, str. 1189-1196.

Locati F., Marfil S., Baldo E., 2010b. Effect of ductile deformation of quartz-bearing rocks on the alkali-silica reaction. *Eng. Geol.*, 116, str. 117-128.

López-Buendía A.M., Climent V., Verdú P., 2006. Lithological influence of aggregate in the alkali-carbonate reaction. *Cem. Concr. Res*., 36, str. 1490-1500.

Lu D., Fournier B., Grattan-Bellew P.E., 2006. Evaluation of accelerated test methods for determining alkali-silica reactivity of concrete aggregates. *Cem. Concr. Comp.,* 28, str. 546-554.

Lundin J.B., 2015. Overview about the units of the baltic shield. Staženo 19.7.2016 z: https://en.wikipedia.org/wiki/Svecofennian_orogeny

Modrý S., 2003a. *Vyloučení alkalické reakce kameniva v betonu na stavbách pozemních komunikací. Etapa a) Rešeršní průzkum alkalické reakce s vyhodnocením* Výroční zpráva projektu za r. 2003, č. Projektu 803/120/114, 74 str.

Modrý S., 2003b. *Vyloučení alkalické reakce kameniva v betonu na stavbách pozemních komunikací. Etapa i) Zahraniční předpisy pro zkoušení reaktivnosti kameniva a pro diagnostické průzkumy a měření na konstrukcích. Výběr vhodných metod pro ČR.* Výroční zpráva projektu za r. 2003, č. Projektu 803/120/114, 57 str.

Monteiro P. J. M., Mehta P. K., 1986. Interaction between carbonate rock and cement paste. *Cem. Concr. Res*., 16, str. 127-134.

Multon S., Cyr M., Sellier A., Diederich P., Petit L., 2010. Effects of aggregate size and alkali content on ASR expansion. *Cem. Concr. Res*., 40, str. 508-516.

Nixon P.J., Sims I. (eds.), 2016. *RILEM Recommendations for the Prevention of Damage by Alkali-Aggregate Reactions in New Concrete Structures*. 1st ed., Springer, 168 str.

Passchier C.W., Trouw R.A.J., 2005. *Microtectonics*. 2nd ed., Springer Verlag, 366 str.

Pertold Z., Chvátal M., Pertoldová J., Zachariáš J., Hromádko J., 2002. Poruchy vozovkového betonu dálnice D11 způsobené reakcí alkálií s kamenivem (RAK). *Beton TKS*, Volume 2, str. 21-24.

Pertold Z., Šachlová Š., Šťastná A., Bílek V.ml., Krutilová K., Bílek V.st., Topolář L., 2014. Alkalicko-křemičitá reakce v České republice a možnosti její eliminace. *Beton TKS*, Volume 2, str. 34-41.

Ponce J.M., Batic O.R., 2006. Different manifestations of the alkali-silica reaction in concrete according to the reaction kinetics of the aggregate. *Cem. Concr. Res.,* 36, str. 1148-1156.

Poole A.B., 1992. 1 Introduction to alkali-aggregate reaction in concrete. In: Swamy R.N. (ed.) *The Alkali-Silica Reaction in Concrete*. 1st ed., Blackie and Son Ltd, 333 str.

Rajabipour F., Giannini E., Dunant C., Ideker J.H., Thomas M.D.A., 2015. Alkali-silica reaction: Current understanding of the reaction mechanisms and the knowledge gaps. *Cem. Concr. Res*., 76, str. 130-146.

Ramos V., Fernandes I., Silva A.S., Soares D., Noronha F., 2016. Potential reactivity of granitic rocks. Petrographic characterization vs accelerated expansion tests. *Ibracon Structures and Materials Journal,* 7, str. 66-74.

Rixom M.R., Mailvaganam N.P., 1999. *Chemical Admixture for Concrete.* 3 rd ed., CRC Press, 456 str.

Seidlová Z., 2010. *Experimentální výzkum alkalicko-křemičité reaktivnosti vulkanických hornin.* Diplomová práce, Ústav geochemie, mineralogie a nerostných zdrojů PřF UK, Praha, 36 str., 28 příl.

SGU, 2016. Geological Survey of Sweeden (Sverigen geologiska undersökning). Navštíveno 4.7.2016: http://www.sgu.se/en/.

Shayan A., 2007. Field Evidence for Inability of ASTM C 1260 Limits to Detect Slowly Reactive Australian Aggregates. *Australian Journal of Civil Engineering*, 3, str. 13-27.

Shon C.-S., Zollinger D.G., Sarkar S.L., 2002. Evaluation of modified ASTM C 1260 accelerated mortar bar test for alkali-silica reactivity. *Cem. Concr. Res*., 32, str. 1981-1989.

St John D.A., Poole A.B., Sims I., 1998. *Concrete Petrography. A handbook of investigative techniques*. Arnold, 474 str.

Stanton T.E., 1940. Experience of concrete through reaction between cement and aggregate. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 66 (10), str. 1781-1811.

Stanton T.E., Porter O.J., Meder L.C., Nicol A., (1942). California experience with expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. *J. Am. Concr. Inst.,* 13 (3), str. 209–236.

Swamy R.N., 1992. 3 Testing for alkali-silica reaction. In: Swamy R.N. (ed.) *The Alkali-Silica Reaction in Concrete*. 1st ed., Blackie and Son Ltd, 333 str.

Šachlová Š., Přikryl R., Pertold Z., 2010. Alkali-silica reaction products: Comparison between samples from concrete structures and laboratory test specimens. *Mater. Charact*., 61, str. 1379-1393.

Šachlová Š, Pertold Z., Šťastná A., Míčka T., 2014. Factors affecting DEF and ASR in the concrete dam at Vrané nad Vltavou. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, Volume 3, Special Issue 13, str. 57-62.

Šachlová Š., Kuchařová A., Pertold Z., Přikryl R., Fridrichová M., 2015. Quantitative assessment of alkali silica reaction potential of quartz-rich aggregates: comparison of chemical test and acceletated mortar bar test improved by SEM-PIA. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, str. 1-12.

Škvára F., 2003. *Chemie a technologie anorganických pojiv II.* Interní skripta Ústavu skla a keramiky VŠCHT Praha, 225 str.

Škarková J., 2000. Podcenili jsme nebezpečí alkalické reakce kameniva v betonu, část I: vozovkový kryl dálnice D11. *Silniční obzory*, 61, str. 58-60.

Taylor H.F.W., Famy C., Scrivener K.L. Delayed ettringite formation. *Cem. Concr. Res*., 31, str. 683-693.

TP 137 2015. Technické podmínky. Vyloučení alkalické reakce kameniva v betonu na stavbách pozemních komunikací. Technické podmínky. Ministerstvo dopravy ČR a Ředitelství silnic a dálnic ČR, 29 str.

Urhan S., 1987. Alkali silica and pozzolanic reactions in concrete. Part 1: Interpretation of published results and an hypothesis concerning the mechamism. *Cem. Concr. Res*., 17, str. 141-152.

Vayghan A.G., Rajabipour F., Rosenberger J.L., 2016. Composition-rheology relationships in alkali-silica reaction gels and the impact on the gel's deleterious behavior. *Cem. Concr. Res*., 83, str. 45-56.

Wang Y., Yu G., Deng M., Tang M., Lu D., 2008. The use of thermodynamic analysis in assessing alkali contribution by alkaline minerals in concrete. *Cem. Concr. Comp.*, 30, str. 353-359.

Whitney D.L., Evans B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *Am. Min.*, 95, str. 185-187.

Wigum B.J., 1995. Examination of microstructural features of Norwegian cataclastic rocks and their use for predicting alkali-reactivity in concrete. *Eng.Geol.*, 40, str. 195-214.

Yamada K., Karasuda S., Ogawa S., Sagawa Y., Osako M., Hamada H., Isneini M., 2014. *Constr. Build. Mater*., 64, str. 184-191.

Zhang C., Wang A., Tang M., Wu B., Zhang N., 1999. Influence of aggregate size and aggregate size grading on ASR expansion. *Cem. Concr. Res*., 29, str. 1393-1396.

Použitý software

Corel PHOTO-PAINT X3 (Corel Corporation)

Gnuplot (Williams T. a Kelley C., svobodný software)

SigmaScan Pro 5 (Jandel Scientific)

Příloha I, Markéta Kuchyňová, Reaktivnost křemene v experimentálních maltových tělesech.

Receptury k přípravě 1 betonového trámce ke zkoušce RILEM AAR-4.1.

Kamenivo	**Jednotky**	**Q1**	**Q4**	**Q5**	**Q7**	**Q8**	**Q9**
Hrubé kamenivo	g	1678.0	1647.9	1688.7	1653.9	1668.5	1653.9
Jemné kamenivo	g	1151.0	1125.6	1177.7	1090.0	1145.3	1142.6
Cement	g	735.7	757.3	753.7	800.0	750.1	765.2
Destilovaná voda	ml	337.8	359.7	335.7	362.7	344.4	339.1
Plastifikátor	ml	2.2	2.3	2.2	2.5	2.2	2.3
Přídavek NaOH	g	3.3	3.4	3.4	3.6	3.4	3.5
Celková hmotnost	g	3908.2	3896.4	3961.6	3912.8	3914.0	3906.8
Frakce jemné kamenivo							
2 – 4	g	287.8	281.4	294.4	272.5	286.3	285.7
1 – 2	g	287.8	281.4	294.4	272.5	286.3	285.7
0.5 – 1	g	287.8	281.4	294.4	272.5	286.3	285.7
0.25 – 0.5	g	230.2	225.1	235.5	218.0	229.1	228.5
0.125 – 0.25	g	57.6	56.3	58.9	54.5	57.3	57.1
Celková hmotnost	g	1151.0	1125.6	1177.7	1090.0	1145.3	1142.6
Voda na navlhčení	ml	57.6	56.3	58.9	54.5	57.3	57.1
Základní vlastnosti							
Hrubé kamenivo							
ρ_{ssd} [mg/m³]	[mg/m³]	2.72	2.58	2.67	2.45	2.65	2.60
ρ_{rd} [mg/m³]	[mg/m³]	2.71	2.57	2.65	2.45	2.64	2.56
WA [%]	[%]	0.32	0.43	0.62	0.15	0.30	0.10
Jemné kamenivo							
ρ ssd [mg/m3]	[mg/m³]	2.53	2.45	2.52	2.14	2.50	2.43
ρ rd [mg/m3]	[mg/m³]	2.43	2.32	2.49	2.23	2.40	2.40
WA [%]	[%]	2.26	3.93	0.95	1.00	2.25	0.75

ρ_{ssd} - objemová hmotnost nasyceného a povrchově osušeného vzorku kameniva

ρ_{rd} - objemová hmotnost vysušeného vzorku kameniva

WA [%] - nasákavost

Příloha II, Markéta Kuchyňová, Reaktivnost křemene v experimentálních maltových tělesech.

Výsledky měření ze zkoušky ASTM C1260.

Q1	**Expanze Δ [%]**		
den / trámec	1	2	3
2	0.020	0.017	0.013
4			0.070
5	0.039	0.086	
7	0.068	0.141	0.161
8	0.076	0.162	
9	0.088	0.184	0.211
11			0.257
13	0.140	0.265	
14	0.151	0.282	0.302

Q4	**Expanze Δ [%]**			
den / trámec	1	2	3	4
1		0.000		
2	0.020	0.009	0.010	0.011
4			0.035	0.032
5	0.039			
6		0.064		
7	0.068	0.078	0.094	0.096
8	0.076	0.098		
9	0.088	0.116	0.140	0.143
11			0.184	0.185
12		0.158		
13	0.140			
14	0.151	0.180	0.238	0.238

Q5	**Expanze Δ [%]**		
den / trámec	1	2	3
2	0.017	0.015	0.006
4			0.023
5	0.038	0.040	
7	0.070	0.066	0.108
9	0.113	0.110	0.204
11			0.217
12	0.170	0.164	
14	0.194	0.192	0.276

Q7-A	**Expanze Δ [%]**			
den / trámec	1	2	3	4
2	0.033	0.032	0.036	0.040
5	0.138	0.137	0.148	0.146
7	0.210	0.212	0.228	0.228
9	0.276	0.283	0.304	0.302
12	0.360	0.367	0.391	0.388
14	0.398	0.407	0.434	0.430

Příloha II, Markéta Kuchyňová, Reaktivnost křemene v experimentálních maltových tělesech.

Výsledky měření ze zkoušky ASTM C1260.

Q7-B	**Expanze Δ [%]**			
den / trámec	1	2	3	4
2	0.068	0.075	0.070	0.067
4	0.168	0.169	0.169	0.163
7	0.278	0.286	0.285	0.272
9	0.341	0.349	0.351	0.335
11	0.390	0.404	0.404	0.382
14	0.454	0.461	0.470	0.444

Q7-C	**Expanze Δ [%]**			
den / trámec	1	2	3	4
2	0.074	0.074	0.074	0.069
4	0.165	0.174	0.166	0.162
7	0.259	0.270	0.265	0.269
9	0.313	0.328	0.326	0.331
11	0.360	0.373	0.367	0.378
14	0.410	0.423	0.418	0.434

Q7-D	**Expanze Δ [%]**			
den / trámec	1	2	3	4
2	0.028	0.033	0.029	0.035
5	0.152	0.155	0.142	0.146
7	0.224	0.234	0.218	0.217
9	0.294	0.303	0.284	0.282
12	0.381	0.382	0.358	0.355
14	0.418	0.426	0.402	0.396

Q8	**Expanze Δ [%]**			
den / trámec	1	2	3	4
3	0.022	0.018	0.022	0.022
5	0.044	0.040	0.030	0.039
7	0.072	0.064	0.054	0.064
10	0.108	0.099	0.088	0.100
12	0.132	0.123	0.112	0.122
14	0.158	0.147	0.134	0.143

Q9	**Expanze Δ [%]**			
den / trámec	1	2	3	4
2	0.008	0.006	-	0.015
5	0.027	0.025	0.022	0.024
7	0.033	0.031	0.032	0.032
9	0.093	0.042	0.094	0.044
12	0.098	0.056	0.062	0.060
14	0.102	0.079	0.080	0.080

Příloha III, Markéta Kuchyňová, Reaktivnost křemene v experimentálních maltových tělesech.

Příloha III-a: Výsledky měření zkoušky RILEM AAR-4.1.

Expanze E_n [%]									
týden [n]	**Q1**	**Q4**	**Q5**	**Q7-A**	**Q7-B**	**Q7-C**	**Q7-D**	**Q8**	**Q9**
5	0.005	0.006	0.004	0.052	0.038	0.020	0.015	0.040	0.019
10	0.014	0.010	0.007	0.055	0.036	0.036	0.017	0.052	0.032
15	0.023	0.015	0.011	0.057	0.045	0.039	0.013	0.054	0.049
20	0.031	0.018	0.012	0.058	0.037	0.056	0.014	0.070	0.074

Příloha III-b: Výsledky měření zkoušky RILEM AAR-4.1 balící metoda dle Yamada et al. (2014).

Expanze E_n [%]				
týden [n]	**Q7-A (1)**	**Q7-A (2)**	**Q8**	**Q9**
5	0.110	0.117	0.037	0.033
10	0.129	0.133	0.068	0.055
15	0.126	0.141	0.089	0.070
20	0.123	0.138	0.093	0.072

Příloha IV, Markéta Kuchyňová, Reaktivnost křemene v experimentálních maltových tělesech.

Příloha IV-a: SEM/EDS analýzy alkalicko-silikátových gelů z maltových trámců ze zkoušky ASTM C1260, hodnoty oxidů jsou v hm. %.

ASTM C1260										
Vzorek	Sp.	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	SO_3	K_2O	CaO	FeO	Total
Q1	12	8.46	1.76	0.07	51.12		1.54		13.06	76.00
Q1	16	4.66	0.49	0.18	54.11		1.17		16.90	77.51
Q1	17	4.96	1.58	0.10	54.83		1.03		14.78	77.28
Q4	5	6.87	0.85	0.49	41.53	0.38	0.51		25.40	76.02
Q4	36	4.10	1.30	1.32	38.86	0.29	0.41		21.48	67.77
Q5	1	5.91	0.58	0.32	56.88	0.17	0.57		15.07	79.51
Q5	8	3.21	0.87	0.29	50.62	0.10	0.65		20.87	76.62
Q5	9	4.91	0.76	0.43	54.24		0.77		19.62	80.73
Q5	22	10.48	1.26	0.25	58.73		1.09		15.76	87.56
Q5	23	3.10	0.70	0.26	60.34		0.84		13.82	79.06
Q7B	11	6.99	2.15	0.21	57.94		0.97		12.80	81.06
Q7B	17	5.82	0.80	0.16	70.29		1.57	0.16	9.63	88.44
Q7B	18	3.56	0.99	0.60	59.14		1.41		12.22	77.92
Q7C	6	5.61	0.52	0.03	68.33		0.40		2.38	77.27
Q7C	7	3.91	0.57	1.13	63.50		0.72		4.83	74.65
Q7C	21	7.54	0.16	0.02	62.43		1.50		17.81	89.46
Q7C	41	8.19	1.22	0.17	56.11		0.39		13.68	79.77
Q8	11	7.42	3.33		53.63	0.64	0.80		18.84	84.66
Q8	12	6.07	4.62		55.29	0.41	0.79		18.41	85.59
Q8	13	5.81	6.14		49.65	0.73	0.72		16.03	79.09
Q9	1	3.04	0.74	0.19	51.08		0.52		15.38	70.94
Q9	20	10.06	0.89	0.43	63.47		0.23		11.89	86.97
Q9	22	4.57	0.63	0.98	60.85		0.35		8.84	76.22

Sp. - spektrum

Příloha IV, Markéta Kuchyňová, Reaktivnost křemene v experimentálních maltových tělesech.

Příloha IV-b: SEM/EDS analýzy alkalicko-silikátových gelů z betonových trámců ze zkoušky RILEM AAR-4.1, hodnoty oxidů jsou v hm. %.

RILEM AAR-4.1										
Vzorek	Sp.	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	SO_3	K_2O	CaO	FeO	Total
Q1	3	2.30	0.08	1.78	58.15		6.28	19.41	0.16	88.16
Q1	12	1.73			54.60		6.17	19.40	0.35	82.25
Q1	60	1.13			59.42		3.14	24.26		87.95
Q4	6	0.75	1.31	0.03	45.77		2.47	30.80		81.14
Q4	7	1.24	1.05	0.11	45.68		4.78	27.62		80.48
Q4	8	1.16	0.41	0.08	52.00		6.00	25.11		84.76
Q4	9	0.88		0.09	51.36		5.07	26.36		83.75
Q5	24	0.72			51.60		4.91	19.38		76.60
Q5	25	1.36			54.84		6.62	16.12		78.94
Q5	27	1.13		0.07	56.33		4.07	23.59		85.20
Q5	28	0.98	0.30	0.12	55.21		4.22	14.46		75.30
Q5	29	0.88	1.20	0.02	50.15		3.03	23.73		79.01
Q7A	19	1.32			48.09		6.46	21.74		77.61
Q7A	21	1.07			52.53		4.06	21.34		79.00
Q7A	22	1.80			58.30		5.16	20.41		85.67
Q7C	27	2.29	0.23		48.34		7.66	20.98		79.50
Q7C	29	1.10	0.40		50.29		6.07	25.40		83.26
Q7C	30	0.89	0.30		50.76		5.14	25.50		82.59
Q7C	35	1.99			53.77		6.35	16.65		78.76
Q7D	3	0.45	0.10	0.11	57.38		1.60	26.36		86.00
Q7D	45	1.54	0.14	0.03	57.43		4.09	22.25		85.49
Q7D	46	1.78	0.07		54.42		5.43	22.88		84.58
Q8	1	1.25	1.84	0.11	51.27		3.41	28.20		86.08
Q8	2	2.87	0.21	0.99	55.56		6.40	20.68	0.43	87.13
Q8	13	0.95	1.02	0.07	41.96		0.81	36.75		81.56
Q8	18	1.94	0.10	0.07	55.47		6.35	21.49	0.12	85.54
Q8	19	1.93	0.40	0.54	51.50		5.12	26.12	0.34	85.96
Q9	29	2.89	0.12	0.22	55.33		7.90	18.42		84.88
Q9	34	1.11	0.68	1.18	51.75	0.84	1.90	22.99	0.18	80.65
Q9	36	3.39	0.51	1.61	60.28		8.09	18.65	1.18	93.71

Sp. - spektrum

Příloha V, Markéta Kuchyňová, Reaktivnost křemene v experimentálních maltových tělesech.

Příloha V-a: Vybrané molární obsahy prvků a molární poměry prvků v alkalicko-silikátových gelech z maltových trámců ze zkoušky ASTM C1260, SEM/EDS.

					ASTM C1260					
Vzorek	Sp.	mol Na	mol Mg	mol Si	mol K	mol Ca	Ca/Si	Na/Si	(Na+K)/Si	(Ca+Mg)/Si
Q1	12	0.14	0.04	0.84	0.02	0.23	0.28	0.16	0.18	0.33
Q1	16	0.08	0.01	0.89	0.01	0.30	0.34	0.08	0.10	0.35
Q1	17	0.08	0.04	0.90	0.01	0.26	0.29	0.09	0.10	0.34
Q4	5	0.11	0.02	0.68	0.01	0.45	0.66	0.16	0.17	0.70
Q4	36	0.07	0.03	0.64	0.00	0.38	0.60	0.10	0.11	0.65
Q5	1	0.10	0.01	0.93	0.01	0.27	0.29	0.10	0.11	0.30
Q5	8	0.05	0.02	0.83	0.01	0.37	0.45	0.06	0.07	0.47
Q5	9	0.08	0.02	0.89	0.01	0.35	0.39	0.09	0.10	0.41
Q5	22	0.17	0.03	0.96	0.01	0.28	0.29	0.18	0.19	0.32
Q5	23	0.05	0.02	0.99	0.01	0.25	0.25	0.05	0.06	0.27
Q7B	11	0.11	0.05	0.95	0.01	0.23	0.24	0.12	0.13	0.30
Q7B	17	0.09	0.02	1.15	0.02	0.17	0.15	0.08	0.10	0.17
Q7B	18	0.06	0.02	0.97	0.01	0.22	0.22	0.06	0.07	0.25
Q7C	6	0.09	0.01	1.12	0.00	0.04	0.04	0.08	0.08	0.05
Q7C	7	0.06	0.01	1.04	0.01	0.09	0.08	0.06	0.07	0.10
Q7C	21	0.12	0.00	1.02	0.02	0.32	0.31	0.12	0.13	0.31
Q7C	41	0.13	0.03	0.92	0.00	0.24	0.27	0.14	0.15	0.30
Q8	11	0.12	0.08	0.88	0.01	0.34	0.38	0.14	0.15	0.48
Q8	12	0.10	0.11	0.91	0.01	0.33	0.36	0.11	0.12	0.49
Q8	13	0.09	0.15	0.81	0.01	0.29	0.35	0.12	0.12	0.54
Q9	1	0.05	0.02	0.84	0.01	0.27	0.33	0.06	0.07	0.35
Q9	20	0.16	0.02	1.04	0.00	0.21	0.20	0.16	0.16	0.22
Q9	22	0.07	0.02	1.00	0.00	0.16	0.16	0.07	0.08	0.17

Sp. - spektrum

Příloha V, Markéta Kuchyňová, Reaktivnost křemene v experimentálních maltových tělesech.

Příloha V-b: Vybrané molární obsahy prvků a molární poměry prvků v alkalicko-silikátových gelech z betonových trámců ze zkoušky RILEM AAR-4.1, SEM/EDS.

RILEM AAR-4.1										
Vzorek	Sp.	mol Na	mol Mg	mol Si	mol K	mol Ca	Ca/Si	Na/Si	(Na+K)/Si	(Ca+Mg)/Si
Q1	3	0.04	0.00	0.95	0.07	0.35	0.36	0.04	0.11	0.36
Q1	12	0.03	0.00	0.90	0.07	0.35	0.39	0.03	0.10	0.39
Q1	60	0.02	0.00	0.97	0.03	0.43	0.44	0.02	0.05	0.44
Q4	6	0.01	0.03	0.75	0.03	0.55	0.73	0.02	0.05	0.78
Q4	7	0.02	0.03	0.75	0.05	0.49	0.66	0.03	0.09	0.69
Q4	8	0.02	0.01	0.85	0.06	0.45	0.53	0.02	0.10	0.54
Q4	9	0.01	0.00	0.84	0.05	0.47	0.56	0.02	0.08	0.56
Q5	24	0.01	0.00	0.85	0.05	0.35	0.41	0.01	0.08	0.41
Q5	25	0.02	0.00	0.90	0.07	0.29	0.32	0.02	0.10	0.32
Q5	27	0.02	0.00	0.92	0.04	0.42	0.46	0.02	0.07	0.46
Q5	28	0.02	0.01	0.91	0.04	0.26	0.28	0.02	0.07	0.29
Q5	29	0.01	0.03	0.82	0.03	0.42	0.51	0.02	0.06	0.55
Q7A	19	0.02	0.00	0.79	0.07	0.39	0.49	0.03	0.11	0.49
Q7A	21	0.02	0.00	0.86	0.04	0.38	0.44	0.02	0.07	0.44
Q7A	22	0.03	0.00	0.96	0.05	0.36	0.38	0.03	0.09	0.38
Q7C	27	0.04	0.01	0.79	0.08	0.37	0.47	0.05	0.15	0.48
Q7C	29	0.02	0.01	0.82	0.06	0.45	0.55	0.02	0.10	0.56
Q7C	30	0.01	0.01	0.83	0.05	0.45	0.55	0.02	0.08	0.56
Q7C	35	0.03	0.00	0.88	0.07	0.30	0.34	0.04	0.11	0.34
Q7D	3	0.01	0.00	0.94	0.02	0.47	0.50	0.01	0.03	0.50
Q7D	45	0.02	0.00	0.94	0.04	0.40	0.42	0.03	0.07	0.42
Q7D	46	0.03	0.00	0.89	0.06	0.41	0.46	0.03	0.10	0.46
Q8	1	0.02	0.05	0.84	0.04	0.50	0.60	0.02	0.07	0.65
Q8	2	0.05	0.01	0.91	0.07	0.37	0.40	0.05	0.13	0.41
Q8	13	0.02	0.03	0.69	0.01	0.66	0.95	0.02	0.03	0.99
Q8	18	0.03	0.00	0.91	0.07	0.38	0.42	0.03	0.11	0.42
Q8	19	0.03	0.01	0.84	0.05	0.47	0.55	0.04	0.10	0.56
Q9	29	0.05	0.00	0.91	0.08	0.33	0.36	0.05	0.14	0.37
Q9	34	0.02	0.02	0.85	0.02	0.41	0.48	0.02	0.04	0.50
Q9	36	0.05	0.01	0.99	0.09	0.33	0.34	0.06	0.14	0.35

Sp. - spektrum

Příloha VI, Markéta Kuchyňová, Reaktivnost křemene v experimentálních maltových tělesech.

Příloha VI-a: Data ze zpracování analýzy obrazu vzorku Q1 v px.

Q1 křemenec, Sklená Huť, CZ - nábrus z maltového trámce ASTM C1260

SNÍMEK	CEMENT	KAMENIVO	PÓRY PRÁZDNÉ	PÓRY S GELY	GELY	CELKEM	ASR PROJEVY součást kameniva
1	442654	598027	6871			1047552	43872
2	397274	577987	73315			1048576	32016
3	403447	548629	18676			970752	32850
4	489132	463008	88171	8265		1048576	26273
5	453372	550954	32138	12112		1048576	27171
6	330179	696622	21775			1048576	42905
7	323150	712511	10084		1807	1047552	41937
8	316899	534491	111014	86172		1048576	31742
9	518028	493244	36430	874		1048576	40063
10	576855	445462	21870	4389		1048576	23407
11	352033	553758	46138	391		952320	58458
12	505657	512391	29504			1047552	38055
13	578324	411995	57233			1047552	19629
14	533588	478883	31296	4313	496	1048576	30479
15	498004	492164	58408			1048576	26122
16	630033	387823	30584		136	1048576	21860
17	380200	624535	38161	1992	3688	1048576	32002
18	413181	568381	60653		5337	1047552	34170
19	340257	633880	53554	19861		1047552	39639
20	488059	533021	21142	5330		1047552	28749
suma [px]	8970326	10817766	847017	143699	11464	20790272	671399
Obj. %	43.15	52.03	4.07	0.69	0.06	100.00	

Q1 horninový výbrus, [px]

SNÍMEK	GEOLOGICKÉ TRHLINY	CELEK
2	61163	1048756
3	59810	1048576
4	59791	1048576
5	55256	1048576
6	62189	1048576
7	58472	1048576
8	53694	1048576
9	46942	1048576
10	58358	1048576
11	56908	1048576
12	57395	1048576
13	65331	1048576
14	61439	1048576
15	51560	1048576
16	59688	1048576
17	56893	1048576
18	53247	1048576
19	57055	1048576
20	57239	1048576
suma [px]	1092430	19923124
Obj. %	5.48	

ASR projevy v trámci [px]	671399
kamenivo v trámci [px]	10817766
podíl ASR na kamenivu [obj. %]	6.21
podíl geol.trhlin v kamenivu [obj. %]	5.48
skutečný podíl ASR na kamenivu [obj. %]	0.72

Q1	[obj. %]
Kamenivo	52.03
Cement	43.15
Póry prázdné	4.07
Póry s gely	0.69
Gely	0.06
Celkem	100.00
Projevy ASR	0.72

Příloha VI, Markéta Kuchyňová, Reaktivnost křemene v experimentálních maltových tělesech.

Příloha VI-b: Data ze zpracování analýzy obrazu vzorku Q4 v px.

Q4 křemenec, Jeníkov, CZ - nábrus z maltového trámce ASTM C1260

SNÍMEK	CEMENT	KAMENIVO	PÓRY PRÁZDNÉ	PÓRY S GELY	GELY	CELKEM	ASR PROJEVY součást kameniva
1	409024	614076	25476			1048576	37962
2	453474	567637	26441			1047552	36456
3	471831	346628	29413			847872	23133
4	498036	524148	25379		1013	1048576	33637
5	553820	468945	25811			1048576	29302
6	407292	622909	18375			1048576	38916
7	344727	685603	18246			1048576	43300
8	422202	601787	24587			1048576	32622
9	420530	603731	23291			1047552	30352
10	372189	663457	12930			1048576	41974
11	464917	573699	7570	268	1098	1047552	26680
12	510635	493354	44406		181	1048576	36423
13	519243	521038	8295			1048576	28373
14	466712	558690	23174			1048576	32065
15	539035	494334	14339		868	1048576	30185
16	523144	486628	38804			1048576	27858
17	400468	635684	12424			1048576	30652
18	415828	620780	10944			1047552	25702
19	422539	585815	39566		656	1048576	26772
20	272279	733409	6958	32136	2770	1047552	50649
suma [px]	8887925	11402352	436429	32404	6586	20765696	663013
Obj. %	42.80	54.91	2.10	0.16	0.03	100.00	

Q4 horninový výbrus, [px]

SNÍMEK	GEOLOGICKÉ TRHLINY	CELEK
1	53673	1048576
2	51304	1048576
3	46423	1048576
4	73335	1048576
5	36811	1048576
6	34639	1048576
7	29344	1048576
8	37146	1048576
9	32308	1048576
10	36625	1048576
11	42720	1048576
12	46932	1048576
13	39193	1048576
14	34686	1048576
15	35814	1048576
16	42151	1048576
17	35011	1048576
18	37930	1048576
19	30621	1048576
20	35025	1048576
suma [px]	811691.00	20971520
Obj. %	3.87	

ASR projevy v trámci [px]	663013
kamenivo v trámci [px]	11402352
podíl ASR na kamenivu [obj. %]	5.81
podíl geol.trhlin v kamenivu [obj. %]	3.87
skutečný podíl ASR na kamenivu [obj. %]	1.94

Q4	[obj. %]
Kamenivo	54.91
Cement	42.80
Póry prázdné	2.10
Póry s gely	0.16
Gely	0.03
Celkem	100.00
Projevy ASR	1.94

Příloha VI, Markéta Kuchyňová, Reaktivnost křemene v experimentálních maltových tělesech.

Příloha VI-c: Data ze zpracování analýzy obrazu vzorku Q5 v px.

Q5 křemenec, Kublov, CZ - nábrus z maltového trámce ASTM C1260

SNÍMEK	CEMENT	KAMENIVO	PÓRY PRÁZDNÉ	PÓRY S GELY	GELY	CELKEM	ASR PROJEVY součást kameniva
1	455602	573489	18461			1047552	42301
2	370318	657143	19870		245	1047576	49547
3	470461	511227	26079	40809		1048576	48378
4	332352	706788	8412			1047552	59405
5	382032	641424	18494	6626		1048576	55830
6	447955	573541	27080			1048576	36078
7	494399	534534	18619			1047552	33222
8	476114	552637	18801			1047552	45396
9	280110	751071	17395			1048576	52405
10	311412	721543	14597			1047552	66852
11	448245	549451	13580	37300		1048576	47154
12	380159	654779	13153		485	1048576	69765
13	413638	610392	24546			1048576	46674
14	536222	364253	104467	41009	2625	1048576	27657
15	498626	447170	102780			1048576	33691
16	188579	736880	15987	101603	4503	1047552	59279
17	486244	493575	28760	39997		1048576	31289
18	418029	597815	30530	1178		1047552	50712
19	240732	798917	8927			1048576	70425
20	180360	844901	20159	1183	1973	1048576	73231
suma [px]	7811589	12321530	550697	269705	9831	20963352	999291
Obj. %	37.26	58.78	2.63	1.29	0.05	100.00	

Q5 horninový výbrus, [px]

SNÍMEK	GEOLOGICKÉ TRHLINY	CELEK
1	60343	1048576
2	36473	1048576
3	30055	1048576
4	30510	1048576
5	33577	1048576
6	31255	1048576
7	28497	1048576
8	29152	1048576
9	17787	1048576
10	39866	1048576
11	37748	1048576
12	32138	1048576
13	31849	1048576
14	25436	1048576
15	31856	1048576
16	27584	1048576
17	29277	1048576
18	27354	1048576
19	26083	1048576
20	43298	1048576
suma [px]	650138.00	20971520
Obj. %	3.10	

ASR projevy v trámci [px]	999291
kamenivo v trámci [px]	12321530
podíl ASR na kamenivu [obj. %]	8.11
podíl geol.trhlin v kamenivu [obj. %]	3.10
skutečný podíl ASR na kamenivu [obj. %]	5.01

Q5	[obj. %]
Kamenivo	58.78
Cement	37.26
Póry prázdné	2.63
Póry s gely	1.29
Gely	0.05
Celkem	100.00
Projevy ASR	5.01

Příloha VI, Markéta Kuchyňová, Reaktivnost křemene v experimentálních maltových tělesech.

Příloha VI-d: Data ze zpracování analýzy obrazu vzorku Q7-B v px.

Q7-B křemenná metadroba, Klovsjo, SE - nábrus z maltového trámce ASTM C1260

SNÍMEK	CEMENT	KAMENIVO	PÓRY PRÁZDNÉ	PÓRY S GELY	GELY	CELKEM	ASR PROJEVY součást kameniva
1a	217678	350031	4148			571857	62438
1b	135291	273773	2584			411648	42413
2	384183	655373	5673	2323		1047552	62497
3	408387	628092	12097			1048576	31759
4	331441	704048	13087			1048576	26082
5	205838	830704	11010			1047552	17567
6	417956	606717	23903			1048576	24861
7	404722	626066	17788			1048576	26184
8	370165	564220	25684	88510		1048579	38312
9	408038	453799	19509	165183	1023	1047552	41714
10	587072	422447	33346	4933	778	1048576	53543
11	408529	281286	24937			714752	42100
12	240210	799778	7564			1047552	152567
13	142677	896446	9453			1048576	252838
14	217632	805639	12469	8221	3591	1047552	77115
15	487881	518775	41920			1048576	25959
16	398121	621624	27807			1047552	28962
17	379130	659355	10091			1048576	20399
18	428259	466589	152704			1047552	24535
19	212051	828353	7363		809	1048576	40746
20	407729	601462	38361			1047552	108017
21	457602	525860	65114			1048576	78009
suma [px]	7650592	13120437	566612	269170	6201	21613012	1278617
Obj. %	35.40	60.71	2.62	1.25	0.03	100.00	

Q7-B horninový výbrus, [px]

SNÍMEK	GEOLOGICKÉ TRHLINY	CELEK
1	9594	1048576
2	16665	1048576
3	14989	1048576
4	14977	1048576
5	12776	1048576
6	30825	1048576
7	15869	1048576
8	15901	1048576
9	21542	1048576
10	24305	1048576
11	24591	1048576
12	21129	1048576
13	18400	1048576
14	18392	1048576
15	12046	1048576
16	8464	1048576
17	7925	1048576
18	13516	1048576
19	18951	1048576
20	14251	1048576
suma [px]	335108.00	20971520
Obj. %	1.60	

ASR projevy v trámci [px]	1278617
kamenivo v trámci [px]	13120437
podíl ASR na kamenivu [obj. %]	9.75
podíl geol.trhlin v kamenivu [obj. %]	1.60
skutečný podíl ASR na kamenivu [obj. %]	8.15

Q7-B	[obj. %]
Kamenivo	60.71
Cement	35.40
Póry prázdné	2.62
Póry s gely	1.25
Gely	0.03
Celkem	100.00
Projevy ASR	8.15

Příloha VI, Markéta Kuchyňová, Reaktivnost křemene v experimentálních maltových tělesech.

Příloha VI-e: Data ze zpracování analýzy obrazu vzorku Q7-C v px.

Q7-C křemenná metadroba, Klovsjo, SE - nábrus z maltového trámce ASTM C1260

SNÍMEK	CEMENT	KAMENIVO	PÓRY PRÁZDNÉ	PÓRY S GELY	GELY	CELKEM	ASR PROJEVY součást kameniva
1	395018	622972	19790	7526	3270	1048576	127478
2	412807	630985	4493		291	1048576	43709
3	451356	571090	26130			1048576	31265
4	404872	531189	29529	82364	622	1048576	19364
5	375505	601817	14733	54306	2215	1048576	21038
6	482541	542039	22972			1047552	19473
7	459085	423402	20820	145269		1048576	15787
8	587266	431945	28341			1047552	12095
9	462924	571117	14535			1048576	19690
10	388378	549194	5532			943104	81725
11	438731	598967	10878			1048576	207776
12	426094	614601	5836		2045	1048576	67096
13	345740	698603	4233			1048576	94527
14	466222	572633	9721			1048576	41299
15	551221	481967	14364			1047552	19631
16	349156	656672	42748			1048576	16479
17	405617	624721	13952	3262		1047552	14296
18	523192	514540	10844			1048576	20471
19	387877	649699	11000			1048576	24259
20	390358	650468	6726			1047552	46756
21	478263	466501	7273	4768	2595	959400	82772
suma [px]	9182223	12005122	324450	297495	11038	21820328	1026986
Obj. %	42.08	55.02	1.49	1.36	0.05	100.00	

Q7-C horninový výbrus, [px]

SNÍMEK	GEOLOGICKÉ TRHLINY	CELEK
1	26991	1048576
2	28741	1048576
3	23125	1048576
4	21465	1048576
5	22030	1048576
6	21029	1048576
7	16933	1048576
8	19874	1048576
9	22668	1048576
10	30318	1048576
11	23244	1048576
12	32277	1048576
13	48639	1048576
14	25804	1048576
15	22931	1048576
16	24863	1048576
17	19123	1048576
18	14422	1048576
19	14562	1048576
20	16876	1048576
suma [px]	475915.00	20971520
Obj. %	2.27	

ASR projevy v trámci [px]	1026986
kamenivo v trámci [px]	12005122
podíl ASR na kamenivu [obj. %]	8.55
podíl geol.trhlin v kamenivu [obj. %]	2.27
skutečný podíl ASR na kamenivu [obj. %]	6.29

Q7-C	[obj. %]
Kamenivo	55.02
Cement	42.08
Póry prázdné	1.49
Póry s gely	1.36
Gely	0.05
Celkem	100.00
Projevy ASR	6.29

Příloha VI, Markéta Kuchyňová, Reaktivnost křemene v experimentálních maltových tělesech.

Příloha VI-f: Data ze zpracování analýzy obrazu vzorku Q7-D v px.

Q7-D křemenná metadroba, Klovsjo, SE - nábrus z maltového trámce ASTM C1260

SNÍMEK	CEMENT	KAMENIVO	PÓRY PRÁZDNÉ	PÓRY S GELY	GELY	CELKEM	ASR PROJEVY součást kameniva
1	542314	414212	17896	72708	1446	1048576	107667
2	641819	345795	26835	34127		1048576	41621
3	433801	586757	26482	512		1047552	38623
4	547599	491923	8030			1047552	17895
5	486740	509533	7571	43018	1714	1048576	24064
6	507499	528530	12547			1048576	19027
7	274516	740435	32601			1047552	26191
8	359645	639919	12524	36488		1048576	18751
9	419418	546221	73575	8424	938	1048576	79578
10	380649	530548	132580	1680	3119	1048576	149344
11	444749	555043	19425	28335		1047552	79851
12	410652	605610	28795		3519	1048576	69582
13	430174	524066	94336			1048576	31059
14	475907	535165	13592	22888		1047552	22046
15	510447	527227	9878			1047552	24781
16	472806	555240	19506			1047552	29307
17	491811	548217	8548			1048576	23223
18	310132	714129	24315			1048576	65326
19	434834	553090	16288	44364		1048576	116124
20a	207659	304260	9700	37485		559104	38303
20b	109369	91147	4279			204795	15836
20c	90183	35035	2884			128102	5848
suma [px]	8982723	10882102	602187	330029	10736	20807777	1044047
Obj. %	43.17	52.30	2.89	1.59	0.05	100.00	

Q7-D horninový výbrus, [px]

SNÍMEK	GEOLOGICKÉ TRHLINY	CELEK
1	21144	1048576
2	15959	1048576
3	13809	1048576
4	15681	1048576
5	8734	1048576
6	12008	1048576
7	18861	1048576
8	16444	1048576
9	14589	1048576
10	17594	1048576
11	16478	1048576
12	22388	1048576
13	24640	1048576
14	25195	1048576
15	16885	1048576
16	11080	1048576
17	14281	1048576
18	18514	1048576
19	16050	1048576
20	42976	1048576
suma [px]	363310.00	20971520
Obj. %	1.73	

ASR projevy v trámci [px]	1044047
kamenivo v trámci [px]	10882102
podíl ASR na kamenivu [obj. %]	9.59
podíl geol.trhlin v kamenivu [obj. %]	1.73
skutečný podíl ASR na kamenivu [obj. %]	7.86

Q7-D	[obj. %]
Kamenivo	52.30
Cement	43.17
Póry prázdné	2.89
Póry s gely	1.59
Gely	0.05
Celkem	100.00
Projevy ASR	7.86

Příloha VI, Markéta Kuchyňová, Reaktivnost křemene v experimentálních maltových tělesech.

Příloha VI-g: Data ze zpracování analýzy obrazu vzorku Q8 v px.

Q8 kvarcit (bohatý K-živcem), Kulbacksliden, SE - nábrus z maltového trámce ASTM C1260

SNÍMEK	CEMENT	KAMENIVO	PÓRY PRÁZDNÉ	PÓRY S GELY	GELY	CELKEM	ASR PROJEVY součást kameniva
1	463010	566864	18430		272	1048576	26267
2	214887	823204	9573		912	1048576	27105
3	337471	702924	8181			1048576	25146
4	413888	623691	10997			1048576	28787
5	431111	531137	85613		715	1048576	39925
6	420835	432693	10728			864256	17175
7	482916	542470	23190			1048576	20938
8	492872	525192	30512			1048576	24879
9	457575	554538	35297		1166	1048576	21278
10	372150	586588	21811	64901	3126	1048576	18489
11	526860	505032	16502		182	1048576	21673
12	403991	627428	16959		198	1048576	35558
13	472411	560000	16165			1048576	24617
14	535700	483338	29538			1048576	20953
15	425673	573489	49414			1048576	25285
16	487341	540975	20260			1048576	21210
17	358025	664636	25915			1048576	27700
18	331424	687888	28958		306	1048576	18170
19	216090	811090	20933		463	1048576	30650
20	397798	629893	20885			1048576	17121
suma [px]	8242028	11973070	499861	64901	7340	20787200	492926
Obj. %	39.65	57.60	2.40	0.31	0.04	100.00	

Q8 horninový výbrus, [px]

SNÍMEK	GEOLOGICKÉ TRHLINY	CELEK
1	3142	1048576
2	2262	1048576
3	2374	1048576
4	2922	1048576
5	2272	1048576
6	2985	1048576
7	5496	1048576
8	4857	1048576
9	15732	1048576
10	12825	1048576
11	7509	1048576
12	3297	1048576
13	7094	1048576
14	6209	1048576
15	3981	1048576
16	4791	1048576
17	4698	1048576
18	4763	1048576
19	2350	1048576
20	3337	1048576
suma [px]	102896.00	20971520
Obj. %	0.49	

ASR projevy v trámci [px]	492926
kamenivo v trámci [px]	11973070
podíl ASR na kamenivu [obj. %]	4.12
podíl geol.trhlin v kamenivu [obj. %]	0.49
skutečný podíl ASR na kamenivu [obj. %]	3.63

Q8	[obj. %]
Kamenivo	57.60
Cement	39.65
Póry prázdné	2.40
Póry s gely	0.31
Gely	0.04
Celkem	100.00
Projevy ASR	3.63

Příloha VI, Markéta Kuchyňová, Reaktivnost křemene v experimentálních maltových tělesech.

Příloha VI-h: Data ze zpracování analýzy obrazu vzorku Q9 v px.

Q9 pegmatitový křemen, Edsele, SE - nábrus z maltového trámce ASTM C1260

SNÍMEK	CEMENT	KAMENIVO	PÓRY PRÁZDNÉ	PÓRY S GELY	GELY	CELKEM	ASR PROJEVY součást kameniva
1	428455	527563	90510			1046528	4128
2a	358984	361667	5365			726016	13494
2b	146909	110348	1815			259072	5944
3	292763	697279	58534			1048576	19135
4	432090	563597	51865			1047552	19698
5	461254	567648	19674			1048576	22029
6	287518	684928	6181	68925		1047552	14860
7	403964	636525	8087			1048576	7398
8	335755	707229	4568			1047552	19069
9	390587	647936	10053			1048576	16402
10	421482	606720	20374			1048576	23023
11	483045	556901	4491		4139	1048576	16878
12	522421	513417	11714			1047552	18888
13	540327	497259	10990			1048576	17360
14	485440	554527	7585			1047552	10427
15	513048	527278	8250			1048576	17177
16	501378	537685	9513			1048576	22865
17	464124	536528	46900			1047552	22134
18	450718	534418	63440			1048576	16025
19	466508	572458	9610			1048576	20332
20	497028	544516	6008			1047552	16178
suma [px]	8883798	11486427	455527	68925.00	4139	20898816	343444
Obj. %	42.51	54.96	2.18	0.33	0.02	100.00	

Q9 horninový výbrus, [px]

SNÍMEK	GEOLOGICKÉ TRHLINY	CELEK
1	9675	1048576
2	8732	1048576
3	7861	1048576
4	11408	1048576
5	9582	1048576
6	9822	1048576
7	11281	1048576
8	11961	1048576
9	12551	1048576
10	12406	1047552
11	10832	1048576
12	11108	1048576
13	6363	1048576
14	7864	1048576
15	8545	1048576
16	10364	1048576
17	11419	1048576
18	9430	1048576
19	8723	1048576
20	8711	1048576
suma [px]	198638	20970496
Obj. %	0.95	100.00

ASR projevy v trámci [px]	343444
kamenivo v trámci [px]	11486427
podíl ASR na kamenivu [obj. %]	2.99
podíl geol.trhlin v kamenivu [obj. %]	0.95
skutečný podíl ASR na kamenivu [obj. %]	2.04

Q9	[obj. %]
Kamenivo	42.18
Cement	54.96
Póry prázdné	2.18
Póry s gely	0.33
Gely	0.02
Celkem	100.00
Projevy ASR	2.04

Příloha VII, Markéta Kuchyňová, Reaktivnost křemene v experimentálních maltových tělesech.

Příloha VII-a: Data ze zpracování alternativní analýzy obrazu vzorku Q8 v px.

Q8 kvarcit (bohatý K-živcem), Kulbacksliden, SE

Q8 nábrus z trámce: křemen

Více než 60 zrn

SNÍMEK	PROJEVY ASR	CELEK	PLOCHA křemen
1	896	1048576	13635
2	696	1048576	20941
3	904	1048576	33547
4	631	1048576	17977
5	887	1048576	21807
6	1037	864256	31173
7	1044	1048576	21977
8	1309	1048576	30578
9	1391	1048576	47179
10	1456	1048576	53294
11	2182	1048576	67757
12	1676	1048576	30399
13	1533	1048576	36260
14	1991	1048576	52246
15	2108	1048576	50057
16	1634	1048576	50532
17	1526	1048576	25256
18	1048	1048576	34710
19	2547	1048576	96088
20	886	1048576	31070
suma [px]	27382	20787200	766483
Obj. %	3.57		

Q8 horninový výbrus: křemen

Více než 60 zrn

SNÍMEK	GEOLOGICKÉ TRHLINY	CELEK	PLOCHA křemen
1	1460	1048576	555373
2	1202	1048576	500031
3	1092	1048576	476343
4	1733	1048576	489710
5	1514	1048576	473011
suma [px]	7001	5242880	2494468
Obj. %	0.28		

Q8 nábrus z trámce: plagioklas

Cca 60 zrn

SNÍMEK	PROJEVY ASR	CELEK	PLOCHA plagioklas
1	1269	1048576	35802
2	875	1048576	30133
3	1126	1048576	30179
4	1536	1048576	28991
5	1169	1048576	36797
6	1643	1048576	55248
7	928	1048576	31732
8	901	1048576	26417
9	820	1048576	26156
10	934	1048576	29966
11	1268	1048576	54409
12	2829	1048576	69720
13	1898	1048576	44526
14	2082	1048576	57726
15	1245	1048576	27890
16	1034	1048576	44826
17	1025	1048576	26122
18	896	1048576	20402
19	896	1048576	46864
20	839	1048576	31078
suma [px]	25213	20971520	754984
Obj. %	3.34		

Q8 horninový výbrus: plagioklas

Více než 60 zrn

SNÍMEK	GEOLOGICKÉ TRHLINY	CELEK	PLOCHA plagioklas
1	1776	1048576	316850
2	1136	1048576	319117
3	1217	1048576	276530
4	1426	1048576	324317
6	2063	1048576	361313
suma [px]	7618	5242880	1598127
Obj. %	0.48		

Příloha VII, Markéta Kuchyňová, Reaktivnost křemene v experimentálních maltových tělesech.

Příloha VII-a: Data ze zpracování alternativní analýzy obrazu vzorku Q8 v px.

Q8 nábrus z trámce: K-živec

Cca 60 zrn

SNÍMEK	PROJEVY ASR	CELEK	PLOCHA K-živec
1	779	1048576	11370
2	731	1048576	10207
3	891	1048576	19868
4	373	1048576	6705
5	575	1048576	6345
6	466	1048576	7914
7	718	1048576	9548
8	1398	1048576	20890
9	659	1048576	7703
10	1140	1048576	23651
11	1612	1048576	28018
12	1263	1048576	22641
13	1069	1048576	18836
14	783	1048576	6327
15	1004	1048576	14594
16	538	1048576	7514
17	940	1048576	20916
18	1434	1048576	44152
19	1066	1048576	23119
20	649	1048576	9691
suma [px]	18088	20971520	320009
Obj. %	5.65		

Q8 horninový výbrus: K-živec

Cca 60 zrn

SNÍMEK	GEOLOGICKÉ TRHLINY	CELEK	PLOCHA K-živec
1	9467	1048576	202379
2	18312	1048576	298357
3	18004	1048576	357402
4	17969	1048576	310591
6	12950	1048576	290881
suma [px]	76702	5242880	1459610
Obj. %	5.25		

Q8 nábrus z trámce: slída – biotit

Cca 31 zrn

SNÍMEK	TRHLINY Threshold 0-70	CELEK	PLOCHA biotit
4	1658	1048576	11480
6	329	1048576	712
7	452	1048576	3199
9	307	1048576	1456
12	766	1146880	5043
14	705	1048576	5982
15	1552	1048576	9447
16	2112	1048576	13130
17	1594	1048576	10218
18	558	1048576	4167
suma [px]	10033	10584064	64834
Obj. %	15.47		

Q8 horninový výbrus: slída – biotit

Cca 47 zrn

SNÍMEK	TRHLINY Threshold 0-70	CELEK	PLOCHA biotit
1	1124	1048576	6493
2	798	1048576	4344
3	316	1048576	1726
4	308	1048576	1232
5	286	1048576	1731
6	627	1048576	2114
7	67	1048576	1040
8	762	1048576	3348
13	390	1048576	3993
14	987	1048576	6938
16	588	1048576	2650
17	677	1048576	2592
18	171	1048576	1085
19	388	1048576	2311
20	595	1048576	2798
suma [px]	8084	15728640	44395
Obj. %	18.21		

Příloha VII, Markéta Kuchyňová, Reaktivnost křemene v experimentálních maltových tělesech.

Příloha VII-a: Data ze zpracování alternativní analýzy obrazu vzorku Q8 v px.

Q8 **nábrus z trámce: slída – muskovit**
Cca 18 zrn

SNÍMEK	TRHLINY Threshold 0-70	CELEK	PLOCHA muskovit
1	1786	1048576	18860
2	1564	1048576	39462
11	310	1048576	3321
13	390	1048576	3946
16	302	1048576	3404
17	1051	1048576	12303
suma [px]	5403	6291456	81296
Obj. %	6.65		

Q8 **horninový výbrus: slída – muskovit**
Cca 20 zrn

SNÍMEK	TRHLINY Threshold 0-70	CELEK	PLOCHA muskovit
1	35	1048576	1181
3	150	1048576	4558
4	33	1048576	761
6	52	1048576	4299
9	163	1048576	4155
10	222	1048576	3547
13	314	1048576	8769
17	161	1048576	2593
19	65	1048576	2992
suma [px]	1195	9437184	32855
Obj. %	3.64		

Příloha VII-b: Výpočet alternativní analýzy obrazu vzorku Q8.

	Projevy ASR nábrus [obj. %]	Geol.trhliny hor.výbrus [obj. %]	Projevy ASR mínus geol.trhliny	Modální složení [obj. %]	Vážený průměr projevů ASR [obj. %]	Podíl minerálu na projevech ASR [%]
Křemen	3.57	0.28	3.29	44.70	1.47	61.27
Plagioklas	3.34	0.48	2.86	28.65	0.82	34.16
K-živec	5.65	5.25	0.40	26.17	0.10	4.33
Biotit	15.47	18.21	-	0.28	0.00	0.00
Muskovit	6.65	3.64	3.01	0.19	0.01	0.24
celk.			9.56	99.99	2.40	100.00