

**Ministerstvo dopravy a výstavby SR
Sekcia cestnej dopravy a pozemných komunikácií**

ALKALICKO-KREMIČITÁ REAKCIA KAMENIVA V BETÓNE

ROZBOROVÁ ÚLOHA

OBSAH

1	Všeobecné údaje	3
2	Cieľ rozborovej úlohy (RÚ)	3
2.1	Distribúcia RÚ	3
2.2	Súvisiace a citované právne predpisy	3
2.3	Súvisiace a citované normy	3
2.4	Súvisiace a citované technické predpisy rezortu	4
2.5	Súvisiace zahraničné predpisy	4
2.6	Použitá literatúra	5
2.7	Použité skratky	9
3	AKR a jej vplyv na betón, faktory ovplyvňujúce AKR a možnosti zamedzenia AKR	9
3.1	AKR v betóne – princíp reakcie	10
3.2	Faktory vplyvajúce na AKR	11
3.3	Možnosti zamedzenia AKR v betóne	14
4	Metódy hodnotenia nebezpečnosti kameniva z hľadiska AKR	15
4.1	Petrografický opis	19
4.2	Chemické skúšky na kamenive	21
4.3	Chemické skúšky na zatvrdnutom betóne (vývrty)	22
4.4	Terénne skúšky na veľkých blokoch	23
4.5	Dilatometrické merania	24
5	Limitné hodnoty kameniva vo vzťahu k AKR v betóne	26
5.1	Určenie limitných hodnôt kedy sa dá AKR v betóne obmedziť a kedy nie je kamenivo použiteľné	27
6	Vplyv prostredia betónu na tvorbu AKR	27
6.1	Ph betónu, vplyv vlhkosti	28
7	Možnosti eliminácie AKR v betóne a jej následkov	29
7.1	Nízko-alkalické cementy	29
7.2	Minerálne prímеси	29
7.3	Lítiové soli	30
8	Skúšobné metódy na preukazovanie AKR - početnosti skúšania	30
9	Rozdelenie hornín z hľadiska rizikovosti	31
10	Výskyt AKR na Slovensku	32
11	Záver	34

1 Všeobecné údaje

Objednávateľ:	Slovenská správa ciest
Zhotoviteľ:	ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE IČO 00397 563
Doba riešenia:	20.6.2022 – 15.11.2022
Riešiteľ:	Doc. Dr. Ing. Katarína Zgútová Doc. Ing. Martin Pitoňák, PhD. Doc. Ing. Juraj Šrámek, PhD. Ing. Matúš Kozel, PhD. Ing. Juraj Mušuta

2 Cieľ rozborovej úlohy (RÚ)

Cieľom RÚ je rozpracovať problematiku alkalicko-kremičitej reakcie (AKR) kameniva v betóne. Preskúmať možnosti skúšania na jej preukazovanie, definovať parametre kameniva do betónu z hľadiska AKR a popísať podmienky, za ktorých sa kamenivo s reaktívnymi minerálmi a zložkami dá do betónu použiť, za splnenia požadovaných kritérií, a ktoré je do betónu nepoužiteľné.

2.1 Distribúcia RÚ

Elektronická verzia RÚ sa zverejní na webovom sídle SSC: www.ssc.sk

2.2 Súvisiace a citované právne predpisy

- [Z1] Zákon č. 135/1961 Zb. o pozemných komunikáciách (cestný zákon), v znení neskorších predpisov;
- [Z2] vyhláška FMD č. 35/1984 Zb., ktorou sa vykonáva zákon o pozemných komunikáciách (cestný zákon);
- [Z3] zákon č. 8/2009 Z. z. o cestnej premávke a o zmene a doplnení niektorých zákonov v znení neskorších predpisov;
- [Z4] vyhláška MV SR č. 9/2009 Z. z., ktorou sa vykonáva zákon o cestnej premávke a o zmene a doplnení niektorých zákonov v znení neskorších predpisov;
- [Z5] zákon č. 133/2013 Z. z. o stavebných výrobkoch a o zmene a doplnení niektorých zákonov v znení neskorších predpisov;
- [Z6] vyhláška MDVRR SR č. 162/2013 Z. z., ktorou sa ustanovuje zoznam skupín stavebných výrobkov a systémy posudzovania parametrov v znení neskorších predpisov;
- [Z7] nariadenie Európskeho parlamentu a Rady (EÚ) č. 305/2011 z 9. marca 2011, ktorým sa ustanovujú harmonizované podmienky uvádzania stavebných výrobkov na trh a ktorým sa zrušuje smernica Rady 89/106/EHS v platnom znení;

2.3 Súvisiace a citované normy

STN EN 206+A2	Betón. Špecifikácia, vlastnosti, výroba a zhoda.
STN EN 12620+A1	Kamenivo do betónu
TNI CEN TR 16349	Rámec pre špecifikácie na zabránenie poškodenia betónu vplyvom alkalicko-kremičitej reakcie (ASR)
STN 72 1179	Stanovenie a hodnotenie alkalicko-kremičitej rozpínivosti kameniva (alkalicko-kremičitá reakcia).
STN EN 13925-1	Nedeštruktívne skúšanie. Röntgenová difrakcia polykryštalických a amorfných materiálov. Časť 1: Všeobecné podmienky
STN EN 13925-2	Nedeštruktívne skúšanie. Röntgenová difrakcia polykryštalických a amorfných materiálov. Časť 2: Postupy
STN EN 932-3	Skúšky na stanovenie všeobecných vlastností kameniva. Časť 3: Postup a terminológia na zjednodušený petrografický popis.
STN 72 1160	Stanovenie alkalicko-kremičitej rozpínivosti prírodného stavebného uhličitanového kameňa
ČSN 72 1179	Stanovenie reaktivity kameniva s alkáliami

ČSN 72 1160 Stanovenie alkalickej rozpínivosti prírodného stavebného uhličitanového kameňa

Poznámka: Súvisiace a citované normy vrátane aktuálnych zmien, dodatkov a národných príloh.

2.4 Súvisiace a citované technické predpisy rezortu

[T1]	TP 073	Katalóg porúch vozoviek s cementobetónovým krytom
[T2]	TP 091	Monitorovanie betónového ostenia tunelov
[T3]	TKP 0	Všeobecne
[T4]	TKP 8	Cementobetónové kryty vozoviek
[T5]	TKP 9	Kryty chodníkov a iných plôch z dlažby
[T6]	TKP 18	Betón na konštrukcie
[T7]	KLK KB 1/2021	Katalógové listy kameniva pre konštrukčné betóny

Poznámka: Súvisiace a citované Technické predpisy rezortu v platnom znení vrátane dodatkov.

2.5 Súvisiace zahraničné predpisy

[ZP1]	DAfStb	Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkali-reaktion im Beton, [Preventívne opatrenia proti škodlivým alkalickej reakciám v betóne].
[ZP2]	ASTM C-1260-14; ASTM C 1260-21	Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method), [Štandardná skúšobná metóda pre potenciálnu alkalickej reaktivity kameniva (metóda maltových teliesok)].
[ZP3]	ASTM C-1293	Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction, [Štandardná skúšobná metóda na stanovenie zmeny dĺžky betónu v dôsledku alkalicko-kremičitej reakcie].
[ZP4]	ASTM C1567-8; ASTM C 1567-21	Standard Test Method for Determining the Potential Alkali-Silica Reactivity of Combinations of Cementitious Materials and Aggregate (Accelerated Mortar-Bar Method) [Štandardná skúšobná metóda na stanovenie potenciálnej alkalicko-kremičitej reaktivity kombinácií cementových materiálov a kameniva (zrýchlená metóda malty a teliesok)]
[ZP5]	ÖNORM B 3100	Beurteilung der Alkali-Kieselsäure-Reaktivität im Beton, [Hodnotenie alkalicko-kremičitej reaktivity v betóne].
[ZP6]	TP 137	Vyloučení alkalickej reakce kameniva v betonu na stavbách pozemních komunikací, [Zamedzenie alkalicko-kremičitej reakcie kameniva a betónu na stavbách pozemných komunikácií].
[ZP7]	NF P18-454	Concrete - Reactivity of a concrete formula with regard to the alkali-aggregate reaction - Performance test, [Betón – reaktivita receptúry betónovej zmesi vo vzťahu k alkalicko kremičitej reakcií kameniva – výkonový test]
[ZP8]	BS 7943:1999	Guide to the interpretation of petrographical examinations for alkali-silica reactivity [Návod na interpretáciu petrografických vyšetrení alkalicko-kremičitej reaktivity]
[ZP9]	CSA-A23.1-Appendix B.	Appendix B Alkali-aggregate reaction. [Príloha B Alkalická reakcia kameniva]
[ZP10]	CSA A23.1-04.	Concrete Materials and Methods of Concrete Construction, [Betónové materiály a spôsoby výstavby betónu]
[ZP11]	ASTM C150 a AASHTO M85	Standard Specification for Portland Cement, [Štandardná špecifikácia pre portlandský cement]
[ZP12]	ASTM C441/C441M-17	Standard Test Method for Effectiveness of Pozzolans or Ground Blast-Furnace Slag in Preventing Excessive Expansion of Concrete Due to the Alkali-Silica Reaction [Štandardná skúšobná metóda na účinnosť pucolánov alebo vysokopecnej trosky pri prevencii nadmerného rozpínania betónu v dôsledku alkalicko-kremičitej reakcie]

[ZP13] ASTM-C294	Standard Descriptive Nomenclature for Constituents of Concrete Aggregates [Štandardná popisná nomenklatúra pre zložky betónového kameniva]
[ZP14] ASTM-C295	Standard Guide for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete [Štandardná príručka pre petrografické skúmanie kameniva do betónu]
[ZP15] ASTM C856/C856M	Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete [Štandardná popisná metóda petrografického skúmania vytvrdeného betónu]
[ZP16] CAN/CSA-A23.2-14A-14	Potential Expansivity of Aggregates; Procedure for Length Change Due to Alkali-Aggregate Reaction in Concrete Prisms [Potenciálna expanzia agregátov; Postup zmeny dĺžky v dôsledku alkalicko-agregátovej reakcie v betónových telieskách]

2.6 Použitá literatúra

- [L1] Stanton, T.E., "Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate," Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 66, 1940, pp. 1,781–1,811. [Expanzia betónu prostredníctvom reakcie medzi cementom a kamenivom]
- [L2] Experimentální výzkum alkalicko-křemičité reaktivnosti vulkanických hornin [online]. Praha, 2010. Dostupné z: Experimentální výzkum alkalicko-křemičité reaktivnosti vulkanických hornin. Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze. [Experimentálny výskum alkalicko-kremičitej reaktivity vulkanických hornín]
- [L3] MODRÝ, S. Vyloučení alkalické reakce kameniva v betonu na stavbách pozemních komunikací: Etapa a) Rešeršní průzkum alkalické reakce s vyhodnocením. Kloknerův ústav ČVUT, 2003 [Eliminácia alkalickej reakcie kameniva v betóne na stavbách pozemných komunikácií]
- [L4] D.W. Hobbs, Alkali-Silica Reaction in Concrete (Thomas Telford, London, 1988) [Alkalicko-kremičitá reakcia v betóne]
- [L5] FARNY, James A.; KOSMATKA, Steven H. *Diagnosis and control of alkali-aggregate reactions in concrete*. Skokie, IL: Portland Cement Association, 1997. [Diagnostika a kontrola alkalickej reakcií kameniva v betóne]
- [L6] RAJABIPOUR, Farshad, Eric GIANNINI, Cyrille DUNANT, Jason IDEKER a Michael THOMAS. Cement and Concrete Research: Alkali-silica reaction: Current understanding of the reaction mechanisms and the knowledge gaps. 2015, , 130-146. DOI: 0008-8846. [Výskum cementu a betónu: Alkali-kremičitá reakcia: Súčasné chápanie reakčných mechanizmov a medzery v súčasnom poznaní]
- [L7] SIMS, Ian; POOLE, Alan B. (ed.). *Alkali-aggregate reaction in concrete: A world review*. CRC Press, 2017. [Alkalická reakcia kameniva v betóne: svetový prehľad]
- [L8] Binal, Adil. (2015). The Pessimism Ratio and Aggregate Size Effects on Alkali Silica Reaction. *Procedia Earth and Planetary Science*. 15. 725-731. 10.1016/j.proeps.2015.08.103. [Pesimový pomer a vplyv veľkosti kameniva na tvorbu alkalického oxidu kremičitého]
- [L9] Ichikawa, Tsuneki. (2009). Alkali-silica reaction, pessimum effects and pozzolanic effect. *Cement and Concrete Research*. 39. 716-726. 10.1016/j.cemconres.2009.06.004. [Alkalicko-kremičitá reakcia, pesimové účinky a pucolánový efekt]
- [L10] Fernandes, Isabel & Broekmans, Maarten A.T.M.. (2013). Alkali-Silica Reactions: An Overview. Part I. Metallography, Microstructure, and Analysis. 2. 10.1007/s13632-013-0085-5. [AKR Prehľad. Časť I. Metalografia, mikroštruktúra a analýza]
- [L11] Mather, B., New Concern over Alkali-Aggregate Reaction, Joint Technical Paper by National Aggregates Association and National Ready Mixed Concrete Association, NAA Circular No. 122 and NRMCA Publication No. 149, Silver Spring, Maryland, 1975. [Nové obavy z AKR]
- [L12] Farny James A Beatrix Kerkhoff and Portland Cement Association. 2007. *Diagnosis and Control of Alkali-Aggregate Reactions in Concrete*. Skokie III: Portland Cement Association. [Diagnostika a kontrola AKR v betóne]
- [L13] L.H. Tuthill, Performance failures of concrete materials and of concrete as a material. *ACI Concr. Intern.* 2(1), 33–39 (1980) [Poruchy výkonu betónových výrobkov a betónu ako materiálu]
- [L14] L.J. Malvar, L.R. Lenke; Efficiency of fly ash in mitigating alkali-silica reaction based on chemical composition, *ACI Mater. J.*, 103 (2006), pp. 319-326 [Účinnosť popolčeka pri zmierňovaní alkalicko-kremičitej reakcie na základe chemického zloženia]

- [L15] N. Tenoutasse, A.M. Marion; The influence of silica fume in alkali–aggregate reactions; P.E. Grattan-Bellew (Ed.), Concrete Alkali–Aggregate Reactions, Noyes Publications, Park Ridge, N.J. (1987), pp. 711-775 [Vplyv oxidu kremičitého na AKR]
- [L16] M.D.A. Thomas, R.F. Bleszynski; The use of silica fume to control expansion due to alkali–aggregate reactivity in concrete — a review J. Skalny, S. Mindess (Eds.), Material Science of Concrete, American Ceramic Society, Westerville, OH (2001) [Použitie kremičitého úletu na kontrolu expanzie v dôsledku AKR]
- [L17] A. Carles-Gibergues, M. Cyr, M. Moisson, E. Ringot; A simple way to mitigate alkali–silica reaction, Mat. Struct., 41 (2008), pp. 73-83 [Jednoduchý spôsob, ako zmierniť AKR]
- [L18] Omezení vzniku křemičito-alkalické reakce kameniva v betonu; Výzkumný ústav maltovin Praha. [online]. Dostupné z: <http://www.vumo.cz/wp-content/uploads/2015/05/taborsky-prezentace.pdf> [Obmedzenie vzniku AKR kameniva v betóne]
- [L19] Alkali-Aggregate Reaction. PCA - The Portland Cement Association - America's Cement Manufacturer [online]. Copyright © 2019 Portland Cement Association. All rights reserved. www.cement.org [cit. 16.09.2022]. Dostupné z: <https://www.cement.org/learn/concrete-technology/durability/alkali-aggregate-reaction> [AKR]
- [L20] PERTOLD, Z.; ŠACHLOVÁ, Š.; ŠTASTNÁ, A.; BÍLEK, V.; KRUTILOVÁ, K.; BÍLEK, V.; TOPOLÁŘ, L. Alkalicko- kremičitá reakce v České republice a možnosti její eliminace. Beton TKS, 2014, roč. 14, č. 2, s. 34-41. ISSN: 1213- 3116. dostupné z: [2014-2-34 ALKALICKO-KŘEMIČITÁ REAKCE V ČESKÉ REPUBLICE A MOŽNOSTI JEJÍ ELIMINACE | Ebeton](#) [AKR v Českej republike a možnosti jej eliminácie.]
- [L21] Xu, H., "On the Alkali Content of Cement in AAR," in *Concrete Alkali-Aggregate Reactions, Proceedings of the 7th International Conference*, edited by Grattan-Bellew, Patrick E., Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey, 1987, pages 451 to 455 [O alkalickom obsahu cementu v AKR]
- [L22] Poole, A. B., "Introduction to Alkali-Aggregate Reaction in Concrete," *The Alkali-Silica Reaction in Concrete*, edited by Swamy, R.N., Van Nostrand, R., New York, New York, 1992. [Úvod do AKR v betóne]
- [L23] MID-ATLANTIC REGIONAL TECHNICAL COMMITTEE, et al. Guide Specifications for Concrete Subject to Alkali-Silica Reactions. *Mid Atlantic Regional Technical Committee, Silver Springs*, 1993. [Sprievodca špecifikáciami pre betón podliehajúci AKR]
- [L24] Dove P. M.: 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*, 1995, č. 31, 235-290. [Kinetické a termodynamické kontroly reaktivity oxidu kremičitého pri určitých poveternostných prostrediach]
- [L25] Rogers, Chris & Grattan-Bellew, P.E. & Hooton, Doug & Ryell, J. & Thomas, M.. (2000). Alkali-aggregate reactions in Ontario. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 27. 10.1139/cjce-27-2-246. [AKR v Ontáriu]
- [L26] Perenchio, W. F., Kaufman, I., and Krause, R. J., "Concrete Repair in a Desert Environment," Concrete International, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, February 1991, pages 23 to 26. [Možnosti opravy betónu v púštnom prostredí]
- [L27] Stark, D., Handbook for the Identification of Alkali-Silica Reactivity in Highway Structures, SHRP-C/FR-91-101, Strategic Highway Research Program, Washington, D.C., 1991a. Also PCA Publication LT165. [Príručka na identifikáciu AKR v konštrukciách diaľnic]
- [L28] Stark, D., "The Moisture Condition of Field Concrete Exhibiting Alkali-Silica Reactivity," CANMET/ACI Second International Conference on Durability of Concrete, SP-126, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1991, pages 973 to 987. [Vlhkosť betónu vo vzťahu k AKR]
- [L29] Stark, D., "Effects of Water-Cement Ratio on Expansion Due to ASR," Concrete Technology Today, PL951, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, March 1995 [Účinky vodného súčiniteľa na expanziu v dôsledku AKR]
- [L30] Grattan-Bellew, P. E., "Alkali-Silica Reaction— Canadian Experience," in *The Alkali-Silica Reaction in Concrete*, edited by Swamy, R.N., Van Nostrand Reinhold, New York, 1992, pages 223 to 248 [AKR – skúsenosti z Kanady]
- [L31] Helmuth, R., Alkali-Silica Reactivity: An Overview of Research, SHRP-C-342, Strategic Highway Research Program, Washington, D. C., 1993. Also PCA Publication LT177. [AKR: Prehľad výskumu]
- [L32] Stark, D., "Effects of Chloride Solutions on Expansion Due to ASR," Concrete Technology Today, PL953, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, November 1995. [Účinky roztokov chloridov na expanziu v dôsledku AKR]

- [L33] Swamy, R.N., and Al-Asali, M.M., "New Test Methods for Alkali-Silica Reaction," in Concrete Alkali-Aggregate Reactions, Proceedings of the 7th International Conference, edited by Grattan-Bellew, Patrick E., Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey, 1987, pages 324 to 329. [Nové testovacie metódy pre alkalicko-kremičitú reakciu]
- [L34] Abbas, S.; Abbass, W.; Nehdi, M.L.; Ahmed, A.; Yousaf, M. Investigation of Alkali-Silica Reactivity in Sustainable Ultrahigh Performance Concrete. Sustainability 2021,13,5680. <https://doi.org/10.3390/su13105680>. [Skúmanie AKR v udržateľnom betóne s vysokým výkonom]
- [L35] Ozol, M.A. The pessimum proportion as a reference point in modulating alkali-silica reaction. Proceedings of a Symposium on Alkali-Aggregate Reaction, Preventive Measures, 1975 pp. 113–130. 35. [Podiel pesima ako referenčný bod pri modulácii AKR]
- [L36] Mielenz, R.C., Green, K.T. and Benton, E.J. Chemical test for the reactivity of aggregate with cement alkalis: chemical processes in cement aggregate reaction. Am. Conc. Inst. 1947 Pr. 44, 193–224. [Chemická skúška reaktivity kameniva s cementovými alkáliami]
- [L37] P.E. Grattan-Bellew, Petrographic and technological methods for evaluation of concrete aggregates, in: V.S. Ramachandran, J.J. Beaudoin (Eds.) Handbook of analytical techniques in concrete science and technology Principles, Techniques, and Applications, Noyes Publications, 2001, pp. 63-98. [Petrografické a technologické metódy hodnotenia betónových agregátov]
- [L38] J.E. Gillott, Alkali-aggregate reactions in concrete, Engineering Geology, 9 (1975) 303-326. [AKR v betóne]
- [L39] P.H. Besem, P. Demars, Reactions alkalis-granulats dans le beton, Annales des Travaux Publics de Belgique, Ministère des Travaux Publics, Belgique, 4 (1989). [AKR v konštrukcii]
- [L40] The Institution of Structural Engineers, Structural effects of alkali-silica reaction, Technical guidance on the appraisal of existing structures, in, London, 1992, pp. 48. [Technický návod na hodnotenie existujúcich štruktúr]
- [L41] A. Le Roux, Les mécanismes mis en jeu dans les dégradations dues à l'alkali-réaction, in: Seminário Degradação de Estruturas por Reações Expansivas de Origem Interna, LNEC, Lisbon, 2001. [Mechanizmy podieľajúce sa na degradácii v dôsledku AKR]
- [L42] A. Shayan, The pessimum effect in an accelerated mortar bar test using 1M NaOH solution at 80°C, Cement and Concrete Composites, 14 (1992) 249-255. [Pesimálny účinok v zrýchlenom teste malty s použitím 1M roztoku NaOH pri 80 °C]
- [L43] F. Bektas, L. Turanli, T. Topal, M.C. Goncuoglu, Alkali reactivity of mortars containing chert and incorporating moderate-calcium fly ash, Cement and Concrete Research, 34 (2004) 2209-2214 [Alkalická reaktivita mált obsahujúcich droby a stredne vápenatý popolček].
- [L44] A.D. Buck, K. Mather, Methods for controlling effects of alkali-silica reaction in concrete, in: Army Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg MS Structures Lab, Accession no ADA178479, 1987, pp. 69. [Metódy kontroly účinkov AKR v betóne]
- [L45] Matos, Ana & Silva, Fernando & Azevedo, Antônio & Marins, J & Delgado, João. Alkali-reactivity of Pernambuco east shear zone coarse concrete aggregates: An experimental discussion. Construction and Building Materials. 2022, 344. 128239.10.1016/j.conbuildmat.2022.128239. [AKR pri použití hrubého kameniva šmykovej zóny: Diskusia k experimentu]
- [L46] Multon, Stéphane & Cyr, Martin & Sellier, Alain & Leklou, Nordine & Petit, Laurent. (2008). Coupled effects of aggregate size and alkali content on ASR expansion. Cement and Concrete Research - CEM CONCR RES. 38. 350-359. 10.1016/j.cemconres.2007.09.013 [Spojené účinky veľkosti kameniva a obsahu alkálií na AKR expanziu]
- [L47] Wigum, Børge & Lindgård, Jan. (2018). Three decades of international RILEM activities to combat deleterious Alkali-Silica Reactions (ASR) in concrete.. MATEC Web of Conferences. 199. 03001. 10.1051/mateconf/201819903001. [Tri desaťročia medzinárodných aktivít RILEM na boj proti škodlivým AKR v betóne]
- [L48] RILEM - Introduction. RILEM - Home [online]. Copyright © 2022 RILEM [cit. 16.09.2022]. Dostupné z: <https://www.rilem.net/page/600082/introduction> [RILEM - úvod do problematiky]
- [L49] Rønning, Terje & Wigum, Børge & Lindgård, Jan & Nixon, Philip & Sims, Ian. (2021). Recommendation of RILEM TC 258-AAA: RILEM AAR-0 outline guide to the use of RILEM methods in the assessment of the alkali-reactivity potential of concrete. Materials and Structures. 54. 10.1617/s11527-021-01687-w. [RILEM AAR-0 prehľadný návod na použitie metód RILEM pri hodnotení potenciálu AKR]

- [L50] Nixon, Philip & Sims, Ian. (2016). RILEM Recommended Test Method: AAR-2—Detection of Potential Alkali-Reactivity—Accelerated Mortar-Bar Test Method for Aggregates. 10.1007/978-94-017-7252-5_4. [Detekcia možnej alkalickkej reaktivity – zrýchlená testovacia metóda malty a kameniva]
- [L51] RILEM Recommended Test Method: AAR-3—Detection of potential alkali-reactivity—38 °C test method for aggregate combinations using concrete prisms. In RILEM Recommendations for the Prevention of Damage by Alkali-Aggregate Reactions in New Concrete Structures; RILEM State-of-the-art Report (17); Nixon, P.J., Sims, I., Eds.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2016; pp. 79–97. [Detekcia potenciálnej AKR – skúšobná metóda 38 °C pre kombinácie kameniva s použitím betónových hranolov]
- [L52] Nixon, Philip & Sims, Ian. (2016). RILEM Recommended Test Method: AAR-4.1—Detection of Potential Alkali-Reactivity—60 °C Test Method for Aggregate Combinations Using Concrete Prisms. 10.1007/978-94-017-7252-5_6. [Detekcia potenciálnej AKR – skúšobná metóda 60 °C pre kombinácie kameniva s použitím betónových hranolov]
- [L53] Nixon, Philip & Sims, Ian. (2016). RILEM Recommended Test Method: AAR-5—Detection of Potential Alkali-Reactivity—Rapid Preliminary Screening Test for Carbonate Aggregates. 10.1007/978-94-017-7252-5_7. [Detekcia potenciálnej alkalickkej reaktivity – rýchly predbežný skríningový test na uhličitanové kamenivá]
- [L54] Fernandes, Isabel & Ribeiro, Maria & Broekmans, Maarten A.T.M. & I., Sims & Eds.,. (2016). Petrographic Atlas: Characterisation of Aggregates Regarding Potential Reactivity to Alkalis - RILEM TC 219-ACS Recommended Guidance AAR-1.2, for Use with the RILEM AAR-1.1 Petrographic Examination Method. 10.1007/978-94-017-7383-6. [Petrografický atlas: Charakterizácia kamenív s ohľadom na potenciálnu reaktivitu na alkálie]
- [L55] Bc. Eva Černá Ověření vlivu složení betonů na životnost cementobetonových krytů. Brno, 2017. 88 s., 16 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc. [Overenie vplyvu zloženia betónov na životnosť cementobetónových krytov]
- [L56] Igarashi, Go & Yamada, Kazuo & Xu, Yanfan & Wong, Hong S. & Hirono, Shinichi & Ogawa, Shoichi. (2016). IMAGE ANALYSIS OF ALKALI-AGGREGATE GEL IN CONCRETE PRISM TEST WITH ALKALI-WRAPPING. [Analýza snímok AKR gélu z telies pri použití prekryvania vzoriek textíliou s alkáliami]
- [L57] Guthrie G. D., and Carey J. W.. A Simple, Environmentally Friendly, and Chemically Specific Method for the Identification and Evaluation of the Alkali-Silica Reaction. *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, No. 9, 1997, pp. 1407–1417. [Jednoduchá, ekologická a chemicky špecifická metóda identifikácie a hodnotenia AKR]
- [L58] Outdoor exposure site testing for preventing Alkali-Aggregate Reactivity in concrete – a review. Benoit Fournier, Jan Lindgård, Børge J. Wigum, Ingmar Borchers; MATEC Web Conf. 199 03002 (2018) DOI: 10.1051/mateconf/201819903002 [Vonkajšie testovanie in situ s cieľom zabrániť výskytu AKR v betóne – prehľad]
- [L59] Thomas, Michael & Dunster, Andrew & Nixon, Philip & Blackwell, Barry. (2011). Effect of fly ash on the expansion of concrete due to alkali-silica reaction – Exposure site studies. *Cement & Concrete Composites - CEMENT CONCRETE COMPOSITES*. 33. 359-367. 10.1016/j.cemconcomp.2010.11.006. [Vplyv popolčeka na expanziu betónu v dôsledku AKR – štúdie miesta expozície]
- [L60] GARCIA, Jose E., et al. Laboratory and Outdoor Exposure Site Evaluations of Portland Limestone Cements. 2019. [Laboratórne a vonkajšie hodnotenia miesta vystavenia portlandským vápencovým cementom]
- [L61] 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 [4] , 611-635. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.09.004> [Projekt EU "PARTNER" - Európske štandardné testy na zabránenie alkalických reakcií v kamenive: Konečné výsledky a odporúčania]
- [L62] Lindgård, Jan & Pedersen, Bård & Kjær Bremseth, Sigrun & Dahl, Per & Rønning, Terje. (2008). Experience using the Norwegian 38°C concrete performance test evaluating the alkali reactivity of concrete mixes and different binder combinations. 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions in Concrete, Trondheim, Norway. [Skúsenosti s použitím nórskeho testu výkonnosti betónu pri teplote 38 °C, ktorý hodnotí AKR betónových zmesí a rôznych kombinácií spojív]

- [L63] BREMSETH, Sigrun Kjær. Fly ash in concrete. A literature study of the advantages and disadvantages. COIN P 4 Operational service life design Sub. P 4.4 Alkali aggregate reactions of concrete. 2009. [Popolček v betóne. Štúdia literatúry o výhodách a nevýhodách]
- [L64] Menéndez, E., Silva, A.S. & Duchesne, J. Recommendation of RILEM TC 258-AAA: RILEM AAR-8: determination of potential releasable alkalis by aggregates in concrete. *Mater Struct* **54**, 205 (2021). <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01682-1> [stanovenie potenciálne uvoľniteľných alkálií kamenivom v betóne]
- [L65] R.D. Moser, A.R. Jayapalan, V.Y. Garas, K.E. Kurtis: Assessment of binary and ternary blends of metakaolin and Class C fly ash for alkali-silica reaction mitigation in concrete; *Cement Concr. Res.*, 40 (12) (2010), pp. 1664-1672 [Hodnotenie binárnych a ternárnych zmesí metakaolínu a popolčeka triedy C na zmiernenie alkalicko-kremičitej reakcie v betóne]
- [L66] Kaladharan, Gopakumar & Szeles, Tiffany & Stoffels, Shelley & Rajabipour, Farshad. (2021). Novel admixtures for mitigation of alkali-silica reaction in concrete. *Cement and Concrete Composites*. 120. 104028. 10.1016/j.cemconcomp.2021.104028. [Nové prísady na zmiernenie AKR v betóne]
- [L67] Shimizu, Mayuko & Sano, Naomi & Ueki, Tadamasa & Komatsu, Tetsuya & Yasue, Ken-ichi & Niwa, Masakazu. (2019). Provenance identification based on EPMA analyses of heavy minerals: Case study of the Toki Sand and Gravel Formation, central Japan. *Island Arc*. 28. e12295. 10.1111/iar.12295. [Identifikácia pôvodu založená na EPMA analýzách ťažkých minerálov: Prípadová štúdia tokijskej pieskovej a štrkovej formácie]
- [L68] Owsiak, Z. & Zapala-Sławeta, Justyna. (2013). The course of the alkali-aggregate reaction in the presence of lithium nitrate. *Ceramics - Silikaty*. 57. 138-145. [Priebeh AKR v prítomnosti dusičnanu lítneho]
- [L69] Kawamura M., Fuwa H. Effects of lithium salts on ASR gel composition and expansion of mortars. *Cement and Concrete Research*, 33 (6), 2003, pp. 913 – 919, DOI: 10.1016/S0008-8846(02)01092-X [Účinky lítiových solí na zloženie gélu AKR a expanziu mált]
- [L70] Leemann A., Lortscher L., Bernard L., Le Saout G., Lothenbach B., Espinosa-Marzal R.M. Mitigation of ASR by the use of LiNO₃—Characterization of the reaction products. *Cem. Concr. Res.* 2014;59:73–86. doi: 10.1016/j.cemconres.2014.02.003. [Zmiernenie ASR použitím LiNO₃ – charakteristika reakčných produktov]
- [L71] Briľ, F., Choma, Š.: Oprava mosta na diaľnici D1 v križovatke Podbanské, Zborník z konferencie BD 2018, s. 59-64
- [L72] Záverečná správa Doplnková diagnostika mostu D1 – 229, ľavý most nad cestou II/537 v križovatke Podbanské. INSET s.r.o. (Žilina), 2018, 38 s.

2.7 Použité skratky

AKR	Alkalicko kremičitá reakcia
eq.	Ekvivalent - vyjadrenie obsahu alkálií v cemente
RTG	Röntgenová difrakčná analýza
SEM	Skenovacia elektrónová mikroskopia
STA	Simultánna termická analýza
TG-DTA	Termogravimetria - Diferenciálna termická analýza

3 AKR a jej vplyv na betón, faktory ovplyvňujúce AKR a možnosti zamedzenia AKR

Alkalicko-kremičitá reakcia (ďalej „AKR“), ktorá bola prvý krát popísaná ako nežiadúca reakcia medzi cementom a kamenivom v roku 1940 [L1]. Následne bola detailnejšie popísaná Matherom [L11], kde došlo k podrobnejšej analýze jej škodlivosti, predovšetkým ak je spojená s výraznou expanziou.

Je výsledkom reakcie medzi alkáliami obsiahnutými v pórovom roztoku betónu (sodíkom – Na a draslíkom – K) a reaktívnymi minerálmi (ako je napr. reaktívny SiO₂, kremičitany či prímies na báze silikátov) v kamenive. AKR je teda spôsobená rozpustnosťou a následnou mobilitou SiO₂, ktorý reaguje s iónmi Na⁺, K⁺ a Ca²⁺.

Pri reakcii vzniká gél (alkalicko-silikátový), ktorý má schopnosť absorbovať vodu (hydratovať sa), a zároveň zväčšovať svoj objem, čím na betón pôsobí rozpínavou silou. Za určitých podmienok môžu tieto reakcie viesť k opakovanému rozpínaniu, až k vzniku trhlín v betóne.

V zmysle [T2] k alkalickému rozpínaniu kameniva v betóne dochádza v prípadoch, keď kamenivo obsahuje vysoký podiel amorfného oxidu kremičitého, ktorý reaguje so sodnými a/alebo draselnými iónmi obsiahnutými v cemente za prítomnosti vody. Následkom týchto reakcií vzniká gél,

ktorý spôsobuje expanzné tlaky v mikroštruktúre betónu. Tieto sa prejavujú vznikom charakteristických trhlín. Vlastný proces monitorovania AKR nie je štandardizovaný. Monitorujú sa vznikajúce trhliny, pri ktorých je dôležité správne identifikovať príčinu ich vzniku.

Podľa druhu reaktívneho kameniva a mechanizmov reakcie možno podľa Farnyho [L12] rozlíšiť dva základné druhy:

- alkalicko-uhlíková reakcia (ACR – z anglického alkali-carbonate reaction) reakcie alkálií, ktoré sa vyskytujú medzi dolomitovými vápencami s prímiesou ílov a alkalickými pórovými roztokmi,
- alkalicko-kremičitá reakcia (ASR – z anglického alkali-silica reaction), pri ktorej dochádza k reakcii alkálií s kamenivom obsahujúcim rôzne reaktívne formy oxidu kremičitého.

Prejavy oboch vyššie uvedených reakcií sú pozorovateľné na povrchu betónovej konštrukcie predovšetkým vo forme [L10]:

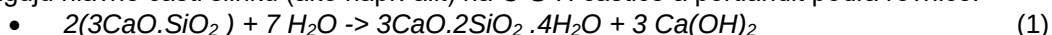
- trhlín sieťového charakteru, a to aj mimo stopy zaťaženia/bez vplyvu na miesto zaťaženia, všesmerne orientovaná, v počiatočnej fáze vlasového charakteru hrúbky do 0,1 mm, začínajúca predovšetkým na miestach opakovane namáhaných vodou alebo vlhkosťou,
- tvorba deformácie expanziou materiálu, a následné obnaženie výstuže odlamovaním betónu krycej vrstvy,
- posunu konštrukčných prvkov,
- tvorbe jamiek v betóne,
- tvorbe výkvetov v miestach trhlín, a to vo forme bieleho žltkastého alebo bezfarebného výtoku tekutiny, s prechodom do gélu, alebo voskovo až gumovo zatuhnutému gélu,
- drolenie až celkový rozpad dielca / konštrukčnej vrstvy.

Predmetné prejavy sú okrem vyššie uvedeného zadefinované aj v [T1], kde je prejav AKR definovaný ako:

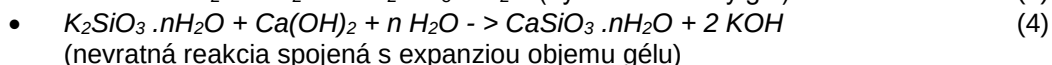
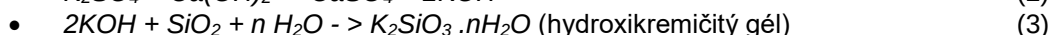
- popraskanie povrchu všesmerne priestorovo orientovanými trhlinami. Najväčšia hustota trhlín zodpovedá najvyššej dlhodobej vlhkosti betónu (na hranách a na rohoch, prípadne v spodnej časti). Trhlinová sieť je pri prostom betóne nepravidelná, prípadne s okami tvaru blížiacemu sa štvor až sedemuholníkom.

3.1 AKR v betóne – princíp reakcie

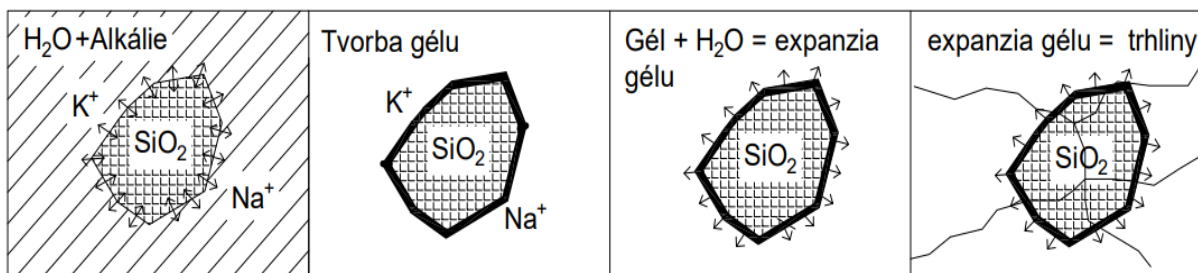
V zmysle [L18] prvá reakcia síranov alkálií prebieha počas hydratácie. Pri reakcii cementu s vodou reagujú hlavné časti slínku (ako napr. alit) na C-S-H častice a portlandit podľa rovnice:



Súčasne popri reakcií prechádzajú alkalické sulfáty do roztoku, kde reagujú so vznikajúcim portlanditom, čo umožňuje reakciu takto vznikajúcich alkalických hydroxidov s reaktívnym kamenivom podľa rovnice:



Predmetná reakcia sa pri dosiahnutí určitých podmienok opakuje (hlavne prítomnosť vody) a nie je možné ju zvrátiť. Na povrchu zrn reaktívneho kameniva tak dochádza pri kontakte s cementovou matricou k vzniku gélu, s narastajúcim objemom. Daný gél a nárast jeho objemu spôsobuje narastajúce ťahové napätie, ktoré po presiahnutí medze pevnosti betónu, spôsobí rozrušenie jeho štruktúry (Obrázok 1 priebeh AKR).



Obrázok 1 – Priebeh AKR

3.2 Faktory vplývajúce na AKR

Vzhľadom na princíp reakcie a jej procesy popísané v kapitole 3, musia byť podľa [L2 a L3] pre výskyt AKR prítomné všetky nasledujúce faktory:

- dostatočné množstvo reaktívnych minerálov obsiahnutých v kamenive,
- dostatočne vysoká koncentrácia alkálií v pórovom roztoku, prípadne dodatočný prísun alkálií,
- dostatočný prísun vody (vlhkosť).

Pre účinnú prevenciu poškodenia konštrukcie v dôsledku AKR je nutné zaistiť, aby aspoň jeden z vyššie uvedených faktorov bol eliminovaný.

Množstvo gélu vytvoreného pri AKR v betóne závisí od množstva a typu reaktívneho oxidu kremičitého obsiahnutého v reaktívnych formách minerálov kameniva, a od koncentrácie alkalického hydroxidu v roztoku pórov betónu. Prírodné kamenivo obsahuje rôzne formy minerálov oxidu kremičitého, ktoré majú rôzne hodnoty reaktivity – miery pripravenosti oxidu kremičitého reagovať s alkáliami. Vnútorne zdroje alkálií (sodík a draslík) môžu pochádzať z cementu, pucolánov, kameniva, prímiesí a zámesovej vody. Keď alkálie a oxid kremičitý reagujú, tvoria produkt gélovej reakcie. Vonkajšie alkálie môžu pochádzať z mnohých zdrojov, ale prevládajúcim zdrojom sú chemikálie proti námraze alebo rozmrazovacie soli. Presné zloženie výsledného gélu sa líši v závislosti od druhu cementu, reaktívnych minerálov a priebehu reakcie, avšak gél vždy obsahuje alkálie, vápnik, oxid kremičitý a vodu [L21].

3.2.1 Reaktívne minerály v kamenive

Reaktivita je priamo závislá od typu horniny obsiahnutej v kamenive a formy jej jednotlivých zložiek. Minerály kremíka ako takého sú vo všeobecnosti v prípade jeho obsiahnutia v kamenive stabilné, ak sú kryštalické, a reaktívne ak sú amorfné (okrem výnimiek). Napríklad existuje niekoľko bežných kryštalických foriem oxidu kremičitého ako kremeň, tridymit a cristobalit. Kremeň, pokiaľ nie je mikrokryštalický alebo vysoko namáhaný, je stabilný. Tridymit a cristobalit sú tiež kryštalické, ale sú to porézne materiály s nízkou hustotou a sú náchylné na napadnutie alkalickými hydroxidmi.

Náchylné na výskyt AKR je každé zrno kameniva, ktoré predstavuje dostatočne veľkú povrchovú plochu pre prípadnú reakciu a je slabo metamofrované, s mnohými mriežkovými defektmi, amorfné, sklovité, prípadne mikroporézne [L7, L12 a L22].

Určenie minerálov, ktoré tvoria skladbu kameniva sa získava petrografickou analýzou, počas ktorej sa identifikujú predovšetkým minerály s obsahom kritického množstva potencióálne reaktívnych foriem oxidu kremičitého ako napríklad:

- rohovec a pazúrik z obsahom mikrokryštalických sférolitických častíc chalcedonu;
- kyslé a stredné vulkanické horniny, ako je ryolit, liparit, dacit, latit (trachyandezit a pod.), andezit a súvisiace porfýry a tufy;
- bridlica a fylitická bridlica; pieskovec, prachovec a kremenec;
- kremičité uhlíkové horniny;
- droby;
- ílovité bridlice, rekryštalizovaný litifikovaný ílovec;
- fylity;
- granit a granodiority, granitové a granodioritové ruly.

Tento zoznam neobsahuje všetky reaktívne horniny, a taktiež takto identifikované horniny obsiahnuté v kamenive pre betón, môžu vo výslednej zmesi fungovať aj bez výskytu AKR a to napriek prítomnosti všetkých podmieňujúcich faktorov.

Okrem definovania potencionálne reaktívnych hornín uvedených vyššie môžeme uviesť aj zoznam podľa [L23], kde sa uvádza jemné a hrubé kamenivo aj s limitným obsahom jednotlivých zložiek, po ktorých presiahnutí sa považuje za potencionálne reaktívne:

- opál – viac ako 0,5 % objemu,
- rohovec alebo chalcedón – viac ako 3,0 % objemu,
- tridymit, asmanit alebo kristobalit – viac ako 1,0 % objemu,
- opticky deformovaný alebo mikrokryštalický kremeň – viac ako 5,0 % (nachádza sa v granitoch, granitových rulách, drobách, ílovitých bridliciach a rekryštalizovaných litifikovaných ílovcach, fylitoch, siltovcoch a prachovcoch, niektorých prírodných pieskoch a štrkoch).

Pri koncentráciách uvedenej vyššie sa dané kamenivo pred prípadným použitím musí pri ďalších skúškach posúdiť už ako reaktívne, a teda je možné už pri posúdení konkrétnej čiary zrnitosti pristúpiť k snahe o potlačenie AKR (doplnením kameniva z iných zdrojov a úpravou jednotlivých frakcií tak, aby bolo možné pomocou nízko alkalického cementu (cementu na ktorom bola určená hodnota meraním alkálií aspoň na slinku), aplikáciou prímiesí AKR minimalizovať).

Okrem reaktivity obsiahnutých minerálov, má výrazný vplyv aj veľkosť povrchu častíc predmetného reaktívneho minerálu obsiahnutého v kamenive. Na základe reakcie popísanej v kapitole 3 je miera rozpustnosti SiO_2 závislá na veľkosti povrchu, na ktorom solvent (rozpušťač vo forme vody) je v kontakte s SiO_2 , a na voľnej energii povrchu reaktívnej látky s obsahom SiO_2 . Čím je voľná energia látky vyššia a polomer častice menší, tým je rozpustnosť väčšia [L23].

3.2.2 Vysoko alkalické prostredie pórového roztoku

Keď sa pH/zásaditosť roztoku pórov zvyšuje, zvyšuje sa aj potenciál, pre prípadnú AKR. Pri vyšších koncentráciách alkalických hydroxidov sú dokonca aj pomerne stabilnejšie formy oxidu kremičitého, bežne nepovažované za náchylné na reakciu reaktívne [L21]. Ak je teda koncentrácia alkálií dostatočne veľká, alkalické hydroxidy začnú rozbíjať aj silnejšie kremíkové väzby nachádzajúce sa v pomerne menej reaktívnych horninách obsiahnutých v kamenive za vzniku expanzívneho gélu.

Alkalické hydroxidy obsiahnuté v pórovom roztoku budú ľahko reagovať s reaktívnymi formami oxidu kremičitého v kamenive. So zvyšujúcou sa reaktivitou kameniva môže vznikáť gélová reakcie s nižšími koncentraciami alkálií. Preto aj použitie nízko-alkalických cementov samotné nemusí postačovať na kontrolu AKR s vysoko reaktívnymi horninami obsiahnutými v kamenive. Za reaktívny sa považuje akýkoľvek cement s obsahom $\text{Na}_2\text{O}_{\text{ekv}}$ viac ako 0,6 % hmotnosti.

Pre úplné vylúčenie reaktivity resp. zníženie reaktivity pomocou nízko reaktívneho cementu sa odporúča hodnota obsahu $\text{Na}_2\text{O}_{\text{ekv}}$ (podľa Tuthill [L13]) pod 0,4. Avšak, aj pri betónoch s veľmi nízkym obsahom reaktívneho cementu, môže cyklické vystavovanie určitým podmienkam ako napr. vlhkosti (opakované sušenie a vlhčenie) prípadne prechod elektrického prúdu spojený s migráciou alkálií, spôsobiť lokálny výskyt AKR.

Migrácia alkálií spojená s tvorbou AKR sa vyskytuje predovšetkým v priepustných betónoch. Pri opakovanom cyklickom zaťažení vlhkosťou (opakované vlhčenie a vysychanie betónu) dochádza k migrácii alkálií. Vo vzťahu k obsahu alkálií v pórovom roztoku tak môže dôjsť k lokálnej kumulácii alkálií aj pri nízko-alkalických cementoch. [L12] To vysvetľuje, prečo aj horniny prípadne kamenivá považované za nereaktívne v kombinácii aj s nízko-alkalickým cementom niekedy vykazujú AKR.

Pri použití určitých druhov zmesných cementov, prípadne pri pridaní trosky alebo pucolánových prímiesí, je možné znížiť priepustnosť výslednej betónovej zmesi. Čím menší stupeň priepustnosti betónu sa dosiahne, tým je betónová konštrukcia menej náchylná na AKR.

3.2.3 Alkálie dodané cementom

Niektoré z národných noriem (ako napr. [ZP9] prípadne v zmysle [L25]), predpisujú medzné množstvo tzv. „alkalickej náložky“. Koncept je najpoužívanejší v prípade potreby aplikácie portlandského

cementu ako jediného spojiva, aplikovateľný je aj pre posúdenie použitia prímiesí na elimináciu AKR, pričom výpočet sa vykonáva nasledovne:

$$(\text{kg cementu/m}^3) \times (\% \text{ Na}_2\text{O eqv. v cemente})/100 = \text{kg alkálií / m}^3 \quad (5)$$

*V prípade ak sú aplikované prímiesi pre minimalizáciu AKR, je potrebné ich množstvo aj podiel alkálií vo výpočte zohľadniť.

Ak existuje potenciál pre AKR, akceptované prípustné limity pre obsah alkálií v betóne používanom v Kanade sa pohybujú medzi 1,8 kg/m³ a 3,0 kg/m³, a to podľa reaktivity kameniva, veľkosti betónového prvku a konkrétneho prostredia [ZP10].

Totožný postup je aplikovaný v spojených štátoch [ZP10]), pričom množstvo alkalického cementu (obsah alkálií pod 0,6 %).

Ako je uvedené vyššie v kapitole 3.2.3 a vzhľadom na fenomén migrácie alkálií, môže aj betón vyrobený s nízko-alkalickým cementom stále vykazovať prejavy AKR, predovšetkým ak pohyb alkálií pri potrebnej vlhkosti (a cyklickom zaťažení vlhkosťou) koncentruje zásady na jednom mieste [L26]. Taktiež nie je samotné zníženie alkálií použitím nízko-alkalického cementu účinné v prípade ak [L12]:

- je kamenivo vysoko reaktívne,
- ak sú alkálie dodávané niektorými prímiesami, prípadne kamenivom alebo zámesovou vodou,
- je konštrukcia chemicky zaťažená (zásady z externých zdrojov – prostredia vid'. kapitola 3.2.5), čo významne prispieva k zvýšeniu obsahu zásad v betóne a potenciálnej AKR.

3.2.4 Vlhkosť prostredia

Vlhkosť umožňuje migráciu alkalických iónov do reakčných miest, čo vedie k tvorbe gélu, ktorý po opätovnom vstupe vlhkosti, túto vlhkosť absorbuje v spojení s expanziou. Z tohto dôvodu sa AKR neprejaví v betónoch, ktoré sú v suchom prostredí (platí pri znížení zámesovej vody).

Výskum ukázal, [L12,L27,L28] že AKR sa môže prejaviť predovšetkým v betóne s relatívnou vlhkosťou nad 80 %. Je však možné, že dobre vyzretý betón v suchých podmienkach má relatívnu vlhkosť konštantne na úrovni 80 % a viac, predovšetkým tesne pod povrchom, dokonca aj po niekoľkých dekádach.

Akémkoľvek zníženie priepustnosti použitím nízkeho vodného súčiniteľa zmesi, prípadne zníženie prenikania vlhkosti pomocou prímiesí, tak znižujú pravdepodobnosť výskytu AKR. Napr. pri totožnej skladbe reaktívnych hornín, reaktivite cementu a dostatočne zníženom vodnom súčiniteli (ako napríklad v predmetnej štúdií na 0,35) sa výrazne znížil v prvých 19-tich mesiacoch výskyt AKR [L29].

3.2.5 Externé vplyvy prostredia

Prípadný prísun alkálií do konštrukcie zvyšuje jej náchylnosť na AKR, najmä keď je betón povrchovo poškodený (popraskaný) alebo ak je vysoko priepustný [L30].

Najčastejším externým zdrojom vonkajších zásad (alkálií) sú rozmrazovacie soli, morská voda, podzemná voda, prípadne voda z priemyselných procesov. Najmä použitie rozmrazovacích materiálov (chemického posypu – NaCl a CaCl₂) na vozovku, môže významne prispieť k nárastu alkálií v konštrukciách, nakoľko roztoky rozmrazovacích solí môžu poskytnúť prakticky neobmedzené množstvo alkálií [L31]. Vplyv chemického posypu na AKR pri reaktivite kameniva bol popísaný vo viacerých štúdiách, pričom najškodlivejšia je kombinácia chemického posypu a vlhkosti pri náraste teploty [L32, L33].

Pre zníženie vnikania vonkajších zásad je potrebné:

- prísne dodržiavanie technologickej disciplíny pri realizácii jednotlivých konštrukcií,
- použitie doplnkových prímiesí,
- použitie nízkeho vodného súčiniteľa,
- aplikovať ochranné nátery a tmely,

s cieľom zníženia priepustnosti betónu, spomalenia vstupu vonkajších alkálií a s tým spojeného zníženia potenciálnu výskytu AKR.

3.3 Možnosti zamedzenia AKR v betóne

Vo vzťahu k princípom reakcie popísaným v predchádzajúcej kapitole 3.1 a jednotlivým popisom faktorov v kapitole 3.2, je možné zamedziť výskyt AKR elimináciou jednotlivých faktorov, ktoré musia nastať pre výskyt AKR.

V zmysle aktuálne platných noriem a [T4 a T6] na kamenive do betónu sa musí preventívne preukázať jeho vhodnosť, aby sa zabránilo škodlivým účinkom reaktívnosti neuhličitanového kameniva s alkáliami alebo reaktívnosti uhličitanového kameniva s alkáliami. Potenciálna náchylnosť na reaktívnosť neuhličitanového kameniva s alkáliami sa skúša podľa STN 72 1179 a reaktívnosť uhličitanového kameniva sa skúša podľa STN 72 1160. Na základe výsledkov skúšok výrobcu betónu musí zabezpečiť opatrenia podľa STN EN 206+A2 a STN 72 1179. Taktiež v zmysle [T7] sú určené katalógové listy, ktoré obsahujú rozdelenie požadovaných vlastností kameniva, ktoré sú skúšané na vstupnej surovine, a ktoré surovina musí spĺňať, aby bola použiteľná do určitých konštrukcií.

V prípade potreby použitia potencionálne reaktívneho kameniva a zamedzení AKR je potrebné nahradiť určité množstvo daného potencionálne reaktívneho kameniva, a zároveň použiť nízko-alkalický cement prípadne prímеси minimalizujúce výskyt alkalickkej reaktivity (minerálne za účelom nahradenia určitého množstva cementu popolčekom, kremičitým úletom, mletou granulovanou troskou, prípadne chemické prímеси vo forme lítiových solí pre ktoré bola v zmysle STN EN 206+A2 určená „k“ hodnota), pričom na konkrétnom zastúpení jednotlivých frakcií, ktoré má byť použitá pre výrobu daného typu betónovej zmesi, je potrebné vykonať dilatometrické meranie.

Pomerne dostupnou a stáva aj tzv. RAP (z anglického Reactive Aggregate Powder) [L34] prímеси na báze bežne dostupných kamenív pomletých na 80 µm. Takto jemne pomletý filer vyplňa menej priepustnú štruktúru čo minimalizuje predmetnú reaktivitu.

Ďalšou možnosťou je v prípade konštrukcií, ktoré nie sú opakovane vystavené pôsobeniu vody, zníženie vlhkosti v predmetnej konštrukcii. Samotná vlhkosť je jedným z faktorov vplývajúcich na proces AKR. Aj keď je betón v prostredí s nízkou vlhkosťou, zostáva v ňom po relatívne dlhú dobu určité množstvo zámesovej vody, ktoré môže AKR umožniť. U betónov s nízkym vodným súčiniteľom možno predpokladať, že veľké množstvo zámesovej vody bude spotrebované pri hydratačných procesoch cementu. Tak ako je uvedené v [L3], pre rozvoj AKR je potrebná vnútorná vlhkosť betónu nad 80 %, v opačnom prípade sa reakcia zastaví. Ak je zaistený dostatočný prístup vlhkosti, prebieha AKR do doby, kedy všetky reaktívne zložky zreagujú, v prípade nedostatku vody je proces zastavený.

Pre akékoľvek použitie potencionálne reaktívneho kameniva je potrebné preukázať jeho vhodnosť v zmysle [T3 a T4] (napr. dilatometrickou skúškou), pričom overenie musí byť vykonané na konkrétnej kombinácii percentuálneho zastúpenia jednotlivých frakcií daného kameniva a potrebnom množstve prímеси.

3.3.1 Pojem „pesimálneho“ rozdelenia vo vzťahu k AKR

Pojem pesimálneho rozdelenia [L35, L36] je podstatný k pochopeniu problematiky AKR, predovšetkým pre potreby pochopenia výsledkov z jednotlivých skúšok (dilatometrických), a bol predmetom viacerých štúdií [L8, L9]. Pojem pesimálny je antonymum k optimálnemu, a teda v danom prípade predstavuje maximálne možné množstvo okolností, ktoré môžu nastať s negatívnym vplyvom na výskyt AKR.

Veľké množstvo doteraz vykonaných laboratórnych skúšok, ktoré boli publikované [L4, L37-L40] preukázalo, že dilatometricky zistené pomerné predĺženie vo väčšine prípadov nie je, tak ako by sa dalo na prvý pohľad predpokladať, lineárne závislé od množstva reaktívnych foriem minerálu obsiahnutého v kamenive.

Maximálnu úroveň expanzie dosiahne posudzovaná vzorka pri konkrétnom „pesimálnom“ obsahu reaktívnej zložky. Pri navýšení podielu alebo znížení podielu množstva reaktívnych minerálov vo vzorke, oproti pesimálnemu množstvu, dôjde k zníženiu pomerného predĺženia. Nárast pomerného predĺženia je teda lineárny len do dosiahnutia pesimálneho množstva (od 0-vého množstva reaktívnych minerálov SiO₂ až po pesimálne množstvo). Následný pokles je spôsobený nedostatkom alkálií

dodaných cementom a rozložením daných alkálií, na vysokom podiele kremičitých reakcií, bez kumulácie dostatočného množstva alkálií na tvorbu gélu [L42].

Pesimálne množstvo, pri ktorom sa dosahuje maximálna expanzia, sa líši v závislosti na potenciálu reaktívnej zložky kameniva. Pri rýchlo reagujúcich horninách, ako je opál, dochádza k maximálnej expanzii už pri nízkych obsahoch SiO_2 [L43] už do 10 % podielu, zatiaľ čo pri pomaly reaktívnych mineráloch, môže dosiahnuť maximálna expanzia lineárny charakter bez tzv. pesimálneho správania a maximum reakcie dosiahnuť pri 100 % koncentrácií.

V prípade, ak je vo vzorke identifikované kamenivo, ktoré môže vykazovať pesimálne správanie, je potrebné skúšku opakovať vo viacerých koncentráciách reaktívneho materiálu, aby bolo možné určiť „pesimálnu“ hodnotu reaktívnych zložiek.

Pri potlačení pesimálnych kamenív a minimalizácie prejavov AKR po ich použití vo výslednej zmesi, sa ukázali najvhodnejšie prímеси na minerálnej báze (popolček, troska, kremičitý úlet). Pri použití daných prímесí je však potrebné správne dávkovanie, keďže niektoré zo štúdií [L44] preukázali že v prípade použitia náhrady cementu popolčekom v príliš nízkych koncentráciách (dávkované ako % náhrady cementu), v skutočnosti spôsobili väčšiu expanziu, ako bez danej prímеси, a to pri jeho kombinácií s nízko-alkalickým cementom, pričom predpokladali, že daná expanzia bola spôsobená dodatočnými vo vode rozpustnými zásadami uvoľnené popolčekom.

Viaceré štúdie venované pesimálnemu priebehu [L45, L46] preukazujú, že reakcia prebieha rýchlejšie pri menších časticiach, a v prípade ak je k reaktívnemu materiálu pridaný iný druh reaktívneho materiálu vo forme jemných alkalických prímесí s oveľa menšou veľkosťou zrn, dôjde k vyčerpaniu alkálií bez prejavu AKR.

4 Metódy hodnotenia nebezpečnosti kameniva z hľadiska AKR

Vzhľadom na rozsiahle využitie betónu ako jedného z primárnych stavebných materiálov naprieč celému svetu, je možné predpokladať celosvetovo aj výskyt problematiky nežiadúcej reaktivity jednotlivých druhov kameniva. Z daného dôvodu bolo celosvetovo publikovaných viacero metodík, ktoré vzhľadom na charakter výskytu reaktivity v priebehu životného cyklu konštrukcií a potreby dlhodobého sledovania naďalej pokračujú.

Ako príklad môžeme uviesť metodiku RILEM [L47, L48], ktorá vznikla ako medzinárodná spolupráca laboratórií, momentálne pokrývajúca 90 krajín. Vznikla v roku 1947 a prvá komisia špecializovaná komisia na hodnotenie AKR vznikla už v roku 1988, pričom prvé odporúčania pre obmedzenie AKR vydala pod označením TC 106-2 a TC 106-3, ako výstup súhrnnej úlohy pod označením TC 106, zameraného na skúšanie jednotlivých vlastností kameniva (roky 1988 - 2001). Na danú komisiu nadviazala komisia TC 191-ARP (2001 - 2006), následne TC 219-ASC (2006 - 2014), TC258-AAA (2014 - 2020), až po TC 301-ASR (2020 - 2025), ktorá ešte stále prebieha. Každý z výstupov definoval nové výskumné úlohy vo vzťahu k priebehu reaktivity jednotlivých materiálov, a zároveň poskytol aktuálne špecifikácie pre minimalizovanie výskytu nežiadúcich reakcií v betóne vzhľadom na súčasnú úroveň poznania danej problematiky.

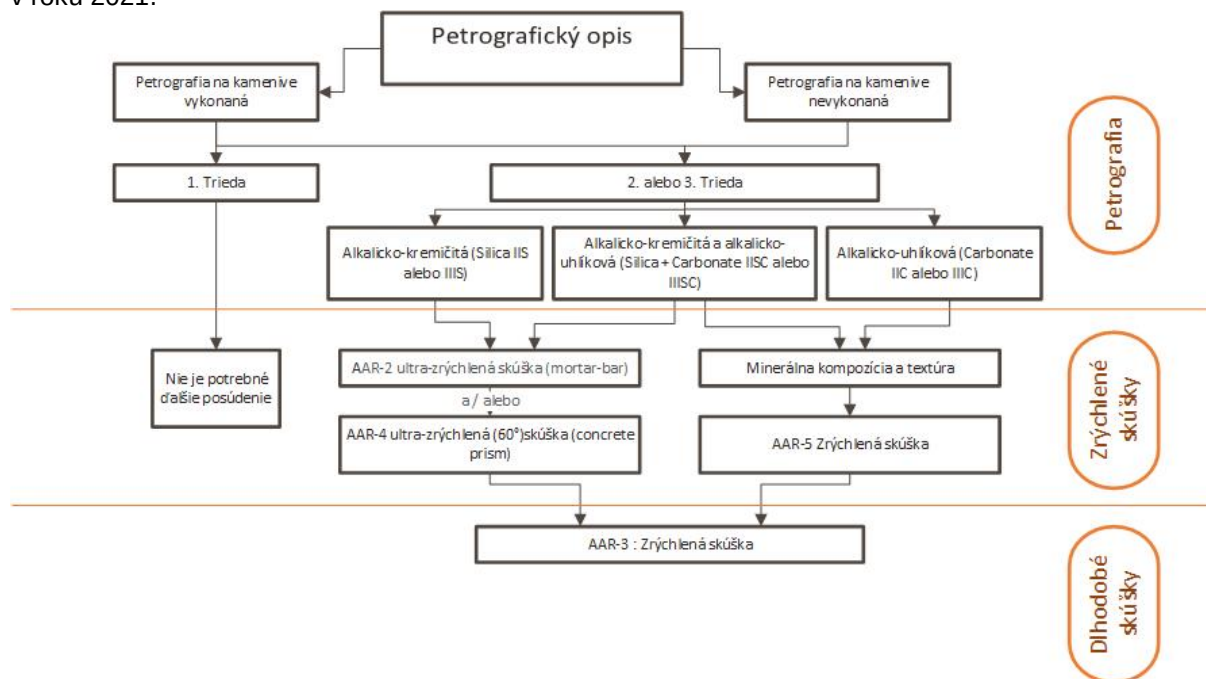
Na danom prípade vieme aj rozdeliť jednotlivé metodiky na hodnotenie novej reaktivity, pričom treba uviesť, že jednotlivé metódy na seba nadväzujú, prípadne sa dopĺňajú, aby mohli čo najviac minimalizovať výskyt AKR v betóne, prípadne výskyt preukázať na konkrétnej vzorke (jadrového vývrtnu z poškodenej konštrukcie).

Podľa druhu posúdenia môžeme teda skúšky rozdeliť nasledovne:

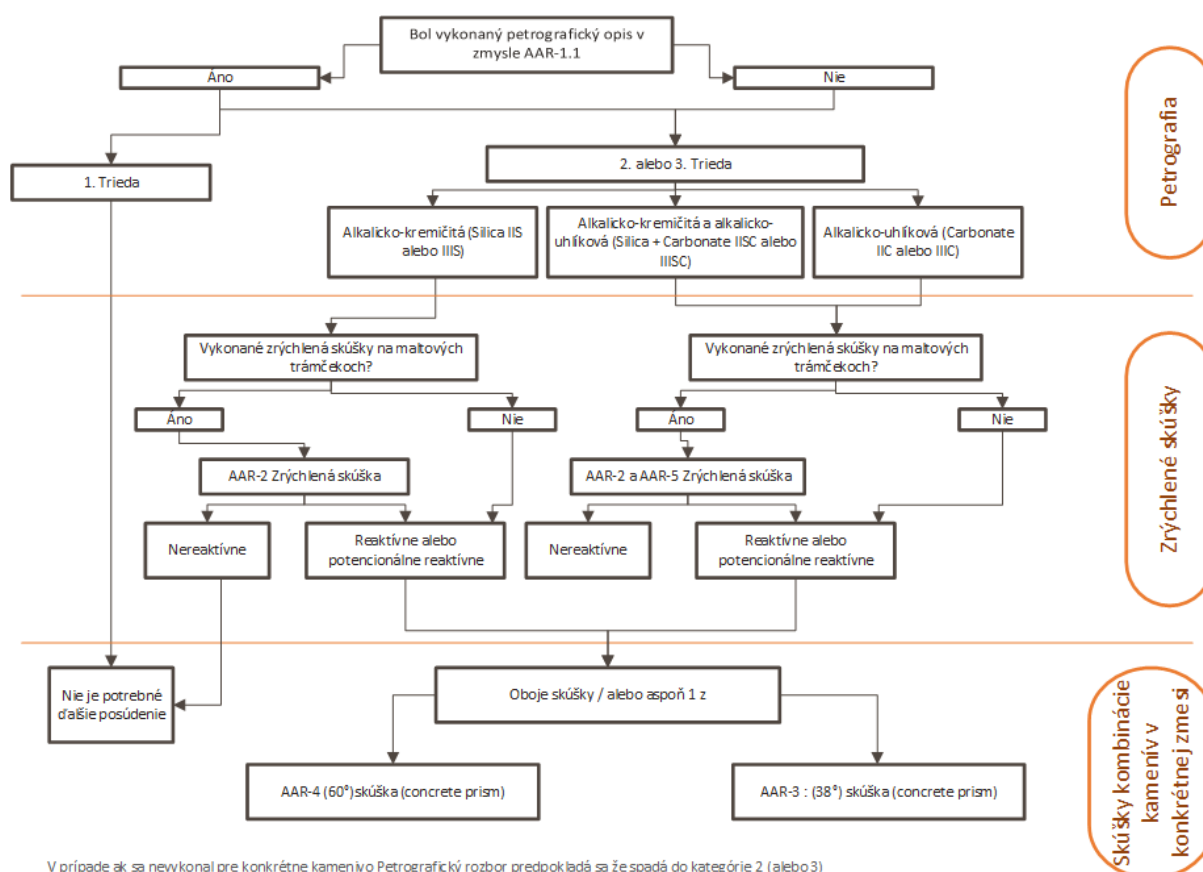
- petrografické posúdenie kameniva, pričom súčasťou môže byť
 - o mikroskopia,
 - o RTG difrakčná analýza,
 - o TG-DTA Termogravimetria - Diferenciálna termická analýza,
 - o infračervená stereoskopia,
- terénne skúšky betónových blokov
- dilatometrické meranie,
 - o zrýchlené meranie,
 - o ultra zrýchlené meranie,
- chemické skúšky,
 - o pokles alkality roztoku,
 - o unacylakrylátová analýza,
 - o rhodaminová metóda,
 - o hexanitrobaltitanová metóda.

Rešerš jednotlivých metód s príslušným hodnotiacim kritériom, ustanovujúcou normou, druhom vzoriek, dobou trvania skúšky a hodnotením je uvedená v prílohe č.1 tejto úlohy.

Pri prihladení k medzinárodným štandardom je možné aplikovať metodiku RILEM AAR0 [L49] (2021), ktorá je neustále dopĺňaná, a samotný výskum spojený s AKR v rámci danej metodiky naďalej prebieha podľa integrovanej schémy posúdenia kameniva, na ktorej možno pozorovať aj vývoj danej metodiky – Obrázok 2. Integrovaná schéma posúdenia kameniva k vydaniu metodiky RILEM AAR0 v roku 2003 a Obrázok 3. Integrovaná schéma posúdenia kameniva k vydaniu metodiky RILEM AAR0 v roku 2021.



Obrázok 2 – RILEM Integrované schéma posúdenia reaktivity (AAR 0 po zavedení dilatometrických skúšok vydané v roku 2003)



V prípade ak sa nevykonala pre konkrétne kamenivo Petrografický rozbor predpokladá sa že spadá do kategórie 2 (alebo 3)

Obrázok 3 – RILEM Integrované schéma posúdenia reaktivity (AAR 0 vydané v 2021)

Petrografická analýza by mala byť vždy prvým krokom pri hodnotení potenciálnej alkalickéj reaktivity kameniva do betónu, v zmysle RILEM AAR-0.

Táto metodika špecifikuje všeobecný postup petrografického skúmania kameniva do betónov, s cieľom identifikovať typy hornín a minerálov, ktoré môžu reagovať s hydroxylovými iónmi z roztoku pórov betónu (AKR reakcia). Metóda vrátane odberu vzoriek je určená na rutinné skúšanie prírodného kameniva vrátane piesku, hrubého štrku, ťaženého a drveného kameniva v skúšobných laboratóriách. Metódu možno použiť aj na kvantifikáciu množstva rôznych druhov minerálov a hornín, v posudzovanom kamenive. Hlavným cieľom petrografickej metódy (v zmysle kategorizácie RILEM) je určiť klasifikáciu konkrétneho kameniva z hľadiska alkalickéj reaktivity. Ako výsledok petrografického opisu by sa malo kamenivo klasifikovať do nasledujúcich tried:

- trieda I – veľmi nepravdepodobné, že by bol reaktívny s alkáliami,
- trieda II – potencionálne reaktívna s alkáliami alebo alkalická reaktivita nie je jednoznačná,
- trieda III – veľmi pravdepodobne reaktívna s alkáliami.

V prípade triedy II (alebo triedy III) bude tiež potrebné petrografickým skúmaním určiť, či je kamenivo úplne alebo čiastočne kremičité (trieda II-S alebo III-S), alebo úplne alebo čiastočne uhlíčanové (trieda II-C alebo III-C), prípadne kombinácia obsahujúca významné podiely kremičitých aj uhlíčanových materiálov (trieda II-SC alebo III-SC).

Ak petrografia nie je k dispozícii alebo bola nejednoznačná, hodnotený materiál by sa mal považovať za materiál triedy II alebo III.

Akceptácia a skúsenosti s reaktívnymi zložkami sa medzi jednotlivými krajinami, kde bola metodika aplikovaná líšia, a preto by sa konečné hodnotenie a klasifikácia mali riadiť akýmikoľvek národnými alebo regionálnymi skúsenosťami, odporúčaniami a špecifikáciami. Preto sa odporúča, aby vždy, keď je to možné, mali petrografi použiť miestne usmernenia a/alebo miestne skúsenosti, ktoré im pomôžu pri tejto klasifikácii (vrátane historických informácií o horninách z danej oblasti, prípadne výskytov reaktivity na konštrukciách zhotovovaných z kameniva ťaženom v danej oblasti).

V prípade nových lomov/zdrojov kameniva, je bežne kamenivo zaradené do Kategórie II a bude potrebné jeho ďalšie testovanie. V prípade existujúcich lomov/zdrojov kameniva, kde je možné vziať do úvahy skúsenosti s používaním pre miestne aplikácie, sú častejšie možnosti triedy I alebo III. Trieda III je výnimočná pre nové lomy/zdroje kameniva, a v podstate obmedzená na kamenivo, u ktorého sa zistilo, že obsahujú opál alebo opálový oxid kremičitý.

V prípade, ak petrografia indikuje triedu II alebo triedu III, je potrebné pred použitím kameniva rozhodnúť o ďalších najvhodnejších skúškach. Takéto kamenivo, ktoré je buď prevažne kremičité, alebo s výskytom uhličitanov s potenciálne reaktívnym obsahom oxidu kremičitého, sa označuje trieda II-S alebo III-S, a možno ich podrobiť skúške rozťažnosti RILEM (AAR-2 [L50], AAR-3 [L51] alebo AAR-4.1 [L53]).

Kamenivo, ktoré je buď prevažne uhličitanové, alebo zmesi zahŕňajúce potenciálne reaktívne typy uhličitanov, sú označené ako trieda II-C alebo III-C a môžu byť podrobené špecializovaným postupom pre kamenivo obsahujúce uhličitanové materiály, najmä ak uhličitan obsahuje minerálny dolomit. (uhličitan vápenato-horečnatý). Niektoré druhy kamenív zmiešaného zloženia môžu byť označené ako trieda II-SC alebo III-SC, a preto by sa mali podrobiť postupom opísaným pre uhličitanové kamenivá (AAR-5[L52]).

Podiel oxidu kremičitého, ktorý môže viesť k najškodlivejšej reakcii, bude závisieť od reaktivity oxidu kremičitého. Malé množstvo vysoko reaktívneho oxidu kremičitého v kamenive bude najviac škodlivé, zatiaľ čo ak kamenivo obsahuje vysoký podiel takéhoto vysoko reaktívneho oxidu kremičitého, môže dôjsť k malému poškodeniu. Ak sa kamenivo obsahujúce vysoko reaktívny oxid kremičitý zmieša s nereaktívnym kamenivom, správanie zmesi sa bude meniť od veľmi škodlivého po nepoškodzujúce vôbec, v závislosti od pomerov zmesi. Táto funkcia je známa ako efekt „pesimum“ (vysvetlenému v kapitole 3.3.1). Naopak, v kamenivách obsahujúcich formy oxidu kremičitého s nízkou reaktivitou alebo tam, kde oxid kremičitý, nie je ľahko vystavený alkalickému roztoku pórov, môže k najhoršiemu poškodeniu dôjsť, keď je prítomné najväčšie množstvo oxidu kremičitého.

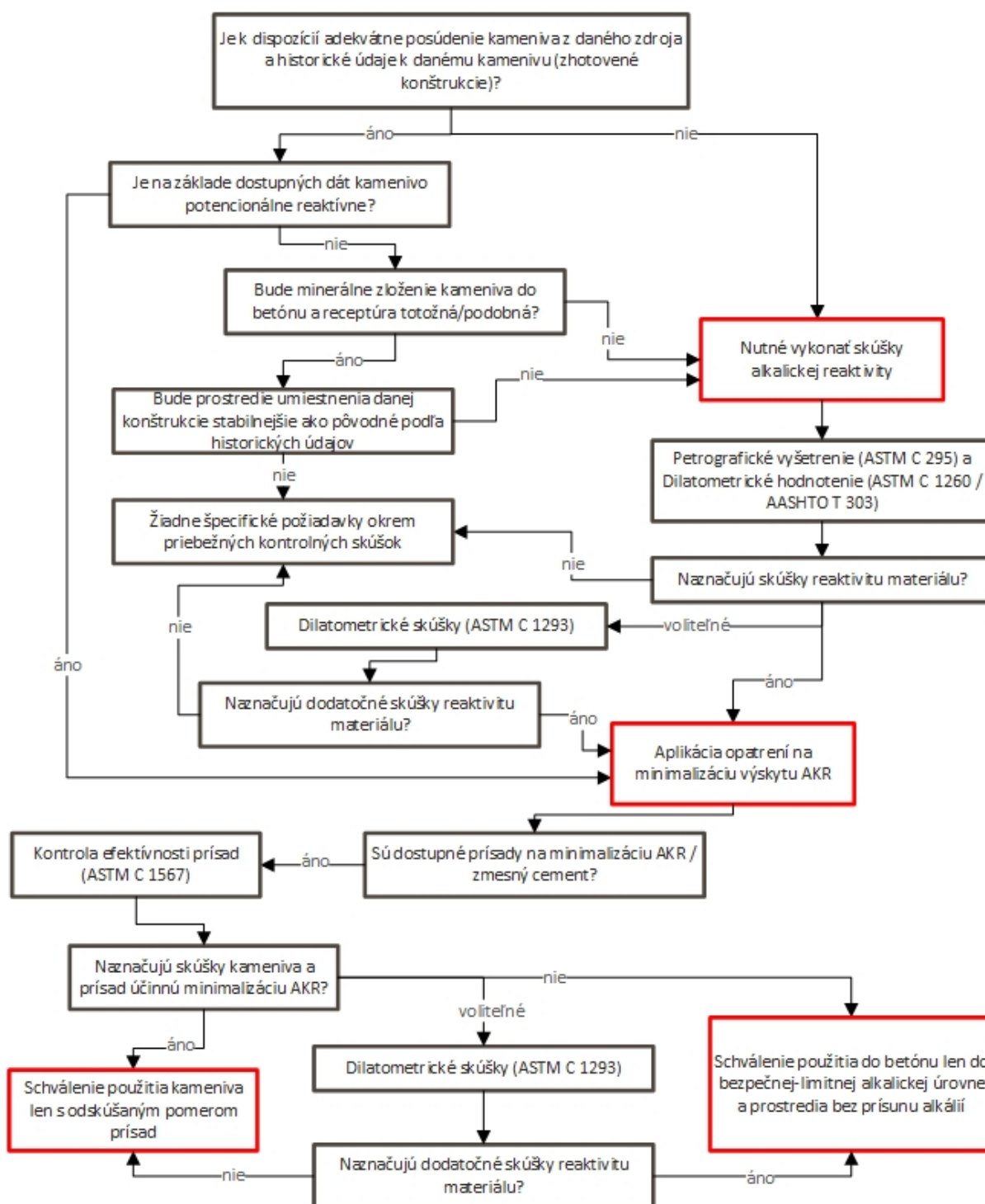
Z tohto dôvodu je dôležité, aby sa posudzovala celá kombinácia kameniva, vstupujúca do výrobného procesu, pretože množstvá reaktívneho oxidu kremičitého, ktoré sú neškodné v jemnom alebo hrubom kamenive samotnom, môžu byť v kombinovanom kamenive škodlivé. Naopak, zjavne reaktívne jemné alebo hrubé kamenivo môže byť bezpečné, ak sa použije v kombinácii. Preto sa v prípade kombinovania jednotlivých kamenív odporúča použiť metodiku hodnotenia AAR-3 aj AAR-4.1.

V prípade dilatometrických skúšok RILEM bola metóda maltových trámčekov AAR-3 predtým považovaná za referenčnú skúšku na základe nahromadených nameraných údajov a skúseností s jej používaním v rôznych formách. Avšak AAR-3 vyžaduje veľmi dlhé obdobie, 6 až 12 mesiacov alebo viac, aby sa dosiahli spoľahlivé výsledky, a dokonca AAR-4.1 vyžaduje až 4 mesiace. V dôsledku toho boli vyvinuté skúšky AAR-2 a AAR-5 pre zabezpečenie skoršieho zaistenia výsledkov.

V súčasnosti sa po petrografickom hodnotení považuje za rizikové spoliehať sa len na výsledky zrýchlených skúšok v zmysle AAR-2 a AAR-5 a predbežné indikácie z týchto metód by mali byť vždy potvrdené skúškou ktorá by mala zachytiť aj pomaly reagujúce reaktívne horniny. Praktické skúsenosti pri aplikácii laboratórnych skúšok a výskytom poškodení na jednotlivých konštrukciách naznačujú, že zrýchlené testovanie ako AAR-2 môže byť nespoľahlivé pre kamenivo triedy II-S obsahujúce porézny pazúrik (rizikové sú aj iné druhy droby) ako potenciálne reaktívnu zložku. Väčšie skúsenosti so zrýchlenými skúškami môžu časom umožniť korekciu danej skúšobnej metódy.

Všetky zdroje prírodného kameniva vykazujú systematické aj náhodné variácie v zložení a vlastnostiach. Posúdenia vhodnosti sa preto musia pravidelne opakovať, a to najmä v prípade hodnotení potenciálu AKR.

Okrem metodiky RILEM poznáme aj metodiky ASTM a AASHTO [ZP2-ZP4 a ZP9-ZP12] pričom druhy jednotlivých metód sú uvedené v prílohe č.1 a samotný priebeh posúdenia prebieha tak ako pri metodike RILEM pomocou viacerých druhov skúšok. Postup samotnej metodiky aplikovaný v prípade postupu hodnotenia kameniva v zmysle podrobnej štúdie zameranej na minimalizáciu AKR v spojených štátoch amerických publikovaný v [L12] je uvedený na obrázku 4.



Obrázok 4 – ASTM integrovaná schéma posúdenia reaktivity v zmysle [L12]

4.1 Petrografický opis

V zmysle [T2], [T5]; a STN 72 1179 k alkalickému rozpínaniu kameniva v betóne dochádza v prípadoch, keď kamenivo obsahuje vysoký podiel amorfného oxidu kremičitého. Z daného dôvodu je potrebné už v prvej fáze hodnotenia nebezpečnosti kameniva, vykonať petrografické vyšetrenie kameniva - petrografický opis v zmysle STN EN 932-3, na určenie minerálneho zloženia horniny, ktorá má byť spracovaná na daný typ kameniva, s dôrazom na mineralogicky náchylné horniny (s obsahom reaktívnych foriem SiO_2), pričom dôležitou súčasťou opisu je okrem všeobecného zatriedenia horniny s minerálnym zložením a petrografického typu, aj popis veľkosti zrna, textúry, anizotropie, farby, pórovitosti prípadne aj tvaru pórov. Následne je potrebné v zmysle STN 72 1179 doplniť petrografiú v zmysle STN EN 932-3 o kvalitatívnu a kvantitatívnu identifikáciu SiO_2 o RTG prípadne aj TG-DTA.

Petrografický opis je základným typom posúdenia AKR vo viacerých metodikách (RILEM AAR 1; 1.1 a 1.2 [L54]; ASTM C294, 295 [L17, L18]). Využíva sa tak na samotnom kamenive, ako aj na zisťovaní už konkrétnych vzoriek odobratých jadrovým vývrtom z konštrukcií, kde je podozrenie na výskyt AKR. V určitých metodikách býva doplnená o atlas hornín (napr. RILEM AAR1.2 [L54]). V prípade jej doplnenia o mikroskopiu prebieha posúdenie rastrovaním, s následným počítaním bodov, aby mohol byť určený čo najpresnejší podiel reaktívnych hornín.

Aby bolo možné predpokladať, že kamenivo je bezpečné na použitie z hľadiska AKR udáva STN 72 1179 obsah 95 % materiálu posudzovanej horniny s hornín s minimálnou rizikovosťou (Granit, granodiorit, gabra, čadič, piesky a štrkopiesky, amfibolit a serpentit) a zároveň, nesmie obsahovať akýkoľvek podiel opálu, tridymitu, cristobalitu alebo sopečného skla, pričom nesmie obsahovať ani podiel kremičitých hornín (silícitov ako napr. rohovec) v množstve nad 2 % hmotnosti.

4.1.1 Skenovacia elektrónová mikroskopia (SEM)

Elektrónový mikroskop je možné použiť na skúmanie hornín a minerálov, ale je obzvlášť užitočný na stanovenie AKR v betóne. Princíp zahŕňa vysokorychlostné bombardovanie povrchu vzorky primárnymi elektrónmi vo vákuu. Odrazené sekundárne elektróny sú určené detektorom a transformované na elektrický signál. Signál je závislý od atómového čísla analyzovaného materiálu, hustoty vzorky a energie primárnych elektrónov (fixná). Na vytvorenie obrazu vzorky sa elektrónový lúč pohybuje v lineárnom smere a skenuje vzorku. Použitím techniky spätného rozptylu sa obraz zobrazí s rôznymi šedými odtieňmi, kde svetlejšie oblasti pozostávajú z minerálov s vyšším atómovým číslom a tmavšie oblasti s nižšími atómovými číslami [L54].

Analýzou röntgenového žiarenia vyžarovaného zo škvŕn alebo menších oblastí je možné určiť analýzu prvkov pomocou energeticky disperzného detektora (EDX). Elektrónové mikroskopy môžu byť vybavené aj systémami disperzných detektorov vlnovej dĺžky (WDX), ktoré často poskytujú presnejšie výsledky, najmä pre ľahšie prvky, ale môžu spôsobiť poškodenie cementových hydrátov a ASR gélu, v dôsledku vyššieho použitého elektrického prúdu (100-krát EDX). Tieto analytické SEM sa nazývajú EPMA [L54].

Systém SEM sa vo veľkej miere používa pri silicifikovaných vápencoch vo Francúzsku, aby pomohol určiť siete kremičitých materiálov a morfológiu v takýchto materiáloch. Možno identifikovať dve rôzne formy kremičitého materiálu. Prvá forma je rozpoznaná na makroskopickej úrovni a pozostáva z kremičitých modulov (podobne ako chocholatá). Tieto majú textúru a zloženie chalcedónu a/alebo opálu a pozostávajú hlavne z mikrokryštalického oxidu kremičitého, o ktorom sa bežne predpokladá, že má vysoký potenciál pre alkalickú reaktivitu oxidu kremičitého. Druhú formu oxidu kremičitého, nazývanú „diagenetický oxid kremičitý“, možno pozorovať iba na mikroskopickej úrovni. V skutočnosti, po miernom napadnutí leštených vápencových rezov kyselinou (3 minúty v roztoku HCl zriedenom na 1/200), je pod SEM viditeľná jemná mriežka oxidu kremičitého. Túto „mriežku“ oxidu kremičitého nemožno pozorovať pod bežným petrologickým mikroskopom, pretože hrúbka mriežky je medzi 4 a 10 μm [L54].

Tieto dva typy kremičitého materiálu sú prítomné v rôznych mierkach, ale považujú sa za možnú príčinu potenciálnej alkalickkej reaktivity určitých vápencov (doterajší výskyt predovšetkým vo Francúzsku).

Uvedená metóda je nevhodná pre niektoré vápence bohaté na íl, kde reaktívny oxid kremičitý sú zrná mikrokremeňa s veľkosťou menšou ako 10 μm , ktoré sú zapustené v ílovej matrici. V tomto prípade sa môže použiť kyselina fosforečná alebo podobná metóda (viď vyššie).

EPMA sa v Japonsku používa aj na diagnostiku AKR v betóne, ako aj na odhad obsahu alkálií v pôvodnom cemente použitom vo vytvrdnutom betóne [L67].

4.1.2 Röntgenová difrakčná analýza (RTG)

RTG analýza sa používa na identifikáciu kryštalických materiálov. Princíp spočíva v tom, že prášky rozdrvených kryštálov sú vystavené monochromatickému žiareniu so známou vlnovou dĺžkou. Röntgenové žiarenie sa odráža (difraktuje) od rovín atómov tvoriacich kryštálovú štruktúru. Pretože každý minerál má inú kryštálovú mriežku (D), odrazené röntgenové lúče pri danej vlnovej dĺžke (tu fixné)

sa budú odrážať len pod jedným uhlom dopadu. Kryštálová mriežka je jedinečná pre každý typ minerálu a možno ju vypočítať zo zaznamenaného uhla dopadu podľa Braggovho zákona. Identifikácia minerálov sa vykonáva pomocou pásového grafu (difraktogramu) alebo pomocou počítačového programu s knižnicou známych vzorov. RTG analýza sa bežne používa na kvalitatívnu identifikáciu minerálov, ale môže sa použiť aj na semi-kvantitatívne meranie v porovnaní so štandardmi.

4.1.3 Termogravimetria (TG) - Diferenciálna termická analýza (DTA)

Danú skúšku je možné zaradiť ako Simultánnu termickú analýzu (STA), ktorá využíva súčasne dve metódy pre štúdium fyzikálnych vlastností, a to v danom prípade Termogravimetriu (TG) a Diferenciálnu termickú analýzu (DTA). Pri Termogravimetrii sa sleduje zmena hmotnosti analyzovanej vzorky v závislosti na teplote alebo čase. Pri Diferenciálnej termickej analýze (DTA) je sledovanou veličinou teplotný rozdiel medzi analyzovanými vzorkami a referenčnou látkou. Pomocou danej metódy je možné určiť druh minerálov, vrátane množstva prítomných nečistôt, s presným stanovením obsahu jednotlivých zložiek vzorky.

4.2 Chemické skúšky na kamenive

Pri aplikáciách chemických skúšok sa kamenivo odobrané zo zdroja, prípadne vzorky odobrané z konštrukcií pri ktorých je podozrenie na výskyt AKR, podrobuje skúškam, pri ktorých sú vystavené nepriaznivému chemickému prostrediu a sleduje sa buď zmena chemizmu vzorky na základy výskytu reakcie (úbytok zásaditosti), prípadne reakcia vo forme sfarbenia.

4.2.1 Chemická skúška (podľa STN 72 1179:2014)

Upravená vzorka s požadovanou zrnitosťou sa spolu s 1 M roztokom hydroxidu sodného (NaOH) zahrieva vo vodnom kúpeli pri teplote 80 °C počas 24 h. Následne sa v roztoku filtráciou stanoví oxid kremičitý SiO_2 a titračne úbytok zásaditosti. Výsledky skúšky sa uvádzajú v milimoloch na 1 l roztoku.

Hodnotením parametrom je molárna koncentrácia oxidu kremičitého (S) a úbytok zásaditosti (R). Aby kamenivo bolo posúdené ako nereaktívne tak musí platiť:

- 1) pre úbytok zásaditosti väčší ako 70, musí byť molárna koncentrácia SiO_2 nižšia ako úbytok zásaditosti, alebo
- 2) pre úbytok zásaditosti menší ako 70, musí byť molárna koncentrácia SiO_2 nižšia ako polovica úbytku zásaditosti navýšená o 35.

4.2.2 Metóda kyseliny chlorovodíkovej

Metóda sa používa na dezintegráciu vzoriek frakcií kamenív bohatých na uhličitaný [ZP14]. Niektoré uhličitanové horniny sú alkalicko-kremičité-reaktívne; reaktívny oxid kremičitý je zvyčajne rozptýlený v kryptokryštalickej hmote matrice, a nie je ľahko viditeľný v tenkom reze pod mikroskopom. Metóda kyseliny chlorovodíkovej umožňuje stanovenie v kyseline nerozpustného zvyšku z uhličitanových hornín. Taktiež je možné použiť optickú mikroskopiu, röntgenovú difrakciu alebo chemickú analýzu, a to na identifikáciu typov a množstiev nečistôt, ako je hlinitých materiálov, rohovcov alebo opálu. Takýmto spôsobom môžu byť hodnotené aj iné škodlivé zložky, ako sú sírany a sulfidy.

Postupy sú nasledovné: K 5 g reprezentatívnej vzorky z uhličitanovej horniny sa pridá 20 % roztok kyseliny chlorovodíkovej. Na zlepšenie presnosti by sa však malo použiť niekoľko vzoriek. Na urýchlenie rozpustnosti uhličitanov sa vzorka zahreje na 80 °C a kyselina sa pridáva v malých množstvách, kým sa uhličitan úplne nerozpustia. Po ukončení reakcie sa roztok prefiltruje a zvyšky sa premyjú destilovanou vodou. Síranové nečistoty sa odstránia vyzrážaním chloridom bárnatým. Presné určenie povahy a množstva nekarbonátových nečistôt je možné získať pomocou röntgenovej difrakcie, elektrónovej mikroskopie a chemickej analýzy.

Metóda sa neodporúča na posúdenie kamenív, u ktorých existuje podozrenie, že sú reaktívne s alkalickým uhličitanom a to predovšetkým z dôvodu, že reaktívne zložky sú dolomit a nie kremičité zložky.

4.2.3 Metóda kyseliny fosforečnej

Metóda extrahuje kremičité minerály (cristobalit, tridymit a kremeň) z horniny a rozpúšťa ďalšie kremičitany, uhličitaný a oxidy [ZP14]. Používa sa v oblasti posúdenia životného prostredia v cementárskom priemysle v Japonsku, ale má veľké využitie pri zisťovaní reaktívnych minerálov oxidu kremičitého v kamenivách pre betónové zmesi.

Postup je nasledovný: 25 ml roztoku kyseliny fosforečnej sa pridá k reprezentatívnej vzorke 0,3 g práškovej vzorky horniny (preosiatej < 75 mikrometrov) v kónickej kadičke. Kadička sa následne umiestni (300 ml) na elektrický ohrievač (300 W, Ni-Cr drôt) tak, aby varenie začalo po 90 sekundách, čo predstavuje napätie približne 80 V. Po 12 minútach varu zalejeme vzorku horúcou vodou (60-70) °C, 125 ml a kadičkou silno pretrepeme, aby sa rozpustila sirupovitá kyselina fosforečná.

Následne sa pridá 10 ml roztoku kyseliny fluoroboritej (10 % HBF₄) a dôkladne sa vzorka pretrepe s následným pridaním 10 ml suspenzie papierovej drviny. Vnútro kadičky sa umyje (25 ml vody) a nechá stáť 1 hodinu. Roztok sa prefiltruje a zvyšok sa premyje zriedeným horúcim roztokom kyseliny chlorovodíkovej (1 + 9), potom sa opakovane premyje horúcou vodou, aby sa pred zapálením odstránila kyselina fosforečná.

Pre petrografické účely by sa mal zvyšok vzorky zapáliť pri nízkych teplotách (600-800) °C a podrobiť kvantitatívnej XRD analýze, aby sa určil pomer cristobalitu, tridymitu a kremeňa vo vulkanických horninách. V prípade sedimentárnych hornín, najmä hlinitých uhlíkových hornín, sa robí pozorovanie SEM (elektrónový mikroskop), aby sa potvrdila prítomnosť reaktívneho krypto- až mikrokryštalického kremeňa v jemnozrnej matrici.

4.2.4 Gél-pat test

Metóda sa používa na identifikáciu alkalického silikagélu, ktorý vzniká na skúšanom kamenive. Metóda je v súčasnosti začlenená do britskej normy BS 7943 [ZP8], ako jej dopĺňajúca príloha. Použitie takejto skúšky sa považuje za nevyhnutné ak existuje podľa prvého petrografického vyšetrenia potenciál pre malé množstvá opálu v súhrnnej vzorke, ktoré nemusia byť detekovateľné počas konvenčného petrografického vyšetrenia. Pomalšie reaktívne materiály sa touto metódou nezistia.

Táto technika sleduje tvorbu viditeľného gélu AKR na povrchu častíc kameniva ponorených do alkalického roztoku, zatiaľ čo sú zrná kameniva zapustené v kotúči s cementovou pastou. Počas skladovania pri konštantnej teplote 20 °C sa vzorka pravidelne kontroluje a zaznamenáva sa výskyt akéhokoľvek gélového rastu na posudzovanom kamenive. Prípadný výskyt gélových výrastkov v rámci špecifikovaného časového obdobia, naznačuje pravdepodobnú prítomnosť opálového oxidu kremičitého alebo iných výnimočne reaktívnych foriem oxidu kremičitého.

4.3 Chemické skúšky na zatvrdnutom betóne (vývrty)

Jedná sa predovšetkým o skúšky, kedy je zbrúsený povrch betónu, prípadne oblasť betónu získaná odvrtom, bez predchádzajúceho pôsobenia (nie je použitý povrch betónu), vystavený chemickej interakcií, pričom sa sleduje prejav danej chemickej reakcie.

4.3.1 Uranylacetátová metóda

Spočíva v reakcií roztoku uranylacetátu [UO₂(C₂H₃O₂)₂] v kyseline octovej s alkalickokremičitými gélmi [L55, L56]. Roztok uranylacetátu v kyseline octovej sa nanáša na povrch betónu, pričom nastáva sorpcia UO₂²⁺ na negatívne nabitom povrchu alkalicko-kremičitého gélu.

Prítomnosť gélu je možné potom po ožiarení betónu UV svetlom identifikovať podľa zelenožltých škvŕn. Metóda sa používa na identifikáciu alkalicko-kremičitého gélu na akomkoľvek povrchu betónu, odporúča sa používať povrchy vopred pripravené v podobe lomových plôch, vývrtov alebo odrezkov.

Metóda sa používa v USA, Austrálii a Francúzsku. V USA je obsiahnutá v prílohách ASTM C 856 (AASHTO T 299) [L19]. Nedostatkom je použitie zlúčeniny, ktorá obsahuje mierne rádioaktívny izotop uránu. Ďalšou možnou komplikáciou môže byť aj nevyhnutnosť použitia ultrafialového svetla. Použiteľná je v laboratóriu alebo priamo na stavbe, avšak z dôvodu dodržania hygienických a bezpečnostných predpisov, je odporúčané používať ju skôr v laboratórnych podmienkach.

Táto metóda musí byť doplnená aj o ďalšie- napr. optická alebo elektrónová mikroskopia, pretože niektoré kamenivá prirodzene reagujú aj bez prítomnosti gélu (svetielkujú) pod UV lampou, preto ich prítomnosť je potrebné vopred zohľadniť.

4.3.2 Rhodaminová metóda

Alkalicko-kremičité gély menia časom svoje zloženie, zvyšuje sa napr. obsah vápnika. Na identifikáciu prítomnosti tohto druhu gélu bolo navrhnuté použitie Rhodaminu B, (C₂₈H₃₁N₂O₃Cl). Pri nanosení roztoku Rhodaminu B na povrch betónu sa sfarbí miesto, kde sú prítomné

alkalicko-kremičité gély bohaté na vápnik, ružovou farbou. Farebne môžu reagovať aj niektoré ďalšie vápenaté zložky hydratovaného cementu. V prípade rhodamínovej i hexanitrokobaltitanovej skúšky je potrebné na prípravu roztokov aj na oplachovanie povrchu betónu použiť deionizovanú vodu, z dôvodu zabránenia nežiaducej druhotnej dotácii iónov draslíka, sodíka, príp. aj vápnika [L55, L57].

4.3.3 Hexanitrobaltitanová metóda

Gél vznikajúci pri alkalickej reakcii v betóne je obohatený K^+ a Na^+ . Hexanitrokobaltitan sodný ($Na_3Co(NO_2)_6$) reaguje s draslíkom v alkalicko-kremičitom géle, za vzniku žltej zrazeniny hexanitrokobaltitanu sodno draselného ($K_2NaCo(NO_2)_6 \cdot 6H_2O$). Výsledný farebný odtieň súvisí s obsahom prvkov K, Na, Ca. Tým, ako pribúda Ca v géle, žltoranžová farba sa mení na tehlovo až fialovo červenú [L57].

4.3.4 Mikroskopické skúmanie (posúdenie expanzity gélu)

Pre vyhodnotenie prítomností alkalickej reakcie sa sledujú trhliny, ktoré sa môžu vyskytovať v cementovej matrici alebo na okrajoch jednotlivých zŕn kameniva v jednotlivých odvrtoch. Taktiež sa skúma akákoľvek prítomnosť gélu tvoreného alkalickou reakciou kameniva. (vhodné zariadenie - Rastrovací elektrónový mikroskop). Vykonáva sa podľa ASTM C295, ASTM C457M, ASTM C856 [ZP14,ZP15] a podrobnejšie je popísaná pri skúmaní samostatného kameniva, ako súčasť petrografického vyšetrenia v kapitole 4.1.1.

4.4 Terénne skúšky na veľkých blokoch

Monitorovanie veľkých betónových blokov, špecifického zloženia, uložených na externom mieste expozície poskytuje doplnenie údajov, ktoré sa získavajú zo záznamov o zhotovení konštrukcií, kde sa následne v priebehu životnosti objavila AKR, pričom postupy danej metódy môžeme nájsť vo viacerých publikáciách [L58, L59]. Príkladom takejto štúdie je skúšobné pole v Building Research Establishment (BRE) v Spojenom kráľovstve, kde sú priamo z reaktívneho kameniva v kombinácii s aplikáciou opatrení na zamedzenie výskytu AKR, zhotovené veľké prvky s veľkosťou od 350 mm do 900 mm, pričom je zachovaný priamy kontakt so zemou, alebo sú umiestnené tak, že 25 mm až 50 mm vzorky je ponorených vo vode.

Zloženie jednotlivých blokov oproti bežnému a reaktívnemu kamenivu býva doplnené o prímеси ako popolček, troska, metakolín a zlúčeniny lítia (v prípade BRE sa jednalo hlavne o popolček). Na blokoch sú určené referenčné body, v ktorých sú osadené tenzometre. Monitorovanie BRE napríklad okrem iného preukázalo účinky popolčeka, pri výraznom znížení reaktivity pri úrovni 25 % z objemu cementového spojiva.

Terénne skúšky momentálne pokračujú aj na univerzite v Texase v Austine, CANMET v Ottawe, pričom sa jedná v oboch prípadoch o dlhodobé sledovanie aplikácie preventívnych opatrení na zamedzenie výskytu AKR vo forme prímеси, vrátane zlúčenín lítia (vrátane kombinácií s ostatnými prímesami), prípadne kombinácie prímеси s aplikáciou nízko-alkalického cementu.

Oba vyššie uvedené momentálne prebiehajúce výskumy sú situované na pobreží a skúšobné polia sú vystavené nielen poveternostným vplyvom (Obrázok 5), ale aj vplyvom prímorskej oblasti (chloridy). Výskum v Texase bol publikovaný vydaním reportu [L60] v Októbri 2019, AKR je venovaná kapitola 11.



Obrázok 5 [L60] – Terénne skúšky na blokoch – Texas (vľavo Austin, vpravo Port Aransas)

V súčasnosti sa tieto štúdie rozširujú o rôzne technológie určené na potlačenie, resp. zastavenie expanzie v už existujúcich betónových konštrukciách, na ktorých sa AKR už prejavila.

Ak sa presunieme do Európskeho priestoru, tak na Islande začal podobný výskum s aplikáciou terénnych skúšok v roku 1987, kde bolo vytvorených 6 skúšobných betónových stien s rôznym (aj reaktívnym) kamenivom, s objemom spojiva od 256 do 302 kg/m³ aplikovaným s rôznou úrovňou Na₂Oe.

Ďalší výskum prebiehal na terénnych skúškach, ako porovnávacie meranie a verifikácia metodík, na zrýchlené dilatometrické merania pomocou metodiky RILEM AAR-3 [L51] a AAR-4 [L52]. Porovnávacie meranie preukázalo, že napriek tomu, že sa v laboratórnych podmienkach pri použití 7 % prímеси vo forme vysokopečnej trosky (mikrosiliky) pri skúškach na trámčekoch znížila AKR pod 0,1 % (limitná hodnota skúšky), sa AKR prejavila, a to na cementových blokoch expanziou po 8mich rokoch na úrovni nad 0,1 %.

Výskum na terénnych skúškach pokračoval v rámci projektu PARTNER (zastrešujúci 24 partnerov v 14tich krajinách, so začiatkom riešenia v roku 2002) [L61], kde sa v rámci danej úlohy opäť verifikovali zrýchlené spôsoby dilatometrického testovania potencionalnej AKR (v zmysle metodiky RILEM a iných národných metodík používaných v Európe – a to na celkom 413 vykonaných individuálnych skúškach v rámci 9-tich metodík pri 13tich rôznych zdrojoch kameniva). Celkovo sa vykonalo overenie laboratórnych hodnotení na 100 betónových kociek rozmeru 300mm v piatich rôznych lokalitách, pričom každá z lokalít bola zaťažená iným druhom prostredia (napr. prídavné zaťaženie od posypových solí, prípadne morskej vody - prímorské oblasti). Každá zámes mala dostatočný obsah reaktívneho Na₂Oe (1,26 %), pričom jedna kombinácia bola uložená vo vlhkom prostredí (čiastočne namočená) a druhá totožná bola vystavená len poveternostným podmienkam (na štrkovom podklade). Merania zmeny dĺžky sa vykonávali v pravidelných intervaloch. Celkové zhrnutie výsledkov je uvedené v literatúre [L61] ktorá uvádza zistenia vo vzťahu k dlhoročnému vystaveniu kociek poveternostným vplyvom:

- žiaden z nereaktívnych kamenív nevykázal známky AKR,
- vysoko reaktívne kombinácie kameniva sa prejavili v prvých 6tich rokoch,
- stredne reaktívne kamenivá sa prejavili v 15 až 20 ročnom intervale,
- po prvom výskyte AKR na sledovaných vzorkách prípadný pokles teplôt znásobí rozširovanie trhlín,
- všetky laboratórne testy správne identifikovali vysoko reaktívne a nereaktívne kombinácie jednotlivých frakcií kameniva. Avšak z testovacích metód RILEM sa AAR-4.1 javí ako najvhodnejší na identifikáciu potenciálnej reaktivity stredne reaktívnych kombinácií kamenív. Výsledky potvrdzujú potrebu úpravy limitnej hodnoty 0,03 % na 20. týždeň namiesto 15. týždňa.
- Nórsky dilatometrický test vykonávaný pri 38°C v zmysle [L62] tiež spoľahlivo identifikoval stredne reaktívne kombinácie kameniva, pravdepodobne v dôsledku zníženého lúhovania alkálií z prímov v porovnaní s RILEM AAR-3.

Terénne skúšky naďalej pokračujú rovnako ako prebieha ďalší výskum výskytov jednotlivých reaktivít medzi projekty zahŕňajúce terénne skúšky môžeme zaradiť okrem vyššie uvedených aj COIN projekt (Nórsko 2007-2014) [L63] alebo RILEM TC 258-AAA (spustený 2015) [L48, L64].

Takéto terénne skúšky poskytujú výrazné zlepšenie predchádzania výskytu AKR, a používajú sa ako jediná alternatíva na verifikáciu k zrýchleným dilatometrickým meraniam. Aplikujú sa predovšetkým ako výskumný nástroj pre overenie predpokladov pomocou dlhodobých meraní. S pravidla sa nejedná o dobu kratšiu ako 5 rokov, nakoľko prebieha reaktivita prirodzene, pôsobením prostredia, bez zvýšenia zaťaženia možných vplyvov (vlhkosť, alkalita prostredia).

4.5 Dilatometrické merania

Dilatometrické meranie je vo všeobecnosti určené na meranie objemových zmien spôsobených určitým fyzikálnym alebo chemickým procesom. Pri posudzovaní AKR sa vytvorí teliesko z kameniva, ktorého reaktivitu chceme posúdiť a cementu s predpísanou úrovňou alkalickosti hodnoty. V prípade ak cement nedosahuje predpísanú hodnotu obsahu alkálií, upravuje sa na normovú úroveň pridaním hydroxidu. Zámes je vytvorená s normatívnou hodnotou vodného súčiniteľa. Posudzované

kamenivo sa vytvorí v dvoch navážkach, pričom jedna sa archivuje a druhá je použitá na výrobu minimálne troch alebo štyroch telies.

Prejav AKR je hodnotený ako dĺžková zmena skúšobného telesa, charakterizovaná ako jeho predĺženie alebo skrátenie, merané rovnobežné s pozdĺžnou osou skúšaného telesa. Meranie dĺžky sa vykonávajú v presne stanovených časových intervaloch.

Výsledkom dilatometrického merania je pomerné predĺženie betónového trámčeka špecifických rozmerov, pričom nulté meranie je vykonané po odformovaní, pred vystavením vzoriek nepriaznivým vplyvom, ktoré by mali spôsobiť prejavenie AKR vo forme zmeny dĺžky telies. Podľa hodnôt pomerného predĺženia v jednotlivých vyhodnocovacích časových úsekoch, sa určí potencionálna reaktivita daného druhu kameniva, popíše sa popis stavu povrchu (v prípade ak nastali trhliny prípadne výluhy).

Okrem tvaru telies sa jednotlivá metodiky dilatometrického hodnotenia líšia spôsobom prípravy/úpravy kameniva, prípadne prostredím ktorému sú vystavené.

Dilatometrické meranie sa nepoužíva len na hodnotenie kameniva, ale aj kombinácií reaktívneho a nereaktívneho kameniva, prípadne kombinácií prímiesí a nízko-alkalického cementu. Taktiež je možné použiť dilatometrické meranie len na hodnotenie prímiesí, kde sa používa špecifické Pyrexové sklo pre overenie účinnosti konkrétnej koncentrácie prímiesí.

Vo vzťahu k vytvorenej reaktivite prostredia môžeme rozdeliť dilatometrické skúšky na:

- dilatometrické testovanie (norma ASTM C 1293 [ZP3]/CSA A23.2-14A [ZP16]/RILEM AAR 3 [L51]/STN 72 1179)
- zrýchlené dilatometrické testovanie (norma ASTM C 1260 [ZP2]/ASTM C 1567 a AASHTO T 303 [ZP4]/TP 137 [ZP6])

4.5.1 Dilatometrické skúšanie kameniva na možný výskyt AKR (norma ASTM C 1293/CSA A23.2-14A/RILEM AAR 3/STN 72 1179)

V prípade dilatometrického merania AKR je v daný spôsob merania považovaný za referenčný k ostatným kratším vyhodnoteniam (Vid' príloha 1). Doba trvania skúšky je 6 mesiacov, pričom je možné v prípade pochybností predĺžiť vyhodnocovanie skúšky až na 1 rok.

Nevhodné prostredie pri ktorom sa overuje náchylnosť kameniva je v danom prípade tvorené použitím cementu s určitou úrovňou alkálií, prípadne dodanie alkálií do zmesi hydroxidom (zámesovou vodou) a následné umiestnenie telies nad vodnú hladinu pri stálej teplote a vysokej relatívnej vlhkosti.

Pre STN 72 1179

sú pri danej skúške telesá umiestnené nad vodnú hladinu pri vysokej relatívnej vlhkosti a teplote vody 40 °C. Alkálie v zámesi sú na úrovni 1,30 + 0,05 Na₂O eq.

Trámčeky sú minimálne 3 kusy pre jednu overovanú zmes, rozmerov 40 x 40 x 160 mm.

Hodnotenie reaktivity kameniva prebieha po 6tich mesiacoch. Ak je pomerné predĺženie do 0,1 % nepovažuje sa za potencionálne náchylné. Ak je hodnota nad 0,1 % zohľadňuje sa obsah Na₂O eq. úroveň obsahu cementu ktorý má byť použitý nasledovne:

- úroveň cementu nad 0,91 Na₂O eq. je:
 - do 0,1 %, nízka reaktivita,
 - od 0,1 % do 0,15 % stredná reaktivita a
 - nad 0,15 % vysoká reaktivita.
- úroveň cementu od 0,61 do 0,90 Na₂O eq. je:
 - do 0,13 %, nízka reaktivita,
 - od 0,13 % do 0,18 % stredná reaktivita a
 - nad 0,18 % vysoká reaktivita.
- úroveň cementu do 0,60 Na₂O eq. je:
 - do 0,15 %, nízka reaktivita,
 - od 0,151 % do 0,2 % stredná reaktivita a
 - nad 0,2 % vysoká reaktivita.

Maximálna úroveň koncentrácií vo vzťahu k hodnoteniu merania uvádzajú aj ostatné národné predpisy jednotlivých krajín, pričom limit býva adaptovaný na druh reaktívneho kameniva (vid' tabuľka 1 a príklad Írska).

Tabuľka 1 – Národné normy na obsah Na_2O v cemente pri reaktivite kameniva

Kanada, Dánsko	1,8 až 3,0 Kg/m^3 Na_2O , po predchádzajúcom posúdení kameniva na AKR a určenie úrovne ohrozenia konštrukcie z hľadiska AKR
Afrika	2,0 až 4,5 Kg/m^3 Na_2O , po predchádzajúcom posúdení kameniva na AKR
Nový Zéland	2,5 Kg/m^3 Na_2O ekvivalent
UK	2,5 až 5,0 Kg/m^3 Na_2O , po predchádzajúcom posúdení kameniva na AKR
Belgicko, Čína, Japonsko, Rusko	3,0 Kg/m^3 Na_2O
Francúzsko	3,0 až 3,5 Kg/m^3 Na_2O , v závislosti od druhu cementu a množstva jeho alkálií
Írsko	4,0 Kg/m^3 Na_2O , 4,5 Kg/m^3 Na_2O len pre špecifické kamenivo- chert

Ostatné metódy (vrátane dilatometrických) sú popísané v prílohe č.1.

4.5.2 Zrýchlené skúšanie AKR (norma ASTM C 1260 / ASTM C 1567 a AASHTO T 303)

Parametre kameniva a postup skúšky je možné vykonať podľa Českého TP 137 [ZP6]. V prípade dilatometrického merania AKR (v danom prípade označeného ako zrýchlené meranie) je v daný spôsob merania považovaný za doplnujúci k ostatným vyhodnoteniam (Vid' príloha 1). Doba trvania skúšky je 16 dní, pričom je možné v prípade pochybností predĺžiť vyhodnocovanie skúšky na 20 dní.

Nevhodné prostredie pri ktorom sa overuje náchylnosť kameniva je v danom prípade tvorené použitím normového cementu (úroveň alkálií je dodávaná prostredím - roztokom) a umiestnením telies do alkalického roztoku (NaOH) pri teplote 80 °C.

Jeden druh kameniva sa overuje na 3 telesách rozmeroch 25 x 25 x 285 mm. Nárast dĺžky sa vyhodnocuje oproti nultému meraniu, ktoré sa vykoná po 24 hodinách od odformovania, počas ktorých bol umiestnený vo vodnom kúpeli s teplotou 80 °C. Po nultom meraní sa umiestni teleso do kontajnera naplneného 1N roztokom NaOH , tak aby bol celý ponorený a ponechá sa pri stálej teplote 80 °C. Následne sa vyhodnocuje každé 2 dni počas 14 dňového vyhodnocovania.

V prípade ak po 14 dňoch nastane pomerné predĺženie:

- do 0,100 % dĺžky vrátane, kamenivo sa považuje za nízko reaktívne,
- od 0,100 do 0,200 % dĺžky sa považuje za stredne reaktívne,
- nad 0,200 % dĺžky za vysoko reaktívne.

V prípade hodnoty nad 0,300 % sa považuje za veľmi vysoko reaktívne a neodporúča sa na použitie do betónu.

5 Limitné hodnoty kameniva vo vzťahu k AKR v betóne

Vo vzťahu ku hodnoteniu kameniva sa odporúča vyhodnocovať kamenivo v zmysle dilatometrických meraní uvedených v kapitole 4.3.1 a 4.3.2, prípadne podľa medzinárodných štandardov uvedených v prílohe č. 1.

V prípade vyhodnotenia kameniva ako stredne resp. vysoko reaktívne, je potrebné posúdiť, tak ako je uvedené v 4.3.1, alkalickú úroveň cementu, ktorý má byť použitý ako spojivo a zároveň definovať prostredie, akému bude daná konštrukcia vystavená.

Podmienky použitia prírodného kameniva do betónu je možné definovať podľa CEN/TR 16349:2012 (E), prípadne podľa T11 vo vzťahu k triede prostredia E1, E2 a E3 z hľadiska reaktivity kameniva s alkáliami a celkového obsahu alkálií v betóne v zmysle tabuľky č. 2.

Tabuľka 2 – Podmienky použitia prírodného kameniva do betónu podľa stupňa vlhkosti prostredia a obsahu Na_2O eq. v betóne

Rizikovosť kameniva		Nízka	Stredná	Vysoká
		Obsah Na_2O na 1 m^3 betónu		
Vhodnosť do prostredia	E1	Bez obmedzenia	Bez obmedzenia	Bez obmedzenia
	E2	max. 4,5 kg/m^3 **	max. 3,5 kg/m^3 *	max. 2,5 kg/m^3 *
	E3	max. 3,5 kg/m^3 *	max. 2,5 kg/m^3 *	Nevhodné
Poznámka: * Podmienka vhodnosti do betónu: Obsah alkálií v cemente maximálne 0,8 % hmotnosti, avšak max. 2,5 alebo 3,5 $\text{kg Na}_2\text{O}$ na 1 m^3 betónu. Výpočet ekvivalentu alkálií Na_2O eq. = $\text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{ K}_2\text{O}$ ** Podmienka vhodnosti do betónu: Obsah alkálií v cemente maximálne 1,0 % hmotnosti, avšak max. 4,5 $\text{kg Na}_2\text{O}$ na 1 m^3 betónu. Výpočet ekvivalentu alkálií Na_2O eq. = $\text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{ K}_2\text{O}$.				

5.1 Určenie limitných hodnôt kedy sa dá AKR v betóne obmedziť a kedy nie je kamenivo použiteľné

Každý zdroj kameniva, by mal disponovať aktuálnym a platným posúdením v zmysle STN 721179. Pričom na základe výstupov daného posúdenia by sa malo kamenivo špecifikovať pre konštrukcie so špecifickou hodnotou alkalického reaktivity cementu a prostredia, v ktorom majú byť budúce betónové konštrukcie zhotovované.

V prípade ak dané podmienky kamenivo nespĺňa, je možné pristúpiť k posúdeniu aplikácie prímies na minimalizáciu výskytu.

Pri dilatometrickom vyhodnocovaní v zmysle STN 721179, dosiahlo kamenivo hodnotu rizikovosti po šiestich mesiacoch vysokú, malo by sa pokračovať v meraní, a to v dĺžke 1 rok, pričom ak kamenivo po 1 roku dosahuje hodnoty 0,200 % dĺžky pre drvené kamenivo, respektíve 0,100 % dĺžky pre ťažené kamenivo, označuje sa ako extrémne rizikové a nie je možné ho použiť do betónu.

Skúšobné metódy a hodnotenie rizikovosti kameniva do betónu z hľadiska jeho reaktivity s alkáliami uvádza tabuľka č. 3.

Tabuľka 3 – Klasifikácia kameniva do betónu z hľadiska rizika reakcie s alkáliami v zmysle ZP6

Skúšobná metóda	Jednotky	Riziková prírodného kameniva (skúškou zistené hodnoty)		
		Nízka	Stredná	Vysoká
Dilatometrická podľa ASTM C-1260-14[hodnoty podľa ZP6]	% dĺžky	$\leq 0,100$	$> 0,100 - 0,200$	$> 0,200^*$
Dilatometrická podľa ČSN 72 1179[hodnoty podľa ZP6] (hodnoty s vzťahujú na odčítanie po 6 mesiacoch)	% dĺžky	$\leq 0,070$	$> 0,070 - 0,100$	$> 0,100^{**}$
Dilatometrická podľa ČSN 72 1160[hodnoty uvedené v ZP6] (uhličitanové kamenivo)	% dĺžky	$\leq 0,50$		$> 0,50^{***}$
Skúšky prírodného kameňa. Petrografický opis STN EN 12 407 [ZP6]	–	podrobný petrografický popis všetkých odobratých vzoriek		
Chemická skúška STN 72 1179[ZP6]	mmol/l	ak molárna koncentrácia oxidu kremičitého „S“ $< 35 + R/2$ a úbytok zásaditosti „R“ je < 70 možno predpokladať že vzorka neobsahuje reaktívne formy kremeňa		

Poznámka:
**Pri prekročení parametru podľa ASTM nad 0,300 % dĺžky je výsledok bez ohľadu na výsledky ostatných metód „riziková extrémna“, a teda sa neodporúča kamenivo použiť.*
***Dilatometrická trémová skúška podľa ČSN 72 1179 s použitím portlandského cementu CEM I 42,5 s dodatkom doplnených alkálií v zámesovej vode na 1,25 % Na₂O eq. V prípade intenzívneho vzostupného priebehu krivky rozpínania telesa (bez tendencie k poklesu) z rizikových materiálov pri skúške podľa STN 72 1179 previesť skúšku v trvaní jedného roku s kritériom 0,200 % dĺžky pre drvené kamenivo, respektíve 0,100 % dĺžky pre ťažené kamenivo. Pri prekročení tejto hodnoty je výsledné hodnotenie bez ohľadu na výsledky ostatných metód „riziková extrémna“, a teda sa neodporúča kamenivo použiť.*
****Pri rozpustení alebo rozpade trémky pri dilatometrické skúške uhličitanového kameniva podľa ČSN 72 1160 je výsledok považovaný za nevyhovujúci.*

Výsledná riziková v zmysle STN 72 1179, na základe vyhodnotenia dilatometrickou skúškou uvedenou v tabuľke 3 sa klasifikuje podľa obsahu Na₂O eq v cemente nasledovne:

Tabuľka 4 – Klasifikácia rizikovosti kameniva podľa obsahu Na₂O eq v cemente

Skúšobná metóda	Obsah Na ₂ O eq v cemente	Riziková kameniva podľa relatívneho predĺženia (%)		
		Minimálna	Stredná	Vysoká
Dilatometrická metóda (po 6 mesiacoch)	Do 0,60	Max. 0,150	0,151 až 0,200	Nad 0,200
	Od 0,61 do 0,9	Max. 0,130	0,131 až 0,180	Nad 0,180
	Nad 0,91	Max. 0,100	0,101 až 0,150	Nad 0,150

6 Vplyv prostredia betónu na tvorbu AKR

Tak ako je uvedené v kapitole 3 rozborovej úlohy a v úvode uvedených národných normách ako STN 72 1179, tak aj zahraničných normách ako napr. ONORM B 3100 [ZP5], jednou z podmienok

pre výskyt AKR je vplyv prostredia, ktorému je daná konštrukcia vystavená. Nepriaznivé pôsobenie prostredia spočíva v prísune vlhkosti, prísune chemických látok (napr. chloridy) prípadne výskytu bludných prúdov napomáhajúcich k migrácii alkálií pri AKR.

6.1 Ph betónu, vplyv vlhkosti

Ph betónu sa vzhľadom na jeho alkalitu pohybuje od 12,5 až do 13,5 pri čom presná koncentrácia pH záleží aj na druhu použitého cementu. Nízko-alkalický cement produkuje pH na úrovni 12,7 až 13,1 (zmesné, puzolánové), zatiaľ čo vysoko alkalické cementy (napr. portlandské) dosahujú pH od 13,5 do 13,9 [L4]. Čím je zmes zásaditejšia, tým viac je náchylná na reakciu s kyslým reaktívnym kamenivom. Samotné vytvorenie reakcie alkalického prostredia s kamenivom s obsahom kremičitých látok nespôsobí prejavenie AKR. Vzniká však gél, ktorý dokáže aj osmoticky nasávať vodu. Akékoľvek nasýtenie gélu vodou je spojené s postupnou expanziou, ktorá sa zastaví, až keď dôjde k vyčerpaniu oxidov v kremičitom kamenive [L12].

Taktiež rozpustnosť reaktívneho SiO_2 je najmenšia pri pH 2, následne pri hodnote od 2 k 8,5 sa rozpustnosť len mierne zvyšuje, zatiaľ čo pri hodnote pH 9 sa prudko zvyšuje pričom maximum dosahuje pri hodnote pH 11 až 13.

Takéto pH predstavuje najbežnejšie prostredie v betóne. Ak je roztok v rovnováhe s amorfným kremeňom a koncentrácia SiO_2 v roztoku je ďaleko vyššia, môžu vznikať ionizované vyššie polyméry ako $\text{H}_6\text{Si}_4\text{O}_7$. Rozpustnosť a prvé disociačné konštanty SiO_2 sa menia s teplotou. Tým vzniká pomerne zložitý vzťah medzi správaním sa reaktívnych častíc na báze kremeňa v závislosti na pH a teplote [L24].

Práve vystavenie konštrukcie špecifickému prostrediu, teplote a pH konštrukcie zohráva úlohu aj pri určení limitných hodnôt použiteľnosti jednotlivých druhov kameniva. Z daného dôvodu je podstatné práve prostredie vo vzťahu k možným dodatočným príjmom alkálií, prípadne vystavenie konštrukcie vlhkosti pričom najhoršie prostredie vo vzťahu k AKR je práve opakované cyklické zaťaženie vlhkosťou.

Rozdelenie prostredia je v súčasnosti udávané v zmysle TNI CEN/TR 16349 nasledovne:

Tabuľka 5 – Definícia kategórie prostredia podľa TNI CEN/TR 16349

Popis prostredia		Betón je vystavený prostrediu
E1	Suché prostredie ochránené pred vonkajšou vlhkosťou	vnútorný betón budov v suchom prostredí*.
E2	Pôsobenie vonkajšej vlhkosti**	vnútorný betón budov s vysokou vlhkosťou; tj. pracovne, rezervoáre, plavecké bazény, betón vystavený vlhkosti z okolitého ovzdušia, neagresívnej podzemnej vode, ponorený v sladkej vode alebo trvale ponorený v morskej vode***
E3	Pôsobenie vonkajšej vlhkosti a ďalších prirážajúcich faktorov	betón vystavený rozmrazovacím soliam, betón vystavený morskej vode*** (máčanie a vysušanie) alebo slanému postreku prevlhčený betón vystavený striedavému účinku mrazu a rozmrazovaniu, prevlhčený betón vystavený dlhotrvajúcim vyšším teplotám, betónové vozovky vystavené nerovnomernému zaťaženiu.

Poznámka:

*Suché prostredie zodpovedá okolitej priemernej relatívnej vlhkosti nižšej ako 75 % (bežne vo vnútri budov), kde nedochádza k vystaveniu externým zdrojom vlhkosti.

**Nebezpečenstvo poškodenia AKR môže vzniknúť pri betóne, ktorý je počas životnosti málokedy suchý aj v suchom prostredí. Zodpovedajúce betónové konštrukčné prvky by mali byť zahrnuté do kategórie E2 a ich rozmery môžu byť stanovené v štátnych špecifikáciách.

***Betón trvalo ponorený v morskej vode nie je vystavený väčšiemu riziku AKR ako podobný prvok vystavený vlhkému vzduchu, usadený v zemi alebo ponorený v sladkej vode, pretože obsah alkálií v morskej vode je nižší ako obsah alkálií v pórovom roztoku väčšiny betónov.

Najnevhodnejším je práve cyklické exponovanie betónovej konštrukcie vodou a následné vysychanie. Pri takomto procese totiž dochádza k najvýznamnejšiemu pohybu alkálií v konštrukciách, až k miestam, kde dané alkálie dokážu reagovať s Kremičitanom obsiahnutým v kamenive [L7].

Taktiež z povahy samotnej reakcie popísanej v kapitole 3 je jasné, že reaktivita oxidu kremičitého nenastane bez vody. Prítomnosť vody má teda pri AKR dvojakú úlohu. V prvom kroku slúži ako tzv. „nosič“ alkalických kationov a hydroxylových iónov. V druhom kroku je absorbovaná vzniknutým

hydroskopickým gélom, ktorý narastá z opakovanou reakciou, až kým tlak vyvolávaný danou expanziou nepresiahne pevnosť betónu a nevznikne trhlinka.

7 Možnosti eliminácie AKR v betóne a jej následkov

Každé z opatrení, ako napríklad aplikácia prímiesí ktoré dokážu čiastočne nahradiť určité množstvo cementu (ako napríklad prímiesi typu II podľa STN EN 206+A2, prípadne iné prímiesy pre ktoré bola v zmysle danej normy určená „k“ hodnota), prípadne aplikácia prímiesi bez náhrady cementu, vplýva na celkovú zmes inak, a na základe toho je možné dané opatrenia rozdeliť do nasledovných mechanizmov.

Najbežnejším postupom (mechanizmom) pre elimináciu, resp. potlačenie AKR je použitie:

- nízko-alkalického cementu (Cement s úrovňou alkálií pod 0,6),
- minerálnych prímiesí (angl. supplementary cementitious materials alebo SCMs). Najčastejšie používanými minerálnymi prímiesami na potlačenie AKR je podľa jeho účinnosti nasledovné:
 - o Kremičitý úlet,
 - o Metakaolín,
 - o Vysokoteplotný popolček,
 - o Vysokopecná troska,
- nahradením nevhodného kameniva,
- použitie lítiových solí.

7.1 Nízko-alkalické cementy

Za nízko-alkalický cement považujeme ten, pri ktorom celková úroveň alkálií garantovaná výrobcom nepresahuje hodnotu 0,6 %. Zníženie hodnoty sa dosahuje úpravou chemickej skladby cementu pomocou modifikácie vstupov výrobného procesu – nízkoalkalické suroviny, prípadne použitím CaCl_2 na vstupe suroviny do rotačnej pece.

Pri určovaní alkality cementu, pre posúdenie alkality konkrétnej zmesi, musíme zohľadniť aj ostatné zdroje alkality a uplatniť výpočet v zmysle STN 72 1179.

Vzhľadom na problematiku získavania údajov od jednotlivých výrobcov cementov sa odporúča požadovať aspoň údaje o úrovni alkálií na slinku. V danom prípade je taktiež potrebné overiť účinnosť takéhoto opatrenia (zrýchlenou skúškou), prípadne ho kombinovať s aplikáciou minerálnych prímiesí prípadne lítiových solí.

7.2 Minerálne prímiesi

Medzi minerálne prímiesi začleňujeme vo vzťahu k AKR každú prímies, ktorá dokáže čiastočne nahradiť určité množstvo cementu. Minerálne prímiesi znižujú prejavy AKR aj tým, že ich reakcia spotrebúva hydroxid vápenatý, čím znižuje alkalitu pórového roztoku (a tým aj pH). Zníženie alkality pórového roztoku zníži rozpúšťanie oxidu kremičitého z jednotlivých reaktívnych minerálov obsiahnutých v kamenive. Zároveň minerálne prímiesi s obsahom oxidu hlinitého postupne uvoľňujú do pórového roztoku hliník, ktorý znižuje rozpustnosť oxidu kremičitého jednotlivých reaktívnych minerálov [L65].

Účinnosť jednotlivých prímiesí je teda závislá od chemického zloženia, veľkosti častíc a jemnosti mletia a od množstva dávkovania prímiesi.

- metakaolín a prímiesi s obsahom hlinitanu vápenatého a hydrátu hliníto-kremičitanu vápenatého ktorý reaguje v úvodnej fáze hydratácie portlandského cementu s $\text{Ca}(\text{OH})_2$ spolu s tvorbou doplnkových hydrátov kremičitanu vápenatého. Táto reakcia má za následok zníženie priepustnosti výslednej zmesi čo predstavuje zníženie prenikania alkálií a prípadnej vlhkosti z vonkajšieho prostredia (vznikne zahustenie pastovej časti zmesi a medzifázovej prechodovej zóny).
- Tvorba doplnkových hydrátov taktiež poskytuje dodatočné adsorpčné miesta na viazanie alkálií, dodaných do zmesi z materiálov použitých na výrobu betónu alebo ktoré môžu prenikať z prostredia, čím sa obmedzuje produkcia gélu AKR.
- Nahradenie cementu s vysokou koncentráciou alkálií.
- Nadbytok Ca^{2+} prispievajúci CH prítomným v roztoku pórov môže nahradiť Na^+ a K^+ viazané v alkalickom silikagéli, čím sa iniciuje komplexná interakcia medzi „zrelým“ a „nezrelým“ gélom (t. j. gélom, ktorý reagoval alebo nereagoval s Ca^{2+}), ktorý vedie k mikroštruktúrálnemu poškodeniu. Spotreba CH pucolánovými reakciami môže

obmedziť poškodenie AKR znížením množstva voľného vápnika prítomného v roztoku pórov a teda obmedzením expanzie gélu [L12].

Skorší výskum vykonaný na binárnych zmesiach jednotlivých prímiesí s cementom ukázal, že popolček s nízkym obsahom vápnika, ASTM C 618 Trieda F (CSA A23.5 Typ F), popolček, metakaolín a kremičitý úlet sú najúčinnnejšie pri zmiernovaní AKR. Popolček a troska s vysokým obsahom vápnika ASTM C 618 triedy C (CSA A23.5 typ CH) preukázali zníženú schopnosť zmierniť AKR, čo si vyžaduje vyššie úrovne, až do 30 % náhrady cementu pre kamenivo so strednou až vysokou reakciou na AKR. Vzhľadom na celkové požadované vlastnosti betónovej zmesi má použitie dvoch typov jednotlivých prímiesí ako trojzložkových zmesí potenciál synergicky optimalizovať príspevky každého z nich, s ohľadom na faktory, ako je pevnosť v ranom a neskoršom veku betónu, spracovateľnosť, trvanlivosť a náklady spojené s výrobou zmesi. Každá úprava zmesi si vyžaduje v prípade zabudovania reaktívnych foriem kameniva nastavenie jednotlivých prímiesí spolu s kontrolným meraním [L66].

Potrebné je však posúdiť aj samotnú prímies, nakoľko správanie sa minerálnych prímiesí (predovšetkým popolčekov a trosiek) je závislé predovšetkým od ich vlastností ako aj chemického zloženia, pričom je možné sledovať vysoké rozdiely daných vlastností, v závislosti od samotného výrobného procesu pri ktorom vznikajú. Aj preto je žiadúce vykonať kontrolné meranie kombinácie konkrétneho potencionálne reaktívneho kameniva s prímiesou použitou na elimináciu AKR.

Ukážka správania sa minerálnych prímiesí je podrobne popísaná v štúdií vykonávanej v Českej republike [L20]. V predmetnej štúdií je opísaných celkovo 10 kombinácií jednotlivých prímiesí, konkrétne meranie bez aplikácie prímiesí a následne 3 koncentrácie (10 %, 20 % a 30 %) prímiesí ako náhrady cementu (metakaolín, vysokopecná troska, popolček). Výskum preukázal účinnosť prímiesí pričom každá z aplikácií (od 10 % až do 30 %) sa prejavili znížením pomerného predĺženia skúmaných telies. Najmenej účinnou bola vysokopecná granulovaná troska, kde pre potrebnú minimalizáciu pomerného predĺženia (pod 0,1 %) skúšobných telies bolo potrebné 30% nahradenie cementu. Účinnjšou prímiesou bol popolček kde už 20 % náhrady cementu zodpovedal požadovanému zníženiu (a podobnému poklesu ako pri 30 % trosky) a vzorky s 30 % náhradou nevykazovali prakticky žiadne pomerné predĺženie. Najúčinnjšou prímiesou bol metakaolín. Desať percentná náhrada cementu danou prímiesou zamedzila presiahnutiu limitnej hodnoty pomerného predĺženia (totožný pokles ako pri 30 % trosky a 20 % popolčeka).

7.3 Lítiové soli

Najpoužívanjšou a najúčinnjšou soľou s obsahom lítia aplikovanou na elimináciu výskytu AKR je dusičnan lítny (LiNO_3). Jedná sa o neutrálu a vysoko rozpustnú soľ, ktorá po pridaní do zámesi nezvyšuje úroveň pH v pórovom roztoku, čím sa znižuje riziko pesimového správania. Alternatívou k dusičnanu lítnemu je uhličitan lítny a hydroxid lítny. Obe tieto náhrady však pri nesprávnom dávkovaní predstavujú riziko opačného efektu (nárastu výskytu AKR), nakoľko pri ich použití pri reakcií narastá množstvo hydroxilových iónov (OH^-) ktoré napomáhajú AKR [L68, L69].

Aplikáciou LiNO_3 dochádza k zmene chemického zloženia roztoku pórov, bez nárastu pH čo vplyva na zvýšenie stability oxidu kremičitého. Predpokladá sa, že sa po aplikácii LiNO_3 na povrchu reaktívnych zŕn vytvorí určitá vrstva tvoriaca fyzikálnu bariéru [L70]. V iných štúdiách sa predpokladá, že daná bariéra vzniká práve na reakcii kameniva obsahujúceho SiO_2 s LiNO_3 a je tvorená kryštalickou formou Li_2SiO_3 a gélom s obsahom lítia. Daný gél obsahujúci Li^+ ióny následne zabraňuje rozpustnosti oxidu kremičitého, čo zabraňuje prípadnej expanzii gélu.

LiNO_3 sa aplikuje pomocou zámesovej vody v rôznych molárnych pomeroch lítiových iónov k alkalickým iónom $\text{Li}/(\text{Na}+\text{K})$, pričom odporúčaná je dávka pomeru na úrovni 0,74. Dávkovanie LiNO_3 je závislé od chemického zloženia a jeho účinnosť sa môže líšiť v závislosti od zloženia kameniva. Vzhľadom na pomerne vysokú cenu sa používa v kombinácií s minerálnymi prímiesami, pričom v oboch prípadoch (samotného dávkovania a kombinácie s inými prímiesami) je potrebné overiť vplyv danej koncentrácie prímiesí a preukázať danú účinnosť dilatometrickými skúškami.

8 Skúšobné metódy na preukazovanie AKR - početnosti skúšania

Spôsob vyhodnotenia reaktivity kameniva a početnosť skúšania by mal byť zachovaný tak ako je uvedené v STN 72 1179. Prípadná úprava by mohla nastať predovšetkým vo vzťahu k posúdeniu

možného zabudovania potencionálne reaktívneho kameniva, a to tak, že by sa ustanovil normovaný postup overenia účinnosti prímiesí na prejav AKR. Konkrétne by mohla byť prevzatá metodika RILEM, kde sa v prípade nevyhovujúcej dilatometrickej skúšky pristupuje k opätovnému posúdeniu konkrétnej čiary zrnitosti, v ktorej má byť reaktívne kamenivo použité do betónu, v kombinácii s prímiesou pôsobiaceou na potlačenie prejavu AKR. Takéto posúdenie však môže byť vykonané len na menej namáhaných a exponovaných konštrukciách.

Početnosť skúšania v zmysle STN 72 1179 je uvedená v tabuľke 6 nasledovne:

Tabuľka 6 – Početnosť skúšania v zmysle STN 72 1179

Skúšobná metóda	Rizikovosť kameniva		
	Minimálna	Stredná	Maximálna
Petrografický opis	3 roky pri ťažbe menšej ako 500 000 t kameniva/rok	2 roky pri ťažbe menšej ako 500 000 t kameniva/rok	1 rok
	2 roky v prípade väčšej ťažby	1 roky v prípade väčšej ťažby	
Dilatometrická metóda	3 roky pri ťažbe menšej ako 500 000 t kameniva/rok	2 roky pri ťažbe menšej ako 500 000 t kameniva/rok	1 rok
	2 roky v prípade väčšej ťažby	1 roky v prípade väčšej ťažby	
Chemická metóda	3 roky pri ťažbe menšej ako 500 000 t kameniva/rok	2 roky pri ťažbe menšej ako 500 000 t kameniva/rok	1 rok
	2 roky v prípade väčšej ťažby	1 roky v prípade väčšej ťažby	

9 Rozdelenie hornín z hľadiska rizikovosti

Reaktívne formy SiO_2 sa môžu vyskytovať vo všetkých druhoch hornín. Prehľad výskytu reaktívnych foriem SiO_2 v jednotlivých horninách sa uvádza v zmysle STN 72 1179 v tabuľke 7.

Tabuľka 7 – Výskyt reaktívnych foriem SiO_2

Reaktívna zložka SiO_2	Forma výskytu	Výskyt v horninách	Pravdepodobnosť výskytu
Opál	Amorfná, Mikrokryštalická	Kremité horniny (silicity, napr. rohovce, bulžníky, jaspilidy, diatomity, bridlice)	Vysoká
Chalcedón	Mikrokryštalická, vláknitá	Pieskovce, silicity (rohovce, pazúriky)	Vysoká
Tridymit, cristobalit	Mikrokryštalická	Horniny s obsahom opálu, kyslé vulkanické horniny (ryolity)	Ojedinelá
Kremeň	Mikrokryštalická, zrnitá	Kremence, pieskovce, piesky, granit, bridlice	Bežná
Kremičité sklo	Amorfná	Vulkanické sklá (ryolitové, andezitové, dacitové), tufy, horniny sopečného pôvodu, riečne kamenivo z vulkanických oblastí	Vysoká

Petrografický opis podľa STN EN 932-3 slúži na účely všeobecného zatriedenia horniny. Opis obsahuje informácie týkajúce sa veľkosti zrna, textúry anizotropie, farby, pórovitosti a tvaru pórov (sopečné horniny) údaje o minerálnom zložení a identifikáciu petrografického typu horniny. Pre formácie sopečných, vyvretých a usadených hornín sa dopĺňa aj informácia o ich geologickom veku. Petrografický opis predstavuje predbežné posúdenie kameniva z hľadiska náchylnosti na AKR.

Kvalitatívna identifikácia prítomnosti a obsahu reaktívnych foriem SiO_2 vyžaduje, aby sa metódy používané pri petrografickom opise (vizuálne pomocou lupy a mikroskopické posúdenie pripraveného petrografického preparátu/výbrus pomocou polarizačného mikroskopu) doplnili o RTG, a v prípade potreby doplnili informácie aj o TG-DTA.

Tabuľka 8 – Orientačné rozdelenie niektorých hornín podľa náchylnosti na AKR

Rizikovosť	Druh horniny (podľa pôvodu)	Hornina (petrografický typ)
Minimálna	Vyvreté	Granit, granodiorit, gabra, čadič
	Usadené	Piesky a štrkopiesky
	Premené	Amfibolit, serpentit

Stredná	Vyvreté	Ryolit, porfýr, andezit
	Usadené	Droba, piesky a štrkopiesky, rohovec
	Premenené	Parula, ortorula, kontaktný rohovec
Vysoká	Vyvreté	Ryolit, porfýr, porfýrit, vulkanické sklo
	Usadené	Kremenné arenity (kremenec), droba, piesky a štrkopiesky
	Premenené	Metadroba, metakvarcit, porfýroid

Rozsah úpravy STN 72 1179 navrhujeme v zavedení dilatometrickej zrýchlenej metódy v zmysle ASTM-1260-21, pričom hodnotenie a limitné pomerné predĺženie uvedené v tabuľke 2 navrhujeme pre pomerné predĺženie po 28-mich dňoch na rozdiel od normového hodnotenia po 14tich dňoch a to predovšetkým z dôvodu minimalizácie možného výskytu AKR pri pomalšie reagujúcich horninách.

Skúška by mala byť aplikovaná v prípade ak jedna z metód popísaných v STN 72 1179 vykáže strednú, prípadne vysokú rizikovosť AKR. V takom prípade by sa mala overiť reaktivita dodatočnou dilatometrickou skúškou a to s aplikáciou konkrétneho opatrenia a teda aplikácií prímiesí, nízko-alkalického cementu, nahradením časti potencionálne reaktívneho kameniva prípadne kombináciou daných opatrení. Jednalo by sa teda o doplňujúcu skúšku, ktorá by bola buď implementovaná do STN 72 1179 alebo popísaná samostatným Technologickým postupom a to na základe postupov popísaných v ASTM-1260-21 [ZP2] resp TP137 [ZP6].

Pre rozhodnutie o vhodnosti suroviny ako zdroja pre kamenivo do betónu, respektíve do malty je potrebné vždy vykonať všetky tri skúšky podľa STN 721179 vrátane RTG analýzy, prípadne TG-DTA.

Ak sa na základe výsledkov petrografického opisu potvrdí prítomnosť reaktívnych foriem SiO_2 alebo ak bude výsledok chemickej alebo dilatometrickej skúšky nevyhovujúci, môže sa pri splnení určitých podmienok, ktoré sú špecifikované vo výrobových normách na betón, použiť na výrobu betónu, respektíve malty aj takéto kamenivo, pričom výrobca betónu, musí v tomto prípade dodržiavať požiadavky STN 72 1179:

- požiadavky na kamenivo uvedené v STN EN 206+A2 v poznámke k 5.2.3.5 Odolnosť proti AKR a informatívnej prílohe L, riadok 4, v zmysle rámca na špecifikovanie požiadaviek podľa TNI CEN TR 16349;
- vyžiadať od výrobcu cementu používaného na výrobu betónu s použitím kameniva so strednou a vysokou rizikovosťou podľa tabuľky 4, 5 a 6 výsledky obsahu alkálií v konkrétne používanom cemente 6 po sebe idúcich mesiacoch (predchádzajúce obdobie). Výrobca cementu musí výsledky celkového obsahu alkálií v cemente výrobcovi betónu na požiadanie predkladať aj v nasledujúcom období;
- pri výrobe betónu s použitím kameniva so strednou alebo vysokou rizikovosťou môže používať prímiesi s obsahom alkálií do 2 % hmotnosti;
- pri výrobe betónu vystaveného vlhkému prostrediu a betónu pevnostnej triedy vyššej ako C 12/15 s použitím kameniva so strednou alebo vysokou rizikovosťou nesmie používať recyklovanú vodu;
- pri výrobe betónu s použitím kameniva so strednou alebo vysokou rizikovosťou musí zabezpečiť zníženie nasiakavosti betónu.
 - o dané zníženie je možné dosiahnuť práve pomocou prímiesí popísaných v kapitole 7, pričom overenie konkrétnej zmesi potencionálne reaktívneho kameniva s aplikovaným opatrením na obmedzenie výskytu AKR musí byť opätovne posúdené podľa STN prípadne podľa inej metodiky ktorú je potrebné prijať (po vzore RILEM, resp. ASTM metodiky popísanej v kapitole 4).

10 Výskyt AKR na Slovensku

Prejavy AKR všeobecne nastávajú na mohutných konštrukciách, kde sú podmienky pre výskyt. Jedným z príkladov prejavu AKR na Slovensku je mostný objekt ev. č. D1-229 Podbanské, ľavý most na diaľničnom úseku lptovskej D1 (Liptovský Ján – Liptovský Hrádok). Predmetný most mal 34 ročnú životnosť (v prevádzke od 1984, následne uzavretý 2018), pričom bol po uzavretí zbúraný a nahradený novým.

Pri diagnostike porušení predmetného mosta bola v zmysle [L71, L72] použitá nemecká metodika, ktorá sa používa aj na diaľniciach v ČR:

0. stupeň – neporušený betón, pevnosť v ťahu $\geq 2,0$ MPa
I. stupeň - objavujú sa gély, betón je bez trhlín, pevnosť betónu v ťahu 1,0 až 1,6 MPa
II. stupeň – gély výrazné s trhlinami, pevnosť betónu v ťahu 0,5 až 1,1 MPa
III. stupeň – gély výrazné, lokálny rozpad, pevnosť betónu v ťahu 0,0 až 0,6 MPa



Obrázok 6 [L71, L72] – Fotodokumentácia diagnostiky mostného objektu D1-299 Podbanské
Na danom mostnom objekte došlo v zmysle [L71, L72] ku kombinácii výskytu AKR v betóne hornej stavby mosta, čo spolu s nedostatočnými opatreniami počas zimnej betonáže, spôsobilo rozpad štruktúry betónu v rozsahu, ktorý spôsobil zaradenie mosta do stavebno-technického stavu VII.- havarijný stav.

11 Záver

Na základe aktuálnych poznatkov k priebehu reakcie je možné konštatovať nasledovné:

- potencionálne reaktívny materiál vo forme SiO_2 možno identifikovať vo väčšine hornín vyskytujúcich sa na našom území (nakoľko kremeň je jedným z najbežnejších minerálov vyskytujúcich sa na Slovensku), nie každá forma je však reaktívna a na výskyt AKR sú potrebné určité okolnosti, podrobne popísané v kapitole 3 RÚ,
- problematika AKR je naďalej predmetom výskumu, nakoľko sa vyskytujú prípady prejavu AKR aj pri aplikáciách zamedzujúcich opatrení/prímesí (viď kapitola 4 príklad metodiky RILEM TC 301-ASR (2020-2025), ktorá ešte stále prebieha, prípadne postup revízií metodiky ASTM na hodnotenie jednotlivých kombinácií potencionálnej reaktivity kameniva, kde je aktuálne platná už šiesta revízia ASTM C1567-21 z 20.5.2021),
- rýchlosť prejavu reakcie je závislá na druhu a množstve reaktívneho materiálu (viď. kapitola 3.3.1 pesimálne správanie),
- na hodnotenie náchylnosti kameniva na výskyt AKR je možné použiť viacero metód, pričom najčastejšie zastúpené skúšky pri hodnotení AKR sú dilatometrické. Takáto skúška sa momentálne aplikuje aj na Slovensku v zmysle STN 72 1179 (jedná sa o dlhodobú časovo náročnú skúšku s dobou trvania 6 mesiacov, počas ktorých sa hodnotí pomerné predĺženie),
- Predmetné dilatometrické metódy sa používajú aj vo väčšine národných predpisov, pričom vo viacerých sa pripúšťa použitie potencionálne reaktívneho materiálu,
- použitie potencionálne reaktívneho materiálu je možné, len v prípade aplikácie opatrení v zmysle kapitoly 3.3 rozborovej úlohy, a teda takých opatrení ktoré zabránia výskytu AKR,
- zníženie reaktivity pomocou nízko-alkalických cementov je účinné len čiastočne a nie je ho možné aplikovať v prostredí, kde môžu byť dodávané externé alkálie (napr. chemický posyp). Taktiež je v praxi problémové získať dostatočné údaje o úrovni alkálií v cemente, čo obmedzuje použitie potencionálne reaktívnych kamenív v kombináciách s nízko-alkalickým cementom,
- zníženie reaktivity sa vykonáva okrem aplikácie cementu s nižšou hodnotou alkálií aj pomocou prímesí, ktoré sú popísané v kapitole 7 rozborovej úlohy, pričom účinnosť jednotlivých prímesí musí byť laboratórne overená (dilatometricky),
- v prípade použitia reaktívneho kameniva v kombináciách s prímesami je vhodné vo vzťahu k výkonu skúšok na kamenive, prípadne kamenive v kombináciách s prímesou limitujúcou výskyt AKR aplikovať zrýchlenú skúšku (vyhodnotenie po 14-tich dňoch, respektíve 28-mich dňoch),
- jedna z možných metodík, pomocou ktorej môže byť potencionálne reaktívne kamenivo hodnotené je popísaná v úvode kapitoly 4 rozborovej úlohy. V prípade zavedenia legislatívneho rámca pre možnosť aplikácie zrýchlených skúšok, prípadne zabudovania kombinácií potencionálne reaktívneho kameniva s prímesami je možné aplikovať:
 - o pomocou doplnenia/revízie STN 72 1179, konkrétne:
 - o zrýchlenú skúšku v zmysle metodiky uvedenej v kapitole 4 (obrázok 4 strana 19 rozborovej úlohy),
 - o možnosť aplikácie dilatometrickej (6 mesačnej skúšky) a zrýchlenej skúšky vykonávanej na kombináciách potencionálne reaktívneho kameniva a prímesi (zrýchlenú skúšku nie je odporúčané aplikovať v prípade použitia prímesí s vysokými hladinami alkálií – popolček s úrovňou nad 4,5 % $\text{Na}_2\text{O}_{\text{ekv}}$ hmotnosti; troska a kremičitý úlet nad 1,0% $\text{Na}_2\text{O}_{\text{ekv}}$ hmotnosti, pričom pri takýchto úrovniach je potrebné vykonať 6 mesačnú dilatometrickú skúšku v zmysle STN 72 1179), s určením spôsobu hodnotenia a určením limitnej hodnoty pre ktorú je kombinácia kameniva a prísad bezpečná (pri väčšine národných predpisov je to 0,1 % pomerné predĺženie po vyhodnotení zrýchlenej dilatometrickej skúške, prípadne hodnota určená ako limitná pre použitie v zmysle konkrétnej skúšky – hodnotiace kritérium pre jednotlivé druhy skúšok je uvedené v prílohe 1 rozborovej úlohy),
 - vzhľadom na danú normu sa však jedná o zdĺhavý a legislatívne náročný proces,
 - o pomocou vytvorenia samostatného technického predpisu:
 - v ktorom by bol popísaný presný postup pre aplikácie zrýchlenej skúšky s definovaním metodiky hodnotenia (ako napríklad obrázok 4 strana 19 rozborovej úlohy),
 - s určením spôsobu hodnotenia jednotlivých kombinácií prímesí s reaktívnym materiálom pre umožnenie jeho následného zabudovania, s určením limitných hodnôt pre ktorú je kombinácia kameniva a prímesí bezpečná rovnako ako pri druhom bode

predchádzajúceho odseku (možnosti aplikácie potencionalne reaktívneho kameniva pomocou revízie STN 72 1179)

o zavedení ASTM C 1260-21 slúžiacej pre zavedenie zrýchlenej skúšky a ASTM C 1567-21, ktorá je modifikáciou danej normy ASTM C 1260-21, slúžiaca pre overovanie jednotlivých kombinácií prímiesí a potencionalne reaktívneho kameniva zrýchlenou skúškou, do sústavy STN (nevýhodou danej úpravy pomocou ASTM noriem je rozdielny druh sitovania materiálov v ASTM normách).

o súčasne v prípade umožnenia aplikácie potencionalne reaktívneho materiálu je potrebné spoločne s úpravou legislatívneho rámca vo forme umožnenia aplikácie zrýchlenej skúšky a zavedením metodiky overovania spolupôsobenia potencionalne reaktívneho kameniva a prímiesí potrebné vykonať úpravu KLK KB, nakoľko prímiesi ako popolček a troska nahrádzujú/doplňajú podiel spojiva. Jednalo by sa o úpravu a doplnenie:

- KLHS 01/2016 o kapitulu VII Minerálne prímiesi na elimináciu výskytu AKR, kde by bolo definované aké minerálne prímiesi je možné použiť a aké parametre musia dané prímiesi spĺňať,
- KLK KB 01/2021 o možnosť použitia zrýchlenej skúšky (v zmysle ASTM C-1260 a 1567), prípadne o umožnenie použitia prímiesí (typu II ako čiastočnej náhrady cementu v zmysle STN EN 206+A2, prípadne prímiesí bez náhrady cementu) a určenie limitnej hodnoty použitia kameniva s prímiesou na zamedzenie výskytu AKR.

Príloha č.1 porovnanie súčasne využívaných metód pre overovanie AKR (kremičitá resp. uhľiková reaktivita)								
Alkalicko - kremičitá reaktivita								
Názov predpisu	označenie predpisu	účel skúšky	druh skúšky	vzorky	doba trvania skúšky	hodnotené kritérium	vyhodnotenie	poznámka
Potenciálna _AKR pri kombinácii cementu a kameniva (dilatometrická)	ASTM C 227	Overiť náchylnosť určitých kombinácií cementu a kameniva na expanzívne reakcie zahŕňajúce alkálie	dilatometrické meranie trámčekov uskladnených nad vodou pri 37,8°C a vysokej relatívnej vlhkosti	minimálne 4 telieska o rozmeroch 25x25x285mm	V závislosti od priebehu skúšky: 1. meranie po 14 dňoch, následne 1x mesačne počas 6tich mesiacov, následne 1x za 3 mesiace počas 6tich mesiacov, následne 1x za 6 mesiacov pokiaľ narastá pomerné predĺženie vzorky	Zmena dĺžky telies - pomerné predĺženie	max. 0,10% pomerné predĺženie počas 6tich mesiacov max 0,05% pomerné predĺženie počas 3och mesiacov	Test nemusí zaznamenať expanziu uhlíčanových kamenív, Dlhé trvanie testu, Pomerné predĺženie môže nastať aj z iných dôvodov ako AKR
Potenciálna AKR kameniva (dilatometrická zrýchlená)	ASTM C 1260 / ASTM C 1567 / AASHTO T 303	Na overenie potenciálu škodlivej reakcie alkalicko-kremičitého kameniva, test na maltových trámčekoch	Ponorenie trámčekov v alkalickom roztoku pri 80 °C	minimálne 3 telieska 25x25x285mm	16 dní	Zmena dĺžky telies - pomerné predĺženie	pri predĺžení nad 0,10% požaduje doplnkový test, predĺženie 0,20% a viac - potencionálne reaktívne kamenivo, nevhodné	veľmi rýchla alternatíva k C 227, veľmi vhodná pre pomaly reagujúce kamenivo, prípadne kamenivo pri ktorom sa prejavuje reaktivita neskôr, nevodná pre skúšanie kombinácie cementu a kameniva
Potenciálna AKR kameniva (chemická)	ASTM C 289	Na overenie potenciálu škodlivej reakcie kremičitého kameniva	Vystavenie vzorky alkalickému roztoku pri 80 °C	3 až 25 gramové vzorky predvrúbeného a preosiateho kameniva	24 hodín	Pokles alkality roztok a množstvo rozpusteného oxidu kremičitého	Grafické vyhodnotenie, na základe ktorého môže spadať do škodlivej resp. potencionálne škodlivej kategórie	Rýchle výsledky Niektoré druhy kamenív vykazujú nízke hodnoty aj keď majú vysoký obsah oxidu kremičitého - nespôhlivosť testu
Stanovenie zmeny dĺžky v dôsledku AKR (dilatometrická)	ASTM C 1293 / RILEM AAR 3	Na overenie potenciálu škodlivej AKR konkrétnych kombinácií cementu a kameniva, test na maltových trámčekoch	Telieska skladované nad vodou pri 38°C	3 telesá na 1 kombináciu cementu a kameniva, rozmer 75 x 75 x 285 mm (75 x 75 x 250 mm pri RILEM AAR 3)	V závislosti od priebehu skúšky: 1. meranie po 7 dňoch, následne 28. a 56. deň, následne v 3.; 6.; 9. a 12. mesiaci, následne 1x za 6 mesiacov	Zmena dĺžky telies - pomerné predĺženie	Podľa prílohy XI, potenciálne reaktívne ak je nárast 0,04 % a viac za 1 rok / 0,05% a viac za rok pri RILEM AAR 3 (alebo 0,04 % po 2 rokoch, ak sa hodnotí kombinácia reaktívneho kameniva a prímеси na zmiernenie reaktivity)	Najpreferovanejší spôsob hodnotenia, používa sa ako doplnok k C 227, C295, C289, C1260 a C1567; veľmi podobný test ako CSA A23.2-14A Pomerne dlhé trvanie testu, harmonizovaná s RILEM AAR 3
Stanovenie zmeny objemu v dôsledku AKR	ASTM C 342	Na overenie potenciálu škodlivej AKR konkrétnych kombinácií cementu a kameniva	Telieska skladované vo vode pri 23°C	3 telesá na 1 kombináciu cementu a kameniva, rozmer 25x25x285mm	365 dní / 52 týždňov / 1 rok	Zmena dĺžky telies - pomerné predĺženie	V súlade s ASTM C33 nevhodné ak je pomerné predĺženie 0,2% a viac po 1 roku	Primárne používané v USA, pre kamenivo vybraných štátov (Oklahoma, Kansas, Nebraska, Iowa)
Overenie účinnosti pozzolanov alebo mletej granulovanej vysokopecnej trosky na zamedzenie / zmiernenie AKR	ASTM C 441	Na overenie potenciálu škodlivej AKR konkrétnych kombinácií cementu a kameniva s pridaním pozzolanov alebo mletej granulovanej vysokopecnej trosky.	Telieska sú vytvorené pridaným pyrexovým sklom - náhradou kameniva slúžiace ako normové, a klasické telesá s reaktívneho kameniva Telieska sú uskladnené nad vodou pri teplote 37,8°C a vysokej relatívnej vlhkosti	3 telesá pre jeden typ zmesi + 3 telesá ako kontrolná zmes (pyrex. sklom)	V závislosti od priebehu skúšky: 1. meranie po 14 dňoch, následne 1.,2.,3.,4.,6.,9. a 12. mesiac, následne 1x za 6 mesiacov pokiaľ narastá pomerné predĺženie vzorky	Zmena dĺžky telies - pomerné predĺženie	Podľa ASTM C 989, minimálne 75% zníženie expanzie alebo 0,020 % maximálna expanzia prípadne pripúšťa vyhodnotenie podľa C 618, porovnaním hodnôt s nízko alkalických hodnotami	Vysoko reaktívne umelé kamenivá nemusia zodpovedať skutočnosti - posudzovanému reaktívnemu kamenivu
Posúdenie zložiek prírodného minerálneho kameniva	ASTM C294	Poskytnúť podrobné popisné zatriedenie pre bežnejšie alebo vybrané dôležité prírodné minerály – dobrý východiskový bod na predpovedanie správania sa hornín z hľadiska AKR	Vizuálne posúdenie	Rôzne, podľa rozsahu vzorky, rozsah však musí byť reprezentatívny pre celý zdroj kameniva (lom)	veľmi krátky - doba posúdenia geológom	Zmena dĺžky telies - pomerné predĺženie	-	Tieto opisy sa používajú na charakteristiku prírodnene sa vyskytujúcich minerálov, ktoré tvoria bežné zdroje kameniva
Petrografické posúdenie kameniva	ASTM C 295	Identifikácia vhodnosti kameniva pomocou petrografického posúdenia	Vizuálne a mikroskopické posúdenie pripravených vzoriek – sitová analýza, mikroskopia, test úlomkov, test chemickým činidlom (kyselinou chlorovodíkovou), môže byť doplnené o RTG skúšku	Rôzne, podľa znalosti zdroja kameniva (lomu): pri jadrách (odvrtoch) od 53 do 100mm v priemere, 45kg alebo 300 kusov, alebo 2 kg	veľmi krátky - vizuálne posúdenia nevyžadujú reakčnú dobu	Vlastnosti častíc, ako je tvar, veľkosť, textúra, farba, minerálne zloženie, fyzický stav	-	Zvyčajne mikroskopia, môže byť použitá aj RTG analýza / difrakčná analýza / infračervená spektroskopia (viď C 294 pre názvoslovie)
Petrografické posúdenie -zo vzorky zavtvrdnutého betónu	ASTM C 856 / AASHTO T299	Identifikácia vhodnosti kameniva po zabudovaní (in situ) pomocou petrografického posúdenia, hlavne pri určovaní stavu alebo zostatkovej životnosti konštrukcie	Vizuálne a mikroskopické posúdenie pripravených vzoriek	Aspoň jeden jadrový odvrt priemeru 150 mm dĺžky 300mm	veľmi krátky - vrátane prípravy vzoriek, vizuálneho a mikroskopického posúdenia	Je obsiahnuté kamenivo známe ako reaktívne? Orientácia a geometria trhlín prítomnosť gélu v trhlinách	Určenie príznakov AKR a ich prejavu na konkrétnej konštrukcii, používa sa v kombinácii s inými skúškami	Vzorky možno posúdiť mikroskopmi (stereoskopický, metalografický, polarizačný a rastrovací elektrónový mikroskop)
Použitie uranylacetátu	ASTM C 856 Annex	Identifikácia / overenie AKR v zatvrdnutom betóne	Sfarbenie čerstvo odkrytého betónu (v mieste výrezu) a kontrola pod UV svetlom	Možné aplikovať na jadrách / obrúsenom povrchu / úlomkoch	veľmi krátky - okamžité vyhodnotenie	Intenzita fluorescencie	Nedostatok fluorescencie	Identifikuje malé množstvá AKR gélu, či spôsobuje expanziu alebo nie, Opál, prírodné kamenivo a taktiež nasýtený gél môže svietiť / Fluorescencia - možné skreslenie interpretácie výsledku. Skúška musí byť doplnená o petrografické vyšetrenie a fyzikálne skúšky na určenie rozťažnosti betónu.
Potenciálna AKR kombinácií cementových materiálov a kameniva (zrýchlená metóda -dilatometrická)	ASTM C 1567	Na overenie potenciálu škodlivej reakcie alkalicko-kremičitého kameniva, test na maltových trámčekoch	Ponorenie trámčekov v alkalickom roztoku pri 80 °C	minimálne 3 telieska pre každú kombináciu	16 dní	Zmena dĺžky telies - pomerné predĺženie	pri predĺžení nad 0,10% naznačuje reaktivitu a požaduje doplnkový test C 1293 (2 ročný test) na potvrdenie	Veľmi rýchla alternatíva k C 1293 Umožňuje vyhodnotenie prímеси na zmiernenie reaktivity a určenie optimálneho dávkovania
Prehľadný návod na použitie metód RILEM pri hodnotení kameniva na potenciálnu alkalickú reaktivitu	RILEM AAR-0	Prehľadný návod na využívanie metodiky RILEM pre komplexné vyhodnotenie kameniva s cieľom vylúčiť výskyt AKR v betóne	popis metód	v závislosti od metódy	v závislosti od metódy	v závislosti od metódy	v závislosti od metódy	v závislosti od metódy
petrografické preskúmanie kameniva na posúdenie potenciálu AAR	RILEM AAR-1; 1.1; 1.2	Petrografický atlas kameniva	Vizuálne a mikroskopické posúdenie pripravených vzoriek – predvrúbenie kameniva, sitová analýza, mikroskopia, test úlomkov, test chemickým činidlom (kyselinou chlorovodíkovou, fosforečnou), môže byť doplnené o RTG skúšku/difrakčnú analýzu, rastrovací elektrónový mikroskop	Odber tak aby reprezentoval celý zdroj kameniva, Navážka vzorky podľa maximálneho zrna - minimálne hodnoty pre 40; 20; 10 a 4mm zrno: 45kg; 6kg; 1kg; 0,5kg.	veľmi krátky - vizuálne posúdenia nevyžadujú reakčnú dobu	Posúdenie vyskytovaných hornín, vlastností a zatriedenie reaktivity	Zatriedenie do 3 kategórií a to buď: -bez výskytu reaktívnych minerálov a zároveň bez potreby ďalšieho testovania, -s výskytom reaktívnych minerálov a potreby ďalšieho testovania pre ďalšie použitie - bez jednoznačného zatriedenia, v prípade ak nie je možné bezpečne vylúčiť prítomnosť reaktívnych materiálov a potreby ďalšieho testovania pre ďalšie použitie	1. z krokov RILEM metód pre určenie reaktivity obsahuje chemické skúšky, mikroskopiú (vrátane elektrónového rastrovacieho mikroskopu), RTG analýzu, infračervenú spektroskopiú; pri 1.2 obsahuje atlas hornín s predpokladanou reaktivitou
Určenie nožnej AKR kameniva- Zrýchlený dilatometrický test	RILEM AAR-2	Na overenie potenciálu škodlivej reakcie alkalicko-kremičitého kameniva, test na maltových trámčekoch	Telieska po odformovaní zmerajú, následne sa umiestnia do vody na 24h pri teplote 80°C opäť sa zmerajú, následne sa umiestnia do alkalic. roztoku pri 80 °C	min. 3 telesá, 2 druhy teliesok a to: 25 × 25 x 285 mm 40 × 40 x 160 mm	16 dní	Zmena dĺžky telies - pomerné predĺženie	pri predĺžení 285 × 25 × 25 mm od 0,1% a 160 × 40 × 40 mm od 0,08% do 0,2% - potencionálne reaktívne - nutnosť ďalších skúšok/prípadne posúdené ako reaktívne (napr. Austrália a Kanada); pri predĺžení nad 0,2% - reaktívne	Doplnková k RILEM AAR-3, podobná ako ASTM C 1260 / AASHTO T 303, pomerne krátka , nevhodná pri Rohovcoch
Určenie nožnej AKR – Testovacia metóda pre kombinácie jednotlivých druhov kameniva s použitím dilatometrického merania	RILEM AAR-4	Na overenie AKR pri konkrétnej kombinácii rôznych druhov kamenív, test na maltových trámčekoch	Dilatometrické meranie trámčekov, ktoré sa umiestnia do vlhkého prostredia na 20 týždňov pri teplote 60°C	min. 3 telesá, 75 x 75 x 250 mm	celkom 141 dní / 20 týždňov 1. meranie po 24h od odformovania, následne po 5,10,15 a 20-tich týždňoch	Zmena dĺžky telies - pomerné predĺženie	Podľa prostredia kde bude daná zmes zabudovaná, referenčne nad 0,03% po 15 týždňoch (odporúča sa vykonať rezy na vyhodnotenie vzoriek v mieste trhlín pre overenie prítomnosti gélu).	Metóda na overenie konkrétnej receptúry, možnosť overiť aj samostatne reaktívne kamenivo spolu s prímесami resp. doplnením nereaktívneho kameniva.

Stanovenie úrovne potenciálne uviňiteľných alkálií kamenivom v betóne	RILEM AAR-8	Na overenie a posúdenie že kamenivo neuvolňuje alkálie ktoré môžu následne reagovať z AKR kamenivom	Chemická reaktivita vysušeného kameniva pri ponorení s 0,7 M roztoku NaOH resp. KOH a prebytkom hydroxidu vápenatého, pričom sa priebežne určuje draslik alebo sodík	objem vzorky závisí na max. zme vzorky pre zmo 10mm 5kg; výsledok má byť priemerom 3 meraní	26 týždňov	% podiel uvoľnených zásad voči hmotnosti vzorky	ak po 6 týždňoch uvoľnili nízke -menej ako 0,1 % Na2 Oekv vysoké-viac ako 0,25 % Na2 Oekv	Skreslenie, vystavenie danej koncentrácií v betóne nenastane
Stanovenie kombinácií spojiv pre návrh nereaktívnych zmesí pomocou skúšobnej metódy betónových trámčekov – 38 °C	RILEM AAR-10	Overenie konkrétnej kombinácie reaktívneho kameniva spolu s určením presného pomeru cementu a prímiesí spolu s určením jednotlivých alternatív množstva alkálií pri ktorom sa AKR prejaví.	Telieska skladované nad vodou pri 38°C	3 telesá pre navrhovanú konkrétnu zmes, rozmer 100 x 100 x 450 mm	V závislosti od priebehu skúšky: 1.; 4; 8; 13 26 a 52. týždeň v prípade potreby a 78 a 104 týždeň	pomerne predĺženie teliesok a pomerný úbytok hmotnosti a objem alkálií uvoľnený do výluhu na základe použitej kombinácie reaktívneho materiálu a prímies	pomer alkálií a prímiesí pri ktorom dochádza k pesimu zmesi, maximálna hodnota pomerného predĺženia stanovená v národných predpisoch jednotlivých krajín napr. Francúzsko 0,03% po 12mesiacoch	Rozšírenie AAR 3 s cieľom identifikácie konkrétnych množstiev alkálií pri ktorých je posudzované kamenivo vyhovujúce a zároveň určenie alkalického nálože pri ktorej je aplikácia kameniva a prímiesí bezpečná.
Stanovenie kombinácií spojiv pre návrh nereaktívnych zmesí alebo odolnosti betónových zmesí proti alkalickeo-kremičitej reakcii pomocou betónových hranolov - 60°C	AAR 11	Overenie konkrétnej kombinácie reaktívneho kameniva spolu s nereaktívnym prípadne s určením presného pomeru cementu - plánovaná čiara zmitosti a prímiesí spolu s určením jednotlivých alternatív množstva alkálií pri ktorom sa AKR prejaví.	Telieska skladované pri 100% vlhkosti pri 60 °C	3 telesá pre navrhovanú konkrétnu zmes, rozmer 75 x 75 x 250 mm	V 4, 8, 12, 16 a 20 týždni, ak zmes overuje aplikáciu prímiesí tak aj 24, 28, 32, 36, 40, 44, 48 a 52 týždeň	určenie limitnej hodnoty prímiesí pre daný typ kameniva	pomer alkálií a prímiesí pri ktorom dochádza k pesimu zmesi, maximálna hodnota pomerného predĺženia 0,02% po 20 týždňoch a 0,03% po 48 týždňoch, môže sa líšiť podľa limitov jednotlivých krajín	Podobná Fr. Norme P18-454/2 a rozšírenie AAR 4 s cieľom: zistiť ako môže konkrétna prímies znížiť náchylnosť reaktívneho kameniva a v akom presnom množstve, je potrebné jej dávkovanie pri určitom podiele reaktívneho kameniva, prípadne či je možné znížiť reaktivitu v takom množstve že je použité určité reaktívne kamenivo
Stanovenie kombinácií spojiv pre návrh nereaktívnych zmesí alebo odolnosti betónových zmesí proti alkalickeo-kremičitej reakcii pomocou betónových hranolov – 60 °C skúšobná metóda s pridaním alkálií	AAR 12	Totožná s RILEM AAR 11 s pridaním alkálií z prostredia - určenie pomeru kameniva pri stálom prísune alkálií do zmesi (použitie pri CB vozovkách). Určenie kombinácie spojiv vrátane maximálneho podielu alkálií pre posudzované reaktívne kamenivo Určenie kombinácií spojiv pre určité vysoko reaktívne kamenivo (skúška skôr pre výrobcov prímiesí a cementu) Overenie konkrétnej zmesi (vrátane čiar zmitosti) pre určitú kombináciu spojiv a reaktívneho kameniva	Telieska skladované pri 100% vlhkosti pri 60 °C - s pridaním Hydroxidu sodného do zámesovej vody a vystaveniu chloridovému roztoku	3 telesá pre navrhovanú konkrétnu zmes, rozmer 75 x 75 x 250 mm	prvé meranie 28 dní po odliatí, následne sa aplikuje 10x postup: -5 dní v suchom prostredí pri 60°C -4 h pri 20 °C 65% vlhkosť -48 h pri 20 °C, telesá ponorené do chloridového roztoku -6 dní pri 60 °C, nad vodným roztokom s vysokou úrovňou vlhkosti -24 h pri 20 °C v uzavretých nádobách po každom opakovaní sa vykonáva priebežné meranie celkovo 10cyklov po 340 hodin	určenie limitnej hodnoty prímiesí pre daný typ kameniva	pomer prímiesí pri ktorom posudzované kamenivo spĺňa podmienku zabudovania do predmetnej konštrukcie (závislé na konkrétnom prostredí)	Nie je platná pre ľahké a recyklované kamenivo, podobná ako AAR 11 avšak overuje sa kombinácia kameniva a prímiesí s doplnením vplyvu prostredia, v Nemecku používané pri posúdení kameniva pre CB vozovky
aplikácia alkálií obaľovaním telies na posúdenie potenciálu pomerného predĺženia pôsobením AKR	AAR 13	nejedná sa o metódu ako takú, skôr o možnosť doplnenia metód AAR 10 a AAR 11 o dodatočný spôsob zamedzenia strate alkálií na povrchu vzorky a zároveň dodaním dodatočnej vlhkosti, čo navyšuje podiel alkálií až o 20 %. Obalový materiál obsahuje vodný alkalicý roztok.	podľa skúšky	-	-	-	-	používa sa v kombinácií s AAR 3 , AAR 4 AAR 10 a AAR 11,
Alkalickeo - uhličitánová reaktivita								
Zrýchlená predbežná skúška na AKR pri uhličitánových kamenivách	RILEM AAR-5	Na overenie AKR pri použití uhličitánových kamenív, test na maltových trámčekoch,pre uhličitánové kamenivo (dolomitické) sa aplikuje len pre frakciu do 4/8 (najvýraznejšia reakcia)	Dilatometrické, po odformovaní 24h vo vode pri 80°C, následne v alkalicom roztoku pri 80 °C	min. 3 telieska, 40 x 40 x 160 mm	29 dní 1. meranie po odformovaní, 2. po 24h, následne po 2,7,14,21 a 28dni	Zmena dĺžky telies - pomerné predĺženie	Rovnaké ako pri AAR 3 a 4; reaktívne ak nastalo predĺženie nad 0,1%	Predovšetkým na uhličitánové kamenivá - pomalšia reaktivita
Posúdenie alkalickej reaktivity uhličitánových hornín pre kamenivo do betónov	ASTM C 586	Určenie expanzie materiálu zamerané na uhľikové kamenivo	Ponorenie cylindrických (válcových) vzoriek v alkalicom roztoku pri 23 °C	Válcové teliesko 35mm dlhé priemeru 9mm	Až do 1 roka, tendencie rozširovania však môžu byť pozorované už po 28 dňoch	Zmena dĺžky telies - pomerné predĺženie	-	Náročné zabezpečenie reprezentatívnej vzorky. Dlhé skúšobné obdobie, slúži predovšetkým ako dopĺňujúca skúška k ostatným postupom
Pomerne predĺženie betónu v dôsledku reakcie alkalickeo-uhľikových hornín	ASTM C 1105	na stanovenie náchylnosti kombinácií cementu a kameniva na alkalickeo-uhľičitú expanzivnu reakciu	Dilatometrické meranie trámčekov umiestnených v teplote 23°C a vysokej relatívnej vlhkosti	6 trámčekov rozmerov 75 x 75 x 285	1 rok	Zmena dĺžky telies - pomerné predĺženie	kamenivo je označené za potencionálne reaktívne ak nastane predĺženie 0,03% po 1 roku (alternatívne vyhodnotenie je 0,025% po 6 mesiacoch a 0,015% po 3 mesiacoch)	Dlhé skúšobné obdobie, používaná na overenie potencionálnej reaktivity pre horniny u ktorých sa na základe petrografie predpokladá alkalickeo-uhľičitá reakcia
Posúdenie náchylnosti expanzie kameniva (Postup pre pomerne predĺženie pre AKR - Súhrnná reakcia v betónových trámčekoch)	ASTM C 1105	na stanovenie potencionálneho predĺženia hrubého aj jemného kameniva	Dilatometrické meranie trámčekov umiestnených nad vodou pri 38°C	3 trámčeky 75 x 75 x 285, pričom sa používa aj 4 kranol pre účel petrografick. Vyhodnotenia	1 rok	Zmena dĺžky telies - pomerné predĺženie	kamenivo je označené za potencionálne reaktívne ak nastane predĺženie 0,04% po 1 roku	Dlhé skúšobné obdobie, používa sa v spojení s petrografickým posúdením Podobné ako ASTM C 1293
Určenie zložiek prírodných minerálnych kamenív	ASTM C 294	na poskytnutie popisného posúdenia pre bežnejšie alebo reaktívne dôležitejšie prírodné minerály – dobrý východiskový bod na predpovedanie správania sa vo vzťahu k reaktivite	Vizuálne posúdenie	Rôzna, vzorkovanie by však malo byť reprezentatívne pre daný zdroj kameniva	veľmi krátky - vizuálne posúdenia nevyžadujú reakčnú dobu	Súhrnný popis druhu a jednotlivých podielov obsiahnutých minerálov	-	Tieto opisy sa používajú na charakteristiku prirodzene sa vyskytujúcich minerálov, ktoré tvoria bežné zdroje kameniva
Petrografické posúdenie kameniva	ASTM C 295	Identifikácia vhodnosti kameniva pomocou petrografického posúdenia	Vizuálne a mikroskopické posúdenie pripravených vzoriek – sitová analýza, mikroskopia, test úlomkov, test chemickým činidlom (kyselinou chlorovodíkovou), môže byť doplnené o RTG skúšku	Rôzne, podľa znalosti zdroja kameniva (lom): pri jadrách (odvrtoch) od 53 do 100mm v priemere, 45kg alebo 300 kusov, alebo 2 kg	veľmi krátky - vizuálne posúdenia nevyžadujú reakčnú dobu	Vlastnosti častíc, ako je tvar, veľkosť, textúra, farba, minerálne zloženie, fyzický stav	-	Zvyčajne mikroskopia, môže byť použitá aj RTG analýza / difrakčná analýza / infračervená spektroskopia (viď C 294 pre názvoslovie)
Použitie uranylacetátu	ASTM C 856 Annex	Identifikácia / overenie AKR v zatvrdnutom betóne	Sfarbenie čerstvo odkratého betónu (v mieste výrezu) a kontrola pod UV svetlom	Možné aplikovať na jadrách / obrúsenom povrchu / úlomkoch	veľmi krátky - okamžité vyhodnotenie	Intenzita fluorescencie	Nedostatok fluorescencie	Identifikuje malé množstvá AKR gélu, či spôsobuje expanziu alebo nie, Opál, prírodné kamenivo a taktiež nasýtený gél môže svietiť / Fluorescencia - možné skreslenie interpretácie výsledku. Skúška musí byť doplnená o petrografické vyšetrovanie a fyzikálne skúšky na určenie rozťažnosti betónu.