

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

**POUŽITIE KRYŠŤALICKÝCH PRÍSAD DO BETÓNOV
A ICH VPLYV NA VLASTNOSTI BETÓNU**

ROZBOROVÁ ÚLOHA

2022

OBSAH

1	Všeobecné údaje	3
2	Cieľ rozborovej úlohy (RÚ)	3
2.1	Distribúcia RÚ	3
2.2	Súvisiace a citované právne predpis	4
2.3	Súvisiace a citované normy	4
2.4	Súvisiace a citované Technické predpisy rezortu	4
2.5	Použitá literatúra	4
2.6	Použité skratky	6
3	Úvod	8
3.1	Rešerš skúseností s danou problematikou	8
3.2	Prieskum dostupných kryštalických prísad	10
3.3	Sumarizácia poznatkov	13
4	Metodika, materiál a receptúry	14
4.1	Metodika riešenia úlohy	14
4.2	Materiál	16
4.3	Receptúra mált a betónov	17
5	Výsledky a diskusia	18
5.1	Skúšky na maltách	18
5.2	Skúšky na betónoch	26
6	Záver	32
6.1	Prieskum problematiky	32
6.2	Experimentálna časť	32
6.3	Podklady pre úpravu národnej prílohy STN EN 206/NA	33
6.4	Návrh na úpravu zmien v TPR	33
6.5	Záverečné vyhodnotenie	34

1 Všeobecné údaje

Na základe objednávky Slovenskej správy ciest (SSC) č. O-124/2200/2022 vypracoval Technický a skúšobný ústav stavebný, n.o. (TSÚS) rozborovú úlohu (RÚ) s názvom - Použitie kryštalických prísad do betónov a ich vplyv na vlastnosti betónu.

Objednávateľ:	Slovenská správa ciest Miletičova 19, P.O. BOX 19, 826 19 Bratislava
Zhotoviteľ:	Technický a skúšobný ústav stavebný, n.o. Studená 3, 821 04 Bratislava
Doba riešenia:	jún – november 2022
Riešitelia:	Ing. Ivan Janotka, DrSc. Ing. Michal Bačuvčík, PhD. Ing. Michal Cápay Ing. Lukáš Húlek Ing. Patrik Ševčík

2 Cieľ rozborovej úlohy (RÚ)

Cieľom rozborovej úlohy (RÚ) bolo porovnanie vlastností rôznych druhov betónov s použitím a bez použitia rôznych kryštalických prísad.

Zadanie RÚ pozostávalo z nasledovných parciálnych úloh:

- 1) Rešerš domácich a zahraničných skúseností s danou problematikou.
- 2) Prieskum dostupných kryštalických prísad.
- 3) Vytvorenie metodiky riešenia úlohy: dávkovanie prísad, druh betónu, špecifikácia skúšaných vlastností, vek betónu, a i.
- 4) Vyhodnotenie a porovnanie výsledkov účinku na vybrané vlastnosti betónu.
- 5) Vytvorenie podkladu pre úpravu národnej prílohy STN EN 206/NA.
- 6) Závery, ktoré obsahujú odporúčania použitia kryštalických prísad do betónu.
- 7) Návrh na úpravu konkrétnych zmien v TPR.

Postup riešenia RÚ vychádzal z objednávky SSC a môže sa rozdeliť do 4 etáp. Prvá etapa RÚ zahŕňala rešerš domácich a zahraničných skúseností s danou problematikou a oboznamovanie sa s dostupnými kryštalickými prísadami. Ďalej zohľadňuje tvorbu metodiky RÚ (výber dávok prísad, druhu betónu, skúšaných vlastností a veku betónu).

Druhá etapa RÚ bola zameraná na preukázanie mechanizmu vybraných kryštalických prísad a ich účinku na vytvorenú pórovú štruktúru a fázové zloženie cementového kameňa, začiatok tuhnutia, objemovú stálosť a pevnosti cementu. Na tieto účely boli porovnávané vlastnosti cementových mált s 3 prísadami, pri dvoch dávkach a bez prísad (spolu 7 systémov).

V tretej etape RÚ boli realizované a vyhodnocované skúšky betónov z pohľadu účinku kryštalických prísad na ich podstatné vlastnosti v čerstvom a zatvrdnutom stave. Hlavným zámerom bolo preukázanie výrobcami prezentovaného účinku zahusťovania pórového systému, ktorý sa má prejavovať na zlepšení funkčných vlastností betónu, hlavne zvýšením jeho vodotesnosti, znížením nasiakavosti a utesňovaním trhlín s hrúbkou do 0,4 mm. Porovnávali sa vlastnosti betónov s tromi prísadami, pri dvoch dávkach a bez prísad (spolu 7 systémov).

Štvrtá etapa RÚ pozostávala z vyhodnotenia skúšok a porovnania podstatných vlastností betónov s použitím a bez použitia rôznych kryštalických prísad. Výsledkom sú odporúčania pre použitie kryštalických prísad do betónu, podklady pre úpravu národnej prílohy STN EN 206/NA a návrh na úpravu konkrétnych zmien v TPR.

2.1 Distribúcia RÚ

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

2.2 Súvisiace a citované právne predpis

- [Z1] Zákon NR SR č. 133/2013 Z. z. o stavebných výrobkoch a o zmene a doplnení niektorých zákonov v znení neskorších predpisov;
- [Z2] Vyhláška MDVRR SR č. 162/2013 Z. z., ktorou sa ustanovuje zoznam skupín stavebných výrobkov a systémy posudzovania parametrov v znení neskorších predpisov;
- [Z3] 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 73 1316	Stanovenie vlhkosti, nasiakavosti a vzliňavosti betónu
STN 73 1322	Stanovenie mrazuvzdornosti betónu
STN 73 1326	Stanovenie odolnosti povrchu cementového betónu proti pôsobeniu vody a chemických rozmrazovacích látok
STN EN 12350-2	Skúšanie čerstvého betónu. Časť 2: Skúška sadnutím
STN EN 12350-6	Skúšanie čerstvého betónu. Časť 6: Objemová hmotnosť
STN EN 12350-7	Skúšanie čerstvého betónu. Časť 7: Obsah vzduchu. Tlakové metódy
STN EN 12390-3	Skúšanie zatvrdnutého betónu. Časť 3: Pevnosť v tlaku skúšobných telies
STN EN 12390-5	Skúšanie zatvrdnutého betónu. Časť 5: Pevnosť v ťahu pri ohybe skúšobných telies
STN EN 12390-8	Skúšanie zatvrdnutého betónu. Časť 8: Hĺbka presiaknutia tlakovou vodou
STN EN 14068	Výrobky a systémy na ochranu a opravu betónových konštrukcií. Skúšobné metódy. Určenie vodotesnosti injektovaných ustálených trhlín v betóne
STN EN 196-1	Metódy skúšania cementu. Časť 1: Stanovenie pevnosti
STN EN 196-3	Metódy skúšania cementu. Časť 3: Stanovenie času tuhnutia a objemovej stálosti
STN EN 206/NA	Betón. Špecifikácia, vlastnosti, výroba a zhoda
STN EN 206+A2	Betón. Špecifikácia, vlastnosti, výroba a zhoda
STN EN 480-1	Prísady do betónu, mált a zalielok. Skúšobné metódy. Časť 1: Porovnávanie betónov a porovnávané malty pri skúškach
STN EN 480-2	Prísady do betónu, mált a zalielok. Skúšobné metódy. Časť 2: Stanovenie času tuhnutia
STN EN 413-2	Cement do mált na murovanie a omietky. Časť 2: Skúšobné metódy
STN EN 934-1	Prísady do betónu, mált a zalielok. Časť 1: Spoločné požiadavky
STN EN 934-2+A1	Prísady do betónu, mált a zalielok. Časť 2: Prísady do betónu. Definície, požiadavky, zhoda, označovanie a etiketovanie (Konsolidovaný text)
EAD 260026-00-0301	Waterproofing admixture for concrete (Hydroizolačná prísada do betónu).

Poznámka: Súvisiace a citované normy v platnom znení vrátane dodatkov a národných príloh.

2.4 Súvisiace a citované Technické predpisy rezortu

[T1]	TP 026	Sekundárna ochrana betónových konštrukcií;
[T2]	TP 063	Odvodnenie mostov na pozemných komunikáciách;
[T3]	TP 090	Ochrana tunelov proti vode a odvodnenie tunelov;
[T4]	TKP 15	Betónové konštrukcie všeobecne;
[T5]	TKP 18	Betón na konštrukcie.

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

2.5 Použitá literatúra

- [L1] Ke Liang Wang, Ting Zheng Hu, Shang Jie Xu: Influence of Permeated Crystalline Waterproof Materials on Impermeability of Concrete (*Vplyv preniknutých kryštalických hydroizolačných materiálov na nepriepustnosť betónu*), Advances Materials Research, Vol. 446-449, 2012, pp. 954-960. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.446-449.954>;
- [L2] Lei Jinshan, Ruan Bo, Sun Liming, Xu Mingen: Experimental research on waterproof mechanism of capillary crystalline waterproof material (*Experimentálny výskum mechanizmu vodotesnosti kapilárnych kryštalických hydroizolačných materiálov*). Innovation & sustainability of modern railway. Proceedings the 1st International Symposium on Innovation and Sustainability of Modern Railway, Nanchang, China, October 16 – 17, 2008, pp. 264-269.;

- [L3] He Xiong-fei, Huang Wei, Tang, Gang, Zhang, Hao: Mechanism investigation of cement-based permeable crystalline waterproof material based on spectral analysis (*Skúmanie mechanizmu priepustného kryštalického hydroizolačného materiálu na báze cementu na základe spektrálnej analýzy*). Spectroscopy and Spectral Analysis, Vol. 41, 2021, No.12, pp. 3909-3914. DOI:10.3964/j.issn.1000-0593(2021)12-3909-06.;
- [L4] Guangyan Li, Xiaofeng Huang, Jiesheng Lin, Xiang Jiang, Xinya Zhang: Activated chemicals of cementitious capillary crystalline waterproofing materials and their self-healing behaviour (*Aktivované chemikálie cementových kapilárnych kryštalických hydroizolačných materiálov a ich samoošetrovacie správanie*). Construction and Building Materials, Vol. 200, 2019, pp. 35-45. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.093>.;
- [L5] Gojevic, A., Ducman, V., Netinger Grubeša I., Baricevic, A., Banjad Pečur, I.: The effect of crystalline waterproofing admixtures on the self-healing and permeability of concrete (*Vplyv kryštalických hydroizolačných prísad na samoošetrovanie a priepustnosť betónu*). Materials, Vol. 14, 2021, Article Number 1860. <https://doi.org/10.3390/ma14081860>.;
- [L6] Mircea, C., Toader, T.-P., Hegyi, A., Ionescu, B.-A., Mircea, A.: Early age sealing capacity of structural mortar with integral crystalline waterproofing admixture (*Počiatková schopnosť utesňovania zabudovanej malty s integrálnou kryštalickou hydroizolačnou prísadou*). Materials, Vol. 14, 2021, Article Number: 4951. <https://doi.org/10.3390/ma14174951>.;
- [L7] Pazderka, J., Hájková, E.: Crystalline admixtures and their effect on selected properties of concrete (*Kryštalické prísady a ich vplyv na vybrané vlastnosti betónu*). Acta Polytechnica, Vol. 56, 2016, No. 4. pp. 306-311. DOI: <http://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/ap>.;
- [L8] Lim, Seungmin, Kawashima, Shiho: Mechanisms underlying crystalline waterproofing through microstructural and phase characterization (*Mechanizmy, ktoré sú základom kryštalickej hydroizolácie prostredníctvom mikroštruktúrálnej a fázovej charakterizácie*). Journal of Materials In Civil Engineering, Vol. 31, 2019, No. 9, Article Number: 04019175. DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002752.;
- [L9] Xiao, Xin, Zhang, Zhang, Qisen, Liang, Xiaoye, Zhang, Xiaoning: Research on chloride ion diffusion of concrete water-based capillary crystalline waterproofer and its penetration depth by using electron microscope (*Výskum difúzie chloridových iónov betónového kapilárneho kryštalického hydroizolačného materiálu a jeho hĺbky prieniku pomocou elektrónového mikroskopu*). Advanced Pavement Research, Book Series: Advanced Materials Research, Vol. 857, 2014, pp. 27-32. DOI: 0.4028/www.scientific.net/AMR.857.27.;
- [L10] Bohuš, Š., Drochytka R.: Cement based material with crystal-growth ability under long term aggressive medium impact (*Materiál na báze cementu so schopnosťou kryštalizácie počas dlhodobého účinku agresívneho média*). Applied Mechanics and Materials, Vol. 166-169, 2012, pp. 1773-1778. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/Amm.166-169.1773>.;
- [L11] Thakdanaj, K., Nantawat, K., Suvimol, S.: The effect of crystalline waterproofing materials on accelerated corrosion of steel reinforcement in concrete (*Vplyv kryštalických hydroizolačných materiálov na urýchlenú koróziu oceleovej výstuže v betóne*). International Journal of Civil Engineering, Vol. 19, 2021, pp. 699-716. <https://doi.org/10.1007/s40999-020-00593-6>.;
- [L12] Azarsa, P., Gupta, R., Biparva, A.: Durability and self-sealing examination of concretes modified with crystalline waterproofing admixtures (*Skúška odolnosti a samotesňovania betónov modifikovaných kryštalickými hydroizolačnými prísadami*). Materials, Vol. 14, 2021, No. 21, Article number: 6508, DOI: 10.3390/ma14216508.;
- [L13] Wu, M., Johannesson, B., Geiker, M.: A review: Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material (*Prehľad: Samoošetrovanie v cementových materiáloch a cementový kompozit vyvinutý ako samoliečiaci materiál*). Construction and Building Materials, Vol. 28, 2012 pp. 571–583. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.086>.;
- [L14] van Tittelboom, K., de Belie, N.: Self-healing in cementitious materials – a review (*Samoošetrovanie v cementových materiáloch – prehľad*). Materials, Vol. 4, 2013, No. 6, pp. 2182–2217. <https://doi.org/10.3390/ma6062182>.;
- [L15] Cuenca, E., Tejedor, A., Ferrara, L.: A methodology to assess crack-sealing effectiveness of crystalline admixtures under repeated cracking-healing cycles (*Metodika na hodnotenie účinnosti kryštalických prísad utesňovať trhliny pri opakovaných cykloch vzniku trhlín a hojenia*). Construction and Building Materials, Vol. 179, 2018, pp. 619-632. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.261>.;

- [L16]Xiaoyan Hu, Jia Xiao, Zedi Zhang, Conghao Wang, Congyun Long, Liang Dai: Effects of CCCW on properties of cement-based materials: A review (*Účinky CCCW na vlastnosti materiálov na báze cementu: Prehľad*). Journal of Building Engineering, Vol. 50, 2022, Article Number 1004184 <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104184>;
- [L17]Technický list Centrament Proof CL1 Prísada do betónu s kryštalickým tesniacim a plastifikačným účinkom. MC-Bauchemie, s.r.o., Diaľničná cesta 18, 903 01 Senec. Vydanie 06/20.;
- [L18]Produktový list SikaControl®-210 WT Liquid Kryštalizačná a tesniaca prísada do betónu v tekutej forme. Sika Slovensko, spol. s r.o., Rybníčná 38/e, 831 06 Bratislava. Marec 2021, Verzia 01.02.;
- [L19]Materiálový list IDROCRETE KR 1000 Krystalizační přísada na výrobu vodonepropustných betonů. 7804-12-2016 (CZ), MAPEI, spol s r.o., Smetanova 192, Olomouc, Česká republika,;
- [L20]Technický list XYPEX ADMIX C-1000 / C-1000 NF Cementová kryštalická izolácia betónu. HYDROSTOP, s.r.o., Karpatská 15, 058 01 Poprad. REV 03/2015;
- [L21]Technický list XYPEX ADMIX C-1000 NF. HYDROSTOP, s.r.o., Karpatská 15, 058 01 Poprad. DAT-ADM-SK1. REV-09-20;
- [L22]Vyhlásenie o parametroch XYPEX ADMIX C-1000 NF. XYPEX CE, s.r.o., Thákurova 7, 160 00 Praha, Česká republika. 3.9.2020
- [L23]Produktový list VANDEX AM 10 Kryštalická vodonepriepustná prísada do betónu testovaná podľa CE EN934-2:T9. STAVAN spol. s r. o., Slavkovská 18, 040 01 Košice
- [L24]List s technickými údajmi VANDEX AM 10 Kryštalická vodonepriepustná prísada do betónu testovaná podľa CE EN934-2:T9. VANDEX, Odborárska 52, 831 02 Bratislava

2.6 Použité skratky

A	kryštalická prísada A
ASTM	americká štandardná testovacia metóda
B	kryštalická prísada B
C	kryštalická prísada C
Ca	vápnik
Ca(OH) ₂	hydroxid vápenatý
Ca ²⁺	vápenatý kation
CaCO ₃	uhličitan vápenatý
C-A-H	kalcium aluminát hydrát
CaO	oxid vápenatý
CO ₂	oxid uhličitý
CO ₃ ²⁻	uhličitanový anión
CP	celková otvorená pórovitosť v rozsahu merania 1,82 nm až 0,534 mm
C-S-H	kalcium silikát hydrát
ČOV	čistiareň odpadových vôd
DTA	diferenčná termická analýza
EAD	European assessment document (európsky hodnotiaci dokument)
EDTA	kyselina etyléndiamínotetraoctová
ETA	European technical assessment (európske technické posúdenie)
H ⁺	kation vodíka
H ₂ O	voda
HCO ₃ ⁻	hydrogénuhličitan
CHRL	chemické rozmrazovacie látky
K	koeficient priepustnosti pre porozimetriu

kT	koeficient priepustnosti (permeability) podľa skúšky s prístrojom TORRENT
M	malta
MMP	medián polomeru mikropórov v rozsahu merania 1,82 nm až 5 250 nm
MVP	medián polomeru všetkých pórov v rozsahu merania 1,82 nm až 0,534 mm
n	počet
Na ₂ O	oxid sodný
O	oxid
OH	hydroxidová skupina
PD	projektová dokumentácia
PK	pozemné komunikácie
R	hydrofóbná skupina v látke
REF	referenčná/referenčný
RÚ	rozborová úloha
S4	stupeň sadnutia kužeľa 4
SAV	Slovenská akadémia vied
SiO ₂	oxid kremičitý
SSC	Slovenská správa ciest
STV	skúška typu výrobku
ŠPP	špecifický povrch všetkých otvorených pórov v rozsahu merania 1,82 nm až 0,534 mm
TG	termogravimetria
TKP	technicko-kvalitatívne podmienky
TP	technické podmienky
TPR	technické predpisy rezortu
TPV	technický predpis výrobcu
TSÚS	Technický a skúšobný ústav stavebný
ÚSTARCH	Ústav stavebníctva a architektúry
VCP	celkový objem pórov v rozsahu merania 1,82 nm až 0,534 mm
VMP	celkový objem mikropórov v rozsahu merania 1,82 nm až 5 250 nm
XC	stupne vplyvu prostredia karbonatizácie
XF	stupne vplyvu prostredia pôsobenia mrazu a rozmrazovania

3 Úvod

Úvodná kapitola RÚ je venovaná rešerši domácich a zahraničných skúseností s danou problematikou a oboznámení sa s dostupnými kryštalickými prísadami.

Na úvod je dôležité poznamenať, že pojem kryštalická prísada nie je uvedený v norme STN EN 206+A2 a ani v národnej prílohe STN EN 206/NA. Tieto normy popisujú možnosti použitia prísad do betónu, ktorých vhodnosť bola preukázaná podľa STN EN 934-1 a STN EN 934-2+A1. Norma STN EN 206+A2 definuje prísadu do betónu nasledovne: zložka pridaná počas procesu miešania v malých množstvách v pomere ku hmotnosti cementu na úpravu vlastností čerstvého alebo zatvrdnutého betónu. Prísady do betónu sa pridávajú hlavne na dosiahnutie požadovanej konzistencie (plastifikátory alebo superplastifikátory) alebo obsahu vzduchu v čerstvom betóne (prevzdušňovacie prísady), príp. spomalenia alebo urýchlenia tuhnutia cementu. Na trhu sa objavujú aj iné prísady, ako sú napríklad kryštalické prísady, ktorých hlavnou úlohou je utesňovať zatvrdnutý betón.

Norma STN EN 934-2+A1 dokumentuje definície, požiadavky, zhodu, označovanie a etiketovanie pre prísady určené na použitie do betónu. Norma vo všeobecnosti definuje prísady ako materiál pridávaný počas miešania betónu, v množstve najviac 5 % hmotnosti cementu v betóne, aby sa požadovaným spôsobom upravili vlastnosti zmesi v čerstvom a/alebo v zatvrdnutom stave. V norme sú definované nasledovné označenia prísad:

- plastifikačná prísada;
- superplastifikátor;
- prísada zadržiavajúca vodu;
- prevzdušňovacia prísada;
- prísada urýchľujúca tuhnutie;
- superplastifikátor urýchľujúci tuhnutie;
- prísada spomaľujúca tuhnutie;
- plastifikačná prísada spomaľujúci tuhnutie;
- superplastifikátor spomaľujúci tuhnutie;
- prísada urýchľujúca tvrdnutie;
- prísada modifikujúca viskozitu;
- hydrofobizačná prísada.

Pre kryštalické prísady do betónu, ktorých hlavnou vlastnosťou má byť vo všeobecnosti utesňovanie betónu znížením celkovej pórovitosti cementovej matrice, nie sú v žiadnej norme uvedené požiadavky na preukazovanie ich podstatných a relevantných vlastností. Preto je problematika tejto rozborovej úlohy vysoko aktuálna a potrebná.

3.1 Rešerš skúseností s danou problematikou

Prezentovaná rešerš sa týka výskumných projektov, ktoré boli vykonané na účely preukazovania účinkov kryštalických prísad na vlastnosti betónu alebo malty a mechanizmu ich pôsobenia. Rešerš bola vypracovaná z odborných časopisov, ktoré sú dostupné na elektronickom portáli Web of Science.

Vplyv penetrovaných kryštalických vodonepriepustných prísad na priepustnosť a automatické hojenie (liečenie, samoopravu) betónu sa vo výskumnom projekte [L1] verifikoval skúškami na nepriepustnosť betónu. Jeho mikroštruktúra sa identifikovala predovšetkým elektrónovou riadkovacou mikroskopiou a ortuťovou porozimetriou s cieľom pozorovania druhu, tvaru a rastu kryštálov ako reakčných produktov vytvorených hydratovaným cementom s aktívnymi látkami kryštalických prísad. Výsledkami bolo preukázané, že za použitia kryštalických prísad sa zvyšovala nepriepustnosť betónu a zlepšovalo samoliečenie betónu, najmä z pohľadu uzatvárania trhlín. Tento efekt autori vysvetľujú reakčnou kryštalizáciou aktívnej zložky prísady s Ca^{2+} iónmi, dotovanými predovšetkým z $\text{Ca}(\text{OH})_2$, čím sa vyplňala a tak spevňovala kontaktná zóna na rozhraní kameniva a cementovej matrice betónu. Kryštalická prísada svojím reakčným účinkom okrem toho vyplňala pôvodne vytvorený pórový systém takým spôsobom, že pórová štruktúra sa vyznačovala väčším podielom nepriepustných mikropórov v porovnaní so zastúpením viac-priepustných makropórov. Takto zahustená pórová štruktúra zvýšila nepriepustnosť betónu [L1].

V experimentálnom výskume [L2] autori vysvetľujú penetráciu kryštalických prísad do malty a betónu otvorenou pórovitosťou, ktorú následne zahusťujú. Hĺbka jej prieniku sa zvyšuje s dobou exponovania. Na počiatku je rýchlosť prieniku nízka. V čase sa zvyšuje a po 28 dňoch môže hĺbka prieniku prísady v malte a betóne dosiahnuť až 30 mm. Kryštalická prísada reaguje s hydratačnými

produktmi cementu za vzniku tyčinkovitých kryštálov, ktoré objemovo vyplňujú pórovú štruktúru s takým konečným efektom, že malta a betón sa vyznačuje trvalou vodotesnosťou [L2].

Efekty samoliečenia (samoutesnenia) betónu, zahusťovania pórovej štruktúry a tým zvýšenia nepriepustnosti malty a betónu za použitia kryštalických prísad sa prejavujú aj zvýšením pevnosti a zlepšením iných technicky významných vlastností malty a betónu. V štúdií [L3] bolo uvedené, že nepriepustný kryštalický vodotesný materiál obsahoval oxid vápenatý, kremičitan sodný, disilikát sodný, uhličitan vápenatý, hydroxid vápenatý, redukčné činidlo na báze polyaromatických uhľovodíkov a etyléndiamintetraacetát. Skúšobné vzorky s kryštalickou prísadou sa vyznačovali vynikajúcou samoliečebnou spôsobilosťou prítomných defektov. Autori projektu [L3] prezentovali návrh mechanizmu samoliečenia nasledovne: kremičitan sodný a disilikát sodný reagovali pri hydratácii cementu na gél hydrátu kremičitanu vápenatého (C-S-H), pričom v systéme disponibilný Ca^{2+} prítomný v CaO , Ca(OH)_2 a CaCO_3 donoroval reakciu na C-S-H gél, ktorý sa usadzoval v priestore trhliny a tak ju zacelil.

Optimálne zastúpenie aktívnych látok v kryštalických prísadách je podľa [L4]: uhličitan sodný 1,0, kremičitan sodný 2,0 %, hlinitan sodný 1,0 %, tetrasodný EDTA 1,0 % a glycín 0,5 %. Najvýraznejší vplyv kryštalickej prísady na samoliečebnú schopnosť vykazuje kremičitan sodný. Samoliečebnú schopnosť betónu podporujú spotreba Ca(OH)_2 a vznikajúce produkty: C-S-H gél, uhličitan vápenatý a etringit ako výsledok chemickej reakcie hydratovaného cementu s aktívnou zložkou kryštalickej prísady. Takto vzniknuté produkty zvyšujú kompaktnosť vytvorenej cementovej matrice/mikroštruktúry. Kryštalická prísada vytvára s aktívnymi látkami biele kryštály, ktoré utesňujú vytvorené mikrotrhliny a zahusťujú pórovú štruktúru [L4].

Bol zistený priamy vplyv použitého vodného súčiniteľa na hydroizolačnú účinnosť kryštalickej prísady. Výsledky [L5] rozhodujúceho významu sú: pridanie kryštalickej prísady nemá významný vplyv na pevnosť betónu v tlaku, avšak znížil sa prienik vody dovnútra betónu. Tento priaznivý jav sa zvýraznil v betóne s nižším vodným súčiniteľom. Ukazuje sa, že minimálna doba tvrdnutia betónu 28 dní predpísaná v skúšobnej norme betónu na hĺbku presiaknutia tlakovou vodou STN EN 12390-8 môže byť príliš krátko na dosiahnutie rastu kryštálov ako dôsledku reakcie aktívnej látky v prísade s hydratujúcim cementom. Dlhšia doba exponovania betónu vytvára príležitosť na zefektívnenie zníženia priepustnosti betónu. Prítomnosť kryštalickej prísady zlepšilo samoliečenie betónu zacelením trhlín so šírkou do 0,15 mm. Zistilo sa, že trhliny v betóne s nižšou dávkou kryštalickej prísady neboli dôkladne zacelené, čo indikuje nerovnomerné rozloženie prísady v priestore betónu. Tento nedostatok možno eliminovať väčšou dávkou kryštalickej prísady. Za príčinu zlepšenia úžitkových vlastností betónu (zníženie prieniku vody do betónu a samoliečenie trhlín) s kryštalickou prísadou sa považuje kinetika reakcie aktívnej látky v prísade s hydratujúcim cementom tvorbou C-S-H gélu, uhličitanu vápenatého bohatého na horčík a reakcie kremičitanu sodného, ktorý konverguje na uhličitan, prípadne hydrouhličitan vápenatý [L6].

V prítomnosti vody reagujú kryštalické prísady v betóne a vytvárajú tenké kryštály, ktoré vyplňajú póry a mikrotrhliny. Po vysušení betónu ostávajú nečinné. Pri ich opakovanom styku s vodou sa znova reakčne aktivizujú do ďalšej kryštalizácie. Po cielenom vytvorení mikrotrhliny pri zaťažení skúšobnej vzorky betónu trojbodovým ohybom na 90 % maximálnej kapacity, ďalej vystavenému cyklovaniu v režime mokré a suché uloženie bola sledovaná schopnosť 1 až 3 % hmot. dávky kryštalickej prísady z cementu zaceliť mikrotrhliny [L7]. Skúšky boli vykonané po 1 dni, 4 dňoch, 8 dňoch, 14 dňoch a 20 dňoch striedavo mokrého a suchého uloženia. Výsledky preukázali, že najlepší samoliečebný účinok bol dosiahnutý v betóne s 3 % hmot. kryštalickej prísady. Detegovaný tesniaci efekt sa získava nasledovnou znázornenou reakčnou kinetikou [L7]:

- 1) po pridaní kryštalickej prísady do betónu sa stáva hlavným tesniacim produktom CaCO_3 ; tesniaca účinnosť sa vzťahuje na koncentráciu Ca^{2+} , CO_2 a k prítomnosti vody na vstupe do trhliny podľa chemickej reakcie (1) a (2)



- 2) ak sa v reagujúcom systéme nachádza popolček, ktorý generuje puzolánovou reakciou viac C-S-H gélu, samotiesniaci účinok sa zvyšuje chemickou reakciou (3)



Pre praktické využitie kryštalických prísad je možné vysloviť reálny predpoklad, že betón s touto prísadou disponuje zaručenou hydroizolačnou schopnosťou po 28 dňoch veku. Hydroizolačný efekt je možné dosiahnuť aj skôr v závislosti od kvality betónu (už 12 dní). Výsledkami bolo preukázané,

že kryštalické prísady znižujú priepustnosť vodných pár o 16 % a 20 %, mierne spomaľujú zrenie betónu v čase 28 dní, pričom tento jav sa neprejavuje znížením pevností v tlaku [L8]. Tieto tvrdenia platia pre dve verifikované prísady XYPEX a PENETRON. Vzhľadom na veľmi podobné látkové zloženie ďalších prísad tohto druhu (VANDEX, MAXSEAL, SIKKATON, MASTERSEAL, KRYSTOL) je možné očakávať podobné vlastnosti betónu aj s týmito kryštalickými prísadami [L8]. Ďalšie významné efekty, ktoré sprevádzajú použitie kryštalických prísad v betóne spočívajú v redukcii pórovej štruktúry, vo zvýšení chemickej a koróznej odolnosti a mrazuvzdornosti betónov. Vzorky betónu s kryštalickou prísadou charakterizovalo výrazné zníženie pórovitosti, ktorá sa rozhodujúcim spôsobom modifikovala tvorbou uhličitanu vápenatého v pôvodne vytvorenom pórovom systéme [L9]. Kryštalická prísada spôsobuje evidentné zvýšenie odolnosti betónu proti penetrácii chloridov [L10] a zlepšenie odolnosti proti síranovej agresivite [L11]. Kryštalickými prísadami v dávke 0,5 %, 0,8 %, 1,0 % a 2,0 % z hmotnosti cementu sa verifikoval ich vplyv v materiálovom zložení betónu na rýchlosť korózie zabudovanej ocelevej výstuže, pričom sa na tento cieľ použila urýchlená skúška. Výsledky preukázali nielen nárast pevností v tlaku betónu s kryštalickou prísadou, ale aj zlepšenie odolnosti ocelevej výstuže proti koróznemu ataku agresívneho roztoku chloridu sodného. Protikorózna ochrana ocele sa zvýšila so stúpajúcou dávkou kryštalickej prísady v betóne, pričom pri 2,0 % hmot. dávke bola najefektívnejšia [L12]. Betón s kryštalickými prísadami po 300 cykloch zmrazovania a rozmrazovania, dokonca aj neprevzdušnenom stave, dokumentoval index mrazuvzdornosti vyšší ako 80 %, zatiaľ čo referenčný betón charakterizoval index mrazuvzdornosti pod 60 %. Zistila sa aj zvýšená korózna odolnosť zabudovanej ocele a schopnosť samoliečenia betónu zhotoveného s kryštalickými prísadami [L13]. Samoliečenie betónu závisí rozhodujúcim spôsobom od reakčnej kinetiky vzniku $\text{Ca}(\text{OH})_2$, pri ktorom Ca^{2+} ióny reagujú s uhličitanovými iónmi vo vode alebo CO_2 na vzduchu pri vzniku CaCO_3 , ktorý sa vyzráža v otvorenom pórovom systéme betónu alebo vo vzniknutých trhlinách. Tento druh samoliečenia, ku ktorému dochádza pri uzatváraní pórového systému alebo trhlín s bežnými hydratujúcimi zložkami cementovej matrice je známy ako „autogénne liečenie“ (v anglickom origináli: „autogenous healing“). Ak sa do hydratujúceho cementového systému/matrice v betóne pridajú špecifické látky, teda prísady zacielené na zvýšenie tvorby tesniaceho, vyzrážaného CaCO_3 , tak proces samoliečenia sa stáva intenzívnejší a nazýva sa inžinierske liečenie (v anglickom origináli: „engineered healing“). Kryštalické prísady fungujú na zámernom pridaní špecifických prísad do hydratujúceho cementového systému s cieľom modifikovať autogénne liečenie na inžinierske, predovšetkým z pohľadu hojenia trhlín [L14 a L15].

Na základe uskutočneného výskumu možno ešte postulovať nasledujúce závery:

- Expozičné prostredie významne determinuje schopnosť samoliečenia betónu. Vzorky exponované na vzduchu sa vyznačujú nízkym samoliečebným účinkom. Vzorky betónu ponorené vo vode potvrdili vysoké samoliečebné utesnenie trhlín, dokonca aj pri opakovaných cykloch vyvolávania umelých trhlín s ich hojenia, najmä do jedného roka po prvom vyvolaní umelej trhliny.
- Úplné utesnenie trhlín sa pozoruje len pri vzorkách betónu trvalo alebo cyklicky ponorených vo vode pri veľkosti trhlín pod 0,30 mm. Utesnenie trhlín sa najvýznamnejšie prejavuje do šírky 0,15 mm v betóne trvale ponorenom vo vode, ale aj pri periodickom namáčaní do vody a exponovaní na vzduchu.

Vplyv orientácie prípadných vlákien v betóne je takmer nulový na samoliečebnú schopnosť betónu za použitia rozptýlenej ocelevej výstuže [L16].

3.2 Prieskum dostupných kryštalických prísad

Na základe prieskumu slovenského trhu a po konzultácií s odbornou praxou bolo identifikovaných 5 najdostupnejších kryštalických prísad. Tabuľka 1 dokumentuje zoznam, základnú identifikáciu a špecifiká prísad. Ďalej sa uvádzajú informácie, ktoré poskytujú výrobcovia prísad v technických a materiálových listoch [L17 – L24].

Tabuľka 1 – Zoznam kryštalických prísad

Označenie prísady	Základný popis prísady	Označenie druhu	Typ prísady	Dávkovanie (v % z hmotnosti cementu)
Centrament Proof CL1	kryštalická hydroizolačná prísada	prísada	tekutá	1,5 - 2,5
SikaControl®-210 WT	kombinovaná tesniaca a kryštalizačná prísada	prísada	tekutá	1,0 - 2,0
IDROCRETE KR 1000	kryštalizačná prísada k hydroizolácii betónu	prísada	prášková	1,0 - 3,0
Xypex Admix C-1000	prísada s obsahom aktívnej chemickej bázy	prísada	prášková	0,5 - 1,5
VANDEX AM 10	kryštalická prísada do betónu	prísada	prášková	1,0 - 2,0

Kryštalické prísady sú dostupné v tekutom alebo práškovom stave, ich dávkovanie sa líši a pohybuje v rozsahu od 0,5 % do 3,0 % z hmotnosti cementu/spojiva v betóne. Z toho vyplýva, že účinnosť a mechanizmus prísad je rozdielna. Najnižšie dávkovanie (0,5 % až 1,5 %) je odporúčané pre prísadu Xypex Admix C-1000 a najvyššie (1,0 % až 3,0 %) pre prísadu IDROCRETE KR 1000.

Aktívne zložky **prísady Centrament Proof CL1** [L17] využívajú hydratačné produkty cementu v betóne a premenia ich na trvácne nerozpustné kryštály. Kryštály vyplňajú póry a kapiláry, čím zabráňujú prenikaniu vody a korozívnych látok do matrice betónu. Zníženie počiatkovej pórovitosti cementového kameňa je docielené vďaka možnosti zredukovať potrebné množstvo zámesovej vody. Prípadné zvyškové póry a kapiláry sa následne uzavrujú v priebehu kryštalizačnej reakcie. Rastúce kryštály prísady Centrament Proof CL1 vyplnia a uzavrujú nielen póry a kapiláry, ktoré sa prirodzeným spôsobom vytvoria v cementovom kameni, ale sú aj schopné, preklenúť a uzavrieť jemné trhliny až do 0,4 mm. Oblasť použitia - chladiace veže tepelných a atómových elektrární, betónové nádrže ako cisterny, záchytné nádrže a plavecké bazény, podzemné stavby s požiadavkou na vodotesnosť, kanalizačné prvky ako rúry, kanály, šachty a konštrukcie, ktoré sú dimenzované na dlhú dobu životnosti.

Výrobca prísady Centrament Proof CL1 prezentuje nasledovné vlastnosti pri použití v betóne:

- zníženie hĺbky priesaku vody;
- všeobecnú ochranu proti tlakovej vode;
- minimalizovanie porozity;
- zlepšenie odolnosti proti mrazu a chemickým rozmrazovacím látkam;
- možné samoutesnenie trhlín až do 0,4 mm.

Technický list výrobku [L17] neobsahuje metódy preukázania uvedených špecifických vlastností prísady. Výrobca uvádza, že údaje v technickom liste sú uvedené na základe ich skúseností a najlepšieho vedomia a nie sú záväzné.

Prísada SikaControl®-210 WT je zmesou hydrofóbných látok a funkčných prísad. Reakciou týchto zložiek s hydratačnými produktami cementu dochádza v sústave pórov a kapilár prítomných v betóne ku vzniku nerozpustných kryštalizačných produktov a tým k trvalému utesneniu betónu proti prenikaniu vody a ďalších kvapalín a ku zníženiu jeho nasiakavosti. Špeciálne zloženie prísady zaisťuje schopnosť samoliečenia vzniknutých trhlín (samoregeneračná schopnosť) a zvyšuje schopnosť betónu preklenovať trhliny [L18].

Výrobca prísady SikaControl®-210 WT prezentuje nasledovné vlastnosti pri použití v betóne:

- zníženie prenikania tlakovej vody;
- zníženie nasiakavosti;
- zníženie priepustnosti vodnej pary;
- zvýšenie odolnosti proti chemickému namáhaniu;
- zvýšenie schopnosti betónu preklenovať trhliny;
- má schopnosť samoliečenia vzniknutých trhlín;
- podporuje samoregeneračné vlastnosti betónu.

Produktový list výrobku [L18] neobsahuje metódy preukázania uvedených špecifických vlastností prísady. Výrobca uvádza v zozname osvedčení a noriem, normu EN 934-2+A1, tab. 9, ktorá predpisuje osobitné technické požiadavky na hydrofobizačné prísady, ktoré sa preukazujú skúškami na kapilárnu nasiakavosť, pevnosť betónu v tlaku a obsahu vzduchu v čerstvom betóne. Výrobca oznamuje, že spracovávateľ produktu musí vopred vyskúšať vhodnosť produktu pre plánované použitie a účel.

Prísada IDROCRETE KR 1000 reaguje s hydroxidom vápenatým a ďalšími produktami, ktoré vznikajú v priebehu hydratácie cementu a vytvára zložky kremičitanu vápenatého a ďalších nerozpustných solí. Kryštalické zlúčeniny spoločne s hydratovaným kremičitanom vápenatým sa ukladajú vo voľných dutinách cementovej matrice a tým znižuje jeho celkovú pórovitosť a zvyšuje odolnosť betónu proti prieniku tlakovej vody [L19].

Výrobca prísady IDROCRETE KR 1000 prezentuje nasledovné vlastnosti pri použití v betóne:

- zvýšenie odolnosti proti hydrostatickému tlaku vody;
- zníženie kapilárnej absorpcie;
- všeobecné zníženie priepustnosti;
- obmedzenie pórovitosti;
- obmedzenie vzniku mikrotrhlín.

Materiálový list výrobku [L19] neobsahuje metódy preukázania uvedených špecifických vlastností prísady. Výrobca uvádza v časti technické vlastnosti (typické hodnoty) klasifikáciu podľa EN 934-2+A1, že sa jedná o tesniacu prísadu proti vode podľa tabuľky 9. V materiálovom liste je upozornenie výrobcu, že uvedené údaje a predpisy, aj keď odpovedajú ich najlepším skúsenostiam, možno považovať v každom prípade iba za typické a informatívne a musia byť podporené bezchybným spracovaním materiálu; preto je nutné pred samotným spracovaním posúdiť vhodnosť výrobku pre predpokladané použitie.

Pre dosiahnutie účinnej vodonepriepustnosti zatvrdnutého betónu využíva **prísada Xypex Admix C-1000** druhotnú hydratáciu, ktorá produkuje nerozpustnú, objemovo stálu kryštalickú štruktúru na molekulárnej úrovni a trvale zaceľuje transportné cesty pre kvapalné média. Tým vytvára z bežného betónu trvale účinný systém, nepriepustný pre tlakovú vodu, odolný naftu, olejom a ich derivátom i rade priemyselných chemikálií z akéhokoľvek pôvodu. Oblasť použitia - vodojemy, úpravné vody, bazény, záchytné nádrže, ČOV, kanalizácie, podzemné konštrukcie, základy, tunely, podzemné dráhy, kolektory, mosty, garáže, parkovacie domy, čerpacie stanice, silážne jamy a prefabrikované konštrukcie [L20 a L21]. Technický list [L20] má v názve výrobku uvedenú odvolávku na normu EN 934-2+A1. V technickom liste [L21] je v popise produktu uvedené, že sa jedná o kryštalickú hydroizolačnú prísadu podľa ETA 18/1129 (European technical assessment - Európske technické posúdenie) a prísadu do betónu a malty spomaľujúca tuhnutie (pri rovnakej konzistencii) podľa STN EN 934-2+A1.

Výrobca prísady Xypex Admix C-1000 prezentuje nasledovné vlastnosti pri použití v betóne:

- odolávanie extrémne vysokému hydrostatickému tlaku;
- zníženie koeficientu priepustnosti vody;
- zabránenie priesakom soľných roztokov betónom a ochrániť tak výstuž proti pôsobeniu chloridov;
- ochranu betónu pred chemikáliami, ktorých pH sa pohybuje v rozmedzí od 3,0 do 11,0 pri stálom kontakte a od 2,0 do 12,0 pri občasnom kontakte;
- ochranu betónu proti karbonatizácii;
- nepriepustnosť a trvalú odolnosť betónu pre transformátorový olej, ropu, naftu, benzín, silážne šťavy;
- odolnosť betónu proti síranom aj siričitanom;
- ochranu betónu proti radónu;
- zacelenie v betóne statických trhlín až do veľkosti 0,4 mm;
- zníženie vzniku zmrašťovacích a expanzných trhlín v betóne až do 30 % tým, že pri chemickej reakcii spotrebováva zostatkovú zámesovú vodu;
- vytváranie nerozpustných kryštalických formácií v betóne a následné zvýšenie pevnosti;
- preukázanie plastifikačného účinku v betóne;
- predĺženie začiatku tuhnutia čerstvého betónu;
- zvyšovanie požiarnej odolnosti betónu;
- ochranu výstuže pred negatívnymi vplyvmi bludných prúdov.

Technické listy [L20 a L21] bližšie nešpecifikujú metódy preukázania všetkých špecifických vlastností prísady. Vyhlásenie o parametroch výrobku [L22] obsahuje odvolávky na EAD 260026-00-0301 (European assessment document – európsky hodnotiaci dokument) a ETA 18/1129: 2019 a deklaruje podstatné a dodatočné vlastnosti prísady. Medzi podstatné vlastnosti prísady zaraďuje celkový obsah chlóru, chloridy rozpustné vo vode, obsah alkálií (Na_2O ekvivalent), korózne správanie, obsah vzduchu v čerstvom betóne, pevnosť v tlaku, zvýšenie vodonepriepustnosti betónu, mrazuvzdornosť a odolnosť povrchu betónu proti pôsobeniu vody a chemicky rozmrazovacích látok. Dodatočné vlastnosti prísady predstavuje koeficient filtrácie a kryštalická aktivita (autonómne utesnenie pasívnych trhlín do 0,4 mm).

Prísada VANDEX AM 10 je kryštalická vodonepriepustná prísada do betónu. Prísada je špecificky vytvorená pre spolupôsobenie s kapilárnou štruktúrou betónu a po aplikácii sa stáva trvalou časťou betónového telesa. Chemicky aktívne látky spolu s voľným vápnikom za prítomnosti vlhkosti, vytvárajú nepriepustnú kryštalickú štruktúru v kapilárach a póroch betónu, čím zabezpečujú nepriepustnosť betónu pre kvapalné látky. Kryštály v betóne takisto znižujú množstvo zmrašťovacích trhlín v betóne. Betónová konštrukcia však umožňuje prienik vodných pár. Oblasť použitia - nové

a existujúce budovy, zásobníky pitnej vody, podzemné a nadzemné parkoviská, základy stavieb, pivnice a podzemné priestory, ČOV, tunely, mosty a priemyselné stavby [L23 a L24].

Výrobca prísady VANDEX AM 10 prezentuje nasledovné vlastnosti pri použití v betóne:

- odolávanie tlakovej vode do 146 m vodného stĺpca;
- zabezpečenie všestrannej a trvalej vodotesnosti betónu;
- odolávanie vplyvom pôsobenia posypových solí, benzínu, ropy, silážnych štiav;
- odolávanie radónu do stredného radónového rizika pri dodržaní tesnosti spojov;
- prerastanie trhliny do šírky 0,4 mm;
- zvyšovanie pevnosti betónu;
- zlepšenie spracovateľnosti betónu.

Produktový a technický list [L23 a L24] uvádzajú, že kryštalická prísada je testovaná a certifikovaná podľa EN 934-2+A1. Technický list [L24] obsahuje ďalšie údaje z testovania nad rámec certifikácie pričom sa odvoláva na americké normy ASTM.

3.3 Sumarizácia poznatkov

Na základe vykonanej rešerše [L1-L22] možno predostrieť nasledovné sumarizačné poznatky:

- 1) Mechanizmus pôsobenia aktívnych látok obsiahnutých v kryštalických prísadách pri styku s materiálmi na báze cementu vysvetľuje: **a)** precipitačná reakcia a **b)** komplexo-precipitačná reakcia. Aktívne látky v prísade vytvárajú s hydratujúcim cementom kryštalické novotvary určené na vyplnenie trhlín a otvorených pórov. V praxi sa súbežne uplatňujú obidva vyššie spomenuté mechanizmy takým spôsobom, že nastáva jednak rýchly a jednak dlhodobý nárast hydroizolačných vlastností betónových konštrukcií po použití kryštalických prísad. Oba mechanizmy podporujú hydratáciu ešte nehydratovaných cementových častíc, čím urýchľujú a stimulujú samoliečebnú schopnosť betónu v čase. Ďalší možný mechanizmus pôsobenia aktívnych látok na zlepšenie hydroizolačných vlastností betónu predstavuje: **c)** polykondenzačná polymerizácia.
- 2) Kinetiku aktívnych látok v kryštalických prísadách vystihujú reakcie:

a) Precipitačná reakcia [L16]

Precipitačná reakcia je založená na interakcii chemicky aktívnych látok, najmä s Ca^{2+} iónmi, ktoré sú pre túto reakciu dostupné počas hydratácie cementu, v pórovom systéme betónu za vzniku nerozpustných kryštalických produktov, predovšetkým CaCO_3 , ale v minoritnejšom množstve aj C-S-H gélu a marginálne etringitu. Vznik kľúčového produktu precipitačnej reakcie CaCO_3 znázorňuje rovnica (4):



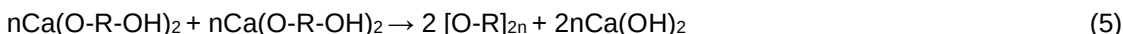
Vápenec a prídavné reakčné produkty vyplňajú otvorené mikro- a makropóry a deponujú sa v trhlínach, ktoré zahatávajú samoliečebným procesom. Aktívne látky môžu súčasne preniknúť do povrchu oceľovej výstuže a tak vytvoriť stabilnú mikro-membránu na povrchu ocele, ktorá zlepšuje jej odolnosť proti korózii. Aktívne látky v betóne exponovanom v suchom prostredí sa vyzrážajú (precipitujú) v tuhom skupenstve, aby udržali tzv. „kludový stav“. Pri styku s vodou (menej intenzívne s vlhkosťou) sa kryštalické prísady opäť zaktivizujú. Precipitačná reakcia opäť pokračuje.

b) Komplexo-precipitačná reakcia [L16]

Aktívne látky v kryštalických prísadách reagujú s Ca^{2+} iónmi, dostupnými z Ca(OH)_2 a C-S-H ako bežnými reakčnými produktmi hydratácie cementu za vzniku vo vode rozpustného a nestabilného komplexu, ktorý naďalej difunduje do pórového systému. Anión prítomný v komplexotvornom činidle sa v čase nahradzuje silikátovými a aluminátovými aniónmi. Výsledkom tejto modifikovanej precipitačnej reakcie komplexotvorným činidlom je dominantne nerozpustný kremičitan vápenatý, ale aj hlinitý; oba sú stabilné a nerozpustné vo vode. Tieto produkty vyplňujú prítomné trhliny a zabezpečujú ich samoliečebný proces, ako aj utesňujú otvorený pórový systém.

c) Polykondenzačná reakcia [L16]

Tento druh reakčného mechanizmu úzko súvisí s aktívnymi látkami v kryštalickej prísade s molekulárnou štruktúrou Ca(O-R-OH)_2 . Pozostáva z hydrofilnej (OH) aj hydrofóbnej skupiny (R), avšak prevláda hydrofilný trend. V prítomnosti vody aktívne látky prenikajú do mikroštruktúry betónu. Ich účinnosť sa pomaly zvyšuje s hydratáciou cementu až do momentu kondenzačnej polymerizačnej reakcie za vzniku kryštálov typu $[\text{O-R}]_{2n}$ - rovnica (5):



Zvyšovanie reakčného čísla n determinuje molekulová hmotnosť kryštálu $[O-R]_{2n}$ a zvyšuje jeho hydrofóbnosť, ktorá je väčšia ako pôvodná hydrofilnosť. Polymerizačnú reakciu sprevádza tvorba nerozpustných kryštalických látok v otvorenom pórovom systéme betónu, ktorú vystihuje rovnica (6):



Pri znížení pH prostredia, reakcia (6) smeruje väčšiemu zastúpeniu polymérnej zložky $[O-R]_{2n}$.

- 3) Kryštalické prísady, v závislosti od dávkovania, môžu výrazne zlepšiť spracovateľnosť čerstvých zmesí, mechanické vlastnosti a trvanlivosť cementových kompozitov - betónu. Ich účinok súvisí aj so zložením cementových kompozitov (obsah cementu, vodný súčiniteľ, prímеси a iné prísady). Kryštalické prísady dokumentujú najlepší priaznivý účinok na vlastnosti cementových kompozitov pri trvalom exponovaní vo vode. Ich odporúčaná dávka sa pohybuje v rozmedzí 0,5 % - 3 % z hmotnosti cementu. Kryštalické prísady sú vhodné a najviac účinné pri samoliečebnom procese trhlin so šírkou pod 0,4 mm, pričom utesňujú aj otvorený pórový systém. Priaznivý účinok na makroskopickú úroveň sa prejavuje znížením koeficienta priepustnosti (ako dôsledku zahustenia pórovej štruktúry) a znížením absorpcie vody vo vodnom uložení či priepustnosti vodných pár pri exponovaní cementových kompozitov na vzduchu. Na mikroskopickú úroveň sa na vyhodnocovanie účinku kryštalických prísad používajú inštrumentálne metódy ako skenovacia elektrónová mikroskopia, röntgenová difrakčná analýza, ortuťová porozimetria a iné mikroskopické detekčné metódy na analýzu morfológie a zloženia liečebných produktov potrebných na zahojenie šírky trhlín či zahustenie pórovej štruktúry.

4 Metodika, materiál a receptúry

4.1 Metodika riešenia úlohy

Vykonaný experiment RÚ pozostával z dvoch parciálnych častí. Prvá časť bola zameraná na preukázanie mechanizmu vybraných kryštalických prísad a ich účinku na vytvorenú pórovú štruktúru a fázové zloženie cementového kameňa, začiatok a koniec tuhnutia, objemovú stálosť a pevnosti cementu. Boli porovnávané vlastnosti cementových mált s 3 prísadami, pri dvoch dávkach (minimálna a maximálna odporúčaná) oproti referenčnej malte bez použitia prísad (spolu 7 systémov). Rozsah skúšok, ktoré boli vykonané na maltách sú uvedené v tabuľke 2.

Tabuľka 2 – Skúšky na maltách

Skúšaný materiál	Skúška	Postup
Cementová malta s prísadami a bez nich	Pevnosť v ťahu pri ohybe a v tlaku po 28 dňoch	STN EN 196-1
	Začiatok tuhnutia cementu s prísadou	STN EN 196-3 STN EN 480-2
	Objemová stálosť cementu s prísadou	STN EN 196-3
Cementový kameň z mált	Termická analýza na preukázanie mechanizmu účinku prísad	Metodika TSÚS
	Ortuťová porozimetria - štúdium pórovej štruktúry	Metodika TSÚS

Identifikácia pórovej štruktúry a termická analýza boli vykonané na maltách po skúške pevnosti v ťahu pri ohybe a v tlaku (obrázok 1). Na účely termickej analýzy (obrázok 1 vpravo) boli vzorky malty drvené, vysušené pri 60 °C do ustálenej hmotnosti a mleté na jemnosť zrn pod 0,063 mm. Takto pripravené analytické vzorky boli analyzované termickým rozkladom v rozsahu teplôt od 20 °C do 1 100 °C s gradientom nárastu teploty 10 °C/min a záznamom úbytku hmotností (termogravimetria – TG) a zmenou tepla (diferenčná termická analýza – DTA). Vyhodnotením TG-DTA záznamov bolo porovnávané vytvorené fázové zloženie mált s prísadami a bez prísad, so zameraním sa hlavne na obsah reakčných produktov hydratácie cementu. Stanovenie pórovej štruktúry bolo uskutočnené na kompaktných úlomkoch študovaných vzoriek pomocou ortuťovej porozimetrie.



Obrázok 1 – Pevnosť mált v ťahu pri ohybe a v tlaku a termická analýza

Druhá časť predstavuje skúšky betónov z pohľadu účinku kryštalických prísad na ich podstatné vlastnosti v čerstvom a zatvrdnutom stave. Hlavným zámerom bolo preukázanie výrobcami prezentovaného účinku zahusťovania pórového systému, ktorý sa má prejavovať na zlepšení funkčných vlastností betónu, hlavne zvýšením jeho vodotesnosti, znížením nasiakavosti a autonómnym utesnením pasívnych trhlín s hrúbkou do 0,4 mm. Boli porovnávané vlastnosti betónov s 3 prísadami, pri dvoch dávkach (minimálna a maximálna) a bez prísad (spolu 7 systémov). Zoznam vykonaných skúšok je dokumentovaný v tabuľke 3. Skúšky boli vykonané vo veku betónu 28 dní od výroby. Skúšobné telesá boli uložené vo vode.

Tabuľka 3 – Skúšky na betónoch

Skúšaný materiál	Skúška	Postup
Betón s prísadami a bez nich	Konzistencia čerstvého betónu	STN EN 12350-2
	Obsah vzduchu v čerstvom betóne	STN EN 12350-7
	Objemová hmotnosť čerstvého betónu	STN EN 12350-6
	Pevnosť v tlaku a objemová hmotnosť zatvrdnutého betónu	STN EN 12390-3
	Pevnosť v ťahu pri ohybe	STN EN 12390-5
	Maximálna nasiakavosť	STN 73 1316
	Hĺbka presiaknutia tlakovou vodou – maximálny priesak	STN EN 12390-8
	Mrazuvzdornosť – 50 cyklov	STN 73 1322
	Odolnosť betónu proti pôsobeniu vody a chemickým rozmrazovacím látkam – 50 cyklov	STN 73 1326
	Permeabilita betónu – prístrojom TORRENT	Metodika TSÚS
	Maximálna vodotesnosť – dlhodobá	Modifikovaný STN EN 14068 a STN EN 12390-8
	Schopnosť utesnenia vzniknutej trhliny v betóne	Modifikovaný STN EN 14068

Stanovenie permeability zatvrdnutého betónu bolo vykonané prístrojom TORRENT (obrázok 2), ktorý vyhodnocuje koeficient priepustnosti kT . Skúšobná dvojkomorová hubica bola prisatá na povrchu betónu a meral sa rozdiel tlakov. Výrobca prístroja zatrieduje kvalitu povrchu betónu z pohľadu jeho priepustnosti (permeability) do 5 stupňov, podľa tabuľky 4.

Tabuľka 4 – Triedy kvality povrchu betónu z pohľadu jeho priepustnosti

Kvalitatívna trieda povrchu betónu	Stupeň kvality (Index)	Koeficient permeability kT ($\times 10^{-16} \cdot m^2$)
Veľmi zlý betón	5	> 10
Zlý betón	4	1,0 až 10
Normálny	3	0,1 až 1,0
Dobrý betón	2	0,01 až 0,10
Veľmi dobrý betón	1	< 0,01



Obrázok 2 – Stanovenie permeability zatvrdnutého betónu prístrojom TORRENT

Dlhodobá skúška maximálnej vodotesnosti betónu principiálne postupovala podľa STN EN 14068 s modifikáciou skúšobných telies. Skúšobné telesá boli kocky s hranou 200 mm, ktoré neobsahovali cielene vyvolanú trhlinu. Po 7 dňoch uloženia vzoriek vo vode bola vykonaná skúška hĺbky presiaknutia tlakovou vodou podľa STN EN 12390-8 (obrázok 3) s predĺžením pôsobenia tlaku na 28 dní. Režim zvyšovania tlaku bol nasledovný:

- 7 dní – 25 % cieľového tlaku;
- 7 dní – 50 % cieľového tlaku;
- 7 dní – 75 % cieľového tlaku;
- 7 dní – 100 % cieľového tlaku.

Cieľový tlak predstavuje hodnotu 500 kPa. Po 28 dňoch pôsobenia tlakovej vody bolo vykonané stanovenie hĺbky presiaknutia tlakovou vodou podľa STN EN 12390-8.

Skúška na preukázanie schopnosti utesnenia vzniknutej trhliny v betóne bola vykonaná podľa STN EN 14068 s modifikáciou na použitie kryštalických prísad. Betóny boli vyrobené vo forme kocky s hranou 200 mm. Po 7 dňoch uloženia vzoriek vo vode bola v kockách kontrolované vytvorená trhlina s veľkosťou 0,2 mm až 0,4 mm (obrázok 3). Vzorky so stabilizovanými trhlínami boli následne nasadené na stolicu, ktorá je určená na skúšku hĺbky presiaknutia tlakovou vodou podľa STN EN 12390-8. Bolo naplánované postupné zvyšovanie intenzity pôsobenia tlakovej vody v čase nasledovne:

- 7 dní (príp. predĺženie podľa aktivity prísady) – bez tlaku – voľne presakovala voda;
- 7 dní – 25 % cieľového tlaku (príp. predĺženie alebo zníženie tlaku podľa aktivity prísady);
- 7 dní – 50 % cieľového tlaku (príp. predĺženie alebo zníženie tlaku podľa aktivity prísady);
- 7 dní – 75 % cieľového tlaku (príp. predĺženie alebo zníženie tlaku podľa aktivity prísady);
- 7 dní – 100 % cieľového tlaku (príp. predĺženie alebo zníženie tlaku podľa aktivity prísady).

Hodnota cieľového tlaku bola zvolená podľa STN EN 12390-8 na hodnotu 500 kPa. Počas skúšky bola sledovaná intenzita presakovania vody cez trhlinu, resp. miera utesnenia trhliny v čase. Na túto skúšku bola vybraná najaktívnejšia kryštalická prísada a referenčný betón bez prísady.



Obrázok 3 – Skúška hĺbky presiaknutia tlakovou vodou a tvorba trhliny do 0,4 mm

4.2 Materiál

Z dostupných kryštalických prísad, ktoré sú uvedené v kapitole 2.2, boli pre experimentálnu časť RÚ vybrané 3 prísady, ktoré sa v ďalšom slede experimentu označujú skratkami – prísada A, B a C, nakoľko uskutočnená štúdia nie je zameraná na porovnanie funkčných vlastností konkrétnych

výrobkov, ale na všeobecné zhodnotenie ich vplyvu na vybrané vlastnosti mált a betónov. Prísada A bola tekutá a príslady B a C boli v práškovom stave.

Na výrobu mált bol použitý portlandský cement CEM I 42,5 R, normalizovaný piesok CEN podľa STN EN 196-1, voda a kryštalické príslady A až C.

Betóny boli vyrobené s portlandským cementom CEM I 42,5 R, prírodným riečnym kamenivom špecifikovaným ako prírodný ťažený materiál - naplaveniny/sedimenty rieky Dunaj s frakciami 0/4 mm a 8/16 mm, vodou a kryštalickými prísladami A až C, bez použitia iných modifikujúcich prísad.

4.3 Receptúra mált a betónov

Receptúra mált vychádza z požiadaviek normy STN EN 480-1, ktorá predpisuje použitie referenčnej porovnávacej malty podľa STN EN 196-1. Receptúru a označenie mált dokumentuje tabuľka 5. M-REF malta neobsahovala príslady a ostatné malty obsahovali minimálnu a maximálnu odporúčanú dávku prísad A až C. Vodný súčiniteľ bol zvýšený z 0,50 na 0,55 z dôvodu prípravy mált s nižšími fyzikálno-mechanickými vlastnosťami, čím vznikol väčší priestor na prejavenie sa pozitívneho účinku kryštalických prísad. Vyššia dávka vody umožňuje tvorbu reakčných produktov hydratácie cementu vo väčšom priestore, predovšetkým kryštalicky vyvinutého $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a C-S-H/C-A-H gélu s väčším podielom viazanej vody v porovnaní s viac stiesnenými priestorovými podmienkami, ktoré nastávajú pri nižšom vodnom súčiniteli. V tomto prípade bol v hydratovanej matici cementu objavený kryštalicky úspornejšie vyvinutý $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a gély s menším množstvom viazanej vody, čo rezultuje v jemnejšej pórovej štruktúre s redukovaným zastúpením priepustných makropórov, hutnejšej cementovej matrici s vyššou pevnosťou a nižšou tendenciou vzniku trhlín, schopných zaceľovania samoliečením do hrúbky 0,4 mm.

Tabuľka 5 – Receptúry mált

Označenie malty	Množstvo zložky (g)			
	Cement CEM I 42,5 R	Kryštalická príslada	Normalizovaný piesok CEN	Voda
M-REF	450	bez	1350	247,5
M-A-min	450	min. dávka A	1350	247,5
M-A-max	450	max. dávka A	1350	247,5
M-B-min	450	min. dávka B	1350	247,5
M-B-max	450	max. dávka B	1350	247,5
M-C-min	450	min. dávka C	1350	247,5
M-C-max	450	max. dávka C	1350	247,5

Receptúra betónov bola zvolená v súlade s požiadavkami na referenčný porovnávaci betón podľa STN EN 480-1 s prihliadnutím na ciele RÚ. Podľa STN EN 480-1, tabuľka 2 bol zvolený referenčný betón II, ktorý obsahuje 300 kg/m^3 cementu a dosahuje konzistenciu sadnutím $120 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$. Voľbou nižšieho obsahu cementu a vyššej dávky vody na dosiahnutie požadovanej konzistencie bol vyrobený referenčný betón s nižšími fyzikálno-mechanickými vlastnosťami, čím vznikol väčší priestor na prejavenie sa pozitívneho účinku kryštalických prísad. Receptúru a označenie betónov prezentuje tabuľka 6. Referenčný betón (REF) bol zhotovený bez prísad, ostatné betóny obsahovali minimálnu a maximálnu odporúčanú dávku prísad A až C.

Tabuľka 6 – Receptúry betónov

Označenie betónu	Množstvo zložky (kg/m^3)				
	Cement CEM I 42,5 R	Kryštalická príslada	Voda	Kamenivo	
				0/4 mm	8/16 mm
REF	300	bez	185	1018	833
A-min	300	min. dávka A	185	1018	833
A-max	300	max. dávka A	185	1018	833
B-min	300	min. dávka B	185	1018	833
B-max	300	max. dávka B	185	1018	833
C-min	300	min. dávka C	185	1018	833
C-max	300	max. dávka C	185	1018	833

5 Výsledky a diskusia

Výsledky sú rozdelené do dvoch častí. Prvá časť predstavuje skúšky na maltách s prísadami a bez prísad. Účelom bolo študovanie mechanizmu a účinku kryštalických prísad na vytvorenú pórovú štruktúru a fázové zloženie cementového kameňa, začiatok a koniec tuhnutia, objemovú stálosť a pevnosti cementu.

Druhá časť výsledkov obsahuje skúšky na betónoch za účelom preukázania výrobcami prezentovaných účinkov kryštalických prísad na parametre betónov.

5.1 Skúšky na maltách

5.1.1 Fyzikálno-mechanické skúšky

Na základe prieskumu v kapitole 2 bolo zistené, že niektoré kryštalické prísady ovplyvňujú čas tuhnutia betónov. Tuhnutie betónu závisí primárne od začiatku a konca tuhnutia použitého cementu (cementovej pasty/malty), ktoré sa stanovuje na cementovej malte podľa STN EN 480-2. Postup podľa STN EN 196-3 sa aplikuje na stanovenie tuhnutia cementu. Na preukázanie účinku prísad na tuhnutie boli použité oba postupy.

Tabuľka 7 dokumentuje výsledky stanovenia obsahu vody na dosiahnutie normalizovanej hustoty, objemovej stálosti a začiatku a konca tuhnutia cementov s prísadami a bez nich podľa STN EN 196-3. Obsah vody predstavuje percentuálne zastúpenie vody potrebnej na dosiahnutie normalizovanej hustoty cementovej kaše bez prísad (M-REF) a s prísadami A, B a C. Objemová stálosť bola skúšaná na Le Chatelierových objímkach a jej hodnota nesmie byť vyššia ako 10 mm. Začiatok a koniec tuhnutia bol vykonaný pomocou Vicatovho prístroja.

Tabuľka 7 – Výsledky skúšok normalizovanej hustoty, objemovej stálosti a času tuhnutia stanovené podľa STN EN 196-3

Označenie	Obsah vody (%)	Začiatok tuhnutia (min)	Koniec tuhnutia (min)	Objemová stálosť (mm)
M-REF	32,5	2:32	3:43	1
M-A-min	31,5	4:01	5:21	1
M-A-max	28,0	1:29	4:44	1
M-B-min	32,5	3:32	4:32	1
M-B-max	33,5	1:36	5:31	1
M-C-min	32,0	3:37	4:12	1
M-C-max	34,0	4:45	6:12	1

Použitie kryštalických prísad sa v porovnaní s cementovou pastou bez prísady (M-REF) neprejavilo na objemovej stálosti cementu. Všetky hodnoty boli na úrovni 1 mm. Väčšina prísad predĺžila začiatok aj koniec tuhnutia cementu. Maximálna dávka prísady A a B skrátila začiatok tuhnutia približne o hodinu. Obsah vody bol na približne rovnakej úrovni. Najvýraznejší pokles obsahu vody bol evidovaný pri maximálnej dávke prísady A. Použitím prísad, nezávisle od ich dávky, bola predĺžená doba tuhnutia mált.

Tabuľka 8 prezentuje stanovenie konzistencie na Hägermannovom rozlievacom stolíku podľa STN EN 413-2 a začiatku a konca tuhnutia mált podľa STN EN 480-2 pri zachovaní rovnakého vodného súčiniteľa. Konštantný vodný súčiniteľ mált bol zvolený na základe požiadavky na referenčné malty pre tesniace prísady podľa kapitoly 7.1 normy STN EN 480-1.

Tabuľka 8 – Výsledky skúšok a času tuhnutia stanovené podľa STN EN 480-2

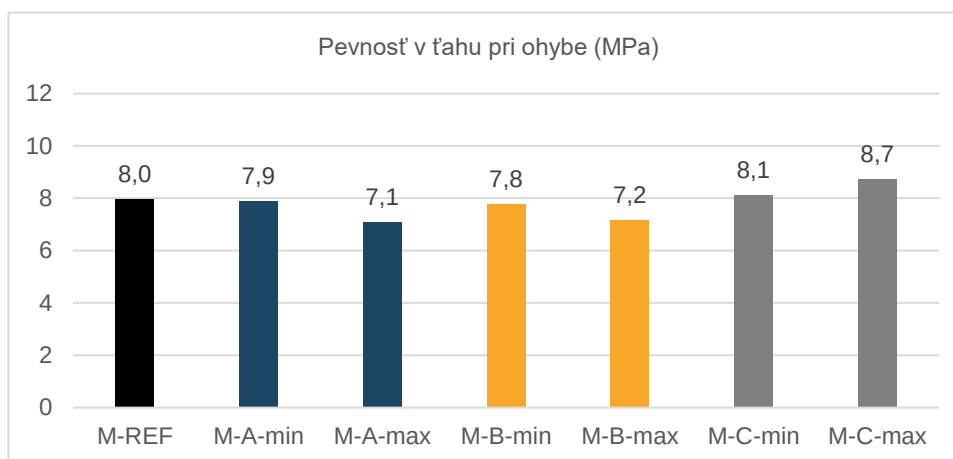
Označenie malty	Konzistencia rozliatím (mm)	Začiatok tuhnutia (min)	Koniec tuhnutia (min)	Čas medzi začiatkom a koncom tuhnutia (min)
M-REF	155	4:30	5:15	0:45
M-A-min	162	5:44	7:39	0:35
M-A-max	166	7:31	9:31	1:55
M-B-min	168	6:01	6:36	0:40
M-B-max	166	5:53	7:48	1:20
M-C-min	183	5:37	6:17	1:55
M-C-max	202	6:44	8:04	2:00

Všetky kryštalické prísady pri minimálnej aj maximálnej dávke zvýšili mieru rozliatia a predĺžili začiatok a koniec tuhnutia mált oproti malte bez prísad. Pri maximálnej dávke všetkých prísad a minimálnej dávke prísady C bol predĺžený čas medzi začiatkom a koncom tuhnutia mált v porovnaní s M-REF.

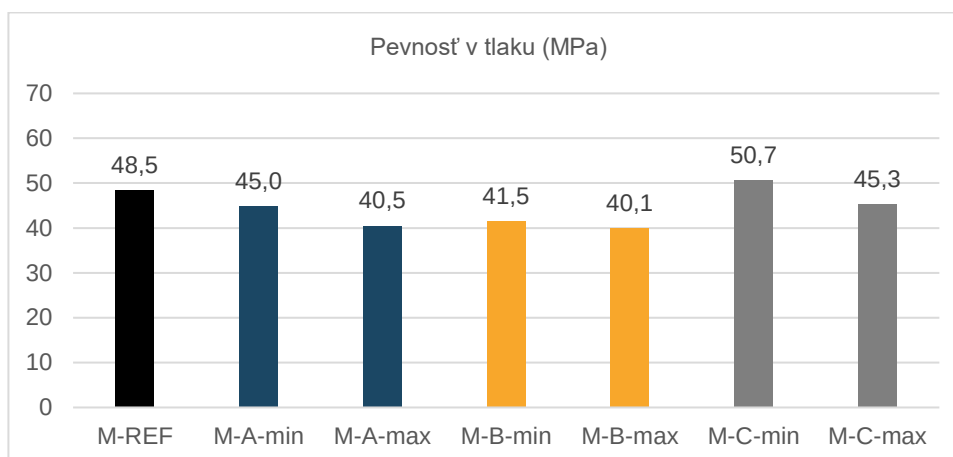
Štúdium účinku kryštalických prísad na pórovú štruktúru a fázové zloženie cementových kompozitov bolo vykonané na cementových maltách z dôvodu materiálovo menej heterogénneho zloženia mált ako betónov. Z mált bolo možné pripraviť reprezentatívnejšiu a viac homogénnu analytickú vzorku ako v prípade betónov. Na tieto účely boli vyrobené vzorky mált vo forme trámcov, na ktorých bola stanovená ich pevnosť. Výsledky skúšok objemovej hmotnosti a pevností mált sú uvedené v tabuľke 9. Receptúry mált sú uvedené v tabuľke 5. Obrázky 4 a 5 porovnávajú pevnosti mált v ťahu pri ohybe a v tlaku.

Tabuľka 9 – Výsledky skúšok fyzikálno-mechanických vlastností mált

Označenie malty	Objemová hmotnosť (kg/m ³)	Pevnosť v ťahu pri ohybe (MPa)	Pevnosť v tlaku (MPa)
M-REF	2 270	8,0	48,5
M-A-min	2 260	7,9	45,0
M-A-max	2 290	7,1	40,5
M-B-min	2 220	7,8	41,5
M-B-max	2 230	7,2	40,1
M-C-min	2 230	8,1	50,7
M-C-max	2 260	8,7	45,3



Obrázok 4 – Porovnanie pevnosti mált v ťahu pri ohybe



Obrázok 5 – Porovnanie pevnosti mált v tlaku

Pevnosti mált v ťahu pri ohybe a v tlaku s minimálnou a maximálnou dávkou prísad A, B a C okrem M-C-min boli oproti malte bez prísad (M-REF) nižšie. Pri maximálnej dávke bolo zníženie výraznejšie ako pri minimálnej dávke. Pre maltu s minimálnou dávkou prísady C boli preukázané vyššie

pevnosti oproti pevnostiam, ktoré boli stanovené pre maltu M-REF. Pri maximálnej dávke M-C-max bolo evidované zvýšenie pevnosti v ťahu pri ohybe a zníženie pevnosti v tlaku.

Parciálne vyhodnotenie výsledkov fyzikálno-mechanických skúšok mált:

- Kryštalické prísady plastifikovali, predĺžili začiatok a koniec tuhnutia a predĺžili čas medzi začiatkom a koncom tuhnutia mált. Tieto zistenia sa môžu aproximovať aj na betón, keďže boli použité relevantné metódy preukazovania vlastností prísad do betónov.
- Kryštalické prísady A a B znížili pevnosti mált v ťahu pri ohybe a v tlaku pri porovnaní s maltou bez prísad pri rovnakom vodnom súčiniteli.
- Kryštalická prísada C zvýšila pevnosti mált v ťahu pri ohybe a v tlaku pri porovnaní s maltou bez prísad pri rovnakom vodnom súčiniteli. Zistené účinky prísad na pevnosti boli overované aj na betónoch.

5.1.2 Pórová štruktúra a fázové zloženie mált

Po skúške pevností mált bola študovaná ich vytvorená pórová štruktúra a fázové zloženie. Výrobcovia kryštalických prísad podľa prieskumu prezentujú mechanizmus účinku kryštalických prísad utesňovaním otvoreného pórového systému a teda znižovaním pórovitosti, hlavne v oblasti kapilárnych pórov.

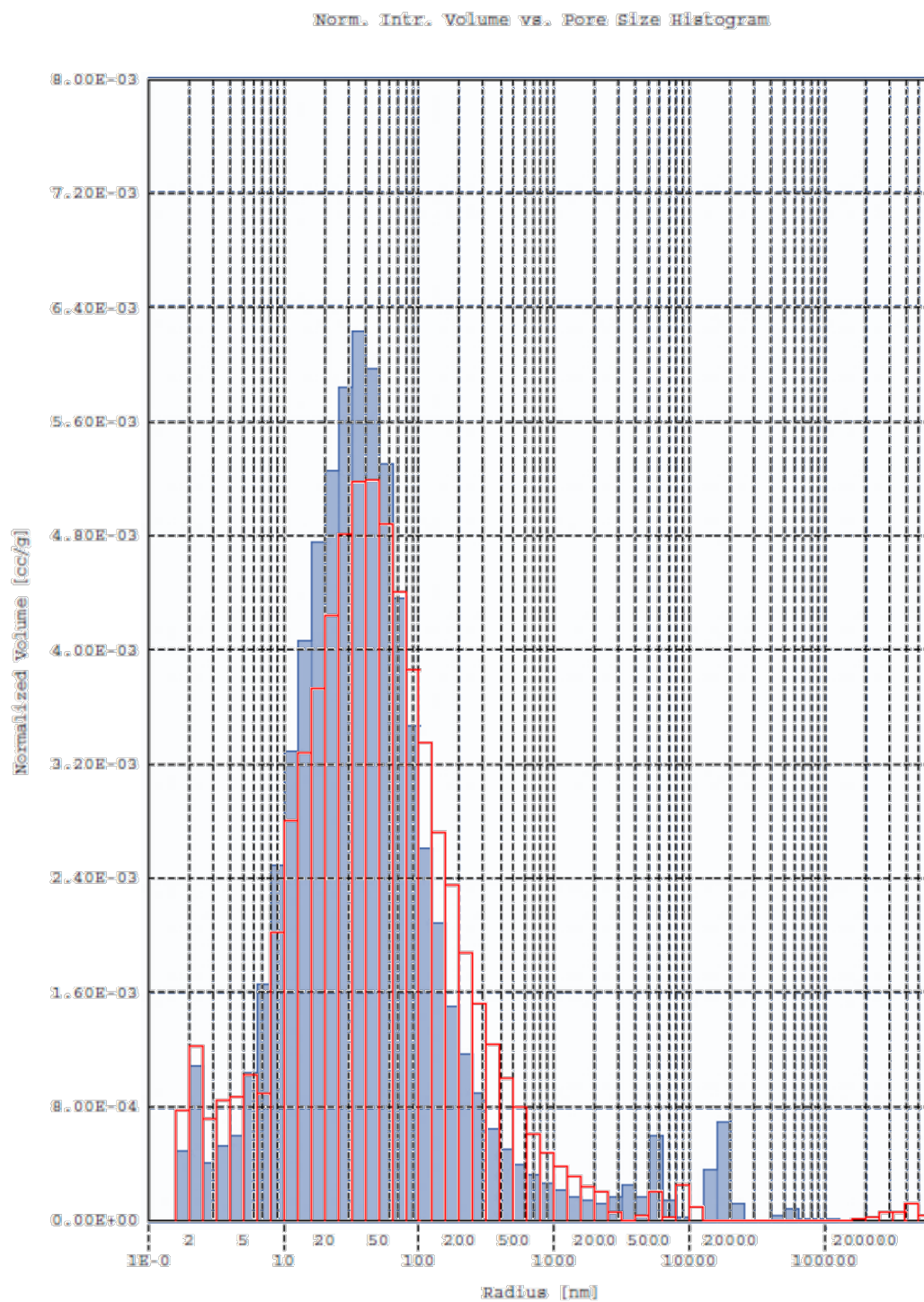
Tabuľka 10 dokumentuje základné charakteristiky pórovej štruktúry mált v dobe 28 dní od ich zhotovenia. V tabuľke sú uvedené nasledovné parametre v skratkách:

- V_{CP} – celkový objem pórov v rozsahu merania 1,82 nm až 0,534 mm;
- V_{MP} – celkový objem mikropórov v rozsahu merania 1,82 nm až 5 250 nm;
- $\dot{SPP}$ – špecifický povrch všetkých otvorených pórov v rozsahu merania 1,82 nm až 0,534 mm;
- M_{VP} – medián polomeru všetkých pórov v rozsahu merania 1,82 nm až 0,534 mm;
- M_{MP} – medián polomeru mikropórov v rozsahu merania 1,82 nm až 5 250 nm;
- CP – celková otvorená pórovitosť v rozsahu merania 1,82 nm až 0,534 mm;
- K – koeficient priepustnosti (vypočítaný z výsledkov merania podľa Metodiky ÚSTARCH SAV).

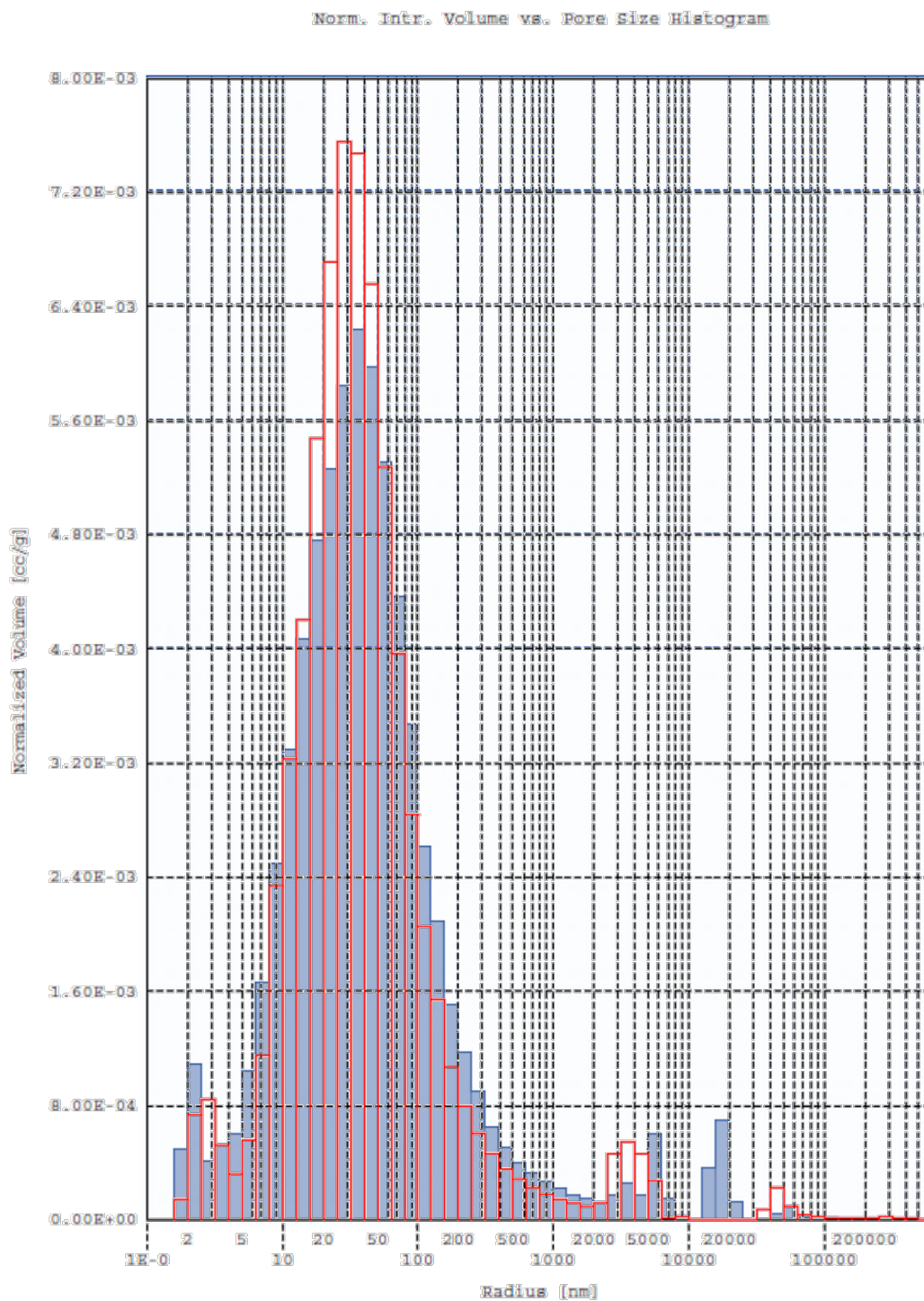
Tabuľka 10 – Základné parametre pórovej štruktúry referenčnej malty a mált zhotovených s minimálnou a maximálnou dávkou kryštalickej prísady

Označenie malty	V_{CP} (cm ³ /g)	V_{MP} (cm ³ /g)	Podiel makro-pórov (%)	$\dot{SPP}$ (m ² /g)	M_{VP} (nm)	M_{MP} (nm)	CP (%)	K ($\times 10^{-11}$ m/s)
M-REF	0,0709	0,0688	2,65	7,4891	36,90	34,42	15,3	6,87
M-A-min	0,0659	0,0634	3,79	7,6097	38,96	36,24	14,3	5,36
M-A-max	0,0687	0,0686	0,14	7,5193	44,86	44,81	14,7	6,14
M-B-min	0,0659	0,0644	2,27	7,5969	35,38	33,46	15,5	5,64
M-B-max	0,0703	0,0684	2,70	6,9748	33,77	31,74	15,7	7,97
M-C-min	0,0642	0,0630	1,87	10,3695	27,58	26,12	14,1	2,70
M-C-max	0,0672	0,0649	3,42	10,2051	29,18	27,58	14,5	3,14

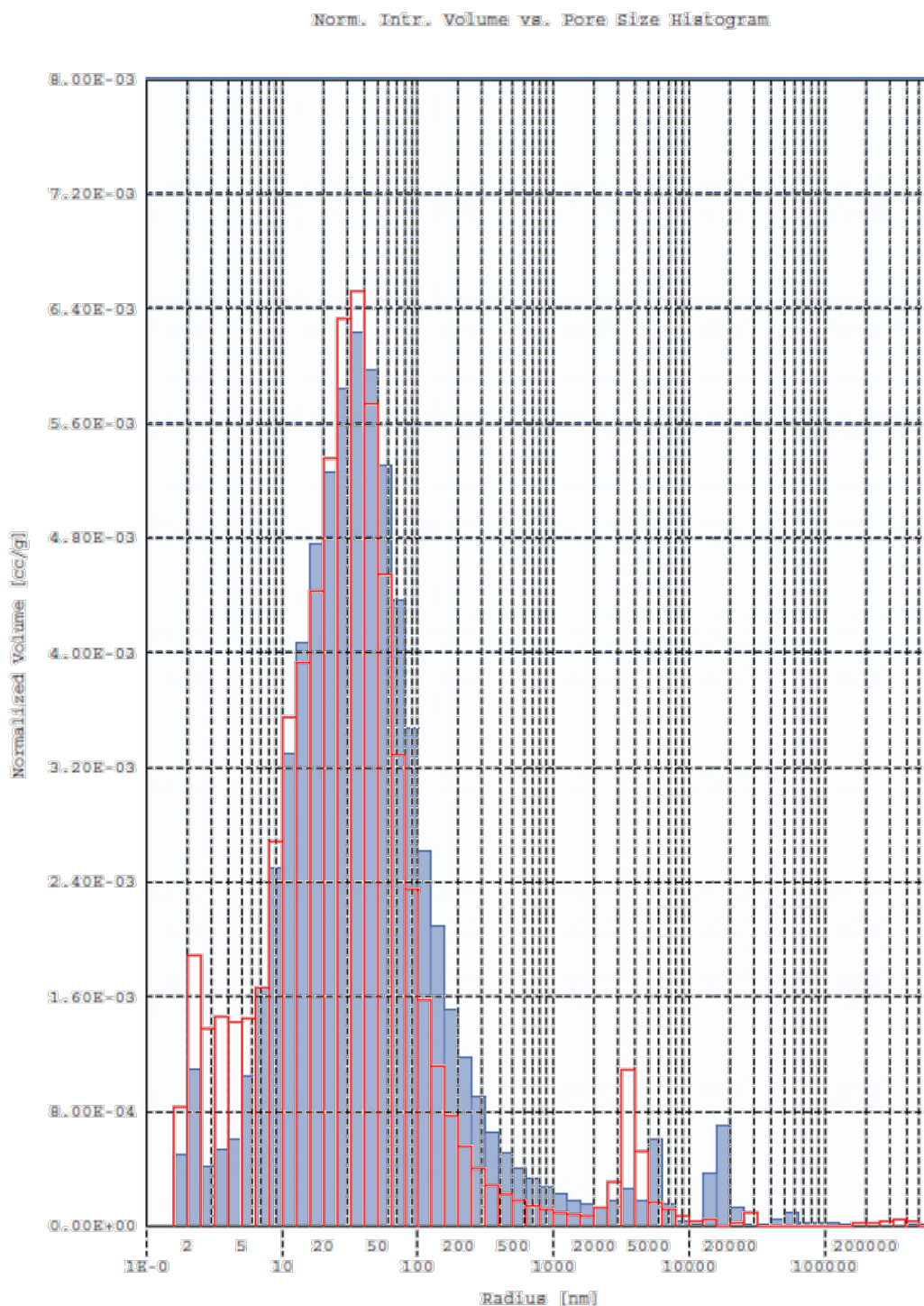
Pórová štruktúra mált neindikovala významné rozdiely v zisťovaných základných parametroch. Malty sa zhodne vyznačovali nízkym podielom makropórov, vysokým špecifickým povrchom všetkých otvorených pórov, nízkymi hodnotami mediánu všetkých pórov a mikropórov a malým rozdielom medzi nimi, pri približne rovnakej celkovej pórovitosti a priepustnosti mált. Táto skutočnosť svedčí o vývoji pórovej štruktúry s rozhodujúcim podielom menej priepustných mikropórov. Pozorované rozdiely v parametroch pórovej štruktúry referenčnej malty a mált s kryštalickými prísadami, ako aj detegované rozdiely medzi maltami jedného druhu, dotovanými minimálnou alebo maximálnou dávkou kryštalických prísad boli marginálne. Kryštalickými prísadami za daných podmienok experimentu nebolo preukázané zahusťovanie pórovej štruktúry a tým zvýšenie nepriepustnosti malty v porovnaní s referenčnou maltou, nie je hodné bližšej pozornosti. Porovnanie rozdelenia veľkosti pórov v referenčnej malte (M-REF) a maltách s maximálnou dávkou kryštalickej prísady (M-A-max, M-B-max a M-C-max) ilustrujú obrázky 6 až 8.



Obrázok 7 – Porovnanie rozdelenia veľkosti pórov malty **M-A-max** (červená) s maltou M-REF (modrá)



Obrázok 8 – Porovnanie rozdelenia veľkosti pórov malty **M-B-max** (červená) s maltou M-REF (modrá)

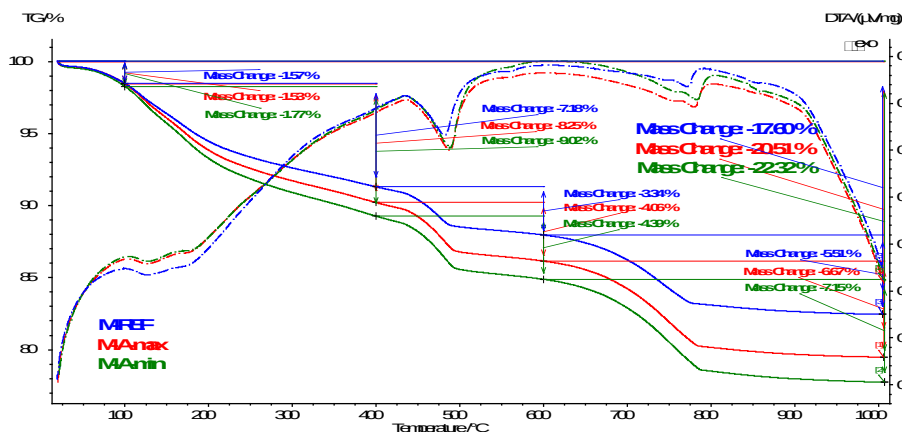


Obrázok 9 – Porovnanie rozdelenia veľkosti pórov malty **M-C-max** (červená) s maltou M-REF (modrá)

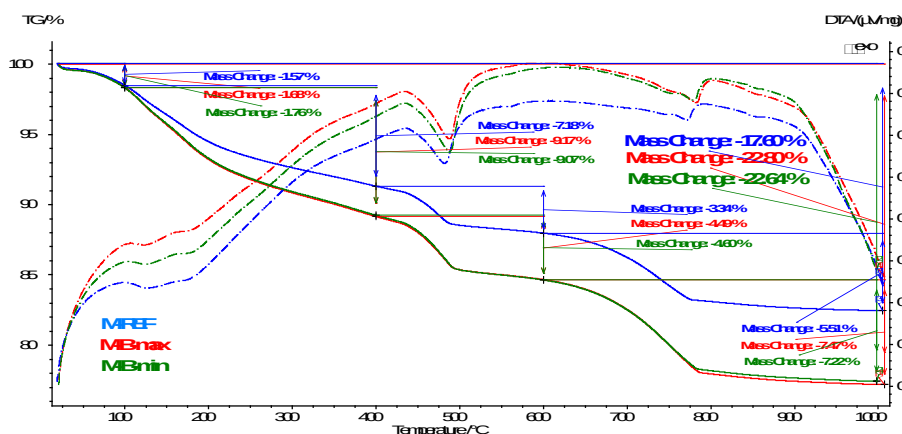
Použitie kryštalických prísad v malte M-B-max a M-C-max indikovalo väčšie zastúpenie mikropórov v oblasti medzi 1,82 nm a 5 250 nm v porovnaní s ich distribúciou v malte M-REF. Tento trend nebol tak badateľný v malte M-A-max. Táto malta v porovnaní s M-REF, M-B-max a M-C-max sa vyznačovala menším zastúpením makropórov, najmä v rozsahu 5 250 nm - 20 000 nm. Zmeny rovnakého charakteru v rozdelení veľkosti pórov boli pozorované aj pri použití nižších dávok kryštalických prísad (M-A-min, M-B-min a M-C-min). Rozdiely v rozdelení veľkosti pórov, v súlade s výsledkami základných parametrov pórovej štruktúry, neboli významné.

Aplikáciou kryštalických prísad bola indikovaná tendencia vytvorenia pórovej štruktúry s jemne navrhnutým podielom mikropórov do 5 250 nm a redukciou zastúpenia makropórov nad 5 250 nm v porovnaní s pórovou štruktúrou referenčnej malty.

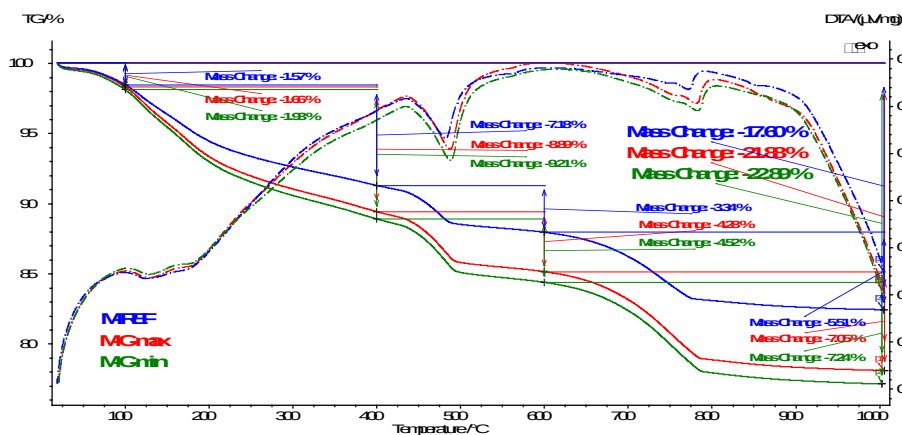
Obrázky 10, 11 a 12 znázorňujú termické záznamy mált (M-REF, M-A-min a M-A-max), (M-REF, M-B-min a M-B-max) a (REF, M-C-min a M-C-max) vo veku 28 dní od ich zhotovenia. Súčet vyznačených parciálnych strát v celom teplotnom rozsahu merania 20 °C až 1 100 °C poskytuje údaj o celkovej strate žíhaním. Strata hmotnosti v rozsahu teplôt 100 °C až 400 °C predstavuje vodu viazanú v kalcium silikát hydrátoch (C-S-H) a kalcium aluminát hydrátoch (C-A-H), ktoré sú hydratačnými produktmi cementu. Hmotnostný úbytok v rozsahu 400 °C až 600 °C indikujúci stratu viazanej (hydroxylovej) vody v Ca(OH)_2 ako aj hmotnostnú stratu CO_2 medzi 600 °C až 1 100 °C indikujúcu disociáciu CaCO_3 boli prepočítané na celkový obsah Ca(OH)_2 a CaCO_3 . Takto vyhodnotené fázové zloženie jednotlivých mált sumarizuje tabuľka 11. Obrázky 13 a 14 porovnávajú obsah viazanej vody v C-S-H a C-A-H géloch a obsah hydroxidu vápenatého v maltách.



Obrázok 10 – Porovnanie TG-DTA záznamu malty M-REF, M-A-min a M-A-max



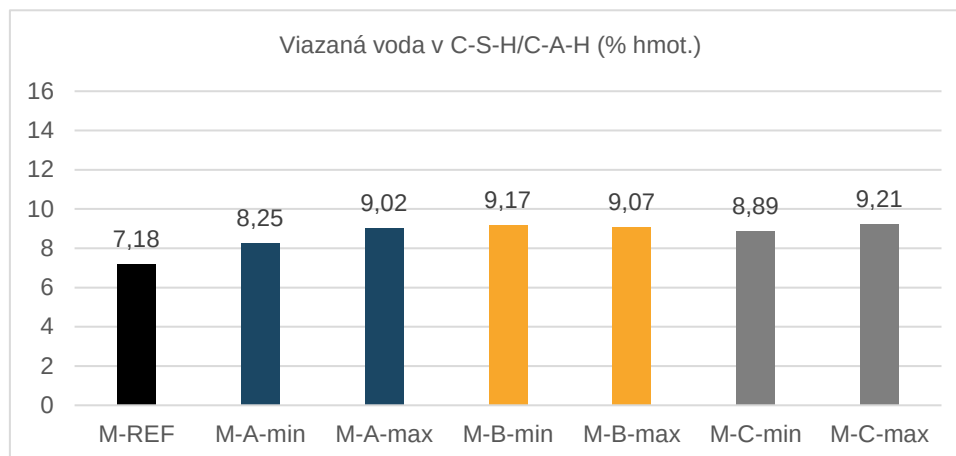
Obrázok 11 – Porovnanie TG-DTA záznamu malty M-REF, M-B-min a M-B-max



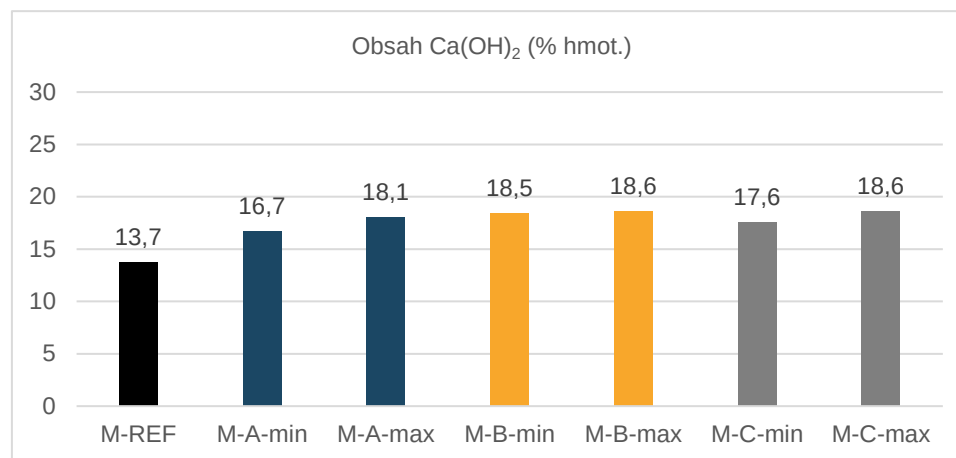
Obrázok 12 – Porovnanie TG-DTA záznamu malty M-REF, M-C-min a M-C-max

Tabuľka 11 – Kvantitatívne zastúpenie jednotlivých fáz v maltách podľa zloženia

Označenie malty	Viazaná voda v C-S-H/C-A-H (% hmot.)	Obsah Ca(OH)_2 (% hmot.)	Obsah CaCO_3 (% hmot.)	Celková strata žíhaním (% hmot.)
M-REF	7,2	13,7	12,5	17,6
M-A-min	8,3	16,7	15,2	20,5
M-A-max	9,0	18,1	16,3	22,3
M-B-min	9,2	18,5	17,0	22,8
M-B-max	9,1	18,6	16,4	22,6
M-C-min	8,9	17,6	16,0	21,9
M-C-max	9,2	18,6	16,5	22,9



Obrázok 13 – Porovnanie obsahu viazanej vody v C-S-H a C-A-H géloch v maltách



Obrázok 14 – Porovnanie obsahu hydroxidu vápenatého v maltách

Všetky kryštalické prísady ovplyvnili hydratáciu cementu v porovnaní s referenčnou maltou vytvorením hydratovanej fázy bohatšej na:

- 1) obsah vody viazanej v gélových hydratačných produktoch druhu C-S-H a C-A-H;
- 2) obsah hydroxidu vápenatého Ca(OH)_2 ,
- 3) zastúpenie sprievodného produktu CaCO_3 .

Tieto skutočnosti determinujú hodnoty celkovej straty žíhaním, ktorá dokumentovala vyššie zastúpenie reakčných produktov hydratácie cementu [C-S-H/C-A-H a Ca(OH)_2] a CaCO_3 v maltách za použitia kryštalickej prísady, nezávisle od jej dávky vo vzťahu k relevantnej hodnote detegovanej v referenčnej malte.

Parciálne vyhodnotenie výsledkov pórovej štruktúry a fázového zloženia mált:

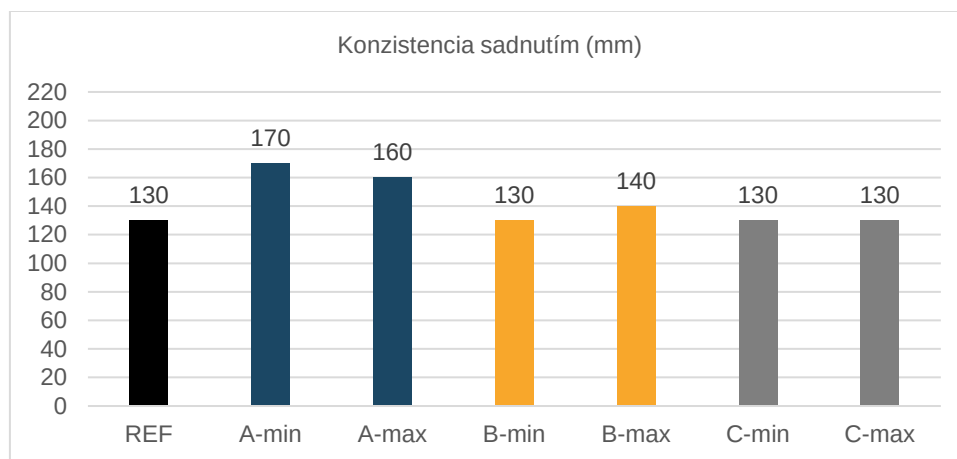
- Kryštalické prísady napomáhali tvorbe väčšieho množstva reakčných produktov hydratácie cementu a sprievodného CaCO_3 .
- Kryštalické prísady indikovali vytvorenie pórovej štruktúry s väčším podielom mikropórov.
- Analýzy poukázali na mechanizmus účinku kryštalických prísad vznikom zahustenej štruktúry mikropórov a v nej deponovanú hydratovanú fázu s vyšším obsahom reakčných produktov hydratácie cementu. Tieto zistenia potvrdzujú poznatky z odbornej rešerše.

5.2 Skúšky na betónoch**5.2.1 Vlastnosti čerstvých betónov**

Rovnako ako na maltách, tak aj na betónoch bola overovaná schopnosť niektorých kryštalických prísad plastifikovať cementové kompozity. Bol porovnávaný vplyv prísad na konzistenciu čerstvého betónu skúškou sadnutia Abramsovoho kužela. Tabuľka 12 prezentuje výsledky skúšok reologických vlastností čerstvých betónov, objemovú hmotnosť, konzistenciu a obsah vzduchu. Bola porovnávaná konzistencia betónov s prísadami A, B a C a bez nich, výsledky jednotlivých porovnaní prezentuje Obrázok 15.

Tabuľka 12 – Výsledky skúšok reologických vlastností čerstvých betónov

Označenie betónu	Objemová hmotnosť (kg/m ³)	Konzistencia sadnutím (mm)	Obsah vzduchu (%)
REF	2 370	130	1,2
A-min	2 370	170	1,0
A-max	2 360	160	1,1
B-min	2 360	130	1,4
B-max	2 340	140	1,8
C-min	2 360	130	1,2
C-max	2 360	130	1,4



Obrázok 15 – Porovnanie konzistencie betónu sadnutím

Betón bez prísad (REF) spĺňal požiadavku na konzistenciu sadnutím 120 mm $\pm$ 20 mm pre referenčný betón II podľa tabuľky 2 STN EN 480-1. Konzistencia sa zatrieďuje do stupňa sadnutia kužela S3 podľa STN EN 206+A2.

Kryštalická prísada A v porovnaní s betónom REF výrazne plastifikovala betón už pri minimálnej dávke. Konzistencia betónu s prísadou A sa zvýšila na stupeň sadnutia kužela S4. Betóny s prísadami B a C vykazovali rovnakú konzistenciu ako REF betón, pričom B-max mierne vyššiu.

Rozdiely v objemovej hmotnosti a obsahu vzduchu v betónoch boli zanedbateľne malé. Výraznejšie zvýšenie obsahu vzduchu bolo evidované oproti REF betónu v betóne s prísadou B.

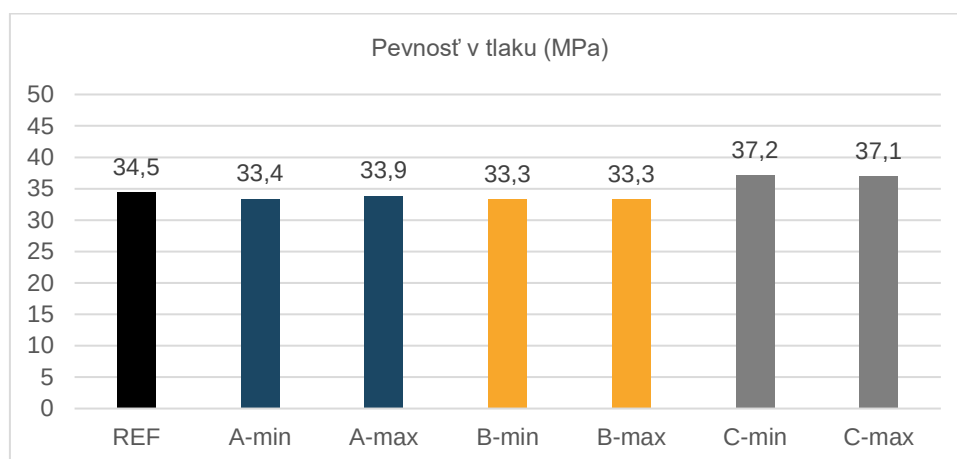
Betóny boli porovnateľné svojimi reologickými vlastnosťami aj pri zachovaní rovnakého vodného súčiniteľa (bez úpravy obsahu zámesovej vody).

5.2.2 Fyzikálno-mechanické vlastnosti zatvrdnutých betónov

Výrobcovia kryštalických prísad prezentujú zlepšenie niektorých fyzikálno-mechanických vlastností betónov pri ich použití, hlavne zníženie nasiakavosti, zvýšenie vodotesnosti a pevnosti v tlaku a vo všeobecnosti zníženie priepustnosti betónu. V tabuľke 13 sú uvedené výsledky skúšok objemovej hmotnosti, pevnosti v tlaku a ťahu pri ohybe, nasiakavosti, hĺbky presiaknutia tlakovou vodou (vodotesnosť) a koeficientu permeability (priepustnosť) betónov. Obrázky 16 až 20 porovnávajú najpodstatnejšie parametre betónov z pohľadu účinku kryštalických prísad.

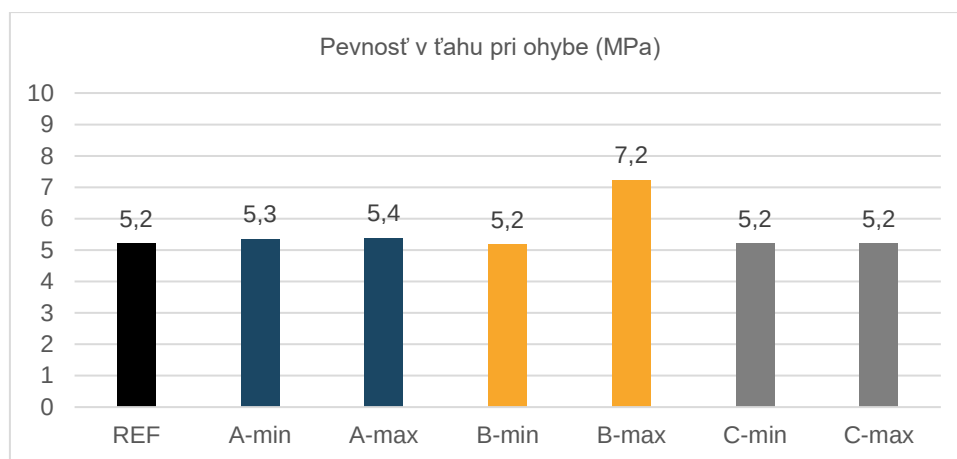
Tabuľka 13 – Výsledky skúšok fyzikálno-mechanických vlastností betónov

Označenie betónu	Objemová hmotnosť (kg/m ³)	Pevnosť v tlaku (MPa)	Pevnosť v ťahu pri ohybe (MPa)	Nasiakavosť (%)	Hĺbka presiaknutia tlakovou vodou (mm)	Koeficient permeability k_T ($\times 10^{-16} \cdot \text{m}^2$)
REF	2360	34,5	5,2	5,95	23	0,035
A-min	2360	33,4	5,3	6,11	26	0,022
A-max	2370	33,9	5,4	5,91	25	0,020
B-min	2360	33,3	5,2	5,97	21	0,030
B-max	2380	33,3	7,2	5,78	22	0,043
C-min	2370	37,2	5,2	6,02	26	0,026
C-max	2370	37,1	5,2	5,83	23	0,017



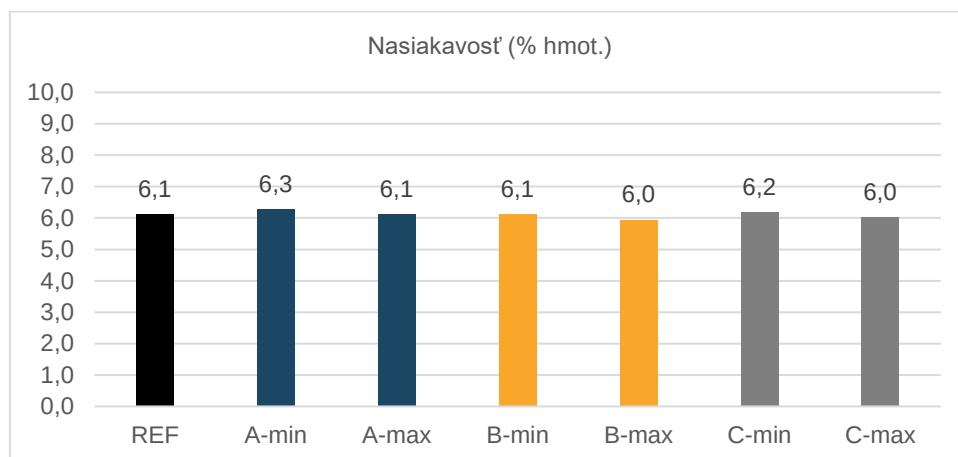
Obrázok 16 – Porovnanie pevnosti betónu v tlaku

Použitím kryštalických prísad A a B sa oproti betónu bez prísad (REF) nedosialo zvýšenie pevnosti betónu v tlaku (obrázok 16). Naopak v prípade použitia prísady C bolo dosiahnuté zvýšenie pevnosti v tlaku už pri minimálnej dávke prísady.

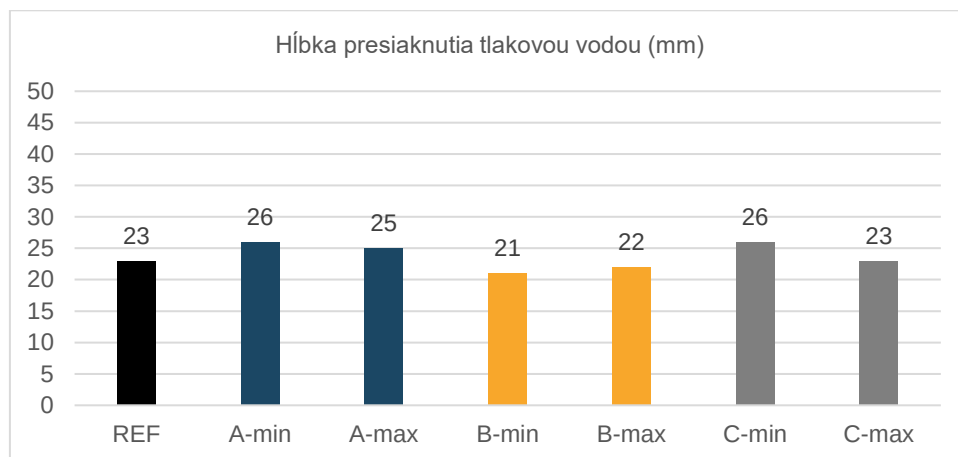


Obrázok 17 – Porovnanie pevnosti betónu v ťahu pri ohybe

Pevnosť v ťahu pri ohybe (obrázok 17) u všetkých betónov okrem B-max bola na približne rovnakej úrovni. Pri maximálnej dávke prísady B bolo dosiahnuté zvýšenie pevnosti betónu v ťahu pri ohybe o 2 MPa, čo predstavuje 39 % navýšenie oproti REF betónu.



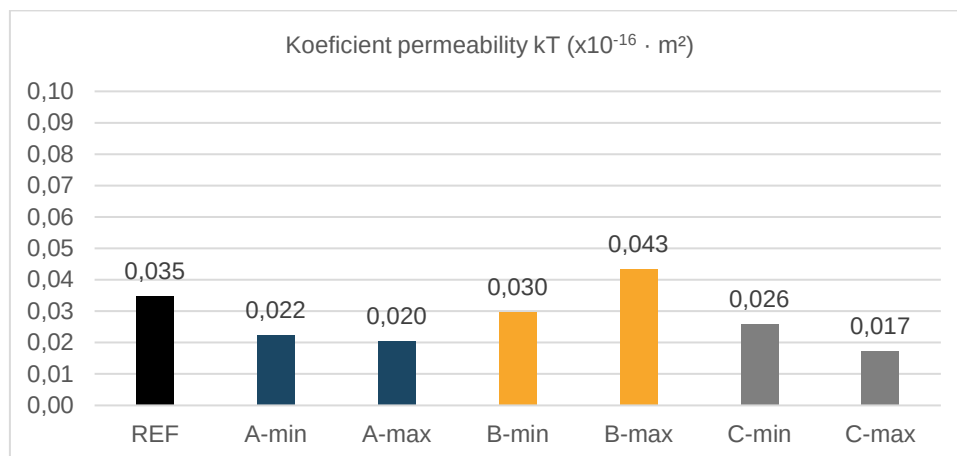
Obrázok 18 – Porovnanie nasiakavosti betónu



Obrázok 19 – Porovnanie hĺbky presiaknutia tlakovou vodou

Najdôležitejšie parametre, ktoré prezentujú výrobcovia kryštalických prísad sú znižovanie nasiakavosti a zvyšovanie vodotesnosti, resp. znižovanie hĺbky presiaknutia tlakovou vodou v betóne. Z porovnania výsledkov na obrázkoch 18 a 19 vyplýva, že kryštalické prísady nezlepšili nasiakavosť ani vodotesnosť betónov oproti referenčnému betónu bez prísad. Hodnoty boli na približne rovnakej úrovni.

Tieto zistenia podporujú výsledky skúšky permeability (priepustnosti) betónov prístrojom TORRENT (obrázok 20). Hodnoty koeficientov permeability kT všetkých betónov boli zaradené do jednej kvalitatívnej triedy povrchu betónu podľa tabuľky 4 – dobrý betón. Použitím kryštalických prísad sa nedosiahlo zlepšenie permeability betónu, preklasifikovaním do kvalitatívnej triedy - veľmi dobrý betón, t.j. betón s $kT < 0,01 \times 10^{-16} \cdot \text{m}^2$. Najvýraznejší pokles v hodnote koeficientu permeability kT betónu oproti REF betónu bol evidovaný pri maximálnej dávke prísady C.



Obrázok 20 – Porovnanie koeficientu permeability povrchu betónu

Parciálne vyhodnotenie výsledkov fyzikálnych a mechanických vlastností betónov:

- Kryštalická prísada A plastifikovala betón. Rovnaké zistenie bolo potvrdené aj na maltách. U ostatných kryštalických prísadách (B a C) sa plastifikačný efekt nepotvrdil.
- Kryštalická prísada C zvýšila pevnosť betónu v tlaku. U kryštalických prísadách A a B sa tento efekt neprejavil.
- Kryštalická prísada B pri maximálnej dávke výrazne zvýšila pevnosť betónu v ťahu pri ohybe.
- Na žiadnom betóne sa neprejavilo zníženie nasiakavosti, zvýšenie vodotesnosti a zníženie priepustnosti účinkom kryštalických prísad. Zistené rozdiely možno považovať za marginálne.

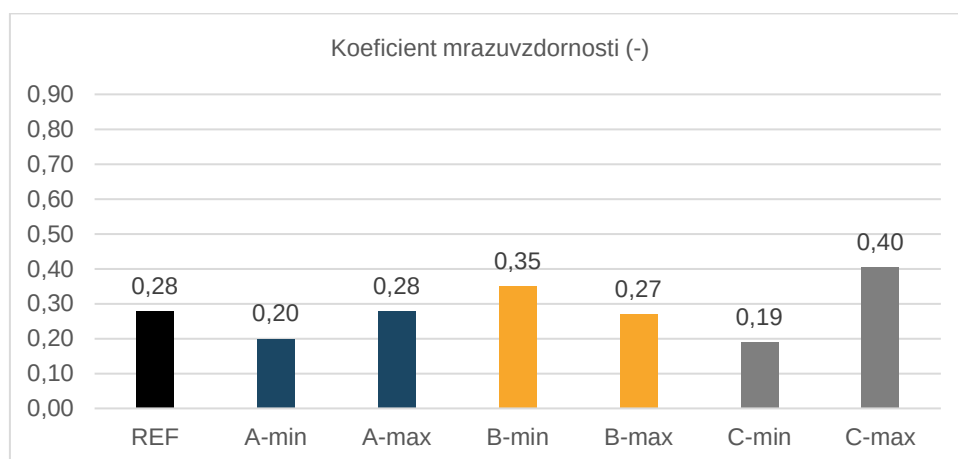
5.2.3 Odolnosť betónov proti účinku mrazu a rozmrazovacích látok

Výrobcovia niektorých kryštalických prísad uvádzajú, že prísady zlepšujú odolnosť betónu proti striedavému účinku mrazu a rozmrazovania (mrazuvzdornosť) a/alebo odolnosti povrchu betónu proti pôsobeniu vody a chemických rozmrazovacích látok (CHRL). Tabuľka 14 sumarizuje a obrázky 21 až 23 porovnávajú výsledky skúšok mrazuvzdornosti po 50 cykloch a odolnosti betónov proti CHRL po 25 a 50 cykloch.

Tabuľka 14 – Výsledky skúšok odolnosti betónov proti mrazu a rozmrazovacím látkam

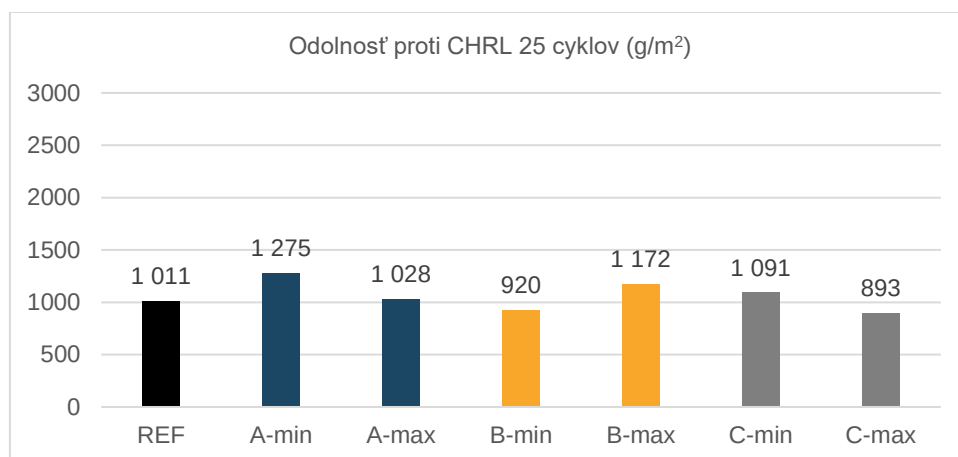
Označenie betónu	Koeficient mrazuvzdornosti po 50 cykloch (-)	Odolnosť proti CHRL po 25 cykloch (g/m^2)	Odolnosť proti CHRL po 50 cykloch (g/m^2)
REF	0,28	1011	5996
A-min	0,20	1275	7077
A-max	0,28	1028	5334
B-min	0,35	920	5145
B-max	0,27	1172	3907
C-min	0,19	1091	6674
C-max	0,40	893	3595

Zámerne bol vyrobený referenčný betón nespĺňajúci podmienku mrazuvzdornosti a odolnosti proti CHRL, aby vznikol dostatočný priestor na prejavenie sa pozitívneho účinku kryštalických prísad. Tento úsudok podporujú aj zistenia z odbornej rešerše, v ktorých bola dokumentovaná skutočnosť, že pozitívny vplyv kryštalických prísad sa prejavuje aj v betónoch nižšej kvality. Koeficient mrazuvzdornosti (pomer pevností v ťahu pri ohybe zmrazovaných a nezmrazovaných betónov) REF betónu bol po 50 cykloch na úrovni 0,28, čo je hlboko pod kritériom 0,85 podľa STN EN 206+A2. Odolnosť REF betónu proti CHRL (vyjadrená ako hmotnosť uvoľnených častí povrchu betónu na $1 m^2$ skúšobnej plochy) bola zatriedená podľa STN 73 1326 do stupňa porušenia 4 – silne narušený po 25 cykloch a stupňa 5 – rozpadnutý po 50 cykloch.



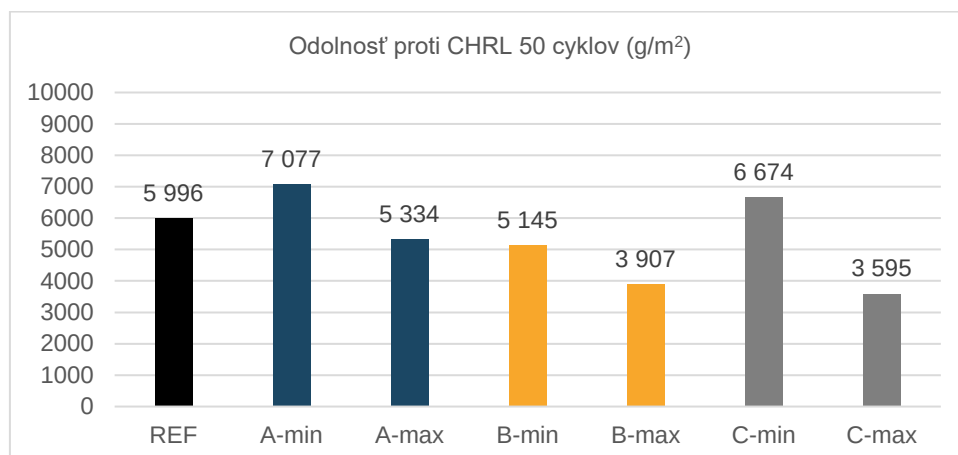
Obrázok 21 – Porovnanie koeficientu mrazuvzdornosti betónov

Použitím kryštalických prísad B-min a C-max bolo dosiahnuté zvýšenie koeficientu mrazuvzdornosti betónu v porovnaní s REF betónom. Prísady A a B pri maximálnej dávke nezhoršili mrazuvzdornosť. Použitím prísad A a C v minimálnej dávke došlo k zníženiu koeficientu mrazuvzdornosti.



Obrázok 22 – Porovnanie odolnosti betónu proti chemickým rozmrazovacím látkam po 25 cykloch

Odolnosť betónu proti účinku CHRL po 25 cykloch (obrázok 22) sa zvýšila pri použití prísady B v minimálnej dávke a prísady C pri maximálnej dávke. Stupeň porušenia povrchu týchto betónov podľa STN 73 1326 sa oproti REF betónu znížil na úroveň 3 – narušený. Ostatné betóny s prísadami ostali po 25 cykloch na rovnakom stupni porušenia povrchu ako REF betón.



Obrázok 23 – Porovnanie odolnosti betónu proti chemickým rozmrazovacím látkam po 50 cykloch

Stupeň porušenia povrchu betónov so všetkými prísadami bol rovnako ako u REF betónu po 50 cykloch (obrázok 23) na úrovni 5 – rozpadnutý. Zlepšenie odolnosti betónov oproti REF betónu bolo badateľné pri použití prísady B a C v maximálnej dávke.

Parciálne vyhodnotenie výsledkov odolnosti betónov proti účinku mrazu a rozmrazovacích látok:

- Kryštalické prísady B v minimálnej dávke a C v maximálnej dávke zvýšili koeficient mrazuvzdornosti betónu po 50 cykloch a zlepšili odolnosť proti CHRL po 25 cykloch v porovnaní s REF betónom.
- Kryštalické prísady B a C v maximálnej dávke zlepšili odolnosť proti CHRL po 50 cykloch v porovnaní s REF betónom.

5.2.4 Maximálna vodotesnosť a schopnosť utesnenia vzniknutej trhliny v betóne

Dlhodobá skúška maximálnej vodotesnosti betónu s predĺženým pôsobením 28 dní a postupným navyšovaním tlaku na cieľový podľa kapitoly 3.1 bola zvolená z toho dôvodu, aby sa vytvoril čo najvhodnejší priestor pre aktiváciu prísady a overenie vlastností zlepšovania vodotesnosti betónov, ktorú deklarujú všetci výrobcovia kryštalických prísad. V rámci rešerše sme neidentifikovali predpis v ktorom by bolo zadefinované preukazovanie schopnosti kryštalických prísad utesniť vzniknutú trhlinu v betóne. Preto bol použitý modifikovaný postup podľa STN EN 14068. Týmto skúškam bola vystavená najaktívnejšia kryštalická prísada C-max a referenčný betón bez prísady. Výsledky skúšok sú dokumentované v tabuľke 15.

Tabuľka 15 – Výsledky skúšok maximálnej vodotesnosti a preverenia schopnosti utesnenia trhliny v betóne

Označenie betónu	Maximálna vodotesnosť (hĺbka presiaknutia tlakovou vodou) (mm)	Schopnosť utesnenia vzniknutej trhliny v betóne
REF-1	35	neutesnila sa
REF-2	40	neutesnila sa
REF-3	38	neutesnila sa
REF-priemer	38	-
C-max-1	25	neutesnila sa
C-max-2	25	neutesnila sa
C-max-3	30	neutesnila sa
C-max-priemer	27	-

Výsledky dlhodobej skúšky maximálnej vodotesnosti betónov poukazujú na zlepšenie tejto vlastnosti u betónu s kryštalickou prísadou, znížením hĺbky presiaknutia tlakovou vodou o 29 %, v porovnaní s hodnotu REF betónu. Z porovnania výsledkov skúšok hĺbky presiaknutia tlakovou vodou betónov v čase 28 dní podľa štandardného postupu v STN EN 12390-8 na obrázku 19 (strana 28) vyplýva, že kryštalické prísady nezlepšili vodotesnosť betónov oproti referenčnému betónu bez prísad. Modifikáciou štandardného postupu skúšania vodotesnosti betónov bol dosiahnutý vhodnejší postup overovania tejto vlastnosti pre kryštalické prísady.

Výsledok skúšky overenia schopnosti najaktívnejšej kryštalickej prísady utesniť trhlinu do 0,4 mm, pri jej maximálnej odporúčanej dávke, bol negatívny. Cez trhlinu v betóne bez prísady aj s prísadou počas celej doby skúšania pretekala voda a nepodarilo sa zvýšiť pôsobiaci tlak z dôvodu neutesnenia trhliny. Metodika overenia tejto vlastnosti simulovala vznik trhliny v konštrukcii v mladom veku betónu a postupným zvyšovaním tlaku by nechala priestor pre prípadnú aktiváciu kryštalickej prísady a možnosť utesniť trhlinu aby nedošlo okamžitým pôsobením vysokého tlaku k vymytiu vytvorených kryštálov. Výrobcovia kryštalických prísad prezentujú túto vlastnosť, ale neuvádzajú akým spôsobom bola preukázaná.

6 Záver

6.1 Prieskum problematiky

Z prieskumu problematiky o kryštalických prísadách vyplývajú nasledovné závery:

1. STN EN 206+A2 v súčasnosti nedefinuje použitie kryštalických prísad do betónu, ktorých hlavnou vlastnosťou má byť utesňovanie betónu znižovaním celkovej pórovitosti cementovej matrice.
2. Požiadavky na posudzovanie parametrov podstatných vlastností definuje EAD 260026-00-0301. Predpis dokumentuje nasledovné parametre: homogenita, celkový chlór, chlorid rozpustný vo vode, obsah alkálií, korózne správanie, obsah vzduchu a objemová hmotnosť čerstvého betónu, pevnosť v tlaku, zvýšenie vodonepriepustnosti betónu, odolnosť voči mrazu a rozmrazovaniu, odolnosť voči mrazu a rozmrazovaniu s rozmrazovacím prostriedkom.
3. Odborná rešerš poukázala na zlepšenie technicky významných vlastností betónov za použitia kryštalických prísad, najmä autonómnym utesňovaním pasívnych trhlín s hrúbkou do 0,4 mm a zahusťovaním pórovej štruktúry, čo sa v konečnom dôsledku prejavuje vo zvýšení nepriepustnosti betónu. Zistené zlepšenia boli pripisované chemickým reakciám aktívnej zložky kryštalických prísad s hydratujúcim cementom.
4. Výrobcovia prísad prezentujú v technických, materiálových a produktových listoch široké spektrum zlepšenia vlastností betónov, najmä: predĺženie tuhnutia, plastifikačný efekt, zvýšenie pevnosti v tlaku, zníženie nasiakavosti a hĺbky presiaknutia tlakovou vodou, zvýšenie mrazuvzdornosti a odolnosti proti rozmrazovacím látkam a schopnosť utesnenia vzniknutých trhlín do šírky 0,4 mm.
5. Technické, materiálové a produktové listy kryštalických prísad neobsahujú metódy preukázania ich všetkých špecifických vlastností. Väčšina listov obsahuje odvolávku na EN 934-2+A1, ktorá neobsahuje definíciu a osobitné technické požiadavky na kryštalické prísady. Výrobcovia väčšinou upozorňujú, že údaje v listoch sú uvedené na základe ich skúseností a najlepšieho vedomia a nie sú záväzné, resp. sú typické alebo informatívne a je nutné pred spracovaním posúdiť ich vhodnosť pre predpokladané použitie a účel.

6.2 Experimentálna časť

Na základe porovnania výsledkov skúšok mált a betónov s prísadami A, B a C s referenčnými maltami a betónmi bez prísad (REF) vyplývajú nasledovné závery experimentálnej časti RÚ:

1. Mechanizmus účinku kryštalických prísad sa prejavil väčším podielom mikropórov a v nej deponovanú hydratovanú fázu s vyšším obsahom reakčných produktov hydratácie cementu. Tieto zistenia potvrdili poznatky z odbornej rešerše.
2. Kryštalické prísady predĺžili začiatok a koniec tuhnutia a predĺžili čas medzi začiatkom a koncom tuhnutia mált. Tieto zistenia sa vzťahujú aj na betón, keďže boli použité relevantné metódy preukazovania vlastností prísad do betónov.
3. Kryštalická prísada A plastifikovala betón. Rovnaké zistenie sa potvrdilo aj na maltách. U ostatných kryštalických prísadách (B a C) sa plastifikačný efekt na betóne neprejavil.
4. Kryštalické prísady zlepšili, ale aj zhoršili určité mechanické vlastnosti mált a betónov, v závislosti od typu a dávky použitej prísady nasledovne:
 - prísada C zvýšila pevnosti mált v ťahu pri ohybe a v tlaku; u prísad A a B sa tento efekt neprejavil a došlo k zníženiu hlavne pevností mált v tlaku;
 - prísada C zvýšila pevnosť betónu v tlaku; u prísad A a B sa tento efekt neprejavil a pevnosti sú približne na rovnakej úrovni ako betón REF;
 - prísada B pri maximálnej dávke výrazne zvýšila pevnosť betónu v ťahu pri ohybe; u prísad A a B sa tento efekt neprejavil a pevnosti sú približne na rovnakej úrovni ako betón REF.
5. Na žiadnom betóne s kryštalickou prísadou sa vo veku 28 dní a použitím štandardných postupov overovania neprejavilo významné zníženie nasiakavosti, zvýšenie vodotesnosti a zníženie priepustnosti účinkom kryštalických prísad. Zistené rozdiely možno považovať za marginálne.
6. Kryštalické prísady zlepšili, ale aj zhoršili odolnosť betónov proti účinku mrazu a rozmrazovacích látok, v závislosti od typu a dávky použitej prísady nasledovne:
 - prísady B v minimálnej dávke a C v maximálnej dávke zvýšili koeficient mrazuvzdornosti betónu po 50 cykloch a zlepšili odolnosť proti CHRL po 25 cykloch; u prísady A sa tento efekt neprejavil;

- prísady v maximálnej dávke zlepšili odolnosť proti CHRL po 50 cykloch; prísady A a C v minimálnej dávke zhoršili odolnosť.

Zámerne bol vyrobený referenčný betón nespĺňajúci podmienku mrazuvzdornosti a odolnosti proti CHRL, aby vznikol dostatočný priestor na prejavenie sa pozitívneho účinku kryštalických prísad.

7. Zistené pozitívne efekty kryštalických prísad na funkčné vlastnosti samotného betónu vo veku 28 dní je možné charakterizovať ako marginálne, pričom je dôležité zdôrazniť, že boli zdokumentované aj negatívne účinky.
8. Modifikovaná metóda preukazovania zvyšovania vodotesnosti betónov účinkom kryštalických prísad dlhodobou skúškou sa osvedčila ako vhodnejšia v porovnaní so štandardnou skúškou podľa STN EN 12390-8. Kryštalická prísada C v maximálnej dávke zlepšila vodotesnosť betónu o 29 % v porovnaní s betónom bez prísady.
9. Nebola preukázaná schopnosť kryštalickej prísady autonómneho utesnenia pasívnych trhlín s hrúbkou do 0,4 mm, ani po 35 dňoch presakovania vody cez trhlinu.

6.3 Podklady pre úpravu národnej prílohy STN EN 206/NA

Norma STN EN 206/NA popisuje možnosti použitia prísad do betónu, ktorých vhodnosť bola preukázaná. Norma STN EN 934-2+A1 dokumentuje definície, požiadavky, zhodu, označovanie a etiketovanie pre prísady určené na použitie do betónu. Normy STN EN 934-1 a STN EN 934-2+A1 vôbec nepojednávajú a hlavne neobsahujú požiadavky na preukazovanie podstatných a relevantných vlastností kryštalických prísad, ktorých hlavnou vlastnosťou má byť utesňovanie betónu znížením celkovej pórovitosti cementovej matrice a tým zvýšením vodotesnosti a znížením nasiakavosti betónu a schopnosťou utesnenia vzniknutých trhlín do 0,4 mm. EAD 260026-00-0301 z hľadiska funkčných vlastností betónu špecifikuje parametre ako zvýšenie vodonepriepustnosti, odolnosť voči mrazu a rozmrazovaniu, odolnosť voči mrazu a rozmrazovaniu s rozmrazovacím prostriedkom.

Potreba úpravy národnej prílohy STN EN 206/NA nie je nutná z toho dôvodu, že v rámci používania prísad do betónu sa odvoláva na normy STN EN 934-1, STN EN 934-2+A1, prípadne na možnosť preukázania vhodnosti Európskym technickým posúdením.

Prezentované výsledky experimentálnej časti RÚ poukazujú na skutočnosť, že na žiadnom betóne s kryštalickou prísadou sa podľa štandardných skúšobných noriem na betón v čase 28 dní neprejavilo významné zníženie nasiakavosti, zvýšenie vodotesnosti a zníženie priepustnosti účinkom kryštalických prísad. Z doterajších výsledkov experimentálnej časti RÚ vyplýva, že na objektívne zhodnotenie účinnosti kryštalických prísad na zvýšenie vodotesnosti a schopnosti autonómneho utesnenia pasívnych trhlín s hrúbkou do 0,4 mm je nutné aplikovať špeciálne modifikované metodiky, ktoré napr. principiálne vychádzajú z príbuzných noriem STN EN 14068 a STN EN 12390-8, ktoré poskytnú dostatočne dlhý čas na prejavenie sa účinku kryštalických prísad.

6.4 Návrh na úpravu zmien v TPR

Na základe uvedených zistení, navrhujeme upraviť v TKP 15: Kapitulu 4.15 Materiály na zlepšenie vlastností nasledovne:

Tieto materiály sa používajú buď vo forme prísad do betónu pri novostavbách, alebo vo forme náterov pri novostavbách alebo sanáciách betónových konštrukcií. Vhodnosť použitia, ako aj dávkovanie a postupy pri aplikácii týchto materiálov sú dané TPV.

Požiadavky na vlastnosti betónovej konštrukcie s použitím kryštalizačných prísad alebo náterov predpisuje PD, v ktorej musia byť *zadefinované požadované funkčné vlastnosti betónu hotovej konštrukcie ako napríklad:*

- *zníženie prenikania tlakovej vody s uvedením hodnoty tlaku pôsobiacej vody a hodnoty maximálneho priesaku;*
- *zníženie nasiakavosti s uvedením hodnoty maximálnej nasiakavosti betónu;*
- *zlepšenie odolnosti proti mrazu a chemickým rozmrazovacím látkam s odkazom na požadovanú triedu XF v zmysle tabuľky F.1 STN EN 206/NA;*
- *ochrana betónu proti karbonatizácii s odkazom na požadovanú triedu XC v zmysle tabuľky F.1 STN EN 206/NA;*
- *samoutesnenie trhlín s uvedením maximálnej šírky trhliny, ktorá sa má v betóne s kryštalickou prísadou samoutesniť (prípadne aj s uvedením požadovaného času, za ktorý sa má trhlina utesniť);*

- *ochrana betónu pred chemikáliami s uvedením konkrétnych chemikálií, voči ktorým má byť betón s kryštalickou prísadou odolný.*

Spracovanie betónovej zmesi s použitím kryštalizačných prísad je obvykle bežným spôsobom podľa STN EN 206 + A2 a STN EN 13670. Prípadné špeciálne požiadavky pri spracovaní musia byť uvedené v technických listoch výrobcu použitého materiálu. Taktiež musia byť v technických listoch uvedené požiadavky na úpravu povrchu betónovej konštrukcie pred aplikáciou náterových systémov, prípadne iných povrchových aplikáciách.

Všetky betónové výrobky v konštrukciách PK s použitím kryštalických prísad musia spĺňať ustanovenia [Z1] a [Z2]. Receptúry betónov s kryštalizačnou prísadou musia byť vopred overené STV, v ktorej musí byť preukázané dosiahnutie hodnôt požadovaných funkčných vlastností.

6.5 Záverečné vyhodnotenie

Kryštalické prísady sa používajú na Slovensku aj v zahraničí. Existujú štúdie, ktoré prezentujú zlepšenia rôznych vlastností betónov, vyplývajúcich z účinku kryštalizácie v hydratovanej fáze betónu, čím sa zahusťuje pórový systém a tým sa znižuje permeabilita. Normy na prísady do betónu neobsahujú definíciu a osobitné technické požiadavky ani skúšobné metódy na funkčné vlastnosti, ktoré prezentujú výrobcovia kryštalických prísad. Podklady od výrobcov neuvádzajú jednotný prístup k deklarovaniu funkčných vlastností kryštalických prísad a ich účinnosť nie je možné vhodne preukázať v čase deklarácie parametrov betónu podľa platných noriem, čo potvrdzuje aj vykonaný experiment v rámci RÚ. Z toho dôvodu je nevyhnutná detailná špecifikácia požiadaviek na funkčné vlastnosti betónu zo strany ich špecifikátorov (projektantov).