



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ

FACULTY OF CHEMISTRY

ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE

**STUDIUM PROVZDUŠŇOVACÍCH PŘÍRAD V ALKALICKY
AKTIVOVANÝCH MATERIÁLECH**

STUDY OF AIR-ENTRAINING ADMIXTURES IN ALKALI-ACTIVATED MATERIALS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Kiripolský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Lukáš Kalina, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Číslo práce: FCH-DIP1504/2019 Akademický rok: 2019/20
Ústav: Ústav chemie materiálů
Student: **Bc. Tomáš Kiripolský**
Studijní program: Chemie, technologie a vlastnosti materiálů
Studijní obor: Chemie, technologie a vlastnosti materiálů
Vedoucí práce: **Ing. Lukáš Kalina, Ph.D.**

Název diplomové práce:

Studium provzdušňovacích přísad v alkalicky aktivovaných materiálech

Zadání diplomové práce:

vypracování literární rešerše

příprava testovacích vzorků

sledování vybraných vlastností alkalicky aktivovaného materiálu s přídavkem AEA

zhodnocení účinku AEA v alkalicky aktivovaných materiálech

Termín odevzdání diplomové práce: 29.5.2020:

Diplomová práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu. Toto zadání je součástí diplomové práce.

Bc. Tomáš Kiripolský
student(ka)

Ing. Lukáš Kalina, Ph.D.
vedoucí práce

doc. Ing. František Šoukal, Ph.D.
vedoucí ústavu

V Brně dne 31.1.2020

prof. Ing. Martin Weiter, Ph.D.
děkan

ABSTRAKT

Prevzdušňovacie prísady sú povrchovo aktívne látky, ktoré sa bežne používajú v materiáloch z portlandského cementu, pretože vytvárajú resp. stabilizujú malé vzduchové bubliny roz distribuované v spojive, čím menia distribúciu veľkosti pórov. Cieľom týchto prísad je zvýšenie trvanlivosti vytvrdeného spojiva, najmä v klimatických podmienkach, kde musí odolávať nízkym teplotám, a zároveň zlepšujú spracovateľnosť v plastickom stave. Vplyv prevzdušňovacích prísad v alkalicky aktivovanej troske bol sledovaný na určitých vlastnostiach. Prevzdušňovacie prísady dokázali prevzdušniť alkalicky aktivovanú maticu resp. zmenili distribúciu veľkosti pórov, čo malo za následok zníženie kapilárneho tlaku v poréznom komplexe, a došlo k redukcii zmrštenia za autogénnych podmienok. Pozitívom je určite aj zlepšenie spracovateľnosti, no na druhú stranu došlo k zníženiu pevnosti v ťahu za ohybu a pevnosti v tlaku. Morfológia prevzdušneného spojiva bola sledovaná pomocou skenovacej elektrónovej mikroskopie, a zároveň bol sledovaný vplyv prevzdušňovacích prísad na hydratáciu pomocou izotermickej kalorimetrie.

ABSTRACT

Air entraining admixtures are surfactants, that are commonly used in Portland cement materials, because they form and stabilize small air bubbles distributed in the binder, thereby changing the pore size distribution. The aim of these additives is to increase the durability of the cured binder, especially in climatic conditions, where it must withstand low temperatures, and simultaneously improving the workability in the plastic state. The effect of air entraining admixtures in alkali-activated slag was studied for certain properties. Air entraining admixtures were able to entrain the air in the alkali-activated matrix, they changed the pore size distribution, which resulted in a reduction in capillary pressure in the porous complex, and there was a reduction of shrinkage under autogenous conditions, respectively. The improvement of workability is certainly also positive, but on the other hand there has been a bad effect on flexural strength and compressive strength. The morphology of the air entrained binder was observed by scanning electron microscopy, and simultaneously the effect of air entrained admixtures on hydration was observed by isothermal calorimetry.

KLÚČOVÉ SLOVA

Prevzdušňovacia prísada, alkalicky aktivovaná troska, pevnosť, autogénne zmrštenie, porozita, hydratácia, štruktúra

KEY WORDS

Air entrained admixture, alkali activated slag, strength, shrinkage, porosity, hydration, structure

KIRIPOLSKÝ, Tomáš. *Studium provzdušňovacích přísad v alkalicky aktivovaných materiálech*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/123780>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav chemie materiálů. Vedoucí práce Lukáš Kalina.

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som diplomovú prácu vypracoval samostatne, a že všetky použité literárne zdroje som správne a úplne citoval. Diplomová práca je z hľadiska obsahu majetkom Fakulty chemickej VUT v Brne a môže byť využitá ku komerčným účelom, iba so súhlasom vedúceho diplomovej práce a dekana FCH VUT.

.....

Podpis študenta

POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval vedúcemu diplomovej práce Ing. Lukášovi Kalinovi, Ph.D. za cenné rady, konzultácie a pomoc pri vypracovaní tejto práce. Ďalej by som chcel poďakovať ďalším pracovníkom CMV FCH za ich spoluprácu pri vykonávaní meraní a taktiež musím poďakovať svojej priateľke a rodine za veľkú podporu pri vykonávaní tejto práce.

OBSAH

Úvod.....	5
1. Teoretická časť	6
1.1. História alkalicky aktivovaných materiálov	6
1.2. Alkalicky aktivovaný materiál	7
1.3. Vodné sklo ako alkalický aktivátor	8
1.4. Vysokopecná troska ako materiál pre alkalickú aktiváciu	8
1.4.1. Výroba vysokopecnej trosky	8
1.4.2. Typy vysokopecnej trosky.....	9
1.4.3. Alkalická aktivácia vysokopecnej trosky a jej hydratácia	10
1.4.4. Hydratačné produkty alkalicky aktivovanej trosky	11
1.5. Problémy alkalicky aktivovanej trosky	13
1.6. Vzduchové prevzdušňovanie.....	14
1.6.1. Prevzdušňovacie prísady	15
1.6.2. Rozdelenie a druhy prevzdušňovacích prísad	17
1.6.3. Prevzdušňovacie prísady v alkalicky aktivovanom materiály.....	19
2. Experimentálna časť	21
2.1. Použité suroviny a ich charakterizácia	21
2.1.1. Vysokopecná troska.....	21
2.1.2. Vodné sklo.....	21
2.1.3. Prevzdušňovacie prísady	21
2.1.4. Piesok	22
2.2. Príprava testovacích vzoriek a značenie zámesi.....	22
2.3. Stanovenie prevzdušnenia a stanovenie objemovej hmotnosti.....	23
2.4. Pevnosti v ťahu za ohybu a pevnosti v tlaku	24
2.5. Stanovenie autogénneho zmrštenia	24
2.6. Meranie rozliatia malty.....	25
2.7. Ortuťová intrúzna porozimetria.....	25
2.8. Skenovacia elektrónová mikroskopia.....	25
2.9. Izotermická kalorimetria	26
3. Výsledky a diskusia	27
3.1. Stanovenie prevzdušnenia a stanovenie objemovej hmotnosti.....	27
3.2. Pevnosti v ťahu za ohybu a pevnosti v tlaku	28
3.3. Stanovenie autogénneho zmrštenia	31
3.4. Meranie rozliatia malty.....	34
3.5. Ortuťová intrúzna porozimetria.....	36
3.6. Skenovacia elektrónová mikroskopia.....	39
3.7. Izotermická kalorimetria	42

4.	Záver	44
5.	Literatúra	46
6.	Zoznam použitých skratiek a symbolov	53
7.	Prílohy.....	55

ÚVOD

Betón je jedným z najrozšírenejších stavebných materiálov na svete, pričom tento silikátový materiál je vyrábaný z veľkej miery z portlandského cementu. Portlandský cement zohráva dôležitú úlohu v konštrukčnom materiáli vďaka svojim spojovacím vlastnostiam. Výroba portlandského cementového slinku je energeticky najnáročnejšia etapa výroby cementu, ktorá predstavuje viac ako 90 % celkovej spotreby energie. Približne 5–7 % celosvetových emisií uhlíku pochádza z výroby cementu. Výroba 1 tony portlandského cementu vytvára približne 1 tonu skleníkových plynov a NO_x , a vyžaduje 1,5 ton surovín, ktoré sa získavajú ťažbou z lomu, čo tiež predstavuje veľký zásah do prírody. Cementársky a betonársky priemysel je tretím najväčším spotrebiteľom energie po hliníkovom a oceliarskom priemysle. Výsledkom je, že prírodné zdroje a energie sa postupne vyčerpávajú a pre nás, ako aj budúcu generáciu, sú pre nás veľkou výstrahou. Preto je rozhodujúci čas nájsť alternatívny spôsob výroby betónu alebo nájsť ďalšie spoľahlivé spojivo schopné nahradiť betón z portlandského cementu [73].

Vhodnou alternatívou môžu byť materiály z alkalicky aktivovaného materiálu (AAM). Tieto materiály sa môžu použiť ako doplnok cementu na výrobu trvalo udržateľného betónu alebo na výrobu betónu bez cementu. Alkalicky aktivované materiály sú netradičné cementové materiály, ktorých výskum a následné praktické aplikácie v súčasnosti prechádzajú vývojom. Zvýšený záujem o tieto materiály súvisí predovšetkým so znížením emisií CO_2 , ktoré sú nižšie ako z výroby portlandského slinku. Taktiež väčšina alkalicky aktivovaných materiálov je založená na priemyselnom odpade a druhotných surovinách, ktoré významne prispievajú k šetreniu prírodných zdrojov. Alkalicky aktivované materiály môžu vynikať vo vlastnostiach, ako je vysoká pevnosť a odolnosť [3, 58, 59], nehorľavosť resp. odolnosť voči vysokým teplotám [60, 61, 70], mrazuvzdornosť [62, 63], vodotesnosť [64], nerozpustnosť vo vode a vysoká chemická odolnosť [65], no tieto materiály majú aj niektoré nevýhody, ktoré značne obmedzujú ich praktické použitie. Problémom je ich vysoké autogénne zmrštenie a zmrštenie vysychaním [72].

Možným riešením problému autogénneho zmrštenia a zmrštenia vysychaním by mohlo byť použitie prevzdušňovacích prísad, ktoré stabilizujú tvorbu bublín v AAM, čím menia distribúciu veľkosti pórov. Distribúcia veľkosti pórov ovplyvňuje zmrštenie a aj iné vlastnosti v AAM, a práve preto sa táto práca zaoberá prevzdušňovacími prísadami, a sleduje vplyv prísad na vlastnosti v AAM, no sleduje hlavne vplyv na zmrštenie.

1. TEORETICKÁ ČASŤ

1.1. História alkalicky aktivovaných materiálov

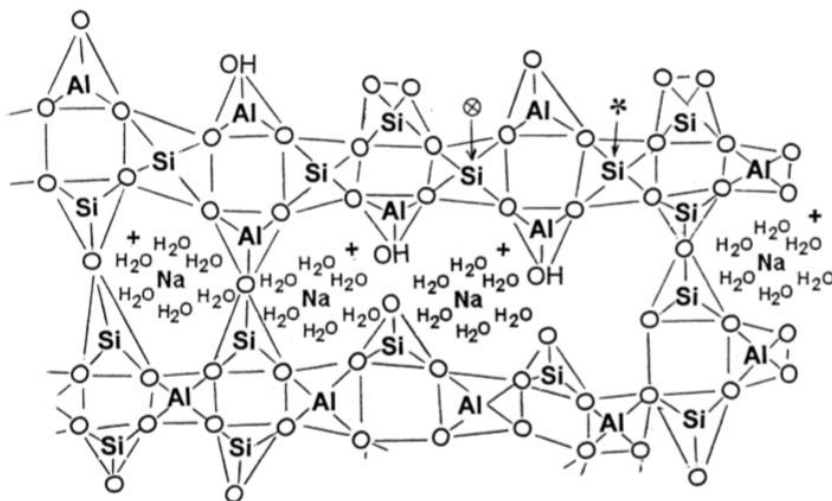
V roku 1908 sa datuje prvý patent opisujúci myšlienku alkalickéj aktivačnej reakcie s pevnými hlinítokremičitanovými prekursorami na vytvorenie pevného materiálu porovnateľného s hydratovaným portlandským cementom. Reakcia bola vytvorená zo sklovitej trosky, alkalicky aktivovaná síranmi a uhličitanmi alkalických kovov a bola patentovaná nemeckým inžinierom Kühlom [1].

V roku 1940 bola vydaná laboratórna štúdia o cementoch bez slinku, ktorú uviedol Purdon. V tejto práci využil rôzne druhy trosky, ktorú aktivoval alkáliami (hydroxid sodný a hydroxid vápenatý) a zistil, že výsledné pevnostné vlastnosti boli porovnateľné s vlastnosťami portlandského cementu. Táto jeho práca viedla k vytvoreniu všeobecného názvu „alkalicky aktivovaný materiál“ [2].

V roku 1957 Glukhovskij, vedec z bývalého sovietskeho zväzu, ako prvý navrhol funkčné spojivo na báze hlinítokremičitanu s nízkym obsahom vápnika a bol aktivovaný roztokom alkalických kovov [3].

V roku 1981 sa uskutočnil najväčší prelom v oblasti alkalickéj aktivácie. Tento prelom dokázal francúzsky profesor Joseph Davidovits, ktorý zaviedol teóriu, podľa ktorej je geopolymér látka, ktorá vzniká anorganickou polykondenzáciou tzv. geopolymérizáciou, kde ^{27}Al NMR spektrum musí obsahovať pík okolo 55 ppm. To znamená, že hliník musí byť v koordinácii 4. Ak táto podmienka nie je splnená, produkt sa preto nemôže nazývať geopolymér, ale alkalicky aktivovaný materiál. Táto veľmi striktná formulácia však zahŕňa iba materiály, ktoré vznikli alkalickou aktiváciou čistého metakaolínu [5]. Davidovits taktiež vyslovil teóriu, že egyptské pyramídy sú vytvorené zo spojiva vyrobeného človekom a nie z prírodného kameňa. Rozbor ktorý spravil, uvádza, že pyramídové bloky sú vytvorené zo zmesi vápencového piesku s hydroxidom vápenatým, uhličitanom sodným a vodou. [3]

Davidovitsov model geopolyméru bol však prekonaný novším Barbarosovým modelom (viz obr. 1). Podľa tohto modelu je štruktúra tvorená tetraédrami SiO_4 a AlO_4 náhodne rozmiestnených pozdĺž polymérnych reťazcov, ktoré sú zosieťované tak, aby poskytovali dostatočne veľké dutiny pre hydratované ióny alkalického kovu kompenzujúce náboj [6].



Obr. 1 Štruktúra alkalicky aktivovaného materiálu podľa Barbarosu [6]

1.2. Alkalicky aktivovaný materiál

Alkalicky aktivované materiály sú anorganické materiály vytvorené reakciou hlinítokremičitanu s alkalickým roztokom. Táto reakcia sa nazýva alkalická aktivácia, pričom táto reakcia prebieha v alkalickom prostredí pri pH vyššom než 12 a následne prebieha polykondenzačná reakcia. Atómy Si a Al sú teda viazané prostredníctvom zdieľaných atómov kyslíka (Si–O–Al). Výsledkom je trojrozmerná (3D) štruktúra, obvykle pozostávajúca z náhodne usporiadaných tetraédrov SiO_4 a AlO_4 . Táto 3D štruktúra má dutiny, v ktorých sú umiestnené solvatované alkalické ióny (Na, K). Alkalické ióny kompenzujú záporný náboj štvormocného hliníku. Produkty alkalickej aktivácie sú obvykle amorfné alebo semikryštalické, a závisí to na charaktere surovín a podmienok reakcie [5, 7].

Alkalicky aktivovane spojiva sa skladajú z dvojzložkových systémov. Jedným z nich je alkalicky aktivátor a druhou je aktivujúca zložka (prekurzor), kde výsledkom reakcie je hydraulický systém, ktorý tuhne a tvrdne po pridaní určitého množstva vody.

Aktivujúce zložky sú latentné hydraulické látky alebo pucolány s bohatým obsahom hlinítokremičitanov v amorfnej fáze. Ak chceme tento materiál komerčne využiť, tak je vhodné aby prekursor bol ekonomicky výhodný a šetrný k životnému prostrediu. Môžu to byť rôzne prírodné práškové materiály alebo vedľajšie priemyslové produkty z energetických a metalurgických prevádzok, ktoré by mali mať správne zloženie s uspokojivou kvalitou a stálosťou [4, 8]. Najbežnejšími a najobľúbenejšími prekursorami sú vysokopecná troska (VPS), popolček a metakaolin [3]. Existuje však aj mnoho ďalších, ktoré majú dobrý potenciál, ale čakajú na hlbšie preskúmanie. Za zmienku stoja aj iné druhy trosiek, ako je troska fosforečná alebo silikomangánová a červený kal, ako vedľajší produkt z výroby hliníku Bayerovým procesom. Ďalej je možné pokračovať s rôznymi druhmi popola, ako je popol z uhlia alebo popol z ryže, a výrobky zo spaľovania kalov alebo odpadového skla alebo keramiky. Nemalo by sa zabúdať ani na prírodné minerály atď [9].

K vytvoreniu AAM je potrebný, už spomínaný alkalický aktivátor. Ako alkalický aktivátor sa používajú hydroxidy a soli alkalických kovov ako sú hydroxid sodný (NaOH), uhličitan sodný (Na_2CO_3), síran sodný a vodné sklo. Uvedené chemikálie sú najpoužívanejšie a najekonomickejšie. Sú to silné alkálie potrebné na aktiváciu hlinítokremičitanového materiálu [3].

Najbežnejšie sa využíva vodné sklo, ktoré je podľa niektorých autorov najúčinnnejším aktivátorom. U vodného skla záleží na koncentrácii roztoku a na tzv. silikátovom module, čo je molárny pomer $\text{SiO}_2 : \text{Me}_2\text{O}$ ($\text{Me} = \text{Na}, \text{K}$). Vodné sklo sa využívalo už v minulosti na výrobu komerčných výrobkov napr. špeciálnych cementov, povlakov, tvarovaných výrobkov a katalyzátorov [10, 11].

Ďalej sa najčastejšie používajú sodné zlúčeniny, tieto zlúčeniny sú najlepšie dostupné a zároveň ekonomicky prijateľné. Sodné ióny napomáhajú rozpúšťaniu skelnej fáze a pri reakcii s alkalicky aktivovaným materiálom sa uvoľní menej tepla ako pri reakcii s draselnými kationmi, ktoré podporujú tvorbu gélu. Zistilo sa, že sodné geopolyméry ktoré majú vysoký pomer $\text{Na}_2\text{O} : \text{Al}_2\text{O}_3$, majú sklony k viditeľným výkvetom [12].

Voľba aktivátoru je z hľadiska vývoja mechanických vlastností jedným z najdôležitejších parametrov pri príprave alkalicky aktivovaných materiálov [13].

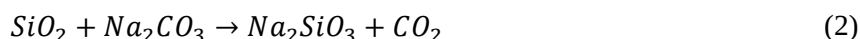
Účinnosť aktivátoru je silne závislá na pH, pretože to riadi počiatočné rozpúšťanie prekursoru a následné kondenzačné reakcie. Phair a van Deventer študovali vplyv rôzneho pH na pevnosť geopolymerného materiálu. Ukázalo sa, že vzorky pri pH 14 mali asi 50× väčšiu pevnosť v tlaku ako pri pH 12. Je to spôsobené tým, že so zvyšujúcim sa pH dochádza k tvorbe krátkych reťazcov oligomérov a monomérnych silikátov, ktoré tak môžu vytvárať geopolymérnu spojivovú fázu [15]. Pri pH menšom ako 11,5 rovnovážna rozpustnosť kremičitanu je nižšia a VPS sa nerozpúšťa [14]. S rastúcim pH rozpustnosť vápniku klesá, zatiaľ čo rozpustnosť hlinítokremičitanu rastie. Hoci majú roztoky NaOH výrazne vyššie pH, než vodné sklo pri obdobnej koncentrácii, v oboch prípadoch zreaguje porovnateľné množstvo trosky, pričom vodným sklom aktivované systémy dosiahnu vyšších tlakových pevností. To je dané príspevkom kremičitanových jednotiek vo vodnom skle, ktoré môžu reagovať s vápenatými iónmi za tvorby CASH fáze [8].

V ďalšej časti práce je teoretická časť zameraná na alkalickú aktiváciu vysokopecnej trosky a alkalickéj aktivácie pomocou vodného skla, z dôvodu použitia týchto surovín v experimentálnej časti.

1.3. Vodné sklo ako alkalický aktivátor

Vodné sklo je pojem, ktorý predstavuje koloidný roztok kremičitanových zlúčenín alkalických kovov definovaných všeobecným vzorcom $M_2O \cdot nSiO_2$. Variabilita koeficientu n spôsobuje rozdiely vo vlastnostiach a priemyselnom využití vodného skla. Vodné sklo je typická alkalická soľ, pretože je vytvorená reakciou silnej báze a slabej kyseliny [3].

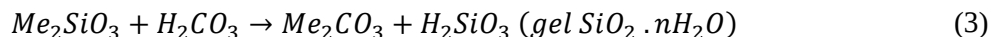
Výroba vodného skla spočíva v tom, že kremičitý piesok sa roztaví s bezvodým alkalickým uhličitanom pri teplote cca 1400 °C podľa rovnice:



Pomer SiO_2 a uhličitanu v násade sa riadi tým, aký pomer $SiO_2 : Na_2O$ resp. $SiO_2 : K_2O$ má mať výsledný produkt. Tento pomer sa nazýva silikátový modul (M_s), ktorý dokáže charakterizovať roztok kremičitanu sodného resp. draselného [10]. M_s bežne používaných vodných skiel sa zvyčajne pohybuje v rozmedzí od 1,6 do 4,1. Kvapaliny z vodného skla mimo tohto rozsahu majú obmedzenú stabilitu a nemajú praktické využitie v priemysle [16].

Hustota, viskozita a hodnota pH sú ďalšie dôležité parametre charakterizácie. Hustota nám poskytuje informácie o koncentrácii roztoku a zložení šarže skla. Vodné sklo je nenewtonská kvapalina. Jeho viskozita závisí od koncentrácie a M_s (viskozita sa zvyšuje s vyšším silikátovým modulom alebo klesajúcou teplotou). Posledný parameter je pH, ten je funkciou chemického zloženia a koncentrácie vodného skla [4, 10].

Vodné sklo vplyvom reakcie so vzdušným CO_2 , resp. H_2CO_3 sa na vzduchu vytvrdzuje. Pri tejto reakcii dochádza k tvorbe kremičitého gélu a príslušného alkalického uhličitanu podľa reakcie:



Využitie vodného skla je rôzne, bežne sa používa ako spojivo pri výrobe slievarenských foriem, nachádza využitie v stavebníctve, chemickom, papierenskom a potravinárskom priemysle pri konzervácii vajec a pri spracovaní tuku [10]. Samozrejme v tejto práci sa vodné sklo využije ako aktivátor pre alkalickú aktiváciu vysokopecnej trosky. Vodné sklo je výborný aktivátor vďaka obsahu rozpustených kremičitanov a už dávno zverejnené publikácie uvádzajú najlepšie výsledky pevnosti v tlaku získane z malty z alkalicky aktivovanej vysokopecnej trosky aktivovanej roztokom vodného skla [17].

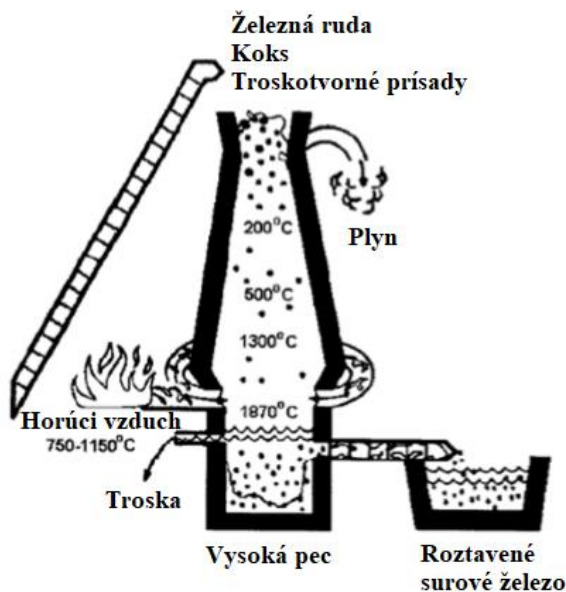
1.4. Vysokopecná troska ako materiál pre alkalickú aktiváciu

Na prípravu AAM môžeme využiť veľkoobjemovo produkované priemyselné druhotné suroviny, ako napríklad vysokopecnú trosku, ktorá je už dnes dobre známa ako pucolánová alebo latentne hydraulická látka pridávajúca sa do cementu. Toto využitie súčasne prináša ekonomické a ekologické výhody, preto nie je potreba hľadať vhodné prírodné suroviny [18].

1.4.1. Výroba vysokopecnej trosky

Vysoká pec je vysoká stavba v rozmedzí 25–40 m, ktorá slúži na výrobu surového železa. Do vysokej pece sa pridáva železná ruda, koks a prímеси, ktoré sa tavia a dochádza k redukcii železnej rudy. Pre odstránenie nežiadúcich látok zo železnej rudy sa pridávajú troskotvorné prísady a taktiež tieto prísady pomáhajú predchádzať oxidácii roztaveného železa. Medzi troskotvorné prísady patria napríklad vápenec a dolomit. Počas premeny železnej rudy na železo sa vytvára roztavená kvapalná troska, ktorá obsahuje prevažne kremičitany a hlinítokremičitany vápniku a ďalšie bázy, ktoré plávajú na povrchu roztaveného železa pomocou rozdielu hustôt a roztavené surové železo klesá ku dnu [19]. Roztavená troska má špecifickú hmotnosť okolo 2 800 kg/m³, pri čom surové železo má asi okolo

7 000 kg/m³ [20]. Roztavená troska sa odoberá od tekutého kovu a chladí sa. Túto schému výroby vysokopecnej trosky zobrazuje obr. 2.



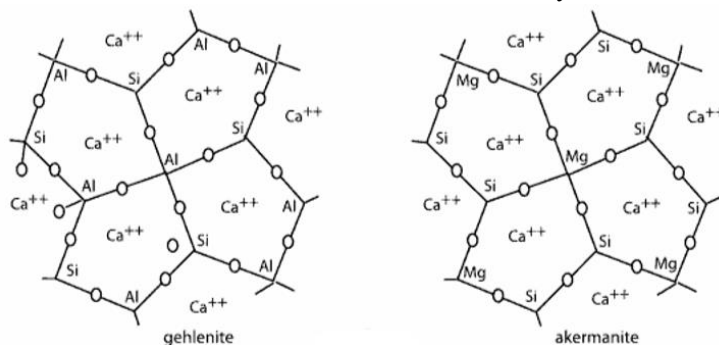
Obr. 2 Schéma vysokej pece a tvorba vysokopecnej trosky [20]

1.4.2. Typy vysokopecnej trosky

Chemické vlastnosti vysokopecnej trosky sú tesne späté s ich chladením, jednoducho povedané, chladiace podmienky určujú vnútornú štruktúru, hustotu a pórovitosť trosky. Rozlišujú sa tri typy trosiek, ktoré sú závislé od spôsobu chladenia po odobratí od tekutého surového železa, a to: chladené vzduchom, expandované a granulované [19, 23].

Troska chladená vzduchom je chladená pomaly, a pri tomto spôsobe chladenia vznikajú stabilné kryštalické Ca–Al–Mg silikáty. Pomaly chladená troska nemá takmer žiadne hydraulické vlastnosti, preto ju nemôžeme využiť v spojivových systémoch, ale môže byť použitá ako podkladová vrstva vozoviek alebo ako kamenivo napríklad do betónu alebo asfaltu.

Veľmi rýchlym ochladením troskovej taveniny vzniká tzv. granulovaná troska. Granulovaná troska je klasifikovaná ako latentná hydraulická látka, ktorá má amorfnú štruktúru a preto sa dá použiť ako hydraulické spojivo pre cementy, betóny, ale aj AAM. Granulovaná troska sa po ochladení podrobuje sušeniu a mletiu, čo vedie k zvýšeniu reaktivity. Rozomletá granulovaná vysokopecná troska sa komerčne používa ako doplnková látka do portlandského cementu [3]. Chemické zloženie granulovanej trosky sa skladá hlavne z CaO–SiO₂–MgO–Al₂O₃ systému a možno ju opísať ako zmes fáz pozostávajúcich z gehlenitu (2CaO·Al₂O₃·SiO₂) a akermanitu (2CaO·MgO·2SiO₂), rovnako tak ako depolymerizované kalcium aluminosilikátové sklo [22]. Štruktúru týchto fáz zobrazuje obr. 3.



Obr. 3 Štruktúra fáz gehlenitu a akermanitu [22]

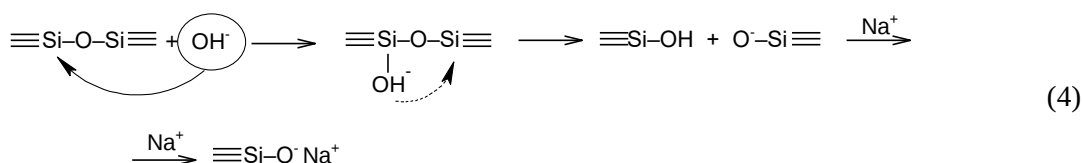
Ak je trosková tavenina vymršťovaná do vzduchu špeciálnym kotúčom tak, že k chladeniu trosky dochádza kombináciou vody a vzduchu, v tom prípade má ochladená troska podobu viac menej sférických peliet a je obvykle označovaná ako peletizovaná alebo expandovaná troska. Všeobecne sa

používa pre výrobu ľahkých betónových blokov (s vylepšenou odolnosťou voči ohňu, zvukotesnosťou...) a muriva. Môže byť tiež použitá ako prísada do portlandského cementu [20, 24].

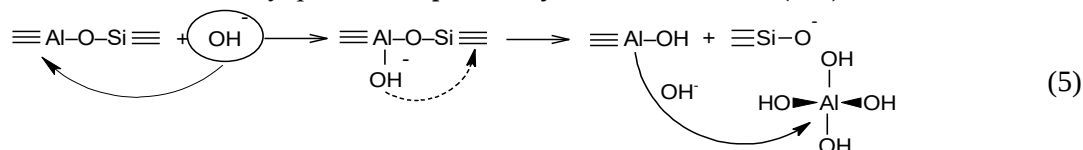
1.4.3. Alkalická aktivácia vysokopecnej trosky a jej hydratácia

Alkalická aktivácia VPS je komplexný proces, pri ktorom prebieha reakcia medzi prekursorom a alkalickým aktivátorom s vysokým pH. Alkalická aktivácia VPS je opísaná ako heterogénny proces pozostávajúci z viacerých krokov. Najprv dochádza k rozpúšťaniu skelnej fáze, čím sa rozruší pôvodná štruktúra, a následne dochádza nukleácii a rastu pevných hydratačných produktov. Na fázovom rozhraní novovytvorených fáz dochádza k interakciám a mechanickému spájaniu. Ďalej pokračujú reakcie pri ktorých sa uplatňujú chemické rovnováhy a difúzie reaktantov cez už vytvorenú vrstvu hydratačných produktov [2, 25].

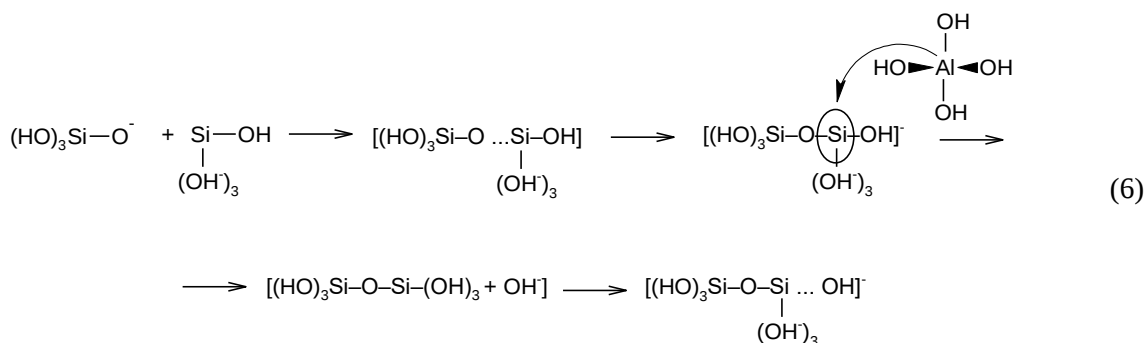
V prvom kroku podľa rovnice (4) teda dochádza k rozpúšťaniu skelnej fáze pri vysokom pH, čiže za prítomnosti OH^- iónov z alkalického aktivátoru. OH^- ióny spôsobujú prerušenie väzby Si-O-Si , Al-O-Al , Al-O-Si a dochádza k hydrolyze respektíve tvorbe silanov ($-\text{Si-OH}$) a sialátov ($-\text{Si-O}^-$), pričom prítomný alkalický kation neutralizuje negatívny náboj a vytvára $-\text{Si-O}^- \text{Na}^+$.



Ióny OH^- taktiež ovplyvňujú väzby Si-O-Al (5) rovnakým spôsobom ako väzby Si-O-Si a tvoria rozpustené a zložené zlúčeniny, prevažne v podobe hydroxohlinitanov $\text{Al}(\text{OH})_4^-$.



V druhom kroku dochádza k akumulácii iónových zlúčenín a dochádza ku polykondenzácii. Monoméry oxidu kremičitého interagujú za vzniku dimérov, ktoré ďalej reagujú s ďalšími monomérmi za vzniku polymérov (viz. reakcia 6). Túto fázu katalyzujú OH^- ióny. Hlinitan sa rovnako zúčastňuje polymerizácie, pričom izomorfne nahrádzajú kremíkové tetraédry. Kým v prvom kroku alkalický kov katalyzoval reakciu, tak v druhom už pôsobí ako štruktúrna zložka [26].



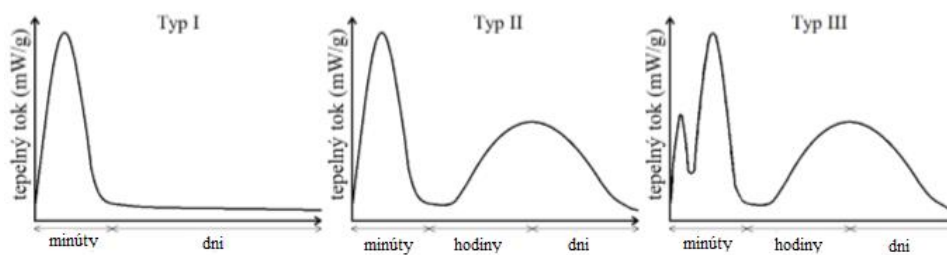
Alkalická aktivácia taktiež závisí na použitom aktivátore, túto skutočnosť sledovali Shi a Day [27] a opísali VPS v troch modeloch. Kalorimetrické krivky týchto modelov sú vidieť na obr. 4.

Prvý model je definovaný ako systém bez alkalického aktivátora a v grafe sa zobrazuje ako jediný počiatočný pík behom prvých minút hydratácie. Je to systém ktorý obsahuje napríklad VPS vo vode alebo v roztoku Na_2HPO_4 pri teplote 25 alebo 50 °C. Jediný počiatočný pík vývoja tepla, ktorý je viditeľný patrí k rozpúšťaniu troskových častíc a nezaznamenávajú sa žiadne ďalšie píky. Preto produkt obvykle nepodlieha tuhnutiu a tvrdnutiu. Reakcia troskových častíc s vodou vedie k narušeniu povrchových väzieb Si-O , Al-O , Mg-O a Ca-O v dôsledku polarizačných účinkov OH^- iónov. Keďže väzby Ca-O a Mg-O sú oveľa slabšie ako väzby Si-O a Al-O , preto Ca a Mg lepšie prenikajú do vody ako Si a Al, a na troskových časticách sa vytvárajú vrstvy bohaté na Si-Al. Vrstva Si-Al

dokáže adsorbovať určité množstvo H^+ iónov, čo vedie k zvýšeniu hodnoty OH^- iónov resp. pH roztoku. Avšak táto hodnota pH roztoku je stále na toľko nízka, že nedokáže pretrhnúť väzbu Si–O a Al–O pre vytvorenie hydratačného produktu CSH, CAH alebo CASH [3, 27].

Druhý typ modelu je typický pre VPS alkalicky aktivovanú pomocou NaOH pri teplote 25 a 50 °C. Ako vidieť z obr. 4 kalorimetrická krivka má dva píky, rovnako ako pri hydratácii bežného portlandského cementu. V predindukčnej perióde sa nachádza viditeľný počiatkový pík a v poindukčnej perióde sa nachádza jeden zrýchlený hydratačný pík. Poloha a veľkosť týchto píkov je ovplyvnená dávkou aktivátora a teplotou hydratácie. Roztok NaOH má vysokú koncentráciu OH^- iónov a po zmiešaní s VPS dokáže pretrhnúť Ca–O, Mg–O a rovnako aj Si–O a Al–O. To vedie k rýchlemu vyzrážaniu CSH, CAH a CASH z roztoku v podobe tenkých vrstiev, a $Ca(OH)_2$ zostáva v roztoku z dôvodu vysokej rozpustnosti [27].

Posledný typ kriviek obsahuje dva píky v predindukčnej perióde a jeden zrýchlený hydratačný pík v poindukčnej perióde. Vzájomná veľkosť týchto píkov sa môže líšiť v závislosti na type aktivátora a teplote pri hydratácii. Tomuto tretiemu typu modelu odpovedá troska aktivovaná pomocou kremičitanu sodného (Na_2SiO_3) pri teplote 25 °C, Na_3PO_4 pri teplote 50 °C a NaF pri teplote 25 a 50 °C. Vzhľadom k tomu, že sú v tomto prípade dva počiatkové píky veľmi blízko u seba, môže dôjsť v závislosti na dávke aktivátora, vlastnostiam trosky a teplote k ich zlúčeniu. Tento úkaz bol pozorovaný pri hydratácii trosky aktivovanej pomocou Na_2SiO_3 pri teplote 50 °C. Spomínaný aktivátor patrí do posledného typu modelu a dochádza ku tvorbe CSH gélu z aniónovej skupiny $(SiO_4)^{4-}$ pochádzajúcej z aktivátora, a Ca^{2+} iónov uvoľnených z trosky. Pri aktivácii Na_3PO_4 sa vytvára $Ca_3(PO_4)_2$ [3, 27].



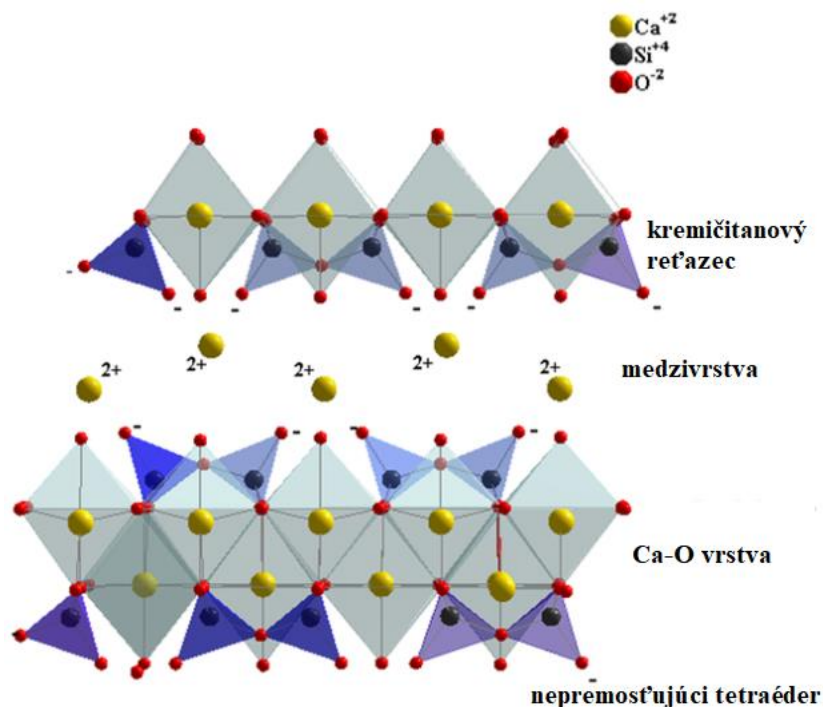
Obr. 4 Kalorimetrické krivky troch modelov hydratácie VPS [27]

1.4.4. Hydratačné produkty alkalicky aktivovanej trosky

Hlavným hydratačným produktom alkalicky aktivovanej trosky je amorfný alebo semikryštalický CSH gél resp. CASH gél. Štruktúra tohto gélu je odvodzovaná od neusporiadanej tobermoritickej štruktúry. Samozrejme tvorba hydratačných produktov závisí na type alkalického aktivátora [28]. Ďalším možným produktom alkalicky aktivovanej trosky je hydrotalcit ($Mg_6Al_2CO_3(OH)_{16} \cdot 4H_2O$), ktorý sa vytvára jak pri alkalickí aktivácii hydroxidom, tak i vodným sklom. Obsah oxidu železitého v troske napomáha vytvárať nízku kryštalickú fázu, ako sú hydrogranáty s približným zložením $C_6AF_2H_8$. Minoritná fáza C_4AH_{13} sa vytvára z VPS s vysokým obsahom CaO a nízkym Al_2O_3 aktivovaný kremičitanom sodným. $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCO_3 \cdot 12H_2O$ sa vytvára z trosky aktivovanej uhličitanom sodným, a C_4AH_{13}/C_2ASH_8 sa vytvára z trosky aktivovanej pomocou NaOH, pričom tieto fázy môžu koexistovať vedľa hlavného CASH gélu [3].

Ako sa vyššie spomínalo, CASH gél má neusporiadanú tobermoritickú štruktúru. Podobnú štruktúru gélu vytvára bežný hydratovaný portlandský cement, ale s menším množstvom Ca a väčšou substitúciou Al v tetraédroch. Tobermoritická štruktúra sa skladá z vrstvy CaO mnohostenov, ktoré sú vložené medzi dva kremičitanové reťazce. V medzivrstve sú taktiež prítomné ióny Ca^{2+} , OH^- a molekuly H_2O . Ideálna štruktúra tobermoritu je tvorená dlhými lineárnymi reťazcami kremičitanových tetraédrov, pričom tieto reťazce sú tvorené sekvenciami troch silikátových tetraédrov, kde dva sú spojené cez kyslíky k medzivrstve a tretí premost'ujúci tetraéder má nezdieľaný atóm kyslíku. Oproti dokonalej štruktúre tobermoritu, kde sú kremičitanové reťazce nekonečne dlhé sa CSH gél vyznačuje defektami, pričom premost'ujúce tetraédry často chýbajú a tak majú kremičité reťazce krátku dĺžku, viz obr. 5 [29]. V prípade CASH gélu, kde sú prítomné hlinitanové tetraédry, tak

dochádza ku začleňovaniu hlinitanových tetraédrov do štruktúry a predstavujú premostujúce tetraédry, čo vedie k predĺženiu lineárnych reťazcov, a zároveň dochádza k možnému náhodnému medzireťazcovému spájaniu (zosieťovaniu) cez Si–O–Al väzby, kde výsledkom je CASH gél [30]. Keďže dochádza nahradzovaniu kremičitanových tetraédrov za hlinitanové, preto je nutné kompenzovať vzniknuté nábojové zmeny sodnými iónmi [31].



Obr. 5 Schematický diagram štruktúry CSH gélu založený na tobermoritickej štruktúre [32]

1.5. Problémy alkalicky aktivovanej trosky

Alkalicky aktivovaná troska môže vynikať vo vlastnostiach, ako je vysoká pevnosť a odolnosť [3, 58, 59], nehorľavosť resp. odolnosť voči vysokým teplotám [60, 61, 70], mrazuvzdornosť [62, 63], vodotesnosť [64], nerozpustnosť vo vode a vysoká chemická odolnosť [65].

Vedľa týchto zaujímavých vlastností, tento systém má aj negatívne vlastnosti. Je to predovšetkým tvorba výkvetov [3, 66], ktoré znehodnocujú povrch výrobku. Ďalšou negatívnou vlastnosťou je značné zmrštenie [2, 3, 67, 68], ktoré je dokonca väčšie ako u portlandského cementu. Zmrštenie malty znamená, že pri konštantnej teplote dochádza zmenšeniu objemu bez vonkajšieho zaťaženia. Všeobecne je zmršťovanie betónu príčinou vzniku porúch betónových konštrukcií, zníženie ich pevnosti a zároveň ich životnosti. Zmršťovanie rozdeľujeme na autogénne zmršťovanie, plastické zmršťovanie, zmršťovanie vplyvom karbonatácie a zmršťovanie vysychaním [3].

K autogénnemu zmršteniu dochádza v prípade, že je zabránené výmene vody medzi betónom a okolím, teda keď je malta izolovaná od vonkajšieho prostredia. Pri tomto jave dochádza k objemovým zmenám, ktoré sú následkom toho, že výsledný hydratovaný produkt má menší objem, než začiatkové reaktanty [36].

Zmrštenie vysychaním má najväčší vplyv na výsledné vlastnosti AAM. Tento typ zmrštenia je založený na výmene vody medzi maltou a okolitým prostredím, a závisí na mnohých faktoroch. Faktory ako vlhkosť prostredia, zloženie malty, množstva výstuže, tvaru maltového prvku alebo doby, po ktorej je betón vystavený prostrediu s nízkou vlhkosťou. Vysychanie malty je dôsledkom odparovania časti vody obsiahnutej v spleti kapilár, ktoré sú spojené s povrchom malty. Toto odparovanie smeruje k vyrovnaniu relatívnej vlhkosti v kapilárach a v okolitom prostredí. Najskôr z betónu odchádza voda obsiahnutá vo veľkých kapilárach blízko povrchu betónu, pretože je viazaná najmenšími kapilárnymi silami. Čiže póry s väčšími rozmermi začnú po chvíli obsahovať vzduch, no naproti tomu póry s menším polomerom sú zaplnené kvapalnou vodou. Táto voda ktorá sa nachádza medzi vrstvami CSH gélu vytvára v póroch meniskusy, a tým sa vytvára kapilárne napätie a pri vysychaní tak dôjde k zmršteniu [33, 40]. Tvorba meniskov neplatí len pre zmrštenie vysychaním, ale platí aj pre autogénne zmrštenie. U autogénneho zmrštenia podľa [41] dochádza k objemovým zmenám vplyvom vnútornej spotreby vody, pričom táto spotreba vody je spôsobená hydrataciou trosky, a dochádza k postupnému vysychaniu pórov v systéme a tvorbe meniskusov, čo vedie k zmršťovaniu.

Kapilárne napätie alebo kapilárny tlak p_c je dané tlakovým rozdielom medzi kvapalnou fázou p_l a plynnou fázou p_v , ale taktiež môže byť vyjadrené cez polomer zakrivenia κ a povrchové napätie γ [41], viz. rovnica (7). V prípade guľovitého tvaru menisku a dobre zmáčanej steny póru (uhol zmáčania je blízky hodnote nula), je možné zahrnúť polomer póru r v rovnici, viz. rovnica (7). Kapilárne napätie v menisku je tým väčšie, čím menšia je veľkosť pórov a výsledné zmrštenie je teda vyššie, a zároveň kapilárne napätie v menisku je tým nižšie, čím menšie je povrchové napätie a výsledné zmrštenie je teda nižšie.

$$p_c = p_l - p_v = \kappa\gamma = -2\gamma/r \quad (7)$$

Všeobecne maltový materiál je veľmi porézny a obsahuje širokú distribúciu veľkosti pórov od makropórov (50–5000 nm [44]) cez mezopóry (2–50 nm [44]) až po mikropóry (< 2 nm [44]). Kapilárne póry obsahujú mezopóry a makropóry, a tvoria vodou vyplnený priestor existujúci medzi pôvodnými cementovými zrnami, zatiaľ čo mikropóry tvoria súčasť gélovej zložky hydrátu kremičitanu vápenatého. Už vyššie spomínaný mechanizmus zmršťovania vysychaním za praktických podmienok závisí od straty vody z mezopórov a tiež od veľkosti makropórov, čo určuje, ako ľahko sa môže z mezopórov stratiť voda [69]. Materiály obsahujúce alkalicky aktivovanú vysokopecnú trosku majú menej poréznu štruktúru, než portlandský cement, a taktiež majú oveľa väčší podiel veľkosti pórov v oblasti mezopórov, v ktorej sa iniciuje kapilárny tlak, preto u nich dochádza k väčšiemu zmršteniu [3, 69].

Táto práca sa zaoberá prevzdušňovacími prísadami, ktoré menia distribúciu veľkosti pórov materiálu z alkalicky aktivovanej trosky (AAS), vďaka ktorému by mohlo poklesnúť kapilárne napätie v menisku resp. poklesne povrchové napätie vody v póroch, a práve preto jednou zo stanovených cieľov je sledovať zmenu distribúcie veľkosti pórov v AAS, a sledovať jej vplyv na zmrštenie.

1.6. Vzduchové prevzdušňovanie

Vzduchové prevzdušňovanie je zámerne vytvorenie malých vzduchových bublín rozdistribuovaných v betóne. Bublíny sa vytvárajú prídavkom prevzdušňovacej prísady do betónu, čo je v podstate povrchovo aktívna látka. Povrchovo aktívne látky umožňujú tvorbu malých uzavretých a dobre dispergovaných pórov v betóne, ktoré dosahujú veľkosti v priemere 10 až 500 mikrometrov. Vzduchové bubliny sa vytvárajú počas miešania s betónom ešte v plastickom stave, a po vytvrdnutí sa tieto bubliny stávajú súčasťou vytvrdnutého betónu. Primárnym cieľom týchto prísad je zvýšenie trvanlivosti vytvrdneného betónu, najmä v klimatických podmienkach, kde musí odolávať nízkym teplotám (mrazuvzdornosť). Sekundárny dôvod je zvýšenie spracovateľnosti betónu v plastickom stave [34].

Napriek tomu, že vytvrdený betón je pevný, tak v skutočnosti je vysoko pórovitý a má malé kapiláry, ktoré sú výsledkom vyparovania vody nespotrebovanej na hydratáciu. Všetky cementové častice potrebujú na hydratáciu vodu v určitom pomere voda : spojivo. Pri použití vody nad rámec požadovaného pomeru, pridávame nadbytočnú vodu, ktorá nám zlepšuje tok resp. znižuje viskozitu a tým zlepšuje spracovateľnosť. Nadbytočná voda, ktorá nereaguje s časticami spojiva sa vyparuje a zanecháva malé kapilárne dutiny alebo póry. Postupom času tieto dutiny a póry môžu byť zaplnené dažďovou vodou alebo vodou z prostredia. Počas pôsobenia mrazivých teplôt sa voda obsiahnutá v týchto póroch rozširuje až o 9 % objemu. Zmeny objemu vody v ľad vyvíja vnútorný tlak vo vnútri betónu, ktorý prevyšuje jeho pevnosť v ťahu, čo spôsobuje praskanie, odlupovanie a eventuálne rozpad. Vzduchové bubliny vzniknuté prevzdušňovacími prísadami poskytujú reliéfny systém pre vnútorný tlak ľadu tým, že poskytujú vnútorné dutiny na prispôbenie objemovej expanzie spôsobenej zmrznutou vodou [34, 36]. V prípade pôsobenia mrazivých teplôt na spojivo, ktoré obsahuje vzduchové bubliny, tak dochádza miernemu stlačeniu týchto bublín, čím sa zníži alebo absorbuje napätia spôsobené mrazom [35]. Preto prevzdušnený betón je schopný veľmi dobre odolávať pôsobeniu mrazu a rozmrazovacích solí. Ukázalo sa, že prevzdušnený betón je mrazuvzdorný aj po 350–400 zmrazovacích cykloch, pričom referenčný neprevzdušnený betón vydržal iba 60 cyklov [36]. Vysoký obsah vzduchu však nestačí k zaisteniu správnej odolnosti proti účinkom mrazu. Vzduchové bubliny musia byť dostatočne u seba, ale aj dostatočne od seba. Je potrebné, aby vzduchové bubliny boli dostatočne u seba, aby sa zaistilo vnútorné napätie nižšie než je pevnosť malty. Základným parametrom pre zaistenie účinnosti ochrany poskytovanej sieťou vzduchových bublín je faktor rozostupu. V prípade betónu z portlandského cementu (OPC) by mal byť tento rozostupový faktor menší ako 500 μm , aby sa zabránilo vnútornému praskaniu, a väčší ako 200 μm , aby sa zabránilo zmene veľkosti povrchu. Účinnosť prevzdušňovacích prísad v AAM je však stále v štádiu vývoja [4].

Taktiež tieto prevzdušňovacie prísady kladne prispievajú k spracovateľnosti tým, že pôsobia ako lubrikant pre všetky agregáty a veľké častice obsiahnuté v spojivej zmesi [35].

Pridávanie vzduchového prevzdušnenia sa zaviedlo v tridsiatych rokoch minulého storočia, keď sa zistilo, že niektoré diaľničné úseky sú odolnejšie proti účinkom mrazu ako ostatné. Štúdiá ktorá bola vykonaná na týchto diaľničných úsekoch zistila, že použitý cement na diaľnici bol mletý s hovädzím lojom, ktorý sa použil ako mlecie činidlo. Hovädzí loj bol neúmyselným prídavkom, ktorý fungoval ako prevzdušňovacia prísada. Preto dnes najmodernejšie betóny, ktoré sú vystavované mrazivým teplotám obsahujú práve prevzdušňovacie prísady [34].

Vytvrdené spojivo s prídavkom prevzdušňovacej prísady obsahuje aj zachytený vzduch. Bublíny zachyteného vzduchu sú väčšie, ako bubliny vytvorené prevzdušňovacou prísadou, sú nestabilné, spájajú sa za vzniku hrubších bublín a taktiež sú nerovnomerne rozdistribuované. Preto účinok

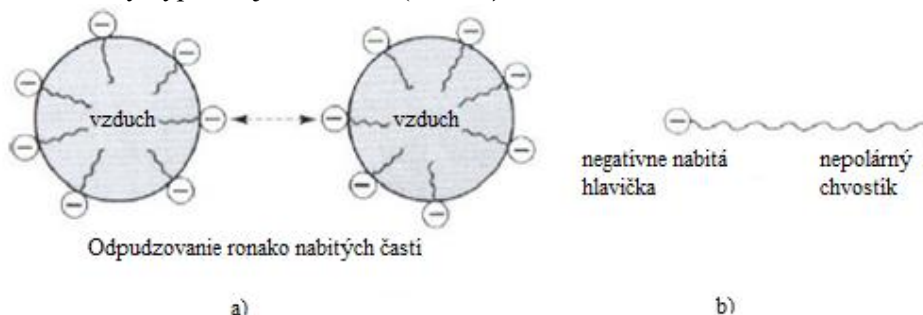
zachyteného vzduchu nemá pozitívny prínos na pevnosť, trvanlivosť a je nežiadúci. Správnymi vibračnými technikami nežiadúci vzduch možno odstrániť [35, 36].

Pre svoju prekvapujúcu trvanlivosť sa prevzdušnený betón hodí najmä pre konštrukcie dopravných stavieb ako sú mostné piliere, rímsy alebo protihlukové steny, letiskové plochy a vôbec pre všetky obalové betóny masívnych konštrukcií, ktoré sú vystavené poveternostným účinkom. Tento druh betónu sa tiež používa na výstavbu vodných elektrární, mostov a iných stavieb, ktoré prichádzajú do kontaktu so silným prúdom vody [36, 39].

Prítomnosť drobných vzduchových bublín v prevzdušnenom betóne má za následok zníženie nasiakavosti betónu. Príčinu treba hľadať v okolnosti, že každá vzduchová bublina pretína celý rad jemných kapilárnych kanálikov, čím sa lokálne zväčšuje ich priemer. Vzhľadom na to, že vztlínalosť kvapaliny v kapiláre je nepriamo úmerná priemeru kapiláry, toto lokálne zväčšenie priemeru kapilár má pochopiteľne za následok podstatné zníženie nasiakavosti prevzdušneného betónu. Zlepšená vodotesnosť prevzdušneného betónu sa uplatní práve už pri spomínaných vodných stavbách, vystavených účinku agresívnych vôd [37].

1.6.1. Prevzdušňovacie prísady

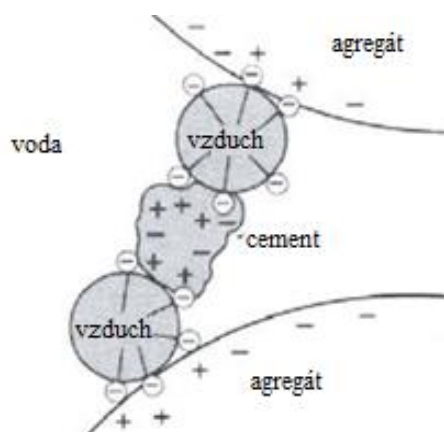
Prevzdušňovacie prímеси obsahujú povrchovo aktívne, amfifilné látky, ktoré pôsobia na rozhraní vzduch-voda v cementovom pastách, čím sa stabilizuje zachytený vzduch počas miešania vo forme malých oddelených bublín. Sú charakteristické tým, že obsahujú nepolárny hydrofóbny uhl'ovodíkový reťazec, ktorý je zakončený hydrofilnou, polárnou skupinou (obr. 6b). Typické polárne skupiny sú karboxylové alebo sulfónové skupiny. Tieto prísady sa obvykle používajú vo forme sodnej soli, pričom ionizovaná polárna skupina sa orientuje do vodnej fázy, zatiaľ čo uhl'ovodíkový reťazec smeruje do vnútra bubliny vyplnenej vzduchom (obr. 6a) [37].



Obr. 6 a) Orientácia povrchovo aktívneho činidla na povrchu vzduchovej bubliny a b) aniónové prevzdušňovacie činidlo (najviac používané) [37]

Pri miešaní malty sa povrchové napätie vody znižuje, čo uľahčuje tvorbu bublín. Každá bublina má rovnako nabitý plášť, čo vedie ku vzájomnému odpudzovaniu a tým sa zamedzuje zrastaniu do väčších bublín (viz obr. 6a). V maltách tento povrchový náboj spôsobuje, že stabilizované bubliny priľnú ku opačne nabitým zónam na cemente a agregovaných časticiach. Celkovým efektom je tvorba určitého prepojenia cez „most“ typu agregát-vzduch-cement-vzduch-agregát, čo zlepšuje súdržnosť zmesi a stabilizáciu systému vzduchových dutín, viz obr. 7.

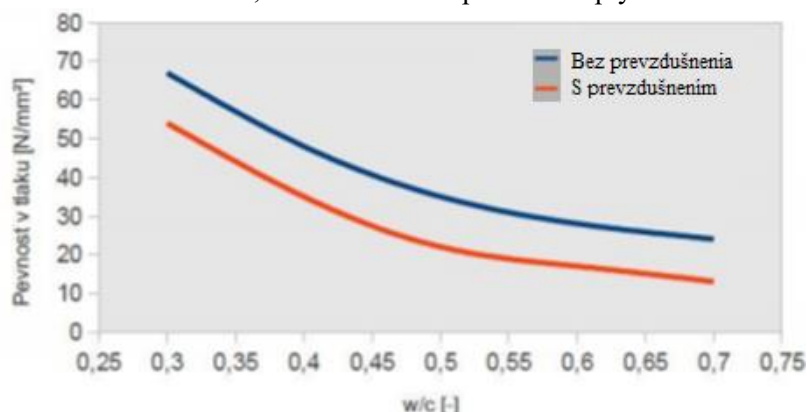
Je zrejmé, že takýto systém by umožnil relatívne voľný pohyb v strihu so stabilizovanými vzduchovými bublinami, ktoré by pôsobili ako stlačiteľné ložiská. Zlepšuje sa tak súdržnosť a spracovateľnosť zmesi [37].



Obr. 7 Mechanizmus, pomocou ktorého zachytené vzdušné bubliny zostávajú v malte stabilné [37]

Dôležité je, aby prevzdušňovacia prísada bola účinná už pri použití vo veľmi malom množstve, a aby nezhoršovala niektoré iné vlastnosti betónov. Vzhľadom na to, že povrchovo aktívne látky s peniacimi vlastnosťami sú organickými látkami, požiadavka vysokej účinnosti prevzdušňovacej prísady je vonkoncom nevyhnutná, keďže privádzanie organických substancií do betónu v podstate všeobecne zhoršuje proces tuhnutia a tvrdnutia betónu a aj iné jeho vlastnosti (napr. objemovú stálosť, pevnosť atď.) [36, 38].

Vyšší obsah vzduchu vo stvrdnutom betóne znižuje pevnosť cementového spojiva zvyšovaním jeho pórovitosti, tým pádom bude znížená aj súdržnosť medzi cementovým spojivom a kostrou betónu, teda kamenivom. Tento vplyv prevzdušňovacích prísad je redukovaný prídavkom plastifikačných prísad. Dochádza k zníženiu vodného súčiniteľa, teda k zvýšeniu pevnosti betónu, ako možno pozorovať na obr. 8 [36]. Collepardi [36] uvádza, že vnesením pórov prevzdušnením do štruktúry betónu sa pevnosť betónu v tlaku zníži až o 20 % oproti betónu bez prevzdušnenia. Taktiež Aitcin [40] uvádza, že v rozsahu od 4 do 6 % prevzdušnenia sa zvýšením obsahu vzduchu o 1 % zníži pevnosť v tlaku o 4 až 6 %. Je teda zrejmé, že s rastúcim obsahom vzduchu vo vytvrdnutom betóne klesá nie len pevnosť v tlaku, ale i modul pružnosti (statický aj dynamický). Práve preto treba, aby prevzdušňovacia prísada bola účinná aj v takom malom množstve, ktoré nemôže nepriaznivo vplývať na vlastnosti betónu.



Obr. 8 Vplyv obsahu vzduchu na pevnosť v tlaku malty [36]

Ďalšou špeciálnou požiadavkou na prevzdušňovaciu prísadu je účinnosť v pomerne silne alkalickom prostredí, lepšie povedané, v prostredí nasýteného roztoku Ca(OH)_2 , ktoré sa pri hydratácii spojiva vytvára. Toto predpokladá určitú, aspoň dočasnú stálosť povrchovo aktívnej látky, ktorá by sa mala použiť ako prevzdušňovacia prísada v roztokoch solí alkalických zemín a špeciálne v roztoku Ca(OH)_2 . Ďalej by mala prevzdušňovacia prísada mať dispergačné vlastnosti a taktiež plastifikačné účinky. Z hľadiska výroby prevzdušňovacej prísady je veľmi dôležitou požiadavkou jednoduchosť a lacnosť jej prípravy, bez potreby väčších investícií.

1.6.2. Rozdelenie a druhy prevzdušňovacích prísad

Prevzdušňovacie prísady môžeme kategorizovať do piatich kategórií založených na infračervenej analýze [41]:

- 1) alfa olefin sulfonáty
- 2) benzén sulfonáty
- 3) živice a mastné kyseliny
- 4) vinsolová živica
- 5) kombinácie (povrchovo aktívne látky, močovina, talový olej a iné)

Kategorizácia založená na chemickom zložení hydrofilnej hlavičky prevzdušňovacej prísady [41]:

- 1) Aniónové
- 2) Katiónové
- 3) Amfotérne
- 4) Neiónové

Máme len obmedzený počet organických zlúčenín, ktoré sú vhodné na použitie ako prevzdušňovacia prísada. Najstaršia a najúčinnnejšia je vinsolová živica extrahovaná z borovicového dreva. Účinnou zložkou je abietát sodný, sodná soľ kyseliny abietátovej, čo je komplexná aromatická zlúčenina získaná z rozkladu prirodzených drevných živíc. Vinsolové živice s obsahom rôznych abietátov sú účinnejšie v prítomnosti alkalických kovov, ako je vápnik a sodík, na rozdiel od mnohých jednoduchých karboxylátov, dlhých reťazcových zlúčenín, ktoré sa vyzrážajú v prítomnosti vápnika a obmedzujú ich použitie. Ostatne deriváty prírodných produktov, ako napríklad mydla z kyseliny olejovej a kyseliny kaprónovej, boli v minulosti využívané, ale ich účinnosť je menej spoľahlivá ako u moderných syntetických prevzdušňovacích prísad. Z dôvodu zvyšovania nedostatku vinsolovej živice a širšiemu používaniu zmiešaných cementov obsahujúcich popol z práškového paliva sa začali používať vo väčšom množstve patentované prevzdušňovacie prímеси založené na syntetických látkach [37].

Aniónové prevzdušňovacie prísady

Hydrofilná časť aniónovej prevzdušňovacej prísady má negatívny náboj. Podľa Tadros (2005) najviac používané aniónové skupiny sú karboxylové, síranové, sulfonátové, fosfátové a taurátové [41, 47].

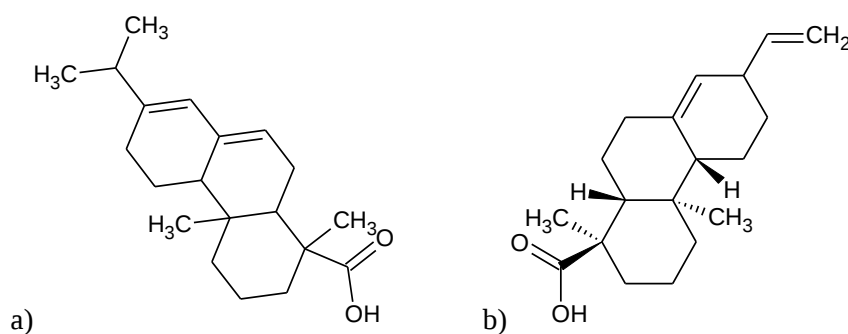
Karboxylové kyseliny môžeme rozdeliť na:

- soli drevných živíc, kde patria kyselina abietová (obr. 9a)) a kyselina pimarová (obr. 9b))
- ropné kyseliny
- mastné a živicové kyseliny a ich soli (spracovaná buničina a zvieracia koža)

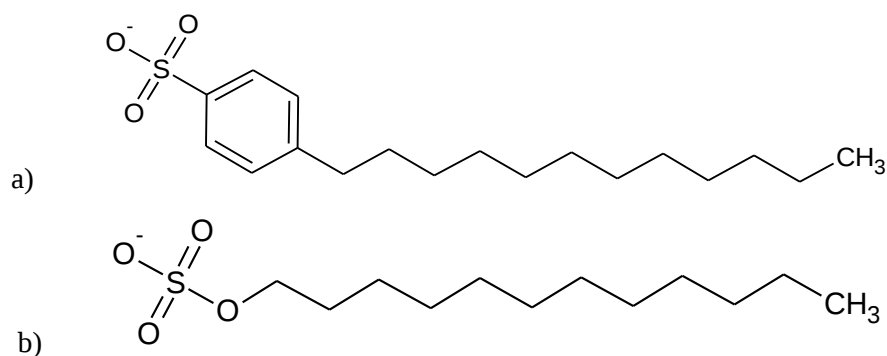
Soli kyseliny sulfónovej, ktoré sa používajú ako komerčné povrchovo aktívne látky sú:

- alkyl benzénsulfonát sodný
- zmes trietanol aminu a dodecylbenzénsulfonátu

Medzi soli kyseliny sírovej patrí dodecylbenzén sulfonát (obr. 10a)), dodecyl síran (obr. 10b)), oleylsulfát sodný a medzi tauráty patrí soľ N-acyl-N-alkyl taurátu [41].



Obr. 9 Chemická štruktúra a) kyseliny abietovej a b) kyseliny pimarovej



Obr. 10 Chemická štruktúra a) dodecylbenzén sulfonátu a b) dodecylu síranu

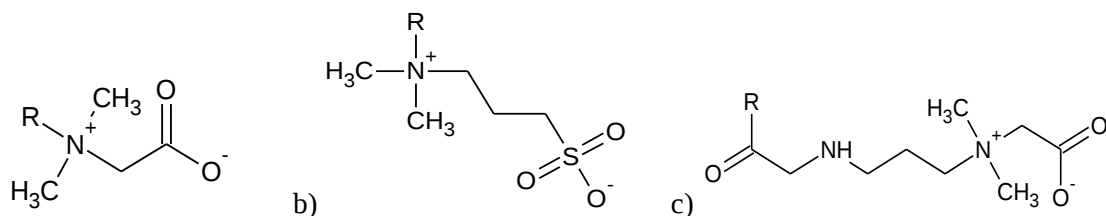
Katiónové prevzdušňovacie prísady

Katiónové prevzdušňovacie prísady resp. povrchovo aktívne látky majú pozitívne nabité hydrofilné hlavičky. Najčastejšie sú to organické zásady typu kvartérnych amóniových solí, ktoré nosia pozitívny náboj na dusíku a preto sa dokážu adsorbovať na väčšinu povrchov, najmä s negatívnym nábojom. Výhodou je ich kompatibilita s neiónovými a amfotérnymi prevzdušňujúcimi prísadami, ale sú nekompatibilné s iónovými prevzdušňujúcimi prísadami [41].

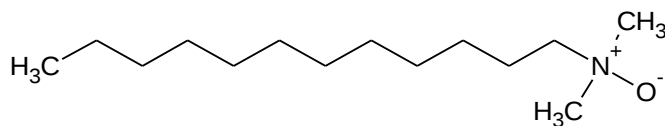
Amfotérne prevzdušňovacie prísady

Hydrofilná skupina amfotérnych prevzdušňovacích prísad resp. povrchovo aktívnych látok nesie negatívny aj pozitívny náboj, takže celkový náboj molekuly je nula. Hlavnou charakteristikou amfotérnych povrchovo aktívnych látok je, že ich správanie závisí od pH. V prípade kyslých roztokov molekula získava pozitívny náboj a správa sa ako katiónová povrchovo aktívna látka, zatiaľ čo v alkalických roztokoch má záporný náboj a správa sa ako aniónový. V ich izoelektrickom bode sa vlastnosti amfotérnych povrchovo aktívnych látok veľmi podobajú vlastnostiam neiónových prevzdušňovacích prísad.

Príklady použitia amfotérnych prevzdušňovacích prísad sú betaíny, amínokyseliny a amíny. Z betaínov sa komerčne využíva alkyl amidopropylsulfobetain a z amínokyselín sa komerčne využíva dodekan dimetyl amin oxid (obr. 12). Chemická štruktúra betaínov je zobrazená na obr. 11a), b), c) [41, 48].



Obr. 11 Chemická štruktúra betaínov (R = dlhý hydrofobný reťazec) a) alkyl betaín
b) alkyl sulfobetain c) alkyl amido propylbetaín



Obr. 12 Chemická štruktúra dodekan dimetyl amin oxidu

Neiónové prevzdušňovacie prísady

Neiónové prevzdušňovacie prísady sú neiónové povrchové látky, ktoré majú polárne hlavičky a nie sú elektricky nabité. Zvyčajne sa spoliehajú na funkčnú skupinu, ktorá je schopná deprotonovať, ale iba vo veľmi malom rozsahu, väčšinou sú založené na etylénoxide a sú rozdeľované do nasledujúcich kategórií [41, 46]:

- alkoholové etoxyláty
- alkyl fenol etoxyláty
- etoxyláty mastných kyselín
- monoalkylamidy etoxyláty
- glykolové estery
- estery glycerolu a polyglycerolu
- glykosidy a polyglykosidy
- estery sacharózy

Neiónové prevzdušňovacie prísady majú výhodu v ich kompatibilite so všetkými typmi prevzdušňovacích prísad resp. povrchovo aktívnych látok. Vzhľadom na svoju neiónovú povahu, tieto povrchovo aktívne látky nevykazujú silnú adsorpciu na nabité povrchy, no ich hlavnou nevýhodou je ich neschopnosť správne stabilizovať vzduchový systém, ktorý vytvárajú, čo zmiernuje zhlukovanie a zhrubnutie bublín [41]. Medzi neiónové povrchovo aktívne látky patrí nonylfenoletoxylát, čo je účinná prevzdušňovacia prísada, ale v testoch na odolnosť proti mrazu nemá dobré výsledky. Pravdepodobne je to spôsobené nedostatkom hydrofóbného „chvosta“ orientovať sa smerom do vnútra vzduchových bublín, ktorý zabraňuje vniknutiu vody, v prípade pôsobenia tlaku [37].

1.6.3. Prevzdušňovacie prísady v alkalicky aktivovanom materiály

Douglas a kol., zisťoval účinok prevzdušňovacieho aditíva typu sulfonovaného uhlovodíka vo vysokopecnej troske aktivovanej kremičitanom sodným a zistil, že došlo k požadovanému prevzdušneniu. Výsledky sa výrazne líšili, no zistilo sa, že potrebné dávky na požadovaný obsah vzduchu boli vo všeobecnosti podobné tým, ktoré sa použili do betónu z portlandského cementu [8].

Avšak, Rostami a Brendley zistili, že použitie (konkrétne nešpecifikovanej) prevzdušňovacej prísady nezlepšuje mrazuvzdornosť betónu z popolčka aktivovaného kremičitanom sodným. Mrazuvzdornosť sa netýka len obsahu prevzdušnenia, ale aj jeho distribúcie. Distribúcia vzduchových bublín v AAM môže byť rozdielna ako v betóne z portlandského cementu (pričom môže byť prevzdušnená ekvivalentným množstvom vzduchu), čím sa môže ovplyvniť mrazuvzdorná vlastnosť. Táto problematika ostáva zatiaľ nepreskúmaná [8]. Taktiež Byfors a kol. [53] vo svojej práci tvrdí, že pre dosiahnutie rovnakého obsahu prevzdušnenia v OPC, môžu byť vyžadované väčšie dávky prevzdušňovacej prísady, ale zvýšenie obsahu prevzdušňovacej prísady (AEA – z angličtiny „*air entrained admixtures*“) nemusí nutne viesť k vyššej účinnosti, ak ide o odolnosť proti mrazu. V niektorých prípadoch môže AEA viesť k nestabilite bublín alebo sa nemusí vytvoriť stabilná, rovnomerne rozdistribuovaná porézna sieť, ako napríklad pre niektoré alkalicky aktivované systémy popolčekov [54].

Bakharev a kol. [49] študoval vplyv alkylarylsulfonátu ako prevzdušňovacej prísady na spracovateľnosť, zmrštenie a mechanickú pevnosť betónu z vysokopecnej trosky alkalicky aktivovanej pomocou vodného skla alebo zmesi hydroxidu sodného a Na_2CO_3 . Títo autori usúdili, že tieto aditíva zvýšili spracovateľnosť, zredukovali zmrštenie a nemali efekt na mechanickú pevnosť. Okrem superplastifikátoru, spomaľovaču tuhnutia, prevzdušňovacej prísady a prídavku modifikovaného sadrovca použili aj protizmršťujúcu prírodu. Podľa výsledkov príroda redukujúca zmrštenie výrazne znížila zmrštenie, ktoré sa takmer blížilo zmršteniu portlandského cementu avšak podobný efekt mala aj prevzdušňujúca príroda i prídavok modifikovaného sadrovca. Zmrštenie vysychaním AAM s prevzdušňovacou prírodou prevyšovalo autogénne, pričom zmrštenie vysychaním v AAM bolo nižšie o 60 % ako u OPC pri 56 dňoch tvrdnutia, aj keď zmršťovanie pokračovalo ďalej. Zistilo sa, že zmes znižujúca zmršťovanie je nerozpustná v alkalickom roztoku, takže jej interakcia

s betónom môže priniesť rôzne výsledky. Prevzdušňujúca prísada taktiež výrazne zlepšila spracovateľnosť zmesi, a preto ju autori uprednostňujú pred protizmršťujúcou prísadou.

Práca [74] zase sledovala vlastnosti stvrdnutej pasty alkalicky aktivovaného popolčeka, kde autor zistil, že pasta so 6 % prevzdušnením mala asi o 16 % nižšiu pevnosť v tlaku ako pasta s 1,5 % prevzdušnením. Taktiež práca [75] namerala 16 % pokles pevnosti v tlaku, ale v betóne z trosky aktivovanej hydroxidom sodným, pričom rozdiel bol pozorovaný medzi neprevzdušnenou vzorkou a vzorkou s 8 % prevzdušnením.

Ďalšie štúdie ukazujú, že obsah vzduchu v alkalicky aktivovaných maltách môže byť modifikovaný s anorganickými prísadami. Nie je to prevzdušňovanie v pravom slova zmysle, ale je to v podstate tvorba peny, pričom póry sú oveľa väčšie, a tvoria sa vznikajúcim plynom v spojive [8].

Je dobre známe, že existuje problém kompatibility medzi cementom a prevzdušňovacími prísadami. Preto je dôležité porozumieť kompatibilite medzi prevzdušňovacou prísadou a AAS, aby sa zaviedlo vhodné množstvo vzduchu do betónu z AAS. Niekoľko štúdií sa pokúsilo použiť prevzdušňovacie prímеси na dosiahnutie určitého množstva vzduchu [3]. Douglas a kol. (1992) [50] uviedli, že konvenčné prevzdušňovacie prímеси pre portlandský cementový betón nefungovali v betóne z AAS. Gifford a Gillott (1996) [51] zistili, že komerčne dostupná prevzdušňovacia prímесь obsahujúca vodný roztok modifikovaného sulfónovaného uhl'ovodíka sa dobre spracovala v zmesi z portlandského cementu, ale bola neúčinná v zmesiach z AAS. Zistilo sa však, že prevzdušňovacie prísady navrhnuté na použitie v nízko-rozlievacích betónoch alebo pre cementy s vysokým obsahom alkalických látok je účinná v betóne z AAS [3].

2. EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

V experimentálnej časti práce sú popísané použité suroviny a ich zloženia pre prípravu prevzdušnenej AAS. V ďalšej časti sú popísané jednotlivé metódy, ktoré boli použité na merania a stanovenia. V jednotlivých metódach sú popísané princípy a postupy podľa ČSN a ASTM noriem.

2.1. Použité suroviny a ich charakterizácia

2.1.1. Vysokopecná troska

Vysokopecná granulovaná troska bola hlavnou zložkou spojiva. Jednalo sa o veľmi jemne pomletú trosku pomletú na merný povrch podľa Blainea 400 m²/kg, zo spoločnosti Kotouč Štramberk, spol. s r.o.. VP (vysokopecná) troska je práškové latentné hydraulické spojivo, a preto po pridaní vody sama o sebe netuhne a netvrdne. Hydraulické vlastnosti sa prejavujú po pridaní aktivátoru, ako napríklad alkalické zlúčeniny [56]. Z hľadiska prvkového zloženia, VP troska sa stanovila pomocou röntgenofluorescenčnej analýzy (XRF), kde jednotlivé zastúpenia prvkov sú stiahnuté na oxidy. Chemické zloženie VP trosky v hmotnostných percentách (hm. %) je uvedené v tab. 1. Z hľadiska fázového zloženia bola VP troska stanovená pomocou röntgenovej difrakčnej analýzy (XRD) a vyhodnotená Rietveldovou metódou. Z prílohy 1 je viditeľné, že VP troska obsahuje prevládajúcu amorfnú zložku viditeľnú z XRD röntgenogramu ako zdvihnuté pozadie, a zároveň obsahuje minerály ako akermanit, merwinit, kalcit a kremeň.

Tab.1 Chemické zloženie vysokopecnej trosky (hm. %)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO
34,7	9,1	41,1	0,4	0,9	10,5	1,4	0,3	1,0	0,6

2.1.2. Vodné sklo

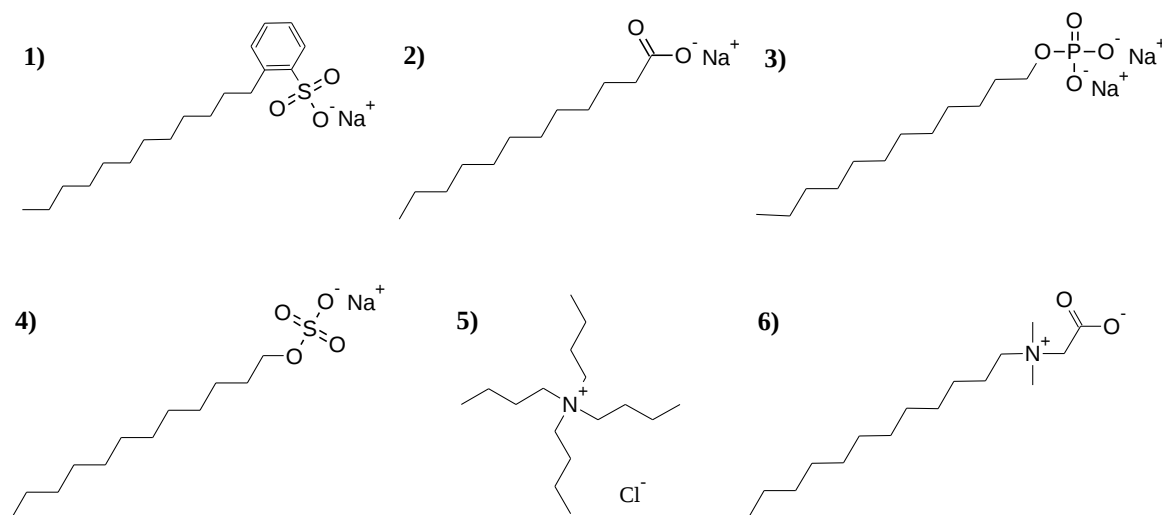
K alkalickej aktivácii VP trosky v tejto práci bolo používané sodné vodné sklo dodávané spoločnosťou Vodní sklo, a. s. zo závodu v Brne. Silikátový modul používaného vodného skla bol 2,0. Z chemického hľadiska vodné sklo obsahuje Na₂O (17,01 hm. %), SiO₂ (32,06 hm. %) a zvyšok predstavuje voda [57].

2.1.3. Prevzdušňovacie prísady

Na prevzdušnenie mált z AAS bolo použitých šesť prevzdušňovacích prísad, pričom boli vybrané z kategórií aniónových, kationových a amfotérnych. Prehľad použitých AEA je zobrazený v tab. 2, taktiež s uvedenou kategorizáciou založenou na chemickom zložení hydrofilnej hlavičky AEA, do ktorej dané AEA patria. Štruktúra použitých AEA je zobrazená na obr. 13. Prísady boli vyrobené vo firme abcr GmbH. Pred miešaním trémie bola každá prísada, okrem dodecyl betaínu, rozpustená vo vode, a preto do zámesi sa pridávala vo forme vodného roztoku. AEA dodecyl betaín bol v kvapalnom stave, preto sa iba nariedil a primiešal do vzoriek.

Tab. 2 Prehľad použitých AEA s príslušnou kategorizáciou

AEA		Kategória AEA
1.	Dodecyl benzénsulfonát sodný (SDBS)	Aniónová (sulfonáty)
2.	Sodná soľ kyseliny laurovej (SL)	Aniónová (karboxyláty)
3.	Sodná soľ dodecylesteru kyseliny fosforečnej (SDPA)	Aniónová (fosfáty)
4.	Dodecylsírany sodný (SDS)	Aniónová (sírany)
5.	Tetrabutylamónium chlorid (TBAC)	Kationové
6.	Laurylbetaín (LB)	Amfotérne



Obr. 13 Štruktúra použitých AEA: 1) dodecyl benzénsulfonát sodný, 2) sodná soľ kyseliny laurovej, 3) sodná soľ dodecylesteru kyseliny fosforečnej, 4) dodecylsírán sodný, 5) tetrabutylamónium chlorid a 6) laurylbetáin

2.1.4. Piesok

Pre prípravu mált bol použitý normalizovaný kremičitý piesok s tromi rôznymi frakciami z pieskovne Polešovice, v súlade s normou ČSN EN 196-1. Bol použitý skúšobný piesok jemný (PG I), skúšobný piesok stredný (PG II) a skúšobný piesok hrubý (PG III). Hmotnostný pomer skúšobného piesku (PG I, PG II, PG III) a spojiva bol 3 : 1.

2.2. Príprava testovacích vzoriek a značenie zámesi

Vzorky pre stanovenie mechanických vlastností ako pevnosti v ťahu za ohybu a pevnosti v tlaku boli pripravené malty, ktoré mali rozmery $40 \times 40 \times 160$ mm od každej zmesi podľa normy ČSN EN 196-1 a malty o rozmeroch $25 \times 25 \times 280$ mm podľa normy ASTM 596 pre stanovenie autogénneho zmrštenia AAS. Malty boli pripravené zo zmesi vysokopečnej trosky, PGI, PGII, PGIII, vodného skla, destilovanej vody a prevzdušňovacej prísady. Vzorky pre porozimetriu a SEM boli pripravené pasty zo zmesi vysokopečnej trosky, vodného skla, destilovanej vody a prevzdušňovacej prísady.

Najprv sa navážili všetky zložky, a následne sa prešlo k samotnému miešaniu. Do vopred pripraveného roztoku aktivátoru v nádobe na miešanie, ktorý obsahoval vodné sklo, vodu, prípadne prevzdušňovaciu prísadu sa prisypala VP troska a táto zmes bola miešaná 30 s pri nízkych otáčkach miešačky. Po 30 s sa prisypal piesok (PGI, PGII, PGIII), samozrejme do pást sa piesok nepridával, a táto zmes sa miešala 30 s pri nízkych otáčkach miešačky a 30 s pri vysokých otáčkach. Následne sa miešanie zastavilo a zmes prilepená na stenách miešacej misky sa zotierala a miešala pomocou špachtle. Po zotrení špachtľou, miešanie bolo opäť zapnuté na 1,5 minúty pri vysokých otáčkach. Namiešaná zmes sa naliala do pripravených foriem a to najprv do polovice, pričom formou sa mierne zaklepalo pre dokonalejšie rozliatie malty vo forme. Následne sa forma doplnila až po okraj a znova sa formou mierne zaklepalo. V prípade foriem na meranie zmršťovania AAS boli pridané do formy kovové kontakty. Pripravené vzorky boli na jeden deň ponechané vo formách a prikryté umelohmotnými vreckami. Druhý deň boli vzorky odformované z foriem a boli uložené do plastovej fólie (autogénne podmienky).

Percentuálne zloženie pripravených vzoriek je uvedené v tab. 3, pričom referenčná vzorka (REF) je malta alebo pasta bez prevzdušňovacej prísady. Po príprave maltových vzoriek REF sa pripravili vzorky s prídavkom AEA, pričom každá AEA bola testovaná pri štyroch rôznych koncentráciách na pevnosť v ťahu za ohybu, pevnosť v tlaku a na dĺžkové zmeny. Použité koncentrácie jednotlivých AEA vo vzorkách predstavuje tab. 4 (hodnoty označené šedou farbou). Všetky koncentrácie zobrazené v tab. 4 boli použité na meranie rozliatia malty, stanovenie prevzdušnenia a stanovenia objemovej hmotnosti. Pripravené vzorky mali pomer vody k spojivu 0,45 a dávka aktivátoru predstavovala 4 %

Na₂O na hmotnosť trosky. Po príprave pastových vzoriek REF sa pripravili vzorky s prídavkom AEA, pričom každá AEA bola testovaná pri najväčšej koncentrácii použitej na prípravu malty (použité koncentrácie sú podčiarknuté v tab. 4). Prídavok AEA do malty bol vždy vztiahnutý na množstvo použitej trosky, preto koncentrácia prídavku AEA do pasty musela byť prepočítaná vzhľadom k množstvu použitej trosky. Pasty boli pripravené v pomere vody k spojivu 0,35 a dávka aktivátoru predstavovala 4 % Na₂O na hmotnosť trosky.

Všetky malty sú označené skratkou jednotlivej AEA s použitým množstvom vo vzorke napr. SDBS_5,55·10⁻⁴ (hm. %) znamená dodecyl benzénsulfonát sodný s množstvom 5,55·10⁻⁴ (hm. %).

Tab. 3 Navážky použitých surovín na prípravu vzorky REF (hm. %)

	VPS	vodné sklo	destilovaná voda	PG I	PGII	PG III
REF pre malty	21,92	5,26	7,06	21,92	21,92	21,92
REF pre pasty	68,39	16,41	15,20	–	–	–

Tab. 4 Prehľad použitých AEA a použité koncentrácie jednotlivých AEA, šedou farbou sú označené koncentrácie použité na stanovenie pevnosti v ťahu za ohybu, pevnosti v tlaku a na stanovenie zmrštenia, podčiarknuté hodnoty boli použité na prípravu pasty

AEA	Dávkovanie AEA pre malty · 10 ⁻⁴ (hm. %)							
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
Dodecyl benzénsulfonát sodný	2,78	5,55	8,18	10,96	13,74	16,51	19,14	21,92
Sodná soľ kyseliny laurovej · 10 ⁻⁶ (hm. %)	0,88	2,63	11,40	21,92	43,84	87,67	175,35	1398,43
Sodná soľ dodecylesteru kyseliny fosforečnej	19,52	39,04	48,80	58,56	78,08	117,60	156,16	234,82
Dodecylsíran sodný	0,29	0,58	0,87	1,17	1,32	1,46	1,75	2,28
Tetrabutylamónium chlorid	18,41	36,82	77,15	154,29	292,17	584,17	1167,66	1750,47
Laurylbetaín	0,15	0,29	0,88	1,11	2,22	4,44	6,58	8,70

2.3. Stanovenie prevzdušnenia a stanovenie objemovej hmotnosti

Pre skúšku prevzdušnenia sa používajú dva typy tlakových prístrojov. Oba typy používajú princíp Boyle-Mariottovho zákona, pre ktoré sú stanovené špecifické skúšobné postupy. V tejto práci bol použitý typ B. Typ B meria zníženie tlaku vzduchu v pretlakovej komore, ktorá bola vopred natlakovaná a uvoľnenému tlaku bol vystavený povrch malty (najčastejšie používaná metóda).

Bol meraný obsah vzduchu v referencií a prevzdušnených vzorkách. Najprv bola hliníková nádoba od prevzdušňovacieho meradla naplnená až po vrchný okraj a očistená od nečistôt. Na hliníkovú nádobu sa položil a svorkami uchytil zvyšok meradla na prevzdušnenie. Meradlo bolo naplnené destilovanou vodou cez odvzdušňovací ventil, až pokiaľ nezačala pretekať cez opačný odvzdušňovací ventil. Meradlo bolo následne napumpované vzduchom pomocou pumpičky, až pokiaľ sa tlakomer

nastavil na hodnotu 0. Po natlakovaní sa rýchlym otvorením ihlového ventilu vypustil vzduch z meradla a bola odčítaná hodnota prevzdušnenia. Skúška bola vykonaná podľa normy ČSN EN 12350-7.

Metóda prevzdušnenia bola doplnená o stanovenie objemovej hmotnosti. Objemová hmotnosť bola zmeraná u prevzdušených vzoriek, ale aj u REF. Objemová hmotnosť je definovaná ako hmotnosť objemovej jednotky príslušnej látky, pričom sa uvažuje objem celého kusu materiálu so všetkými pórnymi a dutinami. Základnou veličinou pre objemovú hmotnosť je kg/m^3 .

Meranie objemovej hmotnosti bolo podľa normy ČSN EN 12350-6, a bolo nasledovné. Do vopred odváženej, vodotesnej, hliníkovej nádoby zo skúšky na stanovenie obsahu vzduchu v čerstvej malte, s objemom 1 dm^3 sa naliala čerstvá zmes malty. Malta sa plnila v dvoch vrstvách, pričom po každom naplnení sa nádoba s maltou zhutňovala slabým zátrasom. Malta sa naplnila až po okraj nádoby, a po zarovnaní zmesi s vrchným okrajom sa na vonkajšom povrchu nádoba očistila, a následne bola nádoba so zmesou zvážená. Objemová hmotnosť D (kg/m^3) sa vypočítala podľa:

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (8)$$

kde m_1 je hmotnosť prázdnej nádoby (kg), m_2 je hmotnosť naplnenej nádoby (kg) a V je objem nádoby (m^3) [42].

2.4. Pevnosti v ťahu za ohybu a pevnosti v tlaku

U pripravených vzoriek boli uskutočnené pevnostné skúšky pre zistenie ich mechanických vlastností. Jednalo sa o pevnosť v ťahu za ohybu (trojbodový ohyb) a pevnosť v tlaku podľa normy ČSN EN 196-1. Tieto skúšky pevnosti sú jednou zo základných mechanických skúšok slúžiacich k posúdeniu finálnych vlastností cementových spojív, preto boli volené i pre účel tejto práce. Pre stanovenie pevnosti v ťahu za ohybu boli použité normované trámiky o rozmeroch $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$, pričom na stanovenie pevnosti v tlaku boli použité zlomené trámiky po pevnostnej skúške v ťahu za ohybu. Stanovenia sa vykonávali na trámikoch po 24 hodinách, 7 a 28 dňoch zrenia. Každá vzorka s rovnakým zložením bola testovaná na dvoch trámikoch, preto vzorky na stanovenie pevnosti v ťahu za ohybu boli dve a na stanovenie pevnosti v tlaku boli vzorky štyri. Na testovanie mechanických vlastností bol použitý prístroj Destest 3310 od spoločnosti Beton System, Ltd. Merané boli všetky druhy pripravených vzoriek a to referencia a vzorky s prevzdušňovacími prídavkami.

Behom stanovenia pevnosti v ťahu za ohybu je zisťované napätie, pri ktorom dôjde k porušeniu skúšobného telesa v obyčajnom ťahu za ohybu. Pevnosť v ťahu za ohybu sa vypočíta podľa vzťahu:

$$f_{cf} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot d_1 \cdot d_2^2} \quad (9)$$

kde f_{cf} je pevnosť v ťahu za ohybu (MPa), F je maximálne zaťaženie (N), l je vzdialenosť medzi podpornými valčekmi (mm), d_1 a d_2 sú rozmery priečného rezu trámiku (mm).

Pri stanovení pevnosti v tlaku daného trámiku bola meraná veľkosť napätia dosiahnutá v mieste porušenia pri zániku celistvosti. Polovica trámiku bola umiestnená medzi statickú oceľovú podložku a pohybujúci sa oceľový piest o určitom rozmere a tvare. Po započatí merania dochádza k pohybu piestu smerom dolu a ku vzniku tlakovej sily na povrch materiálu. Meria sa tlaková sila potrebná na porušenie štruktúry daného materiálu. Pevnosť v tlaku sa vypočíta zo vzťahu:

$$\sigma_{tlak} = \frac{F_{max}}{S} \quad (10)$$

kde σ_{tlak} je pevnosť v tlaku (MPa), F_{max} je maximálna sila pôsobiaca pri porušení (N) a S je plocha (mm^2) [55].

2.5. Stanovenie autogénneho zmrštenia

Pri zmršťovaní alkalicky aktivovanej trosky sa pozorujú dĺžkové a hmotnostné zmeny. Táto metóda sa vykonáva podľa normy ASTM C596. Trámiky majú na oboch koncoch umiestnené kovové

kontakty a ich dĺžkové zmeny sú merané v pravidelných intervaloch ako zmena dĺžky medzi kontaktmi. Prvý týždeň od namiešania dochádza k najväčšiemu zmršteniu, preto všetky trámiky boli merané každý deň v prvých siedmych dňoch, a po siedmych dňoch už iba každý tretí deň. Dĺžkové zmeny boli merané na prístroji (tzv. dilatometer) a hmotnostné zmeny na váhach. Aby dilatometer mohol slúžiť k meraniu rôzne dlhých trámikov, nemeria absolútnu dĺžku, ale iba relatívnu výchylku z nulovej polohy. Preto je nutné vzorky porovnávať s porovnávacím etalónom (oceľová tyč). Percentuálna zmena dĺžky vzorky je následne vypočítaná zo vzťahu:

$$\Delta l = \frac{(l_t - l_{et,t}) - (l_1 - l_{et,1})}{250} \cdot 100 \quad (\%) \quad (11)$$

kde l_t a l_1 je nameraná výchylka dilatometra (mm) pre vzorku v čase t resp. $t = 1$ deň, $l_{et,t}$ a $l_{et,1}$ je nameraná výchylka dilatometru (mm) pre etalón v čase t resp. $t = 1$ deň a 250 je vzdialenosť medzi kovovými kontaktmi vo vzorke (mm).

2.6. Meranie rozliatia malty

Meranie rozliatia malty sa používa k stanoveniu počiatkovej spracovateľnosti a konzistencie čerstvej malty, prípadne k návrhu upravenia vodného súčiniteľa. Boli pripravené všetky vzorky alkalickej aktivovanej trosky bez prídavkov prevzdušňovacích prísad, a tak isto s prídavkami prevzdušňovacích prísad. Toto stanovenie sa začalo naliatím čerstvej malty do kužeľovitej formy, položenej na stolíku pre rozlievanie. Po naplnení formy sa forma odstránila normovaným pohybom a pozorovalo sa rozliatie malty. Vzorka bola podrobená 15 zátrasom a následne bol odčítaný priemer rozliatia malty na stupnici, znázornenej na sklenom podstavci stolíka na rozliatie. Meranie sa vykonávalo podľa normy ČSN EN 1015-3.

2.7. Ortuťová intrúzna porozimetria

Ortuťová intrúzna porozimetria sa bežne používa na charakterizáciu pórovitého materiálu pomocou ortuťového porozimetru. Metóda sleduje distribúciu veľkosti pórov v poréznom materiáli a je založená na zvyšovaní tlaku nezmáčavej intrúznej kvapaliny (ortuť) a postupným zaplňovaním pórov od najväčších po najmenšie. Prístroj pracuje v dvoch režimoch: 1) v nízkotlakom režime začína zaplňovať evakuovanú vzorku a pokračuje cez normálny tlak až do 3–4 atmosfér (4 μ m veľkých pórov), 2) potom sa vzorka presunie do vysokotlakačkej časti, kde sa meria medzi atmosférickým tlakom a maximálnym tlakom 414 MPa. Najmenšie stanoviteľné póry sú póry veľkosti 3 nm, táto metóda teda umožňuje stanovenie celej distribúcie makropórov, a aj mezopórov [88]. Samotné vyhodnocovanie intrúdných pórov (d) na základe zistených tlakov (p) je dokázané podľa Washburnovej rovnice (12). Pri výpočte za hodnotu povrchového napätia ortuti γ bolo dosadené 480 mN/m a zhmáčací uhol θ bol uvažovaný ako 140°.

$$d = - \frac{4\gamma \cdot \cos\theta}{p} \quad (\mu\text{m}) \quad (12)$$

Vzorky testované ortuťovou intrúznou porozimetriou boli pripravované rovnakým spôsobom ako v prípade SEM s jediným rozdielom a to tým, že vzorky neboli lámané, ale boli vybrusované do pravidelného kvádra o rozmeroch približne 7 mm $\times$ 7 mm $\times$ 22 mm. Odber vzorky bol vždy približne z rovnakého miesta trámiku.

2.8. Skenovacia elektrónová mikroskopia

Najnázornejším spôsobom štúdia morfológie prevzdušnenej AAS je pomocou skenovacej elektrónovej mikroskopie (SEM). Základný princíp SEM je založený na interakciách primárnych elektrónov (uvolnených z katódy a urýchlených pôsobiacim elektrickým poľom), ktoré snímajú povrch vzorky a malý priestor v hĺbke pod povrchom (1–3 μ m). Z dôvodu interakcie primárnych elektrónov so vzorkou, dochádza k tvorbe sekundárnych elektrónov, spätne odrazených elektrónov, Augerových elektrónov a k tvorbe spojitého a charakteristického röntgenového žiarenia. Sekundárne

elektróny poskytujú hlavnú informáciu o reliéfe vzorky, a spätne odrazené elektróny nám poskytujú informáciu o prvkovom zložení materiálu alebo o kryštalografii daného materiálu. Obraz v skenovacom elektrónovom mikroskope je vytvorený riadkovaním (rastovaním) úzkeho lúča elektrónov po povrchu vzorky, pričom konečný obraz je založený na kontrastoch. Kontrasty sa vytvárajú na základe počtu protónov, kde ťažšie prvky majú jasnejšiu farbu a ľahšie prvky sú tmavšie. Kontrast je taktiež vytváraný rozdielnou povrchovou topografiou (reliéfny kontrast), kde dutiny poskytujú nižšiu intenzitu signálu, takže sú tmavšie a vyššie postavené miesta poskytujú silnejší signál, čiže sú svetlejšie [43].

SEM bola použitá k pozorovaniu lomovej plochy vzorky vo forme pasty, ktorá hydratovala 7 dní. Čerstvá pasta pripravená v súlade s kap. 2.2 bola naliata do kovových foriem o rozmeroch 20 mm × 20 mm × 100 mm a po 24 hod boli trámiky odformované a zabalené do plastovej fólie (autogénne podmienky). Po 7 dňoch hydratácie boli z vnútorných častí trámikov mechanickým pôsobením vypreparované ich približne ploché úlomky a pre zvodivenie vzoriek bola na vzorky naprášená vrstvička zlata.

2.9. Izotermická kalorimetria

Izotermické kalorimetrické meranie umožňuje sledovanie tepelných zmien behom prebiehajúcich chemických reakcií, ktoré sú u anorganických spojív práve tuhnutie a tvrdnutie. Vďaka tomuto môžeme určiť počiatok a koniec tuhnutia a taktiež zistiť vplyv daných prísad. Sledovanie vývoja hydratačného tepla z alkalicky aktivovanej trosky s prídavkami AEA bolo vykonané použitím izotermického mikrokolorimetru TAM Air, pri konštantnej teplote 25 °C.

Meraná bola vzorka REF a vzorky s AEA. Najprv boli pripravené vialky s objemom 15 ml, do ktorých sa nadávkovalo 4 g trosky a po dosiahnutí tepelnej rovnováhy sa nainjektoval aktivátor a zmes sa ponechala miešať 3 minúty. Okamžite po nainjektovaní aktivátoru sa zaznamenal vývoj hydratačného tepla ako tok tepla.

Aktivátor vzorky REF obsahoval vodu a vodné sklo, zvyšné aktivátory obsahovali vodu, vodné sklo a AEA. Dávkovanie aktivátoru bolo prepočítané zo zmesi použitej na prípravu pasty.

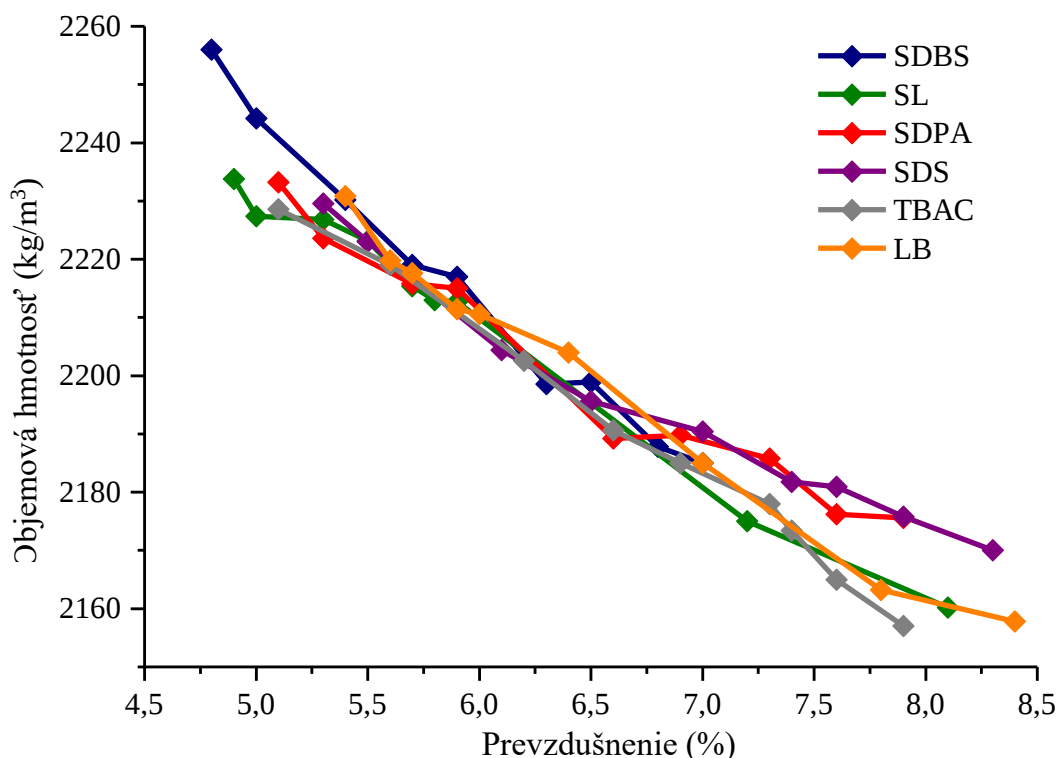
3. VÝLEDKY A DISKUSIA

Vplyv prevzdušňovacích prísad na alkalicky aktivovanú trosku je prediskutovaný na základe výsledkov merania v nasledujúcej kapitole.

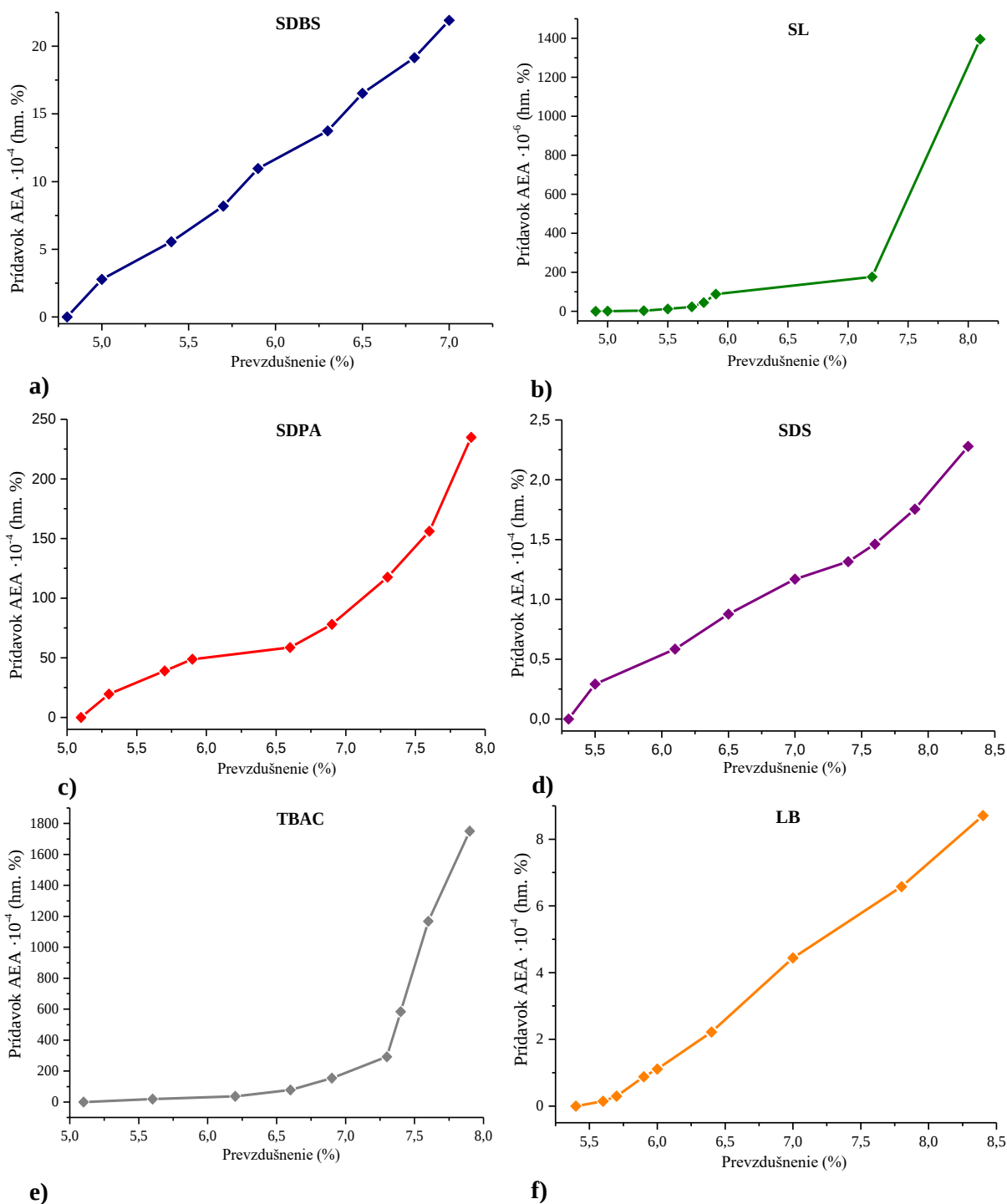
3.1. Stanovenie prevzdušnenia a stanovenie objemovej hmotnosti

Do AAS sa pridali rôzne druhy AEA, s rôznymi koncentraciami a sledovalo sa prevzdušnenie a objemová hmotnosť. Výsledky nameraných objemových hmotností pre jednotlivé AEA prísady v AAS sú zobrazené na obr. 15, kde môžeme vidieť pokles objemovej hmotnosti pri zvyšovaní dávky AEA resp. zvyšovaním prevzdušnenia vo vzorkách. Znižovanie objemovej hmotnosti je spôsobené zvyšovaním obsahu vzduchu resp. stabilizácie väčšieho množstva vzdušných bublín vo vzorkách pomocou AEA.

Prevzdušnenie vzoriek s použitím AEA vo vzorkách potvrdzuje aj stanovenie prevzdušnenia na obr. 16. Vo všeobecnosti môžeme povedať, že všetky použité AEA resp. povrchovo aktívne látky prevzdušňujú AAS. Za povšimnutie stojí fakt, že vzorka REF obsahovala zachytený vzduch aj bez použitia AEA, čo bolo spôsobené tým, že sa nepoužil vibračný stôl na odstránenie vzduchu vo vzorkách. Taktiež vzorka REF vykazovala odlišné hodnoty prevzdušnenia v rozmedzí 4,9–5,4 %, keďže prevzdušnenie je závislé na teplote [76] a teplota v laboratóriu mohla kolísať. Taktiež odlišnosť hodnôt stojí na fakte, že vzorky sa nedávali na vibračný stôl a vzorky boli nesúrodo rozliate vo formách. Preto vzorka REF bola premeraná pred meraním každej prísady. U vzoriek SDBS, SDS a LB je pozorovaný relatívne lineárny trend stúpania prevzdušnenia vzoriek so zvyšujúcim sa dávkovaním AEA vo vzorkách. U vzoriek SL a TBAC je pozorovaný trend rastu prevzdušnenia s miernym dávkovaním, no od prevzdušnenia cca 7,25 % dochádza k rapidnému navýšeniu dávkovania pre zvýšenie prevzdušnenia.



Obr. 15 Porovnanie objemových hmotností prevzdušnených vzoriek pomocou AEA s rastúcim prevzdušením



Obr. 16 Závislosť prídavku AEA na prevzdušnenie v AAS pre použité AEA: a) SDBS, b) SL, c) SDPA, d) SDS, e) TBAC a f) LB

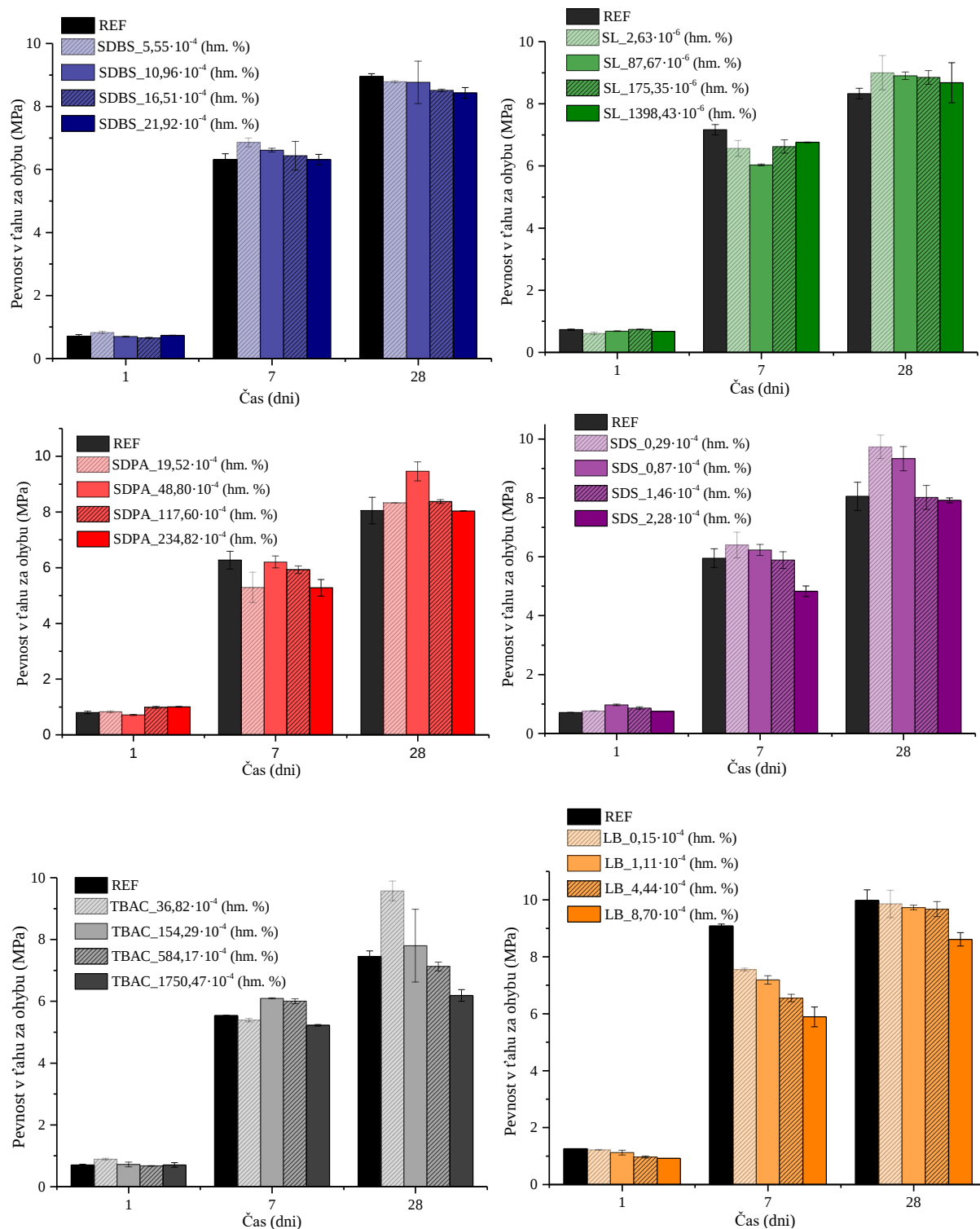
3.2. Pevnosti v ťahu za ohybu a pevnosti v tlaku

Cieľom tejto práce je sledovať vplyv AEA na vybrané vlastnosti alkalicky aktivovanej trosky s prídavkami AEA. Jednými so sledovaných vlastností je práve pevnosť v ťahu za ohybu a pevnosť v tlaku za autogénnych podmienok, pričom výsledky sú zobrazené na obr. 17 a 18. U väčšiny prísad, až na menšie výnimky, môžeme pozorovať klesajúci trend pevnosti v ťahu za ohybu resp. pevnosti v tlaku so zvyšujúcou sa koncentráciou AEA vo vzorkách, v 28. deň tvrdnutia. Tento trend je spôsobený zmenou distribúcie veľkosti pórov resp. zvýšením porozity, ktorá znižuje pevnosti v ťahu za ohybu resp. pevnosti v tlaku. So zvyšovaním koncentrácie AEA vo vzorkách dochádzalo

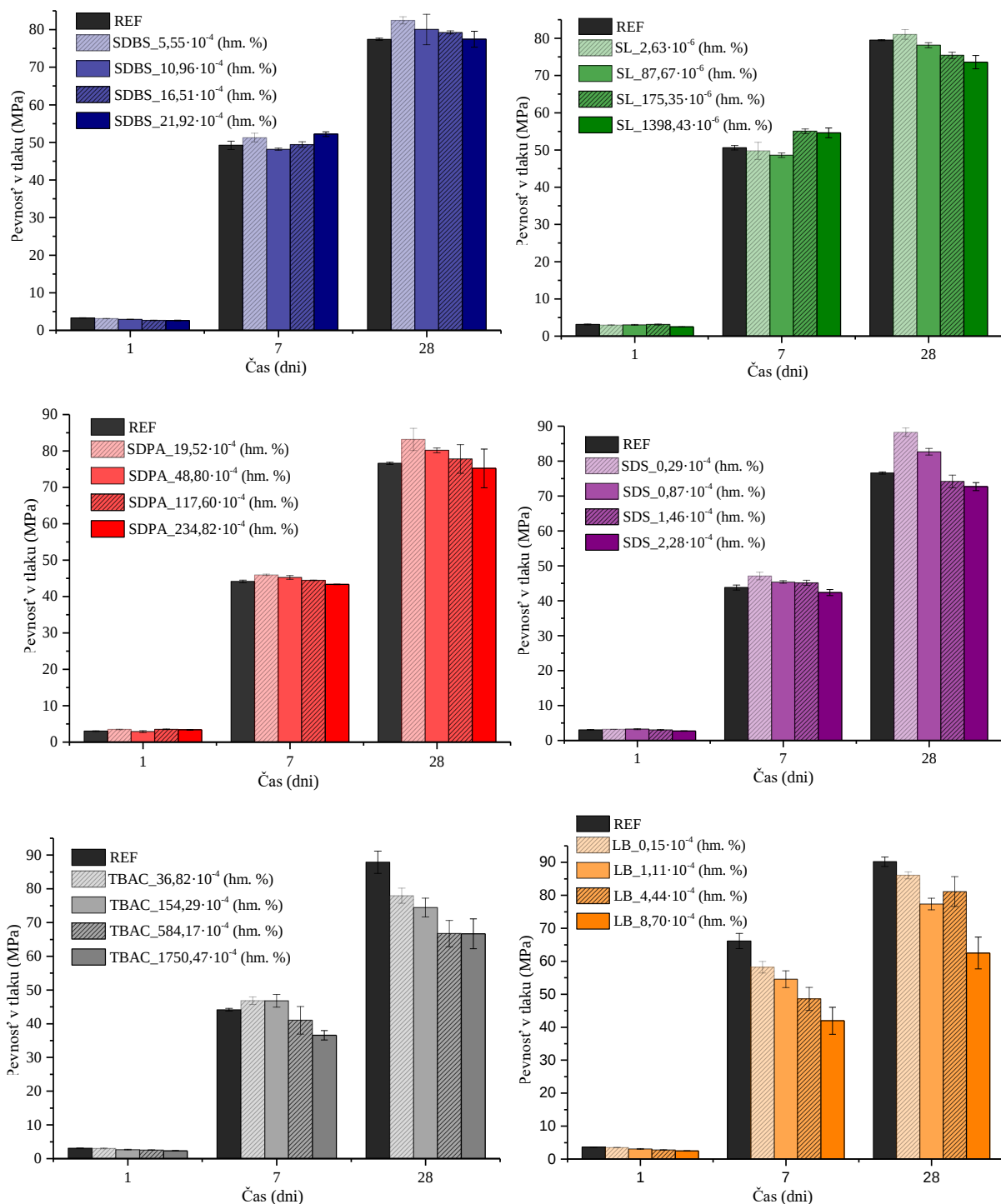
k zvýšeniu množstva pórov v materiály, čiže sa vytvorilo väčšie množstvo defektov na ktorých sa koncentrovalo napätie, a preto póry iniciovali tvorbu trhlín pri pôsobení tlaku na trámiky z AAS. Zaujímavosťou je, že u niektorých AEA ako SL, SDPA, SDS a TBAC dosahovali pevnosti v ťahu za ohybu (28. deň tvrdnutia) väčších pevnosti vzorky obsahujúce AEA, ako vzorka REF. Táto zaujímavosť bola pozorovaná aj pri pevnostiach v tlaku, u vzoriek SDBS, SL, SDPA, SDS (28. deň tvrdnutia). Toto pozorovanie môže byť vysvetlené tým, že vzorka REF obsahovala zachytený vzduch, ktorý vytvoril vzduchové bubliny nepravidelného tvaru. Vzorky obsahujúce AEA stabilizujú tvorbu vzduchových bublín pravidelných veľkostí, a tým sa pravdepodobne dosiahli vyššie pevnosti. Klesajúci trend pevnosti v ťahu za ohybu je pozorovaný, aj v 7. deň tvrdnutia pri prímiesiach ako SDBS, SDS a LB. Klesajúci trend pevnosti v tlaku v 7. deň tvrdnutia bol pozorovaný u vzoriek SDPA, SDS, TBAC a LB. U vzoriek s prímiesami SDBS, SDS a TBAC boli pozorované niektoré vzorky s obsahom AEA, ktoré dosahovali väčších pevnosti v ťahu za ohybu ako REF v 7. deň tvrdnutia, a taktiež pevnosti v tlaku u vzoriek SDBS, SL, SDPA, SDS a TBAC čo mohlo byť spôsobené už spomínanou stabilizáciou vzduchových bublín. Pevnosť v tlaku u vzorky LB $4,44 \cdot 10^{-4}$ (hm. %) je mierne vyššia, a vychýľuje sa z klesajúceho trendu, ale vysoká hodnota chybovej úsečky poukazuje na fakt, že pevnosť v tlaku sa nachádza v klesajúcom trende.

Podobné výsledky sú prezentované v práci [86], kde autor použil AEA na báze kokosového oleja a dietanolaminu, a po zvyšovaní koncentrácie AEA vo vzorkách AAS dochádzalo k poklesu pevnosti v tlaku.

AEA sa bežne používajú v betóne z OPC u ktorého zvyšujú spracovateľnosť, ale taktiež má negatívny vplyv na pevnosť v ťahu za ohybu a pevnosť v tlaku. Vzduchové bubliny vytvorené pomocou AEA vedú k strate betónovej pevnosti v tlaku, obvykle okolo 5,5 % s každým 1 obj. % vzduchu v betóne [80, 81]. Z nameraných výsledkov tejto práce boli stanovené poklesy pevnosti v tlaku, v 28. deň tvrdnutia. U prísady SDBS nastal pokles pevnosti v tlaku o 3,5 % s prídavkom 1 % prevzdušnenia pomocou AEA. U prísady SL došlo k poklesu pevnosti v tlaku o 3,1 %, u prísady SDPA o 3,2 %, u prísady SDS o 6,5 %, u prísady TBAC o 9 % a u prísady LB o 8,6 % s prídavkom 1 % prevzdušnenia pomocou AEA. S prihliadnutím na prevzdušnenie vzoriek, tak došlo k najväčšiemu poklesu pevnosti v tlaku u prímеси TBAC, pričom tieto poklesy sú spôsobené znížením tvorby CSH gélu. Pre lepšie odôvodnenie viz. kapitola 3.7.



Obr. 17 Pevnosti v ťahu za ohybu prevzdušnených vzoriek AAS za autogénnych podmienok, v čase tvrdnutia 1 deň, 7 dní a 28 dní



Obr. 18 Pevnosti v tlaku prevzdušnených vzoriek AAS s autogénnym ošetrovaním, v čase tvrdnutia 1 deň, 7 dní a 28 dní

3.3. Stanovenie autogénneho zmrštenia

Na vzorkách AAS s prídavkami AEA bol taktiež sledovaný vplyv prísad na zmrštenie za autogénnych podmienok. Výsledky merania zmrštenia sú zobrazené na obr. 19, a výsledky z merania hmotnostných zmien sú zobrazené na obr. 20. Na obr. 19 je viditeľný postupný pokles dĺžkových zmien u všetkých vzoriek, čo značí že dochádzalo k autogénnemu zmršteniu. Toto autogénne zmrštenie bolo merané do 28 dní, pričom je viditeľné, že pokles dĺžkových zmien, ale aj hmotnostných zmien (obr. 20) by naďalej klesal. Zaujímavosťou je, že v druhý deň merania hodnoty autogénneho zmrštenia boli pomerne nízke u všetkých použitých prísad, okrem prísady TBAC, ale

v tretí deň začali hodnoty zmrštenia rásť omnoho vyššie. Podľa nameraných výsledkov došlo k redukcii autogénneho zmrštenia AAS pomocou všetkých druhov AEA. Taktiež z nameraných výsledkov je viditeľné, že s väčším prídavkom AEA resp. väčším prevzdušnením, dochádza k väčšej redukcii autogénneho zmrštenia. Tento trend je pozorovaný u všetkých použitých AEA. Je to spôsobené zmenou distribúcie veľkosti pórov a môžeme to vysvetliť na základe práce [69]. V práci [69] je opísaný vplyv distribúcie veľkosti pórov na zmrštenie v AAS a OPC. Autori publikácie tvrdia, že došlo ku väčšiemu zmršteniu vzoriek AAS ako OPC, a toto väčšie zmrštenie pripisujú práve hustej pórovitej štruktúre v AAS. Ich experimentálne výsledky ukázali, že AAS obsahuje veľké množstvo mesopórov, zatiaľ čo OPC obsahuje väčšie množstvo makropórov, ale menšie množstvo mesopórov. Z publikácií ako [33, 40] vieme, že dochádza k tvorbe meniskov nehydratovanej vody medzi vrstvami CSH gélu, a tým sa vytvára kapilárne napätie. Kapilárne napätie v menisku je tým väčšie, čím menšia je veľkosť pórov a výsledné zmrštenie je teda vyššie. Autori publikácie [69] vo výsledku zistili, že AAS obsahuje viac pórov v rozpätí mezopórnych limitov ako OPC, preto v AAS dochádza k tvorbe meniskov v menších veľkostiach pórov a dochádza k väčšiemu kapilárnemu tlaku resp. výsledné zmrštenie je väčšie, ako v OPC.

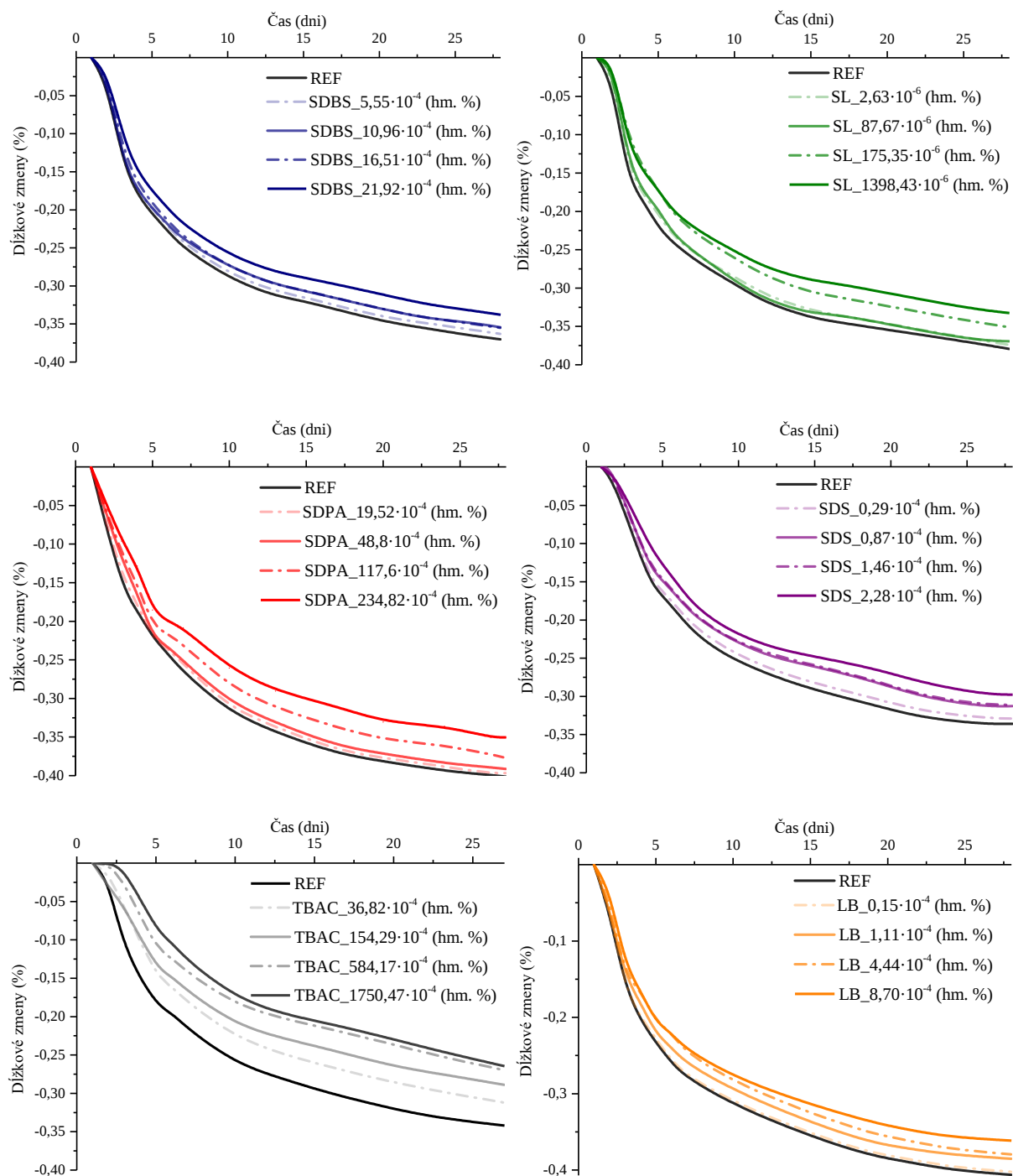
Podľa obr. 19 došlo k redukcii autogénneho zmrštenia pomocou všetkých AEA. Táto redukcia bola spôsobená zmenou distribúcie veľkosti pórov, pretože AEA prevzdušňuje resp. stabilizuje zachytený vzduch (viz. kap. 3.1.) a tento zachytený vzduch zvýšil množstvo pórov v rozsahu veľkosti mezopórov a makropórov (viz. kapitola 3.5.). Navýšenie množstva makropórov spôsobilo tvorbu meniskusov v póroch s väčším priemerom, a preto dochádzalo k menšiemu kapilárnemu tlaku resp. výsledné autogénne zmrštenie bolo menšie vo vzorkách s prídavkom AEA ako vo vzorke REF, ktorá neobsahovala žiadnu prísadu.

Taktiež práce [86] a [87] hovoria o vplyve distribúcie veľkosti pórov na redukcii zmrštenia. V týchto prácach sa troska nahradzovala popolčekom, pričom popolček znížil množstvo mezopórov a zvýšil množstvo makropórov, čo malo za efekt nižšie pevnosti v tlaku, ale došlo k redukcii zmrštenia.

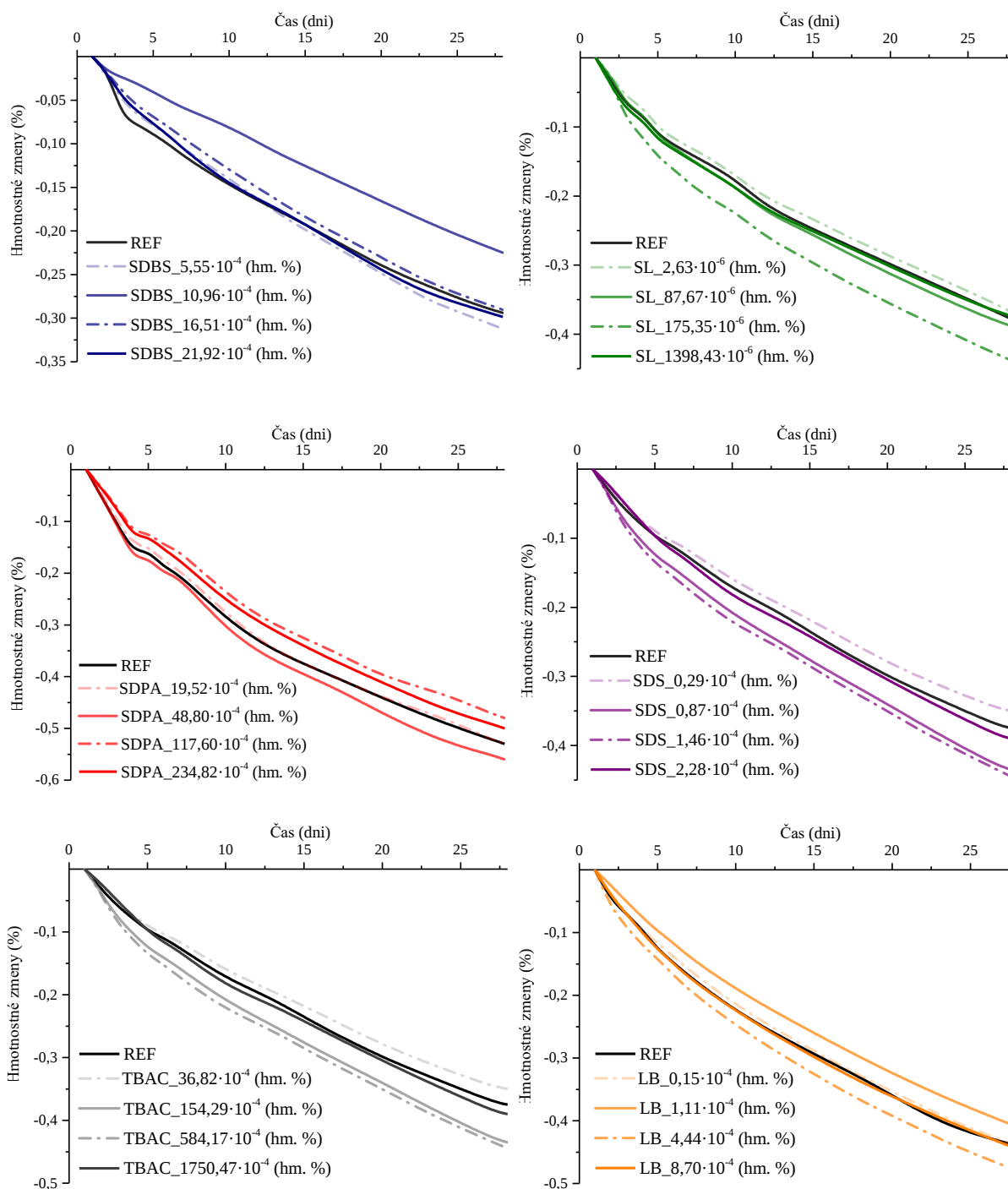
Tieto tvrdenia o redukcii zmrštenia sú podporené aj faktom, že použité prevzdušňovacie prísady sú povrchovo aktívne látky a povrchovo aktívne látky znižujú povrchové napätie [84]. Pri znižovaní povrchového napätia dochádza k znižovaniu tlaku na meniskuse vytvorenom v kapilárach (p_c), pričom tento vzťah je daný podľa rovnice (7). To znamená, že keď znižujeme povrchové napätie, tak znižujeme tlak na meniskuse vytvorenom v kapilárach, a tým sa znižuje aj zmrštenie [85].

Podľa obr. 20 dochádzalo k hmotnostným stratám, čiže dochádzalo ku strate vlhkosti vo všetkých vzorkách s použitím AEA, ale aj bez použitia AEA. Podľa týchto hmotnostných strát môžeme usúdiť, že dochádzalo k relatívne malému zmršťovaniu vysychaním, ale iba v malej miere, pretože tieto hmotnostné straty nie sú veľké. Taktiež môžeme pozorovať, že zvyšujúca koncentrácia AEA nemala vplyv na stratu hmotnosti.

Z kapitoly 3.3. vieme, že prísada SDBS prevzdušnila AAS z 4,8 % (REF) na 7,0 % (SDBS_21,92·10⁻⁴ hm. %), čo znamená, že s 2,2 % prevzdušnením AAS pomocou SDBS došlo k redukcii autogénneho zmrštenia o 9 %. Prísada SL zredukovala autogénne zmrštenie o 12 %, pričom došlo k prevzdušneniu z 4,9 % (REF) na 8,1 % (SL_1398,43·10⁻⁶), čiže s 3,2 % navýšením prevzdušnenia. U vzorky SDPA došlo k navýšeniu prevzdušnenia z 5,1 % (REF) na 7,9 % (SPDA_234,82·10⁻⁴ hm. %), čiže o 2,8 % a došlo k redukcii autogénneho zmrštenia o 13 %. U vzorky SDS došlo k navýšeniu prevzdušnenia z 4,8 % (REF) na 7,0 % (SDS_2,28·10⁻⁴ hm. %), čiže o 3 %, a došlo k redukcii autogénneho zmrštenia o 12 %. U vzorky TBAC došlo k navýšeniu prevzdušnenia z 5,1 % (REF) na 7,9 % (TBAC_1750·10⁻⁴ hm. %), čiže o 2,8 %, a došlo k redukcii autogénneho zmrštenia o 23 %. A u poslednej vzorky LB došlo k navýšeniu prevzdušnenia z 5,4 % (REF) na 8,4 % (LB_8,70·10⁻⁴ hm. %), čiže o 3,0 %, a došlo k redukcii autogénneho zmrštenia o 11 %.



Obr. 19 Autogénne zmrštenie prevzdušnených vzoriek AAS za autogénnych podmienok, v priebehu 28 dní hydratácie



Obr. 20 Hmotnostné zmeny prevzdušnených vzoriek AAS za autogénnych podmienok, v priebehu 28 dní hydratácie

3.4. Meranie rozliatia malty

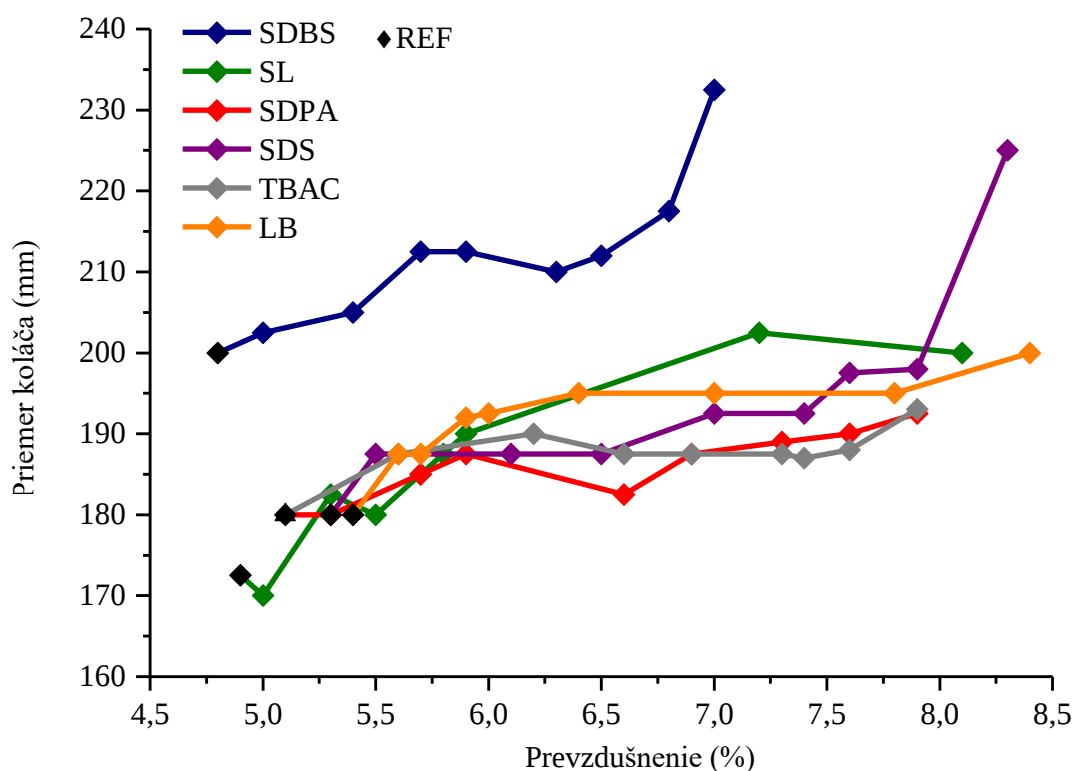
Prídavky prevzdušňovacích prísad majú vplyv nie len na zmrštenie AAS, ale aj na spracovateľnosť. Bol sledovaný vplyv AEA na spracovateľnosť ako priemer koláču vzniknutého rozliatím malty, po 15 zátrasoch, na rozlievacom stolíku. Vplyv AEA na spracovateľnosť zobrazuje obr. 21. Môžeme pozorovať zvyšujúci sa priemer koláča malty, ktorý stúpa s prevzdušnením, čo znamená, že spracovateľnosť malty stúpa s rastúcim prídavkom AEA resp. prevzdušnením malty. Spracovateľnosť malty je nepriamo úmerná pevnosti, čiže keď spracovateľnosť stúpa, tak pevnosti klesajú. Tento fakt dokazuje kap. 3.2., kde je možné vidieť klesajúci trend pevnosti s prídavkom AEA. Zvýšenie

spracovateľnosti môžeme vysvetliť tým, že malé vzduchové bubliny zachytené v malte pomocou AEA sa správajú ako guľôčkové ložiská, cez ktoré ľahko klížu častice agregátov. Tento efekt sa nazýva lubrikačný účinok vzduchových bublín. Poskytuje tiež tlmiaci účinok medzi zrnami piesku a znižuje interferenciu častíc na minimum [77]. Kashani a kol. [83] tento efekt nazýva ako premostujúci efekt. Premostujúci efekt vzniká vytvorením premostenia medzi bublinou a naadsorbovanými dvoma alebo viacerými troskovými časticami. Prekvapivo, pri nepôsobení šmykového napätia na premostenie dochádza k zvyšovaniu meze klzu, pričom bubliny fungujú ako flokulačné častice, a pri pôsobení šmykového napätia dochádza k poklesu plastickej viskozity, pričom bubliny fungujú ako tekutina.

Za povšimnutie stojí vzorka REF, ktorá vykazovala odlišné hodnoty prevzdušnenia v rozmedzí 4,5–5,4 %, keďže prevzdušnenie je závislé na teplote [76] a teplota v laboratóriu mohla kolísať. Preto vzorka REF bola premeraná pred meraním každej prísady.

Obdobné výsledky prezentovali Bakharev a kol. [49], ktorý pridali rozpustnú soľ alkyl arylsulfonátu. Táto rozpustná soľ bola pridaná do trosky aktivovanej sodným vodným sklom a fungovala ako prevzdušňovacia prísada. V tejto práci uvádzajú zlepšenie spracovateľnosti s prídavkom prevzdušňujúcej prísady. Taktiež Douglas a kol. [78] dosiahol podobných výsledkov. Vo svojej práci použili prevzdušňovaciu prísadu typu sulfonovaného uhl'ovodíka vo vysokopecnej troske aktivovanej kremičitanom sodným.

K prihliadnutiu na prevzdušnenie, najlepšie dokázala zlepšiť spracovateľnosť prísada SDS, a to o 25 % s 3 % prevzdušnením. Dobré výsledky mala prísada SDBS, ktorá zlepšila spracovateľnosť o 16 % s prevzdušnením o 2,2 %, a taktiež prísada SL zlepšila spracovateľnosť o 16 % s 3,2 % prevzdušnením. Prísada LB mala taktiež slušné výsledky, ale dokázala zlepšiť spracovateľnosť, iba o 11 % s 3 % prevzdušnením. U ostatných prísad došlo k zlepšeniu spracovateľnosti, ale nie v takej veľkej miere, a to o 7 % u prísady SDPA s 2,8 % prevzdušnením, a rovnako o 7 % u prísady TBAC s 2,8 % prevzdušnením.



Obr. 21 Vplyv AEA na spracovateľnosť AAS vzoriek, zobrazený ako závislosť priemeru koláča na prevzdušnení

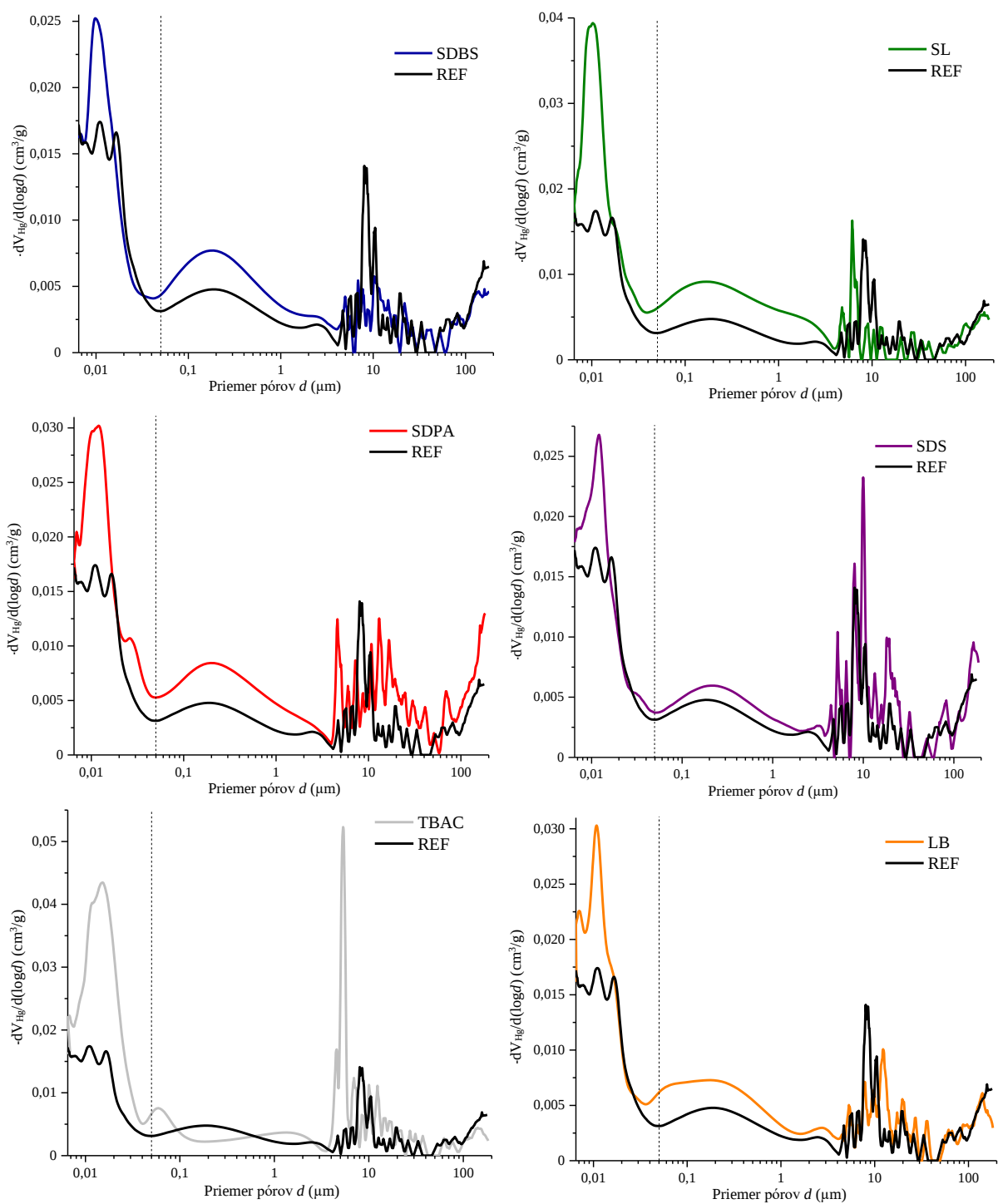
3.5. Ortuťová intrúzna porozimetria

Obr. 22 dokazuje, že prevzdušňujúce prísady mali očakávaný efekt na pasty z AAS, pričom na tomto obrázku sú zobrazené distribučné krivky priemerov pórov všetkých použitých AEA s najväčšou koncentráciou, použitou na prípravu malty viz. tab. 4, po 7 dňoch hydratácie. Z obr. 22 je viditeľné, že po 7 dňoch hydratácie bola nájdená prepojená sieť pórov o veľkostiach okolo 10 nm, a v rozmedzí od 50 nm až po 1 μm s tým, že s prídavkom AEA došlo k zvýšeniu intenzity týchto pík, okrem prísady TBAC, ktorá vytvorený pík v rozmedzí 50 nm až po 1 μm skôr rozdelila a vytvorila dva píky, na hodnotách 60 nm a 2 μm . Za zmienku stojí aj oblasť s veľkosťami pórov nad 30 μm , kde je “zubatá” časť v oblasti makropórov. Táto časť krivky môže byť ovplyvnená nerovnosťami na povrchu pripravenej vzorky, ktoré mohli vzniknúť pri jeho brúsení, a taktiež mohli byť ovplyvnené trhlinami spôsobené autogénnym zmrštením a lámacou technikou preparácie vzorky. V grafoch na obr. 22 je zobrazená prerušovaná čiara na hodnote 50 nm, ktorá oddeľuje rozmedzie veľkosti mezopórov a makropórov (podľa IUPAC [44]). Po ľavej strane prerušovanej čiary, čiže od 50 nm a nižšie sú zobrazené distribúcie priemerov mezopórov, a na pravej strane od prerušovanej čiary sú zobrazené distribúcie priemerov makropórov. Je viditeľné, že AEA v AAS menili distribúciu priemerov pórov v oblasti mezopórov, ale aj v oblasti makropórov, a to tak, že sa vytvorilo väčšie množstvo mezopórov, ale aj makropórov. Všetky AEA mali relatívne podobné distribúcie priemerov pórov, okrem prísady TBAC. Prísada TBAC rozdelila spomínaný pík (od 50 nm až po 1 μm) v oblasti makropórov na dva, a zároveň vykazuje obrovský pík na hodnote 5 μm v oblasti makropórov. Meranie vplyvu AEA na mikroporozitu nebol možný, keďže použitá technika má rozsah iba na meranie mezopórov a makropórov.

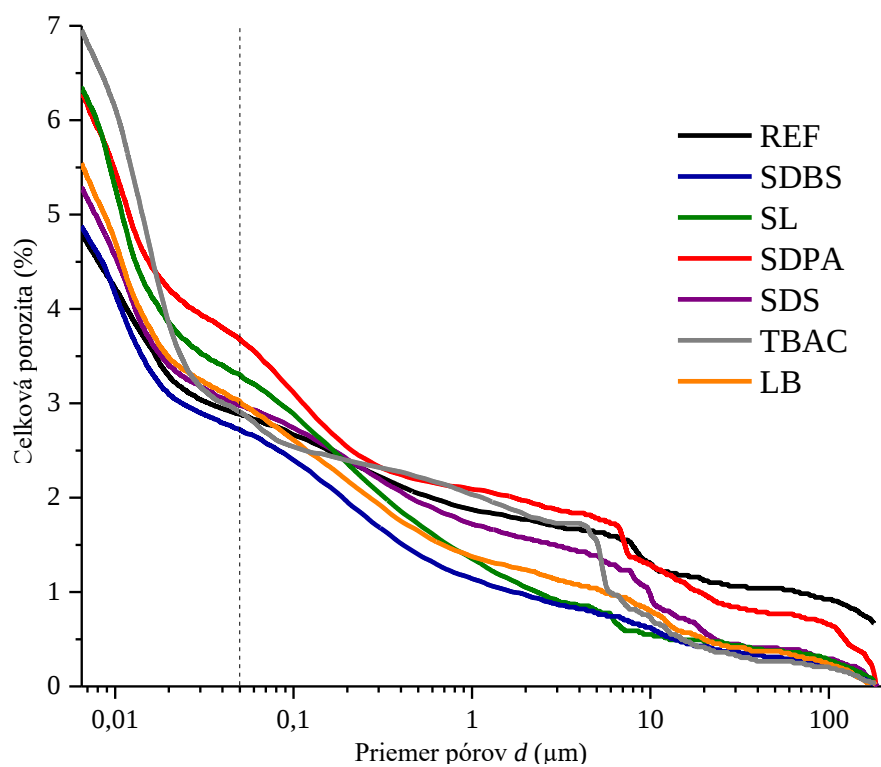
Výsledky získané z ortuťovej intrúznej porozimetrie boli prepočítané na celkovú porozitu vo vzorkách, po 7 dňoch hydratácie, a výsledný graf je zobrazený na obr. 23. Z tohoto grafu boli zároveň prepočítané percentuálne množstvá mezopórov a makropórov, pričom výsledné hodnoty sú zaznamenané v tab. 5. Množstvo mezopórov bolo stanovené iba v škále od 6,5 nm po 50 nm, z dôvodu rozsahu použitého ortuťového intrúzneho porozimetru. Z výsledkov je evidentné, že REF obsahuje veľké množstvo mezopórov ako tvrdil autor v práci [69], a zároveň je evidentné, že dochádzalo k zvyšovaniu množstva makropórov s prídavkami AEA. K najväčšiemu zvýšeniu makropórov, k prihladnutiu na prevzdušnenie, došlo u prísady TBAC, čo bolo spôsobené retardáciou hydratácie resp. vytvorilo sa menšie množstvo CSH gélu. Pre lepšie odôvodnenie viz kapitola 3.7.

Distribučné krivky priemerov pórov podporujú vysvetlenie redukcie autogénneho zmrštenia pomocou AEA. Došlo k navýšeniu množstva makropórov v AAS, čo spôsobilo tvorbu meniskusov v póroch s väčším priemerom, a preto kapilárny tlak klesol resp. výsledné autogénne zmrštenie bolo menšie vo vzorkách s prídavkom AEA ako vo vzorke REF, ktorá neobsahovala žiadnu prísadu.

Podobné výsledky prezentuje práca [24], kde autor použil prísadu redukujúcu zmrštenie v AAS, pričom táto prísada zvýšila percento pórov s priemerom od 1 do 0,1 μm , kde je kapilárne napätie omnoho nižšie ako v menších kapilárach prevládajúcich v AAS bez prísady redukujúcej zmrštenie.



Obr. 22 Distribučné krivky priemerov pórov všetkých použitých AEA v pastách AAS po 7 dňoch hydratácie



Obr. 23 Distribúcia priemerov pórov vo vzorkách AAS, po 7 dňoch hydratácie

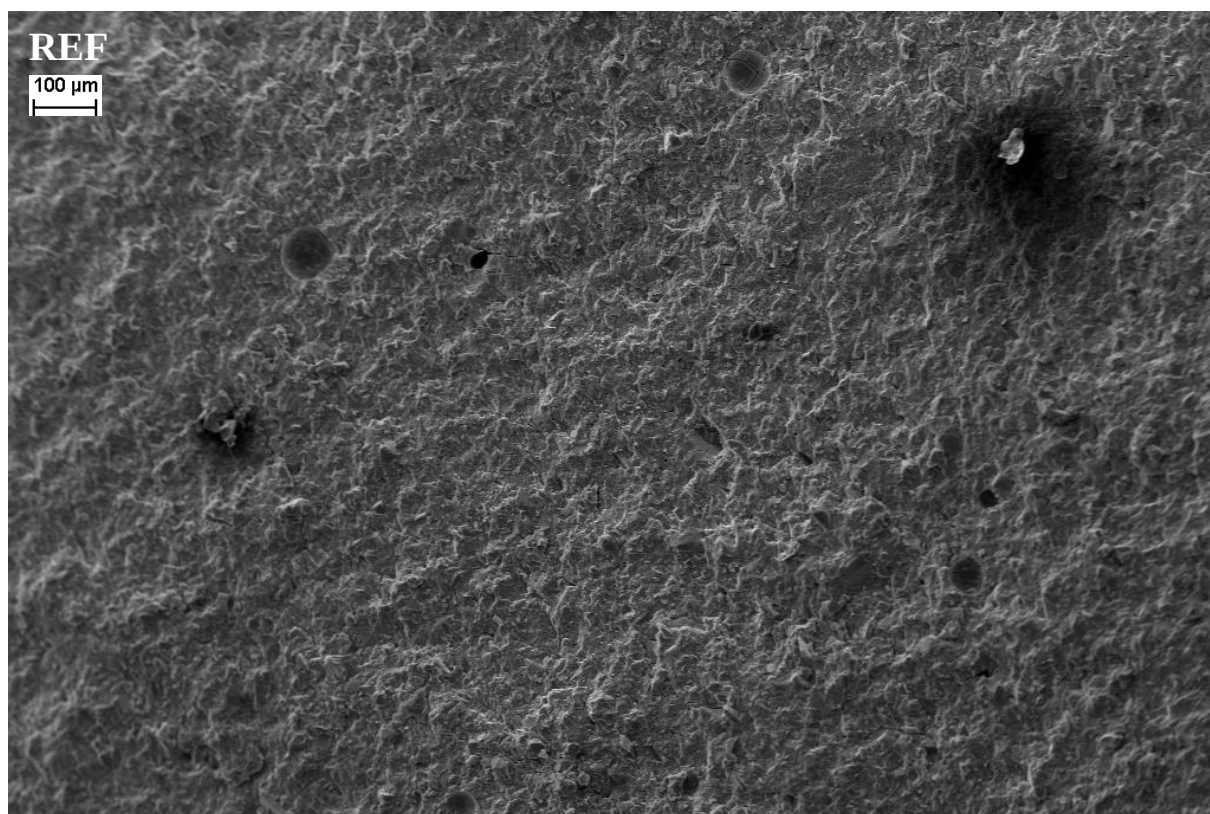
Tab. 5 Celková porozita a množstvo mezopórov a makropórov vo vzorkách, po 7 dňoch hydratácie

Vzorka	Celková porozita (obj. %)	Množstvo mezopórov (obj. %)	Množstvo makropórov (obj. %)
REF	4,79	60,27	39,73
SDBS	4,88	55,94	44,06
SL	6,34	52,05	47,95
SDPA	6,28	58,76	41,24
SDS	5,28	56,29	43,71
TBAC	6,96	41,92	58,08
LB	5,54	54,66	45,34

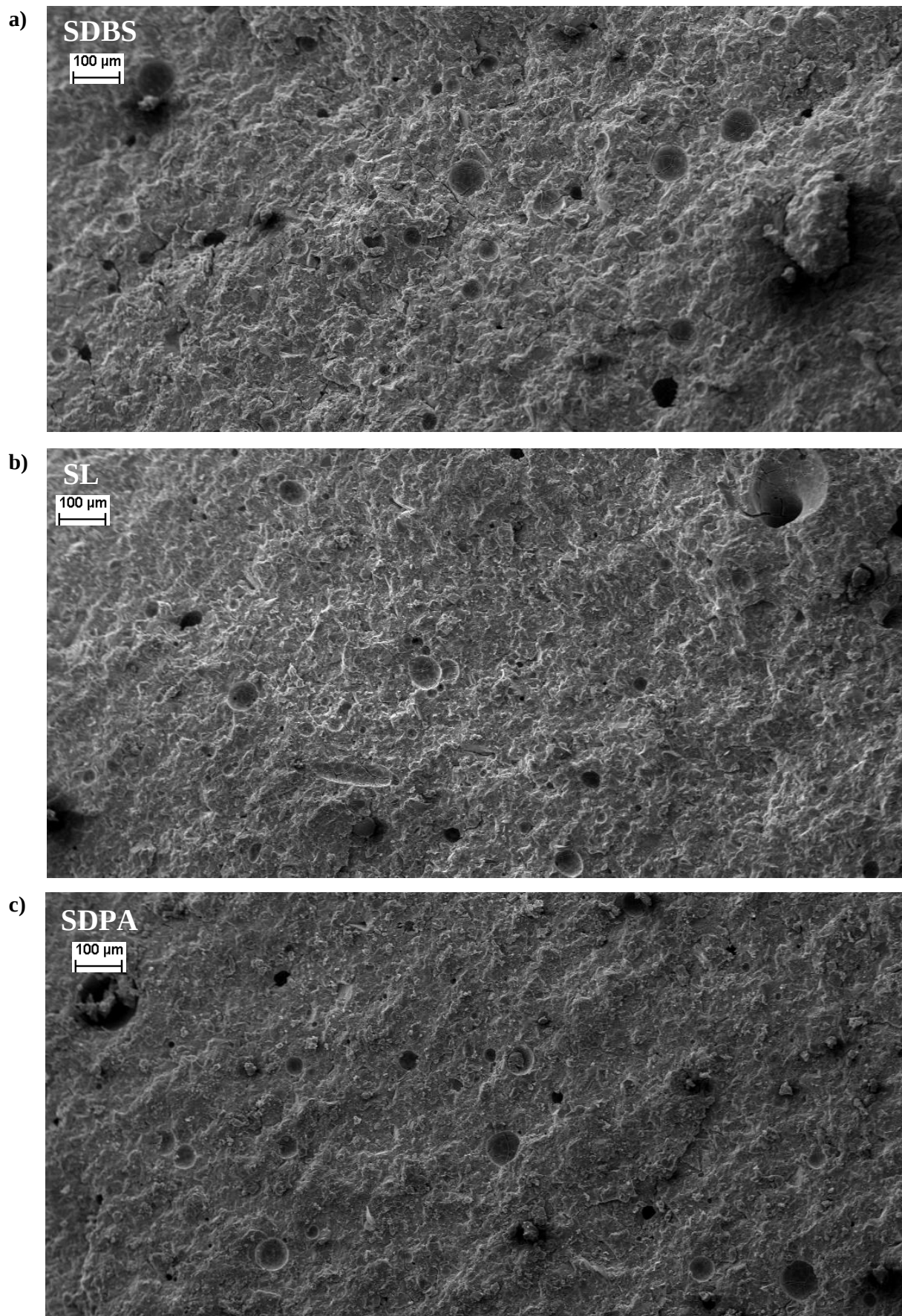
3.6. Skenovacia elektrónová mikroskopia

Pre potvrdenie a podporenie predošlých výsledkov bola porovnaná morfológia AAS bez AEA (vzorka REF) so vzorkami, ktoré obsahujú AEA. Porovnanie morfológie bolo zrealizované prostredníctvom SEM s detektorom sekundárnych elektrónov po 7 dňoch hydratácie pasty. Vzorky použité na SEM analýzu sa odoberali zo vzoriek lámaním namiesto rezania, pretože technikou lámania dochádza k pretrhnutiu v najslabšom mieste, čo je práve stred dutiny, vytvorenej záchytnom vzduchu pri miešaní čerstvej malty [82]. Preto technika lámania najlepšie slúži na účel pozorovania skutočných priemerov vzduchových dutín. Výsledky sú zobrazené na obr. 24, 25 a 26. Na obr. 24 je zachytená snímka zo SEM, ktorá zobrazuje morfológiu lomovej plochy vzorky REF a na obr. 25 a 26 sú snímky zo SEM, ktoré zobrazujú morfológiu lomovej plochy vzoriek s obsahom AEA. Na snímkach zo SEM sú viditeľné póry, ktoré majú veľkosť viac ako 50 nm, čo znamená, že sa jedná o makropóry (podľa IUPAC [44]), taktiež je viditeľný rozdiel medzi REF a vzorkami s obsahom AEA. U vzoriek s obsahom AEA je viditeľne viac vytvorených dutín ako u vzorky REF, ktoré sa vytvorili stabilizáciou vzduchových bublín pomocou AEA pri miešaní pasty. Na týchto snímkach je taktiež viditeľné, že v týchto dutinách je veľké množstvo prasklín v porovnaní s okolitým zhydratovaným spojivom. Pomocou AEA boli vytvorené bubliny, ktoré pôsobili ako defekty na ktorých sa koncentrovalo napätie, preto sa iniciovali tvorby trhlín pri pôsobení tlaku na trámiky, čo potvrdzuje kapitola 3.2.. Trhliny v dutinách sú najlepšie viditeľné na snímke vzorky TBAC.

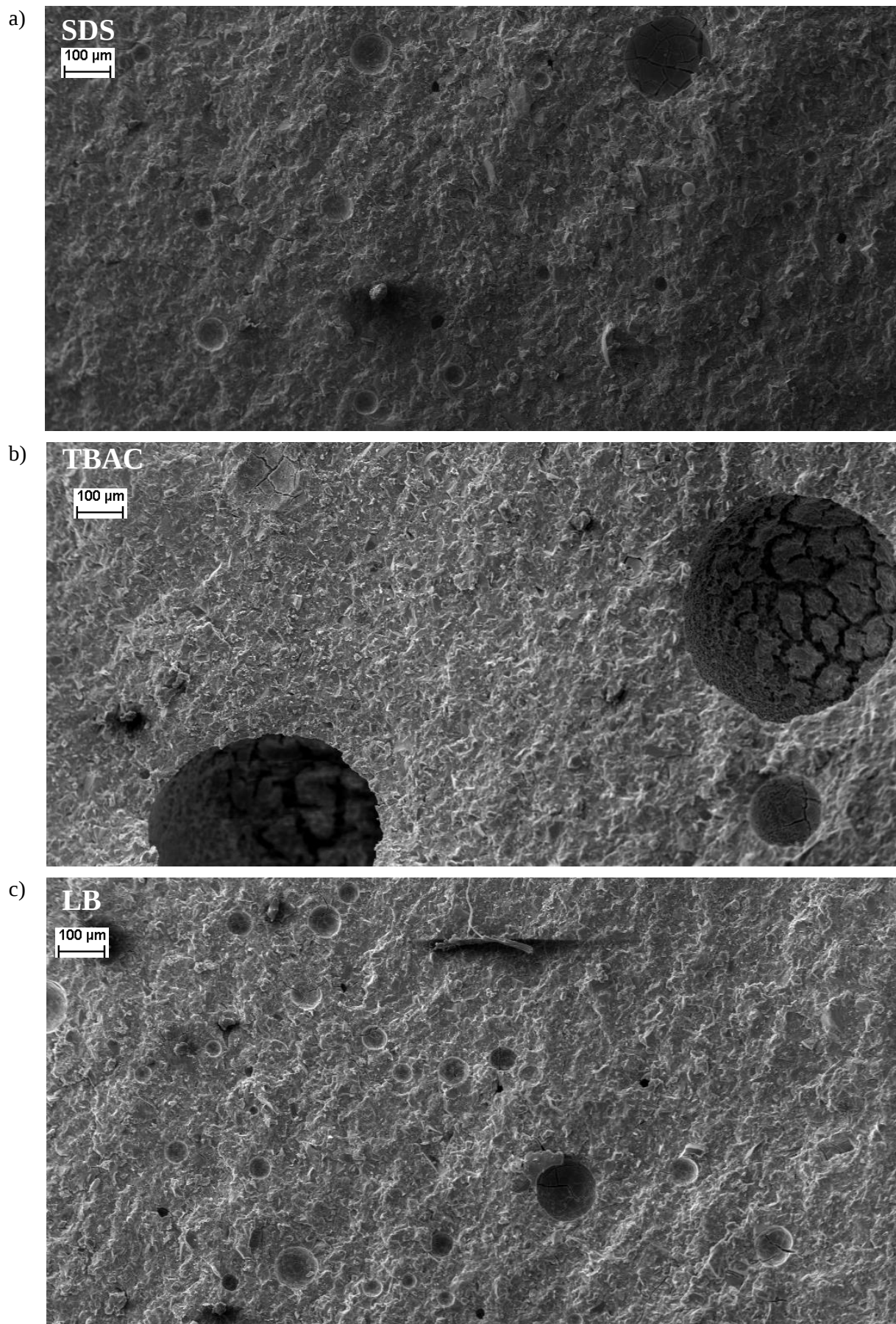
Pri porovnaní snímok nie je viditeľný žiadny iný rozdiel okrem počtu vytvorených dutín, preto môžeme usúdiť, že AEA nemalo viditeľný vplyv zo SEM snímok na hydratáciu a tvorbu CSH resp. CASH gélu.



Obr. 24 Snímka zo SEM, ktorá zobrazuje morfológiu lomovej plochy vzorky REF



Obr. 25 Snímky zo SEM, ktoré zobrazujú morfológiu lomovej plochy vzoriek AAS s prísadami
a) SDBS, b) SL a c) SDPA

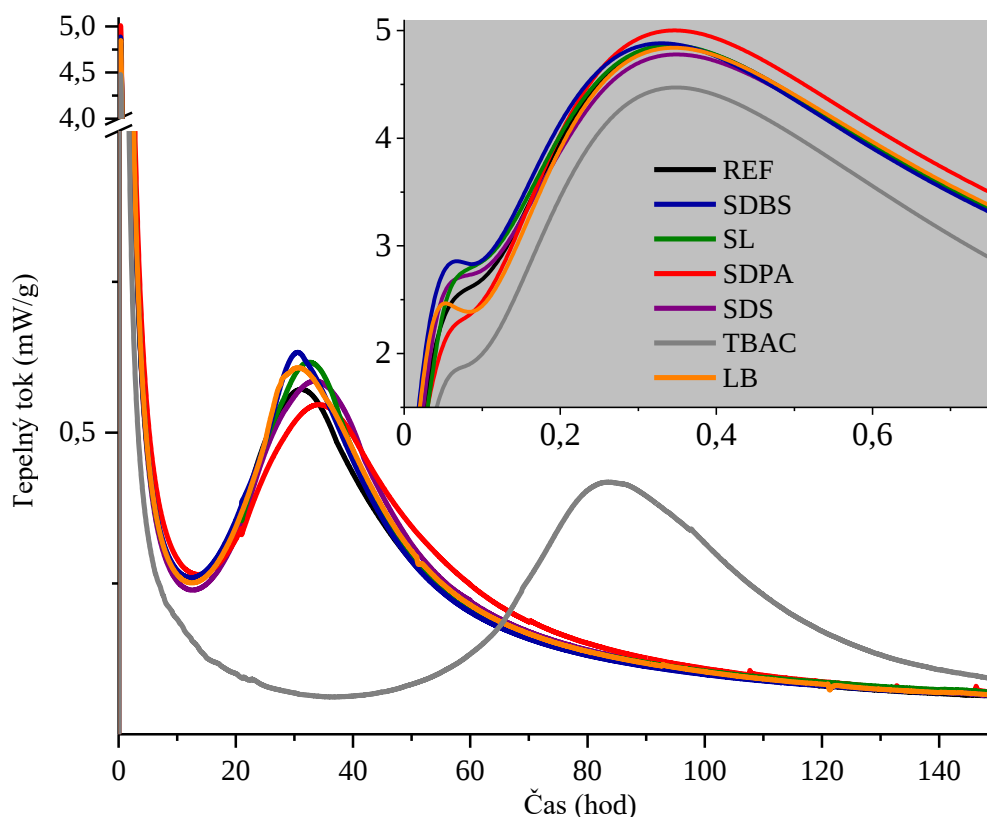


Obr. 26 Snímky zo SEM, ktoré zobrazujú morfológiu lomovej plochy vzoriek AAS s prísadami
a) SDS, b) TBAC a c) LB

3.7. Izotermická kalorimetria

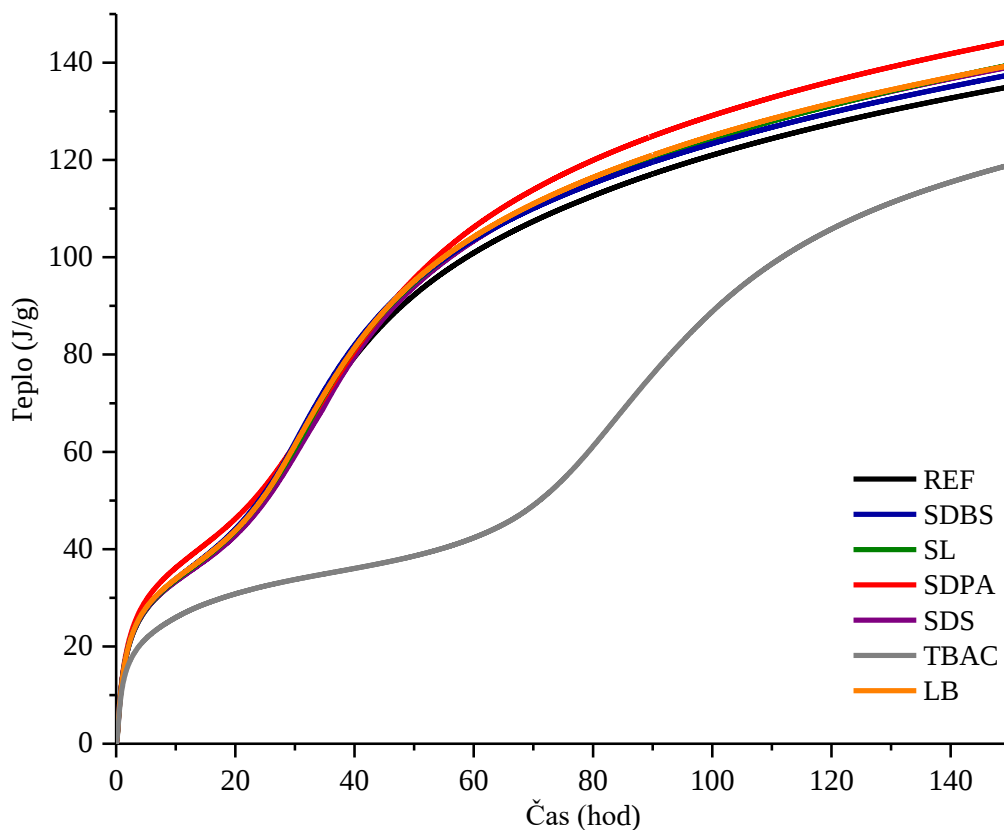
Sledovanie vplyvu AEA v AAS bolo doplnené o izotermickú kalorimetriu, pričom výsledky sú uvedené na obr. 27 a 28. Na obr. 27 je zobrazená kalorimetrická krivka trosky aktivovanej pomocou vodného skla, kde sa objavujú dva píky v predindukčnej perióde a jeden po indukčnej perióde. Prvý pík v predindukčnej perióde prevažne odpovedá zmáčaniu a rozpúšťaniu VP trosky, a taktiež sa adsorbujú niektoré ióny na povrch troskových zŕn, a druhý pík odpovedá tvorbe primárneho CSH gélu. Potom nastáva indukčná perióda a následne obdobie zrýchlenej hydratácie, kde vzniká sekundárny CSH gél, pričom zrýchlená hydratácia je na krivke indikovaná tretím píkom, a za jeho maximom rýchlosť uvoľňovania tepla iba klesá. Tento priebeh kalorimetrickej krivky je typický pre typ krivky III (viz. kapitola 1.4.3). Obr. 27 taktiež zobrazuje vplyv AEA na tepelný tok hydratácie AAS, a je zrejmé, že použité AEA nemajú veľký vplyv na hydratáciu AAS, ale toto tvrdenie neplatí pre prísadu TBAC. Prísada TBAC viditeľne zabraňuje rozpúšťaniu zŕn VP trosky, čím sa vytvorilo menšie množstvo primárneho CSH gélu (viz. druhý pík v predindukčnej perióde). Taktiež z výsledných kalorimetrických kriviek je zrejmé, že prísada TBAC posunula iniciáciu tretieho píku, čo znamená, že došlo k retardácii hydratácie AAS resp. vytvorilo sa menšie množstvo sekundárneho CSH gélu, čo malo za následok zhoršenie počiatkových, ale aj neskorších pevností v tlaku, popísané v kapitole 3.2., a zároveň došlo k väčšej tvorbe makropórov, čo pozitívne ovplyvnilo redukciu autogénneho zmrštenia viz. kapitola 3.3. Navyše tretí pík je širší a nižší, pričom podobný vplyv na tretí pík je pozorovaný aj v práci [89], kde autor použil prísadu redukujúcu zmrštenie v AAS, ktorá so zvyšujúcou sa koncentráciou posúvala tretí pík, a zároveň práca [45] prezentovala podobný vplyv na tretí pík, kde autor sledoval vplyv silikátového modulu na troskový systém aktivovaný vodným sklom.

Zaujímavosťou je, že u vzorky TBAC $\cdot 1750 \cdot 10^{-4}$ hm. % nedochádzalo skoro k žiadnemu zmršteniu približne do 2 dni (viz. kapitola 3.3.), no po 2. dni zmršťovanie začalo, čo sa môže vysvetliť práve tvorbou sekundárneho CSH gélu v 2. deň hydratácie.



Obr. 27 Vplyv AEA na tepelný tok v priebehu 7 dňoch hydratácie AAS

Vývoj celkového hydratačného tepla vzoriek s prídavkami AEA, v priebehu 7 dní hydratácie, je uvedený na obr. 28. V prvej fáze hydratácie vzoriek s prídavkami AEA je vývoj celkového uvoľneného tepla takmer totožný so vzorkou REF, ale s objavovaním tretieho píku, vzorky s prídavkom AEA uvoľňujú mierne väčšie množstvo celkového tepla. To ale neplatí pre vzorku s prísadou TBAC, ktorá uvoľnila podstatne menej tepla ako REF.



Obr. 28 Vplyv AEA na celkové uvoľnenie tepla behom 7 dní hydratácie AAS

4. ZÁVER

Cieľom diplomovej práce bolo sledovať vybrané vlastnosti alkalicky aktivovanej trosky s prídavkami AEA a zhodnotenie účinku AEA v alkalicky aktivovanom materiáli. AEA sú povrchovo aktívne látky, ktoré vytvárajú resp. stabilizujú malé vzduchové bubliny roz distribuované v spojive, čím menia distribúciu veľkosti pórov. Podľa práce [69] má distribúcia veľkosti pórov veľký vplyv na zmrštenie, a práve preto bol sledovaný vplyv AEA na alkalicky aktivovanú trosku, keďže je notoricky známy fakt o probléme zmršťovania v AAS.

Na začiatok treba uviesť, že AEA z kategórie aniónových a amfotérnych prísad mali relatívne rovnaký efekt na všetky vybrané vlastnosti, bez ohľadu na ich chemickú štruktúru, a AEA z kategórie kationových mali iný efekt na určité sledované vlastnosti. Prídavok AEA v AAS mal očakávaný výsledok, došlo k prevzdušneniu resp. AEA stabilizovali tvorbu malých bublín v čerstvej malte. So zvyšujúcou koncentráciou AEA sa zvyšovalo prevzdušnenie v AAS, a zároveň klesala objemová hmotnosť.

Hlavným spomínaným dôvodom prídavku AEA bolo sledovanie zmrštenia za autogénnych podmienok. Prídavky AEA mali pozitívny vplyv, dokázali zredukovať autogénne zmrštenie, a so zvyšujúcou sa koncentráciou AEA dochádzalo k väčšej redukcii zmrštenia. Zmrštenie bolo merané 28 dní, ale toto zmrštenie nebolo konštantné, a z výsledkov bolo viditeľné, že zmrštenie by rástlo aj naďalej. Autogénne zmrštenie bolo zredukované tým, že AEA zmenili distribúciu veľkosti pórov. Podľa ortuťovej intrúznej porozimetrie AEA zvýšilo množstvo mezopórov, ale aj množstvo makropórov v AAS. Tým že AEA vytvorilo väčšie množstvo makropórov, tak došlo ku tvorbe meniskusov v póroch s väčším priemerom, čím sa znížilo kapilárne napätie, ktoré je hlavným zdrojom zmrštenia. Redukcia autogénneho zmrštenia mohla byť podporená aj tým, že AEA sú povrchovo aktívne látky, čiže znižujú povrchové napätie, a pri znižovaní povrchového napätia dochádza k znižovaniu tlaku na meniskuse vytvorenom v kapilárach.

Prídavok AEA mal taktiež pozitívny vplyv na spracovateľnosť čerstvej malty, keďže so zvyšujúcou koncentráciou AEA bol priemer rozliatej malty väčší. Zvýšenie spracovateľnosti môžeme vysvetliť tým, že malé vzduchové bubliny zachytené v malte pomocou AEA sa správajú ako guľôčkové ložiská, cez ktoré ľahko klížu častice agregátov. Nevýhodou je, že spracovateľnosť malty je nepriamo úmerná pevnosti, čiže keď spracovateľnosť rastie, tak pevnosti klesajú. Tento nepriaznivý fakt platil aj v tomto prípade, keďže so zvyšujúcou koncentráciou AEA sa znižovala pevnosť v ťahu za ohybu, ale aj pevnosť v tlaku. So zvyšovaním koncentrácie AEA vo vzorkách dochádzalo k zvýšeniu množstva pórov v materiáli, čiže sa vytvorilo väčšie množstvo defektov na ktorých sa koncentrovalo napätie, a preto póry iniciovali tvorbu trhlín pri pôsobení tlaku na trámiky z AAS. Zaujímavosťou je, že u niektorých AEA ako SL, SDPA, SDS a TBAC dosahovali pevnosti v ťahu za ohybu (28. deň tvrdenia) väčších pevností vzorky obsahujúce AEA, ako vzorka REF. Táto zaujímavosť bola pozorovaná aj pri pevnostiach v tlaku, u vzoriek SDBS, SL, SDPA, SDS (28. deň tvrdenia). Toto pozorovanie môže byť vysvetlené tým, že vzorka REF obsahovala zachytený vzduch, ktorý vytvoril vzduchové bubliny nepravidelných tvarov. Vzorky obsahujúce AEA stabilizujú tvorbu vzduchových bublín pravidelných veľkostí, a tým sa pravdepodobne dosiahli vyššie pevnosti. Vo všeobecnosti dochádzalo k strate pevnosti v tlaku, 28. deň tvrdenia v rozmedzí od 3,1 % do 6,5 % s prídavkom 1 % prevzdušnenia u aniónových AEA, u kationovej AEA dochádzalo k 9 % poklesu, a u amfotérnej AEA nastal pokles o 8,6 % s prídavkom 1 % prevzdušnenia.

Práca bola doplnená o snímky zo skenovacieho elektrónového mikroskopu, ktoré dokázali tvorbu väčšieho množstva makropórov po prídavkoch AEA. Taktiež práca bola doplnená o izotermickú kalorimetriu, kde sa sledoval vplyv AEA na hydratáciu AAS. Použité AEA nemajú veľký vplyv na hydratáciu AAS, ale toto tvrdenie neplatí pre prísadu TBAC. Prísada TBAC viditeľne zabraňuje rozpúšťaniu zrn VP trosky, čím sa vytvára menšie množstvo CSH gélu, a zároveň dochádza k retardácii hydratácie AAS a vytvára sa menšie množstvo primárneho a sekundárneho CSH gélu, čo má za následok zhoršenie počiatočných, ale aj neskorších pevností v tlaku, no zároveň došlo k pozitívnemu ovplyvneniu redukcii zmrštenia. Retardácia hydratácie môže byť vysvetlená tým, že

prísada TBAC obsahuje kvartérny amóniový kation, ktorý je pravdepodobne priťahovaný k záporne nabitým časticiam trosky, a tým sa častice trosky obaľujú a spomaľuje sa hydratácia.

S prihliadnutím na prevzdušnenie, došlo k najväčšiemu poklesu pevnosti v tlaku u prímеси TBAC, a zároveň došlo k najväčšej redukcii zmrštenia za autogénnych podmienok. Táto redukcia zmrštenia bola ovplyvnená zmenou distribúcie veľkosti pórov, no zároveň bola ovplyvnená retardáciou hydratácie trosky, čím sa vytvorilo menšie množstvo CSH gélu. Z pohľadu využitia prevzdušňovacích prísad v AAS na prevzdušnenie, sa vhodné javia aniónové prísady (SDBS, SL, SDPA, SDS), keďže u týchto prísad v nízkych koncentráciách došlo k miernemu zvýšeniu pevnosti v tlaku, a pri najvyšších koncentráciách došlo k miernemu zníženiu pevnosti v tlaku, ale tento pokles bol v rámci chybových úsečiek, preto táto strata môže byť zanedbaná. Samozrejme s prihliadnutím na prevzdušnenie. Zároveň aniónové prísady dokázali zlepšiť spracovateľnosť, a čo je hlavné, dokázali zredukovať autogénne zmrštenie, a preto do budúcnosti z hľadiska redukcie autogénneho zmrštenia v nich môžeme vidieť veľký potenciál.

5. LITERATÚRA

- [1] KÜHL, Hans. Cement and process of making the same. 1926. US1594178 A US PATENT.
- [2] PROVIS, John L. and Jannie S. J. VAN DEVENTER. Alkali Activated Materials: State-of-the-Art Report, RILEM TC 224-AAM. 2014. ISBN 978-940-0776-722.
- [3] SHI, Caijun, Pavel V. KRIVENKO and Della ROY. Alkali-Activated Cements and Concretes. New York: Taylor & Francis, 2006. ISBN 978-0-415-70004-7.
- [4] CYR, M. a R. POUHET. The frost resistance of alkali-activated cement-based binders. *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*. Elsevier, 2015, 2015, , 293-318. DOI: 10.1533/9781782422884.3.293. ISBN 9781782422761. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9781782422761500113>
- [5] ŠKVÁRA, František. ALKALI ACTIVATED MATERIALS OR GEOPOLYMERS? In: *Ceramics – Silikáty* [online]. 2007, s. 173–177 [cit. 2017-11-05]. ISSN 1804-5847. Available at: http://www.ceramics-silikaty.cz/2007/pdf/2007_03_173.pdf.
- [6] V.F.F. BARBOSA, K.J.D MACKENZIE, C. THAUMATURGO, *Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers*. International Journal of Inorganic Materials 2 (2000) 309-317
- [7] Stavební obzor. Praha: Fakulta stavební ČVUT, 2006, roč. 15, č. 5. ISSN 1210-4027. Dostupné z: www.profesis.cz/files//dokumpdf/sobzor/so052006.pdf.
- [8] DEVENTER, Jannie van a J. L. PROVIS. *Alkali Activated Materials - State-of-the-Art Report*. Springer, 2013. ISBN 9789400776715.
- [9] PROVIS, John L., Angel PALOMO and Caijun SHI. Advances in understanding alkaliactivated materials. *Cement and Concrete Research* [online]. 2015, 78, 110–125 [cit. 2017-11-05]. DOI: 10.1016/j.cemconres.2015.04.013. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884615001192>.
- [10] KOTLÍK, P. *Stavební materiály historických objektů*. Praha: VŠCHT Praha, 1999. ISBN 80-7080-347-9.
- [11] BAKHAREV, Tatiana, Jay Gnananandan SANJAYAN a Yi-Bing CHENG. *Alkali activation of Australian slag cements*. DOI: 10.1016/S0008-8846(98)00170-7. ISBN 10.1016/S0008-8846(98)00170-7. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884698001707>
- [12] NAJAFI KANI, Ebrahim, Ali ALLAHVERDI a John L. PROVIS. *Efflorescence control in geopolymer binders based on natural pozzolan*. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2011.07.007. ISBN 10.1016/j.cemconcomp.2011.07.007. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946511001272>
- [13] FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A., J. G. PALOMO a F. PUERTAS. Alkali-activated slag mortars: Mechanical strength behaviour. *Cement and Concrete Research*. 1999, 29(8), 1313–1321. DOI: 10.1016/S0008-8846(99)00154-4.
- [14] KONSTA-GDOUTOS, Maria S. a Surendra P. SHAH. *Hydration and properties of novel blended cements based on cement kiln dust and blast furnace slag*. DOI: 10.1016/S0008-8846(03)00061-9. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884603000619>
- [15] PHAIR, J.W., VAN DEVENTER, J.S.J.: Effect of silicate activator pH on the leaching and material characteristics of waste-based inorganic polymers. *Minerals Engineering*, Vol. 14, No. 3, 2001, pp. 289-304.
- [16] Základní informace o vodním skle. In: *Vodní sklo* [online]. [cit. 2017-11-15]. Available at: <http://www.vodnisklo.cz/cz/clanky/zakladni-informace-o-vodnim-skle>.

- [17] BAKHAREV, Tatiana, Jay Gnananandan SANJAYAN a Yi-Bing CHENG. *Alkali activation of Australian slag cements*. DOI: 10.1016/S0008-8846(98)00170-7. ISBN 10.1016/S0008-8846(98)00170-7. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884698001707>
- [18] BUCHWALD, A., KAPS, CH., HOHMANN, M.: Alkali-activated binders and pozzolan cement binders – complete binder reaction or two sides of the same story?. 11th International Congress on the Chemistry of Cements, Durban, South Africa, 2003. pp. 1238-1246.
- [19] LI, Chao, Henghu SUN a Longtu LI. *A review: The comparison between alkali-activated slag (Si Ca) and metakaolin (Si Al) cements*. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.03.020. ISBN 10.1016/j.cemconres.2010.03.020. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S000888461000089X>
- [20] AITCIN, P.C.: Vysokohodnotný beton. 1. vyd. Praha: Betonové stavitelství, 2005. 320 s. ISBN: 80-86769-39-9.
- [21] GOVOROV, A. A. *The Processes of Hydrothermal Hardening of Slag Dispersions*, Naukova Dumka Publish., Kiev, 1976.
- [22] DAVIDOVITS, J.: Geopolymer: Chemistry & Applications. 2nd ed. Geopolymer Institute, 2008. ISBN: 2-9514820-1-9.
- [23] Properties and uses of iron and steel slags. In: National Slag Association [online]. [cit. 2020-05-25]. Available at: http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:GeXgCKDzRVoJ:www.nationalslag.org/sites/nationalslag/files/documents/nsa_1826_properties_and_uses_slag.pdf+&cd=14&hl=en&ct=clnk&gl=cz
- [24] PALACIOS, M. a F. PUERTAS. Effect of shrinkage-reducing admixtures on the properties of alkali-activated slag mortars and pastes. *Cement and Concrete Research*. 2007, **37**(5), 691-702. DOI: 10.1016/j.cemconres.2006.11.021. ISSN 00088846. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884607000208>
- [25] FERNANDEZ-JIMENEZ, A., F. PUERTAS and A. ARTEAGA. Determination of Kinetic Equations of Alkaline Activation of Blast Furnace Slag by Means of Calorimetric Data. *Journal of Thermal Analysis* [online]. 1998, **52**(3), 945–955 [cit. 2017-11-15]. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1023%2FA%3A1010172204297>.
- [26] *Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes*. Waltham, MA: Woodhead Pub., 2014. ISBN 978-1-78242-276-1.
- [27] SHI, C. a R. L. DAY. A calorimetric study of early hydration of alkali-slag cements. *Cement and Concrete Research*. 1995, **25**(6), 1333–1346. DOI: 10.1016/00088846(95)00126-W.
- [28] BEN HAHHA, M., G. LE SAOUT, F. WINNEFELD and B. LOTHENBACH. Influence of activator type on hydration kinetics, hydrate assemblage and microstructural development of alkali activated blast-furnace slags. *Cement and Concrete Research*[online]. 2011, **41**(3), 301–310 [cit. 2017-11-15]. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.11.016. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884610002590?via%3Dihub>.
- [29] CONG, X., KIRKPATRICK, R.J.: ²⁹Si MAS NMR Study of the Structure of Calcium Silicate Hydrate. *Advn. Cem. Bas. Mat.*, 1996. pp. 144-156. ISSN: 1065-7355.
- [30] FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A., PALOMO, A. REVUELTA, D.: Alkali activation of industrial by-products to develop new earth-friendly cements. In *Proceeding of the 11th International Conference on Non-Conventional Materials And Technologies (NOMAT 2009)*, Bath, UK, 6-9 September, 2009. pp. 1-15.

- [31] MYERS, R. J., S. A. BERNAL, R. S. NICOLAS, J. L. PROVIS, E. IVANOVA a E. VILCHEVSKAYA. Generalized Structural Description of Calcium–Sodium Aluminosilicate Hydrate Gels: The Cross-Linked Substituted Tobermorite Model. *Langmuir*. 2013, 29(17), 179–197. DOI: 10.1021/la4000473.
- [32] TITS, Jan. Radionuclide uptake by calcium silicate hydrates: Case studies with Th(IV) and U(VI). *Nuclear Energy and Safety Research Department Laboratory for Waste Management (LES)*. 2014, 2014(14), 104. ISSN 1019-0643.
- [33] ARND BERND EBERHARDT. On the mechanisms of shrinkage reducing admixtures in self consolidating mortars and concretes. 2011. Aachen: Shaker, 2011. ISBN 978384-4000-276.
- [34] Air Entrainment versus Air Entrapment. *Precast Solutions Magazine*. 2012, 2012(2), 30.
- [35] *LE GRAND LIVRE DES BÉTONS*. Paris: Éditions du Moniteur, 2014. ISBN 9782281116892.
- [36] COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton*. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. Betonové stavitelství. ISBN 9788087093757.
- [37] *Lea's chemistry of cement and concrete*. 4th ed. Oxford: Elsevier, 2004. ISBN 07-506-6256-5.
- [38] The Influence Organic-added Material on Concrete Compressive Strength. *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering (IJIRAE)* [online]. 2015, 2015(2), 7 [cit. 2019-12-30]. ISSN 2349-2163. Dostupné z: <https://www.ijirae.com/volumes/Vol2/iss11/06.RP10089.pdf>
- [39] Vliv obsahu vzduchu ve ztvrdlém provzdušněném betonu na hodnotu statistického modulu pružnosti a pevnosti v tlaku stanovené NDT metodami. *Beton - Technologie - Konstrukce - Sanace* [online]. 2011 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: http://www.betontks.cz/sites/default/files/2011-4-73_0.pdf
- [40] AITCIN, Pierre-Claude. *Vysokohodnotný beton*. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) a Českou betonářskou společnost vydalo Informační centrum ČKAIT, 2005. Betonové stavitelství. ISBN 80-867-6939-9.
- [41] *Science and technology of concrete admixtures*. Amsterdam: Elsevir, 2016. Woodhead Publishing series in civil and structural engineering, no. 59. ISBN 978-0-08-100693-1.
- [42] SVOBODA, Luboš a Milan MYŠKA. *STAVEBNÍ HMOTY*. 3. Praha: Jaga group, 2013. ISBN 978-80-260-4972-2.
- [43] WASSERBAUER, J.; TKACZ J. and M. BŘEZINA. Praktikum z kovových materiálů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2017. ISBN 978-80-214-5463-7.
- [44] IUPAC. *Compendium of Chemical Terminology, 2nd ed. (the "Gold Book")*. Compiled by A. D. McNaught and A. Wilkinson. Blackwell Scientific Publications, Oxford (1997). Online version (2019-) created by S. J. Chalk. ISBN 0-9678550-9-8. <https://doi.org/10.1351/goldbook>.
- [45] RAVIKUMAR, Deepak a Narayanan NEITHALATH. Reaction kinetics in sodium silicate powder and liquid activated slag binders evaluated using isothermal calorimetry. *Thermochimica Acta*. 2012, 546(5), 32-43. DOI: 10.1016/j.tca.2012.07.010. ISSN 00406031. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0040603112003437>
- [46] RAPP, Bastian E. Surface Tension. *Microfluidics: Modelling, Mechanics and Mathematics*. Elsevier, 2017, 2017, , 421-444. DOI: 10.1016/B978-1-4557-3141-1.50020-4. ISBN 9781455731411. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9781455731411500204>

- [47] Mode of action of anionic surfactants for air entrainment in cement pastes w-w/o Fly Ash. *World of coal Ash Conference* [online]. 2009, **2009**(1.), 19 [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <http://www.flyash.info/2009/067-jolicoeur2009.pdf>
- [48] RAMACHANDRAN, V. S. *Concrete admixtures handbook: properties, science, and technology*. 2nd ed. Park Ridge, N.J., U.S.A.: Noyes Publications, c1995. ISBN 08-155-1373-9.
- [49] BAKHAREV, T, J.G SANJAYAN a Y.-B CHENG. Effect of admixtures on properties of alkali-activated slag concrete. *Cement and Concrete Research*. 2000, **30**(9), 1367-1374. DOI: 10.1016/S0008-8846(00)00349-5. ISSN 00088846. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884600003495>
- [50] Douglas, E., Bilodeau, A. and Malhotra, V. M., 1992, Properties and durability of alkali-activated slag concrete. *ACI Materials Journal*, **89**(5), 509–516.
- [51] Gifford, P. and Gillott, J. E., 1996b, Alkali-silica reaction (ASR) and alkali-carbonate reaction (ACR) in alkali-activated blast furnace slag cement (ABFSC) concrete. *Cement and Concrete Research*, **26** (1), 21–26.
- [52] Amphoteric surfactants. *Chemical book* [online]. 2013 [cit. 2020-01-05]. Dostupné z: https://www.chemicalbook.com/ProductCatalog_EN/1813.htm
- [53] Byfors K, Klingstedt G, Lehtonen V, Pyy H and Romben L (1989), ‘Durability of concrete made with alkali activated slag’, Trondheim Conference.
- [54] Brooks R, Bahadory M, Tovia F and Rostami H (2010), ‘Properties of alkali-activated fly ash: high performance to lightweight’, *International Journal of Sustainable Engineering*, 3 (3).
- [55] Cementy: základní vlastnosti. VŠB, *Zkoušení stavebních materiálů a výrobků: Maltoviny* [online]. [cit. 2016-03-11]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=malty_cement_zk.
- [56] VAVŘÍN F., *Maltoviny*, VUT Brno, Brno, 1987.
- [57] BÍLEK, V. *Možnosti využití odpadních písků z výroby vodního skla ve stavebnictví*. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická.
- [58] WARDHONO, Arie, David W. LAW a Anthony STRANO. The Strength of Alkali-activated Slag/fly Ash Mortar Blends at Ambient Temperature. *Procedia Engineering*. 2015, **125**, 650-656. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.11.095. ISSN 18777058. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705815034128>
- [59] Wardhono, Arie & Law, David & Molyneaux, Tom. (2012). STRENGTH OF ALKALI ACTIVATED SLAG AND FLY ASH-BASED GEOPOLYMER MORTAR.
- [60] PANIAS, D., E. BALOMENOS a K. SAKKAS. The fire resistance of alkali-activated cement-based concrete binders. *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*. Elsevier, 2015, 2015, **125**, 423-461. DOI: 10.1533/9781782422884.3.423. ISBN 9781782422761. ISSN 18777058. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9781782422761500162>
- [61] ABDEL-GHANI, Nour T., Hamdy A. ELSAYED a Sara ABDELMOIED. Geopolymer synthesis by the alkali-activation of blastfurnace steel slag and its fire-resistance. *HBRC Journal*. Elsevier, 2019, 2015, **14**(2), 159-164. DOI: 10.1016/j.hbrj.2016.06.001. ISBN 9781782422761. ISSN 1687-4048. Dostupné také z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1016/j.hbrj.2016.06.001>
- [62] CYR, M., R. POUHET a Sara ABDELMOIED. The frost resistance of alkali-activated cement-based binders. *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*. Elsevier, 2015, 2015, **14**(2), 293-318. DOI: 10.1533/9781782422884.3.293. ISBN 9781782422761. ISSN 1687-4048. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9781782422761500113>

- [63] FU, Yawei, Liangcai CAI a Wu YONGGEN. Freeze–thaw cycle test and damage mechanics models of alkali-activated slag concrete. *Construction and Building Materials*. Elsevier, 2011, 2015, **25**(7), 3144-3148. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.12.006. ISBN 9781782422761. ISSN 09500618. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061810006835>
- [64] KONARIK, J, J BOHACOVA a Wu YONGGEN. Review of practical applications of alkali-activated systems in construction. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Elsevier, 2018, 2015, **385**(7), 3144-3148. DOI: 10.1088/1757-899X/385/1/012030. ISBN 9781782422761. ISSN 1757-8981. Dostupné také z: <http://stacks.iop.org/1757-899X/385/i=1/a=012030?key=crossref.24d0f9adc6dd440a5b5bdc96a3a3dbbd>
- [65] BAŠČAREVĆ, Z., Zuhua ZHANG, Erich D. RODRÍGUEZ, Ana Paula KIRCHHEIM a Hao WANG. The resistance of alkali-activated cement-based binders to chemical attack: A Critical Analysis. *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*. Elsevier, 2015, 2015, **6**(7), 373-396. DOI: 10.1533/9781782422884.3.373. ISBN 9781782422761. ISSN 2296-8016. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9781782422761500149>
- [66] *Frontiers in Materials*. Elsevier, 2019, **6**(7). ISBN 9781782422761. ISSN 2296-8016. Dostupné také z: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmats.2019.00089/full>
- [67] FANG, Guohao, Hossein BAHRAMI, Mingzhong ZHANG, Ana Paula KIRCHHEIM a Hao WANG. Mechanisms of autogenous shrinkage of alkali-activated fly ash-slag pastes cured at ambient temperature within 24 h: A Critical Analysis. *Construction and Building Materials*. Elsevier, 2018, 2015, **171**(7), 377-387. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.155. ISBN 9781782422761. ISSN 09500618. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095006181830655X>
- [68] NEDELJKOVIĆ, Marija, Zhenming LI, Guang YE, Ana Paula KIRCHHEIM a Hao WANG. Setting, Strength, and Autogenous Shrinkage of Alkali-Activated Fly Ash and Slag Pastes: Effect of Slag Content. *Materials*. Elsevier, 2018, 2015, **11**(11), 377-387. DOI: 10.3390/ma11112121. ISBN 9781782422761. ISSN 1996-1944. Dostupné také z: <http://www.mdpi.com/1996-1944/11/11/2121>
- [69] COLLINS, Frank a J.G SANJAYAN. Effect of pore size distribution on drying shrinking of alkali-activated slag concrete. *Cement and Concrete Research*. 2000, **30**(9), 1401-1406. DOI: 10.1016/S0008-8846(00)00327-6. ISSN 00088846. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884600003276>
- [70] DAVIDOVITS, J. Geopolymers. *Journal of Thermal Analysis*. 1991, **37**(8), 1633-1656. DOI: 10.1007/BF01912193. ISSN 0368-4466. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/BF01912193>
- [71] KUNAL, Rafat SIDDIQUE a Anita RAJOR. *Use of cement kiln dust in cement concrete and its leachate characteristics*. DOI: 10.1016/j.resconrec.2012.01.006. ISBN 10.1016/j.resconrec.2012.01.006. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344912000079>
- [72] KALINA, Lukáš, Vlastimil BÍLEK, Eva BARTONÍČKOVÁ, Michal KALINA, Jan HAJZLER a Radoslav NOVOTNÝ. Doubts over capillary pressure theory in context with drying and autogenous shrinkage of alkali-activated materials. *Construction and Building Materials*. 2020, **248**. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118620. ISSN 09500618. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061820306255>
- [73] NAQI, Ali a Jeong JANG. Recent Progress in Green Cement Technology Utilizing Low-Carbon Emission Fuels and Raw Materials: A Review. *Sustainability*. 2019, **11**(2). DOI: 10.3390/su11020537. ISSN 2071-1050. Dostupné také z: <http://www.mdpi.com/2071-1050/11/2/537>

- [74] JO, Byung-wan, Seung-kook PARK a Jong-bin PARK. Properties of concrete made with alkali-activated fly ash lightweight aggregate (AFLA). *Cement and Concrete Composites*. 2007, 29(2), 128-135. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2006.09.004. ISSN 09589465. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946506001697>
- [75] *PERFORMANCE OF ADMIXTURE AND SECONDARY MINERALS IN ALKALI ACTIVATED CONCRETE*. Eindhoven University of Technology, the Netherlands: Eindhoven University of Technology, 2018. ISBN 978-90-386-4440-0.
- [76] ŁAŻNIEWSKA-PIEKARCZYK, Beata a Janusz SZWABOWSKI. Stability of Air-content in the Case of Innovative Air-entraining Portland Multicomponent Cement. *Procedia Engineering*. 2015, 108, 559-567. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.06.178. ISSN 18777058. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705815011327>
- [77] Air Entrainment and the Properties of Concrete. *Engineering Notes* [online]. 2015, 2015(1.), 1 [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <http://www.engineeringenotes.com/concrete-technology/concrete/air-entrainment-and-the-properties-of-concrete-concrete-technology/32170>
- [78] DOUGLAS, E., A. BILODEAU, J. BRANDSTETR a V.M. MALHOTRA. Alkali activated ground granulated blast-furnace slag concrete: Preliminary investigation. *Cement and Concrete Research* [online]. 1991, 21(1), 101-108 [cit. 2020-04-18]. DOI: 10.1016/0008-8846(91)90036-H. ISSN 00088846. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/000888469190036H>
- [79] ŞAHİN, Y., Y. AKKAYA, F. BOYLU a M.A. TAŞDEMİR. Characterization of air entraining admixtures in concrete using surface tension measurements. *Cement and Concrete Composites*. 2017, 82, 95-104. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2017.03.023. ISSN 09589465. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946516301184>
- [80] *Properties of concrete*. 3. Michiganská univerzita: Pitman Pub., 1981. ISBN 9780273016427.
- [81] *Report on Chemical Admixtures for Concrete*. Technical Documents. USA: ACI Committee 212, 2016. ISBN 9781942727804.
- [82] DIAMOND, Sidney. The microstructure of cement paste and concrete—a visual primer. *Cement and Concrete Composites*. 2004, 26(8), 919-933. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2004.02.028. ISSN 09589465. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946504000447>
- [83] A. Kashani, J.L. Provis, J. Xu, A.R. Kilcullen, G.G. Qiao, J.S.J. van Deventer Effect of molecular architecture of polycarboxylate ethers on plasticizing performance in alkali-activated slag paste J. Mater. Sci., 49 (7) (2014), pp. 2761-2772, 10.1007/s10853-013-7979-0
- [84] JOSEPH LIN, T. Increasing Productivity by Reducing Carbon Footprint in Cosmetics Processing. *Cosmetic Science and Technology*. Elsevier, 2017, 2017, , 657-670. DOI: 10.1016/B978-0-12-802005-0.00039-2. ISBN 9780128020050. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128020050000392>
- [85] BÍLEK, Vlastimil, Lukáš KALINA a Radoslav NOVOTNÝ. Polyethylene glycol molecular weight as an important parameter affecting drying shrinkage and hydration of alkali-activated slag mortars and pastes. *Construction and Building Materials*. 2018, 166, 564-571. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.176. ISSN 09500618. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061818302009>
- [86] BÍLEK, V. Alkalicky aktivované systémy. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2017. 163, 185 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Petr Ptáček, Ph.D.

[87] LEE, N. K., J. G. JANG a H. K. LEE. Shrinkage characteristics of alkali-activated fly ash/slag paste and mortar at early ages. *Cement and Concrete Composites*. 2014, 53, 239–248. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2014.07.007. ISSN 09589465. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946514001255>

[88] ROUQUEROL, Jean, Gino BARON, Renaud DENOYEL, et al. Liquid intrusion and alternative methods for the characterization of macroporous materials (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*. 2011, **84**(1), 107-136. DOI: 10.1351/PAC-REP-10-11-19. ISSN 1365-3075. Dostupné také z: <https://www.degruyter.com/view/journals/pac/84/1/article-p107.xml>

[89] BÍLEK, Vlastimil, Lukáš KALINA, Radoslav NOVOTNÝ, Jakub TKACZ a Ladislav PAŘÍZEK. Some Issues of Shrinkage-Reducing Admixtures Application in Alkali-Activated Slag Systems. *Materials*. 2016, **9**(6), 32-43. DOI: 10.3390/ma9060462. ISSN 1996-1944. Dostupné také z: <http://www.mdpi.com/1996-1944/9/6/462>

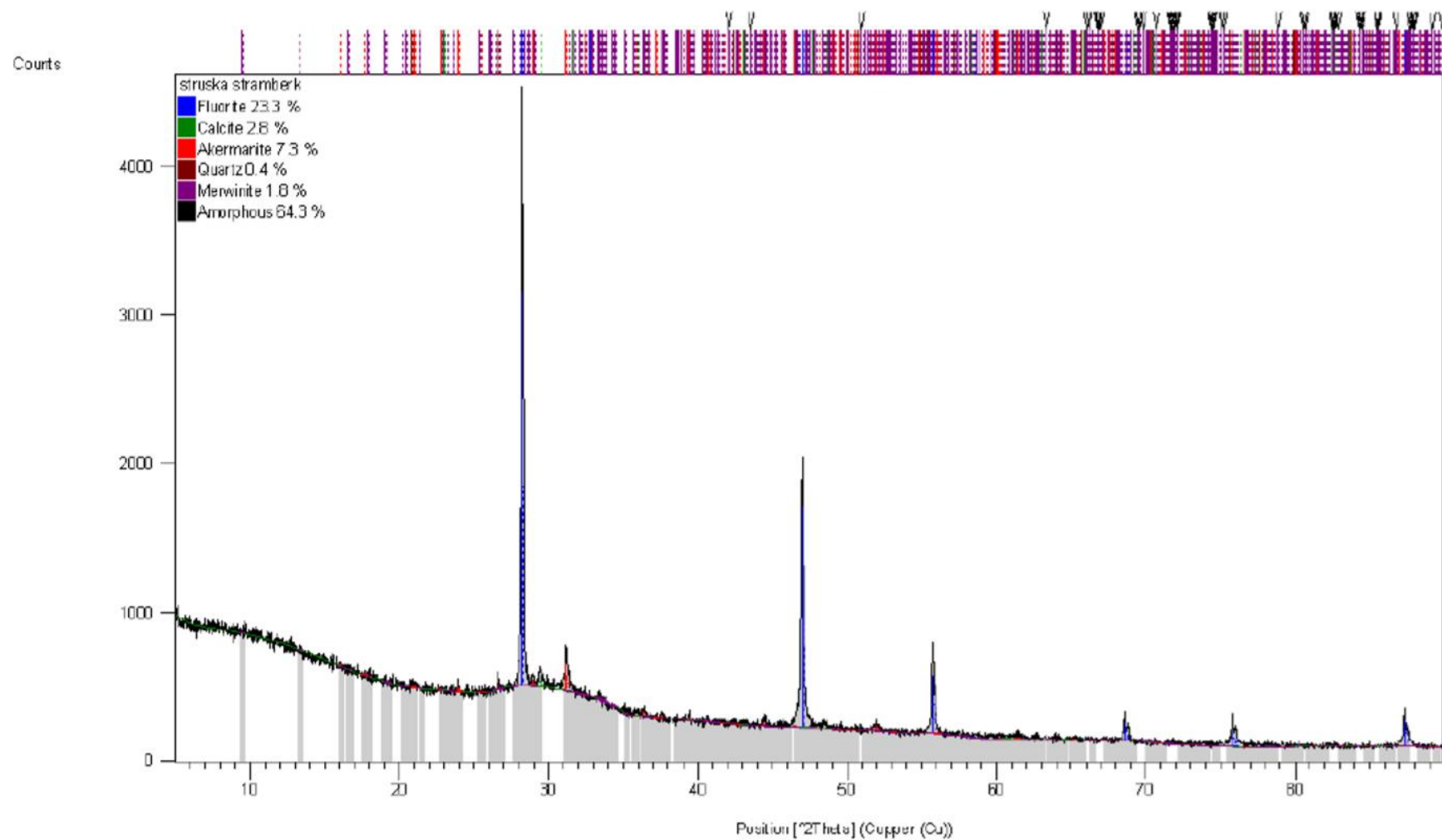
6. ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

AAM	alkalický aktivovaný materiál
AAS	alkalicky aktivovaná troska
AEA	prevzdušňovacia prísada (air entraining admixture)
CASH	kalcium-aluminát-silikát-hydrát (CSH s vyšší zastúpením Al^{3+} v štruktúre)
CSH	kalcium-silikát-hydrát (hlavný produkt hydratácie portlandského cementu)
d_1 a d_2	rozmery priečného rezu trámiku
D	objemová hmotnosť
d	veľkosť intrúdovaných pórov
f_{cf}	pevnosť v ťahu za ohybu
F	maximálne zaťaženie
F_{max}	maximálna sila pôsobiaca na trámik pri porušení
l	vzdialenosť medzi podpornými valčekmi
M_s	kremičitý modul (molárny pomer SiO_2 a Na_2O)
OPC	obyčajný portlandský cement (ordinary Portland cement)
p	tlak
p_c	kapilárny tlak
p_l	tlak v kvapalnej fázy
p_v	tlak v plynnej fázy
r	polomer póru
REF	referenčná vzorka (AAS bez prídavkov prevzdušňovacích prísad)
S	plocha
SEM	skenovacia elektrónová mikroskopia
VP	vysokopecná
VPS	vysokopecná troska
XRD	röntgenová difrakcia (X-ray diffraction)
XRF	röntgenofluorescenčná analýza (X-ray fluorescence)
κ	zakrivenie fázového rozhrania
γ	povrchové napätie
σ_{tlak}	pevnosť v tlaku
θ	zmáčací uhol

Skratky použitých prevzdušňovacích prísad:

SDBS	dodecyl benzénsulfonát sodný
SL	sodná soľ kyseliny laurovej
SDPA	sodná soľ dodecylesteru kyseliny fosforečnej
SDS	dodecylsírán sodný
TBAC	tetrabutylamónium chlorid
LB	laurylbetaín

7. PRÍLOHY



Príloha 1: XRD röntgenogram vysokopecnej trosky Štramberk