

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

**VYSOKOHODNOTNÉ SÍRANOVÉ POJIVO NA
BÁZI ODPADNÍCH SUROVIN**

WASTE MATERIAL BASED HIGH-PERFORMANCE SULPHATE BINDERS

DISERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Iveta Hájková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. DOMINIK GAZDIČ, Ph.D.

BRNO 2018

KLÍČOVÁ SLOVA

Sádrovec, odsíření, kalcinace, anhydrit, plastifikátor, zeta potenciál.

KEYWORDS

Gypsum, desulphurization, calcination, anhydrite, plasticizer, zeta potential.

NÁZEV PRACOVIŠTĚ

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie hmot a dílců

Obsah

1	Úvod.....	5
2	Cíl práce.....	6
3	Metodika práce	6
4	Vyhodnocení výsledků	7
4.1	Příprava sádry z druhotných surovin	7
4.1.1	Laboratorní příprava β -sádry z druhotných surovin	7
4.1.2	Optimalizace kalcinačního procesu laboratorně připravené β -sádry z druhotných surovin.....	8
4.1.3	Poloprovozní příprava β -sádry z druhotných surovin	10
4.2	Modifikace konzistence beta sádry.....	13
4.2.1	Modifikace laboratorně připravené beta sádry komerčními plastifikátory	13
4.2.2	Modifikace konzistence beta sádry změnou zeta potenciálu	17
4.3	Příprava suchých maltových směsí	19
4.3.1	Příprava suchých sádrových omítek.....	19
4.3.2	Příprava sádrových tmelů.....	19
4.3.3	Premix sádrového pojiva	19
4.3.4	Poloprovozní příprava suchých maltových směsí	19
4.4	Příprava sádrových tvarovek	20
4.4.1	Konstrukce poloprovozní formy	20
4.4.2	Laboratorní příprava sádrové tvarovky	21
4.4.3	Poloprovozní příprava sádrové tvarovky	23
4.4.4	Výstavba zkušební příčky.....	25
5	Závěr.....	26
6	Literatura:.....	26
7	Curriculum vitae	28

1 Úvod

Zřejmě nejstarší použití sádry ve střední Evropě potvrdili čeští vědci z Masarykovy univerzity při výzkumu výrobních technologií a tradic pravěkého hrnčířství. Materiál, jehož stáří stanovili na 4 500 let, našli ve zbytcích inkrustace, tedy bílé barvy používané k výzdobě keramiky, na nádobě nalezené v hrobu kultury zvoncovitých pohárů z Milovic u Mikulova. [1]

Rozšířenější produkce sádry je známa ve starověku. Později se její používání přeneslo z Egypta do Řecka a do Itálie. Odtud se její zpracování rozšířilo do dalších částí Evropy. K jejímu většímu využití však došlo až začátkem 19. století. Od té doby se její výroba v zemích s bohatými ložisky sádrovce zmnohonásobila. Mezi největší producenty sádrových pojiv v evropském měřítku patří např. Polsko, Německo, Francie, Rusko a Řecko, v celosvětovém pak Japonsko či USA. Je to nejen proto, že sádra má mnoho dobrých vlastností, ale také proto, že se k její výrobě spotřebuje, jak pro výpal, tak mletí, relativně málo energie, což je dnes při výrobě stavebních hmot a dílců velmi důležitým faktorem. [2]

Na rozdíl od vápenců postrádá Česká republika téměř úplně zdroje čistého sádrovce. Jediným významnějším nalezištěm jsou totiž jen Kobeřice u Opavy, které leží ve výběžku polské pánve. To se v historickém pohledu projevilo tím, že se na našem území velmi úspěšně vyvinula a rozvinula po stránce vědecko-výzkumné i komerční výroba a zpracování vápenných a vápenokřemičitých pojiv, avšak výroba a použití síranových pojiv byla zcela opomíjena. Situace se naprosto změnila v 90. letech 20. století, kdy s realizovanou desulfatací při energetické výrobě (odsiřování elektrárenských spalín) a následnou produkcí energosádrovce se vytvořil předpoklad pro vývoj, zpracování a stavební využití síranových pojiv a výrobků produkovaných na jejich bázi. Některé z nich se již staly běžnou součástí stavební praxe, další je třeba kvůli chybějícím tuzemským technologiím dosud dovážet, a v důsledku určité cenové bariéry je jejich rozšíření stále problematické. Do této skupiny náležejí zvláště velmi kvalitní výrobky na bázi α -sádry a anhydritových maltovin. [3]

Díky vzrůstající tendenci ve všech odvětvích průmyslu, zejména pak ve stavebním, nahrazovat vyčerpitelné přírodní surovinové zdroje sekundárními, existence druhotných zdrojů pro výrobu síranových pojiv umožňuje v současné době produkci jak samotných sádrových pojiv, tak i celou řadu z hlediska technické praxe zajímavých kompozitních materiálů. Důsledek využívání druhotných surovinových zdrojů vznikl zejména z ekologického, ale také ekonomického hlediska.

2 Cíl práce

Cílem disertační práce bylo studium a laboratorní ověření přípravy vysokohodnotného síranového pojiva na bázi druhotných surovin, převedení jeho přípravy do poloprovozních podmínek a návrh možného praktického využití ve stavebnictví. Disertační práce navazuje na výzkumné řešení č. MPO-TIP-FR-TI2/653 ÚTHD FAST VUT v Brně.

3 Metodika práce

Síranová pojiva, jejich vývoj, výroba a použití byla v našich zemích kvůli téměř úplné absenci přírodních surovinových zdrojů tradičně opomíjena. Stavitelství se orientovalo na vápna, hydraulická vápna a později cement, neboť vápenec, jako přirozený surovinový zdroj, je na rozdíl od předchozího v našich zemích hojně zastoupen. Popsaný stav ve zdroji surovin pro výrobu síranových pojiv se však významně změnil po zavedení novodobých ekologických opatření. Šlo jednak o mokrý desulfatační proces v energetickém průmyslu, při němž jako odpadní produkt vzniká sádrovec vysoké čistoty, tzv. energosádrovec, a dále o dvoustupňový desulfatační proces při čištění odpadních vod z výroby titanové běloby. Jeho produktem je vedle velmi nízkého podílu znečištěného sádrovce z druhého desulfatačního stupně dominantní podíl vysoce čistého sádrovce z prvního desulfatačního stupně, tzv. chemosádrovec. Oba uvedené zdroje průmyslově vzniklých sádrovců jsou schopny v naší zemi plně pokrýt potřebu výroby síranových pojiv. Proto je nutné zabývat se podrobně teoretickými podklady a technologií výroby síranových pojiv, a to zejména vývojem jejich vysokohodnotné formy s ohledem na rozšířené možnosti jejich využití ve stavebnictví.

Základním a nejspíše výrobně dosažitelným síranovým pojivem je tzv. beta sádra, tj. β -forma hemihydrátu síranu vápenatého. Tato vzniká kalcinací sádrovce neboli jeho dehydratací působením zvýšené teploty za normálních atmosférických podmínek. Fyzikálně chemické a technologické vlastnosti beta sádry jsou však samy o sobě dosti omezené. V první řadě jde o to, že beta sádra velice rychle tuhne a tvrdne, a dále o to, že dosahuje ve srovnání s cementem jen velice nízkých pevností. Úprava tuhnutí beta sádry se dnes již běžně uskutečňuje zpomalovacími přísadami, nejčastěji na bázi kyseliny vinné. Problematika nízkých pevností je však na rozdíl od předchozího podstatně komplikovanější. Předběžnou studií bylo prokázáno, že pevnosti sádry jsou přednostně závislé na množství záměsové vody. Jelikož oba uvedené průmyslové sádrovce vznikají srážecími procesy, je jejich morfologie podstatně jemnozrnnější než sádrovců přírodních. Proto se nabízí otázka, zda beta sádra připravená z průmyslových sádrovců nebude ve srovnání se sádrrou z přírodního sádrovce vyžadovat ještě vyšší potřebu záměsové vody, a tím vykazovat nižší pevnosti.

Disertační práce byla proto zaměřena primárně na laboratorní přípravu beta sádry na bázi průmyslového sádrovce, stanovení jejích fyzikálně chemických vlastností, návrh technologického postupu výroby a jeho ověření poloprovozní zkouškou. V dalším se orientovala na vyhledání takových postupů, které by vedly ke snížení množství záměsové vody, a tím ke zvýšení pevností připravené beta sádry. Za tímto účelem bylo navrženo a odzkoušeno použití vybraných komerčních ztekucovačů. Jelikož aditiva, cíleně vyvinutá pro ztekucení sádry, se na trhu prakticky nevyskytují, byly pro tento účel použity vybrané plastifikační přísady určené pro ztekucení cementových malt a betonu. Souběžně se zkoušením komerčních betonářských ztekucovačů bylo navrženo teoreticky možné ztekucení způsobem zvýšení hodnoty zeta potenciálu sádrové suspenze.

V závěrečné části disertační práce byla pozornost zaměřena na možnosti průmyslového využití připravené sádry, konkrétně na vývoj suchých maltových směsí pro přípravu sádrových omítek, tmelů a sádrového premixu, a dále na vývoj malých sádrových tvarovek. Navržené suché maltové směsi byly po laboratorní přípravě a odzkoušení fyzikálně chemických vlastností vyrobeny poloprovozně, poté byly znovu odzkoušeny jejich fyzikálně chemické vlastnosti a dále i vlastnosti aplikační. Vývoj malých sádrových tvarovek zahrnoval nejprve návrh složení a odzkoušení vlastností sádrové hmoty, vývoj vhodné formy na odlev tvarovek, návrh technologie výroby a závěrem poloprovozní odzkoušení včetně aplikační zkoušky.

4 Vyhodnocení výsledků

4.1 Příprava sádry z druhotných surovin

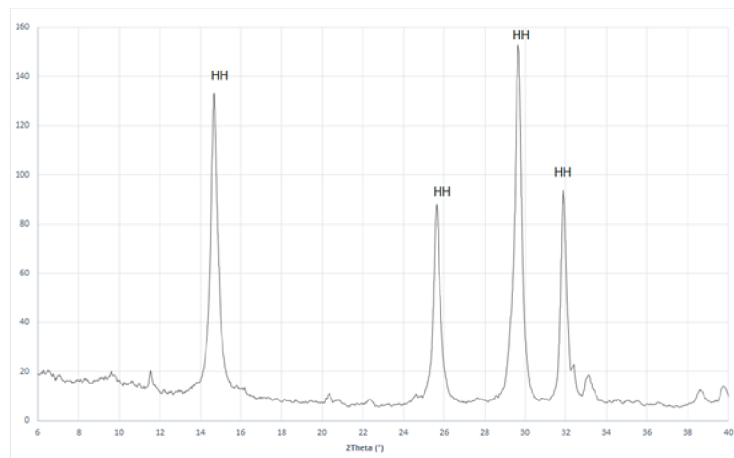
4.1.1 Laboratorní příprava β -sádry z druhotných surovin

Z rešeršních prací provedených na ÚTHD FAST VUT Brno se jako nejvhodnější druhotná surovina pro přípravu β -sádry jeví chemosádrovec Pregips, vyráběný v chemickém závodě Precheza Přerov a.s. V důsledku své geneze, principiálně odpovídající srážecím reakcím probíhajících při neutralizaci síranových iontů vápencem, má vysoce jemnou strukturu, avšak i značnou vlhkost. Jemnozrnná struktura se pozitivně projevuje v nepotřebě nutnosti rozdužení před samotnou kalcinací sádrovce. Avšak společně s vlhkostí může vyvolávat značnou lepivost, která může způsobovat závažný technologický problém při kalcinaci.

Vybraný průmyslový sádrovec Pregips se vyznačuje vysokou čistotou a jemnou zrnitostí.

Laboratorní příprava beta sádry z chemosádrovce Pregips byla uskutečněna na ÚTHD FAST VUT Brno způsobem kalcinace v laboratorní sušárně za teploty 150 °C a normálního atmosférického tlaku. Ukončení přeměny dihydrátu (DH) na hemihydrát

(HH) bylo kontrolováno pomocí RTG-difrakční analýzy, viz rentgenogram na Obrázek 1.



Obrázek 1: Rentgenogram laboratorně připravené beta sádry z chemosádrovce Pregips

RTG difrakční analýzou bylo ověřeno, že připravený vzorek obsahuje pouze difrakční linie hemihydrátu (HH) (Obrázek 1).

Výsledkem byla laboratorně připravená maltovina, která svými vlastnostmi a chováním odpovídala beta sádře dobré kvality, viz Tabulka 1.

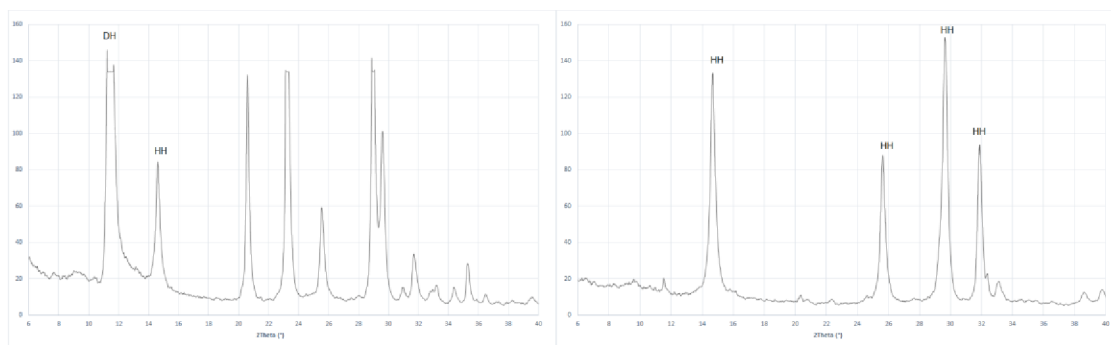
Tabulka 1: Technologické vlastnosti laboratorně připravené sádrové maltoviny

sledovaná vlastnost	hodnota
Jemnost: zbytek na síť 0,2 mm [%]	0,0
Normální konzistence [-]	0,9
Počátek tuhnutí [min]	8
Doba tuhnutí [min]	12
Pevnost v tlaku, 1 den [MPa]	2,1

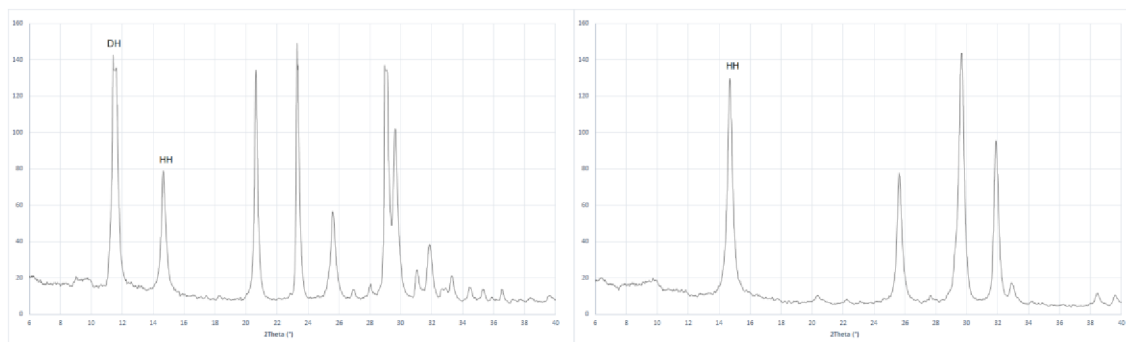
4.1.2 Optimalizace kalcinačního procesu laboratorně připravené β -sádry z druhotných surovin

Pro posouzení kinetiky dehydratačního procesu sádrovce a možného převedení do poloprovozních podmínek pro přípravu v rotační sušárně byly navrženy laboratorní výpaly beta sádry dvěma zvolenými teplotními režimy. První z nich modeloval svou teplotou 130 °C podmínky na tzv. horkém konci rotační sušárny, naopak druhý, vyznačující se teplotou 105 °C, představoval poměry na tzv. chladném konci rotační

sušárny. Ke zkouškám byl nadále používán sádrovec Pregips, který byl vyhodnocen jako nejvhodnější nejen z hlediska technologických vlastností, ale i dopravní vzdálenosti a cenové dostupnosti. Nutná doba přeměny dihydrátu na hemihydrát byla stanovena na základě průběžného sledování mineralogického složení RTG-difrakční analýzou, viz rentgenogramy *Obrázek 2*, *Obrázek 3*. Jako referenční vzorek byla zvolena komerčně vyráběná beta sádra.



Obrázek 2: Průběh dehydratace sádrovce teplotním režimem 130 °C po 15 min dehydratace (vlevo) a po 30 min dehydratace (vpravo)



Obrázek 3: Průběh dehydratace sádrovce teplotním režimem 105 °C po 2 hod dehydratace (vlevo), po 5,5 hod dehydratace (vpravo)

Z průběhu rentgenogramů je patrné, že k úplné přeměně dihydrátu (DH) na hemihydrát (HH) dojde při obou sledovaných teplotních režimech, ovšem doba této přeměny se výrazně liší. Při teplotním režimu 105 °C činí 5,5 hodiny, kdežto při režimu 130 °C odpovídá pouze 30 minutám.

Technologické vlastnosti obou laboratorně připravených sáder, včetně referenčního vzorku komerčně vyráběné beta sádry, uvádí Tabulka 2.

Tabulka 2: Technologické vlastnosti laboratorně připravených sáder

Sledovaná vlastnost	Referenční sádra	Sádra Pregips	
		130 °C	105 °C
Tuhnutí			
Normální konzistence [-]	0,9	1,05	1,03
Počátek tuhnutí [min:s]	6:00	8:30	9:15
Doba tuhnutí [min:s]	15:00	12:00	13:00
Pevnost [MPa]			
V tlaku			
2 hod	1,5	1,6	1,8
28 dnů	3,2	3,6	3,5
V tahu za ohybu			
2 hod	1,0	1,0	1,0
28 dnů	1,8	1,9	1,9
Objemová hmotnost [kg/m ³]			
2 hod	1630	1630	1630
28 dnů	850	820	830

Z dosažených výsledků vyplývá, že vodní součinitel všech zkoušených vzorků byl přibližně stejný. Rozdíl mezi vodním součinitelem sáder, připravených zvolenými teplotními režimy byl v podstatě zanedbatelný, avšak nepatrně nižší hodnota u sádry vzniklé teplotním režimem 105 °C svědčí o tom, že při této podstatně pomalejší kalcinaci vznikly lépe vyvinuté krystaly hemihydrátu, které jsou méně náročné na množství rozdělovací vody. V souladu se stanovenými vodními součiniteli byly i dosažené pevnosti obou zkoušených vzorků sádry přibližně stejné. Současně však oba byly vyšší než u referenčního vzorku komerčně vyráběné sádry, nejspíše z důvodu vyšší čistoty vstupního sádrovce. Průběh objemové hmotnosti vzorků svědčí o jejich postupném vysychání při expozici v laboratorním prostředí.

4.1.3 Poloprovozní příprava β -sádry z druhotných surovin

Technologie výroby beta sádry je v obou stávajících tuzemských závodech zajišťována dehydratací sádrovce v rotačním kalcinátoru, který je konstrukčně shodný s rotační sušárnou, která je primárně určena k sušení kameniva. Na rozdíl od obou kalcinátorů vykazuje však zmíněná sušárna značnou technologickou nedostatečnost v tom, že je rotační těleso o cca 30 % kratší oproti kalcinátoru v Kobeřicích a dokonce téměř o polovinu než v Počeradech.

Na základě vyhodnocení výsledků předešlých etap byla pro připravovanou poloprovozní zkoušku výroby beta sádry navržena a zabezpečena níže uvedená konstrukční opatření.

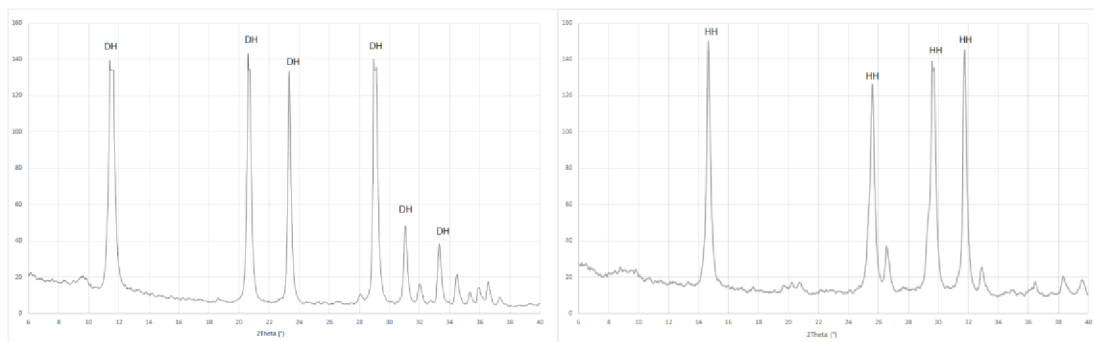
Vzhledem k tomu, že na horkém konci sušárny nesmí z provozních důvodů teplota překračovat cca 130 °C a teplota na chladném konci rotační sušárny nesmí s ohledem na rosný bod poklesnout pod cca 105 °C, spadají teplotní poměry po celém pásmu sušárny do laboratorně odzkoušeného intervalu vhodných dehydratačních teplot. Lze tedy konstatovat, že k dehydratačnímu procesu je nezbytná celá délka rotační sušárny, tj od horkého až po její chladný konec.

Rychlost posunu materiálu sušárnou je obecně řízen jejím sklonem a počtem otáček. Jelikož sklon rotačky není měnitelný, může být posun řízen výhradně počtem otáček. Pro stávající sušení kameniva je udržován chod sušárny v režimu 3 ot/min, při němž doba průchodu materiálu činí cca 10 minut. Tato doba však naprosto nekoresponduje s nutnou dobou přeměny, laboratorně stanovenou pro oba mezní teplotní režimy hodnotami 30 minut pro 130 °C, respektive 5,5 hodin pro 105 °C, navíc je nutno brát v úvahu vysokou vlhkost vstupní suroviny. Proto bylo pro připravovanou poloprovozní zkoušku navrženo snížení otáček na nejnižší možnou hodnotu, odpovídající 1 ot/min. Jelikož při předběžné zkoušce se po tomto zásahu prodloužila doba průchodu jen na cca 20 minut, dospělo se k závěru, že pro dokonalou přeměnu dihydrátu na hemihydrát bude nezbytný dvojnásobný průchod sušárnou.

Poloprovozními zkouškami bylo zjištěno, že pokud vlhkost suroviny přesáhne 10 %, dochází k zalepení na všech úsecích dopravních cest do kalcinátoru. Tento problém odpadá v době suchého nebo mrazivého počasí, kdy surovina na povrchu oschne, anebo voda v ní obsažená vymrzne.

Dalším ze značných problémů je vysoká prašnost finálního produktu, ke které by docházelo během jeho transportu za kalcinátorem dopravními cestami (šnekovým dopravníkem, elevátorem), jimiž linka disponuje. Z tohoto důvodu byla pro poloprovozní zkoušku sušicí linka doplněna pneumatickou dopravní cestou, která nahrazovala šnekový dopravník a elevátor.

Po prvním i druhém průchodu sušárnou byl odebrán vzorek vzniklého produktu, který byl podroben stanovení mineralogického složení RTG-difrakční analýzou, viz Obrázek 4. U vzorku odebraného po druhém průchodu sušárnou byly dále stanoveny technologické vlastnosti, které byly porovnány s vlastnostmi referenčního vzorku komerčně vyráběné sádry viz Tabulka 3. Současně byl navržen postup ke stanovení obsahu hemihydrátu a zbytkového sádrovce ve vzorku vyrobeného v poloprovozních podmínkách, kde není k dispozici vlastní difraktograf či jiné zařízení pro rychlou zkoušku fázového složení.



Obrázek 4: Rentgenogramy poloprovozně vyrobené sádry po prvním průchodu sušárnou kameniva (vlevo), po druhém průchodu sušárnou (vpravo)

Tabulka 3: Technologické vlastnosti poloprovozně vyrobené sádry

Sledovaná vlastnost	Referenční sádra	Poloprovozní sádra
Tuhnutí		
Normální konzistence [-]	0,90	1,04
Počátek tuhnutí [hod:min]	6:00	9:00
Doba tuhnutí [hod:min]	15:00	13:00
Pevnost [MPa]		
V tlaku		
2 hod	1,5	2,2
28 dnů	3,2	3,5
V tahu za ohybu		
2 hod	1,0	0,9
28 dnů	1,8	1,7
Objemová hmotnost [kg/m ³]		
2 hod	1630	1620
28 dnů	850	840

První průchod rotační sušárnou vedl dle předpokladu prakticky jen k vysušení sádrovce, a teprve během druhého průchodu došlo k jeho kalcinaci. Přitom vzniklý produkt obsahoval 98,14 % hemihydrátu a pouze 1,86 % zbytkového sádrovce. Vzhledem k uvedenému složení a zároveň vzhledem k jeho technologickým vlastnostem, které byly srovnatelné s komerčně vyráběnou sádrą, lze konstatovat, že poloprovozně vyrobený produkt z chemosádrovce Precheza Přerov a.s. představuje přírodní bílou beta sádrą dobré kvality.

4.2 Modifikace konzistence beta sádry

4.2.1 Modifikace laboratorně připravené beta sádry komerčními plastifikátory

Pro zkoušky modifikace komerčními plastifikátory byla použita beta sádra laboratorně připravená za teploty 130 °C.

Laboratorně vyrobená beta sádra byla modifikována vybranými ztekuovacími (plastifikačními) přísadami. Je totiž známo, že pevnosti sádry vykazují takřka lineární závislost na vodním součiniteli ve smyslu nepřímé úměry. Čím je tedy vodní součinitel nižší, tím vyšší jsou dosahované pevnosti. Použity byly plastifikátory, které jsou primárně určeny pro betonářskou výrobu či ztekucení cementu, a to konkrétně plastifikátory Sika, Melment F10, Chryso Fluid GT, Biotech, Stachement 6358, Skament Multimix, Sika ViscoCrete 1035 a Stacheplast. Práškové plastifikátory byly dávkovány v množství 0,5, 1 a 3 % na hmotnost sádry. Kapalné plastifikátory byly dávkovány v množství 0,5 a 1 % na hmotnost sádry. Výjimku tvořil plastifikátor Biotech, který byl dávkován v množství 0,3 % a 0,6 % hm. na sádru, viz výše. Připravené vzorky byly podrobeny zkouškám normou sledovaných technologických vlastností. Kvůli potenciální retardaci hydratačního procesu daným plastifikátorem bylo u vzorků s jeho nejvyšší koncentrací 3 % (v případě práškových plastifikátorů) a 1 % (v případě kapalných plastifikátorů) dále stanoveno mineralogické složení po době hydratace 2 hodiny. V následujících Tabulka 4, Tabulka 5, Tabulka 6, Tabulka 7 jsou uvedeny výsledky technologických zkoušek při optimálních dávkách ztekuovače, kdy bylo dosaženo nejlepších technologických vlastností. V případě modifikace beta sádry plastifikačními přísadami řady Melflux byla koncentrační řada upravena na 1 %, 0,5 %, 0,25 %, 0,1 % a 0,01 % z důvodu jeho významného retardačního efektu.

Tabulka 4: Technologické vlastnosti sáder modifikovaných plastifikátory

Sledované vlastnosti	Plastifikátor v dávce					
	Referenční sádra Pregips 130 °C	Sika	Melment F10	Chryso Fluid GT	Biotech	
	0 %	0,5 %	0,5 %	0,5 %	0,3 %	
Tuhnutí						
Normální konzistence [-]	1,05	0,80	0,80	0,85	0,70	
Počátek tuhnutí [min:s]	8:30	8:10	7:10	7:10	10:00	
Doba tuhnutí [min:s]	12:00	13:10	11:30	10:30	9:12	
Pevnost [MPa]						
V tlaku	2 hod	1,6	0,7	1,7	0,6	0,7
V tahu za ohybu	2 hod	1,0	0,7	1,1	0,6	0,7
Objemová hmotnost [kg/m ³]	2 hod	1630	1500	1530	1460	1470

Tabulka 5: Technologické vlastnosti sáder modifikovaných plastifikátory

Sledované vlastnosti	Plastifikátor v dávce					
	Referenční sádra Pregips 130 °C	Stachement 6358	Sika Visco Crete 1035	Sikament Multimix	Stacheplast	
	0 %	1,0 %	1,0 %	1,0 %	1,0 %	
Tuhnutí						
Normální konzistence [-]	1,05	0,50	0,60	0,70	0,65	
Počátek tuhnutí [min:s]	8:30	8:00	8:10	9:30	9:10	
Doba tuhnutí [min:s]	12:00	10:30	11:10	12:20	12:10	
Pevnost [MPa]						
V tlaku	2 hod	1,6	2,2	2,0	1,2	0,8
	28 dnů	3,6	7,4	7,3	6,0	2,5
V tahu za ohybu	2 hod	1,0	1,5	1,4	0,7	0,7
	28 dnů	1,9	3,6	3,0	2,6	1,6
Objemová hmotnost [kg/m ³]	2 hod	1630	1570	1520	1480	1500

Tabulka 6: Technologické vlastnosti beta sádry modifikované plastifikační přísadou Melflux 6681 F

Sledované vlastnosti	Plastifikátor v dávce					
	Referenční sádra Pregips 130 °C	Melflux 6681F				
	0 %	1,0 %	0,5 %	0,25 %	0,1 %	0,01 %
Tuhnutí						
Normální konzistence [-]	1,05	0,40	0,40	0,60	0,80	0,90
Konzistence rozlitím [mm]	180	210	180	180	182	180
Počátek tuhnutí [min:s]	8:30	-	15:20	10:40	9:10	8:30
Doba tuhnutí [min:s]	12:00	-	-	14:50	12:10	12:00
Pevnost [MPa]						
V tlaku 2 hod	1,6	-	-	3,7	-	-
V tahu za ohybu 2 hod	1,0	-	-	2,8	-	-
Objemová hmotnost [kg/m ³] 2 hod	1630	-	-	1650	-	-

Tabulka 7: Technologické vlastnosti beta sádry modifikované plastifikační přísadou Melflux 4930 F

Sledované vlastnosti	Plastifikátor v dávce					
	Referenční sádra Pregips 130 °C	Melflux 4930F				
	0 %	1,0 %	0,5 %	0,25 %	0,1 %	0,05 %
Tuhnutí						
Normální konzistence [-]	1,05	0,40	0,40	0,60	0,80	0,90
Konzistence rozlitím [mm]	180	> 210	180	179	180	180
Počátek tuhnutí [min:s]	8:30	-	14:20	10:40	9:20	8:40
Doba tuhnutí [min:s]	12:00	-	16:50	13:30	12:30	12:00
Pevnost [MPa]						
V tlaku 2 hod	1,6	-	6,4	5,8	-	-
V tahu za ohybu 2 hod	1,0	-	3,9	3,3	-	-
Objemová hmotnost [kg/m ³] 2 hod	1630	-	1760	1680	-	-

Na základě dosažených výsledků lze konstatovat:

- Zvyšování koncentrace plastifikátoru Sika přineslo i další ztekucení, ale účinnost tohoto procesu se postupně snižovala. Z průběhu rentgenogramu past hydratovaných po dobu 2 hodiny, modifikovaných dávkou plastifikátoru 3 % je patrné, že vyšší dávka plastifikátoru způsobovala retardaci hydratačního procesu, jejímž důsledkem byl pokles pevností.
- Při použití plastifikátoru Melment F10 vedlo zvyšování koncentrace k dalšímu ztekucovacímu efektu, avšak ten již nebyl tolik efektivní. Dle srovnání hodnot normální konzistence ztekucoval plastifikátor Melment F10 sádrovou kaši poněkud lépe než plastifikátor Sika. Vzhledem k tomu, že retardační efekt plastifikátoru Melment F10 byl výrazně menší než plastifikátoru Sika, dosahovaly jím modifikované sádrové pasty lepších pevností.
- Plastifikátor Biotech vykazoval nejlepší ztekucující efekt, vlivem kterého bylo dosaženo vysokých pevností, a to i přes určitý retardační účinek této látky.
- Tekutý plastifikátor Stachement 6358, obsahující 25 % sušiny, vykazoval již při dávce 1% kapalné přísady natolik účinné ztekucení, že vodní součinitel poklesl na polovinu hodnoty, stanovené u nemodifikované sádry. I přes nepatrný retardační efekt byly dosahované pevnosti vzorků modifikovaných past velmi uspokojivé.
- Plastifikátor Sika ViscoCrete 1035, s obsahem sušiny 30 %, se sice choval jako účinný plastifikátor, ale vykazoval poměrně silný retardační účinek, který zásadním způsobem ovlivnil pevnostní průběh.
- Kapalný plastifikátor Sikament Multimix, obsahující 30 % sušiny, nevykazoval retardační účinek. Proto i hodnoty dosahovaných pevností byly oproti referenčnímu vzorku zvýšeny úměrně snížení hodnoty vodního součinitele.
- Plastifikátor Stacheplast, s obsahem sušiny 30 %, poskytl velmi dobrý plastifikační efekt, ale vlivem jeho silného retardačního účinku byly dosahované pevnosti dokonce nižší než u referenčního nemodifikovaného vzorku.
- Obě plastifikační přísady řady Melflux vykazaly výrazné ztekucující účinky. Při dávkování v koncentraci 0,5 % bylo dosaženo až pětinasobku pevností oproti referenčnímu vzorku, a zároveň došlo k žádoucímu prodloužení doby tuhnutí. Při snížení koncentrace na hodnotu 0,25 % bylo oproti referenčnímu vzorku stále ještě zřejmé značné ztekucení sádrové kaše, následně výrazná redukce vodního součinitele a výrazné zvýšení pevností.
- Pokles objemových hmotností všech vzorků je exponenciálního rázu a odpovídá postupnému odchodu fyzikálně vázané vody během expozice v laboratorním prostředí.

4.2.2 Modifikace konzistence beta sádry změnou zeta potenciálu

Laboratorní příprava beta sádry pro tuto část etapy probíhala obdobně jako v předešlé, v horkovzdušné sušárně z chemosádrovce Pregips s izotermickou výdrží 130 °C.

Výsledky stanovení konzistence sádrové kaše rozlitím při dané hodnotě vodního součinitele, počátku a doby tuhnutí a u vybraných vzorků též stanovení objemové hmotnosti, pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu po 2 hodinách hydratace uvádí Tabulka 8. Vzorky pro stanovení pevnostních charakteristik byly nejprve upraveny vysušením v sušárně s izotermickou výdrží 40 °C po dobu 1 hodiny.

Tabulka 8: Technologické vlastnosti beta sádry modifikované vybranými solemi

Modifikující sůl 0,027 mol / 100g sádry	Sledovaná vlastnost						Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]
	Vodní součinitel [-]	Rozlití koláče [mm]	Tuhnutí [min]		Pevnost [MPa]		
			Počátek	Doba	V tlaku	V tahu za ohybu	
Referenční	1,0	180	10,0	16,5	2,7	0,9	1430
KCl	1,0	-	-	3,5	-	-	-
NaCl	1,0	138	-	7,5	-	-	-
MgCl ₂	1,0	187	-	-	-	-	-
MgCl ₂	0,9	180	10,5	14,0	3,0	1,0	1450
CaCl ₂	1,0	184	-	-	-	-	-
CaCl ₂	0,9	175	10,5	15,0	3,0	1,2	1480
K ₂ SO ₄	1,0	-	-	2,5	-	-	-
Na ₂ SO ₄	1,0	-	-	4,5	-	-	-
MgSO ₄	1,0	182	-	-	-	-	-
MgSO ₄	0,9	175	8,0	9,5	3,0	1,0	1480
K ₂ CO ₃	1,0	165	8,0	9,5	-	-	-
Na ₂ CO ₃	1,0	170	7,5	9,0			

Na základě shora uvedených výsledků lze říci:

- Při normové laboratorní zkoušce rozlití sádrové kaše je kvůli jejímu předčasnému zatuhnutí namísto záměsové vody používán 1% roztok citranu draselného. Jelikož draselný iont v této sloučenině obsažený je jedním z kationů, u nichž byl sledován vliv zeta-potenciálu na ztekucení sádry, bylo nutné sádro rozdmíchat pouze s čistou záměsovou vodou. Přitom se ukázalo, že až na výjimky působí zkoušené soli jako urychlovače tuhnutí sádrové kaše.
- Ze souboru anionů vyvolával největší zkrácení doby tuhnutí síranový ion, v pořadí další chloridový ion a nejméně urychloval ion uhličitanový. Co se týče síranového anionu, jeho intenzivní akcelerace hydratačního procesu byla kromě čistě chemického působení dána i působením síranových solí jako krystalizačních zárodků pro urychlenou přeměnu sádry na sádrovec.
- Co do vlivu kationů urychloval ze dvou alkalických iontů více kation draselný než sodný. Opačně oba ionty alkalických zemin, tj. Ca^{2+} a Mg^{2+} , proces hydratace prakticky neovlivňovaly.
- Jak je z tabulky patrné, kritický čas, nutný k provedení zkoušky rozlitím, odpovídal počátku tuhnutí sádrové kaše delšímu než 7,5 až 8 minut.
- Výše uvedenému požadavku vyhověly z celého zkoušeného souboru pouze soli MgCl_2 , CaCl_2 , MgSO_4 , K_2CO_3 a Na_2CO_3 . Přitom nejúčinnější ztekucovací efekt byl pozorován u solí s kationy alkalických zemin Ca^{2+} a Mg^{2+} , z toho poněkud lepšího ztekucení se docílilo použitím iontu hořečnatého. Co se týče obou solí s alkalickým kationem, byl poněkud lepší ztekucovací efekt pozorován při použití Na^+ než K^+ . Vliv anionů na ztekucení sádrové kaše není úplně jednoznačně vyhodnotitelný kvůli rychlému tuhnutí směsí. Jeví se však, že chloridový anion vyvolává lepší ztekucení než anion síranový.
- Ve shodě s tezemi Schulze-Hardyho pravidla i s tezemi lyotropních řad byl při stejném molárním dávkování pozorován lepší ztekucovací efekt u solí, jejichž kation či anion má vyšší hodnotu zeta-potenciálu. Ve druhé grupě periodické soustavy prvků, do níž náležejí kationy Ca^{2+} a Mg^{2+} , má dle lyotropní řady vyšší hodnotu zeta-potenciálu hořečnatý kation, a ve shodě s tímto parametrem bylo prokázáno i poněkud lepší ztekucení sádrové kaše modifikované chloridem hořečnatým než chloridem vápenatým. V případě anionů bylo pozorováno lepší ztekucení u solí s jednomocným chloridovým iontem, jehož zeta-potenciál je vyšší než u solí s dvojmocným síranovým, resp. uhličitanovým iontem, jejichž zeta-potenciál je dle Schulze-Hardyho pravidla nižší.

4.3 Příprava suchých maltových směsí

4.3.1 Příprava suchých sádrových omítek

K vývoji sádrových omítek byla použita jako pojivo poloprovozně vyrobená beta sádra a jako plnivo velmi jemně mletý vápenec, případně křemenný písek. Vlastnosti omítek byly modifikovány přísadami, které měly zabezpečit dostatečnou dobu zpracovatelnosti, dostatečnou zádrž vody při aplikaci, dobrou přilnavost a přídržnost k podkladu. Z tohoto důvodu byly k modifikaci navrženy přísady s funkcí retardační, retenční a adhezivní.

Vývoj příslušných receptur spočíval v optimalizaci pojiva ku plnivu, optimalizaci granulometrické křivky jakož i dávkování vybraných přísad. Výsledkem provedeného vývoje byly dvě receptury, jedna na sádrovou omítku hlazenou a druhá na sádrovou omítku točenou (filcovanou).

4.3.2 Příprava sádrových tmelů

Za účelem vývoje sádrového tmelu pro lepení a spárování tvarovek byla jako základní surovina použita poloprovozně vyrobená beta sádra. Tato byla následně modifikována přísadami mikromleté celulózy, derivátů celulózy a bobtnavým škrobem. Vedle sádry obsahoval tmel 30 % mletého vápence. Optimalizací dávkování jednotlivých přísad se dospělo ke vzorku, jehož technologické a aplikační vlastnosti byly laboratorně porovnány s komerčně vyráběným vzorkem tmelu.

4.3.3 Premix sádrového pojiva

Stavební veřejnost se zejména z ekonomických důvodů stále více přiklání k univerzálnějším stavebním hmotám, které mohou za určitých podmínek splňovat vícero funkcí. Jedná se většinou o pojivové premixy, z nichž mezi nejznámější lze zařadit vápenocementový, sloužící pro přípravu vápenocementových omítek a zdicích malt. Obdobně lze navrhnout i sádrový premix, sloužící jako pojivo sádrových omítek i jako sádrový tmel, je však nutné pozměnit kvalitu a dávkování použitých přísad. Zachována byla kvalita a kvantita přísad retardačních, disperzních a retenčních (deriváty celulózy a bobtnavý škrob). Navíc byla navržena provzdušňující přísada, zlepšující objemovou stálost a plasticitu malty.

4.3.4 Poloprovozní příprava suchých maltových směsí

Poloprovozní příprava byla uskutečněna na technologické lince určené pro výrobu suchých maltových směsí. Množství jedné záměsi činilo 375 kg.

Chod technologické linky představoval automatické nadávkování pojiva a plniva a poloautomatické nadávkování přísad do skipu, kterým byly tyto suroviny vyneseny do míchačky suchých maltových směsí. V míchačce probíhala homogenizace směsi po dobu 5 minut při otáčkách 40 ot/min. Zhomogenizovaná směs poté postupovala přes násypku míchačky do šnekového dopravníku, kterým byla transportována do plničky a baličky suchých maltových směsí.

Z poloprovozně vyrobených směsí byly následně odebrány vzorky k provedení technologických a aplikačních zkoušek viz Tabulka 9.

Tabulka 9: Technologické a aplikační vlastnosti poloprovozně připravených suchých maltových směsí

Sledované vlastnosti	Sádrová omítka hlazená	Sádrová omítka točená	Sádrový tmel	Sádrový premix
Záměsová voda [%]	49	42	48	52
Zpracovatelnost [min]	< 120	< 120	< 120	< 120
Objemová stálost	bez trhlin	bez trhlin	bez trhlin	bez trhlin
Objemová hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	1220	1290	1220	1210
Pevnost [MPa]				
V tlaku 7 dnů	2,3	2,3	3,5	3,9
V tahu za ohybu 7 dnů	0,9	1,2	0,6	1,7
Přídržnost [MPa] 7 dnů	0,8	0,5	1,0	0,6
Aplikační				
Rozmíchání s vodou	snadné	snadné	snadné	snadné
Homogenita	dobrá	dobrá	dobrá	dobrá
Lepivost	nízká	nízká	není	střední
Barva	bílá	bílá	bílá	bílá

4.4 Příprava sádrových tvarovek

4.4.1 Konstrukce poloprovozní formy

Při návrhu formy se vycházelo z požadavků na rozpětí stanovených normou (maximální délka $l = 1000$ mm, tloušťka od 50 mm do 150 mm, minimální plocha lícové strany $0,10$ m²). Následujícím kritériem byla co nejsnazší aplikace při zachování

technických vlastností. Rozměry formy byly stanoveny tak, aby rozměry vlastní tvárnice po odformování byly 500 x 300 mm s tloušťkou 60 mm. Tvar bočnice byl navržen s ohledem na to, aby tvarovka mohla být opatřena perem a drážkou. Jako vhodný materiál na konstrukci formy, který by byl odolný vůči korozi při styku se sádrou, vyhovující hmotnostně při ruční manipulaci a zároveň cenově dostupný, bylo vyhodnoceno dubové dřevo. Dřevěná základna formy byla orientována vodorovně, vzniklá podstava byla opatřena vyjímatelnou kovovou podložkou a byly na ni připevněny odnímatelné bočnice. Dvě delší bočnice měly uprostřed pevně přišroubovány úhelníky, kterými byly za pomoci křídlových šroubů připevněny k podstavě. Dvě kratší bočnice byly na svých koncích opatřeny úhelníky pro spojení s delšími bočnicemi pomocí křídlových šroubů. Pro snadnější odformování byly bočnice opatřeny hydrofobním prostředkem na silikonové bázi. Do sestavené formy se po okraj vtila sádrová suspenze, po počátečním zatuhnutí došlo k seříznutí přesahu hmoty ocelovou lištou a po zatvrdnutí k demontáži formy.

4.4.2 Laboratorní příprava sádrové tvarovky

Pro laboratorní přípravu sádrové tvarovky bylo použito 10 kg poloprovozně vyrobené beta sádry, jež byla nejprve modifikována plastifikační přísadou. Následně se přistoupilo k modifikaci sádrové hmoty různou dávkou provzdušňující přísady za účelem získání sádrových tvarovek různých objemových hmotností při stejném množství záměsové vody. Rovněž dávkování plastifikační přísady bylo odzkoušeno v řadě koncentrací. Z důvodu optimalizace počátku a doby tuhnutí byly všechny směsi modifikovány přidavkem retardační přísady.

Po navážení jednotlivých suchých složek byla provedena důkladná homogenizace surovinové směsi. Zhomogenizovaná směs byla smíchána s požadovaným množstvím záměsové vody, rozmíchána na sádrovou kaši a s mírným přesahem odlita do předem připravené formy. Případně se ve hmotě vyskytující vzduchové bubliny a kaverny byly odstraněny zavibrováním formy. V okamžiku, kdy směs začala tuhnout, byl její přebytek seříznut kovovou lištou. Jelikož byla konstrukce formy opatřena kovovou podložkou, umístěnou mezi podstavu formy a bočnice, bylo možné tvárnici odformovat ihned, a na podložce přenést do sušárny. Po vysušení byly tvárnice připraveny k provedení zkoušek a stanovení technologických vlastností dle příslušné normy ČSN EN 12 859, viz Tabulka 10. V případě rozměrů a rovinnosti jsou uvedeny aritmetické průměry naměřených hodnot.



Obrázek 5: Ukázka poloprovozní formy (vlevo) a výsledného produktu (vpravo)

Tabulka 10: Technologické vlastnosti laboratorně připravených tvarovek modifikovaných plastifikační přísadou

Sledované vlastnosti	Normový požadavek	Vzorek A
Rozměry		
Délka [mm]	500 ± 5	502
Výška [mm]	300 ± 2	300
Tloušťka [mm]	60,0 ± 0,5	61,1
Rovinnost [mm]	± 1,0	0,3
Objemová hmotnost [kg/m ³]	Vysoká (D) 1100 - 1500 Střední (M) 800 - 1100 Nízká (L) 600 - 800	1080
Maximální lomové zatížení [kN]	1,5 pro D, M 1,3 pro L	1,6
pH [-]		6,00

Z naměřených hodnot je patrné, že sádrová tvarovka modifikovaná plastifikační přísadou splňuje všechny technické požadavky, avšak ne požadavky rozměrové. Z důvodu potřeby přípravy sádrové kaše, ze které by připravená výsledná tvarovka splňovala požadované rozměry a zároveň by dosahovala nižší hodnoty objemové hmotnosti, přistoupilo se k modifikaci sádrové kaše pomocí provzdušňující přísady. Technologické vlastnosti takto modifikované sádrové kaše jsou uvedeny v Tabulka 11.

Tabulka 11: Technologické vlastnosti laboratorně připravených sádrových tvarovek modifikovaných provzdušňující přísadou

Sledované vlastnosti	Normové požadavky	Vzorek B	Vzorek C	Vzorek D
----------------------	-------------------	----------	----------	----------

Rozměry				
Délka [mm]	500 ± 5	499	500	501
Výška [mm]	300 ± 2	300	300	299
Tloušťka [mm]	60,0 ± 0,5	60,0	60,1	60,0
Rovinnost [mm]	± 1,0	0,5	0,4	0,5
Objemová hmotnost [kg/m ³]	Vysoká (D) 1100 - 1500 Střední (M) 800 - 1100 Nízká (L) 600 - 800	1120	910	780
Maximální lomové zatížení [kN]	1,5 pro D, M 1,3 pro L	8,6	2,5	1,5
pH [-]		6,10	6,20	6,20

Na základě odchylek naměřených rozměrů lze konstatovat, že všechny vyrobené tvarovky dodržují rozměrové parametry stanovené normou ČSN EN 12 859 Sádrové tvárnice - Definice, požadavky a zkušební metody.

Tolerance odchylky lícové plochy od roviny stanovená normou je 1 mm. Toto kritérium nebylo překročeno u žádného z měřených vzorků a lze tedy konstatovat, že všechny zkoušené tvárnice vyhovují na rovinnost.

Z vypočtených hodnot objemové hmotnosti vyplývá, že při použití nejvyšší zvolené dávky provzdušňující přísady je objemová hmotnost nejnižší, 780 kg·m⁻³, a spadá dle ČSN EN 12 859 do třídy L - nízká objemová hmotnost. V případě střední dávky přísady je hodnota objemové hmotnosti zařaditelná do třídy M - střední objemová hmotnost, při nejnižší zvolené dávce přísady je svou hodnotou 1120 kg·m⁻³ zařaditelná do třídy D - vysoká objemová hmotnost. Lze usoudit, že přísada má vliv na plasticitu, vylepšuje její zpracovatelnost a provzdušnění má za následek pokles objemové hmotnosti.

U všech vzorků bylo zjištěno, že vyhovují normovým hodnotám maximálního lomového zatížení. Z naměřených hodnot je patrné, že s rostoucí hodnotou objemové hmotnosti, tedy s klesajícím množstvím provzdušňující přísady, roste i pevnost v tahu za ohybu, vyjádřená lomovým zatížením

Výsledky měření pH prokázaly, že všechny tvarovky spadají do kategorie nízkého pH.

4.4.3 Poloprovozní příprava sádrové tvarovky

Zařízení na přípravu sádrové kaše sestávalo z periodické nerezové míchačky se zaústěným přívodem vody a s čerpadlem k transportu tohoto produktu do zásobního barelu. Poloprovozní model technologie na výrobu tvarovek sestával z manuálně

ovládané točny, do jejichž kvadrantů byly instalovány rozebíratelné formy s vyměnitelnými nerezovými podložkami.

Sádra zhomogenizovaná s aditivu, byla po navážení vsypána ručně. V první fázi zkoušek byla sádra modifikována práškovým zpomalovačem a práškovým plastifikátorem, vodní součinitel činil $w = 0,75$. Jelikož připravené tvarovky byly příliš těžké, byla ve druhé fázi receptura pozměna tak, že plastifikátor byl nahrazen provzdušňující přísadou, jež se prokázala jako neúčinnější v laboratorních zkouškách.

Rozmíchaná sádrová kaše byla poté přečerpána do zásobního barelu, odkud byla přes ventil nadávkována do formy v prvním kvadrantu. Pomocí točny byla forma pootočena o devadesát stupňů do pozice druhého kvadrantu, ve které byl zarovnan její povrch. Po dalším pootočení do pozice třetího kvadrantu byla sádrová kaše již natolik vytvrzená, že bylo možné ji odformovat a na nerezové podložce přemístit ke zrání a sušení. V pozici čtvrtého kvadrantu byla po očištění forma složena a připravena pro další výrobní cyklus. Takto vyrobené tvarovky byly dále použity ke stanovení technologických vlastností.

Tabulka 12: Technologické vlastnosti poloprovozně vyrobené sádrové tvarovky

Sledované vlastnosti	Normové požadavky	Vzorek D	Vzorek E
Rozměry			
Délka [mm]	500 ± 5	499	500
Výška [mm]	300 ± 2	300	300
Tloušťka [mm]	60,0 ± 0,5	60,0	60,1
Rovinnost [mm]	± 1,0	0,5	0,4
Objemová hmotnost [kg/m ³]	Vysoká (D) 1100 - 1500 Střední (M) 800 - 1100 Nízká (L) 600 - 800	1120	910
Maximální lomové zatížení [kN]	1,5 pro D, M 1,3 pro L	8,6	2,5
pH [-]		6,10	6,20

Z hodnot naměřených v Tabulka 12 je patrné, že obě tvarovky vyhověly normou předepsaným vlastnostem.

Kvůli typu použité míchačky bylo nutné výrazně regulovat tuhnutí sádrové kaše zpomalovací přísadou. Toto se však negativně projevilo na zpomalení výrobního cyklu, který činil až 15 minut. Z uvedeného plyne, že periodická míchačka je pro zvolený výrobní postup nevhodná a bylo by žádoucí nahradit ji míchačkou kontinuální.

Způsob uzavírání formy pomocí šroubů není z poloprovozního hlediska vhodný, neboť je pomalý. Bylo navrženo nahradit tento typ tzv. pákovým uzávěrem.

Povrch tvarovky, při odlevu vytvořený na nerezové podložce, je ideálně hladký a lesklý.

K vysušení tvarovek bylo použito odpadního tepla od rotační sušárny, která je ve výrobě v nepřetržitém provozu.

4.4.4 Výstavba zkušební přičky

Zkušební přička byla vystavena v prostorách poloprovozu ve velikosti cca (200 x 150) cm. V rámci přípravných prací byla nejprve vyrovnána podlaha pod přičkou pomocí tvrzeného polystyrenu a na obou koncích zamýšlené přičky byly instalovány U-profily pro vertikální fixaci zdiva (). Poté byla přička zděna z tvárnic způsobem na vazbu, přičemž spoj mezi tvarovkami byl proveden pomocí poloprovozně připraveného sádrového tmelu naneseného špachtlí na jejich bočnice typu pero. Zarovnání okrajů bylo řešeno zaříznutím tvarovky na příslušnou velikost pomocí kotoučové pily.



Obrázek 6: Příprava pro zdění (vlevo), způsob spojování sádrových tvarovek (vpravo)

Vyzděná přička dále sloužila jako podklad pro aplikaci vyvinutého sádrového tmelu, pro aplikaci sádrové omítky a premixu.

Na základě provedené zkoušky bylo konstatováno, že vyzdívání sádrových tvarovek je díky jejich přesnému tvaru, konstrukci pero-drážka a jednoduchému způsobu úpravy na požadovaný tvar řezáním velmi snadné. Vzhledem k tomu, že zdění vyžaduje jen nepatrný podíl sádrového tmelu na vzájemné propojení tvarovek, lze je označit za suchý proces, který je na rozdíl od mokrého procesu ve stavebnictví vnímán jako velmi čistý. Tentýž tmel lze dále použít na vystěrkování a opravu spojů či nerovností. Po

případně úpravě spojů jejich zabroušením např. smirkovým papírem lze díky takto vytvořenému dokonale hladkému povrchu přistoupit k aplikaci finálního povrchu stěny, který dle architektonického záměru může mít podobu omítky anebo přímé výmalby místnosti.

5 Závěr

Lze konstatovat, že z hlediska ekonomického i ekologického se jako nejvhodnější druhotná surovina pro přípravu vysokohodnotného síranového pojiva na území Moravy jeví chemosádrovec Pregips, produkovaný chemickým závodem Precheza a.s. Jde o jemnozrnnou surovinu vysoké kvality. Jedním z nedostatků této suroviny je poměrně vysoká počáteční vlhkost, která představuje v případě nepříznivých klimatických podmínek určité riziko lepení dopravních cest. Z naměřených hodnot vyplývá, že příprava beta sádry z tohoto druhotného zdroje je zcela reálná jak v laboratorních tak poloprovozních podmínkách. Je však nezbytné takto připravenou sádrovinu dále modifikovat příslušnými aditivami. Z důvodu téměř úplné absence ztekucovačů určených pro sádrová pojiva na českém trhu, bylo za účelem modifikace použito plastifikátorů primárně určených pro ztekucení cementových past a betonů. Na základě získaných výsledků se jako nejvhodnější z dozkoušené škály přísad, z hlediska dosažení nejlepších technologických vlastností, jeví plastifikátory řady Melflux, jež měly výrazné ztekucující účinky. Jejich užitím docházelo k prodlužování dob tuhnutí oproti referenčnímu vzorku, ty jsou však ve stavební praxi žádoucí. Nepřímou metodou stanovení konzistence zkouškou rozlitím sádrové suspenze byl u celé řady elementárních sloučenin ověřován ztekucující účinek vyvolaný zvýšením hodnoty zeta potenciálu. Následně byl interpretací těchto měření dle tezí lyotropních řad i Schulze – Hardyho pravidla potvrzen vliv velikosti zeta potenciálu v absolutní hodnotě na ztekucovací efekt sádrové kaše. Postupnou optimalizací surovinové skladby a následnou modifikací příslušnými retenčními, adhezními a plastifikačními přísadami byl vyvinut ucelený stavební program sestávající ze sádrové omítky, sádrového tmele a sádrového premixu. Odstupňovanou dávkou provzdušňovací přísady byly navrženy sádrové tvarovky rozdílných objemových hmotností. Laboratorní přípravou byla ověřena možnost přechodu do poloprovozních podmínek.

6 Literatura:

[1] VŠIANSKÝ, D., KOLÁŘ, J., PETŘÍK, J., Continuity and changes of manufacturing traditions of Bell beaker and Bronze Age ecrused pottery in Morava rever catchment (Czech Republic), Journal of Archaeological Science, volume 49, September 2014, pages 414 - 422.

- [2] VAVŘÍN, F., Maltoviny, 3. vydání. Brno: Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1987, 253 stran.
- [3] BRANDŠTETR, J.; ŠAUMAN, Z.: Teorie struktury stavebních látek, VUT Brno 1979. 258 stran.

7 Curriculum vitae

Osobní údaje:

Jméno a příjmení:	Iveta Hájková
Datum a místo narození:	21. 9. 1986
Stav:	svobodná
Trvalé bydliště:	Fryčajova 16, Bystřice pod Hostýnem

Dosažené

vzdělání:

2002–2006	Gymnázium Ladislava Jaroše, Holešov, všeobecný studijní program
2006–2010	Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, bakalářský studijní program, obor stavebně materiálové inženýrství
2010–2012	Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, magisterský studijní program, obor stavebně materiálové inženýrství
2012–dosud	Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, doktorský studijní program, obor Fyzikální a stavebně materiálové inženýrství, Státní doktorská zkouška absolvována 6. 2. 2014

Pracovní

zkušenosti:

2012–dosud	Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, člen řešitelských týmů projektů
------------	--

Publikační činnost

- [1] HÁJKOVÁ, I.; GAZDIČ, D.; DVOŘÁK, K.; KULÍSEK, K.; NOVÁK, J. Příprava síranového pojiva z chemosádrovce. In Maltoviny 2012. Brno: VUT Brno, 2012. s. 37-42. ISBN: 978-80-214-4657- 1.
- [2] GAZDIČ, D.; HÁJKOVÁ, I.; MAGRLA, R. Monitoring of Calcium Sulphate Phase Transformations Using Hightemperature X- ray Diffraction. In Binders an Materials XI. Advanced Materials Research. 2014. Švýcarsko: Trans Tech Publications, 2013. s. 621-624. ISBN: 978-3-03835-026- 2. ISSN: 1022- 6680.
- [3] HÁJKOVÁ, I.; FRIDRICHOVÁ, M.; GAZDIČ, D.; DVOŘÁK, K. Beta sádra ze sekundárních surovinových zdrojů. In 17. mazinárodní konference Výzkumného ústavu stavebních hmot, a.s. Ekologie a nové stavební hmoty a výrobky - sborník konference. Brno: T.D.V. Brno, 2013. s. 184-187. ISBN: 978-80-87397-14- 5.

- [4] HÁJKOVÁ, I. Možnosti přípravy síranového pojiva z odpadních surovin. In 15. odborná konference doktorského studia Juniorstav 2013. Brno: VUT Brno, 2013. s. 1-6. ISBN: 978-80-214-4670- 0.
- [5] HÁJKOVÁ, I.; FRIDRICHOVÁ, M. Ověření účinnosti vybraných plastifikátorů na silně viskózních pastách. In Construction materials - Zborník recenzovaných vedeckých prác. Nitra: Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, 2013. s. 134-137. ISBN: 978-80-552-1031- 5.
- [6] FRIDRICHOVÁ, M.; DVOŘÁK, K.; HÁJKOVÁ, I. Alternative preparation of sulphated binders from secondary raw- material resources. Advanced Materials Research, 2013, roč. 2014, č. 838- 841, s. 2338-2341. ISSN: 1022- 6680.
- [7] DVOŘÁK, K.; HÁJKOVÁ, I.; FRIDRICHOVÁ, M. Influence of grinding alpha-gypsum on its final property. In Binders and Materials XI. Advanced Materials Research. Švýcarsko: Trans Tech Publications, 2014. s. 61-64. ISBN: 978-3-03835-026- 2. ISSN: 1022- 6680.
- [8] GAZDIČ, D.; HÁJKOVÁ, I.; FRIDRICHOVÁ, M. High-Temperature X- Ray Powder Diffraction of Secondary Gypsum. International Science Index, 2014, roč. 8, č. 11, s. 1109-1112. ISSN: 1307- 6892.
- [9] GAZDIČ, D.; FRIDRICHOVÁ, M.; HÁJKOVÁ, I. Study of increasing of belite reactivity. In Binders and Materials XI. Advanced Materials Research. Švýcarsko: Trans Tech Publications, 2014. s. 9-12. ISBN: 978-3-03835-026- 2. ISSN: 1022-6680.
- [10] FRIDRICHOVÁ, M.; HÁJKOVÁ, I.; DVOŘÁK, K. Efficiency of sulphate paste liquefaction. In Binders and Materials XI. Advanced Materials Research. Švýcarsko: Trans Tech Publications, 2014. s. 57-60. ISBN: 978-3-03835-026- 2. ISSN: 1022-6680.
- [11] HÁJKOVÁ, I.; GAZDIČ, D. Fázové složení cementářských odprašků jako zdroj soli pro tvorbu roztoku na výrobu alfa sádry. In Juniorstav 2014 16. odborná konference doktorského studia s mezinárodní účastí. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2014. s. 294-297. ISBN: 978-80-214-4851- 3.
- [12] HÁJKOVÁ, I.; DVOŘÁK, K.; KULÍSEK, K.; HLAVINKOVÁ, E.; HAVLÍČKOVÁ, K. MOŽNOSTI VYUŽITÍ CEMENTÁŘSKÝCH ODPRAŠKŮ JAKO ZDROJ SOLI PRO TVORBU ROZTOKU NA VÝROBU alfa- SÁDRY. In Construmat 2014. 1. Ostrava: VŠB, 2014. s. 1-6. ISBN: 978-80-248-3381- 1.
- [13] DVOŘÁK, K.; HÁJKOVÁ, I.; HAVLÍČKOVÁ, K. Monitoring the influence of dehydrating solutions for the production of alpha gypsum. In Ecology and New Building Materials and Products. Advanced Materials Research. Švýcarsko: Trans Tech Publications, 2014. s. 51-54. ISBN: 978-80-87397-16- 9. ISSN: 1022- 6680.
- [14] FRIDRICHOVÁ, M.; HÁJKOVÁ, I.; DVOŘÁK, K. Influence of Dehydrating Solution Types on Technological Properties of Alpha- Hemihydrate. In Civil, Structural and Environmental Engineering III. Advanced Materials Research. Švýcarsko: Trans Tech Publication, 2014. s. 1907-1910. ISBN: 978-3-03835-358- 4. ISSN: 1022- 6680.
- [15] FRIDRICHOVÁ, M.; HÁJKOVÁ, I.; DVOŘÁK, K. Production of the alpha plaster modification by pressureless method. In Binders, Materials and Technologies in

Modern Construction. Advanced Materials Research. Švýcarsko: Trans Tech Publications, 2015. s. 64-67. ISBN: 978-3-03835-452- 9. ISSN: 1022- 6680.

[16] DVOŘÁK, K.; DOLÁK, D.; HÁJKOVÁ, I. Impact of Grinding Technology on Final Properties of Portland Cement. In Cpecial Concrete and Composites 2015. Key Engineering Materials (print). Švýcarsko: Trans Tech Publications Ltd., 2015. s. 191-197. ISBN: 978-3-03835-579- 3. ISSN: 1013- 9826.

[17] HÁJKOVÁ, I.; DVOŘÁK, K.; FRIDRICHOVÁ, M.; DOLÁK, D. Influence of grinding processes on gypsum microstructure. In Ekologie a nové stavební hmoty a výrobky. Advanced Materials Research. Švýcarsko: 2015. s. 151-155. ISBN: 978-3-03835-587- 8. ISSN: 1022- 6680.

[18] GAZDIČ, D.; DVOŘÁK, K.; HÁJKOVÁ, I. Laboratory Burning of Anhydrite from Phosphogypsum. In Binders, Materials and Technologies in Modern Construction. Advanced Materials Research. 2015. Švýcarsko: TTP, 2015. s. 60-63. ISBN: 978-3-03835-452- 9. ISSN: 1022- 6680.

[19] MIKULICA, K.; HÁJKOVÁ, I. Testing of technological properties of foam concrete. In Binders, Materials and Technologies in Modern Construction II. Materials Science Forum. Switzerland: Trans tech publication, 2016. s. 229-233. ISSN: 0255-5476.

[20] MIKULICA, K.; HÁJKOVÁ, I.; HUBÁČEK, A. Cement based heat- insulating materials for use in floor constructions. In Materials Science Forum. Materials Science Forum. Switzerland: Trans Tech Publications, 2016. s. 224-228. ISSN: 1662-9752.

[21] DOLÁK, D.; DVOŘÁK, K.; HÁJKOVÁ, I. VPLYV TECHNOLOGIE MLETIA NA VLASTNOSTI PORTLANDSKÉHO CEMENTU. In CONSTRUMAT 2016, Sborník příspěvků z XXII. mezinárodní, konference o stavebních materiálech. Jan Kočí, Eva Vejmelková. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2016. s. 90-98. ISBN: 978-80-01-05958- 6.

[22] HÁJKOVÁ, I.; DVOŘÁK, K.; GAZDIČ, D.; FRIDRICHOVÁ, M. Technological Properties Testing of Blended Portland Cements with Fluidized Filter Ash. In Binders, Materials and Technologies in modern Construction II. Materials Science Forum. Materials science forum. Switzerland: Trans tech publication Ltd., 2016. s. 27-31. ISBN: 978-3-03835-740- 7. ISSN: 0255-5476.

[23] MIKULICA, K.; HÁJKOVÁ, I. Testing of technological properties of foam concrete. In Binders, Materials and Technologies in Modern Construction II. Switzerland: Trans Tech Publications, 2016. s. 229-233. ISBN: 978-3-03835-740-7.

[24] MIKULICA, K.; HÁJKOVÁ, I.; HUBÁČEK, A. Cement based heat- insulating materials for use in floor constructions. In Binders, Materials and Technologies in Modern Construction II. Materials Science Forum. Switzerland: Trans tech publication, 2016. s. 224-228. ISSN: 0255-5476.

[25] MIKULICA, K.; OSUSKÁ, L.; HÁJKOVÁ, I. FYZIKÁLNĚ MECHANICKÉ VLASTNOSTI POPÍLKOVÝCH PĚNOBETONŮ. Praha, Česká republika: České vysoké učení technické v Praze, 2016. s. 196-201

[26] LABAJ, M.; HELA, R.; HÁJKOVÁ, I. Nanosilica Activated High Volume Fly Ash Concrete: Effects on Selected Properties. In Special Concrete and Composites

2016. Key Engineering Materials (web). Switzerland: Trans Tech Publications, 2016. s. 157-162. ISBN: 978-3-0357-1079-3. ISSN: 1662-9795.
- [27] DVOŘÁK, K.; HÁJKOVÁ, I. The Effect of High-Speed Grinding Technology on the Properties of Fly Ash. *Materiali in tehnologije*, 2016, roč. 50, č. 5, s. 683-687. ISSN: 1580-2949.
- [28] DOLÁK, D.; DVOŘÁK, K.; HÁJKOVÁ, I. Srovnání konečných vlastností portlandských cementů vlivem druhu mletí. *TZB- info*, 2017, roč. 19, č. 5, s. 1-6. ISSN: 1801-4399.
- [29] NOVÁKOVÁ, I.; HÁJKOVÁ, I. Quality Evaluation System for Description of Recycled Concrete Aggregates and Verification of its Functionality. In *Civil and Building Materials*. 2017. s. 14-18. ISBN: 978-3-0357-1112-7.
- [30] HUBÁČEK, A.; HÁJKOVÁ, I. Properties of Vibro Compacted and Pressed Concrete Products with Varnished Surface. In *Binders, Materials and Technologies in Modern Construction III. Materials Science Forum*. Switzerland: Trans Tech Publication, 2017. s. 159-163. ISBN: 978-3-0357-1157-8. ISSN: 1662-9752.
- [31] HUBÁČEK, A.; HÁJKOVÁ, I. Water-Tight Concrete Constructions and Directives for their Design and Realization. In *Binders, Materials and Technologies in Modern Construction III. Materials Science Forum*. Switzerland: Trans Tech Publication, 2017. s. 154-158. ISBN: 978-3-0357-1157-8. ISSN: 1662-9752
- [32] HÁJKOVÁ, I.; NOVOSAD, P. Modification of Technological Properties of Laboratory Premixes. In *Binders, Materials and Technologies in Modern Construction IV. Solid State Phenomena*. Switzerland: Trans Tech Publication, 2018. s. 236-241. ISBN: 978-3-0357-1348-0. ISSN: 1662-9779.

ABSTRAKT

Tématem disertační práce byla příprava vysokohodnotného síranového pojiva na bázi druhotných surovin. Za tímto účelem byla práce primárně zaměřena na laboratorní přípravu beta sádry z vybraného průmyslového sádrovce, návrh technologického postupu výroby a jeho ověření poloprovozními zkouškami. V dalším kroku se práce zabývala modifikací beta sádry vybraným souborem ztekucujících látek. Vedle komerčních ztekucovačů bylo zkoušeno možné ztekucení beta sádry způsobem zvýšení hodnoty zeta potenciálu sádrové suspenze. Závěrem byl vyvinut ucelený komplex stavebních výrobků na bázi laboratorně a poloprovozně připravené beta sádry, sestávající ze sádrových omítek, tmelů, sádrového premixu a malých sádrových tvarovek.

ABSTRACT

The Theme of this dissertation was the preparation of a high-quality sulphate binder based on secondary raw materials. For this purpose, the work was primarily focused on the laboratory preparation of beta gypsum from the selected industrial gypsum, the design of the technological process of production and its verification by pilot tests. In

the next step, the thesis dealt with the modification of beta gypsum by a selected set of liquefiers. In addition to commercial dehumidifiers, the possible beta casting of beta gypsum was tested by increasing the zeta potential of the gypsum suspension. At the end, a complete complex of construction products was developed based on laboratory and semi-prepared beta plasters, consisting of gypsum plasters, mastics, gypsum premix and small plaster casts.