



**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 2019**

## 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.

## KLÍČOVÁ SLOVA

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

## 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.

## KEYWORDS

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

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Ing. Iveta Hájková *Vysokohodnotné síranové pojivo na bázi odpadních surovin*.  
Brno, 2018. 139 s. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební,  
Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Dominik Gazdič, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem disertační práci s názvem Vysokohodnotné síranové pojivo na bázi odpadních surovin zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 13. 12. 2018

---

Ing. Iveta Hájková  
autor práce

## **Poděkování**

Ráda bych poděkovala svému vedoucímu Ing. Dominiku Gazdičovi Ph.D. a prof. Ing. Marcele Fridrichové, CSc. za odborné vedení a cenné rady při zpracování této práce a zaměstnancům Ústavu technologie stavebních hmot a dílců za odbornou pomoc při provádění laboratorních zkoušek.

## Obsah

Úvod.....	11
I. Teoretická část.....	13
1. Suroviny pro výrobu pojiv na bázi síranu vápenatého .....	13
1.1 Přírodní zdroje.....	13
1.1.1 Sádrovec .....	13
1.1.2 Minerál bassanit $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$ .....	16
1.1.3 Přírodní anhydrit .....	17
1.1.4 Geneze.....	17
1.2 Uměle vzniklé sádrovce .....	18
1.2.1 Energosádrovec .....	19
1.2.2 Chemosádrovec .....	23
1.2.3 Citrosádrovec .....	25
1.2.4 Fluorsádrovec.....	26
1.2.5 Fosfosádrovec .....	26
1.3 Syntetický anhydrit .....	27
1.4 Termický anhydrit.....	28
2. Druhy pojiv na bázi síranu vápenatého .....	30
2.1 Rychle tuhnoucí sádra $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$ .....	32
2.1.1 $\alpha \text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$ .....	33
2.1.2 $\beta \text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$ .....	34
2.2 Anhydritové maltoviny .....	34
2.2.1 $\text{CaSO}_4$ III .....	35
2.2.2 $\text{CaSO}_4$ II .....	35
2.2.3 Nejznámější druhy historických maltoviny na bázi anhydritu II .....	36
2.3 Pomalu tuhnoucí sádra .....	37
3. Výroba síranových pojiv .....	38

3.1	Výroba vařákovým způsobem .....	38
3.2	Výroba v sušící rotační peci .....	39
3.3	Výroba na roštu .....	39
3.4	Výroba v sušícím mlýně .....	40
3.5	Výroba v autoklávu.....	41
3.6	Výpal ve vzhosu .....	42
3.7	Krystalizace v roztoku solí.....	42
4.	Normativní požadavky na vlastnosti síranových pojiv.....	43
4.1	Normativní požadavky na sádrová pojiva.....	43
4.1.1	Požadavky ČSN 72 2301.....	43
4.1.2	Požadavky ČSN EN 13279.....	46
4.2	Normativní požadavky na anhydritové maltoviny .....	47
4.2.1	Normativní požadavky dle ČSN EN 13454-1.....	48
5.	Hydratace sádrových pojiv .....	52
5.1	Hydratace sádry .....	52
5.2	Hydratace anhydritu .....	54
6.	Modifikační přísady.....	58
7.	Zeta potenciál.....	59
7.1	Elektrokinetické efekty.....	61
7.1.1	Elektroforéza .....	61
7.1.2	Elektroosmóza.....	62
7.1.3	Potenciál proudění.....	62
7.1.4	Sedimentační potenciál .....	62
8.	Použití sádrových pojiv.....	63
8.1	Sádrová pojiva a sádrové malty .....	63
8.2	Sádrokartonové konstrukce .....	64
8.2.1	Sádrokartonové desky.....	64

8.2.2	Technologie výroby sádrokartonových desek.....	64
8.2.3	Výhody použití sádrokartonových desek na podlahy.....	65
8.2.4	Sádrokartonové podhledy a stropy .....	66
8.2.5	Druhy a označení sádrokartonu.....	66
8.3	Sádrovláknité konstrukce .....	67
8.3.1	Sádrovláknité desky.....	67
8.3.2	Technologie výroby sádrovláknitých desek .....	67
8.3.3	Vlastnosti sádrovláknitých desek.....	68
8.3.4	Použití sádrovláknitých desek .....	69
8.4	Sádrové tvárnice .....	69
8.5	Spárovací materiály .....	71
8.6	Sádrové prvky pro závěsné podhledy .....	71
8.7	Lité potěry .....	71
8.7.1	Použití anhydritových potěrů .....	72
8.7.2	Sintrová vrstva.....	72
8.7.3	Anhydritové potěry v praxi .....	73
8.8	Lité sádrové výrobky vyztužené vlákny .....	73
8.9	Použití mimo stavebnictví.....	74
II.	Experimentální část.....	75
1.	Metodika práce.....	75
2.	Postup prací .....	78
2.1	Příprava beta sádry z druhotných surovin.....	78
2.1.1	Laboratorní příprava beta sádry z druhotných surovin .....	78
2.1.2	Poloprovozní příprava beta sádry z druhotných surovin.....	78
2.2	Modifikace konzistence beta sádry .....	78
2.2.1	Modifikace laboratorně připravené beta sádry komerčními plastifikátory .....	79



2.2.2	Modifikace konzistence beta sádry změnou zeta potenciálu .....	79
2.3	Příprava suchých maltových směsí .....	80
2.3.1	Laboratorní příprava suchých maltových směsí .....	80
2.3.2	Poloprovozní příprava suchých maltových směsí .....	81
2.4	Příprava sádrových tvarovek .....	81
2.4.1	Konstrukce poloprovozní formy .....	81
2.4.2	Laboratorní příprava sádrové tvarovky .....	81
2.4.3	Poloprovozní příprava sádrové tvarovky .....	81
3.	Použité suroviny .....	82
4.	Použité přístroje a vybavení .....	85
5.	Vyhodnocení výsledků .....	87
5.1	Příprava beta sádry z druhotných surovin .....	87
5.1.1	Laboratorní příprava $\beta$ -sádry z druhotných surovin .....	87
5.1.2	Optimalizace kalcinačního procesu laboratorně připravené $\beta$ -sádry z druhotných surovin .....	90
5.1.3	Poloprovozní příprava $\beta$ -sádry z druhotných surovin .....	95
5.2	Modifikace konzistence beta sádry .....	99
5.2.1	Modifikace laboratorně připravené beta sádry komerčními plastifikátory .....	99
5.2.2	Modifikace konzistence beta sádry změnou zeta potenciálu .....	109
5.3	Příprava suchých maltových směsí .....	111
5.3.1	Příprava sádrových omítek .....	111
5.3.2	Příprava sádrových tmelů .....	112
5.3.3	Premix sádrového pojiva .....	113
5.3.4	Poloprovozní příprava suchých maltových směsí .....	114
5.4	Příprava sádrových tvarovek .....	116
5.4.1	Konstrukce poloprovozní formy .....	116
5.4.2	Laboratorní příprava sádrové tvarovky .....	118

5.4.3	Poloprovozní příprava sádrové tvarovky.....	121
5.4.4	Výstavba zkušební příčky z poloprovozně vyrobených prvků komplexního příčkového systému .....	123
6.	Diskuze výsledků.....	125
	Závěr.....	128

## 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 spalin) 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  $\alpha$ -sádry a anhydritových maltovin. [3]

Díky vzrůstající tendenci ve všech odvětvích průmyslu, zejména pak ve stavebním, nahrazovat vyčerpatelné 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.

# **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## **1. SUROVINY PRO VÝROBU POJIV NA BÁZI SÍRANU VÁPENATÉHO**

### **1.1 Přírodní zdroje**

#### **1.1.1 Sádrovec**

##### **1.1.1.1 Přírodní sádrovec**

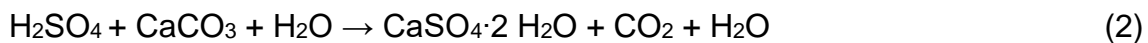
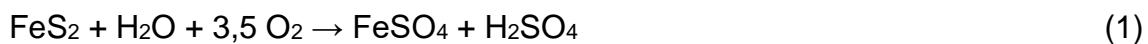
Jedná se o průhledný a bezbarvý nebo bílý minerál, někdy může být i jinak zbarvený, krystalizující v jednoklonné soustavě viz Obr. 1. Je známo asi 70 tvarů krystalů, z nichž nejrozšířenější jsou tabulkové, prizmatické, jehličkové a čočkovitého tvaru. Často dvojčatí a podle osy symetrie vytváří takzvané vlašťovčí ocasy. Chemické složení sádrovce je Ca 23,28 %, S 18,62 %, O 55,76 %, H 2,34 %. Má tvrdost 1,5 až 2 dle Mohse a měrnou hmotnost 2300 až 2320 kg·m<sup>-3</sup>. Ve vodě je jen velmi málo rozpustný (při 18 °C je to asi 0,2 %, při 40 °C asi 0,21 % a při 100 °C asi 0,17 % hm.). [4]. V kyselinách se rozpouští velmi těžce. Jeho ušlechtilými odrůdami jsou saharská růže, mariánské sklo, alabastr (starší název uběl), který je jemně zrnitý, velice bílý, další ušlechtilou odrůdou je pak selenit, což je vláknitý sádrovec s hedvábným leskem.

##### **1.1.1.2 Primárně vzniklý sádrovec**

Vznikl jako sedimentární hornina. Největší ložiska vznikla primární genezí neboli odpařováním mořských lagun a slaných jezer, kdy vysrážený síran vápenatý klesal ke dnu. Nejdříve se vylučovaly soli ve vodě málo rozpustné, mezi něž patří i síran vápenatý, a pak teprve soli rozpustnější zejména sodné a draselné. Proto takto vzniklá ložiska mají spodní vrstvy sádrovcové a nadloží většinou ze solí sodných a draselných.

##### **1.1.1.3 Sekundárně vzniklý sádrovec**

Sekundární sádrovec vzniká rozkladem pyritu na kyselinu sírovou a síran železnatý a následnou reakcí s vápencem či dolomitem.



Ložiska sádrovce vznikajícího sekundární genezí bývají znečištěna vápencem, dolomitem, anhydritem, případně oxidy železa. [6], [7]



Obr. 1: Přírodní sádrovec

#### 1.1.1.4 Naleziště sádrovce

V České republice je jediné přírodní naleziště sádrovce a to v Kobeřicích u Opavy. Zde na ploše cca 60 ha těží společnost Gypstrend s.r.o. Sádrovec zde vyskytující se je znečištěn šedými jíly, což má vliv na jeho zbarvení. Část vytěžené suroviny je odebírána do cementárny jako regulátor tuhnutí cementu. Zbytek vytěženého sádrovce je kalcinací zpracován na sádrové pojivo, které je i využíváno na výrobu příčkových tvárnic a sádrových omítek. Charakteristické vlastnosti tohoto sádrovce jsou uvedeny v Tab. 1.

Tab. 1: Vlastnosti sádrovce těženého v Kobeřicích u Opavy

parametr	hodnota
CaSO <sub>4</sub> ·2 H <sub>2</sub> O	60 - 80 %
Vlhkost	max. 10 %
Ztráta žíháním	10 - 16 %
SiO <sub>2</sub> + nerozpustný zbytek	8 - 15 %
CaSO <sub>4</sub>	0 - 0,5 %
SO <sub>3</sub>	28 - 37 %
CaO	24 - 36 %
MgO	0,2 - 1 %
Seskvioxidy (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1 - 2,6 %
Hmotnostní aktivita <sup>226</sup> Ra	max. 80 Bq/kg

V rozmezí let 1993 až 1995 se každý rok na území České republiky vytěžilo přes 500 000 tun sádrovce. Od roku 1996 došlo k útlumu těžby, až do roku 2001, kdy se získalo jen 24 000 tun. Poté nastalo opět zvýšení těžby, ale pouze na krátkou dobu. V roce 2013 bylo v Kobeřicích vytěženo jen 11 000 tun suroviny. K tomuto poklesu došlo využíváním sádrovce z průmyslové výroby, hlavně sádrovce vzniklého odsířením spalin a odsířením vody z výroby titanové běloby. Přehled klesajícího množství vytěženého sádrovce v letech 2013-2017 je zaznamenán v Tab. 2. [8]

Tab. 2: Těžba sádrovce v České republice 2013 - 2017 [8]

Rok	2013	2014	2015	2016	2017
Počet ložisek celkem	5	5	5	5	5
z toho těžených	1	1	1	1	1
Zásoby celkem [kt]	504 227	504 205	504 205	504 183	504 183
bilanční prozkoumané	119 100	119 088	119 088	119 056	119 056
bilanční vyhledané	302 990	302 990	302 990	302 990	302 990
nebilanční	82 137	82 137	82 137	82 137	82 137
vytěžené	2 259	2 247	2 247	2 215	2 208
Těžba [kt]	11	11	11	10	7

Ložiska v sousedních státech:

- Slovenská republika - Zlatá Baňa, Banská Štiavnica, Novoceská Huta (alabastr), Spišská Nová Ves (síran s obsahem 10 - 15 % anhydritu II), Vikanová u Zvolena (mariánské sklo), Gemerská Hôrka,
- Polsko - Wiczka a Bochnia,

- Spolková republika Německo - Strassfurt, Mainz, Braunschweig, Ralingen, Borken, Osterode am Harz, Eisleben,

- Rakousko - Salzburg, Preinsfelde, Gratkorn, Bergbau. [9]

Světová těžba sádrovce v posledních letech mírně vzrostla. Mezi nejvyšší producenty ve světě patří Čína s 38 000 kt (cca 23 % z celkového množství v roce 2017). Dalšími velkými světovými producenty sádrovce jsou Írán s 19 000 kt a USA s 15 000 kt. V Evropě je největší těžba sádrovce ve Španělsku s cca 7 000 kt. Celková světová produkce oproti minulým letům vzrůstá (cca 170 mil. tun v roce 2017). Světové ložiskové zásoby sádrovce se odhadují na 2,6 mld. tun. [10], [28]

### 1.1.2 Minerál bassanit $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$

Byl pojmenován po italském paleontologovi Francescu Bassanim (1853-1916) z Neapolské univerzity. V přírodě se bassanit nachází na lokalitách spojených s vulkanickými exhalacemi, na hořících uhelných haldách nebo v aridních oblastech. Lokality s výskytem bassanitu můžeme nalézt téměř po celém světě. Např. vulkán Vesuv (Itálie) a Tolbychik (Kamčatka), laguny Hutt a Leeman v Perthu (Austrálie), jeskyně národního parku Big Bend Mexiko (USA), doly Scholler v Libušině a Kateřina v Radvanicích na trutnovsku (Česká republika), magnetitová ložiska v Podrečanech (Slovenská republika). [7] Krystaly bassanitu viz Obr. 2.



Obr. 2: Krystaly bassanitu



### 1.1.3 Přírodní anhydrit

Jedná se o minerál, ve kterém se nepřítomnost H<sub>2</sub>O odráží v jeho názvu. Anhydrit pochází z řeckého termínu „anhydros“, což znamená bezvodý, ale z chemického hlediska se jedná o anhydrid. Přírodní anhydrit je nerost, který je v náležité čistotě schopen hydratovat bez jakéhokoli výpalu, ale je nezbytné jej pomlít a přidat budič hydratace viz Obr. 3.

Přírodní anhydrit, CaSO<sub>4</sub> II, krystaluje v soustavě kosočtverečné (rombické), bývá bezbarvý, bílý, šedý, namodralý, světle fialový. Lesk označujeme jako sklený až perleťový, vryp bílý. Vyznačuje se hustotou 2980 kg·m<sup>-3</sup>, tvrdostí dle Mohse 3 - 3,5. Štěpnost je výborná dle {010} a {100}, dobrá podle {001} a lom se jeví jako lasturnatý. Bývá znečištěn hlavně sádrovcem, vápencem, chloritem a pyritem. Jeho rozpustnost ve vodě nad 40 °C je nižší než u sádrovce a je stálý do teploty asi 800 °C. Tvoří přibližně 40 forem krystalů - vláknité, kuličkovité, jemně zrnité až celistvé agregáty, pseudomorfózy. Krystaly mají tvar prizmatických tabulek (plochy jsou rýhované), dvojčatí. Chemické složení čistého CaSO<sub>4</sub> je 41,13 % CaO, 58,37 % SO<sub>3</sub>, 0,17 % CO<sub>2</sub> a 0,02 FeS<sub>2</sub>. Jeho čistota se udává v rozmezí 85 - 93 %. [11]



Obr. 3: Krystal přírodního anhydritu

### 1.1.4 Geneze

Přírodní anhydrit má obdobný způsob vzniku jako sádrovec. Vzniká převážně jako sedimentární hornina po evaporaci vnitrozemských moří a lagun často spolu

s  $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ . Může však vzniknout i hydrotermálními pochody ve vyvěřelých horninách.

Některá ložiska anhydritu jsou značně znečištěná sádrovcem, vápencem, magnezitem dolomitem, či organickými látkami. V praxi jsou většinou povrchová ložiska anhydritu znečištěna sádrovcem, podzemní ložiska často obsahují ve vodě rozpustnou sůl kamennou. Sádrovec je měkčí minerál, mele se rychleji než anhydrit a následně snadno obaluje anhydritové částice a brání tak jejich dalšímu rozměňování. Všechny nežádoucí látky velmi nepříznivě ovlivňují vlastnosti anhydritové maltoviny. I přes tyto nečistoty bývá přírodní anhydrit bílý. [12]

Ložiska v Evropě:

- Slovensko - Novoveská Huť, Spišská Nová Ves,
- Spolková republika Německo - Stassfurt, Bavorsko, Durynsko, Dolní Sasko,
- Itálie - Vulpin v Lombardii,
- Rakousko - Hall Tirolsko,
- Polsko - Lubichów, Nowy Łąd, Nowy Łąd-Pole Radłówka - roční těžba se pohybuje okolo 150 kt anhydritu.

## 1.2 Uměle vzniklé sádrovce

S přihlédnutím k náročnosti těžby přírodního sádrovce a jeho omezenou dostupností v určitých regionech se pro výrobce sádry nabízí využívání umělého sádrovce z průmyslové výroby. Primárně je pro producenta sádrovce ekonomicky mnohem výhodnější zbavovat se sádrovce formou prodeje oproti drahému skládkování. [13] Nejpočetnější jsou tzv. energosádrovce vznikající při odsíření spalin tepelných elektráren. Mezi další zástupce patří tzv. chemosádrovce, které jsou produkovány při výrobě titanové běloby nebo při výrobě kyseliny fosforečné, borité, fluorovodíkové a citronové. Tyto sádrovce jsou charakteristické svou velmi vysokou chemickou čistotou. Od přírodních surovin se odlišují sypanou hmotností, typem krystalů, malou velikostí zrn a vyšší vlhkostí. Právě zmíněná vyšší vlhkost, která pochází z technologie výroby, má za následek horší následující zpracování. [14]

### 1.2.1 Energosádrovec

Jedná se o průmyslový sádrovec, jež vzniká dvěma způsoby, a to buď mokrou, anebo suchou desulfatací při odsiřování spalin. Jedná se zejména o hnědouhelné elektrárny, kdy z plynného SO<sub>2</sub> vzniklého spalováním síry obsažené v uhlí s reakcí se sorbetem, kterým je buď CaCO<sub>3</sub> nebo CaO, vzniká CaSO<sub>4</sub>. K odsiřování dochází v zásadě buď v ohništi, nebo mimo něj. Odsiřují-li se spaliny v ohništi, přidává se sorbent k palivu a odsiřování se děje ve spalovacím prostoru. Pokud jsou spaliny odsiřovány mimo spalovací motor, bývá zpravidla aplikován polosuchý způsob, nebo mokrá – takzvaná mokrá vápencová vypírka.

Ze seznamu tepelných elektráren skupiny ČEZ, a.s. uvedených v Tab. 3 můžeme usuzovat, že nejrozšířenější metodou využívanou k odsiřování spalin, je mokrá vápencová vypírka. [15], [16]

Tab. 3: Tepelné elektrárny ČEZ, a.s. a jejich způsoby odsiřování [15]

<b>Elektrárna</b>	<b>Bloky</b>	<b>Metoda</b>
Dětmarovice	4 x 200 MW	mokrá vápencová
Hodonín	50 MW, 55 MW	fluidní spalování
Chvaletice	4 x 200 MW	mokrá vápencová
Ledvice	3 x 110 MW	2 x polosuchá metoda, 1 fluidní kotel
Mělník I	2 x 110 MW	mokrá vápencová
Mělník II	500 MW	mokrá vápencová
Počerady	5 x 200 MW	mokrá vápencová
Poříčí II	3 x 55 MW	fluidní spalování
Prunéřov I	4 x 110 MW	mokrá vápencová
Prunéřov II	5 x 210 MW	mokrá vápencová
Tisová I	2 kotle pro 3 x 57 MW + 1 x 12,8 MW	fluidní spalování
Tisová II	112 MW	mokrá vápencová
Tušimice	4 x 200 MW	mokrá vápencová

#### 1.2.1.1 Polosuchý proces

Do proudu suchých spalin se rozstříkuje vápenec v suspenzi s vodou. Voda se v procesu vypařuje a produkt je jímán v tuhé podobě. Takto zachycené sírany jsou obsaženy v největší míře ve formě hemihydrát siřičitanu vápenatého CaSO<sub>3</sub>·0,5 H<sub>2</sub>O.

V důsledku toho, že se vápence aplikuje přebytek, tak výsledný produkt obsahuje i volné vápno. [17]

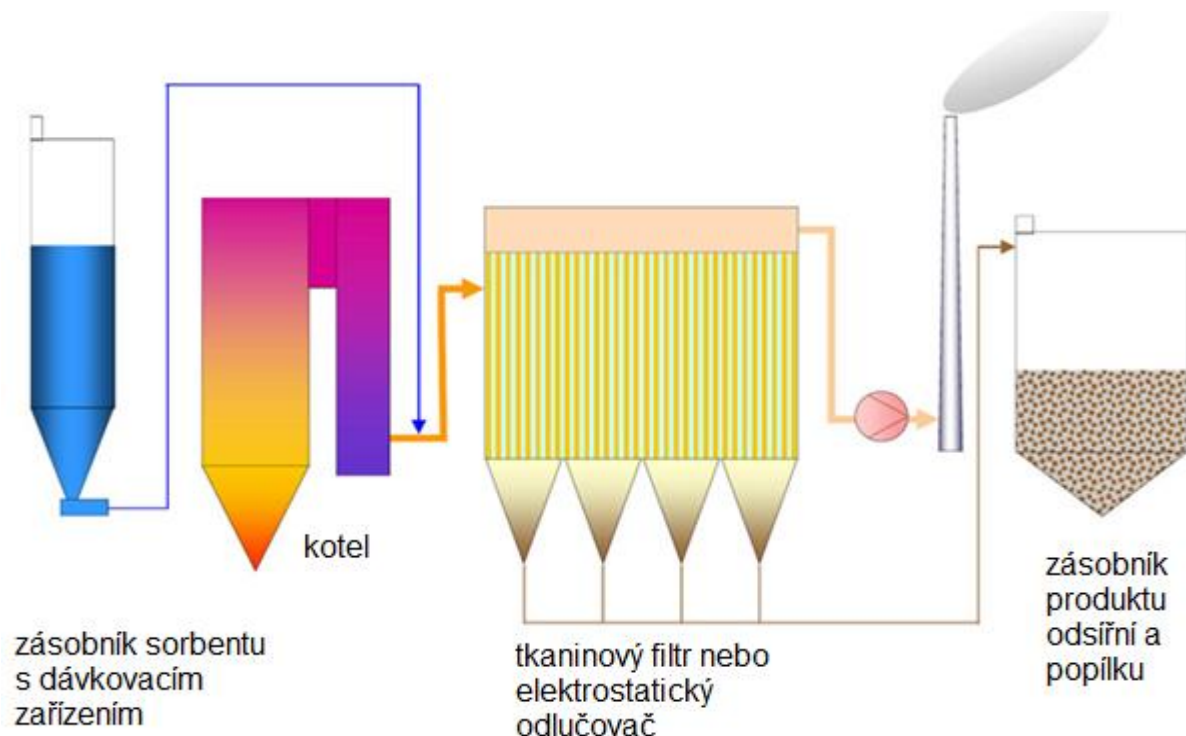
### 1.2.1.2 Suchá desulfatace



Suchou desulfatací se rozumí proces odsíření, kdy je do paliva spalovacího zařízení nebo do spalin dávkován suchý odsiřovací sorbet. Ve spalovacím zařízení nebo ve spalinách může probíhat odsiřování ve fluidním loži. Což má za následek, že vzniklý anhydrit zůstává v popelu, obsahuje hlinito-křemičitou amorfni fázi a rezidua vápna (volné vápno měkce pálené, anhydrit II, křemen, živce), které se chovají jako pucolány, což vede ke vzniku ettringitu do sedmi dnů hydratace, který málo expanduje.

U suchých metod dochází k adsorpci  $\text{SO}_2$  a  $\text{SO}_3$  na pevný povrch sorbetu (fyzikální princip) nebo chemickou reakcí. Při adsorbci se sorbent regeneruje a vrací do procesu, při absorpci se používá jemně mletý prach dmýchaný do ohniště nebo do spalin.

Jako odsiřovací sorbenty se používají  $\text{CaO}$ ,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaCO}_3 \cdot \text{Mg}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot \text{Mg}(\text{OH})_2$  [18], [19], [20]



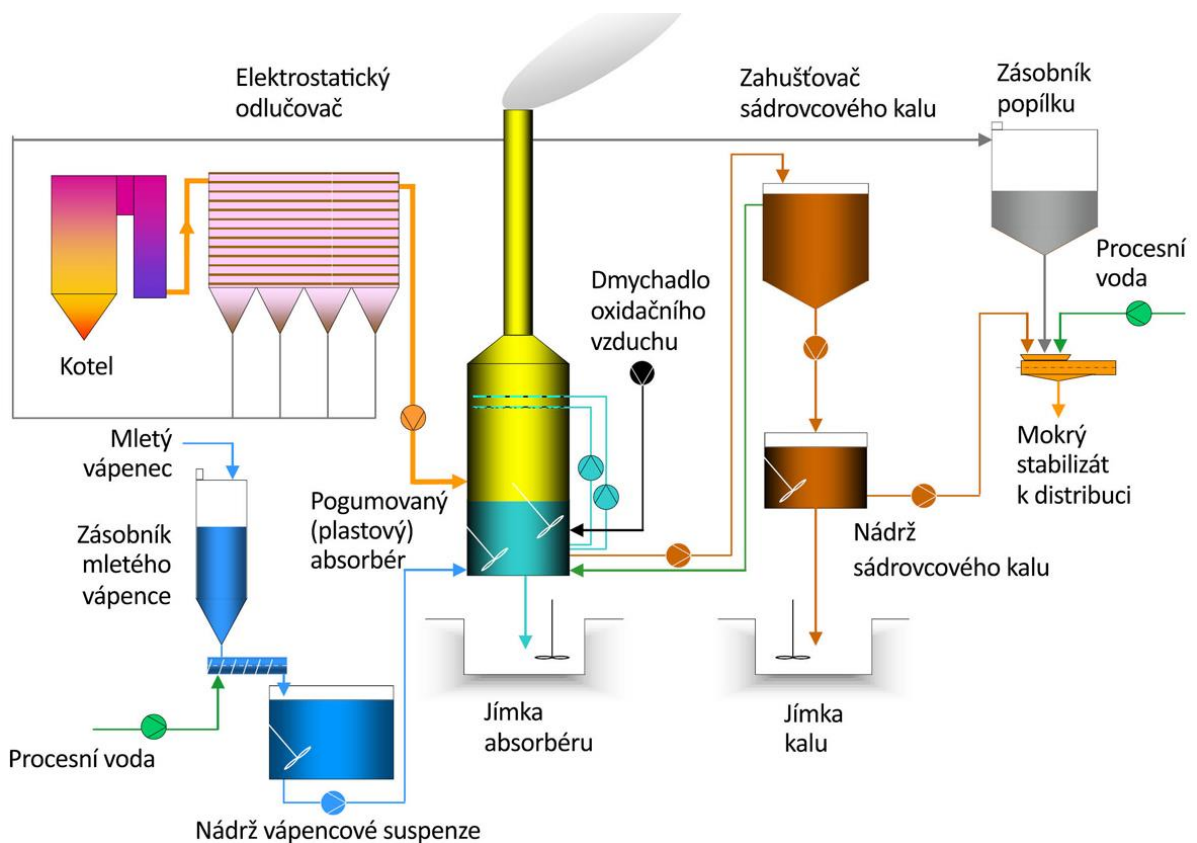
Obr. 4: Schéma suché metody odsíření [19]

### 1.2.1.3 Mokrý desulfatace

#### 1.2.1.3.1 Mokrý vápencová vypírka

Nejvíce využívaná metoda, při které vzniká energosádrovec (Japonsko a Evropa) anebo kal (USA). Natěžený vápenec o vysoké čistotě (98 %) se podrtí na kladivo-odrazovém drtiči, dále pak pomele v kulovém mlýně na maximální velikost zrna 0,09 mm. Následně se smíchá s 25 % vody, následkem čehož vznikne suspenze, která se vstříkuje do horní části absorbéru, kde dochází k chemické reakci s oxidy síry. Protiproudě působí kouřové plyny o teplotě 180 °C. Suspenze poté vstupuje do reprodukčního výměníku, dojde ke vzniku  $\text{CaSO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , který se okyslíčím postupem výměníku níž na  $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ .

U dna výměníku se nachází indikátor složení, sleduje se pH, je-li obsaženo vápno, odvede se směs zpět, dokud není produktem sádrovec. V případě, že je vyroben sádrovec, je odtahován ve formě kalu do kalolisu, z něž vychází jako syvká směs s vlhkostí 10 %, která se již nelepí na dopravní pásy.



Obr. 5: Schéma výroby energosádrovce mokrou cestou

#### 1.2.1.3.2 Mokrý magnezitová metoda

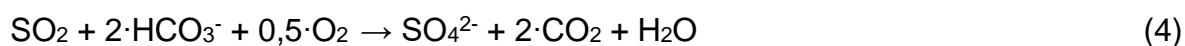
V případě magnezitové metody je jako sorbent použit MgO. Vzniklý MgSO<sub>3</sub> je po oddělení suspenze usušen a tepelně rozkládán na SO<sub>2</sub> a MgO. Spaliny po vyčištění v odlučovači popílku vstupují do předřazené vodní pračky. Zde jsou ze spalin odstraněny zbytky tuhých nečistot a pak zejména Cl a F. Po průchodu absorberem a odloučení kapek jsou spalin ohřáty a zavedeny do komína. V absorberu je ze spalin vyprán SO<sub>2</sub> do pracovní suspenze, tvořené směsí MgSO<sub>3</sub> a hydratovaného a nehydratovaného MgO. Zahuštěná suspenze je usušena v rotační peci. Suchý MgSO<sub>3</sub> je uložen do zásobníku a auty dopravován k regeneraci do chemického závodu. Regenerace je provedena žíháním buď v rotační peci, nebo ve fluidním žíhací peci. Plyn ze žíhací pece s obsahem 14 - 17 % SO<sub>2</sub> je vyčištěn, ochlazen v kotli na odpadní teplo a zpracován na kyselinu sírovou. [19]

#### 1.2.1.3.3 Mokrý čpavková metoda

Při procesu dochází k odsiřování čpavkovou vodou. Výsledný produkt síran amonný (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> je zpracováván na paletizační zařízení tak, aby byl ve formě granulí k dispozici jako hnojivo. V průmyslových zemích však existuje nadbytek tohoto hnojiva z dalších zdrojů, proto se proces využívá jen zřídka. [21], [22]

#### 1.2.1.3.4 Metoda vypírání mořskou vodou

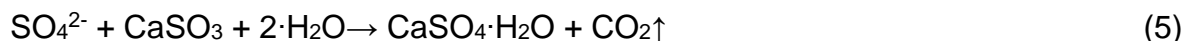
Metoda využívá vlastnosti mořské vody absorbovat a neutralizovat SO<sub>2</sub> obsažený ve spalinách. Pokud je v blízkosti elektrárny k dispozici velké množství mořské vody, použije se pravděpodobně jako chladicí médium v kondenzátorech. Následné zařazení kondenzátorů s mořskou vodou se může použít také pro odsiřování spalin.



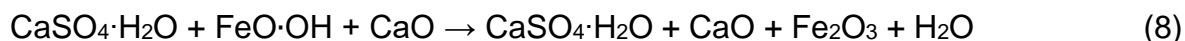
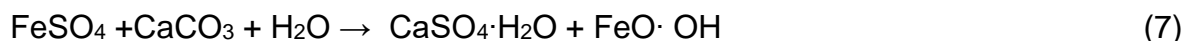
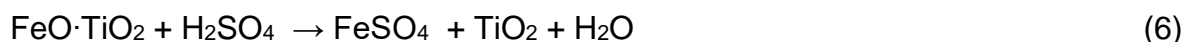
Postup mořskou vodou nezahrnuje žádné dodávání odsiřovacího sorbentu nebo odvádění pevných vedlejších produktů. Používá pouze mořskou vodu, která se již použila jako chlazení v kondenzátoru parní turbíny. [22]

### 1.2.2 Chemosádrovec

Chemosádrovec vzniká v chemických provozech, kde se vyskytují odpadní vody s obsahem  $\text{SO}_4^{2-}$ , které je nutno desulfatovat vápencem ve vodném prostředí:



Příklad průmyslu, ze kterého lze vyrobit chemosádrovec, je výroba titanové běloby:



Jedním z producentů takto vzniklého chemosádrovce v rámci hospodaření s vodami je akciová společnost Precheza Přerov. [23]

Vody s obsahem kyseliny sírové pocházejí z výroby titanové běloby  $\text{TiO}_2$ , která je hlavním výrobním artiklem Prechezy. Titanová běloba se zde vyrábí tzv. sulfátovou technologií. Surovinou pro výrobu titanové běloby sulfátovým způsobem je nerost ilmenit. Chemicky jde o směs oxidů, především titanu a železa. Technologie výroby titanové běloby sulfátovou technologií je založena na rozkladu nerostu ilmenitu kyselinou sírovou. Ilmenit se mele, suší a poté se rozkládá koncentrovanou kyselinou sírovou.

Nátoky odpadní vody jsou rozděleny do tří kategorií podle obsahu kyseliny sírové. Jsou to:

2. stupeň - slabě kyselé vody (do 15 g  $\text{H}_2\text{SO}_4$ / 1 l  $\text{H}_2\text{O}$ )

1.B stupeň - silně kyselé vody (200 g  $\text{H}_2\text{SO}_4$ / 1 l  $\text{H}_2\text{O}$ )

1.A stupeň - vyčleněné vody (nad 200 g  $\text{H}_2\text{SO}_4$ / 1 l  $\text{H}_2\text{O}$ )

Vyčleněné vody navíc oproti ostatním obsahují  $\text{TiO}_2$  z výroby v množství od 1 do 5 g/l, to způsobuje atraktivní bílou barvu vzniklého sádrovce.

Vyčleněné a silně kyselé vody jsou neutralizovány vápencovou suspenzí a posléze jsou zbylé sírany neutralizovány vápennou suspenzí. Slabě kyselé vody jsou neutralizovány vápennou suspenzí. Na přípravu suspenzí se používá filtrát z neutralizační linky, čímž se snižuje množství potřebné vody.

Síranové vody jsou na vstupu do procesu čištění akumulovány do 4 uzavřených zásobníků, které jsou pro případ havárie umístěny v suchých čerpacích jímkách. Odtud jsou z centrálního velínu distribuovány do příslušných neutralizačních reaktorů.

Vyčleněné vody jsou pro neutralizaci vápencovou suspenzí v centrifugách zbaveny vzniklého dispergovaného sádrovce. V centrifugách se sádrovec ještě promývá vodou, aby byl zbaven nezreagované kyseliny sírové. Takto získaný sádrovec, obsahující 11 až 13 % vlhkosti, je odváděn pásovým dopravníkem do dvojlodní skladovací haly, která je zároveň expedičním skladem. V této hale je zabudovaný mostový jeřáb s velkoobjemovým drapákem, který slouží jednak k přemístování sádrovce po skladovací hale, a dále pak k plnění násypek, které plní buď železniční vagóny, nebo nákladní auta.

Odstředěný matečný roztok z 1.A stupně se stává, ve smyslu výroby průmyslového sádrovce, slabě kyselou vodou a je odváděna na 2. stupeň k doneutralizování vápnem. Dochází ke vzniku  $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$ . V případě potřeby zvýšit produkci je možno vést tuto vodu přes tzv. hydrocyklóny. Toto zařízení slouží k získávání hustější části matečného roztoku, kde je obsaženo určité množství sádrovce, které prošlo přes stěny centrifugy. Tato hustější voda s obsahem sádrovce se vrací do centrifugy. Zbylá část vody, která projde hydrocyklónem, pokračuje k neutralizaci vápencem na 2. stupeň. V současné době nejsou hydrocyklóny v provozu z důvodu nízké poptávky.

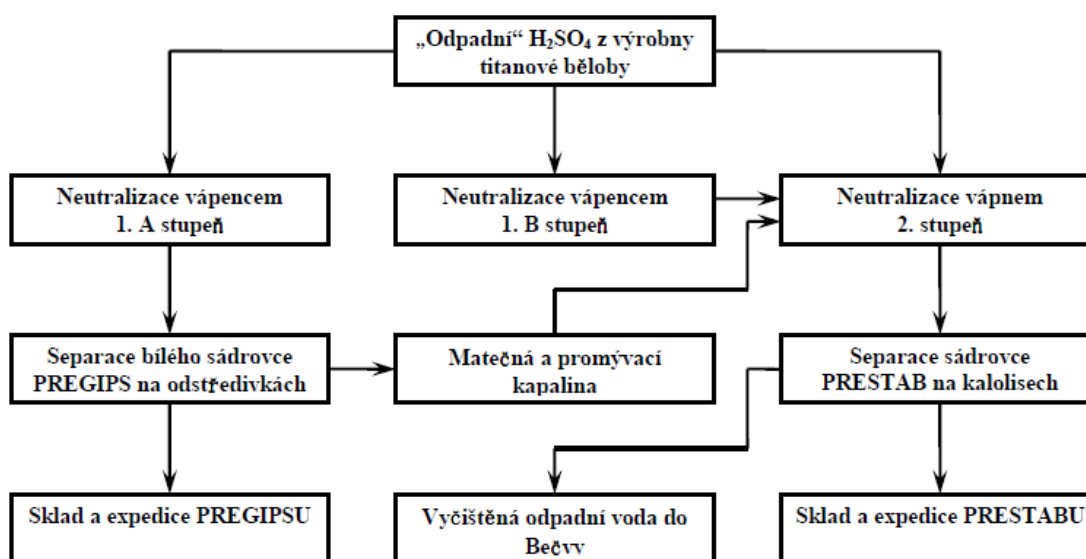
Zaměříme-li se na neutralizaci silně kyselých vod na 1. B stupni, tak se opět realizuje vápencovou suspenzí. Tato suspenze je dopravovaná na 2. stupeň, kde je spolu se slabě kyselými vodami doneutralizována vápnem. Zreagovaná suspenze z reaktoru 2. stupně se odvodňuje na kalolisech a vzniklý filtrační koláč obsahuje přibližně 50 % vody. Nevzniká zde však již bílý produkt (Pregips), ale okrově zbarvený (Prestab). Ten se skladuje v druhé lodi haly, která je obsluhována stejným způsobem jako skládka bílého Pregipsu, s tím rozdílem, že v případě nedostačující poptávky je odvážen na venkovní deponii nedaleko závodu za řekou Bečvou. Přehled základních kvalitativních údajů sádrovce Pregips je zaznamenán v Tab. 4.



Tab. 4: Přehled základních kvalitativních parametrů chemosádrovce Pregips

Parametr	Hodnota
obsah $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ v sušině	min. 95 %
pH	5 - 8
MgO rozpustný ve vodě	max. 0,1 %
$\text{Na}_2\text{O}$ rozpustný ve vodě	max. 0,06 %
$\text{Cl}^-$ rozpustný ve vodě	max. 0,01 %
Vlhkost	max. 13 %

Schéma výroby chemosádrovce je zobrazeno na Obr. 6. Vyčištěná voda z kalolisů na 2. stupni se v dosazovacích nádržích sedimentací zbavuje zbytků sádrovce, který koaguluje a sedimentuje ke dnu, kde je shrabován a odvážen na skládku. Z dosazovacích nádrží jde voda přes kontrolní měřící jímku, kde se zjišťuje, zda splňuje parametry RAS (rozpuštěné anorganické soli) a CHSK (chemická spotřeba kyslíku). Produkce síranových vod z výroby titanové běloby je v čase poměrně rozkolísaná a podle toho úměrně kolísá výroba chemosádrovce. [24]

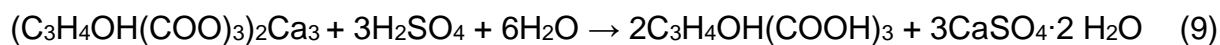


Obr. 6: Výroba chemosádrovce v Precheze Přerov

### 1.2.3 Citrosádrovec

Při výrobě kyseliny citronové vzniká rovněž sádrovec, ten je však kontaminován zbytky kyseliny citronové, berlínské modři a karborafinu.

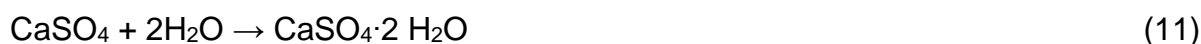
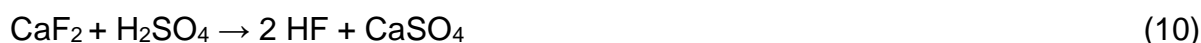
Navzdory vysoké koncentraci síranu vápenatého (až 99 % v sušině), je tuhnutí z tohoto sádrovce vyrobené sádry znečišťujícími příměsemi natolik zpomaleno a výsledné pevnosti jsou tak nízké, že je pro výrobu sádry nepoužitelný.



V České republice se vyráběl v Kaznějově, používal se jako regulátor tuhnutí.

#### 1.2.4 Fluorsádrovec

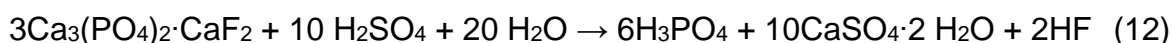
Při výrobě kyseliny fluorovodíkové rovněž vzniká sádrovec. Tento fluorsádrovec navíc obsahuje anhydrit, určité množství kazivce, organické látky a zbytky kyseliny chlorovodíkové. Používá se jako zpomalující přísada do cementu, avšak pro výrobu sádry je nevhodný. V České republice se vyrábí v Ústí nad Labem. [25]



#### 1.2.5 Fosfosádrovec

Za nejběžnější druh chemického sádrovce lze považovat fosfosádrovec produkovaný při výrobě kyseliny fosforečné a fosfátových hnojiv. Používá se tzv. extrakční proces známý již od roku 1880, který je založený na rozkladu přírodních fosforečnanů, hlavně fosforitu a apatitu, kyselinou sírovou. Proces se děje při teplotě 90 - 110 °C podle rovnic:

- z apatitu:



- z fosforitu:



Významným producentem fosfosádrovce byla Fosfa Poštorná, která v současné době již sádrovec neprodukuje, z důvodu přechodu z výroby extrakční na cestu termickou. Ale stále je k dispozici 800 000 t chemosádrovce dobré kvality uloženého v lagunách. V historii uložště byly opakovaně uskutečňovány zkoušky pro jeho využití. Prvním, poměrně významným odběratelem byla koncem minulého století firma

Łahčené stavebné hmoty Bratislava, která jej používala při výrobě panelů. Později byl tento typ sádrovce zkoušen firmami Ytong, Donau Gibs (Rakousko) a Gypstrend, avšak žádný z těchto případů nedospěl do realizačního stádia. Nejzajímavější byla snaha podnikatele z východních Čech o výstavbu sádrárny a vývoz stavební sádry do zahraničí. Tento podnikatelský záměr dospěl v devadesátých letech do stádia vybudování sociálního zázemí pro zaměstnance i prvotního nábory zaměstnanců, byl však před zahájením provozu zmařen z finančního důvodu. Hlavní surovinou pro výrobu kyseliny fosforečné je fluorapatit dovážený ze severozápadu Ruska, poloostrova Kola. Má-li sádrovec více než 1,7 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, dochází k zabránění hydratace a tvrdnutí [26]. Fosfosádra obsahuje okolo 3 % fosforu a vzniká jí cca 5 t na 1 t vyrobeného P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

Mimo jiné druhotné sádrovce vznikají při výrobě kyseliny borité, avšak obsah bóru často převyšuje 10 %, a tak se stává nebezpečným odpadem. Odsířením galvanických kapalných kalů lze také získat materiál na bázi síranu vápenatého, producentem chemosádrovce je i výroba fenolu. Všechny zmíněné druhotné suroviny nachází své uplatnění na trhu, je však důležité brát zřetel na charakter a množství nečistot (alkálie, těžké kovy), které mohou obsahovat. [27]

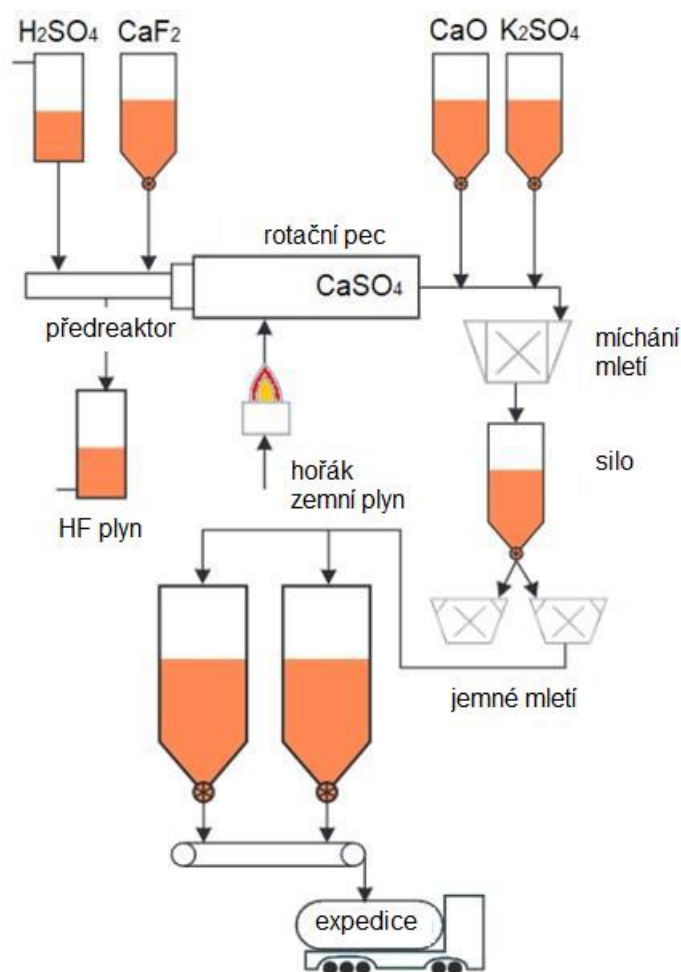
### 1.3 Syntetický anhydrit

Vzniká jako vedlejší produkt při výrobě kyseliny fluorovodíkové, HF. Výchozí surovinou je minerál fluorit, CaF<sub>2</sub>, který se v přírodě vyskytuje nejčastěji jako fialový nebo zelenomodrý nerost kazivec.



Fluorovodík se v plynné formě z minerálu uvolňuje působením koncentrované kyseliny sírové při výpalu v rotační peci na teplotu 400 až 600 °C. Dále prochází kondenzací a rozpouštěním ve vodě, dokud nevznikne kyselina fluorovodíková. Po výpalu vychází z rotační pece, dle rovnice (14), pevný vedlejší produkt syntetický anhydrit, jež má na rozdíl od termického sférické krystaly a sytější žlutou barvu. Syntetický anhydrit má obsah kyselých zbytků a prochází neutralizací, z které si odnáší jistý podíl volného CaO. Čistota CaSO<sub>4</sub> je v rozmezí 93 - 96 %. Schéma výroby je uvedeno na Obr. 7.

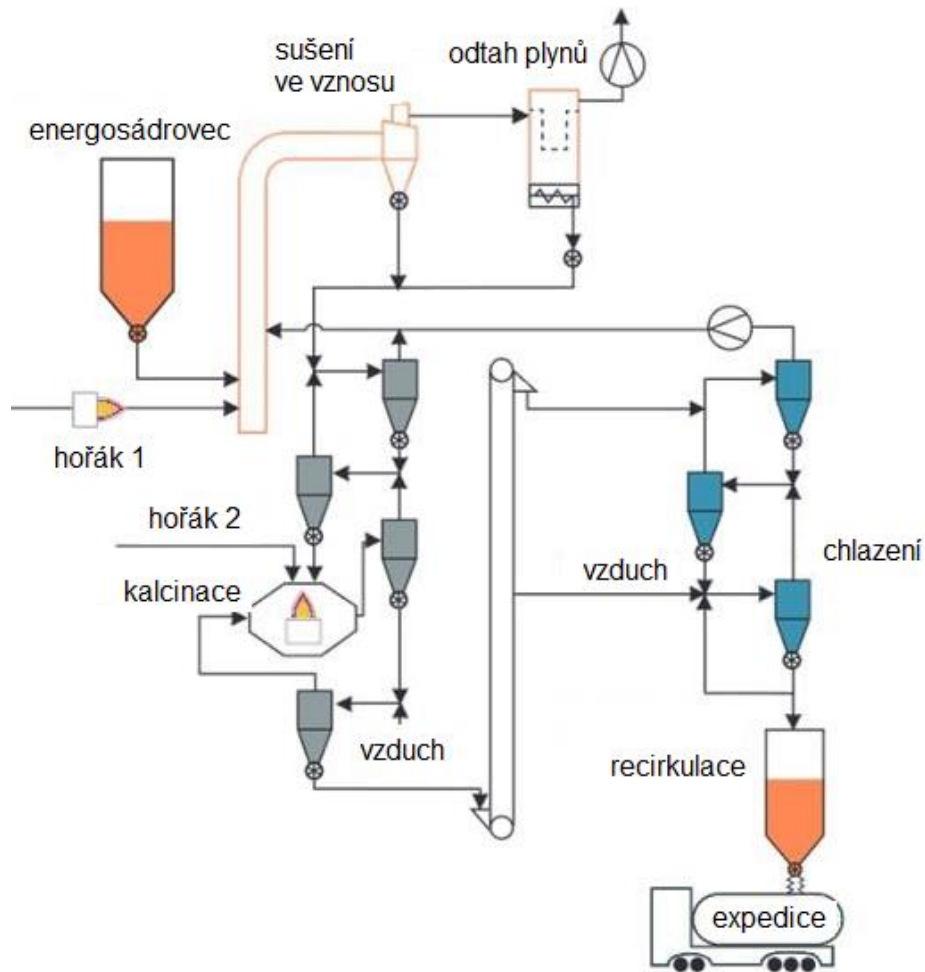
Pro přípravu anhydritové maltoviny ze syntetického anhydritu je zapotřebí vypálený anhydrit, který je potřeba dále drtit, mlít na požadovaný měrný povrch a přidat vhodný vnější budič. [24]



Obr. 7: Schéma výroby syntetického anhydritu

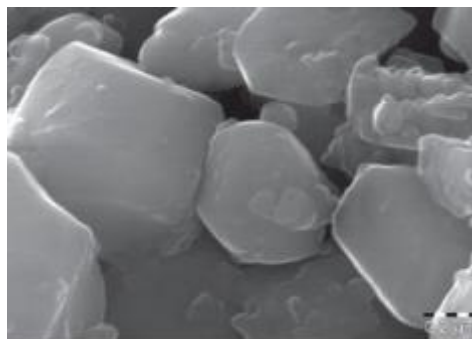
## 1.4 Termický anhydrit

Výchozí surovinou je energosádrovec, jehož krystalicky vázaná voda je při vysokoteplotní kalcinaci na teplotu  $800\text{ }^\circ\text{C}$  odstraněna. Takto je získáván ve vysoké kvalitě anhydrit II N, který je stabilní a je schopen hydratovat. Při této kalcinaci je možné z velmi čistého energosádrovce dosáhnout čistoty anhydritu 96 - 98 % s minimem volného  $\text{CaO}$ , jako zůstatek po technologii odsíření. Schéma výroby termického anhydritu viz Obr. 8



Obr. 8: Schéma výroby termického anhydritu

Pro přípravu anhydritové maltoviny se domílá s vhodným budičem a následně tato maltovina dosahuje vysokých pevností. Typicky má sametovou až nažloutlou barvu. [28]



Obr. 9: SEM snímek termického anhydritu [29]

## 2. DRUHY POJIV NA BÁZI SÍRANU VÁPENATÉHO

Síranová pojiva vznikají tepelným zpracováním základní suroviny, sádrovce  $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ . Přírodní i syntetický sádrovec je stálý do teploty  $42^\circ\text{C}$ . Zvýšením teploty od  $75$  do  $80^\circ\text{C}$  dochází k postupné dehydrataci. Tato reakce nabývá na rychlosti při teplotě, kde tenze par převyšuje atmosférický tlak. [30] Při dehydrataci nevzniká jen jeden produkt, ale soustava sloučenin, které jsou pro dané podmínky v rovnováze. Podmínkami dehydratace lze tedy upřednostnit vznik požadovaných látek. Rozptyl teplot je dán rozdílnými vlastnostmi sádrovců z různých zdrojů, vlhkostí, čistotou, způsobem drcení a mletí a rychlostí ohřevu.

Po ukončení dehydratačního procesu, při teplotě okolo  $200^\circ\text{C}$ , lze dalším postupným zahříváním na různé teploty získat rozdílné modifikace bezvodého síranu vápenatého, které se ve svých vlastnostech podstatně liší.

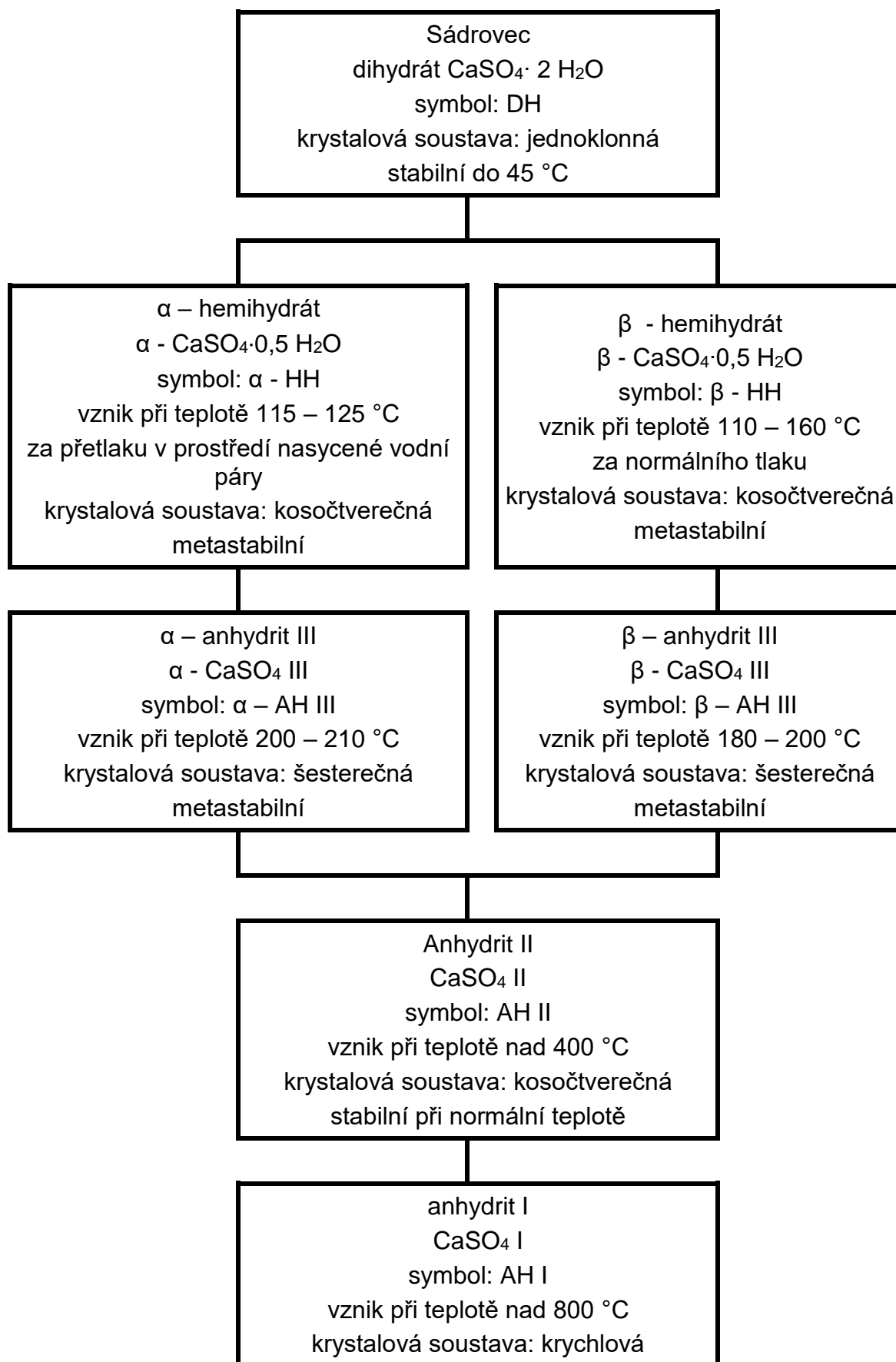
*Schéma jednotlivých druhů maltovin vznikajících tepelným rozkladem síranu vápenatého je uvedeno  
vápenatého je uvedeno*

Obr. 10.

Sádrová pojiva se řadí do skupiny vzdušných maltovin, které se vyznačují tím, že mají schopnost tuhnout a tvrdnout a být stabilní pouze na vzduchu.

Jednotlivými druhy síranových pojiv jsou:

- Rychle tuhnutí sádra v modifikacích ( $\alpha$   $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$  a  $\beta$   $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$ ).
- Anhydritové maltoviny ( $\text{CaSO}_4$  III,  $\text{CaSO}_4$  II)
- Pomalu tuhnutí sádra.



Obr. 10: Schéma jednotlivých druhů síranových maltovin vznikající tepelným rozkladem sádrovce

## 2.1 Rychle tuhnoucí sádra $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$

Rychle tuhnoucí sádra vzniká při teplotách 120 až 180 °C dehydratací sádrovce, vyskytuje se ve dvou formách, které se neliší krystalovou strukturou, avšak vlivem odlišných podmínek vzniku mají rozdílnou velikost a tvar částic, z nichž  $\alpha$ -hemihydrát je podstatně jakostnější než  $\beta$ -hemihydrát. Charakteristickou vlastností rychle tuhnoucí sádry je vysoká rychlost hydratace a nárůst pevností. Doba tuhnutí se pohybuje mezi 2 až 15 minutami. Mezi výhodné vlastnosti patří také dobrá přilnavost k běžným stavebním materiálům, příznivý poměr mezi pevností v tlaku a tahu za ohybu a tuhnutí bez trhlin. Modul pružnosti dosahuje hodnoty  $E = 2\,000$  až  $6\,000$  MPa.

Hlavní nevýhodou sádry je změna vlastností v důsledku vlhkosti prostředí. Při navlhnutí vzorku výrazně klesají pevnosti a modul pružnosti. S ohledem na tuto vlastnost je sádra vhodná pro použití v prostředí s relativní vlhkostí do 60 %.

Vhodné je použití sádry při lití do forem, kdy díky tekutosti břečky je možno odlévat i velmi složité a drobné tvary. K dokonalému vyplnění i velmi jemných detailů formy přispívá malá rozpínavost sádry během hydratace (0,5 - 1 %), čehož se využívá v keramickém průmyslu pro výrobu forem pálené krytiny, či porcelánových výrobků. Je-li bráněno deformaci při rozpínání, dochází k samovolnému zhutnění struktury a nárůstu pevností.

Tepelná vodivost sádry běžných objemových hmotností se pohybuje v hodnotách 0,25 až 0,55  $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . V protipožární technice je sádra používána při ochraně ocelových konstrukcí před požárem. Sádrový výrobek při teplotách nad 110 °C uvolňuje vázanou hydrátovou vodu za současné ztráty pevnosti. Uvolněná voda vytváří vrstvu páry, která dočasně chrání konstrukci před účinky žáru. Čím je sádrový obklad masivnější, tím déle je schopen konstrukci chránit.

Za mrazuvzdornou je sádra považována, pokud alespoň 20 % objemu pórů není vyplněno vodou.

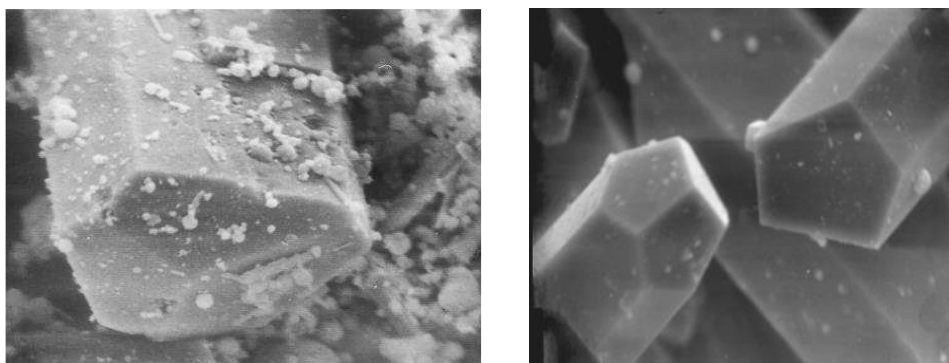
Z chemických vlastností je důležité korozivní působení sádry na kovy, zvláště ve vlhkém stavu, kdy hmota výrobku dosahuje hodnoty  $\text{pH} = 5$ . Při elektrochemické reakci dochází ke tvorbě  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  a  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  a poměrně rychlé degradaci ocelových profilů. Skvrny žluté až hnědé barvy, které rychle prostupují k povrchu, snižují estetickou hodnotu konstrukce. Ke korozi prakticky nedochází při relativní vlhkosti vzduchu do 60 % a vlhkosti výrobku do 10 %. Do konstrukcí kombinovaných



se sádrovými výrobky se proto doporučují profily hliníkové, nebo ocelové s ochranným nátěrem. [31]

### 2.1.1 $\alpha$ CaSO<sub>4</sub>·0,5 H<sub>2</sub>O

Alfa hemihydrát síranu vápenatého je meziproduktem při dehydrataci sádrovce na anhydrit. Vzniká v autoklávech či ve spodní vrstvě vařáku při zahřívání na 115 až 130°C za mírného přetlaku (0,12 - 0,13 MPa), aby nedocházelo k tzv. rozlískování, v prostředí nasycené vodní páry. Dále může vznikat za normálního tlaku a nižší teploty v roztocích některých solí. Pozitivní působení vybraných solí, zvláště chloridových anebo solí organických kyselin, např. citronové a vinné, na vznik krystalů  $\alpha$  - formy se vysvětluje snížením parciálního tlaku vodních par na povrchu zrn CaSO<sub>4</sub>·2 H<sub>2</sub>O. V podstatě tato modifikace vzniká v případě, že krystalová voda uniká ze sádrovce v podobě kapaliny. Částice jsou malé (10 - 20  $\mu$ m) a nejsou porézní. Tvar krystalků může být buď automorfní, kdy vnější tvar odpovídá vnitřnímu uspořádání (Obr. 11), a nebo hypautomorfní, který vznikne při nedodržení tlaku, tvar tušíme, ale je destruovaný. Krystalky se při přípravě kaše pomalu rozpouštějí, směs pomaleji tuhne a vzniká uspořádanější mřížka dihydrátu. Jedná se o „dentální sádra,“ jejíž pevnosti v tlaku dosahují hodnot 30 až 40 MPa, při správném ošetření může dosahovat až 60 MPa, někdy je též nazývána jako „estrich sádra“, která má uplatnění v aplikaci na podlahy. Vyznačuje se nízkým vodním součinitelem 0,3. [32]



Obr. 11:  $\alpha$ -sádra ve formě automorfních zrn hemihydrátu (vlevo) vzniklá v autoklávu (zvětšení 4000x), vzniklá v roztoku NaCl (vpravo) (zvětšení 4000x)

### 2.1.2 $\beta$ CaSO<sub>4</sub>·0,5 H<sub>2</sub>O

Beta hemihydrátu síranu vápenatého je dalším meziproduktem při dehydrataci sádrovce na anhydrit. Na rozdíl od formy  $\alpha$  CaSO<sub>4</sub>·0,5 H<sub>2</sub>O vzniká při zahřívání sádrovce za normálního tlaku při teplotě 100 až 160°C. Voda se v tomto případě uvolňuje ve formě páry, což se projeví rozlískováním a následným nakypřením (Obr. 12), jelikož zrna mají vynikající štěpnost dle roviny 010 a velmi dobrou dle roviny 111 (tvar „otevřené knihy“). Působením vyšší teploty se krystalická voda postupně uvolňuje z krystalické mřížky, ve které dochází k přestavbě. Výsledkem je produkt, který má porézní strukturu, velký měrný povrch a jsou pro něj typické poruchy v krystalové mřížce. Částice jsou velmi malé (1 - 5  $\mu$ m) s drsným povrchem. [33] Tvar krystalků je xenomorfní, což znamená, že vnější ohraničení naprosto odpovídá vnitřnímu. V praxi se jedná o běžnou stavební sádro, vyznačující se nízkou pevností okolo 10 MPa s vyšším vodním součinitelem 0,5 až 0,7.



Obr. 12:  $\beta$ -sádra ve formě silně rozlískované pseudomorfózy po sádrovci (zvětšení 4000x)

## 2.2 Anhydritové maltoviny

Anhydritové maltoviny jsou nehydraulické (vzdušné) maltoviny. Jsou vyráběny jemným semletím přírodního nebo nerozpustného anhydritu, CaSO<sub>4</sub> II, jež je některými vlastnostmi podobný strusce (špatná rozpustnost), proto je nutné přidat budiče. Je získáván vypálením sádrovce za teplot 300 až 600 °C. [6] V případě, že je připraven s nízkým vodním součinitelem, dochází k jeho pomalému tuhnutí, avšak konečné pevnosti jsou vyšší, okolo 25 MPa. Anhydritové maltoviny se co do hlavních

technologických vlastností (tuhnutí, pevnosti) přibližují portlandským cementům nižších tříd, i když jejich chemická podstata je zcela odlišná. Na rozdíl od cementů jsou však více objemově stálé a v důsledku svého chemicko-mineralogického složení jsou stejně jako všechna ostatní síranová pojiva použitelná do interiérů. Tyto maltoviny jsou nejčastěji používány na samonivelační podlahy. Anhydritové maltoviny mají měrnou hmotnost 2800 až 3000 kg.m<sup>-3</sup>, objemovou hmotnost ve stavu volně sypaného 600 až 1000 kg.m<sup>-3</sup> a ve stavu setřeseném 900 až 1500 kg.m<sup>-3</sup>. Výroba anhydritových maltovin způsobem mletí anhydritu probíhá nejčastěji v trubnatých mlýnech, pro výpal ze sádrovce lze použít různých typů pecí, provozovaných ve vápenictví či cementářství (rotační, šachtové, kruhové aj.).

### 2.2.1 CaSO<sub>4</sub> III

Vzniká dehydratací hemihydrátu ve dvou formách: α-CaSO<sub>4</sub> III za teplot 200 až 220 °C a β-CaSO<sub>4</sub> III za o něco nižších teplot 180 až 200 °C. Obě formy jsou od sebe navzájem těžce odlišitelné, mají xenomorfní strukturu a jsou metastabilní, proto je nutné anhydrit III sušit pozvolna v dozrávacích silech, aby přešel na hemihydrát.

### 2.2.2 CaSO<sub>4</sub> II

Stabilní při normální teplotě, vzniká zahříváním anhydritu III nad 200 °C. Měrná hmotnost se udává 3,1 g/cm<sup>3</sup>, tvrdost podle Mohse 2,9-3,5. Vlastnosti se velmi podobají přírodnímu anhydritu. S vodou reaguje velmi pomalu, ale tato reakce se dá urychlit přidávkem tzv. budičů - látek, které umožňují rychlou reakci pojiva s vodou. [38] Tyto budičí přísady lze rozdělit na vnější, které se přidávají k sádrovci již před výpalem, a na vnitřní, které se přidávají k anhydritu při procesu mletí a homogenizace, je nevhodné je přidávat k záměsové vodě. Dále lze tyto budiče dělit na:

- Zásadité (portlandský cement, vápno, vápenný hydrát, granulovaná vysokopeční struska, pálený dolomit, vápno), v množství do 7 %.
- Síranové (síran hlinitý, síran zinečnatý, síran draselný), dávkují se v množství do 3 %.

- Směsné (vznikají smícháním několika budičů síranových nebo zásaditých, např. směs  $ZnSO_4$  a  $K_2SO_4$ , směs portlandského cementu a  $Na_2SO_4$ ), jsou označovány za neúčinnější.

Dle stupně výpalu a reaktivity rozlišujeme:

- AH II -T těžce rozpustný anhydrit vzniklý při výpalu na 200 až 300 °C, reakce s vodou klesá s rostoucí teplotou výpalu.
- AH II – N nerozpustný anhydrit vzniklý zahřátím na 300 až 600 °C, je identický s přírodním anhydritem, s vodou reaguje neobyčejně pomalu, ale tato reakce se dá urychlit přidávkem budičů.
- AH II – E vzniká výpalem nad 600 °C, kdy se část anhydritu II rozpadá na CaO a  $SO_3$ .

V dnešní době představují anhydritové maltoviny dobrý surovinový základ pro výrobu suchých i litých anhydritových směsí, především anhydritových samonivelačních potěrů a podlah. Také se využívají k výrobě samonivelačních stěrek, malt či omítek.

Vzhledem k tomu, že se v ČR anhydrit netěží, je nutné ho dovážet. Mezi hlavní dodavatele patří Německo, které dodává výrobek pod názvem „compound“. Tento produkt obsahuje pojivovou složku spolu s přísadami (plastifikační, antisegregační, odpěňovací), budícími látkami a retardéry hydratace. Dodávaná pojiva mají deklarovanou dobu počátku tuhnutí a pevnosti v tlaku. [9]

### 2.2.3 Neznámější druhy historických maltoviny na bázi anhydritu II

Mezi dnes již historické výrobky na bázi anhydritu II patří tzv. sádroviny, které vznikaly přidávkem vnitřního budiče k rychle tuhnoucí sádře, či samotnému sádrovci s následným výpalem. Využívaly se především na vnitřní omítky a tvorbu různých ozdobných ornamentů. Byly charakterizovány vysokou pevností, poměrně nízkou pórovitostí, lesklým, tvrdým a hladkým povrchem, který bylo možné dále upravovat. [34]

- De Wyldova sádrovina – získává se výpalem sádrovce nebo opětovným výpalem sádry s příměsí vodního skla v množství 4,5 - 5 % za teploty 350 až 450 °C. [35]
- Boraxová, neboli pariánská sádrovina – byla patentována v Londýně v roce 1846. Získává se výpalem směsi síranu vápenatého a boraxu za teplot nad 600 °C. Čím víc je borax koncentrovanější, tím je proces kalcinace delší. Rozemletá se smíchá s vodou obsahující vinný kámen. Používala se pro odlitky napodobující mramor, vyznačuje se vyšší lepivostí a pórovitostí.
- Scottova sádrovina – připravuje se ze směsi síranu vápenatého a 4,5 - 5 % vápna, výpalem přes 800 °C a má vlastnosti v podstatě jako AH I. Příměs vápna nevyvíjí téměř žádné teplo, ale poskytuje maltu, která rychle a energicky tuhne. Takto vzniklá maltovina může být zpracovávána při velmi nízkých teplotách až do - 10 °C bez jakýchkoli nežádoucích účinků. [36]
- Keenův cement – někdy též označovaný jako anhydritový cement, nebo mramorový cement byl patentovaný v roce 1838 Richardem Wynn Keenem ve spolupráci s Johnem Greenwoodem v Londýně. Jedná se o sádrovinu, která se připravuje ze směsi sádrovce a kamence vypálené nad 600 °C (čím vyšší je teplota výpalu, tím tato maltovina pomaleji tuhne a dosahuje tak vyšší pevnosti). Keenova sádrovina se vyznačuje nevysokou pevností v rozmezí 20 až 35 MPa a tvrdostí blížící se mramoru, má však vysoký lesk a je odolná vůči povětrnostním vlivům. [37]

### 2.3 Pomalu tuhnoucí sádra

Toto síranové pojivo vzniká při teplotách vyšších než 800 °C. Základem je  $\text{CaSO}_4$  I (asi 80 %), který nevyžaduje budič, dále pak obsahuje reziduální množství  $\text{CaSO}_4$  II, volné  $\text{CaO}$  (2 - 3 %) a  $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$  (cca 15 %). Počátek tuhnutí nastává za 2 až 5 hodin a konec tuhnutí je zaznamenáván po 9 až 12 hodinách, ale může trvat až 40 hodin. Měrná hmotnost se uvádí 2900 až 3000  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Vodní součinitel na přípravu normální konzistence nabývá hodnot 0,25 až 0,35. Finální pevnosti jsou

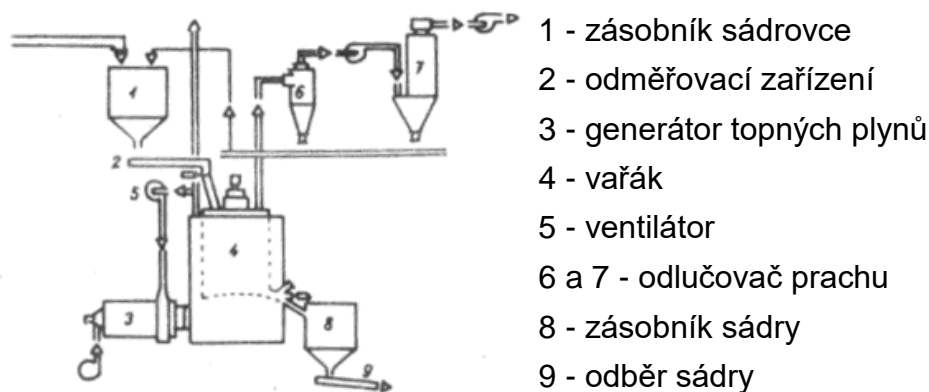
15 až 25 MPa. Jedná se o „zednickou sádro“, nejčastěji se používá jako pojivo samonivelačních podlahových směsí nebo sádrových omítek. [39]

### 3. VÝROBA SÍRANOVÝCH POJIV

#### 3.1 Výroba vařákovým způsobem

Jedním z nejstarších způsobů výroby rychle tuhnoucí sádry je její zahřívání ve vařáku. Jedná se o konstrukčně jednoduché ocelové kotle o objemu 3 až 15 m<sup>3</sup>, které jsou opatřeny míchadlem. Nevýhodou je periodický způsob výroby, avšak velkou předností je to, že se tak, zejména ve spodní části náplně vařáku, získává sádra se značným obsahem  $\alpha$  CaSO<sub>4</sub>·0,5 H<sub>2</sub>O. [66]

Postup je takový, že se sádrovec před dávkováním do vařáku vysuší a pomele. Vařák se spalinami neohřívá přímo, ale potrubím, ve kterém prochází horké plyny. Dehydratace probíhá tak, že se nejdříve sádrovec předem předeheřtý asi na 60 až 70 °C ohřívá za stálého míchání až na 130 až 150 °C, což trvá asi 20 až 30 minut. Pak nastává intenzivní dehydratace, projevující se intenzivním nakypřováním, tzv. vařením. Její ukončení se projeví sednutím náplně a dalším stoupáním její teploty. Maximální teplota by neměla přesáhnout 170 °C, protože pak začíná vznikat rozpustný anhydrit, který zhoršuje vlastnosti sádry. Doba ohřívání ve vařáku je 2,5 až 3,5 hodiny. [2]



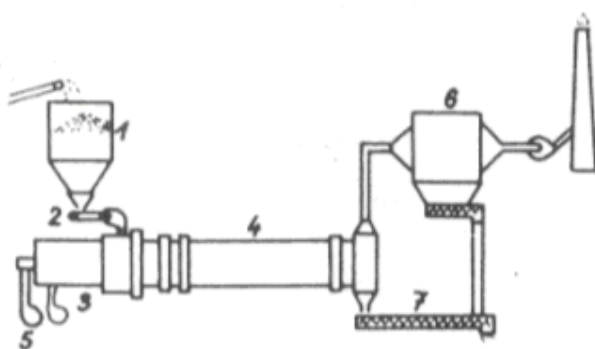
Obr. 13: Výpal sádry ve vařákové peci firmy Pfeiffer

### 3.2 Výroba v sušící rotační peci

Ke kalcinaci sádrovce může také docházet v sušících rotačních pecích, v nichž se surovina mele a současně kalcinuje procházejícím teplým vzduchem o teplotě 600 až 700 °C přiváděným z topeniště. [38]

Dalším způsobem kalcinace je v rotačních pecích, kde se výpal může provádět buď souproutně nebo protiproudě. Při souproutném postupu přicházejí do pece spaliny o teplotě asi 900 °C a při odchodu mají teplotu 160 až 180 °C. Při protiproudním postupu je nutno teplotu spalin přívodem vzduchu snížit na 600 až 700 °C. Z rotační pece odcházejí spaliny, které pak mají nižší teplotu asi 100 °C. K topení lze použít jak tuhá, tak i kapalná nebo plynná paliva. Rotační pec má průměr 2 m a délku asi 12 m, otáčejí se rychlostí 1,5 otáček za minutu. Doba průchodu suroviny pecí trvá jen 20 min, proto se má prodlužovat buď zařazením vestavby nebo změnou rychlosti otáčení nebo sklonu pece. Jedná se o nejpoužívanější způsob výroby hemihydrátu síranu vápenatého.

Vypálená sádra se mele a uskladňuje za teploty asi 100 °C, kde „dozrává“. V podstatě jde o přeměnu zbylého sádrovce a vzniklého rozpustného anhydritu na půlhydrát. [38]



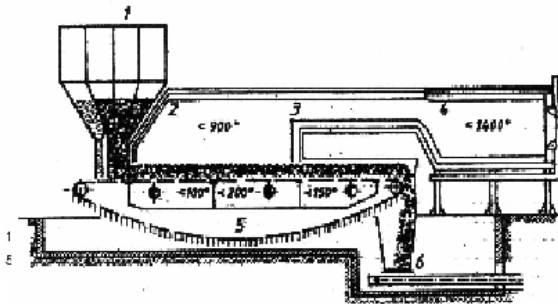
Obr. 14: Rotačkový kalcinátor firmy Bütner-Schilde-Haas

- 1- zásobník suroviny
- 2 - podavač
- 3 - generátor topných plynů
- 4 - rotačkový kalcinátor
- 5 - ventilátor pro obíhající ohřívající plyny
- 6 - zachycovač prachu
- 7 - odvod sádry

### 3.3 Výroba na roštu

Výpalem sádrovce na roštu A.N. Knaufa získáváme pouze beta modifikaci hemihydrát síranu vápenatého. Surovina, která je nejprve roztríděna podle frakcí, je

následně vsypávána na rošt. Spaliny přiváděné ze spalovací komory o teplotě až 900 °C, jsou odtahovány exhaustory skrz rošt. Tento způsob výroby je zcela kontinuální a dobře regulovatelný rychlostí posunu roštu a výkonem exhaustorů. [39], [40]

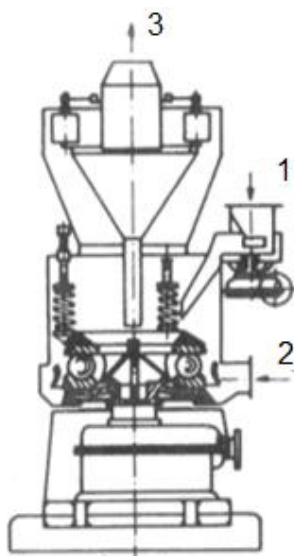


- 1 - zásobník materiálu
- 2 - zóna výpalu
- 3 - sací kanál
- 4 - spalovací komora
- 5 - rošt
- 6 - hřeblový dopravník

Obr. 15: Rošt A. N. Knaufa

### 3.4 Výroba v sušícím mlýně

Hlavní součástí tohoto systému je kolový mlýn, do něž je současně přiváděna surovina a horké spaliny. Tyto mlýny vypalují na nízkou teplotu (300 až 400 °C) nebo na vysokou teplotu (500 až 700 °C). Hotová sádra je vznosem unášena do cyklónu. Tato zařízení jsou z pravidla instalována ve dvojici pro dva druhy výpalu. Jsou aplikována především ve výrobnách rychlovažné sádry při výrobě sádrokartonu. [40]



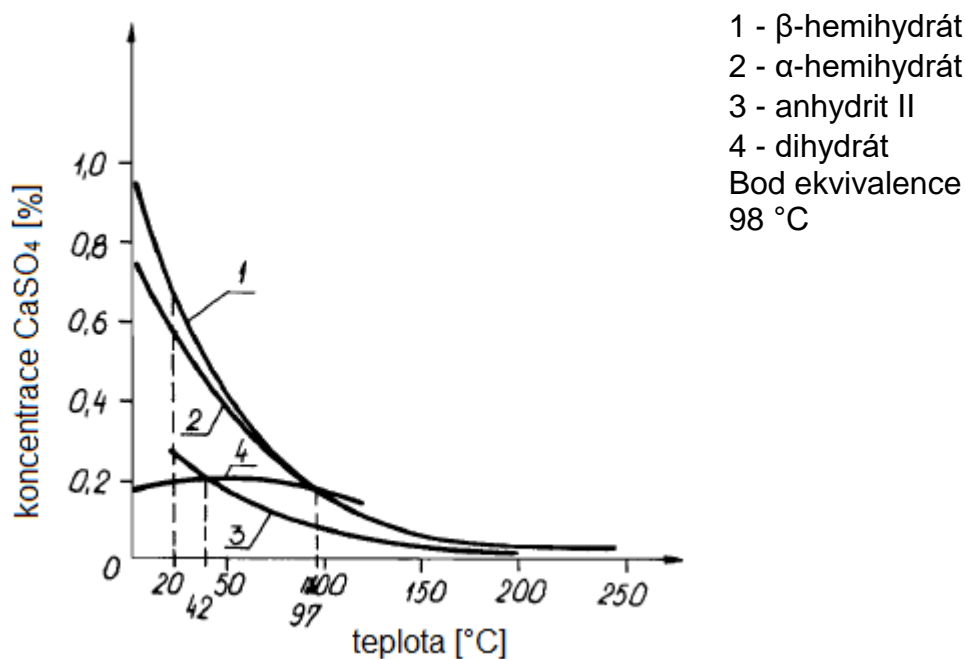
- 1 - přívod sádrovce
- 2 - přívod horkého plynu
- 3 - odvádění hotového výrobku

Obr. 16: Sušící mlýn

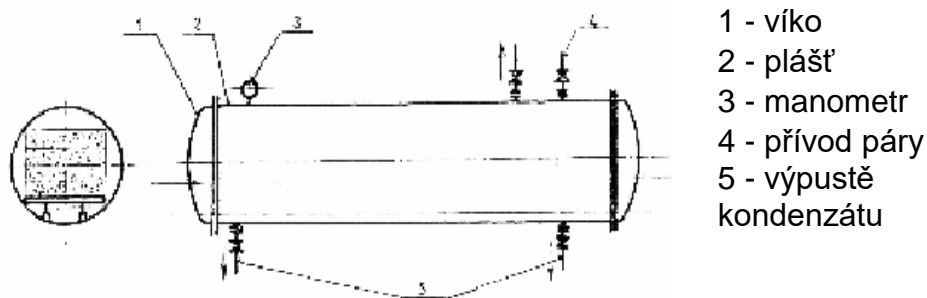


### 3.5 Výroba v autoklávu

Autokláv je dodnes jediným průmyslově využívaným zařízením na výrobu alfa sádry (Obr. 18). Výroba  $\alpha$  půlhydrátu probíhá v autoklávech za zvýšené teploty a tlaku. Do pece z nerezové oceli, která může být buď vertikální, nebo horizontální, je přiváděna perforovanou trubicí ostrá pára, která je přehřívána nad 100 °C. Sádrovec se do této pece vkládá v podobě cihel, za přídavku mineralizátoru (kyselina citronová, kyselina jantarová), který na povrchu zrna vytváří další přítlak, jež zamezuje úniku páry, voda pak odchází v kapalně formě. Dehydratace, jak již bylo zmíněno při tomto způsobu výroby, je realizována ostrou párou. Po otevření autoklávu a poklesu tlaku se s teplotou nesmí klesnout pod bod ekvivalence, jinak by hemihydrát opět přešel na dihydrát (Obr. 17). Z tohoto důvodu se i při přenosu do sušárny nesmí klesnout pod 98 °C, při opětovném vysušení takto vzniklého dihydrátu by rapidně poklesla kvalita. Vzniklý kondenzát je proto z autoklávu odváděn odkalovacími ventily. Touto metodou vzniklá sádra o vysoké čistotě až 98 %.



Obr. 17: Graf rozpustnosti síranu vápenatého ve vodě v závislosti na teplotě



- 1 - víko
- 2 - plášť
- 3 - manometr
- 4 - přívod páry
- 5 - výpustě kondenzátu

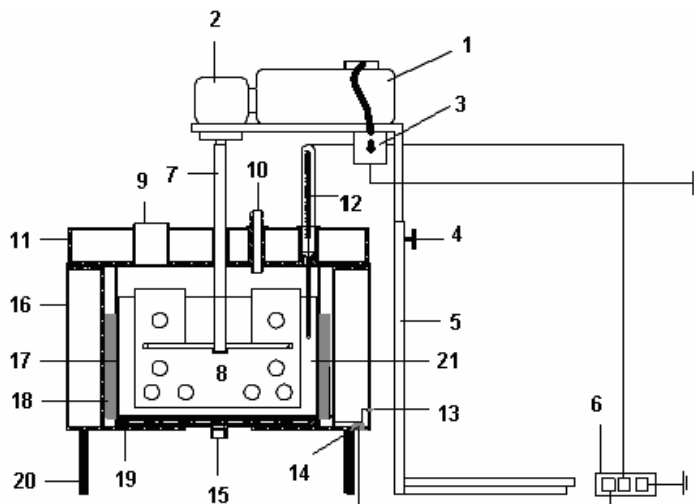
Obr. 18: Autokláv

### 3.6 Výpal ve vzosu

K tomuto způsobu výroby dochází při fluidním výpalu, kdy se surovina vypaluje přímo v plamenu hořáku, který lze nastavit na několik druhů výpalu, čímž lze během krátké doby připravit různé druhy sáder. Mezi přednosti tohoto způsobu výroby řadíme nízkou poruchovost, velkou energetickou účinnost, kontinuální výrobu a nízké nároky na počet pracovníků. [41]

### 3.7 Krystalizace v roztoku solí

Dalším možným způsobem je beztlaká výroba v roztoku solí (nejčastěji chloridy). Aby docházelo ke vzniku přesných krystalů, je nutné, aby voda ze sádrovce odcházela v kapalně formě, čehož dosáhneme roztokem solí, který vře při nižší teplotě. Bod varu se nyní posune na teplotu 104 až 106 °C. Proces probíhá v tzv. „dehydrátoru“, což je nádoba s dvojitým pláštěm, opatřená míchadlem, které pro větší intenzitu udržuje suspenzi ve vzosu. V meziplášti se nachází topná spirála. Pro udržení teploty a koncentrace roztoku je dehydrátor opatřen víkem. Nevýhodou tohoto systému je vodní hospodářství, jelikož po vykrytí otvorů v perforovaném dně dochází k promývání vroucí vodou, které se opakuje pětkrát. Naopak výhodou je nepotřeba autoklávu pro vytvoření tlaku. [42], [43]



Obr. 19: Schéma kontinuálního dehydrátoru [44]

- 1 - el. motor
- 2 - převodovka
- 5 - stojan
- 6 - spínač topného tělesa
- 7 - hnací hřídel
- 8 - lopatka
- 9 - otvor pro odběr vzorku
- 10 - přívodná trubice vařící vody
- 11, 16 - plášť vnitřní, vnější
- 12 - teploměr
- 15 - propustka pro odsávání
- 17 - dehydratační nádoba
- 18 - el. přímotopné těleso
- 19 - filtrační dno
- 21 - vnitřní koš

## 4. NORMATIVNÍ POŽADAVKY NA VLASTNOSTI SÍRANOVÝCH POJIV

### 4.1 Normativní požadavky na sádrová pojiva

#### 4.1.1 Požadavky ČSN 72 2301

Norma ČSN 72 2301: Sádrová pojiva. Klasifikace. Všeobecné technické požadavky., s platností od 1. 7. 1980 určuje tři základní vlastnosti sádrových pojiv (pevnost v tlaku, počátek a dobu tuhnutí sádrové kaše normální konzistence a jemnost mletí).

Vhodný vodní součinitel se zjišťuje pomocí zkoušky kaše normální konzistence, jejíž podstatou je zjištění potřebného množství vody na přípravu tekuté sádrové kaše, která bude mít hodnotu rozlití  $180 \pm 5$  mm. Tato zkouška se provádí pomocí Vicatova prstence, který se naplní tekutou sádrovou kaší a v určený čas se zdvihne. Následně se změří dva na sebe navzájem kolmé průměry „rozlitého koláče“.

Pevnost v tlaku se určuje na normových trámčích o rozměru 40 x 40 x 160 mm a dělí se do 12 kategorií, viz Tab. 5, kde číslo u každé pevnostní třídy udává nejmenší pevnost v MPa po dvou hodinách zrání.

Tab. 5: Normativní dělení sádrových pojiv dle pevnosti v tlaku

třída pojiva	pevnost v tlaku [N·mm <sup>-2</sup> ]	třída pojiva	pevnost v tlaku [N·mm <sup>-2</sup> ]
G - 2	2	G - 10	10
G - 3	3	G - 13	13
G - 4	4	G - 16	16
G - 5	5	G - 19	19
G - 6	6	G - 22	22
G - 7	7	G - 25	25

Počátek a doba tuhnutí sádrové kaše normální konzistence se zjišťuje pomocí Vicatova přístroje, jehož nástavec je tvořen jehlou o průmětu  $1,1 \pm 0,02$  mm a délky 50 mm. Norma charakterizuje počátek tuhnutí jako čas od vsypání sádry do vody po okamžik, kdy se hrot jehly poprvé nedotkne podložky. Dobu tuhnutí jako dobu dokud se jehla nevryje hlouběji jak 1 mm pod povrch zkoušeného vzorku. Norma rozlišuje tři kategorie viz Tab. 6.

Tab. 6: Normativní dělení sádrových pojiv dle rychlosti tuhnutí

druh pojiva	označení doby tuhnutí	počátek tuhnutí [min]	doba tuhnutí [min]
rychle tuhnoucí	A	2	15
normálně tuhnoucí	B	6	30
pomalou tuhnoucí	C	20	-

Jemnost mletí se určuje jako zůstatek na síť p velikosti otvorů 0,2 mm. Množství je vyjádřeno v procentech hmotnosti prosívané navážky. Norma rozlišuje 3 kategorie, viz Tab. 7.

Tab. 7: Normativní dělení sádrových pojiv dle jemnosti mletí [37]

druh pojiva	označení jemnosti mletí	Zbytek na síť o velikosti otvoru 0,2 mm [%]
hrubě mleté	I	30
středně mleté	II	15
jemně mleté	III	2

Podle ČSN 72 2301 “Stavební sádra rychle tuhnoucí” se rozděluje u nás sádra do tří tříd. Každá třída má splňovat určité podmínky, které lze vyjádřit následnými fyzikálními a chemickými vlastnostmi:

Tab. 8: Požadované fyzikální a chemické vlastnosti rychle tuhnoucí sádry [37]

<b>vlastnosti</b>	<b>třída</b>		
<b>jemnost mletí</b>	I	II	III
největší přípustný zbytek na síť o velikosti			
1,25 [mm]	0	2	3
0,63 [mm]	1	nepředepisuje se	
0,2 [mm]	10	20	25
<b>tuhnutí</b>			
počátek [min]	7	5	4
doba [min]	9 až 25	8 až 25	6 až 25
<b>pevnost</b>			
nejmenší průměrná pevnost v ohybu [MPa]			
po 1 hodině	1,8	1,3	1
po vysušení	3,5	3,2	2
nejmenší průměrná pevnost v tlaku [MPa]			
po 1 hodině	3	2,3	2
po vysušení	8,5	6,5	4,5
<b>chemické složení</b>			
minimální obsah SO <sub>3</sub> v %	45	25	35
maximální obsah vlhkosti v %	2	2	2

K uvedeným normou předepsaným hodnotám je třeba ještě uvést, že měrná hmotnost rychle tuhnoucí sádry je větší než u sádrovce a to 2,60 až 2,75 g·cm<sup>-3</sup>. Objemová hmotnost této sádry ve volně sypaném stavu je 800 až 1100 kgm<sup>-3</sup> a v setřeseném stavu 1250 až 1450 kg·m<sup>-3</sup>.

Množství vody potřebné k přípravě sádrové kaše určité konzistence závisí na mnoha činitelích:

- Sádry obsahující αCaSO<sub>4</sub>·0,5 H<sub>2</sub>O (35 až 45 % hmotnostních) vyžadují méně vody než βCaSO<sub>4</sub>·0,5 H<sub>2</sub>O (50 až 70 % hmotnostních).
- Vyrobené sádry uložené dva až tři dny v suchém prostředí potřebují při zpracování méně vody než sádry čerstvé nebo delší dobu skladované. Lze to vysvětlit tím, že nestabilní anhydridy se přemění na půlhydrát a že se na povrchu sádrových částic vytvoří slabé sádrovcové povlaky, které zpomalují

reakcí dalších vrstev sádry s vodou. To má přímý vliv i na zpomalení tuhnutí sádry a zvýšení pevností sádrových výrobků.

- Také teplota kaše má vliv na potřebné množství přidávané vody. Všeobecně se uvádí, že při vyšší teplotě vzniká více krystalizačních zárodků a sádra rychleji tuhne. Částečně tomu lze zabránit větším přídatkem vody, a to hned při začátku přípravy kaše. Přidávání vody do kaše, která již začala houstnout a tuhnout, je již bezpředmětné.
- Pro požadovanou konzistenci sádrové kaše potřebné množství vody lze účinně zmenšovat optimálním přídatkem vhodných plastifikátorů a zpomalovačů tuhnutí.
- Při praktickém použití sádry se také vodní součinitel bude měnit dle způsobu zpracování.

Navlhavost sádrových výrobků je poměrně malá, avšak má velmi nepříznivý vliv na jejich pevnosti, modul pružnosti a na trvalou deformaci. Z tohoto důvodu se stále hledají možnosti zlepšení odolnosti sádrových výrobků proti působení vody a vlhkosti. Řeší se to buď výrobou speciálních sádrových maltovin, přídatkem výplní do sádrových kaší nebo výrobou dílců co nejhutnějších, přídatkem hydrofobních látek nebo dodatečnou impregnací nebo povrchovou úpravou nátěrem nebo nalepením fólií.

Z pravidla velmi vítanou vlastností sádry je její rozpínání při tuhnutí. To umožňuje dokonalé vyplnění forem včetně vykopírování všech detailů. To má význam pro výrobu architektonických dílců a různých ozdob, forem.

Někdy se v praxi využívá i toho, že sádrové hmoty mají zejména při přídatku expandovaného perlitu nebo dřívě azbestu poměrně malou tepelnou vodivost a že dehydratace sádrovce je reakcí endotermní a probíhá pomalu. To umožňuje ochranu ocelových konstrukcí obložených vhodně tvarovanými sádrovými výrobky proti ohni.

#### **4.1.2 Požadavky ČSN EN 13279**

Dalšími normativními předpisy pro sádrová pojiva jsou: norma ČSN EN 13279-1: Sádrová pojiva a sádrové malty pro vnitřní omítky - Část 1: Definice a požadavky, s platností od 1. 4. 2009 a ČSN EN 13279-2: Sádrová pojiva a sádrové malty pro vnitřní omítky - Část 2: Zkušební metody s platností od 1. 7. 2014.

Tab. 9: Druhy sádrových pojiv a malt [45]

<b>značení</b>	<b>symbol</b>
<b>sádrová pojiva</b>	A
sádrové pojivo pro přímé použití nebo další procesy (suché práškové výrobky)	A1
sádrové pojivo pro přímé použití na stavbě	A2
sádrové pojivo pro další procesy (sádrové tvárnice, atd.)	A3
<b>sádrová pojiva pro vnitřní omítky</b>	B
<b>sádrová malta pro speciální použití</b>	C

Dle této normy lze ke stanovení vhodného vodního součinitele použít syponou metodu, disperzní metodu, nebo metodu střešovacího stolku. Princip disperzní metody vychází ze zkoušky kaše normální konzistence, ovšem hodnota rozlití má dosahovat hodnot 150 - 210 mm.

Pevnost v tlaku a v tahu za ohybu se opět určuje na normových trámčích o rozměrech (40 x 40 x 160) mm.

Počátek a doba tuhnutí se zjišťuje pomocí Vicatova přístroje, kde se používá kuželový nástavec. Počátek tuhnutí definuje výše zmíněná norma jako čas od vsypání sádrového pojiva do vody po dobu, kdy se hrot Vicatova kužele zastaví  $22 \pm 2$  mm nad podložkou. Podmínky na dobu tuhnutí zůstávají stejné. Další možností určení počátku tuhnutí je nožová metoda.

Jemnost mletí se dle této normy určuje jako zůstatek na třech sítích o velikosti 5, 0,2 a 0,1 mm.

## 4.2 Normativní požadavky na anhydritové maltoviny

Normativní požadavky na anhydritové síranové maltoviny jsou určeny následujícími normami:

- ČSN EN 74 45 05: Podlaha - společná ustanovení.
- ČSN EN 13813: Potěrové materiály a podlahové potěry - Potěrové materiály - Vlastnosti a požadavky.
- ČSN EN 13454-1: Pojiva, kompozitní pojiva a průmyslově vyráběné maltové směsi pro podlahové potěry ze síranu vápenatého - Část 2: Zkušební metody.

- ČSN EN 13982-1: Zkušební metody potěrových materiálů - Část 1: Odběr vzorků, zhotovení a ošetřování zkušebních těles.

- ČSN EN 13982-2: Zkušební metody potěrových materiálů - Část 2: Stanovení pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku

#### 4.2.1 Normativní požadavky dle ČSN EN 13454-1

Základní dělení anhydritových maltovin rozlišuje druh pojiv a průmyslově vyráběných maltových směsí:

- pojivo ze síranu vápenatého – CAB,
- kompozitní pojivo ze síranu vápenatého – CAC,
- průmyslově vyráběné maltové směsi – CA.

##### 4.2.1.1 Normativní požadavky na CAB a CAC

Kompozitní pojiva CAB se od kompozitních pojiv CAC liší především obsahem síranu vápenatého ( $\text{CaSO}_4$ ). Pro pojiva CAB platí, že obsah síranu vápenatého musí být větší nebo roven 85 %. U kompozitních pojiv CAC je pak obsah síranu vápenatého minimálně 50 %, maximálně 84 %. Hodnota pH u obou pojiv musí být větší nebo rovna 7. Počátek tuhnutí nesmí nastat dříve než po 30 minutách a konec tuhnutí pak musí trvat méně než 12 hodin. Smrštění a rozpínání se musí pohybovat v rozmezí  $\pm 2$  mm/m. [46]

Tab. 10: Pevnosti pojiv CAB a CAC uvedené jako charakteristické hodnoty [46]

Pevnostní třída	Min. pevnost v tahu za ohybu [MPa]		Min. pevnost v tahu za ohybu [MPa]	
	3 dny	28 dní	3 dny	28 dní
20	1,5	4,0	8,0	20,0
30	2,0	5,0	12,0	30,0
40	2,5	6,0	16,0	40,0



#### 4.2.1.2 Normativní požadavky na CA

Konzistence průmyslově vyráběných potěrových materiálů se uvádí v mm. Podle hodnoty rozlití rozlišujeme 3 typy maltových směsí:

- Tekuté maltové směsi - rozlití větší nebo rovno 220 mm, směs se nesmí odměšovat (bez zřetelné sedimentace, bez zřetelného vrsvení).

- Plastické maltové směsi - hodnota rozlití musí být v intervalu (150 až 220) mm.

- Zavlhle maltové směsi - hodnota rozlití musí být v intervalu (110 až 140) mm, označení zalvlhá maltová směs v norě ČSN EN 13454-1, odpovídá označení tuhá maltová směs v ČSN EN 13545-2.

Hodnota pH průmyslově vyráběných maltových směsí musí být větší nebo rovna 7. Minimální doba zpracovatelnosti pro tekuté, plastické i zavhlé směsi je 30 minut, přičemž doba zpracovatelnosti předem průmyslově umíchaných směsí se počítá od okamžiku přidávání vody do maltové směsi. [46]

Výroba a dodávka průmyslově vyráběných směsí:

- Předem dávkované - suché; průmyslové dávkování složek, aplikace na stavbě řízená pokyny výrobce.

- Předem průmyslově mísené - suché; aplikace na staveništi zamícháním s vodou.

- Předem průmyslově umíchané - vlhké; dodávka na staveništi, přímo k užití.

Pevnostní charakteristiky dané normou jsou uvedeny v následujících Tab. 11, Tab. 12.

Tab. 11: Pevnostní třídy průmyslově vyráběných směsí CA podle pevnosti v tlaku

Třída	C5	C7	C12	C16	C20	C25	C30	C35	C40	C50	C60	C80
Pevnost v tlaku [MPa]	5	7	12	16	20	25	30	35	40	50	60	80

Pozn.: Tabulka je v souladu s ČEN EN 13813. Pro síran vápenatý jsou třídy C12 a C60 doporučené.

Tab. 12: Pevnostní třídy průmyslově vyráběných maltových směsí CA podle pevnosti v tahu za ohybu

Třída	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F10	F15	F20	F30	F40	F50
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	1	2	3	4	5	6	7	10	15	20	30	40	50

Pozn.: Tabulka je v souladu s ČEN EN 13813. Pro síran vápenatý jsou třídy F3 a F20 doporučené

Kromě výše uvedeného musí průmyslově vyráběné maltové směsi vyhovovat také požadavkům na reakci na oheň, uvolňování nebezpečných látek, propustnost vodní páry, kročejovou neprůzvučnost, tepelnou odolnost či odolnost proti chemickým vlivům. Vzhledem k tomu, že se síranové potěry nepoužívají jako povrchová vrstva, není provádění zkoušky proti chemickým vlivům nutné. Pro posouzení požadavků slouží norma ČSN EN 13813.

Základními normovými zkouškami jsou:

- Stanovení pH.
- Konzistence rozlité (tekuté maltové směsi), s použitím střešacího stolku (tuhé maltové směsi).
- Stanovení pevnosti v tahu za ohybu, v tlaku.
- Smrštění a rozpínání.

Přehled požadavků na pojiva a průmyslově vyráběné maltové směsi viz Tab. 13.

Tab. 13: Požadavky na pojiva a průmyslově vyráběné maltové směsi

Vlastnosti	Zkušební předpis	Požadovaná hodnota
<b>Pojiva</b>		
Obsah CaSO <sub>4</sub>	ČSN EN 13454-2	CAC ≥ 85 % hmot. CAB ≥ 50 a < 85 % hmot.
pH	ČSN EN 13454-2	≥ 7
Tuhnutí	ČSN EN 13454-2 (postup dle ČSN EN 196-3)	počátek ≥ 30 min konec ≤ 12 hod
Pevnosti	ČSN EN 13454-2 (postup dle ČSN EN 196-1)	viz Tab. 11, Tab. 12
Smršťování a rozpínání	ČSN EN 13454-2	± 0,2 mm
Reakce na oheň	ČSN EN 13501-1	musí být provedena v případě obsahu organických látek > 1 %
<b>Průmyslově vyráběné maltové směsi</b>		
Reakce na oheň	ČSN EN 13501-1	musí být provedena v případě obsahu organických látek > 1 %
Propustnost vodní páry	ČSN EN 12086	v případě použití v podmínkách případné difúze vlhkosti
Kročejevá neprůzvučnost	ČSN EN ISO 140-6	provádí se, pokud je požadováno
Tepelná odolnost	ČSN EN 13813	-
pH	ČSN EN 13454-2	≥ 7
Konzistence	ČSN EN 13454-2	tekutá maltová směs ≥ 220 mm plastická maltová směs (150 - 220) mm zavhlá maltová směs (110 - 140) mm
Doba zpracovatelnosti	ČSN EN 13454-2	≥ 30 min
Pevnost	ČSN EN 13892-2 (postup dle 13454-2)	viz Tab. 14
Smršťování a rozpínání	ČSN EN 13454-2	± 0,2 mm

Tab. 14: Charakteristické a mezní hodnoty pevností v tahu za ohybu a v tlaku pro maltové směsi ze síranu vápenatého

Pevnostní třída	Pevnost v tahu za ohybu [N·mm <sup>2</sup> ]				Pevnost v tlaku [N·mm <sup>2</sup> ]			
	Stáří vzorku [dny]				Stáří vzorku [dny]			
	3		28		3		28	
	Charakt. hodnota	Mezní hodnota	Charakt. hodnota	Mezní hodnota	Charakt. hodnota	Mezní hodnota	Charakt. hodnota	Mezní hodnota
20	1,5	1,0	4,0	3,5	8,0	5,5	20,0	17,5
30	2,0	1,5	5,0	4,5	12,0	9,5	30,0	27,5
40	2,5	2,0	6,0	5,5	16,0	13,5	40,0	37,5

## 5. HYDRATACE SÁDROVÝCH POJIV

### 5.1 Hydratace sádry

Sádra jako pojivo vyniká po rozdělání s vodou relativně rychlým nárůstem pevností. Rychle tuhnoucí sádra obsahuje především hemihydráty obou modifikací a přítomny mohou být také rozpustné anhydridy.

Procesy probíhající při tuhnutí a tvrdnutí rychle tuhnoucí sádry studoval již v roce 1887 Le Chatelier. Experimentálně zjistil, že po smíchání sádry s vodou dochází k rozpouštění  $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$ , ke vzniku nasyceného roztoku a k následující přeměně  $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$  na  $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ . Protože rozpustnost  $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$  přepočtena na  $\text{CaSO}_4$  činí asi 8 g a rozpustnost  $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$  jen asi 2 g v 1 litru, musí se při této přeměně roztok stát přesyceným. Proto se z něho začnou vylučovat krystalky  $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ . Koncentrace  $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$  přitom v roztoku klesá, takže další jeho množství se může zase rozpouštět a proces může pokračovat. Přitom krystalky vytvořeného sádrovce rostou, proplétají se a srůstají. [47]

Dle A. A. Bzikota je možno tuhnutí a tvrdnutí sádry rozdělit do tří period.

V první periodě probíhá smáčení a rozpouštění  $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$  ve vodě až vznikne jeho nasycený roztok.

V druhé části procesu, která začíná téměř současně s první, dochází vlivem vzniku dispersních krystalických částic ke tvorbě gelovité koloidní masy.

Obě periody trvají pouze několik minut. Potom dochází k přeměně rozpustného jemně krystalického sádrovce na málo rozpustný, hrubě krystalický sádrovec.

Tuto úvahu lze dobře fyzikálně zdůvodnit. Malé krystalky jsou totiž nestálé a přeměňují se na krystalky větší, termodynamicky stabilnější s menší povrchovou energií.

Později se však začaly proti této teorii hromadit vážné námitky. Jelikož ní se nedá vysvětlit závislost rychlosti tuhnutí a tvrdnutí sádry na teplotě a vliv silných a slabých elektrolytů, které působí jako urychlovače nebo zpomalovače tuhnutí.

Stručně lze změny mechanických vlastností sádrových výrobků vysvětlit následovně:

Po rozdělání sádry s vodou dochází nejdříve k pomalému a pak k rychlému tuhnutí sádry. Tento proces je poměrně krátký a odpovídá periodě tvorby tuhé struktury kostry. Pak se pevnosti sádrových výrobků zvětšují. Po 20 až 40 minutách se dosáhne největší pevnosti. Následně pevnost poněkud poklesne, jelikož k překrystalování sádrovce dojde, až je přeměněn veškerý půlhydrát. Teprve pak následuje rychlé zvětšení pevnosti sádrových tělísek.

Pro urychlení rozpouštění půlhydrátu je nutno zvětšit jeho jemnost, aby se zvětšil jeho měrný povrch. Proces se také urychlí promícháním směsi sádry a vody, protože se tím zmenší tloušťka difúzní vrstvy. Dále pak lze zvětšit koeficient difúze pomocí látek zvětšujících viskozitu (dextrin, glycerin).

Proces krystalizace můžeme rozdělit do dvou stádií. První je charakterizováno tvorbou krystalizačních zárodků a druhé jejich růstem.

Čím větší je přesycení roztoku půlhydrátu, tím rychleji se krystalizační zárodky vytvářejí. Vznikají-li krystalizační zárodky příliš rychle, jsou velmi malé, nejsou stabilní a časem se zase rozpadají.

Krystalizační zárodky při tvrdnutí sádrových maltovin je možné také vytvářet přídavkem pomletého sádrovce nebo i jemného křemenného písku či vápence.

Rychlost vzniku krystalků závisí na přesycení a na rozměrech samotného krystalku, na který se ukládají postupně další monomolekulární vrstvy.

Další zvětšení pevnosti sádrových výrobků lze docílit ještě jejich vysušením. To lze vysvětlit další hydratací a odpařením vody. Přitom z vodného, mezi krystaly

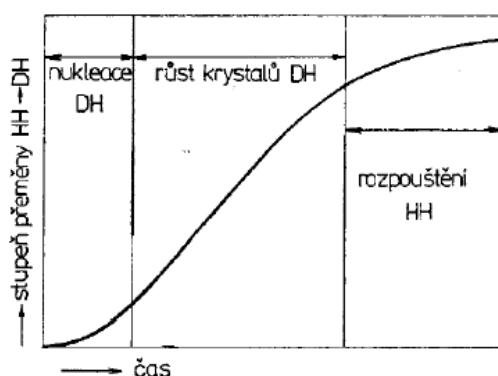
uloženého, síranového roztoku vzniká další sádrovec spojující dále jednotlivé již existující krystaly mezi sebou. Mimoto po odpaření vody nedochází tak snadno k vzájemnému posunu krystalů jako při její přítomnosti. [2], [48]

Podle fyzikální teorie se proces hydratace člení do tří period.

Vlivem lokálních přesycení roztoku hemihydrátem se začnou tvořit zárodky dihydrátu. Tento proces je pomalý, avšak lze jej urychlit přidáním krystalizačních jader v podobě mletého sádrovce nebo vápence. Tato perioda se nazývá indukční.

Druhá perioda je označována jako hlavní. Hemihydrát je hydratován a dochází k vývinu krystalů dihydrátu, tyto krystaly se vzájemně prorůstají, proplétají a srůstají. Tvoří se molekulární vazby a směs se stává tuhou látkou. Část sádrovce zůstává až do konce přítomna ve formě gelu a na konec zaplní případné vzniklé mezery.

Poslední perioda se nazývá rekrystalizační. Zde dochází k transportu vody dovnitř hemihydrátových zrn. Dochází k takzvané vnitřní rekrystalizaci. Tento proces je pomalý, lze jej urychlit zvýšením teploty.



Obr. 20: Průběh hydratace ve vodní suspenzi

## 5.2 Hydratace anhydritu

Rozemletý anhydrit se naváže na vodu, tím dochází k přeměně na sádrovec za současného tuhnutí a tvrdnutí. Hydratace a tuhnutí pojiva je pomalé, částečné.



Hydratace anhydritu je možné urychlit látkami, které mají v tomto směru katalytický účinek pozitivního charakteru. Těmto látkám říkáme katalyzátory tuhnutí a tvrdnutí anhydritového pojiva, jedná se o tzv. budící (aktivační) přísady. Budiče nejen urychlují zatuhnutí pojiva, ale i znamenitě přispívají k mechanickému zpevnění zatvrdlého pojiva. [49]

Přehled typů budičů a jejich dávkování je uveden v Tab. 15.

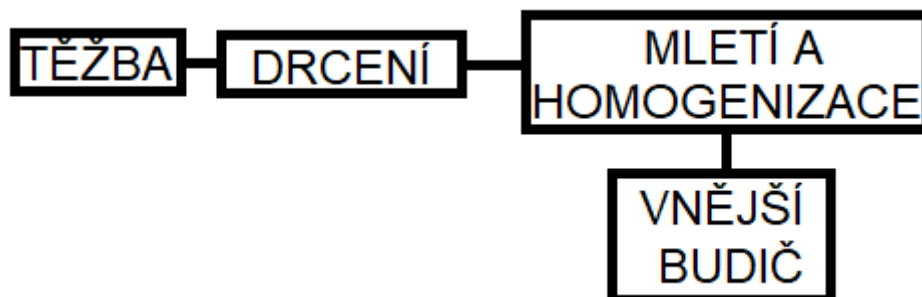
Tab. 15: Budiče pro anhydritové pojivo

Budič		Množství
Zásaditý	portlandský cement vápenný hydrát vysokopeční struska	≤ 7 %
Síranový	síran hlinitý síran zinečnatý síran draselný	< 3 %
Směsné	zásaditosíranový	5 % (z toho nejvýše 3 % sulfátu)

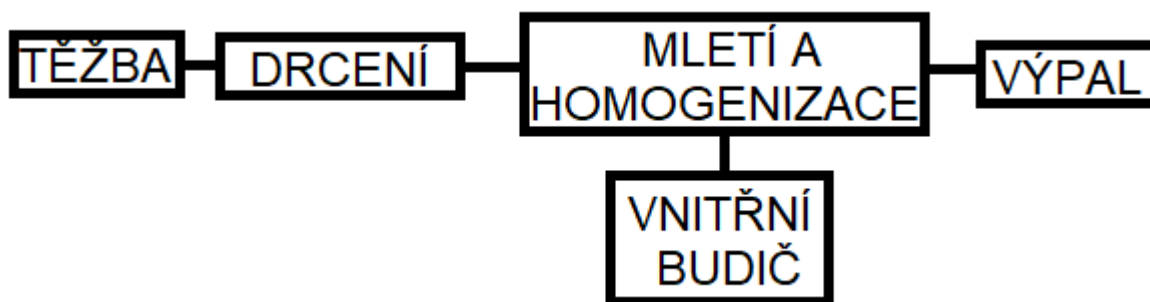
System přidávání budičů k anhydritové maltovině:

- Vnější budiče - přidávají se k anhydritové maltovině a homogenizují se s ní (Obr. 21).

- Vnitřní budiče - přidávají se k sádrovci, ze kterého se výpalem stává anhydritová maltovina. (Obr. 22)



Obr. 21: Schéma systému přidávání vnějšího budiče



Obr. 22: Schéma systému přidávání vnitřního budiče

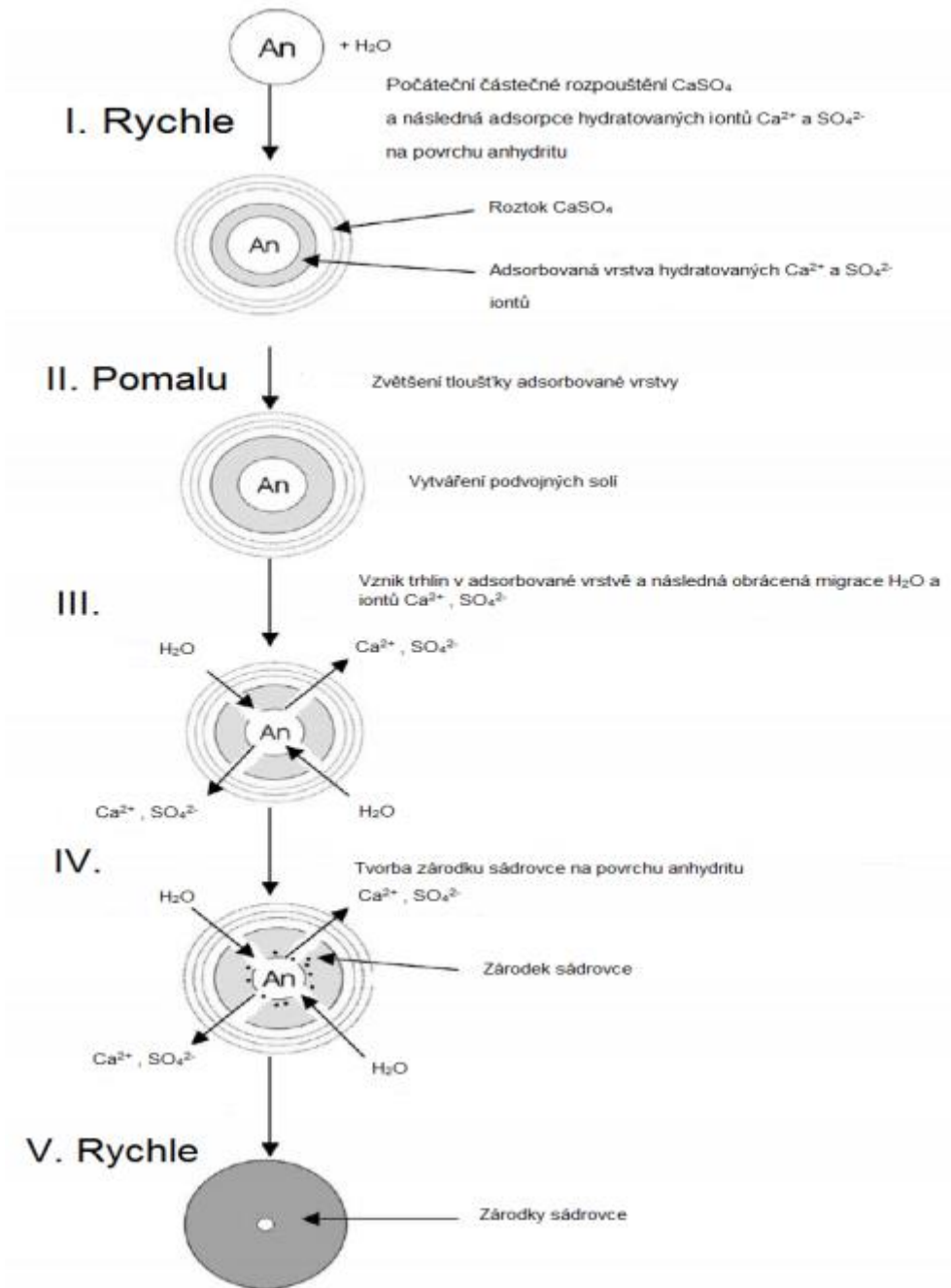
Hydratační kinetika anhydritu závisí na teplotě přípravy, způsobu mechanické aktivace semletím a povaze vnějších kationtů jakožto chemických aktivátorů (budičů). V přítomnosti budičů se změní chování roztoku. Budiče také mohou zpomalovat odpařování vody v důsledku snížení tlaku vodní páry.

Výsledek absorpce, postupu absorbované vody a vznik krystalů se mění v přítomnosti budiče. Změní se čas pro vytvoření maximálního měrného povrchu a maximálního množství vzniklých krystalů sádrovce v hydratujícím anhydritu.

Ionty v hydratujícím roztoku se rychle absorbují na povrchu anhydritu a to způsobí zvětšující se měrný povrch v průběhu času.  $\text{Ca}^{2+}$  a  $\text{SO}_4^{2-}$  ionty mají tendenci se dostat dovnitř roztoku, přičemž molekuly vody mají tendenci reagovat s čerstvě vzniklým povrchem na zrna anhydritu. Jakmile tloušťka adsorbované vrstvy dosáhne určité meze, vytvoří se trhliny. Molekuly vody se dostávají do těchto trhlin, a tak přicházejí tyto molekuly do kontaktu s čerstvě vzniklým povrchem na zrna anhydritu. Zárodek sádrovce je vytvořen, je-li k dispozici dostatečné množství  $\text{Ca}^{2+}$  a  $\text{SO}_4^{2-}$  iontů a vody na povrchu. Jestliže je poloměr zárodka větší než kritická velikost vrstvy, začne krystalizační proces probíhat rychlejším tempem.

Po zformování krystalů se vytvoří silně pórovitý tlak, který umožní další rozpouštění anhydritu, který se nachází ve stavu přesyceného roztoku. Při dalším rozpouštění na rozhraní mezi ještě nerozpuštěným anhydritem a vnější vrstvou, kterou tvoří zárodky krystalů sádrovce, dochází ke zmenšování zrna anhydritu a zvětšování zárodka sádrovce. K úplné přeměně zrna anhydritu na sádrovec nedojde. Vždy zůstane část jádra nepřeměněna a k další hydrataci dochází jen velmi obtížně. Celý mechanismus je zobrazen na Obr. 23. [14], [50]





Obr. 23: Schéma hydratace anhydritu II na sádrovec

Anhydritová maltovina je velmi citlivá na přídavek vody. Teoretická spotřeba pro úplnou reakci činí 26,4 g vody na 100 g anhydritu (vodní součinitel  $w = 0,264$ ). Podle zkušeností však stačí 20 g vody na 100 g anhydritu (vodní součinitel  $w = 0,2$ ). [6]

Přidáme-li k anhydritové maltovině určitý budič, nastává posílení hydratace a s tím spojený rychlejší růst krystalů sádrovce. Na povrchu sádrovce se formují podvojně soli.

Tyto soli se formují ve vysokých koncentracích jako koloidní částice. Jakmile se roztok stane přesyceným, začínají se vytvářet nukleační centra a následně se tvoří krystalizační zárodky sádrovce. Nestabilní podvojně soli se rozkládají na ionty charakteristické pro daný budič, tyto ionty následně na sebe vážou molekuly vody k zrnům hydratujícího anhydritu. [51]

## 6. MODIFIKAČNÍ PŘÍSADY

Pro zabezpečení dobrých pevností sádrových výrobků se musí sádrová kaše zpracovat před začátkem jejího tuhnutí. Proto se k sádře přidávají buď již při jejím mletí, nebo až při úpravě kaše. Přidávají se obvykle zpomalovače tuhnutí, jakou jsou kyselina citronová, klíh, kreatin nebo melasa. Tyto přísady mohou zásadně ovlivnit pevnosti zatvrdlé sádry z důvodu změny tvar krystalů dihydrátu z tenkých a dlouhých na krátké a destičkovité. Další z modifikovaných vlastností může být i zlepšení odolnosti vůči působení vody. [52]

Dle mechanismu působení regulátorů je lze rozdělit do pěti skupin (Ratinov). [53]

1. skupina: silné a slabé elektrolyty, neelektrolyty, které mění rozpustnost půlhydrátu i dihydrátu, ale nevytvářejí na jejich částicích špatně rozpustné filmy. Některé z nich zvětšují rozpustnost a urychlují tuhnutí (NaCl, KCl, NaSO<sub>4</sub>), jiné způsobují zpomalení tuhnutí (NH<sub>3</sub>, etylalkohol).

2. skupina: látky vytvářející krystalizační zárodky (sádrovec), vyznačují se urychlováním tuhnutí sádry. Výhradně jako urychlovače působí přísady jemně mletého sádrovce, křemenného písku, vápence, CaHPO<sub>4</sub>. Od určité meze se již přídavek látky neprojeví vyšším účinkem. Tuto hranici nazýváme mezí použitelnosti.

3. skupina: látky povrchově aktivní, schopné adsorpce na povrchu půlhydrátu i sádrovce, které zpomalují tvorbu krystalizačních zárodků (zpomalovače vápnoklihovalé, ze sulfidových výluhů, které současně působí jako ztekucovače)

4. skupina: látky vytvářející na částicích půlhydrátu ochranné, špatně rozpustné filmy (fosforečnany a boritany alkalických kovů)

5. skupina: přípravky obsahující směs látek z některých uvedených skupin (elektrolyty a látky povrchově aktivní), z počátku způsobují tuhnutí a urychlení hydratace

Uvedené rozdělení není zcela jednoznačné, avšak postačuje pro představu o účinku regulátorů, který závisí na vlastnostech sádry.

Všechny regulátory tuhnutí se mají dobře rozpouštět ve vodě, mají být účinné i při malém přídavku, nemají při uložení podléhat zkáze, nemají nepříznivě působit na osoby a s nimi pracující, nemají ztěžovat odformování výrobků a zhoršovat čištění forem. Mimoto nemají při optimálním přidaném množství zhoršovat ostatní vlastnosti sádrových výrobků, jako je jejich pevnost, odolnosti proti nárazu.

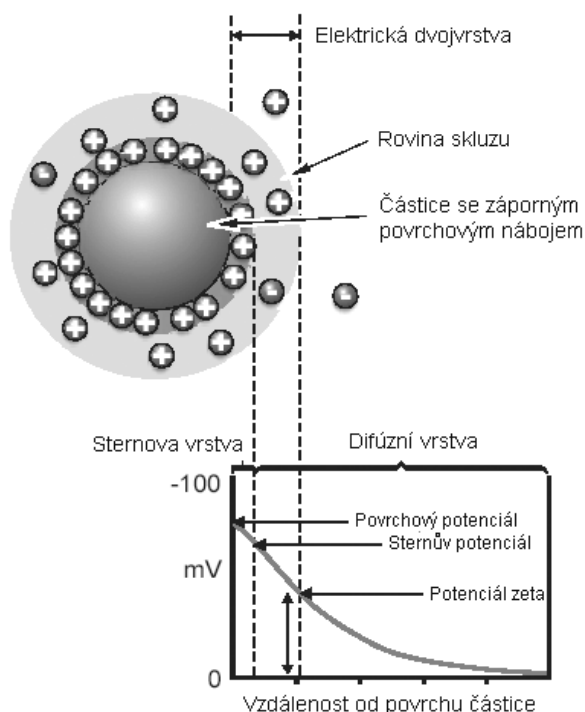
## 7. ZETA POTENCIÁL

Na povrchu částic se v důsledku různých fyzikálně chemických dějů vytváří náboj. Tento náboj vyvolává přísun částic roztoku s opačným nábojem. Tyto pak následně vytvoří silně vázanou vrstvu, která se nazývá „Sternova vrstva“, na jejímž povrchu se vyskytuje „Sternův potenciál“. Tato vrstva není schopna odstínit celý povrchový náboj, a proto se za ní nachází stejně nabitě ionty, které jsou vázány slabšími silami a tvoří spolu se Sternovou vrstvou dvojbal. Povrch tohoto obalu se nazývá rovina skluzu a připadá jí zbytkový potenciál částic, které neodstínilo pevně vázané protiionty. Tento potenciál se nazývá zeta potenciál, nebo také elektrokinetický potenciál. Je jediným skutečně efektivním potenciálem vůči prostředí (Obr. 24).

Jeho hodnoty se pohybují od -70 mV do +70 mV a znaménko je opačné, než je náboj vnitřní části dvojvrstvy. Obecně platí, že čím je hodnota nižší, tím je suspenze stabilnější. Částice se navzájem odpuzují. Jako hraniční hodnota stability je + nebo - 30 mV. Rozmezí -15 mV až +15 mV naznačuje, že systém je nestabilní a dochází k aglomeracím.

Na základě těchto poznatků lze konstatovat, že aby byla ztekucující látka účinná na základě odpudivých sil, měla by zeta potenciál částic zvýšit v absolutní hodnotě aspoň  $\pm 30$  mV.

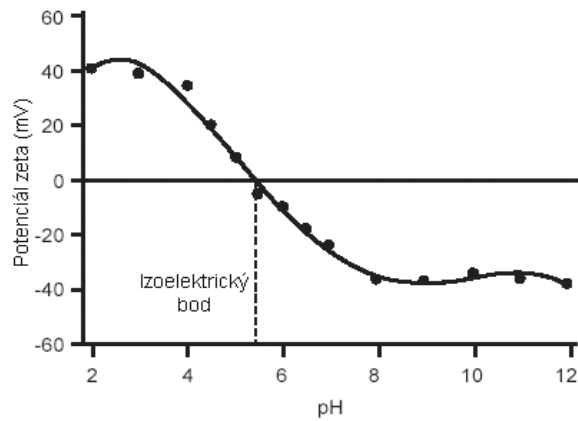
Měření zeta potenciálu je možné například na základě poznatků elektroforetické pohyblivosti (transport částic v elektrickém poli). [54], [55]



Obr. 24: Zeta potenciál

Nejdůležitější faktor, který ovlivňuje zeta potenciál, je pH. Existuje-li v suspenzi částice se záporným potenciálem zeta, přidáním alkálie se docílí zápornějšího náboje této částice. Postupným přidáváním kyseliny k této suspenzi je dosaženo neutralizace záporného náboje a následného vytvoření náboje kladného. Křivka potenciálu zeta proti pH je kladná při nízkém pH a nižší nebo záporná při vysokém pH (Obr. 25).

Izoelektrický bod odpovídá nulovému zeta potenciálu. Je to okamžik, kdy je koloidní systém nejméně stabilní. [56]



Obr. 25: Závislost potenciálu zeta na pH

Velikost zeta potenciálu lze vypočítat:

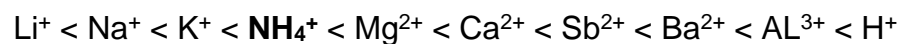
$$\xi = 4 \cdot \pi \cdot e \cdot d \cdot \varepsilon^{-1} \quad (16)$$

e - náboj jádra micely [C]

d - tloušťka difúzní dvojvrstvy, kde působí přitažlivé síly micely (tloušťka lyosféry) [m]

$\varepsilon$  - permitivita disperzního prostředí (vody) [F·m<sup>-1</sup>]

Ztekucování suspenzí se řídí tzv. Hofmeisterovou lyotropní řadou:



vzrůstá	←	tloušťka lyosféry	→	klesá
vzrůstá	←	elektrokinetický zeta potenciál	→	klesá
roste	←	litelnost suspenze	→	klesá
klesá	←	viskozita suspence $\eta$	→	roste

## 7.1 Elektrokinetické efekty

Důsledkem existence elektrických nábojů na povrchu částic je, že pod vlivem aplikovaného elektrického pole vykazují elektrokinetické efekty.

### 7.1.1 Elektroforéza

Jedná se o pohyb nabitě částice ve vztahu ke kapalině, ve které je suspendována.

Je-li na elektrolyt aplikováno elektrické pole, částice suspendované v elektrolytu jsou přitahované směrem k elektrodě s opačným nábojem. Viskózní síly, působící na částice, mají sklon bránit tomuto pohybu. Dosáhne-li se rovnovážného stavu mezi těmito dvěma protichůdnými silami, částice se pohybují konstantní rychlostí. Rychlost částice, nebo-li elektroforetická pohyblivost je závislá na:

- síle elektrického pole nebo gradientu napětí
- dielektrické konstantě média
- viskozitě média
- zeta potenciálu

Aplikováním Henryovy rovnice lze získat zeta potenciál částice

$$U_E = \frac{2\varepsilon z f(ka)}{3\eta} \quad (17)$$

$z$  - zeta potenciál

$U_E$  - elektroforetická pohyblivost

$\varepsilon$  - dielektrická konstanta

$\eta$  - viskozita

$f(ka)$  - Henryova funkce

### 7.1.2 Elektroosmóza

Jedná se o pohyb kapaliny ve vztahu ke stacionárnímu nabitému povrchu.

### 7.1.3 Potenciál proudění

Elektrické pole, generované, je-li kapalina přinucena proudit kolem stacionárního pole.

### 7.1.4 Sedimentační potenciál

Elektrické pole, generované, pohybují-li se nabitě částice ve vztahu ke stacionární kapalně.

## 8. POUŽITÍ SÁDROVÝCH POJIV

V současnosti má sádra ve stavebnictví široké uplatnění, lze ji použít na omítky a stěrky, dále pak jako řada sádrokartonových a sádrovláknitých systémů, suché sádrokartonové podhledy a stropy, samonivelační podlahy, akustické a designové příčky, předsazené a šachtové stěny.

### 8.1 Sádrová pojiva a sádrové malty

Jedná se o práškové výrobky určené pro stavební účely, jejichž základem je sádrové pojivo. Řídí se normou ČSN EN 13279-1: Sádrová pojiva a sádrové malty pro vnitřní omítky - Část 1: Definice a požadavky. Jedná se o malty a především omítky určené pro vnitřní užití. Sádrové omítky jsou především vhodné na podklady s jimi podobnými vlastnostmi. Názorným příkladem pro použití sádrových omítek může být např. zdivo z pórobetonu, které má přibližně stejný difúzní odpor jako sádrová omítka, takže ta nevytváří žádnou bariéru vysychání zdiva, které je u tohoto typu zdícího materiálu předpokladem jeho správné funkce ve stavební konstrukci, neboť obvykle bývá zabudován do stavby s vlhkostí cca 30 %, ale optimálních vlastností dosahuje při vlhkosti cca 5 %. Podle druhu podkladu se sádrové omítky dělí do tří kategorií, odpovídajících v podstatě rovinnosti podkladu:

- sádrová omítka v tloušťce cca 15 mm pro cihelné zdivo se nejčastěji aplikuje strojně,
- sádrová tenkovrstvá omítka v tloušťce cca 4 mm pro zdivo z velkoformátových tvárnic, monolitické betony nebo vyrovnávání podkladů,
- sádrová stěrka se používá na kvalitních betonech, sádrokartonech nebo jádrových omítkách místo štku.

Výhodou sádrových omítek je lehká zpracovatelnost, jednovrstvost, opravitelnost, vydatnost, dobrá přilnavost a vysoká kvalita finálního povrchu. Výrazně kratší doba vyzrání omítek přispívá k urychlení výstavby. Omítky si zachovávají přirozenou vlastnost sádry regulovat vlhkost vzduchu v místnosti. Současně rychle absorbují teplo, a tak zvyšují pohodu vnitřního prostoru.

## **8.2 Sádrokartonové konstrukce**

Sádrokarton jsou prakticky lehké, sádrové vrstvy na okrajích obaleny izolační vrstvou velice podobnou papíru. Sádrokarton je nejsnadnějším řešením takzvaného suchého způsobu zdění. Díky němu lze jednoduše stavět příčky, ale i celkově rekonstruovat, zateplovat či jinak upravovat interiér.

Sádrokartonové desky mají několik velice výhodných vlastností, zejména z důvodu, že sádra umí regulovat vlhkost v místnosti a funguje také jako tepelná a zvuková izolace. Díky několika různým variantám, ve kterých se sádrokarton vyrábí, je také jeho použití velice rozmanité. Ať už klasický sádrokarton, který je nejvhodnější na budování jednoduchých příček a širokého využití nalezne i při stavbě podkroví, tak sádrokarton voděodolný a protipožární.

Voděodolný sádrokarton má vnější izolační vrstvu tvořenou voděodolnou fólií. Díky této fólii odolává daleko vyšší vlhkosti než sádrokarton klasický. Využití potom nalézá při stavbách a rekonstrukcích koupelen a kuchyní. Při budování koupelen se dokonce často doporučuje obložit zeď před položením kachliček ještě sádrokartonovou deskou, právě kvůli její voděodolnosti.

Velkou výhodou sádrokartonu je dále jeho snadná tvarovatelnost.

Sádrokarton se během několika let, co je vyráběn, stal velice oblíbeným materiálem, který rádi využívají nejen kutilové, ale i profesionální firmy. Vybudoval si tak poměrně silnou pozici na trhu a stal se nedílnou součástí moderního stavebnictví.

### **8.2.1 Sádrokartonové desky**

Sádrokartonové desky jsou desky velkého formátu, které se skládají ze sádrového jádra, opláštěného speciálním kartonem. Karton na lícové straně je pevnější a světlejší než na rubové straně. Řídí se normativními předpisy, jež definuje norma ČSN EN 520 + A1: Sádrokartonové desky, požadavky a zkušební metody.

### **8.2.2 Technologie výroby sádrokartonových desek**

Prášková sádra se odebírá šnekovým dopravníkem ze zásobníku a vážícím zařízením se přesně dávkuje do míchačky. Na cestě do míchačky se přidávají přísady



např.: sekané skelné vlákno, tvrdidlo, urychlovače a jiné. Do míchačky se dávkuje studená voda. V míchačce se komponenty smíchají a sádrová kaše se vypouští do koryta, které tvoří na krajích vytvarovaný lícový karton odvíjený z cívky. Rubový karton přichází z cívky a uzavírá sádrovou kaši shora. Kraje rubového kartonu se přilepují na kraje lícového kartonu zařízením. Jádro sádrokartonu se tvaruje pomocí spodních a horních válců v prostoru. Sádrové jádro tuhne na dopravníku. Na konci dopravníku jsou instalovány stříhací nůžky, které nekonečný pás oddělí na požadovanou délku. Před dělením pásu dojde k potisku technickými informacemi. Profil sádrokartonové desky prochází přes kalibrační pravítka a na transportním pásu je unášen k dělicím nůžkám. Následuje sušení v sušičce, kde se desky zbavují nadměrné vlhkosti. Následně dochází k přesnému dorovnání délky pomocí frézovacího zařízení. Na konci linky je paletizace a odvoz desek do skladu. [62]

### **8.2.3 Výhody použití sádrokartonových desek na podlahy**

Výhodami použití sádrových desek jsou:

Suchý proces montáže.

- Při montáži podlah není do objektu vnášena dodatečná vlhkost.
- Různé varianty skladeb podlah. Výškové vyrovnání nerovností podsypem nebo pomocí samonivelační stěrky. Vyřešení tepelné izolace pěnovým polystyrenem. Zlepšení kročejové neprůzvučnosti dřevovláknitou deskou.
- Vysoká mechanická odolnost.
- Vydrží zátěž kolečkových židlí, aniž by byly nutné dodatečné úpravy povrchu.
- Rychlost výstavby.
- Díky jednoduchému skládání prefabrikovaných podlahových dílců se významně zkracuje čas výstavby. Podlahy jsou ihned pochůzné. Zhruba 24 hodin po montáži je možno klást podlahové krytiny.
- Použití do prostor se zvýšenou vzdušnou vlhkostí.
- Snese až 90 % přerušované vlhkosti – například v koupelnách. V místech přímého styku s vodou (např. sprchový kout) je nutno desky opatřit tekutou hydroizolací.

#### **8.2.4 Sádrokartonové podhledy a stropy**

Sádrokarton není využitelný v nosných stropních konstrukcích, ovšem pro případy stropních podhledů a obložení stropů podkrovního interiéru se hodí ideálně. Většinou však konstrukce obkladů stropů slouží k zakrytí poškozených míst stávajícího stropu (kromě podkroví), nebo nahrazují omítky.

Přítom nám zavěšené podhledy umožní stropy snížit a navíc se usnadní vedení instalací. Je-li jako izolace použita minerální vlna, výrazně se zlepší i celkové izolační vlastnosti interiéru. Podhledové systémy lze umístit na jakýkoli nosný strop. Mohou sloužit i jako základ pro konečné povrchové úpravy (malba, štuky, tapety). Dalším možným řešením jsou akustické kazetové stropní podhledy. Ty jsou demontovatelné. Jejich základní modulový rozměr činí 600 x 600 mm a liší se provedeními hran kazet. V případě opláštění šikmých stropů a střech se musí zajistit dostatečná tepelná izolace, ochrana proti vlhkosti, požáru a hluku. Je proto nutné, nejen účelné, izolovat a deskami zevnitř následně obložit celou šikmou střechu.

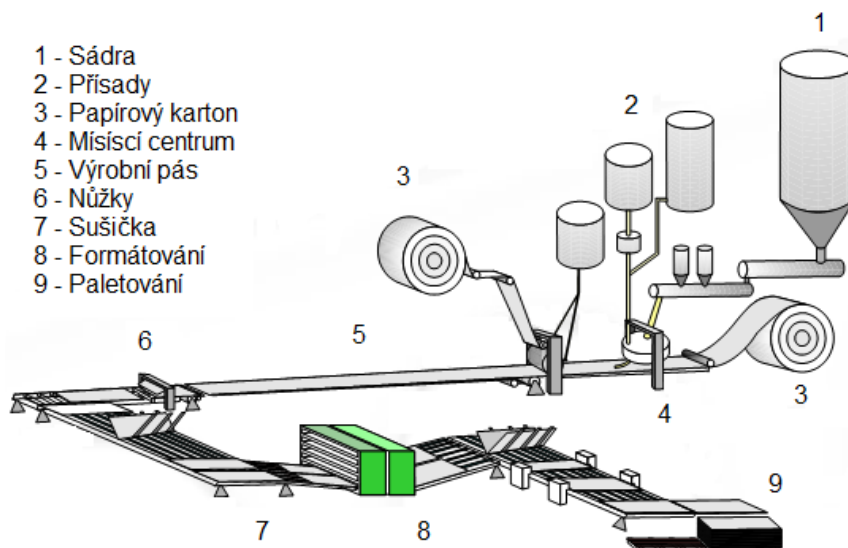
#### **8.2.5 Druhy a označení sádrokartonu**

Sádrokartonové desky rozdělujeme na čtyři základní skupiny podle jejich vlastností a jejich využití. Základním druhem sádrokartonových stavebních desek jsou bílé sádrokartonové desky. Tento druh stavebních desek lze využít jak k tvorbě vnitřních sádrokartonových příček, tak i k obkladům vnitřních stěn či k tvorbě podhledů ze sádrokartonu. Tento druh sádrokartonu je označován RB.

Dalším typem stavebních desek jsou desky, jež mají standardně zelenou barvu a jsou označovány jako RBI. Písmeno „i” v názvu tohoto typu sádrokartonu znamená impregnaci, z čehož vyplývá, že je tento typ použitelný do prostředí se zvýšenou vlhkostí. Impregnovaný zelený sádrokarton se využívá především k tvorbě příček a stropů v koupelnách, kuchyních a všude tam, kde by klasické desky ze sádrokartonu byly poškozené nadměrným působením vlhkosti vzduchu.

Třetím typem stavebních desek ze sádrokartonu jsou desky vyrábějící se nejčastěji v barvě červené nebo růžové a nesou označení RF. Tento druh sádrokartonu má zvýšenou protipožární odolnost oproti klasickým typům stavebních sádrokartonových desek.

Posledním druhem sádrokartonových stavebních desek jsou desky značené jako RFI. Tyto desky jsou stejně jako předchozí druh vyrobené tak, aby splňovaly zvýšené nároky na požární odolnost, jsou však zároveň i použitelné do prostředí se zvýšenou vlhkostí vzduchu. Jejich použití je pak časté například v kuchyních, kde je zvýšená vlhkost a zároveň je zapotřebí zachovat protipožární odolnost.



Obr. 26: Schéma výroby sádrokartonových desek

## 8.3 Sádrovláknité konstrukce

### 8.3.1 Sádrovláknité desky

Základní surovinou je sádra s rozvlákněným starým papírem. Na jejich povrchu není karton. Desky jsou robustní a lépe odolávají mechanickému poškození. Hrany jsou řezané. Práce s těmito deskami jsou obtížnější. Svými vlastnostmi jsou předurčeny pro suché podlahy a mechanicky odolné příčky a konstrukce. [62] Řídí se normativními předpisy dle ČSN EN 15283-2 + A1: Sádrové desky vyztužené vlákny - Definice, požadavky a zkušební metody - Část 2: Sádrovláknité desky.

### 8.3.2 Technologie výroby sádrovláknitých desek

Nejprve je starý papír dopravován na třídící linku, kde se z něj pomocí magnetů vytřídí případné kovy. Vytříděný papír se zpracuje v mlýnech na celulósová vlákna, která se za sucha smíchají se sádrou v poměru 20 % papíru a 80 % sádry.

Vlákna ve směsi vytvářejí pevnou vazbu, obdobně jako u železobetonu armovací pruty. Tímto jednoduchým způsobem se sádra zpevní, a to nejen na povrchu, ale v celém svém průřezu. Materiál je tak tvrdší, má vyšší objemovou hmotnost, vyšší požární odolnost a lepší akustické parametry - to vše bez dalších chemických přísad. Proces výroby sádrovláknitých desek pokračuje po promíchání sádry a papírových vláken nanášením této suché směsi na výrobní pás za kontinuálního provlhčování. Lisováním směsi za tlaku 600 atm a následným vysušením v sušicích boxech při 200 °C, následuje impregnace prováděná další přírodní surovinou - bramborovým škrobem. Výroba končí oříznutím na potřebné formáty. Ve výrobě se za jeden den vyrobí v průměru 100 000 m<sup>2</sup> desek, na něž je zapotřebí tisíc tun materiálu (800 t sádry a 200 t papíru).

Způsob výroby, při níž sádra reagující s vodou proniká do vláken a obalí je, zaručuje sádrovláknitým deskám stabilitu a nehořlavost. [63]

### **8.3.3 Vlastnosti sádrovláknitých desek**

- Statické - jako nosný prvek dřevěných sendvičových konstrukcí.
- Pevnostní - zvýšení pevnosti a únosnosti nenosných dělicích příček.
- Protipožární - zvýšení požární odolnosti stěn, podlah, stropů a podhledů.
- Akustické - zlepšení akustických vlastností stěn, podlah a stropů.
- Desky regulující vlhkost v interiéru.
- Desky vhodné do vlhkých prostor.

### **8.3.4 Použití sádrovláknitých desk**

- Pro montáž dělicích nosných nebo nenosných příček a předsazených stěn.
- Pro montáž zavěšených podhledů.
- Pro montáž nosných stropních konstrukcí.
- Pro montáž podlahových systémů.

## **8.4 Sádrové tvárnice**

Řídí se normativními předpisy dle ČSN EN 12859: Sádrové tvárnice - Definice, požadavky a zkušební metody. Tyto sádrové tvarovky se vyrábějí z lité sádry. Mohou být vyztuženy celulózovými, plastovými a skelnými vlákny nebo plnivem (experlit, písek aj.). Bývají povrchově impregnovány proti vzdušné vlhkosti. Používají se výhradně pro interiérové nenosné stěny, příčky, obklady. Zdí se na sádrovou modifikovanou maltu. Mají rovný a hladký povrch, jsou přesných rozměrů, v důsledku čehož se povrchově upravují jen zašpachtlováním a maltou, případně tapetou. Jsou nehořlavé (tř. A1), s požární odolností 90 minut.

Jedinou firmou v České republice zabývající se výrobou sádrových příčkových tvárnic SUPERBLOK® je Gypstrend s.r.o. sídlící v Koberčicích u Opavy. Tvárnice jsou vyráběny z lité sádry. Jednotlivé tvárnice se spojují speciálním sádrovým pojivem od téže firmy. Společnost vyrábí tvárnice s označením EN o rozměrech (666 x 500) mm a tloušťkách 60, 80 a 100 mm, přičemž 80 a 100 mm silné i v provedení voděodolných tvarovek. Dalším prvkem sortimentu je plná tvárnice formátu (450 x 300 x 800) mm, anebo vylehčená dutinami. [64]

Sádrové tvárnice SUPERBLOK® mají vynikající požární odolnost, velmi příznivé tepelně a zvukově izolační vlastnosti. Využitím přirozené schopnosti sádrové hmoty regulovat vzdušnou vlhkost vytvářejí optimální klima obytných i jiných prostor. Příčky postavené tímto systémem jsou také cenově podstatně výhodnější, než za použití standardních systémů.

#### Charakteristika produktu:

- Určeny ke zhotovování vnitřních nenosných stěnových konstrukcí, izolovaných od zemní a jiné vlhkosti.
- Systém na principu pera a drážky s řadou předností proti tradiční technologii zdění.
- Tvarová přesnost a rozměrová stálost.
- Snadná opracovatelnost (řezáním, vrtáním, frézováním) jak ručním nářadím, tak malou mechanizací.
- Rychlá, jednoduchá a čistá montáž stěny s použitím speciálního sádrového pojiva.
- Možnost snadného zabudování veškerých instalací a zavěšení zařizovacích předmětů.
- Povrchová úprava stěny (malbou, obklady, tapetováním) přímo na připravené zdivo bez omítání.

Tab. 16: Charakteristiky sádrových tvarovek SUPERBLOK®

Sledovaná vlastnost	EN 6	EN 8	EN 10	TPP 8
Délka [mm]	666	666	666	450
Výška [mm]	500	500	500	300
Šířka [mm]	60	80	100	80
Hmotnost [kg]	13,33	16,66	19,33	9 - 12
Plošná hmotnost [kg·m <sup>-2</sup> ]	40	50	58	67 - 89
Počet kusů na m <sup>2</sup>	3	3	3	7,4
Pevnost v tlaku [MPa]	7,8	7,8	7,8	2
Index neprůzvučnosti R <sub>w</sub> [dB]	34	37	40	36
Tepelný odpor [m <sup>2</sup> K·W <sup>-1</sup> ]	0,17	0,25	0,32	0,40
Tepelná vodivost [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	0,36	0,31	0,31	0,20
Požární odolnost [min]	120	120	180	180

Z charakteristických hodnot sádrových tvarovek SUPERBLOK® shrnutých v Tab. 16 je patrné, že tento výrobek při srovnání jiných zahraničních výrobců v dané kategorii vykazuje v oblasti plošné hmotnosti tvárnice stejné tloušťky výrazně nejnižší hodnot. V případě ostatních charakteristik jako jsou tepelná vodivost, neprůzvučnost či požární odolnost dosahuje obdobných výsledků.

## **8.5 Spárovací materiály**

Jsou používány pro sádrokartonové desky, řídí se normou ČSN EN 13963 ed 2: Spárovací materiály pro sádrokartonové desky - Definice, požadavky a zkušební metody, která určuje vlastnosti a požadavky na spárovací tmely a papírové pásy pro tmelení spojů sádrokartonových desek, upravených výrobků ze sádrokartonových desek a sádrových desek vyztužených vlákny.

## **8.6 Sádrové prvky pro závěsné podhledy**

Řídí se normou ČSN EN 14246 Sádrové prvky pro závěsné podhledy - Definice, požadavky a zkušební metody. V těchto výrobcích  $\alpha$ -sádra umožňuje propracování ozdobných detailů, vykazuje vysokou pevnost a životnost, má netoxické složení a je hořlavá.

## **8.7 Lité potěry**

Lité potěry jsou průmyslově vyráběny jako suchá směs složená z pojiva (na bázi  $\alpha$  hemihydrátu a AH II), kameniva různé zrnitosti, přísad usnadňujících zpracování a stavebně chemických přípravků, které ve speciálních poměrech zaručují autonivelaci a požadované technické parametry. Slouží k definitivnímu vyrovnání a dosažení předepsané výšky jako podkladní vrstva pro podlahoviny. Jsou vhodné pro vnitřní prostory v bytech, kancelářích a správních budovách, hotelích, školkách a školách, je však prokázána jejich nevhodnost pro vlhké prostory (garáže, prádelny, sprchy atd.).

Jejich výhodami jsou samonivelační schopnost, vysoká rovnost povrchu, rychlost pokládky s minimální dilatací a beze spár, velmi dobrá přilnavost, vysoké výsledné pevnosti, rychlý proces tuhnutí vedoucí ke snížení finančních nákladů na konstrukci podlah, optimální poměr mezi tepelnou průchodností a akumulacími vlastnostmi u podlah.

### 8.7.1 Použití anhydritových potěrů

Vzhledem k nestálému charakteru vlastností anhydritových potěrů při styku s vodou a zvýšenou vzdušnou vlhkostí není vhodné volit tento typ podlah do exteriérů nebo do trvale vlhkých prostor jakou jsou např. prádelny, velkokuchyně, sauny, bazény apod. Působením vlhkosti dochází zejména ke ztrátě pevnosti, a to až o 50 % oproti pevnosti původní, při vysoušení pak dochází k opětovnému nárůstu pevností podlahy na původní hodnoty. Podlaha však musí vyschnout bez chemického poškození.

V rodinných domech je použitelnost anhydritových podlah téměř neomezená. Zvýšená pozornost zde musí být věnována místnostem se zvýšenou vlhkostí, jako jsou např. koupelny, toalety nebo garáže, kde je nezbytně nutné provést opatření v podobě stěrkových hydroizolací. V místnostech, kde se předpokládá zvýšené zatížení podlahy jako např. pod krbem nebo velkým akváriem, je potřeba provést zpevnění anhydritového potěru, a to buď zesílením jeho vrstvy, nebo zpevněním podkladu.

Anhydritové potěry nemohou sloužit jako pochozí vrstva podlahy, z důvodu jejich nedostatečné odolnosti proti obrusu. Vrstva potěru je vhodná jako podložní vrstva pod finální nášlapnou vrstvu, např. parkety, dlažbu, koberec. Samotný lité potěr může jako nášlapná vrstva sloužit pouze v případě, že jsou provedeny příslušné povrchové úpravy, jako např. stěrky z pryskyřic. [57], [58]

### 8.7.2 Sintrová vrstva

Sintrová vrstva (sintr, šlem) vzniká při tuhnutí a tvrdnutí anhydritového potěru, kdy dochází ke kapilárnímu transportu vody na povrch potěru. Transportovaná voda může obsahovat rozpuštěné látky, které se usazují na povrchu potěru a tím tvoří tzv. sintrovou neboli slinutou vrstvu. Sintrová vrstva vzniká v prvních dnech po provedení potěru, na pohled se jeví matně až hladce a její tloušťka je řádově v desetinách milimetru. Při tvorbě této vrstvy může docházet ke vzniku prasklin, zasahujících i do konstrukční vrstvy potěru, ty však nemají na kvalitu realizované podlahy vliv. [59], [60]

Na vzniku sintru se podílí také síranové budiče, které tvoří hydratované sírany nebo podvojně soli, přičemž výsledný šlem závisí také na druhu síranového budiče. Např. v praxi nejpoužívanější budič  $K_2SO_4$  v porovnání se síranem sodným  $Na_2SO_4$



dává vzniknout slabší vrstvě šlemu. Dalšími aspekty, na kterých závisí tvorba sintru, jsou také tloušťka realizovaného potěru a druh použitého písku.

Sintrová vrstva je nesoudržná s vlastní matricí potěru a odstranění šlemu urychlí proces vysychání potěru, proto je vhodné ji vždy odstranit. V počátečních fázích zrání potěru je možno sintr odstranit zametením či seškrábáním, později se odstranění musí provádět broušením brusným papírem nebo diamantovým kotoučem. Pokud je nášlapná vrstva podlahy řešena jako nelepená, není nutné šlem sundat, pak je však potřeba počítat s delší dobou vysychání potěru. [61]

### **8.7.3 Anhydritové potěry v praxi**

Lité anhydritové potěry jsou vhodné pro všechny podlahové krytiny, přičemž mají velmi dobrou rovinatost. Dosahují minimální pórovitosti, což se nepříznivě projeví v jejich tepelné vodivosti, která je zlepšována také tím, že potěr těsně obaluje trubky podlahového topení. Proto u anhydritového potěru dochází k až o 40 % rychlejšímu prohřátí než u betonové podlahy. Výsledné pevnosti anhydritových podlah závisí jak na kvalitě použitého materiálu, tak na kvalitě provedení. Pevnosti v tlaku dosahují 20 až 30 MPa a pevnosti v tahu za ohybu se pohybují v rozmezí 4 až 6 MPa. Běžně bývají anhydritové potěry používány v konstrukcích až do zatížení 5 kN·m<sup>-2</sup>.

Výrobci dodávají anhydritové směsi jako čerstvě namíchané nebo pytlované v různých pevnostních variantách:

- Pytlované směsi jsou většinou dováženy ze zahraničí, hlavně z Německa a Rakouska, jsou označovány jako tzv. Compound. Compound jsou směsi pojiva a přísad, dodavateli na českém trhu jsou např. Morfico, KVK, Baumit, Hasit aj.

- Pro čerstvé směsi mají firmy obchodní názvy, pod kterými jsou dodávány jako např. Cemex (Anhylevel), Zapa (AnhyScreed), Českomoravský beton (Anhyment), Morfico (MFC Anhydrit), aj. [60], [61]

## **8.8 Lité sádrové výrobky vyztužené vlákny**

Předepisuje norma ČSN EN 13815: Lité sádrové výrobky vyztužené vlákny - Definice, požadavky a zkušební metody. Jedná se o průmyslově vyráběné lité sádrové

výrobky vyztužené vlákny - profil, neohebné desky a kazety - zhotovené různými postupy v závodech nebo dílnách.

## **8.9 Použití mimo stavebnictví**

Značný objem z produkce  $\alpha$ -sádry se spotřebovává ve zdravotnictví, a to zejména pro dentální účely.  $\alpha$ -sádra se používá do směsí pro odlitky, zubní náhrady, jako materiál určený pro překrytí vložek a také jako krátkodobá provizorní výplň, která rychle tuhne ve vlhkém prostředí.

Dále se používá v keramickém průmyslu pro odlévání forem. [65], [65]

## **II. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST**

### **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.

### **1. 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 mokřý 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.

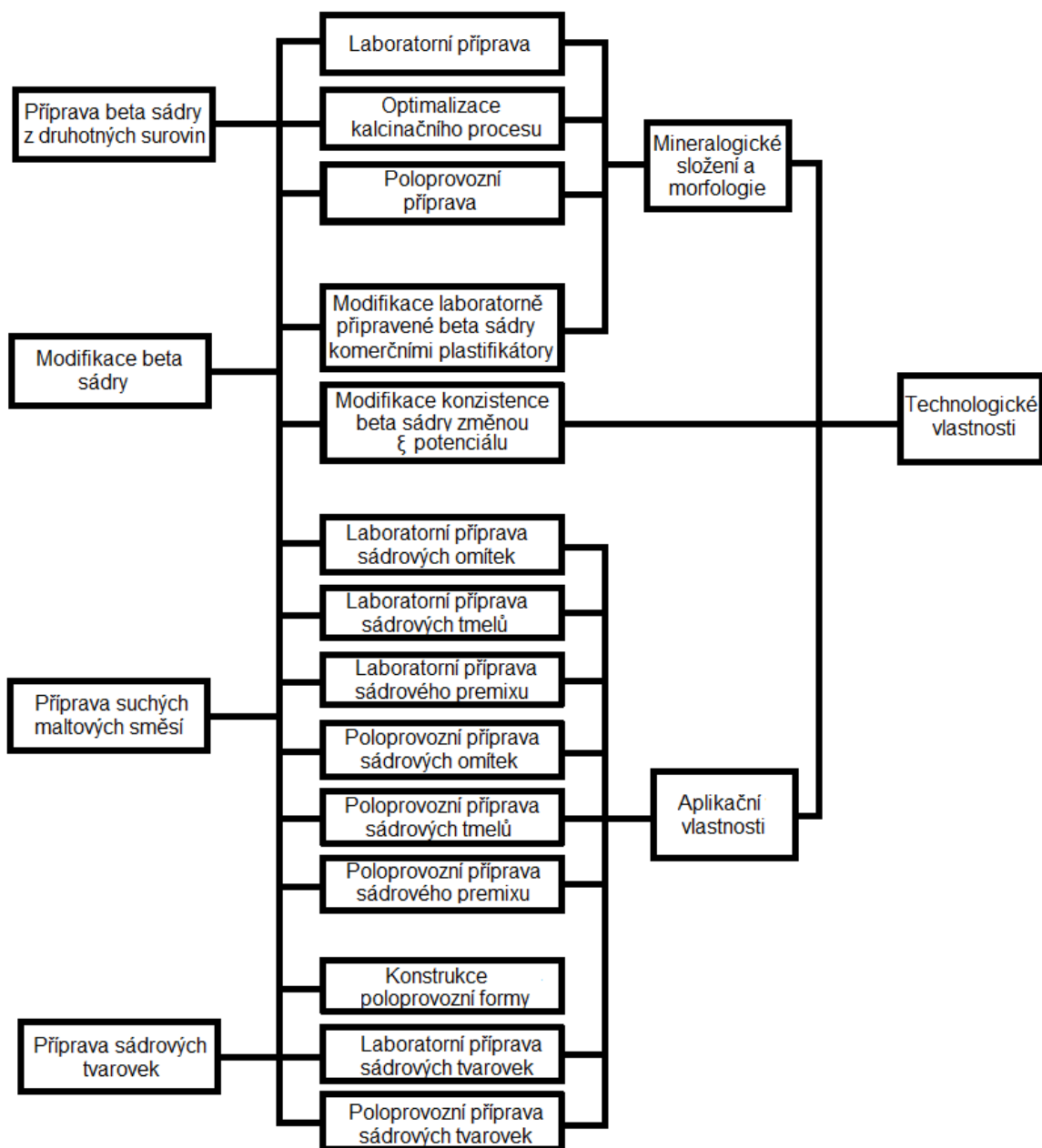
Základním a nejsnáze výrobně dosažitelným síranovým pojivem je tzv. beta sádra, tj.  $\beta$ -forma hemihydrátu síranu vápenatého. Tato vzniká kalcinací sádrovce neboli jeho dehydratací působením zvýšené teploty za normálních atmosférických podmínek.

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 jejich 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.

## Schéma navržené metodiky



## **2. POSTUP PRACÍ**

### **2.1 Příprava beta sádry z druhotných surovin**

#### **2.1.1 Laboratorní příprava beta sádry z druhotných surovin**

Laboratorně byla beta sádra připravována dehydratací sádrovce v horkovzdušné laboratorní sušárně dvěma teplotními režimy a to 130 °C a 105 °C. Kontrola úplné přeměny dihydrátu na hemihydrát byla stanovena na základě sledování změn fázového složení průběžně odebíraných vzorků metodou RTG difrakční analýzy. Laboratorně připravená beta sádra byla podrobena stanovení základních technologických vlastností (stanovení normální konzistence, počátku a doby tuhnutí, pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu, výpočet objemové hmotnosti) v porovnání s komerčně vyráběnou beta sádrovou. Laboratorními podmínkami byla ověřena možná poloprovozní příprava.

#### **2.1.2 Poloprovozní příprava beta sádry z druhotných surovin**

Poloprovozní příprava beta sádry byla uskutečněna na technologické lince, primárně určené k sušení kameniva. Přeměna dihydrátu na hemihydrát byla v tomto případě kontrolována pomocí ztráty žíháním vzniklého produktu. Poloprovozně připravená beta sádra byla podrobena základním technologickým zkouškám (stanovení normální konzistence, počátku a doby tuhnutí, pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu, výpočet objemové hmotnosti).

### **2.2 Modifikace konzistence beta sádry**

Ke zkouškám úpravy konzistence byla použita beta sádra, připravená kalcinací sádrovce Pregips v horkovzdušné laboratorní sušárně za teploty 130 °C.

### 2.2.1 Modifikace laboratorně připravené beta sádry komerčními plastifikátory

Beta sádra byla modifikována širokou škálou průmyslových plastifikátorů na bázi lignosulfonanů, melaminoformaldehydových pryskyřic a dalších, které jsou primárně určeny k plastifikaci cementových malt a betonů.

Jelikož množství těchto betonářských plastifikátorů, vhodné ke ztekucení sádrové kaše, bylo odhadnutelné jen zcela orientačně, byly všechny vybrané plastifikační přísady dávkovány bez ohledu na jejich skupenství v jednotné řadě 0 %, 0,5 %, 1 % a 3 % hm. vztaženo na hmotnost sádry. Výjimku tvořil plastifikátor Biotech, který byl dávkován v množství 0,3 % a 0,6 % hm. na sádru. Jedná se totiž o jedinou přísadu určenou pro ztekucení sádry, a uvedené dávkování je přímo doporučeno výrobcem.

Práškové plastifikátory byly v odváženém množství nadávkovány do sádry, s níž byly následně důkladně zhomogenizovány. Kapalně plastifikátory byly dávkovány přímo do záměsové vody.

Po odzkoušení optimálního množství daného plastifikátoru způsobem rozlití sádrové kaše disperzní metodou, viz ČSN EN 13279-2 Sádrová pojiva a sádrové malty pro vnitřní omítky - Část 2: Zkušební metody, byly u takto modifikované sádry stanoveny základní technologické vlastnosti a sledování hydratačního procesu pomocí RTG difrakční analýzy.

### 2.2.2 Modifikace konzistence beta sádry změnou zeta potenciálu

Pro možné ztekucení, hypoteticky dosažitelné zvýšením zeta potenciálu sádrové suspenze, byla beta sádra modifikována látkami s vhodnými kationy a aniony. Tyto byly vybrány na základě velikosti zeta potenciálu dle tezí lyotropních řad a Schulze – Hardyho pravidla. Podle těchto tezí se zeta potenciál zvyšuje s klesajícím mocenstvím daného prvku, což znamená, že co do kationů mají např. prvky druhé skupiny vyšší zeta potenciál než třetí skupiny, a vůbec nejvyšší hodnoty vykazují prvky první skupiny. Opačně v oblasti elektronegativních prvků, tj. anionů, mají kupříkladu vyšší hodnoty zeta potenciálu prvky sedmé skupiny než prvky šesté skupiny. Pro jednotlivé skupiny zároveň platí tzv. lyotropní řady, přičemž v první skupině tvoří lyotropní řadu postupně kationy  $\text{Li}^+ > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{H}^+$  a dále např. v sedmé skupině postupně aniony  $\text{I}^- > \text{Br}^- > \text{Cl}^- > \text{F}^-$ .

Pro posouzení vlivu jednotlivých iontů na změnu zeta potenciálu, a tím ztekucení sádrové suspenze, byly vybrány soli, které se skládaly z jednomocných kationů  $\text{Na}^+$  a  $\text{K}^+$  a z dvojmocných kationů  $\text{Ca}^{2+}$  a  $\text{Mg}^{2+}$ . K těmto kationům byl vybrán jeden jednomocný anion  $\text{Cl}^-$  a dva dvojmocné aniony  $\text{SO}_4^{2-}$  a  $\text{CO}_3^{2-}$ .

Za základ dávkování zkoušených solí byla vzata přísada  $\text{CaCl}_2$  o koncentraci 3 % hm. vztaženo na hmotnost sádry. Aby chování všech solí bylo objektivně srovnatelné, byla uvedená 3% koncentrace  $\text{CaCl}_2$  přepočtena na látkové množství, které činí 0,027 mol / 100 g sádry, a všechny ostatní soli byly dávkovány v tomto stejném látkovém množství.

Odvážené dávky solí byly kvůli jejich mnohdy i poměrně špatné rozpustnosti nejprve dokonale rozpuštěny ve vodě, a takto vzniklý roztok byl následně použit jako součást záměsové vody pro přípravu sádrové kaše.

U vzorků byla sledována jejich konzistence zkouškou rozlitím sádrové kaše při konstantní hodnotě vodního součinitele  $w = 1,0$ . V případech, kdy rozlité bylo vyšší než referenčních 180 mm, byl vodní součinitel snížen na hodnotu  $w = 0,9$ , a následně stanovena konzistence. Dalšími sledovanými parametry bylo stanovení počátku a doby tuhnutí, viz ČSN 722 301 Sádrová pojiva. Klasifikace. Všeobecné technické požadavky. Zkušební metody. U vzorků, kde byl pozorován ztekucovací efekt, bylo uskutečněno i stanovení objemové hmotnosti, pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu na normových trámčích rozměrů (40 x 40 x 160) mm.

## **2.3 Příprava suchých maltových směsí**

### **2.3.1 Laboratorní příprava suchých maltových směsí**

Příprava sádrových omítek, tmelů a premixu spočívala v modifikaci poloprovozně vyrobené beta sádry přidávkem jemně mletého vápence a přísadami ovlivňujícími zpracovatelnost a přídržnost. Použita byla retardační, retenční a provzdušňující přísada.



### **2.3.2 Poloprovozní příprava suchých maltových směsí**

Pro možnost ověření převodu laboratorních výsledků do poloprovozních podmínek byla uskutečněna i poloprovozní příprava na technologické lince určené pro výrobu suchých maltových směsí.

Z poloprovozně vyrobených směsí byly odebrány vzorky k provedení technologických a aplikačních zkoušek.

## **2.4 Příprava sádrových tvarovek**

### **2.4.1 Konstrukce poloprovozní formy**

Návrh konstrukce poloprovozní formy vycházel z výběru vhodného materiálu z hlediska trvanlivosti a odolnosti, dále pak snadnosti manipulace, demontovatelnosti a možného převedení do poloprovozu. Dále musely být dodrženy rozměrové, aplikační a normové požadavky dle ČSN EN 12859.

### **2.4.2 Laboratorní příprava sádrové tvarovky**

Laboratorně byly připraveny sádrové tvárnice nejprve s dávkou plastifikační přísady, následně s odstupňovanou dávkou provzdušňující přísady a konstantní dávkou záměsové vody, aby bylo dosaženo tvarovek rozdílných objemových hmotností. Pro snadnější odformování byl povrch formy opatřen hydrofobním nátěrem. Na připravených tvarovkách byly v souladu s normou stanoveny technologické vlastnosti v závislosti na dávce plastifikační přísady.

### **2.4.3 Poloprovozní příprava sádrové tvarovky**

Po sestavení poloprovozní aparatury byla uskutečněna poloprovozní výroba sádrové tvarovky modifikované nejprve plastifikační přísadou a následně i provzdušňující přísadou tak, aby bylo docíleno odlehčení připraveného prvku při zachování dostatečné pevnosti. Poloprovozně připravené tvarovky byly podrobeny zkouškám technologických vlastností, konkrétně rozměrové přesnosti, rovinnosti, objemové hmotnosti a stanovení maximálního tíhového zatížení. Zároveň byla

uskutečněna i aplikační zkouška těchto tvarovek způsobem vystavení zkušební laboratorní přičky, na níž byly následně odzkoušeny i aplikační vlastnosti vyvinutých suchých sádrových směsí.

### 3. POUŽITÉ SUROVINY

#### Chemosádrovec Pregips

Na přípravu beta sádry byl použitý chemosádrovec Pregips od společnosti Precheza, a.s. Přerov. Chemosádrovec má bílou až nažloutlou barvu, získává se při neutralizaci kyseliny sírové z výroby titanové běloby. Používá se jako přísada do cementu nebo k výrobě síranových pojiv. Vlhkost činila 11,4 %.

#### Citran draselný

Pro přípravu sádrové kaše normální konzistence byla voda nahrazená 1% roztokem citranu draselného,  $C_6H_5O_7K_3 \cdot H_2O$ , který slouží jako retardační přísada.

#### Retardan GK

Z důvodu rychlých počátků doby tuhnutí při přípravě sádrových tvarovek byl použit práškový zpomalovač tuhnutí Retardan GK světle hnědé barvy. Tento retardant je založen na bázi polykondenzovaných aminokyselin.

#### Dusičnan draselný

Dusičnan draselný od firmy PENTA byl použit jako přísada do sádrové kaše. Molární hmotnost produktu je  $M_{KNO_3} = 101,11 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ .

#### Chlorid sodný

Chlorid sodný od firmy PENTA byl použit jako přísada do sádrové kaše ve formě p. a.. Molární hmotnost produktu je  $M_{NaCl} = 58,44 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ .

### **Chlorid draselný**

Chlorid draselný od firmy PENTA byl použit jako přísada do sádrové kaše ve formě chemicky čistý. Molární hmotnost produktu je  $M_{\text{KCl}} = 74,56 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ .

### **Chlorid hořečnatý hexahydrát**

Chlorid sodný od firmy PENTA byl použit jako přísada do sádrové kaše. Molární hmotnost produktu je  $M_{\text{MgCl}_2\cdot 6 \text{ H}_2\text{O}} = 203,31 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ .

### **Chlorid vápenatý**

Chlorid vápenatý od firmy PENTA byl použit jako přísada do sádrové kaše ve formě bezvodého prášku. Molární hmotnost produktu je  $M_{\text{CaCl}_2} = 110,99 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ .

### **Síran draselný**

Síran draselný od firmy PENTA byl použit jako přísada do sádrové kaše. Molární hmotnost produktu je  $M_{\text{K}_2\text{SO}_4} = 174,27 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ .

### **Síran sodný**

Síran sodný od firmy PENTA byl použit jako přísada do sádrové kaše. Molární hmotnost produktu je  $M_{\text{Na}_2\text{SO}_4} = 142,04 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ . Jako budící přísada pro přípravu anhydritové maltoviny byl dávkován v množství 1 % z hmotnosti anhydritové maltoviny.

### **Síran hořečnatý heptahydrát**

Síran hořečnatý heptahydrát od firmy PENTA byl použit jako přísada do sádrové kaše ve formě p. a.. Molární hmotnost produktu je  $M_{\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}} = 246,48 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ .

## **Uhličitan draselný**

Uhličitan draselný od firmy PENTA byl použit jako přísada do sádrové kaše ve formě bezvodého a chemicky čistého. Molární hmotnost produktu je  $M_{K_2CO_3} = 138,21 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ .

## **Uhličitan sodný**

Uhličitan sodný od firmy PENTA byl použit jako přísada do sádrové kaše ve formě bezvodého a označení p. a.. Molární hmotnost produktu je  $M_{Na_2CO_3} = 105,99 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ .

## **Provzdušňovací přísada Berolan**

Plastifikační/provzdušňující přísada společnosti Berolan silně povrchově aktivní, sloužící i jako změkčovaadlo. Byl vyvinut speciálně pro použití u malt na bázi cementu, sádry, vápna. Tato přísada působí v sádrové směsi v závislosti na dávce buď jako náhrada plastifikační přísady nebo jako provzdušňující přísada.

## **Plastifikační přísada Melflux 4930F a 6681F**

Práškové plastifikační přísady společnosti BASF založené na bázi modifikovaných polykarboxil éterů. Jedná se o plastifikátory určené pro ztekucení cementové kaše, mají významné ztekucující účinky.

## **Plastifikační přísada Sika ViscoCrete**

V případě modifikace vlastností anhydritových maltovin byla použita plastifikační přísada od společnosti Sika a to konkrétně: Sika ViscoCrete 225 P, 510 P a 520 P. Ve všech případech se jedná o bílý prášek na bázi modifikovaného polykarboxylátu. Dávkování udávané výrobcem je pro všechny typy těchto plastifikátorů v rozmezí 0,05 až 0,5 % z hmotnosti pojiva. Příklad 225 P je výrobcem určena jako zvláště vhodná pro výrobu suchých betonových směsí, zároveň je však uvedeno, že se hodí i pro sádrové a anhydritové stěrky. Typ 510 P je vhodný pro stěrky a samonivelační potěry na síranové i cementové bázi. Příklad typu 520 P je vhodná pro samonivelační stěrky. Při předávkování může dojít ke krvácení směsi, či zpomalení tuhnutí.

### **Plastifikační přísada Melment**

V případě modifikace vlastností anhydritových maltovin byla použita plastifikační přísada Melment F 17 G od společnosti BASF. Tento plastifikátor je založen na bázi sulfonovaného polykondenzačního produktu melaminu. Prášek má bílou nebo slabě šedou barvu. Výrobce doporučuje dávkování od 0,2 do 2 % z hmotnosti pojiva. Tato přísada je primárně určena pro pojiva na bázi síranu vápenatého.

### **Retenční přísada Ter Cell**

K modifikaci sádrových maltovin pro přípravu sádrového premixu byla použita retenční přísada na bázi derivátů celulózy.

### **Hydrofóbní nátěr Lukofob**

K ošetření formy na přípravu sádrových tvarovek byl použit hydrofobní nátěr Lukofob, který se při nanášení štětcem nebo houbičkou vsakuje do podkladu a tvoří vysoce hydrofobní film na povrchu, přičemž zachovává původní paropropustnost.

## **4. POUŽITÉ PŘÍSTROJE A VYBAVENÍ**

### **Sušárna Binder**

Dehydratace chemosádrovce byla provedena v teplovzdušné sušárně BINDER FD 53, apt LINE II s maximální teplotou 300 °C. K nucené cirkulaci vzduchu je sušárna vybavená ventilátorem. Umožňuje programovat rychlost nárůstu teploty a čas vypnutí a to až do 99,59 hod. Samozřejmostí je i nepřetržitý provoz.

### **Váhy Kern**

Na měření hmotností byly použity váhy KERN s váživostí do 12 000 g a s přesností 0,01 g.

## **Vicatův přístroj**

Na určení počátku a doby tuhnutí sádrové kaše byl použit Vicatův přístroj. Postup probíhal dle ČSN 72 2301: Sádrová pojiva. Klasifikace.

Část Vicatova přístroje, konkrétně prstenec, byla použita na zkoušku rozlití sádrové kaše, stanovení normální konzistence. Postup zkoušky souhlasně probíhal dle ČSN 72 2301: Sádrová pojiva. Klasifikace.

## **Difraktograf Empyrean**

RTG difrakční analýza byla provedena na difraktografu od firmy PANalytical s PIXcel3D detectorem za podmínek:

- záření Cu K-alpha
- vlnová délka 1,54184 Å
- napětí (kV/mA: 45/40)
- liniový scan
- čas na krok 157,845 s
- velikost kroku 0,0131 °

## **Difraktograf Philips PW 1130/1370**

- záření Cu K-alpha
- vlnová délka 1,5405 Å
- napětí (kV/mA: 40/25)

## **Elektronový mikroskop**

Mikroskopické snímky byly pořízeny pomocí mikroskopu REM Mira 3 od firmy TESCAN. Mikroskop umožňuje zvětšení v rozmezí 2krát až 1000000krát. Přístroj je vybavený detektory SE, BSE, CL a LVSTD pro práci ve vysokém (tlak  $9 \cdot 10^{-3}$  Pa) a nízkém (tlak 7 až 500 Pa) vakuu. Na jedno naplnění přístroje je možné sledovat

až 7 vzorků. Mikroskop je doplněný o EDX analyzátor Bruker na prvkovou analýzu. Přístroj umožňuje měření vzorků v přirozené podobě, tedy i vlhké vzorky.

### **Zkušební formy**

Pro výrobu zkušebních těles byly použity normativní trojformy. Sádrové pasty byly plněny do trojforem, kde byl rozměr jednoho zkušebního trámečku (40 x 40 x 160) mm.

### **Zatěžovací lis**

Zkoušení pevností probíhalo na zatěžovacím lisu. Při zkoušení pevností v tahu za ohybu bylo rozpětí lisu nastaveno na 10 kN s přesností  $\pm 0,05$  kN, pro zkoušení pevnosti v tlaku v rozpětí 40 kN s přesností  $\pm 1$  kN.

### **pH metr**

Pro zjišťování pH laboratorně připravených sádrových tvarovek byl použit pH-metr Mettler Toledo Easy 21.

## **5. VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ**

### **5.1 Příprava beta sádry z druhotných surovin**

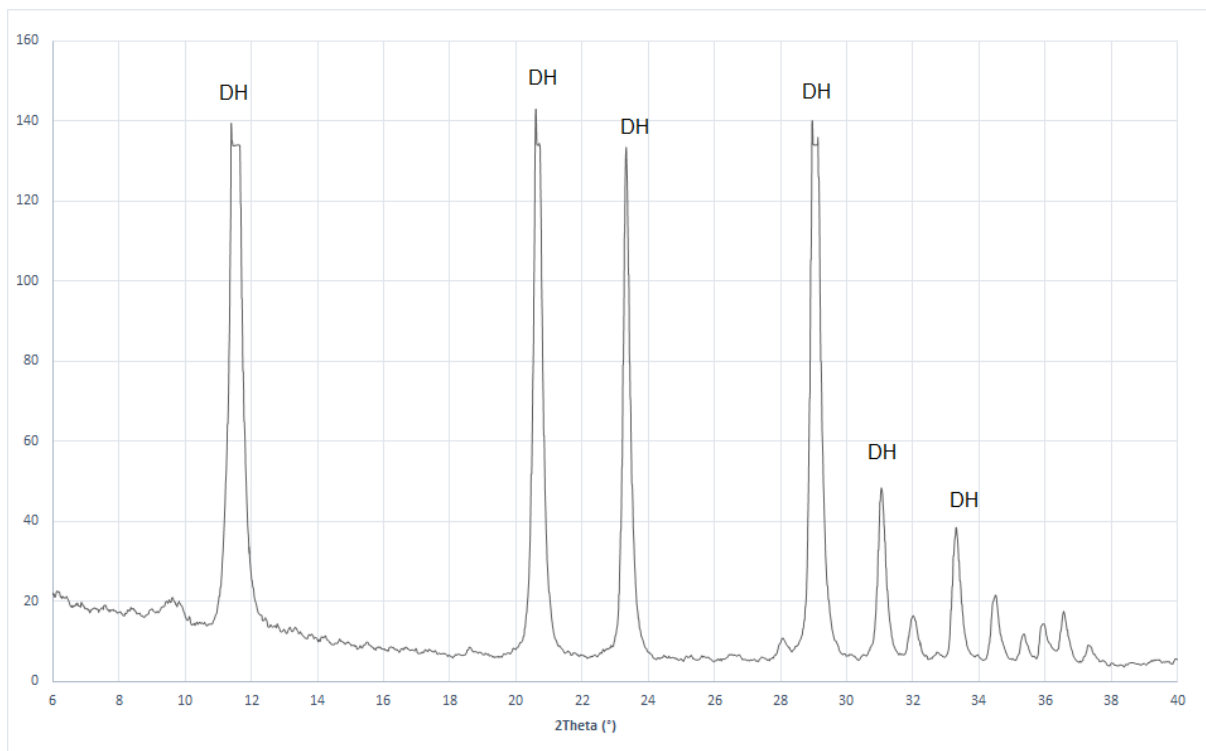
#### **5.1.1 Laboratorní příprava $\beta$ -sádry z druhotných surovin**

Z rešeršních prací provedených na ÚTHD FAST VUT Brno se jako nejvhodnější druhotná surovina pro přípravu  $\beta$ -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. Jemnozrná 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. Vzorek sádrovce byl

podroben chemické analýze viz Tab. 17. Bylo sledováno jeho mineralogické složení RTG difrakční analýzou (Obr. 27).

Tab. 17: Složení chemosádrovce Pregips

složka	obsah [% hmot.]
CaSO <sub>4</sub> ·2 H <sub>2</sub> O	86,56
CaCO <sub>3</sub> + MgCO <sub>3</sub>	< 0,1
SiO <sub>2</sub> + NZ	0,53
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,06
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,12
TiO <sub>2</sub>	0,34
Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O	0,02
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	< 0,01
Fluoridy	< 0,01
ZŽ	12,25
Suma	100

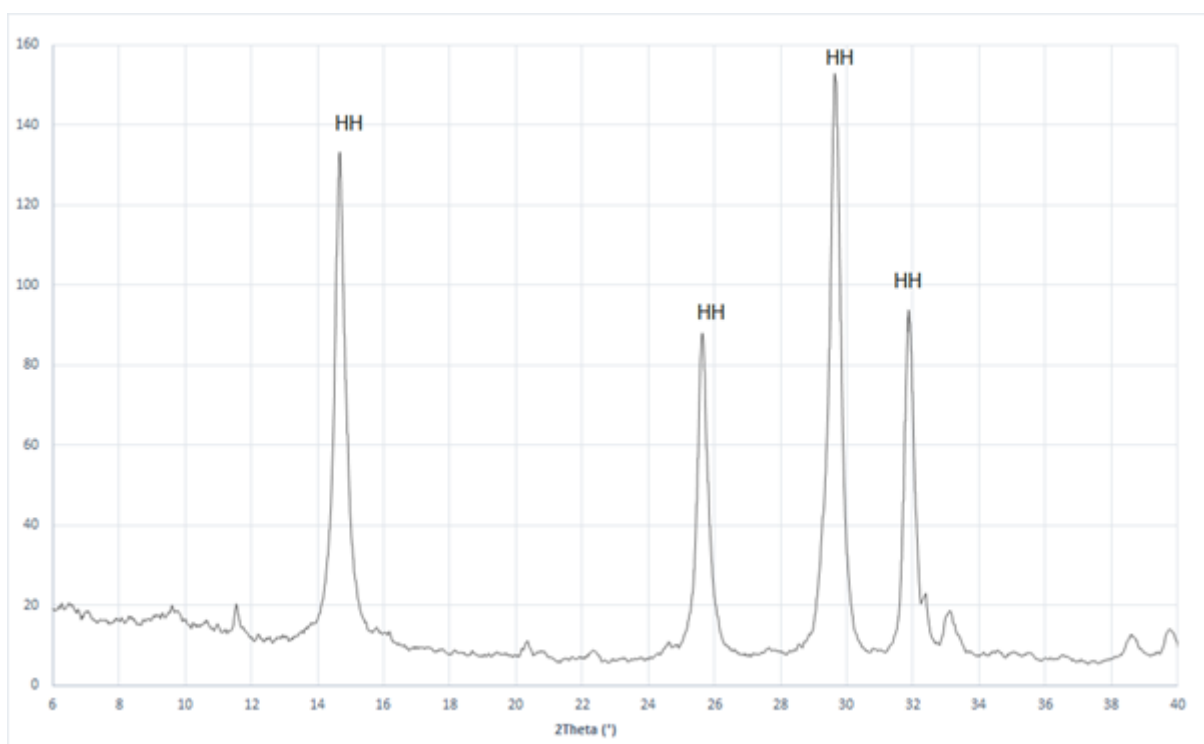


Obr. 27: Rentgenogram chemosádrovce Pregips



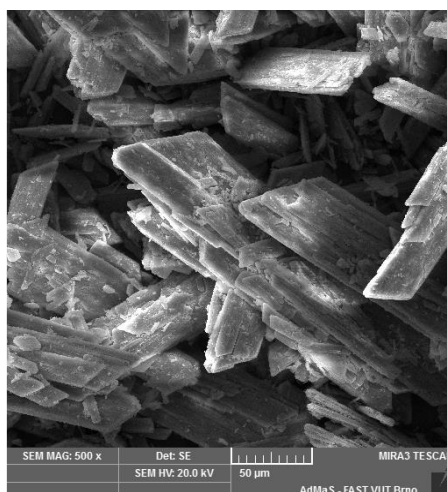
Vybraný průmyslový sádrovec Pregips se vyznačuje vysokou čistotou a jemnou zrnitostí.

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 Obr. 28.



Obr. 28: Rentgenogram laboratorně připravené beta sádry z chemosádrovce Pregips

RTG difrakční analýzou bylo ověřeno, že připravený vzorek obsahuje pouze difrakční linie hemihydrátu (HH) (Obr. 28). Na snímku z elektronového mikroskopu (Obr. 29) jsou viditelná porušení struktury zrn, jež jsou způsobena odchodem hydrátové vody ve formě páry. Struktura zrna se narušila a rozlístkovala v rovině  $\{0,1,0\}$ .



Obr. 29: Rozlístkovávaná struktura zrn laboratorně vyrobené beta sádry z druhotných suroviny (500 x)

Výsledkem byla laboratorně připravená maltovina, která svými vlastnostmi a chováním odpovídala beta sádře dobré kvality, viz Tab. 18.

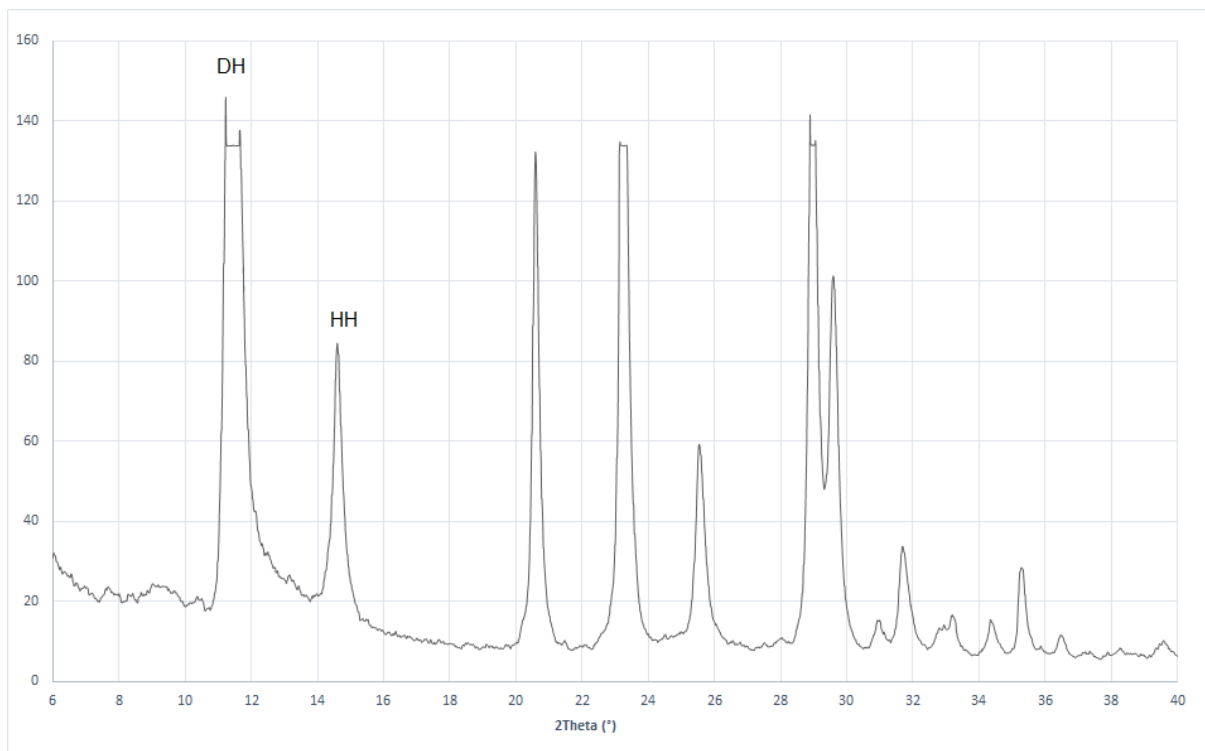
Tab. 18: Technologické vlastnosti laboratorně připravené sádrové maltoviny

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

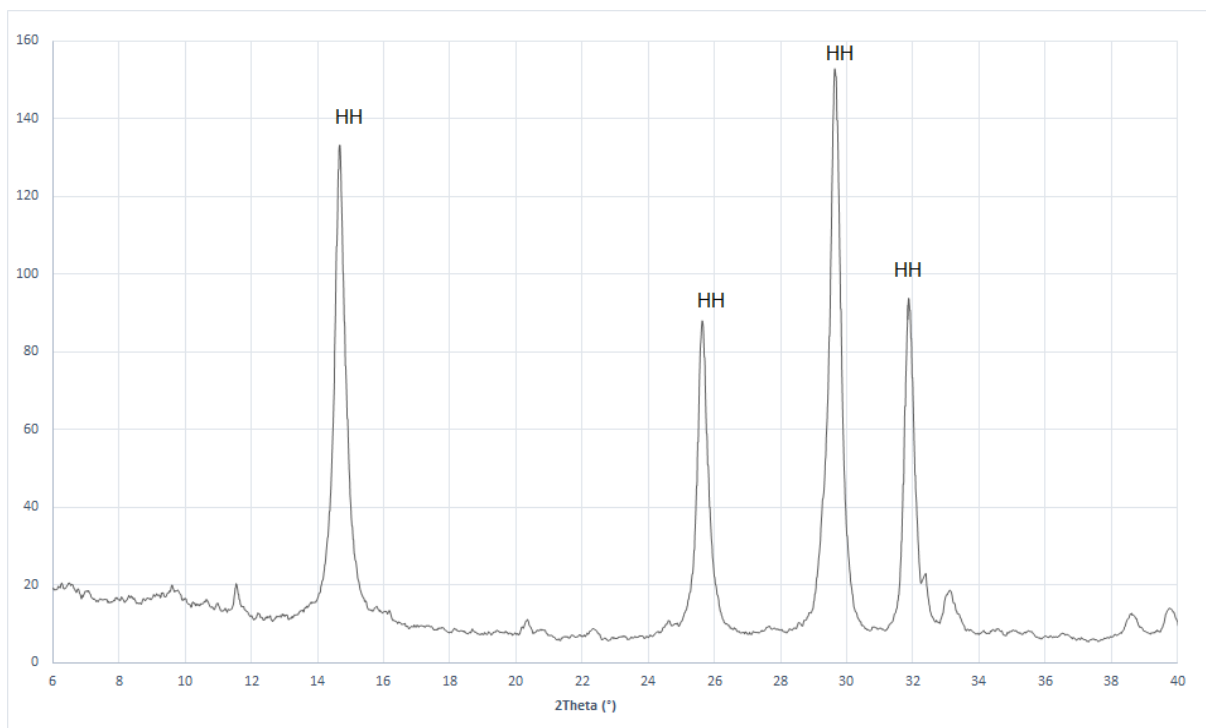
### 5.1.2 Optimalizace kalcinačního procesu laboratorně připravené $\beta$ -sádry z druhotných surovin

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

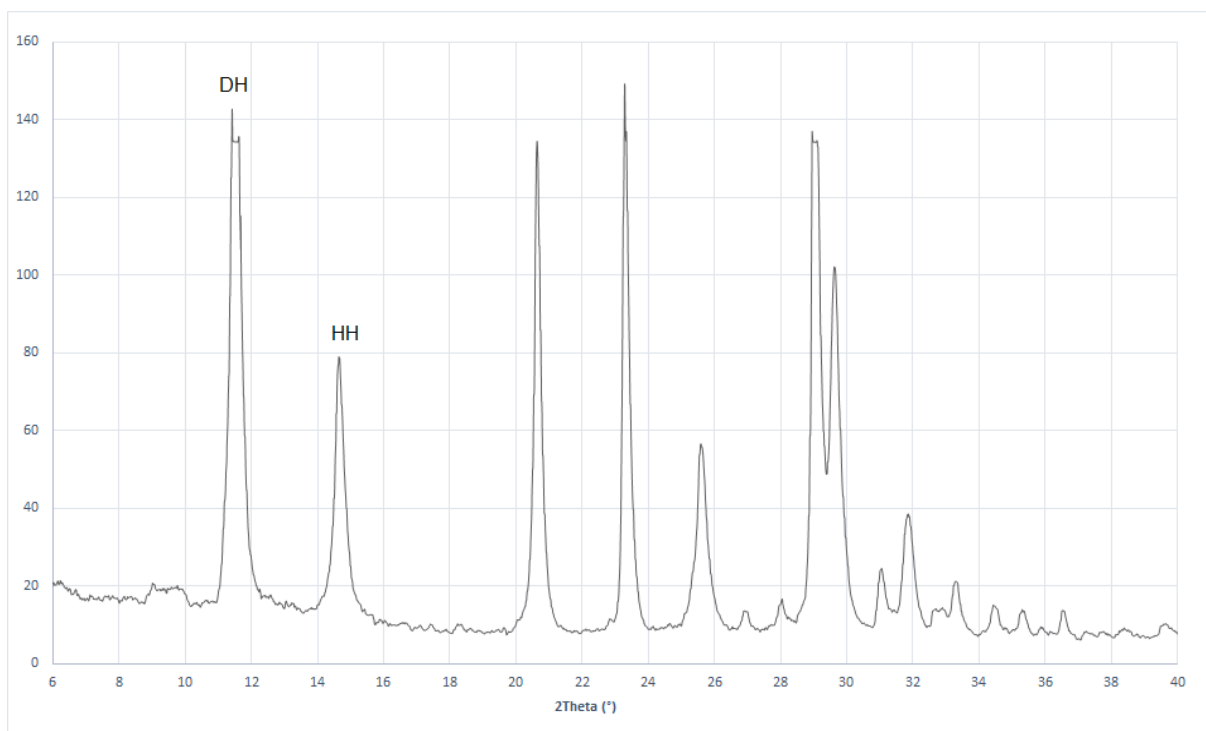
analýzou, viz rentgenogramy Obr. 30 až Obr. 34. Jako referenční vzorek byla zvolena komerčně vyráběná beta sádra.



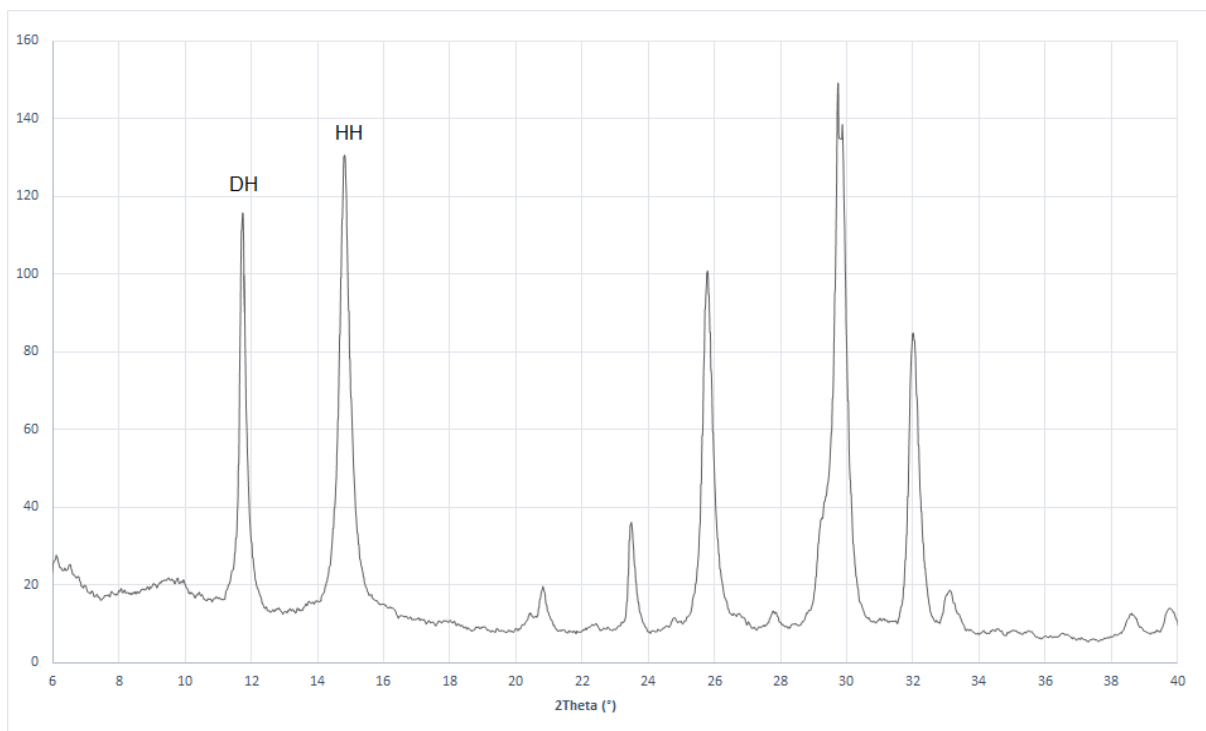
Obr. 30: Průběh dehydratace sádrovce teplotním režimem 130 °C po 15 min dehydratace



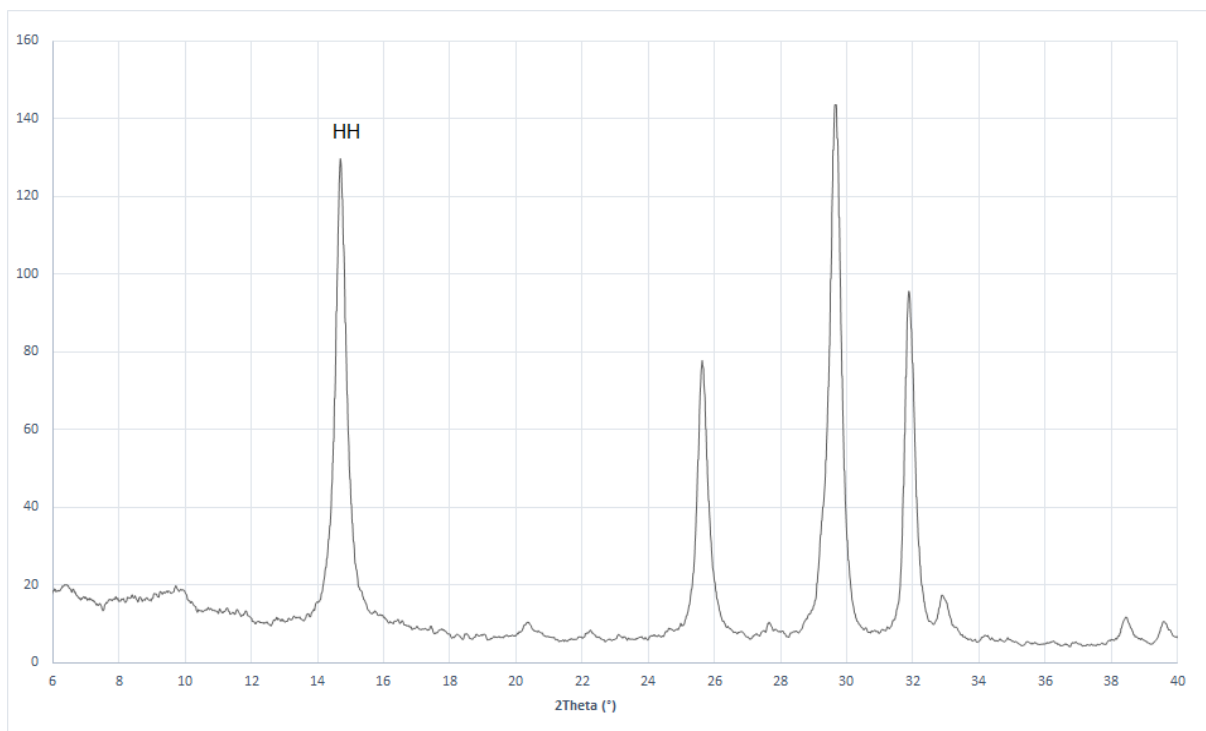
Obr. 31: Průběh dehydratace sádrovce teplotním režimem 130 °C po 30 min dehydratace



Obr. 32: Průběh dehydratace sádrovce teplotním režimem 105 °C po 2 hod dehydratace



Obr. 33: Průběh dehydratace sádrovce teplotním režimem 105 °C po 4 hod dehydratace



Obr. 34: Průběh dehydratace sádrovce teplotním režimem 105 °C po 5,5 hod dehydratace

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 Tab. 19.

Tab. 19: 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 <sup>3</sup> ]			
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 kalcinace 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.

### 5.1.3 Poloprovozní příprava $\beta$ -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 určená 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.

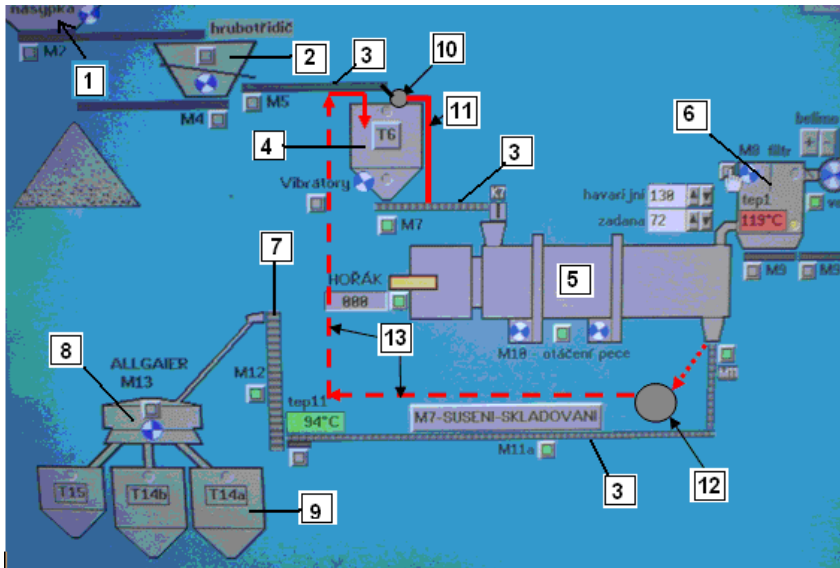
Rychlost posunu materiálu sušárnou je obecně řízen jejím sklonem a počtem otáček. Jelikož sklon rotačky není měnitelný, může být posun řízen výhradně počtem otáček. Pro stávající sušení kameniva je udržován chod sušárny v režimu 3 ot/min, při němž doba průchodu materiálu činí cca 10 minut. Tato doba však naprosto nekorresponduje 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 (Obr. 35, Obr. 36). Z tohoto důvodu byla pro poloprovozní zkoušku sušicí linka doplněna pneumatickou dopravní cestou, která nahrazovala šnekový dopravník a elevátor.



Obr. 35: Kalcinační linka - celkový pohled



Legenda:

- 1 - násypka
- 2 - primární třídíč
- 3 - pásový dopravník
- 4 - předzásobní silo
- 5 - rotační sušárna
- 6 - filtr
- 7 - korečkový dopravník
- 8 - sekundární třídíč
- 9 - zásobní sila
- 10 - šnekový dopravník
- 11 - bypass
- 12 - dopravní pneumatické zařízení
- 13 - pneumatická dopravní cesta

Obr. 36: Kalcinační linka - schéma

Po provedených úpravách pak probíhal proces poloprovozní výroby sádry takto: surovina byla dávkována do násypky sušicí linky (1), odkud postupovala přes primární třídíč (2) pásovým dopravníkem (3) do předzásobního sila (4) nad rotační sušárnou



(5). Po průchodu sušárnou byl vzorek ukládán do zásobního sila (9). Jak je uvedeno výše, bylo pro vyloučení prašnosti a zachování tepelné kapacity materiálu po prvním průchodu sušárnou k transportu meziprojektu zpět do předzásobního sila nad rotačkou navrženo a nainstalováno pneumatické dopravní zařízení (13).

Po prvním i druhém průchodu sušárnou byl odebrán vzorek vzniklého produktu, který byl podroben stanovení mineralogického složení RTG-difrakční analýzou, viz Obr. 37, Obr. 38. U vzorku odebraného po druhém průchodu sušárnou byly dále stanoveny technologické vlastnosti, které byly porovnány s vlastnostmi referenčního vzorku komerčně vyráběné sádry viz Tab. 20. 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.

Pro stanovení obsahu hemihydrátu a zbytkového sádrovce byly navrženy výpočtové vztahy, odvozené ze stanovení hmotnosti kalcinovaného vzorku a téhož vzorku po jeho laboratorním žíhání do konstantní hmotnosti.

$$DH = \frac{172}{36} \cdot \frac{(145 \cdot w - 9 \cdot 100)}{\left(145 - 9 \cdot \frac{172}{36}\right)} \quad (18)$$

$$HH = 100 - DH \quad (19)$$

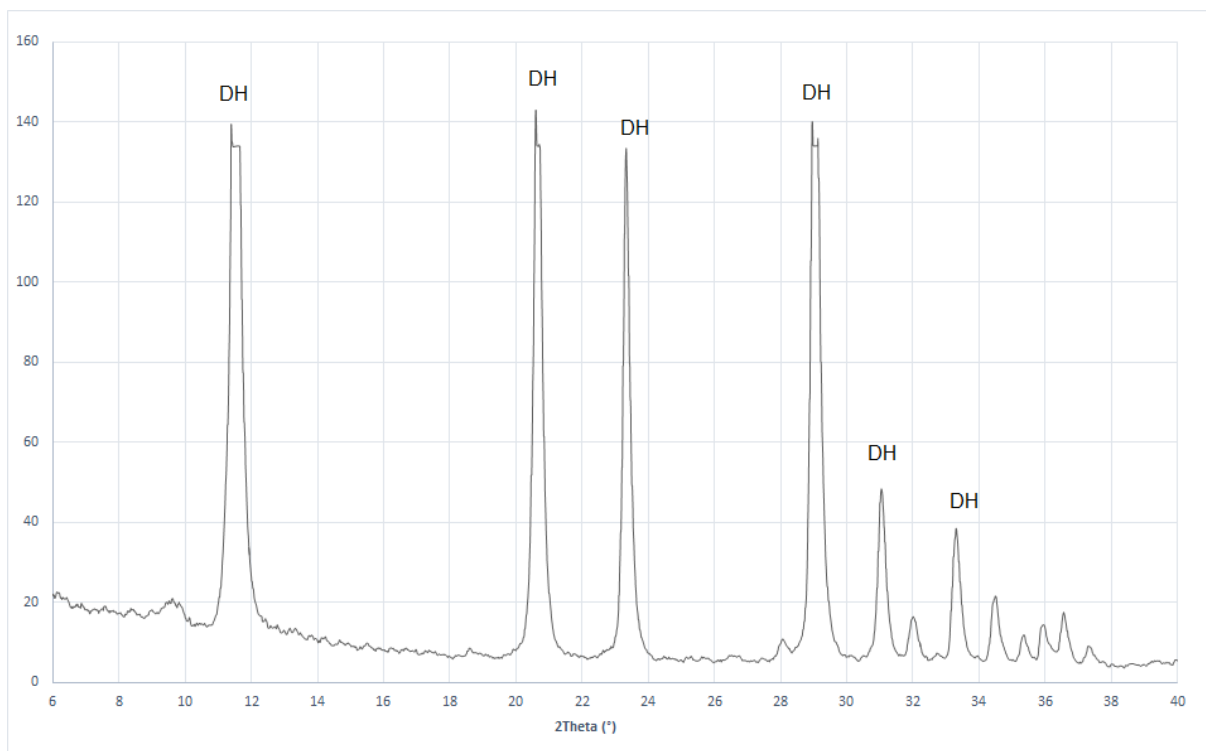
DH - obsah zbytkového sádrovce [%]

HH - obsah vzniklého hemihydrátu [%]

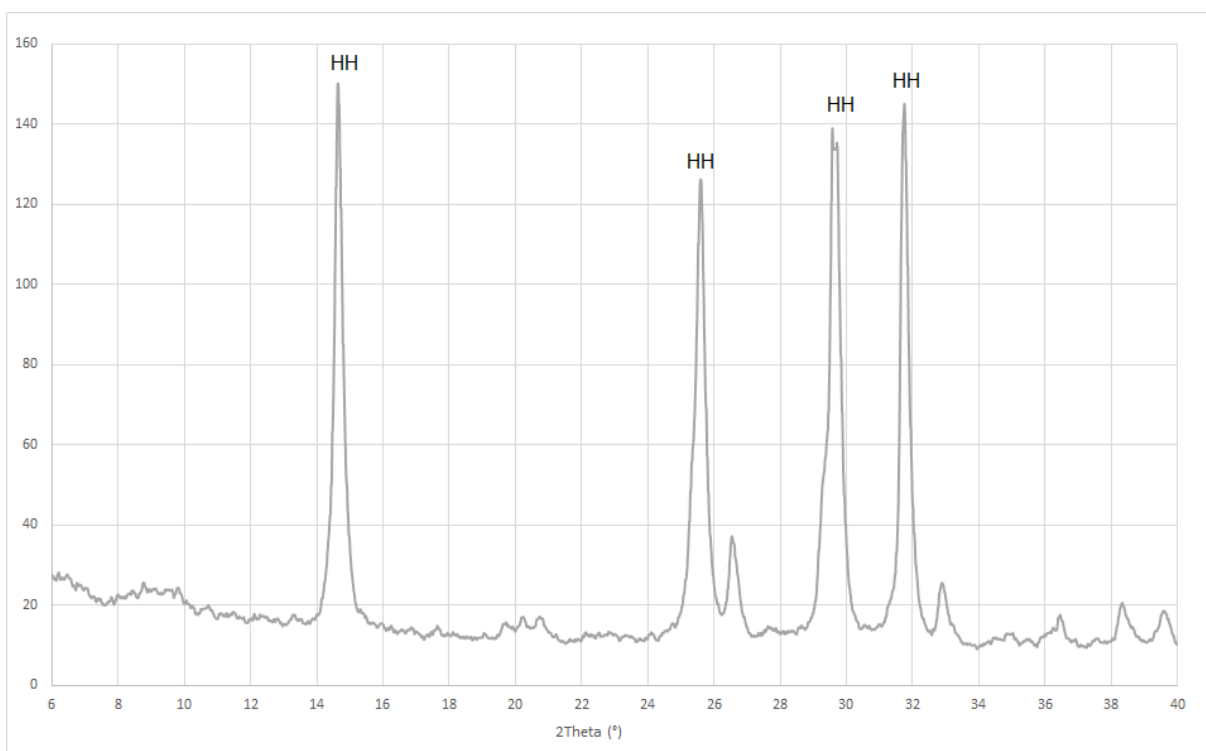
w - ztráta vlhkosti žíháním [%]

Při odběru, provedeném během poloprovozní zkoušky po druhém průchodu suroviny rotační pecí, činila navážka vzorku před vyžíháním  $m_w$  46,14 g a hmotnost vzorku po vyžíhání do konstantní hmotnosti  $m_s$  43,15 g. Z nich vypočtené hodnoty byly:

- Ztráta vlhkosti žíháním 6,48 %.
- Obsah dihydrátu 1,86 %.
- Obsah hemihydrátu 98,14 %.



Obr. 37: Rentgenogramy poloprovozně vyrobené sádry po prvním průchodu sušárnou kameniva



Obr. 38: Rentgenogramy poloprovozně vyrobené sádry po druhém průchodu sušárnou kameniva

Tab. 20: 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 <sup>3</sup> ]		
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 sádrrou, lze konstatovat, že poloprovozně vyrobený produkt z chemosádrovce Precheza Přerov a.s. představuje přírodní bílou beta sádru dobré kvality.

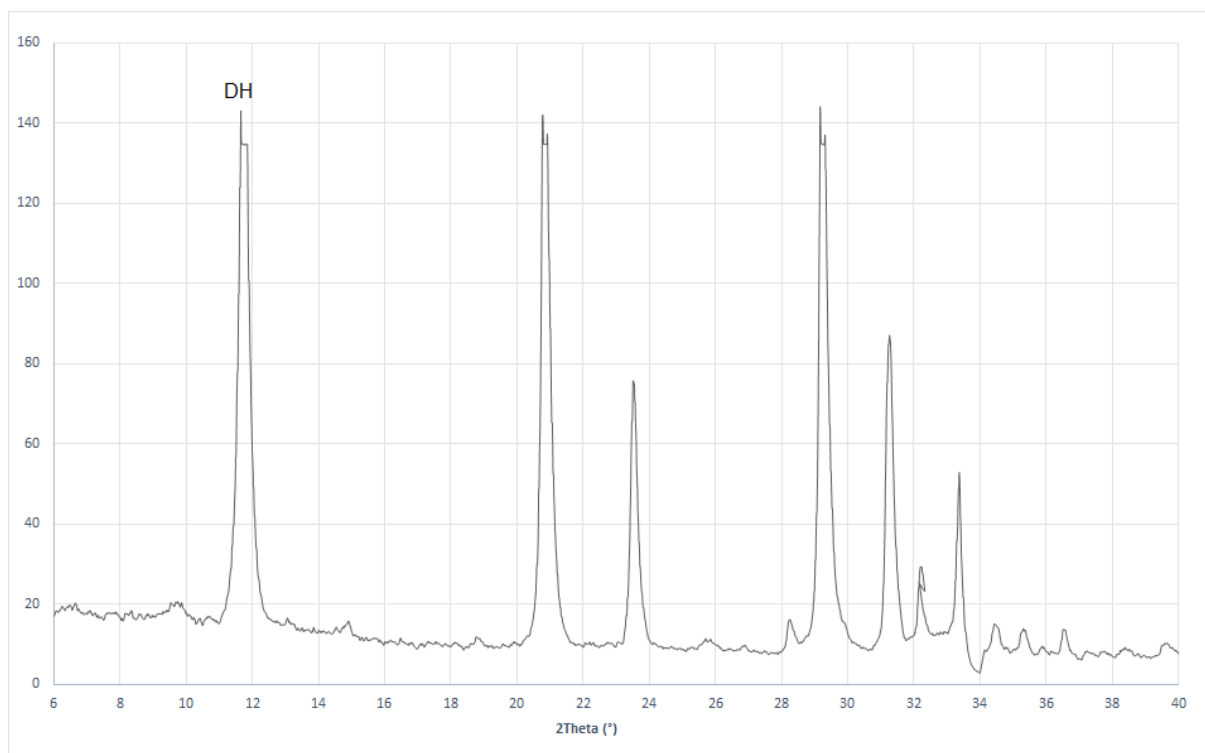
## 5.2 Modifikace konzistence beta sádry

### 5.2.1 Modifikace laboratorně připravené beta sádry komerčními plastifikátory

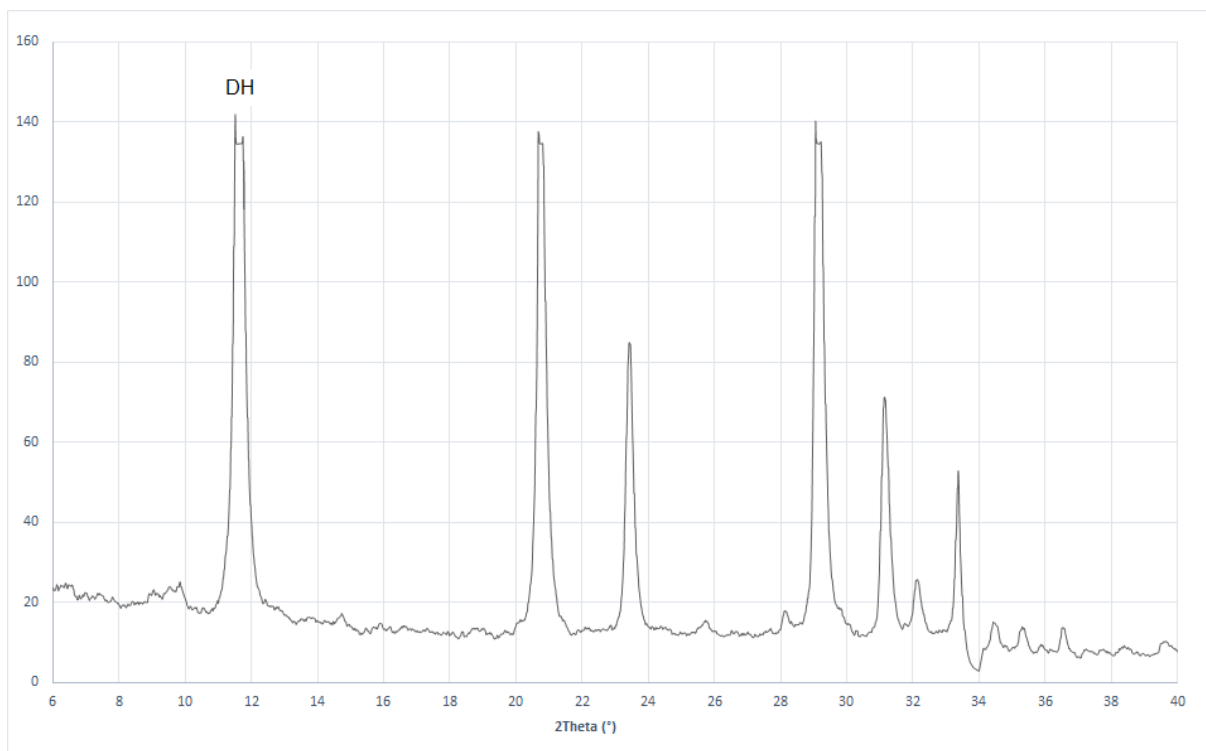
Pro zkoušky modifikace komerčními plastifikátory byla použita beta sádra laboratorně připravená za teploty 130 °C.

Laboratorně vyrobená beta sádra byla modifikována vybranými ztekucovacími (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

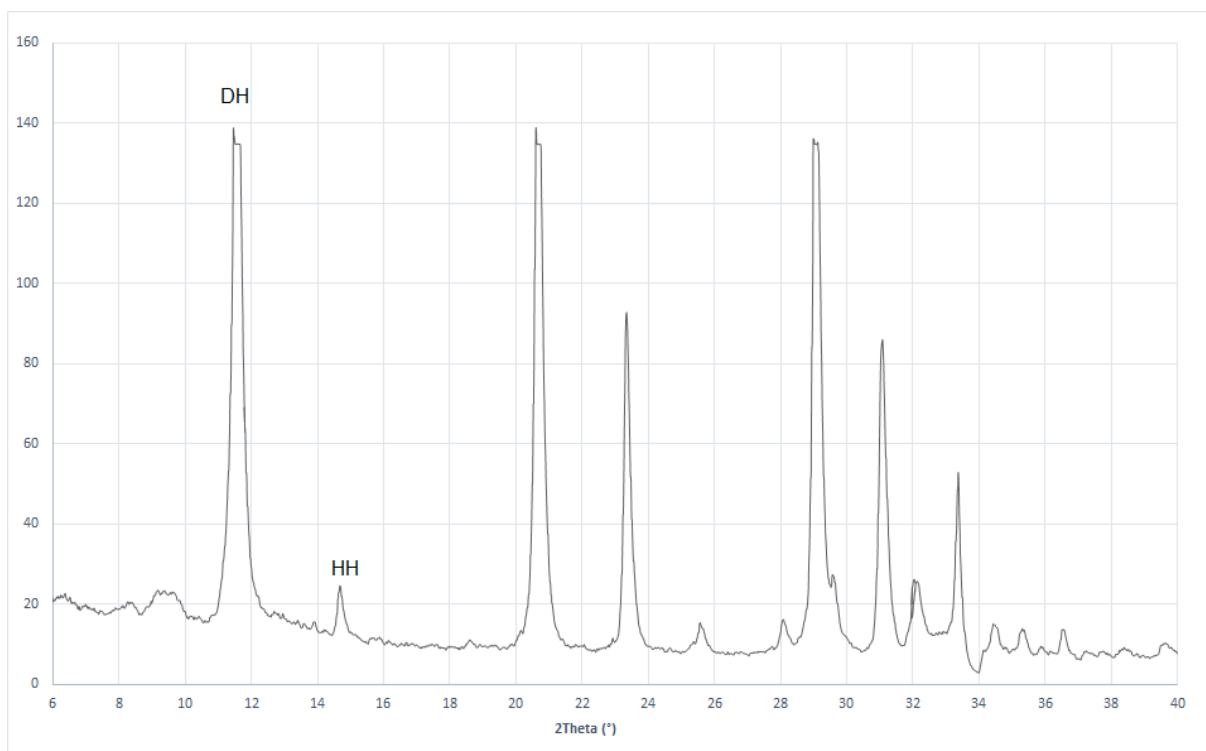
dávkovány v množství 0,5, 1 a 3 % na hmotnost sádry. Kapalné plastifikátory byly dávkovány v množství 0,5 a 1 % na hmotnost sádry. Výjimku tvořil plastifikátor Biotech, který byl dávkován v množství 0,3 % a 0,6 % hm. na sádru, viz výše. Připravené vzorky byly podrobeny zkouškám normou sledovaných technologických 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 (Obr. 39 až Obr. 46). V následujících Tab. 21 až 24 jsou uvedeny výsledky technologických zkoušek při optimálních dávkách ztekucovače, 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.



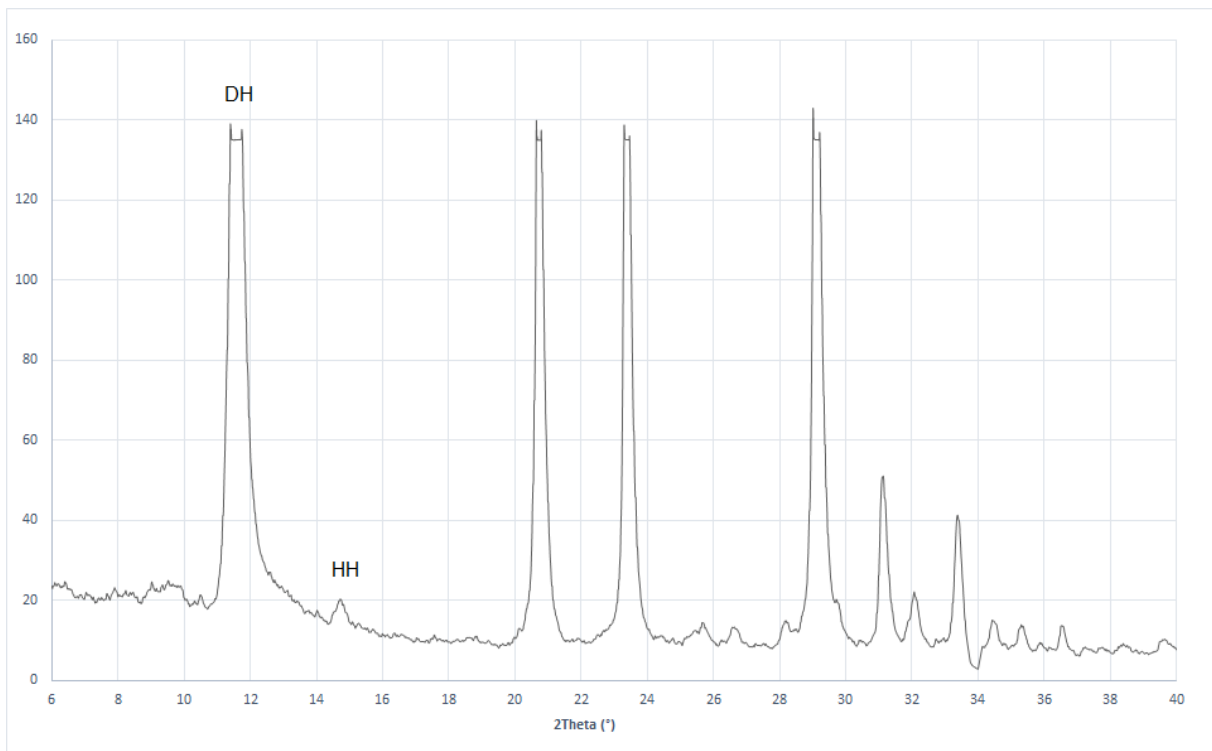
Obr. 39: Rentgenogram sádrové pasty hydratované 2 hodiny, modifikované plastifikátorem Sika v dávce 3 %



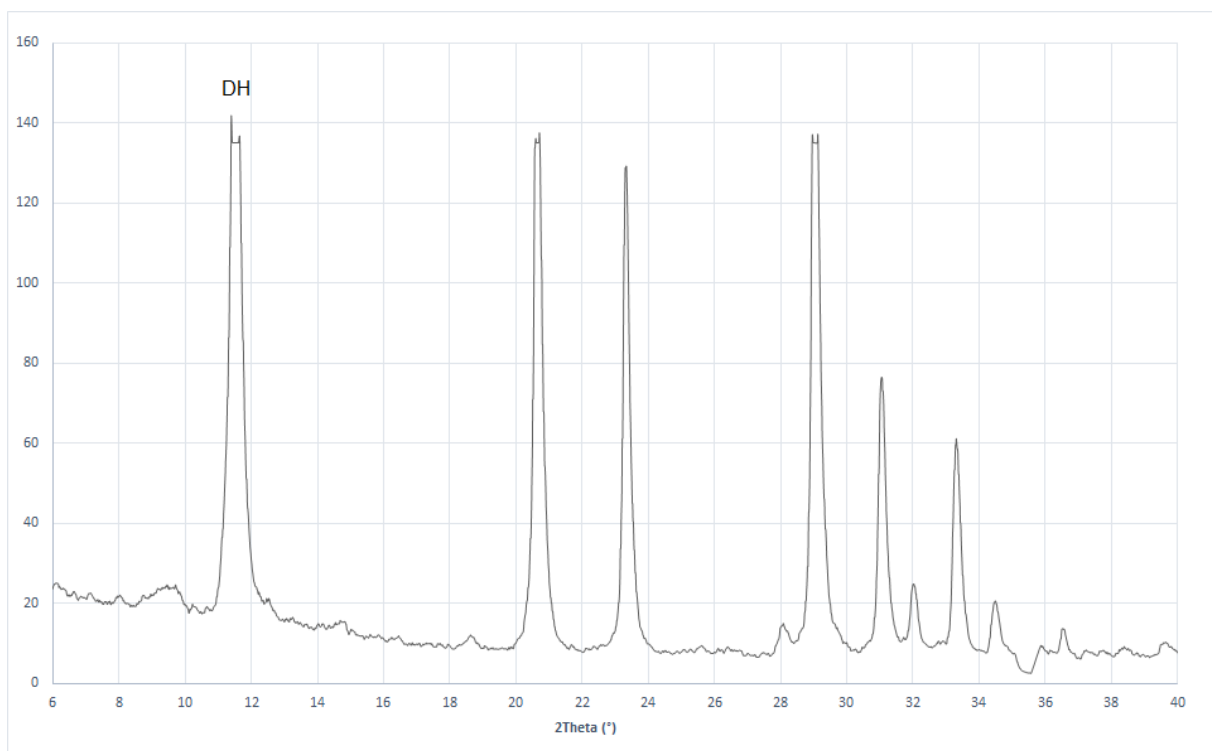
Obr. 40: Rentgenogram sádrové pasty hydratované 2 hodiny, modifikované plastifikátorem Melment F10 v dávce 3 %



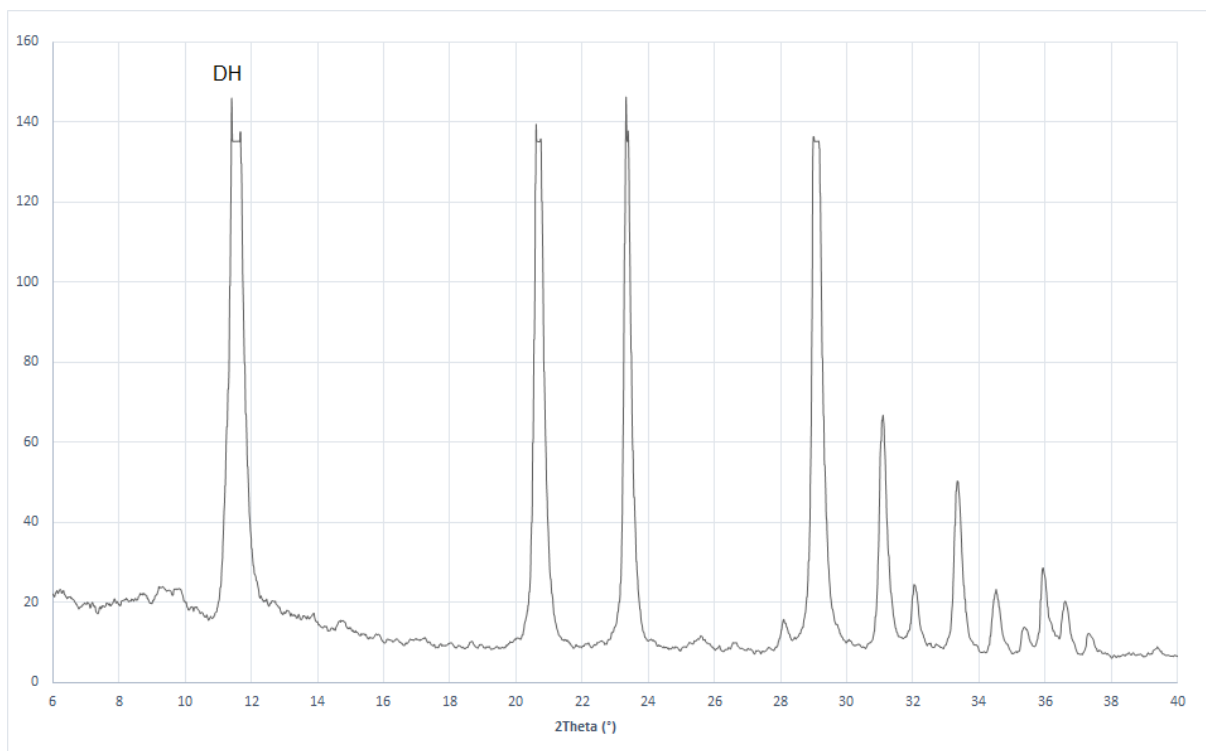
Obr. 41: Rentgenogram sádrové pasty hydratované 2 hodiny, modifikované plastifikátorem ChrysoFluid GT v dávce 3 %



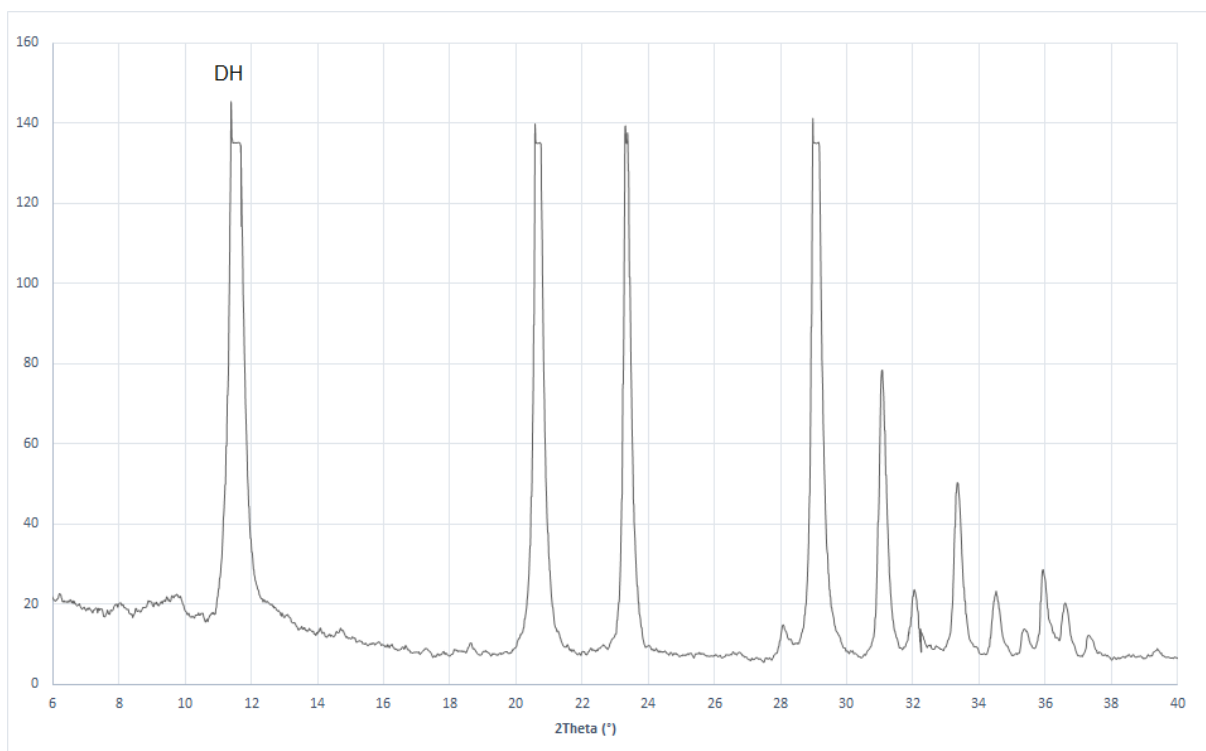
Obr. 42: Rentgenogram sádrové pasty hydratované 2 hodiny, modifikované plastifikátorem Biotech v dávce 0,6 %



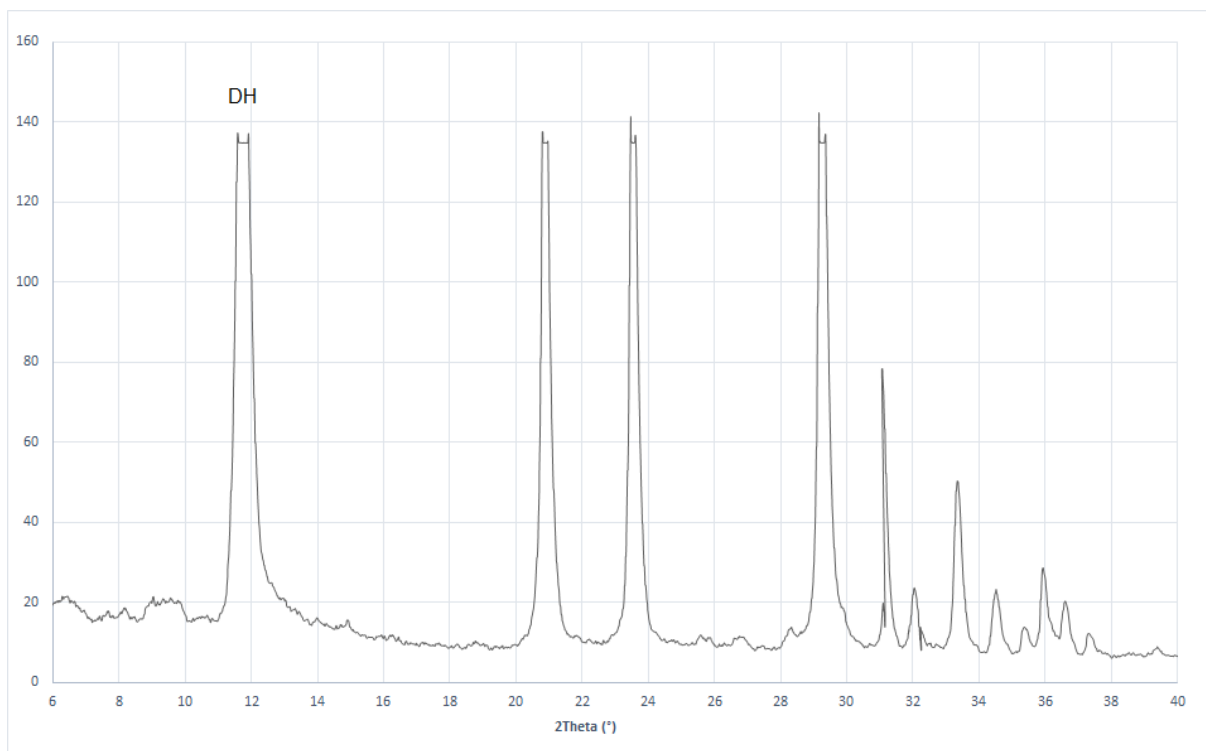
Obr. 43: Rentgenogram sádrové pasty hydratované 2 hodiny, modifikované plastifikátorem Stachement 6358 v dávce 1 %



Obr. 44: Rentgenogram sádrové pasty hydratované 2 hodiny, modifikované plastifikátorem Sika ViscoCrete 1035 v dávce 1 %



Obr. 45: Rentgenogram sádrové pasty hydratované 2 hodiny, modifikované plastifikátorem Sikament Multimix v dávce 1 %



Obr. 46: Rentgenogram sádrové pasty hydratované 2 hodiny, modifikované plastifikátorem Stacheplast v dávce 1 %



Tab. 21: 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
28 dnů	3,6	4,8	5,8	2,0	4,6
V tahu za ohybu					
2 hod	1,0	0,7	1,1	0,6	0,7
28 dnů	1,9	2,5	2,3	1,4	2,7
Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]					
2 hod	1630	1500	1530	1460	1470
28 dnů	820	850	920	890	980

Tab. 22: 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 <sup>3</sup> ]					
2 hod	1630	1570	1520	1480	1500
28 dnů	820	1100	1080	900	990

Tab. 23: 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 rozlitem [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 <sup>3</sup> ]						
2 hod	1630	-	-	1650	-	-

Tab. 24: 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 %
Tuhnutí Normální konzistence [-]	1,05	0,40	0,40	0,60	0,80	0,90
Konzistence rozlitem [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 <sup>3</sup> ]						
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 Stachment 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.

- V odzkoušené škále koncentrací plastifikační přísady Melflux 6681F se jako nejvhodnější jeví dávka ve výši 0,25 %. Při této koncentraci dochází k rapidnímu snížení potřeby záměsové vody, a prodlužuje se dobu tuhnutí. Současně hodnoty naměřených pevností v tlaku a v tahu za ohybu dosahují až trojnásobku pevností referenčního vzorku.

- V případě dávkování plastifikační přísady Melflux 4930F se shodně s předešlou přísadou jeví jako nejvhodnější dávkování 0,25 %. Při této dávce dochází ke snížení záměsové vody oproti referenčnímu vzorku, prodloužení dob tuhnutí, naměřené hodnoty pevností jsou až skoro čtyřnásobné.

- 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.

## 5.2.2 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 Tab. 25. Vzorky pro stanovení pevnostních charakteristik byly nejprve upraveny vysušením v sušárně s izotermickou výdrží 40 °C po dobu 1 hodiny.

Tab. 25: Technologické vlastnosti beta sádry modifikované vybranými solemi

Modifikující sůl 0,027 mol / 100g sádry	Sledovaná vlastnost						
	Vodní součinitel [-]	Rozlití koláče [mm]	Tuhnutí [min]		Pevnost [MPa]		Objemová hmotnost [kg.m <sup>-3</sup> ]
			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 <sub>2</sub>	1,0	187	-	-	-	-	-
MgCl <sub>2</sub>	0,9	180	10,5	14,0	3,0	1,0	1450
CaCl <sub>2</sub>	1,0	184	-	-	-	-	-
CaCl <sub>2</sub>	0,9	175	10,5	15,0	3,0	1,2	1480
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1,0	-	-	2,5	-	-	-
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1,0	-	-	4,5	-	-	-
MgSO <sub>4</sub>	1,0	182	-	-	-	-	-
MgSO <sub>4</sub>	0,9	175	8,0	9,5	3,0	1,0	1480
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	1,0	165	8,0	9,5	-	-	-
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	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 rozemíchat 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.  $\text{Ca}^{2+}$  a  $\text{Mg}^{2+}$ , 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  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{CO}_3$  a  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Přitom nejúčinnější ztekucovací efekt byl pozorován u solí s kationy alkalických zemin  $\text{Ca}^{2+}$  a  $\text{Mg}^{2+}$ , 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  $\text{Na}^+$  než  $\text{K}^+$ . 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  $\text{Ca}^{2+}$  a  $\text{Mg}^{2+}$ , 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.

## 5.3 Příprava suchých maltových směsí

### 5.3.1 Příprava 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), jejichž nejdůležitější vlastnosti jsou uvedeny v Tab. 26.

Tab. 26: Vlastnosti laboratorně připravených sádrových omítek

Sledované vlastnosti	Sádrová omítka hlazená	Sádrová omítka točená
Záměsová voda [%]	46	25
Zpracovatelnost [min]	> 60	> 60
Objemová stálost	bez trhlin	bez trhlin
Pevnost [MPa]		
V tlaku 7 dnů	2,3	2,3
V tahu za ohybu 7 dnů	0,9	1,2
Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ] 7 dnů	1220	1290
Aplikační		
Homogenita malty	dobrá	dobrá
Stálost konzistence malty	dobrá	dobrá
Zpracování povrchu omítky	snadné	snadné
Tvorba trhlin	nejsou	nejsou
Barva	bílá	bílá

Na základě dosažených laboratorních výsledků lze konstatovat, že vyvinuté sádrové omítky vykázaly aplikační i technologické vlastnosti plně srovnatelné s obdobnými výrobky na našem trhu.

### 5.3.2 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 tř. 8. Optimalizací dávkování jednotlivých přísad se dospělo ke vzorku, jehož technologické a aplikační vlastnosti byly laboratorně porovnány s komerčně vyráběným vzorkem tmelu.

Tab. 27: Vlastnosti laboratorně připraveného tmelu

Sledované vlastnosti	Komerční tmel	Laborat. tmel
Záměsová voda [%]	48	50
Otevřený čas [min]	50	70
Opravný čas [min]	4	3,5
Objemová stálost	bez trhlin	bez trhlin
Pevnost [MPa]		
V tlaku 7 dnů	2,5	2,6
14 dnů	6,6	6,2
V tahu za ohybu		
7 dnů	1,7	1,8
14 dnů	3,7	3,4
Přidržitost [MPa]		
7 dnů	0,2	0,2
14 dnů	0,3	0,3
Aplikační		
Rozmíchání s vodou	velmi snadná	snadná
Homogenita	velmi dobrá	velmi dobrá
Lepivost	nízká	nízká
Barva	bílá	bílá



Z naměřených hodnot je patrné, že laboratorně připravený tmel se svými technologickými i aplikačními vlastnostmi blíží vlastnostem komerčně vyráběného tmelu.

### **5.3.3 Premix sádrového pojiva**

Stavební veřejnost se zejména z ekonomických důvodů stále více přiklání k universálnějším 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.

Tab. 28: Vlastnosti laboratorně připraveného sádrového premixu

Sledované vlastnosti	Směsná retenční přísada		
	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3
Záměsová voda [-]	0,54	0,52	0,47
Otevřený čas [min]	70	70	70
Opravný čas [min]	4	4	3,5
Objemová stálost	bez trhlin	bez trhlin	bez trhlin
Pevnost [MPa]			
V tlaku 7 dnů	3,8	4,0	4,1
14 dnů	6,2	6,5	6,4
V tahu za ohybu			
7 dnů	1,8	1,8	1,9
14 dnů	3,4	3,6	3,7
Přidržitost [MPa]			
7 dnů	0,2	0,2	0,3
14 dnů	0,3	0,3	0,3
Aplikační			
Rozmíchání s vodou	snadné	snadné	velmi snadné
Homogenita	velmi dobrá	velmi dobrá	velmi dobrá
Lepivost	zvýšená	střední	nízká
Barva	bílá	bílá	bílá
Zpracování povrchu omítky	snadné	snadné	snadné
Tvorba trhlin při vysychání omítky	nejsou	nejsou	nejsou

Všechny vzorky svými technologickými vlastnostmi vyhověly jak požadavku na pojivo sádrových omítek, tak i požadavku na sádrový tmel. Z hlediska aplikačních vlastností nevyhověl vzorek 1 na lepivost sádrového tmelu, která má být co nejnižší, zároveň nevyhověl vzorek 3 z důvodu zhoršené proveditelnosti povrchové úpravy. Na základě naměřených hodnot a zjištěných vlastností bylo jako nejvhodnější vyhodnoceno složení vzorku 2.

### 5.3.4 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 (Obr. 47).



Obr. 47: Technologická linka přípravy suchých maltových směsí

Z poloprovozně vyrobených směsí byly následně odebrány vzorky k provedení technologických a aplikačních zkoušek viz Tab. 29.

Tab. 29: Technologické a aplikační vlastnosti poloprovozně připravených suchých maltových směsí

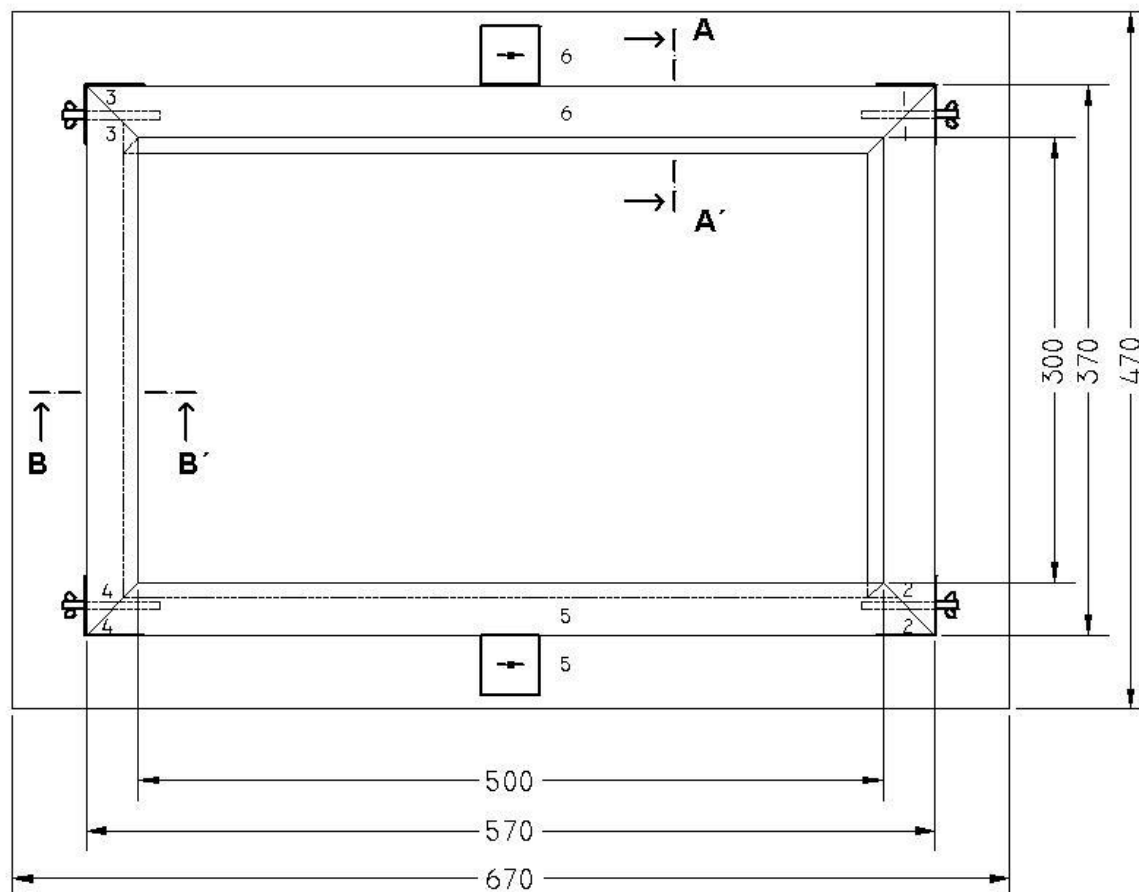
Sledované vlastnosti	Sádrová omítka hlazená	Sádrová omítka točená	Sádrový tmel	Sádrový premix
Záměsová voda [%]	49	42	48	52
Zpracovatelnost [min]	< 120	< 120	< 120	< 120
Objemová stálost	bez trhlin	bez trhlin	bez trhlin	bez trhlin
Objemová hmotnost [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	1220	1290	1220	1210
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
Přidržnost [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

## 5.4 Příprava sádrových tvarovek

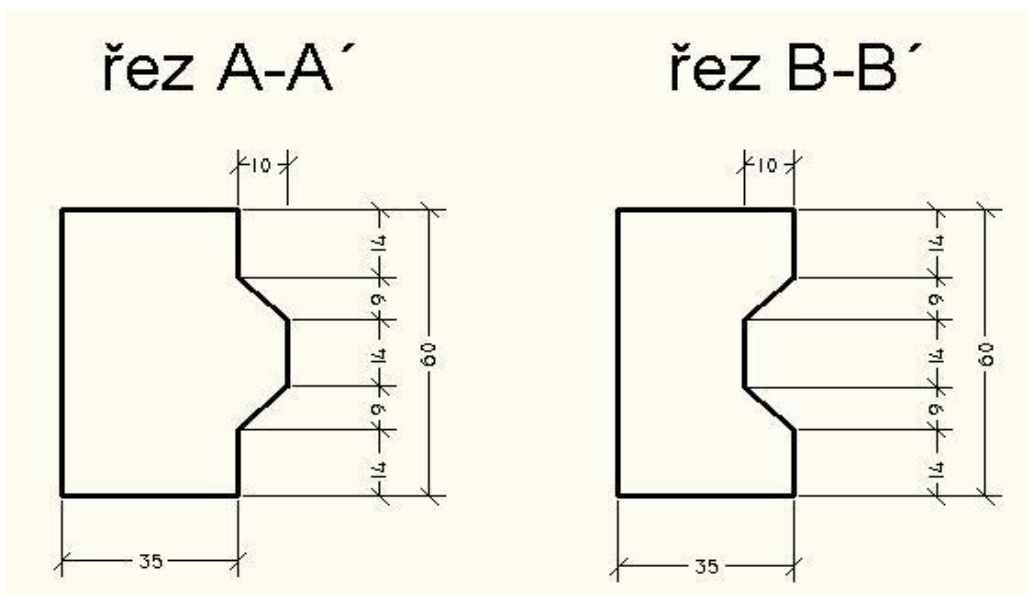
### 5.4.1 Konstrukce poloprovozní formy

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  $0,10$  m<sup>2</sup>). Následujícím kritériem byla co nejsnazší aplikace při zachování technických vlastností. Rozměry formy byly stanoveny tak, aby rozměry vlastní tvárnice po odformování byly  $500 \times 300$  mm s tloušťkou 60 mm (Obr. 48). Tvar bočnice byl navržen s ohledem na to, aby tvarovka mohla být opatřena perem a drážkou (Obr. 49). 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 vlija sádrová suspenze, po počátečním zatuhnutí došlo k seříznutí přesahu hmoty ocelovou lištou a po zatvrdnutí k demontáži formy.



Obr. 48: Půdorysný náčrt formy



Obr. 49: Řezy bočnicemi formy

#### 5.4.2 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 Tab. 30, Tab. 31. V případě rozměrů a rovinnosti jsou uvedeny aritmetické průměry naměřených hodnot.



Obr. 50: : Ukázka poloprovozní formy (vlevo) a výsledného produktu (vpravo)

Tab. 30: 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 <sup>3</sup> ]	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 Tab. 31.

Tab. 31: 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 <sup>3</sup> ]	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<sup>-3</sup>, 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<sup>-3</sup> 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.



### 5.4.3 Poloprovozní příprava sádrové tvarovky

V rámci poloprovozní přípravy sádrové tvarovky bylo nejprve nutné sestavit poloprovozní aparaturu (Obr. 51).

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 jejíchž kvadrantů byly instalovány rozebíratelné formy s vyměnitelnými nerezovými podložkami.



Obr. 51: Poloprovozní aparatura přípravy sádrové tvarovky

Sádra zhomogenizovaná s aditivy, 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 nejúčinnější 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 zarovnáán 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.

Tab. 32: 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 <sup>3</sup> ]	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 Tab. 32 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.

#### **5.4.4 Výstavba zkušební příčky z poloprovozně vyrobených prvků komplexního příčkového systému**

Zkušební příčka byla vystavena v prostorách poloprovozu ve velikosti cca (200 x 150) cm. V rámci přípravných prací byla nejprve vyrovnána podlaha pod příčkou pomocí tvrzeného polystyrenu a na obou koncích zamýšlené příčky byly instalovány U-profilý pro vertikální fixaci zdiva (Obr. 53). Poté byla příčka 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.



*Obr. 52: Příprava pro zdění*



*Obr. 53: Způsob spojování sádrových tvarovek*



*Obr. 54: Zdění příčky (vlevo), úprava povrchu sádrovým tmelem, sádrovou omítkou (vpravo)*

Vyzdřená příčka dále sloužila jako podklad pro aplikaci vyvinutého sádrového tmelu, pro aplikaci sádrové omítky a premixu (Obr. 54).

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 případné 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.

## 6. DISKUZE VÝSLEDKŮ

Jako nejvhodnější druhotná surovina pro přípravu síranových pojiv byl vybrán chemický sádrovec Pregips, jež byl nejprve podroben laboratorní přípravě a následně poloprovozní kalcinaci v rotační sušárně, primárně určené pro sušení a třídění kameniva.

Laboratorní příprava beta sádry probíhala v horkovzdušné sušárně za teploty 150 °C, což odpovídá přípravě sádry za normálních atmosférických podmínek. Následnou optimalizací kalcinačního procesu byly zvoleny dva teplotní režimy, a to 130 °C, jež modeluje teplotu na horkém konci rotační sušárny a 105 °C, jež modeluje teplotní podmínky na tzv. studeném konci rotační pece. Tímto postupem byl za pomoci RTG difrakční analýzy dokázán možný převod do poloprovozních podmínek, jelikož i při nízké teplotě došlo k úplné přeměně dihydrátu na hemihydrát.

Poloprovozní příprava beta sádry musela být z důvodu krátké délky rotační pece realizována dvojnásobným průchodem. Při prvním průchodu docházelo pouze k odchodu fyzikálně vázané vody, při druhém průchodu došlo k dokonalé kalcinaci. Prašnost při procesu přípravy byla odstraněna pneumatickou dopravou materiálu.

Z důvodu téměř lineární závislosti mezi potřebou vody pro přípravu kaše normální konzistence, ve smyslu nepřímé úměry, a konečnými pevnostmi, byla laboratorně připravená beta sádra dále modifikována ztekucujícími přísadami.

Prvotní experimenty byly uskutečněny na škále plastifikačních přísad primárně určených ke ztekucení cementových malt a betonů. Na základě naměřených hodnot byly ze skupiny práškových ztekucujících přísad jako neúčinnější vyhodnoceny plastifikátory Biotech, Sika ViscoCrete a Melflux, ze skupiny kapalných ztekucovadel byl jako neúčinnější vyhodnocen plastifikátor Stachement 6358. Přídavek průmyslových plastifikačních přísad řady Melflux měl výrazný vliv na ztekucení sádry, počátky a doby tuhnutí sádrové kaše. Jejich užitím bylo možné dosáhnout až pětinasobku hodnoty pevností oproti referenčnímu vzorku. Lze tedy konstatovat, že tímto způsobem lze připravit sádru, která je ekonomicky nenáročná na přípravu, dosahuje dobrých pevností a vyznačuje se i pro praxi žádoucím prodloužením doby tuhnutí.

Ze studia možného ztekucení sádrové suspenze způsobem zvýšení zeta potenciálu vyplynulo, že příznivý vliv mělo nejvíce použití  $MgCl_2$  a  $CaCl_2$ , přičemž ztekucení pomocí  $MgCl_2$  bylo poněkud lepší. Uvedené konstatování je v souladu s pořadím kationů v lyotropní řadě, kde se  $Mg^{2+}$  nachází před  $Ca^{2+}$  a tedy zvyšuje zeta potenciál více, což má za následek tvorbu stabilnější suspenze a tím zlepšení ztekucení. Ztekucující efekt jednomocných alkalických kationů, které mají dle Schulze – Hardyho pravidla vyšší hodnotu zeta potenciálu, byl téměř nevyhodnotitelný z důvodu jejich předčasného zatuhnutí. Společně s vlivem souhlasně se chovajícího anionu způsobují totiž oba alkalické kationy svým elektrochemickým působením, především vyšší pohyblivostí iontů, zvýšenou rozpustnost hemihydrátu, a tím v souladu s Le Chatelierovu teorií hydratace i urychlení procesu tuhnutí. Z uvedeného důvodu nebyl úplně jednoznačně vyhodnotitelný ani vliv anionů na ztekucení sádrové kaše. Jeví se však, že jednomocný chloridový anion s vyšší hodnotou zeta potenciálu vyvolává lepší ztekucení než dvojmocné aniony síranový či uhličitanový, jejichž zeta potenciál je nižší.

V oblasti suchých maltových směsí byla navržena a optimalizována skladba sádrové omítky hlazené, točené, sádrového tmelu a premixu sádrového pojiva. Na základě stanovených technologických i aplikačních vlastností, jakož i následně

realizované poloprovozní výroby lze konstatovat, že vyvinuté směsi vyhovují normovým požadavkům a dobře obstojí i ve srovnání s průmyslově vyráběnými zahraničními produkty.

Pro účely vývoje sádrové tvarovky byla nejprve navržena a sestavena laboratorní forma. Z důvodu požadavku na snadnou manipulaci a odolnosti vůči korozi byl jako nejvhodnější materiál zvoleno dubové dřevo, opatřené hydrofobním nátěrem pro snadnější odformování. Horizontálně orientovaná forma byla pro přesnější rozměrovou toleranci a hladkost povrchu umístěná na kovové podložce. Seříznutí přebytku sádrové kaše při vytváření bylo realizováno pomocí kovové desky, což se osvědčilo jako účinnější proti seřezávání strunou.

Při optimalizaci návrhu receptury sádrové směsi pro přípravu sádrových tvarovek byla nejprve použita plastifikační přísada, avšak takto připravený vzorek vykazoval určitou rozměrovou nepřesnost a vysokou objemovou hmotnost. Proto byla sádrová směs následně modifikována odstupňovanou dávkou provzdušňovací přísady, což mělo za následek přípravu sádrových tvarovek různých objemových hmotností a lepší rozměrové tolerance. Na takto připravených vzorcích byly stanoveny základní technologické vlastnosti dle příslušné normy ČSN EN 12 859. Z naměřených a vypočtených hodnot je patrné, že vyrobené tvarovky odpovídají všem požadavkům zkoušené normy z hlediska technologických vlastností i vizuálních parametrů. Z hlediska ekonomické efektivity je použití provzdušňující přísady přínosnější, jelikož už samotné dávkování je nižší oproti plastifikační přísadě.

Následně byla ověřena poloprovozní výroba sádrových tvarovek na navrženém karuselovém zařízení. Z tvarovek, vyrobených na tomto zařízení, byla v laboratoři vybudována zkušební zeď, na níž byly dále odzkoušeny i aplikační vlastnosti navržených a poloprovozně vyrobených suchých maltových směsí.

## 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, produkováný 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 aditivy. 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 se podařilo vyvinout ucelený stavební program sestávající ze sádrové omítky, sádrového tmele a sádrového premixu. Odstupňovanou dávkou provzdušňovací přísady byly navrženy sádrové tvarovky rozdílných objemových hmotností. Navržené technologické postupy přípravy se jeví jako reálné v poloprovozních podmínkách.



## POUŽITÁ 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 catchmnet (Czech Republic)*, Journal of Archaeological Science, volume 49, Sptember 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.
- [4] HLAVÁČ, J.: *Základy technologie silikátů*, SNTL 1988. 516 stran.
- [5] ABRIEL, W., REIDROF, K.: *Dehydration reactions of gypsum: A neutron and X-ray diffraction study*. Journal of solid state chemistry. 1990, pages 85.
- [6] SCHULZE, W., FISCHER, W., LACH, V., TETEL, P., *Necementové malty a betony*, SNTL, Praha, 1990.
- [7] ŠATAVA, V.: *Úvod do fyzikální chemie silikátů* SNTL 1965. 407 stran.
- [8] Surovinové zdroje ČR – nerostné suroviny, vydání z roku 2018. Česká geologická služba [online]. [cit. 2018-08-25] Dostupné z <http://www.geology.cz/extranet/publikace/online/surovinove-zdroje>
- [9] BĚŽÁK, R., *Výzkum v oblasti přípravy anhydritových samonivelačních potěrů*. Brno, 2014, 52 s., Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Dominik Gazdič, Ph.D.
- [10] Surovinové zdroje ČR – nerostné suroviny, vydání z roku 2018, stav 2017. Česká geologická služba [online]. [cit. 2018-08-25] Dostupné z <http://www.geology.cz/extranet/publikace/online/surovinove-zdroje>
- [11] PALACHE, C. et al. Anhydrit. Mineral data publishing. [online]. 2018 [cit. 2018-08-10]. Dostupné z: <http://www.handbookofmineralogy.com/pdfs/anhydrite.pdf>
- [12] ŠVEC, Marek. *Vývoj síranového pojiva z přírodního anhydritu: diplomová práce*. Brno, 2007. 77 s. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Marcela Fridrichová, CSc
- [13] ŠAUMAN, Z.; *Maltoviny I*. VUT v Brně, 1993.

- [14] SIEVERT, T., A. WOLTER and N.B. SINGH. *Hydration of anhydrite of gypsum (CaSO<sub>4</sub>, II) in a ball mill*, Cement and Concrete research 35 (2005), pages 623 - 630.
- [15] Odsiřování spalin v elektrárnách skupiny ČEZ. Skupina ČEZ [online]. [cit. 2018-25-08].  
Dostupné z <http://www.cez.cz/edee/content/file/investori/odsirovani.pdf>
- [16] HANÁČEK, J. *Pojiva a maltové směsi na bázi síranu vápenatého*. Brno, 2015. 81s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Dominik Gazdič, Ph.D.
- [17] HEMERKA, J., VYBÍRAL, P., *Ochrana ovzduší*. 1. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2010, 148 s. ISBN 978-80-01-04646-3.
- [18] IBLER, Z. a kol. *Technický průvodce energetika*. 1. vyd. Praha: BEN Praha, 2002. 616 s. ISBN 80-7300-026-1.
- [19] SKÁLA, Z. *Ekologie v energetice*. 1. vyd. Brno: PC-DIR, spol. s r. o. Brno, 1994. 141 s. ISBN 80-214-0477-9.
- [20] SLEZÁK, P., MÁNEK, O., JULÍNEK, P. *Vybrané možnosti snižování emisí SO<sub>2</sub> u stávajících uhelných zdrojů*. Energie z biomasy VII. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Odbor energetického inženýrství, 2007, s. 179-185. ISBN 978-80-214-3542-1.
- [21] MIKLÍK, T. Odsíření spalin fluidního kotle. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 80 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc
- [22] Referenční dokument o nejlepších dostupných technikách pro velká spalovací zařízení [online]. c2006, [cit. 2018-25-08]. Dostupné z:  
<http://www.ippc.cz/soubory/spalzar2úindex.html>
- [23] FRIDRICHOVÁ, M.; *Maltoviny II přednášky 2010*
- [24] PUTTNER, J.; *Využití chloridových cementářských odprašků k přípravě dehydratačních roztoků pro výrobu alfa sádry*. Brno, 2011, 96 s. Fakulta stavební. Ústav technologie stavebních hmot a dílců.
- [25] CHANDRA, S. *Waste materials used in concrete manufacturing*. Westwood, New Jersey: Noyes Publications, 1997. ISBN 0-8155-1393-3
- [26] CESNIENE, J., *Influence of Phosphatic impurities on the Anhydrite binding material of Phosphogypsum*, Lithuania, Ceramics – Silicates 51 (3), 153-159, 2007

- [27] TOMANCOVÁ, L. *Využití odpadu a druhotných materiálu jako alternativních surovin a paliv v cementáрске výrobě*. In: 12th International conference, Ecology and new building materials and products 2008.
- [28] Ein Überblick über die Fluorchemie [online]. [cit. 2018-23-06]. Dostupné z: <http://www.fluorchemie.de/files/eurofluor.pdf>
- [29] PALACHE, C. et al. Anhydrit. Mineral data publishing. [online]. 2005 [cit. 2018-24-10]. Dostupné z: <http://www.handbookofmineralogy.com/pdfs/gypsum.pdf>
- [30] Information der Industrierverband WerkMörtel, Die Rohstoffe für CalciumsulfatFließestrich, Duisburg, [online] 2009 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.gips.de/wp-content/uploads/downloads/2011/11/rohstoffe.pdf>
- [31] SCHULZE, W., *Necementové malty a betony*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1990, 271 s.
- [32] CESNIENE, J., *Influence of phosphatic impurities on the anhydrite binding material of phosphogypsum*, Lithuanian Energy Institute, April, 2007, Pages 153 – 160.
- [33] FRIDRICOVA, M., HÁJKOVÁ, I., DVOŘÁK, K., *Production of the alpha modification by pressureless method*. Příspěvek na konferenci Binders, Materials and Technologies in Modern Construction, ISSN 1022-6680, ISBN 978-3-03835-452-9, Trans Tech Publication, Švýcarsko, 2015.
- [34] McVAY, T., A., *Study of gypsum hard finish plasters*, University of Illinois at Urbana Champaign Library 1927
- [35] GAZDIČ, D., HÁJKOVÁ, I., FRIDRICOVÁ, M., *High-Temperature X-Ray Power Diffraction of Secondary Gypsum*, článek World Academy of Science, Engineering and Technology, ISSN 1307-6892, World Academy of Science, Engineering and Technology, 2014
- [36] DINGLER, J., G., DINGLER, E., M. *Polytechnilches Journal*, Stuttgart und Tübingen, JG Cotta, 1851
- [37] ČSN 722301 Sádrová pojiva – Klasifikace, všeobecné technické požadavky a zkušební metody
- [38] LOSOS, L., BAVENA, M., *Štukatérství*, nakladatelství GRADA, Praha 2010, ISBN 978-80-247-2175-0.
- [39] PŘICHYSTALOVÁ, E.; *Netradiční stavební pojiva: diplomová práce*. Brno, 2010. 89 s. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav technologie stavebních hmot a dílců.

- [40] KALIVODA, K.; *Výroba alfa sádry s využitím chloridových odprašků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2013. 162 s. Vedoucí disertační práce: prof. Ing. Marcela FRIDRICHOVÁ, CSc.
- [41] PUTNER, J.; *Využití chloridových cementářských odprašků k přípravě dehydratačních roztoků pro výrobu alfa sádry*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2011. 96 s. Fakulta stavební. Ústav technologie stavebních hmot a dílců.
- [42] FRIDRICHOVÁ, M., DVOŘÁK, K., GAZDIČ D., HÁJKOVÁ, I., *Maltoviny*, Modul M02, ISBN 978-80-214-4973-2, VUT Brno, Brno 2014.
- [43] DVOŘÁK, K.; FRIDRICHOVÁ, M.; PUTTNER, J., *Optimalizace výroby alfa-sádry ve směsném roztoku solí*, příspěvek na konferenci Maltoviny 2010, ISBN 978-80-214-4204-7, VUT Brno, Brno, 2010.
- [44] Kalivoda, K. *Možnosti využití cementářských odprašků při výrobě alfa sádry*, příspěvek na konferenci Juniorstav 2008, sborník anotací, ISBN 978-80-86433-45-5, VUT v Brně, Brno, 2008
- [45] BAOHONG GUAN, GUANGMING JIANG, ZHONGBIAO WU, JINGWEI MAO, BAO KONG: *Preparation of  $\alpha$ -Calcium Sulfate Hemihydrate from Calcium Sulfate Dihydrate in Methanol–Water Solution under Mild Conditions*, Journal of the American Ceramic Society Volume 94, Issue 10, pages 3261–3266, October 2011
- [46] ČSN EN 13279-1: *Sádrová pojiva a sádrové malty pro vnitřní omítky - Část 1: Definice a požadavky*
- [47] SINGH, N. B., MIDDENDORF, B. *Calcium sulphate hemihydrate hydration leading to gypsum crystallization*. Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials. 2007.
- [48] STRUNZ, H. NICKEL, E. H. *Strunz mineralogical tables: chemical structural mineral classification system*. 9. Stuttgart. Schweizerbart, 2001.
- [49] ČSN EN 13454-1. *Pojiva, kompozitní pojiva a průmyslově vyráběné maltové směsi pro podlahové potěry ze síranu vápenatého – Část 1: Definice a požadavky*. Praha: ČNI, 2005
- [50] BÁRTA, R., *Technologie silikátů* (Sborník výzkumných prací III), SNTL, Praha, 1957
- [51] FINOT, E., et al. *Correlating surface forces with surface reactivity of gypsum crystals by atomic force microscopy. Comparison with rheological properties of plaster*. *Solid State Ionics* 142 (2001). Pages 39 - 46

- [52] KLOPROGGE, J., T., et al. *Thermal decomposition of syngenite,  $K_2Ca(SO_4)_2 \cdot H_2O$* ; *Thermochimica Acta* 417 (2004). Pages 143–155
- [53] ČERNÝ, R., KERŠNER, Z., ROVNANÍKOVÁ, P., TESÁREK, P., TOMAN, J., TYDLITÁT, V., VIMMROVÁ, A., VYŠVAŘIL, M. *Vlastnosti modifikované sádry*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-7204-665-2.
- [54] KONDRATIEVA, N., BARRE, M., GOUTENOIRE, F., SATYNSKY M.: *Study of modified gypsum binder*. *Construction and Building Materials* vol. 149, 2017, pages 535 - 542.
- [55] ZMRZLÝ, M.: *Měření zeta-potenciálu: Příprava aparatury a metodika měření*. Brno 2001, Speciální technologie maltovin.
- [56] *Praktikum z testovacích a preparačních metod, Měření elektrokinetického potenciálu suspenzí silikátových materiálů*.
- [57] GUMUSTAS, M., T. SENDEL-TURK, C., GUMUSTAS, A., A. OZKAN, S., USLU, B.: *Effect of polymer-Based Nanoparticles on the Assay of Antimicrobial Drug Delivery Systems*, *Multifunctional Systems for Combined Delivery, Biosensing and Diagnostics* 2017, pages 67-108
- [58] Realizace anhydritové podlahy krok za krokem. Anhydritové podlahy. [online]. [cit. 2018-09-03]. Dostupné z: <http://www.anhydritovepodlahy.eu/realizace-anhydritove-podlahy>
- [59] Výhody anhydritové podlahy. *Anhydritové podlahy*. [online]. [cit. 2018-09-03]. Dostupné z: <http://www.anhydritovepodlahy.eu/vyhody-anhydritove-podlahy>
- [60] AnhyLevel – technologický předpis. CEMEX [online]. [cit. 2017-01-09]. Dostupné z: [http://www.specialni-produkty.cz/Anhylevel\\_technologicky\\_predpis.html](http://www.specialni-produkty.cz/Anhylevel_technologicky_predpis.html)
- [61] PÍCEK, J. *Pojiva na bázi síranu vápenatého a jejich použití u TBG Pražské malty*. *Materiály pro stavbu*. Květen, 2011. str. 60-61
- [62] Výhody anhydritové podlahy. *Anhydritové podlahy*. [online]. [cit. 2018-09-03]. Dostupné z: <http://www.anhydritovepodlahy.eu/vyhody-anhydritove-podlahy>
- [63] NYČ, M. *Sádrokarton, stavby a rekonstrukce*. Praha: Grada Publishing
- [64] Podklady firmy Gypstrend [online]. [cit. 2018-09-03]. Dostupné z: [www.gypstrend.cz](http://www.gypstrend.cz)
- [65] *Technologie, stavební stěny*. Učební texty oboru montér suchých staveb. Cech sádrokartonářů České republiky.

[66] CLIFRON, J., R. *Thermal analysis of calcium sulfate dihydrate and supposed  $\alpha$  and  $\beta$  forms calcium sulfate hemihydrate frpm 25 to 500 °C.* Journal of research of the Nation Bureau of Standards - A. Physics and Chemistry. 1972, Sv. 76A, 1.

## SEZNAM TABULEK

- Tab. 1: Vlastnosti sádrovce těžného v Koberčicích u Opavy
- Tab. 2: Těžba sádrovce v České republice 2013 - 2017
- Tab. 3: Tepelné elektrárny ČEZ, a.s. a jejich způsoby odsíření
- Tab. 4: Přehled základních kvalitativních parametrů chemosádrovce Pregips
- Tab. 5: Normativní dělení sádrových pojiv dle pevnosti v tlaku
- Tab. 6: Normativní dělení sádrových pojiv dle rychlosti tuhnutí
- Tab. 7: Normativní dělení sádrových pojiv dle jemnosti mletí
- Tab. 8: Požadované fyzikální a chemické vlastnosti rychle tuhnoucí sádry [37]
- Tab. 9: Druhy sádrových pojiv a malt
- Tab. 10: Pevnosti pojiv CAB a CAC uvedené jako charakteristické hodnoty
- Tab. 11: Pevnostní třídy průmyslově vyráběných směsí CA podle pevnosti v tlaku
- Tab. 12:: Pevnostní třídy průmyslově vyráběných maltových směsí CA podle pevnosti v tahu za ohybu
- Tab. 13: Požadavky na pojiva a průmyslově vyráběné maltové směsi
- Tab. 14: Charakteristické a mezní hodnoty pevností v tahu za ohybu a v tlaku pro maltové směsi ze síranu vápenatého
- Tab. 15: Budiče pro anhydritové pojivo
- Tab. 16: Charakteristiky sádrových tvarovek SUPERBLOK®
- Tab. 17: Složení chemosádrovce Pregips
- Tab. 18: Technologické vlastnosti laboratorně připravené sádrové maltoviny
- Tab. 19: Technologické vlastnosti laboratorně připravených sáder
- Tab. 20: Technologické vlastnosti poloprovozně vyrobené sádry
- Tab. 21: Technologické vlastnosti sáder modifikovaných plastifikátory
- Tab. 22: Technologické vlastnosti sáder modifikovaných plastifikátory
- Tab. 23: Technologické vlastnosti beta sádry modifikované plastifikační přísadou Melflux 6681 F
- Tab. 24: Technologické vlastnosti beta sádry modifikované plastifikační přísadou Melflux 4930 F
- Tab. 25: Technologické vlastnosti beta sádry modifikované vybranými solemi
- Tab. 26: Vlastnosti laboratorně připravených sádrových omítek

Tab. 27: Vlastnosti laboratorně připraveného tmelu

Tab. 28: Vlastnosti laboratorně připraveného sádrového premixu

Tab. 29: Technologické a aplikační vlastnosti poloprovozně připravených suchých maltových směsí

Tab. 30: Technologické vlastnosti laboratorně připravených tvarovek modifikovaných plastifikační přísadou

Tab. 31: Technologické vlastnosti laboratorně připravených sádrových tvarovek

Tab. 32: Technologické vlastnosti poloprovozně vyrobené sádrové tvarovky



## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Přírodní sádrovec

Obr. 2: Krystaly bassanitu

Obr. 3: Krystal přírodního anhydritu

Obr. 4: Schéma suché metody odsíření

Obr. 5: Schéma výroby energosádrovce mokrou cestou

Obr. 6: Výroba chemosádrovce v Precheze Přerov

Obr. 7: Schéma výroby syntetického anhydritu

Obr. 8: Schéma výroby termického anhydritu

Obr. 9: SEM snímek termického anhydritu [29]

Obr. 10: Schéma jednotlivých druhů síranových maltovin vznikající tepelným rozkladem sádrovce

Obr. 11:  $\alpha$ -sádra ve formě automorfních zrn hemihydrátu (vlevo) vzniklá v autoklávu (zvětšení 4000x)

Obr. 12:  $\beta$ -sádra ve formě silně rozlískované pseudomorfózy po sádrovci (zvětšení 4000x)

Obr. 13: Výpal sádry ve vařákové peci firmy Pfeiffer

Obr. 14: Rotačkový kalcinátor fimry Bütner-Schilde-Haas

Obr. 15: Rošt A. N. Knaufa

Obr. 16: Sušící mlýn

Obr. 17: Graf rozpustnosti síranu vápenatého ve vodě v závislosti na teplotě

Obr. 18: Autokláv

Obr. 19: Schéma kontinuálního dehydrátoru [44]

Obr. 20: Průběh hydratace ve vodní suspenzi

Obr. 21: Schéma systému přidávání vnějšího budiče

Obr. 22: Schéma systému přidávání vnitřního budiče

Obr. 23: Schéma hydratace anhydritu II na sádrovec

Obr. 24: Zeta potenciál

Obr. 25: Závislost potenciálu zeta na pH

Obr. 26: Schéma výroby sádrokartonových desek

Obr. 27: Rentgenogram chemosádrovce Pregips

Obr. 28: Rentgenogram laboratorně připravené beta sádry z chemosádrovce Pregips

Obr. 29: Rozlístkováná struktura zrn laboratorně vyrobené beta sádry z druhotných suroviny (500 x)

Obr. 30: Průběh dehydratace sádrovce teplotním režimem 130 °C po 15 min dehydratace

Obr. 31: Průběh dehydratace sádrovce teplotním režimem 130 °C po 30 min dehydratace

Obr. 32: Průběh dehydratace sádrovce teplotním režimem 105 °C po 2 hod dehydratace

Obr. 33: Průběh dehydratace sádrovce teplotním režimem 105 °C po 4 hod dehydratace

Obr. 34: Průběh dehydratace sádrovce teplotním režimem 105 °C po 5,5 hod dehydratace

Obr. 35: Kalcinační linka - celkový pohled

Obr. 36: Kalcinační linka - schéma

Obr. 37: Rentgenogramy poloprovozně vyrobené sádry po prvním průchodu sušárnou

Obr. 38: Rentgenogramy poloprovozně vyrobené sádry po druhém průchodu sušárnou kameniva

Obr. 39: Rentgenogram sádrové pasty hydratované 2 hodiny, modifikované plastifikátorem Sika v dávce 3 %

Obr. 40: Rentgenogram sádrové pasty hydratované 2 hodiny, modifikované plastifikátorem Melment F10 v dávce 3 %

Obr. 41: Rentgenogram sádrové pasty hydratované 2 hodiny, modifikované plastifikátorem ChrysoFluid GT v dávce 3 %

Obr. 42: Rentgenogram sádrové pasty hydratované 2 hodiny, modifikované plastifikátorem Biotech v dávce 0,6 %

Obr. 43: Rentgenogram sádrové pasty hydratované 2 hodiny, modifikované plastifikátorem Stachement 6358 v dávce 1 %

Obr. 44: Rentgenogram sádrové pasty hydratované 2 hodiny, modifikované plastifikátorem Sika ViscoCrete 1035 v dávce 1 %

Obr. 45: Rentgenogram sádrové pasty hydratované 2 hodiny, modifikované plastifikátorem Sikament Multimix v dávce 1 %

Obr. 46: Rentgenogram sádrové pasty hydratované 2 hodiny, modifikované plastifikátorem Stacheplast v dávce 1 %

Obr. 47: Technologická linka přípravy suchých maltových směsí

Obr. 48: Půdorysný nákres formy

Obr. 49: Řezy bočnicemi formy

Obr. 50: : Ukázka poloprovozní formy (vlevo) a výsledného produktu

Obr. 51: Poloprovozní aparatura přípravy sádrové tvarovky

Obr. 52: Příprava pro zdění

Obr. 53: Způsob spojování sádrových tvarovek

Obr. 54: Zdění příčky (vlevo), úprava povrchu sádrovým tmelem, sádrovou omítkou (vpravo)