

Stavební materiály – vlastnosti, degradace, poškození a způsoby oprav a obnovy

Sádrová pojiva a materiály

Renata Tišlová

Katedra chemické technologie
Fakulta restaurování, Univerzita Pardubice



Litomyšl, 18.2. 2025





Obsah přednášky

- Definice a termíny
- Sádrová pojiva
- Výrobní postupy, technologie
- Tuhnutí, tvrdnutí
- Historické využití sádrových pojiv
 - Sádrové odlitky
 - Technika umělého mramoru
- Vynálezy 19. století

Definice a termíny



- Anorganická pojiva na bázi síranu vápenatého (CaSO_4) vznikající výpalem sádrovce nebo jiných surovin s obsahem CaSO_4 .
- Vzdušné pojivo = tuhne a tvrdne po smíchání s vodou na vzduchu. Děj se nazývá hydratace.
- Odlišnosti v rychlosti tuhnutí v závislosti na postupu výroby.
- Tvarová stálost výrobků (nezvětšují ani nesnižují objem).
- Nízká odolnost vůči vodě a vlhkosti.
- Střední pevnost, křehkost.

SÁDROVA POJIVA

sádrovec ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), alt. alabastr,
nebo energosádrovec získaný z průmyslových procesů (odsiřování)

>110 °C (max. do 170 °C)

$\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$
hemihydrát (α, β)

>200 °C

CaSO_4
anhydrit (III-I)

>200 °C

>400 °C

>700 °C

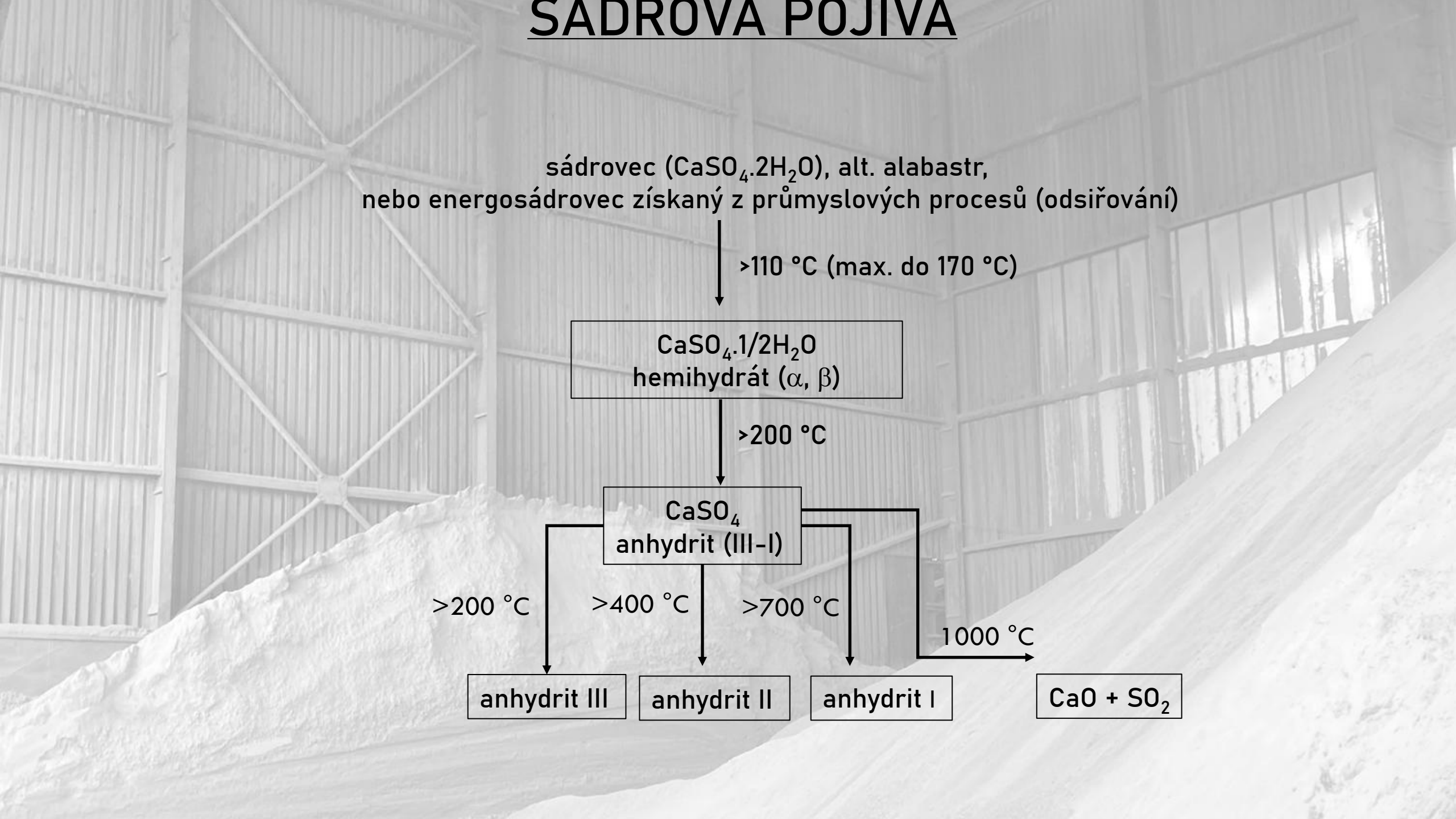
1000 °C

anhydrit III

anhydrit II

anhydrit I

$\text{CaO} + \text{SO}_2$



Sádrovec (Gypsum)

Vzorec: $\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Vzhled: transparentní krystaly, bílé až průsvitné, jiná barevnost způsobena znečišťujícími příměsemi (hlíny, aj.)

Krystalografická soustava: Monoklinická

Morphologie: sloupcové krystaly, vytváří shluky paralelně orientovaných krystalů

Tvrдость: 1,5-2 (Mohsova stupnice tvrdosti) – měkký

Synonyma: Gypsum



Gypsum (monoklinická krystalová struktura), Montmartre, Paříž. Zdroj: <https://www.mindat.org/min-8574.html>



Sádrovec Kobeřice (monoklinická krystalová struktura). Autor fotografie: R. Tišlová.

Alabastr

Vzorec: $\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Vzhled: průsvitný jemnozrnný minerál, mastný až perleťový

Krystalografická soustava: Monoklinická

Morphologie: drobnozrnná struktura

Tvrдость: 1,5-2 (Mohsova stupnice tvrdosti) – měkký

POZOR! Zaměňuje se s mramorem – měkkčí, náchylnější na poškození a působení vody



Alabastr, Zaragoza, Aragon, Španělsko. Zdroj: <https://www.mindat.org/min-90.html>.

Anhydrit

Vzorec: $\text{Ca}(\text{SO}_4)$

Vzhled: bezbarvý, šedobílý nebo bílý, často namodralý nebo narůžovělý, skelný lesk, dobře štěpný

Krystalografická soustava: Rombická

Morphologie: tlustě tabulkovitě nebo sloupcovitě, tvoří zrnité nebo celistvé agregáty

Tvrдость: 3-4 (Mohsova stupnice tvrdosti)

Synonyma: Anhydrite



Anhydrit (rombická krystalová struktura) – typická sloupcovitá struktura krystalů. Zdroj: <https://www.mindat.org/min-234.html>

Energosádrovec – alternativní zdroj sádrovce

Vzorec: $\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – vysoká čistota, nečistoty (popílek)

Výroba: vzniká při odsiřování spalin metodou mokré vápencové vypírky (vodné suspenze CaCO_3 , $\text{Ca}(\text{OH})_2$)

Vzhled: bílý až naředlý prášek, uniformní velikosti částic

Použití: hnojivo v zemědělství, regulátor tuhnutí cementu, výroba sádrových materiálů a stavební sádry



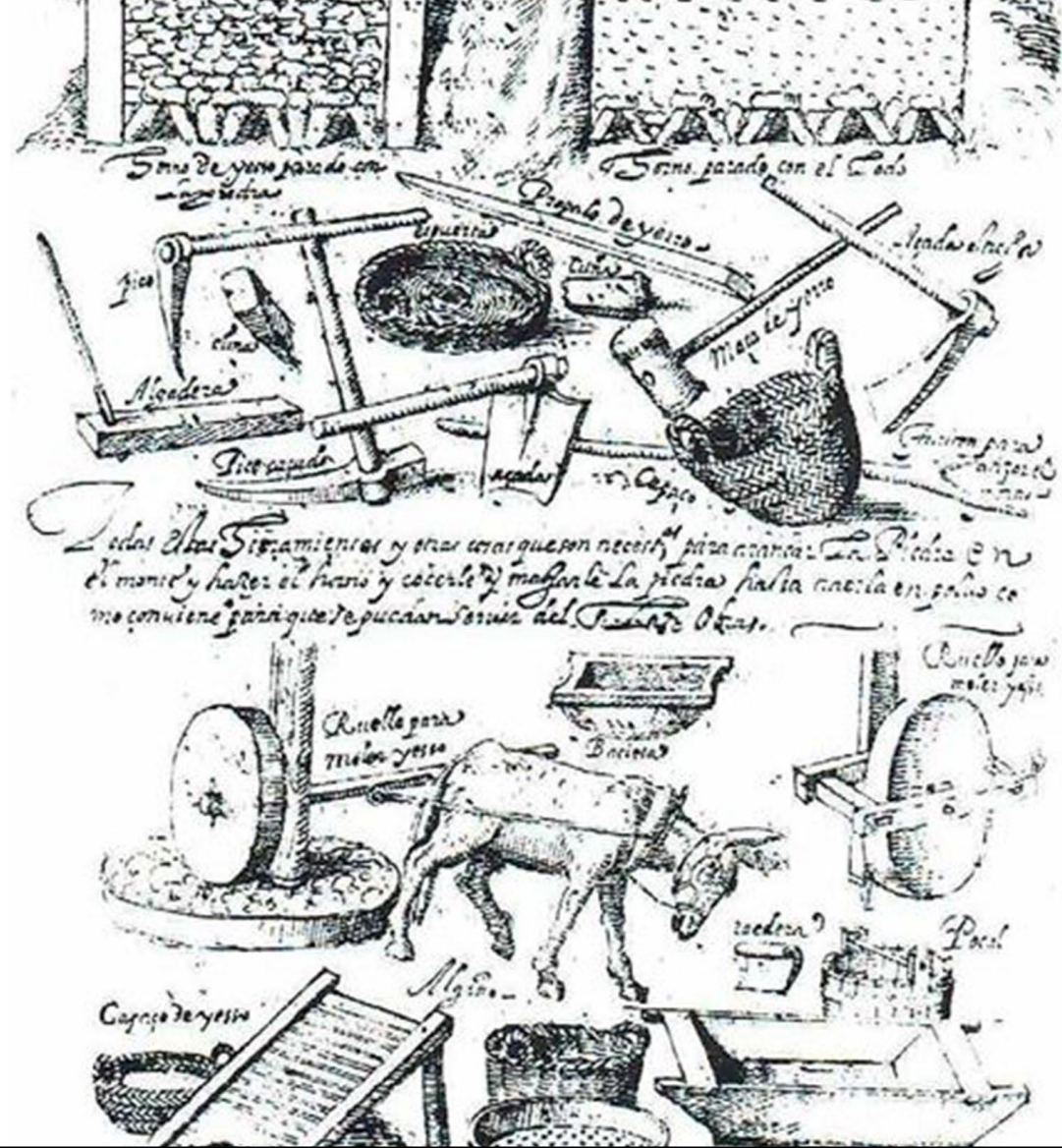
Výroba sádrových pojiv

Těžba, třídění, příp. drcení

Kalcinace

Mletí

Balení



Zdroje: Archaeol Anthropol Sci (2021) 13: 177; Pombo Cardoso, Isabel & Pye, Elizabeth. (2017). Gessoes in Portuguese Baroque Gilding Grounds: Part 2: Analytical Study of Historical Samples and Archaeological Reconstructions. Studies in Conservation. 63. 1-25. 10.1080/00393630.2016.1266430.



Moderní výroba sádrových pojiv

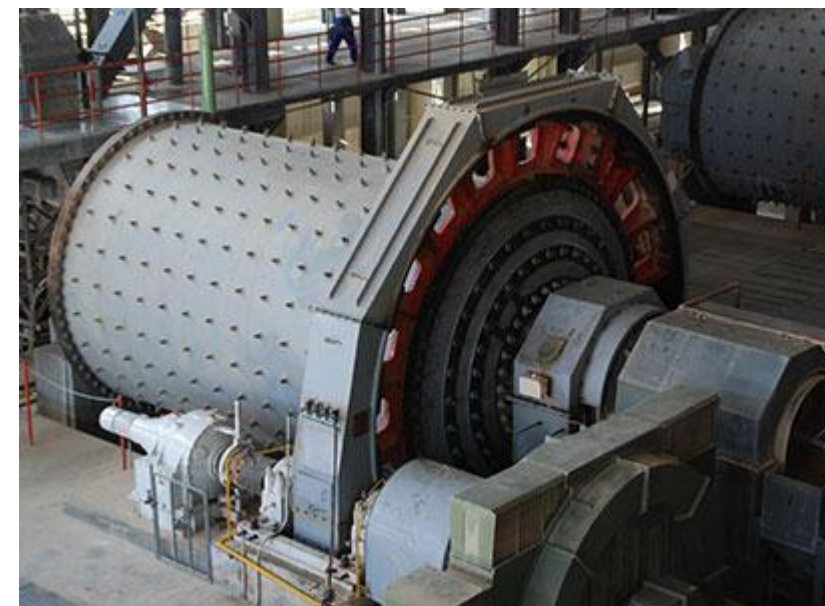
Typy pecí:

- Šachtové pece
- Pece na pečení chleba, pražení kávy..(literatura 19. století)
- Vařáky (retorty), kotlíky (Kettles)
- Rotační pec
- Zdroj: <https://www.gypstrend.cz/>



Mletí sádry

Klíčový parametr určující dobu tuhnutí, jemnost!



Tradiční a moderní mletí sádrových pojiv: vlevo, vpravo nahoře – tradiční drcení tlouky a mletí mlýnskými kameny, dole – kulový mlýn. Zdroje: Archaeol Anthropol Sci (2021) 13: 177, <https://www.zkcomp.com/product/gypsum-ball-mill.html>. <https://www.barrowuponsoarheritage.org.uk/articles/industries/old-industries-of-barrow/limestone-quarrying-burning-in-leicestershire/barrow-gypsum-mill.html>

Hemihydrát ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) (Plaster of Paris)

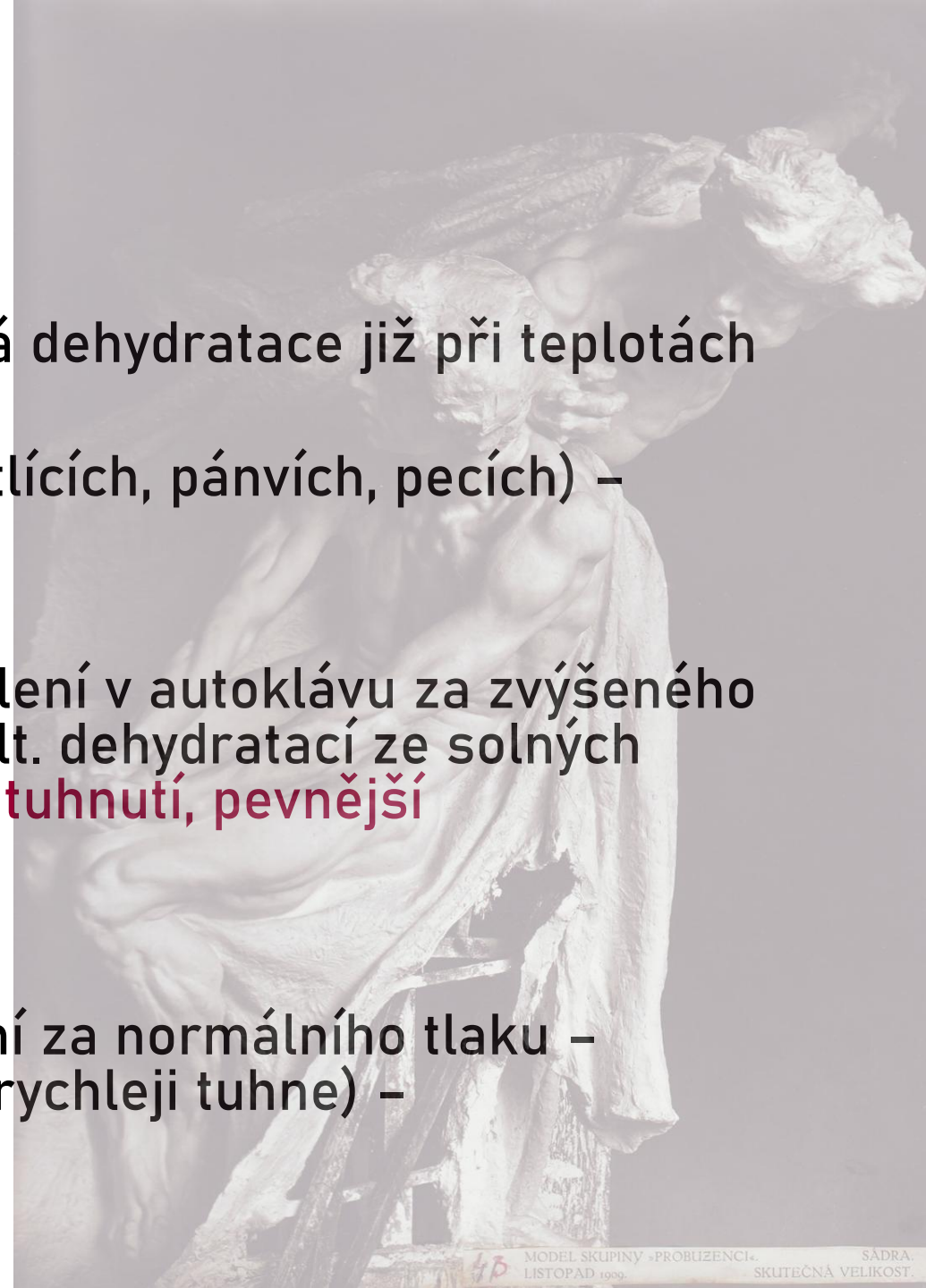
- teplota pálení max. 170 °C (130 °C, částečná dehydratace již při teplotách vyšších než 60 °C)
- výroba: pálením sádrovce (ve vařácích, kotlících, pánvích, pecích) – částečná dehydratace

α -hemihydrát – pomaleji tuhnoucí sádra, pálení v autoklávu za zvýšeného tlaku, v prostředí nasyceném vodní parou (alt. dehydratací ze solných roztoků) – krystaly lépe vyvinuté, **pomalejší tuhnutí, pevnější**

Použití: sanitární zboží

β -hemihydrát – rychle tuhnoucí sádra, pálení za normálního tlaku – heterogenní krystaly (větší měrný povrch – rychleji tuhne) –

Použití: **štukatérská sádra, odlitky, modely**



SADROVA POJIVA

sádrovec ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), alt. alabastr,
nebo energosádrovec získaný z průmyslových procesů (odsiřování)

>110 °C (max. do 170 °C)

$\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$
hemihydrát (α, β)

>200 °C (AIII již od 90°C)

CaSO_4
anhydrit (III-I)

200 °C

200-400 °C

?

400-700 °C

1000 °C

anhydrit III

anhydrit II

anhydrit I

$\text{CaO} + \text{SO}_2$

Pozn.: AIII, AII vznikají již nad >90 °C

Obsah se výrazněji zvyšuje nad uvedené teploty!

Ref: Kreisová J, Kužel R, Koppert M *et al*/ New insight into the phase changes of

Anhydrity

sádrovec → bassanit, hemihydrát → anhydrit III → anhydrit II → anhydrit I

- Anhydrity vznikají nad 170 °C (All již nad 50°C)
- 3 polymorfy All-III, stabilní All, AI (700°C)

All – ve vodě rozpustná fáze, vzniká již nad 90°C do 200°C, nestabilní

All – ve vodě nerozpustná fáze, jednotky procent 50°C, 200-400°C, transformace z All, pomalu reaguje s vodou (zůstává v pastě po hydrataci)

AI – ?, 400-700°C

Vlastnosti: dlouhá doba tuhnutí (hodiny-dny) – pomalu tuhnoucí sádra

Vysoce pevná, odolná

Použití: podlahy, omítky



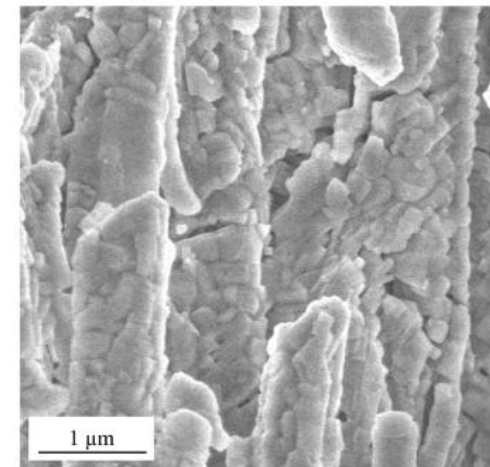
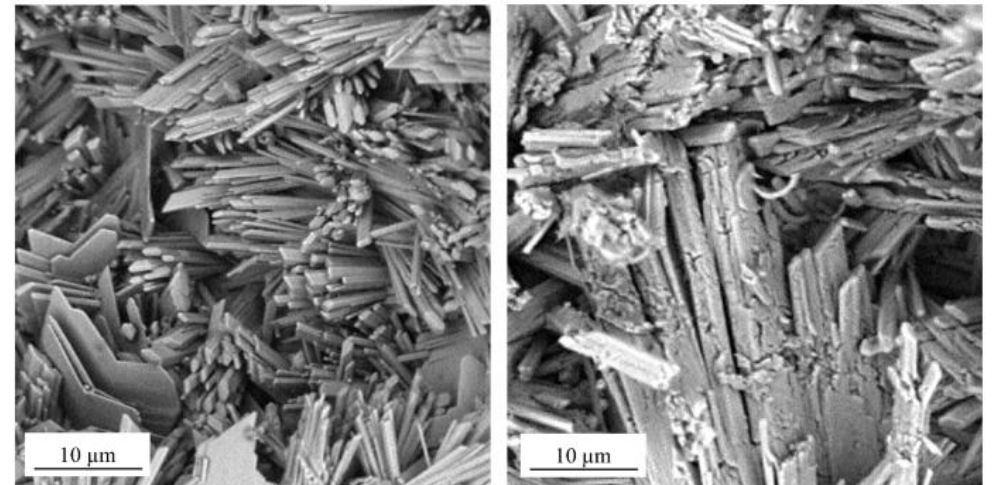
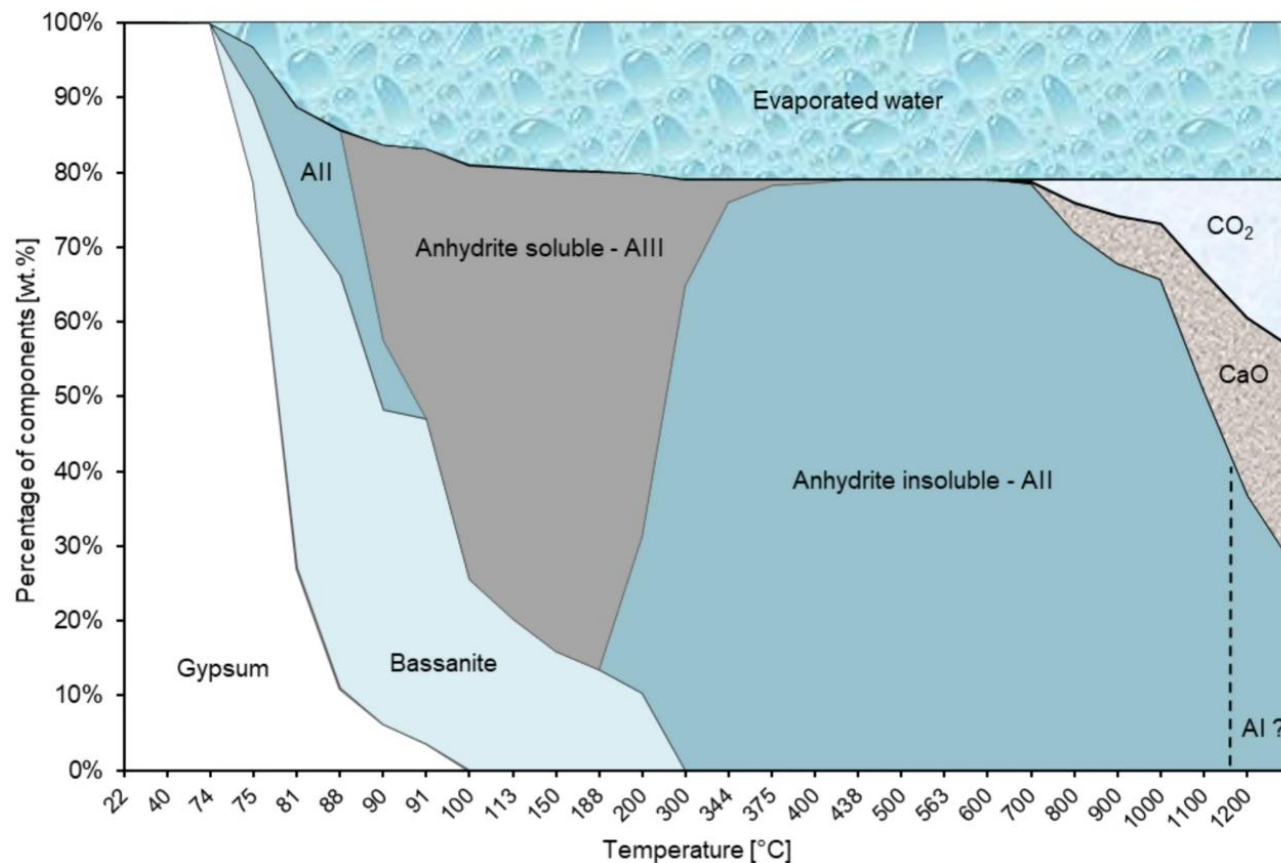
DIARA - Estrich - Gips
Einer der ältesten, bestens bewährten Baustoffe für Fußböden

Maschinelle Verarbeitung — da Langsambinder — Hohe Festigkeit — fugenlose, glatte Oberfläche — rasche Erhärtung — keine störenden Raumveränderungen — Feuerbeständigkeit — rasche Trocknung — Schalldämmung — fußwarm

Stuttgarter Gipsgeschäft Aktiengesellschaft
Stuttgart-Untertürkheim, Telefon 33 01 31 und Werk Entringen, Kreis Tübingen, Telefon Unterjesingen 278

Reklama na Estrichovovu sádru DIARA z roku 1960, Stuttgart.

Anhydritové fáze – otazníky?



Vznik anhydritových fází v závislosti na teplotě. Vznik AI je diskutabilní. Zdroj: <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02404-z>.

Klasifikace sádrových pojiv

- ČSN EN 13279-1
- ČSN 72 2301

Klasifikace A-C: typ

A – sádrové pojivo

B – sádrová malta (různé druhy)

C – speciální sádrové malty

Klasifikace G-2 až G-25: pevnost v tlaku

Klasifikace A-C: podle rychlosti tuhnutí

- A – rychle tuhnoucí
- (B, C) – středně a pomalu tuhnoucí

Klasifikace II: doba tuhnutí, II – počátek 6 min, konec 30 min



Třída pojiva	Pevnost v tlaku [MPa]	Třída pojiva	Pevnost v tlaku [MPa]	Třída pojiva	Pevnost v tlaku [MPa]
G-2	2	G-6	6	G-16	16
G-3	3	G-7	7	G-19	19
G-4	4	G-10	10	G-22	22
G-5	5	G-13	13	G-25	25

Bílá sádra (Kobeřice)

- $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ – hemihydrátové pojivo, rychletuhnoucí
- vyrábí se z energosádrovce
- **Klasifikace pouze A1** = sádrové pojivo pro přímé použití nebo další procesy (suché práškové výrobky), dle ČSN EN 13279-2
- jemnozrnná (frakce $< 2 \text{ mm}$)
- Pevnost v tlaku (2 hodiny): 4-6 Mpa
- Začátek tuhnutí: 6 min
- Sytná váha ($720 \pm 100 \text{ kg/m}^3$)



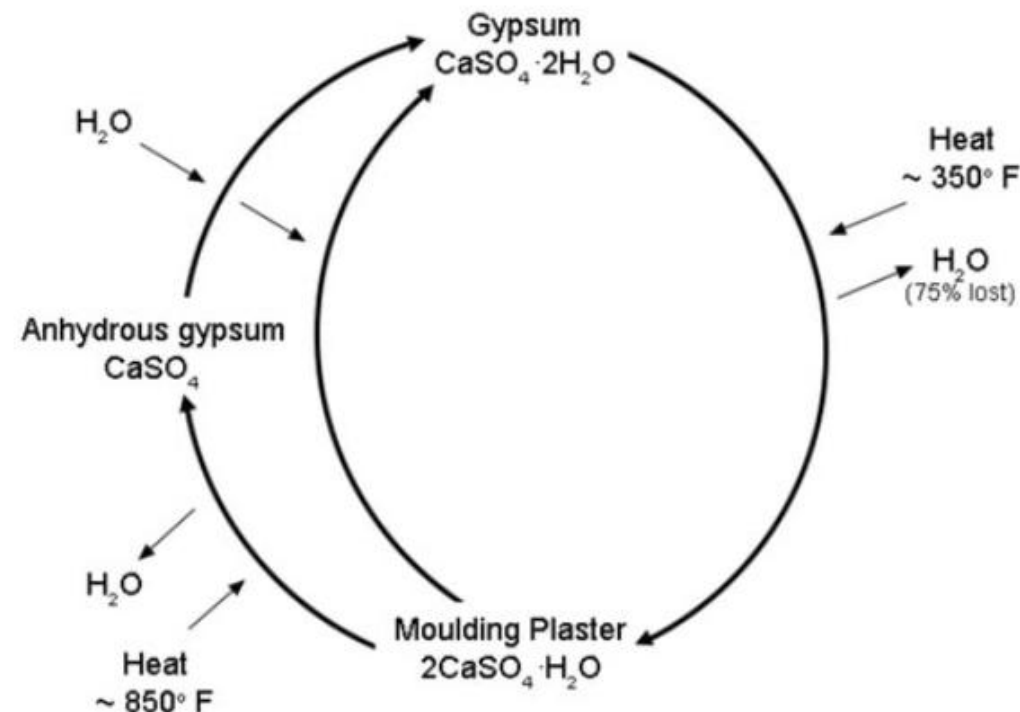
Tuhnutí sádrových pojiv

- HYDRATAČE – opačný děj dehydratace, která nastává při pálení sádrovce, reakce s vodou za vzniku dihydrátu.



REGULÁTORY TUHNUTÍ:

- ZPOMALOVAČE (RETARDÉRY): kolagenní proteiny, třísloviny, org. kyseliny (vinný kámen, kys. citrónová), anorganické soli (borax - $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), vápno
- URYCHLOVAČE TUHNUTÍ: některé anorganické soli (CaCl_2)



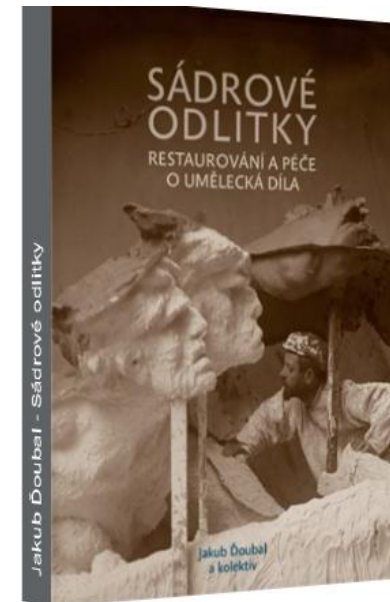
Minerální fáze	Štukatérská sádra ALMOD LC	Sádrový odlitek (S. Sucharda 19./20. století)
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	-	94,6
$\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$	74,0	-
CaSO_4	23,0	-
SrSO_4	-	0,3
SiO_2	tr.	0,3
Amorfní fáze	3,0	4,8

Historické použití sádrových pojiv

Sádrové odlitky



- Materiál sochařské tvorby – nejstarší památky pochází z doby Starověkého Egypta (1350 l př. n. l.)
- Kopie významných děl, posmrtné masky, skicy, pracovní modely, studie,...



- V sádrových skicách a pracovních modelech bývá zachycen proces hledání vhodné formy i obsahu, různá řešení daného zadání či autorovy vize.
- Projekt „*Stopy tvorby - Dědictví velkých sochařů první poloviny 20. století. Restaurování a péče o sochařské památky ze sádry*“, id. kód projektu: DG16P02B052 (2016–2019).

Stanislav Sucharda, „Model skupiny Problíženci“, skutečná velikost, sádra, kašírovaná sádra, 1909.



Stanislav Sucharda, sádrové modely soch pro průčelí muzea v Hradci Králové. Vlevo – sádrový model v měřítku, vpravo – originál v keramice.

Příprava modelů

- **Příprava:** míchání hemihydrátové sádry a vody, alt. příměsí
- **Optimální poměr:** voda/sádra (optimální 0.6, hm.)
- **Odlévání do forem:** želatinové, silikonové

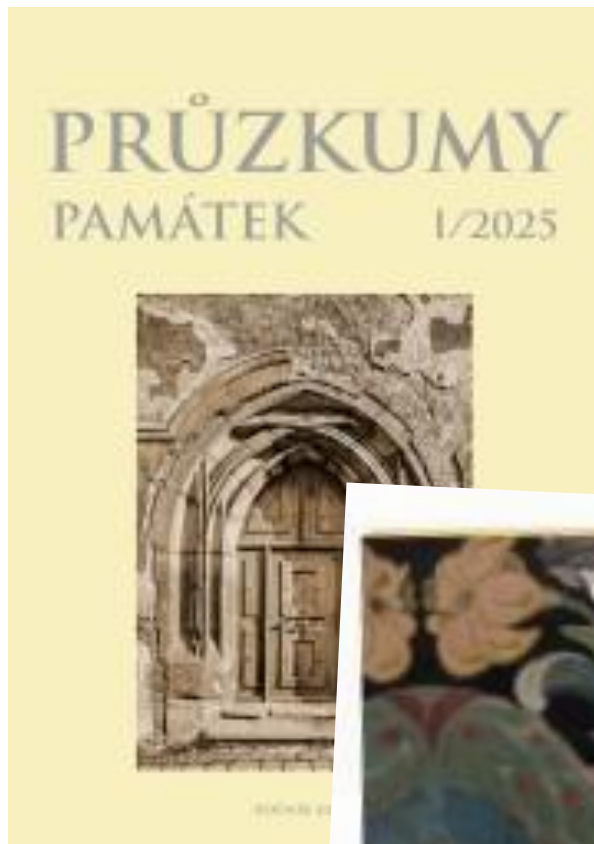
Průběh tuhnutí:

- exotermní reakce
- zvětšení objemu o 0.5-1 obj.% (dokonale kopíruje tvar formy)
- doba tuhnutí: 7,5 min (nožová metoda, viz ČSN EN 13279-2)
- Pevnost v tlaku: okolo 10 Mpa, pevnost v tahu za ohybu (4 MPa)
- **Vysoká celková porozita!**



Odlévání do forem: nahoře – želatinová forma se sádrovým kadlubem, dole – silikonová forma. Foto: P. Zítková, FR UPa.

Technika umělého mramoru



- Dekorativní technika 18. století napodobující různé druhy mramoru nebo jiných hornin, drahých kamenů a minerálů pomocí barevných těst připravovaných ze sádky a pigmentů, příp. jiných materiálů
- Navazuje na renesanční techniku *Pietre dure* (Řím 16. století, plného rozmachu dosáhla ve Florencii). Významný rozkvět v rudolfinské Praze.
- termíny: itl. scagliola, nj. Stuckmarmor, Kunstmarmor, aj. stucco marble, scagliola, čj. umělý, štukový mramor, méně scagliola

Historie a zdroje

Kořeny v antickém Římě? –
nemáme oporu v pramenech ani
dochovaných památkách,

Vitruvius (*Deset knih o
architektuře*) Plinius st. (*Kapitoly o
přírodě*)

Itálie (poč. 17. století)

region Emilia Romana, Carpi
Guido Fassi or Guido del Conte
(1584–1649) – do 20. století
považován za objevitele techniky
scagliola.¹

Erwin Newmann (1959): *Materialen
zur Geschichte der Scagliola in
,Jahrbucher Kunsthistorischen
Sammlungen in Wien', 55, 1959 pp.
75-152.*



'Guido Fassi of Carpi, objevitel scaglioli a vynálezce' 1616.' (18th Century Portrait, Carpi Museum).



Scagliola použitá pro obklady oltáře imitující barevné mramory, Guido Fassi, Cattedrale dell'Assunta – Duomo, Carpi, 1629. (Antependium od Giovanni Gavignani, 1670s, první generace mramorářů).

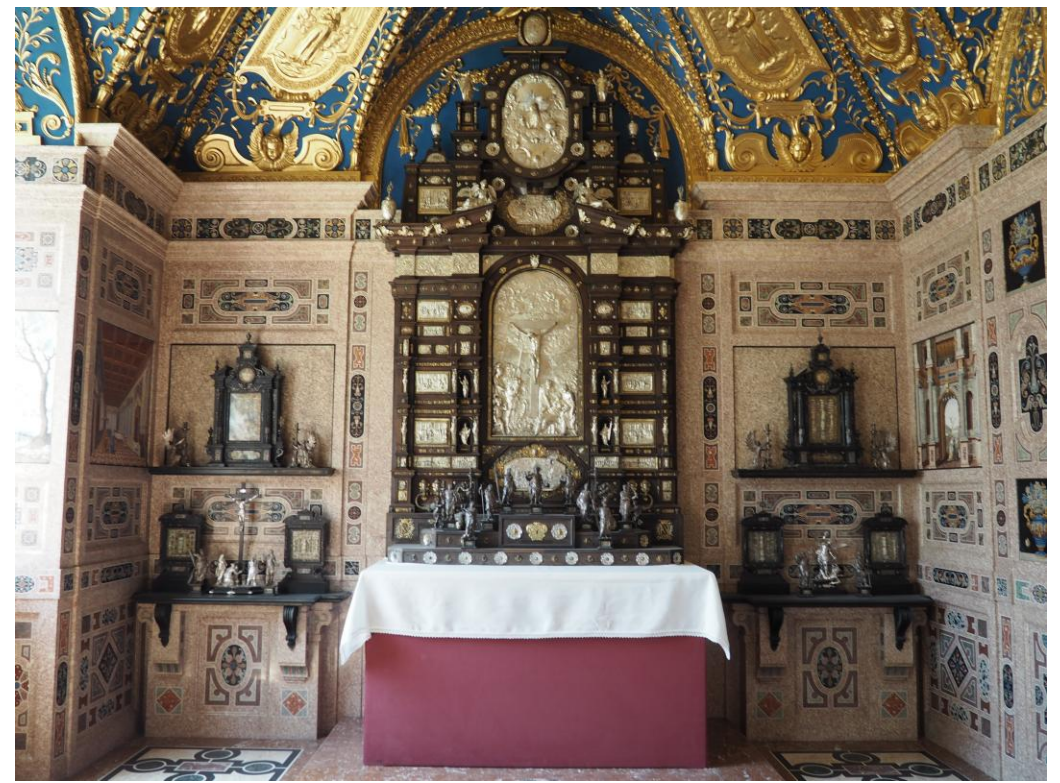
¹ Graziano Manni *I Maestri della Scagliola in Emilia Romagna e Marche*, Modena 1997. Zdroj: <https://thehistoryofscagliola.com/>

Historie a zdroje

Mnichov (2. pol. 16. století, 1587)

- Blasius Pfeiffer - výzdoba soukromé kaple vévody Viléma ve starém vodním hradě Neuveste (1586-1591). Po Vilémově smrti roku 1597 jeho syn, vévoda Maxmilián I., starý hrad částečně opustil a postupně budoval novou kapli - Reiche Kapelle (Mnichovská rezidence), kam byla zřejmě část starších scagliolových desek přesunuta.² Ostatní dokončeny na poč. 17. století.

² Dorothea Diemer, *Hubert Gerhard a Carlo di Cesare del Palagio, Bronzeplastiker der Spätrenaissance*, Berlin 2004. sv. I, s. 113-117.

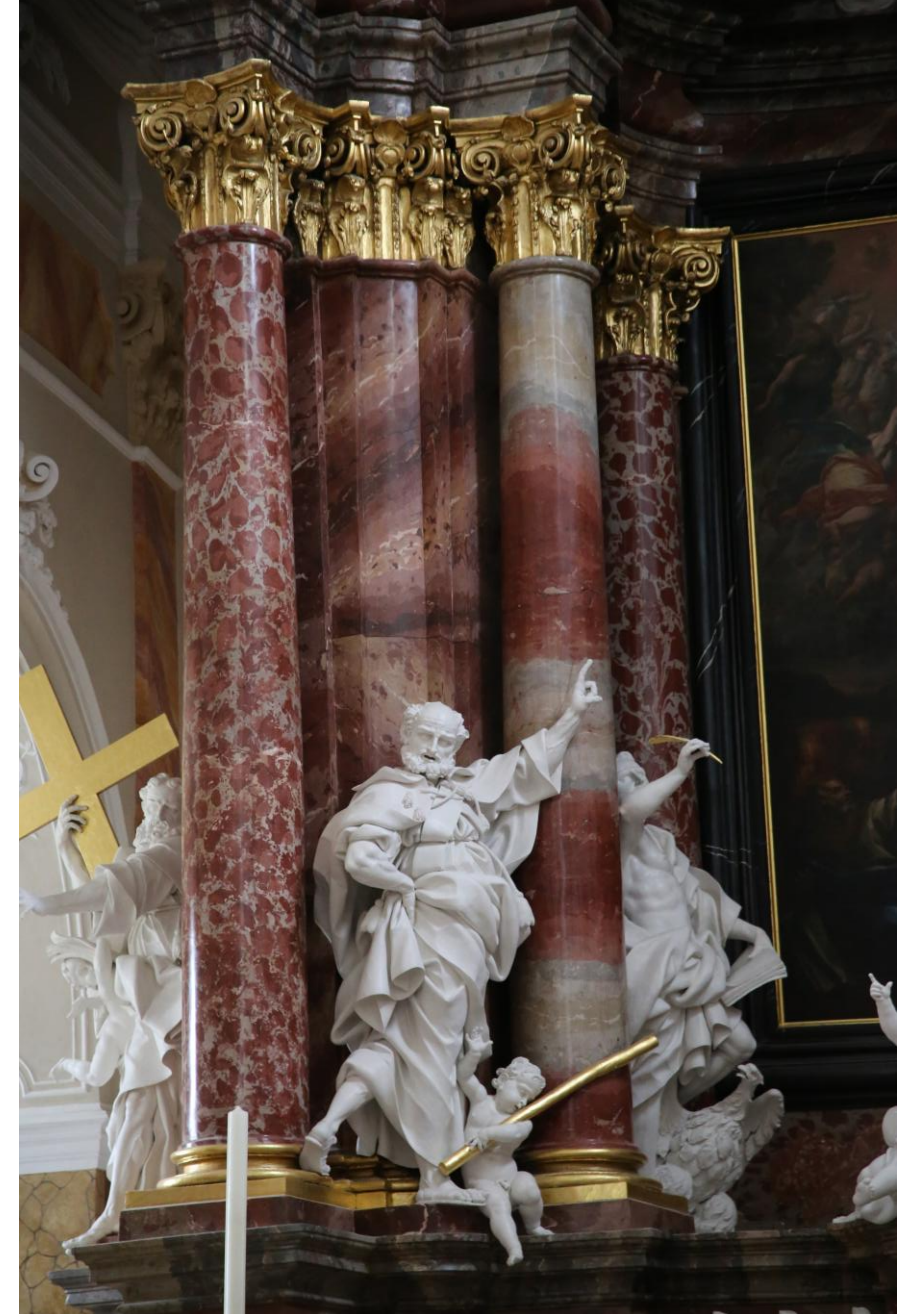


Blasius Pfeiffer, Reiche Kapelle, 1607.

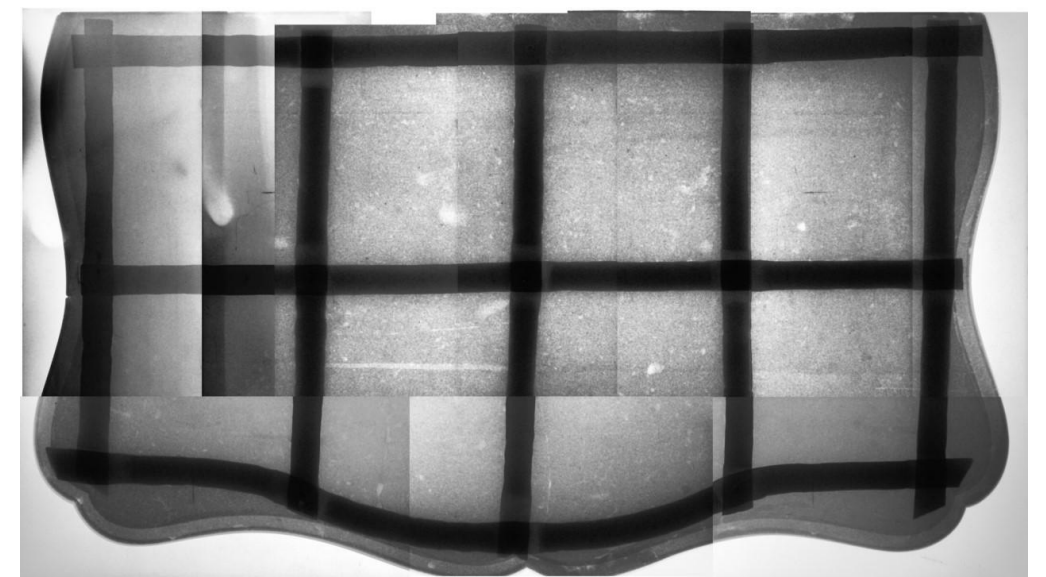


Blasius Pfeiffer, Reiche Kapelle, kartuše s datací výzdoby.

Užití techniky







Suroviny pro přípravu sádrového těsta



Suroviny pro přípravu těsta:

1. Sádra
2. Kihová voda - prodlužuje dobu zpracovatelnosti, utvrzuje - zvyšuje pevnost a trvanlivost
3. Pigmenty, barviva - barevení těst, realizace žil
4. Brusné kameny - broušení
5. Surový lněný olej a přírodní vosk - leštění

Hemihydrát

Hemihydrátová sádra (Plaster of Paris)

Vzorec: $\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$

Vzhled: bezbarvé až bílé krystaly, průsvitné

Krystalografická soustava: monoklinická

Morfologie: jehlicovité krystaly, vytváří shluky paralelně orientovaných krystalů

pH: (5-5,5) (1:10, hm.)

Rozpustnost ve vodě (20°C): 0,32 g/100 ml)

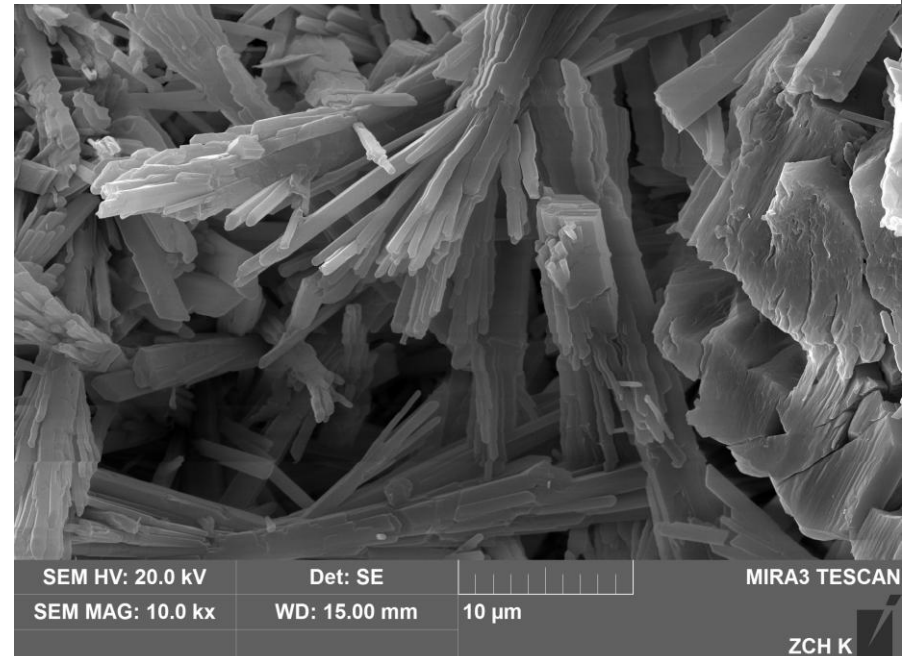


Bassanite (monoklinická krystalová struktura) – typická jehlicovitá struktura. Zdroj: <https://www.mindat.org/min-557.html>

Tuhnutí a tvrdnutí sádry - rehydratace



Snímek úlomku ze SEM, SE, mag. 10 kx.
Sádra+voda, w/s 0.6.



Klih

Složení: kolagenní protein

Původ: kostní, kožní, králičí, rybí...

Rozpustnost ve vodě: omezená, botná, zahřívát na 55 °C

Mikrobiologická odolnost: nízká, hnije



Kostní klij vyráběný z kostí hospodářských zvířat.

Účinek kliehu

1. Zpomaluje tuhnutí (z minut na hodiny), umožňuje přípravu a zpracování těst

Optimální doba tuhnutí těsta: **3-12 hodin**



Účinek klihu

2. Vliv na pevnost – utvrzení



Kostel sv. Víta, Libědice

Zjištěná paleta barvicích látek:

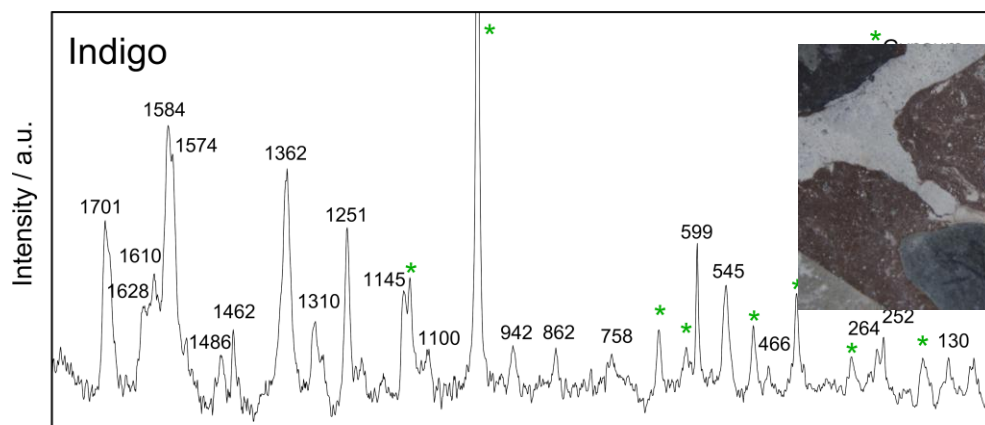
Bílé -

Žluté žlutá hlina, orpiment (As_2S_3), umbra

Červená červená hlina (X13), železitá červeň, rumělka (X9)

Modrá indigo (X8, X19)

Černá železitá a/nebo uhlíkatá čern (X4)



Ramanova spektroskopie pro identifikaci pigmentů.

Využití rentgenfluorescenční analýzy pro neinvazivní průzkum.

