

M3: Stavební materiály – vlastnosti, degradace/poškození a způsoby oprav a obnovy

Tradiční stavební pojiva a materiály (vápno, sádra, cementy výroba, vlastnosti a příprava stavebních materiálů)

Ing. Renata Tišlová, Ph.D., 19. – 21. únor 2025, FR UPCE Litomyšl



Obsah kurzu

- Vzdušné vápno a směsná vápenná pojiva
 - Přirozeně hydraulické vápno, románský a portlandský cement
-
- Výroba pojiv
 - Vlastnosti
 - Využití stavebních pojiv – stavební materiály

Vápno a vápenná pojiva

1

VÝZNAM VÁPNA a VYUŽITÍ



A | Malty, omítky, spárovací malty, štukové dekorace.



B | Štukové práce, V. Krajíček



C | Nástěnné malby: R. Tišlová.

D | Restaurování

Historie používání vápna

- První nálezy vápenných malt z období cca 12 000 p.n.l. (na území dnešního Turecka a Palestiny).
- První použití vápna do omítek před Římským obdobím (Egyptané – příměs do sádrových omítek, Kréta 1500 př. n. l.)
- Theophrastos (370-285 př. n. l.), žák Platóna a Aristotela, popsal vápno v jeho odborné publikaci „O kamenech“.
- **Zdokonalení technologie – Římané (cca od 3. stol. př. n. l.) – využití hydraulických příměsí – tzv. puzzolánová vápna (*Puzzuolli*)**
- Čína – použití při stavbě čínské zdi (od 3. století př. n. l.).
- 1570 - italský architekt Palladio upozornil na hydraulické chování vápen pálených z vápenců z okolí Padovy, které obsahovaly jílové minerály.
- 1729, 1756 - John Smeaton v roce 1756 píše o jílových „nečistotách“ vápen, které mají hydraulické účinky. V roce 1780 Higgins zjistil výhodnost použití některých popelů.

Nejdůležitějším klasickým písemným pramenem je ‘*Deset knih o architektuře*’ (Vitruvius, 2. kniha *Stavební materiály*)

- **Pojednání o způsobech pálení a hašení vápna**
- Přípravě omítek, štukových prací (až 9 nánosů omítek)
 - tectorium* – *opus tectorium* (od lat. Tegere = pokrývat)
 - albarium* – *opus albarium* (od lat. album = bílý)

Historie používání vápna – Čechy, Morava, Slezsko

- Od **9. století** (období Velkomoravské říše) - budování církevních a světských staveb. V roce 940 kníže Boleslav I. si v roce 940 nechal v Praze postavit svůj hrad z opuky, která byla spojena vápennou maltou.
- Z roku **999** se nám zachovala písemná zmínka o vápence, kterou vlastnil Břevnovský klášter.
- V místech dnešního Valdštejnského paláce stála ve **13. století** první vápenka Starého Města pražského. Surovina – vápence z okolí Prahy.
- **od středověku** - vápenky vlastnilo prakticky každé větší město nebo se budovaly při každé větší a nákladnější stavbě, např. Litomyšl.
- **Od 15. století** - české vápenictví stalo pojmem evropského významu. Jako surovinové zdroje sloužily vápence v Podolí, Bráníku na Zlíchově a v Radlicích, které se vyznačovaly hydraulickými vlastnostmi, které umožňovaly, aby se bránické vápno používalo pro vodní stavby. Do Evropy se vyváželo pod názvem „*Pasta di Praga*“.

Chronologický nástin vývoje využívání minerálních pojiv.

Základní rozdělení vápen podle současných norem ČSN-EN 459-1

Stavební vápno – definice, specifikace a kritéria shody

- **Dle způsobu tuhnutí:**

Vzdušná - **Tuhnutí a tvrdnutí:** tvrdnou pomalu na vzduchu reakcí s atmosférickým oxidem uhličitým; obvykle netvrdnou pod vodou, tj. nemají hydraulické vlastnosti.

CL – bílá vápna (*Calcium lime*, obsahuje CaO)

DL – dolomitická (*Dolomitic lime*, obsahuje CaO, MgO)

Hydraulická – **Tuhnutí a tvrdnutí:** tvrdnou rychle pod vodou, karbonatace přispívá k jejich tvrdnutí.

NHL – přirozeně hydraulická vápna

HL – hydraulická vápna

FL – směsné vápno

- **Formy vzdušného vápna**

- Nehašené vápno (Q - Quicklime) – vzdušné vápno ve formě oxidu vápenatého, pálené vápno. Kusová nebo jemně mletá. Prudce reagují s vodou.
- Hašené vápno (S, S PL nebo S ML – hydrated lime) – S – práškové (vápenný hydrát), S PL (vápenná kaše) nebo S ML (vápenné mléko).



Druhy vzdušných vápen dle ČSN 495-1

Druhy vzdušných vápen		
Značení	Slovní označení	Chemické složení vápna v hm. %
CL90	Bílé vápno 90	≥ 90 CaO+MgO (≤ 5)
CL80	Bílé vápno 80	≥ 80 CaO+MgO (≤ 5)
CL70	Bílé vápno 70	≥ 70 CaO+MgO (≤ 5)
DL85-30	Dolomitické vápno 85	≥ 85 CaO+MgO (≥ 30)
DL80-5	Dolomitické vápno 80	≥ 80 CaO+MgO (> 5)
DL90-30	Dolomitické vápno 90	≥ 90 CaO+MgO (≥ 30)
DL90-5	Dolomitické vápno 90	≥ 90 CaO+MgO (> 5)

Tab. 1: Klasifikace označení a klasifikace vzdušných vápen dle ČSN EN 459-1.

Dolomitická vápna (DL)

DL = vzdušné vápno sestávající z oxidu a/nebo hydroxidu vápenato-hořečnatého bez hydraulické/puzolánové příměsi. Obsah MgO se u dolomitických vápen musí být větší než 5 hm.% (viz. Tab. 1). Obsah MgO reflektuje označení dolomitického vápna.

např. DL 90-30 označuje dolomitické vápno s obsahem $\text{CaO}+\text{MgO} \geq 90 \%$, obsah MgO je $\geq 30 \%$

Příprava a zpracování dolomitických vápen:

Surovina: surovinu pro pálení dolomitických vápen tvoří dolomitické vápence nebo dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Jeho naleziště lze u nás nalézt na severu Čech (krkonošsko-jizerské krystalinikum), příp. v lokálních depozitech na střední a jižní Moravě (Uherčice, Jemnice, aj.), jižních Čechách (moldanubikum jižních Čech)

Zpracování dolomitických vápen: podobné podmínky jako u vápen z kalcitu

Pálené vápno: $\text{CaO}+\text{MgO}$

Hašené vápno: $\text{Ca}(\text{OH})_2+\text{Mg}(\text{OH})_2$

Výroba vápna – cyklus vápna

1. Pálení (850-1000°C)



Surovina: - vápenec, mramor, travertiny, slínovce, ...
Teplota výpalu: 850-1000°C

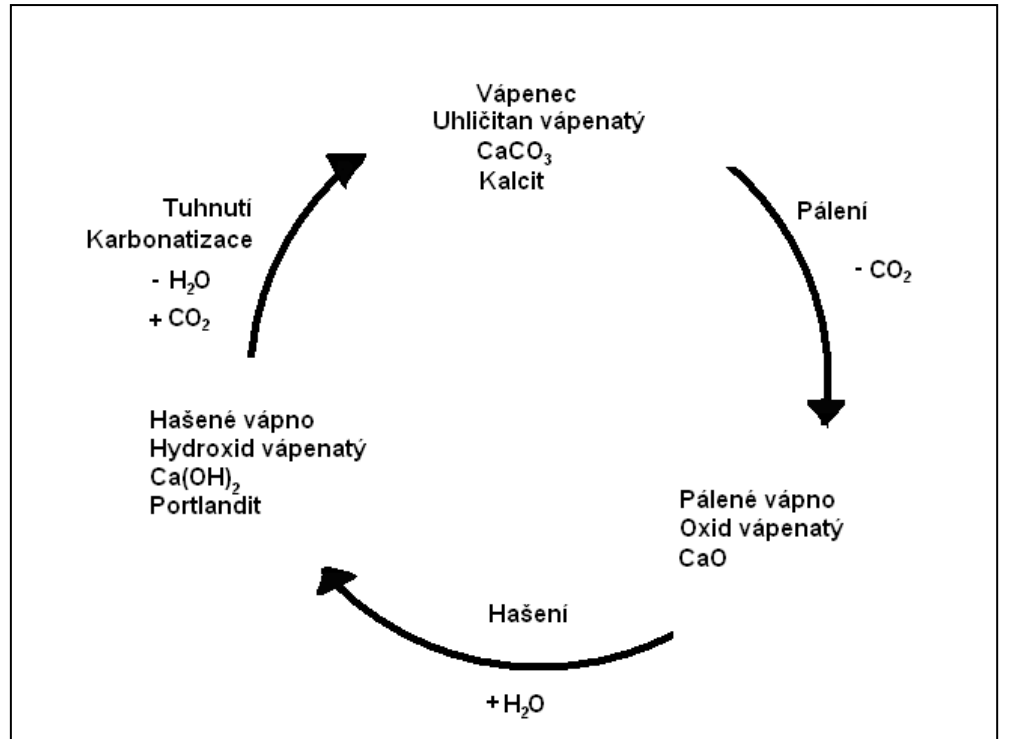
Změna vlastností: porozita, obj. hmotnost (úbytek hmotnosti až o 44%, měrný povrch)

2. Hašení – reakce s vodou (hydratace)

Vzniká $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – podle množství vody vzniká vápenná kaše nebo hydrát (**zvýšení objemu o 50 %**)

3. Tuhnutí, tvrdnutí – reakce s CO_2 (karbonatace)

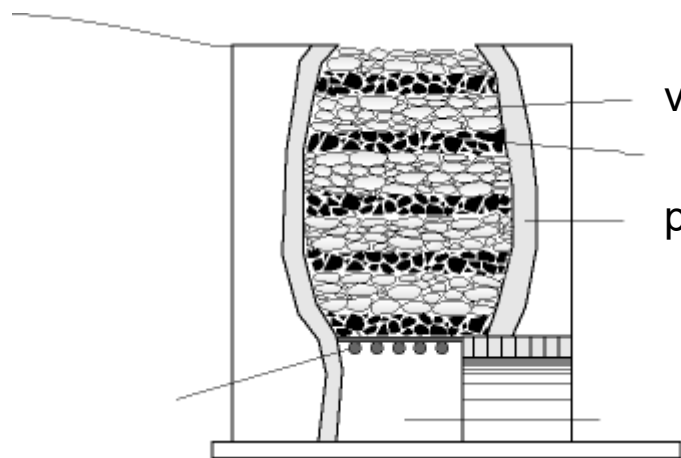
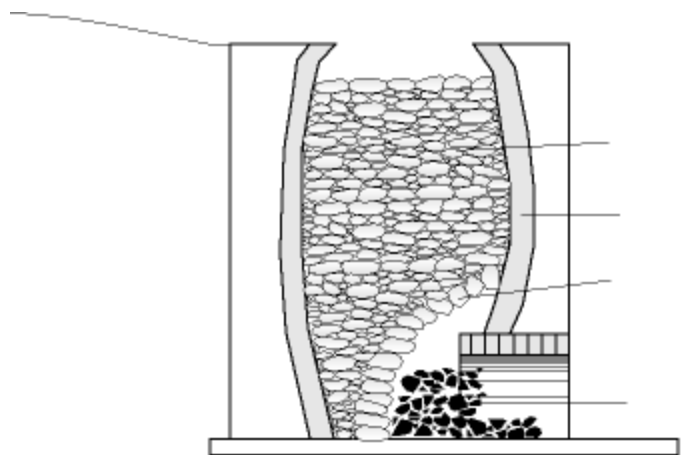
vzniká CaCO_3 – jiné vlastnosti než výchozí látka



1. PÁLENÍ

Tradiční způsoby pálení vápna — polní pece

1. Polní nebo-li milířové pece (v Čechách od 9. století)



vápenec

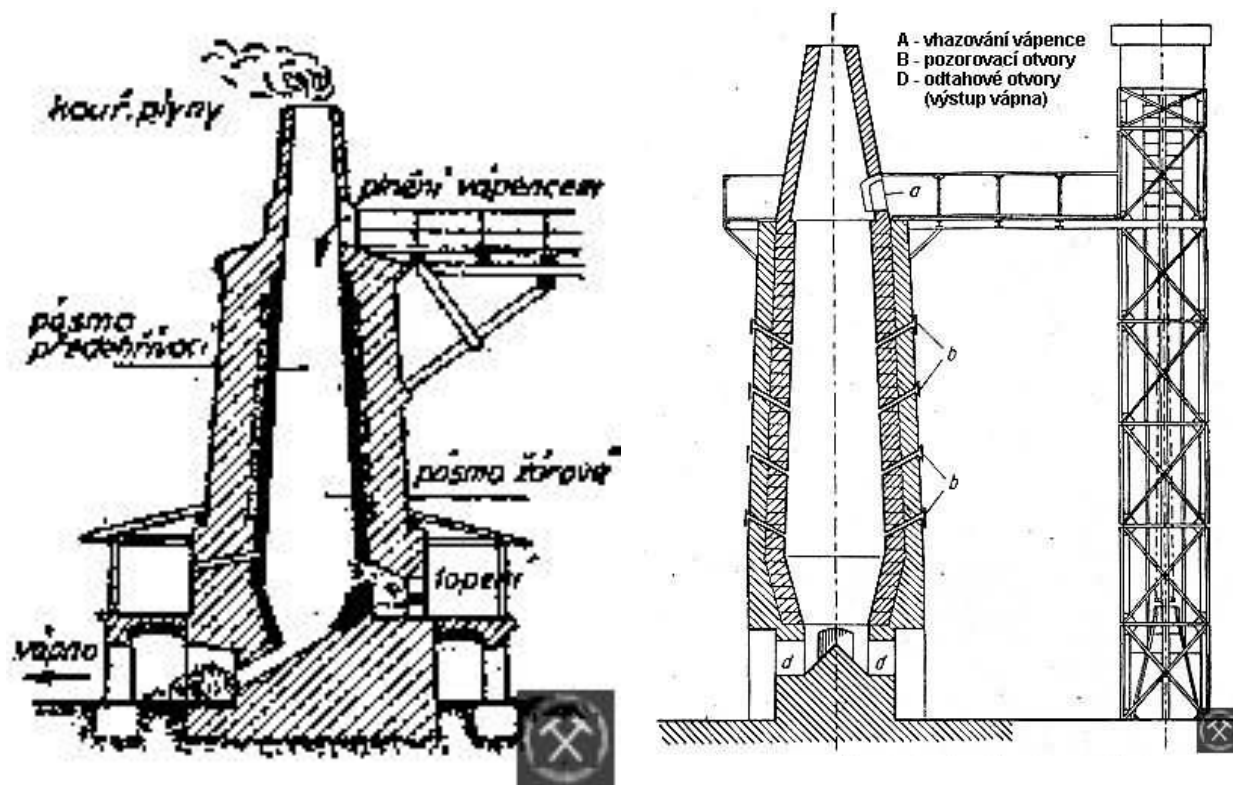
uhlí

plášť



Tradiční způsoby pálení vápna — šachtové pece

2. Šachtová pec (Shaft-kiln), kruhové pece (od 2.pol. 19.století)



šachtová pec v Bystrém u Poličky (poč. 20.století)

Historické způsoby pálení vápna — polní pece

- objem: 2 m³
- cihlový vnější plášť (vnitřní konstrukce nad topeništěm ze šamotových cihel)
- palivo: měkké dřevo



Faktory ovlivňující kvalitu vápna

Teplota výpalu

- měkce pálená – t.v. 850-950°C
- tvrdě pálená – t.v. 1000-1250°C

Kvalita a vlastnosti vápence

- Chemické a fázové složení, obsah a druh příměsí
- morfologie, porozita, hustota, měrný povrch
- Podmínky výpalu vápence – typ pece, paliva, doba pálení, parciální tlak CO_2



Vlastnosti páleného vápna (CaO)

- Bílá krystalická látka, z chemického hlediska CaO
- specifická váha: 3,2-3,4 g/cm³
- objemová hmotnost: 1,4-3,2 g/cm³
- vysoká porozita: 30-50%
- měrný povrch: 0,3-1 m²/g

Tab. 3.4.7: Eigenschaften von Branntkalken verschiedener Brenngrade (nach SCHIELE/BERENS)

Merkmal	Eigenschaften von			
	Weichbrannt	Mittelbrannt	Hartbrannt	Sinterkalk
Reindichte in g/cm ³	3,36 ± 0,04	3,36 ± 0,04	3,36 ± 0,04	3,36 ± 0,04
Rohdichte ¹⁾ in g/cm ³	1,45 ... 1,8	1,8 ... 2,2	2,2 ... 2,8	2,8 ... 3,2
Gesamtporosität in %	46 ... 55	34 ... 46	< 34	-
Mittlere Kristallgröße in µm	1 ... 2	3 ... 6	> 10	vollständig verwachsen
Spez. Oberfläche nach BET in m ² /g	> 1,0	0,3 ... 1,0	< 0,3	-
Reaktionsverhalten NaBlöschkurve in K/min	> 20	2 ... 20	< 2	-
Härte nach Mohs	2 ... 3	-	3 ... 4	-

¹⁾ Die Dichten dolomitischer Kalke liegen etwa 3 ... 4% höher.

- Měkce pálená vápna se slučují rychle s vodou (do 3 min), tvrdě pálená vápna (reaktivita min. 8 min)



2. HAŠENÍ



Produkty: hašené vápno (závisí na množství vody)

Vápenný hydrát – na sucho hašené vápno, s nižším množstvím vody

Vlastnosti: bílý prášek, chemicky Ca(OH)_2 , sytná váha okolo 440 kg/m^3 , rozpustnost ve vodě $1,6 \text{ g/l}$, pH 14 (silně alkalický)

Historicky prováděno v koších, dnes s aerosolem vody, variantou suchého hašení je hašení s vlhkým pískem.

Vápenná kaše – hašení s nadbytkem vody, vznik plastické kaše

Vápenná kaše: bílá kaše s plastickými vlastnostmi, z chemického hlediska Ca(OH)_2 , obsahuje ca 50 % vody, objemová hmotnost vápenné kaše dosahuje okolo 1400 kg/cm^3 , pH 14 (silně alkalická)

Tradiční postupy hašení: **A |** s vlhkým pískem
B, C | v hasnicích, **D |** hašení v koších



D |

Způsoby hašení

+ **SUCHÉ HAŠENÍ** - s ekvivalentním množstvím vody (na 100 kg CaO - 32 kg (l) vody)
Výsledný produkt: **vápenný hydrát suchý**

+ **MOKRÉ HAŠENÍ** - s přebytkem vody (na 100 kg CaO - 200 až 300 kg vody)
Výsledný produkt: **vápenná kaše**

+ **HAŠENÍ S VLHKÝM PÍSKEM**
Výsledný produkt: **malta**

PROBLÉMY PŘI HAŠENÍ:

- **Nadbytek vody** – **utopené vápno**

- **Málo intenzivní míchání, nedostatek vody** – **vznik nehomogenit, 'speklých' částic, dohašují na omítce**

BEZPEČNOST: Nutné míchání, ochrana očí i kůže před popálením!!



3. Zrání vápna - tuhnutí a tvrdnutí vápna

1. fáze - tuhnutí: dochází v důsledku odpaření vody, neprojevuje se výraznou změnou mechanických vlastností

2. fáze - tvrdnutí v důsledku karbonatace: reakce s oxidem uhličitým, projevuje se změnou mechanických vlastností, pomalý proces (ca 1 mm/28 dní). Karbonatace vápenných materiálů probíhá dle reakce:



Vliv podmínek na průběh 'zrání' vápna (např. vápenných omítek)

A) Vlhkost okolního prostředí - pro karbonataci je zásadní zvýšená relativní vlhkost (ideálně okolo 65 %), v suchém prostředí karbonatace probíhá pomaleji, naopak v příliš vlhkém nebo mokřém prostředí dochází k nasycení pórů vodou a zpomalení karbonatace

B/ Teplota - nízká teplota zpomaluje karbonataci, vysoká zvyšuje

C/ Koncentrace a parciální tlak CO₂, výměna vzduchu

Zrání dolomitických vápen – složitější proces (DL)

Zrání = karbonatace

- složitější proces oproti vápnům připraveným z kalcitu, není dosud zcela vyjasněn. Obě látky v pojivu, tj. hydroxid hořečnatý i vápenatý, mají rozdílnou rozpustnost ve vodě, čímž vzniká rozdíl v jejich schopnosti tvrdnout v důsledku reakce s oxidem uhličitým. Pomalejší proces oproti tvrdnutí bílých vápen.

Vznikající fáze:

brucit $[\text{Mg}(\text{OH})_2]$

nesquehonit $[\text{MgCO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}]$

Hydromagnesitu $[\text{Mg}_5(\text{CO}_3)_4 \cdot (\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$

kalcit (CaCO_3) a magnesit (MgCO_3) - vznikají velmi pomalu, v konkurenci s ostatními fázemi

Fázové složení dolomitických malt ovlivňuje i fyzikální a mechanické vlastnosti; většina hořečnatých fází je slabě krystalická až amorfní, dobře vyplňující porézní systém malty. Tím se zvyšuje její objemová hmotnost a mechanické vlastnosti. Jejich vlastnosti se v tomto ohledu podobají vlastnostem hydraulických pojiv, ve kterých v průběhu zrání vzniká amorfní gel, který způsobuje vysokou pevnost a houževnatost malt.

Použití vápna

1. Příprava malt, omítek a nátěrů

- připraveny podle původní receptury
- pojivo zpracováno původním postupem, plnivo o původní distribuci velikosti zrn
- použití tradiční řemeslných postupů (přídavek velmi malého množství vody, vlhčení a stínění nově nanesených ploch)

2. Doplnovací, tmelící maltoviny

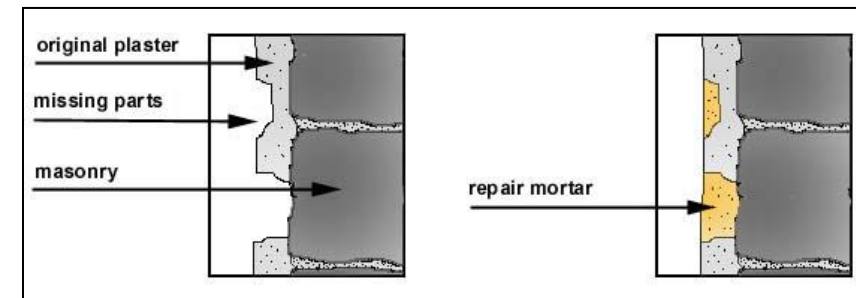
- (doplňování omítkových ploch, štukové výzdoby, rekonstrukce částí fasád, interiérových omítek, vyplnění spár....)



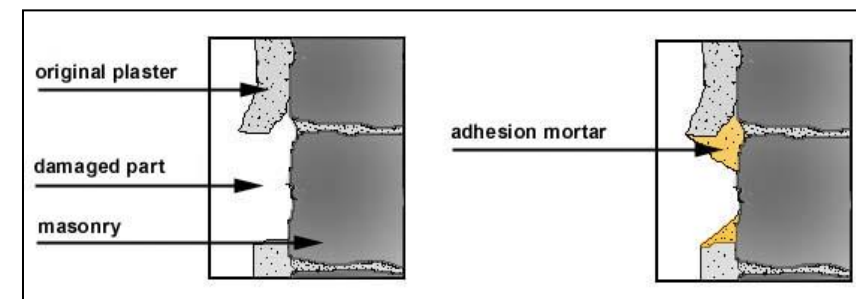
Použití vápna

3. Maltové směsi pro stabilizaci okrajů, injektáž

- (doplňování omítkových ploch, štukové výzdoby, rekonstrukce částí fasád, interiérových omítek, vyplnění spár....)



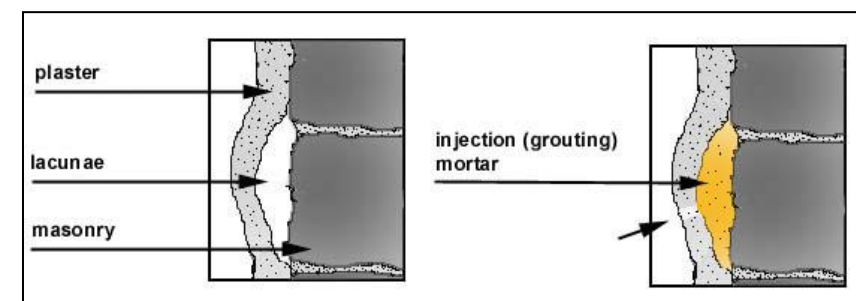
4. Injektážní hmoty (vyplňování prasklin, dutých míst, obnovení koheze mezi omítkou a zdí, mezi omítkovými vrstvami...)



5. Další materiály pro restaurování

Dispergované vápno (Sumpfkalk, Dispergiertes Weisskalk) - velmi jemné vápno s velikostí částic $\text{Ca}(\text{OH})_2$ v řádu mikro- danou technologickým procesem výpalu a hašení, dále následným mechanickým zpracováním. Vlastnosti podobné dlouho uleženímu vápnu. Využití zejména pro injektáže. např. CALXNOVA (Deffner & Johann)

Vápenné nanosuspenze - suspenze $\text{Ca}(\text{OH})_2$ v alkoholu (např. ethanolu, isopropanolu) s velikostí částic hydroxidu vápenatého okolo 50-250 nm. např. CaLoSiL[®] E25, CaLoSiL[®] IP25 (IBZ-Salzchemie, DE)



Vlastnosti vápenných malt – v čerstvém stavu

✓ **Zpracovatelské vlastnosti**

Vápenná pojiva, bez ohledu na složení, se vyznačují výjimečnými vlastnostmi v průběhu zpracování:

✓ **Plasticita - výborná**, plasticita či-li tvárnost, umožňuje zpracování různými postupy a nástroji, tvarování, povrchové úpravy, aj.

✓ **Zpracovatelnost - výborná**, na rozdíl od jiných pojiv se vápenné malty vyznačují dlouhou dobou zpracovatelnosti, která umožňuje tvarování hmoty po dostatečně dlouhou dobu.

? **Rozměrová stálost - omezená**, jedna z nevýhod vápenných malt však nastává při tuhnutí. Po odpaření vody dochází k trhání, zvláště při nanášení velkých objemů. Trhliny lze díky dlouhé zpracovatelnosti korigovat (ale jen do určité míry a doby). Doporučovaná tloušťka jednoho nánosu se pohybuje max. 2 cm. Již od starověku se vždy doporučovalo nanášení malty ve více vrstvách, přičemž do spodních vrstev omítek se často používala více pevná omítka s pucolánem a na vrchní vrstvy štuk s jemným plnivem a vyšším obsahem pojiva.



Plasticita vápenných malt při modelaci plastických doplňků. Rekonstrukce štukového epitafu, Český Rudolec. Foto: K. Šibravová.

Vlastnosti vápenných malt – v zatvrdlém stavu

- ✓ **Pomalá karbonatace**

ca 1 mm/28 dní

- ✓ **Nižší pevnost malt a omítek**

Pevnost se vyvíjí s časem, vyzrálé malty:

pevnost v tlaku (max. 2-3 MPa)¹

pevnost v tahu za ohybu (max. 1 MPa)¹

- ✓ **Nízký dynamický modul pružnosti** – vysoká elasticita

1500-3000 MPa (5000-25000 Mpa – PC malty)

- ✓ **Vysoká porozita, paropropustnost a nasákavost vodou** – výborné pro historické konstrukce nebo rekonstrukční účely. Hrozí poškození mrazem, vodorozpušnými solemi.

Otevřená porozita (20-30%)³

¹ DOI:[10.1016/j.cemconcomp.2004.02.017](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.017)

² doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117216

³ Arandigoyen et al, 2004



Plasticita vápenných malt při modelaci plastických doplňků. Rekonstrukce štukového epitaфу, Český Rudolec. Foto: K. Šibravová.

Význam vápna – restaurování kulturního dědictví

- Splňují požadavek na **kompatibilitu** materiálů používaných pro restaurování vůči historickému originálu, kompatibilita fyzikálních, mechanických, optických vlastností..ale i zpracovatelských a uživatelských.
- **Autenticita** – zachování tradičních postupů výroby a zpracování, řemeslného zpracování, tradic,...
- Ověřená **funkčnost**, výborné zpracovatelské vlastnosti.



Vápna s hydraulickými vlastnostmi

Obecně se jedná o pojiva se znečišťující příměsí, která je buď přirozenou součástí vápna (resp. vápence) nebo vzniká smísením vzdušného vápna s příměsí hydraulických a/nebo pucolánových látek.

Přirozené hydraulické vápno (NHL, natural hydraulic lime) - vápno vyráběné pálením více či méně zahliněných nebo křemičitých vápenců. Vápno se výpalu mele na jemný prášek nebo bez použití mletí. Pojiva mají schopnost tuhnout a tvrdnout po smíchání s vodou hydraulicky (pod vodou) a také reakcí s oxidem uhličitým ze vzduchu).

Směsné vápno (FL, formulated lime) - vápno s hydraulickými vlastnostmi složené ze vzdušného vápna (CL) a/nebo přirozeně hydraulického vápna (NHL) s další příměsí hydraulických a/nebo pucolánových látek. Tuhne a tvrdne jako NHL.

Hydraulické vápno (HL, hydraulic lime) - obsahuje vápno a další látky jako cement, vysokopecní struska, popílek, vápence, aj. tuhne a tvrdne jako NHL.

Pucolány

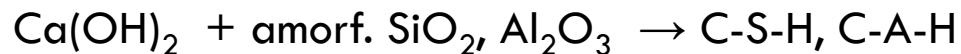
= přírodní nebo uměle připravené materiály obsahující amorfní vysoce reaktivní sloučeniny oxidu křemičitého (SiO_2) a oxidu hlinitého (Al_2O_3). V maltách reagují s hydroxidem vápenatým ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) za vzniku hydraulických sloučenin.

= název látek odvozen od italského města nedaleko Neapole Pozzuoli, kde se těžil sopečný popel

= tzv. latentní hydraulické přísady, tj. netuhnou pod vodou, ale zvyšují reaktivitu vápna

Pucolánová reakce:

- reakce založená na reakci vápna ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) a sloučenin obsažených v pucolánu, tj. oxidu křemíku a hliníku
- reakcí vznikají C-S-H gely a hydratované hlinitany nebo hlinitokřemičitany vápenaté (např. C_4AH_{13} , další C_3ASH_8 , aj.) - reakce je podobná jako u cementů (viz. románský, portlandský cement).



pucolánová aktivita - schopnost pucolánu za normálních podmínek reagovat s hydroxidem vápenatým ve vápně za vzniku hydratovaných křemičitanů, hlinitanů a hlinitokřemičitanů vápenatých. Měří se podle normativních zkoušek:

Přírodní pucolány

A) Přírodní - sopečné popely (tufy (A), tufity), pemza (B), spongolity, perlit, křemelina, jíly, tras

tuf - přírodní popel pocházející ze sopečných erupcí, velmi jemný a reaktivní (Pozzuoli, Santorini, aj.)

tufit - hornina složená ze sopečného popela a terigénního materiálu

pemza - vyvřelá hornina, sopečné sklo vysoce porézní struktury, která vzniká provzdušněním magmatu vulkanickými plyny

perlit (C)- přírodní vulkanické sklo, vzniká prudkým ochlazením lávy ve vodním prostředí. Před použitím se aktivuje kalcinací při teplotě 850-1150 °C (expandace, nárůst objemu až 5x) → expandovaný perlit - porézní s nízkou hmotností (účinkem unikající vodní páry). Obsahuje oxidy křemíku, hliníku a vyšší obsah oxidů alkalických prvků.

Použití: výborné akustické a izolační vlastnosti (izolace ve stavebnictví, protipožární konstrukce, cihly, přísada pro vylehčení vápenných nebo sádrových omítek, dekorativní omítky, akustické stěny, tvárnice, aj.)

křemelina - rozsvívková zemina složená ze schránek rozsvívek s vysokým obsahem reaktivního oxidu křemičitého

Rýnský tras – rozemletý vulkanický tufit (např. ze sopek pohoří Eifel v Německu)



Syntetické pucolány - technogenní

B) Uměle připravené/technogenní pucolány - pálené jíly, metakaolin, popílký

pálené jíly (metakaolin, snímek E, $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) - vyrábí ze z kaolinu $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ kalcinací při teplotě 540 °C, dochází k dehydroxylaci

- rentgenamorfní fáze → vysoká reaktivita
- částice s velkým měrným povrchem → vysoká reaktivita, ochotně reaguje s $Ca(OH)_2$

vysokopecní struska (D) - vzniká jako vedlejší produkt výroby železa za vysoké teploty nad 1300 °C, pro dosažení latentně hydraulických vlastností se mele.

popílký - vznikají jako vedlejší produkt spalování v elektrárnách a teplárnách, složení je ovlivněno způsobem spalování, hlavní složky tvoří sloučeniny oxidu křemíku (okolo 35-55 %), hliníku, železa (celkem asi 8-35 %), příp. vápníku (2-35 %) (stopy sloučenin s obsahem oxidů alkalických kovů, Ti, Mn, obsahují těžké kovy).

a další: mikrosilika (křemičitý úlet), expandovaný perlit



Latentně hydraulické látky

Látky obsahující kromě křemičitanů a hlinitokřemičitanů i CaO – jsou schopné po smíchání s vodou sami tvrdnout. Pucolány CaO neobsahují nebo jen velmi málo.

vysokopecní struska (D), některé druhy popílků

Minerální příměs	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O+K ₂ O	SO ₂ , jiné
Rýnský tras	57	18,5	6,3	5,2	2,2	9,2	0,2
Metakaolin	50-55	45-50	0,5-1,5	0,1-0,5	0,1-0,4	0,2-1	0,1-0,3
Jemný keramický prach	49-65	18-25	5-10	4-12	2-5	0,4-1,5	0,5-3
Elektrárenský popílek	25-55	15-25	0,3-5	<10	<4	<5	<3
Vysokopecní struska	30-50	7-20	2-10	25-40	1-15	0,6-2,4	2-3

Tab. 1: Chemické složení reaktivních minerálních příměsí – pucolánové a latentně hydraulické látky. Zdroj: Vejmelková, 2017, Tubag Tras.