

Malty středověkých staveb na Moravě (hrady, jejich ruiny a základy strženého kostela)

Karel Stránský, Antonín Buchal a Vladimír Ustohal

Úvod

V předloženém příspěvku se zabýváme až dosud opomíjenou oblastí – mineralogickou analýzou malt středověkých staveb, a to hradů a jejich ruin a základů strženého kostela. K mineralogickým rozborům byla použita metoda rentgenové difrakční fázové analýzy ve spojení s moderním rentgenovým difraktometrem SIEMENS D500, řízeným počítačem a vybaveným rozsáhlou databází krystalografických dat.

K napsání příspěvku na toto nekonvenční téma jsme se rozhodli až po získání a analýze rozsáhlejšího souboru malt a po zkušenostech s mineralogickou analýzou železářských strusek, a také strusek po zpracování stříbrných, olovených a měděných rud, při kterých se metoda rentgenové difrakční fázové analýzy, použitá i při analýze malt, významně uplatňuje. Při zpracování tématu jsme využili prameny [1 až 10] citované i s poznámkami v závěru příspěvku.

Pod názvem *maltoviny* rozumíme látky, které jsou schopné tvořit *maltu*. Jsou to vápno, cement, sádra aj. Jestliže maltoviny tuhnou i pod vodou, pak se označují jako *maltoviny hydraulické*, například hydraulické cementy. *Malty* jsou více nebo méně plastické hmoty, které po určité době tuhnou a tvrdnou. Používá se jich ke spojování stavebních kamenů v pevný celek, na omítky nebo i na různé okrasné předměty. Rozlišují se *malty vzdušné*, které tvrdnou jen na vzduchu (k nim se počítá *malta vápenná*, popřípadě sádrová), a *malty hydraulické* (ke kterým se počítá hydraulické vápno a cementy).

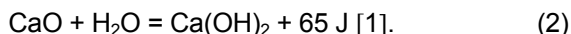
Malta vápenná se skládá z *hašeného vápna*, *písku* a *vody*, přičemž hašené vápno se připravuje z *páleného vápna* hašením. Použití vápenných malt je na území korunních zemí – Čech, Moravy a Slezska – doloženo hluboko do středověku.

Pálené vápno se vyrábí pálením vápence (kalcitu), uhličitanu vápenatého CaCO_3 , který bývá velmi často znečištěn uhličitánem hořečnatým MgCO_3 (magnezitem), hydroxydem železitým, alkaliemi, organickými látkami a popřípadě i hlinou. Vápenec se při červeném žáru rozkládá na pálené vápno a oxid uhličitý podle rovnice

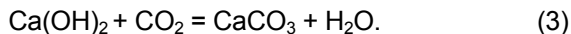


přičemž rozklad vápence je tím snazší a rychlejší, čím vyšší je teplota a čím nižší je tlak vznikajícího oxidu uhličitého. Také výroba páleného vápna sahá na našem území již do raného středověku.

Pálené vápno se velmi energicky slučuje s vodou, *hasí se*, přičemž se současně uvolňuje velké množství tepla. Produktem hašení je *vápno hašené*, které slouží jako jedna ze tří složek, a to složka hlavní, k výrobě *vápenné malty*. Hašením páleného vápna vzniká *hydroxid vápenatý* reakcí



Jestliže se hašené vápno smísí v přiměřeném poměru s vodou a pískem, získá se kašovitá hmota, malta, kterou se vyplňují spáry mezi jednotlivými kusy stavebního materiálu. Ve středověku byl tímto stavebním materiálem používaným v našich zemích při stavbě hradů i kostelů, až na výjimky, kámen. Malta postupem času tuhne, a to jednak tím, že se z ní vypařuje přebytečná voda, jednak pozvolna probíhající přeměnou hydroxidu vápenatého na uhličitán vápenatý na úkor oxidu uhličitého ze vzduchu podle reakce



Tuhnutí malty lze uspišit zvýšením koncentrace okolního oxidu uhličitého a zvýšením teploty, kterou se vypuzuje voda. Obojího účinku bylo možno dosáhnout například tím, že se v čerstvě zděných místnostech spalovalo dřevěné uhlí.

Písek používaný pro maltu má mít střední velikost, jednotlivá zrna pak různou velikost, má být ostrohranný, aby k němu složka hydroxidu vápenatého dobře lnula a zároveň má být čistý, bez hlinitých a organických látek, z nichž se mohou následně tvořit humusové kyseliny, které tuhnoucí maltu rozrušují [4].

Míšení malty, to znamená poměr hašeného vápna a písku, se dnes doporučuje v poměru 1 : 3 pro zdění, až v poměru 1 : 5 pro základovou maltu a v poměru 1 : 1 až 1 : 2 na omítky. Množství použité vody velmi ovlivňuje vlastnosti malty. Malta obsahující 1 až 6 % vody nejlépe tvrdne [4].

Je pozoruhodné, že staré kamenné stavby, dochované dnes už často jen jako zříceniny, vystavené nepříznivému proměnlivému počasí, v létě na slunci teplotám až přes 40 i více stupňů Celsia, v zimě mrazům, často hluboko pod -20 i -30 °C, častým deštěm i jiným nepříznivým účinkům, odolávají *zuba času* mnohem více, než cihlové i kamenné stavby posledních desetiletí, budované rovněž s použitím vzdušných vápenných malt.

Abychom přispěli k objasnění příčin podivuhodně vysoké rezistence středověkých kamenných staveb a s ní spojeným velmi pozvolným, samovolným degradačním procesem, kterým prochází zdivo našich středověkých hradů (ať již dosud udržovaných jako památky nebo ponechaných svému osudu jako ruiny), pokusili jsme se *podívat* na fázové složení středověkých malt prostřednictvím metody rentgenové difrakční analýzy. Tato metoda dnes totiž umožňuje poměrně rychlou a přitom spolehlivou identifikaci krystalických fází, obsažených v analyzované látce, a to:

- díky výkonným, počítačově řízeným přístrojům, rentgenovým difraktometrům,
- díky vysoké zásobě v databázi uložených rentgenových difrakčních spekter látek s krystalovou strukturou (dostupné databáze dnes obsahují až 10⁵ i více spekter anorganických i organických látek)
- a díky možnostem automatického srovnávání a testování změřeného difrakčního spektra se spektry látek v databázi.

Jestliže aplikujeme tuto analytickou metodu ke stanovení fázového, v našem případě *mineralogického* složení malt, pak lze předpokládat, že získané informace mohou postupně, přinejmenším alespoň kvalitativně, přispět k objasnění oné podivuhodné rezistence dosud romanticky působících středověkých kamenných staveb, hradů a jejich zřícenin.

Metodika odběru vzorků malt a rozborů

Soubor středověkých kamenných staveb, z nichž byly odebrány vzorky malt, byl zvolen náhodně a zahrnoval celkem 15 lokalit. Šlo především o gotické hradní zříceniny, v jednom případě o hrad goticko-renesanční udržovaný jako kulturní památka, a v jednom případě šlo o základy pozdně románského kostela strženého za josefinských reforem.

Vzorky malt v množství nejvýše malých desítek gramů, byly odebírány ze spár buď stojícího nebo zříceného kamenného zdiva příslušné stavby, a to z míst, kde malta pevně přiléhala ke kamenu. Zpravidla bylo nutno maltu odrýpnout až odseknot tupým nožem, nebo sekáčkem. Vzorky malt byly odebírány podle jejich vzhledu tak, aby byl vždy odebrán průměrný vzorek. K základním zjištěním při odběrech vzorků malt z různých lokalit patří, že šlo vesměs o malty připravené z poměrně jemnozrnného písku, jehož křemenná zrna měla průměrnou velikost malých jednotek milimetrů, což svědčí o tom, že písek k přípravě malt byl prosíván. Z některých lokalit bylo odebráno více vzorků malt. Důvodem k tomu byla buď vzhledová (morfologická) odlišnost malt, nebo snaha objasnit příčiny zcela zříceného zdiva, popřípadě příčiny dosud stojící věže aj. Všechny vzorky byly odebrány v rozpětí čtyř let 1996 až 2000.

Analýze byly podrobeny pouze celistvé kousky malty. Tyto kousky byly rozemlety na prach v laboratorním achátovém mlýnku a ve formě prášku připraveny ve speciálním držáku pro měření na rentgenovém difraktometru SIEMENS D500. Analyzované množství maltového prášku, rozemletého na zrnitost pod 10 μm, bylo vymezeno objemem držáku o průměru 3 cm a výšce 0,4 cm. Analyzovaný objem *maltového prášku* tedy činil 2,83 cm³.

Pokud jde o historii lokalit, z nichž byly odebrány vzorky malt, odkazujeme u hradů na literaturu [5,7], u základů kostela na literaturu [6,8]. Důvodem je dodržení přiměřeného rozsahu příspěvku.

Výsledky analýz a jejich mineralogické zhodnocení

Základní výsledky fázových analýz jsou přehledně uspořádány v *tab. 1*, která obsahuje: symbol lokality, pořadové číslo vzorku, název lokality, stručnou informaci o tom, odkud byl vzorek malty odebrán, nalezené fázové složení hlavních komponent malty, vyjádřené stechiometrickým vzorcem a názvem korespondujícího minerálu, a nakonec poznámku upřesňující buď místo odběru vzorku malty nebo lokalitu. Kvalitativně identifikované minerály jsou v *tab. 1* seřazeny podle klesající intenzity jejich spektrálních čar v rentgenovém spektru analyzované malty.

Z *tab. I* plyne, že mineralogické složení středověkých malt je velmi pestré. Jednoznačně dominantními minerály malt jsou však křemen a kalcit (vápenec). Poté následují živce, z nichž je četnější výskyt plagioklasů (živců sodnovápenatých – byly nalezeny albit a anortit), méně četný je výskyt ortoklasů (živců draselných – nalezeny byly ortoklas a mikroklín), několikanásobně méně četný je výskyt minerálů typu slíd (nalezeny byly lepidolit, muskovit, klinochlor) a s nimi v podstatě stejná je také četnost jílu (nalezen byl illit a montmorillonit). Jako ojedinělý lze pokládat kvalitativně zjištěný výskyt grafitu, richteritu, riebeckitu, magnезitu, korundu a tremolitu.

Matematicko-statistické hodnocení mineralogického složení

Ke kvantitativnímu posouzení četnosti výskytu minerálů v maltách byly zjištěné minerály účelově rozděleny do sedmi skupin. Jejich rozdělení a označení je uvedeno v *tab. II*.

Vlastní kvantitativní posouzení četnosti minerálů v maltách pak plyne z *tab. III*, v níž byla přítomnost minerálu příslušné skupiny v analyzované maltě označena symbolem 1 a nepřítomnost minerálu dané skupiny symbolem 0.

Celkem bylo v maltách kvalitativně zjištěno 17 různých minerálů. Z těchto minerálů lze pokládat identifikaci křemene, kalcitu, živců, slíd a jílu za zcela spolehlivou. Možnost identifikace minerálů zbývajících, tj. grafitu, richteritu, magnезitu, korundu, tremolitu a riebeckitu, jejichž koncentrace ve sledovaných maltách byla nízká, je však na mezi detekovatelnosti minerálu použitou metodou. Jejich určení v maltách proto pokládáme za méně spolehlivé. Minerály, které se nepodařilo identifikovat s přiměřenou spolehlivostí, nebyly do tabulky zahrnuty.

Z přehledové *tab. III* plyne, že v každé ze vzdušných malt středověkých staveb lze očekávat přítomnost kalcitu a křemene, a to s pravděpodobností kolem 95%. Z dalších minerálů jsou v maltách nejčastěji zastoupeny živce. Z nich plagioklas, tj. sodnovápenatý živce, se v těchto maltách vyskytuje asi dvakrát častěji (80%) než živce draselný, tj. ortoklas (40%). Přibližně stejná je pravděpodobnost výskytu jílu a slíd, která pro každou skupinu těchto minerálů činí 20%. To znamená, že v každém pátém vzorku malty byla nalezena slída, popřípadě jíla.

Ze skupiny jiných minerálů, které mají úhrnnou relativní četnost výskytu v maltách 25%, je to pouze grafit, který byl nalezen v obou vzorcích malty z hradu Starý Jičín. Zbývajících minerálů (*tab. II*, skupina G) byly identifikovány pouze v jednom vzorku malty z analyzovaného souboru. Navíc jde o minerály, jejichž identifikace v maltě je při jejich velmi nízké koncentraci nejistá.

Z posledního řádku *tab. III* plyne, že podle četnosti relativního zastoupení skupin minerálů ve sledovaných středověkých maltách činí křemen (A), kalcit (B), plagioklas (C) a ortoklas (D) celkem 82,6%, na zbývajících skupinách minerálů pak připadá necelých 20%. Podle *Paretova principu* [9] (viz poznámka u citované literatury) lze proto předpokládat, že křemen, kalcit a oba druhy živců budou mít na kvalitu malt dominantní vliv. Z tohoto důvodu jsme pokládali minerály skupin A, B, C a D za hlavní proměnné, určující v prvním přiblížení základní charakteristiky mineralogického složení malt. K posouzení vzájemné podobnosti středověkých malt našich hradů a strženého kostela jsme použili shlukovou analýzu.

Podle této matematicko-statistické analýzy, která v našem případě vychází z dat uvedených v *tab. III*, lze 20 analyzovaných malt pro čtyři proměnné veličiny (minerály A, B, C a D) rozdělit celkem do šesti shluků. Z těchto šesti shluků představují čtyři samostatné shluky jednotlivé malty. Jsou to malty ze základů strženého kostela sv. Klimenta (vzorek A3(3), z hradu Košíkova G1(10), z hradu Starý Jičín I2(13) a z hradu Mostiště J1(14). Tyto malty se neliší žádnými ze zbývajících malt, a to ani sobě navzájem.

Dalších šestnáct malt bylo na základě shlukové analýzy rozděleno do dvou shluků. Početně menší shluk, obsahující čtyři navzájem se svým fázovým složením podobající vzorky malt, zahrnuje malty ze základů strženého kostela sv. Klimenta A2(2), z hradu Rychvaldu B1(4), z hradu Janštejna M1(17) a z věže hradu Štamberka O1(19). Nejpočetnější shluk, zahrnující dvanáct vzorků malt, pak má ve své množině všechny zbývajících malty, to znamená maltu z věže sv. Klimenta A1(1), obě malty z věže hradu Roštejna C1(5) a C2(6), z Hrádku u Žďárce D1(7), z hradu Pyšolce E1(8), z hradu Zubštejna F1(9), z hradu Templštejna H1(11), jednu z malt hradu Starý Jičín I1(12), z Nového Hradu u Blanska K1(15), z hradu Kraví Hora L1(16), z hradu Trmačova N1(18) a z hradeb hradu Štamberka O2(20).

Z předchozí analýzy plyne, že složení středověkých vápenných malt bylo značně proměnlivé a závislé na složení vápence a písku, které byly na jednotlivých lokalitách k dispozici. Ztěžji lze předpokládat, že písky i vápenec byly dopravovány na místo stavby hradu či kostela z velké

vzdálenosti. Výběr základních surovin vápenné malty byl tehdy v mnohem větší míře než je tomu dnes ovlivněn místními geologickými poměry.

Mineralogické složení vápenných a cementových malt

K porovnání rozdílů v mineralogickém složení středověkých vápenných malt s cementovými maltami používanými v současnosti byly z archivu rtg. laboratoře VUT-FSI-ÚMI-OSFA-Brno vybrány dvě cementové malty, jejichž mineralogické složení je uvedeno v *tab. IV*.

Z *tab. IV*. je zřejmé, že cementové malty mají odlišné zastoupení minerálů než středověké vápenné malty, takže je velmi nepravděpodobné, že by mohlo dojít k vzájemné záměně při jejich analýzách, popřípadě při odběru vzorků. Z minerálů je to pouze křemen, kalcit a albit (sodnovápenatý živec – plagioklas), které provázejí jak středověké vápenné malty, tak cementové malty současnosti. Z prvků, který nebyl zaznamenán ani v jednom z analyzovaných vzorků středověkých vápenných malt a naopak provází malty cementové, je to síra, tvořící základní složku minerálů etringitu, bassanitu a sádrovce. Síraný, obsahující složku (SO_4), které jsou součástí dnešních cementů, se velmi pravděpodobně ve středověkých vápenných maltách nenacházejí.

Kvantitativní odhad složení středověkých vápenných malt

První čtyři vzorky vápenných malt, tj. vzorky pocházející ze základů strženého pozdně románského kostela sv. Klimenta a vzorek malty z hradu Rychvaldu, byly podrobeny také kvantitativní bezstandardové rtg. difrakční analýze metodou podle *Rietvelde* a zhodnoceny originálním postupem vypracovaným autory tohoto příspěvku. Pro stručnost textu uvádíme pouze výsledky kvantitativní analýzy v *tab. V*.

Z kvantitativního hlediska se poměrně dobře shodují výsledky analýzy malty A2(2) odebrané z obvodového zdiva lodě a malty A1(1) odebrané z vnitřního zdiva věže. Naproti tomu se od obou výsledků odlišuje výsledek analýzy vzorku malty A3(3) odebraného z vnitřní stěny apsidy a také vzorek malty B1(4) z hradu Rychvaldu.

Je přitom pozoruhodné, že malta z apsidy obsahuje menší podíl kalcitu (11,9 hm.%) a větší podíl křemene (29,3 hm.%) než malta z věže, v níž je podíl kalcitu téměř trojnásobně větší (29,5 hm.%) a obsah křemene přibližně poloviční (14,8 hm.%). Podobné složení jako malta z věže má malta z vnějšího zdiva lodě kostela. Největší podíl kalcitu však obsahuje malta ze zdiva paláce zříceniny hradu Rychvaldu u Lysic (*tab. V*).

Kvantitativní odhad podílů výchozích surovin používaných k přípravě maltoviny, to znamená hmotnostní podíl hašeného vápna a písku, je uveden v *tab. VI*. Vidíme, že maltovina připravená ke zdění vnitřní základové části zdiva apsidy strženého kostela sv. Klimenta v Lipůvce byla *nejchudší* a mohla být připravena v poměru: 1 díl hašeného vápna k 10 dílům písku (viz malta – A3(3), *tab. VI*).

Maltovina připravená ke zdění základů věže kostela a základů zdiva lodě byla *bohatší* než předešlá a mohla být připravena v poměru: 4 díly hašeného vápna k 13 dílům písku (pro věž kostela, malta A1(1), *tab. VI*), popřípadě v poměru: 4 díly hašeného vápna k 15 dílům písku (pro zdivo lodě, malta A2(2) v *tab. VI*).

Nejbohatší byla maltovina připravená ke zdění zdiva paláce hradu Rychvaldu u Lysic, jehož původ se přisuzuje pánům z Kunštátu, která mohla být připravena v poměru: 5 dílů hašeného vápna k 6 dílům písku (malta B1(4) v *tab. VI*).

Nelze vyloučit, že do malty byl přidáván také písek, který mohl obsahovat minerály s jistou koncentrací kalcitu, popřípadě vápníku, nevyjímaje rozdrčený kalcit (vápenec). Jedno od druhého (tj. vápník v hašeném vápně, a vápník v písku) není dnes možno od sebe analýzou dost dobře oddělit.

Zdá se však, že tehdejší stavitelé dobře znali závislost mezi poměrem hašeného vápna a písku ve vápenné maltě a její výslednou kvalitou a pružně ji přizpůsobovali i využívali k účelu nosnému, či obrannému, který měla příslušná středověká architektura plnit. Analýzy přitom nasvědčují, že malty připravované ke zdění objektů pevnostního charakteru mohly být připravovány z jakostnější maltoviny.

K významu mineralogických analýz z pohledu archeologie

Je vhodné ještě upozornit na jednu z předností, kterou difrakční fázová rtg. analýza přináší, a to na možnost navzájem rozlišit krystalovou strukturu minerálu, která je typická pro nízké teploty oscilující například kolem teploty okolí, od struktury příznačné pro teploty vyšší až vysoké, kdy tentýž minerál je například následkem požáru vystaven teplotám až několik set (i přes tisíc) stupňů Celsia. To znamená, že metoda umožňuje rozlišit nízkoteplotní a vysokoteplotní modifikaci téhož minerálu.

V této souvislosti jsou pozoruhodné výsledky malty H1(11) odseknuté ze zdiva věže hradu Templštejna u Nesměře nad řekou Oslavou. Jako hlavní minerály byly v maltě nalezeny: křemen, živec (albit), kalcit, anortit a jako složka podléhající mineralizaci a absorbující chemicky vázanou vodu také v malém, stopovém množství edenit (v tab. II není uveden). Z těchto fází má albit (NaK)AlSi₃O₈ nalezený v maltě H1(11) stejnou vysokoteplotní modifikaci jako živec nalezený v keramice pálené v žáru. Jako pravděpodobné vysvětlení se nabízí kontakt zdiva a malty v něm s žárem, což v mezním případě mohlo znamenat dosud zcela nejasný zánik hradu Templštejna následkem požáru [10].

Závěr

Předložený příspěvek se dotýká až dosud opomíjené oblasti, a to mineralogické analýzy malt středověkých staveb, hradů a jejich ruin a základů strženého kostela.

K mineralogickým rozborům byla využita metoda rentgenové difrakční fázové analýzy ve spojení s moderním rentgenovým difraktometrem SEMENI D500, řízeným počítačem a vybaveným rozsáhlou databází krystalografických dat.

K napsání příspěvku na toto téma, jsme se rozhodli až po získání a analýze rozsáhlejšího souboru malt a po zkušenostech s mineralogickou analýzou železářských strusek, a také strusek po zpracování stříbrných, olověných a měděných rud, při kterých se metoda rentgenové difrakční fázové analýzy, použitá i při analýze malt, významně uplatňuje.

Příspěvek byl napsán k připomenutí památky našeho kolegy a přítele pana ing. Karla Cíhy, CSc. (+1996), který byl rovněž jedním z iniciátorů této studie a stál u jejích počátků.

Literatura a poznámky:

- [1] VOTOČEK, E. – HEYROVSKÝ, J. 1944: Chemie anorganická. IV. vydání. Česká chemická společnost pro vědu a průmysl. Praha.
- [2] PETŘŽELA, L. 1955: Slévárenské formovací látky. SNTL, Praha.
- [3] NĚMEC, F. 1973: Klíč k určování nerostů a hornin. 3. vydání. SPN, Praha.
- [4] ANDRLÍK, K. a kol. 1954: Přehled chemie a chemické technologie. I. díl. Práce, Praha.
- [5] STRÁNSKÝ, K. 1996: Kostely svatého Klimenta. In: Sv. Kliment u Lipůvky, významná památka z počátku našich dějin. Moravskoslezský archeologický klub, Brno, s. 17-22.
- [6] MUSIL, F. a kol. 1987: Hrady a zámky na Moravě. Olympia, Praha.
- [7] ODEHNAL, F. 1995: Poutní místa Moravy a Slezska. DEBORA, Praha.
- [8] PLAČEK, M. 1996: Hrady a zámky na Moravě a ve Slezsku. LIBRI, Praha.
- [9] SEIWERT, L.J. 1995: Čas jsou peníze, Naučte se řídit svůj čas. Management Press, Praha, s. 317. (Vilfredo Pareto formuloval a pomocí statistických metod ověřil již koncem 19. století princip, že v určité množině prvků má několik málo prvků největší hodnotu a největší vliv. Tak například - v obchodě 20% zákazníků znamená až 80% obrátu, ve výrobě 1/5 druhů zmetků znamená 4/5 ztrát, koncentrace na 20% klíčové pracovní doby znamená cca 80% výsledků (tj. konečného efektu) atp. Analogicky lze v našem případě očekávat, že malá skupina minerálů, kterou tvoří křemen, kalcit a oba druhy živců, a která má v maltách ve vztahu ke zbývajícím minerálům dominantní zastoupení 82,6%, bude mít na tyto malty také největší vliv).
- [10] STRÁNSKÝ, K. – USTOHAL, V. – BUCHAL, A. 1999: Záhadný hamr na Oslavě. Slévárenství 47, č. 6-7, s. 447-451.

Tab. I Základní charakteristiky lokality, odběru vzorku malty a stanovené fázové složení komponent vzdušných malt

Označení vzorku	Lokalita	Vzorek malty (místo odběru)	Fázové složení komponent stechiometrie – minerál	Poznámka
A1 (1)	Kostel sv. Klimenta u Lipůvky	vnitřní zdivo věže	SiO ₂ křemen CaCO ₃ kalcit NaAlSi ₃ O ₈ albit KAlSi ₃ O ₈ mikroklin	základy věže strženého kostela
A2 (2)	Kostel sv. Klimenta u Lipůvky	obvodové zdivo lodě	SiO ₂ křemen NaAlSi ₃ O ₈ albit CaCO ₃ kalcit KAlSi ₃ O ₈ mikroklin	základy zdiva strženého kostela
A3 (3)	Kostel sv. Klimenta u Lipůvky	vnitřní zdivo apsidy	SiO ₂ křemen NaAlSi ₃ O ₈ albit KAlSi ₃ O ₈ mikroklin	základy zdiva strženého kostela
B1 (4)	Hrad Rychvald u Lysic	vnitřní zdivo paláce	SiO ₂ křemen CaCO ₃ kalcit NaAlSi ₃ O ₈ albit KAlSi ₃ O ₈ mikroklin	zřícenina – torzo zdiva paláce
C1 (5)	Hrad Roštejn u Telče	vnitřní zdivo hradní věže	CaCO ₃ kalcit (K ₃ O)Al ₂ Si ₃ ·AlO ₁₀ (OH) ₂ illit SiO ₂ křemen Na ₃ (AlMg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) montmorillonit (CaNa)·(SiAl) ₄ O ₈ anortit	goticko-renesanční hrad, sedmiboká věž hradu
C2 (6)	Hrad Roštejn u Telče	vnitřní zdivo hradní věže	(CaNa)·(SiAl) ₄ O ₈ anortit SiO ₂ křemen CaCO ₃ kalcit	sedmiboká věž hradu (jiné patro)
D1 (7)	Hrádek (větší tvrz) u Žďárce na Tišnovsku	hradební zdivo	SiO ₂ křemen CaCO ₃ kalcit (CaNa)·(SiAl) ₄ O ₈ anortit Na _{0,3} (AlMg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ montmorillonit (K ₃ O)Al ₂ Si ₃ ·AlO ₁₀ (OH) ₂ illit	zřícenina nad řekou Libochůvkou – torzo zdiva hradní budovy
E1 (8)	Hrad Pyšolec nad Svatkou u Víru	zdivo hradní věže	SiO ₂ křemen (NaCa)Al(SiAl) ₃ O ₈ albit CaCO ₃ kalcit KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)·(OH) ₂ muskovit (světlá slída) K(AlFeLi)(Si ₃ Al)O ₁₀ (OH)F cinvaldit (tmavá slída)	zřícenina – torzo zdiva kruhové věže
F1 (9)	Hrad Zubštejn u Bystřice nad Pernštýnem.	zdivo hradní věže	CaCO ₃ kalcit SiO ₂ křemen (NaCa)Al(SiAl) ₃ O ₈ albit KLi(AlLi) ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ F ₂ lepidolit (slída)	zřícenina – torzo zdiva hranolové věže
G1 (10)	Hrad Košíkov u Drahonína	zdivo paláce	SiO ₂ křemen CaCO ₃ kalcit Na _{0,75} (Ca _{1,25} Na _{0,75})Mg ₅ Si ₈ O ₂₂ richterit (NaK)AlSi ₃ O ₈ albit KAlSi ₃ O ₈ mikroklin	zřícenina nad řekou Bobrůvkou – torzo zdiva paláce
H1 (11)	Hrad Templštejn nad Oslavou	vnitřní zdivo paláce	(NaK)AlSi ₃ O ₈ albit*) SiO ₂ křemen CaCO ₃ kalcit CaAl ₂ Si ₂ O ₈ anortit	zřícenina u Nesměře – torzo zdiva
I1 (12)	Hrad Starý Jičín	z klenby paláce	SiO ₂ křemen CaCO ₃ kalcit LiKF ₂ Al ₂ Si ₃ O ₉ lepidolit NaAlSi ₃ O ₈ albit C grafit	zřícenina – celistvá klenba paláce
I2 (13)	Hrad Starý Jičín	zdivo paláce	SiO ₂ křemen CaCO ₃ kalcit Ca ₂ Mg ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂ tremolit Al ₂ O ₃ korund C grafit	zřícenina – torzo zdiva

J1 (14)	Hrad Mostišťe u Velkého Meziříčí	zdroj: zřícené zdivo paláce	CaCO ₃ kalcit (Mg,Fe)CO ₃ magnetit **)	zřícenina hradu nad řekou Oslavou
K1 (15)	Nový hrad (též Nové Hrady) u Blanska	ze zdiva zbytků paláce Starého Hradu	SiO ₂ křemen CaCO ₃ kalcit NaAlSi ₃ O ₈ albit	hrad nad řekou Svitavou
L1 (16)	Hrad Kraví Hora	ze zdiva hradní věže	SiO ₂ křemen CaCO ₃ kalcit (NaCa)Al(SiAl) ₃ O ₈ albit (CaNa)(AlSi) ₂ Si ₂ O ₈ anortit	zřícenina nad soutokem Oslavy a Chvojnice
M1 (17)	Hrad Janštejn	ze zdiva hradní věže	SiO ₂ křemen CaCO ₃ kalcit NaAlSi ₃ O ₈ albit (Mg ₅ Al)(SiAl) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ klinochlor (KNa)Al ₂ (SiAl) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ muskovit KAlSi ₃ O ₈ ortoklas	zřícenina východně od Nové Vsi u Jihlávky
N1 (18)	Hrad Trmačov	ze zdiva hradní věže	CaCO ₃ kalcit NaAlSi ₃ O ₈ albit SiO ₂ křemen Na ₂ Mg ₃ Fe ₂ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂ riebeckit	zřícenina severovýchodně od Deblína
O1 (19)	Hrad Štamberk u Mrákotína	ze zdiva hradní věže	CaCO ₃ kalcit SiO ₂ křemen NaAlSi ₃ O ₈ albit KAlSi ₃ O ₈ mikroklín (KH ₃ O)Al ₂ Si ₃ .AlO ₁₀ (OH) ₂ illit	zřícenina severně od Mrákotína u Telče
O2 (20)	Hrad Štamberk u Mrákotína	ze zdiva zbytků hradeb	CaCO ₃ kalcit SiO ₂ křemen (KH ₃ O)Al ₂ Si ₃ .AlO ₁₀ (OH) ₂ illit (NaCa)Al(SiAl) ₃ O ₈ albit	zbytky hradeb na severní straně hradu

Poznámky: *) vysokoteplotní modifikace albitu
 **) stopy: CaFe₂(CoNiMg)₃(AsO₄)₄O.11H₂O - smolianinovit

Tab. II Přehled minerálů nalezených ve vzdušných maltách středověkých kamenných staveb (rozdělení je účelové)

Označení	Minerál – skupina	podskupina
A	křemen	
B	kalcit	
C	živce sodnovápenaté (plagioklasy)	albit* anortit
D	živce draselné (ortoklasy)	ortoklas mikroklín
E	jílly	illit, montmorillonit
F	slídy	lepidolit, muskovit, klinochlor
G	jiné	richterit, grafit, magnetit, korund, tremolit, riebeckit

Poznámka: *) nalezena vysokoteplotní modifikace albit

Tab. III Četnost minerálů v maltách:
1 minerály v maltě indentifikovány
0 minerály v maltě neidentifikovány

Označení	Lokalita	křemen A	kalcit B	živce C	živce D	jíly E	slídy F	jiné G
A1(1)	sv. Kliment	1	1	1	1	0	0	0
A2(2)	sv. Kliment	1	1	1	1	0	0	0
A3(3)	sv. Kliment	1	0	1	1	0	0	0
B1(4)	Rychvald	1	1	1	1	0	0	0
C1(5)	Roštejn	1	1	1	0	1	0	0
C2(6)	Roštejn	1	1	1	0	0	0	0
D1(7)	Hrádek	1	1	1	0	1	0	0
E1(8)	Pyšolec	1	1	1	0	0	1	0
F1(9)	Zubštejn	1	1	1	0	0	1	0
G1(10)	Košikov	1	1	0	1	0	0	1
H1(11)	Tempelštejn	1	1	1*	0	0	0	0
I1(12)	Starý Jičín	1	1	1	0	0	1	1
I2(13)	Starý Jičín	1	1	0	0	0	0	1
J1(14)	Mostiště	0	1	0	0	0	0	1
K1(15)	Nový Hrad	1	1	1	0	0	0	0
L1(16)	Kraví Hora	1	1	1	0	0	0	0
M1(17)	Janštejn	1	1	1	1	0	1	0
N1(18)	Trmačov	1	1	1	0	0	0	1
O1(19)	Štamberk	1	1	1	1	1	0	0
O2(20)	Štamberk	1	1	1	0	1	0	0
Četnost minerálů v maltách	absolutní	19	19	16	8	4	4	5
	relativní [%]	95	95	80	40	20	20	25
Četnost relativního zastoupení minerálů %		25,3	25,3	21,3	10,7	5,3	5,3	6,7

Tab. IV Charakteristiky lokality, odběru vzorku malty a stanovené fázové složení komponent cementových malt

Označení vzorku	Lokalita	Vzorek malty (místo odběru)	Fázové složení komponent stechiometrie – minerál	Poznámka
CA (1)	Elektrárna Dukovany	z jaderného reaktoru (po asi deseti letech provozu)	SiO ₂ křemen Ca ₂ (SO ₄) ₂ ·H ₂ O bassanit (suchá sádra) Al _{0,5} Si _{0,75} O _{2,25} aluminium silikát (NaK)AlSi ₃ O ₈ albit NaAlSi ₃ O ₈ albit MgAlSi ₄ O ₁₀ (OH) ₄ ·2H ₂ O alygorskít*	teplotní expozice malty: 300 °C *) standard: Bole a, Vicenza, Itálie
CB (2)	Výzkumný ústav stavebních hmot Brno, Komárov	zkušební vzorek	Ca ₈ Al ₂ (SO ₄) ₃ (OH) ₁₂ ·26H ₂ O etringit SiO ₂ křemen CaCO ₃ kalcit CaSO ₄ ·2H ₂ O sádrovec	Hydraulické tuhnutí

Tab. V Kvantitativní analýza mineralogického složení středověkých vápenných malt [hm.%]

Malta	Lokalita	Odběr	křemen	albit	kalcit	mikroklín
A1(1)	sv. Kliment	věž	14,80	36,56	29,51	19,13
A2(2)	sv. Kliment	lod'	11,45	39,34	26,55	22,66
A3(3)	sv. Kliment	apsida	29,26	30,70	11,92	28,12
B1(4)	Hrad Rychvald	zdivo	15,38	11,52	52,80	19,13

Tab. VI Odhad složení malty podle analýz v tab.V.: vápenec (kalcit) přepočten na hašené vápno a stanoven poměr (hašené vápno): (zbývající analyzované složky neobsahující vápník)

Malta	Lokalita	Odběr	Hašené vápno	Písek
A1(1)	sv. Kliment	věž	0,739 1	2,39 3,23
A2(2)	sv. Kliment	loď	0,739 1	2,77 3,75
A3(3)	sv. Kliment	apsida	0,739 1	7,39 9,97
B1(4)	Hrad Rychvald	zdivo paláce	0,739 1	0,89 1,20

Pomocné údaje ke zpracování textu

Z hlediska fázového složení se poměrně dobře shodují výsledky analýz malty odebrané z obvodového zdiva loďe a malty odebrané z vnitřního zdiva věže. Naproti tomu se od obou výsledků odlišuje výsledek analýzy vzorku malty odebraného z vnitřní stěny apsidy. Je přitom pozoruhodné, že v přepočtu na chemické složení malta z apsidy obsahuje menší podíl vápníku (4,8 hm.%) a větší podíl křemíku (32,0 hm.%) než malta z loďe, v níž je podíl vápníku asi dvojnásobně větší (10,63 hm.%) a podíl křemíku činí 24,9 hm.%, to znamená asi 2/3 obsahu tohoto prvku v maltě z apsidy. Největší podíl vápníku však obsahuje malta ze zdiva paláce zříceniny hradu Rychvaldu.

V prvním přiblížení lze odhadnout, že k přípravě malty ke zdění paláce na hradě Rychvaldě byla maltová kaše připravena ze směsi písku s vápnem v poměru asi 1 : 1, loď a věž kostela sv. Klimenta byly zděny s maltou připravenou v poměru asi 2 : 7, to znamená dva díly vápna a sedm dílů písku, a apside byla zděna maltou v poměru asi 1 : 8, to znamená, že na jeden díl vápna připadlo asi osm hmotnostních dílů písku. Tato malta se zdá být příliš chudá na vápno a proto je pravděpodobné, že jistá část vápníku bude vázána na *calcian* (jde o zásadité-vápenaté živce typu anorthit).

Tab. II Odhad složení malty podle výsledků analýz vápno: písek vápenec: (zbývající analyzované složky neobsahující vápník)

Analyzovaná malta	vápno (vápenec): písek
A románský kostel sv. Klimenta – apside z vnitřního zdiva	1 : 7,39 1 : 7 5 : 37
B románský kostel sv. Klimenta – loď obvodové zdivo	1 : 2,77 1 : 3 9 : 25
C románský kostel sv. Klimenta – loď obvodové zdivo	1 : 2,39 1 : 2 5 : 12
D hrad Rychvald u Lysic – palác vnitřní zdivo	1 : 0,89 1 : 1 10 : 9

Poznámka: Vápenec CaCO_3 by měl být přepočítán na hydroxyd vápenatý Ca(OH)_2 , neboť v této podobě smíchán s pískem a vodou je malta připravována. Pak

Ca 40,08 Ca 40,08
C 12,10 2H 2.1,00
3O 3.16,00 2O 2.16,00

100,18 74,08

což značí, že 74,08 kg hydroxydu vápenatého se postupně přemění na 100,18 kg vápence. Obsahuje-li dnes malta x kg vápence, pak byla připravována z x.74,08/100,18 kg hydroxydu

vápenatého (hašeného vápna), tj. cca z x.0.739 hašeného vápna. V tomto smyslu je nutno korigovat hodnoty v *tab. II*. Takto dospějeme k *tab. III*:

Tab. III Odhad složení malty podle analýz: *vápenec přepočten na hašené vápno a stanoven poměr (hašené vápno): (zbývající analyzované složky neobsahující vápník)*

Analyzovaná malta	hašené vápno: písek
A románský kostel	0,739 : 7,39
sv. Klimenta – apsida	1 : 9,99
z vnitřního zdiva	1 : 10 A3
B románský kostel	0,739 : 2,77
sv. Klimenta – loď	1 : 3,75
obvodové zdivo	4 : 15 A2
C románský kostel	0,739 : 2,39
sv. Klimenta – loď	1 : 3,23
vnitřní zdivo věže	4 : 13 A1
D hrad Rychvald	0,739 : 0,89
u Lysic – palác	1 : 1,20
vnitřní zdivo	5 : 6 B1

Tab. IV Odhad složení malty podle analýz: *vápenec (kalcit) přepočten na hašené vápno a stanoven poměr (hašené vápno): (zbývající analyzované složky neobsahující vápník)*

Malta	Lokalita	Odběr	Hašené vápno	Písek
A1(1)	sv. Kliment	věž	0,739 1	2,39 3,23
A2(2)	sv. Kliment	loď	0,739 1	2,77 3,75
A3(3)	sv. Kliment	apsida	0,739 1	7,39 9,97
B1(4)	Hrad Rychvald	zdivo paláce	0,739 1	0,89 1,20

Poznámka: k hašenému vápnu viz text [VOTOČEK, E. – HEYROVSKÝ, J.: Chemie anorganická. Česká chemická společnost pro vědu a průmysl, Praha 1944]

Víme však, že do malty byl přidáván také písek, který mohl obsahovat minerály s jistou koncentrací vápníku, nevyjímaje rozdrčený kalcit (vápenec), přičemž jedno od druhého není dnes možno od sebe analýzou dost dobře oddělit. Analýzy však nasvědčují, že malty připravované ke zdění objektů pevnostního charakteru mohly být připravovány z jakostnější maltoviny.

Malta Charakteristika Fáze [hm. %]

Quartz Albite Calcite Microcline

Kostel sv. Klimenta

A apsida (vnitřní 29,26 30,70* 11,92 28,12 zdivo)

B loď (obvodové 11,45 39,34 26,55 22,66 zdivo)

C věž (vnitřní 14,80 36,56 29,51 19,13 zdivo)

Hrad Rychvald

D palác – místnost 15,38 11,52 52,80 20,29 (vnitřní zdivo)

Tab. V Kvantitativní analýza složení malt podle Rietvelde

Malta	Lokalita	Odběr	křemen	albit	kalcit	mikroklín
A1(1)	sv. Kliment	věž	14,80	36,56	29,51	19,13
A2(2)	sv. Kliment	loď	11,45	39,34	26,55	22,66
A3(3)	sv. Kliment	apsida	29,26	30,70	11,92	28,12
B1(4)	Hrad Rychvald	zdivo	15,38	11,52	52,80	20,29

Z *tab. IV* je patrné, že cementové malty mají odlišné zastoupení minerálů než středověké vápenné malty, takže je velmi nepravděpodobné, že by mohlo dojít k vzájemné záměně při jejich analýzách, popřípadě při odběru vzorků. Z minerálů je to pouze křemen, kalcit a albit (sodnovápenatý živec – plagioklas), které provázejí jak středověké vápenné malty, tak cementové malty současnosti. Z prvků, který nebyl zaznamenán ani v jednom z analyzovaných vzorků středověkých vápenných malt a naopak provází malty cementové je to síra, tvořící základní složku minerálu bassanitu a sádrovce.

Z posledního řádku *tab. III* plyne, že podle četnosti relativního zastoupení skupin minerálů ve sledovaných středověkých maltách činí křemen (A), kalcit (B), plagioklas (C) a ortoklas (D) celkem 82,5% na zbývající skupiny minerálů pak připadá necelých 20%. Podle Paretova principu [9] lze proto předpokládat, že křemen, kalcit a oba druhy živců budou mít na kvalitu malt dominantní vliv. Z tohoto důvodu jsme pokládali minerály skupin A, B, C a D za hlavní proměnné určující v prvním přiblížení základní charakteristiky mineralogického složení malt a k posouzení vzájemné podobnosti (příbuznosti) středověkých malt našich hradů jsme použili shlukovou analýzu.

Podle této matematicko-statistické analýzy, která v našem případě vychází z dat uvedených v *tab. III*, lze 20 analyzovaných malt pro čtyři proměnné veličiny (minerály A, B, C a D) rozdělit celkem do šesti shluků. Z těchto šesti shluků představují čtyři samostatné shluky, to znamená jednotlivé malty, a to malty ze základů strženého kostela sv. Klimenta (vzorek A3-3), z hradu Košíkova (G1-10), z hradu Starý Jičín (I2-13) a z hradu Mostišť (J1-14). Tyto malty se nepodobají žádné ze zbývajících malt, a to ani sobě navzájem.

Dalších šestnáct malt bylo na základě shlukové analýzy rozděleno do dvou shluků. Početně menší shluk, obsahující čtyři navzájem se svým fázovým složením podobající vzorky malt, zahrnuje malty ze základů strženého kostela sv. Klimenta (A2-2), z hradu Rychvaldu (B1-4), z hradu Janštejna (M1-17) a z věže hradu Štamberka (O1-19). Nejpočetnější shluk, zahrnující dvanáct vzorků malt, pak má ve své množině všechny zbývající malty, to znamená maltu od sv. Klimenta (A1-1), obě malty z věže hradu Roštejna (C1-5 a C2-6), z Hrádku u Žďárce (D1-7), z hradu Pyšolce (E1-8), z hradu Zubštejna (F1-9), z hradu Templštejna (H1-11), jednu z malt hradu Starý Jičín (I1-12), z Nového Hradu u Blanska (K1-15), z hradu Kraví Hora (L1-16), z hradu Trmačova (N1-18) a z hradeb hradu Štamberka (O2-20).