

Návrh a výroba specializovaných vápenných pojiv pro obnovu památek s využitím historických technologií

Metodika

Ing. Jan Válek, PhD

Ústav teoretické a aplikované mechaniky, AV ČR, v. v. i., Prosecká 76, 190 00 Praha 9,
valek@itam.cas.cz, +420 283 880 458

Metodika je výsledkem výzkumného projektu „Tradiční vápenné technologie a jejich využití v současnosti“ (DF11P01OVV010), podporovaného v letech 2011-2015 Ministerstvem kultury ČR v rámci výzkumného programu NAKI. Autorem textu metodiky je Ing. Jan Válek, PhD. Metodika vznikla na základě výzkumných a experimentálních poznatků, na kterých spolupracovali spoluřešitelé příjemce projektu (Ústavu teoretické a aplikované mechaniky, AV ČR, v. v. i.), jmenovitě: Ing. Tomáš Matas, Josef Jiroušek, Mgr. Eveline van Halem, Bc. Petra Hauková, Mgr. Dita Frankeová, Ing. Jiří Frankl, PhD, Ing. Olga Tomanová, Mgr. Michal Panáček a RNDr. Antonín Zeman, CSc.



Oponenti: Doc. Ing. Petr Kotlík, CSc., VŠCHT Praha
Ing. Vít Mlázovský, projektant

Projekt: Tradiční vápenné technologie historických staveb a jejich využití
v současnosti DF11P01OVV010

OBSAH	str.
1. Úvod	1
2. Cíle a využití metodiky	1
3. Historické vápenné technologie v současné stavební praxi	2
3. 1 Koncepce opravy	2
3. 2 Použití specializovaných vápenných pojiv	3
3. 3 Souvislosti procesu přípravy specializovaných vápenných pojiv	4
3. 3. 1 <i>Materiálový a technologický průzkum</i>	
3. 3. 2 <i>Návrh maltové směsi</i>	
3. 3. 3 <i>Požadavky na kusové vápno</i>	
3. 3. 4 <i>Dostupnost a výběr surovin pro výrobu vápna</i>	
3. 3. 5 <i>Historické technologie tradičního výpalu</i>	
3. 3. 6 <i>Zpracování vypáleného vápna tradičním způsobem</i>	
3. 3. 7 <i>Příprava a aplikace malty - proces tuhnutí a tvrdnutí pojiva</i>	
3. 3. 8 <i>Použití pojiva vyrobeného tradičním způsobem v současné stavební praxi</i>	
3. 3. 9 <i>Bezpečnost práce</i>	
4. Postup přípravy specializovaných vápenných pojiv	9
4. 1 Určení druhu pojiva	9
4. 1. 1 <i>Zatřídění pojiva na základě chemického složení</i>	
4. 1. 2 <i>Petrografický popis nedopalu</i>	
4. 1. 3 <i>Provenience surovin</i>	
4. 2 Technologie zakázkové malovýroby vápenného pojiva	10
4. 3 Výběr horninové suroviny	11
4. 3. 1 <i>Dostupnost horniny</i>	
4. 3. 2 <i>Požadavky na horninu</i>	
4. 4 Proces výpalu	12
4. 5 Zpracování vypáleného pojiva – hašení	13
4. 5. 1 <i>Ruční hašení vzdušného a slabě až středně hydraulického vápna za mokra</i>	
4. 5. 2 <i>Ruční hašení středně až silně hydraulického vápna na prach</i>	
4. 5. 3 <i>Hašení vápna s pískem</i>	
4. 5. 4 <i>Další způsoby hašení</i>	
4. 6 Zpracování vypáleného pojiva – proces odležení	15
4. 6. 1 <i>Odležení vápenné kaše</i>	
4. 6. 2 <i>Odležení pojiva a malty před aplikací</i>	
5. Konkrétní postupy výpalu a hašení specializovaných vápenných pojiv	17
5. 1 Výroba vápna – tradiční výpal dřevem	17
5. 2 Hašení páleného kusového vápna za mokra	22
5. 3 Hašení páleného hydraulického kusového vápna na prach	24
5. 4 Hašení páleného kusového vápna s pískem	26
6. Seznam použité související literatury	27

Návrh a výroba specializovaných vápenných pojiv pro obnovu památek s využitím historických technologií

1. Úvod

Současný přístup k ochraně historických staveb je kromě základních památkových principů ovlivňován i zkušenostmi a znalostmi z minulých restaurátorsko-konzervačních zásahů a rozvojem vědeckého poznání. V relativně nedávné době došlo, a postupně i nadále dochází, k renesanci tradičních materiálů. To je zapříčiněno zejména přirozenou reakcí na nekritické přecenění kvalit novodobých materiálů, které byly v minulosti použity mnohdy nevhodně nebo dokonce i v některých případech způsobily či urychlily degradaci dochovaných historických materiálů. Dílem je příčinou též lepší pochopení vazby mezi výrobou a zpracováním tradičního materiálu na straně jedné a jeho vlastností a vzhledu na straně druhé. Pokud se historické stavby opravují moderními materiály zpracovanými a aplikovanými současnými technologiemi, tak se ztrácí část hodnot, které stavba či její části představují. Pokud to jsou materiály pohledové, například omítky, nátěry a úpravy povrchů, pak se nejedná pouze o materiál samotný, ale jde i o vzhled a estetické vnímání tohoto vzhledu, který reprezentuje daný materiál, styl, sloh, dobu či konkrétní stavbu.

2. Cíle a využití metodiky

Cílem metodiky je podpora využívání a znovuzavedení tradičních vápenných materiálů při opravách historických staveb.

Předmětem metodiky je popsání hlavních kroků, které je třeba uskutečnit v případě, že pro opravu historického objektu je vyžadována malta vyrobená za použití tradičních technologií.

Předmětem metodiky jsou:

- a/ Přehled o okolnostech využití tradičních technologií, které se uplatní při návrhu a výběru vápenného pojiva a jeho zpracování.
- b/ Upřesnění zásadních postupů a principů, které určují vybrané tradiční technologie výroby a zpracování vápna.
- c/ Doporučení konkrétních postupů při výrobě vápna, hašení za mokra, hašení na prach a hašení s pískem.

Využití metodiky

Metodika je určena zejména architektům, stavebním projektantům, památkovým pracovníkům, technologům a restaurátorům. Metodika by měla být využita ve fázi předprojektové a projektové přípravy při rozhodování o výběru vhodného pojiva a zpracovávání technologického návrhu přípravy malty, štuky nebo nátěru.

Typická situace, kdy by měla být metodika uplatněna, je fáze přípravy a opravy stavby, kdy jsou k dispozici výsledky rozboru historických malt a je potřeba určit, jaké pojivo bude použito pro plánovaný stavební zásah a jaký bude technologický postup. Její využití nastává v případech, kdy existují důvody pro použití tradičních metod výroby a zpracování vápna a následně též vápenné malty.

Metodika je členěna do tří oddílů odpovídajících postupným fázím aplikovaným v rozhodovacím a následně prováděcím procesu stavebního díla:

kapitola 3 - rozhodování, jakým způsobem zohlednit tradiční vápenné technologie;

kapitola 4 - specifikace základních kroků od výběru surovin, tradiční výroby vápna po zpracování vápna a přípravu malty;

kapitola 5 - vypracování prováděcího a technologického postupu.

Návrh možných uživatelů metodiky

Architektonické a projekční kanceláře

Restaurátorské a štukatérské firmy

Odborné stavební firmy

Laboratoře zabývající se analýzou historických malt a pojiv

Národní památkový ústav

Oddělení a odbory památkové péče krajských a městský úřadů

Souvislosti s mezinárodními úmluvami a doporučeními

Přístup a požadavky na zajištění ochrany kulturního dědictví jsou v obecné rovině mezinárodně kodifikovány (Aténská Charta, Benátská charta, atd.). Praktické vykonávání ochrany je záležitostí jednotlivých států, které se s těmito úmluvami ztotožňují a dále je upřesňují dle svých potřeb. Nutnost podpory využívání a rozvoje tradičních materiálů a jejich řemeslného zpracování je zmiňováno takřka ve všech hlavních a mezinárodně uznávaných dokumentech pojednávajících o ochraně stavebního kulturního dědictví (Charta z Burry, Úmluva o ochraně architektonického dědictví Evropy, Směrnice pro vzdělávání a školení v oblasti ochrany památek, areálů a sídel atd.).

3. Historické vápenné technologie v současné stavební praxi

3. 1 Koncepce opravy

Na začátku je vždy celková koncepce opravy a její konkrétní cíle. Pro naplnění těchto cílů je potřeba detailních průzkumů a shromáždění různých informací, které tyto cíle dále směřují a formují na straně jedné a ověřují proveditelnost, technickou a ekonomickou náročnost a splnitelnost na straně druhé.

Výzkum tradičních vápenných materiálů přináší nové poznatky a znovuobjevuje již zapomenuté a dnes nevyužívané technologie. Je zřejmé, že na cestě od výzkumu po využití ve stavební praxi při opravách památek je potřeba učinit ještě řadu dalších kroků ve spolupráci se znalostmi a zkušenostmi architektů, projektantů, technologů, restaurátorů, štukatéřů, kameníků a znalců stavební historie a dalšími.

Metodika představuje řetězec od výroby po zpracování pojiva, nicméně připouští i možnost využití pouze některých postupů. Při návrhu opravy se totiž reálně vychází zejména z ekonomických možností

a dostupných řešení a tradiční postupy výroby vápna jsou při stavebních investicích dražší než komerční masová výroba. Při návrhu opravu je též na zvážení, do jaké míry je vhodné využívat tradiční postupy. Právě za účelem zvážení dnes dostupných alternativ a tradičních postupů byla navržena tato metodika.

3. 2 Použití specializovaných vápenných pojiv

Nejdůležitější rozhodná kritéria pro použití specializovaných vápenných pojiv při obnově historických staveb :

- Použití vápna vyrobeného a zpracovaného „tradičním“ historickým způsobem obecně zachovává materiálovou a vizuální autenticitu stavebních konstrukcí a prvků. Platí to zejména u prvků, u kterých je životnost určitým způsobem více omezena a musí být proto neustále obnovovány. Například venkovní omítky nebo vápenné nátěry (obr. 1).
- Materiály připravené z těchto pojiv mají nejpříbuznější mechanicko-fyzikální vlastnosti a tedy i chování jako dochované autentické materiály a jsou proto nejvhodnější pro jejich doplňování nebo náhradu. Z technologického hlediska nejlépe splňují požadavky na památkovou obnovu historických staveb.
- Vápenné pojivo bylo vyráběno z konkrétních přírodních surovin, které určovaly jeho specifické vlastnosti. Jedná se zejména o hydraulická vápenná pojiva, která již nejsou vyráběna, ale v minulosti byla tato pojiva v dané lokalitě využívána a ceněna. Jsou tedy nositelem určité regionální nebo společenské identity a historické hodnoty. Příkladem může být známé Staroměstské vápno, které bylo vyráběno výpalem dvorecko-prokopských vápenců. Jejich využití v Praze je doloženo již z 16. století [Suchý 2014].
- K určitému stavebnímu prvku se v určité době váže i konkrétní způsob přípravy a použití vápenného pojiva. Pojivo je neoddelitelným spoluvůrcem slohových a umělecko-historických projevů stavební produkce. Například použití vápna jako pojiva v maltách a mazaninách podlahových konstrukcí, pojivo v maltách středověkých hradebních zdí nebo klenebních konstrukcí, jemné štuky z vápenné kaše, sgrafitové omítky atd. (obr. 2 a 3).
- Rozličné přirozené vlastnosti a z něj vyplývající nutný způsob zpracování konkrétního vápenného pojiva byl často natolik charakteristický pro dané místo či dobu, že se výrazně projevil i při použití vápenného pojiva v maltách či omítkách a stal se individuální ojedinělou charakteristikou konkrétní stavby. Například hořčnaté omítky s renesančními sgrafity na kostele Sv. Jakuba v Dolní Olešnici od C. Valmadiho.



Obr. 1: Opakované líčení stropních trámů, obec Čistá.



Obr. 2: „Litá“ malta zděné křížové klenby. Krypta románského kostela p. Marie a Sv. Václava, Znojmo.



Obr. 3: Vnitřní zdivo románské hradby s maltou plnou vápenných kusů a nedopalů. Pražský hrad.

3. 3 Souvislosti procesu přípravy specializovaných vápenných pojiv

3. 3. 1 Materiálový a technologický průzkum

Pro návrh „kopie“ pojiva historické malty je třeba co nejpřesněji popsat pojivo či pojivový systém, který byl použit. To ale není jednoduchý úkol, jelikož pojivo malt a jeho kvalita je dána surovinou, ze které je pojivo vyrobeno, procesem výroby pojiva, jeho dalším zpracováním a v neposlední řadě aplikací a zráním. Navíc mohla být vápenná pojiva použita z více zdrojů, popř. jejich vlastnosti byly ovlivněny přidáním přísad a příměsí. Popisem historických malt se zabývá celá řada výzkumných týmů a technologických laboratoř, které za tím účelem využívají celou škálu analytických technik a metod. Souhrnně jsou například popsány v publikaci RILEM [Groot-Ashall-Hughes 2007].

Zásadním výstupem z analytických metod je chemické složení pojiva, na jehož základě lze odhadovat jak je použité vápenné pojivo hydraulické. Vhodným pro kategorizaci je cementační index (1) [Eckel 1928] na základě kterého se pojivo dělí na:

- nehydraulické (CI>0,3),
- slabě hydraulické (CI=0,3-0,5),
- středně hydraulické (CI=0,5-0,7)
- silně hydraulické (CI=0,7-1,1¹)
- přírodní či románské cementy (CI=1,15-1,60 a více²).

$$\text{cementační index} = \frac{2,8SiO_2 + 1,1Al_2O_3 + 0,7Fe_2O_3}{CaO + 1,4MgO} \quad (1)$$

Dalším zásadním výstupem by měl být popis pojivových částic, které jsou často součástí historických malt. V případě, že tyto částice mají původ v nedostatečně přeměně vápence na vápno, lze do určité míry popsat původní surovinu. U hydraulických vápen se vyskytuje nehasitelný podíl, a tak lze z těchto částic dále odvozovat například zpracování vápna či malty.

Nedílnou součástí pro pochopení celého systému je kompletní analýza malt včetně poměrů pojiva a plniva, stanovení charakteru plniva, příměsí a to zejména pucolánově aktivních, organických a anorganických přísad, stavu struktury pojiva atd. [viz Groot a kol. 2007].

3. 3. 2 Návrh maltové směsi

Metodika je sepsána z pohledu využití tradičních technologií výroby a zpracování vápenného pojiva. Řeší tak pouze část návrhu malty, které se týká vápenných pojiv. Pro výběr písku, příměsí, zpracování malty je třeba použít jiné vhodné postupy. Například lze vycházet z doporučení pro návrh opravné maltové směsi technickým výborem organizace RILEM [Groot a kol. 2012a, b, c] nebo směrnice WTA 2-7-01/D “Vápenné omítky pro památkovou péči”.

Při opravě památek platí, že mají být použity jen materiály a technologie, které jsou odzkoušené. Tradiční technologie jsou nepochybně dřívější praxí odzkoušené, ale v zájmu ochrany památek je nutné se i u nich zabývat otázkou jejich kompatibility s dochovaným historickým materiálem. Historický materiál mohl časem též výrazně změnit své vlastnosti a tudíž je možné, že nelze opětovně použít stejná pojiva či maltovou směs.

¹ Pojiva s c.i. nad 1 mohou mít problémy s hašením

² U hořčnatých pojiv může být naopak c.i. menší než 1

3. 3. 3 Požadavky na kusové vápno

U vzdušných vápen je výhoda, že jsou v současné době v ČR vyráběna a lze tak získat pálené kusové vápno pro další zpracování. Výhodou nákupu páleného kusového vápna by měla být znalost produktu podložená technickou dokumentací a to buď konkrétně pro daný materiál popř. průměrnými hodnotami z dlouhodobého měření kontinuální výroby.

Zásadní parametry pro výběr páleného vápna jsou:

- Teplota výpalu. Preferovány by měly být nižší teploty výpalu, tj. okolo 900–1050 °C. Teplota výpalu ale zároveň souvisí s velikostí frakce vsázky a dobou výpalu a tudíž není jediným rozhodujícím kritériem.
- Chemické složení, které by mělo odpovídat požadavkům z analýz historického pojiva, respektive dle kategorizace na základě cementačního indexu. Zásadní je množství CaO a MgO.
- Množství CO₂, které udává množství nedopalu popř. zpětné karbonatace kusového vápna. Většinou se udává jako ztráta žíháním a pohybuje se běžně od 3 do 6 %. Čím nižší obsah CO₂ tím kvalitnější by měl být produkt.
- Reaktivita vápna t_{60} ³ (dle EN ČSN 459-2) by měla být pod 3 minuty, což odpovídá měkce pálenému vápnu. Hodnota t_{60} by měla být větší než cca 40 s, jelikož velmi rychle reagující vápna nelze tradičním způsobem kvalitně vyhasit.

Velikost frakce závisí na typu pece a výpalu a pohybuje se běžně od 25 mm do 125 mm. Pro další zpracování kusového vápna tradičním způsobem není velikost frakce rozhodujícím parametrem. Kusové vápno by mělo být pevné a nemělo by se rozpadat hašením vzdušnou vlhkostí.

Přirozeně hydraulická vápna se u nás v současné době nevyrábějí. Pro potenciální výběr páleného kusového hydraulického vápna je zásadní:

- Mineralogické a chemické složení, které by mělo odpovídat požadavkům z analýz historického pojiva. Zásadní je obsah složek C₂S, C₃A, C₄AF a případně dalších.
- Zařazení vápna dle hydraulicity na základě EN ČSN 459-2, tedy pevnosti tlaku maltových tělísek. Při tradičním způsobu zpracování pojiva je nutno brát tyto pevnosti jako orientační s ohledem na hydraulicitu.
- Údaje pro zpracování vápna jako pojiva, jelikož je potřebné ověřit, zde je reálné hydraulické vápno zpracovat tradičním způsobem. Tj. obsah volného (aktivního) vápna musí být nad 20 %, aby bylo možné vápno vyhasit. Dobré je též znát reaktivitu a zbytek po hašení, který může být až 50 % celkové hmotnosti. Výhodné je též znát složení tohoto „nehasitelného“ podílu.

Velikost frakce by měla být drobnější než u vzdušného vápna, ale záleží na reaktivitě a zpracování. Z pohledu zpracování mohou být výhodná mletá či drcená pálená hydraulická vápna.

Moderní alternativou k pálenému kusovému vápnu jsou pálená vápna mletá. Kritéria pro výběr jsou obdobná. Jejich využití je výhodné zejména v případech, kdy záleží na homogenitě vápna. U vzdušných i hydraulických vápen je vhodné je použít pro hašení s pískem. Mletí či drcení je výhodné pro zpracování přirozeně hydraulických pojiv, jelikož usnadňuje proces hašení a umožňuje zpracování nehasitelného podílu.

³ Hodnota t_{60} je doba, za kterou dosáhne vzorek vápna teplotu 60 °C při zkoušce reaktivity

3. 3. 4 Dostupnost a výběr surovin pro výrobu vápna

Vápno u nás v současné době vyrábí pouze několik málo velkovýrobců (Carmeuse, Hasit, Kotouč Štramberk, Čertovy schody, Vitošov)⁴. Všechna vyráběná vápna jsou vzdušná a jsou dodávána v různé kvalitě a s různými vlastnostmi. Výběr vápna vyrobeného z různých surovin je v dnešní době výrazně omezen oproti minulosti a to i v porovnání se situací přibližně před 100 lety⁵.

Počítáme-li suroviny, ze kterých lze vápno vyrobit, tak je v ČR v současné době otevřeno kolem 40 dobývacích prostorů⁶. V každém lomu lze těžené suroviny dále dělit, ať již dle geologického a stratigrafického členění či rozdílného chemického složení.

Teoreticky lze uvažovat i o získání suroviny mimo v současnosti těžená ložiska. V některých místech například dochází k rekultivaci lomů či jejich údržbě, při které lze omezené množství kamene získat. Místa výskytu karbonátových surovin pro výrobu vápenného pojiva lze najít například ve specializované mapě geodatabáze Calcarius⁷, popř. lze získat detailnější informace ve zprávách uchovávaných v archivu Geofondu a ČGS.

U tradičních materiálů a postupů by se mělo vždy uvažovat o místních surovinách. Bohužel ale řada surovin využívaných v minulosti dnes není dostupná. Příkladem jsou přirozeně hydraulická vápna, u kterých je konkrétní surovina zásadní pro jejich vlastnosti, ale které se u nás již nevyrábí. Metodika v těchto případech ukazuje praktické možnosti zakázkové malovýroby vápna.

3. 3. 5 Historické technologie tradičního výpalu

Výpal vápna tradičními technologiemi se u nás, na rozdíl například od Německa, Chorvatska či Slovinska, nezachoval. Níže jsou popsány základní okolnosti výpalu, které vytváří a ovlivňují kvalitu vápna vyrobeného tradičním způsobem.

Tradiční výrobu vápna je obtížné shrnout do jednotného typu pece či způsobu výpalu, jelikož existuje mnoho historických variant výpalu vápna, které lze považovat za tradiční. Jedním ze základních historických typů výpalu je způsob, kdy se z vápencových kamenů postaví klenba vymezující prostor topeniště, ve kterém se postupně topí dřevem popř. alternativním palivem hořícím vysokým plamenem. Jednorázový výpal ve vápenné peci mohl být proveden i druhým způsobem, pravděpodobně též známým již z dob římské říše. V tomto případě se vápenec vložil do pece přímo ve směsi s palivem. Po zapálení došlo k postupnému vyhoření paliva směrem nahoru a tím výpalu vápence. Používalo se výhřevnější palivo, které hořelo kratším plamenem, což mělo vliv na tvar a velikosti vápenek, jejich plnění, přívody vzduchu a výběrací otvory.

Na území Čech a Moravy převládaly vápenky na dřevo a to až do 19. století, kdy nastalo zprůmyslnění výroby a s tím i kompletní změny technologií [Matoušková 1995, Láník – Cikrt 2001, Ebel 2014, Válek a kol. 2015]. Velikost, tvar a typ vápenky se lišil i dle místa. Tam, kde byl dostatek surovin a dobrý odbyt vápna, vznikaly pokročilejší komorové vápenky s několika tahovými kanály. Naopak na venkově byly

⁴ Zdroj : Svaz výrobců vápna ČR, <http://www.svwapno.cz/> , navštíveno 26.6.2015

⁵ Zdroj : Specializovaná mapa. Soupis lomů ČSR, <http://calcarius.maps.arcgis.com/home> , navštíveno 26.6.2015

⁶ Zdroj : Česká geologická služba. Surovinový informační systém. <http://www.geology.cz/extranet/mapy/mapy-online>, navštíveno 26.6.2015

⁷ Zdroj: Specializovaná mapa. Mapa karbonátových surovin pro výrobu vápna, <http://calcarius.maps.arcgis.com/home> , navštíveno 26.6.2015

rozšířenější drobné zemní vápenky či milíře. Základní principy výpalu dřevem pod klenbou zůstávají ve všech těchto typech pecí stejné.

Konkrétní tvar, velikost a konstrukce pece, její umístění mají podstatný vliv na průběh výpalu a tedy i kvalitu výsledného produktu. Tvar a konstrukce pece ovlivňuje množství a způsob jakým se vápenec rovná a jakým způsobem je zabraňováno úniku tepla. Ačkoliv se jedná o značně variabilní postupy a procesy, tento způsob výpalu vápna dlouhým plamenem má shodné následující principy:

- Stavění klenby z vápence a tím vytvoření prostoru topeniště;
- Rozmístění kamene tak, aby se žár a tah rovnoměrně distribuoval;
- Topení dřevem – palivem s dlouhým plamenem;
- Rozmístění vápencové vsázky dle velikosti odpovídá rozložení tepla v peci;
- Aktivní kontrola úniku tepla a průchodu tahovými kanály vrchem pece během výpalu;
- Ruční manipulaci s kamenem a vápnem, jež umožňuje kvalitativní selekci.

Navíc výpal vápna je ovlivňován i dalšími podmínkami okolního prostředí, zejména povětrností.

3. 3. 6 Zpracování vypáleného vápna tradičním způsobem

Proces hašení je velmi podstatnou technologickou součástí výroby vápenného pojiva. Jak známo, při kontaktu s vodou pálené vápno reaguje za silného vývinu tepla a rozpadá se na jemné částice, přičemž zároveň dochází k nabývání na objemu. Kvalitní „tučná“ vápna, obsahující vysoký podíl vápna (< 95 %), nabývají na objemu (rozmnožují se) až 3,5násobně, ve zmáčeném stavu přibližně 2,1násobně. Tímto jednoduchým procesem se tak získá pojivo, které má částice o velikosti nano- až mikro-metrů bez nutnosti mletí či jiného energeticky náročného způsobu rozmělnování.

V minulosti nebylo možné pálené vápno jednoduše skladovat, a proto bylo výhodnější ho brzy po výpalu zpracovat. Z toho plynou i základní tradiční postupy pro zpracování vápna na přípravu malty.

Tradiční proces hašení lze rozdělit na

- Hašení za mokra neboli v nadbytku vody (vzdušné a slabě až středně hydraulické vápno)
- Hašení na prach (středně až silně hydraulické vápno)
- Hašení ponořením (vzdušné vápno)
- Hašení spolu s pískem (všechny druhy)

Hydraulické vápno lze hasit obdobnými způsoby, ale jeho rozpad je výrazně pomalejší, uvolňované teplo je nižší a nedochází k výraznému zvýšení objemu. Obecně je hašení přirozeně hydraulického vápna komplikovanější. I dobře vypálené hydraulické vápno obsahuje částice, které se hašením nerozpadnou. Pokud má být z pojiva odstraněn nedopal a nehasitelné částice, pak je nejvýhodnější způsob hašení středně až silně hydraulického vápna kropením. Hašené hydraulické vápno je možno skladovat pouze krátkou dobu.

Na proces hašení navazuje proces přípravy malty. Ten úzce souvisí s procesem zpracování pojiva ať již přímo, kdy je vápno hašeno společně s pískem, anebo nepřímo, tedy písek je smíchán s vápnem po vyhašení a společně je nechán s vápnem uzrát.

3. 3. 7 Příprava a aplikace malty - proces tuhnutí a tvrdnutí pojiva

Tradiční materiály jsou náročné na použití. Je to dáno jejich nesourodostí a během aplikace je potřeba umět se materiálu přizpůsobit a využít jeho kvality. Obecně je též známo, že u tradičních materiálů je kvalita malty dána přibližně z 50 % právě zpracováním, aplikací a následným ošetřením. Při úvaze, jaký materiál použít je tak nutno vzít i do úvahy, zda bude správně a odborně využito.

Obecné návody pro použití vápenných malt lze najít v literatuře [Michoinová 2006, Hošek - Muk 1989, Janč 1953]. Pro tradiční pojiva malt je zásadní:

- Kvalitní příprava malty, kdy míchání nesmí být nahrazováno přidáním záměsové vody, tj. vody by mělo být přidáváno minimum.
- Správná aplikace a ochrana před extrémními klimatickými vlivy.
- Pojiva, popř. konstrukce jako celek, musí mít dostatek času k vyvrání před příchodem prvních mrazů. Tradiční stavební sezóna je od konce dubna do konce září, mimo tuto dobu, nelze tradiční materiály ve venkovním prostředí používat.
- Omítky a malty musí být chráněny a ošetřovány i po aplikaci podle typu pojiva.

3. 3. 8 Kvalita a použití pojiva vyrobeného tradičním způsobem v současné stavební praxi

Při rozhodování o využití tradičních technologií je potřeba zohlednit skutečnost, že tradičně vyrobené vápno nelze klasifikovat z plně zatřídit podle stejné normy⁸ jako komerční produkty. Pro využití tradičních pojiv je třeba specifikovat požadavky na kvalitu vápna. Pro postup výroby a zpracování musí být sepsán technologický postup. Podklady pro vytvoření těchto dokumentů poskytuje právě tato metodika a dodržení dále zmiňovaných zásad a postupů by mělo zaručit kvalitu odpovídající historickým pojivům. Z moderních metod je pro zaručení kvality navrženo monitorování teploty během výpalu ve středu pece a popisné laboratorní zkoušky surovin a získaného pojiva, viz kapitola 3.3.3 Požadavky na kusové vápno.

Druhým podstatným vlivem na kvalitu je právě technologie výroby a zpracování. Ta se u tradičních technologií řídí empirií a zkušenostmi. To je například poznání nedopalu. Správně provedené technologické kroky u tradičního způsobu výroby a zpracování pojiva v podstatě neustále usilují o dosažení optimální kvality ve vztahu k použití⁹.

Podstatnou složkou zaručení kvality je zkušenost a odbornost pracovníků, kteří budou výrobu a přípravu vápna tradičními technologiemi realizovat. Zde je nutné požadovat odpovídající vzdělání, dlouholetou praxi v oboru obnovy památek.

Zaručení kvality ve vztahu k památkám by mělo být dáno obecným posouzením kompatibility nového materiálu s materiálem původním.

3. 3. 9 Bezpečnost práce

U tradičních postupů je zvýšené riziko oproti běžným stavebním činnostem a zpracování vápna. Zvláštní pozornost je potřeba věnovat procesu hašení, manipulaci, přepravě a skladování nehašeného vápna (CaO).

⁸ Stavební vápno EN ČSN 459

⁹ Například je to doba odležení po hašení nebo zrání hašeného vápna v jámě.

4. Postup přípravy specializovaných vápenných pojiv

Následující kapitola popisuje postupy při tradiční přípravě vápenných pojiv. Metodika provází základními návrhovými kroky od analýzy vzoru, přes výběr vhodné suroviny a výpal až po zpracování získaného vápna a přípravu malty. Na základě výběru, který je přizpůsoben individuálním podmínkám, metodika popisuje postup zpracování vápenného pojiva tradičním způsobem. Uživatelům metodiky tak umožňuje sjednotit postupy a opakovaně dosáhnout obdobného výsledku.

Metodika neurčuje konkrétní případy, kdy je tento postup žádoucí popř. jaká míra detailu je při takovémto postupu optimální, ale přináší návod jak při zvolení tohoto přístupu postupovat.

Následující popis vychází ze současných znalostí. Doporučované praktické postupy byly odzkoušeny během experimentální výroby vápenných pojiv a jejich následného zpracování.

4. 1 Určení druhu pojiva

Za účelem zjištění druhu použitého vápenného pojiva je třeba provést materiálový průzkum a analýzu složení (viz též kapitola 3. 3. 1). Standardní materiálový rozbor historických malt zahrnuje popis pojiva a lze ho zadat různým odborným laboratořím.

4. 1. 1 *Zatřídění pojiva na základě chemického složení*

Na základě znalosti chemického složení vápenného pojiva lze rozhodnout, zda bude použito vápno vzdušné či hydraulické a případně s jakou mírou hydraulicity.

Pro upřesnění druhu vápenného pojiva je vhodné použít klasifikaci na základě chemického složení. Metodika doporučuje použít cementační index, který je optimální pro popis širokého spektra vápenných pojiv. Tento údaj je primární pro rozhodování, jaké vápenné pojivo by mělo být pro návrh nové maltové směsi použito. Při analýzách je třeba odlišit směsné pojivové systémy, kdy jsou ke vzdušnému vápnu přidány pucolánové přísady popř. pojivové systémy, které vznikly smíšením dvou a více různých vápen.

4. 1. 2 *Petrografický popis nedopalu*

Na základě petrografického popisu vápence lze vymezit surovinové zdroje, které připadají v úvahu v okolí stavby. Polohu konkrétního zdroje surovin lze dále zpřesňovat kombinací dalších informačních pramenů a výzkumu.

V případech, kdy se v historických maltách nachází kusy špatně vypáleného vápna lze surovinu popsat z petrografického hlediska. Nejčastěji to je rozlišení na základě struktury (alochemické, ortochemické, autochtonní) a velikosti částic kalcitového pojiva např. mikritický (zrna kalcitu do velikosti 4 μm) nebo sparitický (zrnitý kalcit) podle Folkovy klasifikace [1959]. Používané je též zařazení na základě vzniku vápence tj. např. organogenní. Tyto informace lze dále využít pro bližší upřesnění suroviny pro výrobu vápna. V některých ojedinělých případech lze uvažovat i o určení provenience suroviny. Za tím účelem je většinou nutné kombinovat znalosti z více oborů a to jak z archivů a písemných pramenů z dob stavby (např. účetní knihy) tak znalosti ohledně místního výskytu vápenců a další geologicko-petrografické znalosti např. výskyt různých druhů fosilií atd. které mohou napomoci lokalizovat místo těžby suroviny.

4. 1. 3 *Provenience surovin*

Znalost konkrétního lomu není nutná pro určení typu vápenného pojiva a z materiálového rozboru lom běžně nelze určit. Na druhou stranu, pokud je lom znám, může se podstatně zjednodušit charakterizování surovin a použitého pojiva.

Provenience surovin je zajímavá v případech, kdy byly pro výrobu vápna používány specifické suroviny. Např. jsou to dvorecko-prokopské vápence, ze kterých se vyrábělo staroměstské vápno. V těchto případech je z hlediska replikace vápenného pojiva podstatnější určení druhu vápence a jeho chemického složení, než nalezení konkrétního lomu.

4. 2 Technologie zakázkové malovýroby vápenného pojiva

Možnosti zakázkové malovýroby vápna jsou v dnešní době velmi omezené a prakticky lze uvažovat o třech následujících:

- stavba vlastní vápenné pece pro výpal vápna tradičním způsobem,
- využití již postavené vápenné pece, která umožňuje výpal vápna tradičním způsobem,
- využití moderní vápenné pece, která umožňuje malosériovou výrobu.

Pro replikaci tradičního výpalu dřevem není stavba vlastní vápenné pece z technického hlediska problém, jelikož tradiční výpal byl z hlediska konstrukce pece a technologie výpalu relativně jednoduchý. Navíc existuje mnoho historických předloh a i z dnešní doby jsou známy příklady, kdy byla tradiční vápenná pec nově postavena (např. pro stavbu hradu, projekt Burgbau v Rakouském Friesachu nebo ve skanzenu Ballenberg ve Švýcarsku). Zkušenosti s výpalem v malé vápenné peci na palivo s krátkým plamenem též existují [Hughes 2002, Demellenne 2013]¹⁰. Ačkoliv stavba jednoduché vápenné pece není technický problém, před realizací je nutné pečlivě zvážit provozní okolnosti. Praktické informace lze najít například v příručce vydané Intermediate Technology [Wingate 1985]. Navíc je nutno zohlednit požadavky zákona o ochraně ovzduší (86/2002 Sb.) a stavebního zákona (183/2006 Sb.).

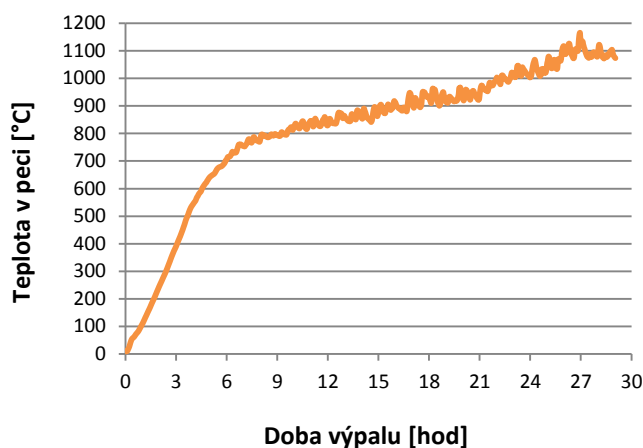
Při zvažování možností výroby vápenného pojiva z různých surovin tradičním výpalem je optimální využít již odzkoušené pece a provozu, který tradiční výpal umožňuje. Takováto zařízení jsou provozována prozatím pouze experimentálně. V rámci projektu „Tradiční vápenné technologie historických staveb a jejich využití v současnosti“ byla vyvinuta a odzkoušena vápenná pec pro malovýrobu vápna tradičním způsobem, která je umístěna v Solvayových lomech v Českém krasu [Válek a kol. 2013a]. Výhodou využití takovéhoho zařízení jsou zejména praktické zkušenosti s výpalem vápna. V tabulce 1 jsou stručně shrnuty základní parametry výpalu vápna v experimentální vápenné peci v Solvayových lomech [Válek a kol. 2012].

Tabulka 1. Základní parametry výpalu jedné dávky v experimentální peci v Solvayových lomech.

vsázka vápence	velikost frakce	palivo	spotřeba	celková doba výpalu	teplota výpalu	úspěšnost výpalu
900 kg	50–300 mm	dřevo	22 kg/h	30–40 h	900–1200 °C	80–90 %

¹⁰ Rakouský památkový ústav (BDA) občasně provozuje dvě malé vápenné pece ve svém informačním a školícím centru v Mauerbachu.

Není-li zásadní požadavek na tradiční výrobu, je možné vypálit dodanou vápennou surovinu v jakékoliv moderní peci, která je k tomu uzpůsobena. Pro zavedené vápenky by ale požadované množství muselo být ekonomicky zajímavé. Zde se však jedná o výrazně větší množství, než vyžaduje obnova jedné stavby. Potenciálně zajímavou možností je využití zakázkové výroby v menším zařízení. V ČR ale v současnosti nikdo takovou službu neprovozuje. Malou rotační pec vlastní a provozuje VÚSTAH v Brně.



Obr. 4: Experimentální pec v Solvayových lomech. Při jednorázovém výpalu lze získat 500 kg páleného kusového vápna. Graf vlevo ukazuje průběh teploty během výpalu ve středu pece nad klenbou. Za přibližně 15 h bylo dosaženo 900 °C a výpal trval dalších 15 hodin.

4. 3 Výběr horninové suroviny

Tento krok se týká případů, kdy je uvažováno o vlastní výrobě vápenného pojiva popř. zakázkové malovýrobě. Rozhodnutí do jaké míry replikovat celý proces výroby je závislé na dostupnosti suroviny či jejich náhražek, předpokládané míře ovlivnění „kvality“ vápna jeho výrobou a zpracováním.

Bylo-li vápenné pojivo historické malty vzdušné vápno, pak je situace jednodušší v tom, že vzdušná vápna jsou u nás stále vyráběna a v těžných lomech je víceméně dostupná celá škála surovin. V případě přirozeně hydraulických vápen je situace složitější, jelikož tato vápna s v ČR již nevyrábí a historické lomy jsou již uzavřeny, rekultivovány popř. již ani neexistují.

Poloha historické stavby, provedené analýzy a znalost historických souvislostí umožňují do určité míry odhadnout potenciální zdroj surovin. Za tím účelem může být též použita *Mapa historických a současných zdrojů surovin pro vápenné technologie*¹¹, která přehledným způsobem ukazuje místa a využití vápenných surovin v minulosti.

4. 3. 1 Dostupnost horniny

Dostupnost suroviny je podstatná, a proto pro zakázkovou malovýrobu vápna jsou uvažovány pouze v současnosti těžené vápenné suroviny, které lze relativně jednoduše získat. V databázi SURIS (surovinový informační systém ČGS) je evidováno okolo 40 těžných dobývacích prostorů na vápenec, dolomit a cementářskou korekční surovinu. Pro většinu z těchto lomů poskytuje *Mapa karbonátových surovin pro výrobu vápna*¹² popis vyskytujících se surovin a jejich průměrné chemické složení. Prvotní

¹¹ Zdroj: Specializovaná mapa. <http://calcarius.maps.arcgis.com/home> , navštíveno 26.6.2015

¹² Zdroj: Specializovaná mapa. <http://calcarius.maps.arcgis.com/home> , navštíveno 26.6.2015

výběr suroviny tak zle učinit na základě výstupů z analýz historického pojiva a dostupných údajů na internetu (ČGS, Calcarius online). Mapové údaje *GIS Calcarius* mají výhodu, že zároveň s chemickým složením umožňují i zohlednit geografickou pozici. Pro získání suroviny je třeba přímého kontaktu s těžební popř. obchodní společností, jelikož se chemické složení může i v rámci jednoho lomu a jedné geologické vrstvy lišit.

4. 3. 2 Požadavky na horninu

Obecné požadavky na suroviny pro výrobu vápna jsou takové, že surovina musí poskytovat vápno, které je požadováno zákazníkem a musí mít takové fyzikální vlastnosti, které odpovídají způsobu výpalu [Wingate 1985]. Z pohledu vápenictví a rozlišování vápen je určující jejich chemické složení po výpalu. To je kromě složení suroviny ovlivněno výpalem a technologií zpracování. Naprostá většina vápenných surovin, které přicházejí v ČR v potaz, vyhovuje svými fyzikálními vlastnostmi tradičnímu výpalu. Určení fyzikálních vlastností surovin má význam pro velké provozy a šachtové pece, kde může docházet k nežádoucímu drcení a rozpadu suroviny během procesu výpalu a zpracování.

Základními parametry pro výběr suroviny pro výrobu vápna je tedy její chemické složení a to zejména obsah CaO, MgO, SiO₂, Al₂O₃ a Fe₂O₃, které je určeno rozbořem historického pojiva a případně i ověřením složení surovin z původních lomů. Složení suroviny bude vždy přirozeně variabilní, a tak je praktické využívat kategorizaci na základě cementačního indexu. Kromě dodržení této klasifikace je též podstatný výskyt jednotlivých oxidů. U velmi čistých vápen je důležité zajistit vysokoprocentní vápence s limitovaným obsahem MgO do 2 %. U dolomitických vápen je podstatný poměr CaO a MgO. Pro výrobu hydraulických vápen je též podstatné, zda se jedná pojivové systémy založené primárně na kalcium-silikátových reakčních produktech či je podstatná i přítomnost aluminátů. Výběr surovin pro výrobu přirozeně hydraulického vápna nelze posuzovat pouze na základě chemického složení, ale je potřeba znát i další strukturní parametry. Navíc jsou výsledné produkty (vápna) výrazně ovlivněny výpalem. Chemické složení suroviny a rozmístění jednotlivých oxidů křemíku, hliníku a želez vytváří pouze předpoklad pro výrobu určité kategorie hydraulického vápna [Válek a kol. 2014].

Využití neznámých a neozkoušených surovin nelze doporučit k přímé výrobě, zejména pokud se jedná o hydraulická vápna. Před použitím je potřeba, kromě znalosti chemického složení, provést kontrolní výpal, například v malé elektrické peci¹³. Pro posouzení použitelnosti vápna se provede zkouška reaktivity a stanoví se nehasitelný podíl. Pro popis hydraulicity je minimálně zapotřebí stanovit kvantifikované mineralogické složení vzniklých fází¹⁴. Navíc je potřeba provést praktickou zkoušku výrobou a odzkoušením maltových tělísek.

4. 4 Proces výpalu

Z pohledu výběru tradiční technologie pro výrobu vápna je podstatné, zda se vápno vyrobené tradičním způsobem liší od moderního způsobu. Na úvod je nutno říci, že pálení vápna je chemická reakce, která podléhá určitým přírodním (fyzikálním) podmínkám. Tudíž odlišnosti vyplývají právě z podmínek nastolených v peci během výpalu. To znamená, že jsou technologického charakteru a jejich popis je vztažen k celé dávce materiálu – vyrobenému vápnu. Logicky, tedy z různých pecí bude vyrobeno různé vápno. Moderní pece mají lepší možnost kontroly nad podmínkami výpalu a celkový následný proces zpracování je založen na neustálé kontrole kvality.

¹³ U surovin s obsahem CaCO₃ nad 90% lze tento kontrolní výpal vypustit.

¹⁴ Např. Rietveldovou metodou pro práškovou rentgenovou difrakci

Následující odstavec se zabývá charakterizováním vápna vyrobeného tradičním způsobem pálení dřeva pod klenbou, jehož základní principy jsou popsány v kapitole 3. 3. 5. Pro účely této metodiky byl vybrán a prakticky odzkoušen postup výroby vápna, který je popsán v kapitole 5.1

Teplota v peci, dlouhý plamen a množství procházejícího vzduchu jsou charakteristiky, které vytváří léty ověřený způsob výroby kvalitního měkce páleného kusového vápna. Teplota v peci při výpalu dřevem může dosahovat pod klenbou i více jak 1300 °C. Tato teplota je maximální a není průměrnou teplotou výpalu. Experimenty v malé vápenné peci potvrdily povrchové slinutí a změnu částic oxidu vápenatého u kusů, které byly vystaveny nejvyšším teplotám po nejdelší dobu. Nicméně zde jsou umísťovány největší kameny a ve větší hloubce od povrchu již nebyly viditelné znaky přepálení. Vápno z vápenců tvořící klenbu topeniště vykazovalo vlastnosti odpovídající měkce až středně pálenému vápnu [Válek a kol. 2013b]. Na základě provedených experimentů a znalostí vápen z jiných tradičních vápenných pecí lze konstatovat, že tento způsob výpalu dlouhým plamenem poskytuje souhrnně měkce pálené vápno. Tj. vápno s reaktivitou $t_{60} < 3$ min, specifickou hmotností v rozmezí 1500–1800 kg/m³, otevřenou pórovitostí od 55 do 45 % a zbytkovým obsahem CaCO₃ v rozmezí od 1 do 4 % [Oates 1998].

Nerovnoměrnost výpalu je u tradičních pecí dána rozložením a vedením tepla. Největší žár je nad topeništěm a v tahových kanálech, které procházejí vsázkou. U vápen pálených tradičním způsobem je vždy určité procento nedopalu a podle typu pece a podmínek výpalu se efektivita výpalu a jeho kvalita liší. Místa, kde se nedopal vyskytuje, jsou známa a nedopal je tak možné odebrat. Například z vrchní části pece.

U tradičního výpalu lze vybrat vápno z různých pozic v peci a tím ho roztřídit dle kvality. Pokud je kusové vápno přenášeno ručně, je možné vytřídit nedopálené kusy na základě váhového odhadu. Za nejkvalitnější je považováno vápno ze středu pece z větších kusů vápence.

4. 5 Zpracování vypáleného pojiva – hašení

4. 5. 1 Ruční hašení vzdušného a slabě až středně hydraulického vápna za mokra

Postup hašení za mokra má mnoho variant, které jsou známy z literatury [např. Niklas – Šanda, 1873, Janč a kol. 1953, Helan - Klement 1960]. Pro účely této metodiky byl vybrán a prakticky odzkoušen postup popsán v kapitole 5.2.

Obecné zásady:

- Vápno by se mělo hasit co nejdříve po výpalu.
- Před hašením většího množství je potřeba předem znát reaktivitu vápna. To lze například vyzkoušením hašení jednoho či dvou kusů vápna.
- Voda se lije na vápno podle rychlosti reakce. Vápno se nesmí prudce schladit nadměrným množstvím vody. Na druhou stranu vápno musí mít kolem sebe dostatek vody, aby se jednotlivé částice rozdužovaly a „nespékaly“. To je zajištěno mícháním. Množství přidávané vody, míchání a rychlost reakce tak jsou v určitém vzájemném poměru, který je nutno dodržet pro optimální výsledek.
- V případě, kdy při hašení dojde lokálně k nedostatku vody a prudkému nárůstu teploty, je výsledná kaše hrudkovitá. Hrudky jsou o velikost až do 2 mm.
- Voda musí být čistá bez zvýšeného množství rozpustných solí.

4. 5. 2 Ruční hašení středně až silně hydraulického vápna na prach

Ruční hašení hydraulického vápna na prach je též známo z literatury [např. Janč a kol. 1953]. Následující postup uvedený v kapitole 5.3 byl odzkoušen a lze ho doporučit pro hašení hydraulických vápen na prach.

Obecné zásady:

- Vápno by se mělo hasit co nejdříve po výpalu.
- Před hašením je potřeba předem znát reaktivitu vápna, kterou lze vyzkoušet vyhašením jednoho dvou kusů páleného vápna.
- Hasit lze pouze přirozeně hydraulická vápna s obsahem volného, aktivního vápna min. nad 20 % hm. To zajišťuje rozpad páleného vápna na prach.
- Složky, které rychle hydratují a tvrdnou bez rozpadu na menší částice nelze tradičním způsobem využít. Jsou to zejména kalciumalumináty a kalciumaluminosilikáty.
- Přirozeně hydraulické vápno obsahuje nehasitelný zbytek, tj. nerozhašuje se zcela na prach.
- Hydraulické vápno je má po vyhašení tradičním způsobem omezenou dobu použitelnosti. Ideálně se připravuje (hasí) přímo pro konkrétní použití.
- U hydraulických vápen je potřeba dobu procesu hašení a optimální dobu odležení odzkoušet. Min. odležení lze doporučit 4 hodiny.

4. 5. 3 Hašení vápna s pískem

Hašení vápna s pískem je tradiční způsob, který spojuje potřebu uskladnění vápna, přípravu malty a odležení. Existuje opět několik variant provádění, které jsou různě doporučovány. Pro metodiku byl odzkoušen postup, který je podrobně uveden v kapitole 5.4.

Obecné zásady:

- Hašení vápna s pískem musí předcházet návrh složení malty, jelikož se zároveň jedná i o přípravu malty. Orientační dávkování pro vzdušná vápna ku písku je 1 : 6 objemově. Pro hydraulická vápna pak 1 : 3 objemově. Přesnější stanovení lze učinit na základě laboratorních zkoušek pojiva a popsání nehasitelného podílu.
- Hašení vápna s pískem zachovává v maltě nehasitelné složky, které mají složením charakter pojiva, ale po mechanicko-fyzikální stránce se chovají jako plnivo.
- Množství přidávané vody nelze předem předepsat. Voda musí být přidávána postupně a s ohledem na konzistenci malty, která nesmí být nikdy řídká. Tj. množství vody nesmí nahrazovat aktivní míchání. Takto připravenou maltu lze použít ještě za tepla popř. ji lze nechat odležet přikrytou vrstvou vlhkého písku.

4. 5. 4 Další způsoby hašení

Existují i další způsoby hašení vápna, popř. jsou obměnami výše zmiňovaných postupů. Metodika se jimi nezabývá, jelikož nebyly v rámci experimentálního výzkumu ověřovány. Například se jedná o relativně rozšířené hašení kusového vápna přímo ve vápenné jámě. Dalším známým způsobem hašení je ponoření proutěného koše s vápnem do vody, kde vápno absorbuje vodu. Vápno se tak rozhasí na prach.

4. 6 Zpracování vypáleného pojiva – proces odležení

Doba odležení vápenného pojiva závisí na použití. Obecně ale vychází ze zajištění objemové stálosti pojiva, tedy dohašení i pomaleji reagujících částic. Tabulka 2 shrnuje způsoby zpracování a doporučenou dobu odležení, které vychází z praxe konce 19. a poč. 20. století.

Tabulka 2: Způsoby zpracování pojiva a doporučená minimální doba odležen

Druh vápna a způsob hašení	Zpracování po vyhašení	Odstranění nedopalu a pecek	Minimální doba zrání	Použití
Vzdušné vápno				
za mokra	uležení v jámě	síto o vel. ≤ 3 mm, sedimentace	14 dní	omítky
za mokra	smícháno s pískem	síto o vel. ≤ 3 mm	ihned	zdící malta
za mokra	smícháno s pískem	síto o vel. ≤ 3 mm	8 dní	omítky
s pískem	-	neprovádí se	dle potřeby	zdící malta a omítky
Slabě hydraulické vápno				
za mokra	smícháno s pískem	síto o vel. ≤ 3 mm	ihned	zdící malta
za mokra	smícháno s pískem	síto o vel. ≤ 3 mm	4 dny	omítky
s pískem	-	neprovádí se	dle potřeby	zdící malta a omítky
Středně až silně hydraulické vápno				
na prach	odležení	síto o vel. ≤ 3 mm	dle typu pojiva	zdící malta
na prach	odležení	síto o vel. 0,5–1 mm	dle typu pojiva	omítky
s pískem	-	neprovádí se	dle potřeby	zdící malta a omítky

4. 6. 1 Odležení vápenné kaše

Vyhašené vápno se po odstátí naředí vodou, aby lépe teklo přes síto do připravené vápenné jámy. Vápenná kaše se optimálně skladuje ve vápenných jámách, které jsou vydrěveny. Okolní zemina by neměla příliš rychle odvádět vodu, aby kaše nevysychala a po přelití nebyla příliš rychle odvodněna. Vápenné mléko se do jámy přelévá přes 3 mm síto (max. velikost ok), aby se odstranily nedohašené pecky a nedopal.

Prvotním přínosem pro zlepšení funkčních vlastností vápenného pojiva hašeného v nadbytku vody je poskytnutí vhodných podmínek pro dohašení a tím i dokončení rozpadu všech součástí, které se nerozpadly (nerozhasily) během samotného hašení. Nerozhašené, respektive pomaleji se hasící součásti se nacházejí i ve velmi čistém vápně. Minimální doba uležení je 14 dní.

Po přelití vápna do jámy dochází k sedimentaci těžších částic, které prošly sítím. Čím jsou částice menší, tím pomaleji klesají. Zároveň se sedimentací částic dochází k pozvolnému odvodňování vápna, protože přebytečné voda prosakuje stěnami do okolní půdy. Tím se stává kaše hustší a klesající částice neklesnou až ke dnu. Nejjemnější vápno je v horní části vápenné jámy a používá se na štuky a jakostní aplikace. Zcela horní vrstvu je nutno odstranit, jelikož je karbonatována, znečištěna a částečně může být degradována mrazem atd. Vápno ze spodní části jámy lze použít na méně náročné aplikace.

Jako optimální dlouhodobá doba uležení vápna se doporučuje 2–3 roky. Uležením vápenné kaše dochází ke zlepšení jejích funkčních vlastností, jako je jemnost, vaznost a vydatnost. Konzistence uležené vápenné kaše je taková, že vápenná kaše sama neteče a drží tvar. Minimální objemová hmotnost je 1400 kg/m³.

4. 6. 2 Odležení pojiva a malty před aplikací

Odležení pojiva má za cíl dohašení všech jeho částic a zamezení hašení po aplikaci. Z tohoto důvodu je běžně požadováno, aby vápenné pojivo používané na omítky bylo minimálně 14 dní odležené.

Dalším opatřením, které lze využít je přesítování pojiva. Tím se odstraní větší částice nedopalu a též případné nedohašené částice. Sítování není nezbytně nutné v případech, kdy jsou tyto pojivové částice záměrně ponechány v pojivu například z důvodu kopie historické předlohy.

Odležení vápenného pojiva v jámě poskytuje tradičně nejkvalitnější vápno. Praktické je využití odležení čerstvé vápenné malty. Tím je dosaženo lepšího kontaktu pojiva s kamenivem [Michoinová 2006]. Malta se skladuje na hromadě a musí být přikrytá 10 cm vrstvou písku. Malta by měla být dobře zhutněna. Skladování malty v řádu měsíců lze realizovat za předpokladu, že pojivem je vzdušné vápno a malta bude dobře chráněna před vysycháním popř. mrazem.

5. Konkrétní postupy výpalu a hašení specializovaných vápenných pojiv

5. 1 Výroba vápna – tradiční výpal dřevem

Bezpečnost práce

Tradiční výroba vápna nese s sebou zvýšená rizika a před započítím prací je potřeba zajistit ochranné pomůcky a proškolit pracovníky na bezpečnost práce a ochranu zdraví.

Výběr kamene

Vhodný kámen je nutné vybrat přímo v lomu. Kromě chemického složení a fyzikálních vlastností je potřeba upřesnit velikost požadované suroviny.

Velikost kamene je omezena tím, že musí být dělitelný ručními nástroji (palicí) a je nutno s ním ročně manipulovat. Pro výpal není vhodná drť menší než cca 20 mm v průměru.

Pro stavbu klenby nelze použít kameny se zaoblenými hranami (např. po průmyslovém nadrčení, třídění a pásové dopravě, který používají vápenky). Pro tyto účely je třeba mít k dispozici dostatek větších kamenů, které se palicí nadělí na potřebnou velikost.

Menší kameny od cca 20 mm do 50 mm jsou vhodné pro vyplnění prostorů, kde jsou v peci dosahovány nižší teploty.

Stavba klenby a prostor topeniště

Topeniště musí být dostatečně prostorné a musí být vyřešen sběr či propad popela. To je dáno u většiny pecí jejich konstrukcí, ze které též vychází i velikost klenby a prostor topeniště. Prostor topeniště je též dán velikostí přikládaného dřeva. U menších kruhových pecí se zaklenuje kámen do polokopule s vrcholem nad přikládacím otvorem. Minimální rozměr je cca 45–50 cm v průměru s výškou cca 60–70 cm.

U větších pecí se staví valená klenba ve středu pece s roztečí cca 80 cm a výškou též kolem 80 cm. Teplo se dále rozvádí v kameni vyskládanými tahovými kanálky.

Kopule, popř. klenba se staví buď tzv. „z ruky“, kdy se jednotlivé kameny postupně skládají a podpírají anebo se vytvoří rozebíratelné bednění, na které se kameny naskládají. V obou případech musí být klenba dostatečně stabilní a z větších kamenů cca 20–30 cm v průměru, u větších pecí i více. Kameny do klenby se dávají na výšku a zúžením dolů. Kameny se navíc dodatečně uklínují. Po zatížení klenby se bednění vyjme. Při výpalu je důležité, že pec hoří dlouhým plamenem, který má procházet skrze celou vápencovou vsázku. Tudíž klenba musí být ze štípaného kamene, který je nepravidelný a má dostatečnou mezerovitost. Kámen



by měl být co nejsušší, popř. je nutno ho dosušit před prudkým zvýšením teploty.

Klenbu lze stavět pouze z pevných kamenů, které se nerozpadají během výpalu. Tímto způsobem nelze pálit určité druhy slínovců popř. jílovců na hydraulické vápno.

Plnění pece

První vrstva po zaklenutí by ho měla kopírovat jako pojistná roznášecí klenba. Další vrstvy lze již skládat či sypat volněji.

Při plnění pece je podstatné znát místa, kde se teplo šíří pomaleji. Jsou to zejména místa v základu klenby a pece. Od poloviny pece směrem nahoru a do stran by se měl kámen postupně zmenšovat. Kameny se kladou na výšku a s ohledem na šíření tepla předpokládanými tahovými kanály. Položením kamenů lze částečně regulovat směr tahových kanálů, které by měly rozvádět teplo co nejrovnoměrněji po celé peci. Zejména je důležité rozvést teplo do stran a při kraji pece, kde je příkladací otvor. Přirozený směr šíření tepla je ovlivněn směrem přívodu vzduchu. Tedy nejtepleji je šikmo vzhůru od přívodu vzduchu. U větších pecí lze vložit do stran na svislo dřevěné kůly, které během výpalu vyhoří a vytvoří tak dodatečné tahové kanály.

Horní vrstva (cca 20–50 cm dle velikosti pece) je vyskládána z drobnějšího kamene s tím, že se odděluje vsázka od pece a vzniká mezera. Kámen se plní do výšky lehce nad horní okraj pece.



Palivo

Palivo by mělo být vyschlé čisté dřevo bez nátěrů nebo moření. Ideální je kombinace měkkého a tvrdého dřeva v poměru 2:1. Měkké dřevo rychleji hoří a dává vyšší plamen. Tvrdé dřevo má vyšší výhřevnost, dohořívá pomaleji a vytváří uhlíkový základ. Při samotném topení tvrdým dřevem může dojít k vytvoření nadměrného množství uhlíků, které žhnou, ale nevytváří dostatečně dlouhý plamen.

Ideální je dva roky suché dřevo. Použitelné je i dobře skladované roční. Vlhčí dřevo je méně ekonomické, jelikož se spotřebovává energie na vysušení a spotřeba paliva tak může stoupnout i o 20 %.

Dřevo musí být štípané a velikostně odpovídat topeništi. Při příkladání se měkké a tvrdé dřevo kombinuje dle odhořívání a uhlíků v topeništi.

Spotřeba paliva je individuální dle typu pece. Orientačně 100 kg dřeva na 150 kg vápence.



Režim topení v peci

Pec se roztápí pomaleji s ohledem na vysušení pece a vsázky. Příliš rychlý náběh teploty vede k rozpukání kamene a v důsledku i k potenciálnímu snížení stability klenby. Tato fáze předehřevu trvá od 2 do 6 h dle konkrétní situace. Po předehřevu lze začít intenzivně topit a pokračovat až do konce výpalu.



Zakrytí horní části pece

Po vysušení horních kamenů se vrch vápence překryje mazaninou z jílu a slámy popř. smrkového chvojí a vápenné kaše. V mazanině se ponechá několik průduchů k podpoře tahu do míst, kde je potřeba. Následně se začne zakrývat mezera mezi stěnou pece a vsázkou vápence. Mezera se postupně zakrývá od míst, kde je nevyšší žár. Rychlost zakrývání záleží na podmínkách výpalu. Vždy se nechávají mezery na průchod kouře a prošlehávajícího plamene.



Určení kalcinační teploty

Tradičně se dosažení kalcinační teploty odhadovalo na základě chování pece, barvy plamene a žáru, který vyzařoval z topeniště. I v dnešní době lze poměrně jednoduše nabýt těchto znalostí praxí. Podstatným indikátorem prohřátí pece na cca 500–600 °C je počátek vyšlehávání plamene nad vsázkou v peci.



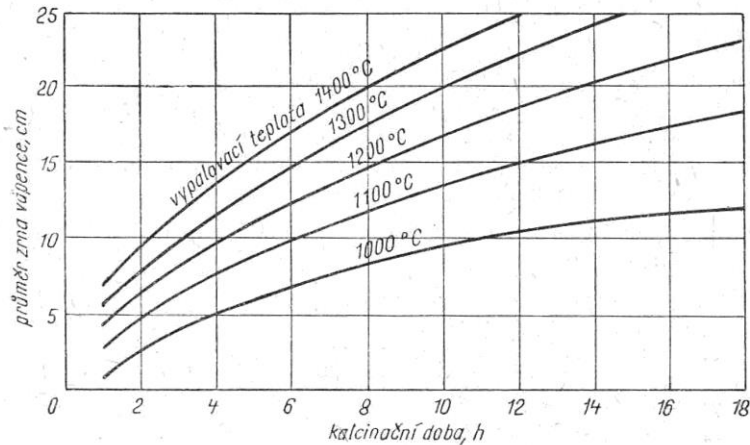
S ohledem na vynaložené prostředky a optimalizaci délky výpalu je lepší v peci realizovat základní monitorování teploty. Doporučené místo pro monitorování teploty je střed pece ve 2/3 výšky. Do těchto míst je nutné umístit termočlánek typu S, pokud má vydržet po celou dobu výpalu, popř. typu K, pokud se předpokládá jeho vytažení po dosažení kalcinační teploty. U termočláneků je potřeba zajistit jejich ochranu před mechanickým poškozením, jelikož u většiny surovin dochází během výpalu k smrštění a drobnému sesuvu celé vsázky kamene.



Pro kontrolu topeniště lze využít bezkontaktní infračervené teploměry a měřit teplotu kamene. Měření teploty v topeništi, ale neleze vztahovat k prohřátí pece.

Kalcinační doba

Kalcinační doba, tedy doba kdy dochází k rozkladu vápence a výpalu vápna nastává v reálných podmínkách od dosažení 900 °C. Pokud od této doby teplota v peci neklesne lze na základě dosažené teploty, převažující velikosti kamene ve středu pece z grafu na obr. 5 odvodit dobu potřebnou k ukončení výpalu.



Obr. 5. Vztah mezi kalcinační dobou a velikostí kamene v peci. [převzato z Helan-Klement 1960]

V praxi to znamená, že po dosažení 900 °C ve středu pece (monitorovací termočlánek) lze odhadnout dobu trvání výpalu. Jelikož je cílem rozložení takřka veškeré vsázky, berou se vždy ty méně příznivé parametry. Tj. větší průměry kamene a nižší teploty. Během výpalu lze dobu potřebnou k dokončení výpalu ještě korigovat.

Tradiční indikace konce výpalu je i například míra poklesu celé vsázky v peci. V pochybnostech lze odebrat vzorek kusového vápna z cca 10–20 cm pod horní ochrannou vrstvou a zkusmo ho vyhasit.

Horní 10 cm až 20 cm vrstva je i přes zakrytí mazaninou odstraňována jelikož je ochlazována okolním prostředím a není zcela vypálena. Popř. lze tento materiál použít na speciální aplikace.

Chladnutí

Proces chladnutí je u tradičního výpalu samovolný a trvá dle velikosti pece od 1 do 3 dnů. V případě dešťů a zvýšené relativní vlhkosti vzduchu je potřeba chránit horní část pece před dopadem kapek. Vhodné je též zakrýt příkládací otvor a přívod vzduchu.



Výběr vápna z pece

Při vybírání vápna z pece se postupuje od shora. Po odstranění mazaniny se vytřídí nedopálené kusy vápna. Po určitých zkušenostech lze na základě váhového rozdílu poznat již 20% nedopal. Nedopal se též pozná dle změny barevnosti.

Při výběru kusového vápna z pece lze postupovat podle dalšího zpracování a třídění kvality. Ve většině případů lze pomocí kovové tyče prolomit klenbu a vápno vybírat příkládacím otvorem. Ten se před tím vyčistí, aby vápno nebylo znečištěno popelem atd. Ručně lze vápno dále třídít dle jakosti a vybírat případné nedopaly.



5. 2 Hašení páleného kusového vápna za mokra

Bezpečnost práce

Tradiční hašení vápna je nebezpečná činnost a před započítím prací je potřeba zajistit ochranné pomůcky a proškolit pracovníky na bezpečnost práce a ochranu zdraví.

Hasnice

Vápnem se hasí ručně v dřevěné hasnici o rozměrech cca 1,2 x 1,8 m. Hasnice musí být vybavena uzavíratelným výtokovým otvorem. Hasnici lze též vyrobit na stavbě z prken, která se položí do pískového lože, aby se zabránilo úniku vápna. Postranice musí být zajištěny proti překlopení. Výhodné je horní hranu postranic překrýt lištou, která omezí případné vystříknutí vápna při míchání.

Kusové vápno a plnění hasnice

Hasnice musí být před prvním hašením čistá. Na dno hasnice se nasype vypálené vápno. Kusy musí být maximálně o velikosti jedné pěsti, tedy cca 100 mm. Množství vápna je takové, že zabírá přibližně ¼ plochy hasnice. První hašení je vždy lepší začínat s menší dávkou vápna.

Při následných hašeních je přípustné ponechat v hasnici zbytek pomaleji se hasícího vápna atd. Rychle reagující vápna se nesmí dávat do mokrého podkladu. Naopak při hašení pomaleji reagujících vápen je možné v hasnici ponechat menší zbytek teplého vápenného mléka k započítí reakce.

Proces hašení a dolévání vody

Před prvním hašením se rozhasí jeden dva kusy vápna pro orientační zjištění reaktivity.

Vápnem se rovnoměrně rozprostře a zaleje cca. do poloviny výšky vodou. Rychlost zalití vodou závisí na reaktivitě vápna. Pro většinu tradičně vyrobených vzdušných vápen lze tuto první dávku vody nalít takřka najednou. U hydraulických vápen je potřeba zohlednit jejich reaktivitu a vodu přidávat kropením postupně. Ruční míchání začíná souběžně s přilítím vody.

Hasící voda musí být čistá, nejlépe pitná s minimálním množstvím rozpustných solí. Voda musí být připravená u hasnice v dostatečném množství i s větší rezervou.

Pro zmiňovanou velikost hasnice je zapotřebí tři pracovníků, dva míchají a jeden dolévá vodu. Další voda se přilévá podle reaktivity vápna. Nikde by nemělo docházet k viditelnému lokálnímu „vyvaření“ vody. Normální spotřeba vody k vyhašení 50kg vzdušného kusového vápna je přibližně 130 litrů, pro hydraulická vápna je to méně.



Doba hašení

Doba hašení a aktivního míchání jedné dávky je přibližně 20 minut, přičemž maximální teploty (reakce) je dosaženo během prvních deseti minut. S ohledem na různé druhy vápna nelze tento časový údaj přesně stanovit. Obecně platí, že po této době je vápno rozmícháno na husté mléko, voda se již nevaří a reakce již viditelně neprobíhá.



Dohašení

Před další manipulací se za občasného promíchání nechá minimálně dalších 20 minut odležet. Pokud během této doby hašené naředěné vápno výrazně zhoustne, lze dolít potřebné množství vody.



Přelití do jámy nebo maltnice

Po dohašení je celý proces hašení v hasnici dokončen a vápno lze buď naředit a přelit do vápenné jámy (platí pouze pro vzdušná vápna) nebo smíchat s pískem a začít s přípravou malty.



Vápno se do jámy přelévá přes síto popř. sadu sít. Nedohašený materiál lze vrátit do hasnice k dohašení v dalším kole. Při větších množstvích nedopalu zůstává část nedopalu v hasnici. Hašení neúplně vypáleného vápna zvyšuje podíl jemných zrn. Pro lepší kvalitu kaše je vhodné velikosti nad 1 mm je zachytit sítím a hašené vápno před přelitím do jámy naředit.



Další hašení je nutné zpracovat následně a co nejdříve tak, aby nedošlo k odvodnění vápenného mléka a nedocházelo k vrstvení. Ideálně je vyhasit a naplnit zrací jámu během jednoho dne. Pro zachování kvality vápna nelze po odvodnění a sedimentaci vápna do jámy dále doplňovat.

5. 3 Hašení páleného hydraulického kusového vápna na prach

Bezpečnost práce

Tradiční hašení vápna je nebezpečná činnost a před započítím prací je potřeba zajistit ochranné pomůcky a proškolit pracovníky na bezpečnost práce a ochranu zdraví.

Hasnice

Vápno na prach lze hasit v hasnici popř. stačí čistá rovná plocha, například prkenná. Ideálně se vápno hasí v zastřešeném prostoru.



Kusové vápno a plnění hasnice

Před prvním hašením se rozhasí jeden dva kusy vápna pro orientační zjištění reaktivity a určení kropení vodou během hašení.



Proces hašení a dávkování vody

Kusové vápno se rozloží rovnoměrně na dno hasnice a větší kusy se roztlučou palicí do maximální velikosti cca 50 mm. Kropením se vápno postupně s přestávkami provlhuje a pozorně se sleduje reakce. Většinou po cca minutě a více začíná kusové vápno pozvolna prskat a rozpadat se. Za občasného kropení se vápno lopatou převrací, aby se nespálilo.



Na rozhasené vápno je možné postupně přidávat další vrstvy, kterým zvýšená teplota, vypařující se vodní pára a zvýšená vlhkost pomáhá při reakci. Výška, popř. množství takovéto vrstvy je dána prostorem a velikostí hasnice.



Po většinovém rozpadnutí na prach se vápno přehází na hromadu. Následně se může celý proces opakovat a vyhasené dávky vápna se na sebe postupně vrství.



Doba hašení

Doba hašení je závislá na druhu vápna (hydraulicitě vápna a jeho složení). Samotný proces prvotního hašení je v řádu minut až desítek minut. U hydraulických vápen hasěných na prach je ale důležitý i proces dohašení.

Dohašení

Vyhašené vápno se z hasnice přehází na hromadu, kde se nechá dohasit. Celá hromada vápna se překryje cca 10 cm tlustou vrstvou vlhkého písku a nechá odležet.

Doba odležení je závislá na hydraulicitě vápna, jeho složení a plánovaném použití. Více hydraulické vápna se pomaleji hasí, ale rychleji tuhne. Doba odležení též závisí na způsobu použití vápna. Pro omítky se doporučuje delší doba odležení pro zajištění objemové stálosti.



Následné zpracování

Přírozně hydraulické vápno obsahuje vždy určitý zvýšený podíl nedopalu, který může být až okolo 40 % (hmotnostních). Před použitím se vápenný prach přesítuje.



5. 4 Hašení páleného kusového vápna s pískem

Bezpečnost práce

Tradiční hašení vápna je nebezpečná činnost a před započatím prací je potřeba zajistit ochranné pomůcky a proškolit pracovníky na bezpečnost práce a ochranu zdraví.

Hasnice

Pro hašení vápna s pískem je potřeba rovná plocha, například dřevěná prkenná maltnice o rozměrech 1,4 x 1,4 m s vyvýšenými okraji (cca 8 cm).



Kusové vápno a plnění hasnice

Před prvním hašením se rozhasí jeden dva kusy vápna pro orientační zjištění reaktivity a určení kropení vodou během hašení.

Proces hašení a dávkování vody

Na plochu se rozprostře mokřý písek, na který se položí vrstva vápna. Toto vrstvení se opakuje dle velikosti maltnice a požadovaného množství malty. Větší kusy se roztlučou palicí do maximální velikosti cca 50 mm. Množství písku a vápna musí odpovídat předem stanovaným poměrům, jelikož se zároveň s hašením vápna připravuje i malta.



Horní vrstvu tvoří písek. V této fázi lze vápno s pískem dále provlhčit kropením a nechat uležet dle potřeby stavby v řádu i několika dnů (neplatí pro silně hydraulické vápna). Minimálně je však potřeba 30 minut. Následně se uprostřed hromady vytvoří důlek, kam se nalévá voda a postupně se začne zpracovávat malta.



Doba hašení

Doba hašení je závislá na druhu vápna (hydraulicitě vápna a jeho složení).



Dohašení

Pokud se malta nepoužije ihned po přípravě (jako horká malta), pak se vytvoří z připravené malty hromada, které se přikryje 10 cm tlustou vrstvou vlhkého písku a nechá se odležet. Malta se chrání před deštěm a vysycháním plachtou.

Doba odležení je závislá na druhu vápna, jeho složení a plánovaném použití. Pro omítky se doporučuje delší doba odležení pro zajištění objemové stálosti.

Následné zpracování

Před použitím je nutné odhrnout pískovou vrstvu a maltu znova promíchat.



6. Seznam použité související literatury

- Demellenne, M. – Van Parys, L. – Scaillet, J.-C., Hayen, R. 2013: Experimental craft lime kiln in the Walloon Region (Belgium) in order to understand the lime properties. In Hughes, J. J. (ed.). The 3rd Historic mortars conference. Glasgow : University of the West of Scotland.
- Eckel E. C., 1928: Cements, Limes and Plasters: Their Materials, Manufacture, and Properties. 3rd ed., John Wiley&Sons, New York, 699 s.
- Ebel, M. 2014: Vápno a jeho výroba do poloviny 19. století. In: Svorník 12/2014, s. 57-66.
- Folk, R.L., 1959: Practical petrographic classification of limestones: American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 43, p. 1-38.
- Groot, C. – Ashall, G. – Hughes, J. 2007: Characterisation of Old Mortars with Respect to their Repair. RILEM report 28, RILEM Publications SARL, 177s.
- Groot, C. - van Balen, K. - Bicer-Simsir, B. - Binda, L. - Elsen, J. - van Hees, R. - von Konow, T. - Lindqvist, JE. - Mauerbrecher, P. - Papayanni, I. - Subercaseaux, M. - Tedeschi, C. - Toumbakari, E. - Thompson, M. - Válek, Jan - Veiga, R. 2012 a: Repair mortars for historic masonry Performance requirements for renders and plasters. Materials and Structures, roč. 45, č. 9, s. 1277-1285.
- Groot, C. - van Balen, K. - Bicer-Simsir, B. - Binda, L. - Elsen, J. - van Hees, R. - von Konow, T. - Lindqvist, JE. - Mauerbrecher, P. - Papayanni, I. - Subercaseaux, M. - Tedeschi, C. - Toumbakari, E. - Thompson, M. - Válek, Jan - Veiga, R. 2012 b: Repair mortars for historic masonry Repair mortars for historic masonry. From problem to intervention: a decision process. Materials and Structures 2012, roč. 45, č. 9, s. 1295-1302.
- Groot, C. - van Balen, K. - Bicer-Simsir, B. - Binda, L. - Elsen, J. - van Hees, R. - von Konow, T. - Lindqvist, JE. - Mauerbrecher, P. - Papayanni, I. - Subercaseaux, M. - Tedeschi, C. - Toumbakari, E. - Thompson, M. - Válek, Jan - Veiga, R. 2012 c: Repair mortars for historic masonry Requirements for repointing mortars for historic masonry. Materials and Structures 2012, roč. 45, č. 9, s. 1303-1309.
- Helan, B. – K. Klement, 1960: Vápno. Výroba a použití. Praha. 226 s.
- Hošek, J., Muk, J. 1989: Omítky historických staveb. Státní Pedagogické Nakladatelství, Praha, 1989
- Hughes, J.J., Swift, D. S., Bartos, P.M.J., Banfill, P.F.G. 2002 A traditional vertical batch lime kiln: thermal profile and quicklime characteristics. Masonry opportunities for the 21st Century, ASTM STP 1432, Eds. American Society for Testing Materials, West Conshohocken
- Janč, L. – Kudrlička, V. – Kytýř, J., 1953: Základy stavitelství. Druhý díl, Praha ,332 s.
- Láník, J. – Cikrt, M., 2001: Dvě tisíciletí vápenictví a cementárenství v českých zemích. Svaz výrobců cementu a vápna Čech, Moravy a Slezska, Praha, 204 s.

Matoušková, A., 1995: Od tradičního vápenictví na území Českého krasu ke vzniku moderní továrny na výrobu portlandského cementu v Králově Dvoře v roce 1911. Královodvorská cementárna, Beroun, 85 s.

Michoinová, D., 2006: Příprava vápenných malt v péči o stavební památky. ČKAIT, Praha, 76 s.

Niklas, J. - Šanda, F., 1873: J.P. Jöndlovo Poučení o stavitelství pozemním. Třetí vydání. Kober, Praha.

Oates, J. A. H., 1998: Lime and Limestone, Chemistry and Technology, Production and Uses, Wiley–VCH, Weinheim.

Suchý M. 2014: Vápno, katedrála Sv. Víta a pražští vápeníci v pozdním středověku. Výpověď písemných pramenů. *Archaeologia historica*, 39/2014, s. 349-363.

Válek J. - Matas T. - Jiroušek J., 2012: Experimentální vápenná pec pro malovýrobu vápenných pojiv. In: Sborník VI. Vápenický seminář 2012, s. 49-55.

Válek, J. – Matas, T. – Jiroušek, J. 2013a: Design and development of a small scale lime kiln for production of custom-made lime binder. In: J. J. Hughes (ed.), *The 3rd Historic mortars conference*. Glasgow.

Válek, J. – Matas, T. – Jiroušek, J. – Machová, D. – Petrářová, V. – Frankeová, D. 2013b: Posouzení vlastností kusového vápna páleného v „tradiční“ vápenné peci, *Keramický zpravodaj* 29, č. 6, s. 6–10.

Válek, J. – van Halem, E. – Viani, A. – Pérez-Estébanez, M. – Ševčík, R. – Šašek, P., 2014: Determination of optimal burning temperature ranges for production of natural hydraulic limes. *Construction and Building Materials* 66, s. 771-780.

Válek, J. – Stuchlíková, E. – Maříková-Kubková, J. – Herichová, I. – Kozlovce, P. – Řihošek, J. – Suchý, M. – Panáček, M. – Bryscejn, J., 2015: Mapa zaniklých a historických surovinových zdrojů a technologií pro výrobu vápenných pojiv. Katalog k výstavě „Calcarius, čili vápeník“

Wingate, M. 1985: *Small-Scale Lime-Burning. A practical introduction*, Intermediate technology publications, 185s.