



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ

INSTITUTE OF BUILDING TESTING

# METODIKA ZKOUŠENÍ CIHELNÉHO ZDIVA PŘI OBNOVĚ PAMÁTEK

THE METHODOLOGY OF TESTING BRICKWORK IN THE CONTEXT OF MONUMENT RESTORATION

## DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Vojtěch Bartoň

## ŠKOLITEL

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Cikrle, Ph.D.

BRNO 2024

## ABSTRAKT

V současné době je velmi obtížné kontrolovat kvalitu a životnost historických plných pálených cihel, získaných ze zbouraných objektů, pro jejich znovuvyužití (tzv. upcyklaci) při rekonstrukci památek. Tato disertační práce se proto zaměřuje na predikci trvanlivosti (životnosti) zdicích prvků pomocí nedestruktivních diagnostických metod. Odhad trvanlivosti je založen na identifikaci vad ve vnitřní struktuře prvků, které nejsou na povrchu viditelné a jejichž odhalení představuje náročnou disciplínu. Pro tento účel byly využity moderní a zcela nedestruktivní elektroakustické metody, konkrétně rezonanční metoda (známá také jako impact-echo) a ultrazvuková impulzní metoda, s doplněním o konvenční (destruktivní) zkoušky. V rámci této práce jsou definovány celkem čtyři třídy trvanlivosti a doporučení pro využití prvků z jednotlivých tříd. Pro lepší porozumění chování cihelného zdiva se tato práce také zabývá jeho mechanickými vlastnostmi. Práce poskytuje komplexní přehled o vlastnostech zdicích prvků a cihelného zdiva a přispívá ke zkvalitnění hodnocení technického stavu (diagnostiky) a rekonstrukce památek.

## KLÍČOVÁ SLOVA

mrazuvzdornost; cihla plná pálená; vnitřní struktura; nedestruktivní testování; impact-echo; ultrazvuková impulzní metoda; trvanlivost materiálu

## ABSTRACT

It isn't easy to control the quality and durability of historic solid bricks obtained from demolished buildings for their reuse (upcycling) in reconstructing monuments. Therefore, this doctoral thesis focuses on the prediction of the durability of masonry elements using non-destructive diagnostic methods. Estimating durability is based on identifying defects in the internal structure of the elements that are not visible on the surface and whose detection represents a challenging discipline. For this purpose, modern and completely non-destructive electroacoustic methods, namely the resonance method (also known as impact-echo) and the ultrasonic pulse method, were used, supplemented by conventional (destructive) testing. Four durability classes and recommendations for the use of elements from each class are defined. This thesis also discusses its mechanical properties for a better understanding of the behavior of brickwork. The piece of work provides a comprehensive overview of the properties of masonry elements and brickwork and contributes to improving the assessment of the technical condition (diagnosis) and reconstruction of monuments.

## KEYWORDS

frost resistance; solid fired brick; internal structure; non-destructive testing; impact-echo; ultrasonic pulse velocity; material durability

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BARTOŇ, Vojtěch. *Metodika zkoušení cihelného zdiva při obnově památek*. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/161555>. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Petr Cikrle.

## PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE:

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané disertační práce s názvem *Metodika zkoušení cihelného zdiva při obnově památek* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 4. 5. 2024

---

Ing. Vojtěch Bartoň

autor

## PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem disertační práci s názvem *Metodika zkoušení cihelného zdiva při obnově památek* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 4. 5. 2024

---

Ing. Vojtěch Bartoň

autor

## PODĚKOVÁNÍ:

Na tomto místě bych chtěl vyjádřit vděčnost vedoucímu mé disertační práce, doc. Ing. Petru Cikrlovi, Ph.D., za jeho podporu, vedení a odborné rady během výzkumného procesu, ale i mého celého studia na univerzitě. Jeho zkušenosti, trpělivost a otevřenost mi byly průvodci na mé akademické cestě. Dále bych chtěl poděkovat Ústavu Stavebního Zkušebnictví (SZK), že mi poskytl příležitost provádět tuto práci a vytvořil pro mě inspirativní a přátelské akademické prostředí. Chtěl bych poděkovat také lidem z technické univerzity v Kielci (Polsko), kde jsem měl možnost absolvovat stáž pod vedením dr. Edyty Spychał. Během této stáže jsem se dozvěděl řadu nových a užitečných informací ale také jsem měl možnost vyzkoušet si metody, které považuji jako alternativní možnosti řešení problematiky, kterou se zabývám. V neposlední řadě mé díky patří Ing. Richardu Dvořákovi, Ph.D., který mi byl velmi nápomocný v problematice vyhodnocování dat. Bez jeho pomoci by napsání této práce bylo velmi obtížné. Nakonec bych rád poděkoval své rodině a přítelkyni za pochopení a trpělivost během celého mého studia.

# Obsah

<b>1. Úvod .....</b>	<b>- 8 -</b>
<b>2. Cíle práce.....</b>	<b>- 9 -</b>
<b>3. Teoretická část .....</b>	<b>- 10 -</b>
<b>3.1 Současné možnosti odhadu trvanlivosti cihel .....</b>	<b>- 12 -</b>
3.1.1 Vliv výroby a složení cihel na jejich trvanlivost.....	- 12 -
3.1.2 Odhad trvanlivosti na základě vlhkostních charakteristik .....	- 15 -
3.1.3 Odhad trvanlivosti na základě identifikace vad ve vnitřní struktuře materiálu.....	- 18 -
3.1.4 Odhad trvanlivosti na základě analýzy pórů.....	- 25 -
<b>4. Zvolená metodika výzkumu.....</b>	<b>- 31 -</b>
<b>4.1 Stanovení materiálových charakteristik.....</b>	<b>- 32 -</b>
4.1.1 Vlhkostní stavy.....	- 32 -
4.1.2 Stanovení objemové hmotnosti .....	- 34 -
<b>4.2 Využívané postupy – Nedestruktivní metody .....</b>	<b>- 35 -</b>
4.2.1 Metoda impakt – echo (rezonanční metoda).....	- 35 -
4.2.2 Ultrazvuková impulsní metoda.....	- 38 -
4.2.3 Stanovení pevnosti v tlaku zdicích prvků (in-situ) .....	- 40 -
<b>4.3 Využívané postupy– destruktivní metody.....</b>	<b>- 41 -</b>
4.3.1 Zkouška mrazuvzdornosti .....	- 42 -
4.3.2 Stanovení pevnosti v tahu za ohybu.....	- 44 -
4.3.3 Stanovení pevnosti v tlaku zdicích prvků.....	- 45 -
<b>5. Experimentální část .....</b>	<b>- 47 -</b>
<b>5.1 Odběr vzorků pro výzkum.....</b>	<b>- 47 -</b>
<b>5.2 Doplnující výzkum .....</b>	<b>- 51 -</b>
5.2.1 Stanovení pevnosti v tlaku zdicích prvků NDT metodami .....	- 51 -
5.2.2 Vliv vlhkosti na pevnost v tlaku zdiva stanovenou nedestruktivně .....	- 58 -
5.2.3 Vliv směru zatěžování na pevnost v tlaku.....	- 68 -
<b>5.3 Predikce trvanlivosti zdicích prvků NDT metodami.....</b>	<b>- 73 -</b>
5.3.1 Vliv vlhkosti na vlastnosti zdicích prvků.....	- 74 -
5.3.2 Rozvoj vad ve vnitřní struktuře vlivem cyklického zmrazování .....	- 78 -
5.3.3 Predikce trvanlivosti zdicích prvků .....	- 83 -
<b>6. Diskuse výsledků.....</b>	<b>- 96 -</b>
<b>7. Závěr .....</b>	<b>- 100 -</b>
<b>8. Seznam použitých zkratk .....</b>	<b>- 101 -</b>
<b>9. Seznam obrázků.....</b>	<b>- 103 -</b>

10. Seznam tabulek .....	- 108 -
11. Použité zdroje.....	- 109 -

## **Přílohy k disertační práci**

Příloha 1. Odhad trvanlivosti pomocí výpočetní tomografie (CT).....	- 2 -
Příloha 2. Analýza pórů v materiálu rozborem (digitálního) obrazu.....	- 5 -
Příloha 3. Stanovení pevnosti v tlaku zdicích prvků NDT metodami.....	- 9 -
Příloha 4. Vliv vlhkosti na pevnost v tlaku zdiva stanovenou nedestruktivně.....	- 19 -
Příloha 5. Vliv směru zatěžování na pevnost v tlaku.....	- 27 -
Příloha 6. Vliv vlhkosti na vlastnosti zdicích prvků.....	- 36 -
Příloha 7. Rozvoj vad ve vnitřní struktuře vlivem cyklického zmrazování.....	- 39 -
Příloha 8. Predikce trvanlivosti zdicích prvků.....	- 40 -

# 1. Úvod

Cihly plné pálené jsou tradičním stavebním materiálem, který má dlouhou historii a tradici. Často jsou klíčovým materiálem historických a památkových objektů téměř po celém světě. Památky představují asi nejhmatatelnější odkaz naší historie a přístup k péči o ně často vypovídá o vyspělosti dané civilizace. Z tohoto důvodu je nezbytné přistupovat k jejich rekonstrukcím, ale i k hodnocení technického stavu, s určitým respektem [1].

Cihelné zdivo bylo v minulosti předmětem mnoha výzkumných prací a je také zakotveno v řadě norem. Tento materiál, jeden z nejstarších stavebních materiálů používaných po celém světě během všech historických období, je stále populární. První zmínky o využití pálených cihel jako stavebního materiálu pocházejí z oblasti Mezopotámie a jsou starší než 7000 let. Popularitu cihel potvrzují stavby po celém světě, od rozsáhlých římských lázní a bazilik až po majestátní gotické stavby. Pojem „cihlová gotika“, spojený především s Německem, Polskem a Litvou, vypovídá o oblíbenosti cihel v tomto období. V té době vznikly nezaměnitelné stavby, jako jsou cihelný hrad v polském Malborku nebo v litevském Trakai. V období renesance zájem o cihly pro výstavbu přetrvává, avšak cihelné zdivo je zpravidla překryto omítkou. Nelze opominout ani cihelné stavby v Asii, kde se nacházejí některé z největších cihelných staveb, jako je Stúpa Jetavanaramaya v Anuradhapuře na Srí Lance [2]. I když nejsou k dispozici přesné údaje o tom, kolik procent současné zástavby tvoří cihlové stavby, je zřejmé, že tyto stavby představují významný podíl kulturního dědictví v mnoha regionech světa. Vzhledem k jejich estetické a historické hodnotě je důležité, aby byly tyto stavby chráněny a udržovány pro budoucí generace [3].

Předpisy a normy se liší v závislosti na konkrétní zemi a individuálních požadavcích. Přesto je možné pozorovat určitý společný vzorec, a sice že trvanlivost cihel plných pálených je často odsunuta do pozadí. Hlavní pozornost je věnována mechanickým vlastnostem, jako je pevnost v tlaku nebo pevnost v tahu za ohybu [4], [5], [6]. Avšak mechanické vlastnosti jsou úzce spojeny s trvanlivostí materiálu. Trvanlivost lze definovat jako schopnost materiálu odolávat povětrnostním vlivům, zejména opakovanému zmrazování a rozmrazování. Pokud materiál nedokáže těmto podmínkám odolat, dochází k degradaci nejen jeho vzhledu, ale i mechanických vlastností. Rozvoj výpočetní a měřicí techniky v posledním desetiletí nám otevírá nové možnosti pro nedestruktivní hodnocení trvanlivosti materiálů [7].

## 2. Cíle práce

Pro rekonstrukce cihelných památek se v současné době stále častěji volí možnost znovuvyužití (tzv. upcyklace) historických plných pálených cihel získaných ze zbouraných objektů. Hlavními důvody jsou zachování autentičnosti cihelného zdiva a také ekologické a environmentální hledisko. Současné metody však neumožňují efektivně a nedestruktivně monitorovat kvalitu (trvanlivost) těchto historických cihel, což je nezbytné pro jejich opětovné použití v konstrukcích. Přesto by kvalita použitého stavebního materiálu měla být i v tomto případě sledována.

Hlavním cílem této disertační práce je vyvinout metodiku pro predikci trvanlivosti zdicích prvků s využitím nedestruktivních elektroakustických metod. Před navržením této metodiky je nutné prohloubit stávající znalosti o faktorech ovlivňujících trvanlivost cihel, jako jsou nasákavost, způsob výroby cihel, rozložení pórů a vady ve vnitřní struktuře prvků.

Kromě tohoto hlavního tématu si práce klade za cíl zlepšit nebo upřesnit některé postupy a metody pro hodnocení technického stavu cihelných staveb. Přestože cihelné stavby představují velké procento současné zástavby (nejen památky), pozornost je často směřována pouze na betonové konstrukce. Postupy pro hodnocení technického stavu cihelného zdiva jsou často zastaralé a moderní přístupy jsou v mnoha případech zcela ignorovány. Při posuzování cihelného zdiva jsme proto někdy nuceni nahlížet do norem, které se zabývají betonem nebo dokonce přírodním kamenem, což může vést k nedokonalému posouzení stavu cihelných staveb.

V práci je kladen důraz na praktické využití navržených postupů ve stavební praxi. Cílem je přinést inovativní přístupy, které povedou ke zkvalitnění oprav historických a památkových cihelných staveb a také k šetrnému posuzování jejich technického stavu.

Tato disertační práce by tak měla přispět nejen k udržení kulturního dědictví, ale i k efektivnějšímu využití stavebních materiálů, zlepšení ekologické stopy a zkvalitnění posuzování technického stavu cihelných staveb.

### 3. Teoretická část

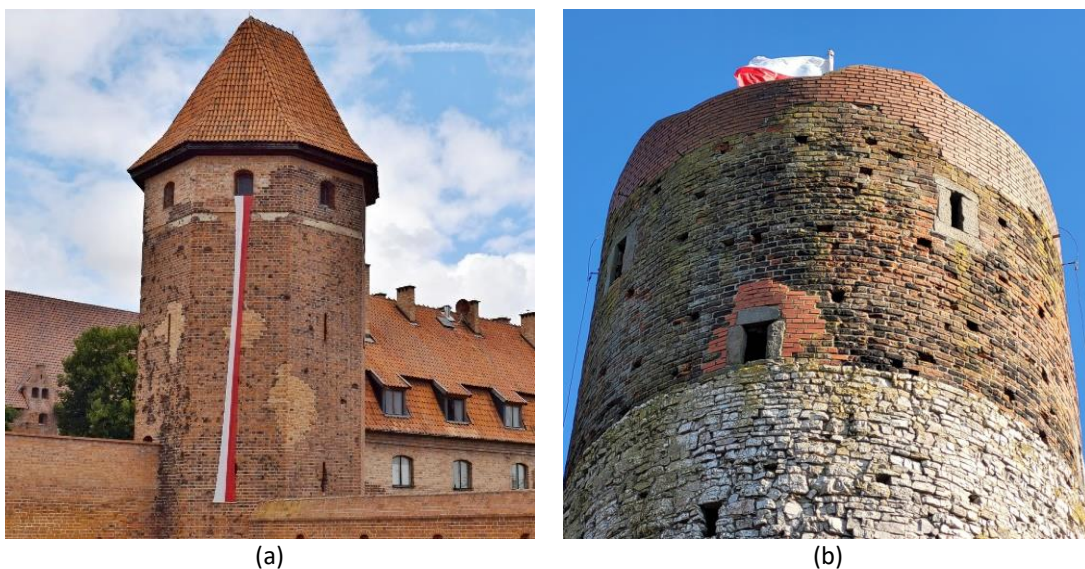
Stavební materiály jsou často posuzovány především z hlediska mechanických vlastností, jako je pevnost v tlaku nebo pevnost v tahu za ohybu [4], [8]. Otázka trvanlivosti cihelného zdiva je však stále odsunuta do pozadí. V kontextu trvanlivosti zdicích prvků je běžně využívána zkouška mrazuvzdornosti neboli schopnost materiálu odolávat opakovanému zmrazování a rozmrazování [9], [5]. Tato zkouška je však destruktivní, což je zejména u památek nežádoucí. Trvanlivost, či schopnost materiálu odolávat vnějším vlivům (působení povětrnostních podmínek, chemické korozi nebo krystalizaci solí), je u materiálů s vysokou nasákavostí, jako jsou právě plné pálené cihly, neméně důležitým faktorem. To je zvláště významné v případech, kdy cihelné zdivo není chráněno omítkou nebo jinou povrchovou úpravou. Takové zdivo tvoří pohledovou část objektů a je nejvíce náchylné k poškození povětrnostními podmínkami.

I přes časté opomíjení této problematiky se trvanlivostí stavebního materiálu zabývala v minulosti řada autorů. Pozornost je však často směřována na odolnost betonových konstrukcí [10], [11]. U autorů, kteří se věnovali trvanlivosti zděných objektů, se jedná spíše o snahu prodloužit životnost konstrukcí tím, že se snaží pochopit již vzniklé vady ve zděných objektech a postupy rekonstrukcí [12], [13] nebo [14], nikoli však předcházení vzniku těchto vad. Další autoři zkoumají trvanlivost plných pálených cihel a vlivy, které trvanlivost snižují, ale často používají destruktivní metody. Výsledkem je, že prvek poté nelze následně využít v konstrukci. Zvláště přínosné pro tento výzkum byly práce autorů zabývajících se problematikou poškození porézních materiálů mrazem, které poskytly lepší obraz o vlivu vnitřní struktury na trvanlivost zdicích prvků. Problematikou degradace materiálu vlivem cyklického zmrazování a rozmrazování se zabývali například autoři [13], [15]. Vliv kritického nasycení na tuto degradaci je popsán v [16].

Snaha o pochopení faktorů, které snižují trvanlivost cihel plných pálených, a hledání nejefektivnějších způsobů renovace existujících staveb s minimálním zásahem do konstrukce je bezesporu velmi přínosná. Často však nastává situace, kdy není možné takové objekty rekonstruovat bez nahrazení jednotlivých zdicích prvků. V takovém případě nastává otázka, zda rekonstruovat stavby historickými cihlami nebo využít zdicí prvky vyrobené moderními technologiemi. Oba přístupy mají své výhody i nevýhody.

Hlavní výhodou využití moderních zdicích prvků je předpoklad menší variability mechanických vlastností (zejména pevnosti v tlaku nebo pevnosti v ohybu), jednotného

vzhledu a trvanlivosti. Během výroby moderních zdicích prvků lze zajistit stabilní technologický proces a přizpůsobit ho podle potřeby. U památek je však často kladen důraz na zachování autenticity cihelného zdiva, což může být při použití moderních zdicích prvků problematické, jak je znázorněno na Obr. 1. Problém s autenticitou zdiva lze řešit výrobou cihel moderními technologiemi na míru konkrétní stavbě [17] nebo [18]. Tento přístup je nicméně finančně a časově náročnější [7].



*Obr. 1. Využití cihel vyráběných moderními technologiemi pro rekonstrukce cihelných památek; (a) rekonstrukce gotického hradu v obci Malbork [7]; (b) rekonstrukce hradu ze 14. století v obci Chęciny.*

Významnou výhodou znovuvyužití historických zdicích prvků je právě zachování autentičnosti zdiva, což je zejména u památkových objektů klíčovým faktorem. Tento přístup umožňuje zachovat původní vzhled stavby, což je v památkové péči velmi ceněno (Obr. 2).



*Obr. 2. Barokní cihelný most v obci Sedlec u Mikulova (ČR) po rekonstrukci historickými cihlami [7].*

V posledních letech se navíc stále více dostává do popředí otázka udržitelného rozvoje, kterému upcyklace historických zdicích prvků efektivně napomáhá. Tento přístup je ekologičtější, neboť významně snižuje potřebu produkce nových zdicích prvků a minimalizuje množství odpadu vzniklých ze zbouraných cihelných staveb. Při opětovném využití historických cihel plných pálených pro rekonstrukce zděných objektů je však nutné počítat s velkou variabilitou jednotlivých prvků. I když jsou historické cihly odebrány z jediné zbourané stavby, jejich stejnorodost není zaručena [19]. Z těchto důvodů je poměrně obtížné získat dostatečné množství cihel podobného vzhledu a vlastností, obzvláště obtížné je potom prokázání jejich požadované kvality nebo trvanlivosti [7].

### **3.1 Současné možnosti odhadu trvanlivosti cihel**

Problematika odolnosti stavebních materiálů byla v minulosti tématem mnoha vědeckých prací. Někteří vědci se zaměřili na tento aspekt s cílem poskytnout komplexní přehled o odolnosti stavebních materiálů, což dokládají práce [20], [21] nebo [22]. V publikaci [23] jsou prozkoumány dopady chemického složení a mikrostruktury na odolnost materiálu a práce [24] je věnována odolnosti porézních materiálů v závislosti na klimatických podmínkách.

Odolnost porézních stavebních materiálů, jako jsou cihly plně pálené, je významně ovlivněna podmínkami prostředí, které mohou vést k chemické, fyzikální i mechanické degradaci. [24]. Trvanlivost materiálů lze tedy chápat jako schopnost materiálu odolávat povětrnostním podmínkám. V této práci je trvanlivost vnímána především jako odolnost proti opakovanému zmrazování a rozmrazování. Problematikou trvanlivosti stavebních materiálů se v minulosti zabývala řada autorů. Přístupy jednotlivých autorů k této problematice se liší, ale hodnocení trvanlivosti je obvykle založeno na identifikaci faktorů, jako jsou množství, charakter nebo redistribuce pórů, nasákavost (či jiná vlhkostní charakteristika) nebo vady ve vnitřní struktuře materiálu. Autoři ve svých výzkumech často kombinují různé metody a při hodnocení mrazuvzdornosti zvažují více než jeden faktor. Přehled nejvýznamnějších prací je uveden níže.

#### **3.1.1 Vliv výroby a složení cihel na jejich trvanlivost**

Nejedná se přímo o odhad trvanlivosti, nicméně složení a technologie výroby cihel jejich trvanlivost zásadně ovlivňují. Při opětovném využívání historických cihel pro rekonstrukce památkových staveb hraje roli několik faktorů. Mezi tyto faktory patří historie použití cihel a míra jejich degradace, ovlivněná historií vlhkosti, účinky solí, nebo cyklickým zmrazováním a

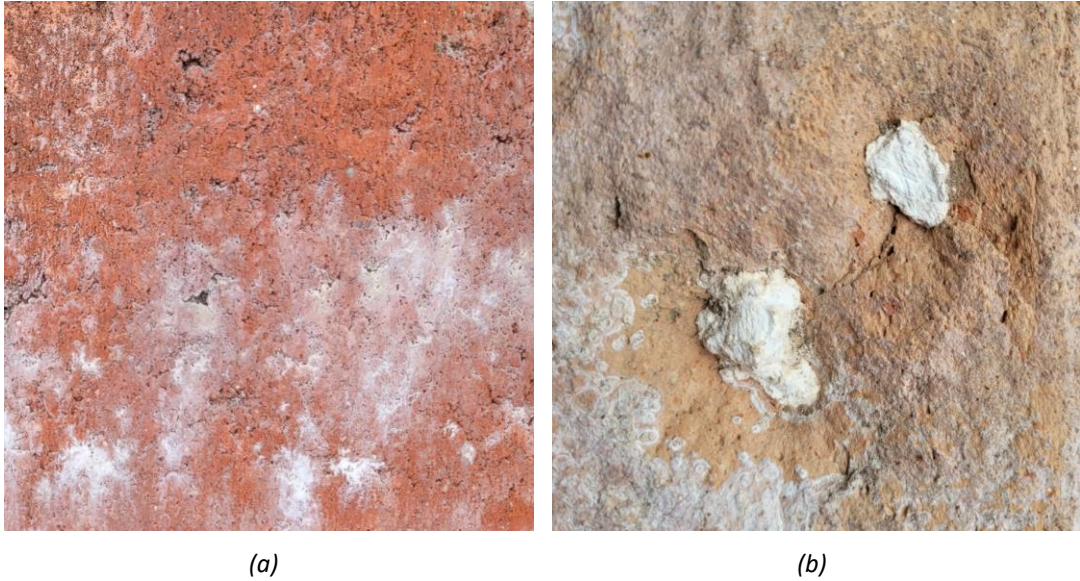
rozmrazování. Nicméně, nejdůležitějším aspektem je původní kvalita samotné cihly, tedy složení cihlářského těsta a technologie jejich výroby [25]. Zásadním faktorem, který ovlivňuje vlastnosti cihel, je typ hlíny použité při jejich výrobě. Různé typy hlíny, jako jsou jílovité nebo železité hlíny, mají specifické fyzikální a chemické charakteristiky, které přímo ovlivňují pevnost, barvu a odolnost cihel vůči povětrnostním vlivům. Jedná se o velmi rozsáhlou problematiku, která se těžko popisuje globálně. Metody výroby cihel se sice vyvíjely, ale základní principy zůstaly neměnné po tisíciletí. Tradiční výroba zahrnuje těžbu, přípravu a míchání hlíny, formování cihel a jejich vypalování v pecích při vysokých teplotách [26]. Teplota a doba vypalování jsou klíčové pro dosažení požadované pevnosti a dalších vlastností cihel. Vysoké teploty způsobují slinování minerálů v hlíně, což zvyšuje pevnost a snižuje porozitu materiálu [27]. Výroba a složení cihel plných pálených jsou předmětem mnoha prací jiných autorů. Složení a vlastnosti renesančních cihel z okolí Padovy v Itálii jsou zkoumány v [28]. Chemické složení cihel z El Bostamy v Egyptě je diskutováno v [29], z údolí Bujang v Kedahu v [30] Technologické postupy výroby cihel v Turecku jsou probrány v [31], technologie výroby a složení cihel z oblasti Harijána na indickém subkontinentu v [32] nebo z okolí Brno v České republice [26]. Je zřejmé, jak rozsáhlou oblast tato problematika představuje, a že její popis pro jedinou konkrétní oblast je otázkou rozsáhlé výzkumné činnosti.

Právě z důvodů rozsáhlosti této problematiky, ale také zaměření této práce, je popis omezen pouze na nejvýznamnější faktory, které mohly ovlivnit kvalitu a trvanlivost cihel již během jejich výroby

#### **3.1.1.1 Výkvěty solí a přítomnost cicvárů**

V případě, že cihelný střepek obsahuje rozpustné soli (nejčastěji sírany a uhličitany), může za přítomnosti vlhkosti docházet k jejich výkvětům na povrchu cihel. Tyto výkvěty se obvykle projevují bílým zbarvením na líci zdiva (Obr. 3 (a)). Jedná se především o estetickou vadu, která však v případě památek může způsobit značné škody [33], [25].

Dalším a významnějším problémem z hlediska trvanlivosti cihel může být přítomnost vápenných sloučenin. Zrna těchto sloučenin se mohou vyskytovat v cihlářských zeminách [34] a při teplotě přibližně 800 °C se mění na oxid vápenatý, který reaguje s vlhkostí a vede k tvorbě hydroxidu vápenatého. To způsobuje zvětšení jeho objemu [33]. Tato změna objemu může způsobovat vznik defektů, jako jsou trhliny či odštěpky, které zhoršují nejen vzhled, ale především trvanlivost (mrazuvzdornost) cihel (Obr. 3 (b)).



Obr. 3. Poruchy způsobené složením cihlářské hlíny; (a) výkvěty solí na povrchu cihly; (b) výskyt cicvárů s typickým odštípnutím vlivem cyklického zmrazování na cihle z 15. století.

### 3.1.1.2 Slinovací proces – teplota výpalu

Nelze tvrdit, že zdicí prvky vyrobené z totožného materiálu ve stejné cihelně budou mít identické vlastnosti nebo vzhled. Kvalita cihel se totiž může lišit i v rámci jednoho výpalu, a to především v závislosti na umístění cihel v peci, kde panují různé teploty výpalu, nebo na době výpalu [25].

Teplota výpalu může ovlivňovat řadu vlastností cihel, jako jsou barva, pórovitost, nasákavost, mechanické vlastnosti nebo rozměry. Pokud je teplota výpalu příliš vysoká, cihla obvykle získá na střepe tmavší barvu (někdy až fialovou), vyšší pevnost v tlaku a výrazně nižší nasákavost (Obr. 4 (a)). Nicméně při nadměrné teplotě výpalu často dochází k deformaci hran a smrštění prvků. Naopak, při nízké teplotě výpalu (Obr. 4 (b)) má cihla obvykle světle hnědou (oranžovou) barvu střepe, nižší pevnost v tlaku a podstatně vyšší nasákavost. Pouze na barvu cihelného střepe však nelze spoléhat, neboť ta je závislá také na typu použité hlíny. Jílovité a železité hlíny se liší svým složením a tím pádem i vlastnostmi. Jílovité hlíny jsou typicky bohaté na kaolinit, zatímco železité hlíny obsahují vyšší procento železitých oxidů, což cihlám dodává charakteristickou červenou nebo hnědou barvu [35], [36].



Obr. 4. Vliv teploty výpalu na vzhled cihly; (a) cihla s vysokou teplotou výpalu; (b) cihla s nízkou teplotou výpalu [7].

### 3.1.1.3 Texturní vady

Dalším faktorem, který výrazně ovlivňuje trvanlivost zdicích prvků, jsou jejich vady, které mohly vzniknout již během výroby. Jako příklad vady vzniklé již během výroby lze uvést delaminaci jednotlivých vrstev. Tato vada ve vzorcích může být způsobena rotačním pohybem směsi na šnekových lisech nebo u ručně vyráběných cihel špatným promísením jílové hmoty. K projevu této vady dochází ve většině případů až v důsledku působení zmrazovacích cyklů, kdy se projeví ve formě soustředných „šnekově“ orientovaných trhlin, podél nichž dochází k postupnému drolení střepe. Tento typ vad je charakteristický nejen pro historické cihly, ale vyskytuje se i u nově vyráběných cihel plných pálených [25], [7].

### 3.1.2 Odhad trvanlivosti na základě vlhkostních charakteristik

Vlhkostní charakteristiky, jako jsou nasákavost nebo kapilární vzlínavost, mají zásadní vliv na trvanlivost stavebních materiálů. Tyto vlastnosti jsou klíčové při posuzování odolnosti materiálů vůči vnějším vlivům, jako je zmrazování a rozmrazování. Problematika náchylnosti mikrostruktury k změnám vodní fáze je popsána v [37]. Publikace [38] diskutuje vliv kapilární vzlínavosti na trvanlivost porézních materiálů. Práce [39] se zabývá vlivem vlhkosti na mrazuvzdornost za mírnějších podmínek, které lépe odpovídají reálným klimatickým vlivům.

Při přeměně vody na led se molekuly vody uspořádávají do pevné krystalické struktury, což způsobuje zvětšení objemu o přibližně 10 %. Dalším poklesem teploty pod bod mrazu dochází k rekrystalizaci ledu. Při rekrystalizaci dochází k přeuspořádání krystalické struktury ledu, což vede k dalšímu zvětšení objemu. Tento jev je patrný zejména při velmi nízkých teplotách, například při teplotě  $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ , kdy objem ledu stoupá o dalších 3,3 % ve srovnání s objemem při bodu mrazu [25]. Tento jev následně vnitřní strukturu materiálu vytváří významná napětí, čímž může dojít k poškození vzorků. Obecně lze předpokládat, že prvky s nižší nasákavostí

budou mít vyšší trvanlivost a naopak. Toto tvrzení však není zcela pravdivé, jak je popsáno například v [40]. V případě trvanlivosti (odolnosti) materiálu totiž hraje významnou roli také například charakter a redistribuce pórů nebo také vliv defektů ve vnitřní struktuře materiálu.

### 3.1.2.1 Odhad trvanlivosti na základě nasákavosti vzorků

Odhad trvanlivosti na základě nasákavosti je zahrnut v řadě norem nebo předpisů. Avšak v těchto případech není mrazuvzdornost (trvanlivost) materiálu posuzována pouze na základě samotné nasákavosti, ale pomocí koeficientů, které jsou stanoveny za odlišných podmínek, jako je teplota vody, tlak nebo doba nasakování.

Prvním z této kategorie je **Saturation coefficient** -  $S_c$  definovaný v ASTM C67 [5]. Tento koeficient je založen na rozdílných hmotnostech, které střepek získá po nasycení po dobu 24 hodin ve vodě při laboratorní teplotě ( $15,5 \div 30$  °C) a po pěti hodinách ve vroucí vodě. Koeficient  $S_c$  lze stanovit dle vztahu:

$$S_c = \frac{W_c - W_d}{W_b - W_d} \quad (1)$$

Kde:  $W_d$  je hmotnost vysušeného vzorku,  
 $W_c$  je hmotnost vzorku po 24 hodinách nasáknutí ve vodě o laboratorní teplotě,  
 $W_b$  je hmotnost vzorku po 5 hodinách nasáknutí ve vroucí vodě.

Dále v této problematice lze zmínit **saturační poměr** –  $T$ , který je uvedený v DIN 52251-3 [41]. Ten je definovaný jako poměr otevřených pórů nasycených vodou za atmosférického tlaku (za běžné laboratorní teploty) a nasycení pórů ve vakuu (30 mbar). Jako obdobu saturačního poměru  $T$  lze považovat **koeficient nasycení střepek** –  $KNS$ . Tento koeficient lze stanovit jako poměr mezi nasákavostí stanovenou ve vodě o laboratorní teplotě po dobu 24 hodin (ČSN EN 772-21) a nasákavostí stanovenou po 5 hodinách sycení vzorků ve vroucí vodě (ČSN 72 2609) [25]. Orientační klasifikace podle saturačního poměru –  $T$  a koeficientu nasycení střepek –  $KNS$  je uveden v Tab. 1.

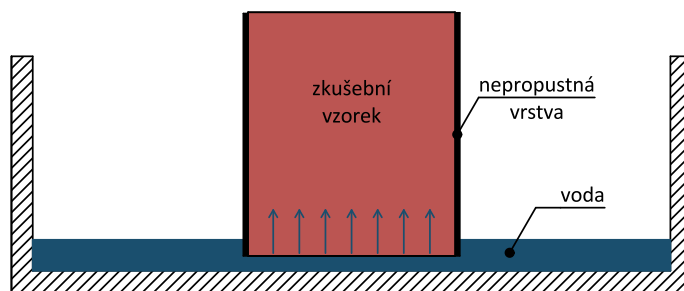
Tab. 1. Hodnocení mrazuvzdornosti dle saturačního poměru –  $T$  [41] a koef. nasycení střepek –  $KNS$  [25].

$T$	$KNS$	hodnocení mrazuvzdornosti
$T < 0,75$	$KNS < 0,74$	vysoká pravděpodobnost mrazuvzdornosti
$0,75 < T < 0,85$	$0,74 < KNS < 0,84$	nejistá mrazuvzdornost
$T > 0,85$	$KNS > 0,84$	výrobek je nemrazuvzdorný

Využití těchto koeficientů je vhodné zejména pro sledování vlastností cihel vyráběnými moderními technologiemi, neboť u historických cihel nasákavost závisí také na historii používání cihly a tuto skutečnost nelze při využití těchto součinitelů zohlednit [25].

### 3.1.2.2 Odhad trvanlivosti na základě kapilární vztlínivosti

V případě prací řady autorů zabývajících se problematikou kapilární vztlínivosti často narazíme na pojem "sorptivity test". Tento pojem zavedl v roce 1957 John Philip jako míru schopnosti materiálu absorbovat nebo desorbovat kapalinu kapilární vztlínivostí [42]. Řada prací se zabývá hlubším pochopením problematiky vztlínivosti vody v materiálu [43], [44] nebo [45]. Metoda je také využívána v celé řadě vědeckých prací přímo pro odhad trvanlivosti (mrazuvzdornosti) materiálu [46], [47] a je součástí norem, například ASTM C1585-20. Velká obliba této metody pravděpodobně vychází z její nenáročnosti na provádění a zkušební vybavení. Vztlínivost je snadno měřitelná vlastnost, která charakterizuje tendenci porézního materiálu absorbovat vodu vztlínivostí [48]. Během zkoušky je vzorek uložen do vodní lázně, přičemž boční strany vzorku jsou izolovány nepropustným materiálem (obvykle páskou nebo epoxidem). Izolace bočních stěn vzorku je nutná, aby docházelo k nasakování vzorku pouze kapilárními silami. Rychlost vztlínivosti je závislá především na průměru kapilár a vlastnostech kapaliny, ale také na mikrotrhlinách, kterými kapalina vztlíná mnohem rychleji než ostatními kapilárami [45]. Schéma zkoušky je znázorněno na Obr. 5.



Obr. 5. Schéma zkoušky kapilární vztlínivosti (sorptivity test) [45].

Hlavní výhodou této metody spočívá především v jednoduchém provádění, kdy není zapotřebí žádné speciální vybavení. Výhodou je také její opakovatelnost. Pokud například zkoušku provedeme na jednom vzorku z obou stran a výsledky budou diametrálně odlišné, lze předpokládat, že ve vzorku jsou vady či defekty.

### **3.1.3 Odhad trvanlivosti na základě identifikace vad ve vnitřní struktuře materiálu**

Vliv defektů ve vnitřní struktuře materiálů a jejich vzájemné působení s vlhkostí jsou klíčové faktory, které ovlivňují trvanlivost stavebního materiálu. Tyto defekty, jako mohou být například trhliny nebo praskliny, nejsou na povrchu viditelné, a jejich odhalení je proto problematické. Níže jsou popsány metody a postupy pro jejich odhalení, od těch nejprimitivnějších, jako je akustická trasovací metoda, až po velmi sofistikované metody, jako je CT. Tyto moderní metody umožňují detailně prozkoumávat vnitřní strukturu materiálů a identifikovat potencionální defekty, což významně přispívá ke zlepšení kontroly trvanlivosti stavebních materiálů. Nicméně, využití těchto metod ve stavebnictví je stále poměrně omezené, zejména kvůli vysokým pořizovacím nákladům. Je proto důležité hledat rovnováhu mezi dostupností metod v běžné stavební praxi a přesností získaných výsledků.

#### **3.1.3.1 Odhad trvanlivosti akustickou trasovací metodou**

Akustická trasovací metoda je ve stavebnictví běžně využívána k identifikaci vad a poruch, jako jsou dutiny, trhliny nebo delaminace. Pro tuto metodu se používá ocelová tyč s ocelovou kuličkou na konci nebo sférické kladívko. Princip spočívá v poklepání prvků a následné interpretaci zvukových signálů (ve slyšitelné oblasti 16 Hz až 16 kHz) na základě individuální zkušenosti pracovníka.

Jedná se o nejjednodušší metodu použitelnou k predikci trvanlivosti cihel plných pálených. Analýza odezvy, která může být zvonivá, dunivá nebo křáplavá, umožňuje odhadovat případné vady ve vnitřní struktuře zkoumaných prvků [49], [50]. Tato metoda byla v minulosti hojně využívána, zejména pro svou finanční nenáročnost a byla oblíbená u řemeslníků pro rychlé posouzení vhodnosti použití cihel plných pálených do konstrukce.

Nicméně, tato metoda má své omezení. Je zcela subjektivní a vyžaduje značnou zkušenost ze strany pracovníka. S rozvojem měřicí techniky a současně nedostatkem dostatečně zkušených pracovníků ve stavebnictví, tato metoda postupně ustupuje modernějším a objektivnějším diagnostickým postupům.

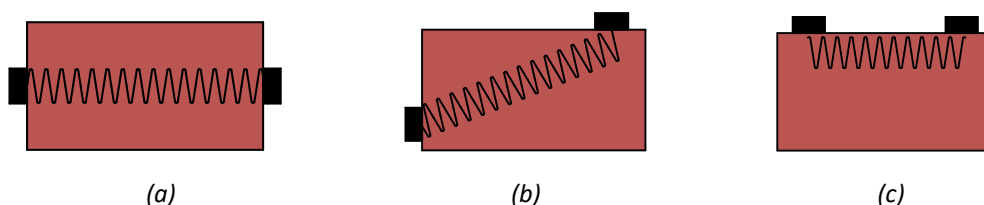
#### **3.1.3.2 Odhad trvanlivosti ultrazvukovou metodou (UZ)**

Ultrazvuková metoda je ve stavebnictví běžně využívána pro stanovení dynamického modulu pružnosti nebo pro stanovení rovnoměrnosti betonu. Tato metoda umožňuje také detekovat poruchy či defekty v prvcích [51], [52].

Metoda funguje na principu mechanického vlnění s frekvencí vyšší než 20 kHz, obvykle do 150 kHz. Na rozdíl od metody impact-echo (kapitola 3.1.3.3) s se pohybujeme v neslyšitelné

oblasti, a toto ultrazvukové vlnění tak může pronikat i relativně silnějšími vrstvami. Ve stavebnictví lze využít jak odrazovou ultrazvukovou metodu (pulse echo) [53], [54], avšak pravděpodobně stále více využívaná je průchodová ultrazvuková metoda (pulse velocity) [55], [56].

Existují tři typy možného prozvučování pomocí průchodové ultrazvukové metody: přímé, polopřímé a nepřímé neboli povrchové [51]. Rozmístění sond a budičů je znázorněno na Obr. 6. Nejprůkaznější výsledky získáme pomocí přímého prozvučování, kde je možné nejpřesněji stanovit délku základu a zároveň je v tomto případě nejmenší útlum [57], [58].



Obr. 6. Typy průchodového prozvučování pomocí ultrazvukové metody; (a) přímé; (b) polopřímé; (c) nepřímé (povrchové) [51].

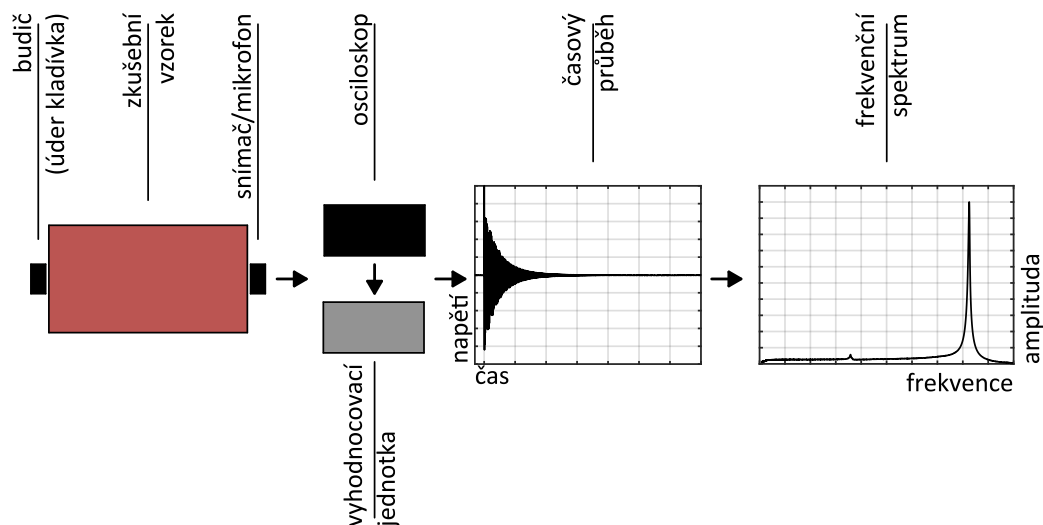
Výhodou této metody je její rychlost a jednoduchost provádění. Stejně jako metoda impact-echo (kapitola 3.1.3.3) je tato metoda zcela nedestruktivní a není vázána na laboratorní podmínky, lze ji tedy využít i in-situ. V případě použití této metody pro odhalení vnitřních defektů však mohou nastat komplikace s vyhodnocováním výsledků. Měření může být ovlivněno řadou faktorů, jako jsou vlastnosti materiálu, jeho vlhkost nebo délka měřicí základny [59]. Tyto faktory je nutné brát v úvahu při interpretaci výsledků. Metoda je však velmi vhodná pro sledování rozvoje defektů ve vnitřní struktuře vzorků cyklickým zmrazováním (norma ČSN 73 1380), kde jedinou proměnnou zůstává rozvoj těchto defektů, protože objemová hmotnost i rozměry zůstávají během měření neměnné.

### 3.1.3.3 Odhad trvanlivosti metodou impakt – echo (IE)

V České republice se tato metoda často nazývá rezonanční (impulsní/kladívková) metoda a je zahrnuta v normě ČSN 73 1372 [60]. V této normě je postup zkoušení popsán pro betonové vzorky, nicméně principy z této normy jsou aplikovatelné i na jiné materiály, včetně cihel plných pálených. Pomocí metody lze stanovit dynamické moduly pružnosti v tahu, tlaku a ve smyku, a rovněž lze určit Poissonův koeficient [60].

Princip metody je založen na vnesení mechanického impulzu do materiálu. Po vnesení impulzu dochází u prvku z tuhého materiálu k jeho rozkmitání. Pokud je frekvence vnějšího

budícího impulsu totožná s vlastní frekvencí prvků, dochází k jevu, který nazýváme rezonancí. Právě tohoto jevu využívá metoda *IE*. [25], [61]. Schéma metody je znázorněné na Obr. 7.



Obr. 7. Schéma měření pomocí metody *impact-echo* (rezonanční metody) [25].

Jako budič slouží úder sférickým kladívkem a pro zaznamenání odezvy (kmitání) lze využít piezoelektrické snímače zrychlení nebo mikrofon. Hlavní rozdíl mezi použitím piezoelektrického snímače a mikrofonu spočívá v rozsahu frekvenčního spektra.

Piezoelektrický snímač zrychlení obvykle zachycuje signály vyšších frekvencí, které se nacházejí v slyšitelném pásmu, a také část nižších frekvencí ultrazvukového pásma. Naopak, mikrofon obvykle zaznamenává pouze slyšitelnou oblast zvuku, avšak nemusí pokrývat celé toto pásmo [25].

Mechanické vlnění je následně převedeno na elektrický proud, který je pomocí osciloskopu přenesen do vyhodnocovací jednotky (PC/notebook). Analýza signálu může probíhat buď v časové nebo frekvenční oblasti. Převod z časové oblasti (závislost napětí nebo proudu na čase) do frekvenční oblasti (závislost amplitudy na frekvenci) lze provést pomocí Fourierovy transformace. Rozvoj výpočetní techniky dnes umožňuje využít časově-frekvenční Fourierovu transformaci (*STFT*) [25]. Stále nejpoužívanější je však pravděpodobně rychlá Fourierova transformace (*FFT*), a to právě kvůli nižším nárokům na výpočetní techniku [62]. Princip (algoritmus) *FFT* byl poprvé popsán v roce 1965, a to jako [63]:

$$F(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (2)$$

Kde:  $F(\omega)$  je frekvenční spektrum,  
 $\omega$  je úhlová frekvence,

$f(t)$  je změřený signál,  
 $t$  je čas,  
 $i$  je komplexní jednotka [63], [25].

Tato metoda je velmi citlivá na vady ve vnitřní struktuře prvků a jejich rozvoj, například vlivem cyklického zmrazování. Vlivem průchodu vlnění přes defekt se mechanická vlna deformuje, což rovněž způsobuje deformaci signálu [25]. Této skutečnosti využívá řada norem a prací jiných autorů. V práci [62] je metoda využita pro sledování změn způsobených tepelnou degradací betonu. Pro odhad mrazuvzdornosti je tato metoda použita v [64]. Jako příklad norem, které této metody využívají, lze zmínit [65], [66] nebo [67]. Nespornou výhodou této metody je její zcela nedestruktivní charakter a dnes i pořizovací cena. Metoda je sice známá již dlouho, ale k oblibě se dostává až v poslední době, kdy došlo k rozvoji měřící techniky a provádění zkoušky se tak výrazně zjednodušilo [64].

#### **3.1.3.4 Odhad trvanlivosti metodou akustická emise (AE)**

Metoda akustické emise je nejpoužívanější ve strojírenství, ale i ve stavebnictví nachází své uplatnění. Tato metoda je použitelná v situacích, kdy je prvek vystaven určitému typu namáhání. Ve stavebnictví se uplatňuje zejména při měření lomové energie nebo sledování rozvoje trhlin během zkoušky v tahu za ohybu. Zdrojem akustické emise může být například vznik trhlin, plastické deformace nebo třecí mechanismy během mechanického zatěžování vzorku. Dalším zdrojem akustické emise může být i vliv teploty, například ochlazování vzorku z vysokých teplot [62], [68], [69].

Využitelnost této metody byla ověřena také během zahraniční stáže autora této práce na Technické univerzitě Świętokrzyska v obci Kielce. V rámci tohoto experimentu byl využit přístroj Pocket AE-2. Akustická emise byla v tomto případě vyvolána ochlazováním vzorků z relativně vysokých teplot.



(a)



(b)

Obr. 8. Měření pomocí metody akustické emise; (a) měřený vzorek s osazením snímačů; (b) přístroj pro měření akustické emise Pocket AE-2.

Během testování byly naměřené obdobné výsledky jako v případě metody *IE* (kapitola 3.1.3.3). Využitelnost metody *AE* pro účely této práce však není příliš valná. Zkušební postup v rámci této metody je totiž výrazně složitější (nutnost vyvolání akustické emise) a také pořizovací cena zařízení *AE* je řádově vyšší. Metoda je však velmi dobře uplatnitelná (mimo výše popsané) pro dlouhodobý monitoring staveb. Pomocí této metody jsme schopni lokalizovat akustickou emisi (například vznik trhlin či jiných defektů) velkých stavebních celků [70], [71].

### 3.1.3.5 Odhad trvanlivosti pomocí výpočetní tomografie (*CT*)

Jedná se o moderní přístup v materiálovém a stavebním inženýrství. Rozvoj tomografických metod jde ruku v ruce s rozvojem výpočetní techniky v posledních několika desetiletích. Tyto metody umožňují zobrazení vnitřní struktury materiálu s vysokým rozlišením v řezech bez jejich porušení [72].

Technika výpočetní tomografie, známá spíše jako *CT* (computer tomography), se běžně používá především v lékařství, průmyslu a v poslední době také v materiálovém inženýrství [73]. Jako příklad využití této metody na analýzu vad ve vnitřní struktuře prvků či pórovitosti lze uvést práci [74] nebo [75], které se zabývají zkoumáním mikrostruktury a defektů v betonu či přírodním kameni. Práce [76] je zaměřena na inovaci metody pro její zefektivnění. Analýzou pórovitosti pomocí *CT* se zabývají například výzkumy [77] nebo [78]. Jako příklad využití této metody na cihlách plných pálených může sloužit práce [79].

Nejčastěji se setkáváme s tomografickými měřeními v režimu průchodu, při kterém jsou měřeny oslabené rentgenové fotony. Struktura tomografického zařízení závisí na aplikaci, ve které má být přístroj použit. Pro rozhodnutí o vývoji takového zařízení jsou klíčové prostorové rozlišení a maximální velikost objektu, který má být snímán [80].

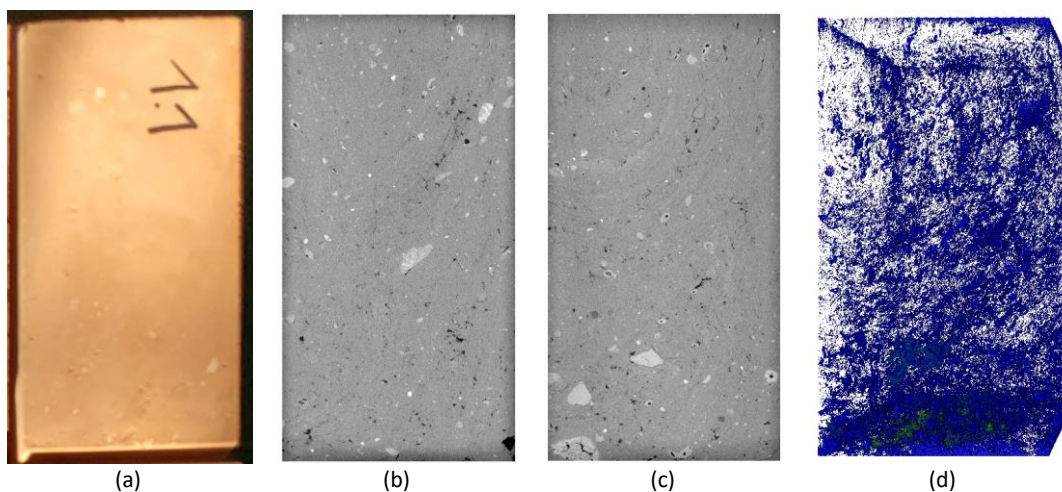
Využitelnost této metody byla ověřena také v rámci zahraniční stáže autora této práce na Technické univerzitě Świętokrzyska v obci Kielce. V rámci tohoto experimentu byl využit přístroj Nikon XT H 225 ST CT (Obr. 9).



Obr. 9. Přístroj XT H 225 ST CT.

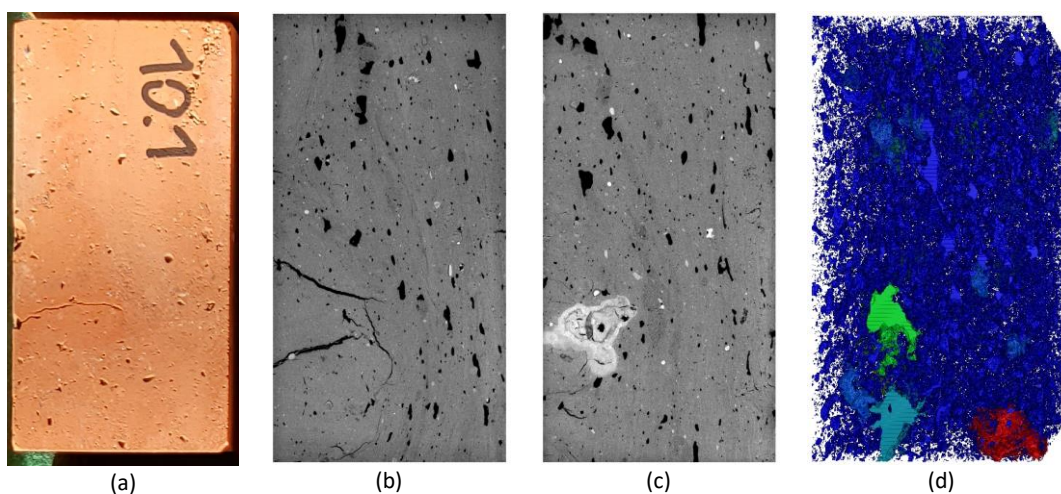
Vzorky byly hranoly o rozměrech přibližně  $50 \times 50 \times 100$  mm, vyřezané z historických cihel plných pálených. Sken byl proveden s rotačním terčem. Jeho maximální napětí je 225 kV a výkon je 450 W. Pro skenování vzorků bylo použito napětí 210 kV a intenzita 431  $\mu$ A. Expoziční čas byl 177 ms. Rozlišení (velikost voxelu) bylo 0,040 mm.

Celkem bylo pomocí tomografu testováno 5 zkušebních vzorků. Příklad zkušebního tělesa s předpokladem vysoké trvanlivosti je zobrazen na Obr. 10. V tomto případě nejsou v tělese žádné výrazné defekty jako jsou trhliny, dutiny nebo přítomnost "cicvárů". Prvek má také relativně nízkou pórovitost  $P = 33 \%$  a nasákavost  $w_s = 14 \%$ . Rovněž měření metodou impact-echo prokázala předpoklad pro dobrou trvanlivost materiálu. První vlastní frekvence podélného kmitání  $f_l = 8,3$  kHz.



Obr. 10. Prvek (č. 1.1) s předpokladem velmi dobré trvanlivosti – bez výraznějších vad ve vnitřní struktuře; (a) fotografie vzorku; (b) a (c) řezy pořízené pomocí CT (Nikon XT H 225 ST CT); (d) 3D sken.

Naopak příklad zkušebního vzorku s předpokladem velmi špatné trvanlivosti je zobrazen na Obr. 11. V tomto případě jsou v tělese trhliny, dutiny a také „cicvár“, které nejsou na povrchu tělesa viditelné. Prvek má také vyšší pórovitost  $P = 39 \%$  a nasákavost  $w_s = 19 \%$ . Rovněž měření metodou impact-echo prokázalo předpoklad pro nízkou trvanlivost materiálu. První vlastní frekvence podélného kmitání  $f_L = 5,8 \text{ kHz}$  a ve spektru frekvencí se vyskytuje řada vrcholů, což naznačuje vady ve vnitřní struktuře a nižší kvalitu tělesa.



Obr. 11. Prvek (č. 10.1) s předpokladem nižší trvanlivosti – prvek obsahuje trhliny, dutiny a také „cicvár“; (a) fotografie vzorku; (b) a (c) řezy pořízené pomocí CT (Nikon XT H 225 ST CT); (d) 3D sken.

Využití CT pro analýzu materiálů je velmi citlivé na defekty ve vnitřní struktuře materiálu, ale také na analýzu pórů v materiálu (tato problematika je rozebrána v kapitole 3.1.4). Na základě analýzy takto vytvořených skenů získáme velmi podrobnou představu o trvanlivosti daného materiálu. Jedná se však o časově i finančně náročnou metodu a při jejím použití jsme vázáni na laboratorní podmínky.

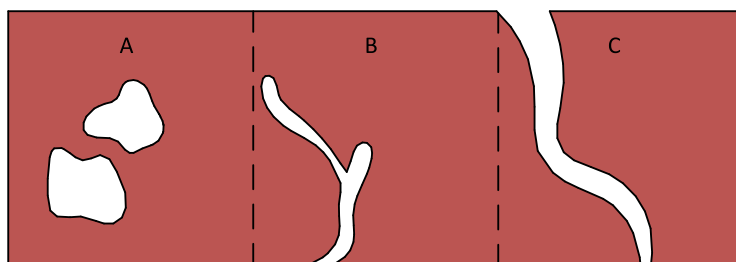
### 3.1.3.6 Odhad trvanlivosti pomocí magnetické rezonance (*MRI*)

Obdobně jako v případě *CT* (kapitola 3.1.3.5) se jedná o tomografickou metodu. Magnetická rezonance (*MRI* – Magnetic Resonance Imaging) je založena na principu nukleární magnetické rezonance (*NMR*). Tento fenomén je známý přibližně od poloviny 20. století. Princip *NMR* spočívá v absorpci elektromagnetického záření o určité frekvenci, kdy jsou jádra s nenulovým magnetickým spinem umístěna v intenzivním magnetickém poli. Neboli, když je vzorek umístěn do silného magnetického pole a následně je vystaven radiofrekvenčnímu signálu, dochází k absorpci energie jádry s určitou rezonanční frekvencí. Tato absorpce je poté detekována a použita k vytvoření *NMR* spektra [81]. *MRI* následně umožňuje pomocí výpočetní techniky převést *NMR* na 2D i 3D obraz [72], [82].

Hlavní nevýhodou této metody je její finanční náročnost, z tohoto důvodu je využívána především v oborech jako je lékařství nebo makromolekulární chemie a ve stavebnictví jen v omezené míře [72]. Přes tuto skutečnost lze nalézt řadu vědeckých prací, které se problematikou stanovení pórovitosti, rozložení pórů nebo identifikace defektů ve vnitřní struktuře materiálu pomocí *MRI* zabývají. Velká část těchto prací je zaměřena na sledování pórovitosti a odhadu trvanlivosti přírodního kamene [83], [84], [85] nebo [86].

### 3.1.4 Odhad trvanlivosti na základě analýzy pórů

Póry (jejich množství, velikost, charakter a redistribuce) mají významný vliv na trvanlivost materiálů. Tato problematika je podrobně popsána v řadě publikací. Snahu o obecnější pochopení vlivu pórů na vlastnosti materiálu nalezneme v [87], [88] nebo [77]. Vlivem pórů na vlastnosti cihel se zabývali autoři v [89], [90], [91], [92] nebo [93]. Některé vědecké práce jsou potom zaměřeny přímo na predikci trvanlivosti právě na základě analýzy pórů [94]. Póry lze rozdělit na tři základních typy ( Obr. 12).



Obr. 12. A – uzavřené póry, B – otevřené póry (slepé), C – otevřený pór (průchozí) [95].

- **Uzavřené póry (A)** – pór je zcela obklopen pevnou látkou, izolovaný od tekutiny.
- **Otevřené póry** – pór, který má přístup k povrchu pevné látky.

- **Slepé póry (B)** – pór uzavřený pouze na jednom konci.
- **Průchozí póry (C)** – pór, který přímo spojuje dva vnější povrchy pevné látky.

Pravděpodobně nejvýznamnější práci v této problematice je [96], kde byly porovnávány možnosti využití rtuťové porozimetrie (kapitola 3.1.4.1) a analýza vzorků pomocí elektronového mikroskopu (kapitola 3.1.4.3). V případě obou metod autoři dospěli k obdobným výsledkům, a to, že póry o průměru <3 μm představují největší riziko z hlediska trvanlivosti (mrazuvzdornosti). Ale především byla definována závislost mezi mrazuvzdorností, pórovitostí a průměru pórů tzv. Maage faktor:

$$D_F = \frac{3,2}{PV} + 2,4 \times P3 \quad (3)$$

Kde:  $D_F$  je Maage faktor (mrazuvzdornost),  
 $PV$  je celkový objem pórů v mm/g,  
 $P3$  jsou póry o průměru > 3 μm z  $PV$  v %.

V práci Franke a Bentrup z roku 1993 je mrazuvzdornost hodnocena na základě limitních hodnot mediánu poloměru pórů [97]. Kritéria mrazuvzdornosti podle Maage faktoru i na základě mediánu poloměru pórů jsou uvedena v Tab. 2.

Tab. 2. Hodnocení mrazuvzdornosti dle Maage faktoru [96] a med. poloměru pórů (Franke a Bentrup 1993) [97].

Maage faktor $F_c$	medián poloměru pórů $r_{50\%}$	hodnocení mrazuvzdornosti
$F_c > 70$	$r_{50\%} > 1,65 \mu\text{m}$	vysoká pravděpodobnost mrazuvzdornosti
$55 < F_c < 70$	$0,60 \mu\text{m} < r_{50\%} < 1,65 \mu\text{m}$	nejistá mrazuvzdornost
$F_c < 55$	$r_{50\%} < 0,60 \mu\text{m}$	výrobek je nemrazuvzdorný

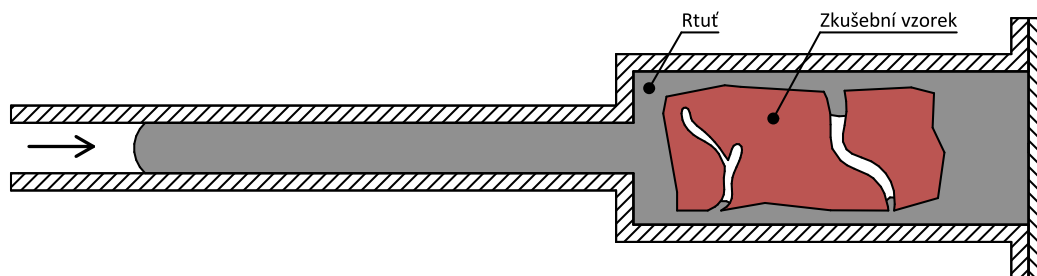
Výše zmíněné práce jednotlivých autorů se ve svých přístupech i využívaných metodách liší, nicméně všechny tyto metody mají jednu společnou nevýhodu, a to skutečnost, že jsou prováděny na malých vzorcích, což je problematické vzhledem k velké nehomogenitě cihelného střepe. Zároveň se často jedná o destruktivní zkoušky a vzorky následně nelze znovu využít pro rekonstrukce cihelných staveb.

### 3.1.4.1 Analýza pórů v materiálu pomocí rtuťové porozimetrie (MIP)

Rtuťová porozimetrie, známá ve světě jako Mercury Intrusion Porosimetry (MIP), je pravděpodobně nejpoužívanější metoda pro analýzu redistribuce, velikosti a množství pórů v materiálu, stejně jako pro analýzu dalších vlastností materiálu [98], [99], [100]. Tato metoda

se využívá již poměrně dlouho, poprvé ji navrhl Edward Washburn v roce 1921 [101] a je rovněž součástí řady norem a předpisů, jako příklad lze zmínit [102] nebo [103].

Princip metody je založen na skutečnosti, že rtuť je za běžných podmínek nesmáčivý kov, což zamezuje kapilárnímu vztlínání (pokud na rtuť není vyvinut tlak). Během zkoušky *MIP* je vzorek uzavřen do speciálního zařízení, do kterého je následně pod tlakem vnášena rtuť, viz Obr. 13.



Obr. 13. Schéma zkoušky *MIP*. Šipka znázorňuje směr tlaku na rtuť [104].

Dutiny a póry o větším průměru jsou zaplňovány při nižším tlaku, zatímco pro zaplnění pórů a dutin s menším průměrem je nutný vyšší tlak rtuti [104]. Větší póry jsou tedy zaplňovány rtutí dříve než póry menší. Jedná se tak o nepřímou úměru. Během zkoušky musí být vzorek zcela vysušený, neboť rtuť nedokáže z pórů vytlačit vodu. Objem rtuti, který pronikl do pórů, se zaznamenává jako funkce použitého tlaku a distribuci velikosti pórů lze vypočítat pomocí Washburnovy rovnice [101]:

$$r = - \frac{2 \times \gamma \times \cos \theta}{p} \quad (4)$$

Kde:  $r$  je poloměr pórů,  
 $\gamma$  je povrchové napětí rtuti,  
 $\theta$  je smáčecí úhel rtuti,  
 $p$  je tlak rtuti.

Z technologických důvodů měřící techniky je pomocí *MIP* možná detekce pórů do poloměru přibližně 3 nm [99], [95]. Jedná se o spolehlivou a přesnou metodu, která má ale své nevýhody. Jednou z těchto nevýhod je skutečnost, že metoda pracuje s toxickou rtutí. Problém také může nastat v případě měkkých a křehkých materiálů, neboť pod tlakem rtuti může dojít k ovlivnění struktury pórů [105]. Další nevýhodou metody je její destruktivní charakter, část rtuti se po zkoušce zachytí v pórech a vzorek tak nelze znovu využít [104], [106].

#### **3.1.4.2 Analýza pórů v materiálu pomocí absorpce plynů**

Metoda absorpce plynů se pro stanovení pórovitosti materiálů používá přibližně od poloviny dvacátého století [107]. Teorie Brunauera, Emmetta a Tellera (*BET*) je v dnešní době také součástí norem [108].

Metoda je založena na principu kapilární kondenzace, což je jev, kdy jsou póry v pevné látce zaplňovány kapalinou v důsledku kondenzace plynné fáze. Tento jev nastává při tlaku nižším, než je tlak, při kterém kondenzuje voda na rovném povrchu. Tento jev je popsán Kelvinovou rovnicí [109], [110]. Během měření se sleduje množství absorbovaného plynu jako funkce relativního tlaku. Tato metoda je velmi podobná rtuťové porozimetrii (kapitola 3.1.4.1), ale na rozdíl od rtuťové porozimetrie jsou plynem zaplňovány nejprve póry menších průměrů (za nižšího tlaku) [111], [112].

Metodou lze stanovit velikost pórů v rozmezí 0,5 až 200 nm. Jedná se o často využívanou metodu a výsledky měření jsou proto často srovnatelné s pracemi jiných autorů [113]. Metoda je nedestruktivní, což umožňuje vzorek využít pro další měření. Hlavní nevýhodou této metody je časová náročnost a také nutnost speciálního laboratorního vybavení [111].

#### **3.1.4.3 Analýza pórů v materiálu rozbořem (digitálního) obrazu**

Principem se jedná o poměrně jednoduchou metodu, kdy na základě analýzy digitálního obrazu lze stanovit charakteristiky vzduchových pórů v materiálu [114]. Tyto metody jsou součástí norem [115] nebo [116]. Do této kapitoly by bylo možné zařadit také metody *CT* (kapitola 3.1.3.5) a *RMI* (kapitola 3.1.3.6), neboť se v podstatě také jedná o analýzu obrazu, ale těmto metodám byla kvůli jejich odlišnému principu věnována samostatná kapitola.

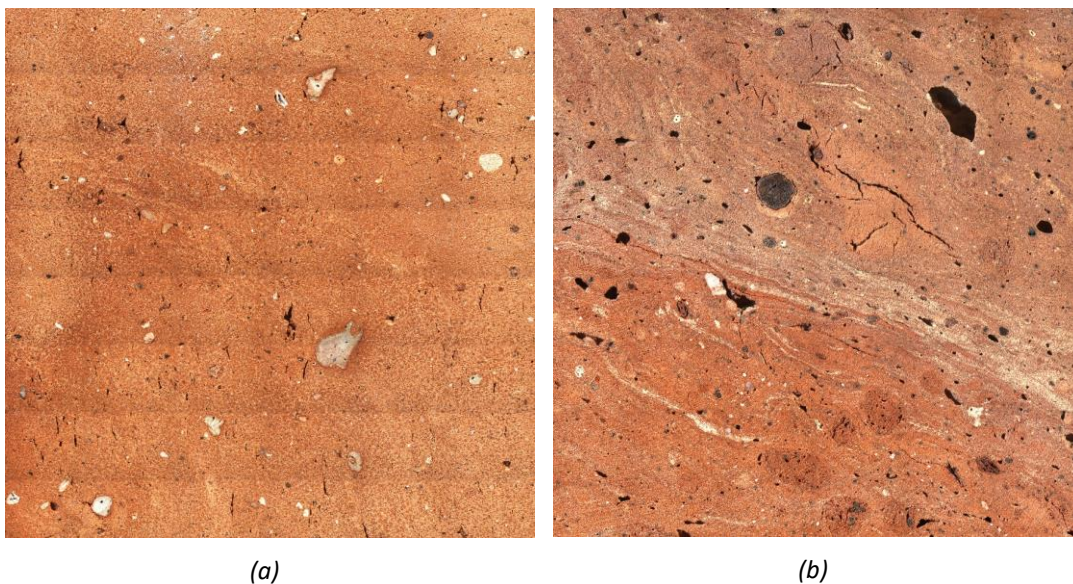
Zkušební vzorek je před pořízením snímku nutné zabrousit a vyleštit, aby se vytvořil hladký a rovný povrch. Snímek lze pořídit například optickým či elektronovým mikroskopem [115]. Vyskytují se však i teorie, že z důvodů zjednodušení zkoušky, je dostatečné použít kvalitní fotoaparát [117]. Typu zvolené metody odpovídá rozlišení pořízeného snímku, a tedy i nejmenší velikost póru, které jsme schopni analyzovat.

Využitelnost metody analýzy digitálního obrazu byla ověřena také v rámci zahraniční stáže autora této práce na Technické univerzitě Świątokrzyska v obci Kielce, pomocí mikroskopu s označením Nikon SMZ1500 (Obr. 14).



Obr. 14. Mikroskop Nikon SMZ1500.

Byly pořízeny snímky vzorků, které byly testovány také v rámci CT (kapitola 3.1.3.4) nebo AE (kapitola 3.1.3.5). Jako příklad vzorku s předpokladem vyšší trvanlivosti lze opět uvést vzorek s označením 1.1 (Obr. 15(a)), neboť vzorek neobsahuje defekty ve vnitřní struktuře. Naopak jako příklad vzorku s předpokladem nižší trvanlivosti lze uvést vzorek s označením 10.1 (Obr. 15(b)), kde se vyskytují trhliny, které mohou snižovat jeho trvanlivost. Pomocí analýzy obrazu byly tedy dosaženy obdobné výsledky jako v případě metod CT a AE.



Obr. 15. Analýza pórů v materiálu rozborem (digitálního) obrazu; (a) prvek (č. 1.1) s předpokladem dobré trvanlivosti – bez výraznějších vad ve vnitřní struktuře; (b) Prvek (č. 10.1) s předpokladem nižší trvanlivosti – prvek obsahuje trhliny, dutiny.

Vyhodnocení snímků v dnešní době probíhá zpravidla manuálně. Přes snímek se vedou pomyslné přímky rovnoběžně s původním horním povrchem vzorku. Zaznamenává se počet protnutých pórů a také délky jednotlivých tětív (délka, kde přímky protínají póry). Pro kontrolu správnosti měření je také nutné zaznamenat délky pevné části povrchu mezi póry zkoušeného vzorku [115].

V dnešní době se však nabízí možnost využít např. strojového učení nebo neuronové sítě pro automatizaci analýzy snímků. Tato problematika je popsána například v [118], [119] nebo [120]. Tento přístup výrazně zjednoduší, ale také zautomatizuje vyhodnocování této metody a odbourává individuální přístup zpracovatele výsledků.

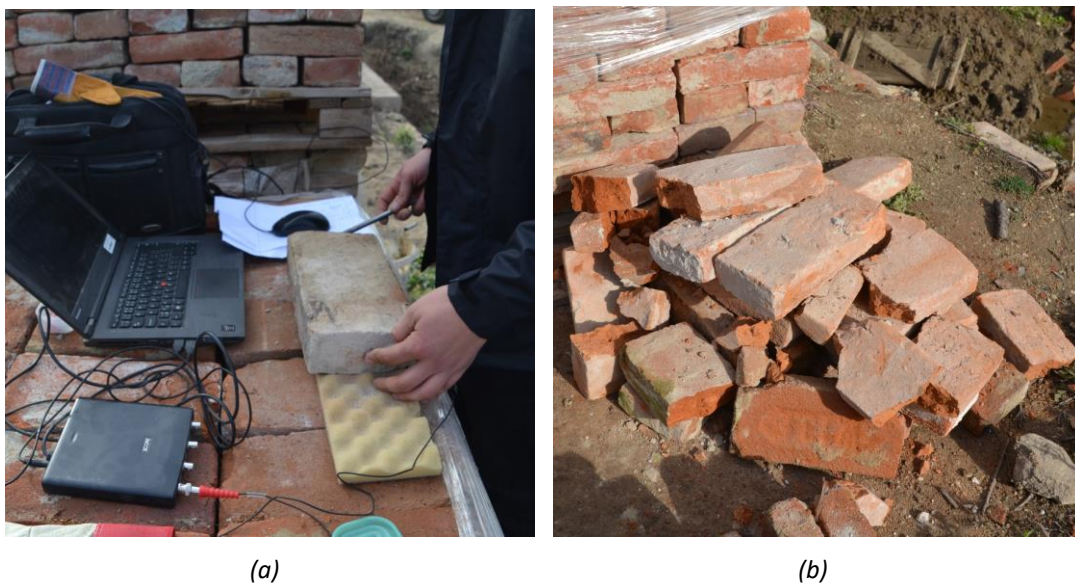
#### **3.1.4.4 Analýza pórů v materiálu pomocí termoporozimetrie (TMP)**

Termoporozimetrie (TMP) je kalorimetrická metoda, která umožňuje na základě poklesu bodu tání nebo krystalizace kapaliny stanovit velikost a distribuci pórů v materiálu [121]. Hlavní nevýhodou této metody je skutečnost, že specifické interakce mezi kapalinou a porézním materiálem nejsou zcela známé. Metoda není tak rozšířená jako například MIP (kapitola 3.1.4.1), což může způsobit nejistotu při interpretaci kalorimetrických signálů. Aby bylo možné použít tuto metodu k určení distribuce velikosti pórů, je zapotřebí znát teplotní závislost fyzikálních parametrů, jako je povrchové napětí, kontaktní úhel, teplo tání a další. Proto se autoři v experimentálních pracích často uchylují k použití referenčních materiálů ke kalibraci a stanovení velikosti pórů, které byly měřeny jinými metodami, jako je MIP [122], [123], [124], [125].

## 4. Zvolená metodika výzkumu

Pro nalezení vhodných metod a postupů k dosažení cílů této práce byla klíčová rovnováha mezi složitostí metod a přesností výsledků. Zvláštní důraz je kladen na praktickou aplikovatelnost výsledků, aby mohlo dojít k reálnému zlepšení rekonstrukcí cihelných památek. Z tohoto důvodu se nabízí využití nedestruktivních metod. Tyto metody jsou cenově relativně dostupné a nevyžadují laboratorní podmínky. Mezi nejvhodnější metody patří elektro-akustické techniky, jako je metoda *IE* (rezonanční metoda) nebo ultrazvuková metoda, které jsou velmi citlivé na defekty ve vnitřní struktuře.

V letech 2019 až 2020 se naskytla jedinečná příležitost ověřit využitelnost těchto metod při rekonstrukci unikátního barokního mostu z 17. století v obci Sedlec u Mikulova. Jednalo se o mezinárodní projekt "Projekt Mikulov, Portz Insel – zpřístupnění a obnova komponované historické krajiny“, realizovaný městem Mikulov ve spolupráci s obcemi Sedlec a Drasenhofen v Rakousku [25].



Obr. 16. Třídění cihel pro znovuvyužití barokního mostu v obci Sedlec u Mikulov; (a) měření in-situ pomocí metody impact-echo; (b) vyřazené cihly nevhodné pro znovuvyužití [126].

Výsledky nedestruktivních zkoušek bylo samozřejmě nutné verifikovat pomocí konvenčních, zpravidla destruktivních, zkoušek. Na trvanlivost je v této práci nahlíženo především jako na odolnost materiálu proti cyklickému zmrazování a rozmrazování. Z tohoto důvodu byl jako stěžejní (destruktivní) test zvolena zkouška mrazuvzdornosti podle ČSN EN 72 2609. Kromě zkoušky mrazuvzdornosti byly sledovány mechanické vlastnosti materiálu, jako je pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu. Tyto vlastnosti poskytují důležité informace

o chování materiálu a jsou nezbytné pro hodnocení schopnosti materiálu odolávat klimatickým vlivům. Porovnáním výsledků z nedestruktivních a destruktivních zkoušek lze lépe porozumět celkové trvanlivosti zkoumaného materiálu a lépe predikovat trvanlivost pro jeho znovupoužití v rekonstrukčních projektech cihelných památek.

## 4.1 Stanovení materiálových charakteristik

Před provedením jakýchkoli nedestruktivních nebo destruktivních měření je klíčové nejprve stanovit základní materiálové vlastnosti. Tyto vlastnosti poskytují důležité informace o materiálu a umožňují lepší porozumění jeho chování. Přehled nejčastěji stanovených vlastností je uveden níže.

### 4.1.1 Vlhkostní stavy

Pro správnou interpretaci výsledků nedestruktivních i destruktivních zkoušek je nezbytné znát a zároveň správně definovat vlhkostní stav zkušební vzorku. V zásadě lze vlhkostní stav cihel rozdělit do čtyř kategorií, a to [25]:

- **Stav přirozené vlhkosti** – jedná se o vlhkostní stav, ve kterém se prvky nacházejí v konkrétním prostředí (v konstrukci, na skládce atd.). Ve stavu přirozené vlhkosti se zpravidla neprovádějí testy, neboť hodnoty přirozené vlhkosti se mohou výrazně lišit, a to vlivem vzdušné vlhkosti, teploty, způsobu uložení nebo i hodnotou nasákavosti cihly. Výsledky stanovené ve stavu přirozené vlhkosti by pak byly těžko vyhodnotitelné a srovnatelné.
- **Vysušený stav** – jedná se o stav, kdy jsou vzorky při teplotě  $105 \pm 5$  °C vysušeny do ustálené hmotnosti. Ustálená hmotnost je stav, kdy úbytek hmotnosti, měřený minimálně po 24 hodinách, je menší než 0,2 % celkové hmotnosti prvku. Detailní postup je definován v ČSN EN 772-21 [127]. Ve vysušeném stavu jsou často stanovovány mechanické vlastnosti, jako je pevnost v tlaku nebo tahu za ohybu. Jedná se také o nezbytnou hodnotu pro stanovení nasákavosti materiálu.
- **Nasycený stav za atmosférického tlaku** – jedná se o stav s maximálně dosažitelnou vlhkostí za daných podmínek. Zkušební postup vychází z ČSN EN 772-21 [127]. Vzorky se ponechají ponořené ve vodě po dobu  $24 \pm 0,5$  hodiny, následně se vyjmou z nádoby a povrchová voda se odstraní pomocí vlhké textilie.

- **Nasycený stav varem** – Jedná se o stav s maximálně dosažitelnou vlhkostí za daných podmínek. Tento stav je zaveden zejména pro zkoušku mrazuvzdornosti dle ČSN 72 2609 [9], kde je také definován postup jeho stanovení. Cihly jsou umístěny do nádoby s destilovanou nebo pitnou vodou tak, aby nedocházelo k jejich vzájemnému dotýkání a byly ponořeny v celém svém objemu. Poté vodu přivedeme k varu a udržujeme var alespoň po dobu dalších 4 hodin. Po ukončení varu se vzorky kvůli ochlazení nechají ve vodě na dalších 16 až 24 hodin.

#### 4.1.1.1 Stanovení nasákavosti a vlhkosti vzorků

Nasákavost je schopnost materiálu absorbovat maximálně možné množství vody. Jedná se v podstatě o maximálně dosažitelnou vlhkost. V praxi se nasákavost a vlhkost zpravidla stanoví hmotnostně (lze i objemově). Nasákavost lze stanovit dle ČSN EN 772-21:

$$w_s = \frac{m_s - m_d}{m_d} \times 100 \quad (5)$$

Kde:  $w_s$  je hmotnostní nasákavost v %,  
 $m_s$  je hmotnost prvku v nasyceném stavu za atmosférického tlaku v g,  
 $m_d$  je hmotnost prvku ve vysušeném stavu (do ustálené hmotnosti) v g.

Stejný výpočetní vztah lze použít i při vyhodnocení nasákavosti dle ČSN EN 772-7, s tím rozdílem, že v tomto případě jsou vzorky nasyceny varem.



(a)

(b)

Obr. 17. Sycení vzorků vodou; (a) sycení cihel za atmosférického tlaku dle ČSN EN 772-21; (b) sycení cihel varem dle ČSN EN 772-7.

Vlhkost vzorku vyjadřuje aktuální množství vody (volné i fyzikálně vázané) v prvku. Jelikož nasákavost představuje maximálně dosažitelnou vlhkost, určuje se i vlhkost z obdobného vztahu:

$$w_r = \frac{m_r - m_d}{m_d} \times 100 \quad (6)$$

Kde:  $w_r$  je hmotnostní vlhkost vzorku v %,  
 $m_r$  je hmotnost prvku ve stavu přirozené vlhkosti v g,  
 $m_d$  je hmotnost prvku ve vysušeném stavu (do ustálené hmotnosti) v g.

#### 4.1.2 Stanovení objemové hmotnosti

Objemová hmotnost je hmotnost jednotkového objemu vzorku včetně dutin a pórů. Objemová hmotnost  $\rho_{g,u}$  cihel plných pálených se stanovuje podle ČSN EN 772-13 [128]. Celé zkušební vzorky jsou vysušeny do ustálené hmotnosti v sušárně s nucenou výměnou vzduchu při 105 °C. Objem vzorků stanovíme ze změřených rozměrů dle ČSN EN 772-16. Hmotnost vzorků lze stanovit zvážením na váze s dostatečnou přesností.



(a)



(b)

Obr. 18. Postup pro stanovení objemové hmotnosti  $\rho_{g,u}$ : (a) vysušení vzorků do ustálené hmotnosti při teplotě 105 °C; (b) stanovení hmotnosti vysušeného vzorku  $m_{dry,u}$ .

Po stanovení objemu zkušební vzorku a jeho hmotnosti ve vysušeném stavu lze objemovou hmotnost dle [128] stanovit podle vztahu:

$$\rho_{g,u} = \frac{m_{dry,u}}{V_{g,u}} \quad (7)$$

Kde:  $\rho_{g,u}$  je objemová hmotnost za sucha v  $\text{kg/m}^3$ ,  
 $m_{dry,u}$  je hmotnost zdícího prvku vysušeného do ustálené hmotnosti kg,  
 $V_{g,u}$  průměrný objem prvku v  $\text{m}^3$  [128].

## 4.2 Využívané postupy – Nedestruktivní metody

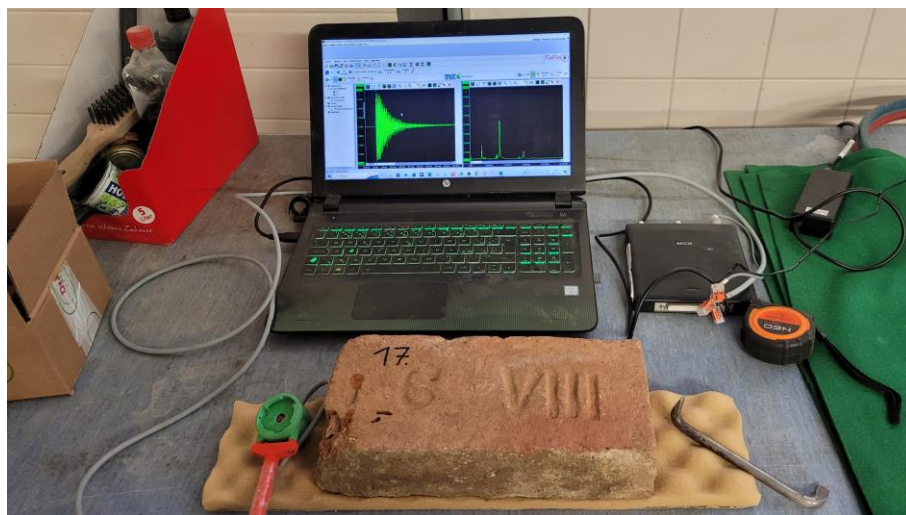
Jak již bylo zmíněno, v případě odhadu trvanlivosti historických cihel plných pálených nelze spoléhat na konvenční zkoušky. Důvodem je velká variabilita tohoto materiálu, a to i v případě, že jsou cihly získány z jediného zbouraného objektu. Je tedy potřeba provést větší počet zkoušek a vzorky nesmí být porušené, aby mohly být následně zabudovány do konstrukce památek. Nedestruktivní metody jsou tedy jedinou správnou volbou. Moderní elektroakustické metody byly vybrány jako nejvhodnější, jelikož se v minulosti osvědčily jako velmi užitečné pro podobné účely.

### 4.2.1 Metoda impakt – echo (rezonanční metoda)

Využití metody impact-echo (*IE*) se pro nedestruktivní predikci trvanlivosti historických cihel pro jejich znovuvyužití přímo nabízí, neboť v minulosti byla tato metoda poměrně úspěšně využívána pro obdobné účely zejména na betonových prvcích nebo konstrukcích. Autoři v těchto pracích často trvanlivost materiálu posuzují na základě hodnot prvních vlastních frekvencí (dominantních „peaků“) [129], [130], [131]. Ovšem v minulosti se objevily i práce, které hodnotí vlastnosti materiálu na základě komplexní analýzy spektra frekvencí pomocí strojového učení [132].

Rozvoj měřicí a výpočetní techniky, ale také rozvoj strojového učení a neuronových sítí, nám nabízí zcela nové možnosti vyhodnocení výsledků získaných touto metodou.

Pro měření metodou *IE* byl využit osciloskop HS3-AWG-5 s rozlišením 16 bitů a s maximální frekvencí sběrnice 195 kHz při daném rozlišení. Tento osciloskop lze připojit pomocí *USB* do výpočetní jednotky, v tomto případě notebooku (Obr. 19).

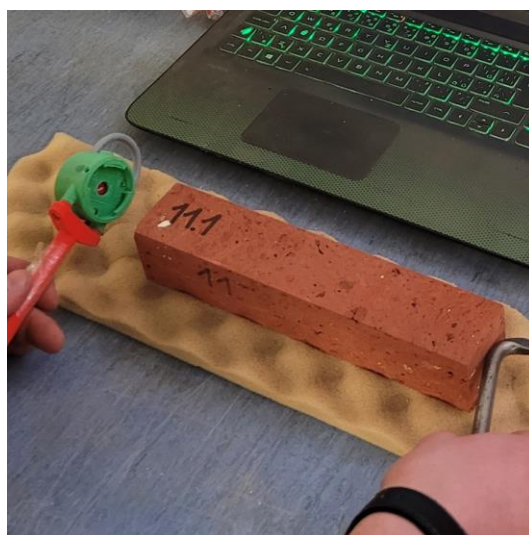


Obr. 19. Měřící soustava IE: digitální osciloskop, mikrofon a vyhodnocovací jednotka (notebook).

Pro vyvolání impulsu (budič) bylo využito sférického kladívka. Odezva byla snímána pomocí mechanicko-elektrického převodníku, a to v podobě kontaktně připevněného piezoelektrického snímače zrychlení (Obr. 20(a)), ale také pomocí mikrofonu (Obr. 20(b)).



(a)



(b)

Obr. 20. Mechanicko-elektrické převodníky pro snímání odezvy; (a) piezometrický snímač; (b) mikrofon s frekvenčním rozsah  $100 \text{ Hz} \div 10 \text{ kHz}$ .

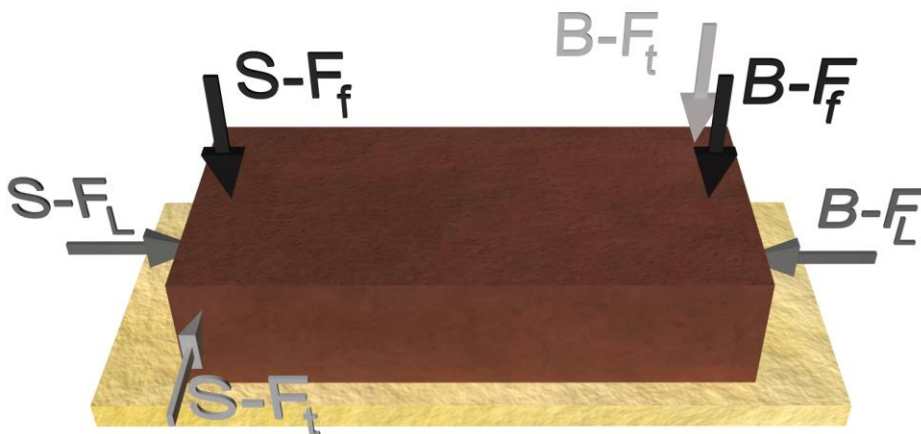
Použitý mikrofon měl dle výrobce frekvenční rozsah od 100 Hz do 10 kHz. Jedná se o cenově dostupné řešení, ale zároveň pro cihly plně pálené s dostatečným rozsahem. Hlavní výhodou použití mikrofonu je jeho bezkontaktní charakter, což je nápomocné především v případě, že měření probíhá například v nasyceném stavu a je problematické připevnit piezoelektrický

snímač. Naopak jeho nevýhodou je nutnost tichého prostředí a jeho využití in-situ je tak téměř vyloučeno.

Hlavním rozdílem mezi piezoelektrickým snímačem a mikrofonem je rozsah frekvenčního spektra. Mikrofon je schopen zaznamenat pouze frekvence ve slyšitelném spektru, zatímco piezoelektrický snímač zaznamenává signály vyšších frekvencí slyšitelného pásma a nižší část ultrazvukového pásma [25].

Ve zkušebním vzorku lze vyvolat nespočet druhů kmitání. V této práci byly však měřeny zejména tři typy kmitání, obdobně jak je uvedeno v ČSN 73 1372. Jedná se o podélné kmitání –  $f_L$ , kroutivé kmitání –  $f_t$ , a příčné kmitání –  $f_f$ . Rozmístění budičů a snímačů pro jednotlivé typy kmitání je znázorněn na Obr. 21.

Pro každý typ kmitání existují místa kmíten a uzlů. V místech kmíten je amplituda kmitání největší, a z tohoto důvodu zde umísťujeme budič (úder sférického kladívka) a snímač (piezoelektrický senzor / mikrofon). Naopak v místě uzlů ke kmitání nedochází a vzorek je zde proto podložen. Pokud by došlo k podložení vzorku v jiném místě (mimo uzel), může nastat nežádoucí útlum konkrétního kmitání. Tomu lze také předejít umístěním vzorku na měkkou podložku, kde nedochází k tlumení žádného kmitání.



Obr. 21. Rozmístění snímačů (S) a budičů (B) pro jednotlivé typy kmitání (podélné kmitání –  $f_L$ , kroutivé kmitání –  $f_t$ , a příčné kmitání –  $f_f$ ).

Podle normy ČSN 73 1372 lze stanovit dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku  $E_{crL}$  z první vlastní frekvence podélného kmitání ( $f_L$ ) a  $E_{crf}$  z první vlastní frekvence příčného kmitání ( $f_f$ ). Dále také lze stanovit dynamický modul pružnosti ve smyku  $G_{cr}$  z první vlastní frekvence kroutivého kmitání ( $f_t$ ) a Poissonův koeficient  $\nu_{cr}$ , který byl z těchto materiálových charakteristik použit jako jediný při predikci trvanlivosti zděných prvků [60]:

$$v_{cr} = \frac{1}{2} \times \left( \frac{1}{k} \times \frac{f_L^2}{f_t^2} - 2 \right) \quad (8)$$

Kde:  $v_{cr}$  je hodnota dynamického Poissonova koeficientu,  
 $k$  je součinitel charakterizující tvar příčného řezu zkušební tělesa a vyjadřující poměr polárního momentu setrvačnosti průřezu k modulu tuhosti v kroucení,  
 $f_L, f_t$  jsou hodnoty prvních vlastních frekvencí podélného a krouživého kmitání.

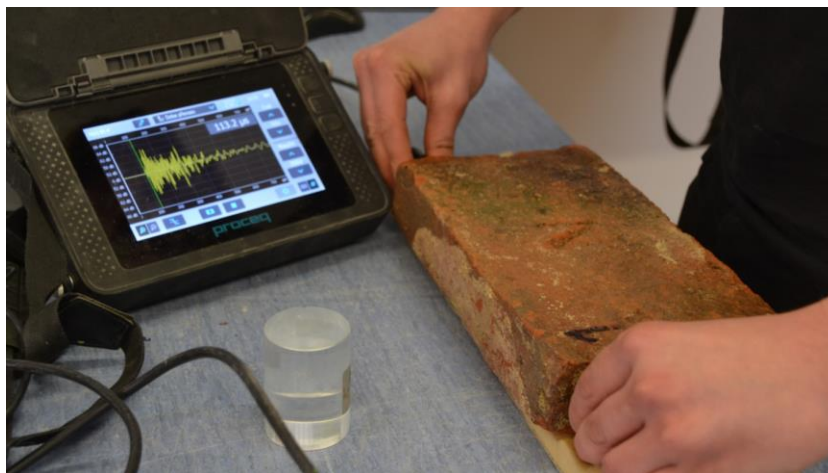
Ke sledování rozvoje vad ve vnitřní struktuře prvků vlivem cyklického zmrazování a rozmrazování lze lépe využít tzv. relativní dynamické moduly pružnosti (*RDM*). Jedná se o zjednodušený výpočet dynamických modulů pružnosti, což je možné z důvodu, že délka ani objemová hmotnost vzorků se během zkoušky mrazuvzdornosti nemění. *RDM* lze po tomto zjednodušení stanovit dle vztahu [65]:

$$RDM_n = \left( \frac{f_n}{f_0} \right)^2 \times 100 \quad (9)$$

Kde:  $RDM_n$  je relativní dynamický modul pružnosti v %,  
 $f_n$  je první vlastní frekvence zkušební tělesa měřená po  $n$  zmrazovacích a rozmrazovacích cyklech v Hz,  
 $f_0$  je počáteční první vlastní frekvence zkušební tělesa v Hz,  
 $n$  je počet zmrazovacích/rozmrazovacích cyklů [65].

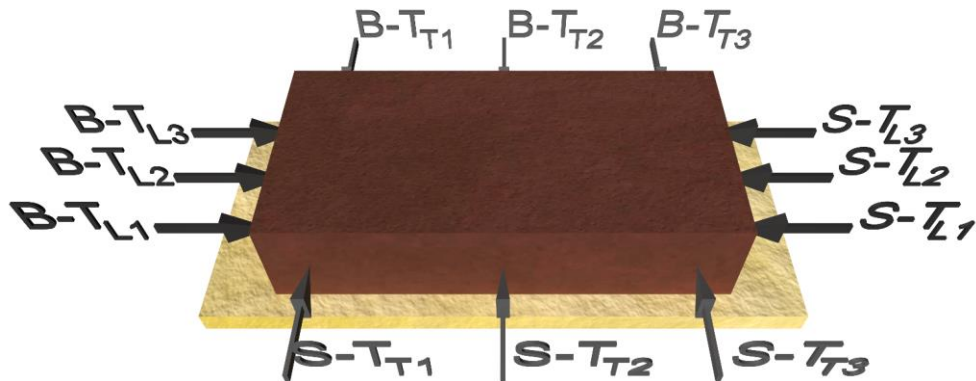
#### 4.2.2 Ultrazvuková impulsní metoda

Obdobně jako s pomocí metody *IE*, tak i pomocí ultrazvukové metody lze identifikovat vady ve vnitřní struktuře, které mohou významně ovlivnit trvanlivost cihel. Pro účely této práce byl využit ultrazvukový přístroj Pundit PL – 200 od firmy Proceq (Obr. 22).



Obr. 22. Ultrazvuková metoda (ultrasonic pulse velocity) - měření pomocí přístroj Pundit PL -200 [25].

Byla tedy využívána průchodová metoda a přímé prozvučování. Prozvučování na celých zdicích prvcích probíhalo ve třech liniích v podélném směru a rovněž ve třech liniích v příčném směru cihly (Obr. 24). Ze tří hodnot pro podélný a příčný směr byl následně stanoven aritmetický průměr. Tento způsob prozvučování byl zvolen pro zachycení všech možných defektů či nehomogenit ve vnitřní struktuře vzorků.



Obr. 23. Ultrazvuková metoda (ultrasonic pulse velocity) - schéma měření dob průchodu ultrazvukových vln. S-snímač, B-budič, index L-měření v podélném směru, index T-měření v příčném směru.

Výše popsaným postupem byly stanoveny doby průchodu ultrazvukových vln. Následně byly doby průchodu přepočteny na rychlosti šíření ultrazvukových vln. V případě rychlosti je totiž zahrnuta délka základny a výsledky na jednotlivých vzorcích jsou tak lépe porovnatelné. Rychlost šíření ultrazvukových vln byla stanovena dle ČSN 73 1371 [133]:

$$v_L = \frac{L}{T} \quad (10)$$

Kde:  $v_L$  je rychlost šíření UZ impulsu v km/s,  
 $L$  je délka měřící základny v mm,  
 $T$  je doba průchodu ultrazvukových vln v  $\mu$ s.

Obdobně jako u metody IE, i v tomto případě lze stanovit dynamický modul pružnosti  $E_{cu}$ . I zde lze, za předpokladu neměnných materiálových a geometrických vlastností vzorků během měření, výpočet zjednodušit a využít relativní dynamické moduly pružnosti (RDM) [65]:

$$RDM_n = \left( \frac{t_{s,0}}{t_{s,n}} \right)^2 \times 100 \quad (11)$$

Kde:  $RDM_n$  je relativní dynamický modul pružnosti v %,  
 $t_{s,0}$  je počáteční doba průchodu ultrazvukových vln v  $\mu\text{s}$ ,  
 $t_{s,n}$  je doba průchodu ultrazvukových impulsů po  $n$  zmrazovacích a rozmrazovacích cyklech v  $\mu\text{s}$ ,  
 $n$  je počet zmrazovacích/rozmrazovacích cyklů.

#### 4.2.3 Stanovení pevnosti v tlaku zdicích prvků (in-situ)

Pro stanovení pevnosti zdicích prvků zabudovaných v konstrukci máme celou řadu možností. Z konstrukce mohou být odebrány celé zdicí prvky, u kterých je následně stanovena pevnost v tlaku v lisu. Odběr celých zdicích prvků je však často velmi problematický. Jedná se také o velký zásah do konstrukce a není proto možné provést větší počet měření. Tento problém lze částečně odstranit pomocí odběrů pouze reprezentativních částí zdicích prvků, v praxi nejčastěji pomocí jádrových vývrtů.

V současné době pevnost v tlaku zdicích prvků stanovíme pomocí tvrdoměrných metod, konkrétně pomocí odrazového kladívka. Tvrdoměrné metody jsou součástí celé řady norem a předpisů [134], [135], [136] nebo [137]. Jedná se o normy zabývající se testováním betonových konstrukcí. Tyto principy jsou však aplikovatelné i na jiné materiály, jako jsou i cihly plné pálené [138].

Pro stanovení pevnosti zdicích prvků v tlaku byl vytvořen tvrdoměr Schmidt LB (Obr. 24), což je upravený Schmidt L pro testování betonových konstrukcí. Klíčovým rozdílem je kulatější koncovka razníku (s větším poloměrem kulové plochy) [25].



Obr. 24. Stanovení pevnosti v tlaku pomocí tvrdoměrné metody Schmidt LB na cihelném pilíři.

Před samotným měřením je důležité důkladně zbrusit povrch cihel. Obvykle se provádí deset měření, z nichž musí být minimálně sedm platných. Platná měření jsou taková, jejichž pevnost v tlaku, stanovená podle odpovídajících kalibračních vztahů, není od aritmetického

průměru vzdálená o více než 20 %. Vzorky, které tuto podmínku nesplňují, se vyřadí, a poté se vypočítá nový aritmetický průměr. Postup měření a zejména vyhodnocování se liší podle jednotlivých norem. Zde byl uveden příklad zkušební postupu podle ČSN 73 1373. [137]. V případě normy ČSN EN 12504-2 [134] je výsledkem medián hodnot odrazů, přičemž více než 20 % měření se nesmí od mediánu lišit o více než 25 %.

Ve výše uvedených normách jsou kalibrační vztahy specifikovány pouze pro beton. Pro cihly bylo vytvořeno několik různých kalibračních vztahů, v závislosti na institucích, které se touto problematikou zabývaly, jako například USZK FAST [25].

Metoda není příliš vhodná pro predikci trvanlivosti zdicích prvků. Důvodů je hned několik. Zachování autenticity cihelného zdiva při použití této metody je problematické. Zabroušením povrchu, které je nezbytné pro provedení zkoušky, totiž dochází ke změně vzhledu cihel. Dalším důvodem je náročnost takové predikce trvanlivosti, neboť zkušební vzorek musí být během zkoušky zatížen v lisu na 10 % předpokládané pevnosti v tlaku, tak aby nedocházelo k útlumu energie úderu. Dalším důvodem je opotřebování tvrdoměru, tím pádem i nutné ověřování jeho funkce (předepsáno po 2000 úderech) [25]. I přes tyto problémy pro hodnocení trvanlivosti či degradace materiálu se najde řada autorů, kteří tvrdoměrné metody pro tyto účely v minulosti využili, z části se jejich práce zabývá i prvky zabudovanými v konstrukci [139], [140] nebo [141].

V této práci byla metoda využívána v rámci doplňkového výzkumu zaměřeného na mechanické vlastnosti cihelného zdiva.

### **4.3 Využívané postupy– destruktivní metody**

I přes zaměření této práce na nedestruktivní predikci trvanlivosti pálených cihel je zřejmé, že zahrnutí destruktivních zkoušek je rovněž nezbytné. Účinnost a spolehlivost nedestruktivních zkoušek byla ověřena právě prostřednictvím těchto destruktivních testů. Mezi ty nejdůležitější patří zkouška mrazuvzdornosti dle ČSN 72 2609 [9], protože trvanlivost materiálu je úzce spojena s jeho schopností odolávat cyklickému zmrazování a rozmrazování. Pevnost v tlaku a tahu za ohybu pak přináší další důležité informace, které jsou klíčové pro celkové hodnocení trvanlivosti ale i dalších vlastností materiálu.

#### 4.3.1 Zkouška mrazuvzdornosti

Zkouška mrazuvzdornosti je pravděpodobně nejlepší ukazatel trvanlivosti materiálu. Přístup k této zkoušce je ve světových normách odlišný, ale princip zde zůstává stejný. Problematika přeměny vody na led a její důsledky jsou popsány v kapitole 3.1.2.

Princip této zkoušky spočívá v cyklickém zmrazování a rozmrazování vzorků a posouzení vzniklých změn, které na vzorcích nastaly. Počet zmrazovacích cyklů se volí na základě agresivity prostředí, pro které mají být zdící prvky použity [142], [9]:

- F0 (neagresivní prostředí) – 0 zmrazovacích cyklů,
- F1 (mírně agresivní prostředí) – 15 (25) zmrazovacích cyklů,
- F2 (silně agresivní prostředí) – 50 zmrazovacích cyklů.

Podle standardního postupu uvedeného v ČSN 72 2609 je nutné zkoušet minimálně 5 zkušebních vzorků. Ty jsou nejprve vysušeny do ustálené hmotnosti a následně zcela nasyceny varem (podrobný postup uveden v kapitole 4.1.1). Nasáknuté vzorky jsou po jejich zchladnutí povrchově osušeny a vloženy do prostoru o teplotě  $-20\text{ °C}$  ( $\pm 3\text{ °C}$ ). Vzorky jsou zmrazovány po dobu 16 hodin a následně po dobu minimálně 2 hodin rozmrazovány ve vodě o teplotě  $+15\text{ °C}$  až  $+30\text{ °C}$ . Jeden zmrazovací cyklus tak trvá minimálně 18 hodin. Ke zkoušce byla využita automatická zmrazovací skříň KD 20 (Obr. 25).



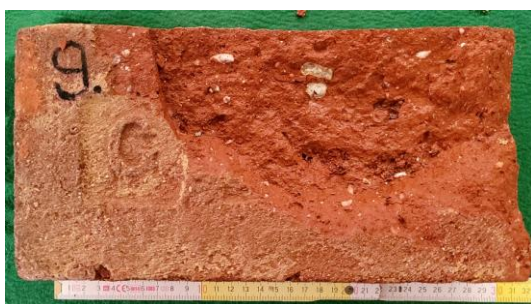
Obr. 25. Zkouška mrazuvzdornosti dle ČSN 72 2609 - reprezentativní vzorky uložené v automatické zmrazovací skříni KD 20.

Vždy po pěti zmrazovacích cyklech se zaznamenají změny vzhledu. Je také vhodné vzorky zvážit kvůli sledování úbytku hmotnosti vlivem tzv. odštěpků. Vzorky se po dosaženém požadovaném počtu zmrazovacích cyklů opět překontrolují a stanoví se pevnost v tlaku dle ČSN EN 772-1+A1 [4]. Jedno z kritérií mrazuvzdornosti dle ČSN 72 2609 [9] je pokles pevnosti v tlaku do 15 % od deklarované pevnosti. Toto kritérium je však u historických cihel téměř nepoužitelné, neboť neznáme deklarovanou pevnost. Jedinou možností zůstává rozdělit zkušební soubor na referenční (srovnávací) a zmrazovaný a následně stanovit pokles pevnosti po cyklickém zmrazování a rozmrazování. Avšak je to náročná až nemožná disciplína, neboť nalézt dvě cihly, natož celý soubor historických cihel s téměř identickými vlastnostmi, je prakticky nemožné. Kritéria mrazuvzdornosti se posoudí na základě Tab. 3.

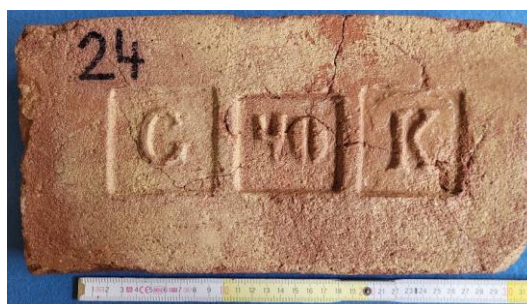
Tab. 3. Kritéria mrazuvzdornosti dle ČSN 72 2609 [9].

zdicí prvky	pro chráněné konstrukce	pro nechráněné konstrukce
mrazuvzdorné	vzorek po zkoušce mrazuvzdornosti nevykazuje změnu oproti původnímu stavu nebo vykáže pouze změny nepodstatné (odštěpky do hloubky max 5 mm, trhlinky) a průměrná hodnota pevnosti neklesne o více než 15 % oproti deklarované pevnosti	na žádném vzorku se po zkoušce mrazuvzdornosti neprojeví viditelné změny vůči původnímu stavu a průměrná hodnota pevnosti neklesne o více než 15 % oproti deklarované pevnosti
nemrazuvzdorné	nejsou splněny všechny podmínky mrazuvzdornosti (za podstatné změny považujeme praskliny, odlomení rohů, rozpůlení, vrstevnatý rozpad a další typy porušení, které ohrožují funkčnost zdicích prvků)	

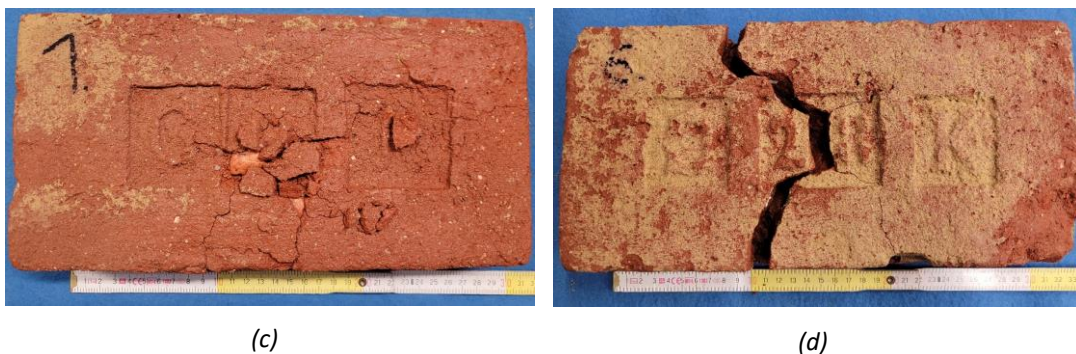
V důsledku zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů mohou na povrchu cihel vznikat trhliny, odštěpky či jiné typy porušení. Příklady možného porušení vzorků cyklickým zmrazováním a rozmrazováním jsou znázorněny na Obr. 26.



(a)



(b)



Obr. 26. Defekty způsobené cyklickým zmrazováním a rozmrazováním; (a) masivní „odštěpek“; (b) vznik trhlin; (c) vznik trhlin a „odštěpků“ způsobené přítomností cívárů; (d) prasklina přes celou šířku i výšku vzorku.

#### 4.3.2 Stanovení pevnosti v tahu za ohybu

Pevnost v tahu za ohybu je maximální napětí při porušení vzorku způsobené ohybovým momentem. Pevnost v tahu za ohybu je pro posouzení trvanlivosti výhodná, neboť vliv mikrotrhlin vzniklých cyklickým zmrazováním je výraznější než u zkoušky pevnosti v tlaku.

Postup pro stanovení pevnosti v tahu za ohybu vychází z ČSN 72 2605 [8]. Zkušební vzorek (buď celá cihla nebo reprezentativní část) se vloží do lisu. Vzorek je podepřen dvěma kyvnými podpěrami (ve vzdálenosti  $l$ ) a zatěžován jedinou silou  $F$  ve vzdálenosti  $l/2$ . Jedná se tedy o zkoušku tříbodovým ohybem (Obr. 27).



Obr. 27. Stanovení pevnosti v tahu za ohybu dle ČSN 72 2605.

Po porušení vzorku se zaznamená hodnota síly  $F$  při porušení a stanoví se šířka  $w$  a výška  $h$  v místě lomu. Pevnost v tahu za ohybu se stanoví jako poměr ohybového momentu k průřezovému modulu [8]:

$$\sigma_{po} = \frac{M}{W} = \frac{3}{2} \times \frac{F \times l}{w \times h^2} \quad (12)$$

Kde:  $F$  je síla potřebná k porušení vzorku v N,

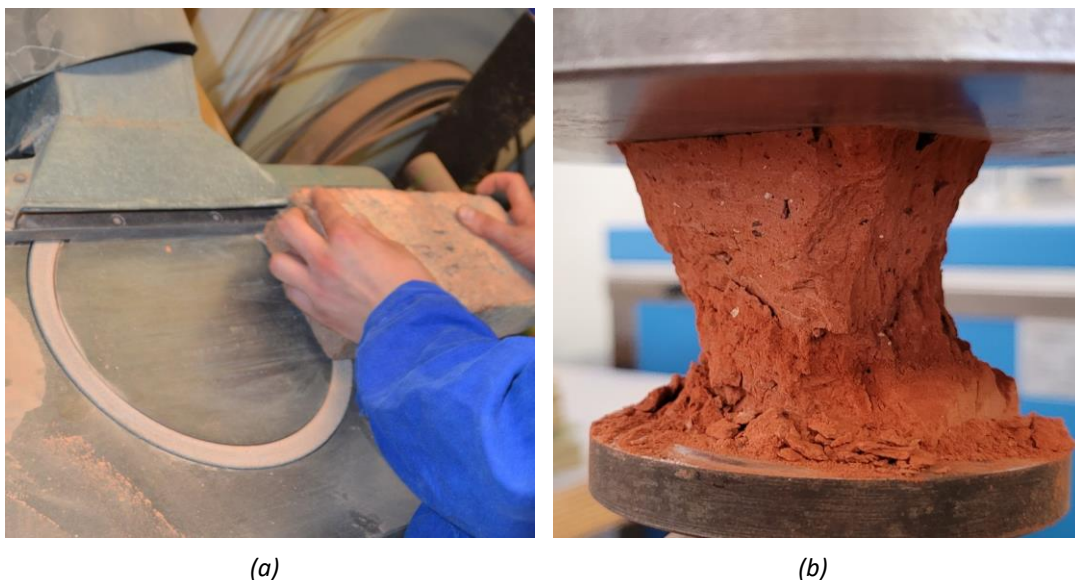
- $l$  je osová vzdálenost podpěr v mm,
- $w_u$  je šířka vzorku v mm,
- $h_u$  je výška vzorku v místě zlomu v mm,
- $\sigma_{po}$  je pevnost v tahu za ohybu v MPa.

Po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu lze na částech vzorku, které vznikly, určit pevnost v tlaku. To je možné za předpokladu, že při porušení vzorku vznikne přibližně kolmá a pravidelná lomová plocha a obě části vzorku zůstanou nepoškozené [25].

#### 4.3.3 Stanovení pevnosti v tlaku zdicích prvků

Pro účely této práce byla pevnost v tlaku stanovena destruktivně zpravidla na celých zdicích prvcích, případně reprezentativních vzorcích. Tyto reprezentativní vzorky byly buď poloviny cihel (po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu), anebo krychle o hraně 50 mm.

Průběh zkoušky vychází z ČSN EN 772-1+A1 [4]. Před zahájením zkoušky je nejprve nutné ošetřit tlačné plochy, k čemuž lze využít vícero přístupů. Vzorky je možné zabrousit, aby splňovaly podmínky rovinnosti a rovnoběžnosti (Obr. 28(a)) nebo je možné nerovnosti vyrovnat vrstvou malty. Alternativním způsobem, využitým rovněž v této práci, je použití vrstvy z měkkého materiálu, který eliminuje vliv nerovností (např. arbiton). Vzorek s upravenou ložnou plochou se vloží dostředně na tlačnou desku lisu tak, aby zatížení působilo rovnoměrně po celé jeho ploše (Obr. 28 (b)).



Obr. 28. Stanovení pevnosti v tlaku dle ČSN EN 772-1+A1; (a) úprava ložné plochy – zabroušením povrchu; (b) krychle o hraně 50 mm po dosažení maximální síly v tlaku.

Rychlost zatěžování prvku se volí na základě předpokládané pevnosti v tlaku. Rychlost zatěžování byla volena buď 0,05 MPa/s (pro předpokládané pevnosti <10 MPa) nebo 0,15 MPa/s (pro předpokládané pevnosti v tlaku vzorků 11 MPa až 20 MPa) [4].

Takto získáme maximální sílu při porušení vzorků. Pevnost v tlaku  $f_{b,u}$  (v případě zkoušení celých zdicích prvků) nebo  $f_{b,p}$  (v případě zkoušení reprezentativních částí) získáme ze vztahu:

$$f_{p,u} = \frac{F_c}{A_u} \quad (13)$$

Kde:  $f_{p,u}$  je pevnost v tlaku jednotlivých vzorků v MPa,  
 $F_c$  je síla potřebná k porušení vzorku v N,  
 $A_u$  je ložná plocha v mm<sup>2</sup>.

Dále je však nutné zahrnout vliv rozměrů zkušebních těles. Tuto skutečnost zohledníme součinitelem  $\delta^{NP2}$  (Tab. 4), kterým vynásobíme pevnosti  $f_{b,u}$  nebo  $f_{b,p}$ , čímž získáme normalizovanou pevnost v tlaku zdicích prvků  $f_b$ .

Tab. 4. Součinitel  $\delta^{NP2}$  vyjadřující vliv rozměrů zkušebních těles změřených po úpravě povrchu zdicích prvků [4].

Výška [mm]	Nejmenší vodorovný rozměr zdicího prvku [mm]				
	50	100	150	200	≥ 250
40	0,80	0,70	-	-	-
50	0,85	0,75	0,70	-	-
65	0,95	0,85	0,75	0,70	0,65
100	1,15	1,00	0,90	0,80	0,75
150	1,30	1,20	1,10	1,00	0,95
200	1,45	1,35	1,25	1,15	1,10
≥ 250	1,55	1,45	1,35	1,25	1,15

## 5. Experimentální část

Experimentální část této práce se skládá z řady menších výzkumů, avšak všechny směřují k jednotnému cíli – predikci trvanlivosti historických zdicích prvků pomocí nedestruktivních metod. Vzorky nejsou v průběhu této predikce poškozeny, což umožňuje jejich opětovné využití při rekonstrukcích cihlových památek. Tato sestava experimentů tak představuje kompaktní soubor výsledků a poznatků.

Kromě tohoto hlavního tématu se experimentální část práce také zabývá aktuálními otázkami, jako je stanovení pevnosti v tlaku zdicích prvků pomocí nedestruktivních metod nebo zkoumání vlivu vlhkosti na tuto pevnost.

Jednotlivé výzkumy byly navrženy tak, aby přispěly ke zkvalitnění rekonstrukcí a posuzování technického stavu památek. Každý z těchto výzkumů byl autorem této práce publikován jako samostatný článek, konferenční příspěvek nebo kapitola v knize.

### 5.1 Odběr vzorků pro výzkum

Pro všechny tyto dílčí experimenty bylo nutné získat historické cihly plně pálené ze zbouraných objektů, aby byly výsledky co nejvýstižnější. Z tohoto důvodu byly v průběhu let sbírané zkušební vzorky, často i z významných zbouraných či rekonstruovaných památek.

Pravděpodobně nejvýznamnější z těchto staveb je unikátní cihelný most v obci Sedlec u Mikulova, který byl již v této práci dříve zmiňován. Barokní cihelný most, dlouhá léta chátrající bez povšimnutí, postupně zarůstal stromy a křovinami. Tato kulturní památka se nachází poblíž hranic s Rakouskem, mezi obcemi Mikulov, Sedlec a Drasenhofen (v pohraničním území). Až do roku 1989 byl veřejnosti nepřístupný [143]. V letech 2019 až 2020 probíhala obnova samotného mostu i okolního prostoru. Rekonstrukce mostu byla pojata velmi citlivě a zodpovědně, čemuž také odpovídá její ocenění „Památka roku 2020“.

Tento most sloužil jako jediná přístupová cesta přes Nový rybník, založený v 15. století, k zámečku Porz, známému také jako lovecký zámek nebo Lusthaus (Obr. 29). Zámeček se nachází na vrcholu Tichého ostrova (Inselu) u Mikulova. Most byl postaven současně s loveckým zámečkem, pravděpodobně ve dvacátých letech 17. století, v období působení kardinála Dietrichsteina, který Mikulov využíval jako své letní sídlo [144], [145].



Obr. 29. Část malby s kartografickým zobrazením mikulovského panství z roku 1672 s cihelným barokním mostem [144].

V dřívějších dobách se mosty často stavěly z kamene kvůli jeho vyšší trvanlivosti a životnosti, ale při výstavbě tohoto mostu byl kámen použit pouze na stavbu pilířů. Zbytek mostu je postaven z cihel, což mu dodává jeho jedinečnost (Obr. 30 a Obr. 31). Další výjimečností je jeho délka – tento patnácti obloukový most měří 100 metrů [145].



Obr. 30. Cihelný most v Sedleci během rekonstrukce – celkový pohled na most během rekonstrukce.



(a)



(b)

Obr. 31. Cihelný most v Sedleci během rekonstrukce; (a) detail cihelné klenby a pilířů; (b) detail unikátního systému odvodnění mostu pomocí žlábků (prejzů) [145].

Při rekonstrukci tohoto mostu byly využity historické cihly získané jak ze samotného mostu (uvolněné cihly apod.), tak z jiných zbouraných staveb. Pro rozhodnutí, které cihly znovu využít a které ne, byla pracovníky na rekonstrukci využita metoda podobná akustickému trasování (viz kapitola 3.1.3.1). Princip tohoto třídění spočíval v klepnutí dvou cihel o sebe. Vzorky byly vyhodnoceny jako nevhodné pro opětovné použití, pokud byla například odezva „dunivá“ nebo pokud tímto úderem došlo k poškození cihel. Autorovi této práce bylo také umožněno odebrat část těchto cihel pro výzkumné účely.



(a)



(b)

Obr. 32. Odběr zkušebních vzorků pro laboratorní testy; (a) skládka historických cihel pro rekonstrukci cihelného mostu; (b) čištění a výběr zkušebních vzorků pro laboratorní testy [126].

Další významnou stavbou, ze které byly odebrány historické cihly pro výzkumné účely, byl Zámecký mlýn, známý také jako Vránův mlýn, v obci Břeclav (Obr. 33). Osud této stavby ze 16. století byl tragičtější než v případě cihelného mostu v obci Sedlec u Mikulova. Od roku 1919 byl pronajímán Janu Vránovi, odkud také pochází název Vránův mlýn, a od roku 1950 nebyla stavba využívána, což vedlo k jejímu chátrání. Osud mlýna byl zpečetěn pravděpodobně v roce 2008, kdy došlo k jeho částečnému vyhoření a v roce 2023 došlo k jeho demolici [146].



Obr. 33. Historická kresba Vránova (Zámeckého) mlýna v obci Břeclavi z roku 1851 [147].

Došlo tak k zániku historické stavby, která představovala důležitou součást místní historie a kulturního dědictví. Nicméně autorovi této práce se naskytla další možnost odběru zkušebních vzorků z významné historické stavby Obr. 34.



Obr. 34. Čištění a odběr vzorků pro výzkumné práce během demolice Vránova mlýna.

## 5.2 Doplnující výzkum

Tato část se věnuje experimentálnímu výzkumu, který přímo nesouvisí s nedestruktivním odhadem trvanlivosti zdicích prvků určených pro rekonstrukce historických cihelných objektů. Přesto tvoří klíčovou součást celé práce, neboť výsledky přinášejí cenné informace a poznatky, které jsou důležité pro optimalizaci postupů pro hodnocení technického stavu cihelných historických staveb.

### 5.2.1 Stanovení pevnosti v tlaku zdicích prvků NDT metodami

Tato práce byla publikována jako kapitola v knize a prezentována na mezinárodní konferenci SAHC 2023 konané v Kjótu [138].

Pro testování zdicích prvků zabudovaných v konstrukci bylo vyvinuto odrazové kladívko Schmidt LB. Tento tvrdoměr vznikl úpravou tvrdoměru Schmidt L určeného pro testování betonových konstrukcí. Hlavní úprava spočívá v zakulacení razníku. Výroba Schmidt LB však byla ukončena a nedestruktivní stanovení pevnosti v tlaku zdicích prvků zabudovaných v konstrukci se stává náročnou disciplínou.

Alternativní metody k tvrdoměru Schmidt LB existují, ale jsou obvykle určeny pro testování betonových konstrukcí. Problém spočívá v tom, že různé nedestruktivní metody poskytují rozdílné výsledky v závislosti na testovaném materiálu. Pro možnou aplikaci těchto principů na hodnocení cihelného zdiva je nezbytné ověřit jejich použitelnost a následně stanovit příslušné regresní (někdy nesprávně nazývané kalibrační) křivky pro cihly plně pálené [138].

#### 5.2.1.1 Postup měření

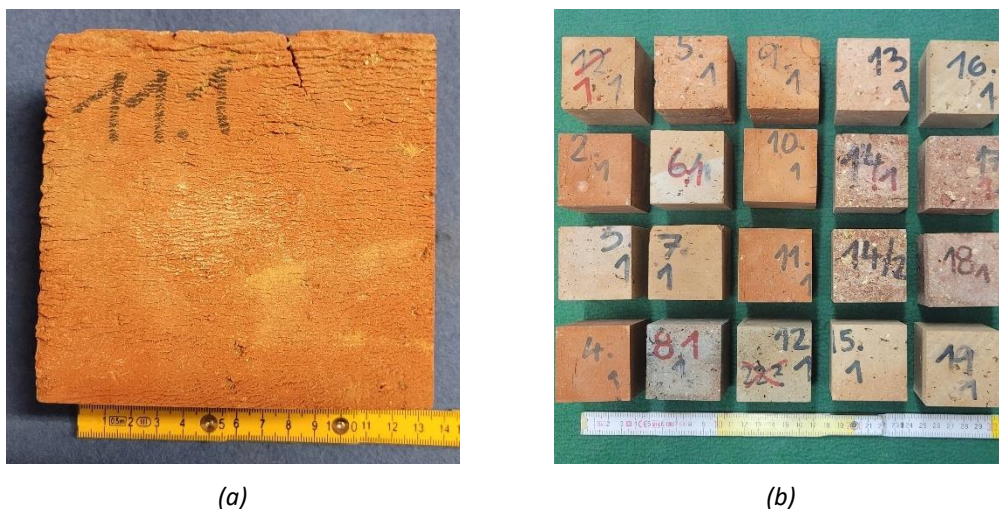
Hlavním cílem tohoto experimentu bylo ověřit použitelnost vybraných NDT metod pro stanovení pevnosti v tlaku historických cihel plných pálených. Použité metody byly Silver Schmidt, konkrétně typy N (Normal) a L (Light) s klasickým i hřibovým nástavcem, který je primárně určen pro stanovení odbedňovacích pevností betonových konstrukcí. Jedná se o nejmodernější tvrdoměrné přístroje z řady Schmidt. Jejich podstatnou výhodou je skutečnost, že nejsou závislé na úhlu měření. Pro přepočítání koeficientu vrácené energie  $Q$  na pevnost v tlaku materiálu tak postačí jediná regresní křivka jak pro svislé, tak šikmé i vodorovné konstrukce. Princip tvrdoměrů Schmidt je podrobně popsán v kapitole 4.2.3.

Další použitou metodou byla upravená vrtačka s označením KV-3, vyvinutá společností KIKTEC ve spolupráci s TZÚS Praha [148]. Jedná se o třetí generaci přístroje fungující na tomto principu, která je veřejnosti známější pod pojmem „Kučerova vrtačka“. Princip této metody

spočívá v závislosti mezi pevností v tlaku a odolností materiálu proti vnikání vrtáku za daného přitlaku, počtu otáček a průměru vrtáku. Hlavní výhodou této metody je možnost stanovení také pevnosti v tlaku malty – pro vyhodnocení pevnosti zdiva v tlaku si tak vystačíme s jediným přístrojem. Další předností je, že povrch zkušebních vzorků není třeba upravovat obroušením. To je zvláště významné u památkových objektů, neboť se tak minimalizuje potřeba odstraňování omítky ze zdiva. Nicméně ve zdicích prvcích vznikají závrtý, což může narušit estetickou stránku zdiva.

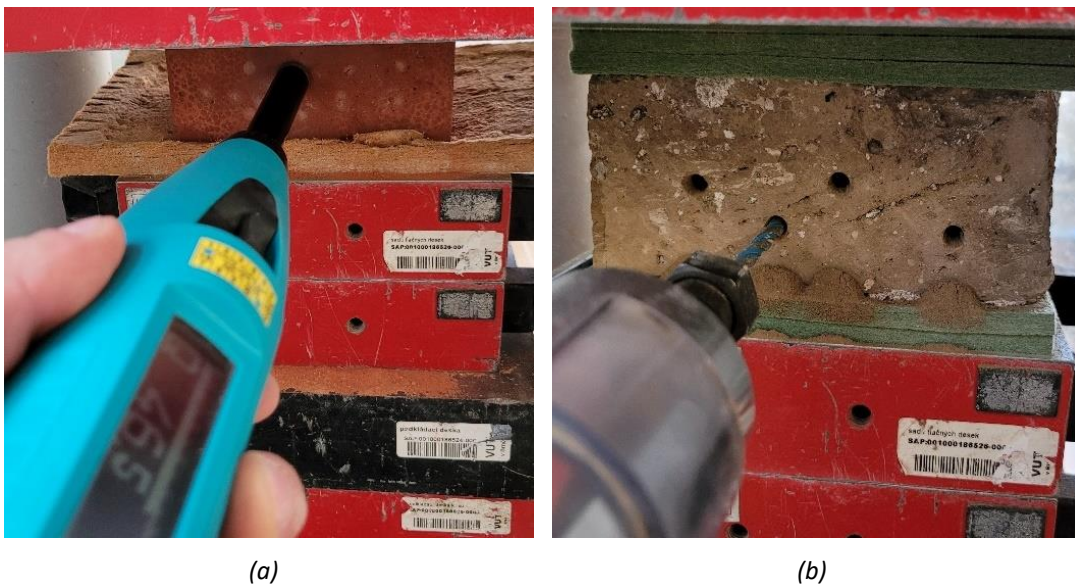
Před zahájením samotného měření bylo potřeba pečlivě zvolit zkušební soubor historických cihel plných pálených. Tyto zkušební vzorky musely reprezentovat co možná nejširší škálu pevností, aby byly následně pokryty všechny části regresní křivky. Z tohoto důvodu bylo vybráno velké množství cihel plných pálených, které se lišily jak svým stářím, tak i svými vlastnostmi (zejména pak pevností v tlaku).

Prvky byly rozřezány na poloviny, a zkoušky prováděny na těchto řezných plochách, aby nedocházelo k ovlivnění výsledků odlišnými vlastnostmi povrchových vrstev. Následně byly vzorky důkladně očištěny a označeny. Označení prvků vycházelo ze zvolené metodiky měření. Poloviny cihel byly označeny postupně, přičemž jedna polovina cihly byla označena pořadovým číslem a dodatkovým označením x.1 (Obr. 35(a)), zatímco druhá polovina cihly x.2. Pomocí metod Silver Schmidt (ve všech modifikacích) byly testovány obě poloviny cihel, ale vrtačkou KV-3 pouze prvky s označením x.2. Z těles s označením x.2 byly následně vyrobeny menší tělesa, krychle o délce hrany 50 mm (Obr. 35(b)). Tento postup byl zvolen s cílem minimalizovat zkreslení výsledků způsobené závrtý vrtačkou [138].



Obr. 35. Zkušební vzorky [138]; (a) příklad zkušebního vzorku (poloviny cihly) s označením 11.1; (b) příklad zkušebních vzorků (krychle o hraně 50 mm) vyřezané z polovin cihel s označením x.2.

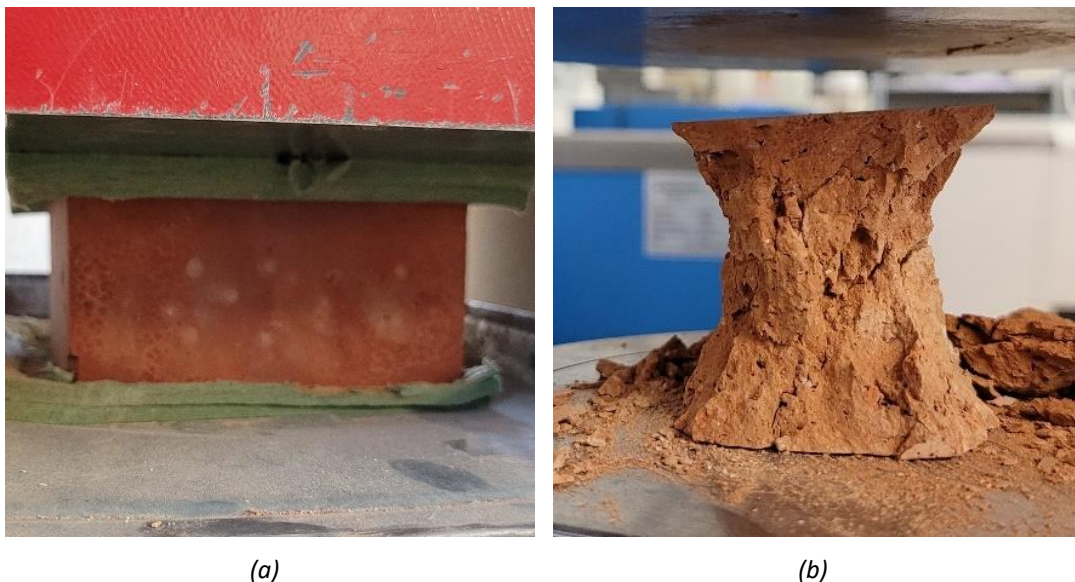
Po vysušení vzorků do ustálené hmotnosti byly stanoveny jejich rozměry a hmotnosti. Z těchto hodnot byly následně stanoveny objemové hmotnosti. Poté bylo přistoupeno k měření pomocí *NDT* metod. Pomocí všech typů Silver Schmidtů byly stanoveny koeficienty vrácené energie  $Q$ . Na každé polovině cihel bylo provedeno celkem 10 úderů (Obr. 36(a)), postup měření a vyhodnocování je podrobně popsán kapitole 4.2.3. Na polovinách cihel s označením x.2 byla navíc provedena měření pomocí vrtačky KV-3 (Obr. 36(b)). Do každého zkušební vzorku byly provedeny celkem 3 závrtů, ze kterých byl následně stanoven aritmetický průměr. Přičemž jednotlivé hodnoty se nesmí lišit od průměru o více než  $\pm 30\%$  [149]. V případě, že tato podmínka není splněna, je potřeba provést náhradní vrt. Hloubky vrtů byly stanovené pomocí posuvného měřítka s přesností na desetiny milimetru. Nedestruktivní zkoušky byly prováděny pod zatížením, které odpovídá přibližně desetině předpokládané pevnosti v tlaku [138].



Obr. 36. Testování vzorků pomocí *NDT* metod [138]; (a) Silver Schmidt; (b) vrtačka KV-3.

Po nedestruktivním měření byly vzorky podrobeny destruktivní zkoušce stanovení pevnosti v tlaku, který je popsán v kapitole 4.3.3. V případě vzorků s označením x.1 byla pevnost stanovena na polovinách cihel plných pálených (Obr. 37(a)). Prvky s označením x.2 byly nařezány na krychle o hraně přibližně 50 mm. Tyto vzorky musely být následně znovu vysušeny do ustálené hmotnosti a opětovně byly stanoveny jejich rozměry a hmotnosti ve vysušeném stavu. Z každé poloviny cihel byly vyrobeny 2 zkušební krychle. Tyto zkušební vzorky byly dodatečně označeny x.2.1 a x.2.2. Zkušební vzorky x.2.1 byly zatěžovány ve směru uložení zdicích prvků ve zdivu a vzorky s označením x.2.2 byly zatěžovány kolmo na směr uložení zdicích prvků ve zdivu (Obr. 37(b)). Tento postup byl zvolen z důvodů zahrnutí vlivu

možných vrstev v cihlách plných pálených, které mohly vzniknout při nedokonalém promísení a plnění cihlářské hlíny do forem (tato problematika je probrána v kapitole 5.2.3). Tento postup tak zahrnuje všechny možné způsoby stanovení pevnosti zdicích prvků, které jsou následně zohledněny v regresních (kalibračních) křivkách [138].



Obr. 37. Destruktivní stanovení pevnosti v tlaku zkušebních těles [138]; (a) na polovině cihel (vzorky  $x.1$ ); (b) na krychlích o hraně 50 mm (vzorky  $x.2.1$  a  $x.2.2$  vytvořené z těles  $x.2$ ).

Pevnosti získané destruktivním měřením ( $f_c$ ) byly určeny jako poměr maximálně dosažené síly ku zatěžovací ploše. Tyto hodnoty pevnosti bylo nezbytné upravit pomocí koeficientu  $\delta^{NP2}$ , který zohledňuje vliv rozměrů zkušebních těles změřených po úpravě povrchu. Tímto způsobem byla získána normalizovaná pevnost zdicích prvků v tlaku  $f_b$ . V praxi je pevnost obvykle stanovena na celých cihlách plných pálených, proto byly následně hodnoty pevností přepočteny koeficientem, který odpovídá jmenovitým rozměrům cihly plné pálené, tedy  $\delta^{NP2} = 0,77$ . Takto konečně získáváme pevnost  $f_{b,u}$ .

Následně bylo přistoupeno k tvorbě regresních vztahů. Pro tyto účely byly využity statistické metody a testy, které vycházejí z [150] a [151]. Pro nalezení nejvhodnějšího regresního modelu byla využita projekční matice ( $H$ ), a byly provedeny t-testy významnosti regresních parametrů. Pro odhalení odlehlých hodnot bylo využito posouzení Jackknife reziduí s hladinou významnosti  $\alpha = 0,05$ . Pro posouzení vhodnosti regresních modelů byl využit koeficient (index) determinace  $R^2$ , který se v ideálním případě blíží hodnotě 1,0. Dalším posuzovaným parametrem byla zbytková směrodatná odchylka  $s_x$ , která vyjadřuje rozdíl mezi hodnotou pevnosti v tlaku stanovenou destruktivně a hodnotou pevnosti v tlaku

vypočtenou z příslušného regresního vztahu. Regresní vztah je považován za použitelný v praxi, pokud  $s_x \leq 0,12$  [152], [151]. Hodnota  $s_x$  byla stanovena dle [138]:

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_i - D_m)^2}{n - 1}} \quad (14)$$

$$D_i = \left| \frac{f_{b,u,d,i} - f_{b,u,i}}{f_{b,u,i}} \right|$$

$$D_m = \frac{\sum_{i=1}^n D_i}{n}$$

Kde:  $n$  je počet měření,  
 $f_{b,u,i}$  jsou jednotlivé pevnosti stanovené z odvozených regresních (kalibračních) křivek,  
 $f_{b,u,d,i}$  jsou jednotlivé pevnosti stanovené destruktivně.

### 5.2.1.2 Výsledky měření

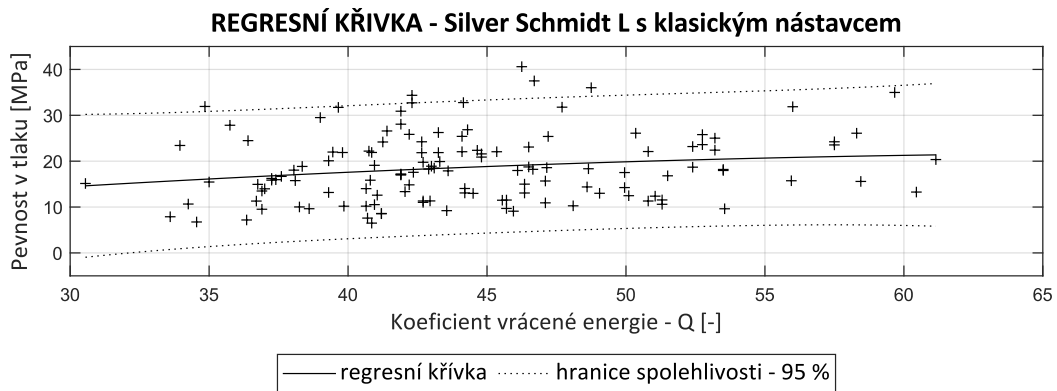
Zkušební soubor tvořil celkem 180 zkušebních těles. Celkem 3 zkušební vzorky byly vyřazeny ještě před zahájením měření, protože došlo k jejich poškození vlivem sušení či poškození během jejich řezání. Zkušební soubor tvořily poloviny cihel (vzorky označené x.1) a krychle o hraně přibližně 50 mm zatěžované ve směru uložení cihly (vzorky označené x.2.1) a kolmo na směr uložení cihly (vzorky označené x.2.2), přičemž písmeno x je pořadové číslo zkušebního vzorku. Rozsah pevností od 6,5 do 42,7 MPa svědčí o dobře zvoleném zkušebním souboru, neboť je zde zastoupena celá škála pevností (Tab. 5) [138].

Tab. 5. Objemové hmotnosti a pevnosti v tlaku vzorků stanovené destruktivně [138].

označení vzorků	počet vzorků	objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]			pevnost v tlaku [MPa]		
		min	med	max	min	med	max
x.1	60	1490	1630	1880	6,5	16,8	42,7
x.2.1	59	1520	1670	1910	7,6	18,0	37,0
x.2.2	58	1550	1670	1940	6,7	18,7	40,6
celkem	177	1490	1670	1940	6,5	18,0	42,7

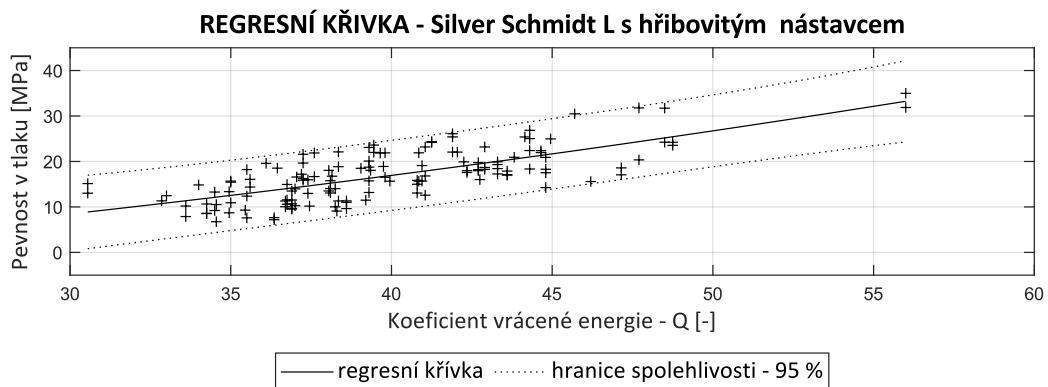
Z měření byly vyřazeny vzorky, které byly identifikovány jako odlehlé hodnoty na základě Jackknife reziduí s hladinou významnosti  $\alpha = 0,05$ . Tyto odlehlé hodnoty byly zpravidla způsobeny defekty ve zkušebních prvcích, jako jsou například trhliny nebo výskyt velkého množství cicvárů. Některé hodnoty byly z vyhodnocení také vyřazeny kvůli atypickému způsobu porušení.

Pro nedestruktivní měření pomocí Silver Schmidta L s klasickým nástavcem se neprokázala statisticky významná závislost. V tomto případě dosahoval koeficient (index) determinace  $R^2 = 0,0354$  (Obr. 38) [138].



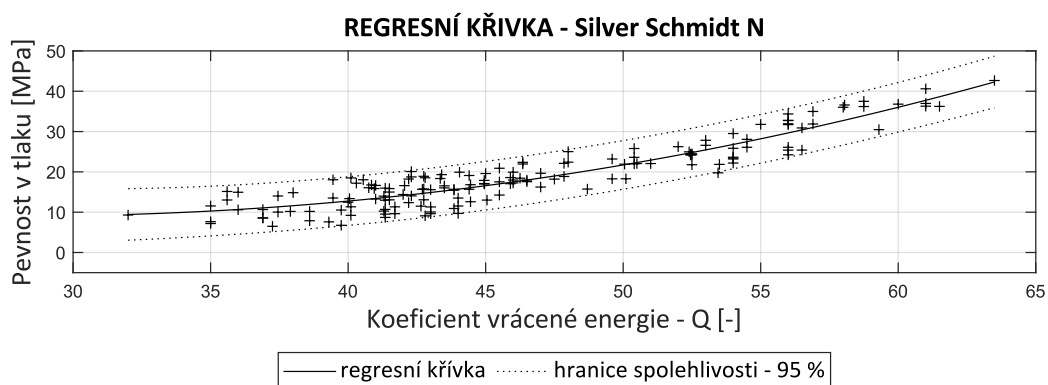
Obr. 38. Regresní vztah pro stanovení pevnosti v tlaku zdicích prvků pomocí Silver Schmidta L s klasickým nástavcem.

V případě Silver Schmidta L s hříbovým nástavcem byl model o něco přesnější, kde  $R^2 = 0,535$  (Obr. 39). Avšak ani tato hodnota není považována za dostatečnou. Z tohoto důvodu nejsou pro tyto přístroje uváděny regresní křivky ani zbytková směrodatná odchylka  $s_x$  [138].



Obr. 39. Regresní vztah pro stanovení pevnosti v tlaku zdicích prvků pomocí Silver Schmidta L s hříbovým nástavcem.

Naopak v případě Silver Schmidta N a vrtačky KV-3 byly výsledky velmi uspokojivé. V obou případech byla prokázána závislost měřené veličiny na pevnosti v tlaku zdicích prvků. Tyto metody jsou tak pro stanovení pevnosti zdicích prvků v praxi použitelné. U Silver Schmidta N byl koeficient determinace  $R^2 = 0,858$  a zbytková směrodatná odchylka  $s_x = 0,119$  (Obr. 40) [138].



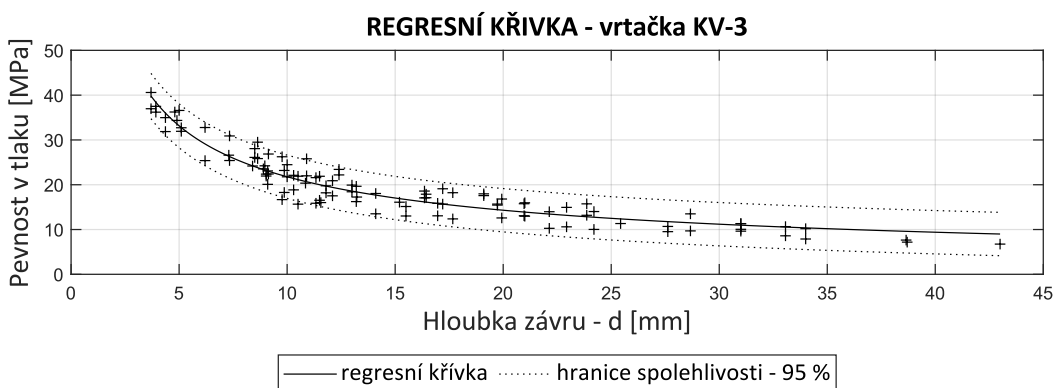
Obr. 40. Regresní vztah pro stanovení pevnosti v tlaku zdicích prvků pomocí Silver Schmidt N.

Nejvhodnější regresní křivka pro stanovení pevnosti v tlaku zdicích prvků  $f_{b,u}$  z koeficientu vrácené energie  $Q$ , stanoveného pomocí Silver Schmidt N, byla určena jako polynom druhého stupně. [138]:

$$f_{b,u} = 0,02673 \times Q^2 - 1,51 \times Q + 30,38 \quad (15)$$

Kde:  $Q$  je koeficient vrácené energie stanovený pomocí Silver Schmidta N.

Pro vrtačku KV-3 dosahoval  $R^2 = 0,903$  a zbytková směrodatná odchylka  $s_x = 0,104$  (Obr. 41) [138].



Obr. 41. Regresní vztah pro stanovení pevnosti v tlaku zdicích prvků pomocí upravené vrtačky KV-3.

Nejvhodnější regresní křivka pro stanovení pevnosti v tlaku zdicích prvků  $f_{b,u}$  z hloubky závrtu, stanovené pomocí upravené vrtačky KV-3, byla určena jako mocninná funkce [138]:

$$f_{b,u} = 87,99 \times d_m^{-0,6063} \quad (16)$$

Kde:  $d_m$  je průměrná hloubka vrtu zhotoveného vrtačkou KV-3 v mm.

### 5.2.1.3 Závěr a diskuse měření

Vybrané nedestruktivní metody byly ověřeny na zkušební souboru, který obsahoval celkem 177 těles. Těmito tělesy byly poloviny cihel a krychle o hraně 50 mm. Zkušební soubor byl sestaven z historických cihel plných pálených. Cihly plně pálené byly do zkušební souboru zařazeny tak, aby reprezentovaly celou škálu vlastností. Cihly se proto lišily jak svým stářím, tak i mechanickými vlastnostmi, především pevností v tlaku. Rozsah pevností od 6,5 do 42,7 MPa svědčí o vhodnosti zkušební souboru.

Tvrdoměrná metoda pomocí Silver Schmidtu L s klasickým a hřibovým nástavcem se v praxi jako použitelná neosvědčila. Nebyly nalezeny regresní vztahy s dostatečnou statistickou spolehlivostí. Problém s tímto typem tvrdoměru nastával především u zdicích prvků s pevností v tlaku nad cca 20 MPa. Přibližně nad tuto hranici nebyly přístroje schopny podávat adekvátní hodnoty koeficientu vrácené energie  $Q$ . Z tohoto důvodu nejsou v práci uváděné regresní (kalibrační) křivky

Naopak využití metod Silver Schmidta N a upravené vrtačky KV-3 se pro použití v praxi osvědčilo. V případě Silver Schmidta N dosáhl koeficient determinace  $R^2$  hodnoty 0,858 a zbytková směrodatná odchylka  $s_x$  činila 0,119. Pro vrtačku KV-3 byl  $R^2$  stanoven na hodnotu 0,903 a zbytková směrodatná odchylka  $s_x$  byla 0,104. Pro vytvoření obecných regresních vztahů by však bylo zapotřebí zkušební soubor rozšířit a zahrnout spolehlivost tak, aby 90 % hodnot leželo pod regresní křivkou. [138].

### 5.2.2 Vliv vlhkosti na pevnost v tlaku zdiva stanovenou nedestruktivně

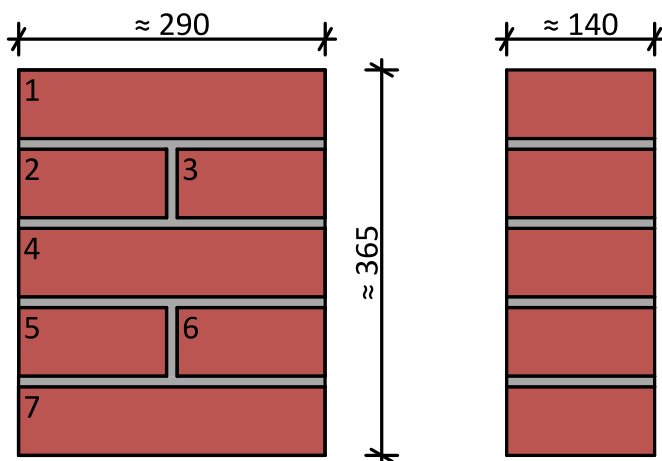
Výsledky tohoto výzkumu byly částečně publikovány na 14. ročníku mezinárodní konference Young Scientist 2022 [153] a v rámci konference Juniorstav 2023 [154].

Současné normy ČSN ISO 13822 [155] a ČSN 73 0038 [156], které se zabývají posuzováním stávajících konstrukcí s vlivem vlhkosti na pevnost v tlaku cihelného zdiva uvažují. Zahrnují tento vliv prostřednictvím součinitele  $\gamma_{m3}$ , kterým dochází k redukci návrhové pevnosti zdiva. Tyto předpisy však nezohledňují, jakým způsobem byla pevnost v tlaku zdicích prvků stanovena. V případě, že bychom z konstrukce odebrali zkušební vzorky (celé zdící prvky nebo jejich reprezentativní části) a ty následně testovali ve vysušeném stavu, je tento postup bezproblémový. V současné době se však pevnost zdicích prvků nejčastěji stanovuje nedestruktivně, a to pomocí tvrdoměru Schmidt LB. I když byla výroba tohoto tvrdoměru ukončena, problematika je stále aktuální. Schmidt LB se bude používat ještě dlouhá léta a problematika se navíc týká i ostatních typů tvrdoměrů.

Lze předpokládat, že vlivem zvýšené vlhkosti dojde ke snížení pevností zdicích prvků již během samotného měření přímo na konstrukci. V případě zvýšené vlhkosti dojde ke „změknutí“ zdicích prvků a hodnoty stanovené pomocí tvrdoměru budou nižší, což vede k nižším hodnotám pevnosti v tlaku zdicích prvků. Poté bude návrhová pevnost zdiva v tlaku snížena vlivem zvýšené vlhkosti součinitelem  $\gamma_{m3}$  podruhé [153].

### 5.2.2.1 Postup měření

Z tohoto důvodu byl navržen experiment, kterým měla být tato teze prokázána. V rámci tohoto experimentu bylo vyžděno celkem 5 pilířů s přibližnými rozměry 290 × 140 × 365 mm. Pro jednoznačnost byly pilíře označeny písmeny A až E a jednotlivé zdicí prvky byly označeny číslicemi 1 až 7 (Obr. 42) [153].



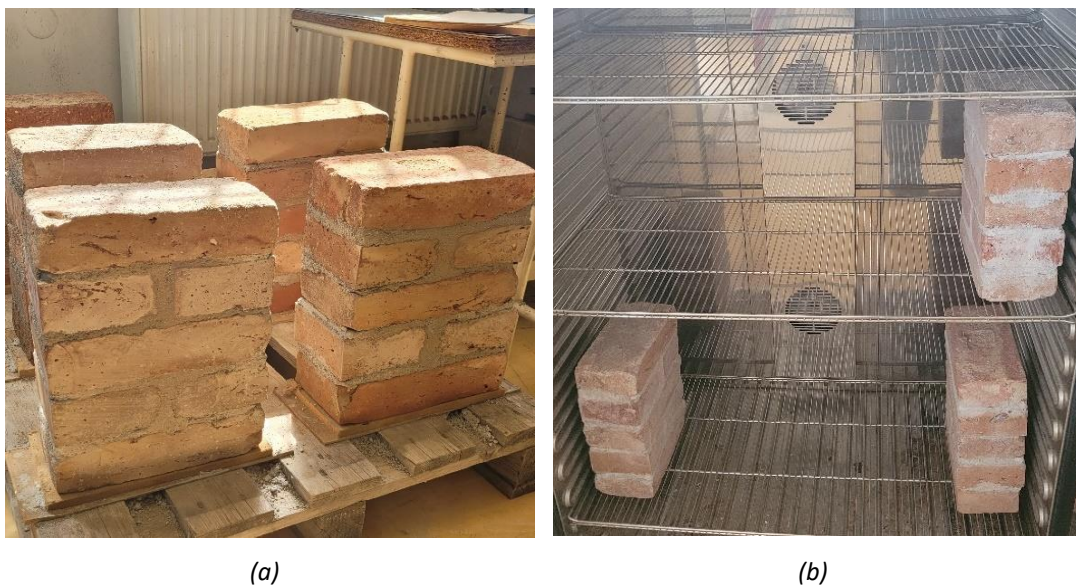
Obr. 42. Pohledy na cihelný pilíř s přibližnými rozměry.

Pilíře byly vyžděné z historických cihel, získaných z barokní kasárny z 18. století. Byla použita vápenocementová malta s tloušťkou spár přibližně 10 mm, aby experiment co nejvíce simuloval skutečné historické konstrukce (Obr. 43 (a)). Nasákavost jednotlivých zdicích prvků i pilířů byla velmi odlišná, a proto i obtížně srovnatelná. Stejná hodnota vlhkosti bude mít odlišný vliv na vlastnosti cihelného zdiva na základě hodnoty nasákavosti. Z tohoto důvodů je v práci uvažováno s procentuálním nasycením nikoli s vlhkostí. Každý z pilířů byl zkoušen v různém procentuálním nasycení, aby bylo možné sledovat jeho vliv na pevnost v tlaku. Pilíře byly nasyceny na 0 %, 25 %, 50 %, 75 % a 100 % procentuálního nasycení.

Před zahájením samotného experimentu bylo nejprve nutné připravit zdicí prvky. Historické plně pálené cihly byly očištěny od malty a dalších nečistot. Zkoušené povrchy prvků byly obroušeny. Část zdicích prvků bylo potřeba rozřezat na poloviny, aby mohla být dodržena vazba pilířů. Nakonec byly stanoveny rozměry zdicích prvků. Z malty pro zdění bylo

také vyrobeno zkušební těleso. Toto těleso bylo „sevřené“ mezi zdicí prvky, aby mělo totožné podmínky jako malta zabudovaná v pilířích. Těleso bylo vytvořené z důvodů následného stanovení pevnosti malty v tlaku.

Aby bylo možné stanovit požadované procento nasycení (vlhkost) pro jednotlivé pilíře, bylo potřeba stanovit hmotnosti ve vysušeném a nasyceném stavu. Z tohoto důvodu byly pilíře nejprve vysušeny do ustálené hmotnosti. Byla zvolena nízká teplota sušení (80 °C), aby nedošlo ke vzniku trhlin ve zdicí maltě (Obr. 43 (b)). Po vysušení byly pilíře zváženy. Následně byly pilíře zcela nasyceny vodou a opět zváženy [153].



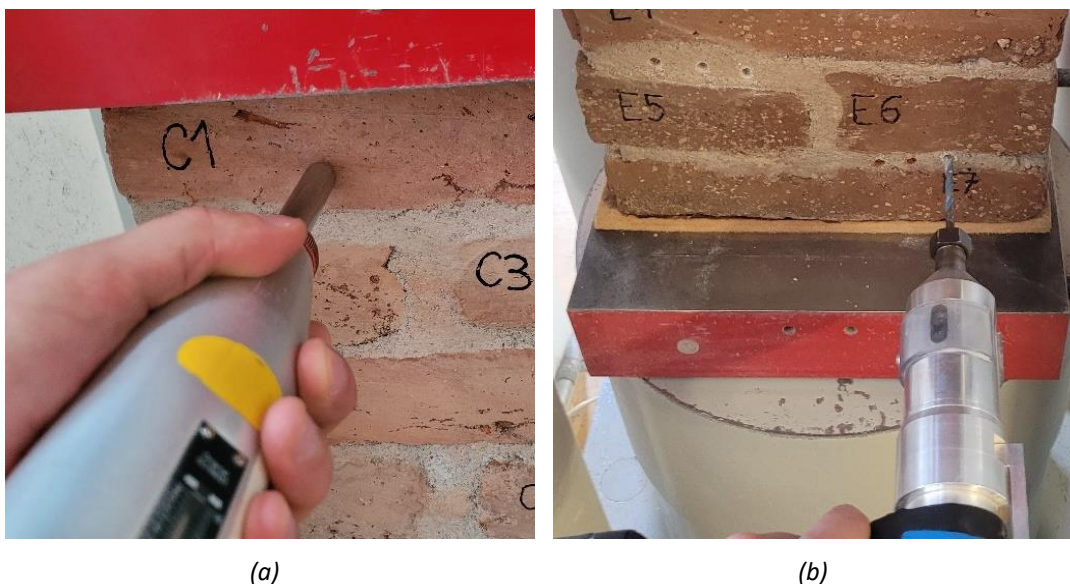
Obr. 43. Příprava zkušebních pilířů [153]; (a) vyzděné cihelné pilíře; (b) sušení pilířů do ustálené hmotnosti.

Z hmotností pilířů ve vysušeném a nasyceném stavu byly následně stanoveny nasákavosti a hmotnosti, které odpovídají požadovaným procentuálním nasycením. V Tab. 6 jsou uvedeny hmotnosti pilířů odpovídající požadovanému procentuálnímu nasycení pro jednotlivé pilíře. Dodržení přesných procentuálních nasycení bylo z technologických důvodů náročné a nebyla zcela dodržena, proto jsou v tabulce uvedeny také skutečné hodnoty procentuálního nasycení pilířů. Rozdíly mezi požadovanými a změřenými hodnotami jsou však pro účely této práce zanedbatelné. Dále byla stanovena nasákavost pilířů a vlhkost v daných procentuálních nasyceních [153].

Tab. 6. Hmotnosti pilířů v nasyceném a vysušeném stavu. Požadované procentuální nasycení a hmotnosti. Skutečné procentuální nasycení, hmotnosti a nasákavost pilířů [153].

označení pilíře	hmotnost (nasycený stav)	hmotnost (vysušený stav)	nasákavost pilířů	požadované procentuální nasycení	skutečné procentuální nasycení	vlhkost v daném proc. nasycení
-	$m_s$	$m_d$	$w_s$	-	-	$w$
[-]	[kg]	[kg]	[%]	[%]	[%]	[%]
A	27,156	23,112	17,5	0,0	0,0	0,0
B	28,831	24,735	16,6	25,0	28,7	4,8
C	28,972	24,792	16,9	50,0	48,8	8,2
D	28,182	24,225	16,3	75,0	73,6	12,0
E	28,677	24,783	15,7	100,0	100,0	15,7

Pevnost zdicích prvků v tlaku byla stanovena nedestruktivně pomocí tvrdoměru Schmidt LB. Pevnost byla stanovena jak ve vysušeném, tak v nasyceném stavu. Dále byla pevnost určena pro různá procentuální nasycení, která se pro jednotlivé pilíře lišila (Obr. 44(a)). Během nedestruktivního zkoušení byl pilíř zatížen napětím odpovídající 10 % předpokládané pevnosti v tlaku pilíře. Pevnost malty v tlaku byla stanovena destruktivně na zkušebních tělesech. Vliv procentuálního nasycení na pevnost malty v tlaku byl ověřen pomocí semidestruktivní metody upravené vrtačky s označením KV-3 (Obr. 44(b)) [153].



Obr. 44. Nedestruktivní stanovení pevnosti zdiva pilířů [153]; (a) stanovení pevnosti zdicích prvků pomocí tvrdoměru Schmidt LB; (b) stanovení pevnosti malty v tlaku pomocí upravené vrtačky KV-3.

### 5.2.2.2 Výsledky měření

Pevnost v tlaku zdicích prvků stanovená nedestruktivně byla vyhodnocena podle [137]. Pro převod mezi hodnotou odrazu  $R$  a pevností v tlaku zdicích prvků byl využit obecný kalibrační vztah [25]:

$$f_{be,u} = 0,956 \times R - 5,444 \quad (17)$$

Kde:  $R$  je hodnota odrazu stanovená pomocí tvrdoměru Schmidt LB.

Takto stanovené pevnosti bylo nutné upřesnit součinitelem  $\alpha$ , stanoveným na pěti zkušebních vzorcích (S1 až S5). Tyto vzorky byly odebrány ze stejné konstrukce jako prvky pro vytvoření pilířů. Tento součinitel upřesnění  $\alpha$  byl stanoven jako poměr součtu pevností stanovených destruktivně ( $\Sigma f_{b,u}$ ) a součtu pevností stanovených nedestruktivně pomocí Schmidt LB ( $\Sigma f_{be,u}$ ). Součinitel  $\alpha = 0,9$  svědčí o vhodnosti využití kalibračního vztahu (hodnota blízká 1,0). Hodnoty jednotlivých pevností i hodnota součinitele  $\alpha$  jsou uvedeny v Tab. 7 [153].

Tab. 7. Stanovení součinitele pro upřesnění NDT zkoušek zdicích prvků pilířů [153].

vzorek	délka [mm]	šířka [mm]	$F_{max}$ [kN]	$f_{b,u}$ [MPa]	$f_{be,u}$ [MPa]	$\Sigma f_{be,u}$ [MPa]	$\Sigma f_{b,u}$ [MPa]	$\alpha$ [-]
S1	275,0	145,0	655,0	16,43	18,74			
S2	290,0	145,0	652,0	15,51	20,85			
S3	289,0	140,0	1000,6	24,73	28,40	106,5	96,3	0,90
S4	284,9	140,0	915,6	22,95	17,98			
S5	285,0	140,0	665,0	16,67	20,56			

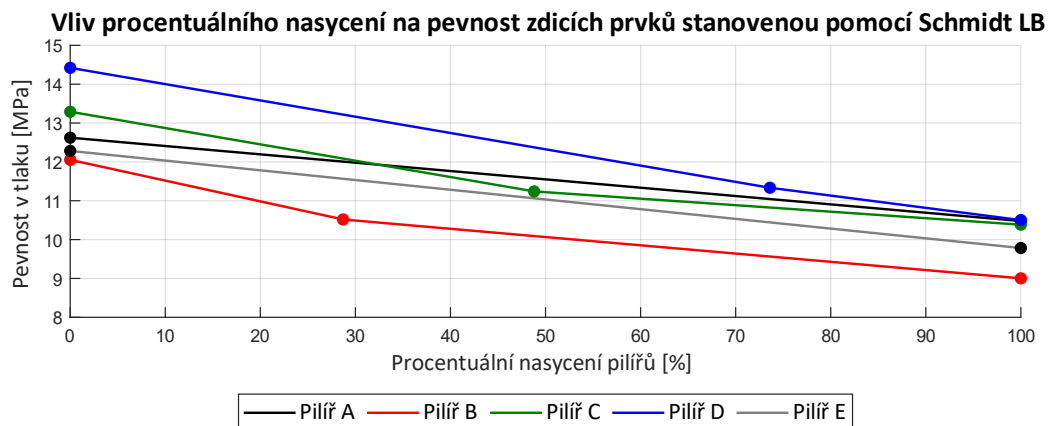
Po upřesnění pevností v tlaku byla stanovená zaručená pevnost zdicích prvků podle [157]:

$$f_{b,u} = f_{be,u} - t_n \times s_x \quad (18)$$

Kde:  $f_{be,u}$  je výběrový průměr zjišťované pevnosti z  $n$  zkušebních míst,  
 $s_x$  je výběrová směrodatná odchylka,  
 $t_n$  je součinitel pro odhad dolní hranice konfidenčního intervalu průměru, stanovený s pravděpodobností  $P = 0,9$ .

Abychom získali normalizovanou pevnost zdicích prvků  $f_b$  bylo nutné hodnotu  $f_{b,u}$  vynásobit součinitelem  $\delta^{NP2}$ . Kalibrační vztah pro Schmidt LB byl vytvořen pro celé plně pálené cihly, a hodnotu  $f_{b,u}$  je proto nutné upravit tímto součinitelem, který zohledňuje vliv rozměrů zdicích prvků [153].

Z Obr. 45 vyplývá, že s rostoucí vlhkostí dochází k „změknutí“ zdicích prvků. Tento jev se odráží v hodnotách odrazu stanovených pomocí Schmidt LB a následném přepočtu na pevnosti v tlaku zdicích prvků. [153]. Byly tedy potvrzené prvotní předpoklady.



Obr. 45. Vliv procentuálního nasycení (vlhkosti) na pevnost zdicích prvků  $f_b$  stanovenou nedestruktivně pomocí tvrdoměru Schmidt LB [153].

Největší pokles pevnosti v tlaku zdicích prvků v nasyceném stavu oproti vysušenému stavu byl zaznamenán u pilíře D, kde hodnota pevnosti klesla o 27 %. Na druhé straně, nejmenší pokles pevnosti nastal u pilíře A, kde klesla o 17 %.

Pro stanovení pevnosti v tlaku zdiva pilířů bylo dále nezbytné určit pevnost v tlaku zdicí malty. Pro tento účel bylo vytvořeno těleso ze stejné směsi, z níž byly vyzděny pilíře. Těleso bylo vloženo mezi zdicí prvky, aby mělo stejné podmínky tuhnutí jako malta zabudovaná v pilířích. Z tohoto tělesa bylo vyrobeno celkem 6 zkušebních těles s označením 1 až 6 ve tvaru krychle a dva vzorky s označením M1 a M2 (Obr. 46(a)). Na zkušebních tělesech 1 až 6 byla pevnost v tlaku stanovena destruktivně (Obr. 46(b)). Zkušební vzorky s označením M1 a M2 sloužily k ověření měření pomocí vrtačky KV-3 [153].



Obr. 46. Stanovení pevnosti v tlaku malty [153]; (a) Zkušební tělesa 1 ÷ 6 pro destruktivní stanovení pevnosti v tlaku a tělesa M1 a M2 pro stanovení semidestruktivní pevnosti v tlaku vrtačkou KV-3; (b) zkušební těleso č.5 po dosažení maximální síly.

Zkušební vzorky malty byly nejprve zváženy a byly stanoveny jejich rozměry s přesností na desetiny milimetru. Následně byly zatěžovány podle postupu uvedeného v [158]. Rozměry, hmotnosti, objemové hmotnosti a výsledné pevnosti v tlaku jsou uvedeny v Tab. 8 [153].

Tab. 8. Rozměry, hmotnosti, objemové hmotnosti a výsledné pevnosti v tlaku zdicí malty [153].

označení vzorku	délka	šířka	výška	hmotnost	objemová hmotnost	síla při porušení	jednotlivé pevnosti malty	průměrná pevnost malty
-	$l_u$	$b_u$	$h_u$	$m_d$	$\rho_{g,u}$	$F_{max}$	$f_{m,i}$	$f_m$
[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kN]	[MPa]	[MPa]
1	39,9	39,4	40,0	130,1	2070	4,9	3,1	3,0
2	38,5	39,2	39,9	124,7	2080	4,2	2,8	
3	39,5	39,5	38,9	127,4	2100	4,8	3,1	
4	39,2	40,0	39,1	127,2	2080	5,1	3,3	
5	39,9	40,0	38,6	128,8	2100	4,9	3,0	
6	39,6	39,1	39,3	125,9	2070	4,5	2,9	

Na zkušebních tělesech M1 a M2 bylo provedeno ověření hloubky vrtu pomocí vrtačky KV - 3. Tyto hodnoty byly porovnány s měřením hloubky vrtů na pilířích v požadovaném procentuálním nasycení. Rozdíly v hloubkách vrtů mezi zkušebními tělesy a maltou zabudovanou v pilířích byly zanedbatelné. Minimální rozdíly vznikly pouze vlivem kvality malty v jednotlivých spárách, nikoli rozdílným procentuálním nasycením. Z tohoto důvodu bylo dále uvažováno pro všechny pilíře s pevností malty v tlaku  $f_m = 3,0 \text{ MPa}$ .

Po stanovení pevnosti v tlaku zdicích prvků ( $f_b$ ) a pevnosti v tlaku malty ( $f_m$ ) byla stanovená charakteristická pevnost v tlaku zdiva [155] a [156].

$$f_k = K \times f_b^\alpha \times f_m^\beta \quad (19)$$

- Kde:
- $f_k$  je charakteristická hodnota pevnosti zdiva v tlaku v MPa,
  - $K$  je konstanta závislá na druhu zdiva a skupině zdicích prvků ( $K = 0,44$ ),
  - $f_b$  je normalizovaná pevnost v tlaku zdicích prvků v MPa,
  - $f_m$  je průměrná pevnost malty v tlaku v MPa,
  - $\alpha$  je exponent závislý na tloušťce ložných spár a druhu malty ( $\alpha = 0,7$ ),
  - $\beta$  je exponent závislý na druhu malty ( $\beta = 0,3$ ).

Tab. 9. Pevnost zdicích prvků a malty v tlaku a charakteristická pevnost zdiva jednotlivých pilířů [153].

označení pilířů	procentuální nasycení	vlhkost	normalizovaná pevnost v tlaku zdicích prvků	pevnost v tlaku malty	charakteristická pevnost zdiva
-	-	$w$	$f_b$	$f_m$	$f_k$
[-]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
A	0	0,0	12,6		3,6
B	28,7	4,8	10,5		2,1
C	48,8	8,2	11,2	3,0	2,2
D	73,6	12,0	11,3		2,2
E	100	15,7	9,8		2,0

Charakteristická hodnota pevnosti zdiva v tlaku ( $f_k$ ) byla určena na základě normalizované pevnosti v tlaku zdicích prvků ( $f_b$ ) a pevnosti malty v tlaku ( $f_m$ ). Návrhovou pevnost zdiva ( $f_d$ ) získáme jako podíl charakteristické pevnosti zdiva a součinu součinitelů  $\gamma_{m1}$  až  $\gamma_{m4}$ . Tyto součinitele zohledňují vlivy, které ovlivňují pevnost zdiva v tlaku [156]:

- základní hodnota dílčího součinitele ( $\gamma_{m1} = 2,0$ )
- pravidelnost vazby zdiva a vyplnění spár maltou ( $0,85 \leq \gamma_{m2} \leq 1,20$ ),
- zvýšenou vlhkost zdiva ( $1,00 \leq \gamma_{m3} \leq 1,25$ ),
- svislé a šikmé trhliny ve zdivu ( $1,00 \leq \gamma_{m4} \leq 1,40$ ).

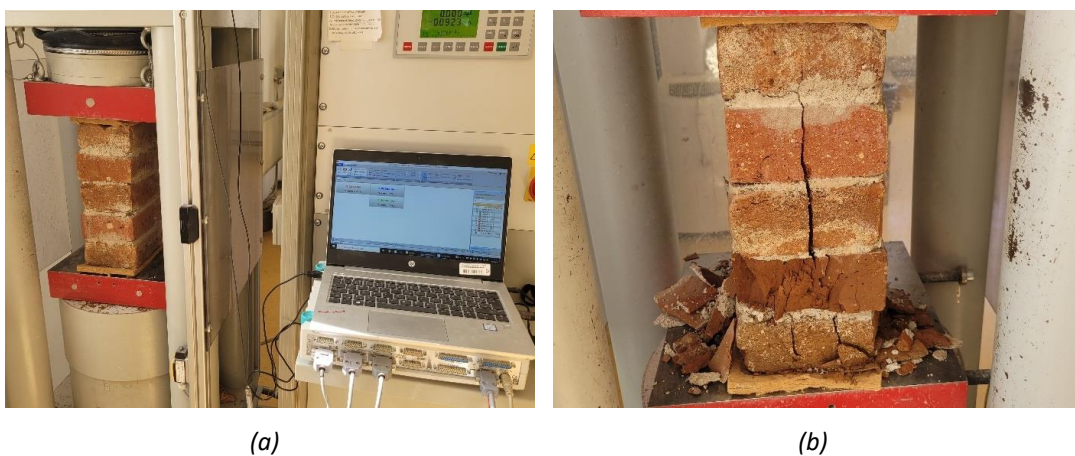
Pilíře byly bez trhlin, vyplnění spár maltou bylo předpokládáno jako téměř bezchybné a vazba zdiva byla pravidelná. Jedinou proměnnou tak zůstává právě vlhkost zdiva. Součinitel zohledňující vlhkost zdiva  $\gamma_{m3}$  se pro vlhkosti v rozmezí 4 % až 20 % lineárně interpoluje mezi hodnotami 1,00 až 1,25. Pro účely této práce byla návrhová pevnost zdiva stanovena dvěma způsoby. První byla návrhová pevnost vyhodnocena podle [156]. Hodnota součinitele byla lineárně interpolována pro konkrétní vlhkosti pilířů, tato pevnost je označena  $f_d$ . Ve druhém

případě byla hodnota součinitele  $\gamma_{m3}$  pro všechny pilíře rovna  $\gamma_{m3}^* = 1,0$ . V tomto případě je pevnost zdiva označená  $f_d^*$ . Tento přístup byl zvolen tak, aby bylo možné sledovat vliv tohoto součinitele na pevnost zdiva v tlaku. Hodnoty jednotlivých součinitelů, pevností zdiva  $f_d$  a pevnosti zdiva  $f_d^*$  jsou uvedeny v Tab. 10 [153].

Tab. 10. Hodnoty součinitelů zahrnující vlivy na pevnost zdiva v tlaku, návrhová pevnost v tlaku  $f_d$  a návrhová pevnost zdiva v tlaku  $f_d^*$  ( $\gamma_{m3}^* = 1,0$ ) [153].

označení pilíře	vlhkost [%]	$\gamma_{m1}$ [-]	$\gamma_{m2}$ [-]	$\gamma_{m3}$ [-]	$\gamma_{m4}$ [-]	$\gamma_m$ [-]	$\gamma_m^*$ [-]	$f_d$ [MPa]	$f_d^*$ [MPa]
A	0,0			1,000		1,80		2,0	2,0
B	4,8			1,010		1,82		1,1	1,1
C	8,2	2,0	0,9	1,070	1	1,93	1,80	1,1	1,2
D	12,0			1,125		2,03		1,1	1,2
E	15,7			1,183		2,13		0,9	1,1

Pro ověření NDT měření byla pevnost v tlaku následně stanovena destruktivně. Pevnost byla určena pro každý pilíř v daném procentuálním nasycení. Rychlost zatěžování byla zvolena tak, aby k porušení došlo během 15 až 30 minut od začátku zatěžování. Z tohoto důvodu byla zvolena rychlost zatěžování 0,2 kN/s, která odpovídá odhadované pevnosti pilířů přibližně 5 MPa (Obr. 47), což odpovídá ČSN EN 1052-1.



Obr. 47. Stanovení pevnosti v tlaku zdiva pilířů destruktivně [153]; (a) zatěžovací soustava; (b) cihelný pilíř po dosažení maximální síly.

V Tab. 10 jsou uvedeny rozměry zatěžovací plochy a maximální síly dosažené při porušení pilířů. Výsledná pevnost v tlaku byla stanovena jako podíl maximální síly ku zatěžovací ploše.

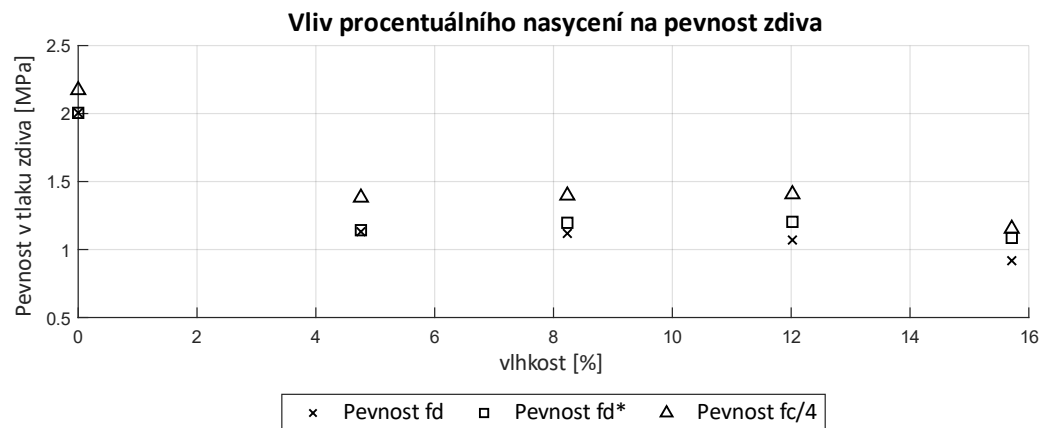
Pevnost stanovená v tlaku destruktivně bývá obvykle přibližně čtyřnásobně vyšší než pevnost v tlaku stanovená pomocí nedestruktivních metod, z tohoto důvodu je v tabulce uváděná také hodnota  $f_c/4$ . Toto pozorování bylo zjištěno z řady předchozích měření autorů této práce. Obdobné závěry jsou uvedeny v [159]. V případě destruktivní zkoušky se totiž

jedná o krátkodobou pevnost v tlaku, která je vyšší než pevnost dlouhodobá. Dalším důvodem je zahrnutí statistiky a spolehlivosti již během stanovení charakteristické pevnosti zdiva v tlaku stanovené nedestruktivními metodami [153].

Tab. 11. Pevnost v tlaku jednotlivých pilířů stanovená destruktivně [153].

označení pilíře -	procentuální nasycení -	zatěžovaná plocha A	maximální dosažená síla $F_{max}$	pevnost v tlaku $f_c$	1/4 pevnosti v tlaku $f_c/4$
[-]	[%]	[mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[MPa]	[MPa]
A	0,0	36974	321,3	8,7	2,2
B	28,7	39440	218,0	5,5	1,4
C	48,8	38475	215,0	5,6	1,4
D	73,6	38908	218,9	5,6	1,4
E	100,0	38880	179,3	4,6	1,2

Vliv procentuálního nasycení (vlhkosti) na pevnost zdiva v tlaku je zobrazen na Obr. 48. Pevnost stanovená destruktivně je zde uváděna jako  $f_c/4$  z důvodů uvedených dříve. Dále je zde uvedena pevnost v tlaku  $f_d$  stanovená NDT měřením, kde byl součinitel  $\gamma_{m3}$  stanoven lineární interpolací podle odpovídající vlhkosti. Poslední uváděnou hodnotou je pevnost  $f_d^*$ , stanovená rovněž z NDT měření, ale součinitel  $\gamma_{m3}$  byl uvažován jako 1,0 pro všechny vlhkosti pilířů [153].



Obr. 48. Vliv vlhkosti na pevnosti v tlaku stanovené nedestruktivně ( $f_d$  a  $f_d^*$ ) a destruktivně ( $f_c$ ) [153].

### 5.2.2.3 Závěr a diskuse měření

Z Obr. 45 a Obr. 48 lze vyvodit závěry potvrzující původní předpoklady. Při stanovení pevnosti zdiva v tlaku nedestruktivními metodami, konkrétně pomocí Schmidtu LB, dochází ke snížení pevnosti již během měření. Důvodem je „změknutí“ zdicích prvků vlivem zvýšené vlhkosti, což se projeví nižšími hodnotami odrazů a tím nižší pevností. Pevnost v tlaku zdiva

( $f_d^*$ ), kde byl součinitel  $\gamma_{m3} = 1,0$  pro všechny vlhkosti, přibližně odpovídá pevnostem stanoveným destruktivně. V případě pevnosti v tlaku stanovené nedestruktivně ( $f_d$ ), kde byl součinitel  $\gamma_{m3}$  lineárně interpolován podle zvyšující se vlhkosti, dochází ke zvětšování rozdílů mezi pevnostmi stanovenými destruktivně ( $f_c/4$ ) a nedestruktivně ( $f_d$ ). Největší rozdíl, je pochopitelně u pilíře E, kde byla nejvyšší vlhkost (nejvyšší hodnota součinitele  $\gamma_{m3}$ ). V tomto případě tvoří rozdíl mezi pevnostmi  $f_d$  a  $f_d^*$  15,5 %, tento rozdíl však může teoreticky dosahovat až hodnoty 20 %.

Při stanovení pevnosti v tlaku zdicích prvků na odebraných vzorcích (celé zdicí prvky), případně na jejich reprezentativních částech (jádrové vývrty), které jsou zkoušeny ve vysušeném stavu, má součinitel  $\gamma_{m3}$  opodstatnění.

Pro vyhodnocení pevnosti zdiva by mělo být bráno v úvahu, jakou metodou byly dílčí pevnosti zdicích prvků a malty stanoveny. Při využití NDT metody (Schmidt LB) dochází k nadměrnému snižování pevnosti zdiva vlivem jeho vlhkosti. To může vést k podhodnocení pevnosti cihelného zdiva, což může mít negativní důsledky ekonomické, v případě nadbytečných zásahů do konstrukce, ale v krajních případech může dojít k poničení památkových objektů.

Nabízí se také otázka, zda pevnost snižovat na základě jejich vlhkosti nebo procentuálního nasycení. Historické cihly plně pálené jsou velmi rozmanitým materiálem a jejich nasákavost se může výrazně lišit. Stejná vlhkost (stejný součinitel  $\gamma_{m3}$ ) bude mít jiný vliv na prvky s velkou nasákavostí a na prvky s nízkou nasákavostí. V případě procentuálního nasycení tento problém zaniká. Stanovení procentuálního nasycení je však při posuzování zdiva v konstrukci velmi problematické [153].

### 5.2.3 Vliv směru zatěžování na pevnost v tlaku

Výsledky tohoto měření dosud nebyly zveřejněny a jsou součástí rozsáhlejšího výzkumu s názvem *Mechanical F-T regeneration of historical bricks*, který je momentálně zpracováván.

V cihlách plných pálených se mohou vyskytovat vrstvy, které vznikly během jejich výroby vlivem nedokonalého promíchání cihlářské hlíny a jejím následným ukládáním do forem. Lze předpokládat, že tyto vrstvy mají vliv na mechanické vlastnosti. Jejich vliv na pevnost závisí na směru zatěžování, tedy na tom, zda vzorek zatěžujeme ve stejném směru jako je uložení cihly v konstrukci, anebo kolmo na tento směr. Tato problematika zatím nebyla dostatečně prozkoumána, což může mít největší dopad v případě destruktivního stanovení pevnosti

zdicích prvků na jádrových vývrtech odebraných z konstrukce. Právě zde je pevnost stanovena v odlišném směru od orientace uložení cihel v konstrukci.

### 5.2.3.1 Postup měření

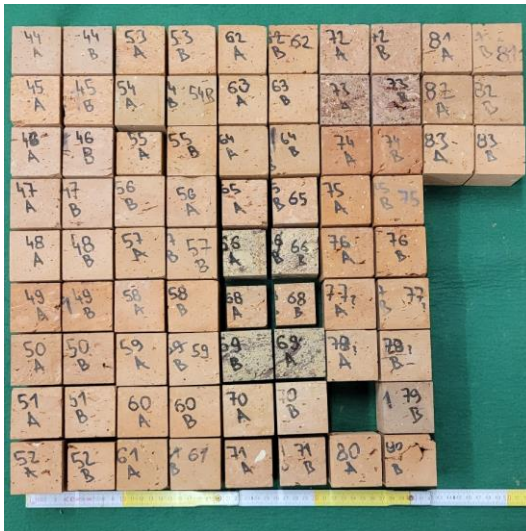
Pro měření bylo vybráno celkem 83 historických plných pálených cihel, převážně z 18. a 19. století (Obr. 49(a)). Tyto cihly byly rozděleny do osmi sad (označených písmeny A, B, D, E, F, H, I a J) podle jejich značení (tzv. kolků) a přibližného stáří. Toto rozdělení bylo provedeno s cílem sledovat, jaký vliv má směr zatěžování na plné pálené cihly různého stáří a s tím související technologický postup výroby.

Dále bylo ověřeno, zda cyklické zmrazování a rozmrazování ovlivní rozdíly v pevnostech v tlaku stanovených v různých směrech. Za tímto účelem je nutné vytvořit soubor referenčních (srovnávacích) vzorků, které nejsou podrobeny zkoušce mrazuvzdornosti a soubor vzorků podrobených cyklickému zmrazování a rozmrazování. V případě historických plných pálených cihel je to obtížný úkol, protože nalézt dvě cihly s téměř totožnými vlastnostmi je prakticky nemožné. Z tohoto důvodu byly z každé cihly vyrobeny dva hranoly o rozměrech 250 × 50 × 50 mm (Obr. 49(b)). Celkem tedy bylo vyrobeno 166 takovýchto hranolů. Z každé cihly byl jeden hranol podroben zkoušce mrazuvzdornosti (podrobný popis zkoušky je uveden v kapitole 4.3.1) a druhý hranol z téže cihly sloužil jako referenční (nebyl zmrazován).



Obr. 49. Příprava zkušebních vzorků; (a) historická cihla plná pálená s označením č. 14 z poloviny 19. století; (b) zkušební trámec vytvořený z cihly č. 14 po 25 zmrazovacích cyklech.

Po ukončení 25 zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů byly z každého hranolu vyrobeny celkem 4 krychle o hraně 50 mm, s výjimkou případů, kdy došlo vlivem cyklického zmrazování k porušení trámců. Celkem tedy bylo vytvořeno přibližně 660 zkušebních těles pro stanovení pevnosti v tlaku (Obr. 50 (a)). Na těchto krychlích byla stanovena pevnost v tlaku (Obr. 50 (b)), postup je popsán v kapitole 4.3.3.



(a)



(b)

Obr. 50. Stanovení pevnosti v tlaku zkušebních vzorků; (a) část zkušebních vzorků z jejich celkového množství 660 kusů; (b) zkušební vzorek po dosažení maximální síly.

Pro sledování vlivu směru zatěžování byly vždy dvě ze čtyř krychlí z jednoho hranolu zatěžovány ve směru uložení cihly v konstrukci (tento směr je dále označován jako ZR – zatěžování rovnoběžně) a zbylé dvě krychle byly zatěžovány kolmo na směr uložení cihly v konstrukci (tento směr je dále označován jako ZK – zatěžování kolmo).

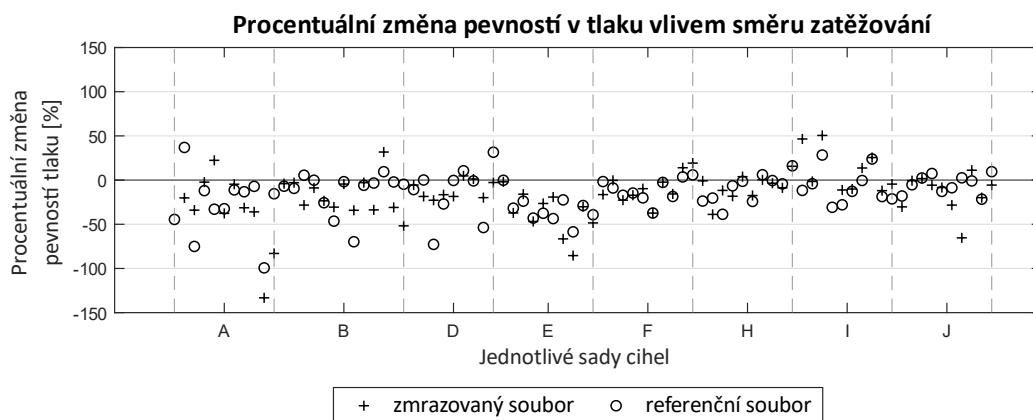
### 5.2.3.2 Výsledky měření

Nejprve byly pevnosti v tlaku krychlí přepočteny na normalizované pevnosti  $f_b$ , aby byl zohledněn vliv rozměrů zkušebních těles. Následně byl stanoven průměr pevností stanovených na dvou krychlích pro totožný směr zatěžování, a to jak pro referenční (nezmrazovaný), tak i pro zmrazovaný soubor.

Zda je pevnost v tlaku ovlivněna směrem zatěžování, bylo posuzováno na základě procentuální změny odpovídajících pevností. Pevnost tedy byla porovnávána mezi krychlemi zatěžovanými ve směru uložení cihly v konstrukci (označeno ZR) a krychlemi zatěžovanými kolmo na směr uložení cihly (označeno ZK). Jako základní pevnost byla brána pevnost ZK. Záporná hodnota procentuální změny pevnosti znamená, že pevnost ZR < ZK a naopak. Pevnosti byly považovány za totožné, pokud byla procentuální změna do  $\pm 0,5 \%$

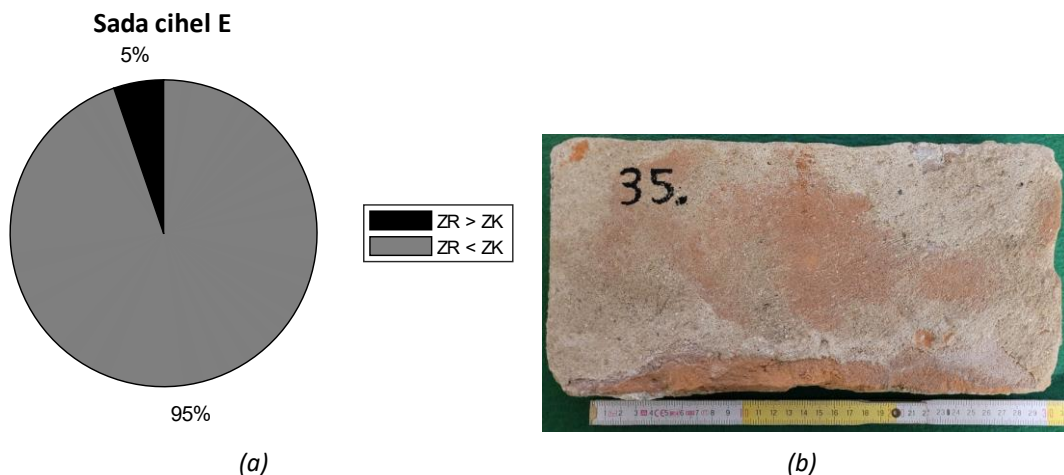
Z Obr. 51 vyplývá, že směr zatěžování má významný vliv na pevnost v tlaku, neboť většina bodů leží mimo hodnotu intervalu  $\pm 0,5 \%$ , a to především pod touto hranicí. V některých případech byl tento rozdíl alarmující, například rozdíly v pevnosti vlivem směru zatěžování cihly s označením č. 10 (sada A) činily pro zmrazovaný soubor  $-124 \%$  (pevnost ve směru ZR

$f_b = 21,1$  MPa a ve směru ZK  $f_b = 47,2$  MPa) a pro referenční soubor -101 % (pevnost ve směru ZR  $f_b = 26,1$  MPa a ve směru ZK  $f_b = 52,5$  MPa).

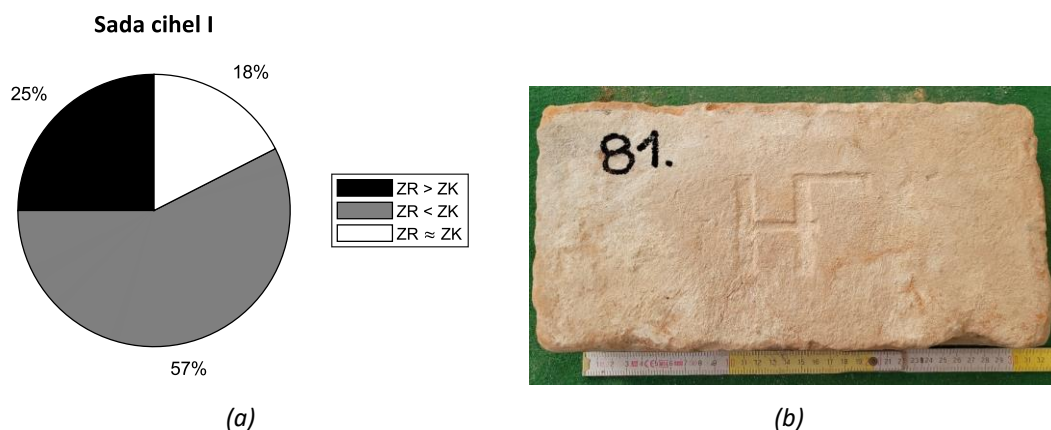


Obr. 51. Procentuální změna pevností v tlaku vlivem směru zatěžování.

Rovněž je zřejmé, že stáří cihly (technologický postup výroby) významně ovlivňuje rozdíly mezi pevnostmi stanovenými zatěžováním ve směru uložení cihly (ZR) a kolmo na tento směr (ZK). Tento jev lze jasně pozorovat na příkladech vzorků ze sady E (Obr. 52) a vzorků ze sady I (Obr. 53). V případě vzorků ze sady E byly pevnosti stanovené ve směru ZR menší než směru ZK v 95 % případů. Oproti tomu u sady I byly pevnosti stanovené ve směru ZR menší než ve směru ZK pouze v 57 % případů.



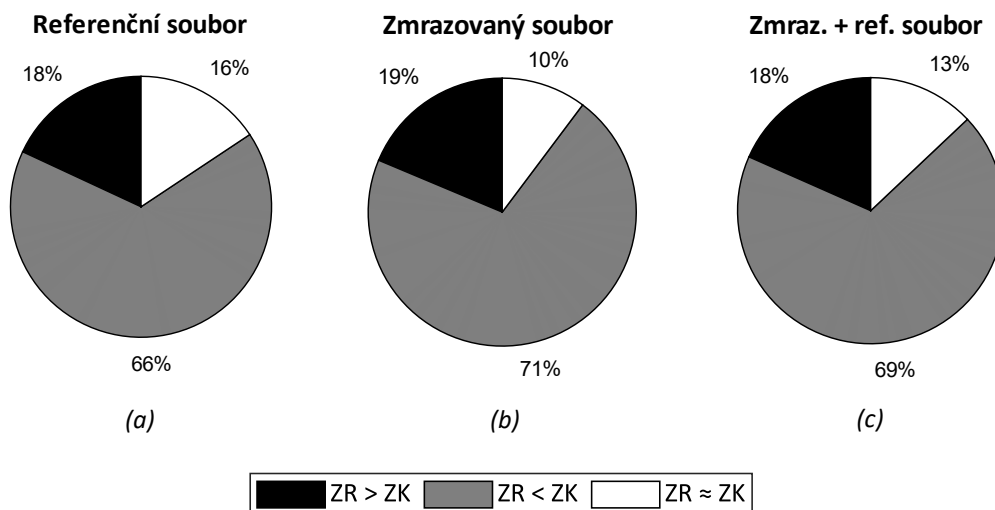
Obr. 52. Srovnání vlivu směru zatěžování na pevnost v tlaku pro zkušební sadu E (referenční i zmrazované vzorky), ZR – zatěžováno ve směru uložení cihly v konstrukci, ZK – zatěžováno kolmo na směr uložení cihly v konstrukci; (a) procentuální zastoupení rozdílných pevností – sada E; (b) vzorek ze sady E (polovina 19. stol.).



Obr. 53. Srovnání vlivu směru zatěžování na pevnost pro zkušební sadu I (referenční i zmrazované vzorky), ZR – zatěžováno ve směru uložení cihly v konstrukci, ZK – zatěžováno kolmo na směr uložení cihly v konstrukci; (a) Procentuální zastoupení rozdílných pevností – sada I; (b) vzorek ze sady I (polovina 18. stol. až polovina 19. stol.).

Oproti tomu vliv cyklického zmrazování a rozmrazování se neprokázal jako významný faktor, který by ovlivňoval pevnosti v tlaku stanovené v odlišných směrech. Procentuální zastoupení vzorků, u kterých byly pevnosti stanovené ve směru ZR menší než ve směru ZK, je téměř totožné jak pro referenční (Obr. 54(a)), tak i pro zmrazovaný soubor (Obr. 54(b)).

Celkové procentuální zastoupení pevností, tedy všech sad cihel referenčního i zmrazovaného souboru, stanovené ve směru ZR, je menší než ve směru ZK v 69 % případů, zatímco vyšší pevnosti ve směru ZR byly pozorovány pouze v 18 % případů. Pevnosti se shodovaly (rozdíl do  $\pm 0,5$  %) ve 13 % případů (Obr. 54(c)).



Obr. 54. Procentuální zastoupení rozdílných pevností vlivem směru zatěžování pro všechny zkušební sady a závislost cyklického zmrazování na tyto pevnosti, ZR – zatěžováno ve směru uložení cihly v konstrukci, ZK – zatěžováno kolmo na směr uložení cihly v konstrukci; (a) referenční (nezmrazovaný) soubor; (b) zmrazovaný soubor; (c) referenční i zmrazovaný soubor.

### 5.2.3.3 Závěr a diskuse měření

Výsledky tohoto měření potvrdily prvotní předpoklady, že pevnosti v tlaku jsou ovlivněny směrem zatěžování. Důvodem jsou vrstvy, které v cihlách vznikly během jejich výroby. Bylo prokázáno, že vliv výroby (stáří cihly) je v této problematice významným faktorem.

Naopak vliv cyklického zmrazování na tuto problematiku nebyl prokázán. Je však nutné uvážit minulost zkušebních vzorků. Jednalo se o historické cihly, které od doby jejich výroby prošly několika zmrazovacími cykly vlivem působení klimatických podmínek. Z tohoto důvodu může být významnost tohoto faktoru zkreslená.

Celkové procentuální zastoupení pevností, tedy všech sad cihel referenčního i zmrazovaného souboru, stanovené ve směru stejném jako je uložení cihly v konstrukci (ZR) je menší než ve směru zatěžování kolmo na směr uložení cihly v konstrukci (ZK) v 69 % případů, naopak je tomu tak v 18 %. Pevnosti se shodovaly (rozdíl do  $\pm 0,5$  %) v 13 % případů. Rozdílné pevnosti jsou s největší pravděpodobností způsobeny „stlačováním“ jednotlivých vrstev v případě zatěžování vzorků ve směru uložení cihly v konstrukci, což má za následek snížení jejich pevnosti.

Především při stanovování pevnosti zdicích prvků na jádrových vývrtech odebraných z konstrukce se může jednat o významný problém. V tomto případě je jádrový vývrt obvykle zatěžován ve směru kolmém na směr uložení cihly v konstrukci, což může vést ke stanovení vyšších pevností, než jaké jsou reálné v samotné konstrukci. Podobný problém může nastat i v případě, kdy je pevnost stanovena na reprezentativních vzorcích (například krychle) a směr zatěžování není kontrolován.

Ovlivnění pevností vlivem směru zatěžování se liší podle stáří cihel (odlišné výrobní technologie) a není tedy možné stanovit obecný součinitel, který by tento problém řešil. Jako možné řešení se nabízí provádět jádrové vývrty o průměru 75 mm, ze kterých budou následně vytvořeny krychle o hraně 50 mm. Tyto krychle pak budou zatěžovány ve směru uložení cihly v konstrukci. Pro praxi se však jedná o poměrně náročný proces, a je proto minimálně nutné mít tuto skutečnost při vyhodnocování pevnosti cihelného zdiva v tlaku na paměti.

## 5.3 Predikce trvanlivosti zdicích prvků NDT metodami

Tato část práce se zaměřuje na hlavní téma, a sice predikci trvanlivosti zdicích prvků pomocí moderních elektroakustických přístrojů, které jsou nedestruktivní. Než bylo možné provést samotnou predikci trvanlivosti, bylo nezbytné ověřit vliv vlhkosti na měření a také prohloubit

znalosti o vývoj defektů ve vnitřní struktuře prvků. Oba tyto faktory mají přímý vliv na trvanlivost cihel.

### 5.3.1 Vliv vlhkosti na vlastnosti zdicích prvků

Tato práce byla publikována v rámci mezinárodní konference Young Scientist 2021 [160] a představuje první krok k nastavení kritérií pro predikci trvanlivosti plných pálených cihel pomocí nedestruktivních metod, jako je metoda Impact-Echo (*IE*) nebo ultrazvuková impulsní metoda (*UZ*).

Vliv vlhkosti, či přesněji nasákavosti, má nepochybně významný dopad na trvanlivost pálených cihel. Vlhkost rovněž ovlivňuje mechanické vlastnosti cihelných výrobků, jako je pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku. Často se uvažuje pouze s maximální vlhkostí (nasákavostí) a jsou sledovány změny vlastností ve srovnání s vysušeným stavem. Běžně se předpokládá lineární průběh poklesu, jak je uvedeno například v ČSN 730038 [156], kde je pevnost zdiva v tlaku lineárně redukována s rostoucí vlhkostí. Avšak lineární pokles mechanických a deformačních vlastností v závislosti na rostoucí vlhkosti se jeví jako velmi nepřesný, jak je zmíněno v [161], kde byl kromě jiného zkoumán vliv vlhkosti na změnu modulů pružnosti nebo na pevnost v tlaku cihelného zdiva [160].

#### 5.3.1.1 Postup měření

Cílem tohoto výzkumu bylo sledovat změny vlastností plných pálených cihel v závislosti na vlhkosti pomocí nedestruktivních metod. Sledovanými vlastnostmi byly první vlastní frekvence podélného kmitání –  $f_l$  a příčného kmitání –  $f_f$  pomocí metody impact-echo. Pomocí této metody byly stanoveny také první vlastní frekvence kroutivého kmitání –  $f_t$ , nicméně kvůli defektům ve vzorcích nebyly tyto data vyhodnotitelné. Dalšími stanovenými vlastnostmi byly rychlosti šíření ultrazvukových vln v podélném a příčném směru vzorků. Rychlost šíření ultrazvukových vln byla stanovena ve třech místech pro oba směry, z těchto hodnot byl následně spočítán aritmetický průměr. Pro tento účel bylo vybráno celkem 10 zkušebních vzorků, pocházejících jak z období baroka a renesance, tak i gotiky.

Vzorky byly nejprve vysušeny do ustálené hmotnosti a následně byla stanovena frekvenční spektra a doby průchodu *UZ* vln, které byly následně přepočteny na rychlosti šíření *UZ* vln. Proces měření je detailněji popsán v kapitolách 4.2.1 a 4.2.2.

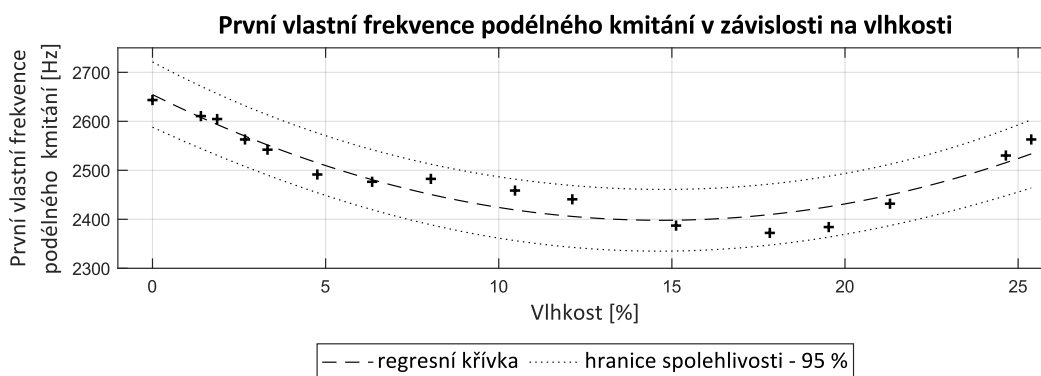
Po stanovení základních vlastností, jako jsou rozměry a objemové hmotnosti, byly vzorky plně nasycené a poté pomalu sušeny při teplotě +75 °C. Každou hodinu byly vzorky po vychladnutí zváženy a byly zaznamenány frekvenční spektra a doby průchodu *UZ* vln. Tento

postup byl zvolen, aby bylo možné získat co nejvíce dat odpovídajících různým úrovním vlhkosti. Po dosažení ustálené hmotnosti byly pro kontrolu, zda během experimentu nedošlo k poškození prvků, znovu stanoveny první vlastní frekvence a doby průchodu *UZ* vln [160].

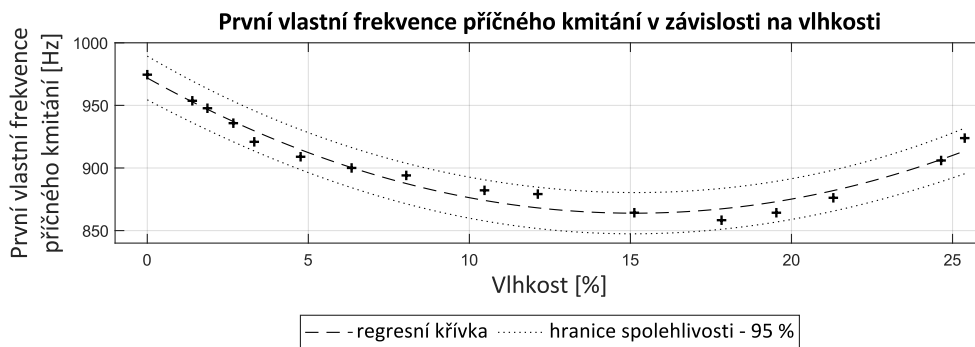
### 5.3.1.2 Výsledky měření

Navzdory rozsáhlému množství naměřených hodnot není možné plně postihnout všechny vlhkosti a odpovídající první vlastní frekvence a rychlosti šíření *UZ* vln. Proto musely být naměřené hodnoty interpolovány vhodným regresním modelem podle [150] a [151].

I přes pochybnosti byl nejprve zvolen lineární regresní model. Byla sestrojena projekční matice  $H$ . Diagonální prvky této matice  $h_{ii}$  byly vyneseny do grafu v závislosti na vlhkosti. Z diagonálních prvků  $h_{ii}$  matice  $H$  bylo patrné, že modelu chybí kvadratický člen (patrný tvar paraboly). Následně byl jako regresní model zvolen polynom třetího stupně. Byl proveden *t-test* významnosti regresních parametrů [150]. Regresní parametr  $\theta_3$ , tedy parametr polynomu třetího stupně, byl podle *t-testu* statisticky nevýznamný. Jako nejvhodnější regresní model pro první vlastní frekvence a rychlosti šíření *UZ* vln v závislosti na vlhkosti se tedy jeví polynom druhého stupně. Koeficient (index) determinace  $R^2$  se ve většině případů pohybuje nad hodnotou 0,9 (blízké 1,0), což svědčí o vhodně zvoleném regresním modelu. Závislost prvních vlastních frekvencí stanovených pomocí *IE* je na Obr. 55 a Obr. 56 [160].

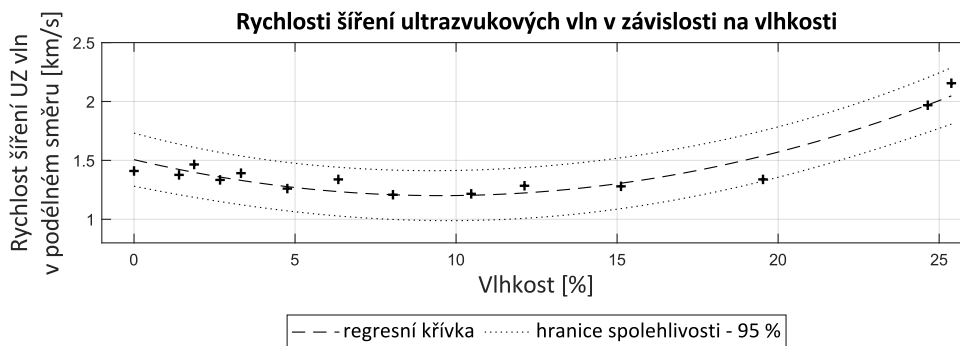


Obr. 55. Vliv vlhkosti na první vlastní frekvence podélného kmitání [160].

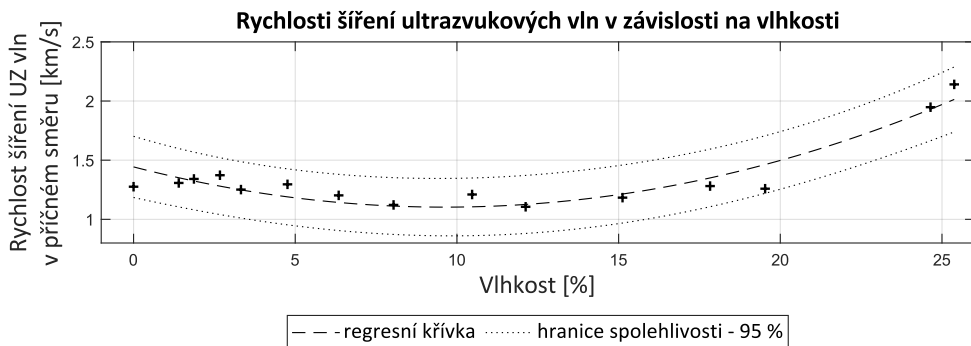


Obr. 56. Vliv vlhkosti na první vlastní frekvence příčného kmitání [160].

Závislost rychlosti šíření ultrazvukových vln na vlhkosti lze pozorovat na Obr. 57 a Obr. 58.



Obr. 57. Vliv vlhkosti na hodnoty stanovené pomocí UZ metody v podélném směru vzorku [160].



Obr. 58. Vliv vlhkosti na hodnoty stanovené pomocí UZ metody v příčném směru vzorku [160].

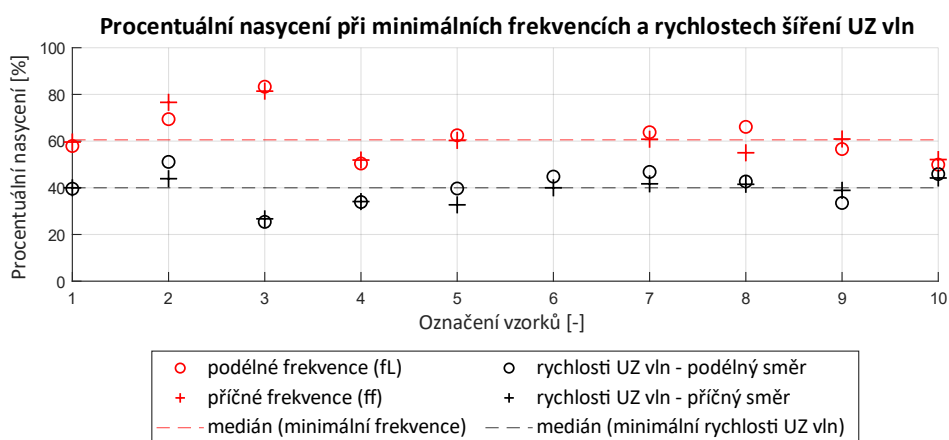
Nasákavost zkušebních prvků je velmi různorodá, pohybuje se od 13 % až do 30 %. Aby bylo možné kritické hodnoty jednotlivých prvků navzájem srovnat, byly vlhkosti odpovídající minimálním vlastním frekvencím a rychlostem šíření ultrazvukových vln přepočítány na procentuální nasycení vzhledem k nasákavosti jednotlivých prvků. Nasákavosti prvků a procentuální nasycení při minimálních frekvencích a rychlostech šíření ultrazvukových vln jsou uvedeny v Tab. 12 [160].

Tab. 12. Nasákavost a proc. nasycení odpovídající minimálním frekvencím a rychlostem šíření UZ vln.

vzorek -	nasákavost $w_s$	procentuální nasycení při minimálních frekvencích		procentuální nasycení při min. rychlostech šíření UZ vln	
		podélné frekvence $f_L$	příčné frekvence $f_f$	v podélném směru $v_{L-L}$	v příčném směru $v_{L-T}$
[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
1	25,4	57,9	59,6	39,6	40,0
2	13,8	69,4	76,6	51,1	43,9
3	20,3	83,3	81,4	25,4	26,7
4	14,0	50,4	51,9	33,9	34,1
5	17,4	62,5	60,3	39,7	32,7
6	30,1	-	-	44,8	40,0
7	19,9	63,8	60,8	46,8	41,7
8	22,1	66,1	55,0	42,7	41,5
9	12,7	56,6	60,9	33,5	38,9
10	24,2	49,9	52,1	45,9	44,2
min	12,7	49,9	51,9	25,4	26,7
med	20,1	62,5	60,3	41,2	40,0
max	30,1	83,3	81,4	51,1	44,2

V případě prvku č. 6 nebylo možné stanovit minimální první vlastní frekvence kvůli jeho velmi špatné kvalitě. Procentuální nasycení odpovídající minimálním frekvencím podélného kmitání –  $f_L$  a příčného kmitání –  $f_f$  dosahuje téměř totožných hodnot. Medián procentuálního nasycení pro minimální první vlastní frekvence podélného kmitání je 62,5 % a pro příčné kmitání 60,3 %.

Minimální rychlosti šíření ultrazvukových vln byly dosaženy při nižších procentuálních nasyceních, než tomu bylo v případě metody IE. Pro podélný směr je medián procentuálního nasycení 41,2 % a pro příčný směr 40,0 % (Obr. 59) [160].



Obr. 59. Procentuální nasycení při minimálních frekvencích a rychlostech šíření UZ vln [160].

### **5.3.1.3 Závěr a diskuse měření**

Z výsledků výzkumu vyplývá, že závislost sledovaných vlastností na vlhkosti má průběh blízký polynomu druhého stupně. Při posuzování stávajících staveb je komplikované bez větších zásahů do konstrukce stanovit nasákavost jednotlivých prvků a určit, při jaké vlhkosti (procentuálním nasycení) jsou vlastnosti zdících prvků nejproblematictější. Je však důležité brát v úvahu, že pokles mechanických a fyzikálních vlastností v závislosti na vlhkosti není lineární a má spíše parabolický průběh.

Tento problém si zaslouží zvýšenou pozornost, zejména u cihelných staveb, které nejsou vytápěny a trvale nejsou využívány, jako například nižší podlaží zámků, muzeí nebo sakrálních staveb, kde je relativní vlhkost nad 60 % a hmotnostní vlhkost cihelného zdiva nad 10 % [161]. Právě v takovém případě bychom se při uvažování lineárního průběhu poklesu vlastností cihelného zdiva vlivem zvýšené vlhkosti dopouštěli nejvýraznějších chyb na stranu nebezpečnou [160].

### **5.3.2 Rozvoj vad ve vnitřní struktuře vlivem cyklického zmrazování**

Tato práce byla publikována v rámci mezinárodní konference International Conference on Rehabilitation and Reconstruction of Buildings 2021 [162].

Vliv defektů ve vnitřní struktuře cihel nepochybně ovlivňuje jejich trvanlivost, což je podrobně rozpracováno v kapitole 3.1.3. Pro predikci trvanlivosti cihel je nezbytné hlubší pochopení změn těchto defektů v důsledku cyklického zmrazování a rozmrazování, ale také jejich projevů na změřených datech za použití nedestruktivních elektroakustických metod.

Výzkum se zaměřuje na sledování rozvoje defektů ve vnitřní struktuře cihel, ale také na jejich závislosti na rozvoji povrchových defektů, jako jsou odštěpky nebo vznik trhlin či prasklin [162].

#### **5.3.2.1 Postup měření**

Cílem této práce je nedestruktivně sledovat vady ve vnitřní struktuře zkušebních prvků a jejich rozvoj vlivem opakovaného zmrazování a rozmrazování. Měření rozvoje defektů probíhalo dlouhodobě i během jiných výzkumných prací. Postup byl však vždy stejný. Vzorky byly nejprve vysušeny do ustálené hmotnosti, pečlivě prohlédnuty a zdokumentovány všechny jejich povrchové vady. Dále byly stanoveny základní charakteristiky jako rozměry, objemové hmotnosti apod. Následně byly vzorky nasyceny varem (kapitola 4.1.1). V plně nasyceném stavu byly stanovené počáteční hodnoty prvních vlastních frekvencí pomocí

metody *IE* (pro podélné  $f_L$ , příčné  $f_f$  i krouživé kmitání  $f_t$ ) a doby průchodu pomocí ultrazvukové metody, a to ve třech měřeních pro příčný a podélný směr vzorků.

Následně byly cihly podrobeny cyklickému zmrazování a rozmrazování, podrobný postup je uveden v kapitole 4.3.1. Po každých 5 zmrazovacích cyklech byl u prvků zdokumentován rozvoj povrchových vad (trhlin nebo odštěpků zkušebních vzorků). Byly opětovně stanoveny první vlastní frekvence a doby průchodu ultrazvukových vln. Konečný počet takto provedených zmrazovacích cyklů byl 25, což odpovídá kategorii mrazuvzdornosti F1 – mírně agresivní prostředí [162].

### 5.3.2.2 Výsledky měření

Pro sledování rozvoje vad ve vnitřní struktuře zkušebních prvků vlivem cyklického zmrazování a rozmrazování byl využit relativní dynamický modul pružnosti (*RDM*). Pro stanovení *RDM* se využívají pouze první vlastní frekvence, respektive doby průchodu ultrazvukových vln. Do výpočtu tak nevstupují jiné proměnné veličiny, které by mohly ovlivňovat výsledky. *RDM* se běžně používá při posuzování porušení vnitřní struktury během zmrazování betonových zkušebních těles [65], ale je aplikovatelný i na jiné materiály [162]. Podrobně je tento postup popsán v kapitole 4.2.1 a 4.2.2.

Byly stanovené *RDM* pomocí metody *IE* z prvních vlastních frekvencí:

- $RDM_{FL}$  – z podélného kmitání
- $RDM_{FT}$  – z krouživého kmitání
- $RDM_{FF}$  – z příčného kmitání

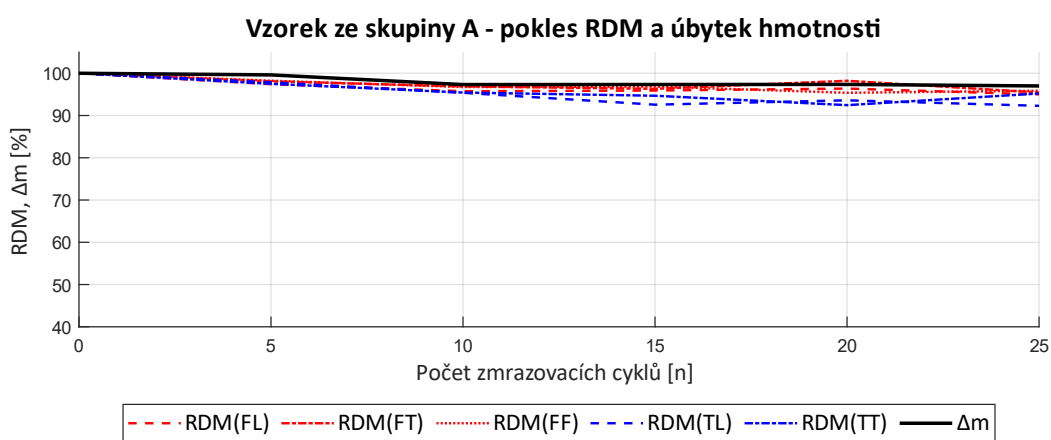
Dále byly stanovené *RDM* pomocí ultrazvukové metody:

- $RDM_{TL}$  – z dob průchodu v podélném směru
- $RDM_{TP}$  – z dob průchodu v příčném směru

Pro sledování povrchových změn sloužila změna hmotnosti ( $\Delta m$ ) uváděná jako procentuální úbytek oproti hmotnosti před začátkem cyklického zmrazování a rozmrazování. Tato změna hmotnosti byla zapříčiněna odštěpkou ze vzorků. Ze sledování rozvoje povrchových vad a monitorování vad ve vnitřní struktuře lze konstatovat, že dochází ke 3 typům porušování vzorků, a to [162]:

- A. K rozvoji povrchových vad i vad ve vnitřní struktuře prvku dochází v obdobné míře.
- B. Dochází k rozvoji pouze povrchových vad – rozvoj vad ve vnitřní struktuře je zanedbatelný.
- C. Rozvoj povrchových vad je nezřetelný – dochází pouze k rozvoji vad ve vnitřní struktuře.

U prvku ze skupiny A během zmrazovacích cyklů došlo k rozvoji povrchových vad (vznik drobných trhlin a odštěpků). V obdobné míře došlo u prvku k rozvoji vad ve vnitřní struktuře, které se projevily poklesem *RDM* (Obr. 60). Tento prvek nesplňuje kritéria mrazuvzdornosti dle ČSN 72 2609 [9], z důvodu odštěpků do hloubky větší než 5 mm [162].



(a)

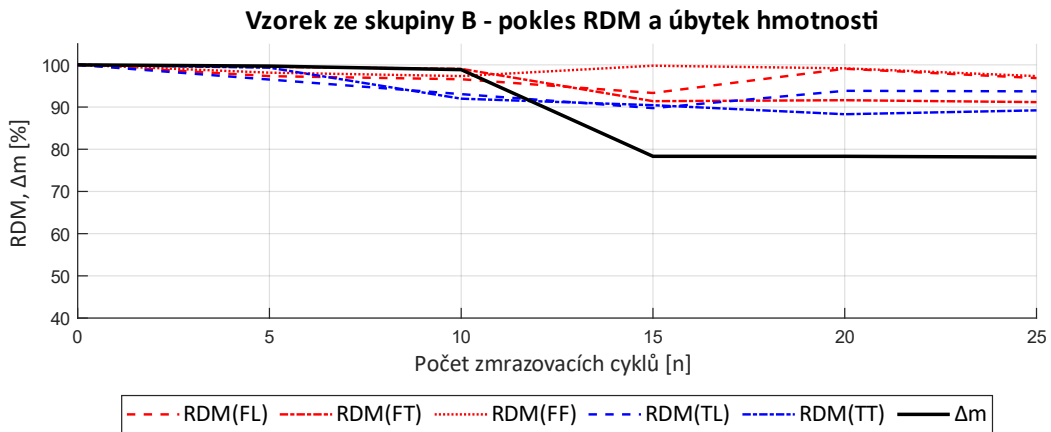


(b)

(c)

Obr. 60. Příklad prvku ze skupiny A [162]; (a) pokles hmotnosti ( $\Delta m$ ) a *RDM*; (b) vzorek před zmrazováním; (c) vzorek po 25 zmrazovacích cyklech.

U prvku ze skupiny B během zmrazovacích cyklů došlo k výraznému rozvoji povrchových vad, a to již po desátém zmrazovacím cyklu (vznik trhlin a odštěpků). Rozvoj vad ve vnitřní struktuře je v tomto případě minimální i po 25 zmrazovacích cyklech. Pokles *RDM* je po 25 zmrazovacích cyklech průměrně 6 % a úbytek hmotnosti 22 % (Obr. 61). Tento prvek rovněž nesplňuje kritéria mrazuvzdornosti dle ČSN EN 72 2609 [9], [162].



(a)



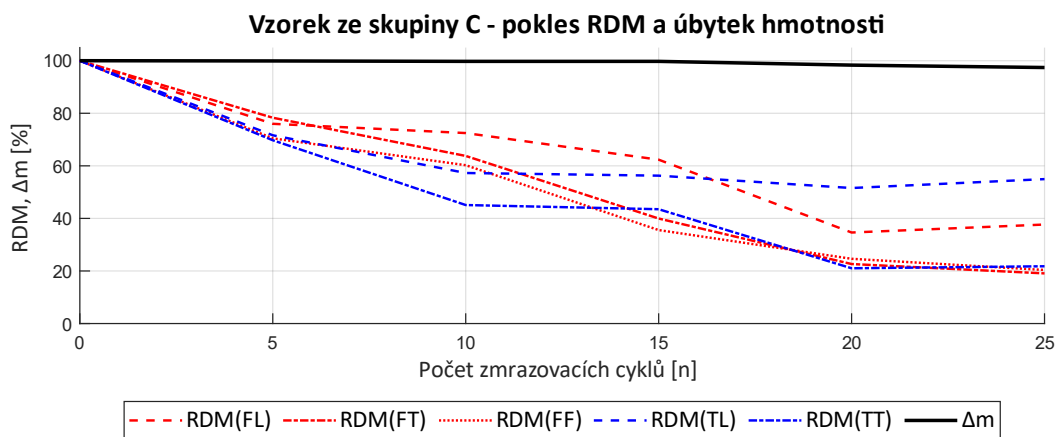
(b)



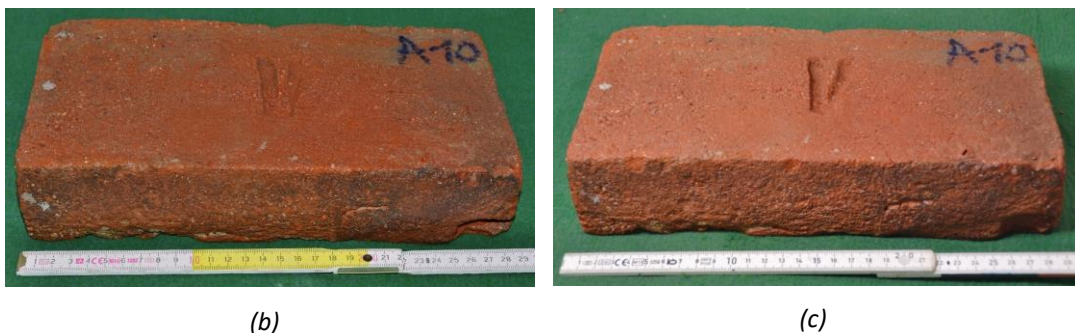
(c)

Obr. 61. Příklad prvku ze skupiny B [162]; (a) pokles hmotnosti ( $\Delta m$ ) a RDM; (b) vzorek před zmrazováním; (c) vzorek po 25 zmrazovacích cyklech.

U prvku ze skupiny C během zmrazovacích cyklů nedošlo k rozvoji povrchových vad ani po 25 zmrazovacích cyklech. Rozvoj vad ve vnitřní struktuře je naopak významný. Pokles RDM je po 25 zmrazovacích cyklech průměrně 69 %, zatímco pokles hmotnosti je pouze 3 % (Obr. 62). Tento prvek splňuje kritéria mrazuvzdornosti dle ČSN EN 72 2609 i přes tento významný pokles RDM, který svědčí o klíčovém rozvoji vad ve vnitřní struktuře [9], [162].



(a)



Obr. 62. Příklad prvku ze skupiny C [162]; (a) pokles hmotnosti ( $\Delta m$ ) a  $RDM$ ; (b) vzorek před zmrazováním; (c) vzorek po 25 zmrazovacích cyklech.

### 5.3.2.3 Závěr a diskuse měření

Z výsledků této práce vyplývá, že vady ve vnitřní struktuře prvků mají výrazný vliv na trvanlivost cihel plných pálených. Na příkladu vzorku ze skupiny C (Obr. 62) však lze vidět, že k rozvoji vad ve vnitřní struktuře může dojít i bez známek porušení na povrchu prvku. Tyto vnitřní vady mohou trvanlivost zdicích prvků výrazně ovlivnit (snížit). U vzorků z této skupiny nedošlo k rozvoji povrchových vad ani po 25 zmrazovacích cyklech. Rozvoj vad ve vnitřní struktuře je naopak významný. Pokles  $RDM$  je po 25 zmrazovacích cyklech průměrně 69 %, ovšem pokles  $RDM_{FT}$  (stanovený z kroutivého kmitání) je až 81 %. Zatímco pokles hmotnosti je pouze 3 %. Tento prvek, i přes velký pokles  $RDM$ , splňuje kritéria mrazuvzdornosti dle ČSN EN 72 2609 [9].

V této normě je také uvedené kritérium mrazuvzdornosti, které částečně rozvoj defektů ve vnitřní struktuře zahrnuje, a to pokles pevností v tlaku do 15 % od deklarované pevnosti. Toto kritérium je však u historických cihel téměř nepoužitelné, neboť neznáme deklarovanou pevnost. Jedinou možností je rozdělit zkušební sadu na referenční (nezmrazovaný) a zmrazovaný soubor. Následně lze stanovit pokles pevností v tlaku zmrazovaného souboru (po ukončení jeho zmrazování) oproti souboru referenčnímu. Jedná se však o náročnou až nemožnou disciplínu, neboť nalézt dvě cihly, natož celý soubor historických cihel s téměř identickými vlastnostmi, je prakticky nemožné. Při posuzování mrazuvzdornosti (trvanlivosti) zdicích prvků bychom se proto měli zaměřit jak na sledování povrchových vad (vznik trhlin a odštěpků), tak i na sledování vad ve vnitřní struktuře, podobně jak je tomu v případě hodnocení mrazuvzdornosti betonových vzorků [65]. Vady ve vnitřní struktuře lze nejlépe sledovat právě pomocí relativních dynamických modulů pružnosti ( $RDM$ ) stanovených metodou impact-echo nebo ultrazvukovou metodou [162].

### 5.3.3 Predikce trvanlivosti zdicích prvků

Rekonstrukce památek historickými cihlami, získanými ze zbouraných objektů, může být především z důvodů velké variability a obtížného sledování kvality prvků náročným úkolem. Z důvodů velké rozmanitosti historických zdicích prvků nelze jejich kvalitu garantovat na základě standardně používaných zkoušek (na odebraných 5 nebo 10 cihlách). Z tohoto důvodu se nabízí využití nedestruktivních metod, pomocí kterých jsme schopni otestovat mnohonásobně větší množství cihel, které mohou být následně zabudovány do konstrukce.

V této práci byly pro predikci trvanlivosti zdicích prvků zvoleny zcela nedestruktivní elektroakustické metody, a to metoda impact-echo a ultrazvuková metoda. Jednotlivé metody a postupy byly zvoleny tak, aby byly aplikovatelné v praxi a zároveň zajišťovaly co největší přesnost výsledků.

Jak již bylo zmíněno dříve, vhodnost zvolených metod byla ověřena během rekonstrukce barokního mostu v obci Sedlec u Mikulova. Byla provedena řada měření historických cihel plných pálených in-situ pomocí metody *IE* a *UZ*. Na základě těchto měření bylo vytypováno celkem 10 zdicích prvků nízké kvality a 10 zdicích prvků s předpoklady pro velmi dobrou kvalitu i trvanlivost.

Vytypované prvky byly následně v laboratoři podrobeny zkoušce mrazuvzdornosti a po 25 zmrazovacích cyklech byly stanoveny mechanické vlastnosti prvků (pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu). Stanovení těchto mechanických vlastností bylo možné pouze u kvalitnějších prvků, neboť u méně kvalitních prvků došlo k jejich rozpadu ještě před ukončením 25 zmrazovacích cyklů. Laboratorními zkouškami (stanovení mrazuvzdornosti, pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku) se potvrdily prvotní odhady trvanlivosti a kvality zdicích prvků provedené in-situ nedestruktivními metodami. Tyto výsledky byly publikovány v rámci [126].

Měření ultrazvukovou impulsní metodou během rekonstrukce mostu nepřineslo valné výsledky. Naopak metoda *IE* se ukázala jako velmi perspektivní, a proto se autoři dále zabývali především touto metodou [7].

#### 5.3.3.1 Postup měření

Po ověření využitelnosti metod in-situ během rekonstrukce památkového objektu mohly započít hlavní práce pro stanovení kritérií trvanlivosti historických cihel plných pálených. Samotný experiment je ve své podstatě jednoduchý. Princip stanovení kritérií trvanlivosti byl založen na analýze spektra vlastních frekvencí a jejich změně v nasyceném stavu oproti vysušenému.

Pro měření bylo vybráno celkem 41 historických cihel plných pálených. Zkušební vzorky byly odebrány z různých zbouraných nebo rekonstruovaných staveb v průběhu asi tří let. Cihly se lišily svým stářím (z období gotiky, renesance i baroka), rozměry, vzhledem i předpokládanou kvalitou. Tímto výběrem byla pokrytá celá škála zkušebních těles.

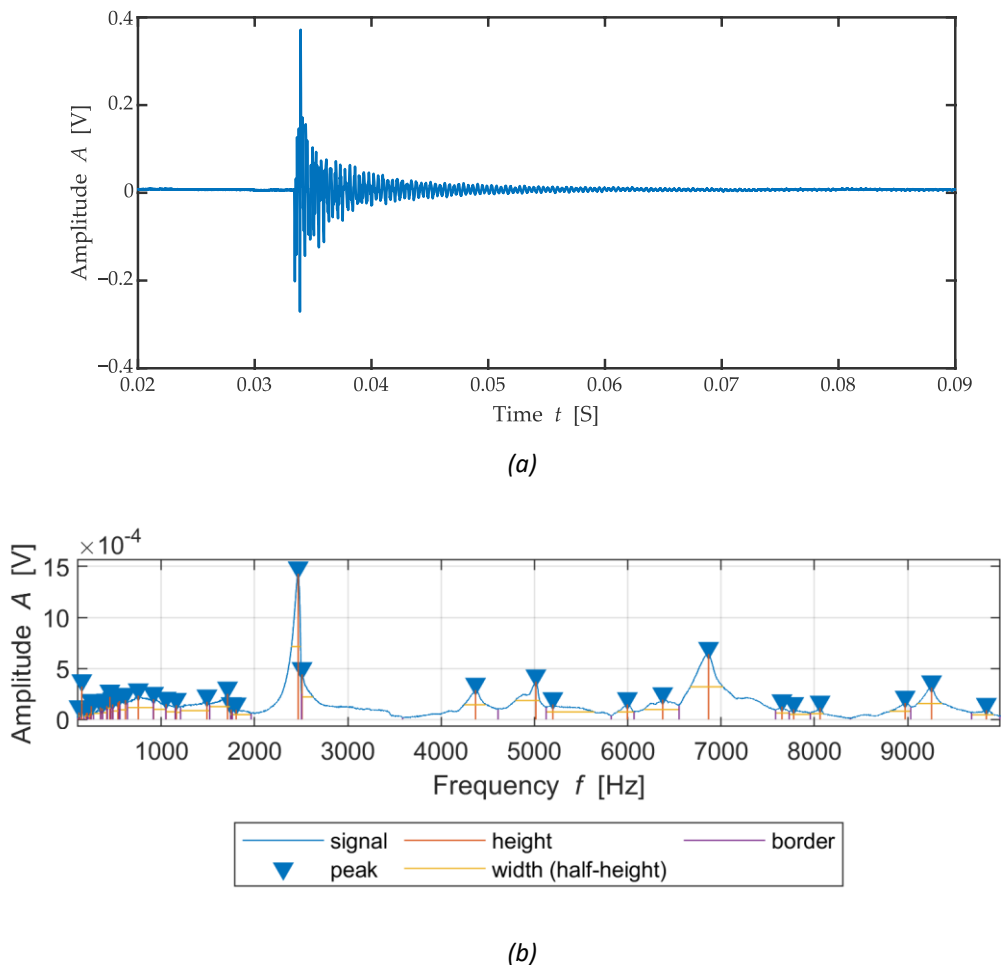
Zkušební prvky byly nejdříve důkladně očištěny a byly stanoveny jejich rozměry. Následně byly vysušeny do ustálené hmotnosti. U všech vzorků byly stanoveny jejich hmotnosti ve vysušeném stavu a byly pečlivě zaznamenány veškeré povrchové vady prvků. Pomocí metody *IE* byly stanoveny frekvenční spektra podélného  $f_{L,VO}$  a kroutivého  $f_{T,VO}$  kmitání. Frekvence příčného kmitání nebyly stanovovány, neboť deformace signálu příčného kmitání se z velké části projeví v signálu kroutivého kmitání. Následně byly prvky zcela nasycené varem. V plně nasyceném stavu byly u prvků opět stanoveny hmotnosti a frekvenční spektra pomocí metody *IE*, a to  $f_{L,NVO}$  pro podélné kmitání a  $f_{T,NVO}$  pro kroutivé kmitání.

Zdicí prvky byly rozděleny do celkem 4 tříd trvanlivosti v závislosti na počtu zmrazovacích cyklů, které dané cihly vydržely. Zároveň bylo definováno možné využití prvků z jednotlivých skupin [7]:

1. třída – cihly použitelné v exponovaném venkovním prostředí (např. nekryté římsy, místa nad zemí se vztlínající vlhkostí apod.)
2. třída – cihly použitelné ve venkovním prostředí, méně exponovaná místa (např. povrchové svislé zdivo s výjimkou soklů, výplně zdiva), anebo ve vnitřních exponovaných prostorách (např. vinné sklepy)
3. třída – cihly použitelné pouze v interiéru, v suchém prostředí
4. třída – cihly nevhodné ke znovupoužití

Pro vypracování modelu predikce trvanlivosti byly použity vstupní měření, která byla provedena před zmrazovacími cykly. Pro hodnocení frekvenčního spektra z metody *IE* byla použita metoda extrakce příznaků, pro získání klíčových charakteristických parametrů posuzovaných spekter. Tato metoda se běžně používá při redukci dimenzionality velkých datových souborů [163] a je hojně využívána v predikci životnosti konstrukcí jak v oblasti stavitelství, tak strojírenství. Kromě dominantní rezonanční frekvence tak byly ze všech spekter extrahovány další parametry jako je amplituda, šířka vrcholu v polovině prominence vrcholu a prominence vrcholu. Z každého spektra byly vybrány tyto parametry prvních třech

dominantních vrcholů sestupně podle prominence. Příklad těchto charakteristik je znázorněn na Obr. 63 [7].



Obr. 63. Příklad signálu získaného pomocí metody impact-echo [7]; (a) signál v časové oblasti; (b) signál po transformaci do frekvenční oblasti se zvýrazněnými vrcholy s různými parametry, jako je frekvence, amplituda, šířka a prominence.

Charakter spektra a podoba jednotlivých vrcholů jsou jasně definovány výše zmíněnou metrikou. V praxi se však často stává, že technici provádějící inspekci pomocí metody *IE* používají k volbě konkrétního vrcholu i svou subjektivní zkušenost. V takovém případě hodnotí pocitově tvar vrcholu. Zkušený diagnostik tak dokáže posoudit, zda zvolený vrchol odpovídá jeho zkušenosti a představě o dominantním vrcholu.

Tato zkušenost je zvláště důležitá v případě posuzování značně degradovaných zkušebních těles, kde dominantní frekvence nemusí být ta s nejvyšší amplitudou. V tomto případě se vybízí stanovit další metriku, která by byla schopná simulovat tuto zkušenost lidského

faktoru, a v této oblasti je výhodné použít kombinaci vícekriteriálního hodnotícího algoritmu v kombinaci s modelem strojového učení.

Vícekriteriální hodnotící algoritmus dokáže na základě zvolených vah přiřadit danému pozorování hodnotu skóre. Samotný algoritmus byl prvně publikován v [164]. V podobě použití tohoto nástroje pro hodnocení frekvenčních vrcholů byla metoda prvně publikována v roce 2021 [165]. V případě, že se hodnocené parametry pohybují blízko požadované hodnotě, hodnota skóre bude vyšší. Pro úspěšné použití této metody je potřeba nastavit váhy sledovaných parametrů. V tomto případě tedy nastavené váhy a požadované hodnoty vychází právě ze zkušeností techniků a jsou znázorněny v Tab. 13 [7].

Tab. 13. Nastavení vah pro hodnocení frekvenčních vrcholů (*A*-amplituda, *F*-frekvence, *P*-prominence, *š*-šířka) [7].

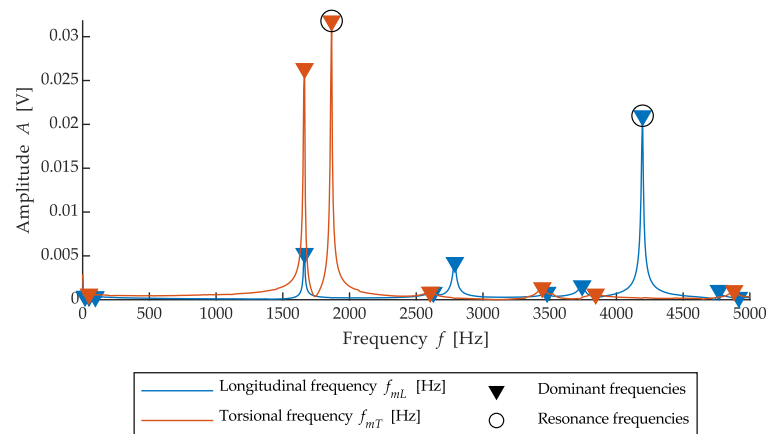
parametr	<i>A</i>	<i>F</i>	<i>š</i>	<i>P</i>	požadováno
<i>A</i>	1,0	5,0	1,0	0,2	Max
<i>F</i>	0,2	1,0	0,2	0,1	Max
<i>š</i>	3,0	5,0	1,0	0,3	Min
<i>P</i>	5,0	10,0	3,0	1,0	Max

Z těchto vah je patrné, že hodnota prominence má dosahovat maximální možné hodnoty a je považována za důležitější než amplituda, frekvence nebo šířka vrcholu. Naopak šířka vrcholu by měla být co nejnižší a je hodnocena jako důležitější než výška amplitudy nebo frekvence. Hodnota frekvence v tomto hodnocení nemá velkou váhu, protože různá zkušební tělesa mohou mít rozdílné rezonanční frekvence v závislosti na svém tvaru, materiálu a vnitřní struktuře. Vlastní frekvence sledovaných vrcholů byla pro účely zpracování vyjádřena vztahem [7]:

$$f_{RL,RT} = \left| \frac{f_i}{f_{mT,mL}} - 1 \right| \quad (20)$$

Kde:  $f_{RL,RT}$  je frekvenční poměr v %,  
 $f_i$  je frekvence dominantního vrcholu v Hz,  
 $f_{mT}, f_{mL}$  je průměrná frekvence pro daný typ kmitání ( $f_{mT}=2000$  Hz,  $f_{mL}=4300$ ) v Hz.

Průměrné frekvence pro dané kmitání ( $f_{mT}$  a  $f_{mL}$ ) byly stanoveny podle zdicích prvků bez poruch ve vnitřní struktuře – 1. třída trvanlivosti (Obr. 64).



Obr. 64. Frekvenční spektrum podélného a kroutivého kmitání vzorku bez defektů ve vnitřní struktuře.

Jako veličina, která je použita pro klasifikaci cihel plných pálených je tedy brána poměrná odchylka frekvence od stanovené průměrné frekvence cihel plných pálených pro daný typ kmitání (podélné nebo kroutivé). Výsledná hodnota  $f_{RL,RT}$  tedy vyjadřuje, jak moc se frekvenčně liší daná cihla od průměru všech sledovaných cihel.

Kromě výše zmíněných metrik prvních třech vrcholů, tak byly doplněny hodnoty skóre. Pro výběr vrcholů byla použita funkce findpeaks s parametry minimální hodnoty prominence 0,03 % maxima amplitudy spektra a minimální vzdálenosti sousedních vrcholů 20 Hz. Tímto způsobem bylo separováno na 100 vrcholů z každého spektra. Z těchto vrcholů byly poté spočteny statistické parametry jako je průměrná hodnota, směrodatná odchylka, špičatost a šikmost. Takto bylo z každého měřeného spektra pro podélné a kroutivé kmitání ve zcela nasyceném a zcela vysušeném stavu získáno celkem 20 parametrů. Frekvenční parametry byly dále doplněny o nasákavost  $A$ , která byla stanovená na počátku zmrazovacích cyklů.

Pro predikci přiřazené třídy, byl použit klasifikační toolbox v rámci softwaru Matlab. Konkrétně v tomto případě se tedy jedná o strojové učení pod dohledem, kdy máme sadu pozorování  $x$  a známe jejich třídy  $y$ . Tato sada je poté rozdělena na učící sadu a testovací sadu. U velkých datasetů toto rozdělení lze provést náhodnou permutací v poměru 75:25. Dále lze k tomuto rozdělení využít algoritmus křížové validace s přeložením. Vstupní množina dat je rozdělena na podmnožiny. Jedna podmnožina slouží jako testovací množina, zbylé podmnožiny slouží jako trénovací množiny. Klasifikátor natrénuje model na trénovací množině a pomocí testovací množiny testuje přesnost a výkonnost tohoto modelu. Tento proces se několikrát opakuje, pokaždé s jinou podmnožinou tvořící trénovací a testovací množinu. V tomto výzkumu byla použita křížová validace s přeložením rovno 5. Podle takto zvoleného postupu extrakce příznaků a vytvoření klasifikačního modelu jsme schopni

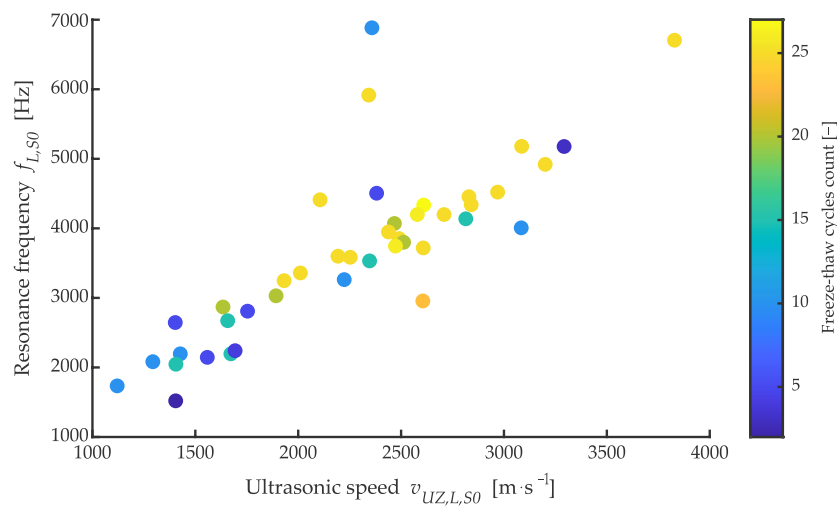
stanovit spolehlivost celé metodiky při predikci pravděpodobné trvanlivosti testovací sady měřených cihel.

Pro ověření správnosti identifikace vad ve vnitřní struktuře prvků a predikce jejich trvanlivosti (odolnosti proti opakovanému zmrazování a rozmrazování) nedestruktivními metodami byla provedena destruktivní zkouška mrazuvzdornosti, postup je podrobně popsán v kapitole 4.3.1 [7].

### 5.3.3.2 Výsledky měření

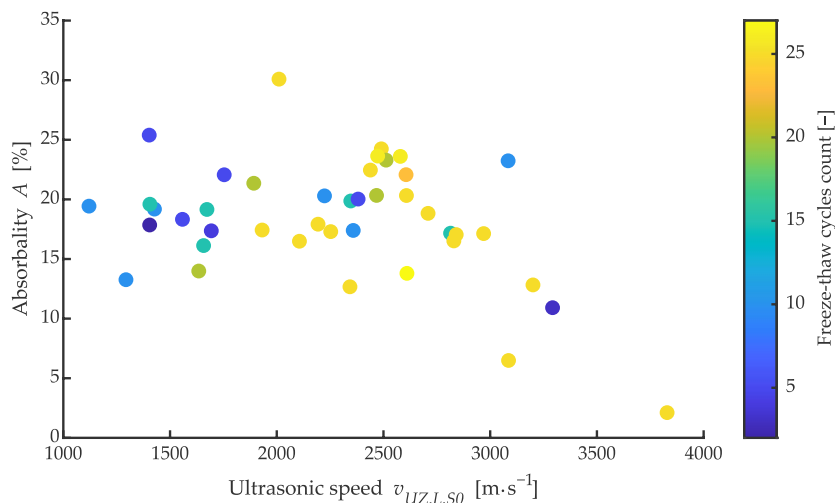
Z počátečních měření provedených přímo na stavbě bylo zjištěno, že doba průchodu nebo rychlost šíření ultrazvukových vln nelze použít jako uspokojivou metriku pro hodnocení pravděpodobné trvanlivosti cihel.

Obr. 65 znázorňuje závislost mezi rezonanční frekvencí a rychlostí šíření ultrazvukových vln, měřených v podélném směru cihly ve vysušeném stavu. Barvou jsou znázorněny počty cyklů, které jednotlivé cihly vydržely před jejich poškozením. Z dat lze pozorovat dominantní diagonálu, která potvrzuje, že tyto sledované parametry jsou v korelaci. Nicméně z pohledu rozdělení cihel, které vydržely 25 a více cyklů, dochází ke značnému promíchání s cihlami, které se rozpadly už po 5 ÷ 10 cyklech. Zároveň lze pozorovat nezanedbatelné množství závislostí, které leží mimo hlavní diagonálu, což bychom mohli označit za anomálie [7].



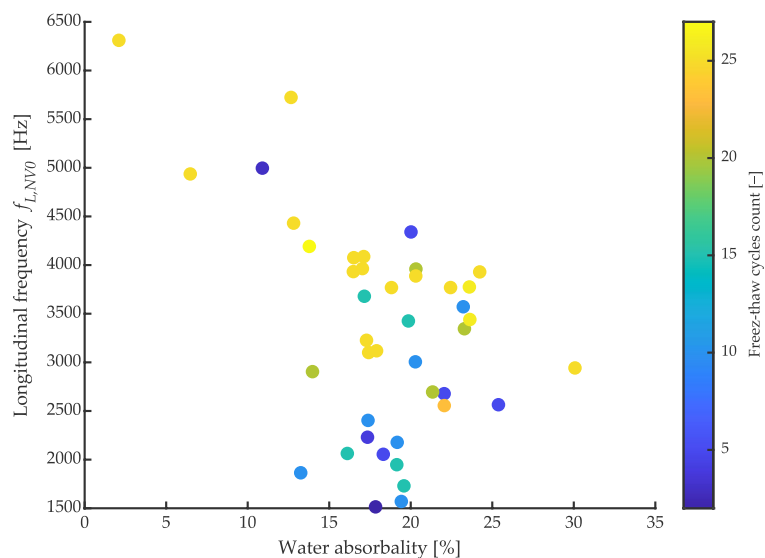
Obr. 65. Závislost mezi rezonanční frekvencí podélného kmitání na rychlosti šíření ultrazvukových vln v podélném směru cihel (ve vysušeném stavu) [7].

Při pohledu na podobnou závislost nasákavosti na rychlosti šíření ultrazvuku na Obr. 66 vidíme, že průměrná hodnota rychlosti ultrazvuku leží v rozmezí 1600-3000 m/s a mísí se zde cihly v celém sledovaném rozmezí zmrazovacích cyklů [7].



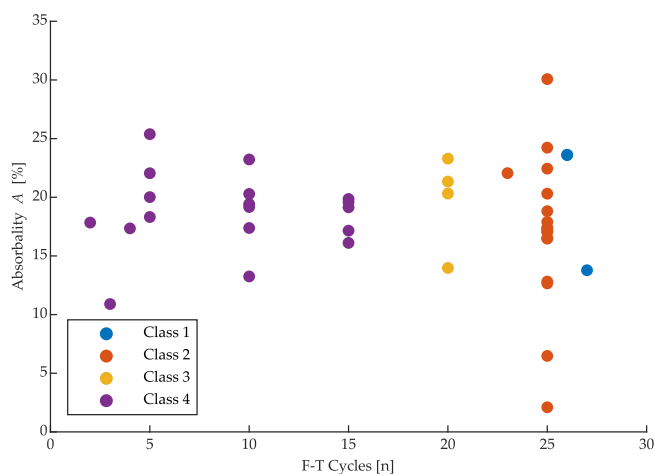
Obr. 66. Závislost nasákavosti na rychlosti šíření ultrazvukových vln v podélném směru cihel (ve vysušeném stavu) [7].

Naproti tomu majoritní část měřených cihel měla hodnotu nasákavosti v rozmezí od 12 % do 24 % s bezvýznamnou korelací s rychlostí ultrazvuku nebo vlastní frekvencí, jak dokládá Obr. 67. Pro stejnou hodnotu nasákavosti existuje cihla jak z 1. třídy trvanlivosti, tak i ze 4. třídy trvanlivosti.



Obr. 67. Závislost frekvence podélného kmitání v nasyceném stavu na nasákavosti se zvýrazněnými cykly zmrazování a rozmrazování (do porušení vzorků) [7].

Srovnání nasákavosti a jednotlivých tříd trvanlivosti je znázorněno na Obr. 68.



Obr. 68. Srovnání počtu zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů (třídy trvanlivosti), které vzorky vydržely před jejich porušením a nasákavosti.

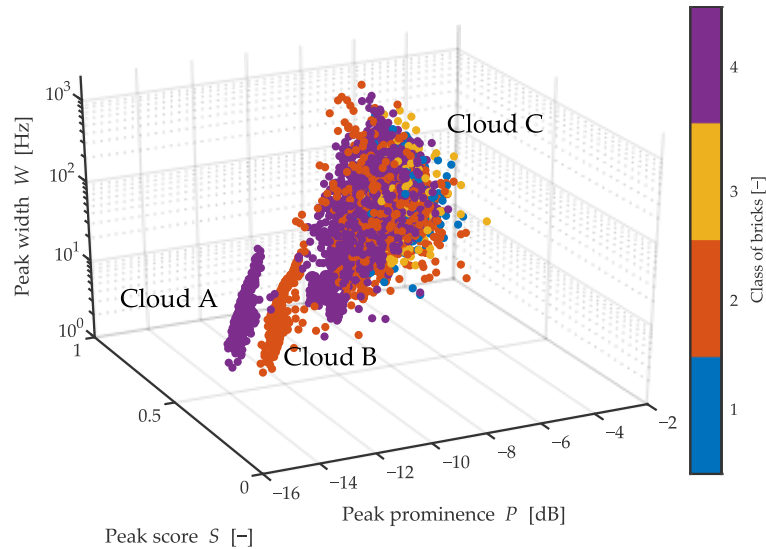
Lze tedy konstatovat, že z běžných parametrů, jako je dominantní frekvence, rychlost šíření ultrazvukových vln či nasákavost, nelze spolehlivě predikovat pravděpodobnou trvanlivost posuzované cihly.

Pokud přejdeme k výsledkům algoritmu extrakce příznaků, začněme u aplikace metody multikriteriálního hodnocení vrcholů frekvenčního spektra. Bylo provedeno statistické porovnání vyjádřené pravděpodobností sledovaných parametrů frekvence, amplitudy, šířky vrcholu, prominence vrcholu a korespondujícího skóre. Jedná se o celkem 4136 sledovaných vrcholů, které byly vybrány funkcí findpeaks z 167 frekvenčních spekter všech 41 měřených cihel.

Třídy s vyšší výdrží zmrazovacích cyklů mají obecně vyšší amplitudu a naopak. Právě uprostřed histogramu však dochází k překrývání těchto parametrů. Podobně je tomu i v případě frekvenčního poměru  $f_R$ . Asi největší rozdíl nastává v případě prominence vrcholů, kde každá třída zastupuje svým vrcholem pravděpodobnosti jinou část rozptylu prominence. I když byly třídy navrženy v závislosti na rostoucím počtu cyklů, pořadí, které vykazuje hodnota prominence, ukazuje, že 1.třída je velmi podobná 3.třídě. Třída 4. je pak velmi podobná 2. třídě. Z tohoto pohledu lze říci, že se jedná o vliv menšího statistického vzorku cihel, který by jinak vykazoval s vyšší třídou nižší hodnotu prominence.

Znázornění těchto veličin v prostorovém grafu je na Obr. 69. Lze zde vyzorovat celkem tři hlavní mračna bodů A, B a největší C. Oblak A a B je díky hodnotě skóre jasně rozdělený mezerou, což umožňuje vysokou spolehlivost při klasifikaci cihel, pokud bychom chtěli použít pouze tyto body. Oblak A a B se skládá výhradně z tříd 2 a 4, což podporuje předchozí zjištění, že tyto třídy jsou si velmi podobné. Tyto mraky však dosahují maximální šířky vrcholu 13 Hz,

což platí hlavně pro extrémně úzké a malé vrcholy. Naopak vrcholy nacházející se v mraku C se vzájemně prolínají a skládají se ze všech zbývajících měřených vrcholů a jsou zde rovnoměrně zastoupeny všechny třídy. Toto pozorování tedy vybízí k možnosti vícestupňového posouzení na přítomnost vrcholů z mraku A a B a poté, pokud by nebyly nalezeny vrcholy z těchto mraků, bylo by potřeba použít podrobnější metodu [7].



Obr. 69. Rozložení metrik vrcholů s porovnáním s třídami a skóre jednotlivých vrcholů [7].

Podrobnější posouzení je zaměřeno na získání vybraných 20 parametrů a vytvoření klasifikačního modelu na principu souboru klasifikátorů [166]. V celkovém počtu vybraných parametrů jsou přítomny varianty jako Freq1, Freq2 apod., v tomto případě se jedná o parametry dominantních vrcholů v sestupném pořadí dle prominence. Parametr Freq1, popřípadě Width1, tedy popisují stejný vrchol, avšak různým způsobem. Statistické parametry jsou použity k lepšímu pochopení rozdílů mezi jednotlivými vrcholy a k jejich efektivnější klasifikaci v rámci modelu [7]:

- **Parametry Kurt a Skew:** popisují špičatost a šikmost distribuce skóre vybraných vrcholů z každého posouzeného spektra.
- **MeanScore:** vyjadřuje průměrné skóre vrcholů.
- **ModeWidth:** popisuje modus šířky vrcholů.
- **StdScore:** vyjadřuje směrodatnou odchylku skóre vybraných vrcholů.
- **TotalScore:** vyjadřuje celkovou sumu skóre vybraných vrcholů.

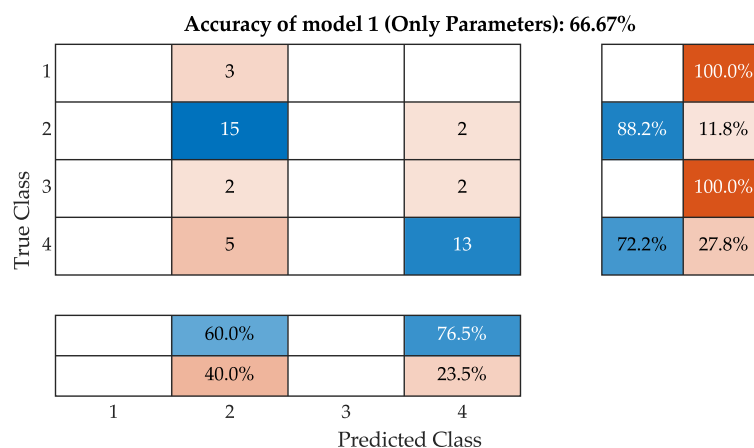
Pro člověka jsou jen obtížně srozumitelné závislosti, které ani pomocí korelačních diagramů nejsou dobrým nástrojem pro interpretaci tohoto typu dat, protože se jedná o

vícedimenzionální data. Vhodnější je tedy posuzovat jednotlivé závislosti pomocí úspěšnosti klasifikačního modelu a pomocí výsledného rozhodovacího diagramu.

Úspěšná predikce trvanlivosti cihel plných pálených klasickými metodami a vyhodnocením není možná, protože se jedná o komplexní chování několika různých parametrů. Pokud tedy necháme tuto klasifikační úlohu provést algoritmem zmíněným v [166], dostáváme se k rozhodnutí, jakým způsobem a v jaké situaci chceme navržený klasifikační model používat.

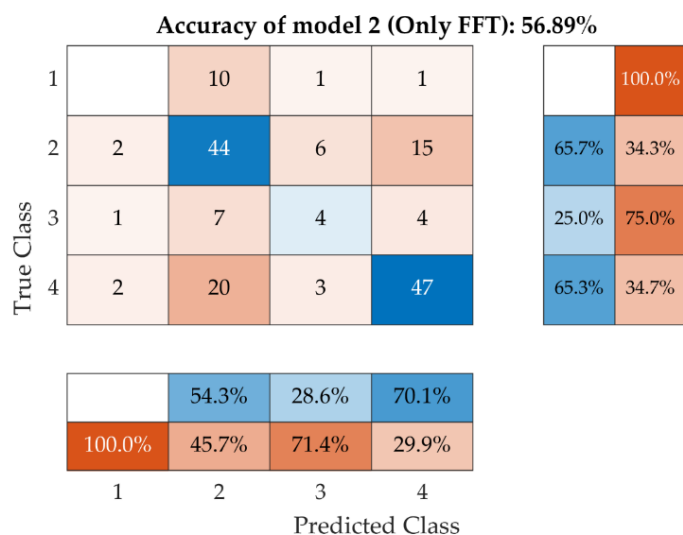
Pokud bychom chtěli použít pouze klasifikační model s možností rozlišit třídu 2 a 4, dostáváme poměrně uspokojivou spolehlivost 88 % pro třídu 2 a 72 % pro třídu 4. Pro tento model byly použity parametry jako je první vlastní frekvence podélného kmitání ve zcela nasyceném a vysušeném stavu, počet vrcholů, rozdíl mezi frekvencí ve zcela nasyceném a vysušeném stavu, šířka, Poissonův součinitel a nasákavost.

Tento model č. 1 je znázorněn pomocí matice zmatenosti na Obr. 70. Matice zmatenosti vyjadřuje procentuální úspěšnost daného modelu, tedy shodu predikované třídy trvanlivosti stanovenou pomocí metody *EI* a třídu trvanlivosti stanovenou pomocí destruktivní zkoušky mrazuvzdornosti dle ČSN 72 2609 [9]. Výsledná úspěšnost modelu koresponduje s výsledky popsanými výše a značí, že třídy 2 a 4 jsou si blízké, ale lze je úspěšně rozpoznat. Z praktického pohledu ale tento postup vyžaduje znalost nasákavosti [7].



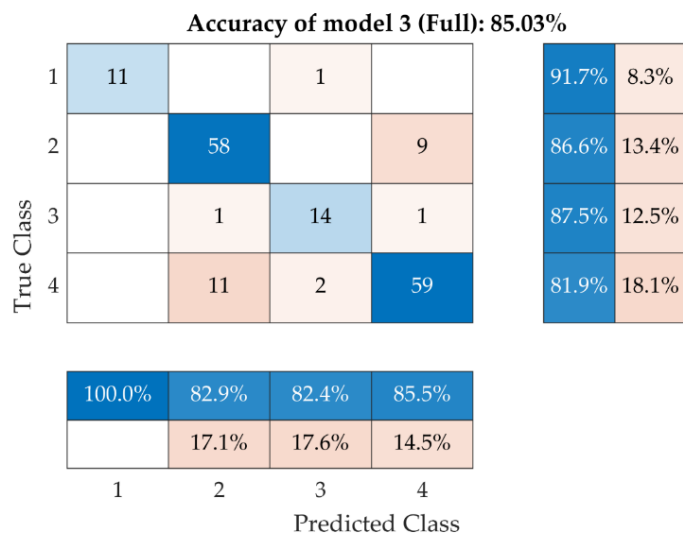
Obr. 70. Matice zmatenosti pro model s parametry získanými z *f<sub>l</sub>* bez statistických parametrů a hodnot skóre.

Pokud použijeme pro vytvoření modelu parametry popsané výše (jako parametry popisující šikmost, špičatost, průměrné hodnoty skóre atd.) bez zahrnutí nasákavosti, dostáváme úspěšnost modelu 65 % pro třídu 2, 25 % pro třídu 3 a 65 % pro třídu 4 (Obr. 71). Z tohoto pohledu je model použitelný i na zabudované cihly, ale za cenu nižší spolehlivosti. I v tomto případě se ukazuje, že obě třídy 2 a 4 jsou si velmi blízké. Nicméně v tomto případě dochází k chybnému zařazení cihel třídy 2 a třídy 4 do ostatních tříd [7].



Obr. 71. Matice zmatenosti pro model se statistickými parametry, bez znalosti nasákavosti [7].

Poslední a zároveň neúspěšnější model č. 3, využívající parametry použité pro model č. 2 obohacené o znalost nasákavosti, dosahuje celkové úspěšnosti 85 %, což je znázorněno na Obr. 72. Z tohoto pohledu se jedná o vůbec nejpresnější model, který dosahuje přesnosti 91 % pro třídu 1, 86 % pro třídu 2, 87 % pro třídu 3 a 81 % pro třídu 4. Model byl použit pro pozorování frekvenčních spekter jak nasyceného stavu, tak vysušeného, a to jak pro podélné, tak kroutivé kmitání. Z tohoto pohledu je tedy možné jej použít na jakémkoliv vzorku, ať už je nasycený či vysušený [7].



Obr. 72. Matice zmatenosti pro neúspěšnější model, zahrnující veškeré parametry [7].

Výsledný model lze demonstrovat na klasifikačním stromu. Klasifikační strom je graf, který využívá strukturu uzlů, větví a listů. Každý uzel je tvořen binární podmínkou, která směřuje



Z porovnání úspěšnosti modelů vyplývá, že nevhodnější je měření pomocí *IE* metody frekvence podélného kmitání v nasyceném stavu, kde model č. 3 dosahuje úspěšnost 90,48 %. Nejnižší úspěšnosti dosahuje kombinace měření frekvence krouživého kmitání ve vysušeném stavu vzorků, kde je úspěšnost 78,05 % [7].

### **5.3.3.3 Závěr a diskuse měření**

Pro možnost upcyclace historických cihel plných pálených, jak v případě architektonických novostaveb, tak v případě rekonstrukcí historických budov, je klíčové zvolit trvanlivý materiál, který plní jak funkční, tak estetickou roli. Nároky na historické cihly opětovně zabudované do konstrukce by měly být stejné jako na cihly nově vyrobené. Výsledky této práce prokázaly, že pomocí nedestruktivní *IE* (rezonanční) metody a známé nasákavosti cihel plných pálených lze s poměrně dobrou přesností predikovat jejich trvanlivost (životnost), a to bez jejich porušení.

Celý postup byl ověřen na vybraném vzorku 41 cihel, které svým stářím a kvalitou postihují široké historické a materiálové spektrum. Lze tedy s jistou spolehlivostí konstatovat, že v rámci provedeného výzkumu lze navrhnout klasifikační model, který bude schopný predikovat pravděpodobnou trvanlivost (životnost) historické cihly na základě nedestruktivních měření. Pro přenesení metody do praxe bude nutné obdobný algoritmus převést například do jazyka Python pomocí knihoven SciPy a NumPy, které se pro tento typ úloh běžně používají. Zároveň bude zvětšen učící soubor dat, tak aby postihoval více zdrojů měření cihel. Ve zkoušeném souboru bylo totiž jejich kvalitativní zastoupení nerovnoměrné. Konkrétně třídy 2 a 4 byly zastoupeny větším počtem než třídy 1 a 3. Je tedy potřeba zahrnout více cihel třídy 1 a 3, aby se celý dataset stal vyváženějším [7].

## 6. Diskuse výsledků

Během oprav cihelných památkových objektů se často setkáváme s nutností doplnění nebo výměny poškozených zdicích prvků. Jednou z možností je využití zdicích prvků z nabídky současných cihelen. Avšak tyto nové cihly často nedokážou adekvátně nahradit původní prvky, což může vést k poškození autenticity cihelného zdiva. Právě u památek je však autenticita zdiva významným faktorem.

Jako alternativa se nabízí využití historických cihel plných pálených, které byly získané ze zbouraných objektů. Avšak i zde se setkáváme s řadou výzev. Největším problémem je sledování kvality a trvanlivosti těchto historických zdicích prvků při jejich opětovném využití. Jedná se o náročnou disciplínu, zvláště pokud jde o rozsáhlé objekty, kde může být zapotřebí desetitisíce kusů cihel. U historických cihel plných pálených je nutné počítat s velkou variabilitou jejich vlastností, i když pocházejí z jediné stavby. Proto nelze spoléhat pouze na konvenční zkoušky. Tato práce se tak zabývá problematikou trvanlivosti zdicích prvků, na kterou je zde nahlíženo jako na odolnost proti cyklickému zmrazování a rozmrazování.

Teoretická část této práce se zabývá vlivy, které mohou trvanlivost zdicích prvků ovlivnit, ale především metodami a pracemi jiných autorů, kteří se touto problematikou v minulosti zabývali. Jsou zde uvedeny metody od těch nejjednodušších, jako je akustická trasovací metoda, až po velmi sofistikované metody jako CT nebo elektroakustické metody. Z prací jiných autorů je zřejmé, že na trvanlivost cihel mají nejdůležitější vliv faktory jako velikost, redistribuce a množství pórů a s tím související vlhkostní charakteristiky. Dalším neméně podstatným faktorem jsou vady a defekty ve vnitřní struktuře cihel, ať už vznikly během výroby, anebo vlivem historie cihel (působení klimatických podmínek, uložení v konstrukci atd.). Z těchto prací vznikla řada kritérií, jak lze trvanlivost posuzovat. Je ovšem nutné zmínit, že trvanlivost zdicích prvků je často posuzována na malých vzorcích, anebo jsou metody finančně i časově náročné. V případě posuzování velkého množství cihel, tak tyto metody a přístupy nejsou zcela použitelné a je nezbytné hledat rovnováhu mezi jednoduchostí použitých metod s dostatečnou přesností výsledků.

Praktická (experimentální) část této práce je rozdělena do dvou sekcí. Pro obě tyto sekce však musely být získány historické plně pálené cihly ze zbouraných nebo rekonstruovaných objektů, často památek. V průběhu let tedy byly vzorky odebírány ze staveb nejčastěji v okolí Brna. Často se jednalo o významné stavby, jako například barokní cihelný most v obci Sedlec u Mikulova nebo Vránův mlýn v obci Břeclav z 16. století.

První sekce experimentální části této práce se věnuje problematice, která nesouvisí přímo s trvanlivostí zdicích prvků. Zabývá se však palčivými problémy současného posuzování cihelného zdiva, které jsou v současných postupech často opomíjeny.

Jedná se o stanovení pevnosti v tlaku zdicích prvků zabudovaných do konstrukce. V současné době tuto pevnost obvykle stanovíme pomocí nedestruktivní tvrdoměrné metody Schmid LB, často s upřesněním pomocí pevností stanovených na jádrových vývrtech. Výroba tohoto tvrdoměru však byla ukončena a nedestruktivní stanovení pevnosti zdicích prvků zabudovaných v konstrukci se tak stává velmi obtížné. Z tohoto důvodu byly vytvořeny regresní křivky, někdy také, byť ne zcela správně, označované jako kalibrační pro alternativní metody ke Schmidu LB. Z celkem čtyř zkoušených metod se v praxi osvědčila pouze metoda Silver Schmidt N a upravené vrtačky s označením KV-3.

Byla také řešena problematika vlhkosti na pevnost zdiva stanovenou nedestruktivní metodou Schmid LB. Tato metoda bude využívána ještě řadu let, i přes skutečnost, že výroba tohoto tvrdoměru byla ukončena. Výsledky tohoto výzkumu jsou navíc aplikovatelné i na jiné tvrdoměry. V rámci tohoto výzkumu bylo prokázáno, že vliv vlhkosti se projeví již během měření pomocí těchto metod in situ. Dochází totiž ke „změknutí“ zdicích prvků, což se projeví na hodnotách stanovených tvrdoměrem. Současná norma na vyhodnocování pevnosti zdiva ČSN 73 0038 nebere v potaz způsob stanovení pevností zdicích prvků a ve výpočetních vztazích zahrnuje vliv vlhkosti. Vliv vlhkosti je tedy v případě využití tvrdoměrných metod zahrnut již podruhé, což může vést k nadbytečnému snížení pevností cihelného zdiva v tlaku.

Poslední řešenou problematikou v této části práce je vliv směru zatěžování na stanovenou pevnost v tlaku. V cihlách plných pálených mohou být vrstvy, které vznikly během plnění cihlářské hlíny do forem. Tyto vrstvy následně ovlivňují pevnosti v tlaku. Míra ovlivnění pevností je dána směrem zatěžování vzorku. Bylo prokázáno, že pevnosti vzorků zatěžovaných kolmo na směr uložení cihly vykazují vyšší pevnosti než vzorky zatěžované ve směru uložení cihel v konstrukci. Tato skutečnost je závažná především v případě stanovení pevností cihel na jádrových vývrtech. V tomto případě je vzorek zpravidla zatěžován právě ve směru kolmém na uložení cihly v konstrukci, což může vést k nadhodnocování pevnosti v tlaku. Je nutné si uvědomit, že tuto skutečnost v praxi nelze vyřešit například použitím koeficientu, který by zohledňoval směr, ve kterém byla pevnost stanovena. Míra, jakou je pevnost ovlivněna, závisí mimo jiné na stáří cihly, přesněji na způsobu a technologii výroby. To by v praxi znamenalo nutnost stanovení období vzniku cihly, což je nelehký (často až nemožný) úkol i pro zkušeného pracovníka. Jako možnost se nabízí odběr jádrových vývrťů o

průměru 75 mm. Z těchto vývrtů mohou být následně vytvořeny krychle o hraně 50 mm, které budou zatěžovány ve směru uložení cihly v konstrukci. V praxi by to však znamenalo komplikace v procesu stanovení pevnosti v tlaku zdicích prvků, nicméně je nezbytné s touto skutečností minimálně uvažovat.

Dále se praktická část práce věnuje problematice trvanlivosti zdicích prvků. Před hlavním výzkumem, tedy predikcí trvanlivosti zdicích prvků nedestruktivními metodami, bylo nutné prohloubit informace o vlivech, které trvanlivost cihel ovlivňují.

Prvním z těchto faktorů je vlhkost zdicích prvků. Pro možné predikování trvanlivosti je nezbytné znát vliv vlhkosti na veličiny stanovené pomocí moderních elektroakustických metod zvolených pro tuto predikci. V tomto výzkumu bylo prokázáno, že závislost veličin stanovených metodou impact-echo a ultrazvukovou impulsní metodou na vlhkosti má průběh blízký polynomu druhého stupně. Jedná se o významné zjištění, neboť tento průběh je velmi často uvažován jako lineární. Tomuto problému je potřeba věnovat zvýšenou pozornost především u cihelných staveb, které nejsou vytápěny a nejsou trvale využívány, jako mohou být především nejnižší podlaží zámků, muzeí nebo sakrálních staveb. Právě v takovém případě bychom se při uvažování lineárního průběhu poklesu vlastností cihelného zdiva vlivem zvýšené vlhkosti dopouštěli nejvýraznějších chyb na stranu nebezpečnou.

Rozvoj vad ve vnitřní struktuře prvků vlivem jejich cyklického zmrazování a rozmrazování byl dalším faktorem, o kterém bylo nutné získat více informací před predikcí trvanlivosti. Pro sledování změn ve vnitřní struktuře vzorků byly použity relativní dynamické moduly pružnosti (*RDM*) stanovené z prvních vlastních frekvencí a dob průchodu UZ vln. V rámci tohoto výzkumu byly stanoveny celkem 3 typy možného porušení. Nejproblematictější jsou vzorky ze skupiny C, kde docházelo pouze k rozvoji vad ve vnitřní struktuře, zatímco rozvoj povrchových vad byl zanedbatelný i po 25 zmrazovacích a rozmrazovacích cyklech.

Po ověření vlivu těchto faktorů a sledování jejich projevů na datech změřených pomocí elektroakustických metod mohlo být přistoupeno k vytvoření modelu pro predikci trvanlivosti zdicích prvků. Během ověření využitelnosti metod pro tyto účely bylo zjištěno, že je vhodná především metoda *IE*. Z tohoto důvodu byla pozornost směřována právě na tuto metodu. Zdicí prvky byly rozděleny do celkem 4 tříd trvanlivosti v závislosti na počtu zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů, které vydržely před jejich porušením. Zároveň bylo definováno možné využití prvků z jednotlivých tříd trvanlivosti. Princip predikce trvanlivosti zdicích prvků je v zásadě jednoduchý. Trvanlivost byla predikována na základě analýzy spektra vlastních frekvencí. Jedná se však o komplexní chování řady parametrů a vyhodnocení

běžnými metodami není zcela možné. Z tohoto důvodu byl využit klasifikační toolbox v rámci softwaru Matlab. Konkrétně se jednalo o strojové učení pod dohledem, kdy máme sadu pozorování  $x$  a známe jejich třídy  $y$ . Tato sada je poté rozdělena na učící a testovanou sadu. Výsledkem je možná predikce trvanlivosti zdicích prvků pomocí dvou modelů. První z těchto modelů neuvažuje s hodnotou nasákavosti. Je tak teoreticky možné jej využít na zdicích prvcích zabudovaných v konstrukci, ovšem za cenu poměrně nízké úspěšnosti predikce předpokládané třídy trvanlivosti 56 %. Podstatnější pro účely této práce je však model, ve kterém je navíc zahrnuta hodnota nasákavosti zdicích prvků. Model dosahuje celkové úspěšnosti 85 %, konkrétně dosahuje přesnosti 91 % pro třídu 1, 86 % pro třídu 2, 87 % pro třídu 3 a 81 % pro třídu 4.

## 7. Závěr

V rámci této disertační práce byl vyvinut model pro predikci trvanlivosti zdicích prvků pomocí nedestruktivní metody impact-echo s úspěšností 85 %. Tento model má praktické využití při renovaci historických cihelných staveb, neboť umožňuje predikovat předpokládanou třídu trvanlivosti historických cihel, které lze následně využít v cihelné konstrukci.

Kromě hlavního cíle se práce zabývá i dalšími aspekty spojenými s hodnocením cihelného zdiva, přičemž se snaží najít vyváženost mezi složitostí metod a přesností výsledků. Výstupy této práce mají potenciál být aplikovány ve stavební praxi. Jejich přínos není pouze akademický, jak dokládá řada publikací, ale také praktický, protože mohou reálně přispět ke zlepšení hodnocení a rekonstrukcí cihelných objektů, zejména památek.

Výsledky této práce mohou sloužit pro několik doporučení:

- V normě ČSN 73 0038 při stanovení součinitele zahrnujícího vliv vlhkosti cihelného zdiva ( $\gamma_{m3}$ ) zohlednit způsob stanovení normalizované pevnosti zdicích prvků ( $f_b$ ). Při současném nastavení normy totiž v případě využití tvrdoměrných metod dochází tímto součinitelem ke dvojnásobnému snížení návrhové pevnosti zdiva v tlaku.
- V normě ČSN 73 0038 definovat směr zatěžování pro stanovení pevnosti v tlaku na reprezentativních vzorcích. Tato pevnost je totiž ovlivněna vrstvami v cihlách, které vznikly během jejich výroby.
- V normě ČSN 72 2609 pro posouzení mrazuvzdornosti zavést kritérium poklesu relativních dynamických modulů pružnosti (*RDM*), obdobně jako je tomu v normě pro posuzování mrazuvzdornosti betonu v ČSN 73 1380. Kritérium poklesu pevností v tlaku po zmrazování do 15 % od deklarované pevnosti je totiž použitelné zejména pro cihly vyráběné moderními technologiemi. Také zvážit nahrazení pevnosti v tlaku za pevnost v tahu za ohybu, což je citlivější přístup pro sledování porušení vnitřní struktury vlivem cyklického zmrazování.

## 8. Seznam použitých zkratek

symbol	popis
%	procenta
$\varnothing$	průměr
$^{\circ}\text{C}$	stupeň Celsia
$\mu\text{A}$	mikroampér
3D, 2D	trojrozměrný (three-dimensional), dvourozměrný (two-dimensional)
A	plocha
AE	akustická emise (Acoustic emission)
ASTM	americká organizace, která vypracovává technické normy
B	budič
BET	teorie Brunauera, Emmetta a Tellera
CT	výpočetní tomografie (computer tomography)
$D_F$	Maage faktor (kritérium mrazuvzdornosti)
$d_m$	průměrná hloubka vrtu zhotoveného vrtačkou KV-3
F	síla
f	pevnost v tlaku
$f(t)$	změřený signál pomocí EI
$F(\omega)$	frekvenční spektrum
$f_0, t_{s,0}$	počáteční vlastní frekvence, doba průchodu ultrazvukových vln
FAST	fakulta stavební
FFT	rychlá Fourierova transformace (Fast Fourier transform)
$f_L, f_t, f_f$	první vlastní frekvence podélné, krouživé a příčného kmitání
$f_n, t_{s,n}$	vlastní frekvence, doba průchodu ultrazvukových vln po n zmrazovacích cyklech
h	výška vzorku
H	projekční matice
Hz, kHz	hertz, kilohertz
i	komplexní jednotka
IE	metoda impact-echo (rezonanční metoda)
K	konstanta závislá na druhu zdiva a skupině zdicích prvků
KNS	koeficient nasycení střepu
kV	kilovolt
L	délka (např. měřící základy nebo vzdálenost podpor)
M	ohybový moment
m, $\Delta m$	hmotnost vzorku, změna hmotnosti
$m_{dry,u}$	hmotnost vzorku ve vysušeném stavu
MIP	rtuťová porozimetrie (Mercury intrusion porosimetry)
mm, $\mu\text{m}$ , nm	milimetr, mikrometr, nanometr
MPa	megapascal (= N/mm <sup>2</sup> )
MRI	magnetická rezonance (Magnetic Resonance Imaging)
ms	milisekunda
$m_s, m_d, m_r$	hmotnost prvku v stavu nasyceném, vysušeném, přirozené vlhkosti
n	počet (např. zmrazovacích/rozmrzovacích cyklů)
NDT	nedestruktivní zkouška (nondestructive testing)

symbol	popis
<i>NMR</i>	Nukleární magnetická rezonance (Nuclear magnetic resonance (spectroscopy))
<i>P</i>	pórovitost
<i>P</i>	tlak
<i>P3</i>	póry o průměru > 3 μm z PV v %.
<i>PV</i>	celkový objem pórů
<i>Q</i>	koeficient vrácené energie
<i>r</i>	poloměr
<i>R</i>	hodnota odrazu stanovená pomocí tvrdoměru
<i>R<sup>2</sup></i>	dosahoval koeficient (index) determinace
<i>r<sub>50%</sub></i>	medián poloměru pórů
<i>RDM</i>	relativní dynamický modul pružnosti
<i>S</i>	snímač
<i>s</i>	sekunda
<i>S<sub>C</sub></i>	koeficient nasycení (Saturation coefficient)
<i>STFT</i>	krátkodobá Fourierova transformace (short-time Fourier transform)
<i>s<sub>x</sub></i>	zbytková směrodatná odchylka, výběrová směrodatná odchylka
<i>T</i>	saturační poměr
<i>t</i>	čas
<i>T</i>	doba průchodu ultrazvukových vln
<i>TMP</i>	termoporozimetrie
<i>t<sub>n</sub></i>	součinitel pro odhad dolní hranice konfidenčního intervalu průměru
<i>TZÚS</i>	Technický a zkušební ústav stavební Praha, s.p.
<i>USZK</i>	ústav stavebního zkušebnictví
<i>UZ</i>	ultrazvuková impulsní metoda
<i>V<sub>g,u</sub></i>	objem vzorku
<i>v<sub>L</sub></i>	rychlost šíření ultrazvukového impulsu
<i>W</i>	watt
<i>W</i>	modul průřezu
<i>w</i>	šířka vzorku
<i>W<sub>b</sub></i>	hmotnost vzorku po 5 hodinách nasáknutí ve vroucí vodě
<i>W<sub>c</sub></i>	hmotnost vzorku po 24 hodinách nasáknutí ve vodě o laboratorní teplotě
<i>W<sub>d</sub></i>	hmotnost vysušeného vzorku
<i>w<sub>r</sub></i>	hmotnostní vlhkost
<i>w<sub>s</sub></i>	nasákavost
<i>w<sub>s</sub>, A</i>	nasákavost
<i>ZK</i>	směr zatěžování kolmý na směrem uložení cihly v konstrukci
<i>ZR</i>	směr zatěžování rovnoběžný se směrem uložení cihly v konstrukci
<i>α</i>	hladina významnosti, exponent závislý na tloušťce ložných spár a druhu malty
<i>β</i>	exponent závislý na druhu malty
<i>γ</i>	povrchové napětí
<i>γ<sub>m1</sub> ÷ γ<sub>m4</sub></i>	součinitele zohledňují vlivy, které ovlivňují pevnost zdiva v tlaku
<i>ρ<sub>g,u</sub></i>	objemová hmotnost ve vysušeném stavu
<i>σ</i>	napětí, pevnost v tahu za ohybu
<i>ω</i>	úhlová frekvence

## 9. Seznam obrázků

Obr. 1. Využití cihel vyráběných moderními technologiemi pro rekonstrukce cihelných památek; (a) rekonstrukce gotického hradu v obci Malbork [7]; (b) rekonstrukce hradu ze 14. století v obci Chęciny. ....	11 -
Obr. 2. Barokní cihelný most v obci Sedlec u Mikulova (ČR) po rekonstrukci historickými cihlami [7]. ....	11 -
Obr. 3. Poruchy způsobené složením cihlářské hlíny; (a) výkvěty solí na povrchu cihly; (b) výskyt cicvárů s typickým odštípnutím vlivem cyklického zmrazování na cihle z 15. století.....	14 -
Obr. 4. Vliv teploty výpalu na vzhled cihly; (a) cihla s vysokou teplotou výpalu; (b) cihla s nízkou teplotou výpalu [7]. ....	15 -
Obr. 5. Schéma zkoušky kapilární vztlávanosti (sorptivity test) [45]. ....	17 -
Obr. 6. Typy průchodového prozvučování pomocí ultrazvukové metody; (a) přímé; (b) polopřímé; (c) nepřímé (povrchové) [51]. ....	19 -
Obr. 7. Schéma měření pomocí metody impact-echo (rezonanční metody) [25]. ....	20 -
Obr. 8. Měření pomocí metody akustické emise; (a) měřený vzorek s osazením snímačů; (b) přístroj pro měření akustické emise Pocket AE-2.....	22 -
Obr. 9. Přístroj XT H 225 ST CT. ....	23 -
Obr. 10. Prvek (č. 1.1) s předpokladem velmi dobré trvanlivosti – bez výraznějších vad ve vnitřní struktuře; (a) fotografie vzorku; (b) a (c) řezy pořízené pomocí CT (Nikon XT H 225 ST CT); (d) 3D sken. ....	24 -
Obr. 11. Prvek (č. 10.1) s předpokladem nižší trvanlivosti – prvek obsahuje trhliny, dutiny a také „cicvár“; (a) fotografie vzorku; (b) a (c) řezy pořízené pomocí CT (Nikon XT H 225 ST CT); (d) 3D sken... ..	24 -
Obr. 12. A – uzavřené póry, B – otevřené póry (slepé), C – otevřený pór (průchozí) [95]. ....	25 -
Obr. 13. Schéma zkoušky MIP. Šipka znázorňuje směr tlaku na rtuť [104]. ....	27 -
Obr. 14. Mikroskop Nikon SMZ1500. ....	29 -
Obr. 15. Analýza pórů v materiálu rozborem (digitálního) obrazu; (a) prvek (č. 1.1) s předpokladem dobré trvanlivosti – bez výraznějších vad ve vnitřní struktuře; (b) Prvek (č. 10.1) s předpokladem nižší trvanlivosti – prvek obsahuje trhliny, dutiny. ....	29 -

Obr. 16. Třízení cihel pro znovuvyužití barokního mostu v obci Sedlec u Mikulov; (a) měření in-situ pomocí metody impact-echo; (b) vyřazené cihly nevhodné pro znovuvyužití [126].	- 31 -
Obr. 17. Sycení vzorků vodou; (a) sycení cihel za atmosférického tlaku dle ČSN EN 772-21; (b) sycení cihel varem dle ČSN EN 772-7.	- 33 -
Obr. 18. Postup pro stanovení objemové hmotnosti $\rho g, u$ ; (a) vysušení vzorků do ustálené hmotnosti při teplotě 105 °C; (b) stanovení hmotnosti vysušeného vzorku $mdry, u$ .	- 34 -
Obr. 19. Měřicí soustava IE: digitální osciloskop, mikrofon a vyhodnocovací jednotka (notebook).	- 36 -
Obr. 20. Mechanicko-elektrické převodníky pro snímání odezvy; (a) piezometrický snímač; (b) mikrofon s frekvenčním rozsah 100 Hz ÷ 10 kHz.	- 36 -
Obr. 21. Rozmístění snímačů (S) a budičů (B) pro jednotlivé typy kmitání (podélné kmitání – $fL$ , kroutivé kmitání – $ft$ , a příčné kmitání – $ff$ ).	- 37 -
Obr. 22. Ultrazvuková metoda (ultrasonic pulse velocity) - měření pomocí přístroj Pundit PL -200 [25].	- 38 -
Obr. 23. Ultrazvuková metoda (ultrasonic pulse velocity) - schéma měření dob průchodu ultrazvukových vln. S-snímač, B-budič, index L-měření v podélném směru, index T-měření v příčném směru.	- 39 -
Obr. 24. Stanovení pevnosti v tlaku pomocí tvrdoměrné metody Schmidt LB na cihelném pilíři. ....	- 40 -
Obr. 25. Zkouška mrazuvzdornosti dle ČSN 72 2609 - reprezentativní vzorky uložené v automatické zmrazovací skříni KD 20.	- 42 -
Obr. 26. Defekty způsobené cyklickým zmrazováním a rozmrazováním; (a) masivní „odštěpek“; (b) vznik trhlin; (c) vznik trhlin a „odštěpků“ způsobené přítomností cicvárů; (d) prasklina přes celou šířku i výšku vzorku.	- 44 -
Obr. 27. Stanovení pevnosti v tahu za ohybu dle ČSN 72 2605.	- 44 -
Obr. 28. Stanovení pevnosti v tlaku dle ČSN EN 772-1+A1; (a) úprava ložné plochy – zabroušením povrchu; (b) krychle o hraně 50 mm po dosažení maximální síly v tlaku.	- 45 -
Obr. 29. Část malby s kartografickým zobrazením mikulovského panství z roku 1672 s cihelným barokním mostem [144].	- 48 -
Obr. 30. Cihelný most v Sedleci během rekonstrukce – celkový pohled na most během rekonstrukce.	- 48 -
Obr. 31. Cihelný most v Sedleci během rekonstrukce; (a) detail cihelné klenby a pilířů; (b) detail unikátního systému odvodnění mostu pomocí žlábků (prejzů) [145].	- 49 -

Obr. 32. Odběr zkušebních vzorků pro laboratorní testy; (a) skládka historických cihel pro rekonstrukci cihelného mostu; (b) čištění a výběr zkušebních vzorků pro laboratorní testy [126].	49
Obr. 33. Historická kresba Vránova (Zámeckého) mlýna v obci Břeclavi z roku 1851 [147].	50
Obr. 34. Čištění a odběr vzorků pro výzkumné práce během demolice Vránova mlýna.	50
Obr. 35. Zkušební vzorky [138]; (a) příklad zkušební vzorku (poloviny cihly) s označením 11.1; (b) příklad zkušebních vzorků (krychle o hraně 50 mm) vyřezané z polovin cihel s označením x.2.	52
Obr. 36. Testování vzorků pomocí NDT metod [138]; (a) Silver Schmidt; (b) vrtačka KV-3.	53
Obr. 37. Destruktivní stanovení pevnosti v tlaku zkušebních těles [138]; (a) na polovině cihel (vzorky x.1); (b) na krychlích o hraně 50 mm (vzorky x.2.1 a x.2.2 vytvořené z těles x.2).	54
Obr. 38. Regresní vztah pro stanovení pevnosti v tlaku zdicích prvků pomocí Silver Schmidt L s klasickým nástavcem.	56
Obr. 39. Regresní vztah pro stanovení pevnosti v tlaku zdicích prvků pomocí Silver Schmidt L s hříbovitým nástavcem.	56
Obr. 40. Regresní vztah pro stanovení pevnosti v tlaku zdicích prvků pomocí Silver Schmidt N.	57
Obr. 41. Regresní vztah pro stanovení pevnosti v tlaku zdicích prvků pomocí upravené vrtačky KV-3.	57
Obr. 42. Pohledy na cihelný pilíř s přibližnými rozměry.	59
Obr. 43. Příprava zkušebních pilířů [153]; (a) vyžděné cihelné pilíře; (b) sušení pilířů do ustálené hmotnosti.	60
Obr. 44. Nedestruktivní stanovení pevnosti zdiva pilířů [153]; (a) stanovení pevnosti zdicích prvků pomocí tvrdoměru Schmidt LB; (b) stanovení pevnosti malty v tlaku pomocí upravené vrtačky KV-3.	61
Obr. 45. Vliv procentuálního nasycení (vlhkosti) na pevnost zdicích prvků $f_b$ stanovenou nedestruktivně pomocí tvrdoměru Schmidt LB [153].	63
Obr. 46. Stanovení pevnosti v tlaku malty [153]; (a) Zkušební tělesa 1 ÷ 6 pro destruktivní stanovení pevnosti v tlaku a tělesa M1 a M2 pro stanovení semidestruktivní pevnosti v tlaku vrtačkou KV-3; (b) zkušební těleso č.5 po dosažení maximální síly.	64
Obr. 47. Stanovení pevnosti v tlaku zdiva pilířů destruktivně [153]; (a) zatěžovací soustava; (b) cihelný pilíř po dosažení maximální síly.	66
Obr. 48. Vliv vlhkosti na pevnosti v tlaku stanovené nedestruktivně ( $f_d$ a $f_d^*$ ) a destruktivně ( $f_c$ ) [153].	67

Obr. 49. Příprava zkušebních vzorků; (a) historická cihla plná pálená s označením č. 14 z poloviny 19. století; (b) zkušební trámec vytvořený z cihly č. 14 po 25 zmrazovacích cyklech.....	69 -
Obr. 50. Stanovení pevnosti v tlaku zkušebních vzorků; (a) část zkušebních vzorků z jejich celkového množství 660 kusů; (b) zkušební vzorek po dosažení maximální síly.....	70 -
Obr. 51. Procentuální změna pevností v tlaku vlivem směru zatěžování. ....	71 -
Obr. 52. Srovnání vlivu směru zatěžování na pevnost v tlaku pro zkušební sadu E (referenční i zmrazované vzorky), ZR – zatěžováno ve směru uložení cihly v konstrukci, ZK – zatěžováno kolmo na směr uložení cihly v konstrukci; (a) procentuální zastoupení rozdílných pevností – sada E; (b) vzorek ze sady E (polovina 19. stol.). ....	71 -
Obr. 53. Srovnání vlivu směru zatěžování na pevnost pro zkušební sadu I (referenční i zmrazované vzorky), ZR – zatěžováno ve směru uložení cihly v konstrukci, ZK – zatěžováno kolmo na směr uložení cihly v konstrukci; (a) Procentuální zastoupení rozdílných pevností – sada I; (b) vzorek ze sady I (polovina 18. stol. až polovina 19. stol.). ....	72 -
Obr. 54. Procentuální zastoupení rozdílných pevností vlivem směru zatěžování pro všechny zkušební sady a závislost cyklického zmrazování na tyto pevnosti, ZR – zatěžováno ve směru uložení cihly v konstrukci, ZK – zatěžováno kolmo na směr uložení cihly v konstrukci; (a) referenční (nezmrazovaný) soubor; (b) zmrazovaný soubor; (c) referenční i zmrazovaný soubor. ....	72 -
Obr. 55. Vliv vlhkosti na první vlastní frekvence podélného kmitání [160]. ....	75 -
Obr. 56. Vliv vlhkosti na první vlastní frekvence příčného kmitání [160]. ....	76 -
Obr. 57. Vliv vlhkosti na hodnoty stanovené pomocí UZ metody v podélném směru vzorku [160].-	76 -
Obr. 58. Vliv vlhkosti na hodnoty stanovené pomocí UZ metody v příčném směru vzorku [160]. ..-	76 -
Obr. 59. Procentuální nasycení při minimálních frekvencích a rychlostech šíření UZ vln [160]. .....	77 -
Obr. 60. Příklad prvku ze skupiny A [162]; (a) pokles hmotnosti ( $\Delta m$ ) a RDM; (b) vzorek před zmrazováním; (c) vzorek po 25 zmrazovacích cyklech.....	80 -
Obr. 61. Příklad prvku ze skupiny B [162]; (a) pokles hmotnosti ( $\Delta m$ ) a RDM; (b) vzorek před zmrazováním; (c) vzorek po 25 zmrazovacích cyklech.....	81 -
Obr. 62. Příklad prvku ze skupiny C [162]; (a) pokles hmotnosti ( $\Delta m$ ) a RDM; (b) vzorek před zmrazováním; (c) vzorek po 25 zmrazovacích cyklech.....	82 -
Obr. 63. Příklad signálu získaného pomocí metody impact-echo [7]; (a) signál v časové oblasti; (b) signál po transformaci do frekvenční oblasti se zvýrazněnými vrcholy s různými parametry, jako je frekvence, amplituda, šířka a prominence. ....	85 -

Obr. 64. Frekvenční spektrum podélného a kroutivého kmitání vzorku bez defektů ve vnitřní struktuře. .....	- 87 -
Obr. 65. Závislost mezi rezonanční frekvencí podélného kmitání na rychlosti šíření ultrazvukových vln v podélném směru cihel (ve vysušeném stavu) [7].	- 88 -
Obr. 66. Závislost nasákavosti na rychlosti šíření ultrazvukových vln v podélném směru cihel (ve vysušeném stavu) [7].	- 89 -
Obr. 67. Závislost frekvence podélného kmitání v nasyceném stavu na nasákavosti se zvýrazněnými cykly zmrazování a rozmrazování (do porušení vzorků) [7].	- 89 -
Obr. 68. Srovnání počtu zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů (třídy trvanlivosti), které vzorky vydržely před jejich porušením a nasákavosti.	- 90 -
Obr. 69. Rozložení metrik vrcholů s porovnáním s třídami a skóre jednotlivých vrcholů [7].	- 91 -
Obr. 70. Matice zmatenosti pro model s parametry získanými z $f_L$ bez statistických parametrů a hodnot skóre.	- 92 -
Obr. 71. Matice zmatenosti pro model se statistickými parametry, bez znalosti nasákavosti [7].	- 93 -
Obr. 72. Matice zmatenosti pro nejúspěšnější model, zahrnující veškeré parametry [7].	- 93 -
Obr. 73. Klasifikační strom navrženého modelu s parametry, podmínkami a výslednými predikovanými třídami trvanlivosti.	- 94 -

## 10. Seznam tabulek

Tab. 1. Hodnocení mrazuvzdornosti dle saturačního poměru – T [41] a koef. nasycení střepeu – KNS [25].....	- 16 -
Tab. 2. Hodnocení mrazuvzdornosti dle Maage faktoru [96] a med. poloměru pórů (Franke a Bentrup 1993) [97].....	- 26 -
Tab. 3. Kritéria mrazuvzdornosti dle ČSN 72 2609 [9] .	- 43 -
Tab. 4. Součinitel $\delta^{NP2}$ vyjadřující vliv rozměrů zkušebních těles změřených po úpravě povrchu zdicích prvků [4].....	- 46 -
Tab. 5. Objemové hmotnosti a pevnosti v tlaku vzorků stanovené destruktivně [138].	- 55 -
Tab. 6. Hmotnosti pilířů v nasyceném a vysušeném stavu. Požadované procentuální nasycení a hmotnosti. Skutečné procentuální nasycení, hmotnosti a nasákavost pilířů [153].	- 61 -
Tab. 7. Stanovení součinitele pro upřesnění NDT zkoušek zdicích prvků pilířů [153].....	- 62 -
Tab. 8. Rozměry, hmotnosti, objemové hmotnosti a výsledné pevnosti v tlaku zdicí malty [153]...-	64 -
Tab. 9. Pevnost zdicích prvků a malty v tlaku a charakteristická pevnost zdiva jednotlivých pilířů [153].	- 65 -
Tab. 10. Hodnoty součinitelů zahrnující vlivy na pevnost zdiva v tlaku, návrhová pevnost v tlaku $f_d$ a návrhová pevnost zdiva v tlaku $f_d^*$ ( $\gamma_{m3}^* = 1,0$ ) [153].....	- 66 -
Tab. 11. Pevnost v tlaku jednotlivých pilířů stanovená destruktivně [153].	- 67 -
Tab. 12. Nasákavost a proc. nasycení odpovídající minimálním frekvencím a rychlostem šíření UZ vln..	- 77 -
Tab. 13. Nastavení vah pro hodnocení frekvenčních vrcholů (A-amplituda, F-frekvence, P-prominence, š-šířka) [7].	- 86 -
Tab. 14. Přesnost modelu č. 2 a č. 3 v kombinacích vysušených nebo nasycených vzorků a stanovení frekvencí kroutivého nebo podélného kmitání metodou IE [7].....	- 94 -

## 11. Použité zdroje

- [1] MACEK, P.; a RAZÍM, V. *Zkoumání historických staveb*. 1. vyd. Praha: NPÚ, ÚOP středních Čech, 2011. ISBN 978-80-86516-41-7.
- [2] *Nejrozšířenějším materiálem po Zemi je cihla*. Online. CSČM. Dostupné z: [https://cscm.cz/nejrozsirenejsim-materiálem-po-zemi-je-cihla/](https://cscm.cz/nejrozsiренеjsim-materiálem-po-zemi-je-cihla/). [cit. 2024-04-27].
- [3] FIALA, J.; MIKOLAS, M.; JUNIOR, J. F. a KREJSOVA, K. (2019). *History and Evolution of Full Bricks of Other European Countries*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 603(3), 032097. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/603/3/032097>.
- [4] ČSN EN 772-1+A1 (722635) - *Zkušební metody pro zdicí prvky – Část 1: Stanovení pevnosti v tlaku*. Praha, ČNI, 2016.
- [5] *ASTM C67/C67M-21: Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile*. DOI: 10.1520/C0067\_C0067M-21. West Conshohocken, Pensylvánie, USA: ASTM International, 2021.
- [6] *JIS R 1250:2011. Common bricks and facing bricks*. 7. vyd. Japanese Standards Association, 2011.
- [7] BARTOŇ, V.; DVOŘÁK, R.; CIKRLÉ, P. a ŠNĚDAR, J. (2022). *Predicting the Durability of Solid Fired Bricks Using NDT Electroacoustic Methods*. *Materials*, 15(17):5882. <https://doi.org/10.3390/ma15175882>.
- [8] ČSN 72 2605 - *Skúšanie tehliarskych výrobkov. Stanovenie mechanických vlastností*. 1. vyd. Praha: ČNI, 1978.
- [9] ČSN 72 2609 - *Zkušební metody pro zdicí prvky – Specifické vlastnosti pálených zdicích prvků*. 1. vyd. Prague: ÚTN, 2017.
- [10] AHMADI, S. a REISI, M. (2020). *Comparison of mechanical and durability properties of concrete and fired facing bricks*. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*, 173(7), 512-522. doi:10.1680/jstbu.18.00144.
- [11] GLANVILLE, J. a NEVILLE, A. (Eds.). (1997). *Prediction of Concrete Durability: Proceedings of STATS 21st anniversary conference (1st ed.)*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482294910>.
- [12] BALKSTEN, K. a STRANDBERG-DE BRUIJN, P. (2022). *Understanding Deterioration due to Salt and Ice Crystallization in Scandinavian Massive Brick Masonry*. *Heritage*, s. 349-370. ISSN 2571-9408. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/heritage4010022>.
- [13] STRYSZEWSKA, T. a KAŇKA, S. (2019). *Forms of damage of bricks subjected to cyclic freezing and thawing in actual conditions*. *Materials*, roč. 12, č. 1165, s. 16. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma12071165>.
- [14] FRUMUSELU, D. (1999). *Application of IR thermography to NDT of art monuments*. *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 41(9), 582-584.
- [15] KONIORCZYK, M.; GAWIN, D. a SCHREFLER, B. A. (2015). *Modeling evolution of frost damage in fully saturated porous materials exposed to variable hygro-thermal conditions*. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, č. 297, s. 39-61. ISSN 0045-7825. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2015.08.015>.
- [16] FAGERLUND, G. (1973). *Critical Degrees of Saturation at Freezing of Porous and Brittle Materials*. Ph.D. Thesis. Lund University, Lund, Sweden.

- [17] BAJARE, D. a SVINKA, V. (2000). *Restoration of the historical brick masonry*. In V. Fassina (Ed.), *Proceedings of the 9th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone* (s. 3–11). Elsevier Science B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-044450517-0/50080-5>.
- [18] BIAŁAS, K. *Konserwatorski remont kościoła św. Stanisława w Warszawie*. Online. Magazyn WhiteMAD - moda, architektura, design w jednym miejscu. Dostupné z: <https://www.whitemad.pl/konserwatorski-remont-kościoła-sw-stanisława-w-warszawie/>. [cit. 2024-03-28].
- [19] ANTON, O; CIKRLÉ, P.; HEŘMÁNKOVÁ, V.; a KRÁLÍKOVÁ, M. *Brick masonry elements in Brno in the late 19th century*. *Forum urbes medii aevi*. 2015, s. 302-309. ISSN 1803-1749.
- [20] YU, Jason a BULL, John. *Durability of Materials and Structures in Building and Civil Engineering*. 1. vyd. Dunbeath Mill: Whittles Publishing, 2006. ISBN 978-1870325585.
- [21] SJÖSTRÖM, CH. *Durability of Building Materials and Components 7: Proceedings of the Seventh International Conference on Durability of Building Materials and Components, 7DBMC, Stockholm, Sweden, 19-23 May 1996, Christer Sjöström*. Spon, 1996. ISBN 0419206906, 9780419206903.
- [22] WRIGHT, J.R.; FROHNSDORFF, G. *Durability of building materials: Durability research in the United States and the influence of RILEM on durability research*. *Materials and Structures*, 18, s. 205–214 (1985). Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/BF02472971>.
- [23] ZHAO, C.; ZHANG, Y.; WANG, C.C. et al. *Recent progress in instrumental techniques for architectural heritage materials*. *Herit Sci*, 7, 36 (2019). Dostupné z: <https://doi.org/10.1186/s40494-019-0280-z>.
- [24] BINDA, L.; MOLINA, C. *Building Materials Durability: Semi-Markov Approach*. online. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 1990, roč. 2, č. 4, s. 223-239. Dostupné z: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1990\)2:4\(223\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1990)2:4(223)). [cit. 2023-11-30].
- [25] CIKRLÉ, P.; SOKOLÁŘ, R.; TOPOLÁŘ, L.; PAZDERA, L.; ANTON, O. *Metodika pro nedestr. diagnostiku zdících prvků: Komplexní metodika pro nedestruktivní a šetrnou semidestruktivní diagnostiku fyzikálně-mechanických vlastností historických pálených zdících prvků*. Brno. Dostupné z: <https://historickehly.cz/projekt/metodika>, [cit. 2023-11-30].
- [26] HOLUB, P.; ANTON, O. *99 brněnských cihelen: historický vývoj stavebních materiálů z pálené hlíny a jejich výroby na území města Brna: kritický katalog výstavy konané ve dnech 16.9.-31.12.2020 v prostorách Fakulty stavební VUT v Brně*. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, nakladatelství VUTIUM, 2020. ISBN 978-80-214-5899-4.
- [27] FERNANDES, F.M.; LOURENÇO, P.B.; CASTRO, F. *Ancient Clay Bricks: Manufacture and Properties*. In: DAN, M.B.; PŘIKRYL, R.; TÖRÖK, Á. (eds.), *Materials, Technologies and Practice in Historic Heritage Structures* (s. 29–48). Springer Netherlands, 2010. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-2684-2\\_3](https://doi.org/10.1007/978-90-481-2684-2_3).
- [28] PÉREZ-MONSERRAT, E.M.; MARITAN, L.; GARBIN, E.; CULTRONE, G. *Production Technologies of Ancient Bricks from Padua, Italy: Changing Colors and Resistance over Time*. *Minerals*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/min11070744>.
- [29] EL-MIDANY, A.A.; MAHMOUD, H.M. *Mineralogical, physical and chemical characteristics of historic brick-made structures*. *Mineralogy and Petrology*, 109(6), s. 733–739, 2015. <https://doi.org/10.1007/s00710-015-0406-2>.
- [30] RAMLI, Z.; RAHMAN, N.H.S.N.A.; JUSOH, A.; HUSSEIN, M.Z. *Compositional Analysis on Ancient Bricks from Candi Sungai Mas (Site 32/34), Bujang Valley, Kedah*. *American Journal of Applied Sciences*, 9(2), s. 196-201, 2012. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2012.196.201>.
- [31] DALKILIÇ, N.; NABIKOĞLU, A. *Traditional manufacturing of clay brick used in the historical buildings of Diyarbakir (Turkey)*. *Frontiers of Architectural Research*, 6(3), s. 346–359, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2017.06.003>.

- [32] KUMAR MISHRA, A.; MISHRA, A.; ANSHUMALI. *Geochemical characterization of bricks used in historical monuments of 14-18th century CE of Haryana region of the Indian subcontinent: Reference to raw materials and production technique*. Construction and Building Materials, 269, 121802, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121802>.
- [33] ELERT, K.; CULTRONE, G.; NAVARRO, C.R.; PARDO, E.S. *Durability of bricks used in the conservation of historic buildings — influence of composition and microstructure*. Journal of Cultural Heritage, 4(2), s. 91–99, 2003. [https://doi.org/10.1016/S1296-2074\(03\)00020-7](https://doi.org/10.1016/S1296-2074(03)00020-7).
- [34] ČSN 72 2607 *Skúšanie tehliarskych výrobkov. Stanovenie výskytu cicvárov*. Technický a skúšobný ústav stavebný, Bratislava, 1979.
- [35] CULTRONE, G.; SEBASTIÁN, E.; ELERT, K.; DE LA TORRE, M.J.; CAZALLA, O.; RODRIGUEZ-NAVARRO, C. *Influence of mineralogy and firing temperature on the porosity of bricks*. Journal of the European Ceramic Society, 24(3), s. 547–564, 2004. [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(03\)00249-8](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(03)00249-8).
- [36] KARAMAN, S.; ERŞAHIN, S.; GÜNAL, H. *Firing temperature and firing time influence on mechanical and physical properties of clay bricks*. Journal of Scientific & Industrial Research, 65, s. 153–159, 2006. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:73691245>.
- [37] RUSIN, Zbigniew; STELMASZCZYK, Grzegorz; ŚWIERCZ, P. *Differential analysis of volumetric strains in porous materials in terms of water freezing*. Ceramics-Silikaty, 57.2, s. 103-107, 2013.
- [38] SECO, A.; URMENETA, P.; PRIETO, E.; MARCELINO, S.; GARCÍA, B.; MIQUELEIZ, L. *Estimated and real durability of unfired clay bricks: Determining factors and representativeness of the laboratory tests*. Construction and Building Materials, 131, s. 600–605, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.107>.
- [39] FENG, C.; ROELS, S.; JANSSEN, H. *Towards a more representative assessment of frost damage to porous building materials*. Building and Environment, 164, 106343, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106343>.
- [40] SVEDA, M. *Effect of water absorption on frost resistance of clay roofing tiles*. British Ceramic Transactions, 102, s. 43–45, 2003. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:137314734>.
- [41] DIN 52251-3 *Indirekte Prüfverfahren zur Prüfung der Frostwiderstandsfähigkeit von Dachziegeln; Bestimmung des Tränkungswertes*. Deutsches institut für normung, Berlín, 1987.
- [42] PHILIP, J. R. *THE THEORY OF INFILTRATION: 4. SORPTIVITY AND ALGEBRAIC INFILTRATION EQUATIONS*. Soil Science, 84(3). Dostupné z: [https://journals.lww.com/soilsci/fulltext/1957/09000/the\\_theory\\_of\\_infiltration\\_\\_4\\_\\_sorptivity\\_and.10.aspx](https://journals.lww.com/soilsci/fulltext/1957/09000/the_theory_of_infiltration__4__sorptivity_and.10.aspx).
- [43] HALL, C. a HOFF, W. D. *Water Transport in Brick, Stone and Concrete*. 3. vydání. CRC Press, 2021. Dostupné z: <https://doi.org/10.1201/9780429352744>.
- [44] MARTYS, N. S. a FERRARIS, C. F. *Capillary transport in mortars and concrete*. Cement and Concrete Research, 27(5), 747–760, 1997. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00052-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00052-5).
- [45] DEGHANPOOR ABYANEH, S., WONG, H. S. a BUENFELD, N. R. *Computational investigation of capillary absorption in concrete using a three-dimensional mesoscale approach*. Computational Materials Science, 87, 54–64, 2014. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2014.01.058>.
- [46] GARDNER, D., JEFFERSON, A. a HOFFMAN, A. *Investigation of capillary flow in discrete cracks in cementitious materials*. Cement and Concrete Research, 42(7), 972–981, 2012. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.03.017>.

- [47] RUSIN, Z. a ŚWIERCZ, P. *Frost resistance of rock materials*. Construction and Building Materials, 148, 704–714, 2017. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.198>.
- [48] HALL, C. *Water sorptivity of mortars and concretes: a review*. Magazine of Concrete Research, 41(147), 51–61, 1989. Dostupné z: <https://doi.org/10.1680/mac.1989.41.147.51>.
- [49] HURLEBAUS, S.; HUESTE, M.; KARTHIK, M. a TERZIOGLU, T. *CONDITION ASSESSMENT OF BRIDGE POST-TENSIONING AND STAY CABLE SYSTEMS USING NDE METHODS*. 2016. Dostupné z: [https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/docs/NCHRP14-28\\_FR.pdf](https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/docs/NCHRP14-28_FR.pdf). [cit. 2023-11-30].
- [50] PLACHÝ, J. a HORSKÝ, J. *Nedestruktivní průzkum poruch vozovkového souvrství na mostech s betonovou mostovkou a hydroizolační vrstvou z asfaltových pásů*. Silnice – železnice, 2015. ISSN 1803-8441. Dostupné z: <http://old.silnice-zeleznice.cz/clanek/nedestruktivni-pruzkum-poruch-vozovkoveho-souvrstvi-na-mostech-s-betonovou-mostovkou-a-hydroizolacni-vrstvou-z-asfaltovych-pasu/>. [cit. 2023-11-30].
- [51] HOBST, L.; ADÁMEK, J.; CIKRLÉ, P.; SCHMID, P. *Diagnostika stavebních konstrukcí: Průvodce předmětem*. Brno: FAST VUT v Brně, 2005.
- [52] CHRISTARAS, B.; CUCCURU, F.; FAIS, S.; PAPANIKOLAOU, H. *Application of Non Destructive Ultrasonic Techniques for the Analysis of the Conservation Status of Building Materials in Monumental Structures*. 2015, s. 139–143.
- [53] CIKRLÉ, P.; JURÁŇ, D.; KOCÁB, D.; ŠNĚDAR, J. *Nedestruktivní měření tloušťky betonu ultrazvukovou odrazovou metodou*. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/24355-nedestruktivni-mereni-tloustky-betonu-ultrazvukovou-odrazovou-metodou>. [cit. 2024-04-08].
- [54] VERMA, B.; BÉLANGER, P. *Surface breaking crack sizing method using pulse-echo Rayleigh waves*. Ultrasonics, 2024, 138, 107232. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2023.107232>.
- [55] CIKRLÉ, P.; HUŇKA, P. *Porovnání metodik zkoušení modulu pružnosti betonu*. In *Technologie, provádění a kontrola betonových konstrukcí 2006*. Praha: Česká betonářská společnost ČSSI, 2006, ISBN: 80-903502-4-0.
- [56] KOPEC, B. a kol. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí*. Brno: CERM, 2008, ISBN: 978-80-7204-591-4.
- [57] CIKRLÉ, P.; ANTON, O.; DANĚK, P.; KUCHARCZYKOVÁ, B.; MISÁK, P.; GROHOVÁ, T. *NDT zkoušení ve stavebnictví*. Brno: Ústav stavebního zkušebnictví, 2015, Příručka kurzu ČŽV, verze 2015.
- [58] KOCÁB, D. *EXPERIMENTÁLNÍ STANOVENÍ FAKTORŮ OVLIVŇUJÍCÍCH STATICKÝ MODUL PRUŽNOSTI BETONU S VYUŽITÍM NEDESTRUKTIVNÍCH ZKUŠEBNÍCH METOD*. Disertační práce. Brno: VUT, fakulta stavební – SZK, 2016.
- [59] *ČSN EN 12504-4 (731303): Zkoušení betonu v konstrukcích – Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.
- [60] *ČSN 73 1372: Nedestruktivní zkoušení betonu – Rezonanční metoda zkoušení betonu*. Prague: ÚTN, 2012.
- [61] KOŘENSKÁ, M. *Aplikace akustických metod ve stavebnictví*. Habilitační práce. Brno: VUT, Fakulta stavební – Ústav fyziky, 2006.
- [62] DVOŘÁK, R. *Využití akustických metod pro posouzení vlivu složení cementových kompozitů na průběh degradace vyvolané zvýšenou teplotou*. Disertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav fyziky, 2020.

- [63] BRACEWELL, R. *The Fourier Transform & Its Applications*. 3. USA: McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 1999. ISBN 0073039381.
- [64] CIKRLÉ, P. a POSPÍCHAL, O. *Nový způsob stanovení mrazuvzdornosti betonu s využitím metod pro sledování poruch struktury*. Online. In: *Ebeton*. s. 56-61. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/clanky/2011-3-56-novy-zpusob-stanoveni-mrazuvzdornosti-betonu-s-vyuzitim-metod-pro-sledovani-poruch-struktury/>. [cit. 2024-04-08].
- [65] ČSN 73 1380 (731380) *Zkoušení odolnosti betonu proti zmrazování a rozmrazování - Porušení vnitřní struktury*. Praha: ČNI, 2007.
- [66] ASTM C1383-15. *Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method*. 1. West Conshohocken: ASTM International, 2015.
- [67] ČSN EN 12371 - *Zkušební metody přírodního kamene - Stanovení mrazuvzdornosti*. 1. Praha: ÚTN, 2010.
- [68] MAZAL, P., PAZDERA, L. a SMUTNÝ, J. *Identifikace kontaktního poškození materiálů a ložisek metodou akustické emise*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2009. ISBN 978-80-214-3826-2.
- [69] HOI, N.-S., KIM, T.-W. a RHEE, K. Y. *Kaiser effects in acoustic emission from composites during thermal cyclic-loading*. *NDT & E International*, 2005, 38(4), s. 268–274. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2004.09.005>.
- [70] ANDREEV, K., SHETTY, N. a VERSTRYNGE, E. *Acoustic emission based damage limits and their correlation with fatigue resistance of refractory masonry*. *Construction and Building Materials*, 2018, 165, s. 639–646. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.062>.
- [71] MURAVIN, G; LEZVINSKY, L; MURAVIN, B. *Acoustic emission diagnostics of reinforced concrete bridges condition*. *Prog Acous Emission*, 1998, 9, s. 89-98.
- [72] KEPPERT, M. *Distribuce velikosti pórů ve stavebních materiálech – charakterizace a význam*. Online. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební. Dostupné z: <https://portal.cvut.cz/wp-content/uploads/2017/04/HP2016-08-Keppert.pdf>. [cit. 2024-03-25].
- [73] SHRESTHA, S., STARR, T. a CHOU, K. *Porosity Analysis in Metal Additive Manufacturing by Micro-CT: Vol. Volume 2: Advanced Manufacturing* (p. V002T02A059). <https://doi.org/10.1115/IMECE2018-87897>.
- [74] VICENTE, M. A., MÍNGUEZ, J., & GONZÁLEZ, D. C. (2017). The Use of Computed Tomography to Explore the Microstructure of Materials in Civil Engineering: From Rocks to Concrete. In A. M. Halefoglú (Ed.), *Computed Tomography*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.69245>.
- [75] CARMELIET, J., DELERUE, J.-F., VANDERSTEEN, K. a ROELS, S. *Three-dimensional liquid transport in concrete cracks*. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2004, 28(7–8), s. 671–687. <https://doi.org/10.1002/nag.373>.
- [76] CONSTANTIN, F., PAVEL, C., BUGOI, R. a TODERĂȘ, M. *An X-ray tomograph based on a flat panel detector*. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2010, 621(1), s. 685–689. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.05.010>.
- [77] COLETTI, C., CULTRONE, G., MARITAN, L. a MAZZOLI, C. *Combined multi-analytical approach for study of pore system in bricks: How much porosity is there? Materials Characterization*, 2016, 121, s. 82–92. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2016.09.024>.

- [78] KLEMENT, U., EKBERG, J. a KELLY, S. T. *3D Analysis of Porosity in a Ceramic Coating Using X-ray Microscopy*. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2017, 26(3), s. 456–463. <https://doi.org/10.1007/s11666-017-0532-y>.
- [79] STĘPIEŃ, P., SPYCHAŁ, E. a SKOWERA, K. *A Comparative Study on Hygric Properties and Compressive Strength of Ceramic Bricks*. *Materials*, 2022, 15(21):7820. <https://doi.org/10.3390/ma15217820>.
- [80] BRUNETTI, A. a CESAREO, R. *X-ray tomography using a CMOS area detector*. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2007, 258(2), s. 485–489. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2007.02.067>.
- [81] GIBBY, W. A. *Basic principles of magnetic resonance imaging*. *Neurosurgery Clinics of North America*, 2005, 16(1), s. 1–64. <https://doi.org/10.1016/j.nec.2004.08.017>.
- [82] FULLERTON, G. D. *Basic concepts for nuclear magnetic resonance imaging*. *Magnetic Resonance Imaging*, 1982, 1(1), s. 39–53. [https://doi.org/10.1016/0730-725X\(82\)90272-7](https://doi.org/10.1016/0730-725X(82)90272-7).
- [83] MARICA, F., CHEN, Q., HAMILTON, A., HALL, C., AL, T. a BALCOM, B. J. *Spatially resolved measurement of rock core porosity*. *Journal of Magnetic Resonance*, 2006, 178(1), s. 136–141. <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2005.09.003>.
- [84] LIN, Jie-LI, ping Ke-ZHOU, jie Wei-LIU a wei Hong-DENG. *NMR research on deterioration characteristics of microscopic structure of sandstones in freeze–thaw cycles*. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016, 26(11), s. 2997–3003. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(16\)64430-8](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(16)64430-8).
- [85] LIU, T., ZHANG, C., CAO, P. a ZHOU, K. *Freeze-thaw damage evolution of fractured rock mass using nuclear magnetic resonance technology*. *Cold Regions Science and Technology*, 2020, 170, 102951. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.102951>.
- [86] JIA, H., DING, S., ZI, F., DONG, Y. a SHEN, Y. *Evolution in sandstone pore structures with freeze-thaw cycling and interpretation of damage mechanisms in saturated porous rocks*. *CATENA*, 2020, 195, 104915. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104915>.
- [87] BERUTO, D., GIORDANI, M. a TURRIZIANI, R. *Frost resistance and related structural and chemical material properties*. *Materials Chemistry and Physics*, 1985, 12(5), s. 407–418. [https://doi.org/10.1016/0254-0584\(85\)90067-7](https://doi.org/10.1016/0254-0584(85)90067-7).
- [88] XIONG, Q., BAYCHEV, T. G. a JIVKOV, A. P. *Review of pore network modelling of porous media: Experimental characterisations, network constructions and applications to reactive transport*. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2016, 192, s. 101–117. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2016.07.002>.
- [89] FERGUSON, J. A. *A Study of Pore Size Distributions in Fired Clay Bricks in Relation to Salt Attack Resistance*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:195854502>.
- [90] STULL, R. T. a JOHNSON, P. V. *Some properties of the pore system in bricks and their relation to frost action*. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 1940, 25, s. 711. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:137820713>.
- [91] NETINGER GRUBEŠA, I., VRAČEVIĆ, M., RANOGAJEC, J. a VUČETIĆ, S. *Influence of Pore-Size Distribution on the Resistance of Clay Brick to Freeze–Thaw Cycles*. *Materials*, 2020, 13, 2364. <https://doi.org/10.3390/ma13102364>.
- [92] MALLIDI, S. R. *Application of mercury intrusion porosimetry on clay bricks to assess freeze-thaw durability — a bibliography with abstracts*. *Construction and Building Materials*, 1996, 10(6), s. 461–465. [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(96\)00005-0](https://doi.org/10.1016/0950-0618(96)00005-0).
- [93] HANSEN, W. a KUNG, J. H. *Pore structure and frost durability of clay bricks*. *Materials and Structures*, 1988, 21, s. 443–447. <https://doi.org/10.1007/BF02472325>.

- [94] WINSLOW, D., KILGOUR, C. a CROOKS, R. *Predicting the Durability of Bricks*. *ASTM International. J. Test. Eval.*, November 1988; 16(6), s. 527–531. <https://doi.org/10.1520/JTE11271J>.
- [95] *Mercury Intrusion Porosimetry Basics: Measuring Pores in Solids*. Online. Anton Paar. Dostupné z: <https://wiki.anton-paar.com/en/mercury-intrusion-porosimetry-basics-measuring-pores-in-solids/>. [cit. 2024-03-04].
- [96] MAAGE, M. *Frost resistance and pore size distribution in bricks*. *Mat. Constr.*, 1984, 17, s. 345–350. <https://doi.org/10.1007/BF02478706>.
- [97] FRANKE, L. a BENTRUP, H. *Beurteilung der Frostwiderstandsfähigkeit von Ziegeln im Hinblick auf lange Lebensdauer. Teil 1: Ziegelindustrie International 7-8 / 93, S. 483 - 492. Teil 2: Ziegelindustrie International 9 / 93, S. 528 - 536*.
- [98] LOWELL, S., SHIELDS, J., THOMAS, M. a THOMMES, M. *Characterization of Porous Solids and Powders: Surface Area, Pore Size and Density*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2004.
- [99] ROUQUEROL, Jean, BARON, Gino, DENOYEL, Renaud, GIESCHE, Herbert, GROEN, Johan, KLOBES, Peter, LEVITZ, Pierre, NEIMARK, Alexander V., RIGBY, Sean, SKUDAS, Romas, SING, Kenneth, THOMMES, Matthias a UNGER, Klaus. *Liquid intrusion and alternative methods for the characterization of macroporous materials (IUPAC Technical Report)*. *Pure and Applied Chemistry*, 2011, 84, no. 1, s. 107-136. <https://doi.org/10.1351/PAC-REP-10-11-19>.
- [100] ABELL, A. B., WILLIS, K. L. a LANGE, D. A. *Mercury Intrusion Porosimetry and Image Analysis of Cement-Based Materials*. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1999, 211(1), s. 39–44. <https://doi.org/10.1006/jcis.1998.5986>.
- [101] WASHBURN, Edward W. *Note on a Method of Determining the Distribution of Pore Sizes in a Porous Material*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1921, 7(4), s. 115–116. <https://doi.org/10.1073/pnas.7.4.115>.
- [102] *ASTM D4404-12: Standard Test Method for Determination of Pore Volume and Pore Volume Distribution of Soil and Rock by Mercury Intrusion Porosimetry*. West Conshohocken: ASTM International, 2012.
- [103] *ISO 15901-1: Evaluation of pore size distribution and porosity of solid materials by mercury porosimetry and gas adsorption – Part 1: Mercury porosimetry*. Geneva: International Organization for Standardization, 2019.
- [104] *Mercury Intrusion Porosimetry*. Online. Particle Technology Labs. Dostupné z: <https://particletechlabs.com/analytical-testing/mercury-intrusion-porosimetry/>. [cit. 2024-03-04].
- [105] LEON, C. A. *New perspectives in mercury porosimetry*. *Advances in Colloids and Interface Science*. 1998.
- [106] DENOYEL, Renaud, et al. *Comparing the Basic Phenomena Involved in Three Methods of Pore-size Characterization: Gas Adsorption, Liquid Intrusion and Thermoporometry*. *Particle & Particle Systems Characterization: Measurement and Description of Particle Properties and Behavior in Powders and Other Disperse Systems*, 2004, 21.2, s. 128-137.
- [107] SING, K. *The use of nitrogen adsorption for the characterisation of porous materials*. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2001, 187–188, s. 3–9. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(01\)00612-4](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(01)00612-4).
- [108] *ISO 9277:2022 Determination of the specific surface area of solids by gas adsorption-BET method*. Geneva: International Organization for Standardization, 2022.
- [109] PARRY, A. O., RASCÓN, C., WILDING, N. B., a EVANS, R. *Condensation in a Capped Capillary is a Continuous Critical Phenomenon*. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, 98(22), 226101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.98.226101>.

- [110] CHALUPA, J. a HUBERMAN, B. A. *Theory of capillary condensation. The Journal of Chemical Physics*, 1980, 72(9), s. 5276–5277. <https://doi.org/10.1063/1.439765>.
- [111] RIIKONEN, J., SALONEN, J. a LEHTO, V.-P. *Utilising thermoporometry to obtain new insights into nanostructured materials. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2011, 105(3), s. 811–821. <https://doi.org/10.1007/s10973-010-1167-0>.
- [112] THOMMES, M., KÖHN, R. a FRÖBA, M. *Sorption and Pore Condensation Behavior of Nitrogen, Argon, and Krypton in Mesoporous MCM-48 Silica Materials. The Journal of Physical Chemistry B*, 2000, 104(33), s. 7932–7943. <https://doi.org/10.1021/jp994133m>.
- [113] GROEN, J. C., PEFFER, L. A. A. a PÉREZ-RAMÍREZ, J. *Pore size determination in modified micro- and mesoporous materials. Pitfalls and limitations in gas adsorption data analysis. Microporous and Mesoporous Materials*, 2003, 60(1), s. 1–17. [https://doi.org/10.1016/S1387-1811\(03\)00339-1](https://doi.org/10.1016/S1387-1811(03)00339-1).
- [114] LIU, B. a YANG, T. *Image analysis for detection of bugholes on concrete surface. Construction and Building Materials*, 2017, 137, s. 432–440. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.098>.
- [115] ČSN EN 480-11 (722325) *Přísady do betonu, malty a injektážní malty – Zkušební metody – Část 11: Stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu*. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006.
- [116] *ASTM C457-09. Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2009.
- [117] CHONG, W. B., OTHMAN, R., JAYA, R. P., SHU ING, D., LI, X., WAN IBRAHIM, M. H., ABDULLAH, M. M. A. B., SANDU, A. V., PŁOSZAJ, B., SZMIDLA, J. a STACHOWIAK, T. *Image Analysis of Surface Porosity Mortar Containing Processed Spent Bleaching Earth. Materials*, 2021, 14(7). <https://doi.org/10.3390/ma14071658>.
- [118] DE ALBUQUERQUE, V. H. C., FILHO, P. P. R., CAVALCANTE, T. S. a TAVARES, J. M. R. S. *New computational solution to quantify synthetic material porosity from optical microscopic images. Journal of Microscopy*, 2010, 240(1), s. 50–59. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2818.2010.03384.x>.
- [119] LEE, Bang Yeon S.-T. Y., KIM, Yun Yong a KIM, J.-K. *Automated image processing technique for detecting and analysing concrete surface cracks. Structure and Infrastructure Engineering*, 2013, 9(6), s. 567–577. <https://doi.org/10.1080/15732479.2011.593891>.
- [120] DE ALBUQUERQUE, Victor Hugo C., DE A. A. R., CORTEZ, Paulo C. a TAVARES, J. M. R. S. *A new solution for automatic microstructures analysis from images based on a backpropagation artificial neural network. Nondestructive Testing and Evaluation*, 2008, 23(4), s. 273–283. <https://doi.org/10.1080/10589750802258986>.
- [121] JOHANNESSON, B. *Dimensional and ice content changes of hardened concrete at different freezing and thawing temperatures. Cement and Concrete Composites*, 2010, 32(1), s. 73–83. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.09.001>.
- [122] SUN, Z. a SCHERER, G. W. *Pore size and shape in mortar by thermoporometry. Cement and Concrete Research*, 2010, 40(5), s. 740–751. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.11.011>.
- [123] LANDRY, M. R. *Thermoporometry by differential scanning calorimetry: experimental considerations and applications. Thermochimica Acta*, 2005, 433(1), s. 27–50. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2005.02.015>.
- [124] BRUN, M., LALLEMAND, A., QUINSON, J.-F. a EYRAUD, C. *A new method for the simultaneous determination of the size and shape of pores: the thermoporometry. Thermochimica Acta*, 1977, 21(1), s. 59–88. [https://doi.org/10.1016/0040-6031\(77\)85122-8](https://doi.org/10.1016/0040-6031(77)85122-8).

- [125] STĘPIEŃ, P. a SPYCHAŁ, E. *The Use of Thermoporometry in the Study of Frost Resistance of Rocks*. *Materials*, 2024, 17(3). <https://doi.org/10.3390/ma17030620>.
- [126] BARTOŇ, V., ŠNĚDAR, J. a CIKRLE, P. *Nedestruktivní metody pro stanovení trvanlivosti cihel plných pálených při rekonstrukci historických staveb*. JUNIORSTAV 2022 - 24. odborná konference doktorského studia - sborník příspěvků. Brno: ECON publishing, s.r.o., 2022. s. 332-337. ISBN 978-80-86433-76-9.
- [127] ČSN EN 772-21 (722635) *Zkušební metody pro zdicí prvky – Část 21: Stanovení nasákavosti pálených a vápenopískových zdicích prvků ve studené vodě*. Praha: ČNI, 2011.
- [128] ČSN EN 772-13 (722635) *Zkušební metody pro zdicí prvky – Část 13: Stanovení objemové hmotnosti materiálu zdicích prvků za sucha a objemové hmotnosti zdicích prvků za sucha (kromě zdicích prvků z přírodního kamene)*. Praha: ČNI, 2001.
- [129] CARINO, N. *THE IMPACT-ECHO METHOD: AN OVERVIEW*. Proceedings of the 2001 Structures Congress & Exposition. Gaithersburg, USA: National Institute of Standards and Technology, 2001, 18, 1-19. [https://doi.org/10.1061/40558\(2001\)15](https://doi.org/10.1061/40558(2001)15).
- [130] EPASTO, G., PROVERBIO, E. a VENTURI, V. *Evaluation of fire-damaged concrete using impact-echo method*. *Mater Struct*, 2010, 43, s. 235–245. <https://doi.org/10.1617/s11527-009-9484-0>.
- [131] GHORBANPOOR, A. a BENISH, N. *Non-destructive testing of Wisconsin highway bridge: Wisconsin highway research program—final report*. Wisconsin Department of Transportation, 2003.
- [132] ZHANG, J.-K.; YAN, W. a CUI, D.-M. *Concrete Condition Assessment Using Impact-Echo Method and Extreme Learning Machines*. *Sensors*, 2016, 16(4). <https://doi.org/10.3390/s16040447>.
- [133] ČSN 73 1371. *Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*. Praha: ÚTN, 2011.
- [134] ČSN EN 12504-2. *Zkoušení betonu v konstrukcích – Část 2: Nedestruktivní zkoušení – Stanovení tvrdosti odrazovým tvrdoměrem*. Praha: ČNI, 2023.
- [135] *ISO 1920-7:2004. Testing of Concrete—Part 7: Non-Destructive Tests on Hardened Concrete*. Geneva: International Organization for Standardization, 2004.
- [136] *ASTM C805. Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2008.
- [137] ČSN 73 1373. *Nedestruktivní zkoušení betonu – Tvrdoměrné metody zkoušení betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [138] BARTOŇ, V.; CIKRLE, P. a ŠNĚDAR, J. *The Determination of Compressive Strength of Masonry Elements of Monuments by the NDT Methods*. In: ENDŌ, Y. a HANAZATO, T. (eds.) *Structural Analysis of Historical Constructions*. Springer Nature Switzerland, 2024, s. 724–734.
- [139] DEBAILLEUX, L. *Schmidt hammer rebound hardness tests for the characterization of ancient fired clay bricks*. *International Journal of Architectural Heritage*, 2019, 13(2), s. 288–297. <https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1436204>.
- [140] ELJUFOUT, T.; HADADIN, N.; HADDAD, A. a ALHOMAIDAT, F. *Correlation models for utilising rebound hammer technique in evaluating weathered limestone walls*. *Australian Journal of Structural Engineering*, 2023, 24(1), s. 77–87. <https://doi.org/10.1080/13287982.2022.2087845>.
- [141] KARMAKAR, M.; BANERJEE, M. a GHOSH, D. *Evaluation of micro-weathering index and weathering grade of diverse geomorphic features of Proterozoic terrain applying Schmidt hammer*. *Physical Geography*, 2023, 44(3), s. 362–379. <https://doi.org/10.1080/02723646.2022.2082352>.

- [142] ČSN EN 771-1+A1. *Specifikace zdících prvků – Část 1: Pálené zdící prvky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [143] HAGHOFER, Iva. *Dříve spojoval tři obce. Nyní historický most společnými silami obnoví*. Online. Břeclavský deník. Dostupné z: [https://breclavsky.denik.cz/zpravy\\_region/drive-spojoval-tri-obce-nyni-historicky-most-spolecnymi-silami-obnovi-20190411.html](https://breclavsky.denik.cz/zpravy_region/drive-spojoval-tri-obce-nyni-historicky-most-spolecnymi-silami-obnovi-20190411.html). [cit. 2024-04-12].
- [144] PORTADESIGN.CZ. *Generální ředitelství NPÚ*. online. In: Národní památkový ústav. Dostupné z: <https://www.npu.cz/cs/generalni-reditelstvi-npu/inspirujte-se/6008-zamecek-portz>. [cit. 2024-04-12].
- [145] BARTOŇ, Vojtěch. *Metodika zkoušek historických cihel a zdiva*. Diplomová práce. Brno: VUT, fakulta stavební – SZK, 2020.
- [146] HRABAL, Michal. *Vranův mlýn? Kupme ho, vyzývá starosta Dominik*. online. In: Břeclavský deník. Dostupné z: [https://breclavsky.denik.cz/zpravy\\_region/vranuv-mlyn-kupme-ho-vyzyva-starosta-dominik-20170314.html](https://breclavsky.denik.cz/zpravy_region/vranuv-mlyn-kupme-ho-vyzyva-starosta-dominik-20170314.html). [cit. 2024-04-13].
- [147] IMPIRE.CZ. *Vránův, Zámecký mlýn; Lundenburg Mühle*. online. In: Vodnimlyny.cz. Dostupné z: <https://www.vodnimlyny.cz/mlyny/objekty/detail/2293-vranuv-zamecky-mlyn-lundenburg-muhle>. [cit. 2024-04-13].
- [148] KIKSRO. *KIKTEC*. online. In: Nenalezený vydavatel. Dostupné z: <http://www.kiksro.cz/prod-zk.html>. [cit. 2024-04-13].
- [149] Technické údaje – Přístroj pro zjišťování pevnosti zdících prvků a malty (Kučerova vrtačka). online. 2020. Dostupné z: [http://www.kiksro.cz/pdf/Návod\\_KV3.pdf](http://www.kiksro.cz/pdf/Návod_KV3.pdf). [cit. 2024-04-28].
- [150] ANDĚL, Jiří. *Statistické metody*. Páté vydání. Praha: Matfyzpress, 2019. ISBN 978-80-7378-381-5.
- [151] ANDĚL, Jiří. *Základy matematické statistiky*. Vyd. 3. Praha: Matfyzpress, 2011. ISBN 978-80-7378-162-0.
- [152] BROZOVSKY, J. *Determine the Compressive Strength of Calcium Silicate Bricks by Combined Nondestructive Method. The Scientific World Journal*. 2014, roč. 2014, s. 1-5. ISSN 2356-6140. Dostupné z: <https://doi.org/10.1155/2014/829794>.
- [153] Bartoň, V.; Šnědar, J. a Cikrle, P. *The influence of moisture on the compressive strength of brickwork. AIP Conference Proceedings, 2023, 2887(1), 020020*. <https://doi.org/10.1063/5.0158963>.
- [154] BARTOŇ, V.; ŠNĚDAR, J.; CIKRLÉ, P. *VLIV VLHKOSTI NA DEFORMACE CIHELNÉHO ZDIVA*. JUNIORSTAV 2023. Brno: ECON publishing, s.r.o, 2023. s. 377-382. ISBN: 978-80-86433-80-6.
- [155] ČSN ISO 13822 *Zásady navrhování konstrukcí – Hodnocení existujících konstrukcí*. Praha: ÚTN, 2014.
- [156] ČSN 730038. *Hodnocení a ověřování existujících konstrukcí – doplňující ustanovení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.
- [157] Metodika pro zjišťování pevnosti zdících prvků a malty ve stávající konstrukci. 1. technický a zkušební ústav stavební Praha, s.p., 2001.
- [158] ČSN EN 1015-11 (722400). *Zkušební metody malt pro zdivo – Část 11: Stanovení pevnosti zatvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku*. Prague: CEN, 2020.
- [159] MARSHALL, Ducan et al. *Understanding Housing Defects: Edition 4*. Milton Park, Abingdon-on-Thames, Oxfordshire United Kingdom: Routledge Taylor & Francis Group, 2013. ISBN 9781136153730.
- [160] BARTOŇ, V.; ŠNĚDAR, J. a CIKRLÉ, P. *Impact of dampness to changes in the mechanical properties of solid fired bricks. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1209(1), 012036*. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1209/1/012036>.

- [161] WITZANY, Jiří. *Poruchy a rekonstrukce zděných budov*. 1. Technická knižnice autorizovaného inženýra a technika. Praha: Český svaz stavebních inženýrů, 1999. ISBN 80-902-6975-3.
- [162] BARTOŇ, V.; ŠNĚDAR, J.; CIKRLÉ, P. *The Expansion of Defects of Solid Fired Bricks due to their Freezing*. In *Construction Technologies and Architecture. INTERNATIONAL CONFERENCE ON REHABILITATION AND RECONSTRUCTION OF BUILDINGS 2021*. Trans Tech Publications Ltd. <https://doi.org/10.4028/p-1bt8c0>.
- [163] ABOUZID, H. a CHAKKOR, O. *Dimension Reduction Techniques for Signal Separation Algorithms. Big Data, Cloud and Applications. Communications in Computer and Information Science*. 2018, s. 326-340. ISBN 978-3-319-96291-7. Dostupné z: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-96292-4\\_26](https://doi.org/10.1007/978-3-319-96292-4_26).
- [164] SAATY, R.W. *The analytic hierarchy process—what it is and how it is used*. *Mathematical Modelling*. 1987, roč. 9, č. 3-5, s. 161-176. ISSN 02700255. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8).
- [165] DVOŘÁK, R. a TOPOLÁŘ, L. *Effect of Hammer Type on Generated Mechanical Signals in Impact-Echo Testing*. *Materials*. 2021, roč. 14, č. 3. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma14030606>.
- [166] Breiman, L. *Random Forests*. *Machine Learning* 45, s. 5–32 (2001). <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>.