

Komplexní metodika pro nedestruktivní a šetrnou semidestruktivní diagnostiku fyzikálně-mechanických vlastností historických pálených zdících prvků

Jedná se o výsledek dílčího cíle 6 projektu NAKI II DG18P02OVV068 „Komplexní diagnostika pálených zdících prvků historických objektů z pohledu stáří, původu a fyzikálně-mechanických vlastností v závislosti na vlhkosti, a jejich náhrada v historických objektech“, poskytovatel: Ministerstvo kultury ČR.

Vypracovali: doc. Ing. Petr Cikrle, Ph.D.
doc. Ing. Radomír Sokolář, Ph.D.
prof. Ing. Luboš Pazdera, CSc.
doc. Mgr. Libor Topolář, Ph.D.
Ing. Ondřej Anton, Ph.D.

Pracoviště: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební
Ústav stavebního zkušebnictví
Veveří 331/95, 602 00 Brno
IČ: 00216305, DIČ: CZ00216305

Zpracováno: Brno, 31. 10. 2020

Úvod

Náhradu zdících prvků v historických konstrukcích lze řešit dvojitým způsobem:

- 1) Použitím nových zdících prvků, ať už se jedná o běžné nové cihly, anebo přímo o repliky historických cihel.
- 2) Použitím starých cihel získaných ze zbouraných historických konstrukcí.

Při použití nových zdících prvků by měly být garantovány jejich vlastnosti jak z hlediska pevnosti, tak i z hlediska trvanlivosti a odolnosti proti vlivům prostředí (certifikace výrobků, doložená zkouškami). Hlavním problémem je dosažení autenticity, tedy přirozeného historického vzhledu, jakési patiny.

Při použití historických cihel získaných ze zbouraných konstrukcí nebývá problém jejich **autenticita** (při výběru dle vizuálních vlastností), avšak obtížné je získat dostatečné množství cihel podobného vzhledu a vlastností a zejména prokázání kvality těchto cihel. Obecně rozšířené mínění o tom, že vypálená cihla je tak kvalitním prvkem, že ji lze bez problémů znovu použít, se nezakládá zcela na pravdě. Faktem je, že při znovupoužití starých cihel při rekonstrukcích památkově významných objektů hraje roli řada faktorů – od historie použití cihly (zda byla umístěna v chráněných či nechráněných konstrukcích), přes míru degradace (historie působení vlhkosti, vlivu solí, vlivu střídavého zmrazování a rozmrazování), avšak zřejmě nejdůležitějším faktorem je původní kvalita zdícího prvku – z jaké suroviny byl vyroben, zda byl technologicky správně zpracován a na jakou teplotu byl vypálen.

Dalším problémem je značná variabilita dodávaných historických cihel. Je třeba si uvědomit, že kvalita cihel se lišila i v rámci jednoho výpalu – podle umístění cihel v peci. Každý další výpal byl mírně odlišný, navíc máme spolehlivě doloženo, že do větších staveb byly dodávány cihly z více cihelen současně (např. ze 4 až 5). Znamená to, že i kvalita cihel použitých v jedné jediné konkrétní stavbě (např. v různých zdech či v různých podlažích) mohla značně kolísat. V dodávkách cihel pro rekonstrukce historických konstrukcí se přitom vyskytují cihly z mnoha různých staveb, čímž variabilita jejich vlastností ještě narůstá. Je proto velmi obtížné garantovat jejich kvalitu na základě standardních zkoušek – na odebraných 5 nebo 10 cihlách např. z množství desítek tisíc cihel nelze jejich kvalitu spolehlivě prokázat, k tomu by bylo zapotřebí odzkoušet výrazně větší množství vzorků.

V menší míře se tento problém objevuje i u nově vyrobených cihel, jejichž kvalita se může v čase rovněž měnit. Proto je důležité stanovit vlastnosti cihel pokud možno nedestruktivními metodami, které lze provést na velkém souboru cihel, v kombinaci s výrazně menším (optimalizovaným) množstvím standardních zkoušek, které jsou pro upřesnění nedestruktivních zkoušek nezbytné.

1 Cíle metodiky

Z výše uvedeného rozboru vyplynuly cíle metodiky. Uvedená metodika by měla především sloužit jako vhodný nástroj pro kvalitativní třídění plných pálených cihel. Základním cílem je ověření kvality zdících prvků určených/vybraných pro rekonstrukce památkově chráněných nebo významných objektů zděných konstrukcí. Metodika je v podstatě velmi podobná pro cihly nově vyráběné a cihly historické – znovupoužité. Určité rozdíly jsou ve vzorkování a výběru vhodných cihel. Je zřejmé, že při posouzení historických cihel bude zapotřebí provést výrazně větší množství zkoušek, včetně důkladného třídění cihel. Provedení velkého množství destruktivních zkoušek by však nevedlo k cíli. Cílem metodiky je tedy nalézt účelnou kombinaci standardních (destruktivních) zkoušek s takovými nedestruktivními metodami, které umožní na jedné straně objektivně stanovit fyzikálně mechanické vlastnosti souboru cihel určených pro obnovu historického a památkově chráněného zdiva, a na druhé straně umožní za pomoci výrazně širšího provedení nedestruktivních zkoušek nedestruktivních, u nichž byla předem provedena vhodná korelace s destruktivními zkouškami, což následně umožní roztřídění cihel podle kvality bez jejich poškození.

2 Popis metodiky

Uvedená metodika popisuje základní principy a způsob provádění a vyhodnocování zkoušek zdících prvků určených primárně jako náhrada či doplnění stávajícího historického zdiva.

Metodika je určena především pro výběr lícových cihel, které musí mít určité specifické vlastnosti, které závisí na prostředí jejich aplikace. Tato metodika je aplikovatelná jak na cihlách starých (použitých, získaných ze zbouraných konstrukcí), tak na nových vyrobených v cihelně, ať už se jedná o běžnou produkci nebo speciálně vyráběné repliky historických cihel. Metodika využívá rozsáhlý soubor zkušebních metod, které však nemusí být vždy v celé šíři využity v závislosti na konkrétních požadavcích na zdící prvky.

2.1 Požadavky na zdící prvky

V první fázi je nutné definovat požadavky na vlastnosti cihel s ohledem na jejich umístění v konstrukci. V zásadě záleží především na tom, zda jde o chráněné (interiérové) zdivo bez možností účinků mrazu, anebo zdivo nechráněné.

2.1.1 Chráněné (interiérové) zdivo bez možnosti účinku mrazu

- Typ cihel: P podle ČSN EN 771-1+A1;
- Prostedí: MX1 (suché prostředí), MX2 (s vlivem vlhkosti nebo smáčení) podle ČSN EN 1996;
- Speciální požadavky z pohledu mrazuvzdornosti a obsahu aktivních rozpustných solí na cihly v závislosti na prostředí aplikace: MX1: libovolné, MX2: F0 (neagresivní prostředí), F1 (mírně agresivní prostředí) nebo F2 (silně agresivní prostředí)/S1 nebo S2 (podle ČSN EN 771-1), doporučuje se S2 bez požadavku na mrazuvzdornost.
- Ostatní požadavky: požadovaná pevnost v tlaku, rozměry, barva střepe.

2.1.2 Nechráněné zdivo

- Typ cihel: U podle ČSN EN 771-1+A1;
- Prostedí MX3 – MX5 podle ČSN EN 1996;
- Požadavek na cihly v závislosti na prostředí aplikace: F1 až F2, S2;
- Ostatní požadavky: požadovaná pevnost v tlaku, rozměry, barva střepe.

2.1.3 Odběr vzorků

Postup při odběru vzorků je popsán v normativní Příloze A normy ČSN EN 771-1+A1. Tento postup se uplatňuje při zkouškách určení typu a v případě požadavku na posouzení shody.

V zásadě se rozlišují dva druhy odběrů vzorků:

- Náhodný odběr vzorků – kdykoliv je to možné, je preferován.
- Reprezentativní odběr vzorků – tam, kde je obtížné se k některým vzorkům dostat.

Ačkoliv je náhodný odběr preferován, v reálných podmínkách je možný pouze u menšího množství vzorků buď volně přístupných, anebo naskládaných v malých slohách (každý vzorek

v dodávce má mít stejnou šanci být vybrán). V případě velkých dodávek paletovaných cihel je obvykle nutné provést reprezentativní výběr vzorků.

Např. při dodávce cihel na paletách musí být náhodně vybráno minimálně 6 palet (balení). Po odstranění obalu se z každé palety vybere stejný počet prvků, nejvýše 4, s přihlédnutím na počet zkoušek. Nesmí se vybrat prvky poškozené při dopravě.

Pokud má vzorek poskytnout pálené zdící prvky pro několik zkoušek, musí se shromáždit celkový počet a ten náhodným způsobem rozdělit do podsouborů. Počty prvků pro nejdůležitější zkoušky pro prvky typu „U“ uvádí tab. 1.

Tab. 1: Počty prvků U požadované pro jednu zkoušku [ČSN EN 771-1+A1].

Vlastnost	Zkušební metoda	Počet cihel
Rozměry	EN 772-16	10
Rovinnost ložných ploch	EN 772-20	3
Rovnoběžnost rovin ložných ploch	EN 772-16	3
Tvarové uspořádání	EN 772-3, 9, 16	10
Objemová hmotnost zdícího prvku v suchém stavu	EN 772-13	10
Pevnost v tlaku	EN 772-1	10
Mrazuvzdornost (odolnost proti zmrazování/rozmrazování)	ČSN 72 2609	5
Nasákavost	EN 772-21	10
Počáteční rychlost nasákavosti	EN 772-11	10
Obsah aktivních rozpustných solí	EN 772-5	10

Poznámka: Pokud nedojde zkouškou k ovlivnění vlastností cihel, může se tentýž prvek použít pro více druhů zkoušek.

Uvedené ustanovení platí pro dodávky nových cihel, které nepřesahují cca 20 m³. V případě starých cihel doporučujeme provést větší výběr vzorků podle vizuálních znaků (minimálně trojnásobný proti požadovanému počtu u cihel nových). Z tohoto výběru zvláště pro zkoušky jako je pevnost v tlaku či mrazuvzdornost doporučujeme neprovádět výběr náhodný, nýbrž předvýběr na základě nedestruktivních zkoušek (rezonanční nebo ultrazvukové). Na základě těchto nedestruktivních zkoušek lze rozdělit vzorky do tří skupin – vzorky s nejnižšími, průměrnými a nejvyššími hodnotami ukazatelů NDT zkoušek (rezonanční frekvence, rychlost šíření ultrazvuku). Vzorky z těchto tří skupin mohou být posouzeny zvláště, anebo společně s rovnoměrným zastoupením cihel různé kvality (na základě NDT zkoušek).

Např. pro zkoušku mrazuvzdornosti se doporučuje vytvořit dvojice cihel s adekvátními vlastnostmi, a na nich provést současně porovnání vlastností ve stavu zmrazovaném a nezamrazovaném.

2.2 Vizuální zkoušení a třídění cihel

2.2.1 Stanovení barvy a vzhledu (dle ČSN 72 2602)

Zjišťuje se vizuálně podle normy ČSN 72 2602 Skúšanie tehliarskych výrobkov, Zistovanie vzhľadu a rozmerov. Jedná se o barvu, tvar, začouzení, trhlinky, množství zlomků, poškození ploch, hran a rohů. Během výpalu může vznikat různá barva střepu způsobená odlišnými teplotami výpalu a použitou cihlářskou zeminou. Barva se posuzuje vizuálně a poté se cihly zařadí do tříd.



Obr. 1: Barva střepu dle teploty výpalu (V – výsušek).

Začouzení se zjišťuje vizuálně ve vzdálenosti 2 m od vzorku při denním rozptýleném světle. Na vzorcích nesmí být z této vzdálenosti viditelné náznaky začouzení. Pokud jsou na vzorcích patrné stopy začouzení, tak se tato místa otřou bílým papírem a pokud na něm zůstanou viditelné stopy sazí a dýmu, tak se vzorek hodnotí jako začouzený.

Kolmost hran se měří pomocí úhloměru nebo úhelníku a měrného klínu. Odchylka od kolmosti při použití úhloměru se udává v úhlových stupních a minutách zaokrouhlených na 1°. Rovinnost hran se zjišťuje přikládáním hrany pravítka na měřenou hranu. Zakřivení se zjišťuje na každé hraně.

Zakřivení se určuje na každé ploše dvakrát ve směru úhlopříček. Prohnutí (konkávní zakřivení) se na ploše zjišťuje přiložením hrany rovného kovového pravítka ve směru úhlopříčky. Měrným klínem se poté odměří největší vzdálenosti mezi povrchem vzorku a pravítkem. Vyklenutí (konvexní zakřivení) ploch se měří ve směru úhlopříček. Kovové pravítko se položí hranou na vrchol vyklenutí a podkládá se z obou stran měrnými klíny takovým způsobem, aby vzdálenost plochy od hrany byla v obou rozích stejná. Zjištěné hodnoty určují velikost zakřivení. Udává se maximální hodnota zakřivení.

Poškození ploch hran a rohů se zkouší přiložením ocelového pravítka na povrch vzorku. Kolmo na pravítko se přiloží měřicí ocelová jehla, jejíž hrot se dotýká nejhlubšího místa poškození. Vzdálenost spodní hrany pravítka od hrotu jehly udává hloubku poškození. Výsledkem tohoto měření je maximální zjištěná hodnota a počet poškození na vzorku. Délka trhlinky se zjišťuje pomocí ocelového měřidla se zešíkmenou hranou nebo posuvným měřítkem. Za délku trhlinky se považuje nejkratší vzdálenost mezi začátkem a koncem. Šířka se zjišťuje měřicí lupou a

udává se s přesností $\pm 0,1$ mm. Za šířku trhlíčky se považuje největší naměřená hodnota. Hloubka trhlinek se zjišťuje měrnou jehlou (pokud to šířka trhlíčky umožňuje) a je za ni považována největší naměřená hodnota.

2.2.2 Stanovení rozměrů (dle ČSN EN 771-1 +A1 a ČSN EN 772-16)

Podstatou zkoušky je změření základních rozměrů (tedy délka l_u , šířka w_u a tloušťka h_u), které se měří vždy na všech čtyřech plochách. Před měřením je nutno povrch zbavit všech výčnělků, výstupků apod., které by překážely měření. Pro každý rozměr se provedou 2 měření a následně se vypočte jejich aritmetický průměr s přesností na 1 mm. Po změření rozměrů se provádí zařazení vzorku do příslušné kvalitativní kategorie (Tab. 2). Skutečné rozměry se stanovují podle normy ČSN EN 772-16 Zkušební metody pro zdící prvky – Část 16: Stanovení rozměrů.

Tab. 2: Kategorie mezních odchylek od jmenovitých rozměrů podle ČSN EN 772-16.

Vnější vlastnosti		Kategorie				
Mezní odchylky jmenovitých rozměrů [mm]	Jmenovité rozměry [mm]	T1	T1+	T2	T2+	Tm
	290	± 7	± 7	± 4	± 4	> 7
	140	± 5	± 5	± 3	± 3	> 5
	65	± 3	± 1	± 2	± 1	> 3

Je třeba si dát pozor na rozměrovou kompatibilitu, neboť každá cihelna dodává na trh CP v naprosto odlišných rozměrových třídách, které často ani nevyhovují požadavkům normy a neumožňují kombinovat své CP s produkty jiných výrobců. Jako příklad uvádíme naměřené hodnoty ze dvou cihelen. Rozptyl rozměrů dodávaných cihel (10 měření):

Cihelna Malenovice: (285,1-289,0) x (138,4 - 140,5) x (60,2 - 61,8) mm

Cihelna Šitbořice: (299,3 - 300,9) x (149,2 - 151,0) x (63,4 - 65,4) mm.

2.2.3 Určení stáří historických cihel na základě technologie výroby, rozměrů a značení

Jelikož se metodika do značné míry zabývá i vlastnostmi a zkoušením historických cihel, nelze pominout ani přibližné určení jejich stáří, a to z důvodů zajištění autenticity a kompatibility cihel použitých pro doplnění a náhradu historického zdiva. Určení stáří cihel je poměrně složité a vždy musí vycházet z kontextu (údaje o stáří objektu, mapové podklady, archivní záznamy), ovšem lze jej provést rovněž na základě vnějších znaků, zejména podle:

- Znaků technologie výroby – formování, prstování, řezání;
- Vývoje formátů cihel, regulace rozměrů;
- Značení cihel.

Znaky technologie výroby – formování, prstování, řezání

Povrch cihly může nést celou řadu stop, které mohou poskytnout informace, týkající se způsobu a průběhu výrobního procesu, a přeneseně pomoci zařadit cihlu do příslušného dějinného období.

Pro cihly středověké, do 15. století bylo často typické tzv. prstování. Jde o podélné rýhy vytvořené prsty cihláře na horní straně cihly vystupující z dřevěné formy. U cihel od konce 15. století se pak spíše setkáváme na straně vystupující z formy se stopou seříznutí přebytečného materiálu strunou, prkénkem nebo nástrojem podobným motyce.



Obr. 2: Prstované cihly (cca 13. stol.).



Obr. 3: Lícová strana cihly se stopami seříznutí nástrojem (Rosa Coeli, Dolní Kounice, 15. stol.).

Na výrobcích je zejména patrné, zda byly vytvářeny vtlačení cihlářské hlíny do formy, či již byl z hlíny šnekovým lisem vytvářen nekonečný pás, který byl následně řezán na jednotlivé výrobky (přelom 19. a 20. století). U cihel starších (středověk) měla forma podobu rámu, který byl položen na pískový podsyp, na finálním výrobku jsou často patrné stopy podsypu, ale i „vytažená“ hrana při dolní ložné ploše cihly.



Obr. 4: Stopy podsypu na spodní straně prstované cihly tzv. malého formátu (Brno 13. stol.).

Dalším vývojem začaly být cihly vytvářeny v dřevěných formách se dnem, zde už je tato strana cihly ideálně rovná, tento způsob formování zjednodušil možnost použití značek – tzv. kolků. Pokud vyjdeme z premisy, že formy opatřené dnem umožňují přenesení výrobku, pro jeho vyklopení, zatímco formy bezedné musí být použity přímo v místě vyklopení cihly, můžeme předpokládat snad někdy v průběhu 16. století, patrně s přechodem z vysokého pozdně gotického formátu na „barokní“ zásadní změnu ve způsobu výroby, představovanou například

přechodem výroby z volné plochy na cihlářské tvářecí stoly. Při studiu získaných vzorků barokních cihel (zámek Loučka, základy kasáren na Veselé ulici v Brně atd.) byl konstatován častý výskyt otisků nehoblovaných prken na spodní ploše cihel, je otázkou, zda byla nehoblovaná prkna užitá jako pevně připevněné dno formy, nebo jako podklad pro rámovou formu (alternativa podsypu).



Obr. 5: Stopy po nehoblovaných prknech, barokní cihla, zámek Loučka – otisk dna formy tvořeného ze dvou kusů nebo podklad pod rámovou formou.



Obr. 6: Znamky řezání cihly z nekonečného pásu vytlačného šnekovým lisem – moderní výroba.

Vývoj formátů cihel, regulace rozměrů

Rozměry cihlářských výrobků, především plných zdících cihel, bývají často diskutovaným tématem. Do bližšího poznání metrického vývoje této komodity je často vkládána až neúměrná naděje, že dopomůže k datování cihel. Jednou ze základních připomínek k přečeňování výzkumu rozměrových a formátových parametrů cihel je nutnost uvědomění si práce s přírodním materiálem v „polních“ podmínkách, kdy hlína při výpalu reaguje dle teploty a dalších podmínek vždy jinak a i z jedné formy můžeme dostat dva výrobky poněkud odlišných rozměrů. Při plošné regulaci rozměrů cihlářských výrobků pak musíme v případě vzorového modelu pro formát před výpalem brát v úvahu užití odlišných typů hlíny a tím i její odlišnou reakci na vlastní výpal (smrštění). A do třetice je nutné před plošnou regulací parametrů cihel

uvažovat o výrazných regionálních rozdílech ve výrobě, jak to již dříve naznačuje studie Martina Ebela v Čechách.

V případě klasických cihel pro zdění lze sledovat vývoj rozměrů přibližně od 13. století. Středověké cihly byly typické nejednotným formátem, nicméně patrnou snahou o zachování poměrů délek stran 4 : 2 : 1 (včetně spáry). Např. v Brně se obvykle setkáváme v průběhu 13. a 14. století s cihlami „malého formátu“, kde rozměry oscilují kolem hodnot 200 × 100 × 50 mm, a pozdní gotiku (14. až 15. století) charakterizuje spíše druhý typ středověkých cihel, tzv. „vysoký formát“, přibližně 290 × 145 × (75-100) mm. Cihly jsou většinou charakterizovány i tzv. prstováním. V průběhu dalších historických období probíhala výroba cihel na našem území bez zásadní snahy o unifikaci formátů, často se rozměry lišily dle místních zvyklostí. Zde bude představen vývoj rozměrů základních cihel pro zdění.

Nejstarší známé snahy o regulaci rozměrů cihlářských výrobků mají taktéž ryze regionální charakter a vztahují se pouze k oblasti Vídně, kde byly rozměry zdících cihel definovány nařízením císaře Leopolda I. již k roku 1686 a to na 11,5×5,25×2,5 dolnorakouského palce (cca 303×138×66 mm).

První plošnou směrnici uvádí M. Ebel k roku 1788, kdy jsou předepsány rozměry 12×6×3 palce (cca 316×158×79 mm). I přes toto nařízení však byly i nadále dodržovány regionální tradice a rozměry vyráběných cihel byly značně variabilní.

Na Moravě se první dosud známý pokus o regulaci cihlářských výrobků datuje k roku 1810, tj. do období kdy probíhají i další pokusy o regulaci výroby v cihlářství (srov. např. nařízení otopu uhlím k roku 1813). Dle cirkuláře moravského gubernia měly mít cihly rozměr 11,5×5,75×2,75 palce (cca 303×151×72 mm).

S přechodem monarchie na metrický systém, uplatňovaným postupně po roce 1876, byl rozměr cihel pro zdění ustanoven na nynější standardní hodnotě 290 × 140 × 65 mm. Po roce 1900 registrujeme však snahy o zavedení tzv. cihly malé používané v Německu a Rakousku (250 × 120 × 65 mm), které se však pro odpor stavební veřejnosti příliš neujaly.



Obr. 7: Názorný příklad porovnání rozměrů cihel v brněnském regionu, zleva 13. st., 15. st., 18. st., cca. 1873, a 1923.

Značení cihel

Zatímco v období baroka bylo použití cihlářských značek na Moravě spíše výjimečné, cihly značili jen někteří výrobci, a značky nesl často jen zlomek vyrobených cihel. Mezi výjimky patří např. cihly z barokního mostu Portz Insel ze 17. století (Sedlec u Mikulova), které jsou všechny označeny negativním vtlačovaným kolkem „N“ (Nicolsburg).



Obr. 8: Jednoduchý negativní kolek vytlačený cejchovadlem, most Mikulov – Portz Insel, 17. st.

Až od druhé třetiny 19. století, zřejmě i v kontextu vydaných předpisů (pro Čechy Guberniální nařízení z 11. 7. 1839) se postupně i u nás začaly všechny cihly značit. Tato praxe je však bezprostředně vázána na technologii výroby a používání forem. Dnes rozlišujeme značky – kolky v zásadě na pozitivní a negativní. Pozitivní kolek vystupuje z plochy cihly, vznikl tak, že do dna formy byla značka vyryta či snad vypálena. Tyto pozitivní kolky jsou proto většinou relativně jednoduché, a jsou obecně považovány za starší (18. stol. - počátek 19. stol.)

Pokročilejší variantou je tzv. negativní kolek, tedy značka zahroubená do plochy výrobku, většinou vznikla připevněním značky (mosazné, či litinové) na dno formy. S těmito kolky se setkáváme v průběhu 19. a ještě na počátku 20. stol. Tradice značení cihel výrobcem postupně zanikla ve 20. století se změnou technologie výroby.



Obr. 9: Typické pozitivní kolky (cca 18.-19. stol.).



Obr. 10: Jednoduchý negativní kolek vytvořený značkami připevněnými na dno formy, Brno, patrně Adalbert Satzer mezi lety 1860 a 1870.

2.3 Zkušební postupy fyzikálně – mechanických zkoušek

2.3.1 Stanovení objemové hmotnosti (dle ČSN EN 771-1+A1 a ČSN EN 772-13)

Objemovou hmotností zdícího prvku se rozumí hmotnost jednotkového objemu vzorku včetně dutin a pórů v něm obsažených. Podle ČSN EN 771-1+A1 musí každý výrobce deklarovat objemovou hmotnost prvků v suchém stavu s tolerancí D1: 10 %. Pro zachování národních zvyklostí hodnocení objemové hmotnosti zdících prvků lze používat klasifikaci podle ČSN 72 2609, kde např. pro třídu objemové hmotnosti 1800 kg.m⁻³ se průměrná objemová hmotnost prvků pohybuje v intervalu 1601–1800 kg.m⁻³.

Objemová hmotnost $\rho_{g,u}$ cihel se stanovuje podle ČSN EN 772-13. Celé zkušební vzorky jsou vysušeny do ustálené hmotnosti v sušárně s nucenou výměnou vzduchu při 105 °C. Poté jsou zváženy (hmotnost $m_{dry,u}$) a změřeny (objem $V_{g,u}$). Objemová hmotnost se vypočte ze vztahu:

$$\rho_{g,u} = \frac{m_{dry,u}}{V_{g,u}} \quad (1.1)$$

- $\rho_{g,u}$ objemová hmotnost za sucha [kg/m³],
- $m_{dry,u}$ hmotnost zdícího prvku vysušeného do ustálené hmotnosti [kg],
- $V_{g,u}$ průměrný objem prvku [m³].

Hodnoty objemových hmotností za sucha jednotlivých vzorků se zaokrouhlí na nejbližších 10 kg/m³ (pro $\rho_{g,u} > 1000$ kg/m³). Následně se určí průměr z těchto hodnot.



Obr. 11: Vysušení zkušební vzorky do ustálené hmotnosti.



Obr. 12: Stanovení hmotnosti ($m_{dry,u}$) vzorku po vysušení do ustálené hmotnosti.

2.3.2 Možné vlhkostní stavy zdících prvků

Stav přirozené vlhkosti

Jedná se o vlhkostní stav, ve kterém se prvky nachází v daném prostředí např. zabudované v konstrukci, uložené na skládce apod. Tento vlhkostní stav je ovlivněn řadou faktorů, jako je vzdušná vlhkost, teplota, způsob uložení apod.

Vysušený stav

Prvky jsou vysušeny při teplotě 105 ÷ 110 °C do ustálené hmotnosti. Ustálené hmotnosti je dosaženo, pokud druhá ze dvou po sobě naměřených hmotností, mezi jejichž stanoveními je časový interval větší než 24 hodin a úbytek hmotnosti je menší než 0,2% celkové hmotnosti prvku. Detailní postup je definován v ČSN EN 772-21.

Nasycený stav za atmosférického tlaku

Zdící prvky vložíme do nádoby s destilovanou nebo pitnou vodou o laboratorní teplotě 20 °C tak, aby se vzájemně nedotýkaly a byly ponořené v celém svém objemu. Takto se ponechají po dobu 24 hodin. Detailní postup je definován v ČSN EN 772-21.

Nasycený stav varem

Zdící prvky vložíme do nádoby s destilovanou, nebo pitnou vodou tak, aby se vzájemně nedotýkaly a byly ponořené v celém svém objemu. Vodu následně přivedeme k varu, který se udržuje ještě další 4 hodiny. Po skončení varu se vzorky ponechají ve vodě další 16 až 24 hodin. Detailní postup je popsán v ČSN 72 2609.

2.3.3 Stanovení vlhkosti

Vlhkost w vyjadřuje množství vody (volné nebo fyzikálně vázané) v prvku. Stanoví se zvážením prvku ve stavu zpravidla přirozené vlhkosti a zvážením prvku po jeho vysušení do ustálené hmotnosti (vysušeného stavu). Následně se vyjádří poměr množství vody ku množství suché látky, a to buď hmotnostně nebo objemově. Rozlišujeme tedy hmotnostní vlhkost a objemovou vlhkost. Vlhkost zdícího prvku stanovíme zpravidla hmotnostně jako:

$$w_m = \frac{m_s - m_d}{m_d} \times 100 \quad (1.2)$$

Kde:

- w_m hmotnostní vlhkost [%],
- m_s hmotnost prvku ve stavu přirozené vlhkosti [g],
- m_d hmotnost prvku ve vysušeném stavu [g].

2.3.4 Stanovení nasákavosti (dle ČSN EN 772-7 a ČSN EN 772-21)

Podle ČSN EN 771-1+A1 musí výrobce pro pálené zdící prvky určené pro neomítané vnější zdivo deklarovat hodnotu nasákavosti. Průměrná hodnota nasákavosti předepsaného počtu prvků nesmí být vyšší než deklarovaná nasákavost. Nasákavost je schopnost vypáleného keramického materiálu přijímat kapalinu. Nasákavost se obecně stanovuje (především jako absolutní hmotnostní nasákavost) v % jako poměr hmotnosti vody pohlcené zkušební vzorkem ke hmotnosti vysušeného vzorku za podmínek stanovených normou. Zkouška spočívá

v tom, že se vyplní otevřené póry vodou. Vysoká nasákavost odpovídá pórovité struktuře, zatímco hutný a slinutý výrobek má nasákavost nízkou. Na základě známé hodnoty nasákavosti, lze potom usuzovat na další vlastnosti keramického střepe (pevnost, mrazuvzdornost, objemová hmotnost apod.).

Pro stanovení nasákavosti se použije zkušební postup podle ČSN EN 772-21 Zkušební metody pro zdicí prvky – Část 21: Stanovení nasákavosti pálených a vápenopískových zdicích prvků ve studené vodě“. Zkušební vzorky byly vysušeny v sušárně s nucenou výměnou vzduchu při 105 °C do ustálené hmotnosti a po ochlazení na laboratorní teploty byly zváženy (hmotnost m_d) a následně umístěny na 24 hodin do nádrže s pitnou vodou o laboratorní teplotě 20 °C. Poté byly z nádrže vyjmuty, povrchově otřeny vlhkou textílií a zváženy (hmotnost m_s).

Další možný postup je popsán v ČSN EN 772-7 - Část 7: Stanovení nasákavosti varem pálených zdicích prvků pro izolační vrstvy proti vlhkosti. Na rozdíl od postupu uvedeném v ČSN EN 772-21 jsou prvky nasyceny varem. Pro oba výše uvedené způsoby stanovíme vlhkost jako:

$$w_s = \frac{m_s - m_d}{m_d} \times 100 \quad (1.3)$$

Kde:

- w_s hmotnostní vlhkost [%],
- m_s hmotnost prvku v nasyceném stavu [g],
- m_d hmotnost prvku ve vysušeném stavu [g].



Obr. 13: Sycení vzorků dle metody uvedené v ČSN EN 772-21



Obr. 14: Sycení vzorků varem dle ČSN EN 772-7.

Hodnotu W_s lze potom použít pro nepřímé posouzení mrazuvzdornosti cihel pomocí tzv. koeficientu nasycení střepe (KNS).

2.3.5 Stanovení mrazuvzdornosti (dle ČSN EN 72 2609)

Mrazuvzdornost je schopnost materiálu vydržet za daných podmínek určený počet cyklů zmrazování a rozmrazování bez následného vzniku závad na střepe. Mrazuvzdornost vyjadřuje trvanlivost a je znakem dobré kvality keramických výrobků. Přeměna vody v led je provázena objemovým nárůstem ledu zhruba 10 %. Při dalším snižování teploty pod bod mrazu dochází navíc rekrytalizací ledu k jeho dalšímu objemovému nárůstu (při -22 °C činí 13,3 %). Zkouška je prováděna podle ČSN 72 2609. Při zkoušce mrazuvzdornosti se zkušební vzorky nasycené vodou podrobují předepsanému počtu zmrazovacích cyklů a posuzují se změny, které na vzorcích nastaly. Počet zmrazovacích cyklů ve vztahu k deklaraci tříd mrazuvzdornosti podle ČSN EN 771-1+A1 je uveden v tabulce níže.

Tab. 3: Mrazuvzdornost pálených prvků podle ČSN EN 771-1+A1.

Kategorie mrazuvzdornosti		Počet zmrazovacích cyklů
F0	Neagresivní prostředí - např. zdivo vnějších stěn opatřených vhodnou ochranou apod	0
F1	Mírně agresivní prostředí - např. zdivo chráněné parapetní deskou s okapnicí, ochrana hlav stěn přesahem stěny nebo krycími deskami apod	15 (25)
F2	Silně agresivní prostředí - např. neomítané zdivo komínů, neomítané zdivo nadezdívek apod.	50

Mrazuvzdornost se stanovuje na 5 zkušebních vzorcích. Vzorky pro stanovení mrazuvzdornosti byly vysušeny při 105 °C do ustálené hmotnosti a po ochlazení na pokojovou teplotu umístěny do nádoby s pitnou vodou tak, aby se nedotýkaly a hladina vody byla min. 50 mm nad povrchem vzorku. Voda byla během 1 hodiny uvedena do varu, který byl udržován další 4 hodiny. Poté byly vzorky ponechány ve vodě dalších 24 hodin za účelem ochlazení. Nasáknuté vzorky se po povrchovém otření textilií vložily do zmrazovacího prostoru vychlazeného na $(-20 \pm 3)\text{ °C}$. Takto byly ponechány 16 hodin. Poté následovalo rozmražení min. 2 hodiny v nádobě s vodou (teplota $+20$ až $+30\text{ °C}$ v min. množství 1,5 l na 1 kg vzorku).

Vzorky se po každých pěti zmrazovacích cyklech překontrolují a zaznamenávají se změny ve vzhledu. Po dokončení stanoveného počtu zmrazovacích cyklů se prvky opět překontrolují a stanoví se pevnost v tlaku dle ČSN EN 772-1+A1. Kritérium mrazuvzdornosti se posoudí dle následující tabulky.

Tab. 4: Podmínky mrazuvzdornosti (ČSN 72 2609).

zdící 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 roků, rozpůlení, vrstevnatý rozpad a další typy porušení, které ohrožují funkčnost zdících prvků)	



Obr. 15: Zkušební vzorky ve zmrazovacím zařízení před zahájením zmrazovacích cyklů.

Existuje také celá řada zkoušek, na základě, kterých lze nepřímo predikovat mrazuvzdornost lícových cihel. V tomto případě lze vyloučit postupy, které jsou založeny na znalosti distribuce velikosti pórů (obvykle vysokotlakou rtuťovou porozimetrií, neboť vycházejí z měření na velmi malých vzorcích, což vzhledem ke značné nehomogenitě cihelného střepeu neskýtá dobrou reprodukovatelnost. Naopak velmi úspěšně lze použít jednoduché zkoušky, které jsou

založeny na stanovení nasákavosti při různých podmínkách (studená voda – var - vakuum). Jedná se především o **Koeficient nasycení střepe (KNS)** - poměr mezi nasákavosti za studena po 24 hodinách (podle ČSN EN 772-21) a nasákavosti varem po 5 hodinách (ČSN 72 2609). Dle výsledného poměru nasákavostí se poté může informativně provést klasifikace:

Tab. 5: Vyhodnocení koeficientu nasycení střepe (KNS) [26].

KNS	Vyhodnocení
KNS < 0,74	vysoká pravděpodobnost mrazuvzdornosti materiálu
0,74 < KNS < 0,84	nejistá mrazuvzdornost
KNS > 0,84	nízká pravděpodobnost mrazuvzdornosti materiálu

Poznámka:

Koeficient nasycení střepe vychází z parametrů, které jsou/byly součástí zahraničních norem. Jedná se o **Saturační poměr T** (podle DIN 52251, 3. část) - je stanovený jako poměr otevřených pórů naplněných vodou za atmosférického tlaku (a běžné laboratorní teploty) a ve vakuu 30 mbar, což je prakticky obdoba KNS. Vyhodnocení podle Tab. 6.

Tab. 6: Vyhodnocení saturačního poměru dle DIN 52251-3.

T	Vyhodnocení
T < 0,75	vysoká pravděpodobnost mrazuvzdornosti
0,75 < T < 0,85	nejistá mrazuvzdornost
T > 0,85	výrobek je nemrazuvzdorný

Dalším parametrem je **Saturation coefficient SC** podle ASTM C67 (Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile). Ten je definován jako:

$$SC = \frac{(W_{c(24)} - W_d)}{(W_{b(5)} - W_d)} \quad (1.4)$$

Kde:

- W_d hmotnost vysušeného vzorku,
- $W_{c(24)}$ hmotnost vzorku po 24. hodinovém nasáknutí ve vodě o laboratorní teplotě (15,5 – 30 °C)
- $W_{b(5)}$ hmotnost vzorku po 5. hodinovém varu.

Ze zkušeností z řady experimentů však lze konstatovat, že uvedené koeficienty mají význam zejména pro hodnocení nově vyráběných cihel. U cihel historických závisí poměry nasákavostí rovněž na historii používání dané cihly a nelze je pro predikci mrazuvzdornosti využít.

Mrazuvzdornost cihelného střepe (lícových cihel) závisí na mnoha okolnostech (pórovitost, pevnost, vady apod.), nicméně zásadním negativním rysem lícových cihel, které výrazně

snižuje mrazuvzdornost je skrytá vada – textura, která vzniká při vytváření cihel na šnekových lisech rotačním pohybem použité surovinové směsi. K jejímu projevu 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.



Obr. 16: Detail destrukce vzorku cihly po zmrazovacích cyklech – typický projev tzv. textury.

2.3.6 Stanovení pevnosti v tahu za ohybu (dle ČSN 72 2605)

Pevnost v tahu za ohybu je kritická hodnota napětí vyvolaná ohybovým momentem při porušení zkušebního vzorku (vzorkem se rozumí celý zdící prvek). Zkušební vzorek je vložen do hydraulického lisu, uložen ve spodní části na dvě kyvné podpěry ve vzdálenosti L . Vzorek se rovnoměrně zatěžuje silou F uprostřed rozpětí až do jeho porušení.



Obr. 17: Zkouška pevnosti v tahu za ohybu cihel o rozměrech přibližně 290×140×65 mm.

Po porušení vzorku se zaznamená hodnota síly F a změří se šířka w_u a výška h_u v místě lomu. Pevnost v tahu za ohybu stanovíme jako:

$$\sigma_{po} = \frac{M}{W} = \frac{3}{2} \times \frac{F \times l}{w_u \times h_u^2} \quad (1.5)$$

Kde:

- F je síla potřebná k porušení vzorku [N],
- l je osová vzdálenost podpěr [mm],
- w_u je šířka vzorku [mm],
- h_u je výška vzorku v místě zlomu [mm],
- σ_{po} je pevnost v tahu za ohybu [N/mm²].

Na vzniklých částech vzorku lze následně stanovit pevnost v tlaku za předpokladu, že po porušení vzorky vznikla přibližně kolmá a pravidelná lomová plocha a obě části vzorku nejsou jinak poškozeny.

2.3.7 Stanovení pevnosti v tlaku zdících prvků (ČSN EN 772-1+A1 a ČSN 72 2605)

Pevnost v tlaku zdících prvků lze stanovit řadou metod, a to nedestruktivně i destruktivně. U zdících prvků, které jsou zabudované v konstrukci, se zpravidla pevnost v tlaku stanoví nedestruktivně s upřesněním na menším počtu zkoušek provedených destruktivně (odběr jádrových vývrtů nebo celých zdících prvků).

V tomto případě bude pevnost v tlaku zdících prvků stanovena na vzorcích vzniklých po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu. Prvky je nejprve potřeba zbrousit do přibližně rovnoměrného tvaru. Tlačené plochy se zbrousí tak, aby splňovaly podmínky rovinnosti a rovnoběžnosti, nerovnosti je také možné vyrovnat vrstvou malty. Alternativním způsobem eliminování nerovností tlačených ploch je vložení pružné vrstvy např. z arbutonu. Takto upravený vzorek se vloží dostředně na tlačnou desku lisu tak, aby zatížení působilo rovnoměrně po celé jeho ploše. Rychlost zatěžování prvku se volí na základě předpokládané pevnosti v tlaku.

Nejprve se stanoví hodnoty pevností v tlaku jednotlivých vzorků jako:

$$f_{b,u} = \frac{F_c}{w_u \times l_u} \quad (1.6)$$

Kde:

- $f_{b,u}$ pevnost v tlaku jednotlivých vzorků [N/mm²],
- F_c je síla potřebná k porušení vzorku [N],
- w_u je šířka vzorku [mm],
- l_u je délka vzorku [mm].

Normalizovanou pevnost v tlaku stanovíme jako:

$$f_b = f_{b,u} \times \delta^{NP2}$$

Kde:

- f_b normalizovaná pevnost v tlaku jednotlivých vzorků [N/mm²],
- $f_{b,u}$ pevnost v tlaku jednotlivých vzorků [N/mm²],
- δ^{NP2} součinitel tvaru vyjadřující vliv rozměrů zkušebních těles



Obr. 18: Průběh zkoušky stanovení pevnosti v tlaku.



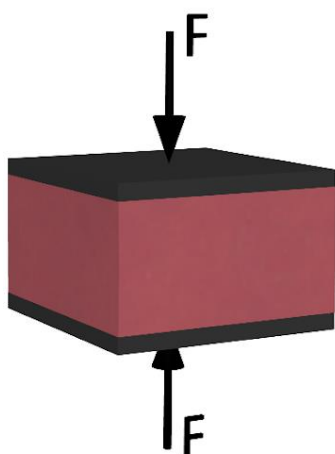
Obr. 19: Reprezentativní zkušební tělesa tvaru krychle o hraně 50 mm.

Tab. 7: Součinitel tvaru $\delta(NP2)$ vyjadřující vliv rozměrů zkuš. těles změřených po úpravě povrchu zdělicích prvků

Výška zdělicího prvku (mm)	Nejmenší vodorovný rozměr zdělicího prvku (mm)				
	50	100	150	200	250 nebo větší
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

Poznámka: Lineární interpolace je povolena.

Z normalizovaných pevností v tlaku jednotlivých vzorků se následně určí průměrná hodnota zaokrouhlená na nejbližší 0,1 N/mm². Zdělicím prvkům lze přiřadit pevnostní značku dle následující tabulky.



Obr. 20: Stanovení pevnosti v tlaku zdícího prvku.

Tab. 8: Pevnost v tlaku (ČSN 72 2609).

pevnostní značka	pevnost v tlaku [N/mm ²]	
	průměrná	jednotlivá
P 2	2	1,6
P 4	4	3,2
P 6	6	4,8
P 8	8	6,4
P 10	10	8,0
P 12	12	9,6
P 15	15	12,0
P 20	20	16,0
P 25	25	20,0
P 30	30	24,0
P 35	35	28,0
P 40	40	32,0

2.3.8 Pevnost v tlaku zjištěná nedestruktivně

Tvrdoměrné metody zkoušení cihel jsou modifikací metod používaných pro beton a jsou uvedeny v ČSN 73 1373 Tvrdoměrné metody zkoušení betonu. Pro zkoušení cihel se používá zejména metoda odrazového tvrdoměru typu Schmidt LB. Zásadním rozdílem proti tvrdoměru Schmidt L na beton je pouze výrazně menší poloměr kulové plochy razníku. Kalibrační vztahy v normě jsou uvedeny pouze pro beton. Pro cihly bylo vytvořeno několik různých kalibračních vztahů jak pro nové, tak i pro staré cihly podle pracovišť, která se touto problematikou zabývala, např. VAAZ Brno, ÚSZK FAST.



Obr. 21: Zkouška tvrdoměrem Schmidt LB na zatíženém vzorku cihly.

Použití tvrdoměrných metod pro třídění cihel je však problematické z několika důvodů. Jednak je třeba zkoušený povrch upravit broušením, čímž dochází ke změně vzhledu i narušení povrchu cihly. Cihlu je třeba při zkoušce upnout např. do lisu, neboť při zkoušení volné cihly dochází k útlumu části energie úderu. Tvrdoměr se opotřebovává, je třeba ho ověřovat co do funkce (předepsáno po 2000 úderech). Při 10 úderech na jedné cihle to znamená velmi časté ověřování. V neposlední řadě byla ukončena výroba speciálních nástavců pro tvrdoměr Schmidt LB, takže do budoucna bude třeba najít jinou tvrdoměrnou metodu.

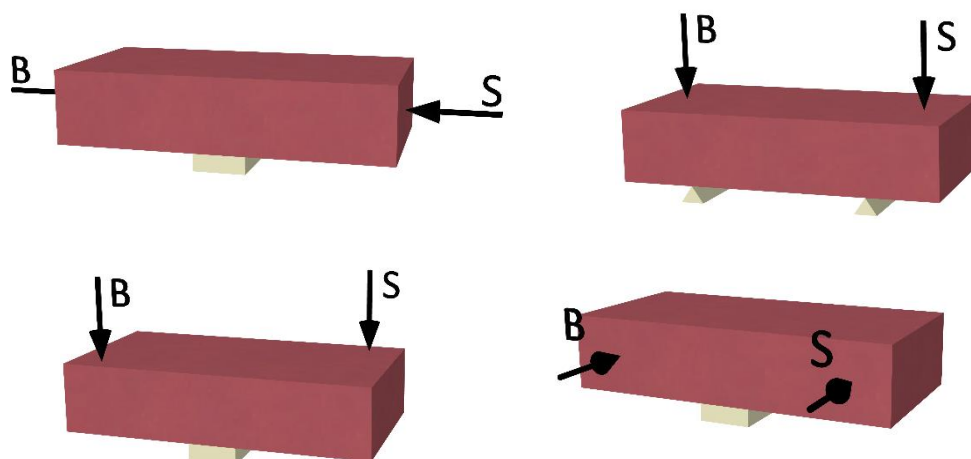
2.3.9 Stanovení dynamický modulů pružnosti – rezonanční metoda

Při mechanickém impulsu se každý předmět z tuhého materiálu rozkmitá. Stav, kdy je vlastní kmitočet tělesa totožný s kmitočtem vnější budící síly nazýváme rezonancí. Kmitání se může uskutečnit mnoha způsoby, pro stanovení dynamických materiálových vlastností je potřeba stanovit zpravidla:

- podélné kmitání – f_L ,
- krouživé kmitání – f_t ,
- příčné kmitání – f_f (rozdílné podle orientace vzorku).

V současnosti se jednotlivé kmitání stanoví nejčastěji pomocí impulsní rezonanční metody. U této metody dochází k rozkmitání tělesa za pomoci impulsního kladívka. Snímač zaznamená celé spektrum frekvencí v námi zvoleném rozsahu.

Snímač i budič (úder impulsním kladívkem) je na zdící prvek umístěn v místech kmiten, tedy místech s největší amplitudou. Podepření prvku je realizováno v místě uzlů.



Obr. 22: Způsob podepření zdícího prvku a rozmístění sond (S – snímač, B – budič) pro podélné kmitání (vlevo nahoře), příčné kmitání (vpravo nahoře), krouživé kmitání (vlevo dole) a druhé příčné kmitání (vpravo dole).

Dle normy ČSN 73 1372 lze stanovit dynamický modul pružnosti v tahu E_{crL} z první vlastní podélné frekvence, E_{crf} z první vlastní příčné frekvence a dynamický modul pružnosti ve smyku G_{cr} z první vlastní kroutivé frekvence jako:

$$E_{crL} = 4 \times L^2 \times f_L^2 \times \rho \quad (1.1)$$

$$E_{crf} = 0,0789 \times c_1 \times L^4 \times f_f^2 \times \rho \times \frac{1}{i^2} \quad (1.2)$$

$$G_{cr} = 4 \times k \times L^2 \times f_t^2 \times \rho \quad (1.3)$$

Kde:

- E_{crL} a E_{crf} jsou dynamické moduly pružnosti v tahu [N/mm²],
- G_{cr} je dynamický modul pružnosti ve smyku [N/mm²],
- L je délka zkoušeného prvku [m],
- f_L , f_f a f_t jsou frekvence podélného, příčného a kroutivého kmitání [kHz],
- ρ je objemová hmotnost materiálu [kg/m³],
- c_1 je korelační součinitel, který zahrnuje vliv smyku a setrvačných momentů při kmitání zkoušeného prvku [-],
- i je poloměr setrvačnosti příčného řezu zkušební tělesa k ose kolmé na rovinu kmitání [m],
- k je součinitel charakterizující tvar příčného řezu zkušební tělesa a vyjadřující poměr polárního momentu setrvačnosti průřezu k modulu tuhosti v kroucení.

Vzorek lze považovat za homogenní v případě, že se hodnoty E_{crL} a E_{crf} neliší o více jak 10 %.



Obr. 23: Stanovení první vlastní frekvence krouživého kmitání zkušební vzorku.

Dále lze dle normy ČSN 73 1372 stanovit Poissonův koeficient ν_{cr} jako:

$$\nu_{cr} = \frac{1}{2} \left(\frac{E_{cL}}{G_{cr}} - 2 \right) \quad (1.8)$$

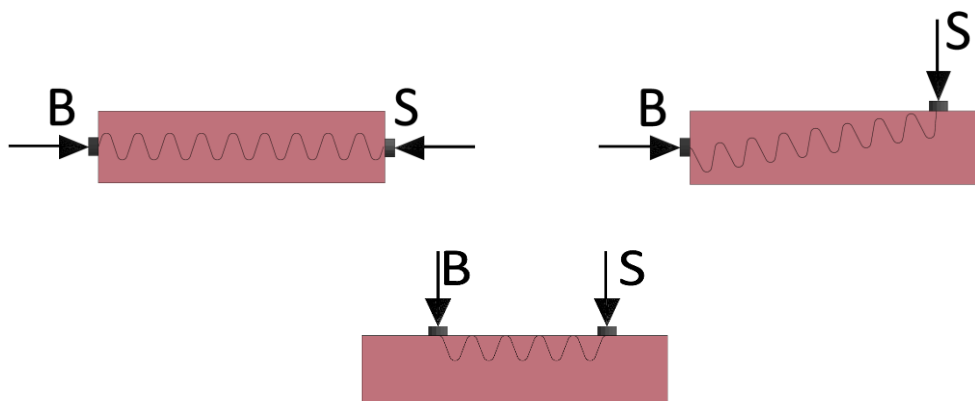
Kde:

- E_{cL} a G_{cr} jsou dynamické moduly pružnosti materiálu, stanoveny z podélného a krouživého kmitání zkušební tělesa.

Poissonův koeficient ν_{cr} lze stanovit také přímo z hodnot vlastních prvních frekvencí pro podélné a krouživé kmitání. Jeho hodnoty by u neporušených vzorků měly být v intervalu 0 ÷ 0,5.

2.3.10 Stanovení dynamický modulů pružnosti – Ultrazvuková impulsová metoda

Ultrazvuková impulsová metoda (dále jen UZ) se ve stavebnictví používá především k ověření rovnoměrnosti betonu. Pomocí UZ však lze také odhalit nejružnější defekty v konstrukci nebo v prvku a lze také stanovit dynamické moduly pružnosti v tahu. Jedná se o mechanické vlnění částic v prostředí o frekvenci obvykle 20 kHz ÷ 150 kHz. Frekvence lze měnit na základě mnoha faktorů jako jsou například délka měřící základny, druh materiálu nebo výkon přístroje. Rozlišujeme tři základní způsoby prozvučování – přímé, polopřímé a nepřímé.



Obr. 24: Rozmístění sond (*S* – snímač, *B* – budič) pro přímé prozvučování (vlevo nahoře), polopřímé prozvučování (vpravo nahoře) a nepřímé (povrchové) prozvučování (dole).

Pro přímé a polopřímé prozvučování lze stanovit dle normy ČSN 73 1371 rychlost šíření impulsů podélných vln podle vztahu:

$$v_L = \frac{L}{T} \quad (1.9)$$

Kde:

- v_L je rychlost impulsu [km/s],
- L je délka měřicí základny [mm],
- T je čas, který uplyne při průběhu impulsu měřicí základnou [μ s].

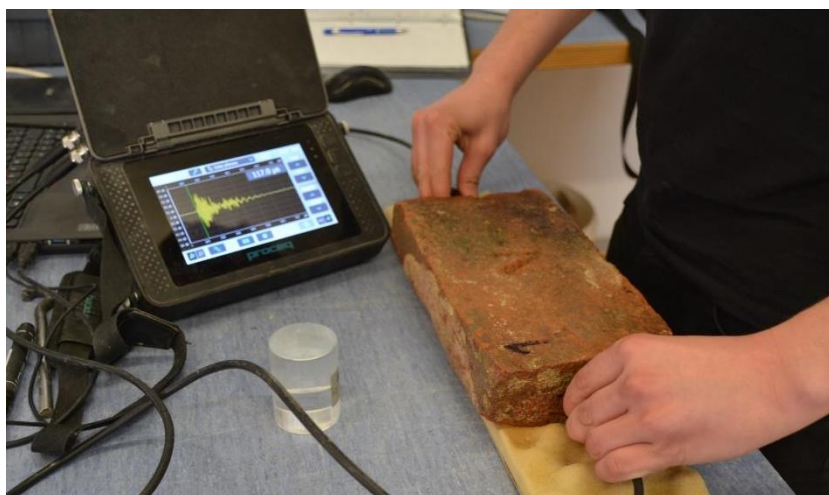
Následně lze z rychlosti šíření impulsů podélných vln stanovit dynamické moduly pružnosti v tahu E_{cu} jako:

$$E_{cu} = \rho \times v_L^2 \times \frac{1}{k^2} \quad (1.10)$$

Kde:

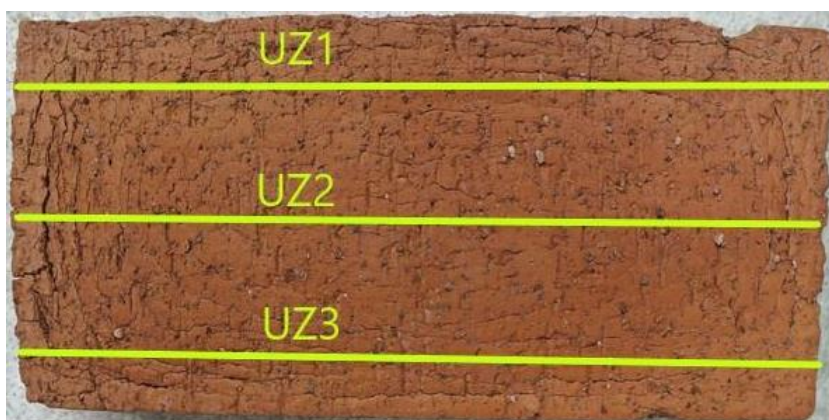
- ρ je objemová hmotnost materiálu [kg/m^3],
- v_L je impulsová rychlost podélného vlnění [km/s],
- k je součinitel rozměrnosti [-].

Pomocí UZ nelze stanovit dynamický Poissonův koeficient ν_{cu} , na kterém je závislý součinitel rozměrnosti k . Pro cihly plné pálené lze uvažovat $\nu_{cu} = 0,18$.



Obr. 25: Stanovení doby průchodu v podélném směru pomocí UZ metody zkušební vzorku.

Pomocí UZ je také možné **nedestruktivní posouzení existence textury**. Odhalení textury je možno na základě stanovení rychlosti průchodu ultrazvuku v různých částech cihly.



Obr. 26: Úrovně zkoušení prvku pomocí UZ pro odhalení textur.

Výsledky změřených rychlostí průchodu ultrazvuku UZ v suchém i mokřém stavu CP (vzorky S1 a S2 v tabulce:

Tab. 9: Rychlost průchodu ultrazvuku UZ změřený na dvou vzorcích lícových cihel 1 a 2, přičemž u vzorku č. 1 se po zkoušce na mrazuvzdornost projevila textura.

		UZ1	UZ2	UZ3
1	suchý	135,4	158,0	128,1
	mokřý	137,0	150,0	129,9
2	suchý	123,5	125,8	119,4
	mokřý	125,6	128,9	124,2

2.3.11 Porušení vnitřní struktury cihel (dle ČSN 73 1380)

Norma ČSN 73 1380 se zabývá zkoušením odolnosti betonu proti zmrazování a rozmrazování – porušením vnitřní struktury. Dané postupy uvedené v této normě se však dají aplikovat i na jiné materiály tedy i na cihly plně pálené.

Podstata spočívá ve stanovení jednotlivých dynamických modulů pružnosti, a to buď z vlastních frekvencí stanovených pomocí rezonanční metody, anebo z doby průchodu impulsů prvkem zjištěných pomocí ultrazvukové impulsní metody a následném výpočtu relativní změny dynamického modulu pružnosti. Veličina, podle které lze posuzovat míru porušení vnitřní struktury prvku, se nazývá **relativní dynamický modul pružnosti** (dále RDM).

Stanovení vlastních frekvencí pomocí **rezonanční metody** je uvedeno v odst. 2.3.9. Relativní dynamický modul pružnosti se stanoví pomocí vztahu:

$$RDM(F) = \left(\frac{f_n}{f_0}\right)^2 \times 100 \quad (1.11)$$

Kde:

- $RDM(F)$ je relativní dynamický modul pružnosti [%],
- f_n je vlastní frekvence zkušebního tělesa měřená po n zmrazovacích cyklech [Hz],
- f_0 je počáteční vlastní frekvence zkušebního tělesa [Hz]

Stanovení vlastní frekvencí pomocí **ultrazvukové impulsní metody** je uvedeno v odst. 2.3.10. Relativní dynamický modul pružnosti se stanoví pomocí vztahu:

$$RDM(F) = \left(\frac{t_{s,0}}{t_{s,n}}\right)^2 \times 100 \quad (1.12)$$

Kde:

- $RDM(F)$ je relativní dynamický modul pružnosti [%],
- $t_{s,0}$ je počáteční doba průchodu UZ impulsů zkušebním tělesem [μ s],
- $t_{s,n}$ je doba průchodu UZ impulsů zkušebním tělesem po n zmrazovacích cyklech [μ s].

2.3.12 Stanovení obsahu rozpustných solí

Náchylnost k tvorbě výkvětů se v současné době stanovuje víceméně nepřímě jako obsah aktivních rozpustných solí chemickou analýzou vodného výluhu posuzovaného cihelného střeptu (podle ČSN EN 772-5 ED.2 – Zkušební metody pro zdící prvky – Část 5: Stanovení obsahu aktivních rozpustných solí v pálených zdících prvcích). Výsledek zkoušky se zařídí do kategorií S0 – S1 – S2 (Tab. 10).

Pokud je výrobek při určeném použití vystaven účinkům počasí, musí výrobce deklarovat obsah aktivních ve vodě rozpustných solí podle kategorií S0 – S1 – S2. Zkušební postup je

popsán v ČSN EN 772-5. Podstatou zkoušky je vodní extrakce podrceného reprezentativního vzorku a stanovení obsahu rozpustných hořečnatých, sodných a draselných iontů ve vodném výluhu (metoda AAS nebo ICP).

Tab. 10: Požadavky na obsah aktivních rozpustných solí podle ČSN EN 772-5.

Kategorie	Mezní hodnoty obsahu solí [% hmotnostní]	
	Na ⁺ +K ⁺	Mg ²⁺
S0	Nepožaduje se	Nepožaduje se
S1	0,17	0,08
S2	0,06	0,03

Pro jednoduché posouzení náchylnosti k tvorbě výkvětů lze pro posuzované lícové cihly postupovat analogicky s ČSN 72 2608, metoda B, kdy lze použít i části cihly (polovina). Zkouška se provádí na 5 vzorcích. Očištěný výrobek se položí svou největší plochou do misky, do té se nalije destilovaná voda tak, aby její hladina přesahovala spodní okraj vzorku o 10 mm. Voda se nechá ve vzorku vzlínat 7 dní za stálého dolévání destilované vody. Potom se vzorky vysuší v sušárně na 105–110 °C po dobu 24 hodin. Poté se vzorky vizuálně posoudí z hlediska výskytu výkvětu (fotodokumentace). Pokud dané použití poskytuje úplnou ochranu proti pronikání vody (prvek je např. chráněn tlustou vrstvou omítky nebo obkladem, popř. se prvek ukládá do vnitřní vrstvy dutinové stěny nebo do zdiva vnitřních stěn), nemusí být deklarován obsah aktivních rozpustných solí (kategorie S0).



Obr. 27: Vzorky cihel po zkoušce na výkvětovost podle ČSN 72 2608, metoda B.

2.3.13 Stanovení výskytu cicvářů

Stanovuje se podle normy ČSN 72 2607 Skúšanie tehliarskych výrobkov, Stanovenie výskytu cicvářů.

Cicvářy jsou zrna vápenatých sloučenin, která se vyskytují jako škodlivina v cihlářských zeminách. Mohou nepříznivě ovlivňovat kvalitu a použitelnost cihlářských výrobků. Škodlivé jsou tehdy, když způsobují změnu vzhledu větší, než připouští příslušná norma, nebo sníží průměrnou pevnost či únosnost prvku o 20 %, případně dojde jejich vlivem k nevyhovujícímu průsaku. Zkouška probíhá na 5 celých výrobcích, které by předtím mohly být vystavené

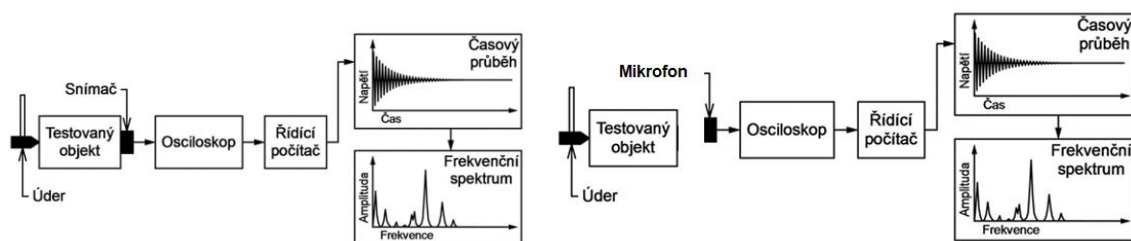
vlhkosti. Vzorky se prohlédnou, popíší a vloží na rošt do nádoby tak, aby se vzájemně nedotýkaly. Zhruba za hodinu se voda pod roštem přivede do varu a nádoba se přikryje víkem. Voda se udržuje v mírném varu další hodinu. Poté se vzorky nechají další 4 hodiny v uzavřené nádobě. Pak se z nádoby vydělají ven, prohlédnou a popíší. Nakonec se provede vyhodnocení.

Tab. 11: Kategorie obsahu cicváru.

Nejsou viditelné změny	Vzorek cicvár neobsahuje
Viditelné změny jsou nepřipustné	Vzorek cicvár obsahuje – je škodlivý
Viditelné změny v rámci normy	Zkouší se pevnost nebo únosnost a poté se zhodnotí škodlivost cicvárů

2.3.14 Metoda impact-echo

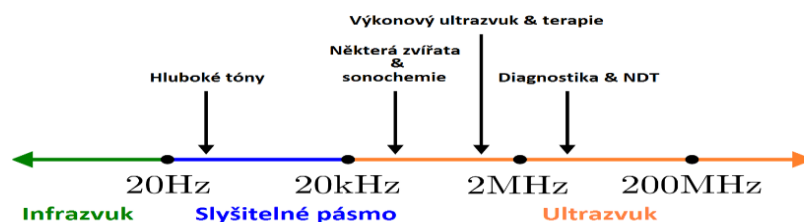
Sledování vlastností historických cihel bylo také provedeno nedestruktivními akustickými metodami, které využívají šíření mechanického vlnění v materiálu, zejména ve slyšitelné oblasti. Byla použita modifikovaná metoda impact-echo. Realizace byla provedena dvěma způsoby, jak je ukázáno na Obr. 28.



Obr. 28: Dva způsoby použití metody impact-echo – vlevo se snímačem, vpravo s mikrofonem.

Principem obou způsobů je vybuzení mechanické vlny impulzem, tj. úderem, a následným zaznamenáním odezvy na vybraných, jednom či více, místech pomocí mechanicko-elektrického převodníku, opět jednoho či více. V prvním případě (Obr. 28 vlevo) je použit kontaktně připojený piezoelektrický snímač zrychlení. V druhém případě (Obr. 28 vpravo) je použit bezkontaktní přenos přes klasický mikrofon. Následný přenos signálu je principiálně v obou případech stejný (Obr. 28). Tedy, mechanické vlnění je převedeno pomocí mechanicko-elektrického převodníku na elektrický proud. Tento proud je zaznamenán a digitalizován „Osciloskopem“ a přenesen do „Řídicího počítače“, kde může být uložen (archivován v surové podobě) a dále zpracován. Signálem nazýváme digitálně navzorkovaný proud, resp. napětí, a případně převedený do číselné podoby. Následně je obvykle prováděna analýza signálu buď v časové („Časový průběh“) nebo frekvenční („Frekvenční spektrum“) oblasti.

Významný rozdíl ve vzorkování pro oba případy realizace (piezoelektrický snímač zrychlení X klasický mikrofon) je v rozsahu frekvenčního pásma a obsahu přijaté mechanické vlny. Zatímco snímač zrychlení obvykle zaznamenává signály vyšších frekvencí slyšitelného pásma a nižší část ultrazvukového pásma (Obr. 29), mikrofon zaznamenává pouze oblast slyšitelnou (ne vždy celou). V našem případě měl mikrofon výrobcem definovaný frekvenční rozsah od 100 Hz do 10 kHz (bylo hledáno levné a dostupné řešení).



Obr. 29: Frekvenční rozsahy a jejich použití.

Také předpokládáme, že šíření vlnění z místa úderu je sférickou (kulovou) vlnou, a že platí Huygensův princip. „Princip popsany Christianem Huygensem předpokládá, že v každém okamžiku lze každý bod na čele šířící se vlny chápat jako nový zdroj vlnění (sekundárních vln). Nový tvar čela vlny v čase o malý okamžik pozdějším lze pak určit jako vnější obálku vln, šířících se z těchto zdrojů.“ Tedy snímač zrychlení zaznamenává kmitání, které je způsobeno jen vlněním, které se šíří uvnitř sledovaného vzorku, tj. plně pálené cihly. Mikrofon pak zaznamenává kmitání v místě mikrofону, které vzniklo ze zdrojů vlnění, které vznikly na povrchu cihly jako sekundární zdroje a vytvořily vlnění vzduchu v prostoru. Tento předpoklad vychází z již definovaného Huygensova principu.

Poznamenejme, že frekvence vlnění f je vázána vztahem:

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (1.13)$$

Kde:

- v je rychlost šíření v materiálu
- λ je vlnová délka,
- T je čas, který uplyne při průběhu impulsu měřící základnou [μs].

Z tabulek lze odhadnout rychlost šíření vlnění ve vzduchu na 300 m/s a pro plnou pálenou cihlu je pak podélná rychlost šíření kolem 3000 m/s a příčná přibližně 2000 m/s.

Vlivem průchodu vlnění přes vady uvnitř cihly se mechanická vlna deformuje, tudíž i signál se deformuje. Tedy výsledný signál obsahuje informace, jak o vadách v materiálu, tak o tvaru vzorku, tak o cestě vlnění, což je poněkud komplikované pro pozdější analýzu.

Analýza signálu může být prováděna jak v časové, tak častěji ve frekvenční oblasti. Do frekvenční oblasti, tedy závislosti amplitudy (fáze, spektra) na frekvenci, se z časové oblasti, tj. závislosti elektrického napětí či proudu na čase, dostáváme použitím Fourierovy transformace:

$$(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-i\omega t} dt \quad (1.14)$$

Kde:

- $X(\omega)$ je komplexní frekvenční „spektrum“,
- ω je úhlová frekvence,
- $x(t)$ je změřený signál,
- t je čas,
- i je komplexní jednotka.

Pro praktické použití se používá převod na frekvenci f dle vztahu $\omega = 2\pi f$ a amplitudové nebo reálné frekvenční spektrum $S(f) \approx |X(\omega)|$ tj. absolutní hodnota z komplexního frekvenčního spektra.

S rozvojem výpočetní techniky, tedy rychlostí a kapacity, se začínají používat na analýzu také další transformace. Jednou z nich je nap. Časově frekvenční Fourierova transformace (STFT).

2.4 Zkušební postupy – mikrostruktura

Jedním z možných požadavků projekce rekonstrukce historických staveb může být dodržení kompatibility použitého zdicího materiálu (plně pálené cihly) z hlediska surovinové základny (použité cihlářské zeminy pro výrobu plných pálených cihel). Odlišné chování během výpalu a současně i vlastnosti střepu po výpalu lze očekávat v případě použití nevápnité a vápenaté cihlářské suroviny, čemuž také odpovídá mineralogické a chemické složení po výpalu.

2.4.1 Mineralogické složení cihlářské zeminy a střepu pálených cihel

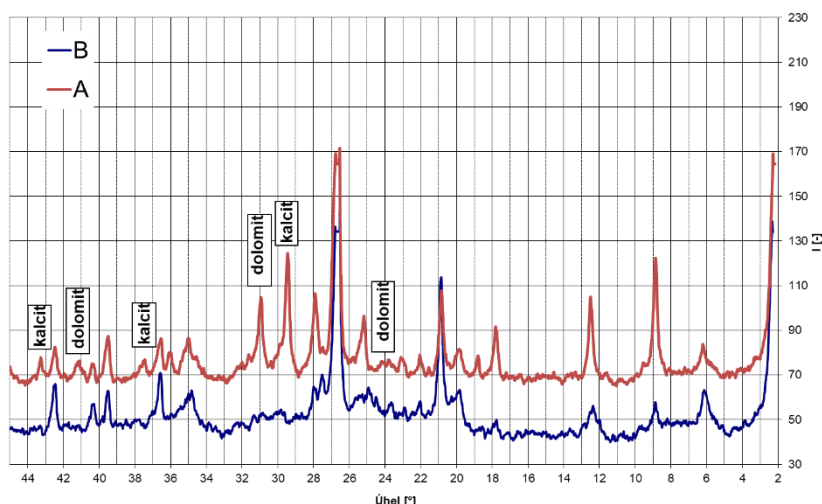
Ke stanovení mineralogického složení krystalických látek (tedy i cihlářských surovin, resp. střepu) slouží metoda rentgenové difrakční analýzy. Tato metoda vychází z principu difrakce rentgenového záření dopadajícího na krystalickou látku. Při dopadu monochromatického svazku rentgenových paprsků dochází k rozptylu na atomu do všech směrů. Každý krystal vykazuje soubor rovnoběžných krystalových rovin, a proto vybuzené rozptýlené záření se interferencí v některých směrech zesiluje a produkuje difraktované záření. Pokud známe hodnoty mezivinných vzdáleností jednotlivých minerálů a pokud známe hodnotu mezivinných vzdáleností zkoumané látky stanovené RTG, můžeme určit, jaké minerály jsou v látce obsaženy.

Typické mineralogické a chemické složení vápnité cihlářské zeminy je demonstrováno záznamy RTG difrakční analýzy (A-vápnitá cihlářská zemina, B – nevápnitá cihlářská zemina), kde výrazný rozdíl (Obr. 30) lze hledat v obsahu dvou obvyklých minerálů pro vápnitý (obecně karbonátový s obsahem kalcitu i dolomitu) typ (A):

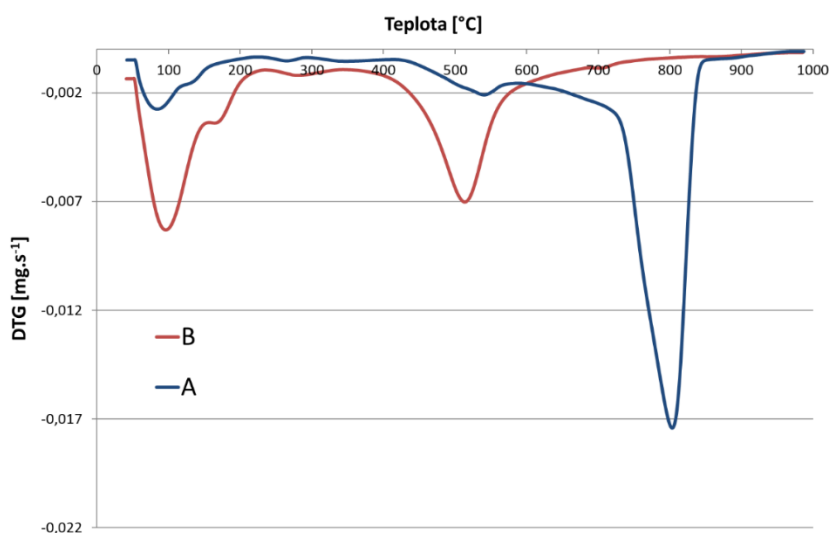
Kalcit: dhkl – **3,035 (29,4 °)** – 2,495 (36,0 °) – 2,095 (43,2 °)

Dolomit: dhkl: 3,69 (24,1 °) - **2,88 (31,0 °)** – 2,19 (41,2 °)

Odlišnost mezi oběma porovnávanými typy cihlářských zemin je možno pozorovat i při využití termických metod – na Obr. 31 záznam derivace termogravimetrické křivky (DTG), na níž je patrný výrazný efekt poklesu hmotnosti vzorku cihlářské zeminy B v důsledku rozkladu uhličitanu vápenatého, resp. uhličitanu hořečnatu vápenatého v teplotním intervalu 700 – 850 °C.



Obr. 30: RTG difrakční analýza vápnitého (karbonátového) typu cihlářské zeminy (A) vs. nevápnitého typu (B).



Obr. 31: Záznam DTG vápnitého (karbonátového) typu cihlářské zeminy (A) vs. nevápnitého typu (B).

V Tab. 12 je uvedeno chemické složení prezentovaných cihlářských zemín A a B, stanovené rentgenovou fluorescenční analýzou. Z výsledků je patrný rozdíl v obsahu oxidu hlinitého a křemičitého (hydraulické oxidy), které tvoří reaktivní amorfni fáze. Zeminy mají rozdílný obsah oxidu vápenatého, zatímco zemina A obsahuje CaO téměř 11 %, zemina B má obsah CaO pod 1 %. V důsledku toho nemohou u zeminy B vznikat při výpalu minerály, které ve své molekule obsahují vápník, nebo vznikají jen v zanedbatelném množství.

Tab. 12: Chemické složení cihlářských zemín A a B.

Cihlářská zemina	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	SO ₃
A obsah [%]	57,07	15,06	4,79	10,70	4,00	3,09	1,01	0,41	0,05	0,16	1,21
B obsah [%]	76,49	18,36	5,13	0,69	1,19	2,48	1,17	0,61	0,06	0,11	0,07

Mineralogické složení cihelného střepu po výpalu

Na Obr. 32 a Obr. 33 jsou zobrazeny rentgenogramy cihelných střepů vyrobených z cihlářských zemín A a B po výpalu na všechny uvedené teploty. V Tab. 13 a Tab. 14 je uvedeno jejich mineralogické složení. Oba vzorky obsahují z krystalických fází křemen a živce, vzorek A obsahuje gehlenit, biotit a wollastonit, vzorek B obsahuje hematit a mullit.

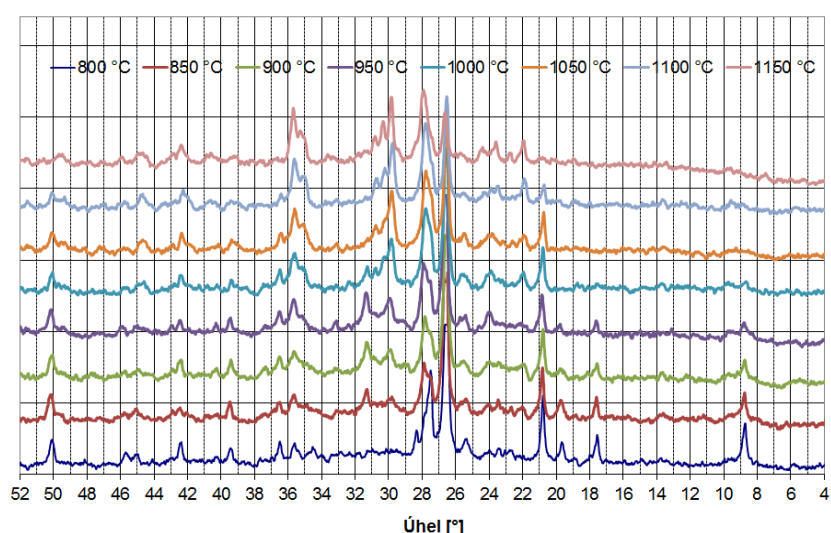
Pro nevápnitý typ cihlářské zeminy je typické mizení vrstevnatých minerálů během výpalu (jílové minerály, slídy), z nových fází pouze vznik mullitu při teplotě výpalu na 1050 °C.

Pro vápnitý typ cihlářské zeminy je mimo mizení vrstevnatých minerálů v průběhu výpalu typický vznik nových vápenatých fází, zejména anortitu, gehlenitu nebo wollastonitu.

Anortit – dhkl (°): 3,203 (27,8 °) – 2,95 (30,2 °) – 2,524 (35,5 °)

Wollastonit 3,30 (27,0 °) - 2,97 (30,1 °) – 1,71 (53,3 °)

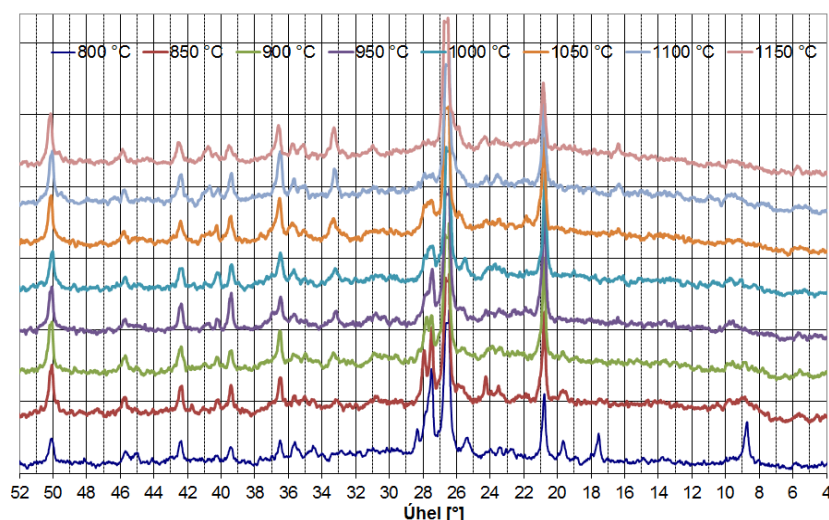
Gehlenit 3,066 (29,1 °) - 2,85 (31,4 °) – 2,437 (36,0 °)



Obr. 32: Rentgenogram cihelného střepu na bázi cihlářské zeminy A.

Tab. 13: Mineralogické složení cihelného střepu A v závislosti na teplotě výpalu.

800 °C	850 °C	900 °C	950 °C	1000 °C	1050 °C	1100 °C	1150 °C
křemen	křemen	křemen	křemen	křemen	křemen	křemen	křemen
illit	illit						
mikroclin	mikroclin	mikroclin	mikroclin	mikroclin	mikroclin	mikroclin	mikroclin
anortit	anortit	anortit	anortit	anortit	anortit	anortit	anortit
	gehlenit	gehlenit	gehlenit	gehlenit			
		wollastonit	wollastonit	wollastonit	wollastonit	wollastonit	wollastonit
biotit	biotit	biotit	biotit	biotit	biotit	biotit	biotit
ortoklas	ortoklas	ortoklas	ortoklas	ortoklas	ortoklas	ortoklas	ortoklas



Obr. 33: Rentgenogram cihelného střepu na bázi cihlářské zeminy B.

Tab. 14: Mineralogické složení cihelného střepu B v závislosti na teplotě výpalu.

800 °C	850 °C	900 °C	950 °C	1000 °C	1050 °C	1100 °C	1150 °C
křemen	křemen	křemen	křemen	křemen	křemen	křemen	křemen
illit	illit						
mikroklin	mikroklin	mikroklin	mikroklin	mikroklin	mikroklin	mikroklin	mikroklin
			hematit	hematit	hematit	hematit	hematit
					mullit	mullit	mullit
ortoklas	ortoklas	ortoklas	ortoklas	ortoklas	ortoklas	ortoklas	ortoklas
anortit	anortit	anortit	anortit	anortit	anortit	anortit	anortit

3 Příklady provedení

3.1 Výběr, označení a stanovení rozměrů zkušebních prvků

Celkem bylo pro zkoušky vybráno 10 cihel. Cihly byly označeny číslicemi 1 až 10. U všech prvků byly stanoveny rozměry a byla stanovená hmotnost ve stavu přirozeně vlhkém, hodnoty jsou uvedeny v Tab. 15. Následně byly všechny vzorky vysušeny do ustálené hmotnosti (označení stavu S0), dále byly nasyceny vodou (označení stavu N0) a nasyceny varem (označení stavu NV0). Prvky označené 2 a 5 až 10 byly podrobovány zmrazovacím cyklům, jejich stav byl kontrolován po prvních 10 zmrazovacích cyklech (označení stavu M10) a následně po každých pěti dalších cyklech až do konečného počtu zmrazovacích cyklů 25 (označení stavu M25). Zbývající prvky tedy č. 1, č. 3 a č. 4 byly vyčleněny pro zkoušky metodou impact-echo (odst. 3.5).

Tab. 15: Rozměry a objemová hmotnost ve stavu přirozeně vlhkém.

Vzorek č.	Šířka w_u	Výška h_u	Délka l_u	Hmotnost vysuš. $m_{d,u}$	Obejmová hmotnost $\rho_{d,u}$ (za lab. podmínek)
	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m ³]
1	148,7	73,8	305,2	4835,0	1440
2	151,4	72,5	302,8	4924,4	1480
3	150,4	75,4	299,8	4928,8	1450
4	141,9	68,3	302,2	4892,0	1670
5	146,5	70,0	302,4	5144,2	1660
6	149,5	70,4	295,9	4384,8	1410
7	153,0	71,9	303,9	5013,4	1500
8	146,9	72,6	297,7	4783,6	1510
9	152,0	66,5	300,9	5440,0	1790
(A)10	149,7	60,4	291,8	4129,0	1560



Obr. 34: Zkušební vzorek č.1 po 0 zmraz. cyklech.



Obr. 35: Zkušební vzorek č.1 po 0 zmraz. cyklech.



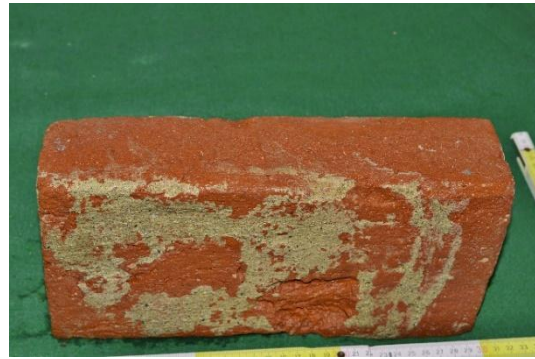
Obr. 36: Zkušební vzorek č.2 po 0 zmraz. cyklech.



Obr. 37: Zkušební vzorek č.2 po 25 zmraz. cyklech.



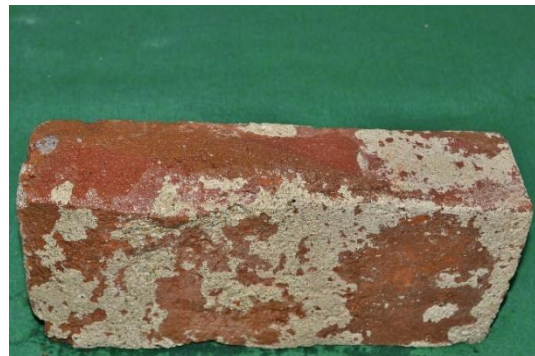
Obr. 38: Zkušební vzorek č.3 po 0 zmraz. cyklech.



Obr. 39: Zkušební vzorek č.3 po 0 zmraz. cyklech.



Obr. 40: Zkušební vzorek č.4 po 0 zmraz. cyklech.



Obr. 41: Zkušební vzorek č.4 po 0 zmraz. cyklech.



Obr. 42: Zkušební vzorek č.5 po 0 zmraz. cyklech.



Obr. 43: Zkušební vzorek č.5 po 25 zmraz. cyklech.



Obr. 44: Zkušební vzorek č.6 po 0 zmraz. cyklech.



Obr. 45: Zkušební vzorek č.6 po 25 zmraz. cyklech.



Obr. 46: Zkušební vzorek č.7 po 0 zmraz. cyklech.



Obr. 47: Zkušební vzorek č.7 po 25 zmraz. cyklech.



Obr. 48: Zkušební vzorek č.8 po 0 zmraz. cyklech.



Obr. 49: Zkušební vzorek č.8 po 25 zmraz. cyklech.



Obr. 50: Zkušební vzorek č.9 po 0 zmraz. cyklech.



Obr. 51: Zkušební vzorek č.9 po 25 zmraz. cyklech.



Obr. 52: Zkušební vzorek č.10 po 0 zmraz. cyklech.

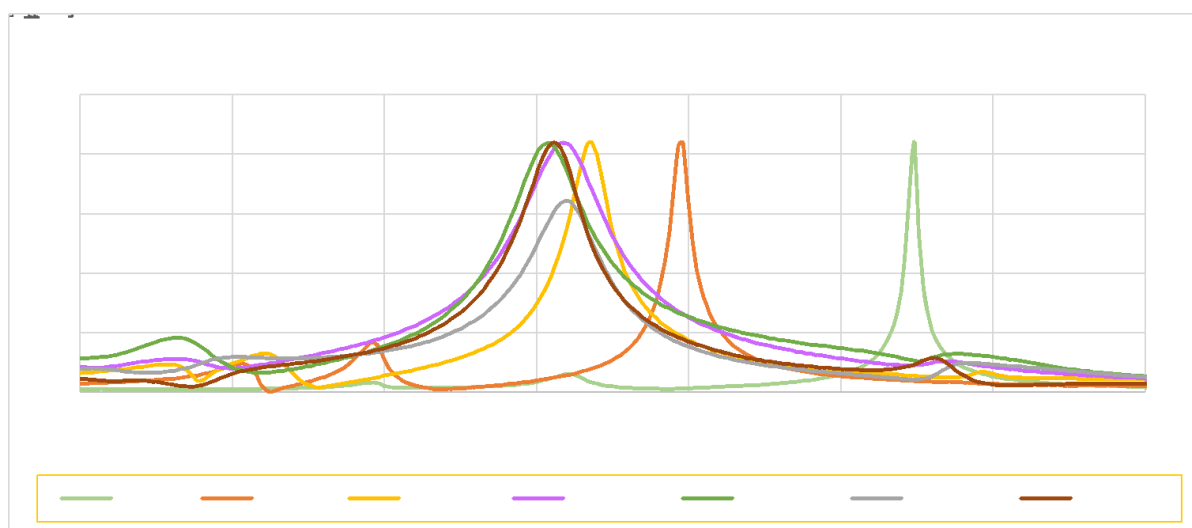


Obr. 53: Zkušební vzorek č. 10 po 25 zmraz. cyklech.

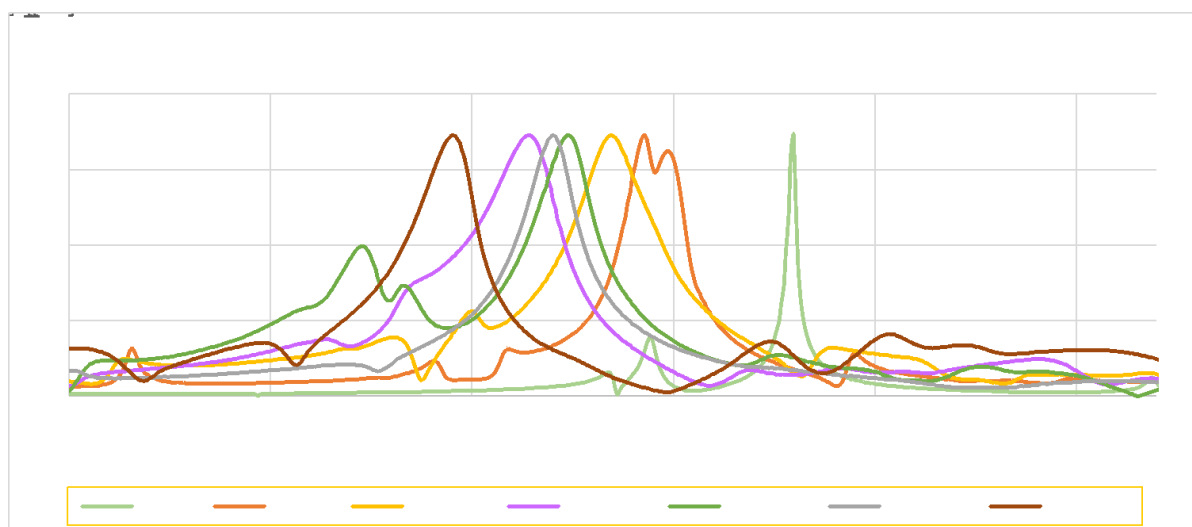
3.2 Rezonanční metoda

Rezonanční metodou byly sledovány změny jednotlivých frekvencí, a to v závislosti na stupni nasycení a na počtu zmrazovacích cyklů. Pomocí rezonanční metody lze sejmout celé (námi zvolené) spektrum vlastních frekvencí a můžeme tak sledovat změny tvaru jejich křivek. Na kvalitu prvku nelze usuzovat pouze z jednotlivých hodnot vrcholů vlastních frekvencí, je nutné vzít v úvahu tvar křivky tedy její „jasnost“, jednoznačnost a šířku jednotlivých vrcholů. Podle tvaru křivky vlastních frekvencí tedy lze předpokládat kvalitu prvku, ale také na případné vady a poruchy ve vnitřní struktuře prvku, které nejsou na povrchu prvku viditelné. Tyto vady se poté během zkoušky mrazuvzdornosti mohou rozšiřovat.

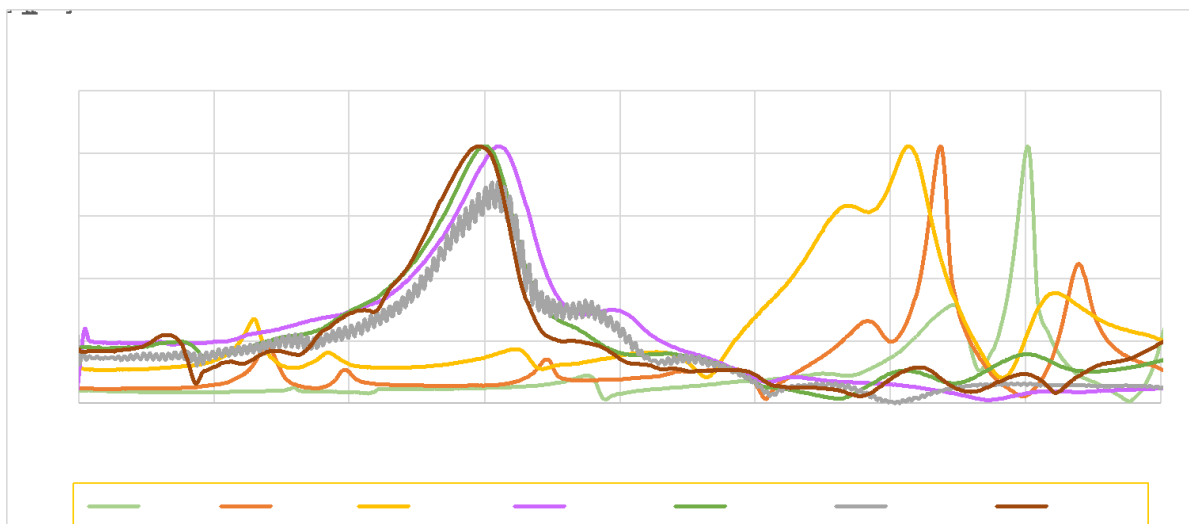
Příklady tvaru křivek prvních vlastních frekvencí podélného kmitání f_L :



Obr. 54: Podélné frekvence prvku č.6 (kvalitnější vzorek).

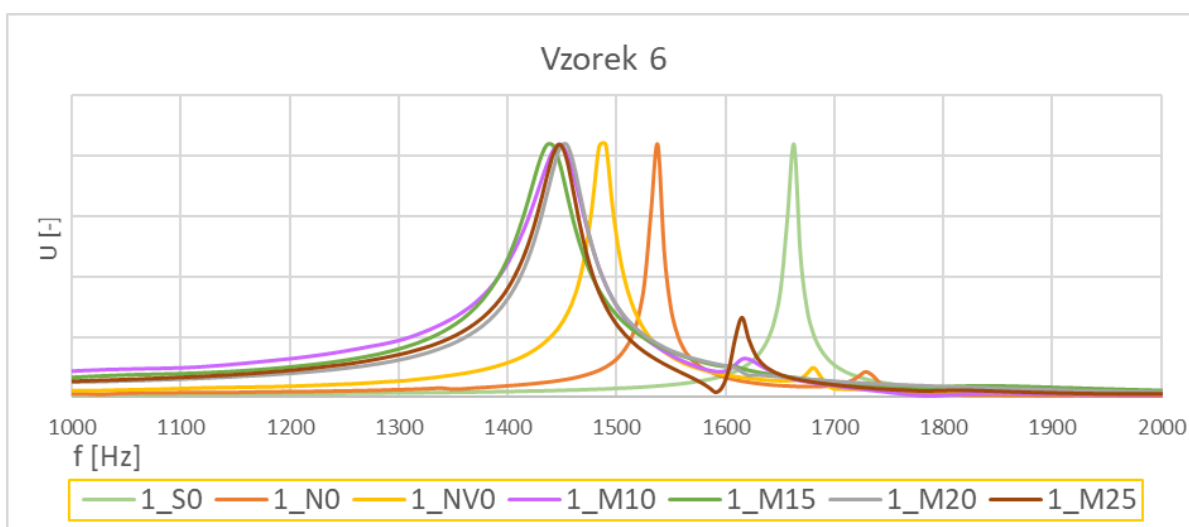


Obr. 55: Podélné frekvence prvku č.2 (průměrně kvalitní vzorek).

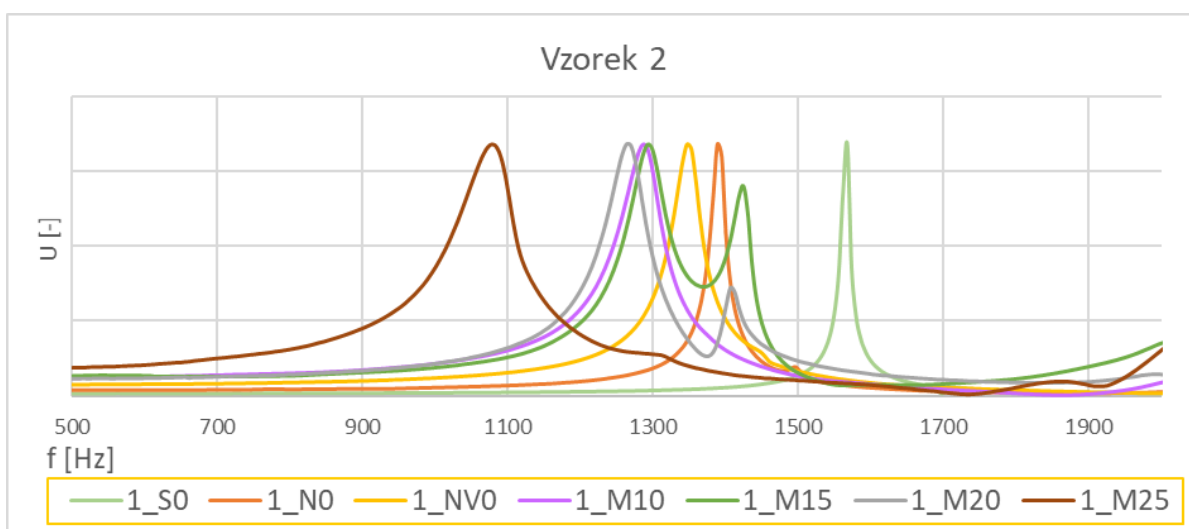


Obr. 56: Podélné frekvence prvku č.8 (méně kvalitní vzorek).

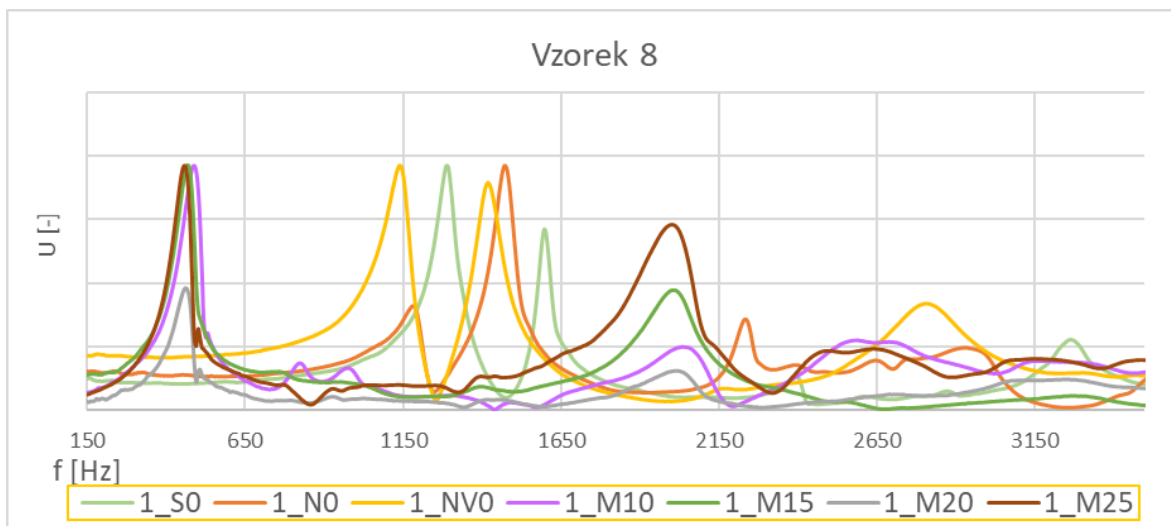
Příklady tvaru křivek prvních vlastních frekvencí příčného kmitání f_f :



Obr. 57: Příčné frekvence prvku č.6 (kvalitnější vzorek).

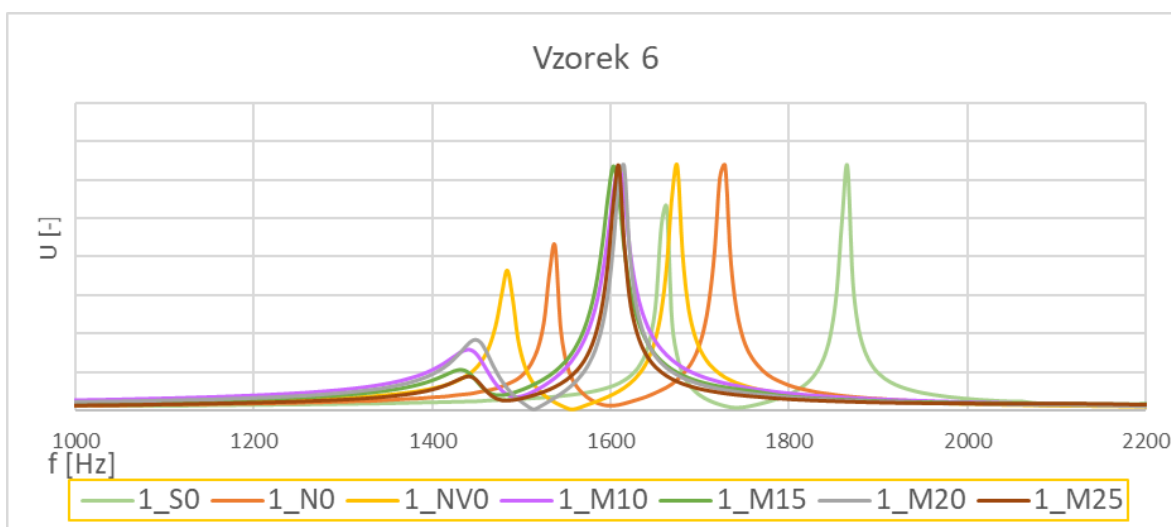


Obr. 58: Příčné frekvence prvku č.2 (průměrně kvalitní vzorek).

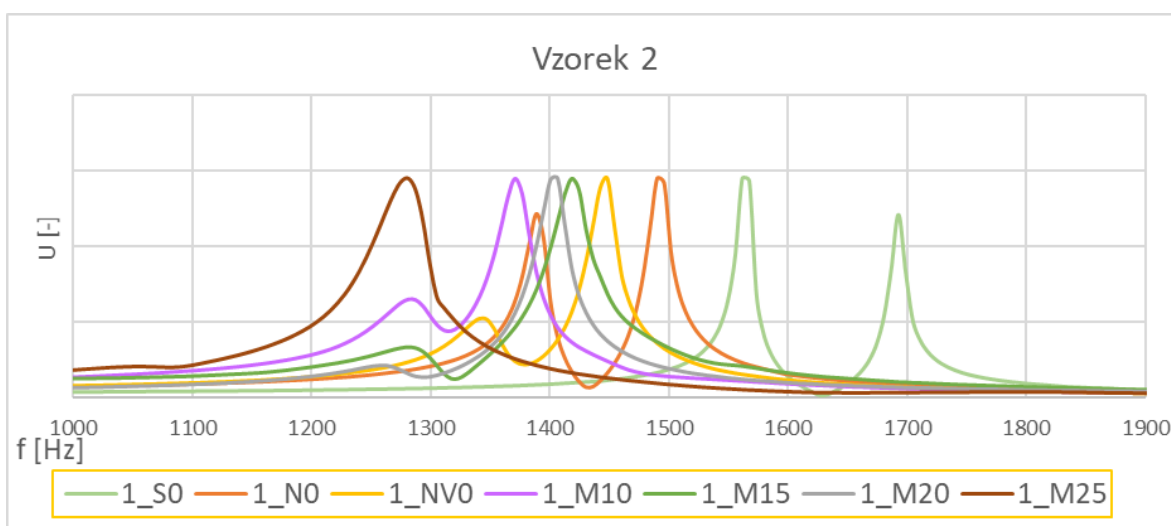


Obr. 59: Příčné frekvence prvku č.8 (méně kvalitní vzorek).

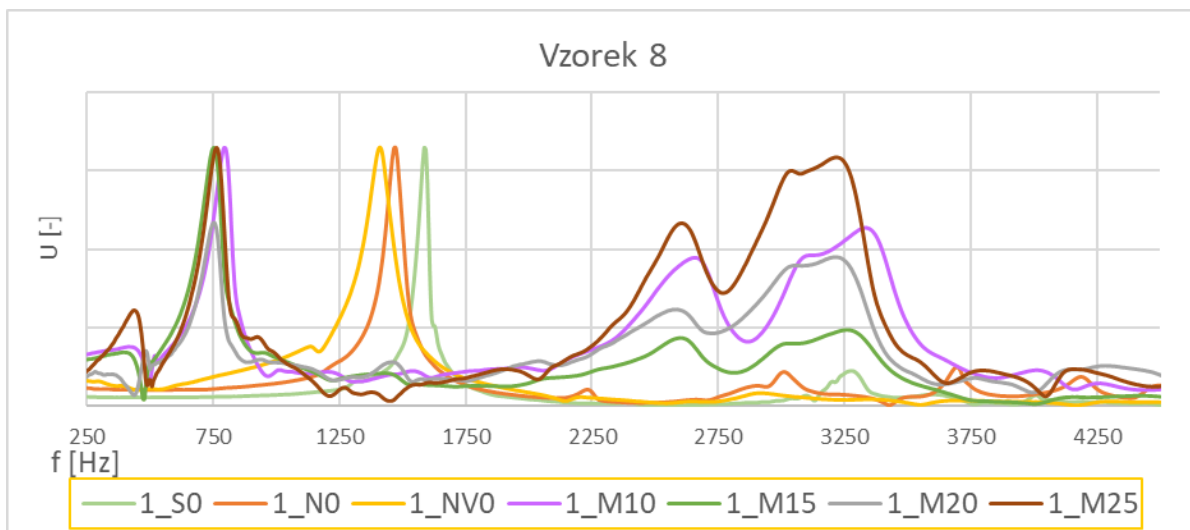
Příklady tvaru křivek prvních vlastních frekvencí krouživého kmitání f_t :



Obr. 60: Krouživé frekvence prvku č.6 (kvalitnější vzorek).



Obr. 61: Krouživé frekvence prvku č.2 (průměrně kvalitní vzorek).



Obr. 62: Kroutivé frekvence prvku č.8 (méně kvalitní vzorek).

Na Obr. 54, Obr. 57 a Obr. 60 jsou vyobrazeny tvary křivek vlastních frekvencí kvalitnějšího prvku z daného souboru (prvek č.6). U tohoto prvku je průběh křivky poměrně „čistý“ s jasným průběhem. Po nasycení i po zmrazovacích cyklech došlo pouze „zploštění“ vrcholu a jeho posunu k nižším hodnotám frekvence, charakter tvaru křivky ale zůstává jednoznačný i po 25 zmrazovacích cyklech.

Naopak na Obr. 56, Obr. 59 a Obr. 62 jsou vyobrazeny tvary křivek vlastních frekvencí méně kvalitního prvku (prvek č.8). Prvek byl již před nasycením a zmrazováním poškozen trhlinami (Obr. 48) z tohoto důvodu není tvar křivky prvku „čistý“ ani jednoznačný ani ve vysušeném stavu. S nasycením prvku vodou a s rostoucím počtem zmrazovacích cyklů se tyto vady a poruchu rozšiřují a jednoznačný tvar křivky se dále zhoršuje.

Z jednotlivých frekvencí byly dále podle kapitoly 2.3.8 stanoveny dynamické moduly pružnosti:

Tab. 16: Frekvence prvků a dynamické moduly pružnosti v tahu a ve smyku ve vysušeném stavu.

Vzorek č.	F_L	F_f	F_t	F_{f2}	E_{crL}	G_{cr}	E_{crF}
	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[GPa]	[GPa]	[GPa]
2	3796,0	1570,0	1696,0	2561,0	7,8	3,0	7,87
5	4198,0	1713,0	1964,0	2725,0	10,7	4,5	11,00
6	4193,0	1662,0	1867,0	2779,0	8,7	3,4	8,09
7	3742,0	1520,0	1792,0	2528,0	7,7	3,5	7,44
8	4005,0	1286,0	1587,0	2378,0	8,6	2,5	5,39
9	2675,0	1068,0	1252,0	1771,0	4,6	2,2	4,53
(A)10	3022,0	1110,0	1265,0	2051,0	4,9	2,0	4,70

Tab. 17: Frekvence prvků a dynamické moduly pružnosti v tahu a ve smyku po 24 h nasycení vodou.

Vzorek č.	F_L	F_f	F_t	F_{f2}	E_{crL}	G_{cr}	E_{crF}
	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[GPa]	[GPa]	[GPa]
2	3455,0	1390,0	1496,0	2154,0	7,7	2,8	7,49
5	3908,0	1598,0	1832,0	2528,0	10,5	4,4	10,85
6	3889,0	1538,0	1727,0	2562,0	8,8	3,4	8,23
7	3458,0	1360,0	1617,0	2309,0	7,9	3,4	7,21
8	3685,0	1178,0	1469,0	2222,0	8,4	2,5	5,22
9	2059,0	827,0	970,0	1364,0	3,1	1,5	3,06
(A)10	2725,0	993,0	1129,0	1817,0	4,6	1,9	4,41

Tab. 18: Frekvence prvků a dynamické moduly pružnosti v tahu a ve smyku po nasycení varem.

Vzorek č.	F_L	F_f	F_t	F_{f2}	E_{crL}	G_{cr}	E_{crF}
	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[GPa]	[GPa]	[GPa]
2	3348,0	1347,0	1453,0	2107,0	7,5	2,7	7,27
5	3767,0	1529,0	1748,0	2421,0	10,2	4,2	10,45
6	3771,0	1491,0	1676,0	2478,0	8,7	3,3	8,06
7	3442,0	1344,0	1582,0	2293,0	8,1	3,4	7,34
8	3571,0	1147,0	1412,0	2141,0	8,4	2,4	5,28
9	2153,0	841,0	969,0	1040,0	3,5	1,5	3,32
(A)10	2690,0	973,0	1090,0	1801,0	4,7	1,8	4,43

Tab. 19: Frekvence prvků a dynamické moduly pružnosti v tahu a ve smyku po 10 zmraz. cyklech.

Vzorek č.	F_L	F_f	F_t	F_{f2}	E_{crL}	G_{cr}	E_{crF}
	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[GPa]	[GPa]	[GPa]
2	3139,0	1286,0	1373,0	1997,0	6,4	2,4	6,41
5	3079,0	1011,0	1277,0	1401,0	6,7	2,2	4,75
6	3735,0	1451,0	1607,0	2464,0	8,4	3,0	7,68
7	3368,0	1323,0	1556,0	2240,0	7,6	3,2	6,91
8	2061,0	483,0	795,0	974,0	2,8	0,8	-
9	2116,0	837,0	956,0	1396,0	3,3	1,5	3,25
(A)10	2290,0	777,0	846,0	1460,0	3,4	1,1	2,91

Tab. 20: Frekvence prvků a dynamické moduly pružnosti v tahu a ve smyku po 15 zmraz. cyklech.

Vzorek č.	F_L	F_f	F_t	F_{f2}	E_{crL}	G_{cr}	E_{crF}
	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[GPa]	[GPa]	[GPa]
2	3215,0	1295,0	1420,0	2019,0	6,4	2,4	6,16
5	2968,0	977,0	1251,0	1317,0	6,3	2,4	4,29
6	3743,0	1425,0	1674,0	2670,0	8,4	3,3	7,26
7	3371,0	1319,0	1557,0	2245,0	7,6	3,2	6,87
8	2050,0	447,0	715,0	-	2,7	0,6	-
9	2080,0	804,0	971,0	1335,0	2,5	1,2	2,35
(A)10	2124,0	845,0	957,0	1408,0	2,9	1,4	3,22

Tab. 21: Frekvence prvků a dynamické moduly pružnosti v tahu a ve smyku po 20 zmraz. cyklech.

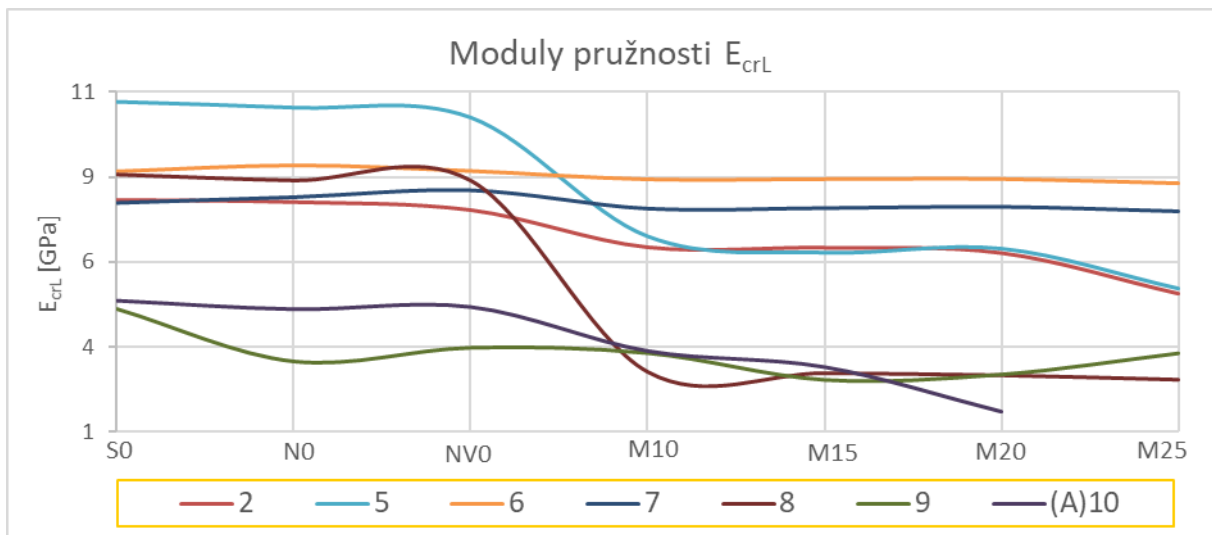
Vzorek č.	F_L	F_f	F_t	F_{f2}	E_{crL}	G_{cr}	E_{crF}
	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[GPa]	[GPa]	[GPa]
2	3186,0	1255,0	1390,0	1989,0	6,3	2,3	5,78
5	2993,0	985,0	1255,0	1352,0	6,4	2,2	4,49
6	3746,0	1467,0	1622,0	2471,0	8,4	3,1	7,79
7	3379,0	1332,0	1545,0	2240,0	7,6	3,1	7,03
8	2027,0	444,0	753,0	753,0	2,7	0,7	-
9	2143,0	850,0	965,0	964,0	2,7	1,2	2,66
(A)10	1583,0	463,0	541,0	753,0	1,6	0,4	-

Tab. 22: Frekvence prvků a dynamické moduly pružnosti v tahu a ve smyku po 25 zmraz. cyklech.

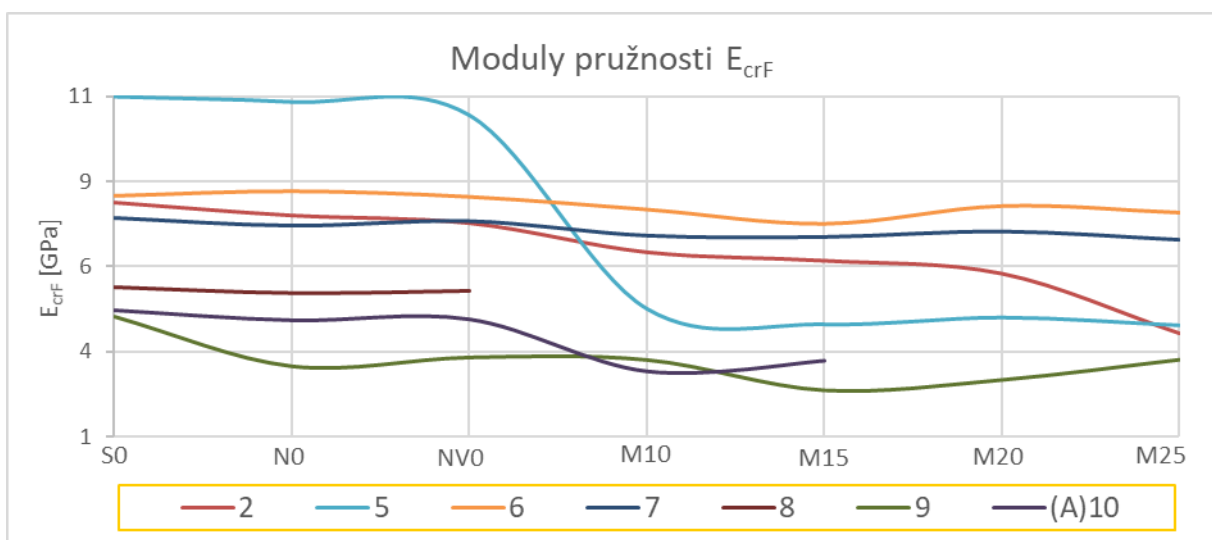
Vzorek č.	F_L	F_f	F_t	F_{f2}	E_{crL}	G_{cr}	E_{crF}
	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[GPa]	[GPa]	[GPa]
2	2954,0	1076,0	1274,0	2496,0	5,1	1,8	4,03
5	2713,0	980,0	1226,0	1347,0	5,2	2,0	4,26
6	3722,0	1448,0	1607,0	2457,0	8,3	3,0	7,59
7	3355,0	1313,0	1549,0	2225,0	7,5	3,1	6,78
8	1979,0	454,0	758,0	975,0	2,5	0,7	-
9	2119,0	840,0	956,0	1395,0	3,3	1,5	3,26
(A)10	1651,0	425,0	492,0	-	1,7	0,4	-

U prvků č. 5 a č. 8 byly hodnoty vrcholů prvních vlastních frekvencí podélného kmitání poměrně vysoké. Tvar křivky vlastních frekvencí podélného kmitání však nebyl „čistý“ a vrcholy nebyly zcela jednoznačné, bylo možné předpokládat, že tyto prvky budou již po prvních zmrazovacích cyklech vykazovat velké poklesy frekvencí (dynam. modulů pružnosti), což se také následně potvrdilo.

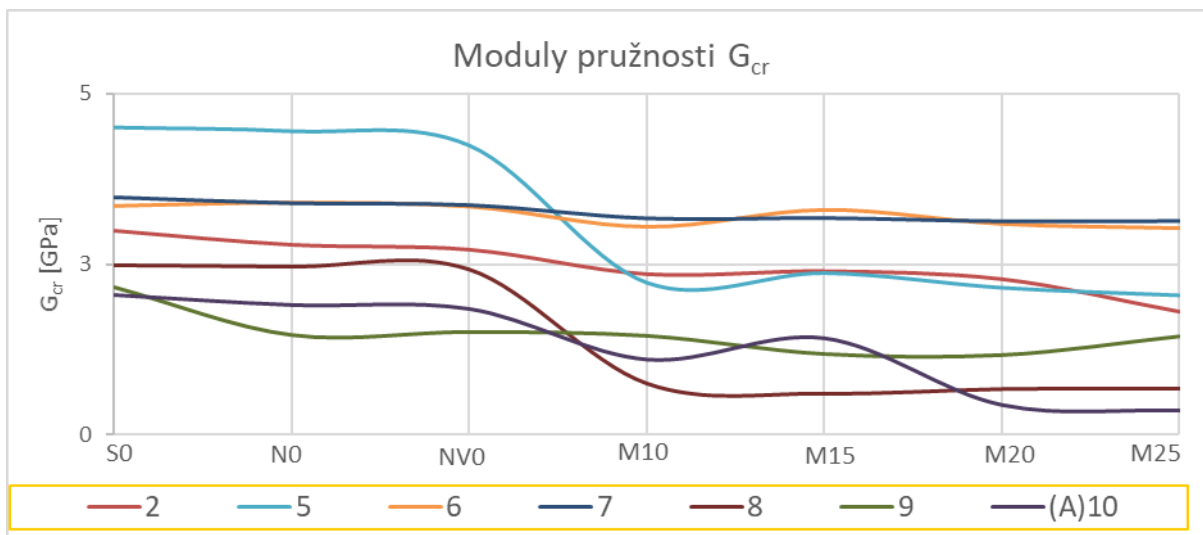
Naopak u prvku č. 6 a č. 7 byla hodnota vrcholu vlastních frekvencí (dynam. modulů pružnosti) průměrná, průběh tvaru křivky byl ale jednoznačný a „čistý“ a nenastal tak velký pokles frekvencí ani po 25 zmrazovacích cyklech (Obr. 63 až Obr. 65).



Obr. 63: Pokles dynam. modulů pružnosti v tahu E_{crL} v závislosti na stupni nasycení a na počtu zmrazovacích cyklů.



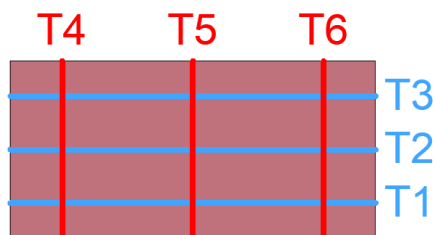
Obr. 64: Pokles dynam. modulů pružnosti v tahu E_{crF} v závislosti na stupni nasycení a na počtu zmrazovacích cyklů.



Obr. 65: Pokles dynam. modulů pružnosti v tahu G_{cr} v závislosti na stupni nasycení a na počtu zmrazovacích cyklů.

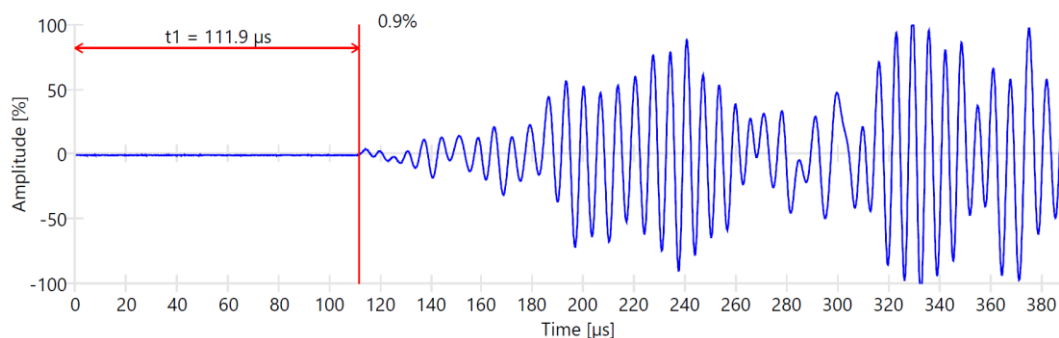
3.3 Ultrazuková impulsová metoda – stanovení dynam. modulů pružnosti

Obdobně jako u rezonanční metody, lze i pomocí ultrazukové impulsní metody sledovat změny ve vnitřní struktuře prvku v závislosti na stupni nasycení prvku a na počtu zmrazovacích cyklů. Podle tvaru impulsu lze odhalit vady a defekty ve vnitřní struktuře, které nejsou na povrchu zjevné. Tyto vnitřní vady a defekty se obvykle se vzrůstajícím počtem zmrazovacích cyklů rozšiřují. V tomto případě byly stanoveny doby průchodu impulsů (T_i) v podélném i příčném směru, vždy po třech základnách viz Obr. 66.

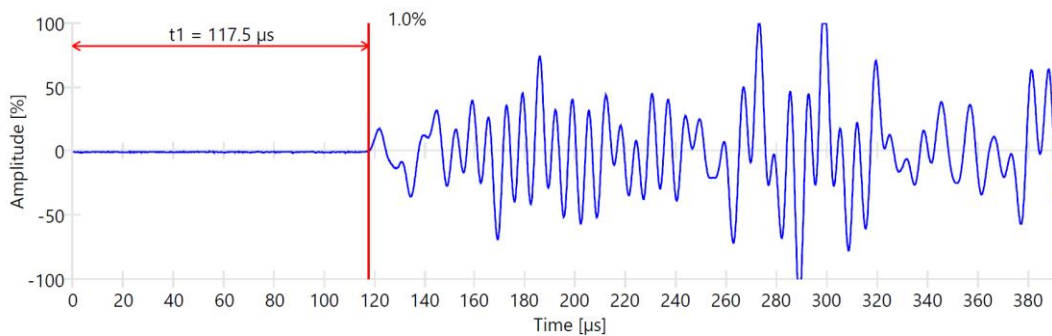


Obr. 66: Schéma rozmístění podélných a příčných základen pro měření dob průchodu UZ impulsů

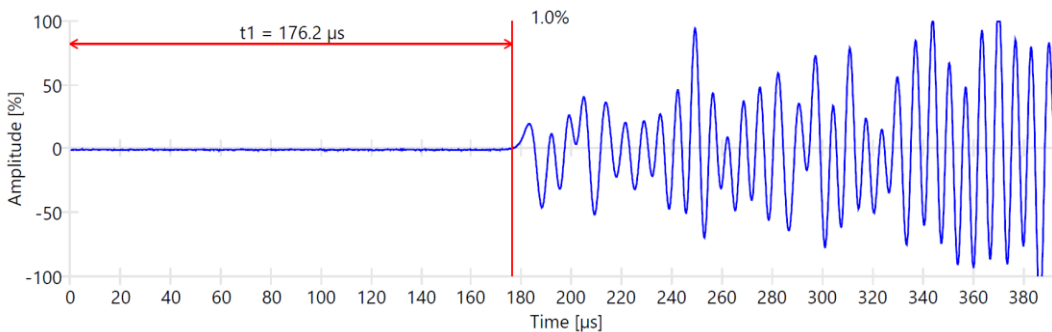
Příklady tvaru UZ impulsů v podélné základně „T1“ ve vysušeném stavu:



Obr. 67: Tvar křivky UZ impulsu vzorku č. 6 ve vysušeném stavu (kvalitnější vzorek).

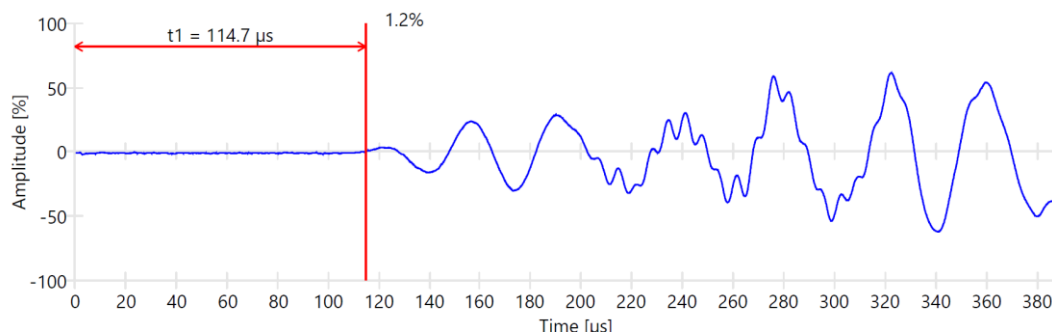


Obr. 68: Tvar křivky UZ impulsu vzorku č. 2 ve vysušeném stavu (průměrně kvalitní vzorek).

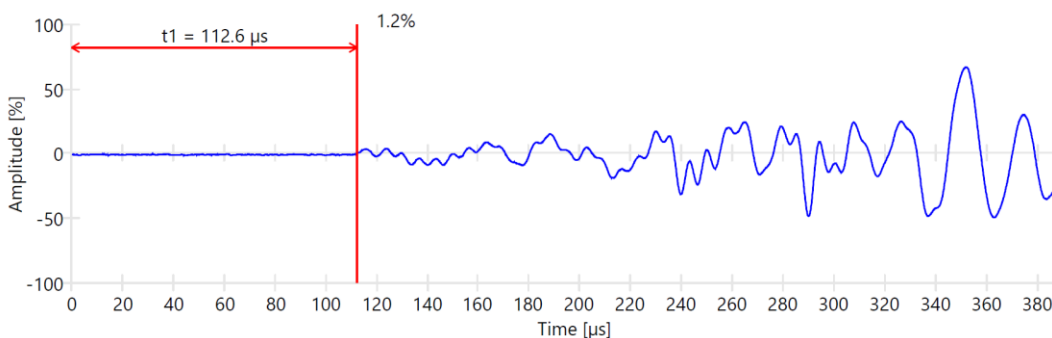


Obr. 69: Tvar křivky UZ impulsu vzorku č. 9 ve vysušeném stavu (méně kvalitní vzorek).

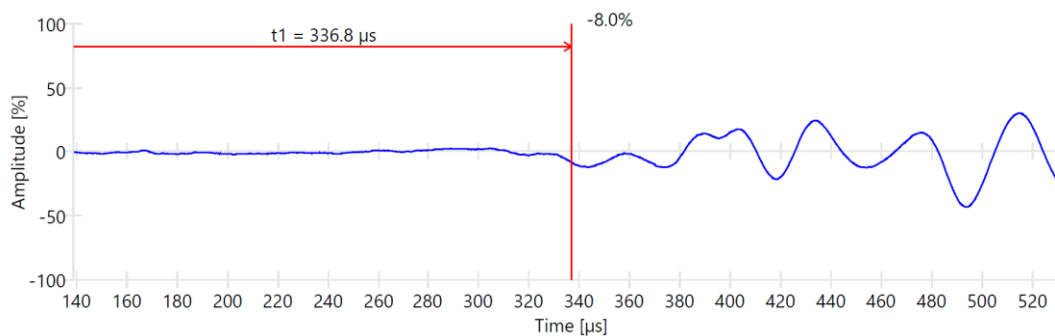
Příklady tvaru UZ impulsů v podélné základně „T1“ po nasycení vzorků varem:



Obr. 70: Tvar křivky UZ impulsu vzorku č. 6 po nasycení varem (kvalitnější vzorek).

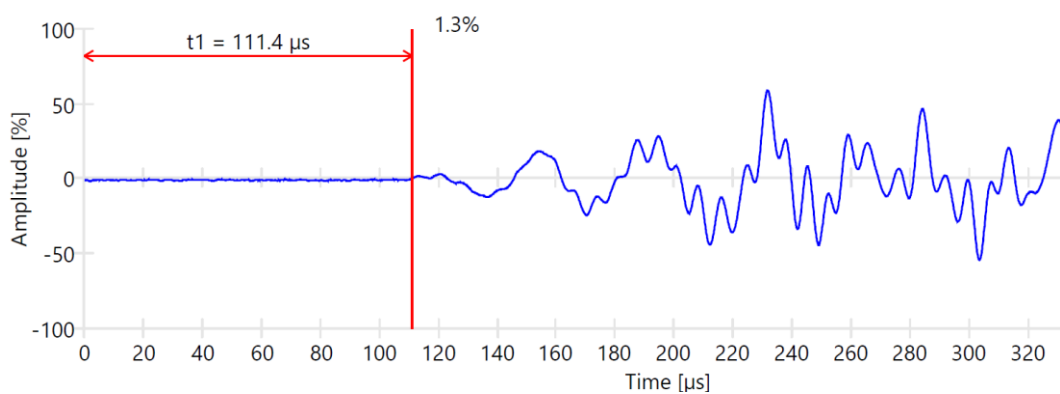


Obr. 71: Tvar křivky UZ impulsu vzorku č. 2 po nasycení varem (průměrně kvalitní vzorek).

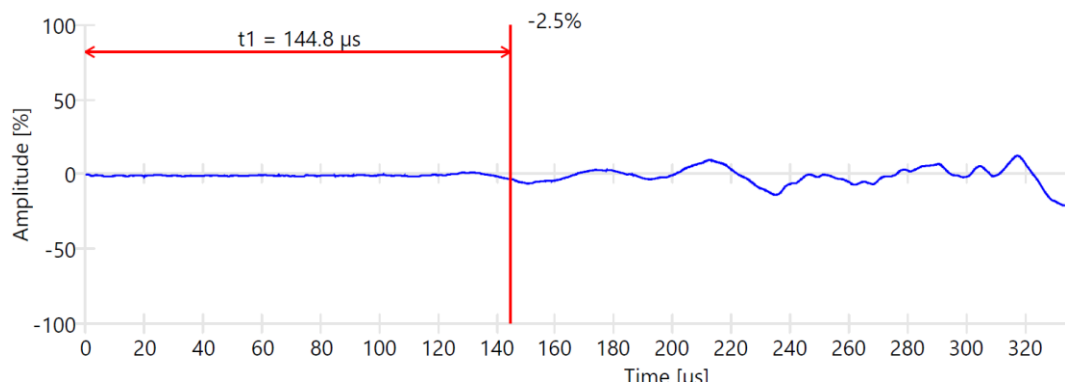


Obr. 72: Tvar křivky UZ impulsu vzorku č. 9 po nasycení varem (méně kvalitní vzorek).

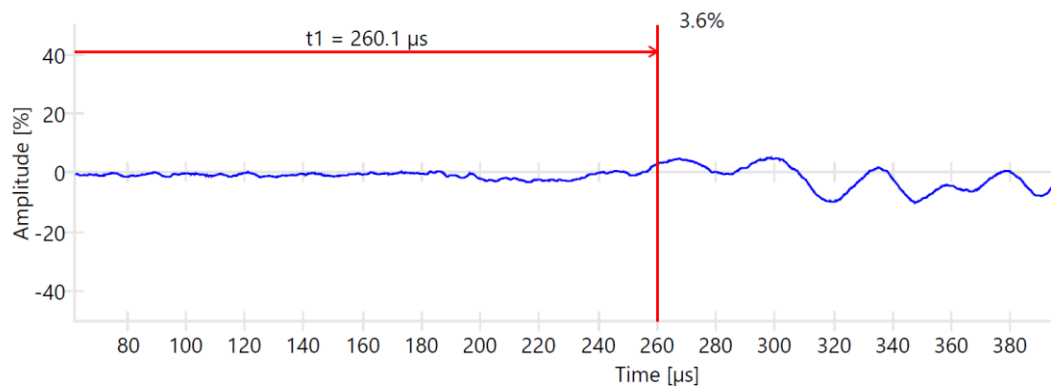
Příklady tvaru UZ impulsů v podélné základně „T1“ po 25 zmrazovacích cyklech:



Obr. 73: Tvar křivky UZ impulsu vzorku č. 6 po 25 zmrazovacích cyklech (kvalitnější vzorek).



Obr. 74: Tvar křivky UZ impulsu vzorku č. 2 po 25 zmrazovacích cyklech (průměrně kvalitní vzorek).



Obr. 75: Tvar křivky UZ impulsu vzorku č. 9 po 25 zmrazovacích cyklech (méně kvalitní vzorek).

Z Obr. 67až Obr. 75 vyplývá, že po nasycení prvků vodou a se vzrůstajícím počtem zmrazovacích cyklů se doba průchodu UZ impulsu zvětšuje a tvar křivky UZ impulsu se zplošťuje a stává se méně čitelný. Důvodem je rozvoj vad a defektů ve vnitřní struktuře prvků, které se s počtem zmrazovacích cyklů rozšiřují.

Z hodnot dob průchodu UZ impulsů pro jednotlivé podélné základy (T1 – T3) byla stanovena průměrná hodnota doby průchodu T_L a následně byly stanoveny dynamické moduly pružnosti v tahu $E_{cu,L}$. Obdobně byl stanoven dynamický modul pružnosti v tahu z měření v příčném směru $E_{cu,P}$. Pro stanovení dynamických modulů pružnosti byl uvažován Poissonův koeficient $\nu_{cu} = 0,18$. Jednotlivé hodnoty dynamických modulů pružnosti v tahu jsou uvedeny v Tab. 23 až Tab. 26.

Tab. 23: Průměrné doby průchodu v příčném a podélném směru a dynam. moduly pružnosti ve vysušeném stavu a po 24 h nasycení vodou.:

Vzorek č.	vysušený stav				po 24 h nasycení vodou			
	T_L	$E_{cu,L}$	T_P	$E_{cu,P}$	T_L	$E_{cu,L}$	T_P	$E_{cu,P}$
	[μ s]	[GPa]	[μ s]	[GPa]	[μ s]	[GPa]	[μ s]	[GPa]
2	120,5	8,6	61,0	8,4	125,1	9,5	63,4	9,3
5	111,6	11,2	57,2	10,0	116,2	11,7	58,1	11,0
6	114,7	8,6	59,3	8,2	120,3	9,3	61,3	9,1
7	122,9	8,4	65,1	7,6	126,2	9,6	64,8	9,2
8	96,5	13,2	49,0	12,5	101,0	13,9	49,7	14,1
9	181,6	4,5	93,2	4,4	216,4	3,6	108,4	3,6
(A)10	154,2	5,2	88,8	4,1	175,0	4,7	93,5	4,3

Tab. 24: Průměrné doby průchodu v příčném a podélném směru a dynam. moduly pružnosti po nasycení varem a po 10 zmrazovacích cyklech.

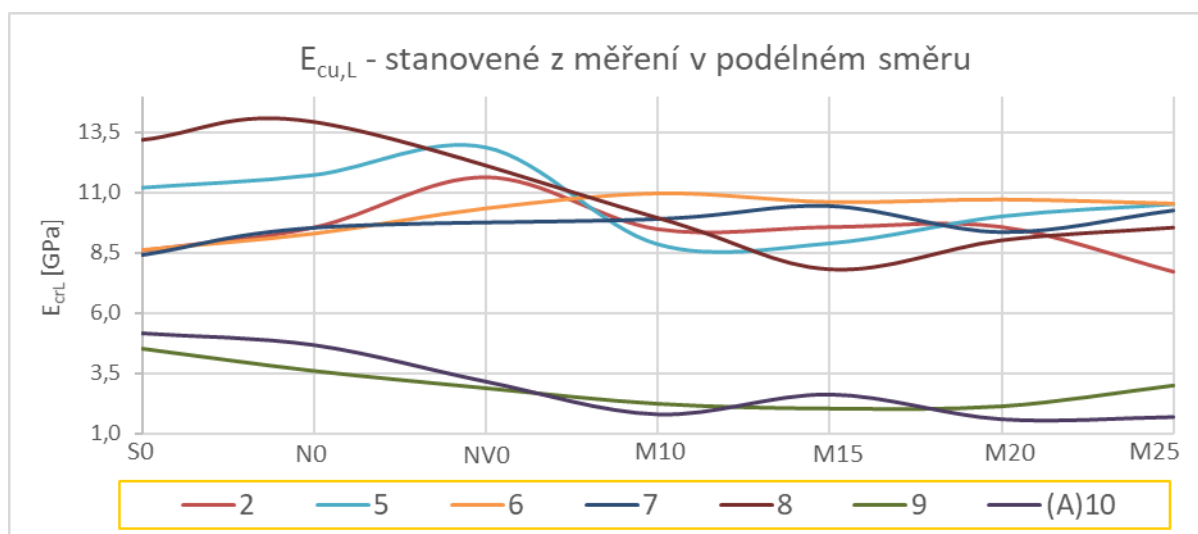
Vzorek č.	po nasycení varem				po 10 zmrazovacích cyklech			
	T_L	$E_{cu,L}$	T_P	$E_{cu,P}$	T_L	$E_{cu,L}$	T_P	$E_{cu,P}$
	[μ s]	[GPa]	[μ s]	[GPa]	[μ s]	[GPa]	[μ s]	[GPa]
2	115,3	11,6	56,7	12,0	125,9	9,5	61,10	10,05
5	113,5	12,9	53,1	13,8	136,1	8,8	58,93	11,06
6	116,5	10,3	56,1	11,4	112,6	11,0	56,30	11,20
7	-	-	-	-	124,4	9,9	63,73	9,58
8	-	-	-	-	122,5	10,0	56,97	11,22
9	245,9	2,9	78,9	7,1	278,2	2,2	89,63	5,44
(A)10	217,0	3,2	71,7	7,6	286,7	1,8	106,83	3,43

Tab. 25: Průměrné doby průchodu v příčném a podélném směru a dynam. moduly pružnosti po 15 a 20 zmrazovacích cyklech.

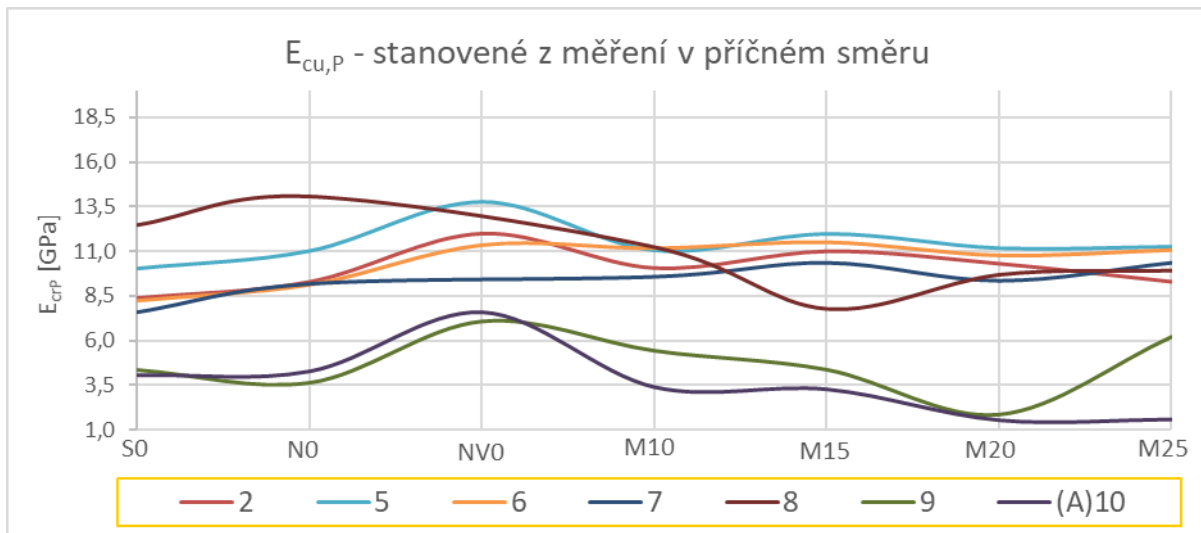
Vzorek č.	po 15 zmrazovacích cyklech				po 20 zmrazovacích cyklech			
	T_L	$E_{cu,L}$	T_P	$E_{cu,P}$	T_L	$E_{cu,L}$	T_P	$E_{cu,P}$
	[μ s]	[GPa]	[μ s]	[GPa]	[μ s]	[GPa]	[μ s]	[GPa]
2	122,3	9,6	57,0	11,0	121,8	9,6	58,70	10,30
5	135,8	8,9	56,6	12,0	128,0	10,0	58,67	11,18
6	114,3	10,6	55,4	11,5	113,7	10,7	57,20	10,80
7	121,2	10,5	61,3	10,4	128,0	9,4	64,50	9,35
8	138,1	7,8	68,4	7,8	128,5	9,0	61,23	9,67
9	259,6	2,0	89,0	4,4	253,8	2,1	136,73	1,85
(A)10	237,7	2,6	108,8	3,3	302,2	1,6	156,43	1,57

Tab. 26: Průměrné doby průchodu v příčném a podélném směru a dynam. moduly pružnosti po 25 zmrazovacích cyklech.

Vzorek č.	po 25 zmrazovacích cyklech			
	T_L	$E_{cu,L}$	T_P	$E_{cu,P}$
	[μ s]	[GPa]	[μ s]	[GPa]
2	131,7	7,7	60,0	9,3
5	124,5	10,5	58,3	11,3
6	114,5	10,5	56,4	11,1
7	122,0	10,3	61,2	10,4
8	124,7	9,6	60,4	9,9
9	239,4	3,0	83,6	6,2
(A)10	292,7	1,7	153,7	1,6



Obr. 76: Pokles dynam. modulů pružnosti v tahu $E_{cu,L}$ v závislosti na stupni nasycení a na počtu zmraz. cyklů.

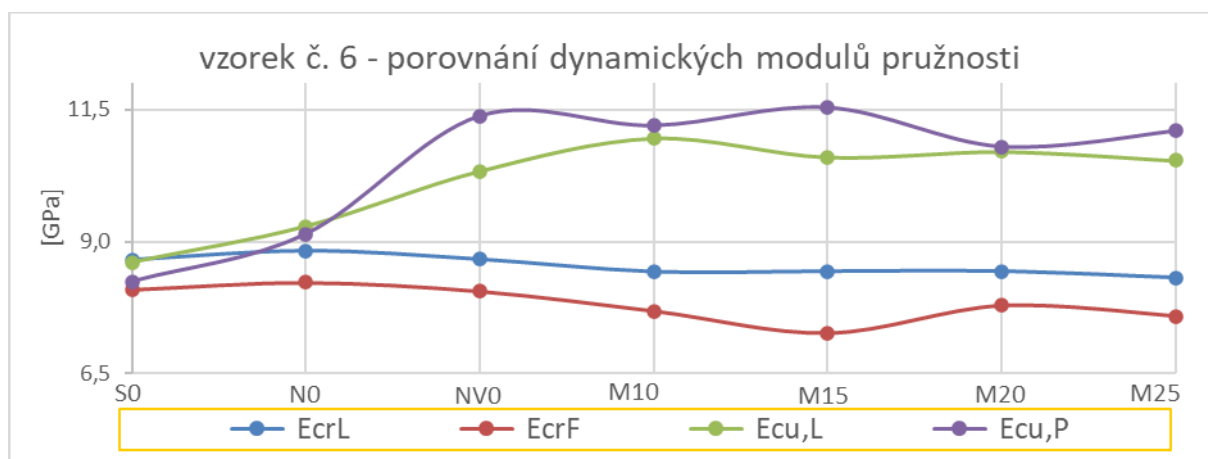


Obr. 77: Pokles dynam. modulů pružnosti v tahu $E_{cu,P}$ v závislosti na stupni nasycení a na počtu zmraz. cyklů.

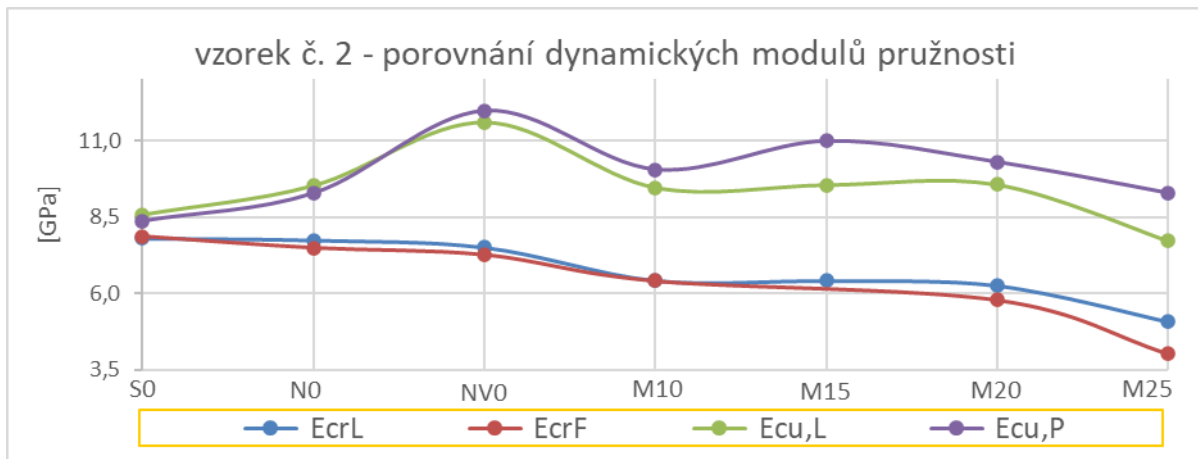
3.4 Srovnání dynamických modulů pružnosti

Dynamické moduly pružnosti v tahu stanoveny rezonanční metodou (odst. 3.2) z podélného kmitání E_{crL} a z příčného kmitání E_{crF} by pro daný vzorek měly dosahovat přibližně stejných hodnot. Pokud se tyto dynamické moduly výrazně liší (o více jak 10%) nelze považovat prvky za homogenní. Rozdíly mohou být také způsobeny vadami ve vnitřní struktuře prvků, které nemají totožný vliv na podélné a příčné vlastní frekvence prvku. Obdobně to platí u dynamických modulů pružnosti v tahu stanovených UZ impulsní metodou (odst. 3.3), tedy $E_{cu,L}$ stanovené z podélného měření a $E_{cu,P}$ stanovené z příčného měření.

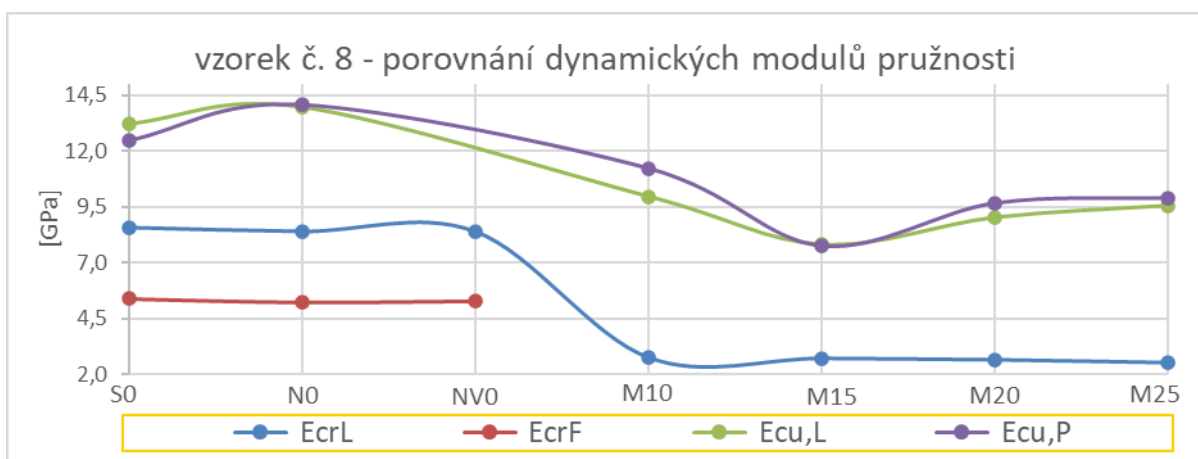
Nasycení vzorků vodou (tedy zvýšení objemové hmotnosti) má na dynamické moduly pružnosti stanovené UZ impulsní metodou větší vliv než na dynamické moduly stanovené rezonanční metodou. Na Obr. 78 až Obr. 80 tak můžeme pozorovat velký nárůst $E_{cu,L}$ a $E_{cu,P}$ po jejich nasycení vodou, tedy mezi stavy S0 a NVO.



Obr. 78: Srovnání dynamických modulů pružnosti stanovených rezonanční metodou a UZ metodou pro vzorek č.6 (kvalitnější vzorek).



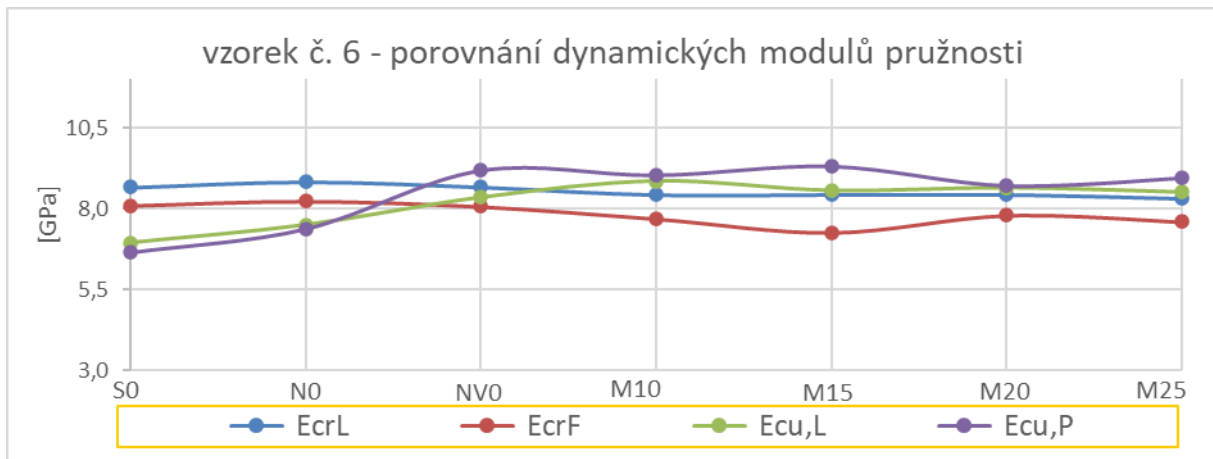
Obr. 79: Srovnání dynamických modulů pružnosti stanovených rezonanční metodou a UZ metodou pro vzorek č.2 (průměrně kvalitní vzorek).



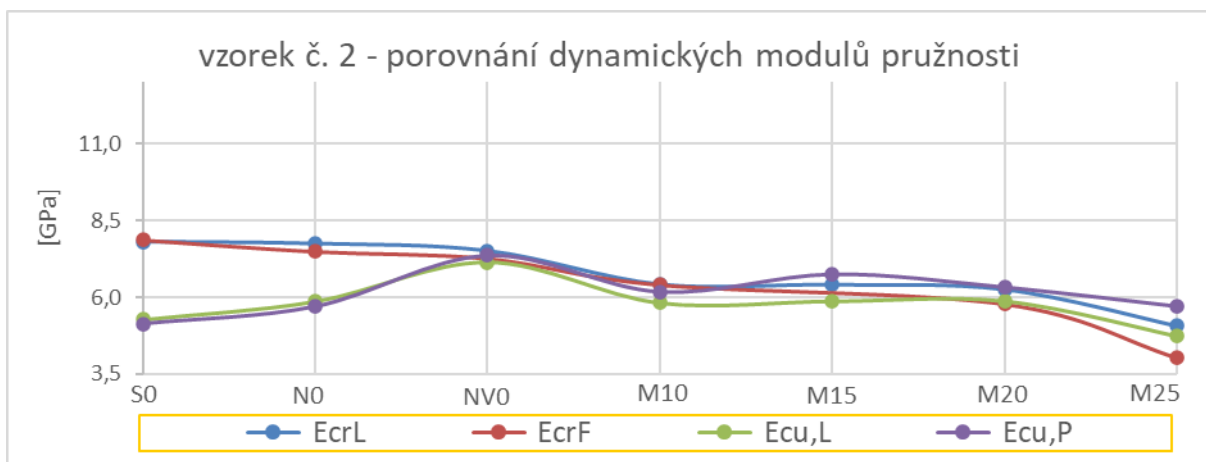
Obr. 80: Srovnání dynamických modulů pružnosti stanovených rezonanční metodou a UZ metodou pro vzorek č.8 (méně kvalitní vzorek).

Dynamické moduly pružnosti stanovené pomocí UZ impulsní metody vychází téměř u všech zkušebních vzorků vyšší. Tento jev je pravděpodobně způsoben faktem, že u UZ impulsní metody uvažujeme Poissonův koeficient konstantní (námi zvolený) $\nu_{cu} = 0,18$. Naopak u rezonanční metody je Poissonův koeficient ν_{cr} proměnný, neboť je závislý na podélných frekvencích f_L a kroutivých frekvencích f_t . Poissonův koeficient ν_{cr} je tedy pro každý stav tělesa odlišný a zpravidla vychází vyšší než 0,18. Tento koeficient může být v rezonanční metodě také určitým ukazatelem kvality prvky. U méně kvalitních prvků tento koeficient vychází v nereálně vysokých, respektive nízkých hodnotách (např. u prvku č. 8 vychází průměrně 0,7).

Pro srovnání zvolíme namísto $\nu_{cu} = 0,18$ hodnotu koeficientu jako průměrnou hodnotu z jednotlivých Poissonových koeficientů ν_{cr} stanovených rezonanční metodou (pro prvek č. 6 $\nu_{cu} = 0,30$ a pro prvek č. 2 $\nu_{cu} = 0,37$). Z Obr. 81 a Obr. 82 je patrné, že po této úpravě jsou rozdíly mezi dynamickými moduly pružnosti podstatně menší. Z toho vyplývá, že stanovení dynamických modulů pružnosti pomocí UZ impulsní metody je závislé na odhadu Poissonova koeficientu ν_{cu} .



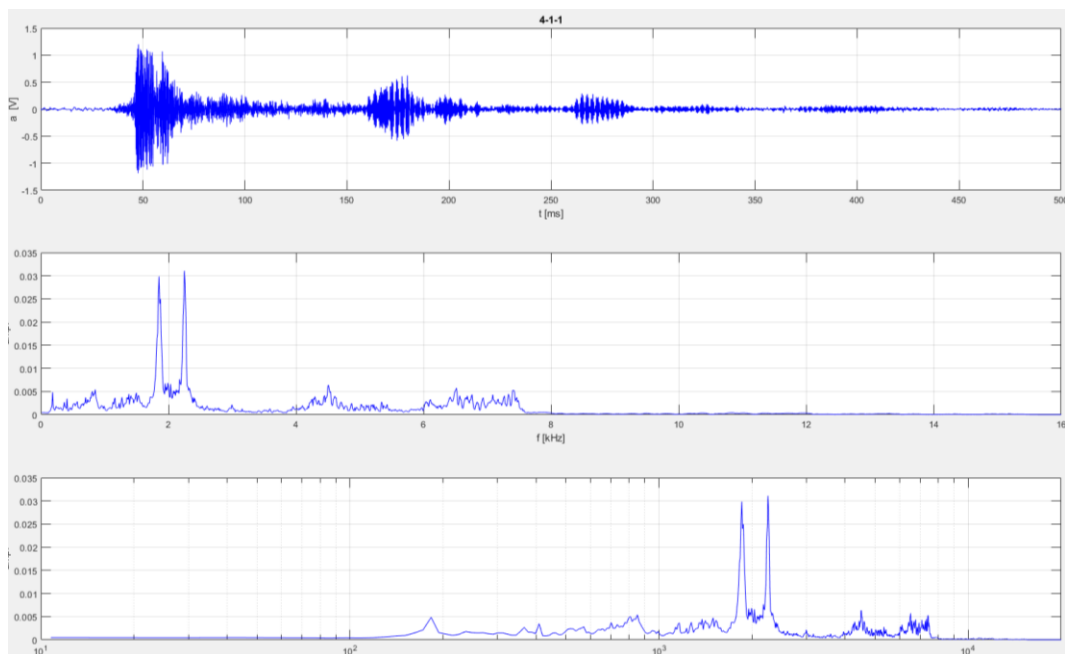
Obr. 81: Srovnání dynamických modulů pružnosti stanovených rezonanční metodou a UZ metodou pro vzorek č.6, $\nu_{cu}=0,30$.



Obr. 82: Srovnání dynamických modulů pružnosti stanovených rezonanční metodou a UZ metodou pro vzorek č.2 $\nu_{cu}=0,37$.

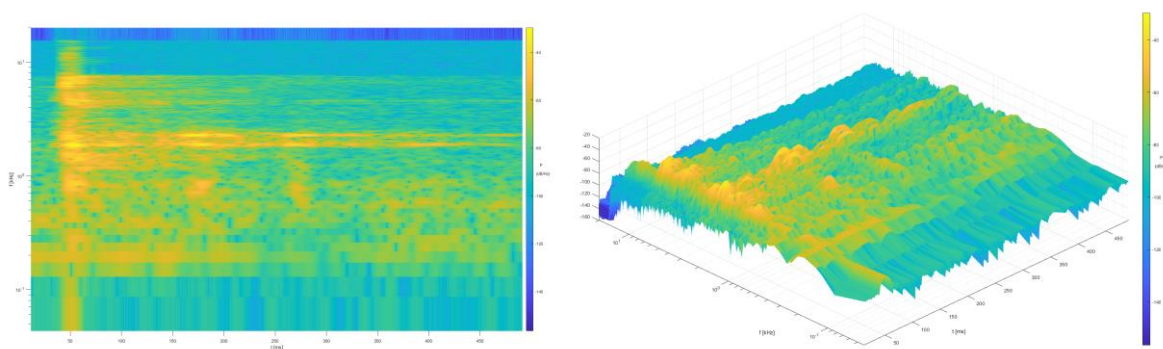
3.5 Metoda impact-echo

Klasická analýza reálného měření na vzorku označeném č. 4 je ukázána na Obr. 83. Signál byl získán úderem kladívka na horní plochu cihly položené na pružné podložce. Odezva byla zaznamenána mikrofonom umístěným přibližně jeden metr od cihly (v přímé vzdálenosti od povrchu cihly). Horní graf ukazuje časový průběh signálu, tedy hodnoty napětí na mikrofону (svislá osa) v závislosti na čase (vodorovná osa). Prostřední a spodní grafy pak ukazují amplitudová spektra signálu z horního grafu. Amplitudové spektrum bylo získáno pomocí Fourierovy transformace. Levá osa těchto grafů ukazuje amplitudu napětí a vodorovná frekvenci, na které se amplituda vyskytuje. Prostřední graf zobrazuje lineární průběh frekvence (vodorovná osa), kdežto spodní graf ukazuje frekvenci (vodorovná osa) v dekadickém logaritmickém měřítku. Ze spodního grafu je zřejmé, že mikrofón pracuje opravdu ve frekvenční oblasti mezi 100 Hz a 10 kHz. Tedy zaznamenává signál s analogovou pásmovou frekvenční propustí.



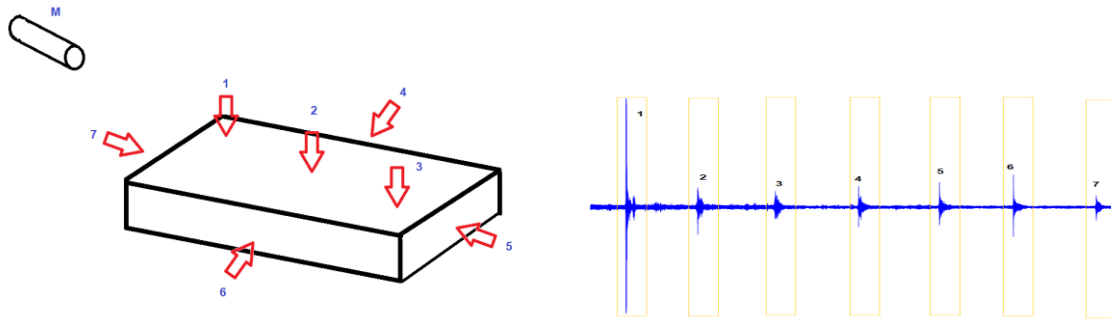
Obr. 83: Reálně změřený signál mikrofonom ze vzorku č. 4.

Na Obr. 84 jsou ukázány analýzy pomocí časově frekvenční Fourierovy transformace pro vzorek č. 4. Jelikož se jedná o funkci dvou proměnných, je výsledné zobrazení buď ve 2D (Obr. 84 graf vlevo), kdy velikost spektra udává barva, nebo 3D (Obr. 84 graf vpravo). Tady můžeme lokalizovat hodnoty spektra (Obr. 84 vlevo) v jednotlivých časech (vodorovná osa označená t) na jednotlivých frekvencích (svislá osa označená f). Protože tímto způsobem dostáváme velké množství informací, není analýza signálu tak jednoduchá, jako v případě frekvenčního spektra.



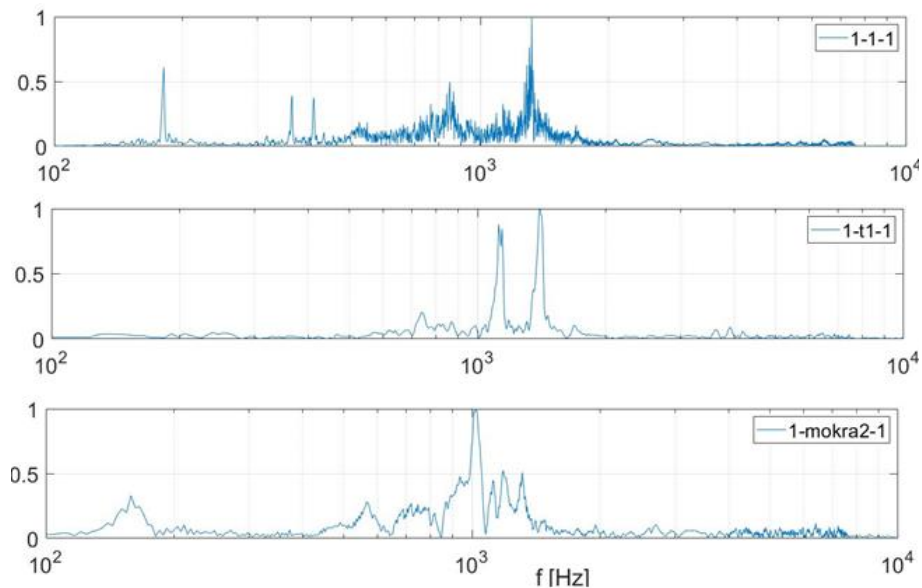
Obr. 84: Časově frekvenční transformace – vlevo 2D zobrazení a vpravo 3D zobrazení.

Vlastní experiment byl proveden dle Obr. 85. Místa úderů jsou označeny šipkami a číslicemi, mikrofon je označen písmenem M. Získaný signál byl později rozdělen na jednotlivé impulsy. Z důvodu snahy o použití jednoduše dostupných prostředků byl použit multimediální mikrofon přímo připojitelný do počítače či notebooku přes klasický 3,5 mm konektor jack. Signál byl zaznamenán interním programem ve Windows „Záznam zvuku“. Pracovník provedl úder (např. po 1 s), které se kontinuálně ukládaly. Doba mezi úderem byla zvolena tak, aby se jednotlivé impulsy nepřekrývaly. Oddělení impulsů bylo provedeno během pozdějšího zpracování.

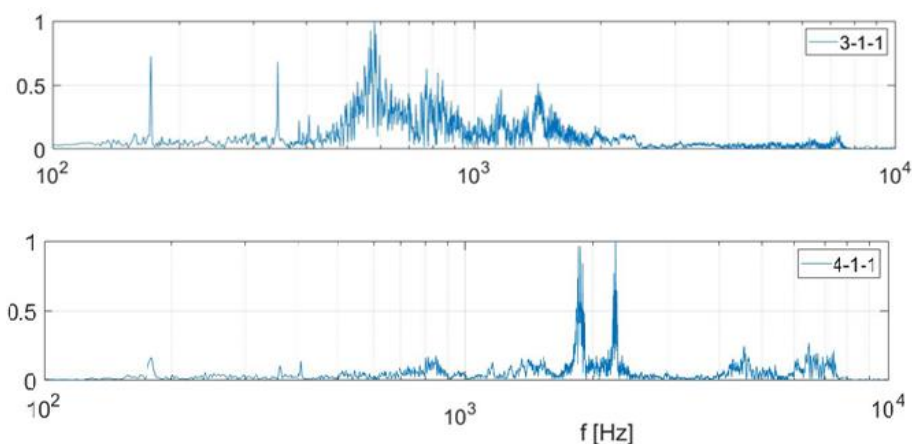


Obr. 85: Schéma měření (vlevo) a výsledný signál (vpravo), jak byl zaznamenán v „Záznam zvuku“.

Pro ukázkou vyhodnocení byl vybrán úder z polohy 1 dle schéma měření (Obr. 85). Následně Obr. 86 ukazuje amplitudová spektra vzorku (historické plně pálené cihly) označené č. 1 ve třech různých stavech. Horní graf ukazuje spektrum, kdy cihla byla plně nasycena vodou – varem. Je zřetelné, že spektrum je „rozkmitané“ a obsahuje pět významných frekvencí. Prostřední graf ukazuje frekvenční spektrum stejné cihly, ale vysušené (sušení při 105 °C do ustálené hmotnosti). Oproti variantě nasáklé varem je frekvenční spektrum „hladké“ s pouze dvěma významnými vrcholy. Po opětovném atmosférickém nasycení vodou (klasické ponoření do vodní lázně) se frekvenční spektrum dle spodního grafu „nerozkmitá“, ale opět se změní polohy frekvenčních vrcholů.

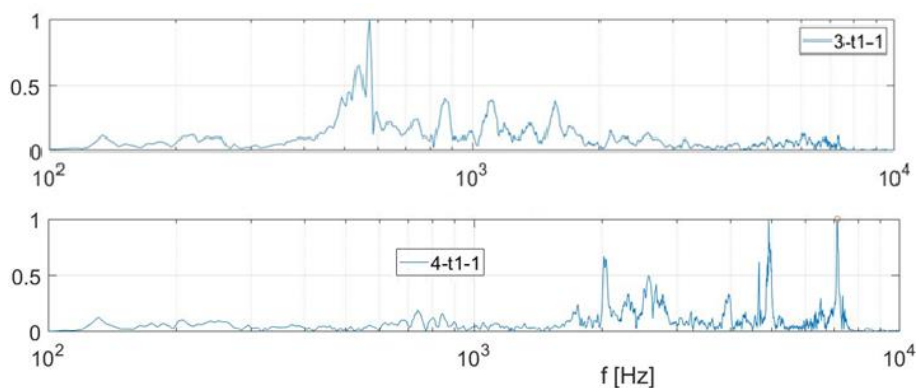


Obr. 86: Frekvenční spektrum vzorku č. 1 pro tři různé stavy nasycení vodou.

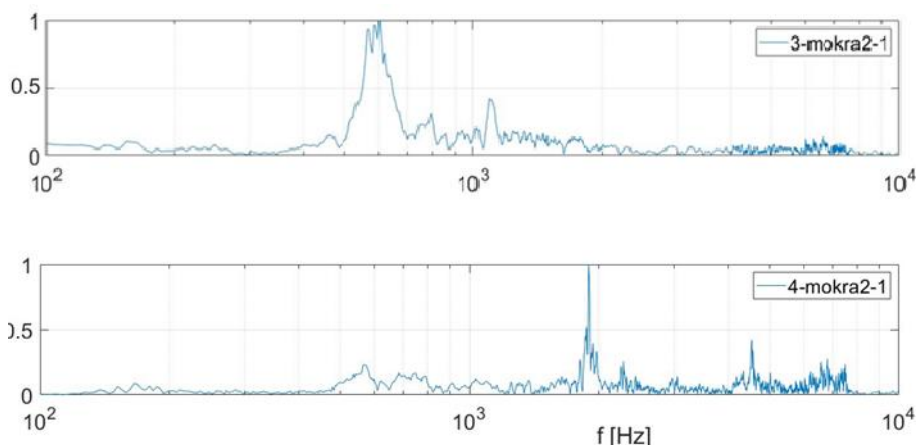


Obr. 87: Porovnání frekvenčních spekter historických cihel ve vodou – varem nasyceném stavu.

Dle vizuálního odhadu (experiment bude kvantifikován) je cihla č. 3 „poškozená“ a cihla č. 4 „dobrá“. Při pohledu na frekvenční spektra nasycených historických cihel na Obr. 87, kde horní graf je pro cihlu č. 3 a spodní graf pro cihlu č. 4, je zřetelně vidět jejich rozdílnost. Zatímco graf u cihly č. 3 (Obr. 87 horní graf) má „neostré“ vrcholy od frekvence 400 Hz do přibližně 2 kHz, graf u cihly č. 4 (Obr. 87 dolní graf) má dva „ostré“ vrcholy v oblasti kolem 2 kHz. Obdobné charakteristiky lze sledovat u těchto vzorků č. 3 a č. 4 při následném vysušení dle Obr. 88 a také při následném nasycení viz Obr. 89.



Obr. 88: Porovnání frekvenčních spekter historických cihel ve vysušeném stavu.



Obr. 89: Porovnání frekvenčních spekter historických cihel ve vodou nasyceném stavu (vodní lázeň) po předchozím nasycení – varem a vysušení (105 °C do ustálené hmotnosti).

Závěr z měření metodou impact-echo

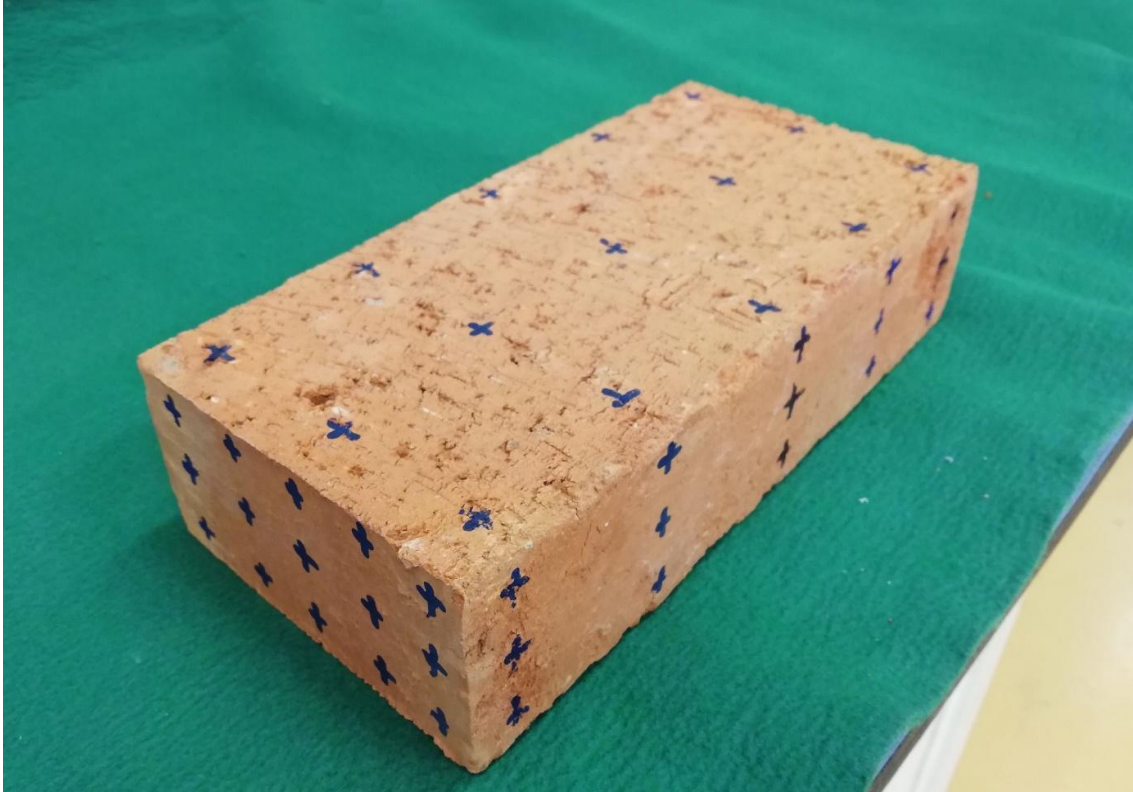
Jak je ukázáno v textu, lze oprávněně usuzovat, že v odezvě na impulz je zahrnuto velké množství informací. Avšak jejich interpretace není jednoduchá. Tvar signálu je tvořen, v případě využití metody impact-echo s mikrofonom, přenosem mechanické vlny ve dvou prostředích. Zachycuje nejen deformaci vlivem tvaru cihly, ale také vlivem nehomogenit v její struktuře. Tyto nehomogenity mohly vzniknout již při výrobě, nebo při následném používání. Z výše uvedeného je také zřejmé, že metoda impact-echo je velmi citlivá na množství vody obsažené ve vzorcích a při její následné aplikaci je s touto vstupní podmínkou nutné pokračovat. Tedy před samotným rozdělením na vzorky dobré X vadné je potřeba mít tyto vzorky, alespoň v podobném stavu nasycení.

3.6 Ultrazvuková impulsová metoda pro odhalení vnitřních vad - textury

Textura je zřejmě nejvýznamnější vnitřní vadou ve struktuře nově vyráběných pálených zdících prvků. Zatímco u cihel děrovaných lze texturu do značné míry eliminovat, u nově vyráběných cihel plných pálených se to ne vždy daří. Texturu lze odhalit buď již na výsušku, kdy po jeho ponoření do vody se v případě přítomnosti texturu ukáží trhliny ve formě soustředných šnekově orientovaných trhlín, anebo se spolehlivě objeví po zkoušce mrazuvzdornosti – viz kap 2.3.5. Jelikož je textura nově vyráběných cihel jednou z hlavních příčin jejich nízké odolnosti proti střídavému zmrazování a rozmrazování, je velmi důležité odhalit ji v každé dodávce cihel určených pro rekonstrukce historického zdiva. Výsušky k dispozici nejsou a standardní zkouška mrazuvzdornosti je velmi náročná jak na čas, tak i na kapacitu laboratoří. Pro odhalení textury je tedy vhodné využít zcela nedestruktivní ultrazvukovou impulzní metodu, tentokrát ve variantě plošného skenování a zobrazení oblastí se stejnou rychlostí šíření ultrazvukového vlnění. Textura (a případně jiné skryté vady uvnitř páleného zdíciho prvku) v podstatě znamená přítomnost řady mikrotrhlín, které až na extrémní výjimky nejsou z vnějšího líce prvku patrné. Pro ultrazvukové vlnění však představují řadu drobných překážek, na nichž dochází jednak ke zpomalení šíření vlnění, jednak ke snížení amplitudy vlnění, případně k deformaci ultrazvukového echa.

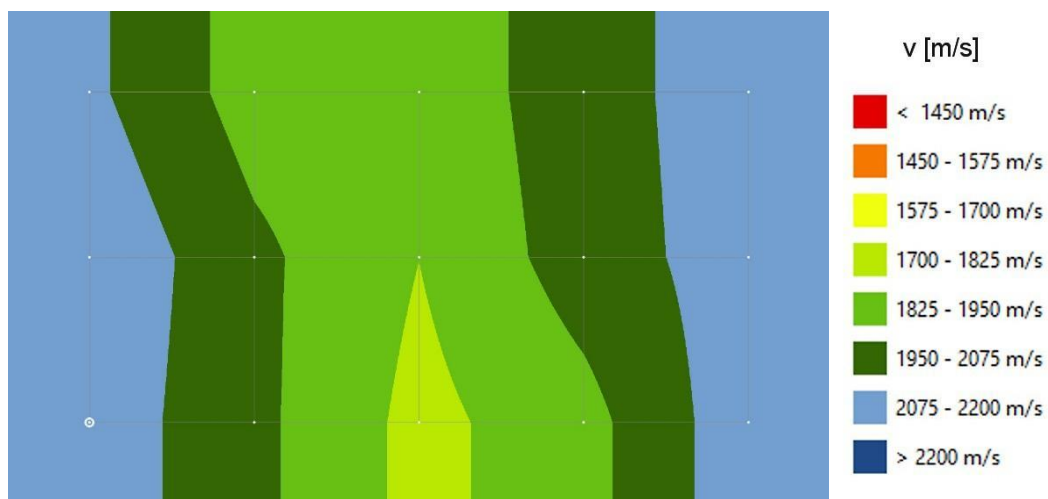
Cihla plná o rozměrech 290×139×64 mm (Obr. 90) byla ve stavu přirozeně vlhkém měřena ve všech třech směrech vždy v rastru 5×3 základen (5 v delším směru a 3 v kratším směru každé měřené strany). Jednalo se o:

- Směr L – rastr na čele cihly, měření na nejdelší základně 290 mm;
- Směr B – rastr na boční stěně cihly, měření na základně 139 mm;
- Směr H – rastr na ložné ploše cihly, měření na základně 64 mm.

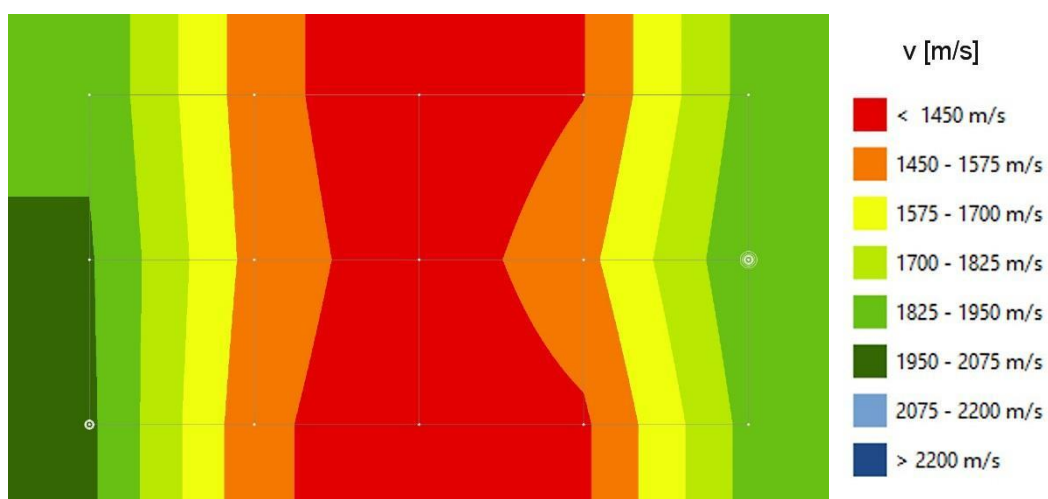


Obr. 90: Cihla plná pálená určená pro ultrazvukové stanovení přítomnosti textury.

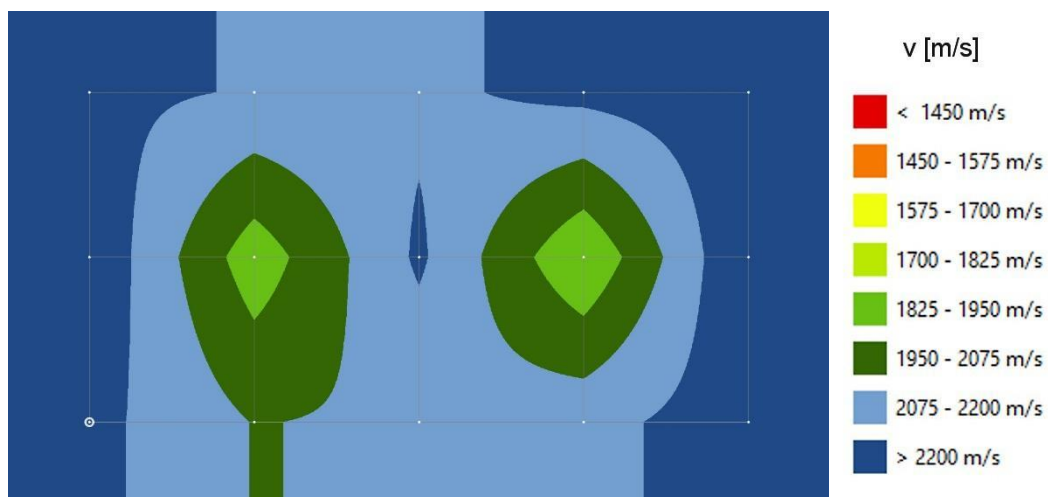
Výsledky měření jsou znázorněny graficky na Obr. 91 až Obr. 93, jedná se o přímé výstupy z přístroje Pundit PL-200, viditelné již v okamžiku měření (s každou měřenou základnou se obrazec doplňuje v reálném čase, takže výsledky jsou viditelné okamžitě, bez nutnosti zdlouhavého vyhodnocování).



Obr. 91: Graf oblastí se stejnou rychlostí šíření ultrazvukového vlnění při měření mezi čelními plochami (L).



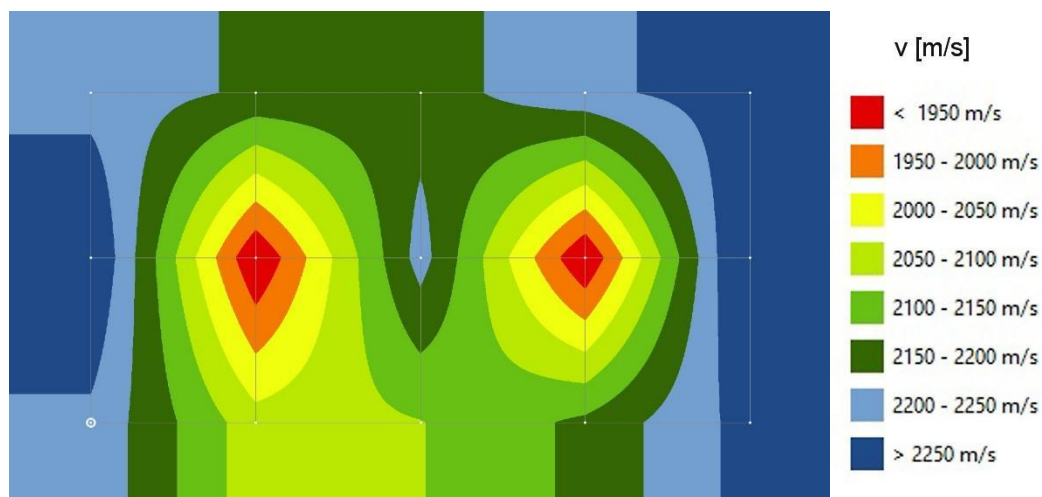
Obr. 92: Graf oblastí se stejnou rychlostí šíření ultrazvukového vlnění při měření mezi bočními plochami (B).



Obr. 93: Graf oblastí se stejnou rychlostí šíření ultrazvukového vlnění při měření mezi ložnými plochami (H).

Intervaly rychlostí šíření ultrazvukového vlnění byly u předchozích tří grafů záměrně zvoleny tak, aby byly navzájem srovnatelné – od 1450 m/s do 2200 m/s. Z naměřených hodnot a jejich grafické vizualizace jednoznačně vyplývá, že k největšímu snížení rychlosti UZ vlnění došlo vždy uprostřed prvku (ve všech třech případech prozvučování), přičemž nejvýraznější pokles byl zaznamenán ve směru „B“, tedy mezi bočními plochami na základně 139 mm, to po celé výšce cihly. Pokles rychlosti UZ vlnění byl zjištěn rovněž ve středních základnách při měření ve směru „L“, rovněž po celé výšce cihly. To je podstatné pro hodnocení prvku, neboť naměřené rozdíly odpovídají právě přítomnosti textury.

U měření mezi ložnými plochami „H“ není pokles rychlosti tak velký, což je logické, neboť mikroporuchy způsobené texturou a následným výpalem jsou orientovány rovnoběžně se směrem měření. Měření ve směru „H“ je však velmi zajímavé vzhledem ke tvaru izovel (čar o stejné rychlosti šíření UZ vlnění), což je lépe patrné při změně měřítka grafu – viz Obr. 94. Na tomto grafu je patrné zřetelné symetrické snížení rychlosti šíření UZ vlnění přesně ve středech obou polovin cihly (zatímco uprostřed cihly je hodnota srovnatelná s okraji), což svědčí o přítomnosti vady způsobené šnekovým lisem.



Obr. 94: Cihla plná pálená určená pro ultrazvukové stanovení přítomnosti textury.

Z uvedeného příkladu je patrné, že ultrazvukovou průchodovou metodu lze úspěšně využít k odhalení textury v hotovém výrobku. Zkouška není časově příliš náročná – včetně nastavení lze měření všech tří stran vzorku provést cca za 5-6 minut, výsledky jsou okamžitě k dispozici. Znamená to, že metoda je vhodná pro rychlou orientační kontrolu každé dodávky nových cihel. Určitou překážkou může být absence kvalitního ultrazvukového přístroje s možností plošného skenování (lze nahradit bodovým měřením a následným vytvořením grafu např. v programu Excel).

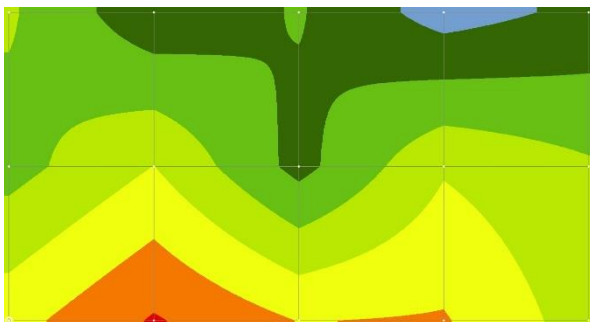
Kromě textury dokáže ultrazvuková metoda odhalit i další skryté vady cihel, např. narušení struktury související s odřezáváním cihel z protlačovaného pásu. Na následujícím obrázku je dokumentováno 7 nových cihel z různých cihelen (abecedně Bratronice, Polom, Šitbořice, Štěrboholy, Vysoké Mýto, Zlín a Žopy) které představují prakticky kompletní sortiment v současnosti vyráběných plných pálených cihel v ČR, které jsou doplněny jednou historickou cihlou ze 17. stol., pocházející z mostu Portz Insel u Mikulova.



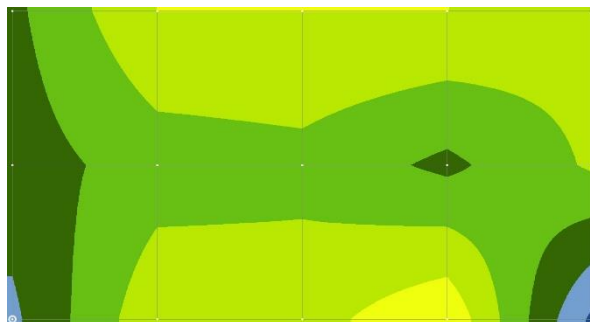
Obr. 95: Vzorky cihel pro stanovení vnitřních vad pomocí ultrazvuku. Vzorky nových cihel A-G pocházejí z různých cihelen, historická cihla N pochází z mostu Portz Insel u Mikulova.

Na následujícím obrázku jsou znázorněny povrchové grafy oblastí se stejnou rychlostí šíření ultrazvukového vlnění sladěné tak, že rozdíly mezi jednotlivými izovelami (hraničními křivkami) jsou 50 m/s. Měření proběhlo ve směru po výšce cihly, tedy přes jmenovitý rozměr 65 mm. Vzorky nových cihel jsou záměrně anonymizovány a označeny A až G, historický vzorek z mostu Portz Insel je značen N (Nicolsburg). Ukázalo se, že většina cihel obsahuje buď texturu, anebo vady způsobené odřezem, případně kombinaci obou těchto vad. Obzvláště markantní je textura u vzorku E, u vzorku A byly zase zřetelné vady způsobené odřezem. Bez výrazných vad byl pouze vzorek B a rovněž srovnávací historická cihla N z mostu Portz Insel.

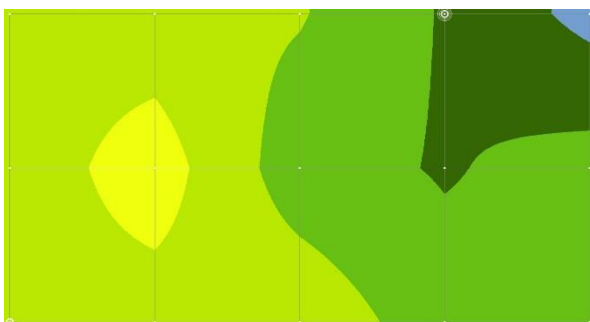
Je zřejmé, že ultrazvuková impulzní metoda má velký význam pro odhalení vnitřních vad a může pomoci odhalit cihly se sníženou trvanlivostí, současně však může pomoci výrobcům zlepšit kvalitu nově vyráběných cihel.



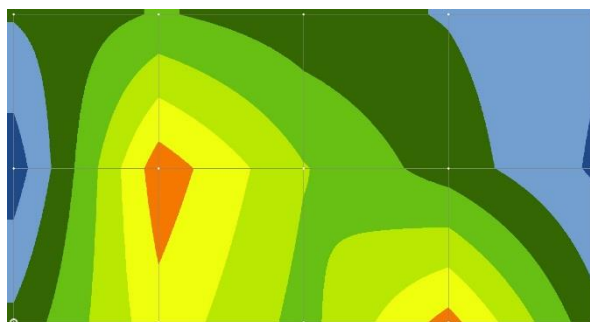
Vzorek A – náznak textury, vady způsobené odřezem.



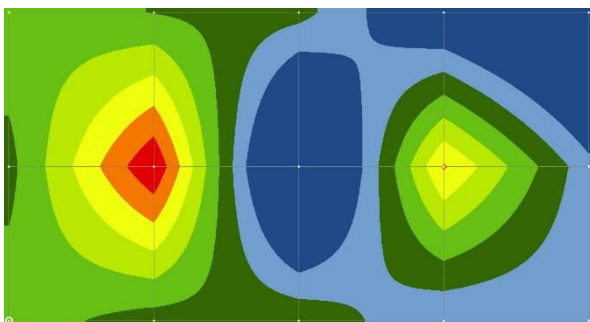
Vzorek B – relativně v pořádku.



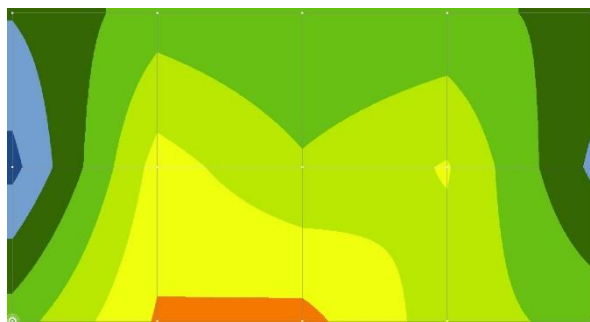
Vzorek C – relativně v pořádku, náznak textury vlevo.



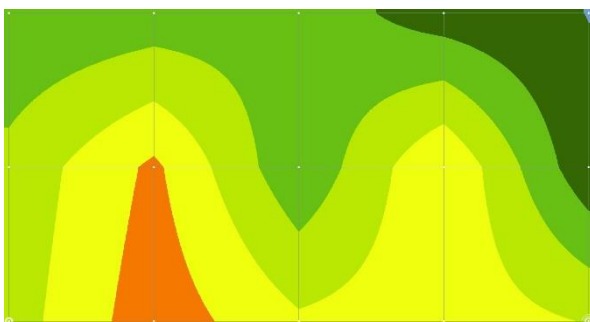
Vzorek D – zřetelná textura, mírné vady odřezem.



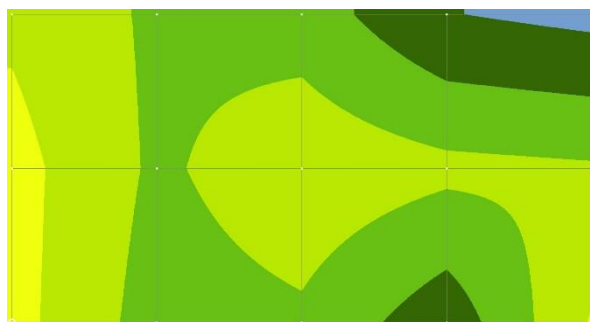
Vzorek E – výrazná textura.



Vzorek F – náznak textury, vady způsobené odřezem.



Vzorek G - náznak textury, vady způsobené odřezem.



Vzorek N – relativně v pořádku

Obr. 96: Grafické znázornění rychlostí šíření ultrazvukového vlnění napříč vzorky cihel A-G a N se zřetelnými vadami uvnitř cihel – texturou a narušením v oblasti odřezu cihly. Pouze dva ze vzorků nových cihel a rovněž vzorek historické cihly nevykazují výraznější vady.

4 SROVNÁNÍ A ZDŮVODNĚNÍ NOVOSTI POSTUPU METODIKY

Metodika vychází z platných norem pro zkoušení a hodnocení cihlářských výrobků, podle nichž jsou prováděny prakticky všechny základní materiálové a fyzikálně-mechanické zkoušky jako stanovení rozměrů, objemová hmotnost a nasákavost, výkvětovost, škodlivost cicvárů, pevnost v tahu za ohybu, pevnost v tlaku, mrazuvzdornost. Pomocí těchto normalizovaných metod dovedeme dobře zhodnotit vlastnosti dodaného úzkého výběru zdících prvků (v řádu několika kusů), obvykle za cenu jejich destrukce. Tímto způsobem lze částečně vyřešit doložení kvality nových cihel určených pro náhradu historického zdiva, ovšem pouze za předpokladu, že se jejich vlastnosti v různých dodávkách neliší. Všechny tyto metody však nejsou zcela vhodné pro typologický výběr vhodných historických cihel ze zbouraných konstrukcí, natož pro jejich rychlé třídění. Tento problém nastává v okamžiku, kdy je v zájmu autenticity opravovaného či nahrazovaného historického zdiva použití cihel historických, získaných ze zbouraných konstrukcí. Na základě velkého množství zkoušek historických cihel z různých období (gotika, renesance, baroko a zejména 19. století), se navíc ukázalo, že předpokládaná velmi dobrá kvalita historických zdících prvků je přinejmenším diskutabilní.

Historické cihly lze samozřejmě třídit tradičním způsobem – tj. vizuálním hodnocením cihel za pomoci jednoduchých metod (poklep kladívkem, vryp). Tak lze vyloučit zejména cihly velmi nízké kvality, např. cihly měkké nebo obsahující značné trhliny. Ze zkušenosti řešitelského týmu však vyplývá, že tyto metody nedokáží postihnout všechny vady uvnitř struktury cihel, zvláště pokud se cihly třídí v suchém stavu.

Novost postupu metodiky spočívá v komplexním zapojení zcela nedestruktivních elektroakustických metod – metody impact-echo, metody rezonanční a metody ultrazvukové impulzové, které posouvají tradiční třídění na výrazně vyšší úroveň. Tyto metody nejsou v normách pro cihlářské výrobky uvedeny, ovšem jejich principy jsou obsaženy v normových postupech pro zkoušení betonu a přírodního stavebního kamene. Vycházelo se tedy zejména z norem pro zkoušení betonu, ovšem s přihlédnutím ke skutečnosti, že rozvoj přístrojové techniky v posledním období předběhl tvůrce norem.

Díky zapojení nedestruktivních zkoušek, jejichž provedení je relativně jednoduché a časově nenáročné, přičemž výsledky jsou u většiny z nich okamžitě viditelné v reálném čase, umožňuje tato metodika provést kvalifikovaný předvýběr souborů cihel vhodných pro náhradu historického zdiva a následně u vybraných souborů provést jejich efektivní třídění a vzorkování, včetně výběru zkušebních vzorků pro ověření fyzikálně-mechanických vlastností cihel tradičními metodami.

Díky řadě provedených srovnávacích zkoušek (nedestruktivní × destruktivní) na souborech různých cihel z různých období je dokonce možné částečně predikovat trvanlivost (mrazuvzdornost) cihel, minimálně je roztřídit do skupin vhodné – diskutabilní – nevhodné. Uvedené nedestruktivní zkoušky však mají značný význam i pro posouzení nových cihel, např. pro odhalení textury, která je jednou z hlavních příčin snížené mrazuvzdornosti cihel. Rovněž lze pomocí těchto metod provést třídění cihel přímo ve výrobě (zejména v případě starších typů pecí, kde je poměrně velká variabilita vypálených cihel. V neposlední řadě lze zabránit zabudování případně špatné dodávky cihel.

5 Využití metodiky

Uvedená metodika by měla především sloužit, jako vhodný nástroj pro rozřídění plných pálených cihel ať už historických nebo soudobých. Metodika dává vcelku jednoduchý návod na kvalitativní rozpoznání plných pálených cihel, kdy lze jasně říct, zdali se cihla dá či nedá použít do daného typu zdiva, a to nejen z důvodů estetických či zachování historické autenticity, ale zejména z hlediska funkčního, aby případná náhrada byla zejména kvalitní náhradou. Kvalitní náhrada s sebou přináší nejen udržitelnost, ale i ekologičnost.

Metodika je určena zejména stavebním firmám, které dané náhrady historickými cihlami budou provádět. Díky uplatnění Metodiky vyberou dostatečný vzorek historických plných pálených cihel a provedou na nich jednotlivé zkušební postupy, které jim pak pomohou rozřídít historické plné pálené cihly do jednotlivých kategorií použití (vnitřní/vnější, chráněné/nechráněné zdivo, apod.).

Metodika je určena rovněž investorům a pracovníkům památkové péče, kdy jim může být nápomocna k zachování kulturního dědictví dalším generacím. A to tím způsobem, že jim umožní určit přibližné stáří plných pálených cihel na základě významných vizuálních znaků, případně na základě fyzikálně-chemických či mechanických vlastností. Protože jak z metodiky vyplývá, plné pálené cihly se v různých obdobích liší zejména způsobem výroby, způsobem výpalu, rozměry, chemickým složením atd.

Metodika může posloužit také široké laické veřejnosti, kdy na základě těch nejjednodušších metod mohou rovněž efektivně třídít plné pálené cihly a tím si jednak ušetřit nemalé finanční prostředky určené na koupi cihel nových, současně přispět k ochraně životního prostředí.

V neposlední řadě je metodika určena i pro výrobce plných pálených cihel, neboť jim může pomoci ověřit parametry svých výrobků s ohledem na požadavky investora za využití destruktivních i nedestruktivních zkoušek, včetně možnosti průběžného monitoringu kvality své produkce. Současně může výrobcům nalézt vhodnou objektivní metodu pro téměř nezbytné třídění kvality svých produktů, které vyplývá zejména z nerovnoměrného výpalu (obvykle v kruhových pecích).

Většina metod použitých v metodice jsou velice jednoduchými nástroji pro rychlé a efektivní rozřídění plných pálených cihel, ačkoliv bez alespoň minimálního množství standardních zkoušek se obejít nelze. Tento aspekt jednoduchého a rychlého způsobu použití a vyhodnocení výsledků byl i záměrem výzkumného týmu. Závěrem lze konstatovat, že se tento záměr zdařil, o čemž svědčí i Příloha 1. Zde je zdokumentováno ověření Metodiky v praxi, kdy pomohla při výběru a třídění cihel určených pro obnovu významné technické mostní památky.

6 použité předpisy a podklady

- [1] ČSN 72 2602 - Skúšanie tehliarskych výrobkov. Zisťovanie vzhľadu a rozmerov
- [2] ČSN EN 771-1 +A1 – Specifikace zdicích prvků – Část 1: Pálené zdicí prvky
- [3] ČSN EN 772-16– Zkušební metody pro zdicí prvky – Část 16: Stanovení rozměrů
- [4] ČSN EN 772-13 - 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)
- [5] ČSN EN 772-7 - Zkušební metody pro zdicí prvky – Část 7: Stanovení nasákavosti varem pálených zdicích prvků pro izolační vrstvy proti vlhkosti
- [6] ČSN EN 772-21 Zkušební metody pro zdicí prvky – Část 21: Stanovení nasákavosti pálených a vápenopískových zdicích prvků ve studené vodě“
- [7] ČSN EN 772-1 +A1 – Zkušební metody pro zdicí prvky – Část 1: Stanovení pevnosti v tlaku a norem návazných
- [8] ČSN 72 2605 - Skúšanie tehliarskych výrobkov. Stanovenie mechanických vlastností
- [9] ČSN 73 1373 (731373) - Nedestruktivní zkoušení betonu - Tvrdoměrné metody zkoušení betonu
- [10] ČSN 73 1372 (731372) - Nedestruktivní zkoušení betonu - Rezonanční metoda zkoušení betonu
- [11] ČSN 73 1371 Nedestruktivní zkoušení betonu - Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu
- [12] ČSN 73 1380 (731380) - Zkoušení odolnosti betonu proti zmrazování a rozmrazování - Porušení vnitřní struktury
- [13] ČSN EN 772-5 - Zkušební metody pro zdicí prvky – Část 5: Stanovení obsahu aktivních rozpustných solí v pálených zdicích prvcích
- [14] ČSN EN 772-5 ED.2 (722635) - Zkušební metody pro zdicí prvky - Část 5: Stanovení obsahu aktivních rozpustných solí v pálených zdicích prvcích
- [15] ČSN 72 2608 (722608) - Skúšanie tehliarskych výrobkov. Stanovenie náchylnosti na tvorbu výkvetov
- [16] ČSN 72 2607 (722607) - Skúšanie tehliarskych výrobkov. Stanovenie výskytu cicvárov
- [17] ČSN EN 1996-1-1 +A1 (731101) – Navrhování zděných konstrukcí
- [18] PUME, D., ČERMÁK, F. a kol.: Průzkumy a opravy stavebních konstrukcí, Praha, Arch 1998
- [19] Metodika pro zjišťování pevnosti zdicích prvků a malty ve stávající konstrukci. 1. technický a zkušební ústav stavební Praha, s.p., 2001.
- [20] ČSN 73 0038 (730038) - doplňující ustanovení. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [21] ČSN 72 2609: Zkušební metody pro zdicí prvky - Specifické vlastnosti pálených zdicích prvků, 2017.
- [22] DIN 52251-3:1987-04 - Indirect methods of determining the frost resistance of roofing tiles; determination of coefficient of impregnation.
- [23] Cikrle, P., Pospíchal, O.: Nový způsob stanovení mrazuvzdornosti betonu s využitím metod pro sledování poruch struktury. *Beton TKS*, roč. 2011, č. 3, s. 56-61. ISSN: 1213- 3116.

- [24] Martin Ebel, Rozměry cihlářských výrobků. Dějiny staveb 2001. Ústí nad Labem 2001, str. 30 -33.
- [25] Martin Ebel, Dějiny českého stavebního práva, ABF – nakladatelství ARCH, Praha 2006
- [26] prof. Ing. Vladimír Lach – Keramika – laboratorní cvičení. VUT FAST, 1989

7 Seznam výstupů předcházejících zpracování metodiky

- [P1] Anton, O.; Cikrle, P.; Heřmánková, V. Identifikace původu a kvalita cihel v objektu bývalého chlapeckého sirotčince v Brně. In *Sborník recenzovaných příspěvků konference ZKOUŠENÍ A JAKOST VE STAVEBNICTVÍ 2016*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2016. s. 7-20. ISBN: 978-80-214-5341- 8.
- [P2] Anton, O.; Cikrle, P.; Heřmánková, V. Historický objekt z hlediska původu a kvality použití cihelných zdících prvků. *TZB- info*, 2016, č. 9, s. 1-6. ISSN: 1801-4399.
- [P3] Anton, O.; Cikrle, P.; Heřmánková, V. Stanovení stáří a původu cihel ve stavební konstrukci. *TZB- info*, 2013, roč. 2013, č. 3, s. 1-10. ISSN: 1801- 4399.
- [P4] Králíková, M.; Cikrle, P.; Anton, O.; Heřmánková, V. Brick masonry elements in brno in the late 19th century. *Forum urbes medii aevi. Archaia Brno o.p.s. AC AB*, 2018, č. IX/1-2, s. 295-302. ISSN: 1803-1749.
- [P5] Sokolář, R. Využití metody akustické emise v keramice. In VUT FAST XI. *Mezinárodní vědecká konference*. 1. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM Brno, 1999, ISBN 80-214-1438-3.

Workshop s názvem „Cihly v historických objektech a možnosti jejich náhrady, dosavadní výsledky probíhajícího výzkumu projektu NAKI II v oblasti materiálové analýzy historických cihel“, VUT FAST, 20. 9. 2019, prezentované příspěvky se vztahem k Metodice:

- [P6] Topolář, L., Pazdera, L.: Určení fyzikálních vlastností cihel nedestruktivními metodami.
- [P7] Cikrle, P., Topolář, L.: Výsledky materiálových analýz souboru historických cihel z Bochnerova paláce.
- [P8] Sokolář, R.,] Cikrle, P.: Příprava metodiky posuzování vlastností plných pálených cihel s ohledem na jejich využití při rekonstrukcích historických objektů.
- [P9] Cikrle, P., Holub, P.: Vzorový příklad výběru cihel pro obnovu památkově chráněného mostu.

Workshop s názvem „Metodika zkoušení plných pálených cihel“, VUT FAST, 16. 9. 2020, prezentované příspěvky se vztahem k Metodice:

- [P10] Sokolář, R.: Vizuální kontrola plných pálených cihel se zaměřením na jejich vady.
- [P11] Pazdera, L., Topolář, L.: Akustická analýza plných pálených cihel.
- [P12] Cikrle, P.: Predikce mrazuvzdornosti cihel na základě NDT zkoušek.
- [P13] Sokolář, R.: Současná výroba plných pálených cihel v ČR (SR).
- [P14] Cikrle, P., Anton, O.: Zkoušky cihelného zdiva in situ, odběry vzorků a laboratorní zkoušky.
- [P15] Cikrle, P.: Shrnutí poznatků pro tvorbu metodiky zkoušení plných pálených cihel.

Příloha 1

Ověření „Komplexní metodiky pro nedestruktivní a šetrnou semidestruktivní diagnostiku fyzikálně-mechanických vlastností historických pálených zdících prvků“ při obnově historického mostu Portz Insel u Mikulova

Jedná se o výsledek dílčího cíle 6 projektu NAKI II DG18P02OVV068 „Komplexní diagnostika pálených zdících prvků historických objektů z pohledu stáří, původu a fyzikálně-mechanických vlastností v závislosti na vlhkosti, a jejich náhrada v historických objektech“, poskytovatel: Ministerstvo kultury ČR.

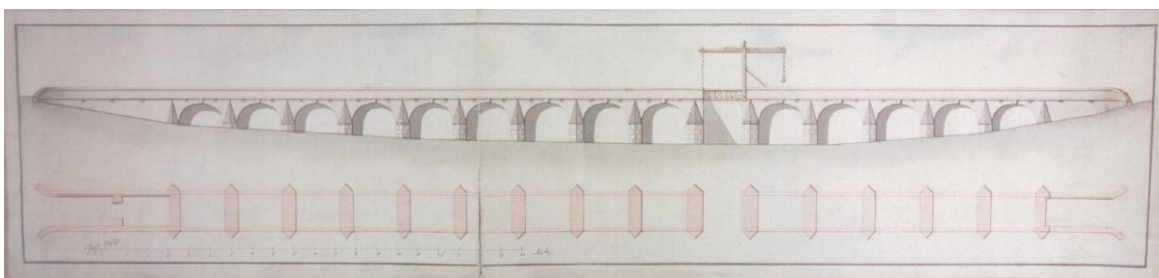
Vypracovali: doc. Ing. Petr Cikrle, Ph.D.
doc. Ing. Radomír Sokolář, Ph.D.
prof. Ing. Luboš Pazdera, CSc.
doc. Mgr. Libor Topolář, Ph.D.
Ing. Ondřej Anton, Ph.D.

Pracoviště: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební
Ústav stavebního zkušebnictví
Veveří 331/95, 602 00 Brno
IČ: 00216305, DIČ: CZ00216305

Zpracováno: Brno, 31. 10. 2020

1 ÚVOD

V roce 2019-20 se naskytla vzácná příležitost ověřit „Komplexní metodiku pro nedestruktivní a šetrnou semidestruktivní diagnostiku fyzikálně-mechanických vlastností historických pálených zdících prvků“ (dále jen Metodika) v praxi. Jednalo se přitom o poměrně unikátní mezinárodní „Projekt Mikulov, Portz Insel – zpřístupnění a obnova komponované historické krajiny“, který realizovalo město Mikulov společně s partnery – obcí Sedlec u Mikulova a rakouskou obcí Drasenhofen. Z hlediska Metodiky bylo nejdůležitější, že hlavním cílem realizace projektu bylo obnovit a zpřístupnit **historický cihelný most s patnácti mostními oblouky**, který je součástí areálu nemovité kulturní památky letohrádku Portz Insel ze 17. století (obr. P1.1).



Obr. P1.1: Plán mostu Portz Insel o 15 polích - jedno z polí bylo původně opatřeno padacím mostem (MZA, F18, mapa 107).

Most byl před obnovou ve velmi špatném stavu, prakticky utopený v nánosech bahna a hlíny (obr. P1.2). Nejprve došlo k odstranění okolních nánosů (obr. P1.3). Při této činnosti byly z blízkosti mostu shromážděny původní cihly (obr. P1.4), avšak ukázalo se, že bude zapotřebí doplnit ještě dalších cca 30000 ks cihel, které byly v průběhu doby z mostu odvezeny (zejména z jeho zábradelních zdí).



Obr. P1.2: Stav mostu před obnovou – od stavby železnice a zasypaní části rybníka ve 2. pol. 19. století most postupně mizel v nánosech bahna a zarůstal vegetací, část cihel zejména ze zábradelní zdi byla rozebrána.



Obr. P1.3: Celkový pohled na most po odstranění nánosů bahna (1. 7. 2020).



Obr. P1.4: Při odstranění nánosů bahna byly všechny nalezené cihly pečlivě vytříděny, očištěny a naskládány na palety. Přesto se ukázalo, že na obnovu mostu nebudou stačit. (foto dne 1. 7. 2020).

Investor ve spolupráci s památkáři řešil klasickou otázku – zda pro obnovu mostu použít cihly nově vyráběné, za cenu přiznání nových částí mostu (zejména zábradelních zdí), anebo zda použít cihly historické, u nichž by byla zajištěna autenticita. V rámci aplikace Metodiky byly zkoušeny všechny druhy cihel:

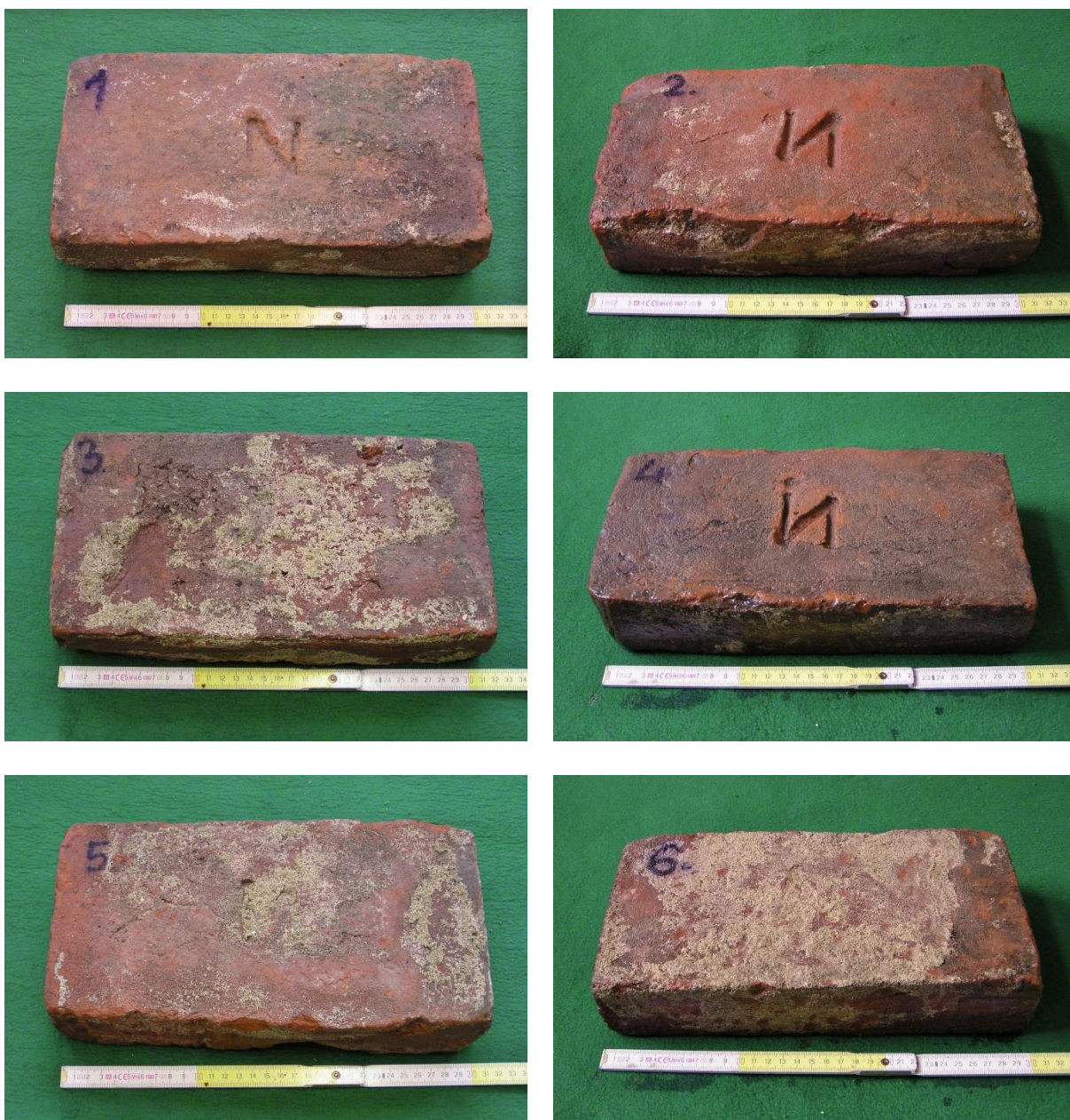
- původní cihly z mostu, značené „N“, ze 17. století;
- cihly náhradní historické, ze zbouraných objektů v Olomouci, z 19. století;
- cihly náhradní nově vyráběné.

Zpracovatelé Metodiky se v žádném případě nepodíleli na výběru druhu náhradních cihel, ani historických, ani nových, pouze aplikovali Metodiku na zjištění jejich vlastností.

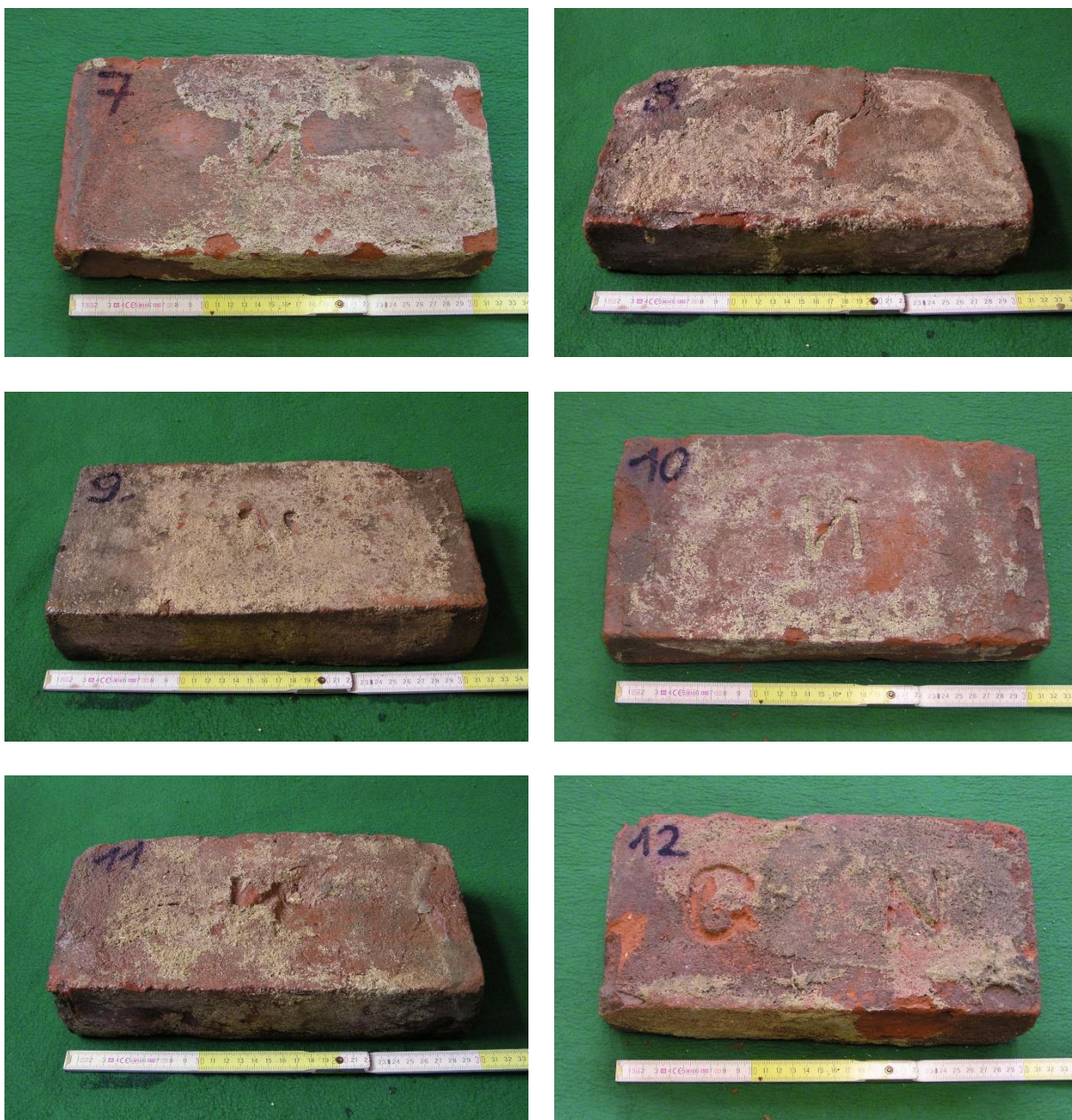
2 VZORKY PŮVODNÍCH CIHEL ZE 17. STOL.

2.1 Údaje o vzorcích

Pro zkoušky bylo vybráno celkem 12 ks původních cihel ze 17. stol z mostu Portz Insel. Sada byla označena „N“ podle značky, která s velkou pravděpodobností znamená označení původu - cihelny (Nicolsburg = Mikulov). Podle vzhledu a rozměrů cihly skutečně odpovídají raně barokním cihlám – jsou nižší a širší, než je obvyklé pro cihly z pozdějšího období. Cihly měly podobný vzhled, barvu střeput i rozměry. Jedinou výjimkou byla cihla č. N 12 (tvarově odlišná, značena kolkem G N, pravděpodobně z pozdějšího období, z 19. století). Vzorky jsou dokumentovány na obr. P1.5 a obr. P1.6.



Obr. P1.5: Vzorky starých původních cihel ze 17. stol., č. N 1 až N 6. Všechny vzorky jsou vizuálně velmi podobné, kvalitně vypálené a s podobnými rozměry.



Obr. P1.6: Vzorky starých původních cihel ze 17. stol. č. N 7 až N 11 a pravděpodobně novější cihla N 12 (liší se rozměry a podle značení pochází z 19. stol.).

Z 12 vzorků bylo dále nutné vytvořit dvě sady – srovnávací a zmrazovanou – po 6 vzorcích. Výsledky zkoušek srovnávacích těles slouží k zařazení cihel do pevnostní třídy, výsledky zmrazovaných těles slouží k posouzení mrazuvzdornosti. Pokud by k rozdělení vzorků do sad došlo pouze na základě vizuálního dojmu nebo dokonce náhodným způsobem, mohlo by dojít ke značnému ovlivnění výsledků. Proto byly vzorky rozděleny na základě nedestruktivních zkoušek – ultrazvukových a rezonančních. Na základě dlouhodobých zkušeností zpracovatele byla jako rozhodující pro seřazení cihel použita první vlastní frekvence příčného kmitání, která velmi citlivě reaguje jak na kvalitu materiálu, tak zejména na vnitřní poruchy v materiálu, zvenku jinak neviditelné.

2.2 Výsledky zkoušek

2.2.1 Rozměry, objemová hmotnost a nasákavost cihel

Cihly byly nejprve vysušeny při 105 °C do ustálené hmotnosti, poté byly změřeny, zváženy a byla vypočtena objemová hmotnost ve stavu vysušeném $\rho_{d,u}$. Dále byly podrobeny zkoušce nasákavosti, z rozdílu hmotností v obou hraničních vlhkostních stavech byla vypočtena nasákavost cihel NV (hmotnostní). Charakteristiky zkušebních těles a vypočtené hodnoty objemové hmotnosti a nasákavosti jsou uvedeny v tab. P1.1.

Tab. P1.1 Rozměry, objemová hmotnost ve stavu vysušeném a nasákavost cihel

Vzorek č.	Šířka w_u	Výška h_u	Délka l_u	Hmotnost vysuš. $m_{d,u}$	Objemová hm. $\rho_{d,u}$	Hmotnost nasyc. $m_{s,u}$	Nasákavost hmotn. NV
	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m ³]	[g]	[%]
N 1	156.7	64.8	306.2	4806.6	1546	5620.0	16.9
N 2	161.7	64.0	309.5	5195.3	1622	5993.4	15.4
N 3	164.1	63.0	307.8	5018.2	1576	5879.0	17.2
N 4	163.2	65.5	313.2	5297.6	1582	6144.6	16.0
N 5	164.6	62.3	308.7	5035.4	1591	5897.2	17.1
N 6	155.5	61.5	307.9	4832.0	1641	5632.4	16.6
N 7	164.5	61.0	312.1	5017.8	1602	5872.6	17.0
N 8	159.5	65.2	308.2	5249.8	1638	6077.8	15.8
N 9	155.3	62.0	308.2	4742.0	1598	5510.2	16.2
N 10	163.1	63.1	309.0	5084.2	1599	5923.4	16.5
N 11	161.8	65.2	304.9	5202.0	1617	6031.6	15.9
N 12	155.5	66.8	307.7	5208.6	1630	6153.8	18.1
Průměr					1600		16.6
<i>Minimum</i>					<i>1546</i>		<i>15.4</i>
Směrodatná odchylka					27.9		0.8

Komentář k objemové hmotnosti a nasákavosti cihel:

Objemová hmotnost jednotlivých vzorků cihel byla poměrně rovnoměrná, pohybovala se od 1546 kg/m³ do 1641 kg/m³. Rovněž hmotnostní nasákavost byla velmi vyrovnaná – pohybovala se od 15,4 % do 18,1 % (u odlišného vzorku N 12). Výsledky těchto zkoušek tak potvrdily prvotní vizuální hodnocení cihel.

2.2.2 Rozdělení cihel do sad podle rezonančních frekvencí kmitání

Je velmi obtížné sestavit dvě vyrovnané sady pro zařazení cihel a pro zkoušku mrazuvzdornosti jen na základě vizuálního hodnocení. Proto byly u cihel změřeny vlastní (rezonanční) frekvence kmitání podélného (L), příčného (F) a kroutivého (T) ve stavu vysušeném – viz tab. P1.2. Podle rezonančních frekvencí a rovněž anomálií ve frekvenčních křivkách byly vybrány cihly do jednotlivých sad:

- Sada zmrazovaná – cihly N 1, N 3, N 5, N 7, N 10 a N 12.
- Sada srovnávací (nezmrazovaná) – cihly N 2, N 4, N 6, N 8, N 9 a N 11).

Tab. P1.2 Vlastní frekvence kmitání vzorků cihel

Vzorek č.	0 cyklů, vysušený stav			Pořadí <i>podle F_F</i>
	F_L [Hz]	F_F [Hz]	F_T [Hz]	
N 1	4441	1634	1851	4
N 2	4560	1665	1848	3
N 3	4135	1478	1769	10
N 4	3771	1477	1670	11
N 5	4519	1586	1801	7
N 6	4363	1584	1804	8
N 7	4337	1529	1733	9
N 8	4550	1688	1886	1
N 9	4346	1413	1732	12
N 10	4455	1613	1819	6
N 11	4452	1634	1801	5
N 12	4293	1688	1900	2

Kromě vlastních frekvencí kmitání se sleduje ještě velikost amplitudy kmitání a tvar frekvenční křivky (špičatost, útlum, parazitní frekvence). Vysoká frekvence kmitání, jasná a ostrá amplituda kmitání (v podstatě vysoký, jasný a čistý tón, kterým cihla zní při poklepu) je typická pro kvalitní materiál bez poruch, snížení frekvence spolu s nevýraznou nebo dvojitou amplitudou naopak ukazuje na poruchy či nespojitosti ve vnitřní struktuře cihel.

Všechny vzorky vykazovaly velmi ostré křivky kmitání, s výjimkou vzorků N 3 a N 4, kde byly náznaky poruch vnitřní struktury. I z toho důvodu byla každá z těchto dvou problematických cihel zařazena do jiné sady (zmrazované a nezmrazované).

2.2.3 Zkoušky pevnosti a mrazuvzdornosti na 25 cyklů

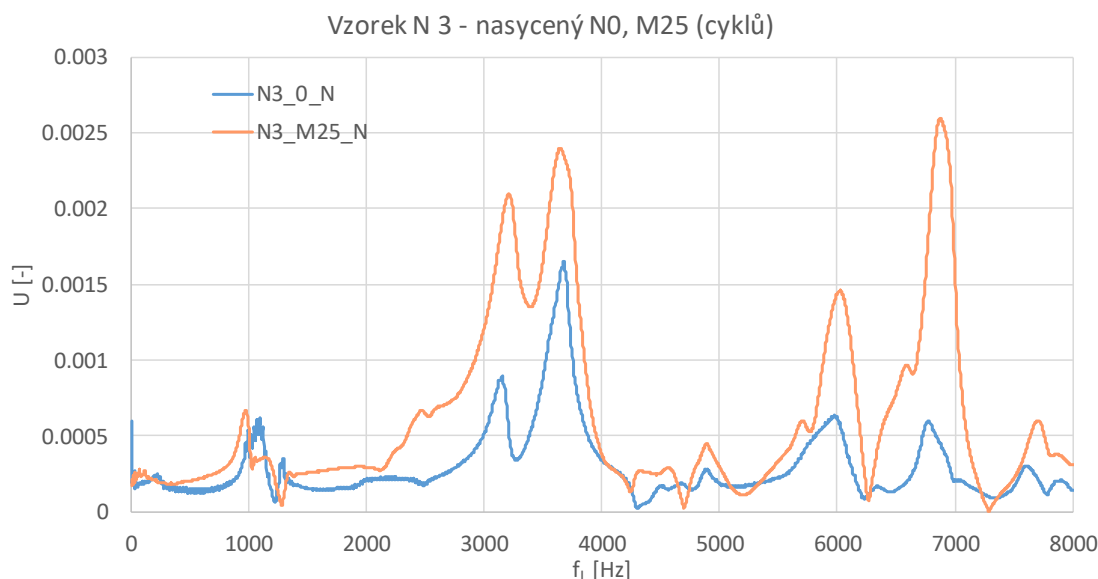
Vzorky vybrané na základě rezonančního měření pro zkoušky mrazuvzdornosti byly podle ČSN 72 2609 nejprve nasyceny varem. Poté byly opět změřeny rezonanční frekvence kmitání. Následovalo střídavé zmrazování a rozmrazování na 25 cyklů v automatickém mrazícím zařízení typu KD podle ČSN 72 2609. Výsledky nedestruktivních měření rezonančních frekvencí zmrazovaných vzorků v nasyceném stavu před zmrazováním a po provedení 25 zmrazovacích cyklů jsou uvedeny v tab. P1.3, včetně výpočtu tzv. relativních dynamických modulů pružnosti.

Tab. P1.3 Vlastní frekvence kmitání vzorků cihel a relativní dynamické moduly po 25 zmrazovacích cyklech

Vzorek č.	0 cyklů, nasycený stav			M 25 cyklů, nasycený stav			Relativní dynamický modul RDM po 25 cyklech zmrazování		
	F_L [Hz]	F_f [Hz]	F_t [Hz]	F_L [Hz]	F_f [Hz]	F_t [Hz]	FL [%]	FF [%]	FT [%]
N 1	4055	1482	1672	4030	1473	1662	98.8	98.8	98.8
N 3	3681	959	1259	3203	957	1294	75.7	99.7	105.6
N 5	4090	1403	1610	4046	1384	1588	97.9	97.3	97.3
N 7	3962	1392	1577	3938	1379	1560	98.8	98.1	97.9
N 10	4076	1473	1652	4057	1463	1645	99.1	98.6	99.2
N 12	3909	1520	1713	3873	1503	1696	98.2	97.8	98.0

Poznámka: Pokud je relativní dynamický modul RDM nižší než 85 %, pak je mrazuvzdornost diskutabilní, při poklesu RDM pod 75 % vzorek jednoznačně nevyhovuje na daný počet cyklů mrazuvzdornosti.

Z výsledků uvedených v tab. 3 je zřejmé, že prakticky všechny vzorky naprosto s přehledem vyhovely na mrazuvzdornost po 25 cyklech, pouze u vzorku N 3 byla zjištěna anomálie u podélné rezonanční frekvence. Jednalo se vzorek, u něhož došlo k většímu poklesu rezonančních frekvencí v nasyceném stavu, což predikovalo poruchu ve vnitřní struktuře, která se po zmrazování skutečně mírně projevila – viz obr. P1.7.



Obr. P1.7: Vzorek N 3 – frekvenční spektrum při rozkmitání cihly podélným kmitáním ve stavu nasyceném před zmrazováním a po provedení 25 cyklů. V grafu patrný dvojitý vrchol u obou křivek, který naznačoval poruchu vnitřní struktury (pravděpodobně nespojitost, vnitřní trhlinu), po zmrazování ještě výraznější.

Dále byly vzorky vysušeny a podrobeny zkoušce pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku. Výsledky zkoušek pevnosti v tahu za ohybu srovnávacích (nezmrazovaných) cihel jsou uvedeny v tab. P1.4A, zmrazovaných cihel po 25 cyklech v tab. P1.4B. Podobně výsledky zkoušek pevnosti v tlaku srovnávacích a zmrazovaných cihel jsou uvedeny v tab. P1.5A a tab. P1.5B.

Tab. P1.4A Pevnost v tahu za ohybu zdících prvků "S" srovnávacích

Vzorek č.	Šířka v místě lomu w_f	Výška v místě lomu h_f	Maximální síla F_f	Pevnost v tahu za ohybu $f_{b,f}$
	[mm]	[mm]	[kN]	[N/mm ²]
N 2	163.3	63.4	7.87	4.31
N 4	162.2	64.3	4.06	2.18
N 6	156.2	61.6	6.37	3.87
N 8	159.2	64.3	7.07	3.87
N 9	154.3	62.1	6.05	3.67
N 11	162.9	65.8	7.64	3.90
Průměr				3.64
<i>Minimum</i>				2.18
Směrodatná odchylka				0.74

Tab. P1.4B Pevnost v tahu za ohybu zdících prvků zmrazovaných "M25"

Vzorek č.	Šířka v místě lomu w_f	Výška v místě lomu h_f	Maximální síla F_f	Pevnost v tahu za ohybu $f_{b,f}$
	[mm]	[mm]	[kN]	[N/mm ²]
N 1	155.0	59.9	8.25	5.34
N 3	165.0	60.9	1.60	0.94
N 5	159.4	60.9	6.90	4.20
N 7	163.5	60.9	8.85	5.25
N 10	162.4	60.4	9.00	5.47
N 12	156.7	68.8	8.98	4.36
Průměr				4.26
<i>Minimum</i>				0.94
Směrodatná odchylka				1.71

Tab. 5A Pevnost v tlaku zdících prvků srovnávacích "S"

Vzorek č.	Šířka w_c	Délka l_c	Maximální síla F_c	Pevnost v tlaku f_b
	[mm]	[mm]	[kN]	[N/mm ²]
N 2	151,0	154,1	564,7	24,3
N 4	137,8	153,2	404,3	19,2
N 6	155,2	154,7	508,0	21,2
N 8	150,7	158,4	603,0	25,3
N 9	155,8	169,6	626,7	23,7
N 11	149,9	159,9	535,0	22,3
Průměr				22,6
<i>Minimum</i>				19,2
Směrodatná odchylka				2,24

Tab. 5B Pevnost v tlaku zdících prvků zmrazovaných "M25"

Vzorek č.	Šířka w_c	Délka l_c	Maximální síla F_c	Pevnost v tlaku f_b
	[mm]	[mm]	[kN]	[N/mm ²]
N 1	156,1	136,7	524,2	24,6
N 3	146,5	117,7	456,6	26,5
N 5	164,7	156,1	775,0	30,1
N 7	155,1	157,0	584,0	24,0
N 10	154,2	138,2	530,7	24,9
N 12	154,6	133,6	383,4	18,6
Průměr				24,8
<i>Minimum</i>				18,6
Směrodatná odchylka				3,77

Komentář k pevnosti v tlaku:

Podle ČSN 72 2609 nesmí pevnost v tlaku po zmrazování klesnout o více než 15% proti deklarované pevnosti v tlaku, v tomto případě proti pevnosti v tlaku srovnávacích (nezmrazovaných) těles. Průměrná hodnota pevnosti v tlaku vyšla u srovnávacích těles 22,6 MPa, u zmrazovaných cihel dokonce 24,8 MPa. Je to dáno tím, že je v podstatě nereálné vytvořit dvě naprosto srovnatelné sady těles, na druhé straně to ovšem svědčí o vynikající mrazuvzdornosti původních cihel z mostu. Podle srovnávacích těles lze původním cihlám přiřadit **pevnostní značku P 20** (průměrná pevnost v tlaku 22,60 MPa, minimální 19,2 MPa). Z hlediska mrazuvzdornosti, kdy hlavním kritériem je pokles pevnosti v tlaku, všechny vzorky vyhověly, cihly jsou **mrazuvzdorné na 25 cyklů**.

2.3 Vyhodnocení zkoušek původních cihel ze 17. století

Na vzorcích původních cihel ze 17. stol., odebraných z mostu „Portz Insel“ byly provedeny zkoušky potřebné k zařazení cihel a k posouzení jejich mrazuvzdornosti na 25 cyklů. Na základě výsledků zkoušek lze konstatovat, že původní cihly z mostu splňují požadavky pro **pevnostní značku P 20**.

Pro zkoušky mrazuvzdornosti byly cihly rozříděny na základě výsledků rezonanční zkoušky tak, aby sada zmrazovaných cihel byla z hlediska kvality srovnatelná se sadou nezmrazovaných cihel. Ukázalo se, že pro mrazuvzdornost byly zřejmě ve skutečnosti vybrány cihly o něco málo lepší, než pro srovnávací zkoušky. Současně se však ukázalo, že cihly naprosto bez problémů **vyhověly požadavkům na mrazuvzdornost pro 25 zmrazovacích cyklů**.

Jedná o cihly odebrané z konstrukce mostu, které byly vystaveny vnějším vlivům po dobu přibližně 380 let. Současně jsou vizuálně velmi podobné, příliš se neliší ani jejich rozměry, ani objemová hmotnost či nasákavost. Prakticky se v nich nevyskytují trhliny, lom cihel při zkoušce pevnosti v tahu za ohybu byl většinou rovný, keramický stěp je rovněž kvalitní a dobře vypálený. Je zřejmé, že se jedná o **mimořádně kvalitně vyrobené a trvanlivé cihly**, za které bude velmi obtížné v současnosti najít adekvátní náhradu.

3 VZORKY NÁHRADNÍCH CIHEL HISTORICKÝCH - Z 19. STOL. Z OLMOUCE

3.1 Údaje o vzorcích

Jednalo se o cihly použité, historické, získané ze zbourané stavby v Olomouci. Podle dodavatele se jednalo o cihly tříděné, lepší kvality. Sada celkem 12 ks cihel byla označena „O“ podle místa původu. Podle vzhledu a značení cihel lze odhadnout, že se jedná o cihly pravděpodobně vyrobené v období od pol. 19. st. do počátku 20. stol. Všechny byly značeny podobným způsobem – kolky Z-V, V a SV v obdélníku, vizuálně se však lišily barevností a tedy i teplotou výpalu střepu, což se projevilo rovněž na rozměrech (u přepálených cihel došlo k většímu smrštění). Vzorky jsou dokumentovány na obr. P1.8 a obr. P1.9.



Obr. P1.8: Vzorky historických „náhradních“ cihel č. O 1 až O 6. Vizuálně kvalitnější jsou vzorky O 1, O 4 a O 5, vizuálně nejméně kvalitní je vzorek O 6.



Obr. P1.9: Vzorky starých „náhradních“ cihel č. O 7 až O 12. Vizually nejmeně kvalitní cihly O 10 a O 12, naopak přepálené a prohnuté cihly O 7, O 9 a O 11 (ta ovšem s trhlinami).

Z 12 vzorků bylo dále nutné vytvořit dvě sady – srovnávací a zmrazovanou – po 6 vzorcích. Výsledky zkoušek srovnávacích těles slouží k zařazení cihel do pevnostní třídy, výsledky zmrazovaných těles slouží k posouzení mrazuvzdornosti. Pokud by k rozdělení vzorků do sad došlo pouze na základě vizuálního dojmu nebo dokonce náhodným způsobem, mohlo by dojít ke značnému ovlivnění výsledků. Proto byly vzorky rozděleny na základě nedestruktivních zkoušek – ultrazvukových a rezonančních. Na základě dlouhodobých zkušeností zpracovatele byla jako rozhodující pro seřazení cihel použita první vlastní frekvence příčného kmitání, která velmi citlivě reaguje jak na kvalitu materiálu, tak zejména na vnitřní poruchy v materiálu, zvenku jinak neviditelné.

3.2 Výsledky zkoušek

3.2.1 Rozměry, objemová hmotnost a nasákavost cihel

Cihly byly nejprve vysušeny při 105 °C do ustálené hmotnosti, poté byly změřeny, zváženy a byla vypočtena objemová hmotnost ve stavu vysušeném $\rho_{d,u}$. Dále byly podrobeny zkoušce nasákavosti, z rozdílu hmotností v obou hraničních vlhkostních stavech byla vypočtena nasákavost cihel NV (hmotnostní). Charakteristiky zkušebních těles a vypočtené hodnoty objemové hmotnosti a nasákavosti jsou uvedeny v tab. P1.6.

Tab. P1.6 Rozměry, objemová hmotnost ve stavu vysušeném a nasákavost cihel

Vzorek č.	Šířka w_u	Výška h_u	Délka l_u	Hmotnost vysuš. $m_{d,u}$	Objemová hm. $\rho_{d,u}$	Hmotnost nasc. $m_{s,u}$	Nasákavost hmotn. NV
	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m ³]	[g]	[%]
O 1	140.3	70.0	288.1	4683.8	1655	5534.4	18.2
O 2	131.5	62.8	282.8	4061.0	1739	4730.2	16.5
O 3	150.4	65.5	297.0	4654.6	1591	5459.2	17.3
O 4	142.8	67.7	286.5	4557.0	1645	5295.4	16.2
O 5	133.6	64.5	274.9	4768.2	2013	5090.4	6.8
O 6	135.8	67.2	287.5	4348.8	1658	5193.4	19.4
O 7	137.6	63.2	272.6	4745.6	2002	5133.8	8.2
O 8	142.5	64.8	288.2	4348.2	1634	5170.0	18.9
O 9	127.5	58.7	275.8	4527.0	2193	4622.0	2.1
O 10	137.2	59.6	286.4	4267.6	1823	4929.4	15.5
O 11	141.1	62.4	282.7	4362.4	1753	4921.4	12.8
O 12	139.5	67.5	289.6	4514.2	1655	5322.4	17.9
Průměr					1780		14.1
<i>Minimum</i>					<i>1591</i>		<i>2.1</i>
Směrodatná odchylka					190.6		5.6

Komentář k objemové hmotnosti a nasákavosti cihel:

Objemová hmotnost jednotlivých vzorků cihel byla značně rozdílná, pohybovala se od 1590 až do 2190 kg/m³. Nepřímo úměrně objemové hmotnosti kolísala i nasákavost cihel – od 2,1 % u cihel přepálených s vysokou objemovou hmotností až po 19,4 % u cihel s nízkou objemovou hmotností. Výsledky těchto zkoušek potvrdily vizuální hodnocení cihel, kdy dodaný soubor je značně různorodý a nestejněměrný.

S tím souvisí i značná rozdílnost rozměrů cihel, kdy u přepálených cihel s hutným střepem došlo po výpalu k výraznému zmenšení rozměrů – např. cihla O 9 s nejvyšší objemovou hmotností měla rozměry pouze 275,8×127,5×58,7 mm, zatímco cihla O 3 s nejnižší objemovou hmotností naopak 297,0×150,4×65,5 mm.

3.2.2 Rozdělení cihel do sad podle rezonančních frekvencí kmitání

Vzhledem ke značné různorodosti cihel je velmi obtížné sestavit dvě vyrovnané sady pro zatřídění cihel a pro zkoušku mrazuvzdornosti. Na vizuální dojem nelze plně spoléhat. Proto byly u cihel změřeny vlastní (rezonanční) frekvence kmitání podélného (L), příčného (F) a krouživého (T) ve stavu vysušeném – viz tab. P1.7. Podle první vlastní frekvence příčného kmitání (F_F), bylo stanoveno pořadí cihel 1 až 12. Pro jednotlivé sady byly vybrány cihly s pořadovými čísly:

- Sada zmrazovaná – cihly v pořadí 1., 4., 5., 8., 9. a 12., tedy vzorky O 2, O 3, O 6, O 9, O 11, O 12.
- Sada srovnávací (nezmrazovaná) – cihly v pořadí 2., 3., 6., 7., 10. a 11., tedy vzorky O 1, O 4, O 5, O 7, O 8, O 10).

Tab. P1.7 Vlastní frekvence kmitání vzorků cihel

Vzorek č.	0 cyklů, vysušený stav			Pořadí
	F_L [Hz]	F_F [Hz]	F_T [Hz]	podle F_F
O 1	4393	1770	1986	3
O 2	4417	1601	1893	5
O 3	3583	1380	1530	9
O 4	3929	1480	1830	7
O 5	3753	1018	2056	11
O 6	1724	687	887	12
O 7	6378	2573	2735	2
O 8	3829	1543	1717	6
O 9	6706	2667	3060	1
O 10	3612	1293	1611	10
O 11	4939	1705	3129	4
O 12	3589	1449	1661	8

Poznámka: Vzorky určené pro mrazuvzdornost jsou v tabulce podbarveny.

Kromě vlastních frekvencí kmitání se sleduje ještě velikost amplitudy kmitání a špičatost frekvenční křivky. Vysoká frekvence kmitání, jasná a ostrá amplituda kmitání (v podstatě vysoký, jasný a čistý tón, kterým cihla zní při poklepu) je typická pro kvalitní materiál bez poruch, nižší frekvence spolu s nevýraznou nebo dvojitou amplitudou naopak ukazuje na poruchy či nespojitosti ve vnitřní struktuře cihel.

Jediným vzorkem, který vykazoval již ve vysušeném stavu před zmrazováním známky poruch vnitřní struktury, byl vzorek O 6.

3.2.3 Zkoušky pevnosti a mrazuvzdornosti na 25 cyklů

Vzorky vybrané na základě rezonančního měření pro zkoušky mrazuvzdornosti byly podle ČSN 72 2609 nejprve nasyceny varem. Poté byly opět změřeny rezonanční frekvence kmitání. Následovalo střídavé zmrazování a rozmrazování na 25 cyklů v automatickém mrazícím zařízení typu KD podle ČSN 72 2609. Výsledky nedestruktivních měření rezonančních frekvencí zmrazovaných vzorků v nasyceném stavu před zmrazováním a po provedení 25 zmrazovacích cyklů jsou uvedeny v tab. P1.8, včetně výpočtu tzv. relativních dynamických modulů pružnosti.

Tab. P1.8 Vlastní frekvence kmitání vzorků cihel a relativní dynamické moduly po 25 zmrazovacích cyklech

Vzorek č.	0 cyklů, nasycený stav			M 25 cyklů, nasycený stav			Relativní dynamický modul RDM po 25 cyklech zmrazování		
	F_L [Hz]	F_f [Hz]	F_t [Hz]	F_L [Hz]	F_f [Hz]	F_t [Hz]	FL [%]	FF [%]	FT [%]
O 2	3993.0	1445.0	1706.0	3848	1408	1651	92.9	94.9	93.7
O 3	3225.0	1233.0	1373.0	3150	1208	1343	95.4	96.0	95.7
O 6	1568.0	643.0	772.0	/	165	267	0.0	6.6	12.0
O 9	6307.0	2463.0	2824.0	6268	2446	2808	98.8	98.6	98.9
O 11	4431.0	1530.0	1686.0	4370	1500	1658	97.3	96.1	96.7
O 12	3116.0	1237.0	1429.0	3051	1208	1397	95.9	95.4	95.6

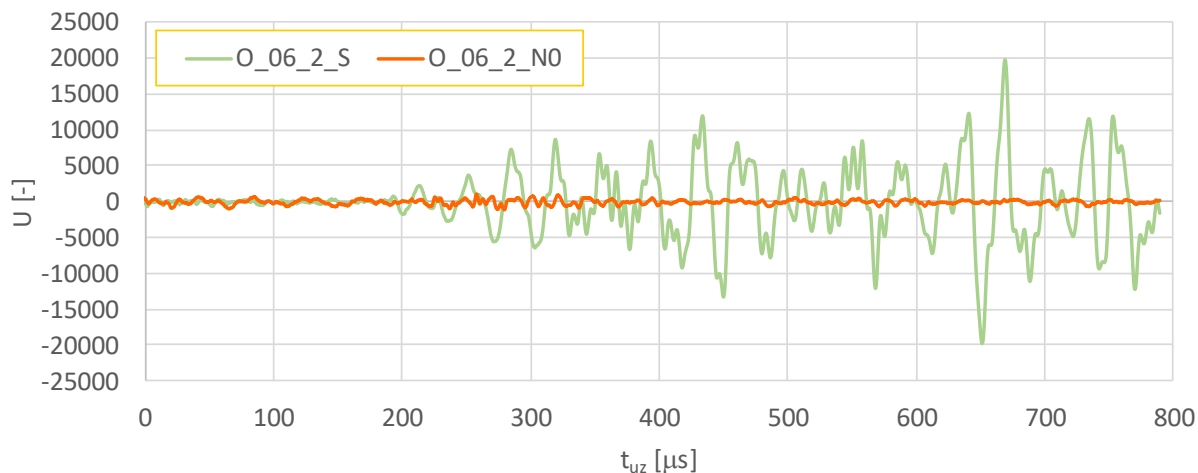
Poznámka: Pokud je relativní dynamický modul RDM nižší než 85 %, pak je mrazuvzdornost diskutabilní, při poklesu RDM pod 75 % vzorek jednoznačně nevyhovuje na daný počet cyklů mrazuvzdornosti.

Z výsledků uvedených v tab. P1.8 je zřejmé, že 5 ze 6 vzorků vyhovělo na mrazuvzdornost po 25 cyklech, pouze vzorek O 6 se výrazně porušil (viz obr. P1.10). Jednalo se vzorek, u něhož ultrazvuková i rezonanční zkouška ukazovala na poruchy vnitřní struktury již před zmrazováním (obr. P1.11, obr. P1.12).



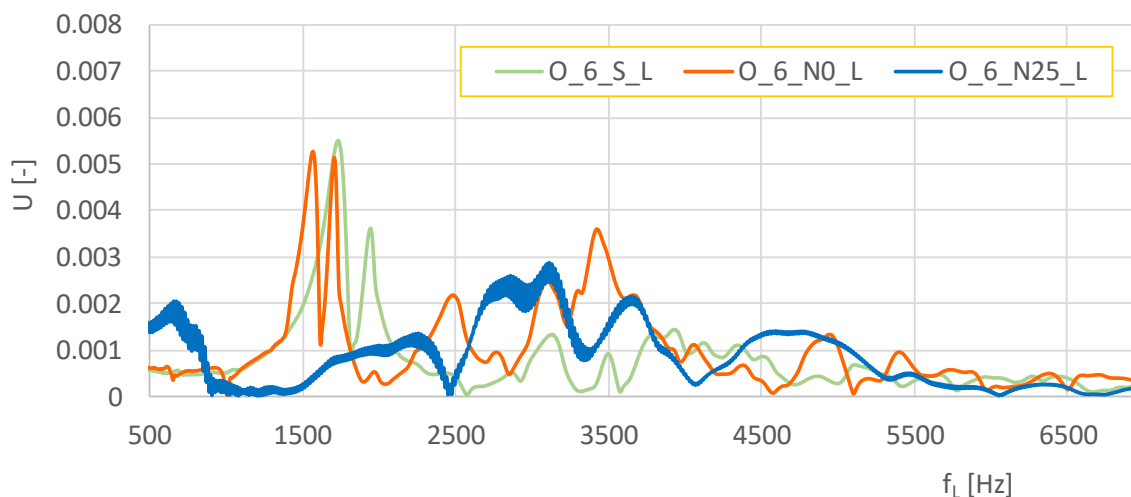
Obr. P1.10: U vzorku O 6 došlo po 25 zmrazovacích cyklech k jeho výraznému porušení trhlinami.

Vzorek O 6 - vysušený a nasycený



Obr. P1.11: Ultrazvukové měření vzorku O 6 ukázalo již ve stavu vysušeném a ještě výrazněji ve stavu nasyceném vodou (před zmrazováním), že vzorek není v pořádku a jeho struktura je značně narušena vnitřními poruchami.

Vzorek O 6 - rezonance f_L



Obr. P1.12: Rezonanční měření (podélná frekvence f_L) - signalizace poruchy struktury již v suchém a nasyceném stavu, po 25 cyklech zmrazování vzorek zcela porušen, frekvence nelze stanovit.

Dále byly vzorky vysušeny a podrobeny zkoušce pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku. Výsledky zkoušek pevnosti v tahu za ohybu srovnávacích (nezmrazovaných) cihel jsou uvedeny v tab. P1.9A, zmrazovaných cihel po 25 cyklech v tab. P1.9B. Podobně výsledky zkoušek pevnosti v tlaku srovnávacích a zmrazovaných cihel jsou uvedeny v tab. P1.10A a tab. P1.10B.

Tab. P1.9A Pevnost v tahu za ohybu zdících prvků "S" srovnávacích

Vzorek č.	Šířka v místě lomu w_f	Výška v místě lomu h_f	Maximální síla F_f	Pevnost v tahu ohybem $f_{b,f}$
	[mm]	[mm]	[kN]	[N/mm ²]
O 1	140.5	72.9	7.78	3.75
O 4	141.9	68.6	3.12	1.68
O 5	133.2	68.5	4.99	2.87
O 7	137.5	65.9	15.80	9.53
O 8	142.0	68.8	5.00	2.68
O 10	135.8	63.4	2.55	1.68
Průměr				3.70
<i>Minimum</i>				<i>1.68</i>
Směrodatná odchylka				2.96

Tab. P1.9B Pevnost v tahu za ohybu zdících prvků zmrazovaných "M25"

Vzorek č.	Šířka v místě lomu w_f	Výška v místě lomu h_f	Maximální síla F_f	Pevnost v tahu ohybem $f_{b,f}$
	[mm]	[mm]	[kN]	[N/mm ²]
O 2	133.2	59.7	4.85	3.68
O 3	149.3	63.3	5.40	3.25
O 6	139.9	62.2	0.12	0.08
O 9	125.4	60.6	11.25	8.79
O 11	142.7	55.1	5.55	4.61
O 12	144.2	66.7	3.00	1.68
Průměr				3.68
<i>Minimum</i>				<i>0.08</i>
Směrodatná odchylka				2.97

Komentář k pevnosti v tahu za ohybu:

Průměrná hodnota pevnosti v tahu za ohybu vyšla u srovnávacích i zmrazovaných cihel prakticky identická, 3,7 MPa. Výrazně vyšší pevnosti v tahu za ohybu vyšly u dvou vzorků O 7 a O 9, které vykazovaly výrazně lepší výsledky již při rezonančním měření. Vzorek O 6 jako jediný výrazně nevyhověl, neboť byl narušen trhlinami.

Tab. P1.10A Pevnost v tlaku zdících prvků srovnávacích "S"

Vzorek č.	Šířka w_c	Délka l_c	Maximální síla F_c	Pevnost v tlaku f_b
	[mm]	[mm]	[kN]	[N/mm ²]
O 1	143.0	133.6	338.8	17.7
O 4	135.3	118.9	253.6	15.8
O 5	129.4	115.6	368.1	24.6
O 7	124.1	107.8	358.0	26.8
O 8	137.4	127.7	328.5	18.7
O 10	150.6	137.4	271.8	13.1
Průměr				19.5
<i>Minimum</i>				13.1
Směrodatná odchylka				5.23

Tab. P1.10B Pevnost v tlaku zdících prvků zmrazovaných "M25"

Vzorek č.	Šířka w_c	Délka l_c	Maximální síla F_c	Pevnost v tlaku f_b
	[mm]	[mm]	[kN]	[N/mm ²]
O 2	135.1	131.6	331.1	18.6
O 3	151.3	146.4	304.7	13.8
O 6	141.2	101.0	91.8	6.4
O 9	131.1	117.2	610.7	39.7
O 11	142.1	104.9	330.5	22.2
O 12	144.0	133.3	262.7	13.7
Průměr				19.1
<i>Minimum</i>				6.4
Směrodatná odchylka				11.44

Komentář k pevnosti v tlaku:

Podle ČSN 72 2609 nesmí pevnost v tlaku po zmrazování klesnout o více než 15% proti deklarované pevnosti v tlaku, v tomto případě proti pevnosti v tlaku srovnávacích (nezmrazovaných) těles. Průměrná hodnota pevnosti v tlaku vyšla u srovnávacích i zmrazovaných cihel rovněž velmi podobná, 19,5 MPa u srovnávacích a 19,1 MPa u zmrazovaných, což je pokles přibližně o 2 %. Podle srovnávacích těles lze cihlám přiřadit **pevnostní značku P15** (průměrná pevnost v tlaku 15,0 MPa, minimální 12,0 MPa). Z hlediska mrazuvzdornosti 5 ze 6 vzorků vyhovělo na 25 cyklů, výjimkou byl opět vzorek O 6.

3.3 Vyhodnocení zkoušek náhradních historických cihel „O“

Ze souboru cihel určených pro náhradu původního zdiva mostu u obce Sedlec – jednalo se o použité cihly ze zbouraných staveb v okolí Olomouce, pravděpodobně vyrobené v 2. pol. 19. stol. či na počátku 20. stol. – byly provedeny zkoušky potřebné k zařazení cihel a k posouzení jejich mrazuvzdornosti na 25 cyklů. Na základě výsledků zkoušek lze konstatovat, že cihly určené jako náhrada splňují požadavky pro **pevnostní značku P 15**.

Pro zkoušky mrazuvzdornosti byly cihly rozříděny na základě výsledků rezonanční zkoušky tak, aby sada zmrazovaných cihel byla z hlediska kvality srovnatelná se sadou nezmrazovaných cihel. Ukázalo se, že 5 ze 6 zmrazovaných cihel vyhovělo požadavkům na mrazuvzdornost na 25 zmrazovacích cyklů. Nevyhověl pouze 1 vzorek O 6, u něhož byly rezonanční zkouškou odhaleny poruchy vnitřní struktury již před zmrazováním.

Soubor cihel, z něhož byly vzorky ke zkouškám odebrány, je použitelný pro náhradu historického zdiva mostu při splnění podmínky, že všechny cihly budou před zabudováním do konstrukce pečlivě prohlédnuty a vyzkoušeny alespoň jednoduchou akustickou zkouškou (poklepem kladívka), přičemž cihly s vizuálně viditelnými vadami (trhliny, nespojitosti) nebo cihly s tlumeným či křaplavým zvukem při poklepu musí být ze souboru vyřazeny.

4 VZORKY NÁHRADNÍCH CIHEL NOVĚ VYRÁBĚNÝCH

4.1 Údaje o vzorcích

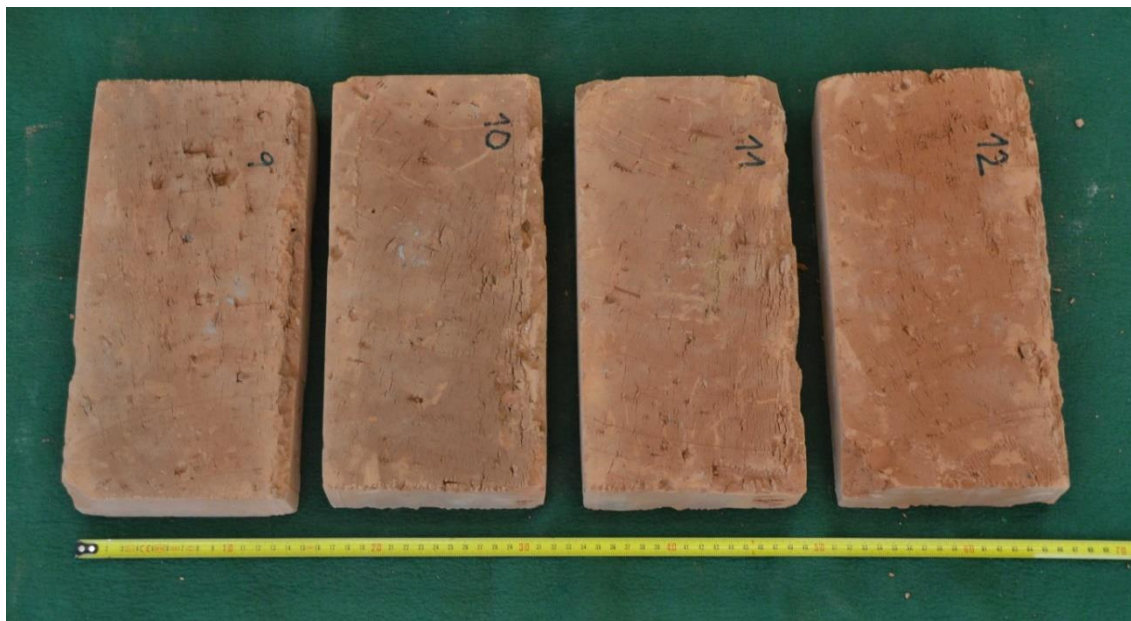
Vzorky do laboratoře dodal objednatel zkoušek. Bylo dodáno celkem 12 ks vzorků vybraných z cihel určených pro náhradu chybějícího zdiva mostu. Sada je záměrně anonymizována, neboť výsledky zde uvedené nemusejí odpovídat běžné nebo současné produkci dané cihelny, výběr typu byl navíc proveden spíše podle barevnosti střepe, než podle fyzikálně-mechanických vlastností. Podle vzhledu se jedná standartní zdící cihly vyráběné v současnosti. Všech 12 cihel určených ke zkouškám je dokumentováno na obr. P1.13 až P1.15.



Obr. P1.13: Vzorky nových „náhradních“ cihel č. 1 až 4. Vizually jsou všechny cihly podobné.



Obr. P1.14: Vzorky nových „náhradních“ cihel č. 5 až 8. Vizually jsou všechny cihly podobné.



Obr. P1.15: Vzorky nových „náhradních“ cihel č. 9 až 12. Vizually jsou všechny cihly podobné.

Z 12 vzorků byly dále vytvořeny dvě sady – srovnávací a zmrazované cihly – po 6 vzorcích. Výsledky zkoušek srovnávacích těles slouží k zařazení cihel do pevnostní třídy, výsledky zmrazovaných těles slouží k posouzení mrazuvzdornosti. Pokud by k rozdělení vzorků do sad došlo pouze na základě vizuálního dojmu nebo dokonce náhodným způsobem, mohlo by dojít ke značnému ovlivnění výsledků. Proto byly vzorky rozděleny na základě nedestruktivních zkoušek – ultrazvukových a rezonančních. Na základě dlouhodobých zkušeností zpracovatele byla jako rozhodující pro seřazení cihel použita první vlastní frekvence příčného kmitání, která velmi citlivě reaguje jak na kvalitu materiálu, tak zejména na vnitřní poruchy v materiálu, zvenku jinak neviditelné.

4.2 Výsledky zkoušek

4.2.1 Rozměry, objemová hmotnost a nasákavost cihel

Cihly byly nejprve vysušeny při 105 °C do ustálené hmotnosti, poté byly změřeny, zváženy a byla vypočtena objemová hmotnost ve stavu vysušeném $\rho_{d,u}$. Dále byly podrobeny zkoušce nasákavosti, z rozdílu hmotností v obou hraničních vlhkostních stavech byla vypočtena nasákavost cihel NV (hmotnostní). Charakteristiky zkušebních těles a vypočtené hodnoty objemové hmotnosti a nasákavosti jsou uvedeny v tab. P1.11.

Tab. P1.11 Rozměry, objemová hmotnost ve stavu vysušeném a nasákavost cihel

Vzorek č.	Šířka w_u	Výška h_u	Délka l_u	Hmotnost vysuš. $m_{d,u}$	Objemová hm. $\rho_{d,u}$	Hmotnost nasyc. $m_{s,u}$	Nasákavost hmotn. NV
	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m ³]	[g]	[%]
1	149.6	61.2	300.3	4828.6	1756	5602.2	16.0
2	148.4	61.6	297.8	4738.6	1741	5547.8	17.1
3	149.3	60.6	299.0	4521.6	1671	5320.0	17.7
4	149.3	63.1	299.5	4700.2	1666	5553.2	18.1
5	148.7	62.4	299.1	4838.0	1743	5682.8	17.5
6	148.9	60.7	298.7	4477.8	1659	5351.8	19.5
7	148.6	60.8	299.1	4625.8	1712	5410.0	17.0
8	148.2	62.6	299.5	4669.4	1681	5509.8	18.0
9	148.6	61.7	299.5	4683.2	1705	5453.4	16.4
10	148.9	60.6	299.8	4484.0	1658	5378.2	19.9
11	149.2	59.6	299.2	4479.2	1684	5324.0	18.9
12	149.6	62.0	298.9	4523.2	1632	5416.8	19.8
Průměr					1690		18.0
<i>Minimum</i>					<i>1632</i>		<i>16.0</i>
Směrodatná odchylka					39.3		1.3

Komentář k objemové hmotnosti a nasákavosti cihel.

Objemová hmotnost jednotlivých vzorků cihel se pohybovala od 1632 do 1756 kg/m³, což odpovídá třídě objemové hmotnosti 1800. Nasákavost cihel se pohybovala od 16,0 % do 19,9 %. Jedná se o standardní hodnoty pro cihly plně pálené.

Rozměry cihel byly rovněž velmi podobné, větší odchylky proti jmenovitým rozměrům byly zaznamenány pouze u výšky cihel.

4.2.2 Rozdělení cihel do sad podle rezonančních frekvencí kmitání

Je velmi obtížné sestavit dvě vyrovnané sady pro zařazení cihel a pro zkoušku mrazuvzdornosti, na vizuální dojem nelze plně spoléhat. Proto byly u cihel změřeny vlastní (rezonanční) frekvence kmitání podélného (L), příčného (F) a kroutivého (T) ve stavu vysušeném – viz tab. P1.12. Podle frekvencí vlastního kmitání, s přihlédnutím ke tvaru rezonančních křivek, bylo stanoveno pořadí cihel 1. až 12. Pro jednotlivé sady byly vybrány cihly:

- Sada zmrazovaná – cihly 2, 5, 6, 10, 11 a 12.
- Sada srovnávací (nezmrazovaná) – cihly 1, 3, 4, 7, 8 a 9.

Tab. P1.12 Vlastní frekvence kmitání vzorků cihel

Vzorek č.	0 cyklů, vysušený stav			Pořadí
	F_L [Hz]	F_F [Hz]	F_T [Hz]	
1	3494	1322	1446	6
2	3165	1219	1338	12
3	3500	1311	1441	7
4	3668	1414	1565	3
5	3397	1311	1446	9
6	3798	1392	1538	1
7	3284	1224	1354	11
8	3268	1295	1435	10
9	3754	1457	1586	2
10	3489	1284	1403	8
11	3641	1365	1484	5
12	3624	1408	1554	4

Poznámka: Vzorky určené pro mrazuvzdornost jsou v tabulce podbarveny.

Kromě vlastních frekvencí kmitání se sleduje ještě velikost amplitudy kmitání a špičatost frekvenční křivky. Vysoká frekvence kmitání, jasná a ostrá amplituda kmitání (v podstatě vysoký, jasný a čistý tón, kterým cihla zní při poklepu) je typická pro kvalitní materiál bez poruch, nižší frekvence spolu s nevýraznou nebo dvojitou amplitudou naopak ukazuje na poruchy či nespojitosti ve vnitřní struktuře cihel.

Již rezonanční zkouška naznačila, že některé vzorky mají nižší kvalitu. Z cihel určených pro zmrazování se jednalo o **vzorky č. 2 a č. 5**. U nich byl rovněž značný rozdíl mezi vysušeným a nasyceným stavem. To může predikovat výpal při nižší teplotě, anebo jiné vady uvnitř struktury cihel.

4.2.3 Zkoušky pevnosti a mrazuvzdornosti na 25 cyklů

Vzorky vybrané na základě rezonančního měření pro zkoušky mrazuvzdornosti byly podle ČSN 72 2609 nejprve nasyceny varem. Poté byly opět změřeny rezonanční frekvence kmitání. Následovalo střídané zmrazování a rozmrazování na 25 cyklů v automatickém mrazícím zařízení typu KD podle ČSN 72 2609. Výsledky nedestruktivních měření rezonančních frekvencí zmrazovaných vzorků v nasyceném stavu před zmrazováním a po provedení 25 zmrazovacích cyklů jsou uvedeny v tab. P1.13, včetně výpočtu tzv. relativních dynamických modulů pružnosti.

Tab. P1.13 Vlastní frekvence kmitání vzorků cihel a relativní dynamické moduly po 25 zmrazovacích cyklech

Vzorek č.	0 cyklů, nasycený stav			M 25 cyklů, nasycený stav			Relativní dynamický modul RDM po 25 cyklech zmrazování		
	F_L [Hz]	F_f [Hz]	F_t [Hz]	F_L [Hz]	F_f [Hz]	F_t [Hz]	FL [%]	FF [%]	FT [%]
2	2422	918	1023	1856	758	858	58.7	68.2	70.3
5	2925	1121	1235	2248	960	1034	59.1	73.3	70.1
6	3754	1352	1499	3545	1321	1491	89.2	95.5	98.9
10	3473	1287	1401	3335	1192	1288	92.2	85.8	84.5
11	3388	1274	1378	3383	1259	1376	99.7	97.7	99.7
12	3489	1365	1489	3420	1321	1428	96.1	93.7	92.0

Poznámka: Pokud je relativní dynamický modul RDM nižší než 85 %, pak je mrazuvzdornost diskutabilní, při poklesu RDM pod 75 % vzorek jednoznačně nevyhovuje na daný počet cyklů mrazuvzdornosti.

Z výsledků uvedených v tab. P1.13 je zřejmé, že u tří ze šesti vzorků došlo k výraznějším poklesům rezonančních frekvencí, přičemž **vzorky č. 2 a 5 nevyhovely poměrně výrazně**. O míře poškození ostatně vypovídá fotodokumentace vzorků po 25 zmrazovacích cyklech na obr. P1.16 až obr. P1.19.

Na záznamech z ultrazvukového a rezonančního měření lze dokladovat, že v tomto konkrétním případě bylo zřejmé již předem (po nasycení vodou), které ze vzorků se dříve poruší. Na obr. P1.20 až P1.22 je záznamy ultrazvukových měření poškozených vzorků č. 2 a 5 a nepoškozeného vzorku č. 12, a to ve všech pěti měřených stavech (vysušeném, nasyceném varem (0 cyklů), nasyčené po 13 a 25 cyklech a vysušené po 25 cyklech zmrazování). Výsledky hovoří jednoznačně, stejně jako záznamy z měření podélné rezonanční frekvence u vzorků č. 2 a č. 12 na obr. P1. 23 a P1.24.



Obr. P1.16: Vzorek č. 2 po 25 zmrazovacích cyklech – došlo k odpadnutí povrchové vrstvy ze všech stěn, navíc je zde patrná výrazná textura.



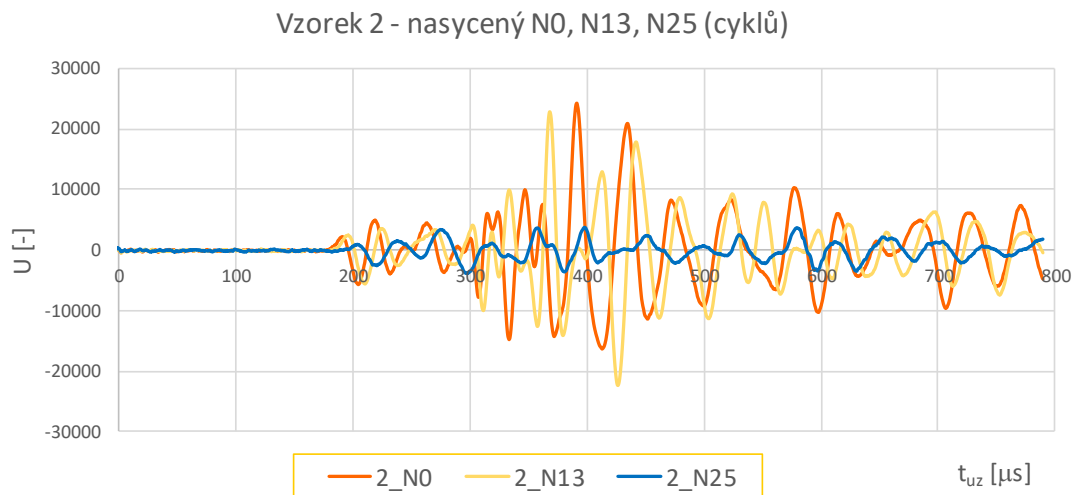
Obr. P1.17: Vzorek 2 po 25 zmrazovacích cyklech, po vysušení a odstranění nesoudržných částí. Je zřejmé, že zatímco povrchová vrstva prakticky ze všech stran opadala, jádro zůstalo celistvé.



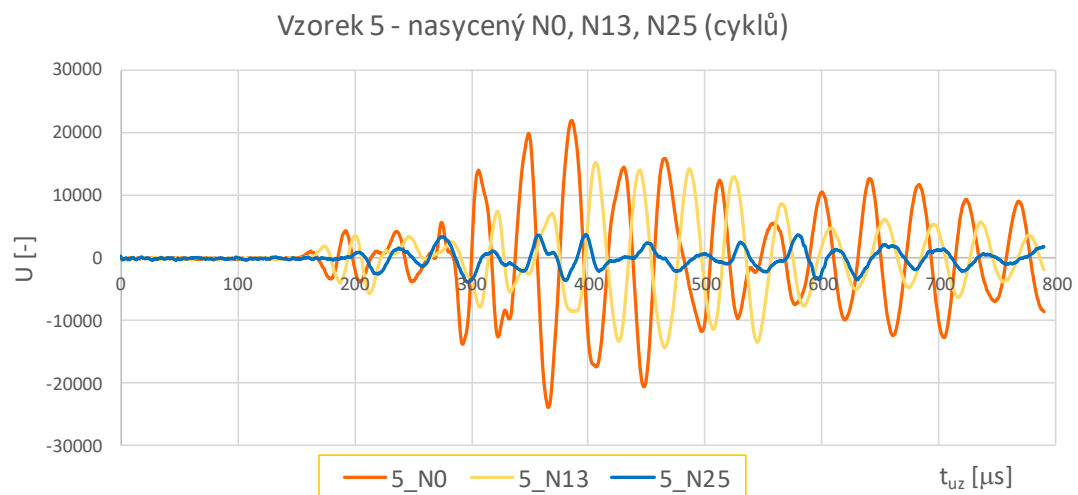
Obr. P1.18: Vzorek 5 po 25 zmrazovacích cyklech – došlo k odpadnutí povrchové vrstvy zejména u bočních stěn.



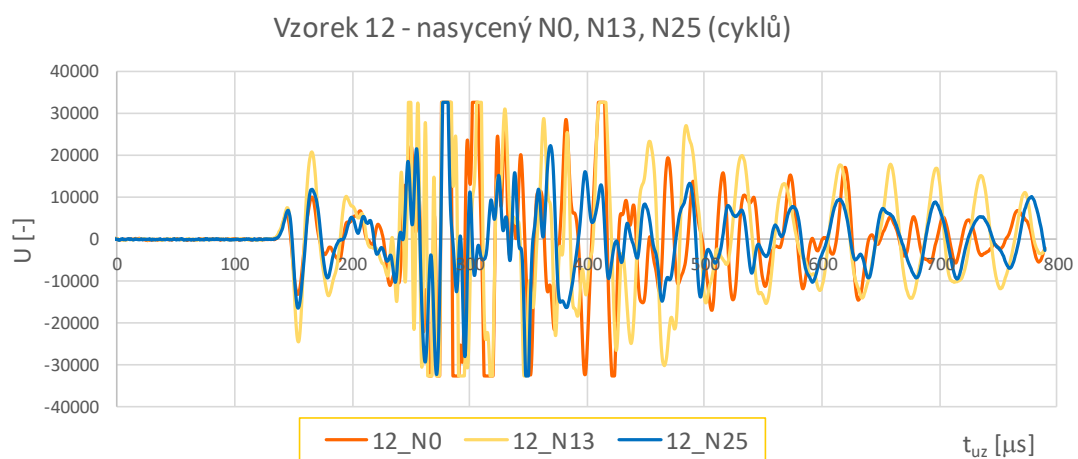
Obr. P1.19: U vzorku 10 je po 25 zmrazovacích cyklech patrné počínající narušení povrchových vrstev, tomu odpovídá i menší pokles měřených veličin.



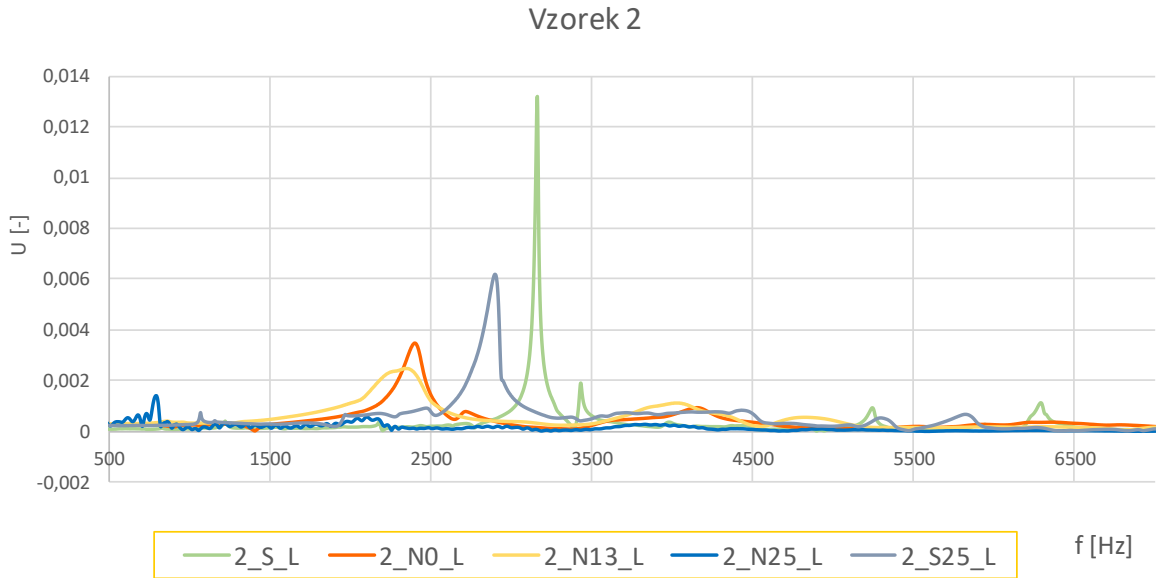
Obr. P1.20: Vzorek 2 – ultrazvukové měření ve stavu nasyceném před zmrazováním (N0) a po 13 (N13) a 25 (N25) zmrazovacích cyklech. Vzorek poškozený – po 13 cyklech mírně, po 25 cyklech výrazně.



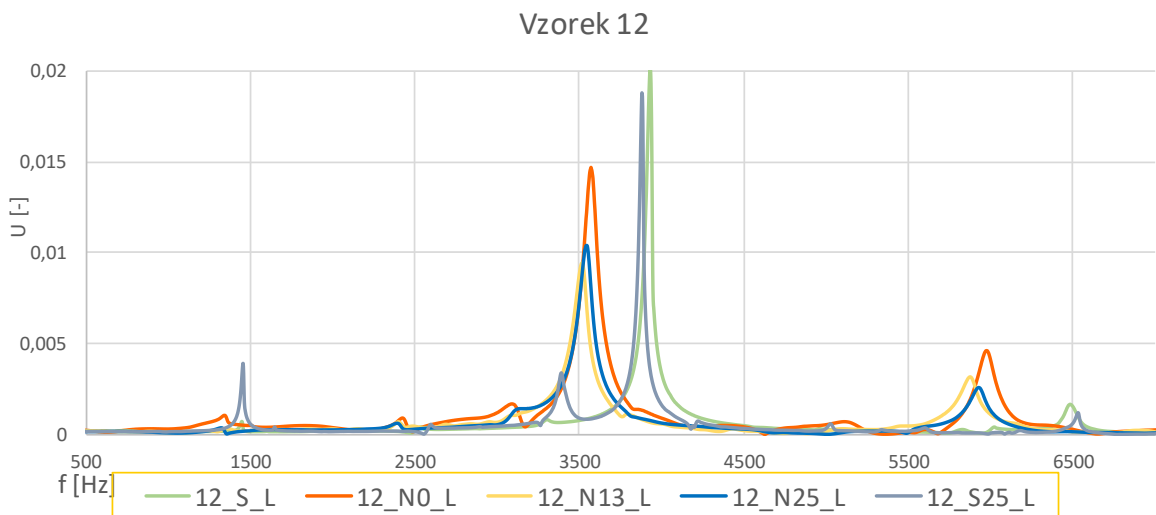
Obr. P1.21: Vzorek 5 – ultrazvukové měření ve stavu nasyceném před zmrazováním (N0) a po 13 (N13) a 25 (N25) zmrazovacích cyklech. Vzorek poškozený – po 13 cyklech mírně, po 25 cyklech výrazně.



Obr. P1.22: Vzorek 12 – ultrazvukové měření ve stavu nasyceném před zmrazováním (N0) a po 13 (N13) a 25 (N25) zmrazovacích cyklech. Vzorek nepoškozený – náběh signálu po 25 cyklech srovnatelný s 0 cykly.



Obr. P1.23: Vzorek č. 2 – měření rezonanční frekvence podélného kmitání f_L před zmrazováním ve stavu vysušeném (S), nasyceném vodou po 0 (N0), 13 (N13) a 25 (N25) zmrazovacích cyklech a po následném vysušení (S25). Na vzorku je patrný výrazný pokles f_L již po nasycení vodou, tak i po zmrazování, vzorek je poškozený.



Obr. P1.24: Vzorek 12 – měření rezonanční frekvence podélného kmitání f_L před zmrazováním ve stavu vysušeném (S), nasyceném vodou po 0 (N0), 13 (N13) a 25 (N25) zmrazovacích cyklech a po následném vysušení (S25). Na vzorku nejsou patrné žádné negativní změny, po mírném poklesu frekvence f_L při nasycení vodou se křivka při zmrazování prakticky neměnila a po opětovném vysušení se vrátila zpět – vzorek je nepoškozený.

Dále byly vzorky vysušeny a podrobeny zkoušce pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku. Výsledky zkoušek pevnosti v tahu za ohybu srovnávacích (nezmrazovaných) cihel jsou uvedeny v tab. P1.14A, zmrazovaných cihel po 25 cyklech v tab. P1.14B. Podobně výsledky zkoušek pevnosti v tlaku srovnávacích a zmrazovaných cihel jsou uvedeny v tab. P1.15A a tab. P1.15B.

Tab. P1.14A Pevnost v tahu za ohybu zdících prvků "S" srovnávacích

Vzorek č.	Šířka v místě lomu w_f	Výška v místě lomu h_f	Maximální síla F_f	Pevnost v tahu ohybem $f_{b,f}$
	[mm]	[mm]	[kN]	[N/mm ²]
1	148.9	62.4	4.54	2.82
3	149.3	60.1	7.17	4.79
4	149.0	63.4	7.02	4.22
7	148.4	61.3	6.82	4.40
8	148.0	63.0	9.80	6.01
9	148.8	61.3	8.45	5.44
Průměr				4.61
<i>Minimum</i>				2.82
Směrodatná odchylka				1.10

Tab. P1.14B Pevnost v tahu za ohybu zdících prvků zmrazovaných "M25"

Vzorek č.	Šířka v místě lomu w_f	Výška v místě lomu h_f	Maximální síla F_f	Pevnost v tahu ohybem $f_{b,f}$
	[mm]	[mm]	[kN]	[N/mm ²]
2	147.1	59.5	3.28	2.27
5	147.2	61.2	3.20	2.09
6	149.2	60.5	5.75	3.79
10	148.7	60.8	6.55	4.29
11	149.0	59.8	6.27	4.24
12	149.5	62.3	6.55	4.06
Průměr				3.46
<i>Minimum</i>				2.09
Směrodatná odchylka				1.01

Komentář k pevnosti v tahu za ohybu:

Průměrná hodnota pevnosti v tahu za ohybu vyšla u srovnávacích vzorků 4,61 MPa, zatímco u zmrazovaných cihel 3,46 MPa, což je pokles o 25 %. Na nižší pevnosti v tahu za ohybu po zmrazování se nejvíce podílí poškozené vzorky 2 a 5, ovšem i zde hodnoty přesáhly 2 MPa. Svedčí to o skutečnosti, že k porušení vzorků dochází zejména na povrchu.

Tab. P1.15A Pevnost v tlaku zdících prvků srovnávacích "S"

Vzorek č.	Šířka w_c	Délka l_c	Maximální síla F_c	Pevnost v tlaku f_b
	[mm]	[mm]	[kN]	[N/mm ²]
1	148.3	143.2	348.2	16.4
3	152.8	141.0	475.3	22.1
4	148.3	138.5	473.6	23.1
7	170.5	146.4	483.5	19.4
8	143.3	147.9	483.0	22.8
9	154.2	147.3	568.7	25.0
Průměr				21.5
<i>Minimum</i>				16.4
Směrodatná odchylka				3.08

Tab. P1.15B Pevnost v tlaku zdících prvků zmrazovaných "M25"

Vzorek č.	Šířka w_c	Délka l_c	Maximální síla F_c	Pevnost v tlaku f_b
	[mm]	[mm]	[kN]	[N/mm ²]
2	144.7	131.4	236.3	12.4
5	147.7	144.4	212.4	10.0
6	148.0	139.5	481.2	23.3
10	148.1	147.5	418.6	19.2
11	150.5	148.7	473.2	21.1
12	147.2	141.0	456.6	22.0
Průměr				18.0
<i>Minimum</i>				10.0
Směrodatná odchylka				5.50

Komentář k pevnosti v tlaku:

Podle ČSN 72 2609 nesmí pevnost v tlaku po zmrazování klesnout o více než 15 % proti deklarované pevnosti v tlaku, v tomto případě proti pevnosti v tlaku srovnávacích (nezmrazovaných) těles. Průměrná hodnota pevnosti v tlaku vyšla 21,5 MPa u srovnávacích a 18,0 MPa u zmrazovaných, což je **pokles o 16,3 %**. Podle srovnávacích těles lze cihlám přiřadit **pevnostní značku P20** (průměrná pevnost v tlaku 20,0 MPa, minimální 16,4 MPa). Z hlediska mrazuvzdornosti však cihly nevyhověly na 25 cyklů, neboť u dvou cihel došlo jak k výraznému porušení povrchu, tak i k výraznému poklesu pevností.

4.3 Vyhodnocení zkoušek náhradních nových cihel

Ze souboru cihel určených pro náhradu původního zdiva mostu u obce Sedlec – jednalo se o nově vyrobené cihly z jedné z tuzemských cihelen – byly provedeny zkoušky potřebné k zatřídění cihel a k posouzení jejich mrazuvzdornosti na 25 cyklů. Na základě výsledků zkoušek lze konstatovat, že cihly určené jako náhrada splňují požadavky pro **pevnostní značku P 20**.

Pro zkoušky mrazuvzdornosti byly cihly roztříděny na základě výsledků rezonanční zkoušky tak, aby sada zmrazovaných cihel byla z hlediska kvality srovnatelná se sadou nezmrazovaných cihel. Ukázalo se, že 2 ze 6 zmrazovaných cihel nevyhověly požadavkům na mrazuvzdornost na 25 zmrazovacích cyklů jak z hlediska porušení povrchu vrstevnatým rozpadem, tak i z hlediska poklesu pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku. Cihly jsou **nemrazuvzdorné** na 25 zmrazovacích cyklů.

Cihly samy o sobě jsou relativně dobré, avšak při jejich použití pro náhradu historického zdiva mostu, což je velmi exponované prostředí z hlediska vlhkosti a mrazu, existuje poměrně značné riziko brzkého poškození povrchu části cihel a nutnosti jejich výměny. Je to dáno rovněž použitou cihlářskou hlinou, kdy pro stavbu byly vybrány cihly s výraznější červenou barevností, tedy současně s nižší teplotou výpalu. Při důkladném třídění by bylo možné vybrat cihly odolnější proti působení mrazu, ovšem s velkou pravděpodobností za cenu změny odstínu směrem do světle červené až žluté barvy.

5 UKÁZKA ZKOUŠEK IN SITU – TŘÍDĚNÍ CIHEL

Z rozhodnutí investora a po odsouhlasení orgány památkové péče byly (i na základě zkoušek) pro náhradu chybějícího zdiva vybrány historické cihly získané ze zbouraných starších staveb. Filozofii obnovy lze dokumentovat na obr. P1.25, kde je patrný rozsah obnovy. Zatímco na mostní pilíře a mostní klenby měly být v co největší míře použity původní cihly „N“ získané při čištění okolí mostu, náhradní cihly z „bouraček“ byly určeny pro doplnění zcela chybějících zábradelních zdí, které jsou z hlediska konstrukčního přece jen méně důležité.



Obr. P1.25: Pohled na typické pole mostu před obnovou – chybí část zdiva pilířů, několik cihel v klenbě a prakticky celá horní část mostu – zábradelní zdi.

Po počátečních zkouškách, které prokázaly vhodnost vybraného typu náhradních cihel pro náhradu chybějícího zdiva, pokračovala další fáze – zkoušení a třídění cihel pomocí nedestruktivních metod přímo in situ. Ukázalo se totiž, že jednotlivé dodávky historických cihel se mohou značně lišit, a i v případě většinově kvalitních cihel se vždy najdou nevyhovující kusy. Zkoušení a třídění přímo na stavbě je složité, což dokládají fotografie palet cihel na obr. P1.26 a obr. P1.27.



Obr. P1.26: Stav mostu před obnovou – od stavby železnice a zasypaní části rybníka ve 2. pol. 19. století most postupně mizel v nánosoch bahna a zarůstal vegetací, část cihel zejména ze zábradelní zdi byla rozebrána.



Obr. P1.27: Stav mostu před obnovou – od stavby železnice a zasypaní části rybníka ve 2. pol. 19. století most postupně mizel v nánosoch bahna a zarůstal vegetací, část cihel zejména ze zábradelní zdi byla rozebrána.

Třídění probíhalo dvoufázově. Nejprve byly cihly prohlédnuty vizuálně a odzkoušeny jednoduchými metodami pomocí zednického kladívka – poklepem a vrypem. Okamžitě vyřazeny byly cihly, u nichž došlo k výraznému vrypu (cihly měkké = málo pevné), anebo byl zvuk po úderu kladívkem křaplavý, případně měly cihly jiné výrazné vizuální vady (praskliny, znečištění dehtem, apod.) – viz obr. P1.28 vlevo. Naopak cihly tvrdé, bez výrazných vnějších vad a s jasným nebo zvonivým zvukem byly zařazeny na paletu jako vhodné – viz obr. P1.28 vpravo. Kromě toho byla zjištěna řada cihel s drobnými vadami, náznakem textury (obvykle vrstevnatost na boční stěně), anebo při tlumeném nebo nejasném zvuku při poklepu kladívkem. Tyto cihly byly zařazeny do skupiny „diskutabilní“ a následně byly podrobně testovány pomocí rezonanční metody (obr. P1.29). U většiny těchto diskutabilních cihel se ukázalo, že uvnitř struktury jsou skryté vady takového charakteru, že to zřejmě bude mít vliv na odolnost proti střídavému zmrazování a rozmrazování, takže by rovněž měly být vyřazeny.



Obr. P1.28: Stav mostu před obnovou – od stavby železnice a zasypaní části rybníka ve 2. pol. 19. století most postupně mizel v nánosech bahna a zarůstal vegetací, část cihel zejména ze zábradelní zdi byla rozebrána.

Závěrem je nutné konstatovat, že u některých dodávek historických cihel došlo k vyřazení značného množství vzorků. Bylo to však nutné k zachování kvality budoucího zdiva zejména zábradelních zdí mostu Portz Insel. Obnova mostu byla úspěšně dokončena a most byl v červenci 2020 slavnostně otevřen pro veřejnost – viz obr. P1.30. V dalším období bude stav mostu monitorován.



Obr. P1.29: Rezonanční zkouška prováděná in situ na cihlách, jejichž kvalita byla vizuálně a jednoduchými metodami stanovena jako diskutabilní.

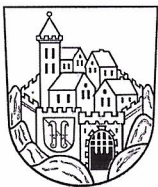


Obr. P1.30: Pohled na obnovený most Portz Insel, slavnostně otevřený dne 3. 7. 2020.

Příloha 2

Potvrzení o využití

„Komplexní metodiky pro nedestruktivní a šetrnou semidestruktivní diagnostiku fyzikálně-mechanických vlastností historických pálených zdících prvků



Město Mikulov
Odbor rozvoje a živnostenského
podnikání
Náměstí 1, 69220 Mikulov
tel.:519444555, fax:519444500
e-mail:podatelna@mikulov.cz



MUMIX0002TXH

Číslo jednací

Spis

Vyřizuje

Kateřina Korandová

Tel: 519444516

Mail: korandova@mikulov.cz

V Mikulově dne 30.10.2020

Počet stran:

Vaše číslo jednací:

Potvrzení o využití „Komplexní metodiky pro nedestruktivní a šetrnou semidestruktivní diagnostiku fyzikálně-mechanických vlastností historických pálených zdících prvků“

V rámci projektu „Mikulov, Portz Insel – obnova historické komponované krajiny“ řešilo město Mikulov ve spolupráci s obcemi Sedlec a Drasenhofen (A) část obnovy velmi cenného území historické komponované krajiny, kterou nechal vybudovat kardinál František Dietrichstein v 17. století. Dominantním objektem celého projektu byl rekonstruovaný patnáctiobloukový barokní cihelný most. Jedná se o naprosto výjimečnou technickou památku, která nemá na Moravě obdoby a současně patří k nejvýznamnějším mostním památkám v České republice.

Při rekonstrukci mostu vyvstal poměrně závažný problém týkající se nutnosti náhrady části historického zdiva (v řádu cca 30.000 cihel), a to buď cihlami nově vyráběnými, anebo cihlami již v minulosti použitými. Řešili jsme jak historickou autenticitu náhradních cihel, tak i jejich kvalitu, která byla značně nevyrovnaná (a to jak u cihel použitých, tak i u nově vyráběných). S řešením tohoto problému nám velmi pomohl doc. Ing. Petr Cikrle, Ph.D. se svým týmem z Ústavu stavebního zkušebnictví FAST VUT v Brně. Ve 2. polovině roku 2019 zde prakticky aplikoval „Komplexní metodiku pro nedestruktivní a šetrnou semidestruktivní diagnostiku fyzikálně-mechanických vlastností historických pálených zdících prvků“, řešenou v rámci projektu NAKI II. DG18P02OVV068 „Komplexní diagnostika pálených zdících prvků historických objektů z pohledu stáří, původu, fyzikálně-mechanických vlastností v závislosti na jejich vlhkosti, a jejich náhrada v historických objektech“.

V rámci řešení tohoto problému byly stanoveny a srovnány vlastnosti původních cihel mostu ze 17. století (vyráběné v Mikulově a značené „N“), a dále cihel nově vyrobených a doporučených pro rekonstrukci mostu, a nakonec cihel tříděných pocházejících ze zbouraného objektu v Olomouci z 19. století.

Výsledky zkoušek ukázaly, že nejlepší vlastnosti mají původní cihly z mostu pocházející z 17. století. Použité a tříděné cihly z 19. století se jim svými vlastnostmi blížily, a to zejména mrazuvzdorností, která pro tento účel byla jednou z nejdůležitějších vlastností. Jako nejméně vhodné se ukázaly cihly nově vyráběné. Na základě výsledků těchto zkoušek byla doporučena dodávka použitých cihel z 19. století (ze zbouraného objektu v Olomouci), což zajistilo mimo jiné také požadovanou autenticitu mostu po rekonstrukci.

Tým docenta Cikrleho v rámci realizace projektu pokračoval v kontrole dalších dodávek použitých cihel, u nichž vyvstala nutnost pečlivého třídění nevyhovujících kusů – třídění probíhalo ukázkově přímo na mostě. Díky použité „Metodice“ se podařilo vytřídit podstatnou část nevyhovujících cihel tak, aby do konstrukce byly použity pouze cihly kvalitní a trvanlivé. I díky tomu postupu se podařilo projekt Portz Insel včas a kvalitně dokončit a most tak mohl být v červenci 2020 otevřen pro veřejnost.

Spolupráce s Fakultou stavební Vysokého učení technického v Brně se ukázala jako velmi přínosná a bude v rámci dlouhodobého sledování tohoto rekonstruovaného objektu pokračovat i nadále.

MĚSTO MIKULOV

odbor rozvoje

a živnostenského podnikání

-2-

Ing. Kateřina Korandová
Manažerka projektu Portz Insel

QUALIFORM, a.s., Mlaty 672/8, Bosonohy, 642 00 Brno
QUALIFORM – odbor posuzování shody

vydává

CERTIFIKÁT

žadateli

Vysoké učení technické v Brně,
Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví,
Veveří 331/95, 602 00 Brno



Posuzovaný předmět certifikace:

Certifikovaná metodika N_{met}

KOMPLEXNÍ METODIKA PRO NEDESTRUKTIVNÍ A ŠETRNOU SEMIDESTRUKTIVNÍ DIAGNOSTIKU FYZIKÁLNĚ-MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ HISTORICKÝCH PÁLENÝCH ZDÍČÍCH PRVKŮ

Tímto certifikátem se potvrzuje, že posuzovaný předmět certifikace odpovídá požadavkům
**Hodnocení výsledků výzkumu a vývoje ve smyslu zákona č.130/2002 Sb.,
nařízení vlády č. 397/2009 Sb. v platném znění a souvisejících technických pokynů**
Výsledky posouzení jsou uvedeny v Souhrnném protokolu o certifikaci metodiky
č. V 1432 0801 ze dne 24. 11. 2020

Podmínky, za nichž se certifikát vydává, jsou uvedeny v licenční smlouvě, která je nedílnou
součástí tohoto certifikátu.

Certifikát se vydává pro účely dokladování výsledků řešení dílčího cíle 6 projektu NAKI II
DG18P02OVV068 (poskytovatel: Ministerstvo kultury ČR)

Podmínky, za nichž se tento certifikát vydává, jsou uvedeny v licenční smlouvě,
která je nedílnou součástí tohoto certifikátu.

Certifikát č. V1-1432/2020



Platnost do 25. 11. 2023

Brno 25. 11 2020



Ing. Jan Svobodník, EurChem
představitel certifikačního orgánu
QUALIFORM - odbor posuzování shody

LICENČNÍ SMLOUVA

(licenční ujednání) č. V1-1432/2020

Akreditovaný certifikační orgán č. 3012 QUALIFORM - odbor posuzování shody

Poskytovatel: QUALIFORM, a.s.
Mlaty 672/8
642 00 Brno

Nabyvatel: Vysoké učení technické v Brně
Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví
Veveří 331/95, 602 00 Brno

čl. I.

Nabyvatel předmětu vlastnictví - certifikátu č. V1 – 1432/2020 je zapsán do Registru držitelů certifikátů certifikačního systému Certifikačního orgánu QUALIFORM - odbor posuzování shody pod č. 1432

čl. II

Nabyvatel se zavazuje:

1. Po dobu platnosti certifikátu dodržovat požadavky referenční normy (předpis) a návazné interní dokumentace, za nichž byl certifikát vydán pro všechny zákazníky (pokud není v konkrétní smlouvě stanoveno jinak) způsobem, který vyloučí poškození zákonných práv zákazníka.
2. Udržovat příslušnou dokumentaci v nezbytném rozsahu k poskytnutí důkazů plnění požadavků referenční normy (předpisu).
3. Bezodkladně oznámit poskytovateli jakékoliv změny nebo skutečnosti ovlivňující soulad s požadavky referenční normy (předpisu) nebo změny ve svém statutu, organizačním členění nebo způsobilosti k výkonu v předmětu certifikace.
4. Užívat certifikát pouze pro oblast činnosti a v rozsahu specifikovaném v certifikátu tak, aby nevznikaly námitky, diskriminace určitého zákazníka nebo nedůvěra k udělenému certifikátu, příp. certifikačnímu systému.
5. Po ukončení platnosti certifikátu (libovolným způsobem) přestat využívat certifikát a nevyužívat oprávnění z této smlouvy vyplývající (včetně reklamních, inzertních, náborových aj. prostředků).

čl. III.

Nabyvatel je oprávněn:

1. Užívat certifikát vydaný Certifikačním orgánem QUALIFORM - odbor posuzování shody k prokazování způsobilosti a důvěry za podmínek uvedených v čl. II. této smlouvy.

čl. IV.

Poskytovatel je oprávněn:

1. K provedení přiměřených kontrol (pravidelných nebo mimořádných dozorů), které umožní certifikačnímu orgánu verifikovat dodržování požadavků referenční normy (předpisu) a návazné interní dokumentace.
2. Ke vstupu do příslušných míst, přístupu k interní dokumentaci a shromažďování informací v předmětné oblasti za účelem provádění kontrol.
3. K přezkoumání výsledků vlastních interních prověrek nabyvatele vztahujících se k předmětné oblasti včetně vyhodnocení účinnosti přijatých opatření k nápravě nedostatků.
4. V případě zjištění podstatných neshod a neplnění podmínek uvedených v čl. II. této smlouvy vydat příslušné rozhodnutí o omezení, pozastavení nebo zrušení platnosti certifikátu nebo zrušení platnosti této smlouvy.

Za nabyvatele:

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
děkan Fakulty stavební
Vysoké učení technické v Brně



Za poskytovatele:

Ing. Jan Svobodník, EurChem
představitel certifikačního orgánu
QUALIFORM - odbor posuzování shody