

Návrh metodiky

# Plně nedestruktivní stanovení mechanických parametrů historických stavebních materiálů – pískovcové zdicí prvky – pevnost v tlaku

2014

Výstup řešení projektu: DF12P01OVV030 – Metodika stanovení vlivu proměnlivého prostředí na degradaci historického zdiva  
Zpracovatel: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební  
Autoři: Zatloukal Jan

## 1. Úvod

U zdících prvků historického zdiva památkových či jiných objektů dochází po určitém čase vlivem degradačních procesů ke změně vlastností použitého materiálu. Tyto degradační procesy jsou zapříčiněny působením okolního prostředí na materiál. Fyzikální a chemické reakce ať už na povrchu či uvnitř materiálu jsou vyvolané působením podmínkami okolního prostředí a jeho agresivitou. Jsou vystaveny klimatickým vlivům tedy teplotě, vlhkosti, mrazu, průmyslovým exhalacím a všeobecně látkám znečišťujícím ovzduší. Na tyto vlivy se pak váže množství dalších faktorů jako např. obsah solí ve vztlínající vodě, působení živých organismů (biodegradace). K degradaci stavebních materiálů dochází také příčinou lidského faktoru o to zejména při zanedbání údržby či špatným provedením stavby, nevhodným stavebním zásahem či nevhodným výběrem materiálu pro danou aplikaci. Kamenné historické zdivo tedy stárne, zvětrává a ztrácí své původní fyzikální, mechanické i estetické vlastnosti. V praxi téměř vždy nastává současné působení několika faktorů.

Určujícími vlastnosti pro rychlost degradace u pískovců jsou pak pórovitost a vlhkost. Stupeň degradace při hodnocení kvality stavebního kamene se zpravidla zjišťuje makroskopickou klasifikací. Degradace u pískovcových prvků se vyznačuje částečnou ztrátou soudržnosti zrn důsledkem vyluhování pojiva. Tmel pískovců je všeobecně jejich nejslabší složkou, a proto je snadno napadán. Jeho postupným vyluhováním se pískovec dostává do konečného stádia degradace, které znamená rozpad na jednotlivá zrna. Tento proces patří k nejčastějším projevům degradace pískovců a je znám pod pojmem minerální disagregace neboli zpískovatění.

Proces degradace je nezvratný děj, nelze jej tedy zcela eliminovat, ale pouze zpomalit. Pro zjištění stavu stavební konstrukce a zhodnocení degradace slouží mnoho indikátorů. Jedním z možných indikátorů, které určují stadium degradace stavebních materiálů v konstrukcích je tedy již zmíněná změna mechanických parametrů v čase. Za mechanické parametry je obecně považován soubor informací, popisujících odezvu materiálu na mechanické zatížení. Mezi nejzákladnější mechanické parametry patří pevnost v tlaku, pevnost v tahu (příčném, za ohybu, nebo v přímém tahu), pevnost ve smyku, statický modul pružnosti v tlaku a smyku. Pro podrobnější studium je třeba tento soubor doplnit dalšími parametry, například dynamickým modulem pružnosti, lomovou houževnatostí nebo lomovou energií a případně dalšími parametry. Pro stanovení mechanických parametrů je standardně užíváno normových postupů. V systému ČSN existují specifické předpisy pro stanovení jednotlivých parametrů pro konkrétní užívané stavební materiály (zdivo, beton, ocel, keramika, maltoviny, omítky a další). Všechny tyto zkoušky jsou až na několik výjimek vždy destruktivní a předpokládá se příprava zkušebních těles při realizaci konstrukcí nových, nebo odběr vzorku u konstrukcí stávajících. Častým požadavkem při studiu historických materiálů však je nenarušení zkoumané konstrukce a je tedy třeba uplatnit plně nedestruktivní diagnostiku materiálových charakteristik. Cenou za nulový nebo zanedbatelný zásah do konstrukce je pak nižší spolehlivost naměřených výsledků materiálových parametrů.

Diagnostika materiálových charakteristik stavebních materiálů je vědní disciplínou, která prošla významným vývojem zejména v posledních desetiletích. Původní metody diagnostiky byly tradičně rozdělovány na destruktivní a nedestruktivní. Destruktivní metody spočívaly ve stanovení pevnosti materiálu v tlaku, nebo v tahu, později také v tahu za ohybu, ve smyku, v příčném tahu a v neposlední řadě také modulu pružnosti. Nedestruktivní metody se rozvinuly zejména díky aplikaci objevů fyzikálních zákonů. Tyto metody spočívají ve využití ultrazvuku, rentgenu, magnetického pole, elektromagnetické indukce, akustické emise, tomografie a dalších ke stanovení mechanických

parametrů stavebních materiálů a současně ke zjištění případných defektů ve struktuře materiálů. Obecně lze prohlásit, že libovolná nedestruktivní zkušební metoda sleduje odezvu zkoumané konstrukce na energetický impuls a tuto odezvu pomocí kalibračních vztahů převádí na hledané parametry, buď mechanické, nebo indikátory degradace. U velké části nedestruktivních metod hraje velmi významnou roli statistika, která umožňuje interpretovat výsledky z celé řady měření.

## 2. Cíl metodiky

Cílem metodiky je určení postupu pro plně nedestruktivní stanovení pevnosti v tlaku historických stavebních materiálů v konstrukcích za pomoci relativně běžně dostupných metod nedestruktivního zkušebnictví. Využity jsou metody odrazového tvrdoměru a impulsní průchodové rychlosti. Obě tyto metody jsou v praxi běžně využívány a dostatečně rychlé a levné. Navíc je přidána metoda, která kombinuje výsledky těchto dvou metod, tzv. metoda SONREB pro zvýšení spolehlivosti výstupů, která je obvykle pro nedestruktivní metody výrazně nižší než u přímého měření metodami destruktivními.

Metodika je určena pro stanovení pevnosti v tlaku kamenných zdicích prvků historického zdiva, vyrobených z pískovce.

Metodika vyžaduje následující přístrojové vybavení pro provádění zkoušek:

- Odrazový tvrdoměr ekvivalentní přístroji Proceq Schmidt hammer type N nebo type L pro kamenné zdicí prvky
- Přístroj pro stanovení ultrazvukové impulsní průchodové rychlosti se sondami s vlastní frekvencí v rozmezí 20 – 100 kHz
- Přístroj pro nedestruktivní stanovení obsahu vody nebo vlhkosti měřeného materiálu, například příložený kapacitní vlhkoměr

## 3. Popis metodiky

Metodika využívá souboru údajů, zjištěných nedestruktivními metodami diagnostiky stavebních materiálů, konkrétně metody odrazového tvrdoměru a impulsní průchodové rychlosti ke stanovení pevnosti v tlaku historických pískovcových zdicích prvků a jejich kombinace metodou SONREB ke zvýšení spolehlivosti naměřených hodnot, přičemž bere v úvahu vliv obsahu vody v materiálu. V následujícím textu je obsažen popis jednotlivých použitých metod.

### 3.1. Metoda odrazového tvrdoměru

Nedestruktivní zkouška pevnosti materiálu Schmidovým tvrdoměrem je jednou z mechanických sklerometrických (tvrdoměrných) metod. Byla vyvinuta pro beton a v této metodice je modifikována pro použití na historických stavebních materiálech.

Tvrdoměrné metody jsou založeny na mechanickém vyvození silového účinku (staticky nebo dynamicky působícího) na speciální indentor (vtlačovací tělísko) nebo přípravek, jehož prostřednictvím dojde k místnímu (zanedbatelnému) narušení povrchu, v tomto případě důlek o průměru několika milimetrů a hloubce několika desetin milimetru. Zjištěný měřený parametr se pak převádí pomocí kalibračního vztahu na hledaný kvalitativní znak. Měření lze opakovat vícekrát na stejném zkušebním místě nebo v jeho blízkém okolí.

Metodu odrazového kladívka vynalezl švýcarský inženýr Ernst Schmidt (1948). Tato jednoduchá metoda se využívá ke stanovení pevnosti, resp. pružnostně plastických vlastností materiálu na povrchu zkoumaného tělesa, přičemž pro extrapolaci těchto vlastností do nitra materiálu se užívá dalších vztahů, založených například na znalosti doby expozice materiálu prostředí, které vyvolává v čase změny mechanických parametrů (typicky karbonatace u betonu). Jako přímo zjišťovaný fyzikální veličina se měří míra odskoku úderníku dané tvrdosti, vrhaného definovanou silou a rychlostí proti povrchu zkoušeného vzorku, a to buď jako dráha odskoku u klasických tvrdoměrů (tzv. R-hodnota), nebo jako poměr rychlostí úderníků bezprostředně před a po odrazu u moderních tvrdoměrů dynamických (tzv. Q-hodnota). Poměr mezi R- a Q-hodnotou je přibližně  $R = 0,75Q$ . Vyhodnocení je prováděno pomocí kalibračního grafu, příslušného ke konkrétnímu stavebnímu materiálu, přičemž standardní kalibrační grafy jsou vytvořené pro beton, pro materiály historických konstrukcí je třeba tyto vztahy definovat nově.

Odrazové tvrdoměry fungují na principu vztahu tvrdosti povrchu a poměru kinetické energie dopadajícího úderníku před a po odrazu. Čím je povrch tvrdší, tím méně energie je při dopadu disipováno. Odrazový tvrdoměr je tvořen vlastním tělem, razníkem, beranem a hnací pružinou. Při uvolnění pružina vrhá hmotu beranu na razník kladívka, který je opřen kulovou plochou o povrch vzorku. Pružností povrchu se beran odrazí a unáší s sebou vlečný ukazatel, který ukáže na stupnici pouzdra stupeň odskoku v případě klasických tvrdoměrů, nebo je digitálně změřena jeho rychlost před odrazem a po odrazu u tvrdoměrů dynamických. Odrazový tvrdoměr může měřit horizontálně, vertikálně, svisle nahoru, nebo v jiném úhlu. Pro každý úhel měření (u stejného materiálu) je potřeba, vzhledem k jinému gravitačnímu efektu, použít zvláštní kalibrační graf (křivku), nebo provést vlastní kalibraci. Moderní přístroje mají vestavěný akcelerometr, který efekt gravitace automaticky kompenzuje již při samotném záznamu měření.

Odrazový tvrdoměr představuje jednoduché, rychlé a levné měřicí zařízení, vzhledem k samotné fyzikální podstatě zkoušky je však třeba počítat s určitými omezeními. Výsledky měření mohou být ovlivněny následujícími faktory:

- jemností povrchu testovaného materiálu, na drsném povrchu je odrazové číslo vyšší
- velikostí, tvarem a stabilitou vzorků, případně setrvačnou hmotou vzorku (pohyb při měření malého vzorku redukuje odrazové číslo – vzorek musí být pevně uchycen, nebo musí mít značnou hmotu)
- stářím vzorků
- povrchovou a vnitřní vlhkostí vzorků, vlhkost snižuje odrazivost na povrchu i uvnitř vzorků

Odrazové tvrdoměry jsou dodávány v různých provedeních pro různé typy materiálů. Liší se měřenou veličinou (velikost odskoku, tzv. R-hodnota u klasických tvrdoměrů nebo poměr rychlostí úderníku před a po odrazu, tzv. Q-hodnota u dynamických tvrdoměrů), tvarem a velikostí kontaktní plochy úderníku a dopadovou energií. Například švýcarská firma Proceq dodává celou řadu pro různé typy materiálů, přístroje jsou primárně určeny pro zkoušení betonu:

- typ N – pro zkoušky betonu v běžném pozemním a mostním stavitelství (rázová energie 2,207 J);
- typ L – pro zkoušení malých a na náraz citlivých dílců, případně materiálů s nízkou pevností (rázová energie 0,735 J);

- typ LB – měření a rázová energie jsou stejné jako u typu L, zakončení rázového čepu je speciálně zaobleno, vhodné pro zkoušení ke kontrole kvality výrobků z pálené hlíny;
- typ M – pro měření pevnosti masivního (hutného) betonu, vozovek, letištních drah, přehrad, atd. (rázová energie 29,43 J);
- typ P – kyvadlové kladívko pro lehké stavební materiály, omítky a povrchové vrstvy (rázová energie 0,883 J);
- typ PT – kyvadlové kladívko se zvětšenou plochou nárazu pro materiály s mimořádně nízkou pevností (rázová energie 0,883 J);
- typ PM – kyvadlové kladívko pro zkoušení spár ve zdivu (rázová energie 0,883 J)

V rámci této metodiky bude uvedena kalibrační křivka pro pískovcové zdicí prvky, kde vstupem bude hodnota odrazu (R- nebo Q-hodnota) a výstupem pevnost materiálu v tlaku.

### 3.2. Impulsní průchodová metoda

Pro stanovení impulsní průchodové rychlosti materiálem se využívá měření doby uplynulé mezi vysláním a příjmem mechanického impulsu mezi dvěma body známé vzájemné vzdálenosti. Jako impuls je využíván krátký zvukový puls o frekvenci vyšší než 20 kHz, tedy v oblasti ultrazvuku. Princip šíření impulsu prostředím popisuje fyzika pružného kontinua. Je-li hmotný bod součástí pružného homogenního prostředí, pak se jeho kmitání postupně přenáší stálou rychlostí na všechny částice. Takto vzniklý pohyb celé soustavy hmotných bodů se nazývá postupné vlnění. V ultrazvukové měřicí technice se většinou používají ultrazvukové impulsy, které nevytvářejí ustálené kmitání. Dávají informaci o amplitudě i o době průchodu ultrazvukové vlny prostředím. Obsahují jen několik málo kmitů, běžně jeden nebo dva. V neohrazeném prostředí se ultrazvukové vlny šíří od svého zdroje prostorově.

Rozlišujeme několik druhů ultrazvukových vln, které se vzájemně liší způsobem pohybu částic vzhledem ke směru postupu vlny. Podle směru kmitání částic v prostředí, v kterém se vlny šíří, rozdělujeme základní typy vln na podélné, příčné a povrchové (Rayleighovy).

#### Rychlost šíření vlny v prostředí

Tuhé látky se liší od kapalin a plynů mnohem vyššími meziatomárními vazebnými silami, a proto snázejí i smykové namáhání. V důsledku toho jsou tuhé látky jediné, které mohou přenášet i smykové namáhání a tedy i všechny druhy ultrazvukových vln. Některé tuhé látky, např. dřevo, jsou anizotropní, což způsobuje, že rychlost šíření ultrazvukových vln v této látce závisí na orientaci jeho šíření. Izotropní látky jsou buď amorfni, kde je struktura podobná kapalině, nebo polykrystalické, u nichž je velký počet zrn orientován zcela náhodně. Proto se v tuhých izotropních látkách stejně jako v kapalině rychlost šíření nemění se směrem šíření.

Rychlost šíření podélných vln  $c_L$  [m/s] v tuhých látkách v neohrazeném prostředí je dána výrazem:

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}}$$

kde

$E$  je dynamický modul pružnosti v tahu [Pa],

$\rho$  je hustota [ $\text{kg/m}^3$ ],

$\nu$  je součinitel příčné kontrakce (Poissonovo číslo) [-].

Prochází-li ultrazvuková rovinná vlna prostředím, klesá její energie, a tím i její akustický tlak v závislosti na vlastnosti prostředí. Příčinou je útlum absorpcí, což je pohlcování ultrazvukových vln, kdy se mechanická energie mění v tepelnou v důsledku vnitřního tření kmitajících částic prostředí.

Impulsová průchodová metoda pracuje s opakovanými UZ impulsy vysílanými budičem do materiálu. Druhá sonda snímá prošlé impulsy. Touto metodou pracuje nejvíce UZ přístrojů určených pro stavební materiály. Kmitočet UZ vlnění je dán vlastní frekvencí budiče. Používají se budiče o kmitočtech 20 kHz až 6 MHz (pro stavební materiály běžně 20 – 100 kHz, max. do 500 kHz).

### Ultrazvuková impulsní průchodová metoda

Tato metoda je nejvíce využívanou v celé oblasti kontroly stejnorodosti, pevnosti a defektoskopie stavebních materiálů. Akustické veličiny, zjištěné při postupu pružných vln zkoumaným prostředím, umožňují poskytnout nepřímou informaci o mechanických vlastnostech, zpracování a vadách struktury. Zjišťuje se akustický tlak vzniklý při průchodu ultrazvukového vlnění materiálem, nebo doba potřebná pro průchod ultrazvukového vlnění vyšetřovaným prostředím. Vlnění je vysíláno formou krátkých impulsů budicí sondou na jedné straně zkoušeného vzorku a je snímáno na protilehlém povrchu prostředí přijímací sondou. Akustický tlak přijímaného ultrazvukového vlnění se transformuje na elektrický signál, který se zesílí zesilovačem. Mezi vyšetřovaným prostředím a sondami musí být dobrá akustická vazba. V této metodě, kde se většinou používají podélné ultrazvukové vlny, je vazebné prostředí kapalně a vyšetřovaná látka tuhá. Jako vazební prostředí se většinou používají speciální gely.

Ultrazvukové vlnění je vysíláno a přijímáno pomocí elektroakustických měničů, které jsou součástí ultrazvukových sond. Převádějí elektrickou energii na mechanickou a naopak. Podle druhu vysílaných, respektive přijímaných ultrazvukových vln se sondy mohou dělit na sondy pro podélné, příčné a povrchové vlnění. Podle provedení se sondy dělí na přímé, vysílající kolmo ke svému povrchu, sondy úhlové pro vysílání pod určitým úhlem a sondy dvojité, které vysílají i přijímají ultrazvukové vlny, určené pro odrazovou metodu. Typů a tvarů ultrazvukových sond je velké množství. Můžeme je dělit podle principu, na kterém pracují, podle vlastní frekvence, materiálu, pro který jsou určeny a podle způsobu jejich použití. Pro účely zjišťování mechanických parametrů historických stavebních materiálů se osvědčily sondy pro podélné vlnění s vlastní frekvencí 54 kHz.

V rámci této metodiky bude sestavena kalibrační křivka pro pískovcové zdící prvky, kde vstupem bude hodnota impulsní průchodové rychlosti a výstupem pevnost materiálu v tlaku. Kalibrační křivka bude následně korigována na naměřenou vlhkost materiálu. Pokud není k dispozici přesná korekce pro konkrétní materiál, provede se korekce zjednodušeně. Tato korekce uvažuje, že pro vysušený materiál platí naměřená hodnota, pro saturovaný se zvýší faktorem 1,2, pro konkrétně naměřenou hodnotu vlhkosti se interpoluje lineárně.

### 3.3. Metoda SONREB

Metoda spočívá v kombinaci impulsní průchodové ultrazvukové metody a tvrdoměrné metody při zjišťování pevnosti pískovcového zdícího prvku. Kombinace dvou vstupních parametrů vede k vyšší spolehlivosti naměřené pevnosti. Některé ultrazvukové přístroje (například PunditLab+) umožňují

nahrání kalibrační křivky do vnitřní paměti přístroje a po zadání naměřené hodnoty odrazu z tvrdoměru zobrazují pevnost betonu přímo na obrazovce spolu s rychlostí šíření impulsu.

Vztah pro výpočet pevnosti materiálu v tlaku  $f_c$  na základě rychlosti šíření impulsu s hodnoty z tvrdoměru je následující:

$$f_c = a \cdot V^b \cdot S^c$$

kde

$V$  je naměřená rychlost šíření impulsu [m/s],

$S$  je tvrdoměrem naměřená hodnota odrazu (R-hodnota pro klasické tvrdoměry, Q-hodnota pro dynamické)

$a, b, c$  jsou kalibrační konstanty

Kalibrační konstanty SONREB metody pro historické materiály nejsou dostupné v literatuře, pro navrhované použití je tedy třeba jejich stanovení na základě výsledků destruktivních zkoušek na zkušebních tělesech.

V rámci této metodiky bude sestavena sada kalibračních konstant pro pískovcové zdicí prvky, kde vstupem bude hodnota odrazu (R- nebo Q-hodnota) a impulsní průchodová rychlost s korekcí na vlhkost materiálu a výstupem pevnost materiálu v tlaku. Pokud není k dispozici přesná korekce pro konkrétní materiál, provede se korekce zjednodušeně. Tato korekce uvažuje, že pro vysušený materiál platí naměřená hodnota, pro saturovaný se zvýší faktorem 1,2, pro konkrétně naměřenou hodnotu vlhkosti se interpoluje lineárně.

Kalibrační vztahy

Aby bylo dosaženo dostatečné spolehlivosti výsledků měření dle této metodiky, je třeba vytvořit statisticky významný soubor měření mechanických parametrů na pískovcových zdicích prvcích. Vzhledem k nutnému rozsahu měření se bude jednat práci na řadu let, s nutností provést řádově stovky měření na desítkách vzorků. Rozsah zkoušek, provedených do dnešního dne, bohužel nemá dostatečnou statistickou signifikanci, aby bylo možno z nich určené kalibrační vztahy prohlásit za směrodatné.

Kalibrační vztah pro pevnost v tlaku  $f_{c.ht}$  v závislosti na hodnotě odrazu z tvrdoměru má tento obecný tvar:

$$f_{c.ht} = a_{ht}S + b_{ht}$$

kde

$S$  je tvrdoměrem naměřená hodnota odrazu (R-hodnota pro klasické tvrdoměry, Q-hodnota pro dynamické)

$a_{ht}, b_{ht}$  jsou kalibrační konstanty

Kalibrační vztah pro pevnost v tlaku  $f_{c.ht}$  v závislosti na hodnotě impulsní průchodové rychlosti má tento obecný tvar:

$$f_{c.pv} = a_{pv}V + b_{pv}$$

kde

$V$  je naměřená rychlost šíření impulsu [m/s],

$a_{pv}$ ,  $b_{pv}$  jsou kalibrační konstanty

Pro reálné materiály je málo pravděpodobné, že v případě provedení obou měření bude po dosažení do kalibračních vztahů vycházet v obou případech stejná hodnota. V tom případě bude třeba použít kalibrační vztah pro metodu SONREB, dle kapitoly 3.3 této metodiky.

### 3.4.Vlastní metodika

Postup prací při určování mechanických parametrů, v tomto případě pevnosti v tlaku, historických pískovcových zdicích prvků pomocí plně nedestruktivních zkoušek:

1. Vybrat vhodné měřicí místo. Místo musí splňovat několik kritérií: dostupnost pro provedení vlastní zkoušky, materiál s reprezentativními vlastnostmi pro zbytek konstrukce (tedy ne viditelně odlišné místo), možnost opakovatelnosti zkoušky na témže místě, dostatečně masivní prvek pro provedení tvrdoměrné zkoušky (při úderu tvrdoměrem do subtilních částí může dojít k poškození), vhodnost pro provedení impulsní průchodové zkoušky (dva rovnoběžné povrchy v rozumné vzdálenosti pro přímé prozvučení nebo dva kolmé povrchy pro polopřímé prozvučení nebo rovný povrch bez trhlin pro nepřímé prozvučení)
2. Očistit zkušební místo na povrchu konstrukce. Pro měření tvrdoměrem je třeba rovný povrch o rozměrech alespoň 100×100 mm, pro měření impulsní průchodové rychlosti ideálně dva protilehlé povrchy o známé vzdálenosti (případně je možné měřit průchodovou rychlost nepřímo na témže povrchu nebo polopřímou na vzájemně kolmých površích)
3. Provést bezkontaktní měření vlhkosti materiálu, například pomocí kapacitního příložného vlhkoměru.
4. Provést tvrdoměrnou zkoušku na povrchu tělesa, a to tvrdoměrem typu N nebo L pro pískovcové kamenné zdicí prvky. Zkouška se provede dle návodu k použití konkrétního přístroje, pomocí 9 nebo 13 úderů na čistý povrch bez výstupků, zaznamenává se hodnota odrazu (R- nebo Q-hodnota). V případě výskytu odlehlých hodnot zkoušku opakovat, dokud nebude zajištěna konzistence výsledků.
5. Provést měření impulsní průchodové rychlosti dle návodu k použití konkrétního přístroje. Velikost impulsní průchodové rychlosti sama o sobě indikuje přítomnost degradace materiálu. Je třeba měření v každém místě alespoň třikrát opakovat a ověřit konzistenci výsledků.
6. Vyhodnocení měření dle kalibračních vztahů, uvedených v kapitole 0 této metodiky, včetně korekce na vlhkost materiálu.
7. Pokud jsou provedena měření podle bodů 3. a 4., pomocí metody SONREB určit jedinou výslednou pevnost v tlaku, dle vztahu z kapitoly 3.3 této metodiky, včetně korekce na vlhkost materiálu.



### 3.5. Přibližné hodnoty kalibračních konstant pro jednotlivé stavební materiály

V následující tabulce je předpokládáno, že tvrdoměrné hodnoty jsou uváděny v Q a impulsní průchodové rychlosti v km/s. Hodnoty pevnosti v tlaku budou vypočteny v MPa.

Materiál zdicího prvku	$f_{c,ht}$		$f_{c,pv}$		SONREB		
	$a_{ht}$	$b_{ht}$	$a_{pv}$	$b_{pv}$	a	b	c
Pískovec	1,4	-33	8,2	6,5	0,042	0,56	0,56

## 4. Srovnání novosti postupů

Metodika pro stanovení pevnosti v tlaku historických stavebních materiálů na základě plně nedestruktivního zkoušení obsahuje nový prvek. Jedná o využití metody SONREB, kombinující odrazovou tvrdoměrnou metodu a metodu impulsní průchodové rychlosti, čímž dochází ke zvýšení spolehlivosti získaných výsledků. Dále obsahuje kalibrační vztahy pro určení pevnosti v tlaku materiálu i v případě, že nejsou k dispozici obě měření, potřebná pro výpočet pevnosti metodou SONREB, tyto vztahy byly odvozeny na základě experimentálního vyšetřování materiálových parametrů na laboratorních vzorcích. Metoda zahrnuje i vliv vlhkosti materiálu na veličiny měřené pomocí NDT metod, konkrétně impulsní průchodovou rychlost. Pomocí metody SONREB se dosáhne značného zpřesnění hodnot získaných nedestruktivním zkoušením. Tyto metody se vyznačují šetrností a nulovým poškozením konstrukce či materiálu, která je důležitá pro maximální zachování původního stavu konstrukcí a minimální nutnosti rekonstrukcí.

Při zjišťování údajů o stavu materiálu je ve všeobecném zájmu využívat metody, které vyžadují jen šetrný zásah do vyšetřované konstrukce. Obzvláště u historických objektů je toto hledisko velice významné. Výsledné hodnoty těchto plně nedestruktivních metod nejsou však přesné a příliš spolehlivé a ve většině případů musí být doplněny šetrnými destruktivními či destruktivními metodami. Jakékoliv destruktivní metody však vyžadují zásah do konstrukce což je u historických konstrukcí nežádoucí. Při použití destruktivních metod se nenávratně ztrácí část původního materiálu a konstrukce. Zejména z tohoto hlediska se klade velký důraz na nedestruktivnost zkoušení. V oblasti NDT metod je však nutné provést množství měření, které povedou k dostatečnému zvýšení spolehlivosti získaných hodnot, tak aby dokázaly konkurovat destruktivním metodám.

## 5. Popis uplatnění certifikované metodiky

Metodika je určena zejména pro provádění diagnostiky materiálů historických stavebních konstrukcí, jmenovitě pro určení pevnosti v tlaku historických zdicích prvků z pískovce. V současnosti se ve světě nachází poměrně značné množství historických či dokonce památkově chráněných objektů z pískovce, u kterých je třeba provádět průzkumy aktuálního stavu. Průzkumy se u těchto historicky cenných objektů provádějí za účelem získání údajů o aktuálním stavu těchto konstrukcí. Tyto údaje jsou nezbytné pro hodnocení stavu stávající konstrukcí, pro návrh opatření v případě rekonstrukcí, havárií a zesilování.

Hodnoty získané jako výsledek uplatnění této metodiky jsou využitelné jako vodítko při projektování rekonstrukcí historických objektů nebo posuzování vlivu výstavby probíhající v okolí historického objektu na něj.

## 6. Seznam související literatury

- AUFMUTH, R.E., 1974. A Systematic Determination of Engineering Criteria for Rock., .
- AYDIN, A. and BASU, A., 2005. The Schmidt hammer in rock material characterization. *Engineering Geology*, 81(1), pp. 1-14.
- BENITO, G., MACHADO, M.J. and SANCHO, C., 1993. Sandstone weathering processes damaging prehistoric rock paintings at the Albarracin Cultural Park, NE Spain. Springer Berlin / Heidelberg.
- CARGILL, J.S. and SHAKOOR, A., 1990. Evaluation of empirical methods for measuring the uniaxial compressive strength of rock, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts 1990*, Elsevier, pp. 495-503.
- CHANG, C., ZOBACK, M.D. and KHAKSAR, A., 2006. Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 51(3), pp. 223-237.
- DEARMAN, W. and IRFAN, T., 1978. Assessment of the degree of weathering in granite using petrographic and physical index tests, *Alteration et protection des monuments en pierre: colloque international 1978*, pp. 35.
- DEERE, D.U. and MILLER, R., 1966. Engineering classification and index properties for intact rock, .
- GARCÍA-TALEGON, J., VICENTE, M., VICENTE-TAVERA, S. and MOLINA-BALLESTEROS, E., 1998. Assessment of chromatic changes due to artificial ageing and/or conservation treatments of sandstones. *Color Research & Application*, 23(1), pp. 46-51.
- GOUDIE, A.S., 2006. The Schmidt Hammer in geomorphological research. *Progress in Physical Geography*, 30(6), pp. 703-718.
- HARAMY, K. and DEMARCO, M., 1985. Use of the Schmidt hammer for rock and coal testing, *The 26th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS) 1985*.
- KAHRAMAN, S., 2001. Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38(7), pp. 981-994.
- KATZ, O., RECHES, Z. and ROEGIERS, J., 2000. Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt Hammer. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37(4), pp. 723.
- OKUBO, T. and TERASAKI, A., 1971. Physical properties and elastic wave velocity of rocks. *Tsuchi-To-Kiso, Japan. Geotech. Soc. 19, in Japan*, pp. 31-37.
- O'ROURKE, J., 1989. Rock index properties for geoen지니어ing in underground development. *Min.Eng.(Littleton, Colo.);(United States)*, 41(2),.
- SACHPAZIS, C.I., 1990. Correlating schmidt hardness with compressive strength and young's modulus of carbonate rocks. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 42(1), pp. 75-83.

SHEOREY, P., 1984. Schmidt hammer rebound data for estimation of large scale in situ coal strength. *Int.J.Rock Mech.Min.Sci.Geomech.Abstr.:(United States)*, 21(1),.

TURKINGTON, A.V. and PARADISE, T.R., 2005. Sandstone weathering: a century of research and innovation. *Geomorphology*, 67(1–2), pp. 229-253.

VERSTRYNGE, E. et al., 2014. Multi-scale analysis on the influence of moisture on the mechanical behavior of ferruginous sandstone, *Construction and Building Materials*, 54, pp. 78-90

XU, S., GRASSO, P. and MAHTAB, A., 1990. Use of Schmidt hammer for estimating mechanical properties of weak rock, *Proceedings of the 6th International IAEG Congress 1990*, pp. 511-519.

YAŞAR, E. and ERDOĞAN, Y., 2004. Estimation of rock physicochemical properties using hardness methods. *Engineering Geology*, 71(3), pp. 281-288.

YILMAZ, I. and SENDIR, H., 2002. Correlation of Schmidt hardness with unconfined compressive strength and Young's modulus in gypsum from Sivas (Turkey). *Engineering Geology*, 66(3), pp. 211-219.

## **7. Seznam předcházejících publikací**

ČERNÝ, R., 2012. Modelové a diagnostické předpoklady stanovení vlivu proměnlivého prostředí na degradaci historického zdiva, ČVUT v Praze, 2012, ISBN 978-80-01-05147-4

JERMAN, M. et al, 2013. Properties of plasters suitable for reconstruction of historical buildings, in: *Structural Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture XIII*, WIT Press, Southampton, pp. 369-378

VEJMEJKOVÁ, E. et al, 2013. Mechanical, hygric and thermal properties of building stones, in: *Structural Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture XIII*, WIT Press, Southampton, pp. 357-367

ČERNÝ, R., 2013. Počítačové a experimentální metody pro stanovení vlivu proměnlivého prostředí na degradaci historického zdiva, ČVUT v Praze, ISBN 978-80-01-05385-0