České vysoké učení technické v Praze
Fakulta stavební

Czech Technical University in Prague
Faculty of Civil Engineering

Ing. Tomáš Čejka, Ph.D.

Stanovení zůstatkové zatížitelnosti historických staveb

Determination of residual carrying capacity of historic buildings

Summary

The habilitation paper briefly summarizes the experimental findings obtained by studying and analyzing different types of masonry structures. The diversity of the results of experimental research on different types of structures indicates the seriousness of the problem of assesment of physical and mechanical properties of materials, structures and parts for proper design of the overall reconstruction and rehabilitation works. The thesis compares the explanatory value of commonly used destructive and nondestructive methods of structural and technical survey and the effect of degradation processes on obtained results.

Souhrn

Habilitační spis stručně shrnuje poznatky získané experimentálním zkoumáním a analýzou různých typů zděných konstrukcí. Různorodost výsledků experimentálního výzkumu jednotlivých typů konstrukcí ukazuje na závažnost problému stanovení odpovídajících fyzikálně mechanických vlastností materiálů, konstrukcí a jejich jednotlivých částí pro správný návrh celkové rekonstrukce a obnovy stavby. Práce porovnává vypovídací hodnotu nejčastěji používaných destruktivních a nedestruktivních metod stavebně technického průzkumu a jejich ovlivnění degradačnímu procesy.

Klíčová slova

pórovitost, distribuce pórů, vlhkost, degradační procesy, interakce, destruktivní metody, nedestruktivní metody, zůstatková pevnost, historické zdivo

Keywords

porosity, distribution of pores, moisture, degradation processes, interactions, destructive methods, non-destructive method, the residual strength, historic masonry

Obsah:

1. Úvod 6
2. Faktory ovlivňující zůstatkovou únosnost historického zdiva 6
2.1 Fyzikálně mechanické vlastnosti složek zdiva..... 7
2.2 Interakce zdicích prvků a pojiva 11
2.3 Obsah vlhkosti obsažené v pórech 13
3. Terénní a laboratorní výzkum stanovení zůstatkové pevnosti zdicích prvků a pojiva 18
3.1 Analýza výsledků terénního a laboratorního výzkumu 19
3.2 Shrnutí 23
4. Závěr 24
5. Poděkování 25
6. Seznam použité literatury 25

1. Úvod

Přes poměrně rozsáhlý výzkum zděných konstrukcí není zcela uspokojivě řešena otázka spolehlivého určení fyzikálních a mechanických vlastností jako např. zbytkové únosnosti (zatížitelnosti) stávajících, zejména historických kamenných, smíšených a cihelných zděných konstrukcí [1,2]. Především rozmanitost a variabilita jednotlivých složek zdiva jako kompozitního prvku, neznalost počátečních vlastností, intenzity degradačních procesů, rozdílné provedení, popř. i pozdější zásahy jsou v souhrnu příčinou náročnosti stanovení fyzikálně mechanických vlastností historického zdiva a jejich vývoje v čase [3,4,5]. Zcela specifické problémy je nutné řešit u tzv. vícevrstvého zdiva s vnějšími vrstvami vyzděnými s uplatněním některých způsobů vazby zdiva a s vnitřní vrstvou tvořenou úlomky kamenů různých velikostí pojenými větším množstvím malty (*obr. 1*).

Obr. 1 Příklady vícevrstvého zdiva

Degradační procesy způsobené nejčastěji zvýšenou vlhkostí zdiva probíhají v maltě i ve zdicích prvcích [4], [6]. Náročnost celé problematiky zvyšují v případě památkově chráněných objektů specifické požadavky památkové ochrany těchto objektů, které v řadě případů vylučují použití destruktivních diagnostických metod.

Problém stanovení zůstatkové únosnosti historického kamenného a smíšeného zdiva není uspokojivě řešen ani v současné legislativě – normách pro navrhování a posuzování zděných konstrukcí (ČSN ISO 13822 – Hodnocení existujících zděných konstrukcí a ČSN EN 1996 – Navrhování zděných konstrukcí).

2. Faktory ovlivňující zůstatkovou únosnost historického zdiva

Stanovení zůstatkové zatížitelnosti historického zdiva by mělo předcházet každé obnově, popř. rekonstrukci historického objektu, při níž dochází ke

změně zatížení a tím k porušení ustáleného stavu napětí. K základním faktorům ovlivňujícím zůstatkovou zatížitelnost historického zdiva patří:

- fyzikálně mechanické vlastnosti složek zdiva
- interakce zdicích prvků a pojiva
- obsah vlhkosti obsažené v pórech

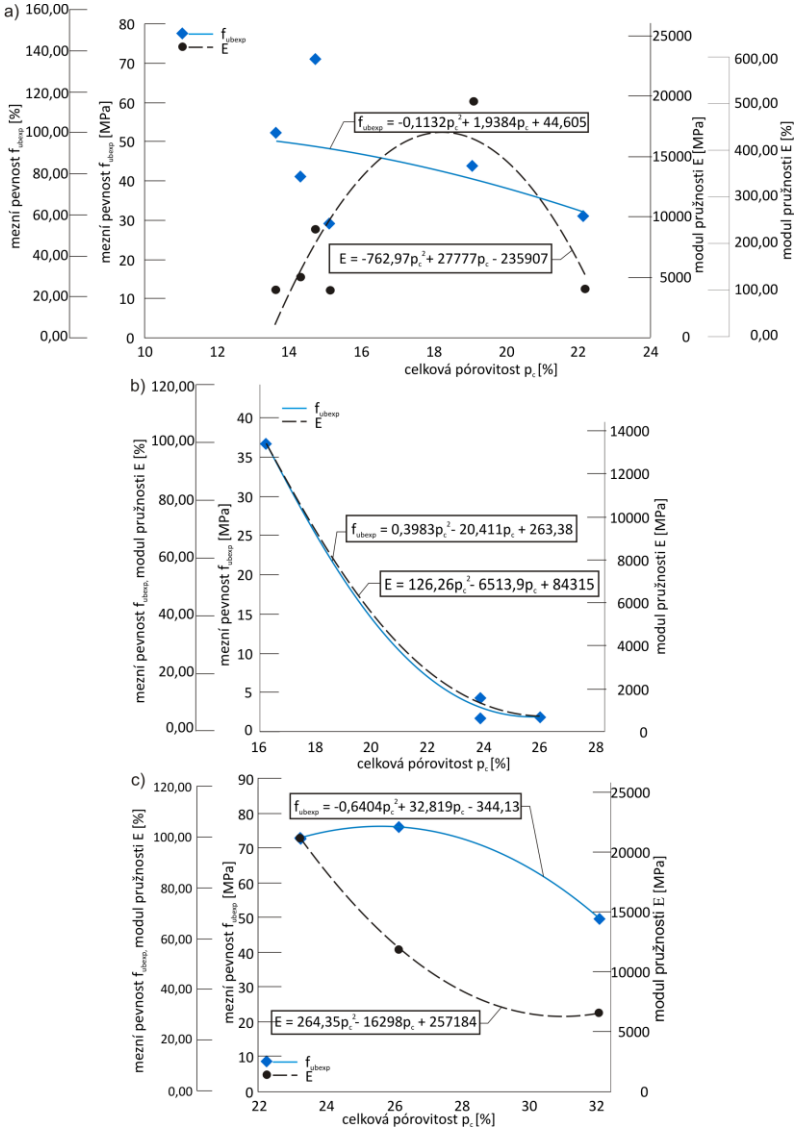
2.1 Fyzikálně mechanické vlastnosti složek zdiva

Stavitelé z období románského a gotického převážně používali zdicí prvky ze sedimentárních hornin (pískovce, opuka), v menším rozsahu vápence, diority a granity a jako pojivo vápennou maltu s pojivem nejčastěji ze vzdušného vápna. U sedimentárních hornin – opuka, pískovce – jsou jejich fyzikálně mechanické vlastnosti, jak prokázal experimentální a laboratorní výzkum, závislé na pórovém systému [7].

Z obr. 2, na němž jsou graficky znázorněny dílčí výsledky experimentálního výzkumu, je patrný významný vliv **celkové pórovitosti** na mezní pevnost v tlaku f_{ubexp} a statický modul pružnosti v tlaku E sedimentárních hornin. Zvýšená celková pórovitost je provázena výrazným poklesem mezní pevnosti v tlaku f_{ubexp} a statického modulu pružnosti v tlaku E. Vysvětlení lze hledat ve snížení obsahu pojivové složky, která „diskrétně" váže jednotlivá zrna a částečky základní „matrice" v místech jejich kontaktu. Pro jednotlivé případy vybraných materiálů činí pokles:

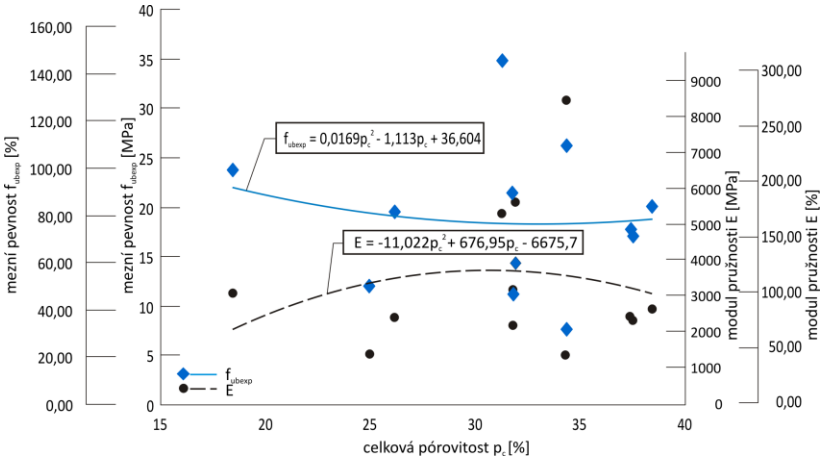
- u vzorků **jemnozrnného pískovce** (*obr. 2a*) pro mezní pevnost v tlaku f_{ubexp} cca 40% hodnoty mezní pevnosti v tlaku f_{ubexp} při nejnižší celkové pórovitosti, pro statický modul pružnosti v tlaku E cca 10% hodnoty statického modulu pružnosti v tlaku E při nejnižší celkové pórovitosti;
- u vzorků **hrubozrnného pískovce** (*obr. 2b*) pro mezní pevnost v tlaku f_{ubexp} cca 95% hodnoty mezní pevnosti v tlaku f_{ubexp} při nejnižší celkové pórovitosti, pro statický modul pružnosti v tlaku E cca 95% hodnoty statického modulu pružnosti v tlaku E při nejnižší celkové pórovitosti;
- u vzorků **opuky** (*obr. 2c*) pro mezní pevnost v tlaku f_{ubexp} cca 35% hodnoty mezní pevnosti v tlaku f_{ubexp} při nejnižší celkové pórovitosti, pro statický modul pružnosti v tlaku E cca 75% hodnoty statického modulu pružnosti v tlaku E při nejnižší celkové pórovitosti;
- na rozdíl od zdicích prvků ze sedimentárních hornin zvýšená porozita **plných pálených cihel** (*obr. 3*) nemá tak výrazný vliv na fyzikálně mechanické vlastnosti plných pálených cihel. Mezní pevnost v tlaku f_{ubexp} plných pálených cihel s celkovou pórovitostí 38% je cca o 15% nižší než mezní pevnost v tlaku f_{ubexp} plných pálených cihel s celkovou pórovitostí 18%. Zvýšení celkové pórovitosti je provázeno pozvolným nárůstem statického modulu pružnosti E. Statický modul pružnosti v tlaku E plných pálených cihel s celkovou pórovitostí 38% je o 50% vyšší než statický

modul pružnosti v tlaku E plných pálených cihel s celkovou pórovitostí 18%.



Obr. 2 Mezní pevnosti v tlaku f_{ubexp} a statický modul pružnosti v tlaku E v závislosti na celkové pórovitosti při hmotnostní vlhkosti vzorků w_{hm} = 0% -

a) jemnozrnného pískovce, b) hrubozrnného pískovce, c) opuky

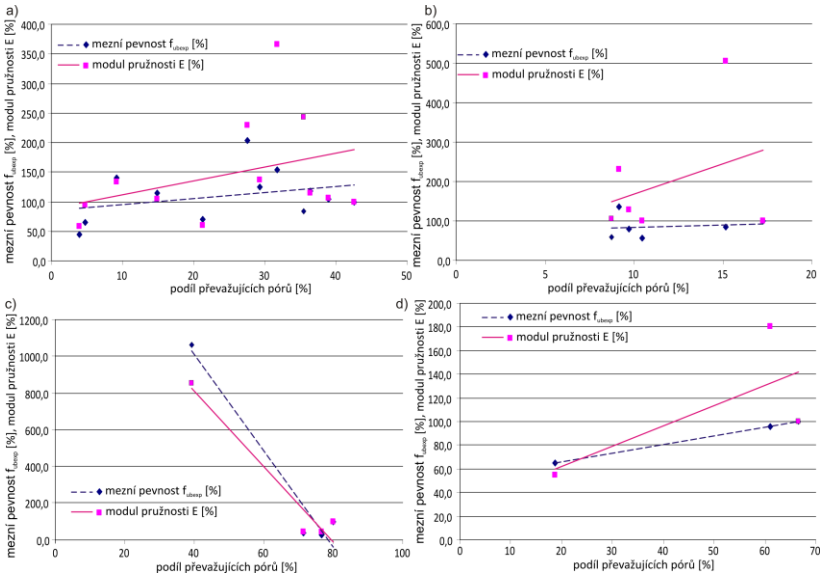


Obr. 3 Mezní pevnosti v tlaku f_{ubexp} a statický modul pružnosti v tlaku E cihel v závislosti na celkové pórovitosti při hmotnostní vlhkosti vzorků w_{hm} = 0%

Experimentální výzkum vlivu **distribuce pórů** na mezní pevnost v tlaku f_{ubexp} a statického modulu pružnosti v tlaku *E* prokázal (obr. 4), že v případě plných pálených **cihel** (*obr. 4a*) lze konstatovat, že s narůstajícím podílem pórů o velikosti poloměru $r \in (7*10^{2}; 5*10^{3})$ z cca 4% na cca 42% – makropóry – ve struktuře cihelného střepu narůstá mezní pevnost v tlaku f_{ubexp} o cca 35% a statický modul pružnosti v tlaku *E* o cca 180%. V případě jemnozrnného a hrubozrnného pískovce a opuky lze na základě rozboru omezeného počtu vzorků konstatovat, že s narůstajícím podílem větších pórů patřících mezi makropóry a hrubých pórů lze vypozorovat tendence ke snížení mezní pevnosti v tlaku f_{ubexp} a statického modulu pružnosti v tlaku *E*. U **jemnozrnného pískovce** (*obr. 4b*) se nárůst makropórů a hrubých pórů o cca 8% projevil poklesem mezní pevnosti v tlaku o cca 40 – 50% a poklesem statického modulu pružnosti v tlaku na cca 50% původní hodnoty. V případě **hrubozrnného pískovce** (*obr. 4c*) nárůst hrubých pórů z 39% na 79% způsobil pokles mezní pevnosti v tlaku f_{ubexp} a statického modulu pružnosti v tlaku *E* na 6 – 10% původní hodnoty. U **opuky** (*obr. 4d*) s převažujícími póry o poloměrech 10 až 150 nm došlo s poklesem jejich podílu z 66,5% na 18,8% k relativnímu poklesu mezní pevnosti v tlaku f_{ubexp} o 35% a statického modulu pružnosti v tlaku *E* o cca 80% .

Již od středověku byly v pozdně románském a následně gotickém slohu používány pálené cihly, např. v gotice tzv. buchty charakteristické svým rozměrem. Použitá hlína, postup pálení, složení cihlářské hmoty, použité

přísady, lisovací tlak, vypalovací teplota jsou hlavní faktory ovlivňující pórový systém cihel a tím i jejich fyzikální a mechanické vlastnosti.

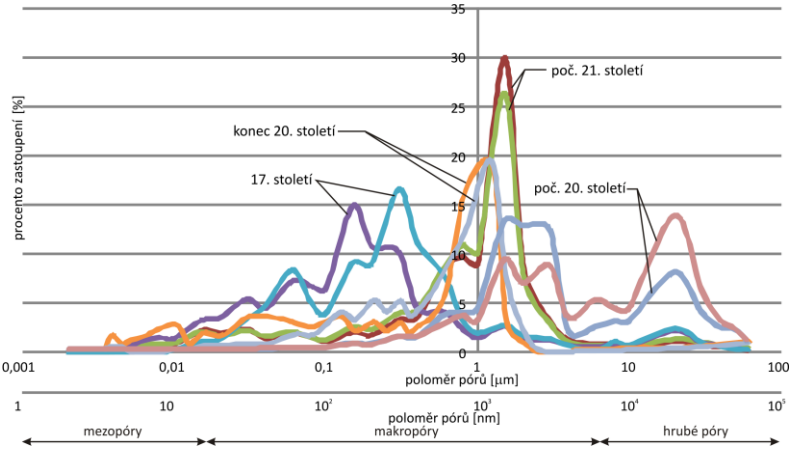


Obr. 4 Závislost mezní pevnosti v tlaku f_{ubexp} a modulu pružnosti v tlaku E na podílu převažujících pórů u vzorků a) plných pálených cihel, b) jemnozrnného pískovce, c) hrubozrnného pískovce, d) opuky

Struktura pálené cihly a sedimentárních hornin je rozdílná. V sedimentárních horninách, dvoufázových strukturách s náhlou změnou vlastností na rozhraní fází, jsou drobná zrna nejčastěji na bázi křemíku – vytvářejí tzv. matrici – vázána v kontaktních plochách pojivem nejčastěji na bázi modifikací vápníku obsahujícím nestabilní rozpustné soli. Rozpustné nestabilní soli jsou zpravidla postupně při cyklických změnách vlhkosti vyplavovány na povrch hornin. Tímto procesem dochází ke změně pórového systému a změně fyzikálně mechanických vlastností sedimentárních hornin, resp. zdicích prvků z těchto hornin.

V procesu vypalování cihlářské hlíny dochází v závislosti na jejím složení a vypalovací teplotě k dehydrataci jílových minerálů, odštěpení v amorfní podobě SiO_2, a tak se vytvoří ve srovnání s pojivem sedimentárních hornin stabilnější struktura složená z taveniny, která po zchladnutí vytvoří tuhý roztok (silikátové sklo), potáhne a propojí zrnka písku a ostatní nejílové složky. Zpravidla cyklické změny vlhkosti, která není kontaminována slabými roztoky kyselin, nejsou na rozdíl od sedimentárních hornin příčinou

chemických degradačních procesů a následně změny pórového systému cihel. Historické cihly charakteristické pórovým systémem s převažujícím podílem makropórů jsou např. odolnější proti mrazovým a rekrystalizačním cyklům (*obr. 5*).



Obr. 5 Distribuční křivky pórů vzorků cihel z různého období

2.2 Interakce zdicích prvků a pojiva

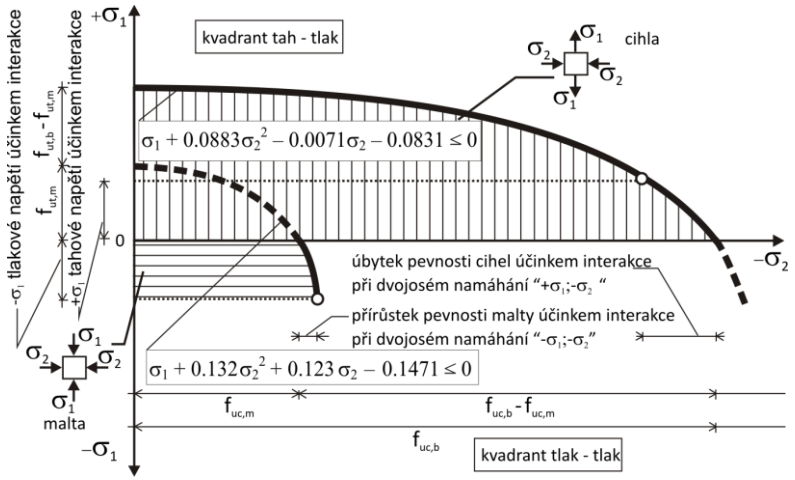
V důsledku vzájemného spolupůsobení zdicích prvků a malty je mezní pevnost zdiva f_{msc} menší než pevnost jeho únosnější složky – zdicích prvků (např. cihel f_{uc}), avšak zpravidla větší než pevnost, která by odpovídala pevnosti méně únosné složky zdiva – spojovací malty malty (f_{mc}) (*obr. 6*) [8].

U běžných druhů zdiva s pojivem o pevnosti 2 – 5 MPa soudržnost malty a cihel zajišťuje jejich spolupůsobení a tím i shodné příčné přetvoření.

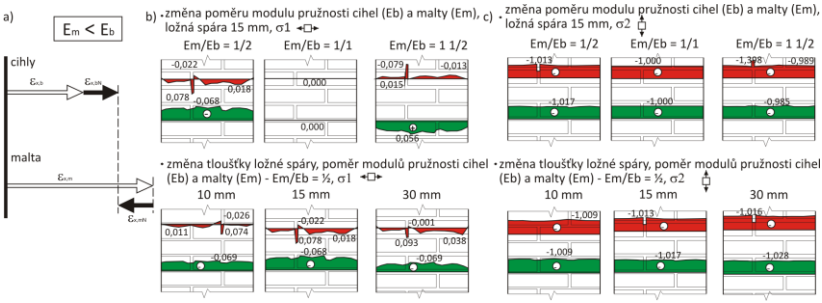
Pro případ větší přetvárnosti malty, $E_m < E_c \rightarrow \varepsilon_{ym} > \varepsilon_{yc}$, vzniká ve zdících prvcích (cihlách) triaxiální stav napjatosti charakteristický vodorovnými tahovými napětími $+\sigma_x$. Podmínku kompatibility (*obr. 7a*) v jednom směru (stejné příčné deformace cihel a malty v blízkém okolí styčné spáry, $\varepsilon_{x,c} = \varepsilon_{x,m}$) můžeme přibližně napsat ve tvaru $\varepsilon_{x,c} + \varepsilon_{x,c\pm\sigma x} = \varepsilon_{x,m} - \varepsilon_{x,m\pm\sigma x}$, kde $\varepsilon_{x,c(m)\pm\sigma x}$ je přírůstek (úbytek) vodorovného přetvoření zdicích prvků (malty) účinkem normálového napětí $\pm\sigma_x$.

Při určitém zjednodušení lze tento prostorový mechanismus vzájemné interakce zdících prvků a pojiva převést na rovinný stav napjatosti popsaný složkami σ_x, σ_y, τ_{xy}. Mechanismus interakce obou složek zdiva a výsledky mikroanalýzy tlačeného zděného prvku pro uvedený poměr pevnosti f, resp. modulů pružnosti E je znázorněný na obr. 7. Z průběhu hlavního napětí σ_1

je patrný vliv rozdílných modulů pružnosti cihel (E_c) a malty (E_m) a tloušťky ložné spáry. Rozdělením zděného pilíře při zatížení dostředným tlakem průběžnými svislými trhlinami na jednotlivé „sloupky“ je následně dosaženo mezního stavu únosnosti zděného pilíře. Rozhodující význam při vzniku a rozvoji tahových trhlin v tlačeném zdivu má pevnost cihly v tahu, která se významně uplatňuje při porušení zdiva příčným tahem.



Obr. 6 Schéma pevnosti (čáry pevnosti) cihel a malty vyjádřené v souřadném systému hlavních napětí σ_1 x σ_2 – úbytek (přírůstek) pevnosti cihel (malty) způsobený vzájemnou interakcí v tlačeném zdivu ($f_{uc(t),m}$ – pevnost malty v tlaku (tahu), $f_{uc(t),b}$ – pevnost cihel v tlaku)



Obr. 7 a) Podmínka kompatibility zdiva, b) Průběh hlavních napětí σ_1 v tlačeném zděném pilíři tl. 450 mm v závislosti na poměru $E_c : E_m$ a tloušťce ložné spáry, c) Průběh hlavních napětí σ_2 v tlačeném zděném pilíři tl. 450 mm v závislosti na poměru $E_c : E_m$ a tloušťce ložné spáry

Vyjádříme-li pevnost cihly při dvouosé napjatosti v souřadném systému σ_1 x σ_2, kde krajní hodnoty pevnosti při nulové hodnotě jednoho z hlavních napětí odpovídají mezní pevnosti stanovené pro jednoosou napjatost, tj. σ_2 = mezní pevnost v tlaku f_{uc} a σ_1 = mezní pevnost tahu f_{ut}, lze podmínku mezní pevnosti cihly při dvouosé napjatosti v souřadném systému σ_1 x σ_2 např. pro poměr mezních pevností f_{uc}/f_{ut} = 1/0,083 přibližně vyjádřit rovnicí obalové křivky pevnosti cihly (popř. jiného kusového staviva) při dvouosé napjatosti:

$$\sigma_1 + 0.0883\sigma_2^2 - 0.0071\sigma_2 - 0.0831 \leq 0$$

Podobně lze podmínku porušení zdiva vyjádřit v souřadném systému ε_1 x ε_2 – např. pro zvolený poměr mezních pevností $\varepsilon_{uc,m}/\varepsilon_{ut,m}$ = 1/0.215 (stanoveno z experimentálních zkoušek cihel) lze psát:

$$\varepsilon_1 + 0.2434\varepsilon_2^2 - 0.0388\varepsilon_2 - 0.2097 \leq 0$$

Obdobně lze vyjádřit pevnost zdiva při dvouosé napjatosti v souřadném systému $\varepsilon_{1,m}$ x $\varepsilon_{2,m}$, které umožňuje provést nelineárně pružnou analýzu porušování zdiva tahovými trhlinami v závislosti na vlastnostech zdicích prvků a malty v tahu. Hodnoty poměrných mezních přetvoření $\varepsilon_{1,m}$ a $\varepsilon_{2,m}$ je nutné určit experimentálně pro různé hodnoty poměru E_m/E_c.

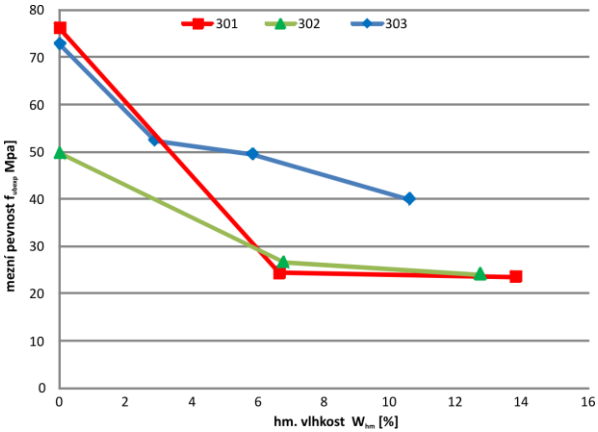
2.3 Obsah vlhkosti obsažené v pórech

Pružná přetvoření sedimentárních hornin s charakteristickou dvousložkovou strukturou jsou dána schopností pružného přetvoření mezizrnečné látky (pojiva). Vznik strukturních a vlasových trhlin, které předcházejí porušení materiálů s touto strukturou, je charakteristický mikroposuny mezi jednotlivými zrny, které jsou provázené narušením kontaktů mezi zrny a mezirnečnou hmotou – pojivem. Hodnota mezního zatížení, při němž vznikají strukturní a vlasové trhliny především závisí na pevnosti v tahu (adhezi) mezizrnečné hmoty a zrn v kontaktních plochách. Při nasycení pórů vlhkostí dochází ke vzniku tahových napětí v pojivu. Uvedené vnitřní rozpínavé síly jsou příčinou objemových změn porézních materiálů účinkem vlhkosti.

Vlhkost má všestranný účinek zejména na pórovité stavební materiály, způsobuje změnu jejich vlastností (fyzikálních, mechanických, chemických a mineralogických) a je „iniciátorem“ degradačních procesů.

Vlhkost se ve stavebních materiálech vyskytuje ve formě páry, vody, ledu anebo vrstvičky vody absorbované na povrchu pórů. Tvar, velikost a celkový objem pórů jsou určující z hlediska transportu vlhkosti v materiálu, jeho nasákavosti a schopnosti pojmout určité množství kapaliny. Většina stavebních materiálů je hydrofilní a reaguje převážně chemicky s vlhkostí obsaženou v pórovém systému [8], [9], [10], [11].

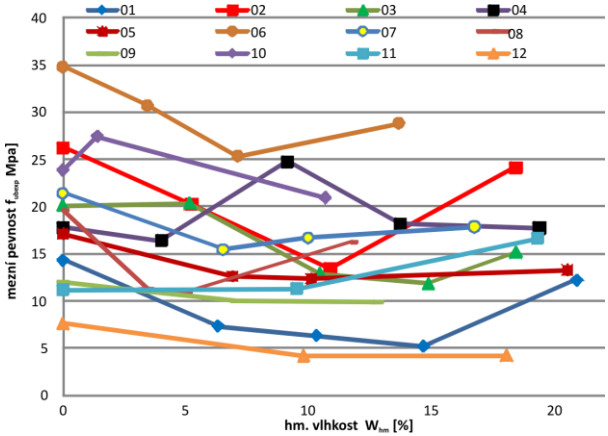
Výzkum vlivu vlhkosti na hodnotu pevnosti zdicích prvků v tlaku f_b prokázal závažný vliv vlhkosti na pevnost v tlaku a modul pružnosti porézních stavebních materiálů, se kterými se nejčastěji setkáváme u historických a památkově chráněných objektů. Experimentální výzkum probíhal na vzorcích sedimentárních hornin – opuky, jemnozrnného a hrubozrnného pískovce, cihel plných pálených a pojiva – malty (*obr. 8,9*) [7], [11], [12].



Obr. 8 Závislost mezní pevnosti v tlaku f_{ubexp} na hmotnostní vlhkosti w_{hm} jednotlivých vzorků opuky (Přední Kopanina)

Experimentální výzkum prokázal, že vyšší hmotnostní vlhkost w_{hm} je provázena snížením mezní pevnosti **opuky** v tlaku f_{ubexp} až o 55%. Závislosti mezní pevnosti v tlaku f_{ubexp} na procentu hmotnostní vlhkosti w_{hm} má u všech vzorků opuky téměř shodný průběh (*obr. 8*) charakteristický výrazným poklesem mezní pevnosti v tlaku f_{ubexp} při nárůstu vlhkosti w_{hm}.
Závislosti mezní pevnosti f_{ubexp} **plných pálených cihel** na procentu hmotnostní vlhkosti w_{hm} pro jednotlivé druhy pálených cihel jsou charakteristické dvěma rozdílnými průběhy (*obr. 9*). U většiny vzorků je závislost f_{ubexp} *x* w_{hm} charakteristická počátečním poklesem mezní pevnosti v tlaku f_{ubexp} při nárůstu hmotnostní vlhkosti w_{hm} o cca 20 - 66% a následným zvýšením mezní pevnosti v tlaku f_{ubexp}, přičemž při plné nasycenosti pórů dosahují mezní pevnosti v tlaku f_{ubexp} hodnot nižších v porovnání s mezní pevností v tlaku f_{ubexp} suchých vzorků plných pálených cihel. Nejnižší hodnoty mezní pevnosti v tlaku f_{ubexp} byly zjištěny při nasycenosti $w_{hm} \in$ (7 - 12)%. Na rozdíl od výše uvedeného u některých vzorků dochází při počátečním zvýšení vlhkosti k nárůstu mezní pevnosti

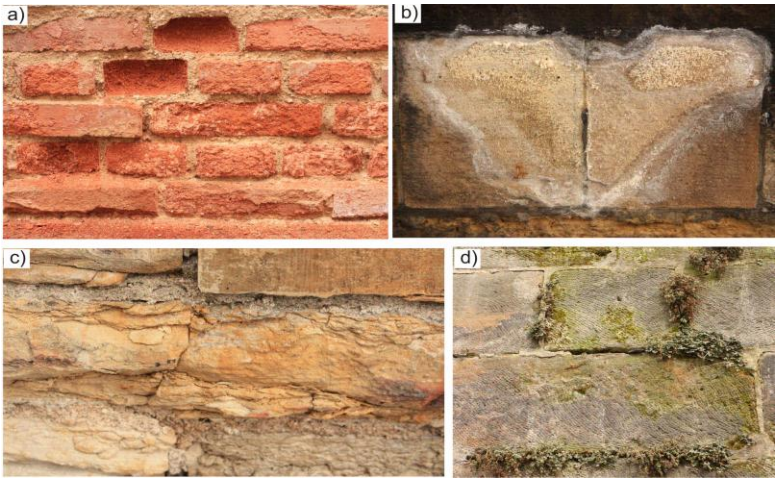
v tlaku (o cca 20%). Při zvýšení vlhkosti nad 50% nasycenosti uvedených vzorků byl zjištěn pokles mezní pevnost v tlaku (o cca 10%).
Vlhkost stavebních materiálů je provázena fyzikálními a chemickými procesy, jejichž intenzita je závislá na chemismu, vlhkosti a teplotě prostředí.



Obr. 9 Závislost mezní pevnosti v tlaku f_{ubexp} na hmotnostní vlhkosti w_{hm} jednotlivých vzorků cihel (01,02 – konec 20. st.; 03,04 – poč. 21. st.; 05 – 10 poč. 20. st.; 11,12 – 17. st.)

Studium **degradačních procesů,** vlivů a podmínek, které jsou jejich příčinou, je východiskem pro stanovení předpokládané životnosti a trvanlivosti stavebních materiálů a konstrukcí, popř. zbytkové životnosti rekonstruovaných a modernizovaných objektů. Na základě studia degradačních procesů a jejich příčin lze navrhnout spolehlivá preventivní opatření. Zvyšující se agresivita vnějšího prostředí zvýrazňuje závažnost problematiky degradačních procesů, které předcházejí vzniku poruch staveb a ztrátě funkční způsobilosti (*obr. 10*) [8].
Pro většinu historických staveb mají zvýšený význam z hlediska stanovení zůstatkové únosnosti zdiva degradační procesy. Výsledky nedestruktivních zkoušek složek zdiva mohou být zvláště u historického zdiva ovlivněny degradačními procesy, jejich největší intenzita zpravidla zasahuje povrchové a přípovrchové vrstvy zdiva s vyšší vlhkostí (procesy chemické, fyzikální a mikrobiologické koroze).
Vlivy a účinky prostředí, které způsobují degradační procesy, lze jen velmi obtížně superponovat, neboť tyto děje mění v čase významné vlastnosti materiálů a konstrukcí. Chceme-li studovat závislost sledovaných vlastností materiálu na určitém **časově proměnném vnějším účinku**, je

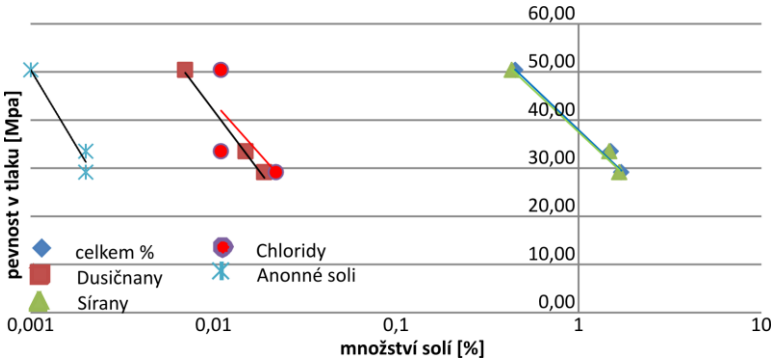
nutné zachovat stálost všech ostatních charakteristik tohoto vnějšího prostředí. Tím lze získat teoretický obraz o vlivu tohoto účinku na chování materiálu, resp. konstrukce, nikoliv však skutečný obraz, kdy dochází k současnému působení ostatních vlivů a k jejich vzájemné interakci. Tuto skutečnost je nutné mít na zřeteli při aplikaci různých laboratorních měření a testů, které zpravidla vyžadují značně komplikovanou interpretaci a mnohdy mají pouze omezené užití. **Vlhkost** má výraznější všestranný účinek a vliv – v porovnání s teplotou – na **změny fyzikálních, chemických a mineralogických vlastností porézních stavebních materiálů** (kámen, keramika, beton, dřevo), na jejich dilatometrické vlastnosti, objemovou hmotnost, tepelnou vodivost apod.



Obr. 10 Příklady degradačních procesů - a) fyzikální a chemická degradace cihelného zdiva, b) chemické degradační procesy na pískovcovém zdivu, c) fyzikální degradace opukového zdiva, d) biologická degradace pískovcového zdiva

Nedílnou součástí degradačních procesů způsobených vlhkostí jsou **chemické degradační procesy** (*obr. 10a,b*). Chemická koroze stavebních materiálů je děj nebo soubor dějů, při nichž v důsledku působení agresivního prostředí nastává snížení hlavních fyzikálně mechanických vlastností materiálů pod hodnoty nezbytné pro jejich užitnou hodnotu.
Podstatou těchto dějů jsou chemické reakce, reakce mezi tuhou a kapalnou, příp. plynnou fází. Při reakcích spolupůsobí vedle vlastní chemické reakce na fázovém rozhraní i přenosové jevy, v jejichž důsledku jsou přiváděny reagující látky a odváděny reakční produkty. Jestliže má reakce probíhat,

musí být zajištěn trvalý přenos – transport – hmotnosti reagující kapalné fáze a jejich účinných složek.
Krystalizací solí v pórech popř. **hydratačními tlaky** vznikají uvnitř struktury stavebních hmot tlaky, které postupně tuto strukturu narušují a způsobují tzv. **fyzikální degradační procesy** (*obr. 10a,c*). Zvětšení objemu některých solí, které přecházejí na hydráty (zvýšený obsah vody) způsobuje krystalizační hydratační tlaky, které dosahují hodnot řádově v desítkách MPa, jež překračují běžné reálné pevnosti v tahu stavebních hmot. Růst krystalů je omezen malými prostorami pórů a krystaly vyvíjejí značné expanzivní tlaky, které rostou s teplotou. Odpařováním vody dochází k dehydrataci krystalů a k jejich rozpadu. Při opětovném zvýšení vlhkosti hydroskopické soli vodu opět absorbují a rekrystalizují. Tímto opakovaným procesem (krystalizace a rekrystalizace) spolu s vymýváním pojivových složek dochází k postupné dezintegraci a rozpadu struktury.
Mechanismy degradačních procesů, jejich intenzita a rychlost průběhu v čase souvisejí se strukturou materiálu, především s pórovým systémem, měrnými povrchy apod. (*obr. 5*)
Tyto parametry rozhodujícím způsobem ovlivňují zejména transportní procesy v materiálech, především vlhkosti (v kapalné i plynné fázi), která je hlavním nositelem různých agresivních látek transportovaných do vnitřní struktury stavebních hmot a konstrukcí, které zpravidla jejich působením mění své chemické, fyzikální a mechanické vlastnosti (*obr. 11*).



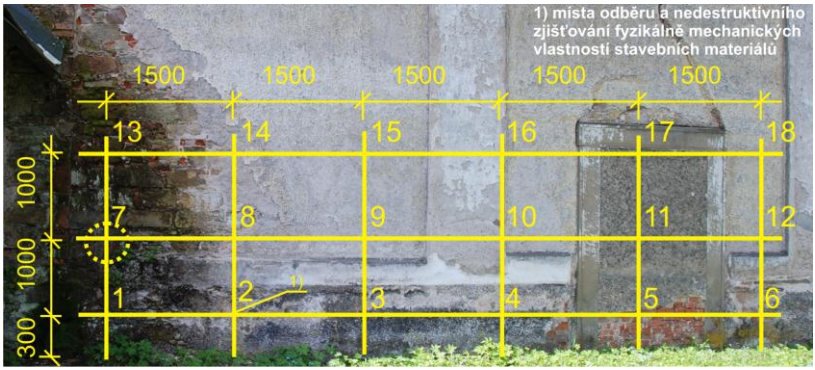
Obr. 11 Vliv obsahu vybraných solí na pevnost v tlaku pískovce

Z tohoto pohledu je zřejmé, že vlastnosti stavebních hmot je třeba chápat jako časově proměnné parametry závislé na prostředí. Přitom je nutné respektovat strukturní nehomogenitu převážné většiny stavebních hmot, charakteristických vícefázovou strukturou a nespojitou změnou vlastností na rozhraní jednotlivých fází.

Dosavadní výzkumné práce prokazují, že právě studium strukturních parametrů může být východiskem pro nalezení výstižných modelů chování a vlastností stavebních hmot resp. funkce popisující vývoj a závislost vlastností na změně vnějších podmínek. Mezi hlavní projevy vnějšího prostředí patří především vlivy teploty a vlhkosti, dále vlivy záření, chemické a biologické [13], [14], [15], [16] (*obr. 10*).

3. Terénní a laboratorní výzkum stanovení zůstatkové pevnosti zdicích prvků a pojiva

Předmětem terénního a laboratorního výzkumu stanovení zůstatkové pevnosti zdicích prvků a pojiva bylo stanovení pevnostních charakteristik zdiva historického objektu ze 17. století (kostel, smíšené zdivo – pískovec, cihly) a objektu z počátku 20. století (tiskárna, cihelné zdivo). V rámci terénního výzkumu bylo provedeno diagnostické ověření pevnostních charakteristik zdicích prvků a pojiva nedestruktivními metodami (Schmidtův tvrdoměr, příklepová vrtačka s identorem – Kučerova vrtačka) a destruktivní metodou (odběr jádrových vývrtů Ø 35 mm). Měření a odběry byly provedeny v průsečících virtuální sítě (ve vodorovném směru cca 6 x 1,5 m, ve svislém směru cca 3 x 1 m) promítnuté na historické zdivo vyšetřovaných objektů (*obr. 12*). Nedestruktivní ověření a odběr vzorků byly provedeny v souladu s normovými a technologickými předpisy.



Obr. 12 Příklad vyšetřované zděné konstrukce s vyznačením virtuální sítě – smíšené zdivo (cihly, pískovec), kostel, 17. století

V Tab. 1 jsou uvedeny experimentálně destruktivními a nedestruktivními metodami zjištěné hodnoty pevností v tlaku a na obr. 13 a 14 jsou zjištěné hodnoty znázorněny graficky.

Tab. 1 Naměřené pevnosti v tlaku zdicích prvků [MPa]

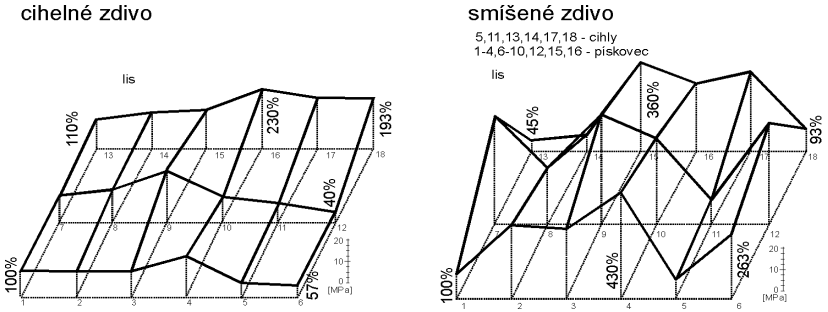
	min	max	průměr	sm.odch.	var. koef	rozptyl
cihelné zdivo, 1. polovina 20. století, tiskárna - výrobní hala						
lis	4,04	29,04	13,43	6,18	46,05	38,22
Schmidt	12,30	19,70	16,43	2,31	14,07	5,34
Kučera	12,00	34,40	25,08	5,79	23,09	33,55
smíšené zdivo – cihly, 17. století, kostel						
lis	3,93	13,03	6,79	3,15	46,48	9,95
Schmidt	10,16	30,29	20,17	5,97	29,59	35,60
Kučera	11,36	35,47	24,30	9,29	38,22	86,29
smíšené zdivo – pískovec, 17. století, kostel						
lis	4,98	40,16	29,32	9,35	31,89	87,43
Schmidt	15,05	33,47	26,41	5,02	19,02	25,24
Kučera	21,28	39,04	34,07	5,22	15,31	27,19

3.1 Analýza výsledků terénního a laboratorního výzkumu

Výsledky analýzy pevnosti zdicích prvků získaných v rámci provedeného průzkumu a statisticky vyhodnocených (Tab. 1) lze shrnout následovně:

- rozložení pevnosti R zdicích prvků ve vyšetřovaných stěnách vykazuje značnou variabilitu rozdělení souboru náhodných hodnot kolem její střední hodnoty,
- z porovnání minimálních a maximálních hodnot experimentálně zjištěných a ze statisticky získané směrodatné odchylky je patrné, že pevnosti zdicích prvků ve vyšetřované oblasti vykazují značné odlišnosti,
- poměrně vysoké hodnoty variačního koeficientu jsou dalším dokladem relativně velké variability rozložení pevnosti zdiva v rámci vyšetřované konstrukce,
- zpravidla vyšší hodnoty pevnosti zdicích prvků získané nedestruktivními metodami (Schmidt, Kučera) jsou především ovlivněny spolupůsobením ověřované lokální oblasti zdicích prvků (v místě kontaktu s diagnostickým zařízením) a oblastí primárně nezatížených (mezní hodnoty namáhání v oblasti lokálního extrémního zatížení),
- ze statistického vyhodnocení je dále patrné, že zejména v rozsahu nižších pevností, tj. nižší kvality zdicích prvků, případně zdicích prvků narušených degradačními procesy, narůstají rozdíly zjištěných pevností získaných nedestruktivními a destruktivními metodami (nižší pevnosti vykazují zkoušky jádrových vývrtů).

Hodnoty pevnosti v tlaku získané destruktivní zkouškou v lisu ukazují na nerovnoměrné náhodné rozložení zjišťovaných charakteristik na vyšetřované konstrukci (*obr. 13*). V případě „homogenní“ cihelné stěny se naměřené hodnoty pevnosti v tlaku pohybovaly v intervalu od 40 do 230 % průměrné pevnosti v tlaku zdicího prvku v posuzované konstrukci. U konstrukce ze smíšeného zdiva byl rozptyl výsledků rozložení pevností v tlaku větší a pohyboval se v rozmezí od 45 do 430 % průměrné pevnosti v tlaku zdicího prvku v posuzované konstrukci.

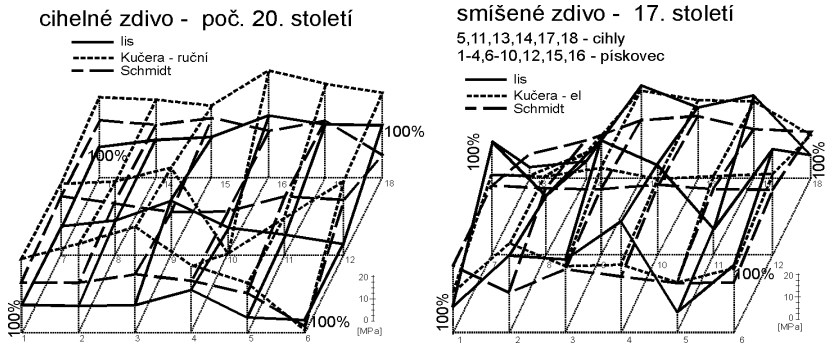


Obr. 13 Porovnání pevností v tlaku zdicích prvků zjištěných destruktivním způsobem (tlaková zkouška v lisu)

Výzkum a analýza výsledků stanovení pevnosti zejména zdicích prvků na základě nedestruktivních metod ukázaly, i při dodržení předepsaných postupů stanovení požadovaných vlastností, na jejich relativně nízkou spolehlivost (*obr. 14*). Stanovení zbytkových mechanických vlastností historického, především smíšeného a kamenného zdiva, má v důsledku heterogennosti zdiva, variability vlastností jeho složek a nízké spolehlivosti nedestruktivních metod převážně informativní charakter a lze je aplikovat pouze při dostatečných rezervách únosnosti zdiva ve vztahu k jejich skutečnému zatížení (které by nemělo přestoupit 30% mezní únosnosti zdiva zjištěné nedestruktivními metodami).

Při porovnání výsledků získaných destruktivními a nedestruktivními metodami (*obr. 14*) jsou patrné rozdíly. Hodnoty získané nedestruktivní měřením za použití upravené příklepové vrtačky (Kučerova vrtačka) se pohybují v rozmezí od 25 do 340 % hodnot získaných z destruktivních zkoušek v případě smíšeného zdiva ze 17. století, a v rozmezí od 25 do 300 % v případě cihelného zdiva z počátku 20. století (*obr. 14*). Při použití Schmidtova tvrdoměru se rozdíly pohybovaly v rozpětí 0 až 270 % pro stěnu ze smíšeného zdiva ze 17. století a v rozpětí 50 až 230 % v případě cihelného zdiva stěny z počátku 20. století při porovnání s hodnotami získanými destruktivním zatěžováním (100 %) (*obr. 14*). Např. pro zdicí

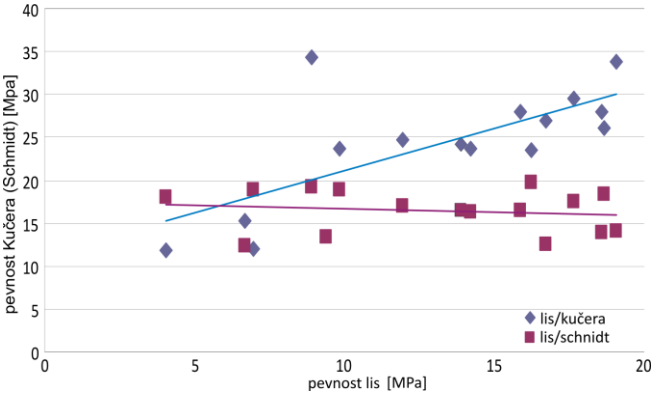
prvky cihelného zdiva z 1. poloviny 20. století lze průměrnou pevnost v tlaku f pro normální rozdělení základního souboru (pevnost ze zkoušek v lisu - výchozí data) s běžnou hodnotou konfidence pro aplikace ve stavebnictví 75 % očekávat v intervalu (11,7; 15,15) MPa. Průměrnou pevnost zdících prvků f pro konfidenci 75 % lze pro Schmidtovo kladívko očekávat v intervalu (14,45; 16,74) MPa, pro Kučerovu vrtačku v intervalu (20,55; 25,15) MPa. Obě nedestruktivní metody vedou k vyšším odhadům průměrné pevnosti zdících prvků než je odhad průměrné pevnosti zdících prvků ze zkoušek z lisu. Po odstranění odlehlých hodnot ze souborů měření a porovnání hodnot z měření pevnosti lisem a Kučerovou vrtačkou a z měření lisem a Schmidtovým kladívkem je z obr. 15 patrné, že se zvyšující se pevností zdících prvků zjištěnou v lisu se zvyšuje pevnost zdících prvků zjištěna Kučerovou vrtačkou.



Obr. 14 Porovnání pevností v tlaku zdících prvků zjištěných nedestruktivními metodami s pevností v tlaku zdících prvků zjištěnou v lisu (100% = pevnost v tlaku zjištěná v lisu)

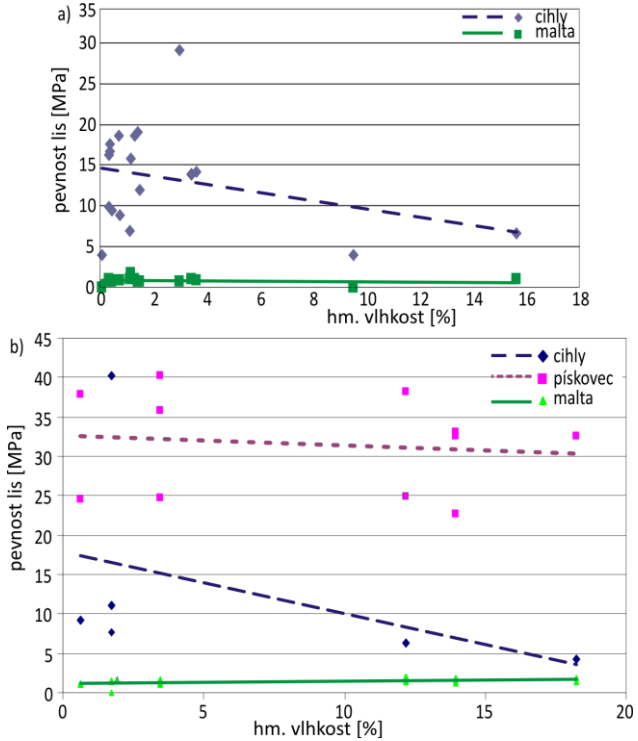
Při porovnání pevností zdících prvků zjištěných lisem a Schmidtovým kladívkem je v tomto případě patrná malá citlivost Schmidtova kladívka na změnu pevnosti zdících prvků. Z obr. 15 vyplývá, že testy Schmidtovým kladívkem jsou patrně v tomto případě neprůkazné, zatímco výsledky obdržené z lisů a Kučerovou vrtačkou naznačují určitý logický trend [17].
Pevnost zdících prvků pro objekt v Humpolci lze na základě měření z lisu (destruktivní zkouška) odhadnout hodnotou 11,3 MPa. Schmidtovo kladívko v tomto případě neprokazuje dobrou shodu s výsledky z lisu. Výsledky získané vrtačkou s identorem (Kučerova vrtačka) je v tomto případě vhodné použít pro identifikaci odlehlých měření hodnot z lisu.
Kromě degradačních procesů působících na zdivo se u nedestruktivních metod projevuje vliv tuhosti zkoušeného prvku, druh použitého

kalibračního vztahu, teplota tvrdoměru v době zkoušky a proměnná velikost působící tlačné síly při použití upravené příklepové vrtačky. Odběr jádrových vývrtů chlazených vodou vyžaduje zjištění vlhkosti zdicích prvků v místě předpokládaného odběru (před odběrem) a následnou úpravu vlhkosti odebraného vzorku na úroveň odpovídající původní vlhkosti zdiva v místě odebraného vzorku.



Obr. 15. Porovnání hodnot z měření lisem a Schmidtovým kladívkem a z měření lisem a Kučerovou vrtačkou pro zdicí prvky

V rámci výzkumu byl dále sledován vliv vlhkosti odebraných vzorků (vlhkost byla zjišťována odběrem materiálů v hloubce cca 100 mm pod povrchem) na pevnost v tlaku zdicích prvků a pojiva (malty). Porovnání těchto výsledků prokázalo převažující vliv zvýšené vlhkosti na snížení pevnosti v tlaku. Ze znázornění na obr. 16a je zřejmé, že se zvýšením hmotnostní vlhkosti cihel z objektu tiskárny z hodnoty 1 % na 15,5 % dojde k poklesu jejich pevnosti v tlaku o cca 50 %, v případě malty ze stejného objektu při shodném nárůstu hmotnostní vlhkosti došlo poklesu pevnosti v tlaku malty o cca 10 – 15 %. V případě objektu kostela ze smíšeného zdiva je ze znázornění na obr. 16b zřejmé, že s nárůstem hmotnostní vlhkosti vzorků z cca 1 % na cca 18 % v případě pískovce došlo k poklesu pevnosti v tlaku o cca 8 – 10 %, v případě cihel došlo k poklesu pevnosti v tlaku o cca 65 – 70 % a v případě malty došlo k mírnému nárůstu pevni v tlaku o cca 15 - 20 %.

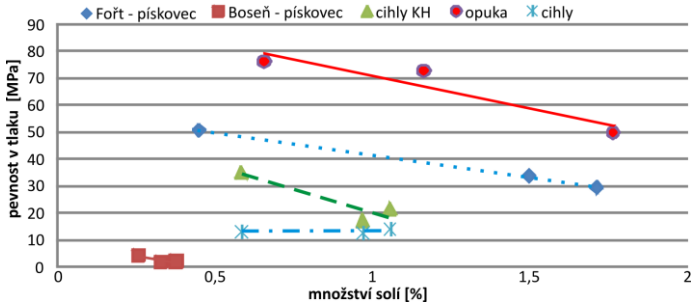


Obr. 16 Vliv hmotnostní vlhkosti na pevnost v tlaku zdicích prvků a malty experimentálně vyšetřované zděné konstrukce - a) Humpolec, b) Fořt

Dílčí výsledky chemismu odebraných vzorků poukázaly na určité souvislosti mezi chemickými vlastnostmi zkoumaných materiálů a množstvím chemických látek obsažených v pórovém systému, popř. vázaných na samotný materiál. Jak je patrné z obr. 11 a 17, nárůst množství solí je provázen snížením pevnosti v tlaku zdicích prvků.

3.2 Shrnutí

Ze statistického vyhodnocení uvedeného v tab. 1 a z obr. 13 a 14 je patrný nejen rozptyl experimentálně zjišťovaných vlastností zdících prvků a malty v rámci uvedené zděné stěny (v místech průsečíků „položené“ virtuální sítě), ale i značný rozptyl samotných experimentálně získaných hodnot při použití různých měřících přístrojů (Schmidtův tvrdoměr L a ruční vrtačka s identorem – tzv. Kučerova.).



Obr. 17 Vliv celkového množství solí na pevnost v tlaku zdicích prvků

Výzkum prokázal obtížnost a vysoký stupeň nespolehlivosti případě extrapolace mechanických vlastností stanovených diagnostickými metodami mimo ověřované místo.
Experimentální výzkum poukázal při porovnání výsledků na poměrně značný rozptyl hodnot získaných jednotlivými destruktivními a nedestruktivními metodami.

4. Závěr

Výsledky numerických analýz a experimentálního výzkumu stanovení zbytkových mechanických vlastností historického zdiva a jeho zatížitelnosti lze shrnout následovně:

- Experimentální výzkum na potřebu vázat příslušné fyzikální a mechanické vlastnosti zejména porézních materiálů na charakteristickou pórovitost (převažující podíl pórů), vlhkost, popř. chemismus.
- Pórovitost, vlhkost a chemismus výrazně ovlivňují pevnost v tlaku těchto materiálů jako základní charakteristiku potřebnou pro stanovení zůstatkové zatížitelnosti.
- Významnou roli z hlediska pevnosti (únosnosti) zdiva (historického) má interakce zdících prvků a pojivové složky, která mimo jiné závisí na vazbě, provedení zdiva a tvaru zdicích prvků (lokální napětí mohou být příčinou místního narušení zdiva).
- Experimentální výzkum a teoretická analýza prokázaly výraznou nesourodost zdiva (zejména kamenného a smíšeného) a v důsledku toho klesající spolehlivost stanovení zůstatkové pevnosti při malém počtu „odběrných“ míst. Tato klesající spolehlivost stanovení zůstatkové zatížitelnosti musí být provázena narůstajícím poměrem mezi experimentálně stanovenou mezní pevností a reálným zatížením

(např. v závislosti na rozsahu, kvalitě a podrobnosti diagnostického průzkumu by nemělo přestoupit 30% mezní únosnosti zdiva zjištěné nedestruktivními metodami).

5. Poděkování

Experimentální výzkum byl proveden za podpory Výzkumného záměru MSM 6840770001 „Spolehlivost, optimalizace a trvanlivost stavebních materiálů a konstrukcí“, řešitel Witzany, J., 2005-2011. Samotná habilitační práce byla podpořena rozvojovým projektem MŠMT 2009 "Podpora profesorských a habilitačních prací.

6. Seznam použité literatury:

[1] Witzany, J. a kol.: Chemická a biochemická degradace Karlova mostu, analýza odolnosti a bezpečnosti kamenné mostní konstrukce při povodni, průzkum základového zdiva a základů mostních pilířů, Stavební obzor, 12, 2003, č. 6, s. 161–180.

[2] Winkler, E. M.: Stone: Properties, Durability in Man´s Environment – 2d ed. Vienna and New York, Springer Verlag 1975.

[3] Kotlík, P., Šrámek, J., Kaše, J.: Opuka, STOP, Praha, 2000, ISBN 80-902668-5-1

[4] Hanykýř, Vl., Kloužková, A., Bouška, P., Vokáč, M.: Stárnutí pórovitého keramického střepu, In: SILIS - Keramický zpravodaj, r. 25, č. 6/2009,s. 5-10, Praha, ISSN 1210-2520

[5] Grant GAČR 103/06/1801 „Analýza spolehlivosti vlastností stavebních materiálů a konstrukcí s přihlédnutím k jejich změnám v čase a časově proměnným vlivům“, 2006- 2008, hlavní řešitel prof. Ing. Jiří Witzany, DrSc.

[6] Heidingsfeld, V.: Fyzikální a chemická koroze stavebních materiálů. In: Voda nepřítel památek. Odborný seminář STOP. Praha: 1997, s. 9-12

[7] Čejka, T.: Experimentální výzkum vlivu vlhkosti na mechanické vlastnosti historických zděných konstrukcí, HP, FSv ČVUT, Praha 2009

[8] Witzany, J., Čejka, T., Wasserbauer, R., Zigler, R.: PDR – poruchy, degradace, rekonstrukce, 1. vydání, Vydavatelství ČVUT, Praha, 2010

[9] Witzany, J., Stařecký, I., Michalko, O., Toman, J.: Degradační procesy stavebních hmot a konstrukcí. Zpráva pro MPO ČR. FSV ČVUT, 1992.

[10] Hall, Ch., Hoff, W.D.: Water transport in Brick, Stone and Concrete, Taylor & Francis, s. 319, Oxon, 2002, ISBN 0-419-22890-X

[11] Čejka, T.: Vliv vlhkosti na fyzikálně mechanické vlastnosti stavebních materiálů; DDP, FSv ČVUT, Praha 2002

[12] Witzany, J., Čejka, T., Zigler, R.: Vliv vlhkosti na změny významných fyzikálně mechanických vlastností zdiva a důsledky pro namáhání nosných

konstrukcí, In: Stavební obzor. 2001, roč. 10, č. 12, s. 15-21. ISSN 1210-4027.
[13] Sand, W.: Microbial mechanisms of deterioration of inorganic substrates - A general overviev, In: International Biodeterioration & Biodegradation Journal, 40, 1997, p 183 – 190
[14] Ważny, J. - Karyš, J.: Ochrana budynkov przed korozja biologiczna, 2001, vyd Waršawa ARKADY, 2001, p. 375
[17] Wasserbauer, R.: Biologické krusty na stavebním kameni, In: Stavební obzor, 10, 2001, 10, 300-302
[15] Bárta, J.: Konzervace režného zdiva památkových objektů konzervanty POROSIL, In: Režné zdivo historických objektů, odborný seminář STOP, Praha 1998, s. 18-24
[17] Sýkora, M., Holický, M.: Poznámky ke statistické analýze pevnosti zdících prvků, KÚ ČVUT, Praha, 2011

Ing. Tomáš Čejka, Ph.D.

Curriculum vitae

Datum narození: 27.8.1972

Vzdělání:

1990 – 1996	ČVUT Praha, Fakulta stavební obor: pozemní stavby
1996 - 2000	Doktorské studium, SDZ ČVUT Praha, Fakulta stavební obor: pozemní stavby
2002	Obhajoba disertační práce - Vliv vlhkosti na fyzikálně mechanické vlastnosti stavebních materiálů
2003 - 2005	Rekvalifikační - znalecký kurz Oceňování nemovitostí
2008	Autorizovaný inženýr v oboru pozemní stavby

Zaměstnání:

1995 - 1996	VPÚ DECO a.s.
2000 – dosud	odborný asistent na Katedře pozemních staveb, ČVUT v Praze, Fakulta stavební
2001 – 2007	učitel odborných předmětů na SPŠ stavební a obchodní akademie, Kladno

Pedagogická činnost:

1996 – dosud	výuka předmětů se zaměřením na rekonstrukce, prefabrikované konstrukce, halové a výškové konstrukce, vedoucí studentských projektů, magisterských a bakalářských prací, výuka předmětů se zaměřením na rekonstrukce a prefabrikované konstrukce v angličtině

Vědecká činnost:

1999 – dosud	Spoluřešitel 9 grantových úkolů a výzkumných záměrů podporovaných Grantovou agenturou ČR, Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy ČR a Ministerstvem průmyslu a obchodu ČR

Odborné publikace:

1999 - dosud	autor a spoluautor více jak 90 článků a příspěvků v odborných domácích a mezinárodních časopisech a konferencích, 5 užitných vzorů, 3 ověřených technologií, 18 výzkumných zpráv, 2x spoluautor skript

Vybrané publikace:

Witzany, J., **Čejka, T.**, Zigler, R., Failure Resistance of the Historic Stone Bridge Structure of Charles Bridge. I: Susceptibility to Nonstress Effects, In: Journal of Performance of Constructed Facilities. 2008, vol. 22, no. 2, p. 71-82. ISSN 0887-3828.

Witzany, J., **Čejka, T**., Zigler, R., Failure Resistance of the Historic Stone Bridge Structure of Charles Bridge. II: Susceptibility to Floods, In: Journal of Performance of Constructed Facilities. 2008, vol. 22, no. 2, p. 83-91. ISSN 0887-3828.

Witzany, J., **Čejka, T**., Zigler, R., The effect of moisture on significant mechanical characteristics of masonry, In: International Conference „Stability and Ductility of Structures", September 24–25, 2009., Vilnius,

Witzany, J., **Čejka, T**., Zigler, R., Response of prefabricate planar system on the effect of induced seismicity, In: International Conference on Computional Design in Engineering, CODE 2009, Seoul, 3.-6.11.2009,

Witzany, J., **Čejka, T**., Zigler, R., Interaction of the bridge infill layers with the bridge structure, In: International Conference on Protection Historica Bulidings, Prohitech 09, Řím, 21. - 24.6.2009, s. 247-254, ISBN 978-0-415-55804-4

Witzany, J., **Čejka, T**., Zigler, R., Experimental Research of Masonry Vaults' Strengthening, In: Structural Faults & Repair-2008. Edinburgh: Engineering Technics Press Edinburgh, 2008, p. 123. ISBN 0-947644-62-7.

Witzany, J., **Čejka, T**., Zigler, R.,Experimental research on strengthening of masonry vaults using FRP, In: FRP Composites in Civil Engineering. Duebendorf: EMPA, 2008, p. 149. ISBN 978-3-905594-50-8.

Witzany, J., **Čejka, T**., Zigler, R., Prefabricated Planar Structure of a Multi-Storey Building Exposed to Cyclic Load and Engineering Seismicity, In:

5th International Structural Engineering and Construction Conference, Las Vegas, 2009, s.339-344, ISBN 978-0-415-56809-8

Witzany, J., **Čejka, T**., Kroftová, K., Zigler, R., Sanace a rekonstrukce zděných budov (1. část), In: Stavební informace. 2005, roč. 10, č. 1, s. 3-46. ISSN 1211-2259.

Witzany, J., Wasserbauer, R., **Čejka, T**., Jiránek M., Sanace a rekonstrukce zděných budov, ochrana proti vlhkosti a radonu, Praha Stavební informace 2006, roč. 13, s. 1-51. ISSN 1211-2259

Witzany, J., Wasserbauer, R., **Čejka, T**.: Poruchy a rekonstrukce historických dřevěných krovů, hrázděných a roubených staveb a dřevěných trámových stropů, Praha Stavební informace 2008, roč. 15, s. 1-49. ISSN 1211-2259

Witzany, J., Wasserbauer, R., **Čejka, T**., Zigler, R., PDR - Poruchy, degradace a rekonstrukce, 1. vyd. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2010. 458 s. ISBN 978-80-01-04488-9.

Čejka, T., Witzany, J., Vliv pórového systému na fyzikálně mechanické vlastnosti stavebních materiálů, In: Stavební obzor. 2010, roč. 19, č. 10, s. 289-294. ISSN 1210-4027.

Witzany, J., **Čejka, T**., Brožovský, J., Zigler, R., Trvanlivost a životnost Karlova mostu z hlediska probíhajících oprav, In: Sanace a rekonstrukce staveb 2010. Praha: Vědeckotechnická společnost pro sanace staveb a péči o památky WTA CZ, 2010, s. 179-185. ISBN 978-80-02-02273-2.

Witzany, J., **Čejka, T**., Zigler, R., Vliv distribuce pórů na mezní pevnost v tlaku f_u a statický modul pružnosti v tlaku vybraných pórovitých materiálů, In: Sanace a rekonstrukce staveb 2010. Praha: Vědeckotechnická společnost pro sanace staveb a péči o památky WTA CZ, 2010, s. 299-302. ISBN 978-80-02-02273-2.

Čejka, T., Witzany, J., Vliv změny vlhkosti na zůstatkovou zatížitelnost a tuhost zdiva, In: Stavební obzor. 2011, roč. 20, č. 11, s. 233-239. ISSN 1210-4027.