

Dátovo-orientovaný prístup na zníženie vlhkosti v pamiatkových budovách

Data-oriented approach for moisture reduction in heritage buildings

Ing. Tomáš Funtík, PhD.^{1*}; Ing. Patrik Šťastný, PhD.¹; Doc. Ing. Ján Erdélyi, PhD.¹; Ing. Richard Honti, PhD.¹

¹ Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, Radlinského 11, 81005 Bratislava, Slovenská republika

* korespondenčný autor: tomas.funtik@stuba.sk

PŮVODNÍ VĚDECKÝ PŘÍSPĚVEK

ORIGINAL SCIENTIFIC ARTICLE

ABSTRAKT

Dnes sa v praxi používa viacero metód merania zameraných na identifikáciu úrovne vlhkosti stavebných konštrukcií. Namerané dáta je možné prepojiť s informačným modelom stavby, výsledkom čoho bude usporiadaná databáza, čo umožní nielen lepšie a komplexnejšie vyhodnocovanie, ale umožní automatizáciu vyhodnocovania s využitím umelej inteligencie. Problémom je najmä absencia informačných modelov stavby, ktoré obzvlášť pri historických objektoch nie sú k dispozícii. V tomto článku sa zameriavame na vytvorenie metodiky pre systematický zber údajov o vlhkosťných pomeroch v konštrukciách pamiatkových objektov, ktorá bude podkladom pre návrh vhodných opatrení na úpravu. Prvým krokom je digitalizácia stavby prostredníctvom fotogrametrie, prípadne terestrického laserového skenovania. Druhým krokom je vytvorenie informačného modelu stavby. Posledným krokom je prepojenie informácií z merania s informačným modelom stavby. Obohatenie BIM o dátový súbor vlhkosťných záznamov z rôznych budov môže výrazne prispieť lepšiemu pochopeniu miery zavlhnutia, identifikácii príčin a tiež napomôcť k výberu vhodných opatrení na základe navrhnutých opatrení v minulosti.

Kľúčové slová: Metodika zberu dát; vzlianjúca vlhkosť; BIM; sanačné opatrenia; TLS

ABSTRACT

Today, several measurement methods aimed at identifying the moisture level of building structures are used in practice. The measured data can be connected to the information model of the building, resulting in an organized database, which will enable not only a better and more complex evaluation, but will enable the automation of the evaluation with the use of artificial intelligence. The problem is mainly the absence of building information models, which are not available especially for historical objects. In this article, we focus on the creation of a methodology for the systematic collection of data on humidity conditions in the constructions of monumental buildings, which will be the basis for the proposal of appropriate measures for adjustment. The first step is the digitization of the building through photogrammetry or terrestrial laser scanning. The second step is the creation of a building information model. The last step is to connect the information from the measurement with the building information model. Enriching BIM with a data set of moisture records from various buildings can significantly

contribute to a better understanding of the degree of wetting, identification of causes and also help to choose appropriate measures based on proposed measures in the past.

Key words: *Data collection methodology; capillary moisture; BIM; remedial measures; TLS*

1 ÚVOD

Ochrana historických budov je komplexná výzva, ktorá si vyžaduje multidisciplinárny prístup, aby sa zabezpečilo zachovanie pôvodnej štruktúry stavby pri súčasnom splnení moderných požiadaviek na pohodlie a bezpečnosť.

Za jeden z najzávažnejších a najrozšírenejších problémov historických stavieb možno považovať prítomnosť vody v murive. Príčin pre vlhnutie týchto stavieb je viacero. Medzi najčastejšie problémy týkajúce sa vlhkých stavieb môžeme označiť vzliňajúcu vlhkosť. Existujú dôkazy, že už aj v minulosti boli využívané rôzne formy hydroizolácie proti vlhnutiu stavieb. Tieto opatrenia však postupom času degenerovali, resp. stratili svoju funkčnosť, nakoľko spomínané systémy vyžadovali priebežnú údržbu a ich materiál tiež podliehal rýchlejšej degradácii. Najmä pri izolácii spodných stavieb boli v značnej miere využívané ílové zásypy, drenáže na zníženie hladiny podzemnej vody, asfaltové nátery, ale taktiež sa využívalo obmurovanie pomocou ostro pálených, málo nasiakavých tehál [1].

Meranie vlhkosti je základným prvkom ochrany historických budov, pretože nadmerná vlhkosť často spôsobuje poškodenie jednotlivých konštrukcií. Existuje množstvo doteraz známych metód určovania miery zavlhnutia konštrukcie. Tieto metódy možno rozdeliť na deštruktívne a nedeštruktívne. Bez ohľadu na to, akým spôsobom bolo meranie uskutočnené, z hľadiska vyhodnocovania nameraných dát je častým problémom relatívne nízka schopnosť vyjadriť vzťahy medzi konštrukčným prvkom, ich materiálovým zložením, informáciách o orientácii na svetové strany, či funkčné využitie daných priestorov a nízka interpretačná schopnosť. Vďaka dostupným technológiám, akými sú terestrické laserové skenovanie, alebo fotogrametria je možný efektívny zber priestorových údajov, ktorý tvorí dôležitý podklad pre tvorbu informačného modelu stavby (angl. Building Information Modeling - BIM) v rámci ktorého je možné obsiahnuť okrem geometrie aj množstvo negrafických informácií. Tieto technológie, ktoré sú v posledných rokoch široko používané na efektívne zdokumentovanie aktuálneho stavu umožňujú systematickú analýzu historických stavieb, ktoré sú typické geometrickou nesúrodosťou konštrukcií.

Témou prepojenia týchto technológií v spojitosti s vlhkosťou sa doposiaľ zaoberalo viacero autorov. Van Hees [2] navrhol metódu využitia laserového skenovania a BIM na posúdenie stavu a sledovanie úrovne vlhkosti murovaných pri oblúkových mostoch. Tento prístup je aplikovaný na historický most v Holandsku a výsledky ukazujú, že môže byť účinným nástrojom na plánovanie ochrany. Dore, Billard a Nicolle [3] použil kombináciu laserového skenovania, BIM, termografie a dendrochronológie na posúdenie poškodenia vlhkosťou v historických budovách. Tento prístup je aplikovaný na prípadovú štúdiu budovy zo 17. storočia vo Francúzsku a autori demonštrujú, ako sa môžu rôzne metódy navzájom dopĺňať pre komplexnejšie hodnotenie.

Kombináciu laserového skenovania a iných technológií tiež použili [4,5,6] na posúdenie rizika vlhkosti v historických budovách. Cieľom bolo vytvoriť model hodnotenia rizík na identifikáciu oblastí potenciálneho poškodenia vlhkosťou.

2 CIELE VÝSKUMU

V článku poskytujeme pohľad na možné využitie BIM pri hodnotení vlhkosti v historických budovách, vrátane diskusie o jeho výhodách, výzvach a potenciálnych aplikáciách. Opierame sa pritom o prípadové štúdie využitia BIM pri hodnotení vlhkosti zameranej na historické stavby, pričom zdôrazňujeme získané poznatky a osvedčené postupy pri jeho implementácii. V konečnom dôsledku sa domnievame, že prispejeme k vývoju komplexného rámca pre využitie BIM pri hodnotení vlhkosti v historických stavbách, čím pomôžeme zabezpečiť ich zachovanie pre budúce generácie.

Výstupom je metodika, ktorá pozostáva zo zberu priestorových dát, ktoré sú nevyhnutným základom pre vytvorenie geometrie danej stavby a následného vytvorenia informačného modelu stavby, vrátane definovania úrovne negrafických informácií potrebných na vytvorenie štruktúrovanej databázy. Databáza bude slúžiť na lepšiu vizuálnu interpretáciu nameraných údajov a predpokladáme, že tento nový prístup k meraniu vlhkosti s využitím súborov údajov vytvorených pomocou laserového skenovania a BIM bude možné použiť na tréning algoritmov umelej inteligencie (AI) za účelom vývoja automatizovaného systému vyhodnocovania vlhkosti pre historické stavby.

3 METODIKA VÝSKUMU

Prvou časťou je získanie prehľadu pre zhodnotenie aktuálneho stavu problematiky na základe ktorého sa použijú metódy analýzy a syntézy. Na základe podrobného skúmania celého procesu, od zameriavania, cez tvorbu modelu a metódy merania vlhkosti, sme identifikovali súvislosti, zákonitosti a princípy, ktoré boli kľúčové pre definovanie konkrétnych krokov navrhovanej metodiky.

Výsledná metodika je tvorivým výstupom autorského kolektívu a je popísaná v druhej časti, kde sú uvedené vyhodnotenia kľúčových zistení na základe dostupných informácií.

4 AKTUÁLNY STAV PROBLEMATIKY

4.1 Digitálny zber údajov

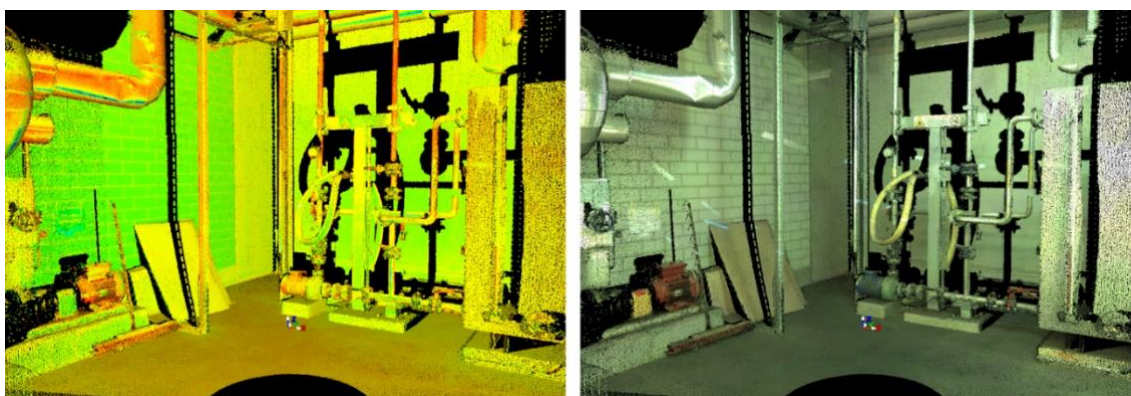
Požiadavku efektívneho zberu priestorových údajov spĺňajú technológie 3D laserového skenovania a fotogrametrie. Fotogrametria je založená na spracovaní obrazu, pričom výsledkom fotogrametrického zberu údajov je virtuálny model fotografovaného objektu alebo dnes najčastejšie mračno bodov. Mračno je množina bodov, ktorá tvorí nepravidelný raster (mračno bodov), ktorý dokumentuje meraný objekt.

Terestrické laserové skenovanie (TLS) umožňuje bezkontaktné určovanie priestorových súradníc bodov ležiacich na povrchu meraného objektu. Výsledkom skenovania je mračno bodov, pričom merané body ležia na povrchu skenovaného objektu. Body mračna sú definované svojimi súradnicami v 3D priestore, ktoré môžu byť doplnené o rádiometrické informácie (intenzita odrazeného meracieho signálu, farba). Mračno bodov slúži ako podklad na tvorbu priestorového modelu meraného objektu alebo ako technický podklad na kontrolu geometrických parametrov, prípadne rozdielov pri určovaní posunov a pretvorení objektov. V mnohých prípadoch upravené mračno bodov tvorí dokumentáciu skutočného vyhotovenia bez potreby tvorby vektorového modelu meraného objektu. Mračno bodov umožňuje dokumentovanie meraného objektu s vysokou mierou detailu. Rýchlosť skenovania súčasnými skenermi (až 2 milióny bodov za sekundu) umožňuje výrazné skrátenie času potrebného na meranie, resp. zvýšenie množstva získaných informácií o meranom objekte [7].

Výhodou terestrického laserového skenovania oproti fotogrametrie je robustnosť. Mračno bodov je výsledkom priameho merania v teréne a nevzniká postprocesingom dát. Pri fotogrametrickom

skenování body mračna sú definované polohou pixelu na fotografiách, ktorý často nemusí reprezentovať povrch meraného objektu, ale čiastočne aj povrch iných objektov (napr. porastu v okolí meraného objektu a pod.). Preto Terestrické laserové skenovanie (TLS) je v súčasnosti najefektívnejších technológií hromadného zberu priestorových údajov a tvorby 3D modelov.

Spolu s meraním 3D súradníc bodov sa v procese zberu priestorových údajov získavajú aj rádiometrické informácie, ktorými sú intenzita odrazeného meracieho signálu, prípadne farby RGB reprezentujúce reálnu textúru meraného povrchu. Intenzita meraného signálu je najčastejšie vyjadrené skalárnym poľom, ktoré reprezentuje energiu meracieho signálu odrazeného od skenovaného povrchu. Jej hodnota sa mení v závislosti od fyzikálnych vlastností povrchov (materiál, farba, hladkosť povrchu a podobe.). Najvyššiu intenzitu získavame pri skenovaní hladkých matných bielych povrchov a najnižšiu pri skenovaní drsných tmavých povrchov. Na Obr. 1 je znázornené mračno bodov doplnené o rádiometrické informácie.



Obr. 1 Priradenie farby k bodom mračna na základe intenzity odrazeného signálu (vľavo) a na základe digitálnych fotografií (vpravo).

Práve kombinácia 3D súradníc a intenzity odrazeného signálu umožňujú vykonanie analýz javov, ktoré nie sú identifikovateľné napr. na fotografiách, resp. neprejavujú sa zmenou geometrie meraného povrchu. Napríklad ak je skenovaná čiastočne navlhnutá biela stena, navlhnuté časti nie sú identifikovateľné v mračne zafarbenej na základe reálnych farieb. Oproti tomu sú dobre identifikovateľné na základe intenzity, pretože od mokrej steny sa merací signál odrazí z nižšou intenzitou. Intenzitu je samozrejme vhodné normalizovať aby sme dostali homogénny súbor informácií aj prípade, že daný povrch je skenovaný z rôznych pozícií skenera. Identifikáciou zmien vlastností skenovaných povrchov na základe „near-infrared“ intenzity sa zaoberá niekoľko publikácií ako napr. [8-11].

4.2 Informačné modelovanie stavieb

Vlhkosť je veľkou hrozbou pre stavby, obzvlášť pre historické budovy, pretože môže spôsobiť znehodnotenie a poškodenie konštrukcií, ako aj prispieť k rastu plesní a iných škodlivých organizmov. Presné vyhodnotenie úrovne vlhkosti v historických budovách je nevyhnutné pre vývoj účinných stratégií ochrany, ktoré zabezpečia dlhodobé prežitie budovy. V posledných rokoch sa ako silný nástroj na hodnotenie vlhkosti v historických budovách objavilo Informačné modelovanie stavieb. BIM umožňuje vytvorenie podrobného digitálneho 3D modelu stavby, ktorý obsahuje informácie o jej komponentoch, systémoch a materiáloch. Tento model možno použiť na simuláciu rôznych scenárov vlhkosti, analýzu reakcie budovy na vlhkosť a vývoj stratégií na prevenciu a zmiernenie poškodenia vlhkosťou.

<http://doi.org/10.51704/cjce.2023.vol9.iss1.pp23-34>

ISSN (online) 2336-7148

www.cjce.cz

Z pohľadu sady noriem sady STN EN ISO 19650 definujeme informačný model (angl. Information Model) ako súbor štruktúrovaných a neštruktúrovaných informačných kontajnerov [12]. Samotný pojem informačný kontajner (trvalá skupina informácií) je pre oblasť stavebníctva relatívne nový. V zásade sa jedná o informácie, ktoré je možné opakovane získavať zo súboru, systému alebo z iného úložiska, napr. výkres, rozpočet, harmonogram, geometria modelu, či obrázok. BIM, resp. Informačné modelovanie stavieb definuje norma [12] ako použitie zdieľanej digitálnej reprezentácie postaveného aktíva na uľahčenie procesov navrhovania, výstavby a prevádzky tak, aby tvorili spoľahlivý základ pre rozhodnutia.

BIM poskytuje podrobnejšie a presnejšie hodnotenie úrovne vlhkosti v historických budovách v porovnaní s tradičnými metódami. Pomocou BIM je možné do modelu integrovať podrobné informácie o komponentoch a materiáloch, čo umožňuje komplexnejšiu analýzu správania sa vlhkosti. Samotné využitie BIM pri hodnotení vlhkosti v historických budovách má viacero výhod. Umožňuje vývoj prediktívnych modelov pre správanie sa vlhkosti, ktoré môžu informovať o stratégiách údržby a opráv. Poskytuje tiež platformu pre rozhodovanie založené na údajoch, čo umožňuje ochrancom uprednostňovať aktivity a efektívnejšie pridelovať zdroje. BIM môže tiež uľahčiť spoluprácu medzi rôznymi zainteresovanými stranami, ako sú architekti, inžinieri a pamiatkari, poskytnutím zdieľanej platformy na výmenu informácií.

Napriek týmto výhodám stále existujú výzvy, ktoré je potrebné riešiť. Patrí medzi ne potreba špecializovaných odborných znalostí a školení, dostupnosť presných a spoľahlivých údajov a vývoj vhodných noriem a protokolov.

Úlohou BIM nie je nahradiť odborníkov softvérom, ale poskytnúť im kvalitný nástroj na zjednodušenie manuálnej a opakujúcej sa práce. Tento prístup však úplne mení pohľad na doterajšie zaužívané postupy firiem v stavebnom odvetví a koncepcie prispieva k efektívnejšej a systematickejšej práci s vylúčením množstva omylov, resp. nezrovnalostí ešte pred fázou vlastnej realizácie stavby. Softvér ale nemožno využívať ako náhradu za príslušné odborné vzdelanie a skúsenosti.

BIM model je vo svojej podstate 3D parametrický dátový model, ktorý obsahuje všetky informácie o stavbe, ktorá je z pohľadu normy [12] definovaná ako aktívum. Informácie majú vysoký potenciál, ak sú do modelu vkladané od prvej fázy koncepčného zámeru, cez projektovú dokumentáciu a následnú výstavbu až po facility management (FM). Informácie z dátového modelu, ktorý je virtuálnou reprezentáciou skutočného objektu a obsahuje všetky konštrukcie, prvky, priestory, ich vlastnosti.

Informačný model, resp. BIM model sa skladá z pohľadu dát z troch častí. Môžeme ho charakterizovať ako kombináciu grafických a negrafických dát, resp. informácií a dokumentov týkajúcich akejkoľvek stavby. BIM umožňuje ku každému prvku stavby priradiť určité informácie o fyzických a funkčných vlastnostiach ako parametre, niekedy označované aj ako atribúty. Výhodou je, že takto usporiadané dáta sa ľahko vyhľadávajú a extrahujú a prispievajú k efektívnemu prístupu k informáciám. Napĺňanie parametrov pri jednotlivých prvkoch je dnes nedostatočné a zatiaľ, žiaľ zväčša nekoordinované. [13]

Informácie, ktoré by mal informačný model stavby obsahovať môžu byť definované pomocou tzv. úrovne informácií (LOI – Level of Information). LOI vyjadruje podrobnosť negrafického obsahu modelu v každej z vymedzených projektových fáz. V tomto prípade sa bude jednať o informačný model už postaveného aktíva – historických stavieb. Dôležité bude teda navrhnuť dohodu o názvosloví negrafických informácií a definovať ich zápis do BIM modelu.

Poslednou súčasťou informačného modelu stavby sú dokumenty. Nie všetky z vlastností a záznamov o stavbe je vhodné ukladať vo forme negrafických dát. Príkladom sú manuály, špecifikácie alebo oficiálne

podpísané dokumenty, ako sú zmluvy a certifikáty, pretože tieto dokumentujú historický záznam o priebehu projektu, resp. stavbe a teda to nie sú informácie o stavbe samotnej, ktoré sú zvyčajne dodávané v statických formátoch (PDF, JPG, atď.), ale môže byť takto referenčne priradený napríklad aj video-súbor. Dokumenty by mali byť dobre organizované, označené a uchovávané spôsobom, ktorý umožní prístup pre všetkých, ktorí potrebujú dané informácie v čase využiť.

4.3 Metódy na stanovenie miery zavlhnutia objektov

Určitú metodiku možno pozorovať vo všetkých výskumoch zameraných na stanovenie miery účinnosti sanačnej technológie. Problémy v nejednotnosti a rozmanitosti spomína už Franzoni [15] vo svojej publikácii z roku 2014. Opisuje tu viacero problémov týkajúcich sa boja so vzliňajúcou vlhkosťou na historických stavbách. Taktiež sa literatúre [16] poukazuje na potrebu vytvorenia modelov pre vytvorenie optimálnych návrhov. Je však potrebné poznamenať, že najspoľahlivejšie sa javia výskumy in situ, ktoré odrážajú reálny stav účinnosti v teréne. Tieto výskumy sú však realizované rôzne. Pri niektorých sa postupuje prácnym meraním jednotlivých miest a ich zaznamenávaním do tabuliek [17] a prepojením do 2D modelu stavby. Iné, ako bolo uvádzané vyššie, využívajú metódy laserového skenovania a BIM [2].

Existuje množstvo doteraz známych metód určovania miery zavlhnutia konštrukcie. Tieto metódy možno rozdeliť na deštruktívne a nedeštruktívne. V súčasnosti existuje mnoho techník na meranie vlhkosti v konštrukciách. Jednotlivé metódy majú svoje výhody a nevýhody. Predmetom článku nie je opis týchto metód a preto budú uvedené len stručne.

4.3.1 Deštruktívne metódy stanovenia vlhkosti

Medzi tieto technológie možno zaradiť gravimetrickú metódu. Autorka Franzoni ju vo svojej publikácii [15] nazýva aj „Tradičnou“. Túto metódu možno považovať za najznámejšiu, ale článok [18] dopĺňa, že ju nemožno považovať za metódu najrozšírenejšiu. Posledné tvrdenie však možno spochybniť, nakoľko existuje mnoho článkov, ktoré práve túto metódu využívajú a opisujú ju vo svojich výskumoch [19, 20, 21]. Táto technológia spočíva vo vysekaní vzoriek z konštrukcie. Tieto vzorky je možné aj vyvrtáť, avšak táto technika sa neodporúča nakoľko popri vrtaní prichádza k treniu, ktoré spôsobuje teplo a vzorky sa vysušujú. Tento aspekt sa dá však taktiež eliminovať. Svedčí o tom publikácia [19], ktorá opisuje využitie tejto technológie, pričom vrtanie jadier bolo realizované pri malých otáčkach za minútu.

Ďalšou známou metódou je metóda sadrového bloku. Do vyvrtaného otvoru sa vloží sadrový blok, ktorý sa svojím povrchom dotýka skúmanej konštrukcie. Po niekoľkých dňoch sa tento blok vyberie (vlhkosť bloku bude totožná s vlhkosťou konštrukcie) a zmeria sa pomocou gravimetrickej metódy. Výhodou využitia gravimetrickej metódy je jej presnosť. Nevýhodou však ostáva dĺžka trvania a nemožnosť jej prevedenia in situ.

Z vyššie uvedeného je preto praktickejšie využiť karbidovú metódu [22]. Pri tejto metóde sa do tlakovej nádoby vloží určité množstvo karbidu vápnika a vzorky konštrukcie, ktorú pred jej vložením do nádoby rozdrvíme. Následne je potrebné nádobu uzavrieť a triasť asi 10 minút, aby prišlo k spojeniu vzorky s karbidom a teda k chemickej reakcii. Táto reakcia vyvolá zvýšenie tlaku v nádobe. Podľa tohto tlaku sa odhaduje množstvo vody vo vzorke.

4.3.2 Nedeštruktívne metódy stanovenia vlhkosti

Vývoj technológií prináša čoraz viac možností realizácie nedeštruktívnych typov meraní. Ich výhodou je zachovanie celistvosti konštrukcia bez potreby vrtania, resp. sekania. Tieto metódy sa pre stanovenie prvotného vlhkového stavu historických konštrukcií javia ako ideálne. Je však pravdou, že mnohé z týchto meradiel sú ovplyvnené mierou zasolenia konštrukcie. Fakt je aj ten, že mnohé tieto prístroje merajú vlhkosť len do malej hĺbky konštrukcie.

Vlhkosť je možné merať pomocou odporových metód. Tieto metódy spočívajú v meraní vlhkosti odporu materiálu, ktorý sa výrazne mení s mierou zavlhnutia skúmanej konštrukcie [23]. Takéto metódy sú taktiež v praxi využívané [24]. V tomto prípade sú využívané aj rôzne vpichové vlhkomery, ktoré sú dostupné, prenosné a je možné nimi realizovať merania in situ.

Existuje celá rada rôznych nedeštruktívnych technológií, od využitia infračervenej techniky, cez mikrovlnné meranie a rôzne iné. O týchto technikách bližšie pojednáva dokument [25], ktorý podrobnejšie opisuje tieto techniky.

4.3.1 Zistenie stavu zavlhnutia a návrh opatrení

Metodiku zberu údajov dnes možno považovať za časovo náročnú, nakoľko merania si vyžadujú prítomnosť a fyzické merania všetkých stanovených bodov. Pred samotnou obhliadkou je potrebné zabezpečiť projektovú dokumentáciu stavby. Vo výskume sa využíva najmä pôdorys objektu, do ktorého sa následne značia jednotlivé miesta budúcich meraní.

Prvým krokom je vizuálna obhliadka objektu. V tomto kroku je potrebné zistiť aktuálny stav objektu, najmä mieru zavlhnutia a napadnutia konštrukcie vykryštalizovanými soľami. Tento krok je väčšinou realizovaný vizuálne s následným vyznačením a meraním bodov vlhkosti a odobratím vzoriek pre laboratórne stanovenie zasolenia konštrukcie. Pôdorysne sa vyznačia miesta v celom rozsahu stavby (interiér a exteriér) a vykoná sa prvá sada meraní v troch výškových úrovniach od podlahy. Hodnoty sa následne zaznačia do tabuľky. Meraní pred realizáciou môže byť viac pre stanovenie lepšieho obrazu o miere zavlhnutia.

Druhým krokom je vyhodnotenie miery zavlhnutia objektu na základe hodnôt zaznamenaných v prvom kroku. Jednotlivé hodnoty sú posudzované podľa normy ČSN P 73 0610 [26], ktorá delí vlhkosť do 5 stupňov zavlhnutia (Tab. 1). Na základe výsledkov a vyhodnotenia sa pristúpi k návrhu vhodnej technológie. Pri výbere príslušnej sanačnej metódy je nutné posúdiť celý komplex vplyvov a činiteľov, ktorý ovplyvní vlhkovú režim stavby tak, aby sme preventívne predišli zlyhaniu sanačnej metódy zanedbaním niektoorej z príčin zvýšenej vlhkosti [27].

V tomto kroku je potrebné brať do úvahy viacero aspektov ako je napríklad miera zavlhnutia, možnosť realizovateľnosti danej technológie, zváženie možného narušenia statiky konštrukcie, finančná náročnosť a taktiež stanoviská úradov na ochranu pamiatok.

Tab. 1 Klasifikácia vlhkosti muriva podľa ČSN P 73 0610.

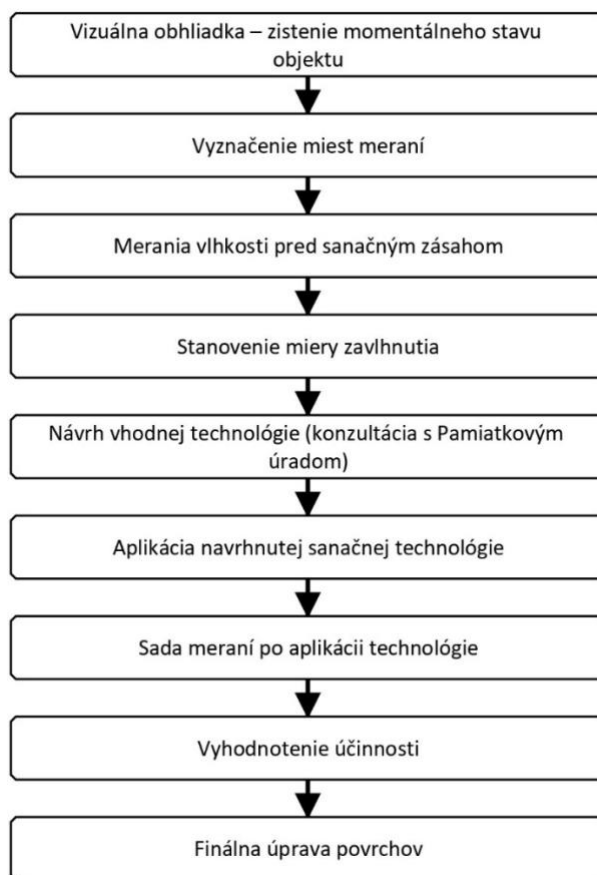
	Stupeň vlhkosti	Vlhkosť muriva [hm. %]
1	Vlhkosť veľmi nízka	<3.0
2	Vlhkosť nízka	3.0–5.0
3	Vlhkosť zvýšená	5.0–7.5
4	Vlhkosť vysoká	7.5–10

5	Vlhkosť veľmi vysoká	>10
---	----------------------	-----

V treťom kroku sa pristúpi k realizácii navrhutej sanačnej technológie. Štvrtý krok je spojený s opätovnými meraniami po aplikácii sanačnej technológie. V tomto kroku sa meria opätovne na stanovených miestach z prvého kroku. Realizuje sa niekoľko meraní v dostatočnom časových rozostupoch. Jednotlivé údaje sa opätovne zaznamenávajú do tabuľky.

Posledným krokom z výskumného hľadiska je vyhodnotenie účinnosti predmetnej technológie. Následne sa vo väčšine prípadov pristupuje k aplikácii sanačnej omietky a merania sa ukončujú.

Zjednodušene by sme tento opis mohli vyjadriť vývojovým diagramom, ktorý je zobrazený na Obr. 1.

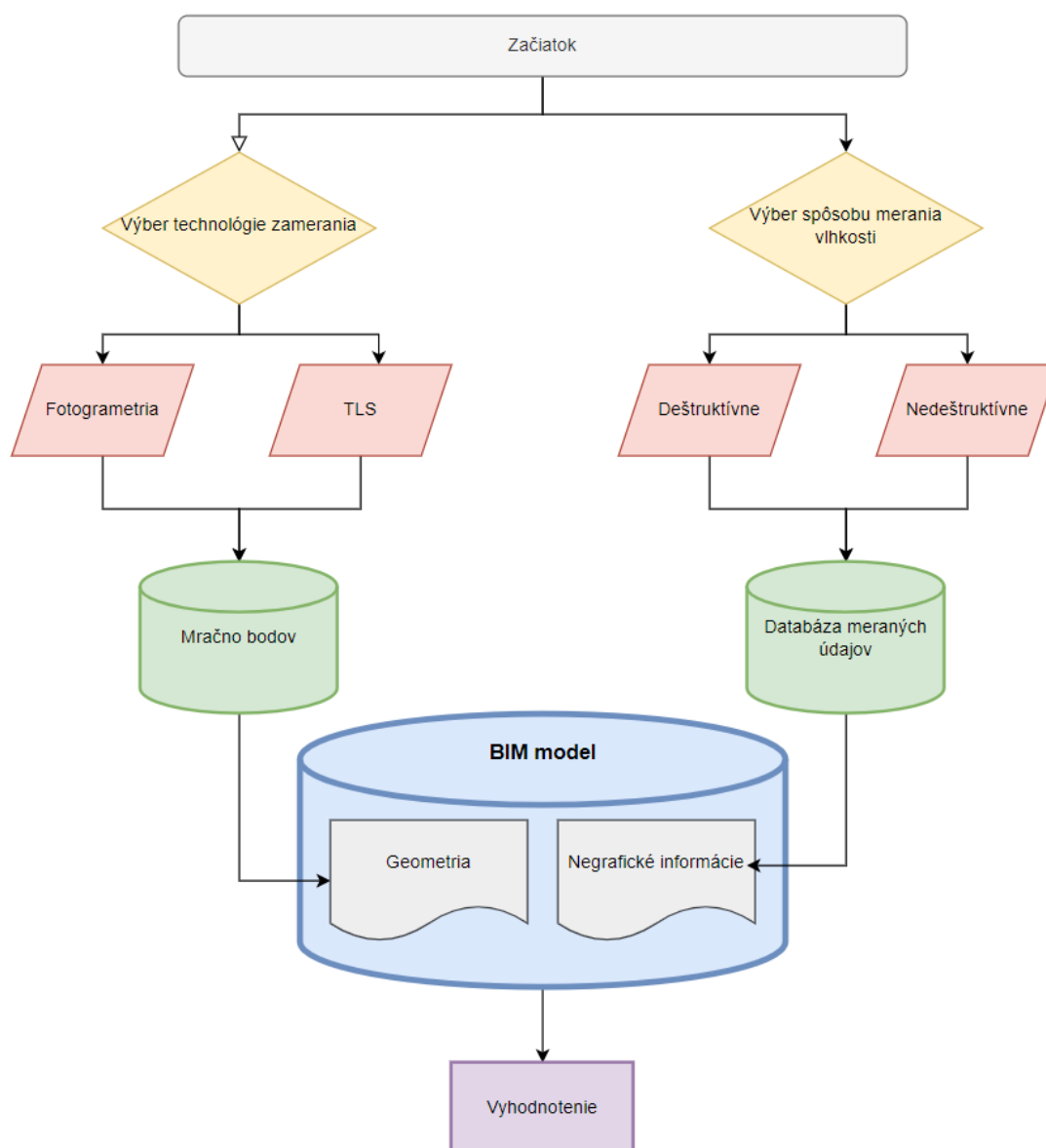


Obr. 2 Vývojový diagram postupných krokov zisťovania stavu a návrhu opatrení.

5 NÁVRH METODIKY

Z predchádzajúcich kapitol je zrejmé, že existuje mnoho spôsobov monitorovania vlhkosti historických konštrukcií. Je však jasné, že tieto metódy a zaznamenávanie jednotlivých údajov netvoria jednotnú formu a je ťažké tieto výsledky medzi sebou porovnávať. Taktiež aj proces zberu údajov je veľmi prácny a zdĺhavý, čo v istej miere obmedzuje efektívnosť výskumu. Tá by sa mohla výrazne vylepšiť zavadením systematického zberu dát bez potreby neustálej fyzickej potreby byť na mieste výskumu. Takýto zber dát by bol rozdelený do niekoľkých postupných krokov. Samotné procesy sú prezentované vo vývojovom diagrame krokov.

Prvým krokom digitalizácia predmetnej stavby pomocou fotogrametrie, alebo TLS, ktorá zabezpečí rýchlejší zber dát a vyššiu presnosť geometrickej reprezentácie. Pri zameriavaní historických pamiatok je premenlivosť hrúbky a pozície (napr. odklon od zvislej osi) výzvou, obzvlášť pri konvenčných metódach zameriavania. V prípade požiadavky na vyššiu presnosť je nevyhnutné použiť TLS, ktorého výstupom je mračno bodov s požadovanou hustotou. Zaznamenané mračno bodov je tiež možné využiť ako cenný zdroj informácií do budúcnosti, najmä v prípade stavebných prác, kedy sú realizované navrhované zmeny, alebo pri nevyhovujúcej starostlivosti o stavbu, kedy postupne dochádza k rozpadaniu konštrukcií, prípadne k deštrukcii. Presný plán merania sa odvíja od priestorového usporiadania stavby a od požiadavky na presnosť (požadovaná maximálna odchýlka).



Obr. 3 Navrhovaná metodika – vývojový diagram.

Druhým krokom je vytvorenie informačného modelu stavby, ktorý bude obsahovať geometriu meraného objektu s členením na jednotlivé konštrukcie, vrátane štruktúry navrhovaných negrafických informácií. V prípade historických objektov je nevyhnutné, aby došlo k zjednodušeniu geometrickej reprezentácie, nakoľko majú konštrukcie často neortogonálny a premenlivý tvar. Pred začatím modelovania bude vytvorený dokument s názvom Vykonávací plán BIM, kde sa uvedú ciele, za akým je model vyhotovovaný a stanoví sa adekvátny detail modelovania. Na zaznamenávanie informácií o vlhkosti je pravdepodobné, že sa bude jednať o zjednodušené formy zobrazovania. Z hľadiska napĺňania negrafických informácií bude nutné vytvoriť požiadavky na štruktúru informácií a definovať presné názvoslovie pre jednotlivé parametre priradzované k objektom v modeli.

Samotné meranie vlhkosti je tretím krokom pri navrhovanej metodike. V tomto prípade sa môže jednať o deštruktívne, ale aj nedeštruktívne formy merania, prípadne meranie s využitím sond, ktoré umožňujú bezdrôtový zber údajov o vlhkosti. Jednotlivé merania budú priradzované ako namerané hodnoty na úrovni negrafických informácií pre jednotlivé konštrukcie, čím bude zabezpečené prepojenie informácií z merania a informačného modelu stavby. Takéto prepojenie umožní lepšie analyzovať jednotlivé konštrukcie, ale aj väzby medzi nimi a celé časti stavby.

Poslednou časťou je vyhodnotenie miery zavlhnutia a návrh vhodnej sanačnej technológie, tá však nie je predmetom tohto článku.

6 ZÁVER

Tento článok sa preto zameriava na návrh nového prístupu k meraniu vlhkosti v historických budovách pomocou technológie laserového skenovania a informačného modelu stavby (BIM), ktorý možno použiť na vyhodnotenie podmienok vlhkosti v budove.

Meranie vlhkosti je kľúčovým prvkom pri ochrane historických budov, nakoľko sa často prejavuje poškodením konštrukcií. Je preto nevyhnutné, aby miera zavlhnutia bola pravidelne kontrolovaná a aby boli analyzované dôvody vzniku vlhkosti za účelom zistenia príčiny a následného návrhu na elimináciu tohto javu. Pri dokumentovaní aktuálneho stavu je možné využiť moderné technológie, akou je napríklad laserové skenovanie, ktoré je v posledných rokoch široko používané na dokumentáciu a analýzu historických budov.

Na základe doterajších skúseností a prieskumov je zrejmé, že optimalizácia a zefektívnenie zberu dát pri výbere vhodnej protivlhkostnej technológie by napomohla k lepšiemu návrhu a vyhodnocovaniu účinnosti navrhnutých technológií. Vytvorenie vhodnej databázy, ktorá by obsahovala nielen informácie o výsledkoch merania vlhkosti daných konštrukcií, ale aj o konštrukčno-materiálových charakteristikách, orientácii na svetové strany, prípadne informácií o datovaní vzniku konštrukcie je cieľom tejto metodiky. Metodika priamo prispieva k systematickému zberu údajov, zabezpečuje priradenie nameraných hodnôt priamo ku konkrétnym miestam 3D modelu daného objektu a umožňuje ďalší rozvoj tejto problematiky, napríklad s využitím umelej inteligencie.

Financovanie

„Táto práca bola podporená Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-18-0247“

Použitá literatura

- [1] MAKÝŠ, O. 2018, *Technológia Obnovy Budov, Ochrana a Oprava Spodných a Obalových Konštrukcií*; Spektrum STU: Bratislava, Slovakia, s. 27–80.
- [2] CHAREF, Rabia, EMMITT, Stephen, ALAKA, Hafiz, FOUCHAL, Farid, 2019, Building Information Modelling adoption in the European Union: An overview, *Journal of Building Engineering*, Volume 25, 100777, ISSN 2352-7102, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100777>
- [3] DORE, D., BILLARD, C. and NICOLLE, J., 2018, Combining 3D Modeling, Thermography and Dendrochronology for Assessing Moisture Damage in Historic Buildings, *International Journal of Architectural Heritage*, vol. 12, no. 4, pp. 602-615.
- [4] KRIJNEN, S., BOMMEL, E. van, 2020, A 3D BIM-based tool for assessing moisture risk in historic buildings, *Automation in Construction*, vol. 111, pp. 103-117.
- [5] GIANNAKIS, G. G., VENERI, A. F., KARYPIDIS, E. Z., 2019, Assessing moisture risk in historic masonry structures using thermal and visual imaging techniques, *Journal of Cultural Heritage*, vol. 39, pp. 117-125.
- [6] FABIANI, C., GAROZZO, M., PESCARIN, M., 2017, BIM and IR thermography for energy efficiency and conservation of historic buildings, *Energy Procedia*, vol. 140, pp. 301-310.
- [7] KOPÁČIK, A., ERDÉLIY, J., KYRINOVIC, P., 2020, Engineering surveys for industry, pp. 1-213, ISBN 978-3-030-48308-1, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-48309-8>
- [8] SUCHOCKI, C. 2020, Comparison of Time-of-Flight and Phase-Shift TLS Intensity Data for the Diagnostics Measurements of Buildings. *Materials*, 13, 353. <https://doi.org/10.3390/ma13020353>
- [9] SUCHOCKI, C., DAMIĘCKA-SUCHOCKA, M., KATZER, J., JANICKA, J., RAPIŃSKI, J., STAŁOWSKA, P., 2020, Remote Detection of Moisture and Bio-Deterioration of Building Walls by Time-Of-Flight and Phase-Shift Terrestrial Laser Scanners. *Remote Sensors*, 12, 1708. <https://doi.org/10.3390/rs12111708>
- [10] AIRA-ZUNZUNEGUI J. R., SÁNCHEZ-APARICIO M., SÁNCHEZ-APARICIO J. L., PINILLA-MELO J. , GARCÍA-MORALES S., 2022, Determination of wood moisture content with terrestrial laser scanner, *Construction and Building Materials*, Volume 350, 128834, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128834>
- [11] DAMIĘCKA-SUCHOCKA, M., KATZER, J., SUCHOCKI, C., 1963, Application of TLS Technology for Documentation of Brickwork Heritage Buildings and Structures. *Coatings* 2022, 12. <https://doi.org/10.3390/coatings12121963>
- [12] STN EN ISO 19650-1, 2018, Organizácia informácií o stavbách. Manažment informácií s využitím informačného modelovania stavieb (BIM). Časť 1: Pojmy a princípy (ISO 19650-1: 2018)
- [13] FUNTÍK, T. a kol., 2018, *Building Information Modeling*, Vydavateľstvo Eurostav, Bratislava, ISBN 978-80-89228-56-0
- [14] STN EN ISO 19650-2, 2018, Organizácia informácií o stavbách. Manažment informácií s využitím informačného modelovania stavieb (BIM). Časť 2: Fáza dodania aktív (ISO 19650-2: 2018)
- [15] FRANZONI, E., 2014, Rising damp removal from historical masonries: A still open challenge, *Construction and Building Materials* vol. 54, pp. 123-136. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.054>
- [16] GUOLO E., ROMAGNONI P., PERON F., 2021, Capillary rising damp in Venetian context: state of the art and numerical simulation, *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 2069,

- 8th International Building Physics Conference (IBPC 2021) 25-27 August 2021, Copenhagen, Denmark, 2069, 012046
- [17] MAKÝŠ, O., 2014, Affects of Ventilation Technologies for Fighting Moisture in Baroque Masonry. CTM 2014 – Construction Technology and management 2014, pp. 315-320.
- [18] POCHMANOVÁ P., MISAR, I., 2011, Kontrolní metody pro stanovení vlhkosti podkladních vrstev podlah. Dostupé na: <https://stavba.tzb-info.cz/podlahy/8050-kontrolni-metody-pro-stanoveni-vlhkosti-podkladnich-vrstev-podlah>
- [19] FASSINA V., FAVARO M., NACCARI A., PIGO M., 2002, Evaluation of compatibility and durability of a hydraulic lime-based plaster applied on brick wall masonry of historical buildings affected by rising damp phenomena, Journal of Cultural Heritage, Volume 3, Issue 1, pp. 45-51. [https://doi.org/10.1016/S1296-2074\(02\)01158-5](https://doi.org/10.1016/S1296-2074(02)01158-5)
- [20] LUBELLI B., HEES, R.P.J.v., R., GROOT, C. W.P., 2006, Investigation on the behaviour of a restoration plaster applied on heavy salt loaded masonry, Construction and Building Materials, Volume 20, Issue 9, pp. 691-699, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.02.010>.
- [21] SARDELLA, A.; DE NUNTIIS, P., BONAZZA, A., 2018, Efficiency evaluation of treatments against rising damp by scale models and test in situ, Journal of Cultural Heritage, Volume 31, Supplement, pp. 30-S37. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.03.020>
- [22] EUSEBI V, MONTAGNA R, PAURI M, STAZI A., 1994, Recovery of rising-damp damaged masonry: experimental comparison between ‘slow diffusion’ and ‘under pressure’ procedures for waterproofing agents. In: Shrive NG, Huize A, editors. Proc 10th IB2MAC, Calgary, Canada, July 5–7, pp. 819–28.
- [23] PRÍDALOVÁ, Z., 2013, Prieskumy na návrh sanácie vlhkého muriva, Availibe on: <https://www.asb.sk/stavebnictvo/zaklady-a-hruba-stavba/obvodove-konstrukcie/prieskumy-na-navrh-sanacie-vlhkeho-muriva>
- [24] SASS, O., VILES, H.A., 2006, How wet are these walls? Testing a novel technique for measuring moisture in ruined walls, Journal of Cultural Heritage, Volume 7, Issue 4, pp.257-263. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2006.08.001>
- [25] HEALY, W. M., 2003, Moisture sensor technology-a summary of techniques for measuring moisture levels in building envelopes. ASHRAE Trans. 109:232. <https://www.proquest.com/scholarly-journals/moisture-sensor-technology-summary-techniques/docview/192512842/se-2>
- [26] ČSN P 73 0610. 2000, Hydroizolace Staveb, Sanace Vlhkého Zdiva, Základní Ustanovení.
- [27] WITZANY, J., 1999, Poruchy a Rekonstrukce Zděných Budov; ČKAIT: Prague, Czech Republic.