

**Univerzita Karlova**

**Přírodovědecká fakulta**

Studijní program: Hydrologie a hydrogeologie

Studijní obor: Povrchová a podzemní voda



**Šimon Pokorný**

**Vliv klimatu na archeologické památky v areálu Pražského hradu**

Climate impact on archeological monuments in Prague Castle

Bakalářská práce

Vedoucí práce/Školitel: Mgr. et Mgr. Tomáš Weiss, PhD.

Praha, 2023

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze dne 4.5.2023

.....

Šimon Pokorný

## Poděkování

Rád bych poděkoval nejprve svému školiteli Mgr. et Mgr. Tomášovi Weissovi PhD. za skvělé vedení bakalářské práce, neúnavnou pomoc a ochotu při řešení všech problémů spojených s vytvářením této práce a trpělivost s mou osobou. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a partnerce za velkou podporu při psaní této práce.

# Abstrakt

Tato práce se zabývá řešením otázky vlivu klimatu na archeologické památky pod dlažbou III. nádvoří Pražského hradu. Komplex archeologického naleziště je ohrožen působením několika klimatických faktorů, zejména vodou a změnami teploty, které způsobují vytváření zvětrávacích procesů a historický stavební materiál v zájmové oblasti je následně degradován. Teoretická část této práce se nejdříve zabývá studií historických stavebních materiálů v areálu vykopávek, hlavní důraz klade na opuku a jílovou břidlici, které jsou nejvíce náchylné k různým druhům zvětrávání. Následně jsou zde probírány degradační procesy, které ovlivňují stav přítomného materiálu, zejména pak procesy spojené s prostupem vody skrze materiál, chemické zvětrávání způsobené krystalizací soli a bobtnání jílových minerálů, proces, který se často vyskytuje u jílových břidlic. Poslední kapitola teoretické části nastiňuje vliv budoucí změny klimatických faktorů na působení těchto procesů. Praktická část této práce se zaměřuje na výzkum mrazových a solných zvětrávacích cyklů, zejména na stanovení četnosti cyklů za jeden rok kontinuálního měření. K tomu jsou využity vlhkostní a teplotní hodnoty v čase z čidel, která jsou rovnoměrně rozmístěna v celé oblasti vykopávek. Výsledky výzkumu prokázaly v současné době nepřítomnost procesu mrazového zvětrávání v celém areálu vykopávek v důsledku teploty vzduchu, která se v průběhu celého roku pohybuje nad 0°C. V případě solného zvětrávání byla objevena přítomnost zvětrávacích cyklů u všech třech čidel, která byla analyzována. Nejvíce náchylná k solnému zvětrávání se jeví severovýchodní část areálu, kde bylo při ročním měření zaznamenáno 57 zvětrávacích cyklů síranu sodného ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) a 55 zvětrávacích cyklů síranu vápenatého ( $\text{CaSO}_4$ ). Kvůli kontinuálně se zvyšující teplotě v důsledku klimatické změny, která vytváří ideální podmínky pro krystalizaci solných výkvětů, může být v budoucnosti riziko spojené se solným zvětráváním ještě vyšší, než je tomu v současnosti.

Klíčová slova: Pražský hrad, archeologické naleziště, změna klimatu, historické stavební materiály, zvětrávání, klimatické faktory

# Abstract

This thesis deals with the question of the influence of climate on archaeological monuments beneath the pavement of the III. courtyard of Prague Castle. The complex archaeological site is threatened by the effects of several climatic factors, especially water and temperature changes, which cause weathering processes, and the historical building material in this area is subsequently degraded. The theoretical part of this thesis first deals with the study of historical building materials in the excavation area, with a focus on marlstone and clay slate, which are most susceptible to various types of weathering. Subsequently, degradation processes that affect the state of the present material are discussed, particularly processes related to water penetration through the material, chemical weathering caused by salt crystallization, and swelling of clay minerals, a process that often occurs in clay slate. The last chapter of the theoretical part outlines the impact of future climate change on the action of these processes. The practical part of this thesis focuses on research into frost and salt weathering cycles, particularly the determination of the frequency of cycles in one year of continuous measurement. Moisture and temperature values over time from sensors that are evenly distributed throughout the excavation area are used for this purpose. The research results currently demonstrate the absence of frost weathering processes in the entire excavation area due to air temperature, which remains above 0°C throughout the year. In the case of salt weathering, the presence of weathering cycles was found in all three sensors that were analyzed. The northeast part of the area appears to be most susceptible to salt weathering, where 57 cycles of sodium sulfate ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) and 55 cycles of calcium sulfate ( $\text{CaSO}_4$ ) were recorded during one year of measurement. Due to continuously increasing temperatures due to climate change, which create ideal conditions for the crystallization of salt efflorescence, the risk associated with salt weathering may be even higher in the future than it is currently.

Keywords: Prague Castle, archaeological site, climate change, historical building materials, weathering, climatic factors

# Obsah

1. Úvod .....	1
2. Lokalizace a historie osídlení .....	3
2.1. Charakteristika III. nádvoří .....	4
3. Historické stavební materiály a základní klimatické faktory .....	6
3.1. Historické stavební materiály .....	6
3.2. Voda .....	8
3.3. Teplota .....	10
4. Vliv klimatických faktorů na degradaci historických stavebních materiálů .....	11
4.1. Materiály přítomné v zájmové oblasti a jejich specifika .....	11
4.2. Degradáční procesy .....	12
4.3. Voda, soli a jíly v historických stavebních materiálech .....	13
4.3.1. Vstup vody - Infiltrační procesy .....	14
4.3.2. Migrační procesy - Proudění vody v porézním materiálu .....	15
4.3.3. Migrační procesy - Transport rozpuštěných látek .....	16
4.3.4. Evaporační procesy .....	17
4.3.5. Krystalizace solí .....	19
4.3.6. Bobtnání jílových minerálů .....	20
4.4. Změna klimatických faktorů a její vliv na procesy .....	21
4.4.1. Teplotní změny .....	22
4.4.2. Vlhkostní změny .....	23
5. Metodika .....	23
5.1. Lokalizace a popis čidel .....	24
5.2. Sběr dat .....	26
5.3. Měření mrazových cyklů .....	26

5.4. Měření solných zvětrávacích cyklů .....	27
6. Výsledky.....	28
6.1 Mrazové zvětrávání .....	28
6.2 Solné zvětrávání.....	29
7. Diskuze .....	32
6.1. Výroční zpráva průzkumů a měření mikroklimatu .....	33
6.2. Zpráva o výsledcích výzkumu zasolení zdiv pod III. nádvořím na Pražském hradě.....	37
8. Závěr .....	40
9. Zdroje.....	41
9.1. Literatura .....	41
9.2 Datové zdroje.....	44
10. Seznam obrázků .....	45
11. Seznam tabulek .....	45
12. Seznam grafů.....	45
13. Přílohy.....	46
13.1. Příloha 1 - Schéma instalovaných sond v půdorysu Velkých vykopávek.....	46

# 1. Úvod

Pražský hrad byl, je a bude jedním z nejvýznamnějších symbolů státnosti České republiky. Znamky osídlení oblasti hradčanského hřbetu sahají až do neolitu (Frolík & Smetánka, 1997) a hrad byl v průběhu dějin několikrát přestavován a území jeho zástavby se zvětšovalo postupně až do současné podoby. Se zvětšováním plochy území úměrně stoupal hrad také do výšky, původní základy starších domů byly zasypávány a nad nimi vyrůstaly budovy nové. V roce 1925 ale byla odkryta dlažba III. nádvoří, pod kterou byly nalezeny pozůstatky těchto základů spolu s velkým množstvím archeologických předmětů z celého spektra našich dějin. Do současnosti zde probíhají archeologické a restaurátorské práce vedené Archeologickým ústavem (ARUP) Akademií věd ČR, se kterou jsem na tomto projektu spolupracoval. Areál představuje jedno z nejbohatších archeologických nalezišť v České republice, které je nutné zkoumat a zároveň zachovávat v co nejpůvodnějším stavu. Areálu je věnována má práce, která se zabývá vlivem mikroklimatu a globální změny klimatu na hmotné kulturní dědictví tohoto areálu, zejména pak právě archeologickým vykopávkám pod III. nádvořím. Je zde mnoho faktorů, které neumožňují komplexnější archeologický výzkum a velmi komplikují i současné výkopové práce, mezi nejvýznamnější patří zahuštěnost zástavby, zvýšená přítomnost turistů, podzemní infrastruktura a ochranné prvky související s hradem jakožto sídlem hlavy státu.

Motivací pro vytvoření této práce byla skutečnost, že historický materiál, ze kterého jsou vybudovány pozůstatky budov z doby rozkvětu českého království, podléhá procesům degradace a zvětrávání. Prostory celého Pražského hradu jsou historicky velmi úzce spjaty s českou historií a je tak třeba zabránit tomu, aby některé jeho části degradovaly v důsledku absence lidské péče a upadly by v zapomnění. Pro zachování této kulturní památky je třeba minimalizovat škody způsobené vlivem klimatických faktorů, které se podílejí na některých procesech a konzervovat archeologické naleziště v současném stavu, aby již dále nepodléhalo destrukčním procesům. Tomuto tématu se současně věnuje pouze velmi málo odborných článků a studií, tudíž tato práce může sloužit jako podkladový materiál pro další projekty v budoucnosti.

Cílem této práce je odhadnout, v jaké míře je ovlivněno zvětrávání historických materiálů pod dlažbou III. nádvoří změnami různých klimatických faktorů. Toho chci dosáhnout porovnáním závěrů z rešeršní části práce s vlastním výzkumem, který se věnuje



stanovení četnosti mrazových a solných zvětrávacích cyklů. Vedlejším cílem této práce je rešeršní analýza všech jednotlivých historických materiálů v zájmové oblasti z hlediska odolnosti vůči degradačním procesům, které jsou v současnosti přítomny v archeologickém komplexu a také jak se tato odolnost bude měnit při měnících se klimatických faktorech.

Tato práce je strukturována do osmi kapitol, na úvodní část navazuje lokalizace zájmové oblasti a stručná historie osídlení Pražského hradu, dále popisují nejvýznamnější stavební materiály, které se zde nachází a také základní klimatické faktory, které ovlivňují mikroklima pod dlažbou III. nádvoří. V další kapitole řeším vliv těchto klimatických faktorů na degradaci historických stavebních materiálů, seznamuji čtenáře s jednotlivými procesy, které se mohou v zájmové oblasti objevit a také se snažím předpovědět, jak procesy ovlivní změna klimatických faktorů v budoucnosti. Kapitola 5 se zabývá metodikou praktické části a je rozdělena na lokalizaci a popis čidel, metody sběru dat a samotná měření, která se věnují určení četnosti mrazových a solných zvětrávacích cyklů za časové období jednoho roku. Šestá kapitola sdružuje výsledky praktické části a sedmá kapitola diskutuje tyto výsledky se zdroji relevantními k zájmové oblasti. Závěrem shrnuji výsledky celé bakalářské práce a nové poznatky ohledně problematiky vlivu klimatu na archeologický areál na Pražském hradě.

## 2. Lokalizace a historie osídlení

Areál Pražského hradu, tyčící se na skalnatém výběžku levého břehu řeky Vltavy ve výšce 250 metrů nad mořem, je nejstarším stálým sídelním centrem státního útvaru v Evropě (Frolík & Smetánka, 1997). Stojí na hřebeni Opyš a celkově má se svými přístavbami a opevněním délku 570 metrů a šířku 128 metrů. Od okolního terénu je oddělen z jihu příkrým svahem, který sestupuje až ke břehům Vltavy a ze severu zářezem potoka Brusnice, za níž pokračuje letenské a hradčanské návrší. Mé zájmové území se nachází jižně od katedrály sv. Víta a přímo s ní sousedí – oblast archeologických vykopávek pod III. hradním nádvořím.

Prvotní známky osídlení oblasti Pražského hradu se sice objevují již v neolitu, avšak nejstarší písemné prameny sahají do 9. století, kdy se zde pravděpodobně nacházelo dřevěné (palisádové) opevnění. Hrad se v průběhu dějin stal centrem českého království pro všechny dynastie vládoucí na českém území, od Přemyslovců až po Habsburky (Frolík & Smetánka, 1997). Mnoho událostí, které jsou spjaty s českou historií se přímo či nepřímo promítá do jak do architektury budov Pražského hradu, tak také do archeologického naleziště pod nimi. Při vzestupu ekonomické situace v českých zemích probíhalo přistavování nových komplexů budov, při poklesu naopak rozšiřování areálu stagnovalo, v dobách rozvoje politického vlivu jsou četnější a rozmanitější archeologické nálezy a doby úpadku se projevují nedostatkem záznamů a písemností (Frolík & Smetánka, 1997), což se odráží v současné podobě vykopávek pod III. nádvořím. Největší dobu rozkvětu zažíval hrad za vlády lucemburského krále Karla IV., kdy se stal také oficiálním sídlem císaře Svaté říše římské a započala stavba katedrály sv. Víta, která byla dostavěna až v roce 1929. Krypty pod katedrálou přímo sousedí s vykopávkami pod třetím nádvořím a nacházejí se podobné struktury a fragmenty postavené ze stejných stavebních materiálů. Pražský hrad si oblíbili hlavně dva habsburští panovníci Rudolf II. a Ferdinand V., kteří si hrad zvolili za své stálé sídlo a za jejich vlády probíhaly další rekonstrukce a dostavby nových palácových křídel a opevnění zejména v oblasti kolem III. nádvoří. Po utvoření demokratického způsobu vlády v roce 1918 začal být Pražský hrad také sídlem prezidenta a symbolem rozvíjející se Československé republiky. Koncem 19. a s příchodem 20. století se také začíná rozvíjet výzkum archeologických pozůstatků po dobách minulých, v té době spojený s rozsáhlými stavebními pracemi souvisejícími s rekonstrukcí III. nádvoří a odkrytím archeologického naleziště, s posvěcením tehdejšího prezidenta T. G. Masaryka. Intenzivní archeologický výzkum zde probíhal mezi lety 1925-1929, poté bylo naleziště

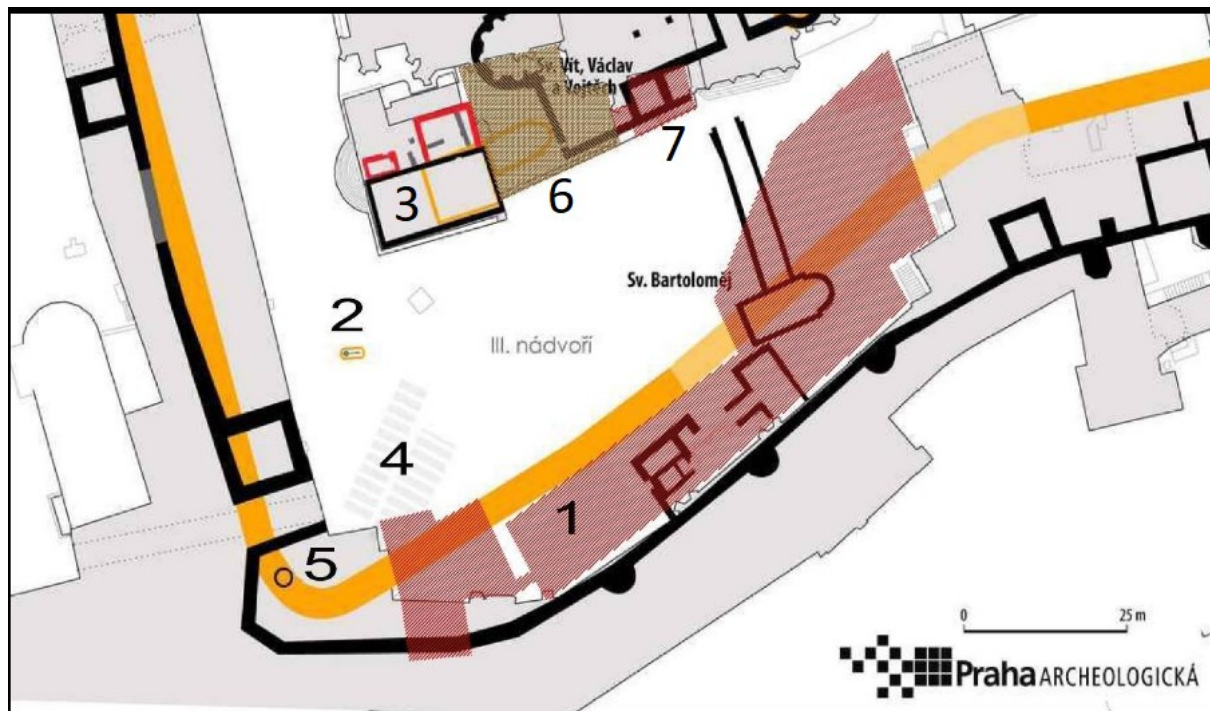
překryto železobetonovou konstrukcí s dlažbou za účelem ochrany proti vnějším vlivům. V dnešní době slouží Hrad hlavně jako kulturně-historická památka.

## **2.1. Charakteristika III. nádvoří**

III. nádvoří Pražského hradu je hlavní a největší ze všech čtyř hradních nádvoří, nachází se ve středu komplexu a obklopuje svatovítskou katedrálu. Souřadnice Mrákotínského monolitu, který se nachází uprostřed III. nádvoří, jsou 50.0902725N a 14.4005122E. Je ohraničeno z jihu Starým královským palácem, z východu je spojeno průchodem s náměstím u Svatého Jiří, ze severu hraničí s katedrálou a na západě je spojeno bránou s II. nádvořím. Právě tato část hradu je pravděpodobně nejdéle osídlena a pod železobetonovou konstrukcí se nachází rozsáhlé archeologické naleziště s pozůstatky základů staveb, které byly zasypány v důsledku vypuknutí velkého požáru v roce 1541. Tyto stavby byly převážně románského a raně gotického slohu z období mezi 10. a 13. stoletím. Některé archeologické nálezy pod nádvořím pocházejí z druhé poloviny 9. století (tzv. hrob bojovníka), častější jsou však pozdní nálezy z 11. století, kdy se místo začalo více využívat jako pohřebiště.

Díky své rozloze a hloubce dosahující až 14 metrů mocnosti zkoumaných vrstev se jedná o jedno z nejvýznamnějších evropských nalezišť, fragmenty zdiva jsou nejčastěji tvořeny opukou a břidlicí, ojediněle se také dochovaly části dřevěných konstrukcí, které se nachází v okolí základů původních dřevohliněných hradeb z poloviny 10. století a nejspíše sloužily jako výztuže těchto hradeb (Boháčová, 2017). Toto naleziště bylo poprvé odkryto v roce 1925 a probíhaly zde intenzivní archeologické a konzervační akce až do roku 1929, kdy byla většina nádvoří zakryta železobetonovou konstrukcí s dlažbou navrženou slovinským architektem Josipem Plečnikem (Frolík & Smetánka, 1997). Před odkrytím a v průběhu archeologických prací se dešťová voda infiltrovala do půdy nádvoří přímo skrz naleziště, stavební materiál v základech středověkých staveb byl proto až do vybudování železobetonové konstrukce vystaven výkyvům teplot, eolické činnosti a s ní souvisejícímu odnosu a vodě, což způsobilo zvětrávání materiálu (Frolík & Smetánka, 1997). Tato vybudovaná konstrukce má velký vliv na mikroklima vykopávek pod sebou, například při větších výkyvech teplot v letních měsících mohou ve spojení s intenzivním slunečním osvětlením nastat vlivem ohřevu betonové

konstrukce teplotní anomálie. Také je možné, že se v zimě může skrz dlažbu například dostat roztátý sníh s podílem technické soli.



*Obrázek 1: Půdorys III. nádvoří Pražského hradu s významnými dochovanými objekty. Velké vykopávky (1), hrob bojovníka (2), starý biskupský palác (3), původní vstup do hradu s částečně zachovalou cestou (4), tzv. románská studna (5), Malé vykopávky (6), potenciálně problémová část Malých vykopávek (7). Upraveno dle Boháčové (2017)*

Vykopávky pod nádvořím jsou rozděleny hlavní rozvodní chodbou na tzv. Malé vykopávky, které se nacházejí na severní straně nádvoří a jsou částečně odkryty (tím pádem jsou ve velké míře ovlivněny vnějším prostředím) a na tzv. Velké vykopávky nacházející se na jižní straně, které jsou zcela zakryty dlažbou nádvoří. Do komplexu Malých vykopávek se vstupuje úzkým průchodem mezi budovou Starého probošství a katedrálou sv. Víta, do Velkých vykopávek se dá dostat přes budovu Prezidentského paláce. Areál Malých vykopávek narozdíl od některých částí Velkých vykopávek a Královské hrobky, která se nachází přímo pod katedrálou sv. Víta nebyl dodnes zařazen do systematické restaurátorské údržby, což se odráží v jeho stavu (Maříková, Válek & Weiss, 2022). Proběhlo zde pouze povrchové očištění základů objektů před sanací betonové konstrukce při technické rekonstrukci v roce 2007, následně připravovaná restaurace a konzervace komplexu však nebyla realizována (fragменты byly

pouze překryty souvrstvím zabraňujícím kontaminaci). Jediným ryze restaurátorským zásahem, který byl v komplexu Malých vykopávek uskutečněn, je konzervace jednotlivých fragmentů zdiva z let 1993–1994, které byly provedeny relativně úspěšně (Maříková, Válek & Weiss, 2022).

Díky obnovené střešní konstrukci (obr. 1, číslo 6) z roku 2007 zastřešující části areálu Malých vykopávek, které se nacházejí na úrovni okolního terénu, je komplex částečně chráněn proti dešťové vodě. Problémy se vsakováním vody ale mohou nastat v její východní části (obr. 1, číslo 7), která je, stejně jako celá oblast Velkých vykopávek, překryta železobetonovou konstrukcí a dlažbou a také v místech, kde vykopávky sousedí se stěnou katedrály a starého biskupského paláce (obr. 1, číslo 3). Významný je také vliv proudění větru, který se zde vyskytuje díky mřížovaným průhledům nacházejících se na jižní straně Malých vykopávek, které umožňují nahlédnout do této části vykopávek turistům přímo z prostranství III. nádvoří.

### **3. Historické stavební materiály a základní klimatické faktory**

#### **3.1. Historické stavební materiály**

Jako stavební materiál můžeme chápat jakoukoliv látku se specifickými vlastnostmi a přednostmi, které je možné využít při budování různorodých struktur. Na rozdíl od klasických současně používaných materiálů, se kterými se setkáváme v moderní architektuře mají historické stavební materiály často různorodější složení a strukturu. I přesto, že fragmenty historického materiálu mohou přežít několik staletí, je nutné zvolit takové metody a prostředky ochrany nebo obnovy, jejichž použití prodlouží existenci pozůstatků po historické stavbě s minimálním poškozením (Kotlík, 1999). Z historických stavebních materiálů můžeme nejčastěji pozorovat pálené a nepálené cihly, stavební kameny různých druhů (například pískovec nebo vápenec), ručně vyráběná pojiva (nejstaršími a nejpoužívanějšími jsou vápno a sádra, produktem vápna smíchaného s vodou a pískem je malta). Na III. nádvoří je nejpoužívanějším materiálem opuka a břidlice a případně také zbytky dřevěných konstrukcí, aplikace těchto materiálů má na území Česka velmi dlouhou tradici a lze je rozpoznat ve velkém množství u našich nejstarších stavebních památek (Kotlík, 1999), jsou také hojně rozšířeny i v dalších evropských zemích.

Jedním z nejdůležitějších aspektů historického stavebního materiálu je přítomnost dutin a pórů v tomto materiálu, takže je můžeme chápat jako materiály porézní s určitou hodnotou pórovitosti. Pórovitost je fyzikální vlastnost horniny, která vyjadřuje objem volného prostoru (pórů a dutin) mezi pevnou částí horniny, u některých materiálů je často vidět i bez použití přibližovacích přístrojů, například u písku je možné si ji představit jako propojený prostor mezi zrnky písku (Hall & Hoff, 2012). Pórovitost je důležitá z hlediska nasákavosti materiálu, kterou její hodnota významně ovlivňuje, dále se z ní také může určit zadržený objem vody v pórech. Pórovitost je v hydrogeologii rozdělena na celkovou, která je definována jako objem všech pórů dělený celkovým objemem materiálu a efektivní, která je definována jako poměr objemu puklin vhodných pro gravitační pohyb vody k celkovému objemu materiálu, obě veličiny se uvádějí v procentech.

Celková pórovitost opuky se pohybuje v rozmezí 15-40 %, ve výjimečných případech může dosahovat až 60 %, což má vliv jak na přirozenou vlhkost horniny, tak na větší míru zvětrávání tohoto kamene (Kotlík, Kaše & Šrámek, 2000). Kromě pórovitosti je také významná velikost samotných pórů, vysoký podíl pórů s poloměrem nad 1  $\mu\text{m}$  způsobuje u opuky snížení pevnosti, tvrdosti a zvýšení nasákavosti (Marešová, 2006). Podle studie věnující se rozboru architektonických fragmentů pod III. nádvořím (Slížková, 2021) byla ze vzorku opuky ze zadní části románského fragmentu stanovena průměrná pórovitost vzorku na 33,08 % metodou rtuťové porozimetrie. Zastoupeny byly v této studii převážně makropóry o velikosti 0,1-1  $\mu\text{m}$  (více než 70 % všech pórů ve vzorku). Podle Slížkové (2021) se *„nárůst pórovitosti na snímcích jeví jako důsledek úbytku základní křemičité hmoty, patrně v důsledku jejího postupného rozpouštění a vymývání vodou“*.

Naopak velmi nízkou pórovitost mají břidlice, zejména pak jílové břidlice, které jsou z většiny tvořeny částicemi s velikostí pod 4  $\mu\text{m}$ . Díky malému prostoru, které póry v břidlici zaujímají, má její pórovitost horní hranici 5 %, bude proto z tohoto hlediska výrazně odolnější vůči mechanickému poškození než opuka. Odolnost jílových břidlic se ale může snížit při vysoké koncentraci jílových minerálů v tomto materiálu, díky jejich schopnosti vázat na sebe vodu sorpcí molekul vody na povrch částic, je zajištěna rovnovážná vlhkost a jejich nadměrné vysušení může jednoduše způsobit mechanické poškození materiálu (Kotlík, 1999). Podle umístění pórů lze pórovitost také rozdělit na spojitou, u které jsou dutiny spojeny s okolním prostředím a uzavřenou, zde jsou póry izolované uvnitř materiálu.

Další vlastností historických stavebních materiálů, která přímo souvisí s pórovitostí je propustnost, popisuje, jak je materiál schopný propouštět vodu vlivem hydraulického gradientu. Propustnost je z archeologického hlediska důležitá zejména pro stanovení množství vody, které materiály propustí a jak je tím následně ovlivněna jejich degradace. V hydrogeologii se rozlišuje na průlinovou, puklinovou a kombinovanou. Průlinová propustnost předpokládá existenci navzájem propojených průlin v materiálu, typická je pro sypké a nezpevněné sedimenty (například pískovce). U puklinové propustnosti je voda vedena materiálem přes spojené pukliny a zlomy, vyskytuje se hlavně u tvrdších a pevnějších materiálů (pro zájmové území platí zejména pro opuku a břidlice). Kombinovaná propustnost spojuje oba předchozí případy, v materiálu voda proudí jak přes spojené pukliny a zlomy, tak také skrz průliny. Kotlík ve své knize Stavební materiály historických objektů (1999) uvádí, že i přes skutečnost, že mají opuky velké množství malých pórů, díky nimž jsou relativně nasákové, jsou obecně známy malou propustností, která ztěžuje průnik konzervačních prostředků. Malá propustnost opuky je způsobena hlavně vysokou koncentrací pórů s velikostí pod 1  $\mu\text{m}$  a také možnou nespojitostí pórů.

### 3.2. Voda

Voda je jedním z klíčových prvků, které mohou způsobovat zvětrávání a následnou degradaci stavebního materiálu. Toho může být dosaženo několika různými cestami. Voda v plynném skupenství zvyšuje vlhkost vzduchu v okolí materiálu, což prospívá vzniku biologických procesů a vzniku chemického degradace, jako je například solné zvětrávání. V určitých klimatických podmínkách může docházet k mrazovému zvětrávání, které je způsobeno expanzí vody při přechodu do pevného stavu a následnému narušení vnitřní textury materiálu.

Třemi základními typy pohybu vody v materiálu jsou absorpce, migrace a desorpce, absorpce označuje vstup vody do stavebního materiálu, migrace popisuje pohyb v něm a desorpce označuje proces ztráty vody z materiálu do okolního prostředí a probíhá v případě stavebních materiálů obvykle výparem (Hall & Hoff, 2012). Množství vody v porézním prostředí se vyjadřuje stupněm nasycení materiálu nebo vlhkostí ( $w_v$ ), ta se označuje jako podíl objemu vody v materiálu ( $V_w$ ) na celkové množství materiálu ( $V_d$ ):

$$w_v = \frac{V_w}{V_d}$$

Stupeň nasycení je bezrozměrné číslo, které se udává jako poměr objemu vody v pórech k celkovému objemu pórů v materiálu. Při absorpci může materiál, který je nesaturovaný (jeho póry nejsou zcela vyplněny vodou), dosáhnout stavu, kdy už nemůže pojmout více vody a dochází k saturaci, tedy plnému nasycení tohoto materiálu. Při plné saturaci materiálu je objemová vlhkost rovna pórovitosti materiálu, tím pádem je v nesaturovaném prostředí vlhkost vždy mezi nulou a maximální pórovitostí materiálu. Z krátkodobého hlediska to není pro materiál závažný problém, ovšem při častém střídání cyklů saturace a desaturace může materiál ztrácet pevnost, například u opukového materiálu při vlhkosti 15 % může ztráta pevnosti dosahovat až 60 % (Marešová, 2006). Dalším termínem, který je úzce spjatý s vlhkostí je obsah vody. Je nejčastěji používán pro popis koncentrace vody v materiálu a stejně jako vlhkost může nabývat pouze hodnot od nuly až do maximální hodnoty pórovitosti materiálu při saturaci. Narozdíl od vlhkosti ale udává analyticky přesný objem ve vzorku materiálu, což je užitečné například při stanovení přesné hodnoty pórovitosti u vybraného vzorku (Hall & Hoff, 2012). Obsah vody je měřitelný přímými metodami (gravimetricky nebo pomocí chemické analýzy vody) nebo nepřímými metodami (radiograficky nebo metodami využívajícími gama a rentgenové paprsky).

Dalším charakteristickým pohybem vody v nejen prostředí se stavebním materiálem je kapilární vztlínání. Každý materiál má svou povrchovou energii a své povrchové napětí, atomy a molekuly na povrchu materiálu jsou méně stabilní než uvnitř materiálu, proto má sklon vytvářet co nejmenší povrch (Hall & Hoff, 2012). Tendence vody spontánně se rozšířit po povrchu pevného materiálu se označuje jako kapilární absorpce, pokud kapalina přilne k povrchu pevného materiálu, dochází ke smáčení, povrch kapaliny se pohybuje směrem nahoru po kapilárách, dokud nedojde k rovnováze mezi povrchovým napětím a gravitačními silami, tento jev se označuje jako kapilární vztlínání. To může často vést k rychlejší saturaci stavebního materiálu vlivem zvětšení obsahu povrchu, který voda smáčí.



### 3.3. Teplota

Teplota je jedním z klimatických faktorů, které mohou významně ovlivňovat zvětrávání stavebního materiálu ve vykopávkách pod III. nádvořím, protože při výkyvech teplot mohou materiály měnit své fyzikální vlastnosti, v jejichž důsledku mohou ztrácet pevnost, příp. může docházet k jejich mechanickému rozrušování.

Jedním z teplotních procesů, kterým je materiál zasažen při dlouhodobých výkyvech teplot, je teplotní roztažnost. Je to jev, při kterém materiál mění svou strukturu a parametry v závislosti na dodávání či odebrání tepla materiálu. Teplotní roztažnost je rozdělena podle toho, jaké rozměrové vlastnosti materiálu jsou ovlivňovány: na objemovou roztažnost, při které jsou transformovány objemové vlastnosti kamene, a lineární roztažnost, při které se mění délkové parametry kamene. Teplotní objemová roztažnost pevných látek je udávána koeficientem teplotní objemové roztažnosti  $\beta$ , který je definovaný vzorcem

$$\beta = \frac{1}{V_0} \frac{dV}{dT}$$

$V_0$  v tomto vztahu značí objem měřený ke vztažné teplotě (je předem určena) a  $dV$  je objemová derivace v teplotním intervalu  $dT$ . Při rozpínání materiálu se molekuly v materiálu pohybují rychleji, při smrštění materiálu naopak molekuly ztrácejí svoji kinetickou rychlost. Tento jev má různou intenzitu u odlišných stavebních materiálů, což je zapříčiněno odlišnými fyzikálními vlastnostmi materiálů, zejména hodnotou pórovitosti, ale významným faktorem je také stáří materiálu. Důležitou vlastností tepelné roztažnosti je možná přítomnost anizotropie, tento proces může, ale nemusí být závislý na směru působení. Například u opuky je anizotropie délkové objemové roztažnosti vyrovnávána pórovým systémem, který usměrňuje deformaci kamene. Po překročení meze pevnosti, což je maximální hodnota normálového napětí, při které není porušena struktura materiálu, se ale začínají objevovat destrukční dilatační trhliny (Marešová, 2006).

Dalším destruktivním procesem, ve kterém hraje hlavní roli kromě teplotního faktoru také voda, je mrazové zvětrávání. Stavební materiál je zpravidla vystaven vnějšímu klimatu a výrazným sezónním změnám teplot, příkladem je částečně odkrytá plocha Malých vykopávek, kde struktura mřížovaných průzorů umožňuje proudění studeného nebo teplého vzduchu do naleziště a z něj. Infiltrovaná voda v materiálu může zmrznout a dochází k mrazovému zvětrávání neboli ke zvětšení objemu kapaliny v pevném skupenství, a mechanickému

rozrušování materiálu. Kromě množství vody uvnitř materiálu je mrazové zvětrávání významně ovlivněno také prostorovým uspořádáním vody v materiálu (Walder & Hallet, 1986).

## **4. Vliv klimatických faktorů na degradaci historických stavebních materiálů**

### **4.1. Materiály přítomné v zájmové oblasti a jejich specifika**

Fragments a základy staveb na III. nádvoří pocházejí z období kolem 11. a 12. století, ve kterém byl na území Česka rozšířen románský sloh. Stavby v tomto slohu jsou často charakteristické přítomností různých druhů stavebních kamenů, v případě III. nádvoří jsou použity hlavně jílové břidlice a opuky, případně zbytky dřevěných konstrukcí palisádového opevnění (Frolík & Smetánka, 1997).

Termín opuka je v odborné literatuře považován za nejednoznačný, mnohem častěji jsou používány přesnější názvy podle toho, z čeho je tento stavební materiál složen (například písčité slínovce). Podle Vítka (2011) jde ve většině případů o světlou, jemnozrnnou sedimentární horninu s větším či menším obsahem jílových minerálů a příměsí sloučenin včetně  $\text{CaCO}_3$  a  $\text{SiO}_2$ . Díky relativně nízké tvrdosti a rozpukání do vhodných stavebních bloků je opuka dobře opracovatelným kamenem, díky čemuž byla hojně využívána při budování prvních kamenných staveb na území Česka, mimo jiné i při výstavě baziliky sv. Jiří na Pražském hradě. S přestávkami se jako stavebním materiálem používala až do první poloviny 20. století.

Různé druhy opuk těžené v různých oblastech Česka mají odlišné fyzikální vlastnosti. Například ve studii vedené Vejmelkovou et al. (2014) bylo zjištěno, že efektivní pórovitost opuky těžené na Džbánsku, ze kterého se materiál dovážel na Pražský hrad, je rozdílná o skoro 33 % v porovnání s opukou těženou v Příbylově. Z hlediska tepelné roztažnosti je opuka velmi náchylným materiálem, podle Kotlíka, Kaše & Šrámka (2000) se mohou teploty na povrchu kamene měnit během krátkého časového úseku i o několik desítek stupňů, což může způsobovat lineární i objemové dilatace a následné mechanické rozrušení kamene vlivem překročení meze pevnosti.

Dalším přítomným materiálem v areálu vykopávek pod III. nádvořím je jílová břidlice, částečně metamorfovaná hornina s majoritním podílem jílových minerálů a prachovců, díky čemuž má velmi jemnou zrnitost. Důležitým poznatkem je, že vrstvy šedých a hnědošedých břidlic tvoří spodní vrstvy hradčanského ostrohu, na kterém je postaven Pražský hrad (Chlupáč et al., 2011). Břidlice je vhodným stavebním materiálem kromě nízké nasákavosti především díky tomu, že se při hrubém opracování rozpuká na podélné desky. Tenké desky mají využití na stavbu střešní krytiny, silnější desky se mohou využít na stavbu zdiva. Podle Netopilové (2004) roste tepelná roztažnost břidlice zpočátku zahřívání poměrně rovnoměrně, změny v kompaktnosti materiálu nastávají až okolo teploty 600 °C, kdy dochází k metamorfóze křemene a slídy, které břidlice obsahuje. Tento proces má vliv na tvrdost materiálu, přeměna křemene jakožto nejodolnější složky břidlice zajistí jednodušší opracování kamene na bloky. Pokud je tento materiál vystaven jednostrannému ohřevu, vlivem značného tepelného spádu dochází k výraznému samovolnému odlupování jednotlivých vrstev na desky.

## **4.2. Degradční procesy**

Tato kapitola se věnuje procesům, které nastávají vlivem působení vody, teploty, v materiálech přítomných solí a působení organismů. Jedním z možných rozdělení degradačních procesů je rozdělení podle způsobu rozrušování materiálu na fyzikální, chemickou a biogenní. Toto rozdělení je významné při určování původu a dopadu jednotlivých faktorů na zájmovou oblast pod III. nádvořím, protože rozlišuje podle způsobu vzniku daného zvětrávání. Fyzikální degradací je myšleno mechanické rozrušování materiálu, které je kromě teplotních změn, vlhkostních změn a nadměrného zatížení kamene způsobeno především působením vody, proto bude v této kapitole kladen důraz především na procesy spojené s tímto faktorem. Při průběhu tohoto typu degradace není ovlivněna chemická struktura materiálu, mění se pouze jeho teplotní, délkové a objemové vlastnosti. Procesy spojené s tímto typem degradace a zároveň se zájmovou oblastí jsou především mrazové zvětrávání a také bobtnání jílových minerálů.

Procesy chemické degradace jsou založeny na rozrušování a přeměnách vlastností materiálu, které jsou způsobeny chemickými reakcemi s okolním prostředím. Patří mezi ně například zmíněná krystalizace solí nebo také rozpouštění a hydratace. Pro zájmovou oblast je

důležitým procesem kromě krystalizace právě rozpouštění materiálu, které může být způsobeno vnějším klimatem. Například Příklad et al. (2003) ve své práci věnované experimentálnímu zvětrávání opuky píše, že k chemickému rozrušení struktury opukového kamene také mohou významně přispět kyselé srážky se zvýšenou koncentrací oxidu uhličitého (CO<sub>2</sub>) nebo oxidu siřičitého (SO<sub>2</sub>).

Posledním typem je biogenní degradace neboli destrukce materiálu zapříčiněná působením živých organismů. Při zvýšených hodnotách vlhkosti vzduchu a teploty (tyto hodnoty se mohou lišit v závislosti na typu materiálu), může docházet k tvorbě povlaků na povrchu materiálu, způsobených houbami, řasami nebo jinými mikroorganismy, které poté dále rozkládají organickou hmotu a způsobují degradaci materiálu (Mandrioli, 2018). Vzhledem k povaze tohoto zvětrávání jsou nejčastěji postiženy organické materiály, v případě zájmové oblasti to mohou být hlavně zbytky dřevěných konstrukcí.

Procesy v materiálu se také dají rozdělit podle toho, kde se nachází voda ve vztahu k materiálu na infiltrační, migrační a evaporační. Navazující podkapitoly jsou členěny podle tohoto rozdělení, aby byl zřejmý záměr autora soustředit práci pouze na takové procesy, které mohou nastat v zájmové oblasti práce. Souhrnně se dají všechny tyto procesy označit jako degradační, neboť vyvolávají změnu mechanických, chemických, fyzikálních i estetických vlastností opuky a dalších stavebních materiálů (Kotlík, Kaše & Šrámek, 2000). Kromě těchto procesů spojených se vstupem, prouděním a výstupem vody z materiálu jsou do této kapitoly zařazeny také procesy spojené s krystalizací solí a bobtnáním jílových minerálů, které jsou obojí relevantní ve vztahu k situaci pod III. nádvořím. Degradace u těchto procesů může mít i více fází, například níže popsaná krystalizace solí se objevuje jak v infiltračních, tak také v evaporačních procesech, nicméně je zařazena pod evaporační procesy, protože hlavní fáze probíhá zde. Důležitým poznatkem týkajícím se všech těchto procesů je skutečnost, že podle Teplého (1997) nelze procesy degradace zastavit, lze je pouze zpomalit na určitý časový interval.

### **4.3. Voda, soli a jíly v historických stavebních materiálech**

V této kapitole jsou podrobně popsány nejdůležitější destruktivní procesy, které se objevují v archeologickém nalezišti pod III. nádvořím a s nimi spojené látky, které stojí za tvorbou těchto

procesů. Nejvýznamnějším faktorem, na který zde bude kladen důraz, je proudění vody, tedy procesy spojené s infiltrací, migrací a evaporací vody v historických stavebních materiálech vyskytujících se v zájmové oblasti. Neméně kritické je také působení solného zvětrávání a vytváření solných povlaků na povrchu zdiva, které také může mít kritický význam pro budoucí stav archeologického komplexu. Poslední podkapitola této části se věnuje problémům spojeným s bobtnáním jílových minerálů, které mohou nastat ve specifických podmínkách u jílové břidlice, jednoho z klíčových stavebních materiálů pod III. nádvořím.

#### **4.3.1. Vstup vody – Infiltrační procesy**

Voda vstupuje do materiálu buď gravitačním vsakováním, které může být vyvoláno například atmosférickým srážkami nebo také zvýšením hladiny podzemní vody, kdy bude část materiálu v přímém kontaktu s vodou. Další možností infiltrace vody do materiálu nastává při kontaktu s půdou, kdy materiál pojme vodu kapilárním vztláním právě z půdní nebo z podzemní vody. V neposlední řadě se voda do areálu může dostat také průsakem skrz vodovodní a kanalizační systémy (Maříková, Válek & Weiss, 2022), takováto voda může být pro materiál obzvláště nebezpečná díky možnému znečištění těchto vod.

Kromě kapalného skupenství se může voda dostat do materiálu i ve skupenství plynném ze vzdušné vlhkosti, a to buď vlivem kondenzace nebo hygroskopicity materiálu, která je dána přítomnými solemi (Charola, 2000). Pokud je materiál nebo látka hygroskopická, znamená to, že může absorbovat vzdušnou vodní páru, dokud nedosáhne rovnovážného stavu s relativní vlhkostí okolního prostředí. Tyto materiály lze dále rozlišovat podle míry hygroskopicity: látky s vysokou mírou hygroskopicity jsou například sůl a některé druhy dřeva (relevantní v zájmové oblasti), mírně hygroskopická látka je například kůže a kožené produkty. Naopak hydrofobní je materiál, jehož molekuly na povrchu nijak nereagují s vodou a netvoří s ní téměř žádné vodíkové můstky. Kondenzace vlhkosti může podle Přikryla et al. (2017) způsobit dilataci opukového materiálu, což může vést k postupnému mechanickému rozrušování materiálu.

### 4.3.2. Migrační procesy – Proudění vody v porézním materiálu

Voda v materiálu migruje nejčastěji v kapalném a plynném skupenství, ale částečně může migrovat i v pevném skupenství, pokud dochází k sublimaci nebo desublimaci. V kapalném skupenství voda v materiálu migruje hlavně prostřednictvím laminárního proudění, výjimečně také turbulentním prouděním a v plynném skupenství vlivem molekulární difuze, procesem definovaným jako rozptyl vodní páry vlivem tepelného pohybu částic. Laminární proudění označuje typ proudění, při kterém se nemísí jednotlivé vrstvy tekutiny, zároveň vrstvy s vyššími rychlostmi jsou zpomalovány sousedními vrstvami s nižší rychlostí a naopak (Brdička, Samek & Sopko 2005). Turbulentní proudění nastává při porušení hranic mezi jednotlivými vrstvami toku, nesourodém promíchání a vzniku vírů. Je charakterické spíše při větším průtoku migrující vody, a proto se při migraci vody uvnitř porézního materiálu objevuje výjimečně v určitých specifických místech (Hall & Hoff, 2012) a tudíž není pro tuto práci relevantní.

Tok vody v kapalném skupenství v saturovaném prostředí popisuje Darcyho zákon a v nesaturovaném prostředí platí upravený, ale konceptuálně podobný Darcyho-Buckinghamův zákon (Domenico & Schwartz, 1990). Stavební materiály jsou téměř vždy nesaturované a pokud se ojediněle saturují na lokálních místech, například na fasádách nebo základech zdí, téměř nikdy nedojde k úplné saturaci celé struktury, voda začne proudit do nesaturovaných regionů, a nakonec se vrátí zpět do okolního prostředí (Hall & Hoff, 2012). Rozšířený Darcyho zákon (Darcyho-Buckinghamův zákon), který je při těchto podmínkách uplatňován, dává do souvislosti kromě tenzoru hydraulické vodivosti  $K$  (m/s) také gradient hydraulické výšky  $\nabla h$  (bezrozměrné číslo) a objemová vlhkost  $\theta$  (bezrozměrné číslo):

$$v = K(\theta)\nabla h$$

Důležitou bezrozměrnou charakteristikou, která mimo jiné popisuje přesun vody ve spojitém materiálu je Reynoldsovo číslo. Toto číslo charakterizuje přímo povahu tohoto proudění, tedy jestli je laminární nebo turbulentní a je stanoveno pomocí střední hodnoty rychlosti proudění  $v_s$ , průměrem pórů  $d$  a kinematickou viskozitou  $\nu$ :

$$Re = \frac{v_s d}{\nu}$$

Čím je hodnota Reynoldsova čísla menší, tím je proudění laminárnější a čím je větší, tím bude proudění více turbulentního charakteru. Proudění vody v porézním materiálu budou proto dosahovat malých hodnot.

#### 4.3.3. Migrační procesy – Transport rozpuštěných látek

Na krystalizaci solí se významně podílejí procesy transportu rozpuštěných látek, zejména pak difuze, disperze, advekce a sorpce. Difuze je všesměrný rozptyl rozpuštěné látky do materiálu, který má tendenci probíhat co nejrovnoměrněji v závislosti na struktuře materiálu. Podle Slavíka (2019) je difuze oproti dalším transportním procesům v průlinovém prostředí většiny hornin méně významným a vlivným činitelem, ale v jílu a v jílových minerálech naopak nabývá na významu kvůli jemné zrnitosti materiálu, která potlačuje ostatní transportní procesy. Dalším důležitým transportním procesem je disperze, kterou lze vysvětlit jako nerovnoměrný rozptyl vody vlivem různorodé šířky a délky pórů nebo puklin v materiálu. Kromě těchto mikroskopických nerovností závisí rychlost disperze také na velikosti a tvaru zrn, nepravidelná a velká zrna obtéká voda pomaleji, než malá a zaoblená. Posledním transportním procesem, který ovlivňuje migraci solí rozpuštěných ve vodě v horninovém prostředí je advekce, která způsobuje transport rozpuštěných látek pohybem vody. Tento proces je hlavně uplatňován při výkonu stopovacích zkoušek nebo kontaminace prostředí, ale má svůj význam i při transportu solného roztoku uvnitř materiálu. Posledním významným procesem, který má vliv na transport rozpuštěných látek v materiálu je retardace. Proces začíná adsorpcí, při níž dochází k navázání molekul této látky na povrch pevných zrn díky povrchovým přitažlivým silám, tyto zrna následně migrují materiálem a látka se poté desorbuje opačným procesem na jiném místě.

Významnou veličinou pro transport rozpuštěných látek je Pecletovo číslo, což je bezrozměrná charakteristika, která popisuje proudění rozpuštěných látek v materiálu z hlediska poměru rychlosti advekce  $v_a$  a rychlosti difuze  $v_d$ , tedy jakým způsobem se pohybují rozpuštěné látky ve vodě:

$$Pe = \frac{v_a}{v_d}$$

V případě proudění v porézním materiálu bude Pecletovo číslo dosahovat hodnot menších než 1, protože zde bude výrazně převažovat rychlost difuze nad advekcí (Hall & Hoff,

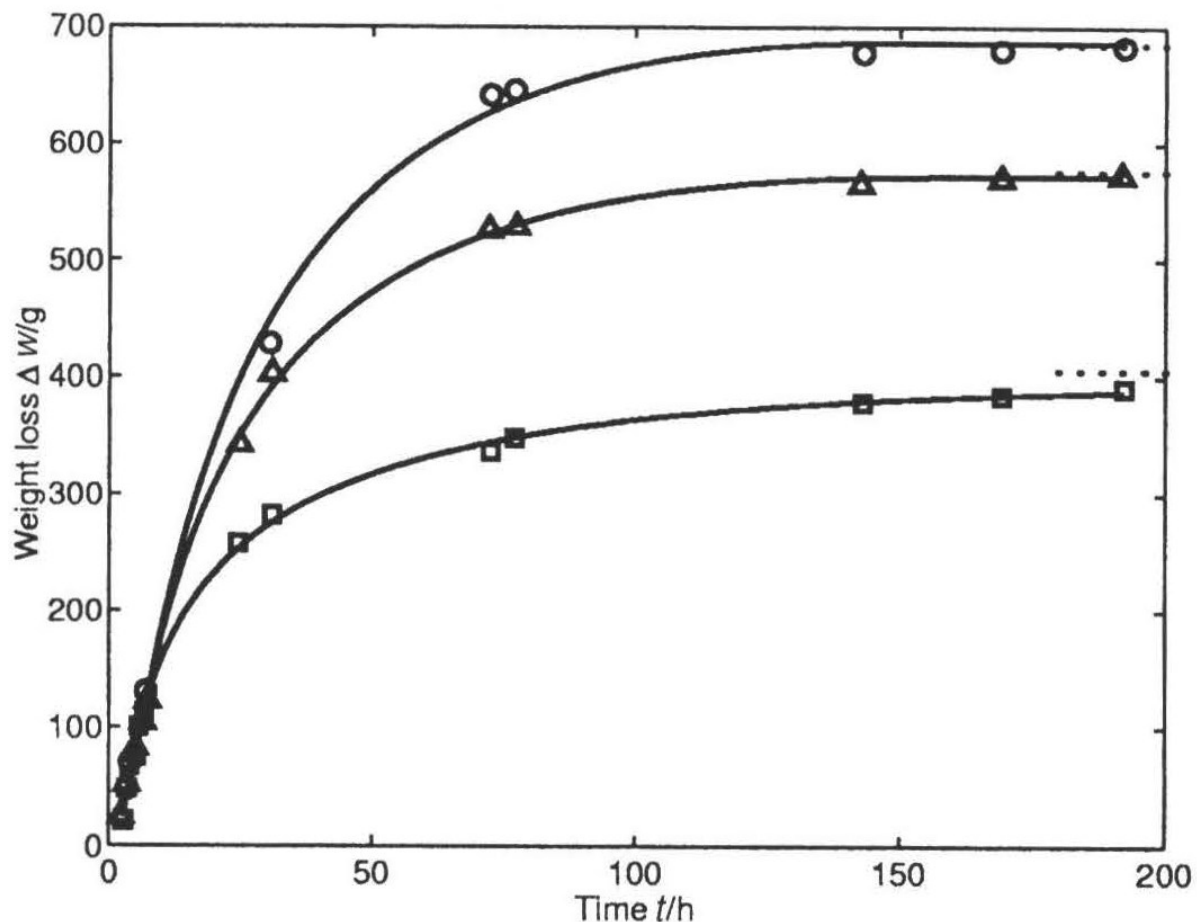
2012). Veličina bude dosahovat vyšších hodnot u povrchových toků nebo u nespojitých materiálů, například štěrkopísků, kde je dominantnější rychlost advekce.

V rozpukané břídlíci voda migruje zejména puklinami a póry, v ideálním nerozpukaném materiálu jsou aplikovány transportní procesy, téměř výlučně difuze a adsorpce (Domenico & Schwartz, 1990).

#### **4.3.4. Evaporační procesy**

Výstupním procesem vody z prostředí je evapotranspirace, je složena evaporace, která je fyzikální složkou výparu, a transpirace, která tvoří biologickou složku výparu. Pro tuto práci ale není relevantní, proto se v této kapitole budu věnovat hlavně evaporaci. Globálně evaporace spotřebuje přibližně 25 % sluneční energie a je klíčovým hydrologickým prvkem, při němž se 60 % suchozemských srážek vrací do atmosféry prostřednictvím evapotranspirace (Or et al., 2013). Je to také nejvýznamnější a zároveň nejvíce procentuálně zastoupená cesta vody z materiálu a nastává, pokud míra desorpce vody z materiálu převažuje nad absorpcí. Evaporace má podle Halla & Hoffa (2012) čtyři hlavní fáze, nejdříve voda existuje jako nenasycený tok kapaliny uvnitř porézního materiálu, poté následuje změna kapalného skupenství vody na plynné, tok vytvořeného plynu uvnitř porézního materiálu a poslední fází je konvektivně difuzní přenos plynu z povrchu materiálu do okolního prostředí. Intenzita a průběh evaporace významně ovlivňují vlhkostní komunikaci mezi materiálem a jeho bezprostředním okolím, evaporace je tudíž základním činitelem, který pohání vlhkostní toky u stavebních materiálů (Hall & Hoff, 2012).





Obrázek 2: Křivky desaturace třech jílových cihel s různými hodnotami efektivní pórovitosti při konstantní teplotě a konstantní relativní vlhkosti. Převzato od: Hall & Hoff (2012)

Z grafu na obrázku 2 je zřetelné, že důležitým faktorem, který ovlivňuje efektivitu desaturace a ztrátu hmotnosti materiálu, je pórovitost. V laboratorním pokusu vedeném Hallem & Hoffem (2012) byly porovnávány tři typy jílových cihel s odlišnými hodnotami efektivní pórovitosti při konstantní teplotě 23,5 °C a konstantní relativní vlhkosti 55 % po časový úsek 200 hodin, největší míra evaporace nastává u všech tří vzorků na začátku a poté se postupně zpomaluje díky stále se snižujícímu objemu vody v materiálu a skutečnosti, že voda musí překonat větší vzdálenost z nitra cihly na povrch. Při poklesu vlhkosti na kritickou mez se cesty pro kapilární proudění rozpadnou a voda se nedostane k místům odparu tak rychle, protože může evaporovat pouze difuzně. U jílových cihel s vyšší efektivní pórovitostí je ztráta hmotnosti výraznější a evaporace vody z materiálu trvá delší časový úsek, než dojde k ustálení křivky.

#### 4.3.5. Krystalizace solí

Evaporace také mimo jiné způsobuje krystalizaci solí uvnitř nebo na povrchu materiálu. Nejvýznamnějším transportním médiem je voda, která přenáší rozpuštěné látky na povrch materiálu, kde se následně odpařuje a v místě evaporace nebo přímo v pórech zůstávají soli, které nemohou evaporovat, díky čemuž dochází k nabohacování a následné krystalizaci těchto solí. Solné výkvěty (v prostorách pod III. nádvořím nejčastěji bílého zbarvení) jsou z většiny způsobeny solemi ze skupiny síranů, zpravidla se na zdech objevuje síran draselný ( $K_2SO_4$ ), síran sodný ( $Na_2SO_4$ ), síran hořečnatý ( $MgSO_4$ ) a síran vápenatý ( $CaSO_4$ ) (Slížková, 2021). Kromě bílých výkvětů se mohou solné krystaly objevovat i v jiných barvách, například červená barva na výkvětech značí přítomnost železa ve sloučenině (Siedel, 2018). Některé z těchto solných sloučenin mohou navíc obsahovat krystalickou vodu, která zapříčiňuje změnu objemu výkvětu a následné mechanické poškození zdiva, na kterém je zachyceno. Podle Pospíšilové (2013) ale často může být na vině samotný stavební materiál, který často nějaké soli obsahuje a podílí se tím na jejich krystalizaci.

Jedním z důležitých jevů, který provází solné zvětrávání a negativně působí na zdivo, je hygroskopicitata. Je to vlastnost solí pohlcovat a udržovat vzdušnou vlhkost v kapalném skupenství, tento jev je odlišný od procesu hydratace tím, že při hydrataci je voda vázána přímo na krystalovou mřížku solí. Pokud se zvýší hodnota relativní vlhkosti v okolním prostředí, způsobuje hygroskopicitata rozpouštění solí, naopak pokud je hodnota relativní vlhkosti menší, dochází ke krystalizaci solí (neboli k solnému zvětrávání). Hygroskopická sůl má oproti hydrataci s vodou slabší a méně stabilnější fyzikální vazby a je zde tudíž mnohem více zřetelná závislost krystalizace solí na okolním prostředí, které může poskytovat zdroj vody v podobě vysoké hodnoty relativní vlhkosti (Siedel, 2018). Viditelným důsledkem přítomnosti hygroskopických solí je vytvoření solných povlaků na odhalené části zdiva, které zvětšují rozsah solné degradace stavebního materiálu a mimo jiné také způsobují navlhnutí zdiva. Při případné evaporaci vody ze zdiva se soli nejvíce ukládají do těchto míst a později se zde díky této skutečnosti mohou vytvořit solné výkvěty. Voda vázaná na hygroskopickou sůl ve vlhkém zdivu může mít tendenci rozrušovat materiál mechanicky, pokud v prostředí s nižší teplotou zamrzne a zvětší svůj objem. V prostředí s vyšší teplotou mohou mít zasažené části naopak větší tendenci podlehnout vzniku plísní, což může být pro tento typ zdiva stejně destruktivní.

S hygroskopicitou úzce souvisí rovnovážná vlhkost solí, což je stav, do kterého se sloučenina soli dostane, pokud jsou vyrovnány hodnoty koncentrace vlhkosti okolního prostředí a koncentrace vlhkosti uvnitř soli. Hodnota rovnovážné vlhkosti je pro každou sloučeninu soli unikátní a může se také mírně lišit i v závislosti na prostředí, kterému je sůl vystavena (Scherer, 2009). Pokud je hodnota vlhkosti okolního prostředí vyšší než rovnovážná vlhkost dané soli, její krystaly se začnou rozpouštět, naopak pokud je nižší, vytvářejí se nové krystaly (Hall & Hoff, 2012). Pokud hodnoty vlhkosti okolního prostředí kolísají blízko hranice stavu rovnovážné vlhkosti, vytváří se ideální prostředí pro vznik tzv. solných zvětrávacích cyklů, které významně zvětrávají materiál v této oblasti.

#### **4.3.6. Bobtnání jílových minerálů**

Bobtnání je přirozeným procesem vyskytujícím se ve větším či menším měřítku u všech typů zemin a některých stavebních materiálů s podílem látek, které jsou k tomuto procesu náchylné. Osmotické bobtnání probíhá, pokud existuje velký rozdíl mezi koncentrací iontu sorbovaného k povrchu minerálu a koncentrací téhož iontu k okolní pórové vodě (Obšilová, 2006). Je hodně druhů bobtnavých materiálů, avšak nejvýznamnějšími z nich jsou nezátížené jílové minerály, které mají velmi silný sorpční potenciál a zároveň se snadno a rychle rehydratují, pokud nejsou zcela vysušeny (Obšilová, 2006). Dalším typem bobtnání, které se vyskytuje u jílových minerálů, je krystalické bobtnání. Probíhá uvnitř materiálu a spočívá v hydrataci kationtů ve vysušeném minerálu a následné distribuci nábojů ve strukturní mřížce, toto je nejlépe znázorněno difrakční analýzou (Ruedrich et al., 2011) (Obšilová, 2006).

Při absorpci vody zvětší materiál svůj objem a zvýší své vnitřní napětí a tlak, naopak při úbytku vody začne docházet ke smršťování, bobtnání je celkově dáno schopností minerálů a hornin vázat na svou krystalovou mřížku vodu. Při tomto procesu se voda dostává do pórů mezi jednotlivými zrny, čím více vody je schopen materiál absorbovat, tím více se od sebe oddalují jednotlivá zrna, vyplňují se póry a dochází k nárůstu bobtnacího tlaku (Fencl, 2010). Kromě vod v kapalném skupenství může materiál náchylný k bobtnání vodu pojmout i ze vzdušné vlhkosti. Průvodním jevem bobtnání je také plastičnost materiálu neboli nevratná fyzikální deformace materiálu, díky které je tento materiál lépe tvarovatelný. Dlouhodobými

následky tohoto děje může být kromě rozrušení a rozpukání kamene také zdvih nebo pokles základů budov, což může být prvotní známkou dalšího rozsáhlejšího poškození stavby.

Nejnáchylnějšími stavebními materiály k tomuto procesu, které se vyskytují v zájmové oblasti pod III. nádvořím, jsou především jílové břidlice a pozůstatky dřevěných konstrukcí. Bobtnavost a plasticitu jílových břidlic pravděpodobně ovlivňuje kromě příměsí jílových minerálů také možná přítomnost dalších látek v tomto materiálu, jmenovitě například živce, karbonáty nebo oxidy a hydroxidy železa a hliníku (Weiss & Kunžvart, 2005). Důležitým klimatickým faktorem, který ovlivňuje rozsah a rychlost bobtnání jílových minerálů je teplota, při vyšších teplotách je totiž zrychlen proces vysušování materiálu a zároveň se výrazně snižují rehydratační a sorpční schopnosti (Obšilová, 2006).

#### **4.4. Změna klimatických faktorů a její vliv na procesy**

Tato kapitola bude zaměřena na vyvíjení poklesu či nárůstu účinnosti zvětrávacích procesů v čase, pokud budou změněny faktory, které tento proces ovlivňují. Těmito klimatickými faktory jsou pro účely práce teplota a vlhkost. Změna těchto faktorů nelze v delším časovém měřítku přesně předpovědět, proto byly mezivládním panelem pro změnu klimatu (IPCC) vyvinuty reprezentativní směry vývoje koncentrací (RCP), což jsou trajektorie zaznamenávající možný vývoj koncentrací antropogenních skleníkových plynů v závislosti na tom, jak se lidstvo bude potýkat s klimatickými problémy 21. století (IPCC, 2022). Existují 4 hlavní reprezentativní směry: RCP2.6 předpokládá rapidní zásahy pro potlačení zvyšujících se emisí a předpokládá limit nárůstu teploty v rámci globálního oteplování maximálně o 2 °C nad úroveň před rokem 1900, který je ve vědeckých kruzích běžně používán jako referenční hranice pro klimatické otázky. Tento scénář vyžaduje velmi rychlý globální přesun k obnovitelným zdrojům a výrazné zlepšení využití spotřebovaných energií, proto je považován za méně pravděpodobný. Reprezentativní směr RCP8.5 naopak předpokládá razantní a kontinuální nárůst koncentrací skleníkových plynů, jehož důsledkem bude vysoký nárůst globální teploty a potenciální kolaps klimatického systému. Tento scénář je také nepravděpodobný, protože nepředpokládá žádné strategie ani technologický pokrok ke snížení emisí skleníkových plynů. Proto byl v této práci pro porovnání a předpoklad budoucího dopadu klimatických faktorů na vykopávky pod III. nádvořím vybrán scénář RCP4.5, který reprezentuje střední cestu mezi výše zmíněnými směry

(posledním ze čtyř scénářů je RCP6, který předpokládá mírně větší koncentraci skleníkových plynů než RCP4.5) a je společně s RCP6 považován za nejpravděpodobnější vzhledem k současnému vývoji koncentrace skleníkových plynů v atmosféře (IPCC, 2022).

#### 4.4.1. Teplotní změny

Teplota je významným klimatickým faktorem, který se v mírném podnebném pásu mění kontinuálně v závislosti na ročním období a meteorologických podmínkách. Podle klimatického scénáře RCP4.5, který v této části bude využit jako vodítko pro sestavení možného odhadu teplotních změn a jejich dopadu na archeologický areál pod III. nádvořím, dosáhnou zvyšující se emise skleníkových plynů a růst globální teploty vrcholu kolem roku 2040, po kterém by měl nastat jejich pomalý, ale udržitelný pokles (IPCC, 2022). Průměrná teplota podle scénáře pravděpodobně naroste do přelomového roku o 1,4 až 2,6 °C, jako odhadovaný průměr se udávají 2 °C. Ve střední Evropě je očekáván zvýšený počet teplotních anomálií a extrémů v letních obdobích, naopak v zimním období budou teplotní extrémy stále méně časté, zimy budou mírnější a deštivější (IPCC, 2022).

Nejvýznamnějším procesem, který se zásadně mění v závislosti na teplotě je mrazové zvětrávání, které nastává při opakovaném tání a mrznutí vody v pórech materiálu. Zároveň je při vyšších hodnotách teploty vzduchu větší míra evaporace, stavební materiál je vysušován a následně dochází k degradaci a zvětrávání materiálu (Hall & Hoff, 2012).

V důsledku globálního oteplování, které ovlivňuje i archeologické naleziště pod III. nádvořím, bude s velkou pravděpodobností výrazně ubývat počet mrazových zvětrávacích cyklů (v práci dále pracuji s termínem freeze-thaw cykly, který se v literatuře používá), protože základní podmínkou pro vytvoření tohoto procesu je kolísání teploty vzduchu kolem 0 °C (Grossi, Brimblecombe & Harris, 2007). Tato skutečnost se bude objevovat podle všech dostupných RCP scénářů stále vzácněji. Naopak mohou v budoucnosti vyvstat opačné problémy s vysokými hodnotami teploty, jako je například termická expanze, při které stavební materiál vlivem vysokých teplot zvětšuje svůj objem a při překročení kritické hranice může nastat mechanické rozrušení materiálu v podobě prasklin a odlupování svrchních vrstev (Paine & Gallagher, 2012) (viz kapitola 3.3).

#### 4.4.2. Vlhkostní změny

Veličiny vlhkosti a teploty jsou spolu velmi úzce spjaty, platí mezi nimi nepřímá úměrnost: čím vyšší bude teplota, tím nižší bude relativní vlhkost vzduchu, protože pro každý teplotní stupeň je pouze omezené množství vodní páry, které je vzduch schopen pohltit. Podle klimatického scénáře RCP4.5 se v budoucnosti, narozdíl od jiných částí světa, v regionu střední Evropy nebudou výrazně měnit srážkové modely. Na základě studie provedené Dobryninem a dalšími (2017) jsou v tomto regionu očekávány podobné srážkové úhrny jako doposud, ale je předpokládáno zvýšení výskytu extrémních srážkových událostí hlavně v zimních měsících. Další studie také předpokládá vyšší míru extrémních událostí, ale přikládá také význam změnám srážkových úhrnů v závislosti na sezonalitě (Kotlarski et al., 2015).

Důležitým procesem, jehož intenzita velmi úzce souvisí s celoročními vlhkostními změnami a také s obecnou klimatickou situací ve zkoumané oblasti, je solné zvětrávání (Grossi et al., 2011). Tento proces je jedním z nejdestruktivnějších procesů, které mohou zvětrávat historické stavební materiály a jeho mechanismus a vliv na stavby je znám již po několik století (Painter, 2022) a existuje mnoho zdrojů a možností, jak se solné výkvěty mohou rozšiřovat v archeologickém komplexu (viz kapitola 4.2.5.). Podobně jako u tepelných změn, také vlhkostní změny mohou způsobit objemovou expanzi a kontrakci materiálu, což v mnoha případech vede k popraskání a odlupování svrchních vrstev materiálu (Tétreault & Michalski, 2014).

I přesto, že v prostorách archeologického naleziště pod III. nádvořím nejsou podle klimatických scénářů očekávány výraznější změny v průměrných hodnotách vlhkosti, budou pravděpodobně představovat v budoucnosti mnohem větší problém z hlediska udržení současného stavu areálu než teplotní změny.

## 5. Metodika

Praktická část této práce se věnuje výzkumu mrazových a solných zvětrávacích cyklů, dvěma potenciálně nejdestruktivnějším procesům, které se mohou vyskytovat v zájmové oblasti pod III. nádvořím. Další zvětrávací procesy, které jsou zmíněny v teoretické části jsem se rozhodl nezakomponovat do části praktické, protože je zjištění jejich vlivu na zájmovou oblast buď

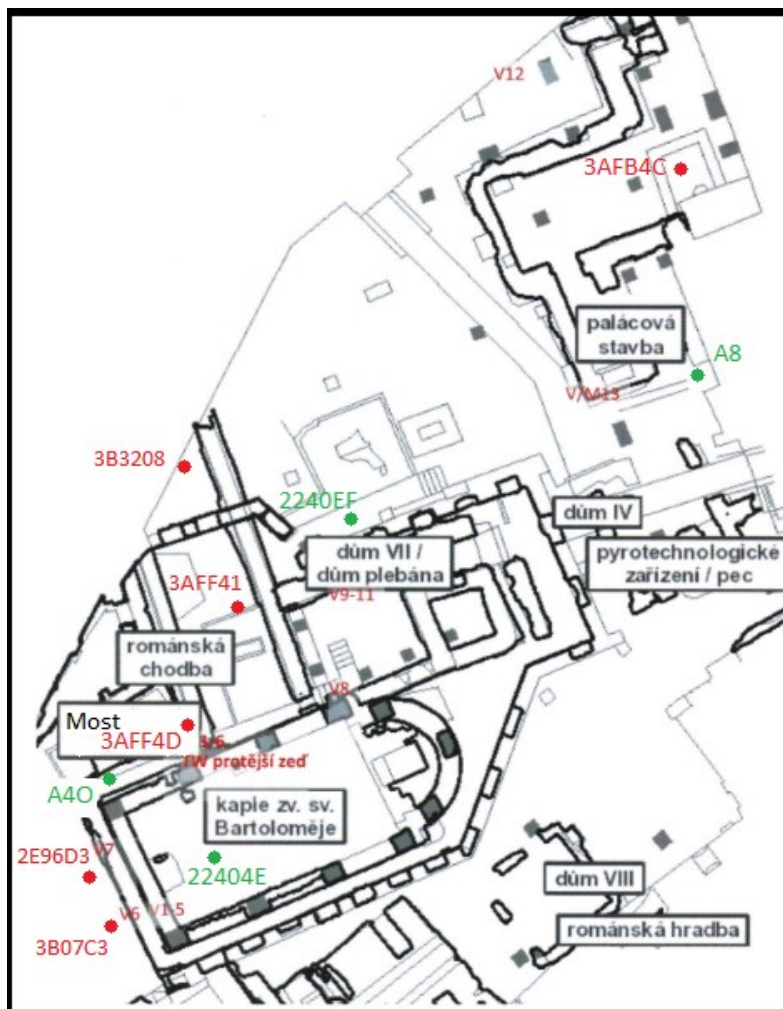
příliš náročné nebo je jejich výskyt v oblasti minimální. Výstupem tohoto výzkumu je stanovení počtu mrazových a zvětrávacích cyklů, které v zájmové oblasti proběhnou za dobu jednoho sledovaného roku. Jako vstupní data poslouží záznamy z loggerů, které sbírají data z čidel umístěných na vybraných místech v archeologickém areálu. Z výsledných hodnot bude odhadnuto, do jaké míry ovlivňují mrazové a solné zvětrávací procesy stav areálu v současnosti a jakou roli mohou sehrát v blízké budoucnosti

## 5.1. Lokalizace a popis čidel

V prostorách archeologického naleziště pod III. nádvořím bylo umístěno dohromady 18 čidel (neboli sond), která kontinuálně zaznamenávají hodnoty teploty vzduchu nebo materiálu, relativní vlhkosti, nebo směru a rychlosti vzduchu. V případě výzkumu ve Velkých vykopávkách bylo použito 9 čidel, které zaznamenávají pouze údaje o aktuální teplotě a 9 čidel, které zaznamenávají kromě teploty také hodnoty relativní vlhkosti. Pro plnohodnotnější vyhodnocení vlivů působících na materiály vykopávek bylo měření stávajících fyzikálních veličin doplněno na začátku roku 2022 o měření vlivu proudění vzduchu přiváděného do prostorů z venkovního prostředí (Červenák, 2022), nevyhodnocovala se pouze teplota, ale také rychlost a směr proudění vzduchu.

Archeologický areál Velkých vykopávek byl týmem z Ústavu teoretické a aplikované mechaniky Akademie věd ČR rozdělen na 9 hlavních sektorů na základě přirozeného uspořádání původních staveb (viz obr. 3 a příloha 1) a předpokládaného mikroklimatického režimu, do nichž byly umístěny sondy. V prostoru hradební zdi byly umístěny 2 čidla s označením A1O a A2S, která monitorují teplotu i relativní vlhkost, vyskytuje se zde hlavně opukový materiál a zbytky dřevěných konstrukcí. Tato část je významně ovlivněna prouděním vzduchu z vnějšího prostředí, protože se nachází nejbližší ke vstupu do archeologického komplexu. V sektoru s názvem Dům III. byly instalovány 4 čidla. Sondy 3AFF3C a A2A zaznamenávají teplotu a relativní vlhkost, A2O pouze teplotu a A2V proudění a rychlost větru. Tato část je tvořena převážně opukovým zdivem a místy také vápnem v otvorech po původních dřevěných konstrukcích, samotné dřevěné konstrukce se zde ale nevyskytují. Je zde aktivní přívod vzduchu a zvýšená vlhkost, což pravděpodobně napomáhá tvorbě solných výkvětů a rozpadu původních materiálů. V prostoru kostela sv. Bartoloměje se nachází čidlo 3B07C3,

kteří měří teplotu a relativní vlhkost a čidlo 2E96D3, které měří pouze teplotu. Nachází se zde zejména opukové zdivo a břidlice, které degraduje kvůli zvýšené vlhkosti a přítomnosti solných výkvětů. V této části není aktivní cirkulace vzduchu. Posledním významným sektorem je Most, ve kterém jsou umístěna dvě teplotní a vlhkostní čidla (A40 a 3AFF4D), je tvořen opukovým zdivem a neprobíhá zde aktivní cirkulace vzduchu. Jsou zde opět zvýšené hodnoty vlhkosti a je zde možná degradace zdiva vlivem mrazového zvětrávání. Ostatní sondy ve Velkých vykopávkách jsou umístěny jednotlivě na strategických místech většinou po obvodu archeologického areálu (například čidla 3B3208 a 3AFB4C) a nejsou už více kumulovány (viz obrázek 3 a příloha 1). V prostoru Malých vykopávek je umístěna 1 sonda pro orientační monitoring teploty vzduchu a relativní vlhkosti (B9) v části chodby s větracím otvorem.



Obrázek 3: Detailní půdorys severovýchodní části archeologického areálu v okolí kostela sv. Bartoloměje. Část je rozdělena na sektory, v každém sektoru je instalováno jedno nebo více čidel. Pro účely praktické části byla použita čidla s označením 3B3208 a 3AFB4C. Čidlo 3AFF3C



*se nachází v jižní části Velkých vykopávek mimo území tohoto obrázku. Upraveno dle Slížkové (2020)*

## **5.2. Sběr dat**

Většina čidel a referenčních sond byla do archeologického komplexu pod III. nádvořím instalována v roce 2021 (pouze teplotně-vlhkostní sonda s označením A40 ze sektoru Most byla instalována v polovině roku 2020), shromažďují tedy data o klimatickém stavu vykopávek už více jak 500 dnů. Každé čidlo zaznamenává aktuální hodnoty proměnných 8x denně ve 3hodinových intervalech, tyto data dále jsou ukládány loggery spolu s informacemi o stavu čidla a jeho baterie do cloudového systému COMET. Zde jsou pro pracovníky Archeologického ústavu Pražského hradu připraveny pro stažení a další analýzu. Pro účel praktické části této práce byl použit roční záznam dat loggerů s označením 3AFF3C, 3B3208 a 3AFB4C od 17. dubna 2022 do 17. dubna 2023. Tyto loggery byly vybrány pro jejich strategické umístění v částech areálu s odlišnými podmínkami a zároveň měly kompletní záznamy bez výpadků měření.

## **5.3. Měření mrazových cyklů**

Podstatou měření mrazových cyklů byla analýza dat z ročního záznamu všech sond a následné určení počtu a intenzity událostí, při kterých mohlo dojít k freeze-thaw cyklu. Tyto události jsou charakteristické kolísáním teploty kolem 0 °C, což způsobuje mrznutí a tání vody uvnitř materiálu. Voda v pevném skupenství zvětšuje svůj objem o 9 %, což značně naruší strukturu materiálu, který se začne zvětrávat (Bartczak et al., 2021). Tento proces je nejvíce frekventovaný ve středních a vyšších zeměpisných šířkách a projevuje se hlavně v těch měsících, ve kterých kolísá okolní teplota kolem bodu mrazu, voda má tak možnost měnit skupenství na denní bázi a rozrušovat materiál konstantně (Kerguillec, 2015). Efektivitu mrazového zvětrávání také velmi významně ovlivňuje pórovitost a saturace zvětrávaného materiálu (Grossi, Brimblecombe & Harris 2007).

## 5.4. Měření solných zvětrávacích cyklů

Principem měření solných zvětrávacích cyklů bylo zjištění hodnot rovnovážné vlhkosti u solných sloučenin  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  a  $\text{CaSO}_4$ , které se vyskytují v prostorách archeologického komplexu pod III. nádvořím a následně je porovnat s křivkami relativní vlhkosti ze záznamu dat loggerů. Při každém překročení této hodnoty v okolním prostředí se krystaly solí rozpouštějí, naopak při hodnotách nižších, než je rovnovážná vlhkost určité soli se krystaly této soli vytvářejí. Hodnota relativní vlhkosti vzduchu se pohybuje podle čidel umístěných v celém archeologickém komplexu pod III. nádvořím mezi 30 % a 100 % (viz grafy 4, 5 a 6), nejvyšších hodnot dosahuje v zimních měsících a nejnižších hodnot v letních měsících. Pro účely praktické části této práce jsem vybral tři loggery (označení „3AFF3C“, „3B3208“ a „3AFB4C“) (viz obrázek 3) v různých částech archeologického areálu pro posouzení vlivu solného zvětrávání při odlišných vstupních podmínkách.

Na základě vlastního pozorování se solné výkvěty v prostorách vykopávek pod III. nádvořím objevují zejména na betonovém zdivu, ze kterého jsou vytvořeny podpěrné pilíře železobetonové dlažby, a na opukových částech zdiva. Beton by mohl být nejnáchylnější složkou v konstrukci chránící vykopávky před vnějším vlivem klimatu nejen kvůli odlišné hodnotě pórovitosti, ale také kvůli složení tohoto materiálu z uhličitanu vápenatého ( $\text{CaCO}_3$ ), který dobře reaguje s vodou a se vzdušným oxidem uhličitým ( $\text{CO}_2$ ), tento výkvět se díky přítomnosti vápníku v materiálu nazývá vápenný. Solné krystaly a výkvěty mají obecně tendenci se na zdech objevovat hlavně v jarních měsících, kdy je evaporace nejintenzivnější (Hall & Hoff, 2012), ale v archeologickém komplexu pod III. nádvořím je největší nárůst solných krystalů zaznamenán v letních měsících, kdy je evaporace nejvýznamnější kvůli specifickému mikroklimatu: vysoké hodnoty absolutní vlhkosti vzduchu a zvýšené teploty během léta. Z důvodu minimalizace škod způsobených solným zvětráváním není dlažba III. nádvoří v zimě posypávána technickou solí, proto se v prostorách archeologického naleziště nenachází solné výkvěty chloridu sodného ( $\text{NaCl}$ ).

Rovnovážná vlhkost solí často významně závisí na teplotě, při změně teplotních podmínek se změní i hodnota rovnovážné vlhkosti. Z tabulky 1 lze vyvodit, že tato úměrnost není přímá. Hodnoty rovnovážné vlhkosti závisí na mnoha dalších faktorech, jako jsou například krystalová mřížka dané soli, její hydratační stav, ale také i okolní tlakové podmínky. Proto má každá sloučenina soli bod, na kterém se růst hodnoty rovnovážné vlhkosti zastaví a

s dále vzrůstající teplotou bude klesat (například u síranu sodného je tato hranice nastavena mezi 32–34 °C, taková teplota je ale v oblasti archeologického areálu spíše výjimkou) (Gulbrandsen & Rypdal 1995).

	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C
<b>Síran sodný (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)</b>	53 %	62 %	70 %	77 %	84 %
<b>Síran vápenatý (CaSO<sub>4</sub>)</b>	56 %	63 %	71 %	79 %	87 %

*Tabulka 1: V tabulce jsou vypsané hodnoty rovnovážné vlhkosti pro sloučeniny solí Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a CaSO<sub>4</sub>, které se nejčastěji vyskytují v zájmové oblasti. Tyto hodnoty byly experimentálně změřeny gravimetrickou metodou. Převzato od: Gulbrandsen & Rypdal (1995)*

Po zanesení dat do programu Excel jsem vytvořil vzorec pro přepočítání rovnovážné vlhkosti obou uvedených sloučenin solí vzhledem k teplotě vzduchu. Tento vzorec vznikl dosazením hodnot teploty do rovnice směrnice trendu pro každou sůl.

$$x_{\text{Na}_2\text{SO}_4} = 0,0154 \cdot T + 0,461$$

$$x_{\text{CaSO}_4} = 0,0156 \cdot T + 0,478$$

Tyto hodnoty jsem následně odečetl od relativní vlhkosti vzduchu. Pokud bylo výsledné číslo kladné, krystaly sloučenin solí se v okolí čidla rozpouštěly, pokud bylo číslo záporné, krystaly solí se v daném časovém úseku vytvářely. Při nulové výsledné hodnotě dochází ke stagnaci, krystaly solí jsou v rovnovážném stavu. Jeden solný zvětrávací cyklus proběhne ve chvíli, kdy se sloučenina soli dostane ze stavu rozpouštění do stavu krystalizace a poté zpět do stavu rozpouštění.

## 6. Výsledky

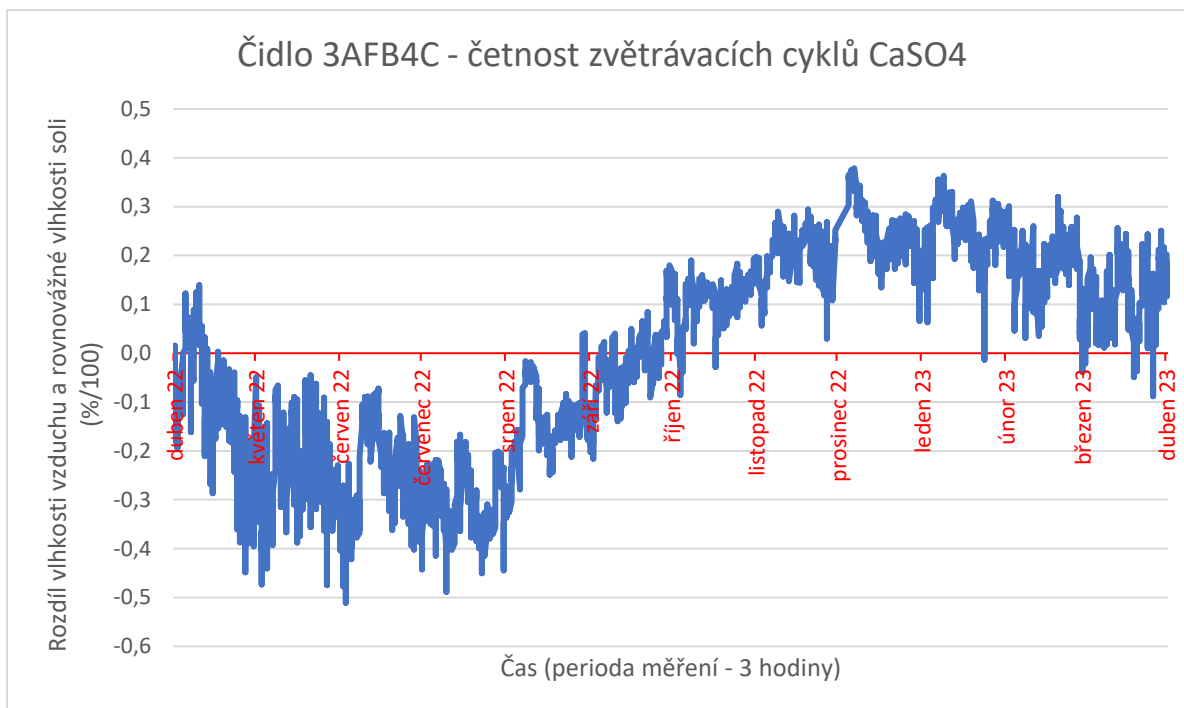
### 6.1 Mrazové zvětrávání

Po analýze dat ze všech dostupných čidel jsem zjistil, že hodnoty průměrné denní teploty vzduchu v areálu nesestoupily u žádného čidla pod bod mrazu, tudíž je zde velmi nepravděpodobný výskyt freeze-thaw cyklů a následného mrazového zvětrávání.

Tento proces by mohl probíhat pouze v části Malých vykopávek, které jsou položeny o několik metrů výše, než Velké vykopávky a umožňují kontakt s okolním prostředím kvůli zamřížovaným průzorům, díky čemuž jsou vystaveny mimo jiné i sezónním výkyvům teplot. Pokud se průzory zasklí nebo jinak zateplí, mohl by se tím tento proces spolu s dalšími destruktivními procesy zcela eliminovat. Při současném trendu globálního oteplování by se mrazové zvětrávání obecně mohlo projevovat i bez stavebních úprav méně často, rozhodujícím prvkem ale vždy bude úloha mikroklimatu ve zkoumané oblasti. V prostorách Velkých vykopávek archeologického komplexu pod III. nádvořím bude teplota zůstat relativně konstantní vůči stabilním výkyvům teplot okolního prostředí hlavně díky vlivu zdejšího mikroklimatu, které je specifické svojí polohou de facto pod dlažbou tohoto nádvoří a absencí téměř jakéhokoliv spojení s okolním prostředím. Ze stejného důvodu zde nejsou také očekávány žádné významné teplotní extrémy.

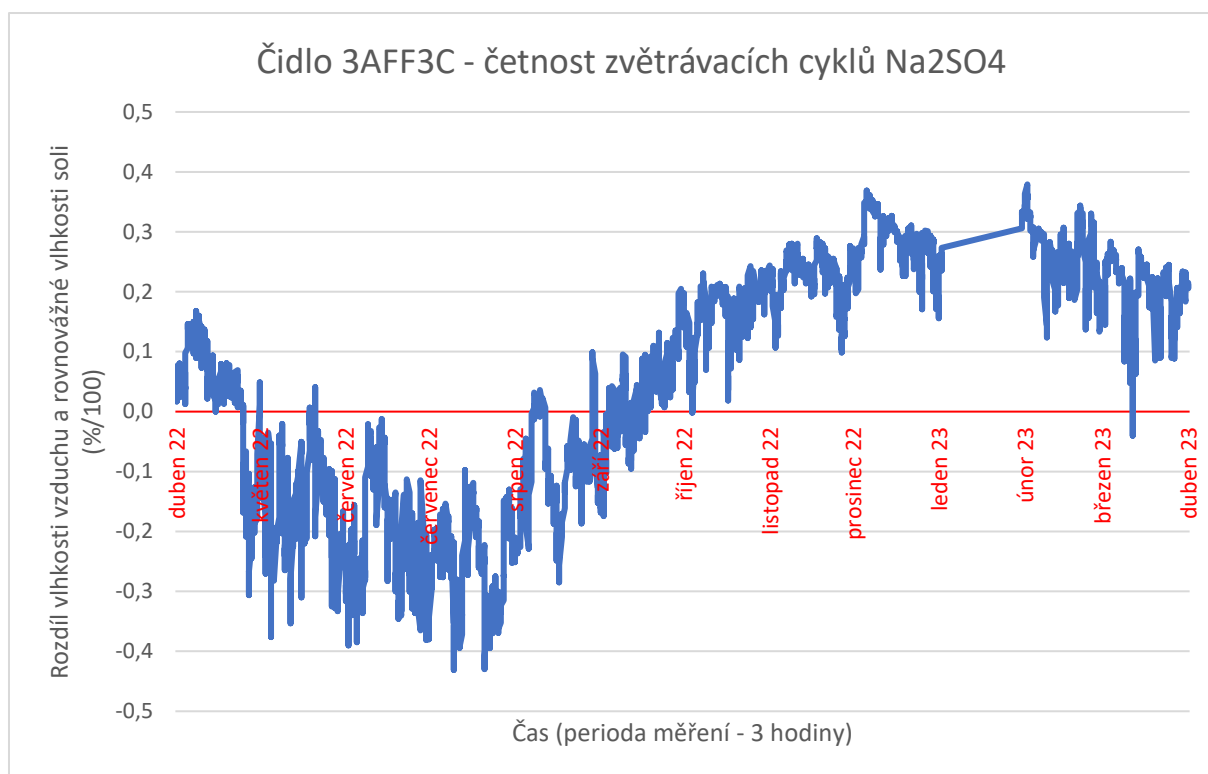
## 6.2 Solné zvětrávání

Vyhodnocení dat odhalilo relativně vysokou míru četnosti solných zvětrávacích cyklů v měřených bodech. Za roční dobu měření jsem u loggeru s označením „3AFF3C“ vypočetl **30** zvětrávacích cyklů  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  a **37** zvětrávacích cyklů  $\text{CaSO}_4$ . V oblasti loggeru „3B3208“ se objevilo **57** zvětrávacích cyklů  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  a **55** zvětrávacích cyklů  $\text{CaSO}_4$ . Z dat z loggeru označeného „3AFB4C“ jsem zjistil **40** zvětrávacích cyklů  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  a **33** zvětrávacích cyklů  $\text{CaSO}_4$ .



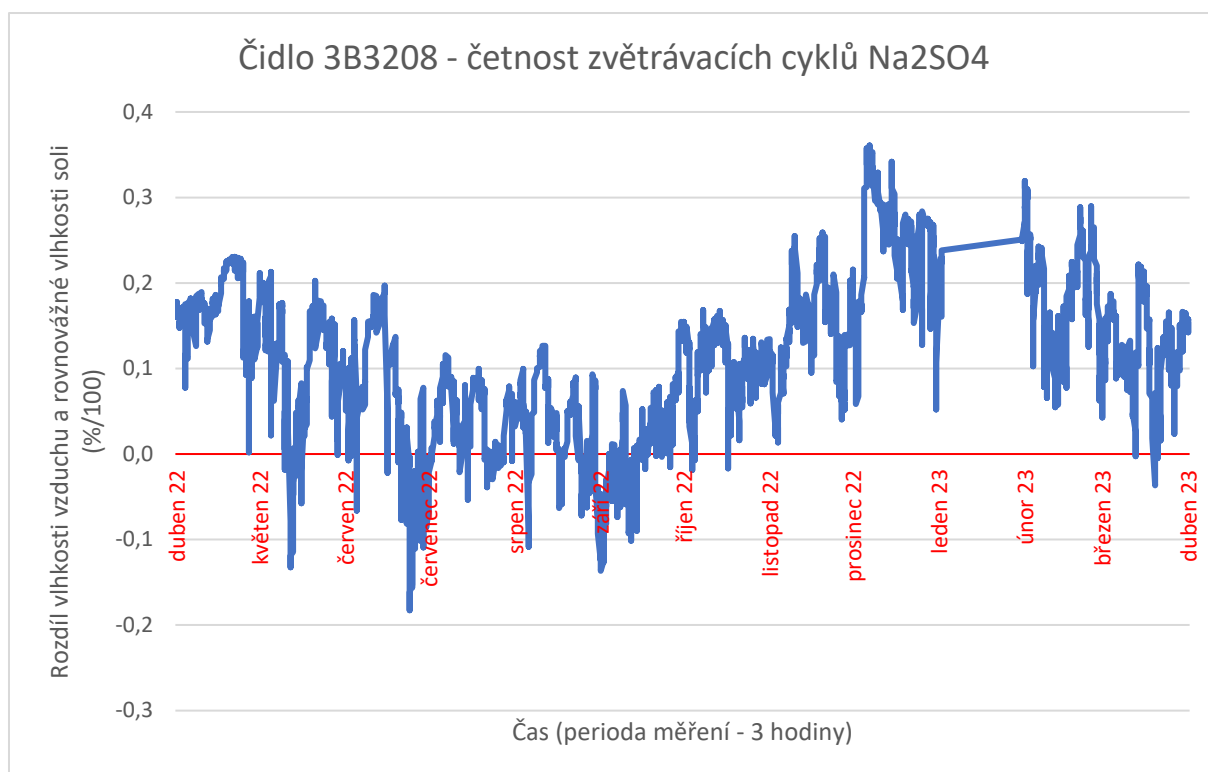
*Graf 1: Graf znázorňuje křivku hodnot rozdílu vlhkosti vzduchu a rovnovážné vlhkosti soli CaSO<sub>4</sub> z loggeru s označením AFFB4C. Kladné hodnoty v tomto grafu značí rozpouštění krystalů soli, záporné hodnoty naopak značí krystalizaci. Tento graf zobrazuje 33 zvětrávacích cyklů.*

Graf 1 je jedním z výstupů praktické části této práce a představuje hlavní podklad pro finální výpočet četnosti zvětrávacích cyklů CaSO<sub>4</sub> pro tuto sondu. Z grafu je patrné, že nejvyšší četnost solných zvětrávacích cyklů byla v období měsíce dubna, září a říjnu v roce 2022, když křivka rozdílu vlhkosti vzduchu a rovnovážné vlhkosti soli kolísala kolem nuly. V těchto měsících je intenzita solného zvětrávání nejvyšší, sůl často osciluje mezi stavem rozpouštění a stavem krystalizace, což způsobuje významné poškození materiálu.



*Graf 2 - Graf znázorňuje křivku hodnot rozdílu vlhkosti vzduchu a rovnovážné vlhkosti soli  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  z loggeru s označením 3AFF3C. Kladné hodnoty v tomto grafu značí rozpouštění krystalů soli, záporné hodnoty naopak značí krystalizaci. Z tohoto grafu bylo zjištěno 30 zvětrávacích cyklů.*

Graf 2 pochází z loggeru umístěného v jižní části archeologického komplexu pod III. nádvořím a křivka rozdílu vlhkosti vzduchu a rovnovážné vlhkosti  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  má velmi podobný průběh, jako křivka z grafu 1. Nejvíce zvětrávacích cyklů se v okolí čidla v roce 2022 objevovalo v dubnu, srpnu a září. Přestávka v měření v lednu roku 2023 je způsobena údržbou a opravami čidla.



*Graf 3 - Graf znázorňuje křivku hodnot rozdílu vlhkosti vzduchu a rovnovážné vlhkosti soli  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  z loggeru s označením 3B3208. Kladné hodnoty v tomto grafu značí rozpouštění krystalů soli, záporné hodnoty naopak značí krystalizaci. Z tohoto grafu bylo zjištěno 57 zvětrávacích cyklů.*

Záznam z loggeru „3B3208“ v grafu 3 pochází ze severní části archeologických vykopávek a bylo zde zjištěno nejvíce zvětrávacích cyklů ze všech měřených oblastí. Relativní vlhkost vzduchu se zde pohybuje celoročně průměrně mezi 60 % a 80 % (viz graf 5), což vytváří příhodné podmínky pro působení zvětrávacích cyklů. Tato oblast je podle výzkumu nejvíce zasaženou oblastí, obě zkoumané sloučeniny solí zde mají výrazně větší počet zvětrávacích cyklů, než je tomu v jiných oblastech. Přestávka v měření v lednu roku 2023 je způsobena údržbou a opravami čidla.

## 7. Diskuze

Tato část se bude věnovat diskuzi a porovnání výsledků vlastního měření s dalšími odbornými pracemi, které také řeší problematiku důsledků změny klimatu na archeologický komplex pod

III. nádvořím. První prací je výroční zpráva průzkumů a měření mikroklimatu (2022) připravená Ing. Janem Červenákem, která obsahuje roční záznamy ze všech čidel v areálu, a zároveň shromažďuje všechny nové poznatky, které výzkum v zájmové oblasti za poslední rok přinesl. Diskuzí s touto prací chci porovnat výsledky výzkumu mrazových zvětrávacích cyklů z mé praktické části. Komplexní soubor dat, který tato zpráva obsahuje lze ale využít i pro ověření výsledků výzkumu solných zvětrávacích cyklů.

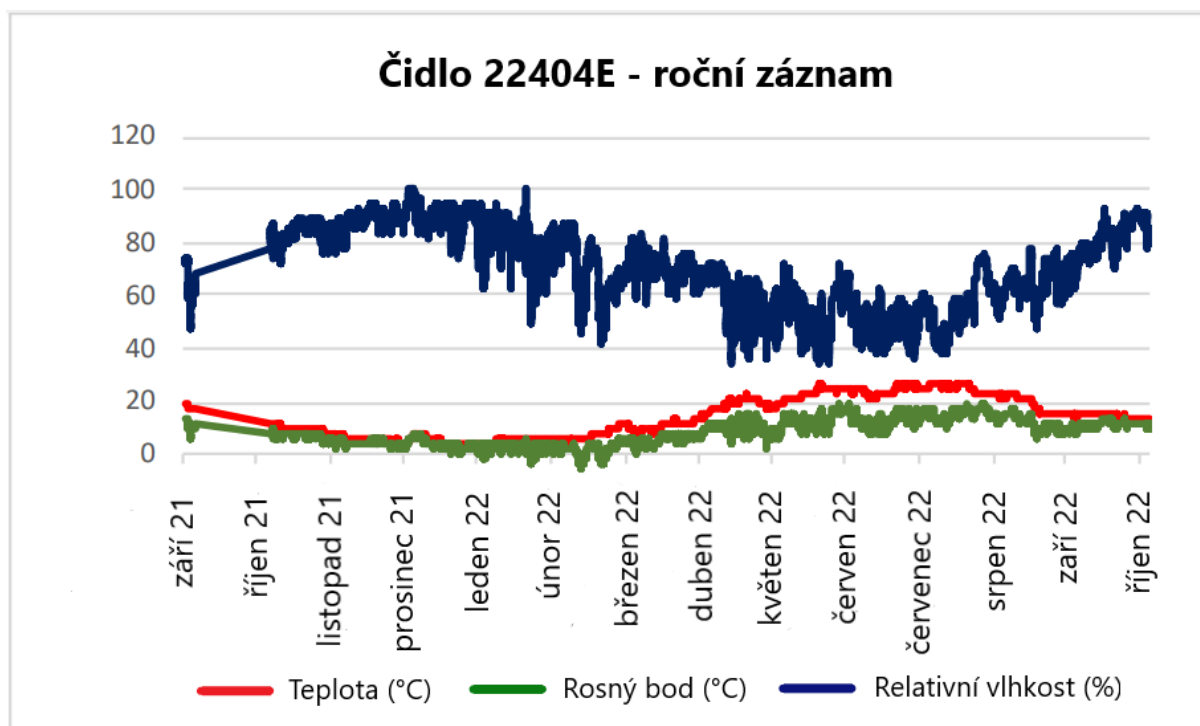
Druhou prací je zpráva o výsledcích výzkumu zasolení zdiv pod III. nádvořím na Pražském hradě (2021 a 2022) vypracovaná doc. Ing. Zuzanou Slížkovou Ph.D., která analyzuje stav archeologického areálu z hlediska solné degradace a zabývá se také podrobným rozbořením všech typů síranových sloučenin, které se zde vyskytují. Diskuzí s touto prací chci porovnat a ověřit výsledky výzkumu solných zvětrávacích cyklů z mé praktické části.

### **7.1. Výroční zpráva průzkumů a měření mikroklimatu (2022)**

Podle výroční zprávy probíhalo v celém komplexu celoroční měření a vyhodnocování následujících veličin: teplota vzduchu, dotyková teplota, vpichová teplota uvnitř stavebního materiálu, teplota rosného bodu, relativní vlhkost a rychlost proudění vzduchu v blízkosti větracích otvorů. Pro úplné vyhodnocení dopadů těchto faktorů na areál je podle autora zprávy nutná minimální délka měření 13 měsíců, ale optimální doba je odhadována spíše na 36–60 měsíců.

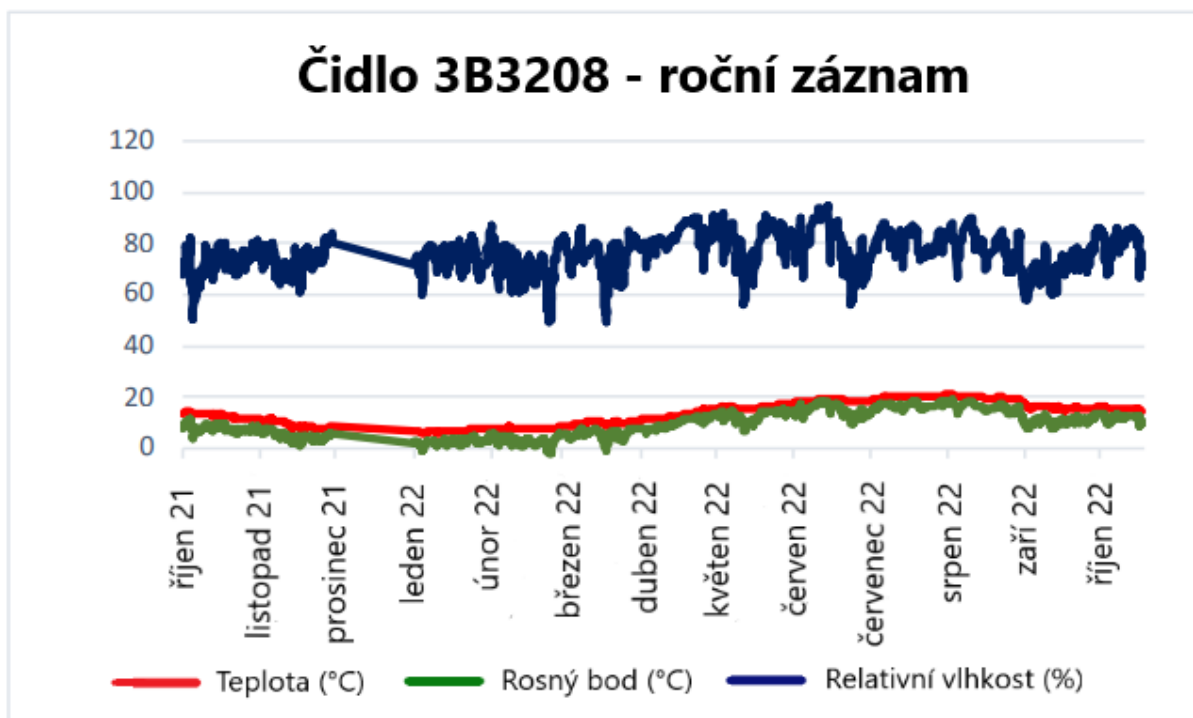
Z výroční zprávy (2022) byly vybrány tři grafy ročního záznamu čidel s výrazně odlišnými křivkami pro teplotu vzduchu, relativní vlhkost a rosný bod pro přiblížení závislosti hodnot těchto veličin a polohou sondy. Dvě z těchto čidel byly také použity v praktické části této práce.





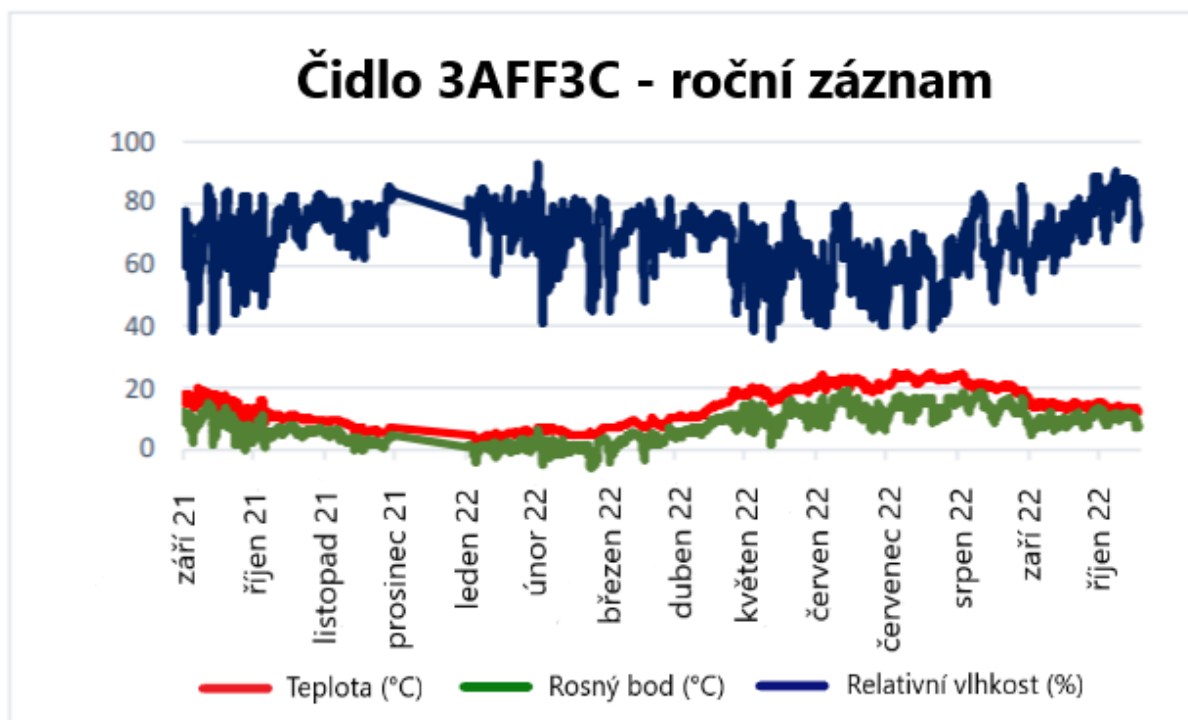
Graf 4: Graf znázorňuje výsledná data z ročního sondového měření relativní vlhkosti, povrchové teploty a rosného bodu čidla 22404E. Tato sonda je umístěna uprostřed pozůstatků kostela sv. Bartoloměje ve Velkých vykopávkách. Převzato z výroční zprávy, Červenák (2022)

V pozůstatcích kostela sv. Bartoloměje zaznamenána celoročně nejvyšší průměrná denní teplota (pohybuje se okolo 18 °C), která je způsobena umístěním kostela ve středu Velkých vykopávek, díky čemuž je ovlivněn cirkulací vzduchu ve vykopávkách pouze minimálně (vzduchové průduchy se vyskytují téměř výlučně po stranách areálu). V grafu 3 je zřetelně vidět amplituda teplotní křivky (v grafu červeně), teplota se v prostorách kostela sv. Bartoloměje pohybuje mezi 5 a 28 °C, přičemž maximálních hodnot dosahuje v červenci a srpnu a minimálních hodnot na konci ledna. Současně jsou zde také zvýšené hodnoty relativní vlhkosti, které vytváří humidní podmínky a jsou průvodním faktorem expanze solných povlaků a výkvětů.



Graf 5: Graf znázorňuje výsledná data z ročního sondového měření relativní vlhkosti, povrchové teploty a rosného bodu čidla 3B3208. Tato sonda je umístěna v sektoru Pec, který se nachází na severním okraji Velkých vykopávek. Převzato z výroční zprávy, Červenák (2022)

Ze záznamu loggeru umístěného v sektoru Pec lze vyvodit, že v severních částech Velkých vykopávek se hodnoty teploty vzduchu nejvíce přibližují konstantnímu charakteru pravděpodobně kvůli absenci cirkulačního proudění vzduchu (nejbližší větrací šachta je v severovýchodní části blízko rozvodní chodby spojující Malé a Velké vykopávky). Oblasti Pece a kostele sv. Bartoloměje, které na sebe přímo navazují, jsou nejvíce zkoumanými částmi Velkých vykopávek nejen z hlediska úlohy mikroklimatu, ale jsou zde zavedena také pravidelná měření vpichových teplot, která pomáhají určit stav zdiva zevnitř.



Graf 6: Graf znázorňuje výsledná data z ročního sondového měření relativní vlhkosti, povrchové teploty a rosného bodu čidla 3AFF3C. Tato sonda je umístěna v prostoru domu III, který se nachází v jižní části Velkých vykopávek. Převzato z výroční zprávy, Červenák (2022)

Sektor dům III propojuje je propojovací částí archeologického komplexu, je spojen s kostelem sv. Bartoloměje a zároveň také s částmi IV. a VIII. Důležitým prvkem je v tomto sektoru vyústění větracího otvoru s regulační okenicí, a protože při režimovém větrání bylo toto místo vyhodnoceno jako vhodné pro měření nejen parametrů mikroklimatu, ale i pro proudění vzduchu, je zde instalována sonda pro měření teplotně-vlhkostních parametrů, senzor pouze pro měření teploty a také senzor pro rychlost proudění vzduchu, který zaznamenal pohyb vzduchu z tohoto sektoru právě do prostoru kostela sv. Bartoloměje. Do prostoru vykopávek VIII. proudí vzduch nad vykopávkami otvory podél novodobé zdi ohraničující kostel sv. Bartoloměje. Hodnoty teploty vzduchu mají proto tendenci k větším výchytkám než ve výše popsanych částech areálu. Ze stejného důvodu je průměrná relativní vlhkost nižší.

Povrchová teplota na všech demonstrovanych grafech z výroční zprávy neklesla v jediném bodě měření pod bod mrazu, tudíž se v oblastech okolo čidel nemohou objevovat mrazové zvětrávací cykly. Je tomu stejně i na ostatních grafech z této zprávy, které byly důsledně analyzovány. Výsledky praktické části této práce a výroční zprávy se shodují.

## 6.2. Zpráva o výsledcích výzkumu zasolení zdiv pod III. nádvořím na Pražském hradě (2020)

Zpráva o výsledcích výzkumu zasolení zdiv pod III. nádvořím na Pražském hradě byla vypracována doc. Ing. Zuzanou Slížkovou Ph.D. v listopadu roku 2020. Výzkum zasolení zdiv spočíval v odebrání dvou sérií vzorků solných výkvětů a fragmentů postiženého zdiva, které byly následně použity pro analýzu vlhkosti a zasolení v oblasti archeologických vykopávek. Tyto vzorky byly autorkou rozděleny do čtyř kategorií: výkvěty vodorozpustných solí v soklových částech zdi kostela sv. Bartoloměje, nerozpustné vápenaté bílé povlaky a úlomky krápníků vzniklé zatékáním vody skrz železobetonovou konstrukci, málo rozpustné šedé sádrovcové krusty na opukovém zdivu a vzorky zdiva z různých výšek výkopu u kostela sv. Bartoloměje.

Všechny vzorky byly podrobeny analýze rentgenovou difrakcí (XRPD) a na část vzorků byla aplikována metoda iontové výměnné chromatografie (IEC). Z výsledků studie vyplývá, že na vybraných zkoumaných místech byly zjištěny dva typy vytvořených solných krust: vápenné a sádrovcové. Vápenné výkvěty se nemusí vytvářet pouze na betonovém základu, i přesto, že v zájmové oblasti je železobetonová konstrukce z hlediska solné degradace jedním z nejpostiženějších stavebních materiálů v areálu. Z rozboru materiálu z architektonických fragmentů pod III. nádvořím pražského hradu, která byla provedena o rok později (Slížková, 2021) bylo například zjištěno, že ve vzorku opuky ze zadní části románského fragmentu byl obsah uhličitanu vápenatého stanoven na 10,9 hmotnostních %. Navíc zde byla zjištěna přítomnost oxidu vápenatého (CaO), který v příhodných podmínkách (vysoká teplota, přítomnost vlhkosti a dostatek času v rámci několika hodin nebo dnů) může reagovat s oxidem uhličitým na uhličitan vápenatý. Dále bylo zjištěno, že se ve spodních soklových částech zdiva objevuje solný minerál thénardit (síran sodný –  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), který má ale tendenci hydratovat v prostředí s vysokou relativní vlhkostí, jako je například zájmová oblast vykopávek pod III. nádvořím, na minerál mirabilit ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ ). Tento proces se začíná objevovat při hodnotě relativní vlhkosti mezi 60 % a 70 %, při vyšších hodnotách thénardit hydratuje rychleji (Zhang, Jiang & Wang, 2015). Podobný proces podstupuje i síran vápenatý ( $\text{CaSO}_4$ ), který v tomto prostředí hydratuje na sádrovec ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ ). V obou těchto procesech hraje významnou roli také výše zmíněná hygroskopicitá solí (viz kapitola 4.3.5).

Označení vzorku	Thénardit Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Sádrovec CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>
TW zed/40cm	41,5	13,8	9.133	-	0.031	0.008	2.658	20.871* (VV)	0.153* (Z)	0.038

Tabulka 2: Výsledky IEC (ion exchange chromatography) analýzy vzorku solného výkvětu na severní zdi kostela sv. Bartoloměje v prostoru Velkých vykopávek, výsledky jsou uvedeny v hmotnostních %. Převzato od: Slížková (2020)

Výsledky analýzy solného výkvětu v tabulce 2 jsou důležité především z hlediska stanovení stupně zasolení na opukovém zdivu v severní části kostela sv. Bartoloměje. Hodnota procentuálního zastoupení síranových aniontů (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) je klasifikována dle normy ČSN 73 0610 (příloha B) jako „velmi vysoký stupeň zasolení zdiva“, hodnota dusičnanových aniontů (NO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) je dle stejné normy klasifikována jako „zvýšený stupeň zasolení“. Metoda iontové výměnné chromatografie (IEC) umožňuje identifikovat a kvantitativně stanovit množství iontů ve vodném výluhu ze stavebního materiálu, nevýhodou této metody je nemožnost stanovit přesnou hodnotu uhličitanových aniontů (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) (Slížková, 2020).

Metoda	XRPD		IEC							
	Sádrovec CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	Kalcit CaCO <sub>3</sub>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>
V9 /11cm	84,4	8,2	0,02	0,00	0,03	0,02	3,35	6,37 VV	0,23 Z	0,01
V11/116 cm	81,6	5,0	neanalyzováno							

Tabulka 3: Výsledky měření obsahu sádrovce a kalcitu metodou XRPD (X-Ray Powder Diffraction) a koncentrace iontů ve vodném výluhu metodou IEC v prostoru Velkých vykopávek, výsledky jsou uvedeny v hmotnostních %. Převzato od: Slížková (2020)

Tabulka 3 se věnuje analýze převážně sádrovcových krust, které se vytvářejí na opukovém zdivu domu plebána (dům přistavěný k severovýchodní stěně kostela sv. Bartoloměje – viz obrázek 3). Výsledky měření koncentrací iontů metodou IEC opět stanovují hodnoty síranových aniontů na „velmi vysoký stupeň zasolení zdiva“ a hodnoty dusičnanových aniontů opět vykazují „zvýšený stupeň zasolení“.

Výsledky obou výzkumů z prostředí archeologických vykopávek pod III. nádvořím od doktorky Slížkové (2020,2021) poukazují na fakt, že zasolení románského zdiva a fragmentů může v budoucnosti představovat významný problém při konzervaci či uchování tohoto

archeologického naleziště. Závěry studií doktorky Slížkové se shodují s výsledky mého výzkumu solných zvětrávacích cyklů.

## 8. Závěr

Výsledky výzkumu v praktické části a informace z rešerše odborných článků poukazují na fakt, že proces, který nejvíce poškozuje stav archeologického komplexu pod III. nádvořím je solné zvětrávání. Nejpostiženější oblastí v areálu je severovýchodní část areálu vedle kostela sv. Bartoloměje, která nemá přístup k cirkulaci venkovního vzduchu, teplota se zde celoročně pohybuje mezi 10–20 °C a relativní vlhkost vzduchu se průměrně drží mezi 60 % a 80 %. Díky všem těmto skutečnostem je v této oblasti zaznamenáno nejvíce solných zvětrávacích cyklů, a to 57 cyklů síranu sodného ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) a 55 cyklů síranu vápenatého ( $\text{CaSO}_4$ ). Důsledkem tohoto procesu jsou solné povlaky a výkvěty nejen na historickém stavebním materiálu, ale také na betonové konstrukci, která podpírá dlažbu nádvoří nad vykopávkami. Z historických stavebních materiálů je k solnému zvětrávání nejnáchylnější opuka, protože obsahuje více uhličitanu vápenatého, který je citlivý na kyselé podmínky.

V současnosti je solné zvětrávání velkým problémem obecně pro nezakonzervované historické stavby a památky a při současném stavu ochrany se bude intenzita solné evaporace stále více zvyšovat (Slížková, 2020). Významný vliv bude mít také nárůst průměrných denních teplot vlivem změny klimatu, díky čemuž se bude zvyšovat také míra evaporace, která podporuje vytváření solných výkvětů. Pro zredukování účinků tohoto procesu by bylo potřeba instalovat do celého komplexu klimatizační a topící systémy, které by udržovaly celoročně optimální hodnoty vlhkosti vzduchu a teploty.

Výsledky měření mrazového zvětrávání přinesly jednoznačný závěr, kvůli celoročně příliš vysoké teplotě vzduchu se tento proces v oblasti vykopávek téměř nemůže objevit. Podle dostupných záznamů z datových loggerů se teploty v areálu po celý rok pohybují nad bodem mrazu vlivem zdejšího mikroklimatu, tudíž voda nemůže zmrznout a zůstává v kapalném nebo plynném skupenství. Tento proces může nastat ve velmi ojedinělých případech a pouze v těsné blízkosti větracích otvorů po stranách areálu. V blízké budoucnosti se bude kvůli změně klimatu dále zvyšovat teplota vzduchu v archeologickém komplexu a pravděpodobnost výskytu tohoto procesu bude tedy ještě nižší, než je tomu v současnosti.

## 9. Zdroje

### 9.1. Literatura

- BOHÁČOVÁ, Ivana. Památky pod dlažbou III. nádvoří Pražského hradu. *Praha archeologická* [online]. Praha, 2017, 17.5. [cit. 2022-02-27]. Dostupné z: <http://www.praha-archeologicka.cz/p/272?tgo=79>
- HALL, Christopher a William D. HOFF. *Water transport in brick, stone and concrete*. 2. Oxford: Spon press, 2012. ISBN 9780415564670.
- FROLÍK, Jan a Zdeněk SMETÁNKA. *Archeologie na Pražském hradě*. 1. Praha: Paseka, 1997. ISBN 80-718-5091-8.
- HARMÁČEK, Jakub. *Hydrogeologie areálu Pražského hradu*. Praha, 2021. Bakalářská práce. Přírodovědecká fakulta univerzity Karlovy. Vedoucí práce Tomáš Weiss.
- MAŘÍKOVÁ, Jana, Jan VÁLEK a Tomáš WEISS. *Vyhodnocení stavu archeologického areálu Malých vykopávek*. Praha: Odbor památkové péče Kanceláře prezidenta republiky, 2022.
- KOTLÍK, Petr. *Stavební materiály historických objektů: materiály, koroze, sanace*. 1. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 1999. ISBN 80-708-0347-9.
- MAREŠOVÁ, Lenka. *Degradace opukového kamene na souboru historických staveb*. Brno, 2006. Diplomová práce. Masarykova Univerzita v Brně. Vedoucí práce Miroslava Gregerová.
- KOTLÍK, Petr, Jan ŠRÁMEK a Jiří KAŠE. *Opuka*. 1. Praha: Společnost pro technologie ochrany památek - Stop, 2000. ISBN 80-902-6685-1.
- CHAROLA, A. Elena. Salts in the Deterioration of Porous Materials: An Overview. *Journal of the American Institute for Conservation*. 2013, 39(3), 327-343. ISSN 0197-1360. Dostupné z: doi:10.1179/019713600806113176
- PŘIKRYL, Richard, Tomáš LOKAJÍČEK, Jiřina SVOBODOVÁ a Zuzana WEISHAUPTOVÁ. Experimental weathering of marlstone from Přední Kopanina (Czech Republic)—historical building stone of Prague. *Building and Environment*. 2003, 38(9-10), 1163-1171. ISSN 03601323. Dostupné z: doi:10.1016/S0360-1323(03)00073-8
- VÍTEK, Jan. Opukový fenomén: Na zvlněných okrajích České tabule. *Vesmír* [online]. 2011, 8.12., 90(704) [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: <https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/2011/cislo-12/opukovy-fenomen.html>
- DOMENICO, Patrick a Franklin SCHWARTZ. *Physical and Chemical Hydrogeology*. 2. New York: John Wiley, 1997. ISBN 978-0-471-59762-9.
- TEPLÝ, Bohumil. *Konzervování a restaurování kamene*. 1. Hořice v Podkrkonoší: Nadace SPŠKS, 1997. ISBN 80-238-0893-1.



NETOPILOVÁ, Miroslava. *Stavební materiály*. 1. Ostrava: Vysoká škola Báňská - Technická univerzita Ostrava, 2004. ISBN 80-86634-27-2.

CHLUPÁČ, Ivo. *Geologická minulost České republiky*. Vyd. 2., opr. Praha: Academia, 2011. Neživá příroda. ISBN 978-80-200-1961-5.

SLAVÍK, Martin. *Stopovače a stopovací zkoušky* [online]. Praha: Univerzita třetího věku, str. 10-14, 2019, 29.11. [cit. 2022-05-30].

WALDER, Joseph S. a B. HALLET. A theoretical model of the fracture of rock due to freezing. *Geological Society of America Bulletin*. 1985, 3. Dostupné z: doi:10.1130/0016-7606

POSPÍŠILOVÁ, Eva. *Průzkum a konzervace archeologické keramiky*. Brno, 2013. Bakalářská práce. Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity. Vedoucí práce Lubomír Prokeš.

SLÍŽKOVÁ, Zuzana. *Rozbor materiálů z architektonického fragmentu pod III. nádvořím Pražského hradu*. 1. Praha: Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, 2021.

SLÍŽKOVÁ, Zuzana, Radek ŠEVČÍK a Jan VÁLEK. *Zpráva o výsledcích průzkumu zasolení zdiv pod III. nádvořím na Pražském hradě*. 1. Praha: Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, 2020.

FENCL, Michal. *Bobtnavé zeminy v ČR*. Praha, 2010. Bakalářská práce. Přírodovědecká fakulta univerzity Karlovy. Vedoucí práce Jan Boháč.

WEISS, Zdeněk a Miloš KUŽVART. *Jílové minerály: jejich nanostruktura a využití*. 1. Praha: Karolinum, 2005. ISBN 80-246-0868-5.

OR, Dani, Peter LEHMANN, Ebrahim SHAHRAEENI a Nima SHOKRI. Advances in Soil Evaporation Physics-A Review. *Vadose Zone Journal*. 2013, 12(4). ISSN 15391663. Dostupné z: doi:10.2136/vzj2012.0163

SIEDEL, Heiner. Salt efflorescence as indicator for sources of damaging salts on historic buildings and monuments: a statistical approach. *Environmental Earth Sciences*. 2018, 77(16), 572-580. ISSN 1866-6280. Dostupné z: doi:10.1007/s12665-018-7752-4

BRDIČKA, Miroslav, Ladislav SAMEK a Bruno SOPKO. *Mechanika kontinua*. Vyd. 3., rev. Praha: Academia, 2005. Česká matice technická (Academia). ISBN 80-200-1344-X.

BARTCZAK, Arkadiusz, Halina KACZMAREK, Michał BADOCHA, Michał KRZEMIŃSKI a Sebastian TYSKOWSKI. Measured and predicted freeze-thaw days frequencies in climate change conditions in central Poland. *PeerJ*. 2021, 9. ISSN 2167-8359. Dostupné z: doi:10.7717/peerj.12153

KERGUILLEC, Riwan. Seasonal distribution and variability of atmospheric freeze/thaw cycles in Norway over the last six decades (1950-2013). *Boreas*. 2015, 44(3), 526-542. ISSN 03009483. Dostupné z: doi:10.1111/bor.12113

OBŠILOVÁ, Eva. *Bobtnání těsnících bentonitů*. Praha, 2006. Diplomová práce. Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy. Vedoucí práce Jan Boháč.

RUEDRICH, Joerg, Tobias BARTELEN, Reiner DOHRMANN a Siegfried SIEGSMUND. Moisture expansion as a deterioration factor for sandstone used in buildings. *Environmental Earth Sciences*. 2011, 63(7-8), 1545-1564. ISSN 1866-6280. Dostupné z: doi:10.1007/s12665-010-0767-0

GROSSI, Carlota M., Peter BRIMBLECOMBE a Ian HARRIS. Predicting long term freeze–thaw risks on Europe built heritage and archaeological sites in a changing climate. *Science of The Total Environment*. 2007, 377(2-3), 273-281. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2007.02.014

GROSSI, C.M., P. BRIMBLECOMBE, B. MENÉNDEZ, D. BENAVENTE, I. HARRIS a M. DÉQUÉ. Climatology of salt transitions and implications for stone weathering. *Science of The Total Environment*. 2011, 409(13), 2577-2585. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2011.03.029

TÉTREULT, J. a S. MICHALSKI. Humidity effects on building materials and cultural heritage. *Journal of Cultural Heritage*. 2014, 15(3), 345-359. Dostupné z: doi:10.1016/j.culher.2013.05.010

PAINE, A.K. a M.A. Effects of temperature on historic building materials and structures. *Construction and Building Materials*. 2012, 26(1), 392-399. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.06.074

ZHANG, Lijuan, Yanan JIANG a Yanlin WANG. Formation and growth kinetics of mirabilite from Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> aqueous solution in controlled relative humidity environment. *Journal of Crystal Growth*. 2015, 415, 23-27. Dostupné z: doi:10.1016/j.jcrysgr.2014.11.031

GIORGI, F., J.M. GUTIÉRREZ, R.E. BENESTAD, E. COPPOLA, C. JONES a E. KJELLSTROM. Regional climate modeling on European scales: a joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble. *Climate Dynamics*. 2015, 44(7-8), 2131-2169. Dostupné z: doi:10.1007/s00382-015-2589-y

VAUTARD, R., A. GOBIET, S. SOBOLOWSKI, S. KJELLSTROM a A.I. STEGEHUIS. Projected changes in high-impact precipitation in Europe at the regional scale based on high-resolution climate models. *Environmental Research Letters*. 2017, 12(6). Dostupné z: doi:10.1088/1748-9326/aa6db1

Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. *Intergovernmental Panel on Climate Change* [online]. Cambridge: Cambridge University press, 2022 [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>

MANDRIOLI, Paolo. Biological agents of deterioration of cultural heritage: An overview. *Rendiconti Lincei*. 2018, **29**(3), 515-524. Dostupné z: doi:10.1007/s12210-018-0712-1

SCHERER, G.W. Theory of moisture transport in porous materials: a review. *Cement and Concrete Research*. 2009, **39**, 735-748. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2009.04.004

ČERVENÁK, Jan. *Zpráva průzkumů a měření mikroklimatu, proudění vzduchu a povrchových a vpichových teplot*. Praha: Průzkum a měření fyzikálních parametrů prostor, proudění vzduchu, povrchových a vpichových teplot materiálů, 2022

## 9.2 Datové zdroje

*Comet cloud* [online]. Praha: ARUP Akademie věd ČR, 2018 [cit. 2023-04-15]. Dostupné z: <https://cometsystem.cloud/device/list>

GULBRANDSEN, Nina D. a Kristin RYPDAL. Equilibrium relative humidity over salt solutions. Part III. The systems K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O and K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-MgSO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O from 5°C to 25°C. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 1996, **41**(3), 524-530. Dostupné z: doi:10.1021/je950278a

## 10. Seznam obrázků

Obrázek 1: Půdorys III. nádvoří Pražského hradu s významnými dochovanými objekty

Obrázek 2: Křivky desaturace třech jílových cihel s různými hodnotami efektivní pórovitosti

Obrázek 3: Detailní půdorys severovýchodní části archeologického areálu v okolí kostela sv. Bartoloměje

## 11. Seznam tabulek

Tabulka 1: Tabulka s hodnotami rovnovážné vlhkosti pro sloučeniny solí  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  a  $\text{CaSO}_4$

Tabulka 2: Výsledky IEC analýzy vzorku solného výkvětu na severní zdi kostela sv. Bartoloměje

Tabulka 3: Výsledky měření obsahu sádrovce a kalcitu metodou XRPD

## 12. Seznam grafů

Graf 1: Znázornění křivky hodnot rozdílu vlhkosti vzduchu a rovnovážné vlhkosti soli  $\text{CaSO}_4$  z loggeru „3AFB4C“

Graf 2: Znázornění křivky hodnot rozdílu vlhkosti vzduchu a rovnovážné vlhkosti soli  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  z loggeru „3AFF3C“

Graf 3: Znázornění křivky hodnot rozdílu vlhkosti vzduchu a rovnovážné vlhkosti soli  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  z loggeru „3B3208“

Graf 4: Výsledná data z ročního sondového měření relativní vlhkosti, povrchové teploty a rosného bodu

Graf 5: Výsledná data z ročního sondového měření relativní vlhkosti, povrchové teploty a rosného bodu

Graf 6: Výsledná data z ročního sondového měření relativní vlhkosti, povrchové teploty a rosného bodu

## 13. Přílohy

### 13.1. Příloha 1 - Schéma instalovaných sond v půdorysu Velkých vykopávek

- Zeleně jsou vyznačena čidla, která zaznamenávají teplotu vzduchu a hodnoty relativní vlhkosti, červeně jsou vyznačena čidla, která zaznamenávají pouze teplotu vzduchu.

Převzato a upraveno od: ARUP AV ČR

