

Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta,  
Ústav geochemie, mineralogie a nerostných zdrojů

Geologie

Ložisková geologie



Bc. Jakub Jablonský

## **Zvětrávací formy ohradní cihelné zdi Zemské porodnice v Praze a jejich interpretace**

Weathering forms of brick-wall surrounding Regional Maternity Hospital  
in Prague and their interpretation

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce: Prof. Mgr. Richard Přikryl, Dr.

Praha 2013

## 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, 10.08.2013

Podpis

## ABSTRAKT

Předložená diplomová práce se věnuje tématice zvětrávání pálených cihel, ze kterých je postavena obvodová zeď a budova Zemské porodnice u Apolináře v Praze. Tato zeď vykazuje na první pohled výrazné známky zvětrání, které se projevují převážně v podobě zčernalých krust sádrovce na původním cihelném povrchu, puchýřováním, odprysky a nejhorších případech mnohovrstvým šupinatěním spojeným s drolivým rozpadem. Tato skutečnost může svědčit o tom, že cihly, ze kterých je tato zeď postavena, nemají vysokou kvalitu, což může být způsobeno nízkou teplotou výpalu (cca 800 - 900°C). To má za následek nízké množství pórů větších než 3µm, které mají pozitivní vliv na odolnost cihel vůči cyklickému působení mrazu a také působení vodorozpustných solí. Cílem předložené diplomové práce bude nalezení zdroje výchozí suroviny pro výrobu cihel a stanovení jejího mineralogického složení a její základní geotechnický průzkum, dále stanovení druhů a intenzity jednotlivých zvětrávacích jevů, k čemuž poslouží detailní terénní studium zdi. Dále bude zkoumán vztah mezi vlastnostmi jednotlivých cihel a zvětrávacími jevy, které se na nich vyskytují. K tomu poslouží výzkum pomocí optické mikroskopie a RTG difrakce, který umožní odhadnout mineralogické složení cihel a následně teplotu jejich výpalu. Pomocí metody iontově výměnné chromatografie bude možné určit koncentraci vodorozpustných solí, které se ve zdi vyskytují a jejich vztah k porozitě povrchových vrstev a jader cihel, která bude určena metodou vysokotlaké rtuťové porozimetrie. Výsledky mohou být užitečné pro budoucí restaurátorské práce, které budou na obvodové zdi i na budově zemské porodnice v budoucnosti probíhat.

## SUMMARY

This diploma thesis focuses on the weathering of firing bricks used for construction of the walls at the Regional Maternity Hospital U Apolináře in Prague. This wall shows significant marks of weathering, such as black crusts of gypsum on the original bricks surface, blistering, spalling and powdering in the worst cases. The poor quality of the bricks is caused by a low firing temperature (aprox. 800 - 900°C). This leads to a lack of pores bigger than 3 µm, which have positive influence on high performance of bricks against freeze-thaw cycles and effect of water soluble salts. This thesis aims to find the source of raw material for production of bricks, determination of their mineralogical composition and their basic geotechnical survey, as well as determination of weathering forms and their intensity by detailed field study of the wall. The relationship between properties of bricks and weathering forms will be studied by optical microscopy, XR diffraction, which allows to estimate mineralogical composition of bricks and their firing temperature. Ion changing chromatography identifies concentration of water soluble salts in the wall and their relationship to porosity of surface area and cores of bricks which will be detected by mercury intrusion porosimetry. Results will be useful for restoration works at the wall and building of the Regional Maternity Hospital site in the future.

## Seznam obrázků:

1. Obecné technologické schéma cihlářské výroby
2. Areál Zemské porodnice se zákresem výzkumných polí ZP/1, ZP/2 (západní strana), ZP/3, ZP/4 (severní strana) a ZP10 (východní strana) –
3. Ohradní zeď i budovy Zemské porodnice v Praze byly vystavěny z neomítnutého cihelného zdiva
4. Kumulativní zrnitostní křivky cihlářské zeminy ze zaniklé střešovické cihelny (vlevo vzorek SBM1, vpravo SBM5)
5. Modifikovaný Winklerův diagram (viz Pytlík 1995) vyznačenými pozicemi vzorků SBM1 (1065) a SBM5 (1066)
6. Diagram plasticity vzorku SBM1
7. Diagram plasticity vzorku SBM5
8. Výřez z povinných císařských otisků map stabilního katastru, zobrazující polohu střešovické cihelny (na mapě popsána jako Cyhelna) západně od barokního bastionu 10
9. První zjištěné mapové zobrazení střešovické cihelny
10. Historické fotografie střešovické cihelny z roku 1864
11. Současná podoba lokality, v níž stávala střešovická cihelna
12. Výřez z geologické mapy lokality, kde stávala střešovická cihelna
13. Situační plán průzkumných polí v rámci záchranného archeologického výzkumu prováděného Archeologickým ústavem AV ČR, v.v.i v roce 2010 s vyznačenou lokalizací profilu č. 8
14. Celkový pohled na profil č. 8, dokumentovaný v jámě Myslbek v rámci záchranného archeologického výzkumu zaniklé střešovické cihelny
15. Winklerův diagram vymezující možné zrnitostní složení cihlářské suroviny pro výrobu plných cihel (I), dutých cihel (II), pálené střešní krytiny (III) a stropních překladů (IV)
16. Bainův diagram vymezující pole optimálních a přípustných mechanických vlastností cihlářské suroviny
17. Zastoupení pórů s průměrem větším než 3  $\mu\text{m}$  pro studované vzorky cihel z ohradní zdi Zemské porodnice v Praze
18. Rozsah hodnot Maageho faktoru mrazuvzdornosti pro studované vzorky cihel z ohradní zdi Zemské porodnice v Praze
19. A. Štěrbínové póry v povrchové části vzorku ZP4/4, B. Charakter pórového prostoru v cihle (vzorek ZP/CI2)
20. A. Původní zpevněný povrch s povrchovými usazeninami a počínajícím puchýřováním, B. Původní i druhotný zpevněný zčernalý povrch, částečně porušený odprsky a obnažené jádro cihly s mnohovrstvým šupinatěním, C. Drolivý rozpad doprovázený mnohovrstvým šupinatěním, D. Rozsáhlé mnohovrstvé šupinatění s počátečním rozvojem voštin až alveol, E. Odprsky zpevněné původní vrstvy, F. Exokrusty na cihlách ozdobné římsy
21. Hydrogeologická mapa zobrazující okolí Zemské porodnice
22. Vývoj koncentrace síranů ve zvětřalém povrchu cihel ohradní zdi Zemské porodnice v Praze
23. Vývoj koncentrace chloridů ve zvětřalém povrchu cihel ohradní zdi Zemské porodnice v Praze
24. Vývoj koncentrace dusičnanů ve zvětřalém povrchu cihel ohradní zdi Zemské porodnice v Praze

## Seznam tabulek

1. Přehled vzorků odebraných z ohradní zdi Zemské porodnice v Praze
2. Vyhodnocení rozsahu poškození jednotlivými zvětrávacími jevy.
3. Fázové složení zvětralých povrchových partií cihel
4. Fázové složení cihel

5. Fázové složení pravděpodobné cihlářské suroviny ze zaniklé střešovické cihelny
6. Vyhodnocení obsahu aniontů vodorozpustných solí v povrchových vrstvách cihelného zdiva Zemské porodnice v Praze
7. Vyhodnocení obsahu aniontů vodorozpustných solí v různých částech cihel z ohradní cihelné zdi Zemské porodnice v Praze
8. Klasifikace stupně zasolení stavebních materiálů podle ČSN 73 061 (2000) a Kopecké a Nejedlého (2005)
9. Výsledky rtuťové porozimetrie vzorků ze zdi Zemské porodnice
10. Rozbor vody ze studně v Apolinářské ulici
11. Složení podzemní vody ze studny č. 15 v lokalitě Apolinářská ulice
12. Průměrné roční emise vybraných polutantů v Praze ze stacionárních zdrojů za rok 2010 REZZO 1 – 3 a z dopravy za rok 2010 REZZO 4
13. Koncentrace NO<sub>2</sub> na různých lokalitách v ČR

Volně vložené přílohy

- I. Typy, rozložení a hloubkový rozsah zvětrávacích jevů ohradní zdi Zemské porodnice v Praze
- II. Základní geotechnice průzkum vzorků zeminy SBM1 a SBM5 provedený firmou GEMATEST

## Obsah

1. ÚVOD.....	1
2. CIHLÁŘSTVÍ.....	2
2.1. Suroviny pro výrobu pálených cihel.....	2
2.2. Technologie výroby pálených cihel.....	2
2.3. Složení a vlastnosti cihel.....	3
2.3.1. Složení cihel.....	3
2.3.2. Barvy pálených cihel v závislosti na minerálním složení.....	4
2.3.3. Fyzikální vlastnosti.....	5
2.3.4. Mechanické vlastnosti.....	6
2.4. Cihlářské výrobky.....	6
2.5. Zvětrávání pálených cihel.....	6
2.5.1. Obecně.....	6
2.5.2. Proces a druhy zvětrávání.....	7
2.5.3. Mechanické zvětrávání.....	8
2.5.4. Solné výkvěty.....	9
2.5.5. Chemické zvětrávání.....	10
2.5.6. Biologické zvětrávání.....	10
2.7. Poznátky z dosavadního výzkumu cihelných konstrukcí.....	11
3. STUDOVANÝ OBJEKT.....	12
3.1. Umístění studovaného objektu.....	12
3.2. Historie výstavby Zemské porodnice.....	12
3.3. Charakteristika studované cihelné zdi.....	14
3.3.1. Makroskopický popis.....	14
3.3.2. Výzkumná pole.....	15
4. METODY STUDIA.....	16
4.1. Studium zvětrávacích jevů <i>in situ</i> a odběr vzorků.....	16
4.2. Archivní studium.....	17
4.3. Laboratorní rozbory vzorků.....	18
4.3.1. Výběr metod a cíle laboratorního rozboru vzorků.....	18
4.3.2. Příprava výbrusů a optická mikroskopie.....	18
4.3.3. RTG difrakční rozbor.....	19
4.3.4. Vysokotlaká rtuťová porosimetrie.....	19
4.3.5. Iontově výměnná chromatografie.....	20
4.3.6. Geotechnický rozbor.....	21

5. VÝSLEDKY .....	22
5.1. Zvětrávací formy cihelného zdiva ohradní zdi Zemské porodnice .....	22
5.2. Mineralogické složení zvětralých povrchových partií cihel a cihlářské suroviny .....	23
5.3. Obsah vodorozpustných solí.....	25
5.4. Rtuťová porozimetrie .....	26
5.5. Geotechnický rozbor pravděpodobné cihlářské suroviny .....	27
6. DISKUZE.....	29
6.1. Zdroj cihel .....	29
6.1.1. Lokalizace místa výroby cihel a zdrojové oblasti cihlářské suroviny .....	29
6.1.2. Ověření vhodnosti suroviny pro výrobu cihel.....	32
6.1.3. Shrnutí poznatků o zdroji cihel.....	35
6.2. Interpretace zvětrávacích forem cihelného zdiva Zemské porodnice.....	35
6.2.1. Obecně.....	35
6.2.2. Složení výchozí suroviny a její vliv na mineralogii cihel .....	35
6.2.3. Vliv pórovitosti na zvětrávací formy cihel.....	36
6.2.4. Zvětrávací formy .....	40
6.2.6. Prostorová distribuce vodorozpustných solí v ohradní zdi Zemské porodnice v Praze .....	44
6.2.7. Vztah mezi velikostní distribucí pórů, typu poškození cihelného zdiva a obsahu vodorozpustných solí.....	48
6.3. Srovnání zvětrávacích forem cihelného zdiva Zemské porodnice s jinými cihelnými konstrukcemi .....	49
6.4. Srovnání zvětrávacích forem a procesů cihelného zdiva se zvětrávacími procesy přírodního kamene .....	50
7. ZÁVĚR .....	51
8. LITERATURA.....	53

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu diplomové práce panu Prof. Mgr. Richardovi Příkrylovi, Dr. za odborné vedení a za cenné rady, které mi byly nápomocny při zpracování předložené diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat RNDr. Ivě Herichové z Archeologického ústavu AV ČR, která mi byla velkou měrou nápomocna s hledáním možné zdrojové suroviny pro výrobu cihel použitých při stavbě Zemské porodnice a dále s hledáním historických pramenů o střešovické cihelně, jež tyto cihly vyráběla. Tato diplomová práce vznikla s finanční podporou Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR, projekt MSM 0021620855 „Mechanismy transportu látek ve svrchních sférách Země“ a projektu GAČR 13-13967S).



## 1. ÚVOD

Pálené cihly jsou společně s přírodním kamenem a maltou považovány za jeden z nejdůležitějších stavebních materiálů, používaných na objektech kulturního dědictví lidstva (Sebastián a Cultrone 2010, Fernandes et al. 2010). První ručně tvarované nepálené cihly se objevují již před 10 000 lety, pozdější tvarování do forem je dokumentováno archeologickými nálezy (Wright 2005). První pálené cihly se začínají objevovat ve 4. tisíciletí př. Kr. (Wertime 1973). Velký rozvoj v používání cihel nastává během průmyslové revoluce. Přestože je v současnosti hlavním stavebním materiálem beton (62 % z celkové výstavby), cihla má stále velký význam a představuje největší objem výroby stavební keramiky. Cihlářské výrobky se v současném stavebnictví podílejí 7 % (Pytlík 1995).

Vypalování cihel dodává tomuto specifickému druhu materiálu trvanlivost a mechanickou odolnost podobnou té u přírodního kamene s tou výhodou, že je lze snáze tvarovat (Fernandes et al. 2010). Podobně jako ostatní stavební materiály, jsou i cihly vystaveny zvětrávacím procesům, které vedou k mineralogickým a strukturním změnám, vzniku trhlin, skvrn, desintegraci materiálu atd. K poškození pórovitého materiálu jako jsou cihly, přírodní kámen nebo malty dochází buď fyzikálními procesy (kolísání teploty, zmrazovací cykly, změny obsahu vody ad.), chemickými ději (reakce mezi povrchem a atmosférickými plyny nebo ionty rozpuštěnými ve vodě) nebo biologickou činností. Míra poškození cihelného zdiva se v jednotlivých částech budov může výrazně lišit (Elert et al. 2003).

Pokud dochází v průběhu let k silnému poškození historického zdiva, je třeba jej šetrně nahradit novými, ale zároveň složením a estetickými vlastnostmi, vhodnými cihlami (Lopéz-Arce et al. 2003). K tomu je nezbytná detailní znalost vlastností původního i nového stavebního materiálu, aby bylo možné předpovědět mechanické i chemické chování celého systému v budoucnu a tím se zabránilo jeho celkovému poškození.

Předložená diplomová práce se zabývá zvětrávacími formami cihel, použitými při stavbě ohradní zdi Zemské porodnice v Praze. Důvodem výběru tohoto objektu je skutečnost, že se jedná o dobře datovanou stavbu (k výstavbě porodnice došlo v letech 1867 – 1875), jehož podstatná část neprošla za dobu existence žádnými významnými změnami. Dále se jedná o objekt, který je vystaven silnému znečištění z dopravy (blízkost severojižní magistrály s vysokou hustotou dopravy). Hlavní motivací výběru tohoto objektu však byly použité materiály – pálené cihly v neomítnutém zdivu. I při běžné makroskopické prohlídce studované cihly vykazují přítomnost řady zvětrávacích forem, jejichž vznik a rozvoj může být ovlivněn řadou faktorů. Jednou z otázek, které si tato práce klade, zda lze tyto zvětrávací formy porovnat s těmi, které vznikají na pórovitém přírodním kameni.

K vyřešení vytčených cílů byly definovány a identifikovány základní zvětrávací formy cihel a bylo provedeno *in situ* studium jejich rozšíření na vybraných partiích ohradní zdi Zemské porodnice. Vznik pozorovaných zvětrávacích forem byl interpretován pomocí studia koncentrace vodorozpustných solí, fázového složení zvětralých vrstev a texturních vlastností pórového prostoru cihel. Součástí studia bylo hledání možného zdroje cihlářské suroviny, použité pro výrobu těchto cihel, a interpretace technologie výpalu jednotlivých cihel. Výsledky této práce by mohly být použity jako součást materiálového průzkumu před restaurátorskými pracemi celého objektu, s nimiž se v blízké budoucnosti počítá.

## 2. CIHLÁŘSTVÍ

### 2.1. Suroviny pro výrobu pálených cihel

Složení suroviny pro výrobu cihel značně ovlivňuje jejich celkovou kvalitu. Základní surovinou pro výrobu cihel jsou cihlářské zeminy nebo jíly, které jsou na zemském povrchu hojně rozšířeny. V českých zemích jsou nejpoužívanějšími kvartérní spraše, sprašové hlíny, glacialní a glacialakustrinní sedimenty. Dále jsou významné neogenní jíly, křídové a permokarbonské jílovce a ordovické jílovité břidlice.

Základními složkami suroviny jsou jílové minerály, nejílový klastický materiál a autigenní nejílové minerály. Z jílových minerálů převažuje illit, může však být též přítomen kaolinit, chlority, vermikulit, v menší míře též smektity nebo smíšené illit-smektitické struktury. Klastická příměs bývá tvořena hlavně křemenem, případně živci a v podružném množství i dalšími neztvrdlými minerály z původních hornin. Za škodlivé příměsi v cihlářských surovinách se považují vápencové konkrece (cicváry), které snižují pevnost výrobků a způsobují povrchové vady (odštěpky na povrchu), dále rozpustné sloučeniny způsobující výkvěty, hrubá zrna křemene, sádrovce, nebo pyritu, fluor (v illitu bývá až 0,33%), který je škodlivou látkou ve spalinách.

Cihlářské suroviny se řadí mezi keramické suroviny. Ty se dělí na tvárnivé (plastické) suroviny, které po smíchání s vodou vytvoří tvárnivé těsto. Mezi ně patří jílovité suroviny (sedimenty s převažujícím obsahem jílovitého materiálu). Netvárnivé suroviny upravují chování surovinové směsi při vytváření, sušení a pálení a současně působí na výsledné vlastnosti výrobků tím, že ovlivňují mikrostrukturu vypáleného střepu. Tyto složky mohou být jak přírodní (klastické, nebo zpevněné sedimenty), tak antropogenní (průmyslové odpady – popílek, piliny, kaly) (Lach 1981).

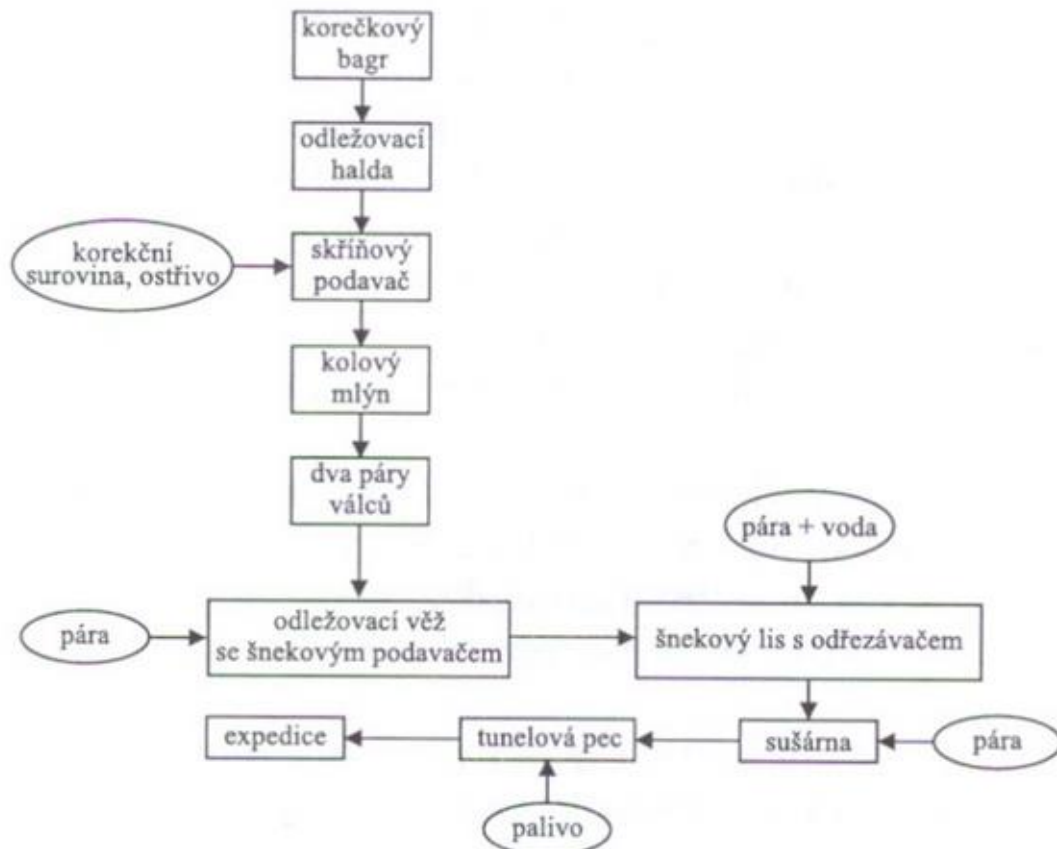
### 2.2. Technologie výroby pálených cihel

Proces výroby cihel představuje dlouhotrvající a složitý postup (Obr. 1), při kterém dochází k významným změnám původní suroviny. Vlastnosti vypálené cihly závisí na reakcích, ke kterým dochází při výpalu nehomogenní masy jílového materiálu (Manning 1995).

Celý proces začíná vyhledáváním, průzkumem a těžbou vhodné suroviny, otvírkou a následnou těžbou ložiska v etážích pomocí rypadel. Důležitými faktory jsou skrývkový poměr a s tím související ekonomie těžby. Následuje příprava suroviny spočívající ve vytvoření těsta vhodného k dalšímu zpracování. Dalším krokem je odležení těsta v přítomnosti vody, která vytváří mikrostrukturu těsta. Doba odležení se pohybuje mezi čtyřmi a čtrnácti dny (Kornmann 2007). K odležení suroviny dochází buď pomocí haldování, nebo skladováním v temperovaných odležárnách. Výsledkem je homogenizace těsta a minimalizace obsahu rozpuštěných solí.

Závěrečnou fází přípravy suroviny je sušení probíhající 12 – 76 hodin. Dochází při něm ke snížení vlhkosti z původní hodnoty rozdělovací vody okolo 20 % na zbytkovou vlhkost 1 – 1,5 %.

Poslední fází celého výrobního procesu pálených cihel je výpal v peci při teplotách v rozmezí 930 – 1050°C. Zpravidla se ale vypalovací teplota pohybuje okolo 1000°C. Podmínky, při kterých dochází k výpalu, jsou stanoveny na základě předchozích zkušeností a jsou vyhodnocovány na základě smrštění vypáleného produktu (Manning 1995). Výpal má zásadní vliv na pórovitost (Fernandes et al. 2010). Doba výpalu činí v průměru 10 až 30 hodin. V současné době se k výpalu používá především tunelových pecí s kontinuálním provozem.



Obr. 1. Obecné technologické schéma cihlářské výroby (Hanykýř a Kutzendörfer 2008).

## 2.3. Složení a vlastností cihel

### 2.3.1. Složení cihel

Během výpalu dochází k prudkému zvýšení teploty suroviny. Benavente et al. (2006) přirovnávají proces pálení cihel k vysokoteplotní metamorfóze z důvodu mineralogických a strukturních změn. Výchozí surovina je poměrně heterogenní materiál obsahující celou řadu minerálů, které prudkým zvýšením teploty mohou změnit svou krystalickou mřížku, nebo vytvořit nové minerální asociace. V geologii by se výše zmíněné dalo přirovnat k anatexi sedimentů při metamorfóze, kdy dochází k tavení (Manning 1995).

Generelně lze tyto změny rozdělit do pěti fází:

- 1) sušení: do 200°C, dochází k největšímu smrštění
- 2) ztráta strukturní vody; rozklad sádrovce: 150 – 650°C
- 3) spalování karbonátů: 200 – 900°C
- 4) rozklad bassanitu, sulfidů a karbonátů: 400 – 950°C
- 5) sinterizace a vitifikace: nad 900°C

Po výpalu dochází k řízenému chlazení, aby se zabránilo mechanickým problémům spjatým s přechodem  $\alpha$ -  $\beta$  křemene při teplotě 573°C, protože tyto dva polymorfy křemene mají rozdílné koeficienty teplotní expanze.

Chování jednotlivých jílových komponent během vypalování suroviny je různé. Hrubé částice hornin a některé minerály (jako křemen) zůstanou během pálení nezměněny, zatímco ostatní (speciálně jíly) reagují rychle. V každém případě nemusí být nutně dosaženo minerálních asociací v termodynamické rovnováze. Na tuto skutečnost musí být pamatováno při pokusech o odhad vlastností vypalování.

Jílové minerály reagují rychle částečně kvůli své jemnozrnnosti a velkému měrnému povrchu a částečně též kvůli nestabilitě při vysokých teplotách. Kromě kaolinitu je chování ostatních jílových minerálů málo objasněno. Kaolinit podstupuje množství přeměn. Mezi 400 – 700°C ztrácí vodu a přeměňuje se na metakaolinit (bezvodá fáze kaolinitu  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ ) a Al-Si spinel. Při teplotách vyšších než 1000°C a dlouhé době pálení se začíná formovat cristobalit. Pálením kaolinitu rovněž vzniká čistě bílý produkt – mullit. Mullit může být i produktem pálení jiných jílových minerálů, ale pouze po uvedení přídavných komponent do systému, což má za následek snížení vypalovací teploty a vznik dalších minerálních asociací – klinochlor produkuje forsterit, spinel a mullit (1000 – 1100°C), illit produkuje mullit, živec a leucit a smectit produkuje mullit a silikáty (cristobalit, tridymit, křemen, anortit a cordierit). Produkce těchto minerálů závisí na složení příslušného jílového minerálu (Manning 1995).

Obvyklou a žádoucí přísadou cihlářských hlín jsou křemenné písky, jejichž přítomnost redukuje srážení, pomáhá vyjímání cihel z forem, urychluje schnutí vytvořením otevřené struktury. Dodatečný písek je někdy přidáván do cihlářských hlín jako inertní plnivo. Jako další přísady jsou používány rozdrčené horniny, spálený domovní odpad nebo recyklované pálené cihly. Dnes obvyklým způsobem je přidávání paliva do cihlářského těsta (koks, rozdrčené uhlí), aby bylo dosaženo rovnoměrného vypálení.

Jinými chemickými plnivy, která jsou prozatím ve fázi výzkumu, mohou být alkalické choridy, chloridy alkalických zemin, chlorid amonný a  $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$  (tri-calcium aluminát). Jejich hlavní výhodou je nízká cena, ovšem ta se může navýšit, pokud způsobí korozi a environmentální problémy. Na druhé straně se lépe jeví využití lignosulfonátu díky jeho disperzním vlastnostem ve stavebních materiálech. (Andrés et al. 2008).

Pálené cihly jsou složitý komplex novotvořených fází. Složení je závislé na výchozí surovině. Detailní studie mineralogie pálených cihel provedená Dunhamem (1992) identifikovala množství dominantních minerálů – křemen, cristobalit, mullit, K – živec, plagioklas, wollastonit, pyroxen, melilit, anhydrit, hematit a sklo.

### 2.3.2. Barvy pálených cihel v závislosti na minerálním složení

Na výsledný estetický vzhled má vliv chování železa během vypalování. Při vypalování cihel v oxidačních podmínkách vytváří každý volný oxid železa hematit, což má za následek červené zbarvení finálního produktu.

V redukčních podmínkách vytváří železo fáze (ve kterých je přítomno jako  $\text{Fe}^{2+}$ ), jako je ilmenit nebo železnaté silikáty (Fe – cordierit). Výsledkem je modré zbarvení cihel. V redukčních podmínkách je důležitá fugacita kyslíku v závislosti na stoupající teplotě (ovlivňuje relativní stabilitu hematitu a magnetitu), což určuje finální barvu produktu. Vyšší vypalovací teplota předurčuje modrou barvu, nižší červenou. Takto se dají vysvětlit i barevné rozdíly mezi vnitřkem a okraji vypálené cihly, jejíž surovina má vysoký obsah organické hmoty nebo pyritu. V jádru cihly může dojít k redukčním podmínkám, jejichž výsledkem je modrá barva, naproti tomu povrch je červený.

Světle zbarvené cihly jsou produkovány buď ze suroviny s nízkým obsahem železa, nebo ze surovin s vyšším množstvím kalcitu (vyvinutého zejména z kalcitu). Výsledkem je produkce Ca – Fe silikátů. Pokud obsah vápníku převládá nad železem, jsou žlutohnědě zbarvené cihly produkovány při

normálních podmínkách. Pokud dochází k výpalu v redukčních podmínkách, tak suroviny s vysokým obsahem vápníku produkují žluté cihly. Kromě toho podíl železa (až do 10 %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) může být přítomný jako pevný roztok v mullitu, což zabraňuje vzniku červenohnědému hematitovému zbarvení (Manning 1995).

### 2.3.3. Fyzikální vlastnosti

Jednou z nejdůležitějších vlastností pálených cihel je jejich pórovitost. Definována je jako podíl mezi množstvím volného prostoru a celkovým objemem vzorku. Má vliv na jejich chemickou reaktivitu, mechanickou pevnost, trvanlivost a kvalitu. Má rovněž vliv na krystalizaci solí (což zahrnuje jejich nukleaci a precipitaci), kapilární přenos roztoků, evaporaci vody a efekty související se smáčením a schnutím cihel (Benavente et al. 2006).

Rozměry a distribuce pórů jsou ovlivněny kvalitou surové hlíny, přítomností přísad nebo nečistot, množstvím vody a teplotou pálení. Se zvyšující se teplotou pálení vzrůstá i počet pórů o velikostech 3 – 15  $\mu\text{m}$ , zato jejich vzájemné propojení klesá spolu s množstvím malých pórů. To má velký dopad na trvanlivost cihel. Vliv teploty na distribuci a velikost pórů byl studováno množstvím autorů. Domnívají se, že celková pórovitost stoupá mezi 400 – 800°C. Přičemž do 600°C dojde ke ztrátě strukturní vody a objemu (smrštění), což má za následek slabý vzestup pórovitosti. Od 600°C je vzestup pórovitosti více znatelný a dosahuje maxima v 800°C, kdy dochází k dekarbonatizaci  $\text{CaCO}_3$ . Tento jev je provázen dilatací pórů. Při teplotách nad 800°C dochází k eliminaci nejmenších pórů, zatímco celkový průměr pórů stoupá (Andrés et al. 2008).

Velikost a distribuce pórů má zásadní vliv na trvanlivost a mechanickou odolnost pálených cihel. Je dokázáno (Benavente et al. 2006), že pórovité cihly s vysokou pórovitostí a póry s poloměrem menším než 1 – 2,5  $\mu\text{m}$  jsou nejnáchylnější k rozpadu. Je to kvůli tomu, že několik důležitých rozkladných mechanismů je inverzně spjata s velikostí pórů, jako je působení mrazu a solí, stejně jako kapilární tlak během fáze smáčení a vysoušení.

Jednu z příčin vysoké pórovitosti, vysvětluje Lopez-Arce et al. (2003) odplyněním hydroxylových skupin fylosilikátů a efektem  $\text{CO}_2$  vzniklého během pálení karbonátů, což má za následek vznik velkého množství pórů o různých velikostech. Pokud dojde ke srovnání s výsledkem studie Elert et al. (2003), je vidět, že vysoká pórovitost v případě Lopez-Arce et al. (2003) je způsobena přítomností karbonátů v surovině. Ze studií (Cultrone et al. 2001, Lopez-Arce et al. 2003, Elert et al. 2003, Maguregui et al. 2009) všeobecně vyplývá, že vysoký obsah karbonátů v surovině má za následek horší kvalitu výsledného produktu. Z jiné studie (Lopez-Arce a Garcia-Guinea 2005) vyplývá, že malé množství karbonátů může mít i pozitivní vliv na odolnost pálených cihel a to kvůli cementaci mikropórů kalcitem, což může vést ke snížení pórovitosti až o 30 %. Zároveň mohou být tvořeny nepropustné vrstvy bohaté kalcitem, což zlepšuje mechanickou odolnost povrchu a snižuje míru vodní absorpce.

S mírou pórovitosti rovněž souvisí i proces vitrifikace. Při vitrifikaci vznikají póry s větším průměrem, mikropóry naopak zanikají. Obecně zanikají menší póry mezi částicemi suroviny při vysokých vypalovacích teplotách jako výsledek tavení a srůstání částic. Se zvyšující se teplotou se zároveň objevují póry s větším průměrem díky plynům vznikajícím ztrátou  $\text{OH}^-$  skupiny u fylosilikátů. Obecně platí pravidlo, že čím je vyšší stupeň vitrifikace, tím odolnější finální produkt je (Elert et al. 2003). Podle Elert et al. (2003) k vitrifikaci dochází na základě složení suroviny mezi 700°C až 900°C, v některých případech i při teplotách vyšších než 1000°C (např. vápnité suroviny).

Velikost pórů má rovněž zásadní vliv na nasákavost. Obecně platí, že čím je vyšší nasákavost, tím menší má cihla trvanlivost. Velké póry sice pohltnou větší množství vody, ale vysychají značně rychleji než póry malé, řečeno jinak: nasákavost je u cihel s velkými póry rychlejší, ovšem celkové množství

vody je menší. Doba zdržení vody v cihlách vypálených při vyšší teplotě, které mají větší procento velkých pórů a malé množství mikropórů, je mnohem menší. Z toho plyne, že mají větší trvanlivost (Kuchitsu et al. 2000). Nasákavost určuje kapacitu fluid uchovaných a cirkulujících v cihle a přispívají k poškození a snižování mechanické pevnosti. V případě zamrznutí vody v pórech může dojít k povrchovým delaminacím, rozpojování a praskání. Voda v kapalném skupenství navíc může reagovat s přítomnými rozpuštěnými solemi, což má za následek eflorescenci.

Dalšími veličinami souvisejícími s fyzikálními vlastnostmi cihel jsou expanze vlhkosti, zdánlivá hustota, vztlínavost, tepelná vodivost aj.

#### 2.3.4. Mechanické vlastnosti

Mezi základní mechanické vlastnosti cihel patří pevnost v tlaku. O pevnosti v tlaku poskytují údaje minerální složení, textura, konfigurace trhlin a pórovitost). Pevnost v tlaku se u pálených cihel pohybuje v rozmezí od 3 do 60 MPa. Pevnost v tahu je dalším určujícím parametrem pro pálené cihly. Závisí na pevnosti minerálních zrn a matrix. Obecně je pevnost v tahu brána jako procento příslušné pevnosti v tlaku (většinou 3 – 10 %).

Dalším parametrem hodnotícím mechanické vlastnosti je modul elasticity, který je charakterizován velkou variabilitou a jeho stanovení je mnohdy složité. Charakterizuje elastické deformace pálené hlíny pod tlakem. Jestliže je materiál isotropní, tak je elasticita určena dvěma parametry – modulem pružnosti v tahu nebo v tlaku - Youngovým modulem a Poissonovým poměrem, který charakterizuje elastické deformace kolmé k zatížení (Kornmann 2007). U pálených cihel se jeho hodnota pohybuje 0,15 – 0,23. Modul elasticity závisí na pórovitosti.

Jinou vlastností spjatou s trvanlivostí a mechanickou odolností pálených cihel je mrazuvzdornost. Při přechodu vody ze skupenství kapalného na pevné vzrůstá její objem v porézním prostředí o 9% a vytváří tlak až  $500 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$  (Cultrone et al. 2000). Jedná se o odolnost proti cyklickému působení mrazu za vlhkého stavu cihelného střepu (Pytlík 1995). Vyjadřuje trvanlivost cihlářského výrobku. Mrazuvzdornost je závislá na vlastním napětí ve střepu, velikosti a distribuci pórů (póry větší než  $0,25\mu\text{m}$  pozitivně ovlivňují mrazuvzdornost), textuře a pevnosti výrobků.

## 2.4. Cihlářské výrobky

Základním cihlářským výrobkem je pálená cihla. Termín cihla však obecně zahrnuje velké množství výrobků. Tyto výrobky se dělí hlavně na základě způsobu použití, což zahrnuje i další dělení (podle teploty výpalu, ceny,...). Pytlík (1995) rozděluje tyto produkty na základě způsobu využití na výrobky pro: svislé konstrukce, horizontální konstrukce (keramické nosníky, hurdisky, stropní dílce,...), pálenou krytinu (bobrovky, prejzy, hřebenáče, francouzské tašky, brněnky...) a jiné využití (trativodky, půdovky, cihelné obklady, cihelné plotovky, antuka,...).

## 2.5. Zvětrávání pálených cihel

### 2.5.1. Obecně

Fenomén zvětrávání je nedílnou součástí životnosti cihel. Životnost cihlových zdív je výsledkem chemické, fyzikální a mechanické stability různých fází, které je tvoří (Larbi 2004). V průběhu let dochází k neustálé interakci pálené cihly s okolním prostředím. Toto prostředí je mnohdy velice agresivní a cihly se proto dostávají do kontaktu s agresivními látkami (znečištěná atmosféra, popílký ze spalín, aerosoly, kyselá dešť, podzemní voda,...) a ty vedou k poškození nebo úplnému rozpadu

pálených cihel. Samotné zvětrávání ve většině případů začíná v mikroskopickém až submikroskopickém měřítku, aniž by mohlo být pozorováno (dutinky, nehomogenity). Pokud ale dojde k jeho iniciaci, pak pomalu ovlivňovat vnitřní strukturu zdiva a nakonec se projeví v makroskopickém měřítku na povrchu.

Odolnost vůči zvětrávání je ovlivněna mnoha dalšími faktory, jakými jsou například složení výchozí suroviny (a s tím související mineralogické změny během výpalu), technologie výroby (teplota výpalu), složení finálního produktu a v neposlední řadě i mnohdy agresivnímu okolnímu prostředí (atmosférické vlivy, kyselá dešť, interakce s podzemní vodou...). Výzkum těchto faktorů umožní výrobu kvalitního, mechanicky a fyzikálně odolného produktu. Co se týče restaurátorských prací, známost těchto parametrů umožní stanovení složení suroviny, podmínek výroby cihel a stanovení vhodného způsobu nahrazení poškozených cihel, nebo jejich chemickou konzervaci.

Je třeba také zmínit, že vliv na trvanlivost celé stavební konstrukce nemají pouze jednotlivé cihly, ale i to, jakou technikou je cihelná konstrukce postavena. Existuje mnoho příkladů, kde má cihelná konstrukce extrémně dlouhou trvanlivost a celkovou odolnost vůči zvětrávání (chrámový komplex My Son ve Vietnamu), který sice vykazuje značné poškození, které je ovšem způsobeno různými válkami a drancováním. Zde je jedná o konstrukci pomocí uměle vytvořených zubů do sebe zaklesnutých vertikálních linií, které jsou navíc spojeny speciální pryskyřicovou maltou, což vytváří tlusté a zároveň pevné zdi (Condoleo 2010).

### 2.5.2. Proces a druhy zvětrávání

Zvětrávání je přírodní proces probíhající na horninách při jejich vystavení okolnímu prostředí na zemském povrchu, v kontrastu s pT podmínkami za nichž materiál vznikl. Jedná se o souhrn reakcí hornin a jejich minerálů atmosférickými, hydrosférickými a biosférickými činiteli s následkem rozpojení (rozkladu) horniny na menší části, které jsou dále vodou, vzduchem nebo gravitací přenášeny do morfologických depresí, kde se ukládají.

Pokud jsou cihly (jako součást budovy) vystaveny subaerickým podmínkám, nebo jsou pod povrchem, jsou vystaveny velmi rozdílným teplotám, tlakům, režimům vlhkosti a stejně tak stykem s vodnými roztoky, atmosférickými plyny a různými organismy. V těchto podmínkách se stávají nestabilními a trpí mikrostrukturami a mineralogickými změnami, které jsou označovány jako zvětrávání nebo poškození. To způsobuje rozpad jejich krystalické mřížky a umožňuje migraci iontů, což má za následek tvorbu nových minerálů s tendencí ustanovení rovnováhy s okolním prostředím.

Horninové zvětrávání může být fyzikální (mechanické), jehož důsledkem je desintegrace materiálu pomocí mrazu a solného zvětrávání, chemické, což způsobují chemické reakce mezi povrchem horniny a atmosférou (pokud je vystavena vzduchu), roztoky (při vystavení podpovrchovým podmínkám) nebo rozpuštěnými ionty (při interakci s vodou) (Lopez-Arce et al. 2003).

Minerální reakce produkují nové fáze následujícími procesy:

- 1) změnami vnitřní energie pomocí strukturních fázových přechodů
- 2) ztrátou soudržnosti
- 3) alkalickou výměnnou protonu na povrchu minerálních zrn a průnik kyselin alkálií
- 4) chemickou sulfatizací vápenatých povrchů
- 5) krystalizací novotvořených minerálů díky interakci mezi fluidy a hydroxidy železa.

Třetím druhem zvětrávání je zvětrávání biologické, které se dá zjednodušeně popsat jako kombinace mechanického a chemického zvětrávání, které je způsobeno živými organismy (Lopez-Arce et al. 2003).

### 2.5.3. Mechanické zvětrávání

K procesům fyzikálního zvětrávání jsou řazeny všechny mechanismy zvětrávání, které jakýmkoli způsobem vedou ke vzniku mechanického napětí ve struktuře stavebního materiálu. S těmito napětími se zpravidla, vyskytují-li se cyklicky a přesahují-li přitom vnitřní pevnost struktury, pojí rozvolnění struktury, což se vlastně rovná destrukci stavebního materiálu. Mezi hlavní činitele, které způsobují mechanickou degradaci stavebního kamene, je krystalizace solí, přítomnost vody a změny teplot.

Soli jsou chemické sloučeniny mezi kationty (kromě  $H^+$ ) a anionty kyselin. Je všeobecně známo, že reakce mezi kyselinou a zásadou produkuje sůl a vodu. Nejčastějšími typy solí jsou chloridy, sírany, nitráty a karbonáty. Soli mají mnoho vlastností, díky kterým jsou důležitými činiteli v procesu zvětrávání. Jsou rozpustné a mohou rozpouštět a rekrystalizovat, mnohé jsou hygroskopické, nebo jsou schopné přijímat vodu ze vzduchu. V některých případech mohou produkovat hydratované formy s možností změny stavu mezi vodní a bezvodou fází. Soli se rovněž podílí na jiných chemických reakcích v přítomnosti vody, reagují s minerály a povrchem horniny (cihly) (Goudie a Viles 1997).

V momentě, kdy soli (rozpustné i nerozpustné) krystalizují v pórech pálených cihel a malt (částečně nad nebo přímo pod povrchem), dochází tím ke vzniku vnitřních tlaků, které vytváří trhlinky a lokální roztržení materiálu. Jedná se o jeden z nejagresivnějších jevů, který je spojen s poškozením cihelných zdív. Existuje mnoho způsobů, kterými se mohou soli dostat do zdiva, ale ve všech případech se dovnitř dostávají pomocí vlhkosti. Krystalizace solí obvykle vede ke dvěma typům rozpadu:

1. V případě zdív, které jsou často smáčené deštěm, dochází k opakované krystalizaci nerozpustných solí, výsledkem čehož je uvolňování částí zdiva, které je smýváno společně se solemi během srážek. Dochází tak k erozi na povrchu zdiva. Na místech, která jsou před deštěm více chráněna, pak vznikají krusty, jejichž tloušťka se zvyšuje s posupující krystalizací solí.
2. Druhým a celkem obvyklým typem je rozpad způsobený krystalizací solí, pocházejících z podzemní vody, která vzlíná do zdiva. Vlhkost z podzemní vody perkoluje skrz cihly a rozpouští přítomné soli (nejčastěji sírany sodíku, draslíku a hořčíku a chlorid sodný). Během vysychání zdiva dochází k transportu solí k povrchu, kde se pak vysráží. Pokud ale dojde k vyschnutí povrchu dřívě, než se k němu soli dostanou, dojde vysrážení solí uvnitř materiálu v pórech. To má za následek vznik vnitřních tlaků a napětí, které poškozují strukturu zdiva. (Larbi 2004).

Podle UNESCO existuje pět hlavních cyklů akumulace solí v horninách (cihlách). Jedná se o cyklus kontinentální, spojený s redistribucí, pohybem a akumulací karbonátů, síranů a chloridů ve vnitrozemí. Dále se jedná o cyklus marinní (akumulace mořských solí – NaCl na pobřežních plošinách suchých nížin) – v marinním cyklu jsou nejstabilnější cihly vypálené při teplotě okolo 1000°C (Cultrone et al. 2000), deltový cyklus (spojený v minulosti hlavně se zavlažováním – Nil, Amurdarja, ...), artézský cyklus (evaporace z hlubokých podzemních vod) a antropogenní cyklus (např. špatné zavlažování, znečištěná atmosféra, ...).

Prostředí, které usnadňuje solné zvětrávání je charakteristické samotným vysokým přísunem solí a přítomností dostatečné vlhkosti. Dalšími faktory jsou výkyvy teplot, humidity (způsobuje četné změny stavu solí), silná evaporace (pomáhá krystalizaci solí a koncentraci solných roztoků), vysoká hladina podzemní vody a směr převládajících větrů přinášejících soli. Společně s mikroenvironmentálními



podmínkami tyto faktory způsobují značná poškození hornin (stavebních konstrukcí). Existují tři hlavní typy škod způsobených solemi: škody způsobené díky krystalizačnímu tlaku, hydratačnímu tlaku a rozdílné termální expanzi (Kuchitsu et al. 2000).

#### 2.5.4. Solné výkvěty

Důležitým mechanismem, který vede ke zvětřování pálených cihel, je mechanismus vyluhování solí. Objevuje se v případech, kdy se déšť nebo zkondenzovaná voda obsahující kyselé plyny ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  a  $\text{CO}_2$ ) dostanou do styku se zdivem. V kyselinách rozpustné složky malty nebo cihel se poté transportují do ostatních částí zdiva, kde rekrystalizují, nebo vysráží nové sloučeniny. Pokud se sraženiny objeví na povrchu materiálu, je tento jev nazýván eflorescence (Larbi 2004).

U pozemních staveb se někdy na povrchu staviv objevují látky, které se projevují krystalky obsahující rozpustné soli alkalických kovů a zemin. Tento jev se nazývá výkvětovost (efflorescence). Způsobují zejména estetické defekty, ojediněle škodí i destruktivně (odlupování). Předpokladem pro vznik výkvětů je přítomnost rozpustných sloučenin, vody, vlhkosti a pórovité prostředí umožňující rozpouštění solí a jejich transport k povrchu konstrukce (Pytlík a Sokorář 2002). Pokud se hydratovaná sůl dostane na povrch, ztrácí vodu. To má za následek tvorbu jemného prášku, který se poté usazuje na povrchu konstrukce. V některých případech mohou hydratované soli vykristalizovat uvnitř samotné pórovité konstrukce, což se označuje jako subflorescence (Amoroso a Fassina 1983). Larbi (2004) tento jev nazývá kryptoflorescence.

Tvorba solných výkvětů může dosáhnout značné tloušťky, což formuje jasné krusty, které mohou mít značně odlišnou barvu, tvrdost a chemickou reaktivitu s povrchem konstrukce, na které krystalizují (Larbi 2004).

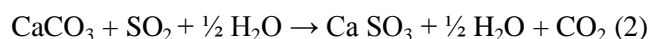
Soli způsobující výkvěty mohou mít různý původ. Mohou vytvářet již během výpalu, z malty, z půdy, na které je cihla uložena, působením kyselých dešťů nebo z posypových solí. Nejčastější původ síranů je z působení  $\text{SO}_2$ , z dolomitu a živců v surovině (vytvoření  $\text{MgSO}_4$ ) a ze sádrovce a pyritu, které surovina obsahuje (zvětřáním se tvoří  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Tvorba výkvětů je ovlivněna prostředím, ve kterém vznikají. Rozdílné bude složení výkvětů v suchém (mrazivém, horkém) klimatickém prostředí od výkvětů, vznikajících v prostředí humidním nebo v prostředí s velkými výkyvy teplot apod. (Goudie a Viles 1997).

Výkvěty především poškozují fasády, avšak podle klimatických poměrů a podle koncentrace roztoku mohou vyvolat svým zvětšením objemu v pórovité struktuře krystalizační tlaky až 100 MPa. Poté dochází k destrukci střepe a opadávání omítky nebo ke ztrátě koheze a pevnosti malty nebo spojů malty s pálenou cihlou (Larbi 2004). Nejčastějšími solemi jsou  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  a  $\text{K}_2\text{SO}_4$ , které při vysokých koncentracích mohou poškozovat mikrostrukturu (Pytlík 1995).

Tvorba výkvětů spočívá v růstu krystalů solí na površích stavebních konstrukcí. Jedním z nejčastějších a zároveň nejzávažnějších případů výkvětů je krystalizace sádrovce, která má za následek estetické i mechanické poškození konstrukce. Tento problém je spjat především s průmyslovými oblastmi, kde se využívají fosilní paliva s obsahem síry, které způsobují nárůst obsahu  $\text{SO}_2$  v atmosféře.  $\text{SO}_2$  je v pokojové teplotě a v suchém prostředí stabilní plyn, ovšem v přítomnosti vlhkosti a jiných polutantů se přeměňuje na kyselinu sírovou, která přímo reaguje s karbonáty přítomnými ve stavebním materiálu a s přítomnými prachovými částicemi za vzniku sádrovce a černých krust. Reakce je znázorněna následující rovnicí 1:



Jiný mechanismus vzniku sádrovce je popsán následujícími rovnicemi 2 a 3:



CO<sub>2</sub> je jeden z nejhojnějších polutantů v atmosféře a jeho role ve zvětrávání se zdá být základní. Následující hypotéza vysvětluje rozklad cihel pomocí CO<sub>2</sub>. CO<sub>2</sub> nejdříve proniká do pórů a reaguje s matrix, která obsahuje soli karbonátového původu. Při mokré depozici reaguje atmosférický CO<sub>2</sub> s vodou a výsledkem je formace H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Při reakci této kyseliny s hydroxidem vzniká příslušný uhličitan. Pokud je přítomen SO<sub>2</sub>, tak tento polutant ve formě kyseliny (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) reaguje s již vzniklým uhličitanem a výsledkem je formace sádrovce (Maguregui et al. 2009).

Rozpustnost sádrovce (většinou není moc rozpustný) může vzrůst až čtyřikrát pokud je smíchán s NaCl. V té samé chvíli je krystalizační vlhkost snížena ze skoro 100% relativní vlhkosti (RH) přibližně na 75% RH pro nasycený roztok. Sádrovec se začíná tvořit přibližně při 95% RH a jeho krystalizace nadále roste společně s klesající RH až do hodnoty 75% RH, kdy bude veškerý sádrovec tvořit pevné krystaly. Při 75 % RH se začíná tvořit halit. Zároveň je důležitá i teplota. Rozpustnost sádrovce stoupá s klesající teplotou. Při teplotách pod 0°C je produkce sádrovce potlačena a místo toho se začíná tvořit mirabilit. Při teplotě -20°C je většina síranů vznikat jako mirabilit. Při 75% RH bude dominantní halit při jakékoliv teplotě (Larsen 2006).

V některých případech se může na povrchu pálených cihel objevit i pyrit, což je vysvětlováno přítomností sulfidů železa, které jsou reziduem z nekompletního spalování fosilních paliv (Schiavon et al. 2008). Jiní autoři přikládají hlavní roli bakteriím produkujícím H<sub>2</sub>S, z něhož za redukčních podmínek může vznikat pyrit (Bertolin et al. 1995).

Dalším mechanismem, který narušuje integritu cihelného zdiva, je cyklicky se opakující mráz. Jak bylo zmíněno v kapitole 2.5.2, dochází při změně vody ze skupenství kapalného na skupenství pevné v porézním prostředí k nárůstu objemu až o 9%, což může způsobit tlak až 500 kg . cm<sup>-2</sup>. Opakující se cykly zmrazování a tání způsobují trhliny v materiálu, což je doprovázeno odlupováním vrstev a celkovému porušení povrchu cihel. K tomuto jevu hlavně dochází u slabě vypálených cihel a jiných drobných materiálů, jako jsou např. bobtnavé jílové minerály a jiné na vodu citlivé složky.

#### 2.5.5. Chemické zvětrávání

Je spjato hlavně se stavebním materiálem s uhličitanovými pojivy. Je výsledkem chemické reakce součástí stavebního materiálu (pojiv, složek) s agresivními součástmi z okolní atmosféry. Toto působení se může projevit buď jako rozpouštění stavebního materiálu (vyplavování pojiv - vápenec) nebo jeho přeměna.

#### 2.5.6. Biologické zvětrávání

Pod tímto pojmem se rozumí interakce mezi stavebním materiálem a faunou nebo flórou. Jedná se o působení kořenů rostlin a mikroorganismů. Tyto mikroorganismy porušují horninu buď produkcí kyselých látek z látkové výměny, které substrát rozpouštějí, nebo jsou akumulátorem vlhkosti, což představuje další zatížení horniny (cihly).

Mikroorganismy ovlivňují zvětrávání těmito způsoby:

- 1) přes dekompozici organické hmoty, ze kterých je mobilizováno mnoho prvků, organických kyselin a CO<sub>2</sub>
- 2) přímým rozkladem minerálů (metabolicky vyvinutými kyselinami a enzymy, které podporují chemické reakce)

3) vznikem napětí v trhlinách

4) přímou účastí na krystalizačním procesu (z bakterií může vznikat kalcit a další minerály)

Úloha organismů může být i pozitivní. Například vznik lišejníků na povrchu cihel ji chrání před atmosférickými vlivy, může zabránit desintegraci zrn nebo bránit krystalizaci solí. Mezi negativní vlivy patří tvorba biofilmů na povrchu cihel, což hraje důležitou roli v poškozování nejen cihlových konstrukcí (Lopez-Arce et al. 2003).

Zvětrávání je složitý proces, na který má vliv řada vlivů, to jasně vyplývá z výše uvedeného. Studium jeho vzniku a chování činitelů, které ho způsobují, je základní pro odhad chování pálených cihel v čase a odhad správných restaurátorských prací.

## **2.7. Poznatky z dosavadního výzkumu cihelných konstrukcí**

Historie cihlářské výroby je dlouhá a sahá až do doby neolitu. Od té doby se snaží lidstvo postupně vylepšovat vlastnosti pálených cihel a bojuje s působením zvětrávání pálených cihel. Pálená cihla se na první pohled může zdát jako jednoduchý produkt pálení jílové suroviny, ovšem je tomu naopak. Je to složitý produkt složitého procesu, ve kterém dochází k sušení a tavení suroviny, ztrátě strukturní vody, tavení, vitrifikaci a tvorbě novotvořených fází. To vše za jasně daných podmínek a teplot výpalu. Pokud se tyto podmínky nedodrží, výsledkem je nekvalitní produkt s malou pevností v tlaku, vysokou pórovitostí a vodní absorpcí, malou mechanickou odolností a mrazuvzdorností. Všechny tyto špatné vlastnosti usnadňují precipitaci solí, jejichž krystalizace se projeví ve formě eflorescence na povrchu, nebo subflorescence těsně pod povrchem, což může mít v některých případech i pozitivní efekt (při malém množství karbonátů, který může zacementovat malé póry a zlepšit tak mechanickou odolnost), ale v drtivé většině jsou efekty krystalizace solí negativní. Ve znečištěné atmosféře jsou přítomny prachové částice ve formě aerosolů ukládány pomocí mokré depozice na stavební konstrukce, dále jsou přítomny popílky ze spalování fosilních paliv, kyselá srážka apod. Tyto polutanty obsahují mnoho  $\text{CO}_2$  a  $\text{SO}_2$ , což jsou nejčastější polutanty, které v reakci s vodou tvoří příslušné kyseliny, které reagují s karbonáty za vzniku sádrovce, který představuje nejčastější formu solných výkvětů.

Pomocí moderních analytických metod (RTG difrakce, hmotnostní a Ramanova spektrometrie, elektronová mikroskopie) i průzkumných metod (mikrovtání, klimatické komory pro urychlení zvětrávacích procesů apod.) lze odvodit chování cihel v čase a určit jejich složení a podmínky výroby nebo náchylnost ke zvětrávání. Pomocí řady metod lze odvodit i složení výchozí suroviny nebo celý proces výroby pálených cihel (Pavía 2006).

Van Balen (1996) vypracoval systém, který je založen na vypracování vhodných otázek a odpovědí v problematice studia poškození zdiva, podle nichž je možné definovat nejen typ jeho poškození, ale i příčiny jeho vzniku. Jedná se o systém MDDS (Masonry Damage Diagnostic System), který v mnoha případech umožňuje zaměřit se pouze na ty důležité parametry a zároveň vyloučit ty parametry, které jsou pro daný typ výzkumu nedůležité.

Správným určením metodiky výzkumu a všech dalších podmínek je možné navrhnout správné postupy při restaurování pálených cihel, ze kterých jsou postaveny mnohé historické budovy, které jsou mnohdy součástí světového a lidského kulturního dědictví, a umožňují tak jejich zachování pro budoucí generace.

### 3. STUDOVANÝ OBJEKT

#### 3.1. Umístění studovaného objektu

Zemská porodnice u Apolináře byla vystavěna v nadmořské výšce 250 m n. m. na území Prahy 2, Novém Městě mezi ulicemi Ke Karlovu a Apolinářská (50°4'17.004"N, 14°25'35.673"E) (Obr. 2). Areál Zemské porodnice je ze tří světových stran (východní, západní a severní) obestavěn ohradní cihlovou zdí, vybudovanou ve stejném období jako vlastní budova porodnice a s použitím stejného materiálu. Severní a západní část ohradní zdi směřuje do ulice Apolinářská, východní část potom do ulice Ke Karlovu. Severní a východní zeď přiléhá k chodníku, který je v zimním období dle potřeby ošetřován posypovými solemi, západní zeď sousedí s volnou zatravněnou plochou.



Obr. 2. Areál Zemské porodnice se zákresem výzkumných polí ZP/1, ZP/2 (západní strana), ZP/3, ZP/4 (severní strana) a ZP/10 (východní strana) (zdroj mapového podkladu: ILPIS 2013).

Areál Zemské porodnice je situován nedaleko severojižní pražské magistrály (ulice Legerova a Sokolská), po níž denně projede 90-100 tis. vozidel (TSK 2012). V těchto místech se tato magistrála kříží s komunikacemi východo-západního směru, tudíž zde dochází k velké kumulaci dopravy (Bradová 2010). Lokalita dlouhodobě vykazuje jedny z nejvyšších emisí a imisí  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , CO, tuhých látek, polétavých popílků a aerosolů na území České republiky (ČHMÚ 2011), což může mít významný podíl na zvětrávacích procesech cihel.

#### 3.2. Historie výstavby Zemské porodnice

První větší rozvoj lokality, v níž byla vystavěna Zemská porodnice, proběhl již za vlády Karla IV., kdy zde byl v roce 1390 v rámci výstavby Nového města pražského postaven kostel U sv. Apolináře. V roce 1462 sem byla přemístěna kapitula ze Sadské, jejíž kapitulní budova byla během 18. stol. (1789) upravena podle Hergetových plánů pro účely porodnice a nalezince s kapacitou 50 lůžek pro

ženy a přibližně 100 lůžek pro novorozence. Realizaci této stavby umožnilo darování budovy císařem Josefem II. pro účely zřízení státní porodnice a nalezince (Hlaváčková a Svobodný 1999).

V průběhu dalších let kapacita porodnice nestačila přílivu rodiček a dětí a v éře prof. Antonína Jungmanna se začalo uvažovat o jejím rozšíření, přestože v původních plánech prof. Jungmanna bylo porodnici přemístít do prostor kapucínského kláštera U sv. Josefa na dnešním nám. Republiky. Tento návrh ovšem nebyl přijat a bylo rozhodnuto o rozšíření stávající porodnice, které se však časem ukázalo jako nedostatečné. Z důvodu nedostatku financí docházelo k různým provizorním řešením; objevovaly se četné problémy se zásobováním vodou a epidemiemi horečky omladnic. Dobové prameny uvádějí, že horečka omladnic zabila 40 – 50 žen ze sta a novorozeňat umíralo zhruba 60 %, ve skutečnosti mohla být situace ještě horší (Hlaváčková a Svobodný 1999).

Zlom nastal v roce 1854, kdy se původně státní porodnický ústav změnil na zemský. V roce 1860 bylo rozhodnuto o výstavbě zcela nového ústavu. Hlavním podnětem k výstavbě byla nízká kapacita stávající porodnice, kterou spravoval řád sester sv. Bartoloměje (Vlček ed. 1998).

První všeobecný stavební program vypracoval v r. 1862 hrabě František Thun Hohenstein. Stavební parcela byla vybrána v místě Na Větrově vedle stávající porodnice, částečně v tehdejší Herzově zahradě a také v místě tehdejšího domu U Heroda (Hrubeš a Hrubešová 1996).

Výstavba Zemské porodnice navazovala na josefínské instituce veřejné zdravotní péče, jejichž budování zahájila v r. 1789 stavba Všeobecné nemocnice. Po rozhodnutí Zemského gubernia byl jako hlavní architekt vybrán Josef Hlávka (Benešovská et al. 2011). Je známé, že Josef Hlávka se na tento projekt poctivě připravoval a během svých zahraničních cest navštívil mnoho na tehdejší dobu moderních porodnic v Belgii, ve Vídni nebo v Paříži. Josef Hlávka (1831 – 1908) poté vypracoval podrobné plány výstavby, které byl ovšem nucen z rozhodnutí zemského výboru několikrát změnit. Například bylo lékařskou komisí rozhodnuto, že budova bude postavena z neomítnutých cihel (Obr. 3). Hlávka chtěl původně použít stejnou techniku jako při výstavbě areálu paláce v Černovicích, tedy různě zbarvené cihly. Vedle neomítnutých cihel byly na stavbě použity i cihly s hnědou a zelenou glazurou (římsy, ozdobné pruhy).



Obr. 3. Ohradní zeď i budovy Zemské porodnice v Praze byly vystavěny z neomítnutého cihelného zdiva. Závěrečná verze plánů byla schválena v r. 1866, stavba měla být dokončena v r. 1870. Hlávka zvolil tehdy moderní pavilónový systém. Budova porodnice měla obdélníkový půdorys, v centrální části měl být vybudován park. Porodnice se skládala z 11 léčebných traktů, vzájemně propojených chodbami. Tyto stavby byly provozně nezávislé; v případě vypuknutí epidemií se daly jednotlivě uzavírat, čímž se mělo zabránit jejich šíření (Hlaváčková a Svobodný 1999). Na svou dobu to byl velmi důmyslný systém a budova Zemské porodnice patří dnes k nejzdařilejším stavbám novogotického romantického stylu ve střední Evropě.

Výstavba Zemské porodnice se oproti původním plánům protahovala, mimo jiné kvůli opožděným dodávkám cihel. Došlo ke sporům mezi Hlávkou a cihelnou, která nebyla schopna dodat správné tvarovky v požadované kvalitě. Významným faktorem byla prusko-rakouská válka, která měla neblahý vliv na přísun finančních prostředků. V roce 1870 se Hlávka psychicky zhroutil a ochrnil, dozor nad stavbou musel převzít Hlávkův žák Čeněk Gregor, který stavbu dokončil s pětiletým zpožděním v roce 1875. Prodloužení výstavby se projevilo na rozpočtu; z původně plánovaných 400 tis. zlatých se celkové náklady vyšplhaly na více milion zlatých, z toho 900 tis. zlatých za vlastní stavbu a 101 tis. zlatých za úpravu interiérů (Vlček ed. 1998). Po dokončení se Zemská porodnice stala prvním moderním porodnickým zařízením v Čechách a řadila se mezi přední ústavy tohoto druhu v Evropě (Houdek ed. 2008).

### 3.3. Charakteristika studované cihelné zdi

#### 3.3.1. Makroskopický popis

Zkoumaná ohradní cihelná zeď obklopuje areál Zemské porodnice u Apolináře v ulicích Apolinářská (severní a západní část) a Ke Karlovu (východní část). Výška ohradní cihelné zdi kolísá nad povrchem terénu v závislosti na jeho sklonu od 180 cm (roh ulic Apolinářská a Ke Karlovu) až do cca 250 cm (východní část severní strany zdi).

Studovaná cihelná konstrukce vykazuje na první pohled patrné výrazné poškození, jehož charakter a intenzita však prostorově výrazně kolísá. Na povrchu cihel lze pozorovat množství zvětrávacích jevů, z nichž je nejvíce patrné zčernání povrchu ohradní zdi převážně v jejích vrchních a spodních patrech. Ve spodní části ohradní zdi jsou dále patrné různé odprysky, puchýřování a druhotný zpevněný povrch, který na některých cihlách vytváří černé krusty. Některé části zdi vykazují úlomkovitý rozpad nebo mnohvrstvé šupinatění v horších případech spojené s drolivým rozpadem cihel. V některých částech cihelné konstrukce dokonce cihly chybí a jsou tak odkryty cihly, které byly součástí vnitřní konstrukce zdi. Spodní části zdi jsou navíc postiženy nánosy nečistot, kterými je zeď postižena díky kapkám vody, které se odráží od povrchu při dešťových srážkách. Ve vrchních částech zdi v místech ozdobných prvků lze pozorovat přítomnost souvislých exokrust s četnými zachycenými částicemi polétavého prachu.

### 3.3.2. Výzkumná pole

Po celém obvodu zdi bylo vybráno 5 výzkumných ploch (Obr. 2), které jsou dále v textu označeny jako ZP/číslo výzkumné plochy. Výzkumné plochy byly voleny tak, aby umožnily studium statisticky významného počtu prvků (tj. jednotlivých cihel) a aby se na nich vyskytoval reprezentativní soubor zvětrávacích jevů.

Studováno bylo jedno výzkumné pole na východní straně zdi (ZP/10), dvě výzkumná pole na severní straně a dvě výzkumná pole na západní straně zdi. Jednotlivá pole byla přibližně 4 m široká, jejich výška závisela na sklonu terénu (viz kap. 3.3.1.).

## 4. METODY STUDIA

### 4.1. Studium zvětrávacích jevů *in situ* a odběr vzorků

Studium zvětrávacích jevů *in situ* provedl autor této diplomové práce na 5 průzkumných polích, situovaných na všech stranách ohradní zdi Zemské porodnice v Praze. Toto studium spočívalo ve vymezení základních typů zvětrávacích forem, jejich identifikaci na jednotlivých cihlách v průzkumných polích a zakreslení do plánu průzkumného pole. Jednotlivé typy poškození byly následně vyneseny do rastru, vytvořeného v aplikaci Microsoft Excel. Barevná škála jednotlivých cihel znázorňuje hloubkový rozsah poškození (čím tmavší, tím hlubší) a původní a nepůvodní povrch jsou rozlišeny pomocí písmen P (původní povrch) a N (nepůvodní povrch). Vybrané zvětrávací jevy byly ve spolupráci se školitelem diplomové práce fotograficky dokumentovány.

V průzkumných polích 1-4 byly zvoleny výškové profily, v nichž byly ve spolupráci se školitelem odebrány vzorky (Tab. 1). Vzorky byly odebrány mechanicky odškrábnutím špachtlí z tvrzeného plastu, aby nebyly poškozeny nezvětralé části cihel. Vzorky byly uloženy do uzavíratelných PVC sáčků a řádně označeny. Systém značení byl ZP/X/Y, kde ZP znamená Zemská porodnice, X je číslo průzkumného pole a Y je pořadové číslo vzorku v rámci tohoto pole. V případě odběru více vzorků z jedné cihly bylo za pořadové číslo přidáno písmeno A, B atd. Pokud byl vzorek, odebraný z jednoho místa, rozdělen na dílčí vzorky podle povahy materiálu – např. na cihlu a exokrustu, byl za pořadové číslo přidán index, značící povahu materiálu (např. Kr jako krusta apod.).

Tab. 1. Přehled vzorků odebraných z ohradní zdi Zemské porodnice v Praze.

vzorek	výška nad zemí (cm)	popis
<b>výzkumné pole 1 (západní strana)</b>		
ZP/1/1_1	15-20	šupinovitě se odlupující původní povrch (jednovrstvé šupinatění) s šedočernou krustou
ZP/1/1_2	15-20	částečně obnažené jádro s drolivým rozpadem (pod vzorkem ZP/1/1_1)
ZP/1/2	25-30	puchýřující původní povrch
ZP/1/3	80	izolovaný drolivý povrch s jednovrstvým šupinovitým rozpadem
ZP/1/4	100-105	alveola s drolivě se rozpadajícím povrchem (též drobné šupiny)
ZP/1/5	125-130	jednovrstvé odlupování původního povrchu a vícevrstvé šupinatění pod povrchem
ZP/1/6	140-145	drolivý rozpad na okrajích a vícevrstvé šupinatění (možné výkvěty solí na plochách šupin)
ZP/1/7	90-95	drolivě-šupinatý rozpad (počátek tvorby alveoly)
ZP/1/8	140-145	vícevrstvé šupinatění a počáteční rozpad na okrajích
<b>výzkumné pole 2 (západní strana)</b>		
ZP/2/1	20-25	vícevrstvé šupinatění s nepůvodním šedavým povrchem
ZP/2/2	45-50	kostkovitě-drolivý rozpad, zčernalý povrch
ZP/2/3	65-70	izolovaný drolivě-šupinatý rozpad
ZP/2/4	80-85	vícevrstvé šupinatění a rozpad na okrajích (do hloubky 2 cm)
ZP/2/5A	80-85	obnažený povrch po odlupující se zčernalé zpevněné povrchové vrstvě
ZP/2/5B	80-85	drolivý rozpad povrchu voštin (1-2 cm zahloubené)
ZP/2/6	90-95	odlupující se zpevněná povrchová vrstva s drolivě-šupinatým rozpadem podloží
ZP/2/7	115-120	drolivě-šupinovitý rozpad s izolovanými zbytky zčernalého povrchu (původního)
ZP/2/8	150	tmavě šedá keříčkovitá krusta a drolivě-šupinovitý (vícevrstvý) rozpad vystupujícího rohu cihly
ZP/2/8_kr	150	tmavě šedá keříčkovitá krusta
ZP/2/9	20-25	vícevrstvé šupinatění a puchýřování opakovaně zčernalého nepůvodního povrchu
ZP/2/9_A	20-25	nepůvodní povrch se světle šedou krustou



ZP/2/9_B	20-25	nepůvodní povrch s černou krustou
ZP/2/9_C	20-25	nepůvodní povrch se světle šedou a černou krustou
ZP/2/10	30-35	šupinatění a puchýřování původního povrchu, místy s šedou keříčkovitou krustou, drolivý rozpad pod povrchem
ZP/2/10_kr	30-35	šedá keříčkovitá krusta
ZP/2/11	10-15	drolivě-šupinovitý rozpad nepůvodního povrchu
<b>výzkumné pole 3 (severní strana)</b>		
ZP/3/1	20-30	puchýřování původní povrchové zpevněné vrstvy a jednovrstvé odprsky na okrajích
ZP/3/2	65-75	puchýřování původní povrchové zpevněné vrstvy a jednovrstvé odprsky na okrajích
ZP/3/3	115-120	vícevrstvý šupinovitý a drolivý rozpad
ZP/3/4	130-135	jednovrstvý odprsk zčernalé povrchové vrstvy
ZP/3/5	130-135	izolovaný vícevrstvý šupinovitý rozpad
ZP/3/6	150-155	izolovaný drolivý rozpad
ZP/3/7	178-183	drolivý rozpad
ZP/3/8	180	povrchové usazeniny (šedočerné keříčkovité krusty a polétavý prach)
<b>výzkumné pole 4 (severní strana)</b>		
ZP/4/1	5-10	puchýřování opětovně zpevněného nepůvodního povrchu (ústup cca 0,5 cm)
ZP/4/2	12-17	puchýřování a jednovrstvé šupinatění povrchové vrstvy
ZP/4/3A	20-25	puchýřování původní zpevněné povrchové vrstvy
ZP/4/3B	20-25	odlupující se původní zpevněná povrchová vrstva
ZP/4/4	28-35	puchýřování a drolivě-šupinovitý (vícevrstvý) rozpad zvětralého povrchu
ZP/4/5	37-42	puchýřování a drolivě-šupinovitý (vícevrstvý) rozpad částečně zvětralého povrchu
ZP/4/6	43-50	vícevrstvé šupinatění doprovázené drolivým rozpadem a solnými výkvěty
ZP/4/7A	52-58	vícevrstvé šupinatění pod povrchem
ZP/4/7B	52-58	jednovrstvě se odlupující původní zčernalý a zpevněný povrch
ZP/4/8	90-95	prachovitý drolivý rozpad, vícevrstvý šupinovitý rozpad pod jednovrstvě se odlupujícím původním zčernalým a zpevněným povrchem s podpovrchovými solnými výkvěty
ZP/4/9A	115-122	vícevrstvý šupinovitý rozpad nepůvodního povrchu, částečně zešedlého (usazeniny polétavého prachu)
ZP/4/9B	130-135	vícevrstvý šupinovitý rozpad nepůvodního povrchu, částečně zešedlého (usazeniny polétavého prachu)
ZP/4/10	155-160	vícevrstvý šupinovitý rozpad nepůvodního povrchu, částečně zešedlého (usazeniny polétavého prachu)
ZP/4/11	158-162	bílé solné výkvěty
ZP/4/12	162-168	povrchové usazeniny (keříčkovité krusty a polétavý prach), zčernalý původní povrch, místy puchýřující
ZP/4/13	190	povrchové usazeniny (keříčkovité krusty)

#### 4.2. Archivní studium

V rámci této diplomové práce byly studovány a konzultovány i archivní materiály, týkající se historie výstavby a lokalizace suroviny pro výstavbu Zemské porodnice u Apolináře. Konzultace probíhaly s hlavním knihovníkem knihovny Strahovského kláštera Gejzou Šidlovským, který poskytl cenné informace k cihelně Strahovského kláštera, jež podle studovaných pramenů byla hlavním dodavatelem cihel pro výstavbu Zemské porodnice. Následně bylo z povinných císařských otisků stabilního katastru zjištěno, že se tato cihelna nacházela ve Sřešovicích v místě dnešního staveniště tunelového komplexu Blanka (staveniště Myslbekova). Tento předpoklad následně potvrdila RNDr. Iva Herichová z Archeologického ústavu AV ČR, v.v.i., která se podílela na archeologickém průzkumu dané lokality a poskytla i vzorky odebrané zeminy z bývalého těžebního prostoru sřešovické cihelny.

Při zpracování předložené diplomové práce byl nápomocen i Pavel Ries z Hlávkovy nadace, který poskytl zajímavé informace o historii a architektuře Zemské porodnice. Součástí bádání bylo i studium archiválií v Národním archívu, které ale bohužel nepřinesly informace takového rázu, které by poskytly další poznatky o zdroji cihel na výstavbu Zemské porodnice.

### 4.3. Laboratorní rozbory vzorků

#### 4.3.1. Výběr metod a cíle laboratorního rozboru vzorků

Výběr metod, použitých k rozboru odebraných vzorků, ovlivnily dva faktory – cíle této práce a možnosti odběru vzorků. Hlavním cílem této práce bylo studium zvětrávacích jevů pórovitých keramických stavebních hmot – tj. cihel a odvození možných mechanismů jejich vzniku (tj. analýza zvětrávacích procesů) nebo faktorů, které jejich vznik podmiňují (např. vliv složení suroviny, podíl podmínek výpalu cihel, ad.).

Volba odběrových míst a velikost odebíraných vzorků byly zásadně ovlivněny faktem, že objekt Zemské porodnice včetně ohradní zdi je nemovitou kulturní památkou (č.r. ÚSKP 40134/1-1244). Dle povolení, vydaného odborem památkové péče Magistrátu hl. města Prahy bylo možné odebírat vzorky pouze z cihel, které vykazovaly určité známky poškození, vlastní vzorky přitom měly pocházet právě z povrchových, nesoudržných vrstev. Tyto vrstvy však představují nejcennější studijní materiál, protože se v nich nejvíce akumulují látky nebo jevy, které souvisí s poškozením. Výběr analytických metod se musel podřídit stavu vzorků, protože množství odebíraného materiálu jednotlivých vzorků se pohybovalo v několika mm<sup>3</sup> a ve většině případů se navíc jednalo o nesoudržný sytký práškový nebo drobně úlomkový materiál. Metody pro studium těchto vzorků byly zvoleny tak, aby se s jejich pomocí dal stanovit obsah vodorozpustných solí ve zvětrávajících částech cihel (iontově výměnná chromatografie) a určit jejich fázové složení, případně též fázové složení solných výkvětů (prášková RTG difrakce).

U několika vzorků, dokumentujících zvětrávací jevy, byly nesoudržné úlomky natolik velké, že bylo možné připravit příčné řezy, resp. výbrusy (optická mikroskopie) a provést nepřímé stanovení texturních vlastností pórového prostoru (vysokotlaká rtuťová porosimetrie). Ze dvou dodatečně získaných větších úlomků cihel z porušených částí cihelného zdiva bylo možné zhotovit nejen výbrusy, ale též získat několik dílčích vzorků pro nepřímé stanovení texturních vlastností pórového prostoru (metoda vysokotlaké rtuťové porosimetrie).

Poslední skupinu analyzovaných materiálů tvoří dva vzorky suroviny – cihlářské zeminy z hliniště zaniklé střešovické cihelny, která byla nejpravděpodobnějším dodavatelem cihel pro výstavbu Zemské porodnice. U těchto vzorků byl proveden kompletní geotechnický rozbor s cílem získat podrobné informace o zrnitosti a konzistenčních mezích (tj. mechanických vlastnostech) zeminy. Oba vzorky zeminy byly též analyzovány pomocí práškové RTG difrakce s cílem zjistit jejich fázové složení.

#### 4.3.2. Příprava výbrusů a optická mikroskopie

S ohledem na stav povrchových zvětralých vrstev odebraných vzorků nebylo možné ve většině případů připravit vhodné preparáty pro mikroskopické studium. Výjimku tvořilo 7 vzorků, kde opadávající povrchové vrstvy měly tvar šupin až 5 mm dlouhých a několik mm mocných. Tyto šupiny byly nejprve zpevněny vakuovým napouštěním směsí epoxidové pryskyřice a fluorescenčního barviva (EpoDye, výrobce Struers, Dánsko) postupem, který se používá pro konsolidaci nesoudržných materiálů, u nichž je zároveň žádoucí zviditelnit pórový prostor vůči minerálním zrnům nebo klastům (Nishiyama a Kusuda 1994). Vakuové napouštění směsí nízkoviskózní epoxidové pryskyřice s delší

dobou tvrdnutí (přibližně 24 hodin) a fluorescenčního barviva (Přikryl 2007), je výhodnější než dříve navrhované penetrační látky – akrylátové pryskyřice (Nishiayama a Kusuda 1994), protože usnadňuje proniknutí penetrační směsi i do pórů nebo trhlin velmi malých rozměrů.

Takto zpevněné vzorky byly uloženy v prstencových přípravcích (průměr cca 2 cm, výška 1 cm) a v nich zality epoxidem. Po vytvrdnutí byl proveden příčný řez tak, aby v ploše řezu byl zachycen kolmý profil odebraným vzorkem od povrchu (vnější, exponovaná část cihly, resp. její zvětrávající povrchové části). Z takto připraveného preparátu byl zhotoven běžný výbrus, ovšem bez použití krycího sklíčka, které by znemožnilo pozorování v odraženém ultrafialovém světle. Vlastní výbrusy byly pozorovány v optickém mikroskopu Leica DMLP v odraženém ultrafialovém světle a při těchto pozorováních byly zhotoveny mikrofotografie.

#### 4.3.3. RTG difrakční rozbor

Metoda rentgenové difrakční analýzy slouží ke stanovení fázového složení zkoumaného materiálu, konkrétně ke stanovení krystalických fází. Metoda je založena na odrazu monochromatického rentgenového záření, dopadajícího na soustavu rovnoběžných rovin – tj. na krystalovou mřížku fází ve studovaném vzorku. Pokud je rozdíl drah paprsků, odražených ze dvou různých rovin, roven celému násobku délky vlny, dochází k zesílení záření, které lze detekovat (Moore a Reynolds 1989). Získaný difrakční záznam zkoumaného vzorku se porovnává s difrakčními záznamy minerálů obsaženými v databázi, čímž se stanoví jeho fázové složení. Za určitých podmínek lze metodu použít i k semikvantitativnímu výpočtu srovnáním intenzit difrakčních pásů pomocí metody korundových čísel.

Vzorky namleté na analytickou jemnost byly proměřeny na difraktometru X'Pert Pro, PANalytical B.V. (laboratoř RTG difrakční analýzy, Ústav geochemie, mineralogie a nerostných zdrojů PřF UK) s následujícími podmínkami měření: zdroj  $\text{CuK}\alpha$ , napětí 40 kV, proud 30 mA, úhlový obor  $2\theta$ : 3-70°, krok 0,05°, doba načítání 200 s; PřF UK v Praze (operátor Mgr. Petr Drahoš, Ph.D.). Vyhodnocení RTG difrakčních záznamů bylo provedeno pomocí počítačového programu X'Pert HighScore 1.0d, PANalytical B.V. s užitím databáze difrakčních spekter (JCPDS 1999) (vyhodnotil autor této diplomové práce s pomocí školitele).

#### 4.3.4. Vysokotlaká rtuťová porosimetrie

Rtuťová porosimetrie je nejčastěji používanou metodou pro nepřímé stanovení texturních parametrů pórového prostoru pórovitých látek (Rübner a Hoffmann 2006 a jimi uváděné odkazy literatury). Třebaže jsou výsledky měření závislé na zvoleném modelu tvaru pórů a jejich absolutní hodnoty je proto nutné interpretovat s velkou opatrností, jsou však velmi vhodné pro relativní srovnání mezi vzorky téhož materiálu, který vykazuje např. různé stupně poškození (např. zvětrání). Interpretace měření rtuťovou porosimetrií je vhodné doplnit mikroskopickým pozorováním.

Metoda rtuťové porosimetrie je založena na jevu kapilární deprese, která se zabraňuje vniknutí nesmáčivé kapaliny (v tomto případě rtuti) do pórového prostoru studovaného materiálu v podmínkách atmosférického tlaku (více k teorii o chování nesmáčivých kapalin v kapilárním prostředí viz např. Adamson a Gast 1997). Nesmáčivá kapalina může proniknout do pórů teprve po vyvinutí určitého tlaku, přičemž s rostoucím tlakem se kapalina dostává do pórů s menším poloměrem. Mezi tlakem  $P$  a poloměrem póru  $r$  existuje závislost vyjádřená Washburnovou rovnicí (Drake 1949):

$$r = \frac{-2 \cdot \gamma \cdot \cos \varphi}{P},$$

kde  $\gamma$  je povrchové napětí rtuť a  $\phi$  úhel smáčení stěn póru rtuť. Pokud se podle přístrojové dokumentace zavedou střední hodnoty  $\gamma = 480 \text{ mN/m}^2$  a  $\phi = 141,3^\circ$ ,  $P$  se vyjádří v MPa a  $r$  v nm (oblast teplot kolem  $25^\circ\text{C}$ ), přechází předchozí rovnice do výpočtového tvaru:

$$r = \frac{750}{P}.$$

Při použití tlakového intervalu 0,1 kPa až 200 MPa lze zjistit přítomnost pórů s poloměry od 3,7 nm do 58  $\mu\text{m}$ , což vzhledem k mezinárodně přijímanému názvosloví rozdělení pórů podle jejich průměru (IUPAC 1976) na mikropóry ( $d < 2 \text{ nm}$ ), mezopóry ( $d = 2\text{-}50 \text{ nm}$ ), makropóry ( $d = 50\text{-}7500 \text{ nm}$ ) a hrubé póry ( $d > 7500 \text{ nm}$ ), zahrnuje většinu mezopórů, celou oblast makropórů a část hrubých pórů. Přítomnost hrubých pórů o průměru větším než 0,1 mm lze ve studovaných materiálech stanovit pomocí optické mikroskopie z výbrusů, připravených z preparátů s barevně zvýrazněnými póry.

Měření texturních parametrů pórového prostoru vzorků, odebraných z obvodové cihlové zdi Zemské porodnice, bylo provedeno metodou vysokotlaké rtuťové porosimetrie na sestavě porozimetrů Pascal 140 + 240 fy Thermo Electron – Porotec v rámci společné „Laboratoře sorpční a porometrické analýzy“ Ústavu struktury a mechaniky hornin AVČR, v.v.i. a Přírodovědecké fakulty University Karlovy v Praze (měřila Alena Jandečková). Porosimetr Pascal 140 sloužil jako plnicí zařízení a provádělo se na něm nízkotlaké měření do tlaku 100 kPa; porosimetr 240 pracoval v rozsahu tlaků 0,1 až 200 MPa. Měření byla provedena při teplotě  $25^\circ\text{C}$  na 2 dílčích úlomcích z každého vzorku velikosti přibližně 5 mm. Získaná porosimetrická data byla vyhodnocena pomocí programu MILESTONE 200 firmy Carlo Erba a byla vyjádřena pomocí objemu mezo-, makro- a hrubých pórů  $V_{\text{mmh}}$ , jejich měrného povrchu  $S_{\text{mmh}}$ , distribuce pórů podle poloměru  $r$  a porovitosti Hg-Por.

#### 4.3.5. Iontově výměnná chromatografie

Iontově výměnná chromatografie je analytická metoda, jejíž podstatou je rozdělování látek mezi 2 fáze s použitím iontoměničů (Opekar et al. 2002). Metoda je založena na výměně iontu iontoměniče za iont obsažený v mobilní fázi nebo ve vzorku. Iontoměničem je stacionární fáze, která obsahuje kyselou funkční skupinu (katex, - náboj) nebo bazickou funkční skupinu (anex, + náboj); mobilní fází je voda. K separaci dochází soutěžením iontoměniče o tyto ionty.

Iontově výměnná chromatografie byla použita na největším počtu vzorků s cílem stanovit obsah vodorozpustných solí ve studovaných vzorcích cihel, resp. jejich zvětralých povrchových částech, a také ve dvou vzorcích cihlářské zeminy. Stanovní obsahu vodorozpustných solí ve zvětralých povrchových částech cihel, případně různých částech cihel nebo cihlářské suroviny bylo zaměřeno na stanovení obsahu hlavních aniontů (síranů, dusičnanů a chloridů) u celkem 52 vzorků. Toto stanovení má význam nejen pro určení typu solí a jejich celkové koncentrace, ale též pro možné odvození potenciálních zdrojů solí. Kvůli poslední jmenovanému cíli byly této analýze podrobeny i dva vzorky suroviny – cihlářské zeminy z hlinišť zaniklé střešovické cihelny, která byla nejpravděpodobnějším dodavatelem cihel pro výstavbu Zemské porodnice.

Měření proběhlo na přístroji Detector Shodex CD-5 s použitím pumpy Delta Chrom SDS 030 a dávkovače Autosampler AS 100. Pro stanovení aniontů byla použita kolona 150x4mm Watrex IC Anion I, 7 $\mu\text{m}$ , eluentem byly 1,8 mM  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , 1,7 mM  $\text{NaHCO}_3$ . a 0,1 mM  $\text{NaSCN}$ , průtok 0,8 ml/min, tlak 5,2 MPa. Měření bylo provedeno ve firmě WATREX Praha, s.r.o., analyzovali Ing. J. Schvantner, Ing. A. Bodnar a RNDr. L.Němcová, Ph.D.

#### 4.3.6. Geotechnický rozbor

Základní geotechnický rozbor, provedený na dvou vzorcích zemin, odebraných pracovníky Archeologického ústavu AVČR v roce 2010 v prostoru bývalého hlinišťe střešovické cihelny v rámci záchranného archeologického výzkumu stavenišťe tunelového komplexu Blanka, byl proveden s cílem stanovit mj. jejich zrnitost a tzv. konzistenční meze. Z výsledků těchto stanovení lze odvodit použitelnost daného materiálu pro cihlářskou výrobu, případně pro určitý typ cihlářských výrobků.

Geotechnický rozbor obou vzorků zemin byl proveden v roce 2013 v laboratoři mechaniky zemin firmy GEMATEST, spol. s r.o. podle norem: ČSN CEN ISO/TS 17892-1 (Stanovení vlhkosti zemin), ČSN CEN ISO/TS 17892-2 (Stanovení objemové hmotnosti jemnozrných zemin – Metoda 4.1, 4.2), ČSN CEN ISO/TS 17892-3 (Stanovení zdánlivé hustoty pevných částic zemin pomocí pyknometru), ČSN CEN ISO/TS 17892-12 (Laboratorní stanovení meze tekutosti zemin), ČSN CEN ISO/TS 17892-4 (Stanovení zrnitosti zemin), ČSN EN ISO 14688-2 – Pojmenovávání a zařídování zemin. Část 2: Zásady pro zařídování, Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací ČSN 73 6133, Zkoušky byly provedeny podle Eurokódu 7: Navrhování geotechnických konstrukcí – Část 2: Průzkum a zkoušení základové půdy a Metodiky laboratorních zkoušek v mechanice zemin a hornin.

## 5. VÝSLEDKY

### 5.1. Zvětrávací formy cihelného zdiva ohradní zdi Zemské porodnice

Na 5 průzkumných polích, vymezených na ohradní cihlové zdi, která lemuje areál Zemské porodnice, byly identifikovány následující zvětrávací formy nebo typy poškození:

- 1) cihly s původním zpevněným povrchem bez výrazných barevných změn;
- 2) cihly s původním zpevněným povrchem výrazně barevně změněným (zčernání povrchu, avšak absence mocnější exokrusty);
- 3) cihly s původním zpevněným povrchem nebo s druhotným (ustupujícím) povrchem výrazně barevně změněným a s makroskopicky znatelnými exokrustami (většinou s výrazně reliéfním povrchem – pŕlkulovité až keřičkovité útvary);
- 4) cihly s původním zpevněným povrchem nebo s druhotným (ustupujícím) povrchem, porušeným puchýřováním;
- 5) cihly s původním zpevněným povrchem nebo s druhotným (ustupujícím) povrchem, porušeným odprsky povrchové zpevněné původní nebo nepůvodní vrstvy;
- 6) cihly s mnohvrstevným šupinatěním nepůvodního (druhotného, ustupujícího) nezpevněného povrchu
- 7) cihly s kombinací mnohvrstvého šupinatění nepůvodního nezpevněného povrchu a drolivého rozpadu;
- 8) cihly se zpevněným nepůvodním povrchem zčernalým (černé krusty na nepůvodním povrchu);
- 9) cihly porušené trhlinami;
- 10) chybějící materiál (chybějící cihly);
- 11) cihly s ŕlomkovitým rozpadem.

Rozsah výskytu těchto zvětrávacích jevů a poškození pro jednotlivá výzkumná pole je graficky znázorněn ve volně vložené příloze I.

Na výzkumném poli 1 se původní zpevněný povrch vyskytuje převážně ve středních a spodních partiích (0 – 90 cm). Tyto cihly nevykazují žádné významné známky poškození, jejich barva je tmavě červená. V této části zdi mohou být cihly výjimečně poškozeny trhlinami nebo ŕlomkovitým rozpadem. V horních partiích výzkumného pole 1 má většina cihel zachovaný původní povrch, avšak barevně změněný kvůli četným povrchovým usazeninám. V nejvyšších partiích (180-190 cm), v místech zdobného reliéfu, vzniká téměř souvislý povlak exokrust tmavě šedých barev, v nichž se kombinují výkvěty solí a usazeniny polétavého prachu. Tento jev se může kombinovat i s ostatními zvětrávacími formami, které se v této výškové úrovni se objevují po celém obvodu zdi. Pro výzkumné pole 1 je charakteristická hojná přítomnost puchýřování, odprsků, šupinatění a drolivého rozpadu (Tab. 2). Při větším hloubkovém rozsahu těchto jevů dochází k poškození cihel až k nepůvodnímu povrchu, na němž se pak stejným způsobem, jako je tomu u původního povrchu, vytváří šedočerné sádrovcové krusty a vytváří se druhotně zpevněný nepůvodní povrch.

Charakter poškození cihel na výzkumném poli 2, které je stejně jako výzkumné pole 1 orientováno k západu, je velmi podobný. Spodní a střední partie cihelné zdi zde mají původní zpevněný povrch, případně zčernalý. Ve vyšších partiích se vytvářejí exokrusty, tvořené směsí solných výkvětů a usazenin polétavého prachu. Velmi hojně je zastoupeno puchýřování (Tab. 2), především ve spodní části zdi, těsně nad povrchem, v prvních osmi řadách zdi (cca do 50 cm). Jedná se především o puchýřování nepůvodního povrchu s hloubkovým rozsahem nad 5 mm. Oproti výzkumnému poli jsou

naopak velmi vzácně přítomny odprsky. Mnohvrstvé šupinatění v kombinaci s drolivým rozpadem s hloubkovým rozsahem nad 5 mm se objevuje ve střední a spodní úrovni zdi.

Tab. 2. Vyhodnocení rozsahu poškození jednotlivými zvětrávacími jevy. Vysvětlivky: +++ velmi četné, ++ četné, + málo četné, +- ojedinělé.

	ZP1	ZP2	ZP3	ZP4	ZP10
původní povrch	+++	+++	+++	+++	
původní povrch zčernalý	+++	+	+++	++	+++
nepůvodní povrch zčernalý	++	++	++	++	±
exokrusty	++	++	++	++	++
puchýřování	++	+++	++	+++	+
odprsky	++	++	++	++	++
mnohvrstvé šupinatění	±	±	+	++	++
drolivý rozpad	±	+	±	+	++
trhliny	+	±	-	-	±
chybějící materiál	±	+	-	-	-
úlomkovitý rozpad	±	+	±	±	±

Ve výzkumném poli 3 je nejvíce rozšířena tvorba černých krust na původním povrchu (Tab. 2). Ostatní jevy jsou přítomny jen ojediněle.

Na výzkumném poli 4, orientovaném stejně jako výzkumné pole 3 k severu, je velmi rozšířeno puchýřování nepůvodního nezpevněného povrchu (Tab. 2), ke kterému dochází ve spodních partiích zdi těsně nad zemí. Rovněž mnohvrstvé šupinatění nepůvodního nezpevněného povrchu se v této části vyskytuje častěji, než u ostatních výzkumných polí. Je však třeba zdůraznit, že cihly, které jsou poškozeny tímto jevem, se ve vrchních partiích nachází vždy mezi cihlami, které žádné poškození nevykazují.

Na východní části ohradní cihelné zdi bylo zkoumáno pouze jediné pole. Pro toto výzkumné pole 10 je nejzajímavější skutečnost, že se zde prakticky nevyskytují cihly s původním nepoškozeným povrchem. Nejrozšířenějším jevem je podobně jako u výzkumného pole 3 tvorba zčernalých krust na původním povrchu, který je v tomto poli rozšířen prakticky ve všech partiích. Oproti ostatním výzkumným polím je více rozšířeno mnohvrstvé šupinatění nepůvodního nezpevněného povrchu, často doprovázené drolivým rozpadem (Tab. 2). Oba tyto jevy jsou rozšířeny ve vyšších partiích zdi převážně pod řadou ozdobných prvků.

## 5.2. Mineralogické složení zvětralých povrchových partií cihel a cihlářské suroviny

Mineralogické složení zvětralých povrchových vrstev je velice podobné (Tab. 3). U všech vzorků jasně převažuje křemen a illit (kromě krusty ZP/4/12\_kr), dále je u vzorků (ZP/4/3B\_Kr, ZP/4/3B\_Ci, ZP/4/8, ZP/4/11 a ZP/4/12\_Ci) četný albit. Vyjma vzorku ZP/4/3\_Ci je gehlenit zastoupen u většiny vzorků minoritně, nebo zcela chybí. Sádrovec je zastoupen u všech vzorků, nejvíce pak ve vzorcích ZP/4/11, ZP/4/12\_Kr (sádrovcová krusta) a ZP/4/13. U ostatních vzorků se pak většinou vyskytuje četně nebo minoritně. U vzorků ZP/4/4, ZP/4/5, ZP/4/9A, ZP/4/9B, ZP/4/10 a ZP/4/13 se vyskytují minoritně ještě další soli.

Tab. 3. Fázové složení zvětralých povrchových partií cihel.

	křemen	illit	albit	gehlenit	sádrovec	další soli
ZP/4/3B_Kr	+++		++	+	++	
ZP/4/3B_Ci	+++		++	++	++	
ZP/4/4	+++	+++			+	+ <sup>1)</sup>
ZP/4/5	+++	+++			++	+ <sup>2)</sup>
ZP/4/6	+++	+++	+		++	
ZP/4/7A1	+++	+++	+	+	+	
ZP/4/7A2	+++	+++	+		++	
ZP/4/7B	+++	+++	+	+	++	
ZP/4/8	+++	+++	++		+	
ZP/4/9A	+++	+++	+		+	+ <sup>3)</sup>
ZP/4/9B	+++	+++	+		+	+ <sup>4)</sup>
ZP/4/10	+++	+++	+	+	+	+ <sup>5)</sup>
ZP/4/11	+++		++	+	+++	
ZP/4/12_ci	+++	+++	++	+	++	
ZP/4/12_Kr	+				+++	
ZP/4/13	++	++	+		+++	+ <sup>6), 7)</sup>

U vzorků celých cihel odebraných z vnitřních partií obvodové zdi zemské porodnice se dominantně vyskytuje křemen, četný je anortit a wollastonit, minoritně jsou zastoupeny gehlenit, cristobalit a hematit (Tab. 4).

Tab. 4. Fázové složení cihel.

	křemen	cristobalit	anortit	gehlenit	wollastonit	hematit
ZP/CI1	+++	+	++	+	++	+
ZP/CI2	+++	+	++	+	++	+

Pravděpodobná výchozí surovina je složena dominantně z křemene, z jílových minerálů je více zastoupen illit na úkor kaolinitu, minoritně se v surovině vyskytuje albit (Tab. 5). Z karbonátů jsou přítomny kalcit a dolomit. U vzorku SBM5 je oproti vzorku SBM4 přítomen i vermikulit.

Tab. 5. Fázové složení pravděpodobné cihlářské suroviny ze zaniklé střešovické cihelny.

	křemen	illit	kaolinit	albit	kalcit	dolomit	vermikulit
SBM1	+++	++	+	+	+	+	-
SBM5	+++	++	+	+	+	+	+



### 5.3. Obsah vodorozpustných solí

Obsah vodorozpustných solí je ve většině odebraných a analyzovaných vzorků značně vysoký (Tab. 6). To se týká zejména chloridů, dusičnanů a síranů v povrchových, zvětralých částech cihel, ale též ve vlastní hmotě cihel (Tab. 7). Koncentrace vodorozpustných solí jsou ve studovaných vzorcích natolik značné, že je lze označit jako vysoké či velmi vysoké (viz Tab. 8).

Tab. 6. Vyhodnocení obsahu aniontů vodorozpustných solí v povrchových vrstvách cihelného zdiva Zemské porodnice v Praze, které vykazují následné typy poškození: tvorbu exokrust (KR), usazeniny polétavého prachu (UP), puchýřování (PU), odprysk zpevněné povrchové vrstvy (OPV), drolivý rozpad (DR), úlomkovitý (kostkovitý) rozpad (UR), tvorbu voštin (VO), jednovrstvé šupinatění (SUJ), mnohovrstvé šupinatění (SUM) a solné výkvěty na povrchu (SV); pp – původní povrch, np – nepůvodní povrch, jc – obnažené jádro cihly. Hodnoty získané metodou iontové výměnné chromatografie jsou uvedeny v hmotnostních procentech, barevná škála odpovídá stupnici v Tab. 8, která uvádí hraniční hodnoty podle metodiky ČSN 730610 (2000); p.m.d. = pod mezí detekce (0,005 hm. %).

vzorek	výška nad úrovní terénu (cm)	typ poškození	Cl <sup>-</sup>	(NO <sub>3</sub> ) <sup>-</sup>	(SO <sub>4</sub> ) <sup>2-</sup>
profil č. 1 (západní strana)					
ZP/1/1-1	17,5	SUJpp	0,03	p.m.d.	1,79
ZP/1/1-2	17,5	DRjc	p.m.d.	p.m.d.	10,84
ZP/1/2	27,5	PUpp	p.m.d.	p.m.d.	3,60
ZP/1/3	80	DR+SUJpp	0,42	1,35	1,31
ZP/1/4	102,5	VO/AL+DRnp	3,41	3,34	1,30
ZP/1/5	127,5	SUJpp+SUMnp	1,31	1,68	1,23
ZP/1/6	142,5	DRpp+SUMpp	1,79	1,54	1,56
ZP/1/7	92,5	DR/SUMnp	0,66	1,71	1,76
ZP/1/8	142,5	SUMnp	1,07	1,70	2,43
profil č. 2 (západní strana)					
ZP/2/1	22,5	SUMnp	0,22	2,56	3,92
ZP/2/2	47,5	URnp+DRnp	0,34	3,27	2,78
ZP/2/3	67,5	DR/SUMpp	1,50	1,10	9,79
ZP/2/4	82,5	SUMnp	1,14	0,85	0,35
ZP/2/5A	82,5	np	0,15	0,26	0,82
ZP/2/5B	82,5	VO/AL+DRnp	0,79	1,44	4,49
ZP/2/6	92,5	pp+DR/SUM	0,48	0,27	2,61
ZP/2/7	117,5	DR/SUMpp	0,82	0,22	2,54
ZP/2/8	150	KR+DR/SUMpp	0,06	0,28	3,20
ZP/2/9	22,5	SUMnp+PUnp	p.m.d.	p.m.d.	3,46
ZP/2/10	32,5	SUJ/PUpp+DRjc	0,10	0,76	5,32
ZP/2/11	12,5	SUJnp+DR/SUMnp	0,12	0,74	3,25
profil č. 3 (severní strana)					
ZP/3/1	25	PUpp	p.m.d.	p.m.d.	1,14
ZP/3/2	70	PUpp	p.m.d.	p.m.d.	12,41
ZP/3/3	117,5	SUM/DRnp?	0,81	0,52	2,46
ZP/3/4	132,5	SUJpp?	0,81	1,10	1,85
ZP/3/5	132,5	SUMpp?	0,60	0,57	1,20
ZP/3/6	152,5	DRpp?	0,60	0,93	3,41
ZP/3/7	180,5	DRpp?	1,04	2,56	3,31
ZP/3/8	180	KRpp	0,41	0,90	25,80
profil č. 4 (severní strana)					
ZP/4/1	7,5	PUnp	0,13	0,19	2,06
ZP/4/2	14,5	PUpp+SUJpp?	0,03	0,06	5,14
ZP/4/3A	22,5	PUnp	0,32	0,29	1,32
ZP/4/3B_Kr	22,5	SUJpp+KRpp	0,06	0,08	2,32
ZP/4/3B_Ci	22,5	PUnp+DR/SUMnp	0,05	0,06	2,99

ZP/4/4	31,5	PUnp+SUJ/SUMnp?	0,14	0,23	0,58
ZP/4/5	39,5	PUnp+SUJ/SUMnp?	0,07	0,23	5,03
ZP/4/6	46,5	SUM/DR+SVnp?	0,19	0,34	1,15
ZP/4/7A	55	OPVpp	0,34	0,64	3,29
ZP/4/7B	55	SUMnp	0,45	0,71	1,03
ZP/4/8	92,5	DR/SUMnp+SV	1,04	0,54	1,57
ZP/4/9A	118,5	SUMnp+UP	0,73	1,54	1,74
ZP/4/9B	132,5	SUMnp+UP	0,53	1,34	6,52
ZP/4/10	157,5	SUMnp+UP	0,07	0,19	1,15
ZP/4/12	165	KRpp+PUpp+UP	0,02	0,12	2,20
ZP/4/13	190	KRpp	p.m.d.	0,08	8,35

Tab. 7. Vyhodnocení obsahu aniontů vodorozpuštěných solí v různých částech cihel z ohradní cihelné zdi Zemské porodnice v Praze. Hodnoty získané metodou iontově výměnné chromatografie jsou uvedeny v hmotnostních procentech, barevná škála odpovídá stupnici v Tab. 8, která uvádí hraniční hodnoty podle metodiky ČSN 73 061 (2000); p.m.d. = pod mezí detekce (0,005 hm. %).

vzorek	pozice analyzovaného vzorku	Cl <sup>-</sup>	(NO <sub>3</sub> ) <sup>-</sup>	(SO <sub>4</sub> ) <sup>2-</sup>
ZP/CI1/J	jádro cihly	0,21	1,41	0,70
ZP/CI1/PV	vnější povrch cihly	0,26	1,51	2,37
ZP/CI1/PE	vnější povrch cihly	0,24	1,68	2,27
ZP/CI2/P	vnější povrch cihly	1,49	0,75	2,03
ZP/CI2/J	jádro cihly	0,71	0,42	0,23

Tab. 8. Klasifikace stupně zasolení stavebních materiálů podle ČSN 73 061 (2000) a Kopecké a Nejedlého (2005). Hodnoty jsou uvedeny v hm. %.

Stupeň zasolení	(Cl) <sup>-</sup>	(NO <sub>3</sub> ) <sup>-</sup>	(SO <sub>4</sub> ) <sup>2-</sup>
Nízký	< 0,075	< 0,1	< 0,5
Zvýšený	0,075-0,2	0,1-0,25	0,5-2,0
Vysoký	0,2-0,5	0,25-0,5	2,0-5,0
Velmi vysoký	> 0,5	> 0,5	> 5,0

#### 5.4. Rtuťová porozimetrie

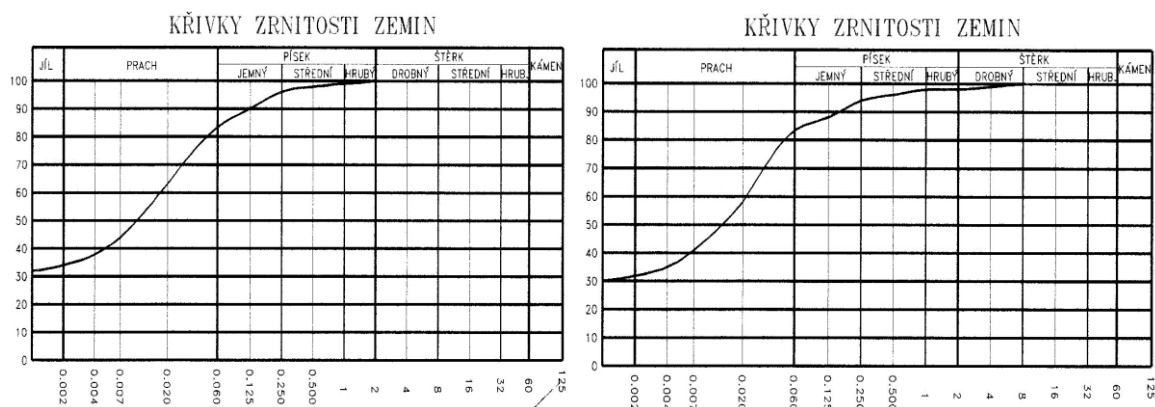
Celkem bylo analýze podrobena 10 vzorků z různých výškových úrovní, odebraných ze dvou průzkumných polí z obvodové zdi Zemské porodnice a 5 dílčích vzorků pocházejících ze dvou větších úlofků cihel (Tab. 9). Analyzované vzorky vykazují značný rozptyl v naměřených hodnotách. celková pórovitost se u vzorků z navětralých částí cihel pohybuje mezi 23 až 39 % (Tab. 9), u vzorků pocházejících z vlastních cihel mezi 27 až 34 %. Podobný rozptyl hodnot vykazuje též celkový objem pórů (118-242 mm<sup>3</sup>/g pro vzorky z navětralých částí cihel, 141-196 mm<sup>3</sup>/g pro vlastní cihly). S dvěma předešlými parametry nekoresponduje úplně hodnota měrného povrchu, kdy nižší hodnota tohoto parametru nemusí nutně znamenat menší celkový objem pórů a naopak. Tento jev je způsoben faktem, že velikost měrného povrchu je mimo jiné ovlivněna tvarem pórového prostoru a velikostní distribucí pórů. Ta, až na výjimky (vzorek ZP/4/4) vykazuje posun k nižším hodnotám střední velikosti (tj. k pórům menších rozměrů) u vzorků ze zvětralých částí cihel v porovnání s vlastními cihlami.

Tab.č. 9. Výsledky rtuťové porozimetrie vzorků ze zdi Zemské porodnice. Systém značení je stejný jako u analýzy vodorozpustných solí. U vzorků ZP/C/1 a ZP/C/2 znamenají písmena J – jádro cihly, PE (resp. P) – povrch externí (povrch exponovaný vnějším vlivům) a PV – povrch vnitřní (povrch ve styku s maltou).

Vzorek	$V_{mmh}$ ( $mm^3/g$ )	$S_{mmh}$ ( $m^2/g$ )	r (nm)	Hg-por (%)
ZP/2/2	119,09	2,90	393	23,96
ZP/2/9	179,45	4,30	458	32,04
ZP/2/11	167,41	6,55	599	29,69
ZP/4/3A	196,39	5,21	337	34,42
ZP/4/3B	160,25	3,61	456	29,49
ZP/4/4	242,38	5,62	17327	39,22
ZP/4/7A	138,97	3,38	660	26,78
ZP/4/7B	153,01	5,86	307	28,00
ZP/4/8	125,68	5,82	505	24,74
ZP/4/12	186,51	5,16	553	31,34
ZP/C/1/J	188,38	9,42	1318	32,98
ZP/C/1/PE	141,72	8,01	1091	27,00
ZP/C/1/PV	157,33	7,57	1315	29,52
ZP/C/2/J	195,97	9,96	1090	33,81
ZP/C/2/P	172,17	8,60	1091	31,51

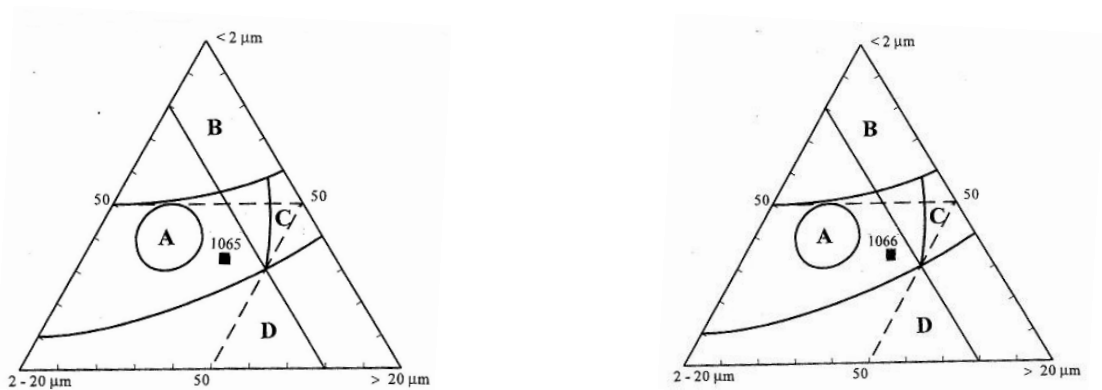
### 5.5. Geotechnický rozbor pravděpodobné cihlářské suroviny

U obou studovaných vzorků cihlářské zeminy převládá prachovitá a jílovitá složka nad menšinovým obsahem písčité, případně i štěrkovité frakce (Obr. 4). Vzorek SBM1 obsahuje 34 % jílové frakce, 50 % prachové frakce a 16 % písčité frakce. Vzorek SBM5 obsahuje 32 % jílové frakce, 52 % prachové frakce, 14 % písčité frakce a 2 % štěrkové frakce.



Obr. 4. Kumulativní zrnitostní křivky cihlářské zeminy ze zaniklé střešovické cihelny (vlevo vzorek SBM1, vpravo vzorek SBM5).

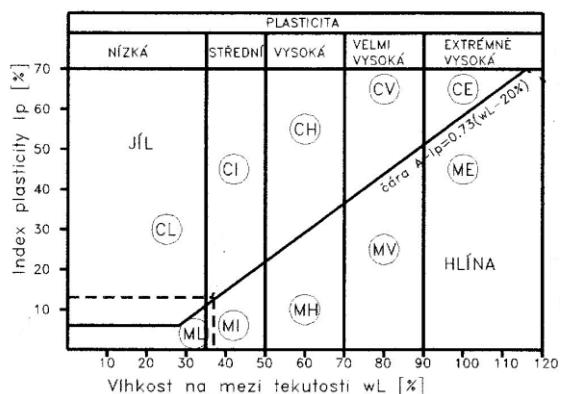
Při zobrazení zrnitosti pomocí modifikovaného Winklerova digramu (Obr. 5) je zřejmé, že oba vzorky spadají do širší zóny A, která vykazuje nejhutnější skladbu zrn, dobrou zpracovatelnost a dobrou kvalitu střepu (Pytlík 1995). Zóna B vykazuje vysoké smrštění sušením (přes 8 %), velkou citlivost k sušení, vysoký obsah jíloviny a potřebu většího množství rozdělovací vody. Zóna C se vyznačuje malou pevností výrobku, protože chybí střední frakce. Zóna D vykazuje malou soudržnost těsta (dilatance) a nedostatek jíloviny (méně než 2 %) (Pytlík 1995).



Obr. 5. Modifikovaný Winklerův diagram (viz Pytlík 1995) s vyznačenými pozicemi vzorku SBM1 (1065) a SBM5 (1066).

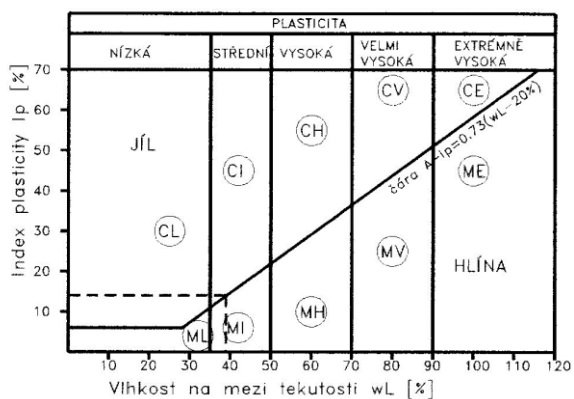
Vzorek SBM1 vykazoval mez plasticity při obsahu vlhkosti 24 %, mez tekutosti při 37 % obsahu vlhkosti. Vlhkost vzorku byla stanovena na 18,3 %. Vzorek SBM5 měl mez plasticity stanovenou na 25 % obsahu vlhkosti a mez tekutosti na 39 % obsahu vlhkosti. Vlhkost byla stanovena na 22,2 %. Vzorek SBM1 lze zařadit do skupiny jílu se střední plasticitou (CI) (Obr. 6) a vzorek SBM5 do skupiny hlín se střední plasticitou (MI) (Obr. 7).

#### DIAGRAM PLASTICITY



Obr. 6. Diagram plasticity vzorku SBM1.

#### DIAGRAM PLASTICITY



Obr. 7. Diagram plasticity vzorku SBM5.

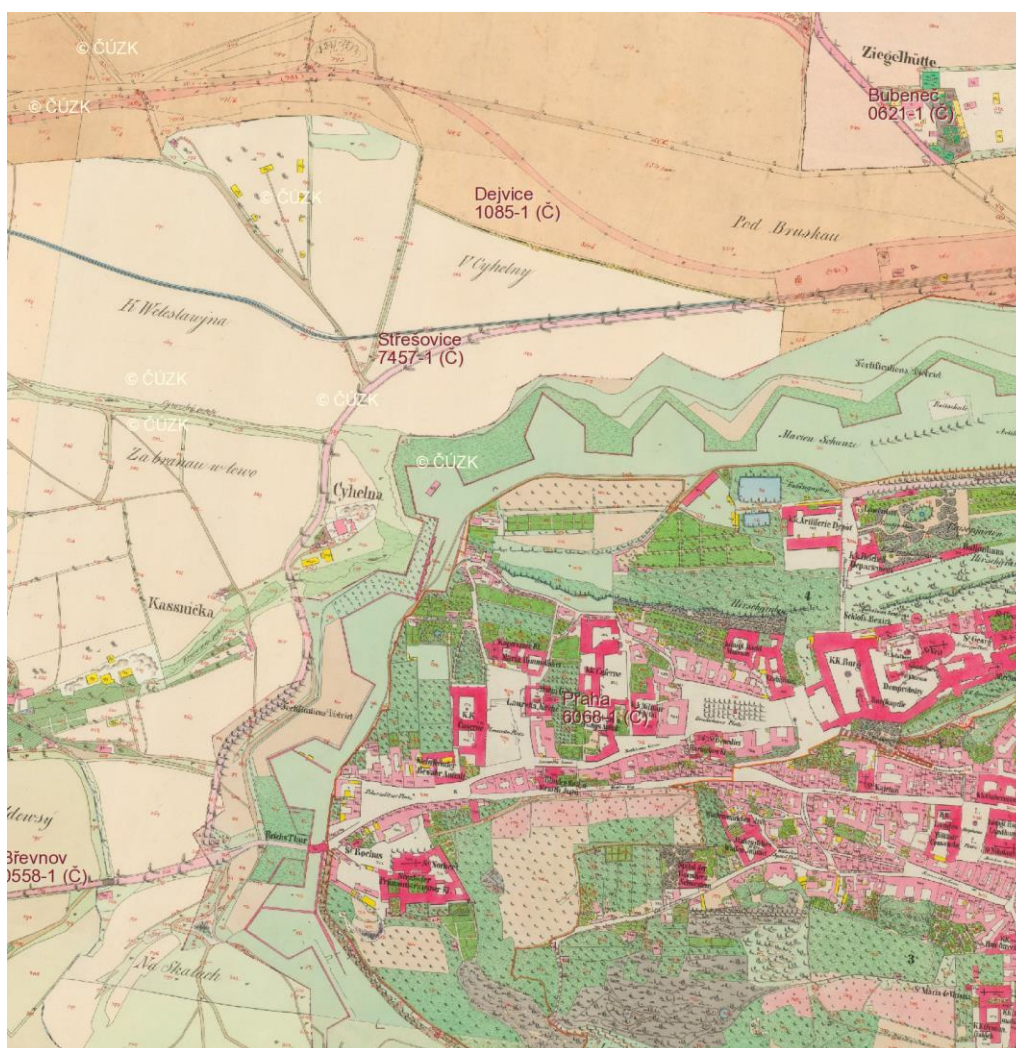
## 6. DISKUZE

### 6.1. Zdroj cihel

#### 6.1.1. Lokalizace místa výroby cihel a zdrojové oblasti cihlářské suroviny

Zemská porodnice v Praze byla vystavěna z červeně zbarvených režných cihel. Podle zjištěných dostupných údajů (Ksandr 1994, Flegl 1992, 1999, Šidlovský 2012, pers. comm) měly být cihly pro tuto stavbu dodávány z cihelny, patřící Řádu premonstrátských řeholních kanovníků ze Strahovského kláštera. Cihelna byla provozována v pražských Střešovicích, které byly již roku 1143 darovány Strahovskému klášteru (Flegl 1999).

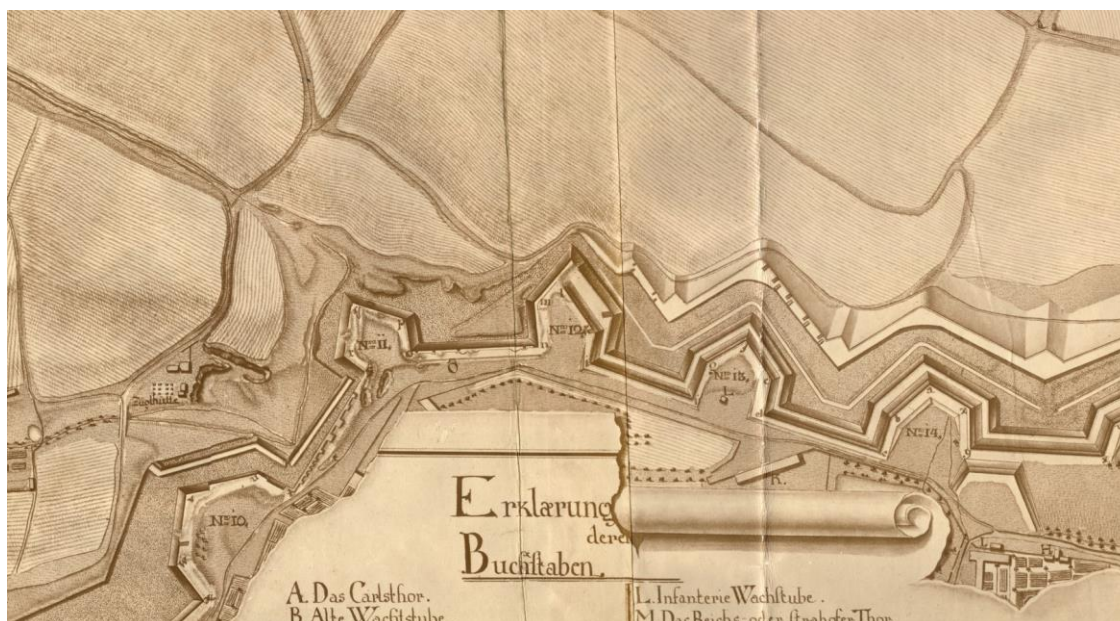
Střešovická cihelna ležela vně pražských hradeb západně od barokního bastionu 11 a severně od bastionu 10 (Obr. 8). Cihelna měla vlastní hlinišťe na levém břehu potoka Brusnice (Herichová 2013, pers. comm). Těžba postupovala od JZ k S do míst, kde do Brusnice ústila vodoteč, tekoucí ze střešovické plošiny od S (Bartošová et al. 2010).



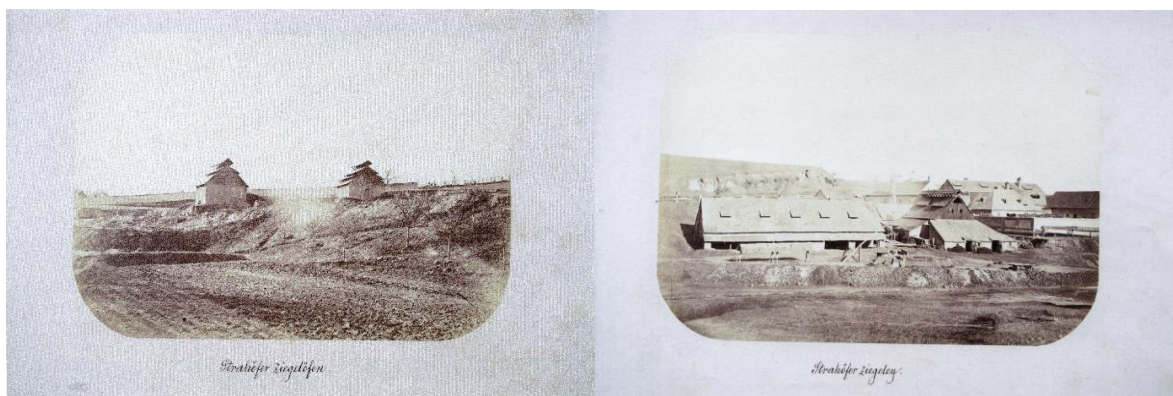
Obr. 8. Výřez z povinných císařských otisků map stabilního katastru, zobrazující polohu střešovické cihelny (na mapě popsána jako Cihelna) západně od barokního bastionu 10 (zdroj: Český úřad zeměměřičský a katastrální).



Dochované prameny (mapová zobrazení území) umožňují klást jisté počátky fungování cihelny do druhé poloviny 18. st. (Obr. 9). Cihelna se poté objevuje na všech mapových zobrazeních až do poloviny 19. st., posledním písemné a mapové potvrzení existence cihelny pochází z roku 1854 (operát Stabilního katastru a Zevrubný popis rozdělení království českého, Praha 1854). Flegl (1992) kladl zánik této cihelny do období let 1854-1870, protože v roce 1870 je na místě původní cihelny již zmiňována funkční octárna (Orth a Sládek 1870). Zánik cihelny je však třeba klást až do období 1862-1870, protože později nalezené historické fotografie z roku 1864 zobrazují funkční cihelnu a hlinišť (Obr. 10). To v principu nevylučuje možnost dodávek cihel z této lokality i pro výstavbu Zemské porodnice. Objekt octárny byl odstraněn v 50. letech 20. st. kvůli rozšiřování komunikace v ulici Patočkova (Herichová et al. 2012). V posledních letech došlo k nevratnému zániku lokality v souvislosti s výstavbou tunelového komplexu Blanka (Obr. 11).



Obr. 9. První zjištěné mapové zobrazení štěšovické cihelny (Johann Seidl, Mathes Modray: Situation plan Der bey Prag von Laurenzi Berg an bis hinter dem Carls Thor, 1784, zdroj: Archiv NPÚ 996-5-286 A-C).



Obr. 10. Historické fotografie štěšovické cihelny z roku 1864. ZDROJ: Flegl, 1992



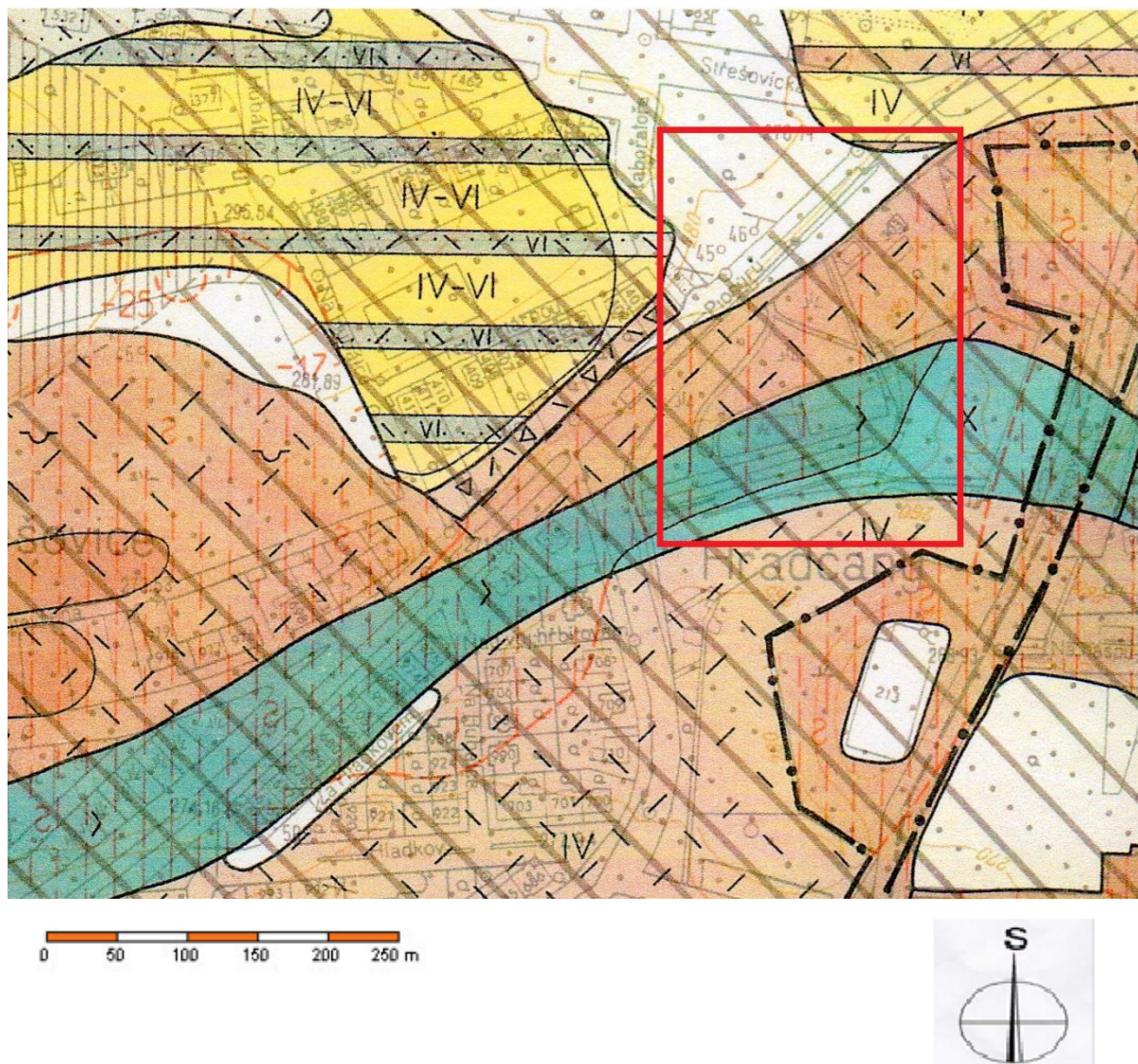
Obr. 11. Současná podoba lokality, v níž stávala střešovická cihelna, pohled ze Z strany (foto autor diplomové práce, stav v létě 2013).

Z výsledků dosud nepublikovaného záchranného archeologického výzkumu, prováděného od roku 2008 pod vedením dr. Herichové (Archeologický ústav AV ČR) v souvislosti s výstavbou zmiňovaného tunelového komplexu Blanka, vyplývá, že cihelnu tvořil složitý systém zděných konstrukcí ve dvou podlažích s výrobními projekty a jejich zázemím (nádrže, zásobníky, studna zasahující hluboko do skalního podloží apod.). Na dané lokalitě byly rovněž zjištěny neukončené zdi („retranchement“, budovaný Francouzi v rámci nástupnických válek v roce 1742 – Herichová et al. 2012) a chodby z období baroka. Lokalita proslula již v 19. st. nálezem ranně středověké pohřebiště, o které se intenzivně zajímal páter Krolmus ze Strahovského kláštera. Některé jeho nálezy jsou k vidění v expozici Národního muzea (Bartošová et al. 2010).

Geologická stavba území kolem střešovické cihelny (Obr. 12), ověřovaná při výše zmiňovaném archeologickém výzkumu, naznačuje přítomnost holocenních nezpevněných sedimentů a antropogenních uloženin (sprašové hlíny, navážky, výsypky, haldy z cihlářské výroby), jejichž podloží je tvořeno pískovci, jílovcí, jílovitými břidlicemi a sprašovými sedimenty. Tyto sedimenty mohly být surovinou pro výrobu cihel, použitých na výstavbu Zemské porodnice.

Ve svrchních částech zkoumaných geologických profilů, situovaných na západní straně původního těžebního prostoru, byla zjištěna přítomnost četných ostrohranných úlomků opuk, promíchaných s prachovitými sedimenty, které dr. Herichová (2013 pers. comm.) interpretuje jako navážky. Surovinou pro výrobu cihel byly nejpravděpodobněji spraše a sprašové hlíny (již jako svahové sedimenty), v nichž lze najít proplástky a čočky s paralelní vrstevnatostí, na kterých lze vidět svahové pohyby. Spodní polohy profilů jsou tvořeny zvětralými pískovci. Stáří spraší a sprašových hlín hornin odhaduje dr. Herichová (2013 pers. comm.) na holocenní, a to kvůli zbytkům kostí savců, které se v nich nachází. Skalní podloží je tvořeno letenským souvrstvím (zvětralé břidlice a úlomky křemenců) (Herichová 2013 pers. comm.).



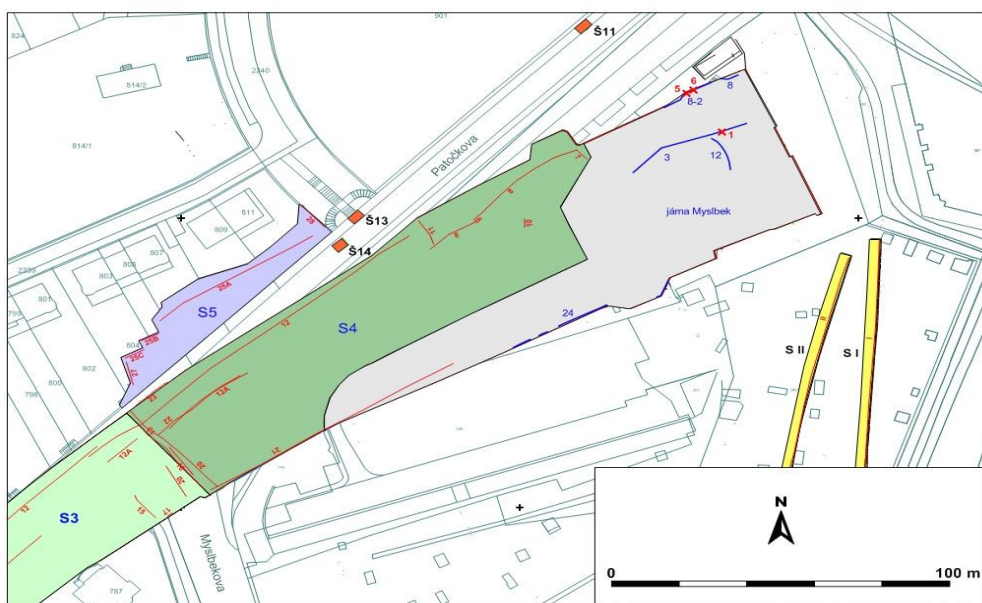


Obr. 12. Výřez z geologické mapy lokality, kde stávala sřešovická cihelna. Podloží je tvořeno letenskými vrstvami znázorněnými černým šrafováním, pokryv tvoří převážně vápnité spraše a sprašové hlíny (znázorněny žlutou barvou), dále eluviální, svahové a soliflukční písčito-jílovité a jílovité hlíny s úlomky ordovických hornin místy i s úlomky hornin křídových v mocnosti 4 – 6 m (škála hnědé barvy – tmavší části vyznačují větší mocnost pokryvu) a hlinitopísčité a písčité holocenní náplavy Brusnice s bahnitými a štěrkovými polohami (modrá barva). Červený rámeček ohraničuje přibližnou polohu původního exploatačního prostoru (zdroj: Geofond, Základní geologická mapa Prahy, část MO30-8-1, 1969).

#### 6.1.2. Ověření vhodnosti suroviny pro výrobu cihel

Druhým významným úkolem, řešeným v souvislosti s otázkou zdrojové lokality cihel pro výstavbu Zemské porodnice, bylo posouzení vhodnosti suroviny pro cihlářskou výrobu. S ohledem na hlavní téma této práce a na možnosti jejího řešení se toto posouzení omezilo na základní geotechnický rozbor dvou vzorků zeminy, odebraných pracovníky Archeologického ústavu AV ČR, v.v.i. ze západní strany exploatačního prostoru původní cihelny během již zmiňovaného záchranného archeologického průzkumu (Obr. 13 a 14). Vzorky byly po odběru uchovány ve skladu Archeologického ústavu AV ČR, v.v.i. v uzavřených PVC pytlicích tak, aby byla zachována „původní“ vlhkost a další vlastnosti. Pro posouzení, zda by tento materiál mohl být kvalitní cihlářskou surovinou, bylo využito zejména stanovení zrnitosti a Atterbergových mezí.





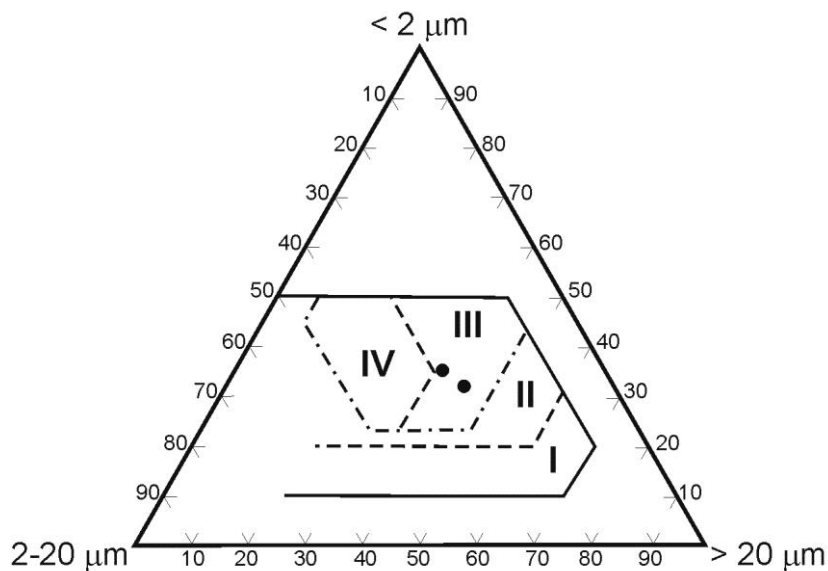
Obr. 13. Situační plán průzkumných polí v rámci záchranného archeologického výzkumu, prováděného Archeologickým ústavem AV ČR, v.v.i. v roce 2010 s vyznačenou lokalizací profilu č. 8, z nějž byly odebrány vzorky pro geotechnické rozbory. (autor: dr. Herichová 2013).



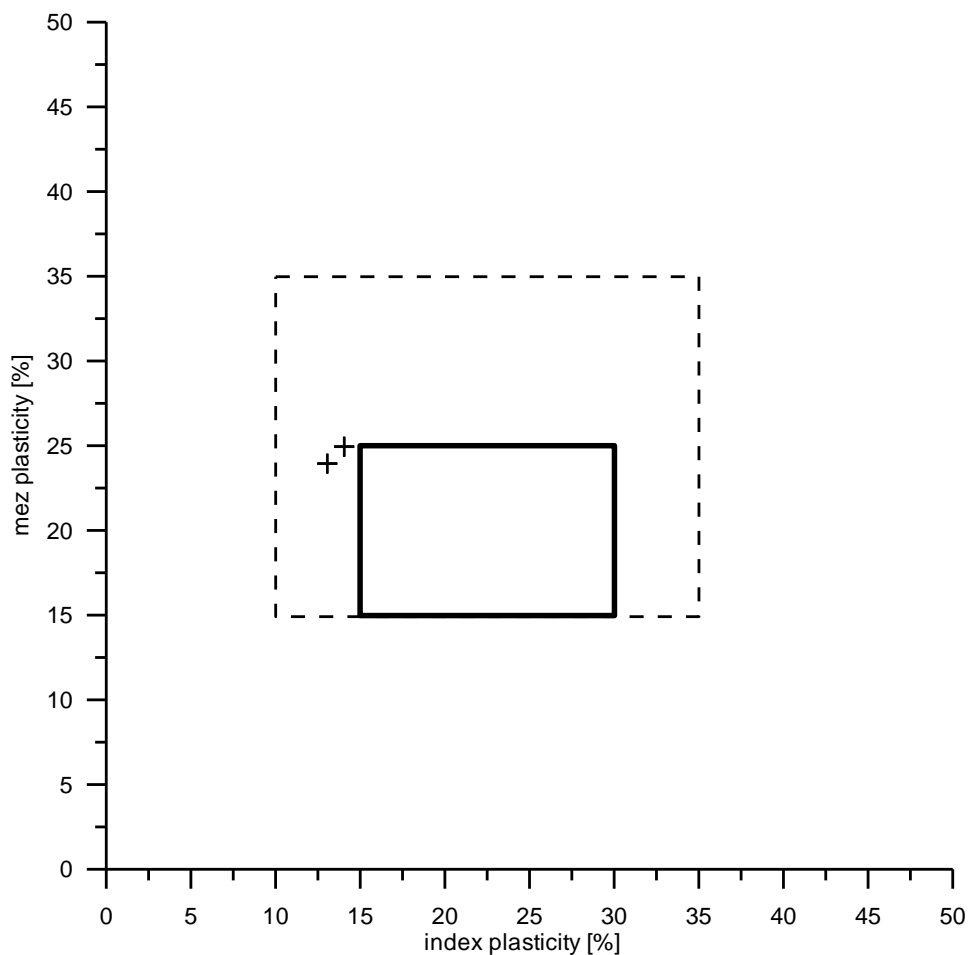
Obr. 14. Celkový pohled na profil č. 8, dokumentovaný v jámě Myslbek v rámci záchranného archeologického výzkumu zaniklé střešovické cihelny (autor: dr. Herichová 2013).

Zrnitostní složení, zobrazované pomocí tzv. Winklerova diagramu, je jedním ze základních parametrů, z něhož lze odvodit využitelnost suroviny pro cihlářskou výrobu. Z provedených rozborů (viz. volně vložená příloha II), je patrné, že oba studované vzorky mají velice příznivé zrnitostní složení, které by umožnilo výrobu nejen plných cihel, ale i náročnějších dutých tvarovek (Obr. 15).

Při posuzování vhodnosti zeminy pro cihlářskou výrobu lze využít tzv. Atterbergovy meze, zobrazené v Bainově diagramu (Obr. 16). Z výsledků této práce je zřejmé, že studovaný materiál sice leží vně pole, vymezujícího optimální vlastnosti suroviny, ale pořád se pohybuje v mezích přijatelných pro běžnou cihlářskou výrobu. Pozice mimo oblast optimálních mechanických vlastností (tj. Atterbergových mezí) je poněkud překvapivá vzhledem k příznivému zrnitostnímu složení suroviny (Obr. 16). V rozporu s výsledky mineralogického studia suroviny (převládá illit) je velice nízká vypočtená hodnota koloidní aktivity (tj. podílu indexu plasticity vůči obsahu zrn menších než 2 mm, viz Skempton 1953), která odkazuje k chování zeminy bohaté kaolinitem.



Obr. 15. Winklerův diagram (Winkler 1954), vymežující možné zrnitostní složení cihlářské suroviny pro výrobu plných cihel (I), dutých cihel (II), pálené střešní krytiny (III) a stropních překladů (IV). Oba studované vzorky (černé body) svým zrnitostním složením by teoreticky umožnily výrobu i pálené střešní krytiny.



Obr. 16. Bainův diagram (Bain 1971, Lorenz a Gwosdz 2003), vymežující pole optimálních (tlustá plná čára) a přípustných (tenká čárkovaná čára) mechanických vlastností (Atterbergových mezí) cihlářské suroviny. Oba studované vzorky (černé křížky) leží blízko pole optimálních vlastností, avšak jejich pozice naznačuje slabší soudržnost mezi částicemi a možnost středního smrštění při sušení.

### 6.1.3. Shrnutí poznatků o zdroji cihel

Ze zjištěných podkladů a z dosud provedených analýz lze předpokládat s vysokou mírou pravděpodobnosti, že střešovická cihelna mohla být dodavatelem cihel pro výstavbu Zemské porodnice. Aby se zvýšila věrohodnost těchto závěrů, bude nutně provést doplňující rozbor suroviny ze střešovické lokality, případně na vzorcích z dalších cihelen v Horoměřicích, Hradištku, Milevsku a Útěchovicích, které vlastnil Řád premonstrátských řeholních kanovníků. Tyto práce by se měly zaměřit na komplexní geochemické rozbor (zejména stopové prvky) a technologické zkoušky (např. pokusné výpaly), případně též na mineralogické rozbor a mikroskopické studium cihel, pocházejících z těchto cihelen a na zjištění případných odlišujících znaků. Tyto rozbor jsou však mimo zadání této diplomové práce a lze je brát jako doporučení pro další studium.

## 6.2. Interpretace zvětrávacích forem cihelného zdiva Zemské porodnice

### 6.2.1. Obecně

Zvětrávací formy a další jevy, které lze pozorovat na povrchu režného cihelného zdiva ohradní zdi Zemské porodnice v Praze mohou souviset s celou řadou faktorů a procesů, jimž je toto zdivo vystaveno. V první řadě je nutno uvažovat vliv složení vlastní suroviny a technologii výroby cihel. Podmínky, panující ve zdivu, tedy interakce cihel s ostatními stavebními materiály (zde vápennou zdící maltou) a vliv podloží, resp. interakce mezi zdí a podložními vrstvami jsou dalším významným faktorem, který může přispět k rozvoji pozorovaných zvětrávacích forem. Ke zvětrávacím procesům však nepochybně přispívají i procesy interakce cihel s okolní atmosférou.

### 6.2.2. Složení výchozí suroviny a její vliv na mineralogii cihel

Pro výrobu cihel, použitých na výstavbu ohradní zdi Zemské porodnice v Praze, byla těžena surovina, v níž převládá křemen a illit, doprovázené kalcitem, živci a případně dolomit. Během výpalu pak docházelo k reakcím právě mezi křemennou fází, illitem a karbonáty. Tomu napovídá i výsledné složení analyzovaných cihel, v nichž se objevuje křemen, anortit, wollastonit, cristobalit, gehlenit a hematit. Fázové studium cihel přitom umožňuje interpretovat i teplotní podmínky výpalu (Manning 1995, Cultrone et al. 2001).

Vzorky jsou bohaté křemenem, který je ale z hlediska odhadu teploty výpalu nedůležitý, protože je stabilní až do vysokých teplot a k pomalému poklesu jeho množství dochází až od 800°C a k výraznému poklesu až při teplotě 1100°C (Cultrone et al. 2001). Pro odhad možné spodní hranice teploty výpalu lze použít přítomnosti nebo absence karbonátů. Podle Cultrona et al. (2001) se dolomit kompletně rozkládá při 700°C a kalcit při 800°C. Ve studovaných vzorcích cihel se žádná z těchto fází nevyskytuje, proto lze předpokládat, že teplota výpalu přesáhla minimálně 800°C.

Pro odhad teploty výpalu zkoumaných cihel byla přítomnost novotvořených fází: anortitu, gehlenitu a wollastonitu. S ohledem na přítomnost vápníku (vázan v kalcitu) ve zdrojové cihlářské surovině není jejich přítomnost překvapivá. Gehlenit a wollastonit vznikají během výpalu reakcí  $\text{CaO}$  a  $\text{SiO}_2$ , při vzniku gehlenitu do reakce vstupuje ještě  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Cultrone et al. (2001) pozorovali, že gehlenit se při výpalu cihlářské suroviny, obsahující karbonáty, objevuje při teplotě 800°C a svého maxima dosahuje při teplotě 900°C. Při té samé teplotě se tvoří i wollastonit. Jeho množství pak s rostoucí teplotou dále stoupá. K poklesu jeho množství dochází až 1100°C.

Pro určení teploty výpalu je rovněž důležitá přítomnost anortitu, který v malých množstvích vzniká ze sodného plagioklasu (albit) cca při teplotách 800°C (Manning 1995), kdy výrazně stoupne obsah vápníku v plagioklasu, jeho množství pak až do teploty cca 1050°C mírně stoupá.

Přítomnost hematitu svědčí o oxidačních podmínkách v peci, při kterých jakýkoli volný oxid železa, který je procesu přítomen vytváří hematit, který poté dává výslednému produktu charakteristickou červenou barvu (Manning 1995). Hematit dosahuje svého maxima při cca 600°C, poté už jeho množství při výpalu suroviny méně klesá.

Velmi zajímavě se jeví přítomnost cristobalitu ve vzorcích analyzovaných cihel. Cristobalit je vysokoteplotní modifikace křemene, která se začíná podle Manninga (1995) i Cultrona et al. (2001) tvořit až při teplotách nad 1000°C.

Podle výše zmíněného lze usuzovat, že vypalovací teplota se musela u zkoumaných vzorků cihel pravděpodobně pohybovat mezi 800°C – cca 1050°C. O tom svědčí vysoký obsah křemene, relativně vyšší množství wollastonitu, relativně menší množství gehlenitu a cristobalitu. Z těchto dat by mohlo vyplývat, že výsledná teplota výpalu by se mohla pohybovat spíše těsně nad hranicí 900°C. To by mohlo potvrdit právě vyšší množství anortitu, který v 800°C teprve vzniká, ale k nárůstu jeho množství dochází až za vyšších teplot, to samé platí pro wollastonit. Naopak gehlenit, který sice vzniká přibližně za stejných teplot jako anortit a wollastonit, dosahuje maximální intenzity právě okolo 900°C, ale pak jeho množství prudce klesá. Přítomnost cristobalitu by mohla napovídat, že teplota výpalu mohla místy překračovat 1000°C, ale vzhledem k poškození cihel a velikostní distribuci pórů se to zdá nepravděpodobné. Jeho možnou krystalizaci za nižší teploty než 1050°C mohla zapříčinit přítomnost kalcitu ve výchozí surovině, protože teplota 1050°C je nastavená pro suroviny, které neobsahují kalcit.

Pro odhad teplot výpalu je důležitá i přítomnost nebo absence fylosilikátů. Třebaže částečný rozklad fylosilikátů (dehydroxylace) probíhá za středních teplot (450-700°C) – Manning 1995, jejich úplné vymizení lze pozorovat až při teplotách nad 900°C (Cultrone et al. 2001). Protože pro řadu analyzovaných vzorků ze zvětralých částí cihel byla naopak charakteristická přítomnost dehydroxylovaného illitu (Tab. 3), lze usuzovat, že minimálně část cihel nebyla vypálena výše než 900°C.

### 6.2.3. Vliv pórovitosti na zvětrávací formy cihel

Pórovitost je jedním z hlavních faktorů, které ovlivňují trvanlivost cihel (Mallidi 1996). Podobně jako u přírodního kamene má význam nejen hodnota celkové nebo otevřené pórovitosti, ale též rozložení velikosti pórů, které ovlivňuje působení kapilárního jevu nebo dobu zadržení vody. Pórovitost cihel je ovlivněna kvalitou výchozí suroviny a maximální teplotou, dosaženou při výpalu, přičemž platí, že se zvyšující se teplotou výpalu pórovitost klesá a zlepšuje se distribuce velikosti pórů (Elert et al. 2003). Při teplotách výpalu okolo 900°C se celková pórovitost pohybuje okolo 30 %, při teplotě 1100°C jen 20 % (Sosim et al. 1985).

Distribuce pórů je pro životnost cihel jednou z nejdůležitějších vlastností. Při vyšší teplotě výpalu zanikají malé póry a dochází k plynulému růstu hodnoty mediánu poloměru pórů (Sosim et al. 1985). Při nízké teplotě výpalu vznikají více pórovité cihly, které zároveň obsahují drobnější póry s nižším rozpětím jejich velikostí, což se jeví jako negativní vlastnost. Lépe je zajistit větší rozpětí velikostí pórů (Pytlík 1995). Naopak při vyšší teplotě výpalu (1100°C) vznikají póry o větším průměru. Zvětšování pórů je poté doprovázeno poklesem celkové pórovitosti (Sosim et al. 1985).

Negativní vliv na pórovitost cihel a nasákavost má přítomnost kalcitu ve výchozí surovině (Kung a Hansen 1988), který podporuje tvorbu drobnějších pórů při výpalu. Drobnější póry vedou k vyšší nasákavosti a menší odolnosti vůči mrazu. Zároveň vyšší obsah jemných částic (menších než 20 µm) ve výchozí surovině vede k vyšší nasákavosti pálených cihel, naopak hrubší částice způsobují její pokles. Kung a Hansen (1988) rovněž poukazují na význam vzájemné propojenosti pórového prostoru,

kdy při zaplňování vodou dochází k rychlejšímu porušení materiálu u cihel s malou propojeností systému pórů.

Z výše uvedeného vyplývá, že materiály, které mají podobnou celkovou pórovitost, nemusí vždy vykazovat stejnou trvanlivost (mohou obsahovat jemnější póry, nebo naopak větší apod.). Studium distribuce velikosti pórů je tedy důležité pro odhad odolnosti cihly vůči vnějším vlivům.

Maage (1984), Nakamura (1988) nebo Robinson (1984) ve svých studiích poukázali na skutečnost, že při převaze pórů, které jsou menší než 1  $\mu\text{m}$ , vykazuje cihla nízkou trvanlivost. Naopak při převaze pórů větších než 2  $\mu\text{m}$  je cihla odolná a trvanlivá. Kung a Hansen (1988) tuto skutečnost vysvětlují tím, že větší póry se velmi vzácně zaplňují během mrznutí vodou kvůli tomu, že do nich sice voda rychle dostane, ale zároveň i rychle odteče. Zároveň nejmenší póry zamrzají až za velmi nízkých teplot, tím pádem nemají zásadní vliv na trvanlivost cihly. Nejcitlivější vůči zamrznání se podle Kunga a Hansena (1988) jeví póry o velikostech 0,1 – 1  $\mu\text{m}$ , protože jsou nejčastěji zaplňovány vodou a voda zde vysychá déle než ve velkých pórech.

Maage (1984) stanovil nepřímou úměrnost mezi objemem pórů a mrazuvzdorností a přímou úměrnost mezi mrazuvzdorností a procentem pórů, které jsou větší než 3  $\mu\text{m}$ . Nakamura (1988) na základě korelace mezi specifickým objemem pórů a zkouškami mrazuvzdornosti stanovil, že póry, které jsou menší než 0,2  $\mu\text{m}$ , mají nežádoucí vliv na mrazuvzdornost cihel. Podle Arnotta (1990) mají póry, které jsou větší než 1–3  $\mu\text{m}$ , pozitivní vliv na trvanlivost cihel.

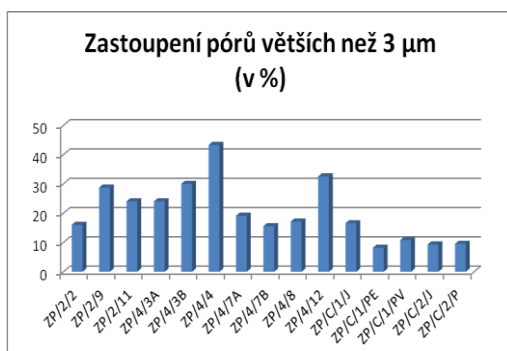
Ve své studii Maage (1984) stanovil tzv. číslo mrazuvzdornosti F (též faktor mrazuvzdornosti), ze kterého vychází odhad mrazuvzdornosti cihel. Jedná se o výpočet založený na experimentálních výsledcích a statistickém modelu, kde hrají hlavní roli dvě proměnné, a to celkový objem pórů a podíl pórů, které jsou větší než 3  $\mu\text{m}$ . Výpočet se provádí podle následujícího vztahu:

$$F = \frac{3,2}{P_V} + 2,4 \cdot P_3,$$

kde  $P_V$  je celkový objem pórů [ $\text{mm}^3/\text{g}$ ] a  $P_3$  je podíl pórů o průměru > 3  $\mu\text{m}$  z  $P_V$  [%].

Podle Maageho faktoru mrazuvzdornosti se cihly dělí na cihly s vysokou pravděpodobností mrazuvzdornosti ( $F > 70$ ), cihly s nejistou mrazuvzdorností ( $55 < F < 70$ ) a cihly s nízkou pravděpodobností mrazuvzdornosti ( $F < 55$ ).

Z výsledků rtuťové porozimetrie bylo nejprve určeno množství pórů větších než 3  $\mu\text{m}$  (Obr. 17). Podle Maageho vztahu byl následně spočten Maageho faktor mrazuvzdornosti u jednotlivých vzorků (Obr. 18).



Obr. 17. Zastoupení pórů s průměrem větším než 3  $\mu\text{m}$  pro studované vzorky cihel z ohradní zdi Zemské porodnice v Praze.



Obr. 18. Rozsah hodnot Maageho faktoru mrazuvzdornosti pro studované vzorky cihel z ohradní zdi Zemské porodnice v Praze.

Z dosažených výsledků je zřejmé, že procentuální zastoupení pórů větších než 3  $\mu\text{m}$  je u většiny vzorků nízké. Nejvyšší zastoupení vykazují vzorky ZP/4/4 a ZP/4/12. Tyto 2 vzorky mají i nejvyšší hodnoty Maageho faktoru mrazuvzdornosti, což jen potvrzuje jeho teorii o pozitivním vlivu pórů větších než 3  $\mu\text{m}$  na mrazuvzdornost cihel. Z výsledků vyplývá i přímá úměra mezi procentuálním zastoupením těchto pórů a hodnotou Maageho faktoru. Čím nižší toto procento je, tím nižší je i hodnota Maageho faktoru a cihla je méně kvalitní. Lepší trvanlivost indikuje i procentuální zastoupení jednotlivých velikostí pórů.

Vzorek ZP/4/12 se zdá být ze všech analyzovaných vzorků nejodolnější a nejkvalitnější. Stupeň poškození tohoto vzorku je jeden z nejnižších. Ze zvětrávacích jevů se zde uplatňuje pouze puchýřování původního povrchu, tvorba krust původního povrchu v kombinaci s usazováním polévatého prachu. U ostatních měřených vzorků je poškození závažnější. Vzorky ZP/2/9, ZP/2/11, ZP/4/3A a ZP/4/3B vykazují nejistou mrazuvzdornost, protože spadají do intervalu hodnot Maageho faktoru mezi 55 – 70. Všechny ostatní vzorky vykazují podle Maageho modelu nízkou pravděpodobnost mrazuvzdornosti, protože zastoupení pórů nad 3  $\mu\text{m}$  je mnohdy velmi nízké. Tento Maageův model potvrzuje i Robinson (1984), který uvádí skutečnost, že cihly s převahou pórů větších než 3  $\mu\text{m}$  indikují trvanlivou cihlu.

Zároveň u vzorků ZP/2/2, ZP/C/1J, ZP/C/1/PE, ZP/C/1/PV, ZP/C/2/J a ZP/C/2P je vidět jasná převaha pórů (více než 60 %), které jsou menší než 2  $\mu\text{m}$  a větší než 0,1  $\mu\text{m}$  a kromě vzorku ZP/2/2, u kterého se jedná o úlomek ze zvětralé cihly, vykazují vysokou pórovitost (cca 30 – 40 %). U ostatních čtyř vzorků se jedná o vzorky dvou celých cihel. Analyzována byla jádra těchto cihel (ZP/C/1J a ZP/C/2P), dále povrch cihly externí (exponovaný vnějším vlivům – ZP/C/1PV, ZP/C/2P) a povrch cihly vnitřní (v přímém styku s maltou – ZP/C/1PV). Nejjemnější póry jsou zastoupeny ve výrazné minoritě (jednotky procent) a tím pádem nemají vliv na odolnost vzorků vůči mrazu. Podle Elerta et al. (2003) mají takovéto vlastnosti cihel za následek jejich menší odolnost vůči vnějším vlivům. Tato skutečnost rovněž potvrzuje Maageův model, jelikož hodnoty faktory mrazuvzdornosti se u těchto vzorků pohybují velmi nízkou.

Pokud by se ale na tyto výsledky aplikoval model Arnotta (1990), musely by se tyto vzorky cihel brát jako relativně kvalitní, protože podle jeho výzkumu póry, které jsou větší než 1 až 3  $\mu\text{m}$ , mají pozitivní vliv na mrazuvzdornost cihel, což zčásti neodpovídá dříve citovaným studiím. Při bližším výzkumu lze ale tvrdit, že tyto vzorky cihel sice mají převahu pórů, které jsou v intervalu mezi 1 – 3  $\mu\text{m}$ , ale samotných pórů, které jsou větší než 3  $\mu\text{m}$ , je ale minimum. I průměrná velikost pórů se drží těsně nad hranicí 1  $\mu\text{m}$ , která podle Arnotta indikuje vyšší trvanlivost cihel. Dalším argumentem může být skutečnost, že variabilita pórů je u těchto vzorků silně omezena. Procentuální zastoupení pórů v daných vzorcích je v rozpětí od 0,8 – 3  $\mu\text{m}$  nad 65% (z toho cca 35 – 45 % v rozpětí 2 – 3  $\mu\text{m}$ ), všechny ostatní velikosti pórů jsou zastoupeny pouze minoritně. Jak poukazuje Pytlík (1995), pro



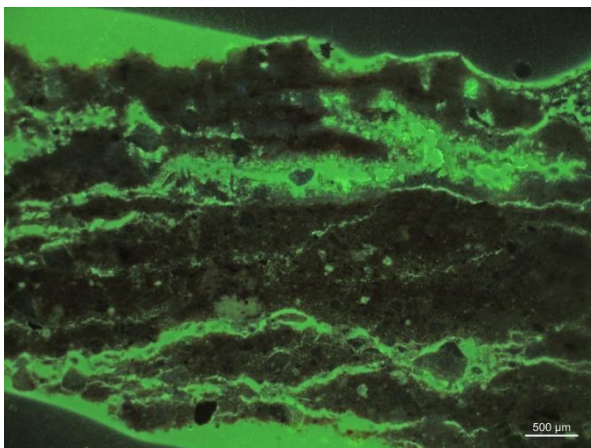
odolnost cihel vůči působení mrazu je lepší zajistit rozmanitost ve velikostech a procentuálním procentuálním zastoupení jednotlivých pórů.

Tuto skutečnost vykazují výše zmíněné vzorky ZP/4/4 a ZP4/12, na kterých je vidět velké množství pórů větších než 3  $\mu\text{m}$  (rovněž větších než 2  $\mu\text{m}$ ), s tím souvisí i vysoký počet pórů větších než 1 – 3  $\mu\text{m}$ , vysoká variabilita ve velikostech přítomných pórů a zároveň nízké procento pórů menších než 0,2  $\mu\text{m}$ , které Nakamura (1988) označuje jako škodlivé pro trvanlivost cihel.

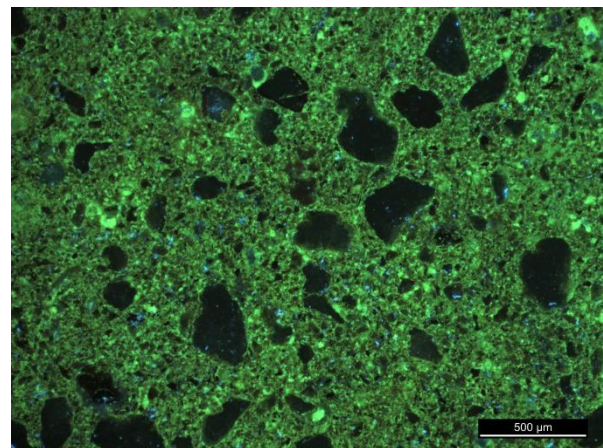
Na druhé straně vyvstává otázka, proč cihla, která podle modelu Maageho má dobrou mrazuvzdornost (ZP/4/4), zároveň vykazuje vysoký stupeň poškození zvětrávacími jevy – konkrétně puchýřování a mnohvrstvé šupinatění nepůvodního povrchu. Vzorek ZP4/4 má podle analýzy rtuťovou porozimetrií dobrou distribuci velikostí pórů a zároveň vysoké množství pórů, které jsou větší než 3  $\mu\text{m}$ . Skutečnost však může být taková, že u tohoto vzorku může docházet k tvorbě druhotně zpevněného povrchu. Při tomto procesu dochází k zaplňování malých pórů, přičemž ty větší zůstávají nezaplněny. Navíc u cihel, které vykazují poškození mnohvrstevným šupinatěním, vznikají tzv. štěrbinové póry (druhotný pórový prostor), které mají jiný tvar, než modelové válcovité póry, které rtuťová porozimetrie analyzovala. Proto může dojít k nepřesnostem ve výsledcích, protože skutečná velikost pórů může být ve skutečnosti menší (nepřesný přepočet rozměru destičkovitých štěrbinových pórů na průměr válcovitých pórů) a cihla tím pádem může být méně odolná vůči mrazu, než ukazuje Maageův faktor mrazuvzdornosti.

Vzorky, které podle Maageho modelu vykazují nejistou mrazuvzdornost (ZP/2/9, ZP/2/11, ZP/4/3A, ZP/4/3B), vykazují podobnou distribuci velikosti pórů jako vzorky, které se jeví jako mrazuvzdorné. Ovšem s tím rozdílem, že procento pórů, které Nakamura (1988) označuje jako škodlivé, je u těchto vzorků vyšší. U vzorku ZP/2/9 – 22 %, u ZP/2/11 – 31 %, ZP/4/3A – 22,5 % a u ZP/4/3B – 19 %. Jako významnější problém lze označit skutečnost, na kterou ve svých pracích poukazovali Nakamura (1988), Maage (1984) a Robinson (1984). Ve vzorku ZP2/9 je více než 51 % pórů menších než 1  $\mu\text{m}$ , u vzorku ZP2/11 cca 57 %, u vzorku ZP/4/3A více než 53 % a u vzorku ZP/4/3B je to tato hodnota nižší (cca 49 %). Tyto hodnoty jsou velmi vysoké a zastoupení pórů větších než 2  $\mu\text{m}$  je nižší, proto se dá usuzovat, že tyto cihly skutečně nebudou mrazuvzdorné.

Výsledky rtuťové porozimetrie napovídají, že kvalita cihel, ze kterých je postavena ohradní zeď Zemské porodnice, není vysoká. Z provedených 30 měření pouze 2 vzorky vykazují dobrou mrazuvzdornost, přičemž u vzorku ZP/4/4 mohlo dojít ke zkreslení výsledků vzhledem k možné přítomnosti štěrbinových pórů (Obr. 19A).



Obr. 19A. Štěrbínové póry v povrchové části vzorku ZP4/4 .



Obr. 19B. Charakter pórového prostoru v cihle (vzorek ZP/C12).

U čtyř vzorků je podle Maageho modelu jejich mrazuvzdornost nejistá a zbývající vzorky vykazují slabou odolnost vůči mrazu. Zároveň je u nich prokázána špatná velikostní distribuce pórů i vyšší množství pórů menších než 2  $\mu\text{m}$ , což má negativní dopad na jejich mrazuvzdornost. Z toho lze usuzovat, že kvalita cihel bude ovlivněna nižší teplotou výpalu – cca 900°C (popř. špatnou technologií výpalu), případně i kvalitou výchozí suroviny (vyšší obsah karbonátů).

#### 6.2.4. Zvětrávací formy

Pozorované zvětrávací formy (Obr. 20) mohou souviset jak s kvalitou cihel (složení suroviny, podmínky při výpalu), tak s procesy, jimiž je ohradní zeď Zemské porodnice vystavena. Zde lze uvažovat zejména lokální přírodní podmínky (vliv geologického podloží, klimatické poměry), ale též antropogenní zátěž (znečištěné ovzduší, solení chodníků a okolních komunikací v zimním období, případně předchozí konzervační práce).

Vznik trhlin a kostkovitý rozpad cihel souvisí s mechanickým poškozením, kde lze zejména uvažovat zmrazovací cykly v zimním období (Thomachot et al. 2005). Mechanický rozpad povrchu cihel pomocí drodivého rozpadu nebo mnohovrstvého šupinatění je zřejmě spojen s několika procesy: cyklické kolísání vlhkosti, akumulace vodorozpustných solí a jejich krystalizace, případně též mrznutí vody v zimním období. Na některých sledovaných částech ohradní zdi se drodivý rozpad nebo mnohovrstvé šupinatění objevuje pouze na izolovaných cihlách, zatímco ostatní zůstávají neporušené. Tento jev lze vysvětlit buď lokálním přínosem solí (viz např. Larsen 2007), nebo proměnlivou kvalitou jednotlivých cihel.

Výše zmíněným jevům předchází puchýřování druhotně zpevněného povrchu nebo povrchu, který byl pozměněn četnými usazeninami. Tvorba puchýřů může souviset jak s mrznutím vody v pórech pod povrchem (Thomachot et al. 2005), tak s krystalizací vodorozpustných solí pod povrchem (Matsukura et al. 2004). Černání povrchu a tvorba exokrust je spojena s usazováním cizorodého materiálu (poléťavý prach, popílek atd.), promíchaného s krystalizujícími solemi (zejména sádrovcem). Poškození krystalizujícími vodorozpustnými solemi ve vyšších částech ohradní zdi může souviset s vysokým kapilárním vznosem vody z podzákladí, ale též s akumulací vlhkosti z dešťových srážek pod okrasnou římsou zdi. Podobný vznik poškození sledovali i Lubelli et al. (2004) v Zeelandu (Nizozemsko).



Obr. 20A. Původní zpevněný povrch s povrchovými usazeninami a počínajícím puchýřováním.



Obr. 20B. Původní i druhotný zpevněný zčernalý povrch, částečně porušený odprisky a obnažené jádro cihly s mnohovrstvým šupinatěním.





Obr. 20C. Drolivý rozpad doprovázený mnohovrstvým šupinatěním.



Obr. 20D. Rozsáhlé mnohovrstvé šupinatění s počátečním rozvojem voštin až alveol.



Obr. 20E. Odprsky zpevněné původní vrstvy.



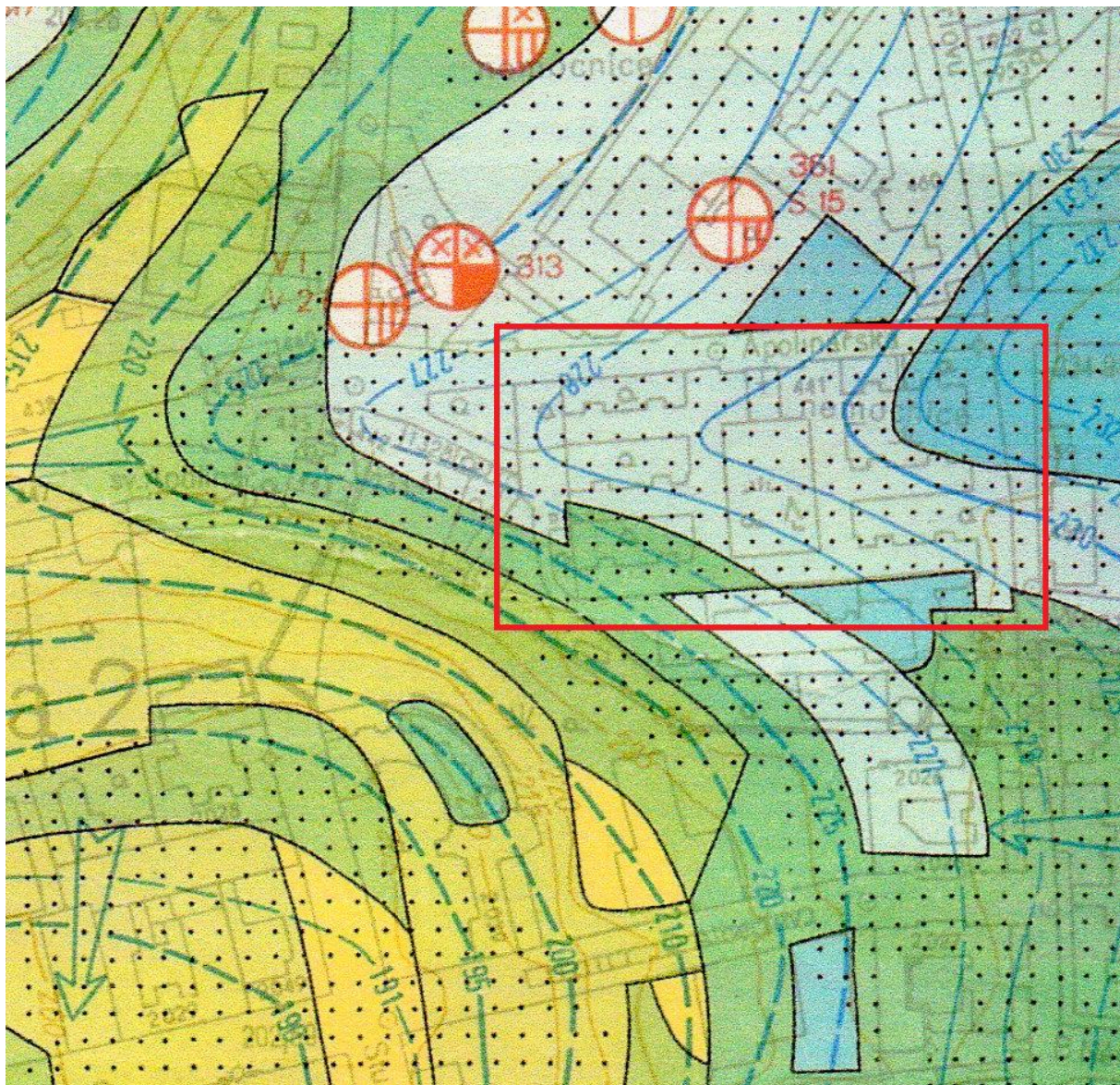
Obr. 20F. Exokrusty na cihlách ozdobné římsy.

#### 6.2.5. Vliv přírodních a klimatických podmínek na zvětrávání cihel zdi Zemské porodnice

Geologické podloží lokality, na níž byla vystavěna Zemská porodnice v Praze, tvoří fluvialní sedimenty (šterky a písky vinohradské vltavské terasy) (Záruba 1948). Dle průvodní zprávy k mapě MO-30-7-2 se do hloubky 2,0 m nachází tmavá, sypká, hlinitá navážka s drobnými úlomky cihel. Mezi 2,0 a 3,4 m se objevuje rezavě hnědý, silně zahliněný hrubý písek s valouny o velikosti 3 – 6 – 8 cm. Hlína v této hloubce tvoří kostru, valouny jsou zastoupeny cca z 30 %. V hloubce 4,2 m je horizont vysoce zvětralé drobové břidlice, která je rozpadlá na drobné úlomky o velikosti 2 cm (70-80 %), obalené písčito-jílovitou zeminou. Od hloubky 4,4 m lze zastihnout poměrně pevné drobové břidlice, jejichž pukliny jsou potaženy limonitem.

Přítomnost hladiny podzemní vody blízko pod povrchem může negativně ovlivnit trvanlivost a kvalitu cihel, kdy se vztlínáním mohou do cihel dostat soli v ní obsažené. Hladina podzemní vody v dané lokalitě kolísá mezi 6 až 10 m (Obr. 21). Souvislý horizont středně až silně mineralizované podzemní vody (Tab. 10) je uváděn z náplavů vinohradské terasy na kótě 229 – 230 m n.m. (Záruba 1948).





0 50 100 150 200 250 m



Obr. 21. Hydrogeologická mapa zobrazující okolí Zemské porodnice (vymezena červeným rámečkem). Tmavě modrá plocha představuje hloubku podzemní vody 2 – 4 m, světle modrá představuje hloubku podzemní vody 4 – 6 m, tmavě zelená plocha odpovídá hloubce 6 – 8 m. Modrými čarami jsou znázorněny hydroizohypsy společně s jejich výškovými kótami, černé tečky v pozadí zobrazují průlinovou propustnost s menší vododajností – písky vyšších teras, náplavy potoků a jeho zvětraliny (zdroj: Geofond, hydrogeologická mapa MO 30-7-2, 1969).

Tab. 10. Rozbor vody ze studně v Apolinářské ulici (Záruba 1948).

Lokalita	výparek (mg/l)	SO <sub>3</sub>	CaO	MgO	celková tvrdost
Apolinářská	1016	156,2	149,9	54,6	22,6

Důkladný průzkum dané lokality probíhal i v 60. letech 20. st., kdy tým geologů mapoval hydrogeologické a inženýrsko-geologické poměry dané lokality, jejichž výsledkem bylo sestavení podrobných map těchto poměrů v měřítku 1:5000. Dle novějších průzkumů se hladina podzemní vody v dané lokalitě se může objevovat již v hloubce 2,9 m. Průměrná hloubka podzemní vody je ovšem stanovena na 3,76 m. V rámci tohoto výzkum byl proveden i odběr vzorku podzemní vody (Tab. 11) ze studně, která se nachází přibližně 100 m severně od severní části obvodové zdi Zemské porodnice. Z toho se dá usuzovat, že složení podzemní vody v místech Zemské porodnice bude velmi podobné.

Tab. 11. Složení podzemní vody ze studny č. 15 v lokalitě Apolinářská ulice (převzato z průvodní zprávy k mapovému listu MO-30-7-2, sestavila Šťastná 1964).

Složení podzemní vody	naměřené hodnoty	jednotky
pH	6,8	
agr. na vápno	6,34	
agr. na železo	12	
Tvrdost celková	42,4	N°
Tvrdost přechodná	13,66	N°
Tvrdost stálá	28,74	N°
Ca <sup>2+</sup>	234,52	mg/l
Mg <sup>2+</sup>	41,42	mg/l
Cl <sup>-</sup>	63,83	mg/l
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	302,04	mg/l
HCO <sub>3</sub>	114,92	mg/l

Jak bylo zmíněno a znázorněno výše, nedaleko Zemské porodnice je situovaná pražská magistrála, po které denně projede vysoké množství vozidel (90 – 100 tis. vozidel během běžného pracovního dne). Co se výfukových plynů týče, Zemská porodnice se nachází ve velmi agresivním prostředí. Nedaleko se nacházející Legerova ulice dlouhodobě vykazuje jedny z nejvyšších emisí a imisí SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, tuhých látek, polétavých popílků a aerosolů (Tab. 12). Tato skutečnost má nepochybně vliv mít na zvětrávání cihel, ze kterých je porodnice postavena.

Tab. 12. Průměrné roční emise vybraných polutantů v Praze ze stacionárních zdrojů za rok 2010 REZZO 1-3 a z dopravy za rok 2010 REZZO 4, hodnoty v t/rok (zdroj: ČHMÚ 5/2012).

	TZL	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO	VOC	NH <sub>3</sub>
REZZO 1-3	415,7	1513,9	2657,3	2056,8	865,09	0,1
REZZO 4	1 549,40	45,6	4 256,40	13 231,60	3 004,60	329,9

V této lokalitě jsou mnohdy překračovány i imisní limity. Podle tabelárního přehledu za rok 2011 byl v tomto směru nejzávažnějším polutantem NO<sub>2</sub>. Okolí Legerovy ulice dokonce vykazuje nejhorší průměrné roční hodnoty z České republiky (Tab. 13). Roční průměrný limit pro NO<sub>2</sub> je dle nařízení vlády č. 350/2002 Sb stanoven na 40 µg/m<sup>3</sup>, v okolí Zemské porodnice u Apolináře je tato hodnota významně překračována (Tab. 13).

Tab. 13. Koncentrace NO<sub>2</sub> na různých lokalitách v ČR, údaje v µg/m<sup>3</sup>.

Lokalita	měřicí stanice	množství
Praha 2 – Legerova	ALEGA	69,5
Brno - Úvoz	BBNVA	48,2
Ostrava – Českoobraská	TOCBA	46,3
Jizerka	LJIZM	13,8
Rýchory	HKRY0	12,9

#### 6.2.6. Prostorová distribuce vodorozpustných solí v ohradní zdi Zemské porodnice v Praze

Podle Zehndera a Arnolda (1991) ionty solí vyluhované z půdy, stavebních materiálů, atmosférické depozice a biologického metabolismu cirkulují ve vodních roztocích skrz zdi a pórovité materiály. V místech, kde se tato voda odpařuje, dochází k akumulaci solí a dalších rozpuštěných látek. V momentě přesycení, dochází k precipitaci různých solných fází a frakcionaci z vícesložkového systému. Zejména se tvoří prostorové sekvence různých solí, které se stávají lokálně koncentrovanými a projevují se jako eflorescence na povrchu a subflorescence pod povrchem porézních materiálů. Všechny soli jsou přenášeny vodními roztoky a všechny druhy vlhkosti v budovách přenášejí rozpustné soli. Tyto vodní roztoky jsou poté v neustálé interakci se stavební konstrukcí a do stavebních konstrukcí se dostávají převážně kapilárním přenosem. Generelně vzato: všechny historické budovy a monumenty vykazují větší či menší poškození převážně ve spodních částech zdí z důvodu povrchové a zemní vlhkosti.

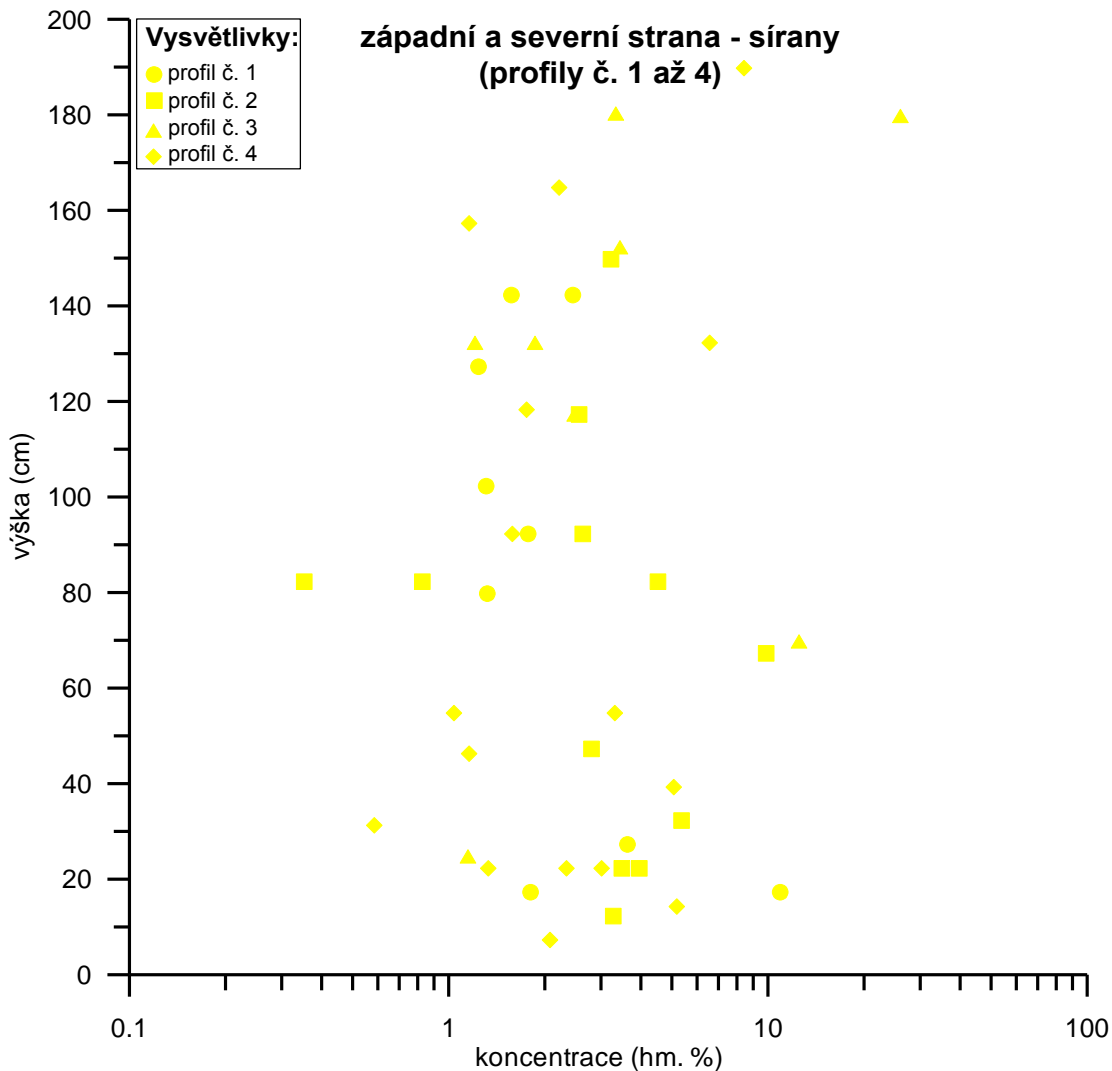
Prostorovou i výškovou distribuci vodorozpustných solí sledovali Zehnder a Arnold (1991) na zdech kostela ve švýcarském městě Müstair. Výsledkem jeho pozorování je model, jenž ukazuje, že k vysrážení síranů dochází ve spodních částech zdi (0 – 110 cm nad povrchem), kde je zeď v kontaktu s podlahou. K akumulaci dusičnanů a chloridů naopak skokově dochází ve vyšších částech zdi (80 – 250 cm), kde zároveň dochází ke snížení obsahu síranů. Ve výšce 110 cm je pozorována nejvyšší akumulace dusičnanů, chloridů i síranů. Od této výšky postupně jejich obsahy klesají. Nejvyšší stupeň poškození zdi kostela v Müstairu je tedy sledován v okolí výšky 110 cm. Na základě pozorování a chemický analýz navrhli Zehnder a Arnold (1991) model vertikální distribuce iontů vodorozpustných skrz zónu stoupající vlhkosti.

Měření obsahu vodorozpustných solí pomocí iontové chromatografie na ohradní zdi Zemské porodnice v Praze potvrzuje její vysoký stupeň poškození. Naměřené hodnoty u síranů, chloridů i dusičnanů vykazují podle ČSN 73 061 (2000) velmi vysoké stupně zasolení. Oproti dříve publikovaným datům (Zehnder a Arnold 1991) ovšem vývoj hodnot obsahu vodorozpustných solí skrz vertikální profil zdi je u některých profilů odlišný. Obecně platí, že nejvyšší obsahy síranů se objevují v nižších partiích stavebních konstrukcí. To je způsobeno tím, že sírany jsou méně rozpustné než dusičnany a chloridy a během evaporace dochází k jejich rychlejšímu přesycení a následnému vysrážení, zatímco více rozpustné ionty se pohybují do vyšších vrstev zděné konstrukce, kde později dochází k jejich akumulaci. Ve 4 studovaných profilech jsou hodnoty síranů obecně velmi vysoké. U profilu 1 na západní straně obvodové zdi je vývoj koncentrace síranů podobný modelu Zehndera a Arnolda (1991). Sírany se zde akumulují především v nejspodnější části zdi, kde dochází k evaporaci podzemní vody bohaté na anionty (SO<sub>4</sub>)<sup>2-</sup>, (HCO<sub>3</sub>)<sup>-</sup> a kationty Ca<sup>2+</sup> a směrem do výšky jejich koncentrace pozvolna klesá (Obr. 20). Dá se předpokládat, že tyto sírany mohou krystalizovat jako sádrovec, protože podzemní voda v dané lokalitě je bohatá na obsah Ca.

Naproti tomu u ostatních profilů se sírany chovají odlišně. Nadále platí, že k akumulaci síranů dochází v nejnižších patrech profilů zdi, ovšem poté v závislosti na poškození jednotlivých cihel začínají hodnoty koncentrace síranu výrazně oscilovat (Obr. 22). K největším oscilacím dochází u profilu 2 na



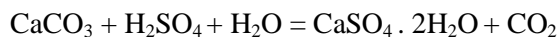
západní straně zdi v úrovni 82,5 cm, kde se stupeň zasolení pohybuje v rozmezí od 0,35 hm. % (nízký stupeň zasolení), přes 0,82 hm. % (zvýšený stupeň zasolení) až po 4,49 hm. %, tedy vysoký stupeň zasolení. Od této výšky stupeň zasolení pozvolna klesá. Průběh zasolení sírany u zbylých 2 profilů na severní straně zdi je až do výšky 180 cm nad povrchem shodný s modelem Zehndera a Arnolda (1991), ovšem v této výšce dochází k prudkému nárůstu zasolení sírany, čímž se výrazně liší od modelu Zehndera a Arnolda (1991), kde k takovémuto signifikantnímu nárůstu nedochází. Otázkou tedy zůstává, jak se mohly málo rozpustné sírany dostat až do úrovně 180 – 200 cm nad povrch? Zajímavá je skutečnost, že u profilu 3 jsou v této úrovni vysoké i hodnoty u chloridů a dusičnanů, zatímco u profilu 4 jsou tyto hodnoty nízké.



Obr. 22. Vývoj koncentrace síranů ve zvětralém povrchu cihel ohradní zdi Zemské porodnice v Praze.

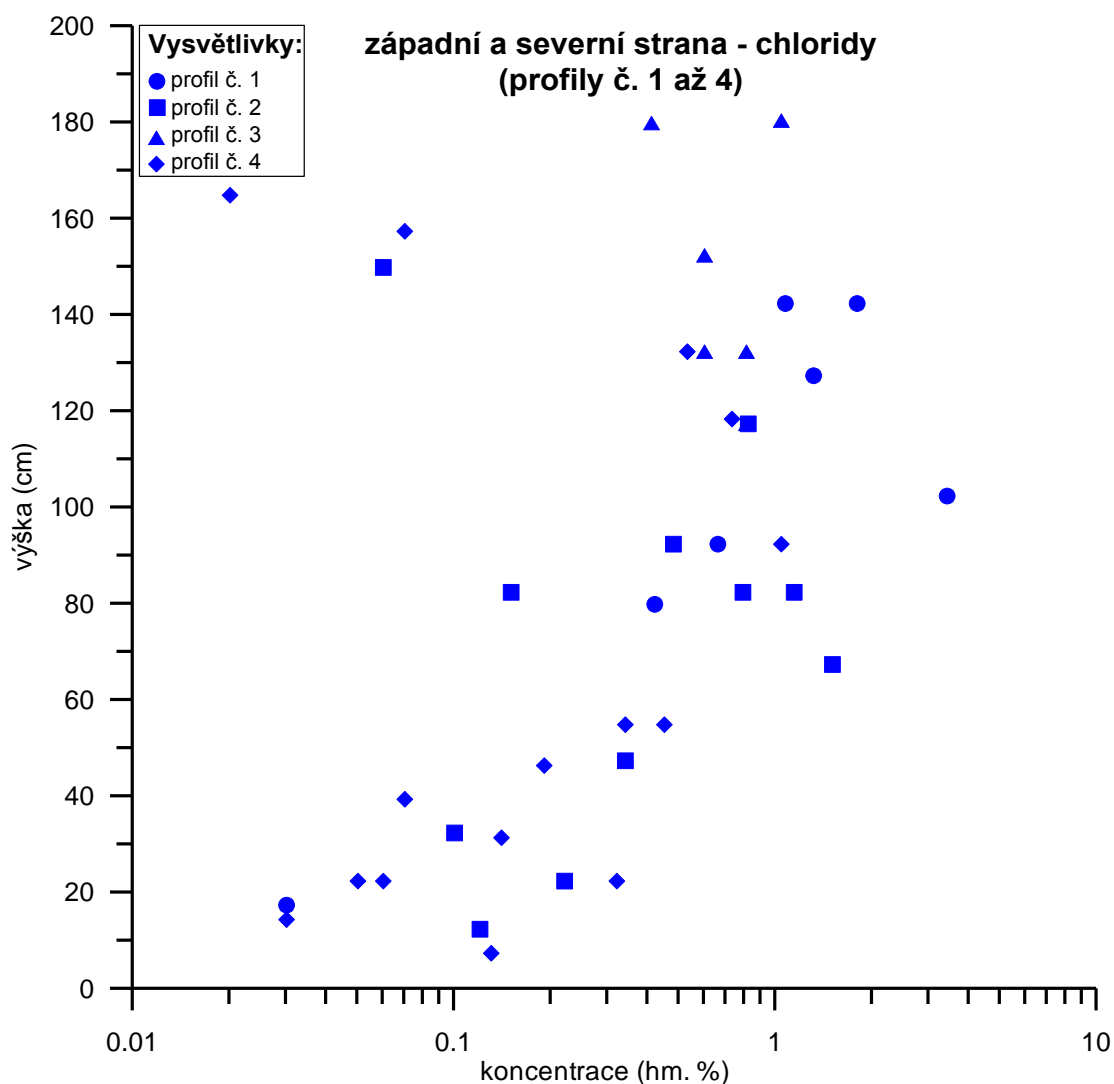
Oba zkoumané vzorky cihel z profilů 3 a 4 z výškové úrovně 180 a 190 cm vykazují stejný typ poškození – tvorbu zčernalých krust původního povrchu. Ty se na kameni i cihle objevují ve velkém množství případů v místech, kde je silně znečištěné ovzduší exhalacemi oxidu siřičitého, který se může zachytávat společně s různými popílky na stavebních konstrukcích (přímá atmosférická depozice). Tento proces lze sledovat i na obvodové zdi Zemské porodnice, jejíž vrchní část je obecně po celém obvodu tvořena cihlami s černými krustami původního povrchu. Mechanismus vzniku

černých krust je řízen přítomností  $\text{Ca}^{2+}$  a reakcí atmosférického  $\text{SO}_2$  s vodou za vzniku sádrovce (Lubelli et al. 2004, Příkryl et al. 2004).

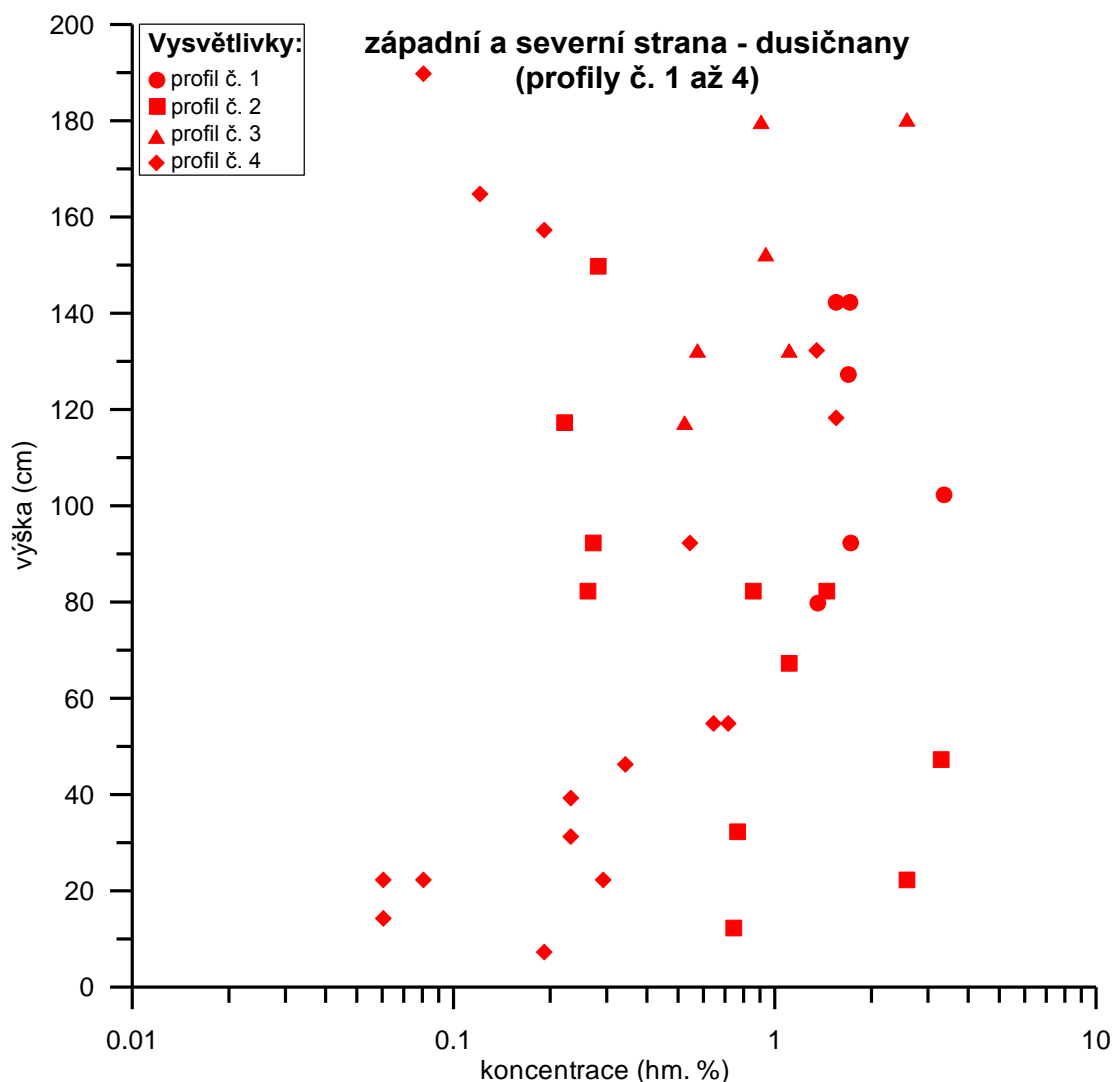


Podle Magureguie et al. (2009) může další roli sehrát přítomnost  $\text{CO}_2$ , který během mokré atmosférické depozice proniká do pórů cihel, kde může reagovat s  $\text{Ca}^{2+}$  a vodou za vzniku  $\text{H}_2\text{CO}_3$  a  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Při reakci této kyseliny s hydroxidy vzniká příslušný uhličitan, který při reakci s  $\text{SO}_2$  ve formě  $\text{H}_2\text{SO}_4$  vytváří sádrovcové krusty. Tímto procesem lze vysvětlit formaci zčernalých krust ve vyšších úrovních obvodové zdi Zemské porodnice.

Chloridy a dusičnany jsou ve srovnání se sírany více rozpustné a tudíž je možné, aby se v této formě dostaly pomocí kapilárního vznosu vlhkosti do vyšších úrovní než sírany (Zehnder a Arnold 1991). Jedná se o místa, kde je dosaženo rovnováhy mezi přínosem vlhkosti a odparem. Tyto soli zůstávají většinou rozpuštěné v roztoku kvůli své hygroskopičnosti. Tím, že jsou silně hygroskopické, nejsou schopné krystalizovat za normálních podmínek. Za normálních podmínek je schopen krystalizovat pouze dusičnan sodný. Ostatní dusičnany jsou schopny krystalizovat jen v době obzvláště suchých klimatických podmínek. Zóny, kde došlo k akumulaci chloridů a dusičnanů (Obr. 23 a 24), bývají obvykle vlhčí a znečištěné a jeví se tmavěji než ostatní zóny.



Obr. 23. Vývoj koncentrace chloridů ve zvětralém povrchu cihel ohradní zdi Zemské porodnice v Praze.



Obr. 24. Vývoj koncentrace dusičnanů ve zvětralém povrchu cihel ohradní zdi Zemské porodnice v Praze.

Čtyři studované profily vykazují převážně velmi vysoké hodnoty zasolení dusičnany a chloridy, pouze profil 4 na severní straně zdi vykazuje širší spektrum naměřených hodnot (od nízkých až po velmi vysoké). Celkově se závislost zasolení dusičnany a chloridy na stoupající výšce od povrchu vyvíjí podobně jako u Zehnderova modelu. V nižších úrovních jsou tyto hodnoty nižší, přičemž směrem nahoru výrazně stoupají, aby ve výšce 120 cm nad povrchem postupně začaly klesat. Podle těchto výsledků se dá předpokládat, že většina chloridů a dusičnanů v ohradní zdi Zemské porodnice zůstává rozpuštěna a akumulují se lokálně během celé historie zdi.

Výjimku tvoří profil 2 na západní straně, kde je koncentrace dusičnanů vysoká již od spodní úrovně zdi těsně nad povrchem. To lze vysvětlit vysokým obsahem vlhkosti v nižší části zdi a zároveň vysokým stupněm poškození jednotlivých cihel, které vykazují poškození drolivým rozpadem nebo mnohvrstevným šupinatěním, které je jedním z projevů přítomnosti chloridů a dusičnanů (Lubelli et al. 2004). Zvýšený obsah síranů může souviset s přítomností NaCl (Lubelli et al. 2004), která zvyšuje rozpustnost síranů, zároveň musí mít dané místo vysoký obsah vlhkosti (vysvětluje zvýšený obsah chloridů a dusičnanů).

Dalším jevem, který nekorresponduje se Zehnderovým modelem (Zehnder 1987), je vysoká koncentrace chloridů ve výšce 180,5 cm nad povrchem na profilu 3 na severní straně zdi, ve které by tyto hodnoty měly již být nízké. Tento jev lze vysvětlit tím, že chloridy i dusičnany jsou schopny pohlcovat kondenzaci více vody, než potřebují k vyplnění svého pórového prostoru. To znamená, že slabě hygroskopická vlhkost je schopna se roztáhnout po větší ploše i do větší výšky. Jiným vysvětlením může být skutečnost, že v dané výšce se na zdi nachází ozdobné prvky (římasy), pod kterými se může zvláště po dešťových srážkách udržovat vyšší vlhkost. V těchto místech se pak mohou akumulovat chloridy i dusičnany.

Podle výše uvedeného se dá soudit, že projevy poškození sírany, dusičnany a chloridy se zřejmě kombinují. Kvůli stoupající vlhkosti jsou dusičnany a chloridy schopny dostat až do této výšky a v těchto místech se poté akumulují a v kombinaci s poškozením sírany, které vytváří zčernalé krusty, působí velmi neesteticky a na pohled výrazně poškozeně.

Toto tvrzení lze podpořit výsledky výzkumu Matsakury et al. (2004), kteří zkoumali změny ve stupni vlhkosti cihelných zdí a zjistili, že vlhkost (která sebou nese i rozpuštěné soli), může vystoupat až do výšky 300 cm (hladina podzemní vody se ve studovaném případě pohybovala mezi 3-4 m pod povrchem, v případě Apolinářské ulice to je 2-6 m). Tam mohou tyto soli v závislosti na klimatických podmínkách vytvářet solné výkvěty nebo být rozpuštěny v roztoku a rozšiřovat se po cihelné konstrukci. Matsakura et al. (2004) předpokládají, že vznik solných výkvětů je spjat se složením podzemní vody a vyluhováním solí, které je urychleno interakcí podzemní a dešťové vody a popílků, usazujících se na povrchu zdí. Solné výkvěty poté souvisí se vztahem mezi relativní vlhkostí okolí, kdy soli krystalizují za podmínek, kdy relativní vlhkost atmosféry je vyšší než rovnovážná relativní vlhkost soli a zároveň je dosaženo nasycení solného roztoku.

#### 6.2.7. Vztah mezi velikostní distribucí pórů, typu poškození cihelného zdiva a obsahu vodorozpustných solí

Z kapitoly 6.2.2. vyplývá závislost typu poškození cihelného zdiva na mrazuvzdornosti jednotlivých cihel. Existuje přímá úměra mezi vysokým stupněm poškození cihly zvětrávacími jevy a nízkou mrazuvzdorností. Zvětrání cihly se pak projeví v podobě jevů, které byly pozorovány na ohradní zdi Zemské porodnice. Ovšem do tohoto vztahu vstupují i vodorozpustné soli, které se do zdiva dostávají buďto z podzemní vody pomocí kapilárního vznosu nebo pomocí srážek. Z výsledků nelze jednoznačně určit přesnou závislost mezi těmito třemi vlastnostmi cihly. Pouze cihly s velmi vysokým obsahem vodorozpustných solí jsou postiženy drolivým rozpadem nepůvodního povrchu (ZP/2/2, ZP/2/11), který se řadí mezi nejzávažnější projevy zvětrání cihel. Naopak vzorek ZP2/9, který má velmi nízký obsah chloridů a dusičnanů vykazuje mnohem vážnější poškození než vzorek ZP/4/3B s podobnými koncentracemi vodorozpustných solí a stejnou výškou nad povrchem. Je třeba pamatovat, že všechny vzorky úlomků cihel (vyjma ZP4/4, ZP4/12, ZP2/2 a ZP 2/11) vykazují velmi podobné vlastnosti, co se distribuce pórů týče (vysoký obsah pórů menších než 2 μm).

V praxi se tak nejspíše jedná o kombinaci všech výše zmíněných vlastností a jevů, přičemž u jednotlivých cihel záleží na jejich konkrétních specifických vlastnostech (percentuální zastoupení jednotlivých pórů, expozice vůči vnějším vlivům, výška, ve které se cihla nachází, koncentrace jednotlivých druhů solí apod.).



### 6.3. Srovnání zvětrávacích forem cihelného zdiva Zemské porodnice s jinými cihelnými konstrukcemi

Srovnání zvětrávacích forem cihel ohradní zdi Zemské porodnice v Praze s jinými cihelnými stavbami není jednoduché. Do procesu zvětrávání totiž vstupuje mnoho činitelů, které se mohou v rámci jednotlivých posuzovaných cihelných konstrukcí lišit. Záleží na složení výchozí suroviny, ze kterých jsou použité cihly páleny, na technologii a teplotě výpalu, na distribuci velikostí pórů, které mají vliv na absorpci mineralizované vody. Mezi hlavních vnější činitele, které ovlivňují zvětrávání cihelných konstrukcí, patří pak klimatické podmínky, ve kterých se cihelné konstrukce nachází.

Je pravděpodobné, že cihelné stavby, které se nachází v tropickém klimatu, budou vykazovat jiné typy zvětrávacích forem než ty, které se nachází v klimatu aridním. V předložené diplomové práci budou stručně porovnány zvětrávací jevy na cihelných konstrukcích, které se vyskytují v podobném klimatu, jako se nachází Zemská porodnice (pec Shimoren – Japonsko), dále konstrukce, které se nachází v mírném oceánském klimatu (kostel Brarup – Dánsko, kostel Domburg - Zeeland – Nizozemsko), dále konstrukce nacházející se v tropickém klimatu (klášter Ayutthaya – centrální Thajsko) a nakonec konstrukce situované v aridnějším klimatu (klášter San Filippo di Fragala – Sicílie).

Ze studovaných článků (Kuchitsu et al. 1999, Cardiano et al. 2004, Lubelli et al. 2004, Matsukura et al. 2004, Larsen 2007, Schiavon et al. 2008) vyplývá skutečnost, že všechny studované cihelné konstrukce jsou náchylné k poškození vodorozpustnými solemi. Poškození z důvodu průniku vodorozpustných solí do cihelných konstrukcí (kostel Brarup, kostel Domburg a pec Shimoren) je závažnější v místech, kde se klimatické podmínky mění častěji v průběhu roku. U těchto konstrukcí se navíc teplota výpalu cihel pohybuje okolo 800 - 900°C. V těchto lokalitách se sezónně mění teplota i relativní vlhkost klimatu (stejně jako v Praze, kde průměrné teploty kolísají od -2 do +22°C a relativní vlhkost se pohybuje mezi 55 – 80%, ČHMÚ 2011), které výrazně ovlivňují rozpustnost sádrovce, halitu a jiných vodorozpustných solí. Dochází tam tak k projevům zvětrávání jako je drolivý rozpad, puchýřování povrchu a tvorbě sádrovcových krust. Tyto projevy zvětrávání jsou přítomné i u cihelné ohradní zdi Zemské porodnice v Praze. Zároveň vykazují tyto konstrukce rozdíly v distribuci vodorozpustných solí. Přítomnost sádrovce a vlhkosti v těchto konstrukcích hraje hlavní roli v procesech jejich zvětrávání. Navíc se tyto konstrukce nachází blízko moře a jsou tím pádem postiženy mořskou solí, která se na ně dostane jako poprašek přenášený větrem. V přítomnosti NaCl se navíc sádrovec stává čtyřikrát rozpustnější a tím pádem se může dostat i do výše umístěných bodů v rámci konstrukce (Larsen 2007).

Na rozdíl od zdi Zemské porodnice tyto 3 konstrukce nevykazují tak vysoké procento černých sádrovcových krust. Je to pravděpodobně způsobeno skutečností, že se dané konstrukce nenachází v průmyslových oblastech, které jsou postiženy silným znečištěným ovzduším, které obsahuje mnoho SO<sub>2</sub>, který se na tomto zvětrávacím jevu podílí.

Naopak cihelná konstrukce v Thajsku vykazuje trochu jiný typ poškození, který závisí hlavně na sezónních klimatických podmínkách. Zdivo je sice opět poškozeno vysokým obsahem vodorozpustných solí, které se do konstrukce rovněž dostávají pomocí kapilárního vznosu z podzemní vody. Jelikož se ale v dané lokalitě střídají období dešťů a sucha, tak přímo úměrně s nimi kolísá i hladina podzemní vody. V období sucha je to 4,4 m pod povrchem a v období dešťů pouze 1,2. V období dešťů je tedy cihelná konstrukce dotována velkým přínosem vlhkosti z podzemní vody a v kombinaci s vysokou relativní vlhkostí dochází k tomu, že většina sádrovce je během tohoto období rozpuštěna spolu s ostatními více rozpustnými solemi. Naopak v období sucha se na konstrukci nachází velké množství solí v podobě bílého prášku. Poškození je nejzávažnější na začátku období sucha, kdy krystalizuje většina solí, které jsou v konstrukci rozpuštěny během období dešťů. Tzn., že solné zvětrávání se v Ayutthaye objevuje v jednoročních cyklech na začátku období sucha v podobě krystalizace solí (Kuchitsu et al. 1999).

Poslední dvě konstrukce se obě nachází v Itálii. U těchto konstrukcí se lze domnívat, že kvůli jejich umístění v místech, kde nejsou velké teplotní výkyvy, u nich nedochází k takové míře zvětrávání, jako je tomu u ostatních. Klášter San Filippo di Fragala se nachází na Sicílii, kde je aridní klima, konstrukce se nenachází blízko moře a dá se předpokládat, že hladina podzemní vody je hluboko pod povrchem. Proto nejsou na cihlách vidět velké známky poškození vlivem vodorozpustných solí. Tuto skutečnost potvrzují i analýzy, které Cardiano et al. (2004) na těchto cihlách provedli. Jejich výsledkem byla skutečnost, že obsah vodorozpustných solí v těchto cihlách je velmi nízký.

Z výše uvedených případů poškození cihelných konstrukcí vyplývá závislost mezi mírou poškození cihel a typem klimatu. V místech, kde se teplota a relativní vlhkost klimatu mění častěji, je míra poškození cihelných konstrukcí závažnější. Dochází zde totiž mnohdy k velkému množství zmrazovacích cyklů, které mají velký vliv na trvanlivost cihel. V tropických oblastech zase záleží na přínosu vody během roku. Zvětrávání je zde vážnější na začátku období sucha, kdy dochází ke krystalizaci solí, které jsou v konstrukci během období dešťů rozpuštěny. Nejmenší poškození ze studovaných objektů vykazuje konstrukce, která se nachází v aridnějším klimatu, kde dochází k nejmenším výkyvům teplot i relativní vlhkosti klimatu v rámci roku.

#### **6.4. Srovnání zvětrávacích forem a procesů cihelného zdiva se zvětrávacími procesy přírodního kamene**

Zvětrávací formy cihelného zdiva a přírodního kamene jsou si v mnohém podobné, protože pálená cihla je v podstatě produkt, jehož výchozí surovinou jsou neuzpevněné horniny. Při výpalu cihel pak dochází k procesům, které se dají srovnat s tepelnou metamorfózou hornin. I z tohoto důvodu se na cihlách objevují podobné projevy zvětrávání, jako je tomu u přírodního kamene. Přírodní kámen má rovněž určitou mineralogii, pórovitost, distribuci pórů, pevnost v tahu a tlaku, odolnost vůči mrazu apod. To jsou ty samé vlastnosti, které se dlouhodobě zkoumají u cihel.

U přírodního kamene rovněž záleží na vnějších podmínkách, se kterými přichází do styku. Jiné projevy má zvětrávání v mírném klimatu než např. v klimatu tropickém. Různé projevy má rovněž v industriálních oblastech, které jsou postiženy vysokými exhalacemi škodlivých plynů ze spalovacích motorů nebo uhelných elektráren, než v oblastech, které nejsou znečištěním ovzduší ovlivněny. Je to dokázáno na sádrovcových krustách, které se vyskytují na sochách na Karlově mostě, které jsou způsobeny předchozími restaurátorskými zásahy a vysokou koncentrací SO<sub>2</sub> v atmosféře (Příkryl et al. 2004). Stejně zvětrávací projevy lze sledovat i na ohradní zdi Zemské porodnice v Praze, stejně jako jsou odprsky, trhliny, úlomkovitý rozpad apod., které spíše souvisí s obsahem vodorozpustných solí a celkovou pórovitostí cihly.

Pórovitá vnitřní stavba přírodního kamene stejně jako u cihel napomáhá pronikání vlhkosti do jeho struktury. Vlhkost přenáší do kamene větší či menší množství vodorozpustných solí, které poté mají vliv na zvětrávací procesy, které se na přírodním kameni vyskytují. Pronikání vlhkosti z podzemní vody (půdy) popsali ve své práci Zehnder a Arnold (1991) pomocí distribuce vodorozpustných solí ve zdivu kostela ve švýcarském Müstairu. Stejný model lze aplikovat i na distribuci vodorozpustných solí v pálených cihlách.

Z výše uvedeného skutečně vyplývá, že zvětrávací jevy přírodního kamene a procesy, ke kterým v něm dochází, jsou velmi podobné těm, které se objevují v cihlách.

## 7. ZÁVĚR

Předložená diplomová práce se zabývala výzkumem cihel z ohradní zdi Zemské porodnice u Apolináře s cílem nejprve stanovit rozsah poškození této zdi zvětrávacími jevy a jejich stanovení a v návaznosti na to určení důvodů, proč tomu tak je. K tomu bylo nutné pokusit se určit zdroj výchozí suroviny, dále určit mineralogické složení výchozí suroviny pro výrobu cihel i mineralogické složení samotných cihel i jejich zvětralých povrchových částí. Z těchto indicií pak došlo k určení pravděpodobné teploty výpalu, která je jedním z hlavních faktorů kvality vypálených cihel. Při výzkumu poškození obvodové zdi byl kladen důraz na obsah vodorozpustných solí a na velikostní distribuci pórů v jednotlivých vzorcích odebraných cihel.

Z předchozích kapitol je zřejmé, že obvodová zeď je velmi poškozená množstvím zvětrávacích jevů. Během *in situ* výzkumu zdi byl potvrzen vysoký stupeň poškození zdi, který se projevuje různými zvětrávacími jevy, z nichž jsou nejčtenější černé sádrovcové krusty původního povrchu, tvorba exokrust, puchýřování, odprsky, černé krusty druhotně zpevněného povrchu, méně často pak mnohvrstvé šupinatění spojené s drolivým rozpadem.

Pomocí RTG difrakce byly stanoveny fáze, které se v cihlách této zdi vyskytují. Z přítomnosti křemene, anortitu, wollastonitu, gehlenitu a cristobalitu byla teplota výpalu odhadnuta mírně nad 900°C, což není teplota, při které by výsledný cihlářský produkt vykazoval nejvyšší kvalitu. Nižší teplotu výpalu lze doložit analýzou texturních vlastností pórového prostoru studovaných cihel. Studované cihly mají velké množství pórů, které jsou menší než 2 μm a zároveň i vysoké procento pórů, jejichž velikost se pohybuje mezi 0,1 – 1 μm, které mají velmi negativní dopad na odolnost cihel vůči mrazu i na jejich nasákavost. Tyto velmi malé póry sice pomaleji přijímají vodu než póry velké, ale zároveň z nich i voda špatně odtéká (vysychá). Z toho důvodu se v nich voda akumuluje déle než ve velkých pórech, což při cyklickém působení mrazu má velmi negativní dopad na jejich mrazuvzdornost. Jelikož se v těchto pórech lépe akumuluje voda, která sebou přináší i vodorozpustné soli, mohou se zde tyto soli rovněž akumulovat a tím poškozovat zkoumané cihly. Tuto skutečnost potvrdila i analýza na obsah vodorozpustných solí (chloridy, dusičnany a sírany), ze které vyplynulo, že jejich obsahy byly v analyzovaných vzorcích v drtivé většině případů velmi vysoké.

Vertikální distribuce těchto solí v rámci zkoumané zdi obecně korespondovala s již dříve publikovanými pracemi. Sírany se povětšinou díky své malé rozpustnosti ve vodě a mobilitě nacházely ve spodních partiích zdi do 55 cm výšky nad terénem, naopak chloridy a dusičnany, které jsou obecně velmi rozpustné ve vodě, se daly sledovat až do výšek 190 cm nad terénem. Vysoké obsahy vodorozpustných solí potvrzuje i složení podzemní vody v dané lokalitě, které je podle zjištění vysoce mineralizována, kapilárním vnosem se dostává do cihelné konstrukce. Tento jev může být intenzivnější v době dešťových srážek. Výjimky, které nekořespondovaly s předchozími pracemi, byly nejpravděpodobněji u síranů spjaty s atmosférickou depozicí SO<sub>2</sub> v oblasti ozdobných prvků zdi, což má za následek tvorbu černých krust, které jsou bohaté na sírany (výzkumná pole 2, 3, 4). Další výjimkou je koncentrace dusičnanů a chloridů již několik cm nad terénem (výzkumné pole 2), což může být vysvětleno lokálně vyšším přínosem vody. Tato skutečnost se projevuje specifickým druhem zvětrávání, kterým je drolivý rozpad. Další odchylku od dříve publikovaného modelu představuje vysoký obsah chloridů ve výšce 180 cm nad terénem (výzkumné pole 3), což by mohlo být vysvětleno opět vyšší lokální vlhkostí způsobenou ozdobnými prvky zdi, pod kterými se může dobře akumulovat voda.

Zemská porodnice u Apolináře patří mezi kulturní památky České republiky. Stupeň poškození její budovy i obvodové zdi je vysoký. Zvětrávací jevy, které se zde vyskytují, působí velice neesteticky a kazí celkový dojem z budovy, která byla na svou dobu velmi moderní a přelomová, o čemž svědčí i skutečnost, že i v dnešní době, 150 let po jejím založení, slouží stále k témuž účelu – jako porodnice.

Vzhledem ke skutečnosti, že je naplánovaná rozsáhlá rekonstrukce budovy zemské porodnice, v rámci které budou rekonstruovány i exteriéry, může mít předložená diplomová práce přínos pro budoucí restaurátorské práce, v rámci kterých bude znát zdroj výchozí suroviny na výrobu cihel, ze kterých byla budova Zemské porodnice postavena. V této diplomové práci jsou rovněž diskutovány mineralogická složení výchozích suroviny i cihel, ze kterých je budova postavena, dále jejich distribuce pórů a obsah vodorozpustných solí. Všechny tyto skutečnosti mohou mít vliv na správné určení cihel, které budou v budoucnu použity při rekonstrukci budovy Zemské porodnice u Apolináře v Praze.

## 8. LITERATURA

- Adamson A.W., Gast A.P., 1997. *Physical Chemistry of Surfaces*. 6<sup>th</sup> ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 784 str.
- Amoroso G.G., Fassina V., 1983. *Stone decay and conservation: atmospheric pollution clearing, consolidation, and protection*. Materials Science Monographs, 11, Elsevier, Amsterdam, 474 str.
- Andrés A., Díaz C., Coz A., Abellán J., Viguri J.R., 2008. Physico-chemical characterisation of bricks all through the manufacture process in relation to efflorescence salts. *Journal of the European Ceramic Society* 29(10): 1869–1877.
- Arnott M., 1990. *Investigation of freeze-thaw durability*. CBAC/IRC Industrial Research fellowship final report, NRC-IRC Report No. 5680.1
- Bain J.A., 1971. A plasticity chart as an aid to the identification and assessment of industrial clays. *Clays and Clay Minerals* 9(1): 1-17.
- Bartošová V., Herichová I., Kašička F., Tomková K., 2010. Barokní opevnění Prahy v trase tunelu Blanka. *Zprávy památkové péče* 70(4): 239–247.
- Benavente D., Linares-Fernández L., Cultrone G., Sebastián E., 2006. Influence of microstructure on the resistance to salt crystallization damage in brick. *Materials and Structures* 39(1): 105–113.
- Benešová K., Beran L., Hermanová H., Hůrková L., Koukalová Š., Kratochvíl P., Líbal P., Petrasová T., Vlček P., Zlámaný M., 2011. *Slavné stavby Prahy 2*. Foibos books s.r.o., Praha, 288 str.
- Bertolin A., Frizzo P., Rampazzo G., 1995. Sulphide speciation in surface sediments of the Lagoon of Venice: A geochemical and mineralogical study. *Marine Geology* 123(1-2): 73–86.
- Bradová E., 2010. *Územně analytické podklady hl. m. Prahy 2010*. Útvar rozvoje hl. m. Prahy, Praha, str. 186.
- Cardiano P., Iopollo S., De Stefano C., Pettignano A., Sergi S., Piraino P., 2004. Study and characterization of the ancient bricks of monastery of “San Filippo di Fragalà” in Frazzanò (Sicily). *Analytica Chimica Acta* 519(1): 103–111.
- Condoleo P., 2010. The Mỹ Sơn Temples in Vietnam: Construction Techniques and Structural Issues. In: Boštenaru M., Příklad R., Török Á. (eds.) *Materials, Technologies and Practice in Historic Heritage Structures*. Springer, Dordrecht, str. 49–68.
- Cultrone G., de la Torre M., Sebastián E.M., Cazalla O., Rodriguez-Navarro C., 2000. Behavior of brick samples in aggressive environments. *Water, Air, and Soil Pollution* 119(1-4): 191–207.
- Cultrone G., Rodriguez-Navarro C., Sebastian E., Cazalla O., De La Torre M.J., 2001. Carbonate and silicite reactions during ceramic firing. *European Journal of Mineralogy* 13(3): 621–634.
- Cultrone G., Sidraba I., Sebastián E., 2005. Mineralogical and physical characterization of the bricks used in the construction of the “Triangul Bastion”, Riga (Latvia). *Applied Clay Science* 28(1-4): 297–308.
- ČHMÚ, 2011. *Znečištění ovzduší a atmosférická depozice v datech, Česká republika*. Český hydrometeorologický ústav, Praha
- ČSN 72 1564, 1986. *Cihlářské zeminy: Společná ustanovení*. Český normalizační institut, Praha, 12 str.
- ČSN 73 061, 2000. *Hydroizolace staveb – Sanace vlhkého zdiva – Základní ustanovení*. Český normalizační institut, Praha, 19 str.

- Drake L.C., 1949. Pore-size distribution in porous materials. Application of high pressure mercury. *Industrial and Engineering Chemistry* 41: 780–785
- Dunham A.C., 1992. Developments in industrial mineralogy: I. The mineralogy of brickmaking, *Proceedings of the Yorkshire Geological Society* 49: 95–104.
- Elert K., Cultrone G., Rodriguez Navarro C., Sebastián Pardo E., 2003. Durability of bricks used in the conservation of historic buildings — influence of composition and microstructure. *Journal of Cultural Heritage* 4(2): 91–99.
- Fernandes F.M., Lourenco P.B., Castro F., 2010. Ancient Clay Bricks: Manufacturing and Properties. In: Boštenaru M., Příklad R., Török Á. (eds.) *Materials, Technologies and Practice in Historic Heritage Structures*. Springer, Dordrecht, str. 29–48.
- Flegl M., 1992. Střešovice na přelomu 18. a 19. století. Stavební kolonizace za pražskými hradbami. *Muzejní a vlastivědná práce* 30(1): 26–32.
- Flegl M., 1999. Střešovice tisícileté. Kapitoly ze stavebního vývoje obce za pražskými hradbami. *Knihovnička časopisu Břevnovan* 2, 20 str.
- Goudie A.S., Viles H.A., 1997. Monitoring of rapid salt weathering in the central Namib Desert using limestone blocks. *Journal of Arid Environments* 37(4): 581–598.
- Hanykýř V., Kutzendörfer J., 2008. *Technologie keramiky*. 2. přeprac. vyd., Silikátový svaz, Praha, 408 str.
- Herichová I., Fridrichová-Sýkorová I., Tomková K., 2012. Tunel Blanka, Tunel do historie Prahy. *Tunel* 21(4): 67–73.
- Hlaváčková L., Svobodný P., 1999. *Pražské špitály a nemocnice*. Nakladatelství Lidové noviny, Praha, 179 str.
- Houdek L., ed. 2008. *Gynekologicko-porodnická klinika „U Apolináře“*. Galén, Praha, 80 str.
- Hrubeš J., Hrubešová E., 1996. *Pražské domy vyprávějí*. ORION Corporation, Praha str. 110–113.
- IUPAC, 1976. Manual of symbols and terminology for physicochemical quantities and units — appendix II. Definitions, terminology and symbols in colloid and surface chemistry. Part II: heterogeneous catalysis. *Pure and Applied Chemistry* 46(1): 71–90
- JCPDS, 1999. *Powder Diffraction File, PDF-2*. International Centre for Diffraction Data, Newtown, Pennsylvania, USA.
- Kopecká I., Nejedlý V., 2005. *Průzkum historických materiálů*. Grada, Praha, 101 str.
- Kornmann M., 2007. *Clay bricks and roof tiles: manufacturing and properties*. www.lasim.org.
- Ksandr K., 1995. Josef Hlávka (1831-1908). *Architekt* 41(1-2): 14.
- Kuchitsu N., Ishizaki T., Nishiura T., 2000. Salt weathering of the brick monuments in Ayutthaya, Thailand. *Engineering Geology* 55(1-2): 91–99.
- Kung J.H., Hansen W., 1988. Pore structure and frost durability of clay bricks. *Material and Structures* 21(6): 443–447.
- Lach V., 1981. *Cihlářská a žárovzdorná výroba*, . Státní nakladatelství technické literatury, Praha.
- Larbi J.A., 2004. Microscopy applied to the diagnosis of the deterioration of brick masonry. *Construction and Building Materials* 18(5): 299–307.
- Larsen P.K., 2007. The salt decay of medieval bricks at a vault in Brarup Church, Denmark. *Environmental Geology* 52(2): 375–383.

- López-Arce P., García-Guinea J., Gracia M., Obis J., 2003. Bricks in historical buildings of Toledo City: characterisation and restoration. *Materials Characterisation* 50(1): 59–68.
- López-Arce P., García-Guinea J., 2005. Weathering traces in ancient bricks from historic buildings. *Building and Environment* 40(7): 929–941.
- Lorenz W., Gwosdz W., 2003. Manual on the Geological-technical Assessment of Mineral Construction Materials. *Geologisches Jahrbuch, Sonderhefte Reihe H*, Heft SH 15: 1–498.
- Lubelli B., van Hees P.J., Groot J.W.P., 2004. The role of sea salts in the occurrence of different damage mechanisms and decay patterns on brick masonry. *Construction and Building Materials* 18(2): 119–124.
- Maage M., 1984. Frost resistance and pore size distribution in bricks. *Materials and Structures* 17(5): 345–350.
- Maguregui M., Sarmiento A., Escribano R., Martínez-Arkarazo I., Castro K., Madariaga J.M., 2009. Raman spectroscopy after accelerated ageing tests to assess the origin of some decayed products found in real historical bricks affected by urban polluted atmospheres. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 395(7): 2119–2129.
- Mallidi S.R., 1996. Application of mercury intrusion porosimetry on clay bricks to assess freeze-thaw durability – a bibliography with abstracts. *Construction and Building Materials* 10(6): 461–465.
- Manning D.A.C., 1995. *Introduction to Industrial Minerals*. Chapman & Hall, London, 276 str.
- Matsukura Y., Oguchi Ch., Kuchitsu N., 2004. Salt damage to brick kiln walls in Japan: spatial and seasonal variation of efflorescence and moisture content. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 63(2): 167–176.
- Moore D.M., Reynolds R.C., 1989. *X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals*. 2. vydání, Oxford University Press, Oxford, 378 str
- Nakamura M., 1988. Indirect evaluation of frost susceptibility of building materials. *American Ceramic Society bulletin* 67(12): 1964–1965.
- Nishiyama T., Kusuda H., 1994. Identification of pore spaces and microcracks using fluorescent resins. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 31(4): 369–375.
- Opekar F., Jelínek I., Rychlovský P., Plzák Z., 2002. *Základní analytická chemie*. Skripta PČF UK, Karolinum, Praha, 201 str
- Orth J., Sládek F., 1870. *Topograficko-statistický slovník Čech*. I. L. Kober, Praha, 1056 str.
- Pavía S., 2006. The determination of brick provenance and technology using analytical techniques from the physical sciences. *Archaeometry* 48(2): 201–218.
- Přikryl R., Svobodová J., Žák K., Hradil D., 2004. Anthropogenic origin of salt crusts on sandstone sculptures of Prague's Charles Bridge (Czech Republic): Evidence of mineralogy and stable isotope geochemistry. *European Journal of Mineralogy* 16(4): 609–617.
- Přikryl R., 2007. Understanding the earth scientist's role in the pre-restoration research of monuments: an overview. In: Přikryl R., Smith B.J. (eds.) *Building Stone Decay: From Diagnosis to Conservation*. Geological Society London, Special Publications, 271, str. 9–21.
- Pytlík P., 1995. *Cihlářství*. Vysoké učení technické, Brno.
- Pytlík P., Sokorář R., 2002. *Stavební keramika: technologie, vlastnosti a využití*. Akademické nakladatelství CERM, Brno, 287 str.

- Robinson G.C., 1984. The relationship between pore structure and durability of brick. *American Ceramic Society bulletin* 63(2): 295–300.
- Rübner K., Hoffmann D., 2006. Characterization of mineral building materials by mercury-intrusion porosimetry. *Particle & Particle Systems Characterization* 23(1): 20–28.
- Sebastian E., Cultorne G., 2010. Technology of Rammed-Earth Constructions (“Tapial”) in Andalusia (Spain): Their Restoration and Conservation. In: Boştenaru M., Příkryl R., Török Á. (eds.) *Materials, Technologies and Practice in Historic Heritage Structures*. Springer, Dordrecht, str. 11–28.
- Schiavon N., Mazzocchin G.A., Baudo F., 2008. Chemical and mineralogical characterisation of weathered historical bricks from the Venice lagoonal environment. *Environmental Geology* 56(3-4): 767–775.
- Sosim S., Zsembery S., Ferguson J.A., 1985. A study of pore size distributions in fired clay bricks in relation to salt attack resistance. In: *Proceedings of the Seventh International Brick Masonry Conference*. Clay Brick and Pavement Institute, Melbourne, 9 str.
- Šolc Jiří, Průvodní zpráva – Dokumentační body MO30-7-2, Projektový ústav dopravních a inženýrských staveb, Praha 1969
- Technická správa komunikací – Praha – Intenzity automobilové dopravy na sledované síti, rok 2012, pracovní den 0 – 24h, TSK, 2012
- Thomachot C., Matsuoka N., Kuchitsu N., Morii M., 2005. Frost damage of bricks composing a railway tunnel monument in Central Japan: field monitoring and laboratory simulation. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 5: 465–476.
- Územně analytické podklady hl. m. Prahy 2010, Odbor územního plánu MHMP,
- Van Balen K., 1996. Expert system for evaluation of deterioration of ancient brick masonry structures. *The Science of the Total Environment* 189/190: 247–254.
- Vlček P., ed., 1998. *Umělecké památky Prahy 2 Nové Město, Vyšehrad*. Academia, Praha, 840 str.
- Wertime T.A., 1973. Pyrotechnology: Man’s First Industrial Uses of Fire: The Neolithic Revolution introduced man to the new energy resources to be had from agriculture and those to be gained by applying fire to fuels and earths. *American Scientist* 61(6): 670–682.
- Winkler H.G.F., 1954. Bedeutung der Krongrößenverteilung und des Mineralbestandes von Tonen für die Herstellung grobkeramischer Erzeugnisse. *Deutsche Keramische Gesellschaft* 31: 337–343.
- Wright G.R.H., 2005. *Ancient Building Technology. Volume 2 Materials. Part 1 Text*. Technology and Change in History, Vol. 7/1. Brill, Leiden, 316 str.
- Zehnder K., Arnold A., 1991. Monitoring wall paintings affected by soluble salts. In: Cther S. (ed.) *The Conservation of Wall Paintings*. Proceedings of a symposium organized by the Courtauld Institute of Art and the Getty Conservation Institute, London, July 13-16, 1987, The Getty Conservation Institute, London, str. 103–135.
- Záruba Q., 1948. *Geologický podklad a základové poměry vnitřní Prahy*. Geotechnica, sv. 5, Státní geologický ústav ČSR, Praha.