České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební

Katedra materiálového inženýrství a chemie

Diplomová práce

2017

Bc. Jiří Hruška

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, pouze za odborného vedení vedoucího doc. Ing. Martina Kepperta, PhD.

Dále prohlašuji, že veškeré podklady, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

……

podpis

Poděkování:

Rád bych poděkoval všem, kteří mi pomáhali při přípravě diplomové práce nebo mě jakýmkoliv způsobem podporovali během jejího vytváření. Nejvíce bych chtěl poděkovat vedoucímu své diplomové práce panu doc. Ing. Martinu Keppertovi, PhD. za nezbytné a podnětné rady, trpělivost a za čas strávený konzultacemi.

Degradace vybraných sedimentárních hornin krystalizujícími solemi

Degradation of selected sedimentary rocks by salt crystallization

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta stavební
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Bc. Hruška Jméno: Jiří Osobní číslo: 396524

Zadávající katedra: Katedra materiálového inženýrství a chemie

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Materiálové inženýrství

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Degradace vybraných sedimentárních hornin krystalizujícími solemi

Název diplomové práce anglicky: Degradation of selected sedimentary rocks by salt crystallization

Pokyny pro vypracování:
Diplomant zpracuje literární rešerši na zadané téma. Experimentálně stanoví odolnost vybraných hornin vůči cyklické krystalizaci různých solí.

Seznam doporučené literatury:
Rybařík V: Ušlechtilé stavební a sochařské kameny České republiky
Benavente D.: The influence of petrophysical properties on the salt weathering of porous building rocks

Jméno vedoucího diplomové práce: doc. Ing. Martin Keppert, Ph.D,

Datum zadání diplomové práce: 26.9.2016 Termín odevzdání diplomové práce: 8.1.2017

[redacted]
Podpis vedoucího práce

[redacted]
Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce" a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací".

26/09/2016
Datum převzetí zadání

[redacted]
Podpis studenta(ky)

Anotace:

Předmětem této práce je zkoumání porézních sedimentárních hornin těžených na našem území. Sedimentární horniny byly po celá léta na našem území populárním stavebním a dekorativním materiálem i přes jejich většinou nízké mechanické vlastnosti. Jedním z největších problémů jejich degradace je krystalizace solí v jejich pórovém systému, a proto je cílem zkoumat jejich trvanlivost při působení krystalizace solí v závislosti na jejich pórovém systému a mechanických vlastnostech. Kameny byly úmyslně vybrány na základě jejich rozdílných pórových systémů a mechanických vlastností.

Klíčová slova: porézní horniny, krystalizace solí, krystalizační tlak, trvanlivostní indikátor

Abstract:

The aim of this thesis is to study porous sedimentary rocks quarried in Czech republic. Sedimentary rocks have been popular construction and decorative materials in Czech republic for ages even though their mechanicial properties are mostly low. One of the biggest problem of their degradation is salt crystallization in their pore system and therefore the aim is to study their durability against salt crystallization according to their pore system and their mechanical properties. All rocks have been chosen purposely on the basis of their different pore systems and mechanical properties.

Keywords: porous rocks, salt crystallization, crystallization pressure, durability estimator

Obsah

Seznam použitých symbolů ... 8

1 Úvod ... 9

2 Zkoumané sedimentární horniny ... 11

2.1 Pískovce ... 11

2.1.1 Úvod do pískovců a historický přehled jejich používání v našich zemích ... 11

2.1.2 Petrografická charakteristika pískovců ... 13

2.1.3 Výskyt pískovců na území České republiky ... 18

2.2 Charakteristika vybraných druhů pískovců ... 20

2.2.1 Božanovský pískovec ... 20

2.2.1.1 Historie těžby božanovského pískovce ... 21

2.2.1.2 Vlastnosti božanovského pískovce ... 22

2.2.1.3 Použití božanovského pískovce ... 25

2.2.1.4 Shrnutí ... 29

2.2.2 Hořický pískovec ... 30

2.2.2.1 Historie těžby hořického pískovce ... 30

2.2.2.2 Ložisko a vlastnosti Hořického pískovce ... 32

2.2.2.3 Použití Hořického pískovce ... 36

2.2.2.4 Shrnutí ... 38

2.2.3 Těšínský pískovec ... 39

2.2.3.1 Ložisko těšínského pískovce ... 39

2.2.3.2 Vlastnosti těšínského pískovce ... 40

2.2.3.3 Použití těšínského pískovce ... 42

2.2.3.4 Shrnutí ... 43

2.3 Opuky ... 43

2.3.1 Úvod do opuk a historický přehled jejich používání v našich zemích ... 43

2.3.2 Petrografická charakteristika opuk ... 45

2.3.3 Výskyt opuk na území České republiky ... 47

2.4 Charakteristika vybraných druhý opuk ... 48

2.4.1 Džbánská opuka ... 48

2.4.1.1 Ložisko džbánské opuky ... 48

2.4.1.2 Vlastnosti džbánské opuky ... 50

2.4.1.3 Použití džbánské opuky ... 51

2.4.1.4 Shrnutí ... 53

2.4.2 Přibylovská opuka ... 54

2.4.2.1 Ložisko přibylovské opuky ... 54
2.4.2.2 Vlastnosti přibylovské opuky ... 55
2.4.2.3 Použití přibylovské opuky ... 57
2.4.2.4 Shrnutí ... 58

3 Vliv vody a solí na stavební materiály ... 59

3.1 Transport a popis chování solí v materiálech ... 59

3.2 Výkvěty ... 61
3.2.1 Primární výkvěty ... 62
3.2.2 Sekundární výkvěty ... 62
3.2.3 Typy výkvětů a jejich zdroje ... 63

4 Experimentální část ... 65

4.1 Provedené zkoušky a experiment ... 66
4.1.1 Rtuťová porozimetrie ... 67

4.2 Prováděné experimenty dle metodiky „Benavente“ ... 68
4.2.1 Fázové diagramy solí použitých pro experimenty ... 69

4.3 Metody pro výpočet krystalizačního tlaku ... 71
4.3.1 Metody výpočtu mezifázového napětí ... 72

4.4 Trvanlivostní indikátory ... 74

5 Výsledky a diskuze ... 75

5.1 Výsledky absorpčního experimentu ... 75

5.2 Stanovení mezifázového napětí a krystalizačního tlaku ... 76
5.2.1 Vstupní data ... 76
5.2.2 Výsledky mezifázového napětí a krystalizačních tlaků ... 78

5.3 Indikátor trvanlivosti a mechanické vlastnosti ... 79

6 Závěr ... 82

Literatura ... 84
Seznam elektronických studijních zdrojů ... 84
Seznam obrázků ... 88
Seznam tabulek ... 90

Seznam použitých symbolů

κ	[$m^2\ s^{-1}$]	součinitel vlhkostní vodivosti
λ	[$W\ m^{-1}\ K^{-1}$]	součinitel tepelné vodivosti
μ	[-]	faktor difúzního odporu
ρ	[$kg\ m^{-3}$]	objemová hmotnost materiálu
σ	[$N\ m^{-1}$]	povrchové napětí kapaliny uvnitř pórového prostoru
φ	[-]	relativní vlhkost
ψ	[%]	pórovitost
DWL	[%]	dry weight loss – „opad ze vzorků“
c	[$mol\ l^{-1}$]	molární koncentrace
h	[-]	hydratační číslo
k	[-]	Boltzmanova konstanta
N_A	[-]	Avogardova konstanta
r	[m]	poloměr pórů
R_g	[$J\ K^{-1}\ mol^{-1}$]	molární plynová konstanta
t	[s]	čas
T	[K, ºC]	teplota

1 Úvod

Přírodní kámen byl, je a bude podstatnou oblastí stavebních materiálů, bez které se většina stavebních objektů neobejde. Na přírodní kámen se dá pohlížet nejen jako na materiál stavební z pohledu fyziky a chemie, ale také jako na věc uměleckou, která do značné míry ovlivňuje naše okolní kulturní prostředí. Při zamyšlení se nad jeho využitím ať už v interiéru či exteriéru, bez většího úsilí nalezneme jistě mnoho příkladů. Využití nemusí být pouze v surovém stavu dané horniny, neboť dnešní moderní doba navíc přeje do značné míry kompozitům, jejichž součástí přírodní kámen často bývá. Možnosti použití stavebního kamene jsou pak tedy velmi široké, a to jak u historických staveb, tak u novostaveb a i uměleckých děl.

Při nahlédnutí na přírodní kámen z toho nejprostšího pohledu jednoznačně dospějeme k závěru, že v povědomí většiny lidí je kámen zafixován jako cosi pevného, těžkého a odolného. Tento přímý přístup samozřejmě ne vždy platí, a pak je třeba respektovat inženýrský přístup a úlohu přírodních věd. Je nutné řešit jednotlivé fyzikální a chemické vlastnosti, obsah a poměr minerálů, rozlišit strukturu, porozitu, nasákavost, objemovou hmotnost a všechny další vlastnosti, které budou reflektovat reálný stav a kondici daného přírodního prvku z hlediska použitelnosti pro daný záměr.

V prvních dvou odstavcích bylo provedeno základní seznámení s úlohou kamene ve stavebnictví, ale je nutné přejít k tomu, že smyslem této práce je jedna konkrétní oblast stavebního kamene, a tou jsou sedimentární horniny. Pro úplnost uvedu, že sedimenty dělíme na mechanické, chemické a organogenní, z čehož i laik vycítí, že v dané klasifikaci narůstá rozmanitost i počet druhů těchto hornin. Aby bylo možné, dostat se k faktickému výsledku bádání, je vždy nutné se zaměřit na konkrétní druhy hornin. Další důležitou věcí je fakt, že lokalita a způsob těžby silně ovlivňují vlastnosti hornin, neboť ta samá hornina při různém způsobu těžby či různém místě těžby bude vykazovat rozdílné vlastnosti a charakteristiky. Z důvodu rozmanitosti těchto hornin je snahou procesy výzkumu nějak zjednodušit, zefektivnit a zrychlit.

Jedním z hlavních faktorů způsobujících degradaci všech stavebních materiálů, hornin nevyjímaje, je voda. Ta do kamenů transportuje soli a další látky,

způsobuje jejich rozpouštění či se s různými solemi sama váže a napomáhá vzniku hydrátů v jejich pórové struktuře. Proces degradace především závisí na vlastnostech daného kamene, na typech přítomných solí, na koncentraci přítomných solí a na vnějších podmínkách, tedy především teplotě. V kamenech následně vznikají výkvěty a dochází k poklesu mechanických vlastností, změně vzhledu a případně k celkovému rozpadu.

V této práci bude tedy řešena jedna z nejničivějších degradací sedimentárních hornin, tedy krystalizace solí v jejich pórové struktuře a následně budou rozebrány možnosti rychlé a relativně přesné klasifikace či identifikace trvanlivosti jednotlivých kamenů po degradaci. Ačkoliv v minulosti několik studií a badání v této oblasti proběhlo, stále se dá říct, že v oblasti sedimentů stále není vše jasně vyzkoumáno a dořešeno, a je zde ještě velký prostor pro výzkum, neboť sedimenty jsou horniny velice různorodé a je jich nespočet.

V teoretické části práce bude obecně pojednáno o vybraných sedimentárních horninách těžených na území České republiky, bude řešena historie jejich použití a těžby, jejich výskyt na našem území, současné využití a mineralogické a mechanické vlastnosti. Nebudou chybět vybrané realizace jak z minulosti, tak ze současnosti. V praktické části bude snahou ověřit trvanlivost těchto hornin v závislosti na zatížení krystalizací solí. Samotný proces je doprovázen tvorbou krystalizačních tlaků v pórové struktuře, a proto se bude práce věnovat i jim. Krystalizační tlaky jsou kapitola sama pro sebe a existuje více možností a teorií k jejich zjištění, ať už výpočtem či pokusy. Pro zatěžování byly vybrány ty soli, které jsou u nás v městském prostoru nejběžnější. Samozřejmě bude brán i ohled na mechanické a další vlastnosti. Zahraniční autoři, především z Francie a Španělska, se již v minulosti snažili stanovit různé indikátory predikující chování kamenů na základě znalostí určitých vlastností, převážně tedy znalostí porozity, avšak bez přesně vymezených hranic jejich použití, a proto je nutné ověřit jejich funkčnost, na horninách těžených na našem území, experimentem.

2 Zkoumané sedimentární horniny

Sedimentární horniny jsou nejrozšířenější horniny na zemském povrchu, jejichž jednotlivé vlastnosti jsou rozdílné. Tato práce má za úkol, věnovat se pouze vybraným sedimentárním horninám a to pískovcům a opukám. Přesněji řečeno, bude se jednat o tři druhy pískovců a dva druhy opuk. Ložiska všech vybraných hornin se vyskytují na území České republiky. Region jejich výskytu udává i jejich název, což bude zřejmé při konkrétnějším pojednání v dalších kapitolách.

2.1 Pískovce

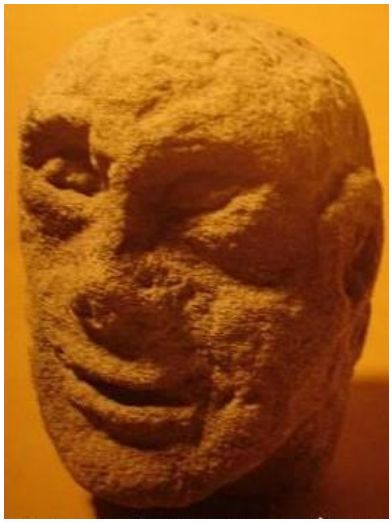
2.1.1 Úvod do pískovců a historický přehled jejich používání v našich zemích

Pískovce jsou pevné klastické sedimentární horniny, které jsou jedněmi z nejrozšířenějších a především v minulosti nejoblíbenějších a nejpoužívanějších užitkových kamenů. Nejvíce se používají v samotném stavebnictví, nicméně díky jejich dalším vlastnostem jako je barva, opracovatelnost, blokovitost a zrnitost se postupem času staly i oblíbenými kameny pro sochařské, architektonické a částečně by se dalo říct i průmyslové účely. Vzhledem k těmto faktům se dají pískovce spolehlivě označit jako takzvané ušlechtilé kameny. Při zamyšlení se nad pískovci jako kameny pro sochařství, se může jevit jako jasná nevýhoda nemožnost leštitelnosti, avšak není náročné je strojně a i ručně opracovávat a určitě se dá říct, že bezprostředně po opracování mají příjemný a pozoruhodný vzhled, ze kterého je jasně vidět podoba toho daného kamene. Dalším superlativem je poměrně častý a různorodý výskyt. Především různorodost výskytu a tím pádem i různorodost vlastností těchto hornin je jedním z důvodů této diplomové práce, neboť jsou velmi zajímavé pro zkoumání.

Další zajímavostí o pískovci je i historie použití samotného názvu pískovec. Jak již bylo výše řečeno, pískovec jakožto materiál byl používán už ve velmi

dávných dobách, ale tehdy byl označován pouze jako „kámen“ či „pískový kámen“, většinou s přívlastkem podle místa původu, například tedy „žehrovický kámen“ z Kamenných Žehrovic. Přívlastky podle místa původu se používají dodnes a v následujících kapitolách bude tento přívlastek pro konkrétní kámen, o kterém se bude zrovna pojednávat, vždy uveden.

V minulém odstavci bylo řečeno, že pískovec byl používán již v dávných dobách. Je tedy třeba si tyto dávné doby přece jen trochu upřesnit. Pískovec byl používán již v pravěku a to především na výrobu různých kamenných předmětů a to především na předměty k mletí obilí. Nicméně již tehdy byly používány i jako umění, přičemž konkrétním dokladem je plastika z jemnozrnného arkózovitého pískovce, která byla nalezena v r. 1957 na hradišti Závist u Zbraslavi. Tato plastika znázorňuje hlavu keltského muže a pochází z latén, tedy nejmladšího pravěku. Je pravděpodobně nejstarším pískovcovým artefaktem na našem území. [1]



Obr. 1: Plastika hlavy keltského muže ze Závisti u Zbraslavi [10]

Co se týče použití přímo na stavebních objektech, je třeba jít dál a to zhruba na přelom tisíciletí našeho letopočtu. Pískovec se využíval při stavění prvních kostelů a klášterů. Nejstarší známé pískovcové stavební objekty z této doby jsou sloupky z krypty bývalé Spytihněvovy baziliky na Pražském hradě (založena r. 1060). V této době bylo užití pískovce na takovéto i podobné účely typické. Jednalo se tedy o ostění oken a dveří, portály atd. U dalších románských staveb se pískovec používal i jako zdící prvek, avšak nepříliš často.

Použití pískovců k architektonickým a sochařským účelům dosáhlo největší obliby až v gotice a to přibližně od poloviny 14. století. Důvodem tohoto rozmachu

byla především kamenická huť ke stavbě chrámu sv. Víta na Pražském hradě, kde se používal prakticky pouze pískovec. Z tohoto období (1372-1378) se zachovaly i latinsky psané účty za opracování a dovoz pískovců ze středních Čech, které jsou nejstarším písemným dokladem o použití tohoto kamene na našem území. Následně v období renesance pískovec příliš používán nebyl, ale poté v období baroka se vrátil na výsluní a stal se hlavním výhradním sochařským kamenem a to u mistrů i prostých lidových umělců, kdy vznikalo tzv. selské baroko. V této době se užíval hojně i v architektuře a stavitelství a to především na portálech, schodištích a ostěních.

Poslední značný rozmach používání pískovce na našem území byl v poslední polovině 19. století do období tzv. historizujících slohů. Jeho počátek byl vyvolán stavbou novorenesanční budovy Národního divadla v Praze (1867-1883), po níž následovaly slohově stejné stavby budov Domu umělců, Zemského, Národního muzea a některých dalších ať už v Praze či jinde na našem území. V této době byla zahájena i dostavba a obnova chrámu sv. Víta v Praze a o něco později i obnova chrámu sv. Barbory v Kutné Hoře. Díky těmto stavbám došlo k vyšší poptávce po pískovci a staré pískovcové lomy se začaly rozšiřovat a začaly se i zakládat lomy nové. Soupis lomů z bývalého Rakouska z r. 1901 velice přesně ukazuje oblíbenost a důležitost pískovce. V tomto historickém soupisu můžeme najít 630 lomů na Českém území, přičemž pískovcových je z této sumy celkově 227 (157 v Čechách, 52 na Moravě a 18 ve Slezsku). Od této doby obliba pískovců v architektuře klesá, nicméně v sochařství je stále pískovec aktuálním kamenem. V současnosti se používá pískovec především na obnovu památek, původně vytvořených z toho samého či podobného kamene. [1]

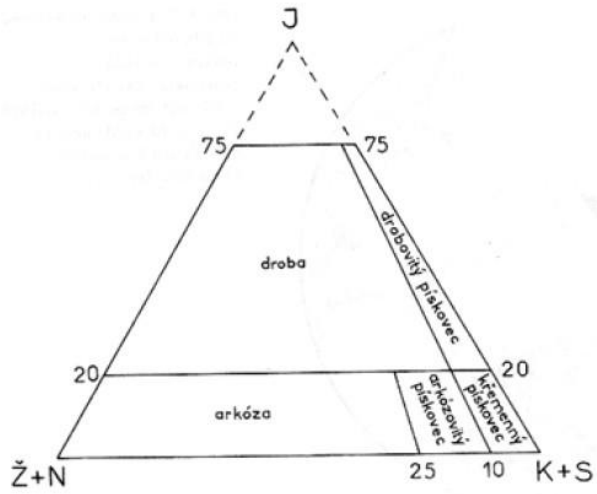
2.1.2 Petrografická charakteristika pískovců

Pískovce se nejpraktičtěji dají popsat jako pevné úlomkovité (klastické) usazené horniny různého petrografického charakteru a to především co se týče nerostného složení a zrnitosti.

Z petrografického hlediska je definice a zejména klasifikace pískovců složitější a není přesně určitelná. Jako pískovce obecně nazýváme pevné klastické

sedimenty, které jsou tvořeny pískovými (psamitovými, tj. velikosti 0,063-2 mm) zrny a nějakou základní hmotou (jíl, prach, úlomky slíd; též matrix).

Klasifikace pískovců jako taková vychází především z jejich nerosného složení a rozděluje je na křemenné pískovce, arkózy a droby. Rozhodujícím kritériem je přitom vzájemný poměr obsahu křemene a úlomků stabilních hornin k obsahu živců a úlomků nestabilních hornin a k obsahu základní hmoty. Tyto základní poměry unifikuje ČSN 72 1001-69 *Pojmenování a popis hornin* a graficky jsou tyto poměry vyjádřeny diagramem na obr. 2. Pro ušlechtilé kamenické a sochařské účely jsou nejvhodnější pískovce křemenné, pískovce částečně arkózovité a také samotné arkózy. Droby a drobovité pískovce jsou vhodné jen výjimečně.



Obr. 2: Základní klasifikace pískovců

J = jíl, slídy (matrix), K+S = křemen a úlomky stabilních hornin, Ž+N = živec a úlomky nestabilních hornin. [1]

Velmi důležitou nerostnou součástí pískovců je tmel, který spojuje jednotlivá písková zrna a ovlivňuje tak technické vlastnosti kamene ať už fyzikální, mechanické, deformační a také hydraulické vlastnosti těchto hornin. Podle způsobu, jakým pojivo vyplňuje prostor mezi zrny, rozlišujeme pojiva resp. tmely na tyto základní typy:

- kontaktní – spojení zrn probíhá pouze na styku, hornina je velmi pórovitá a propustná pro vodu jejími průlinami

- povlakové – zrna jsou obalena po celém jejich obvodu, nicméně póry mezi zrny jsou zachovány (označuje se též jako tmel obalný)
- pórové – jednotlivá zrna se dotýkají a tmel vyplňuje póry mezi nimi
- výplňové – jedná se o mladší tmel, který vyplňuje póry mezi zrny, která byla již v minulosti stmelena starším pojivem (např. dotykovým)
- bazální – klastické částice horniny se nedotýkají a prostor mezi nimi je vyplněn tmelem, který převažuje nad klastickými částicemi
- regenerační – zrna jsou obrůstána tmelem o stejném složení a dochází tedy k dokonalému spojení, což vede ke zvýšení pevnosti horniny

Dalším hlediskem při rozdělení tmelů je podle jejich minerálního složení, které je v daném pískovci nejvíce zastoupeno. Nejčastějším tmelem je železitý (pokud obsahuje limonit – pak má rezavou barvu, pokud hematit – pak má červenohnědou barvu). Dalším tmelem je křemitý (barva šedobílá), dále vápnitý (barva béžová až bělavá) a posledním je glaukonitový (barva šedozelená). Ze značné pestrosti pojiv vyplývá, že s typem přítomného pojiva přímo souvisí i zbarvení sedimentu. [2]

Jedna z dalších klasifikací pískovců vychází z velikosti klastického podílu. To znamená, buď podle průměrné velikosti pískových zrn anebo podle jejich převládající frakce. Takto tedy rozlišujeme pískovce na jemnozrnné s velikostí zrna 0,063-0,25 mm, středně zrnité (střednozrnné) s velikostí zrna 0,25-1 mm a hrubozrnné s velikostí zrna 1-2 mm. Tyto veškeré velikosti odpovídají ČSN 72 1001-69 *Pojmenování a popis hornin*, avšak v naší sedimentologii jsou tyto hranice určitým způsobem odlišné (např. spodní hranice jemnozrnných pískovců a tím i psamitových zrn je 0,05 mm, hranice mezi středně a hrubě zrnitými je 0,5 mm apod.).

Některé méně vytříděné pískovce se skládají kromě z pískovcových zrn i ze zrn větších, která jsou nazývána štěrková (psefitová; podle ČSN 72 1001-69 velikosti 2-128 mm). V takovém to případě, horninu nazýváme slepenčitý pískovec (podle ČSN 72 1001-69 0-25 % psefitových zrn), písčitý slepenec (25-50 % psefitových zrn) anebo slepenec (50-100 % psefitových zrn). Psefitová zrna mohou být opět drobná (2-8 mm), střední (8-32 mm) nebo hrubá (32-128 mm) a podle toho je možno tyto horniny analogicky přesněji označovat jako drobnozrnné, středně zrnité anebo hrubozrnné.

Z výše popsaných skutečností jasně vyplývá, že z důsledků silné geologické variability, a to především co se týče nerostného složení, zrnitosti a typu tmele, mají jednotlivé pískovce velice rozdílné technické vlastnosti. Nejčastěji se u pískovců setkáme s proměnlivou a zvýšenou pórovitostí a tím i objemovou hmotností. Na základě tohoto faktu rozděluje ČSN 72 1800-87 *Přírodní stavební kámen pro kamenické výrobky* pískovce na hutné s objemovou hmotností větší než 2,5 $g \cdot cm^{-3}$ a pískovce hutné pórovité s objemovou hmotností do 2,5 $g \cdot cm^{-3}$. Další typickou vlastností pískovců je nižší mrazuvzdornost a nižší pevnost v tlaku i v tahu za ohybu, které se však po vyschnutí kamene většinou zvyšují. Pro určité druhy pískovců je problematická odolnost proti povětrnostním vlivům, zejména kysličníku siřičitému. Z celkového hlediska jsou tedy pískovce přijatelné jen a pouze pro určité, praxí osvědčené účely, kde lze uplatnit jejich přednosti, tedy snadnou opracovatelnost. [1]

lokalita	hodnota (0	měrná hmotnost [g·cm^{-3}]	objemová hmotnost [g·cm^{-3}]	hutnost [%]	pórovitost [%]	nasákavost v % hmotnosti	nasákavost v % objemu	pevnost v tlaku po vysušení [MPa]	pevnost v tlaku po nasáknutí v [MPa]	pevnost v tlaku po zmrazení v [MPa]	součinitel změknutí	součinitel vymrazení	pevnost v tlaku za ohybu [Mpa]	obrusnost [cm]	poznámka
Božanov	m		2,16			5,50	12,10	58	47	35	0,81	0,60	4,5	0,17	1
	M		2,21			6,50	14,00	72	62	56	0,87	0,77	4,8	0,31	
	Ø		2,18			6,10	13,20	66	56	48	0,84	0,71	4,6	0,26	
Řeka	m	2,66	2,46		3,71	1,24		74	67	62				0,24	2
	M	2,70	2,59		10,52	4,24		112	89	91				0,58	
Kutná Hora - Vyšatova skála	Ø	2,646	2,31	87,34	12,66	4,49	10,80	62	49	44	0,79	0,71	6,1	0,36	3
Choustníkovo Hradiště - Ferdinandov	m		2,19			3,4		42	30	56	0,68	0,69	4,3	0,19	4
	M		2,30			6,3		109	106	86	0,98	0,94	9,9	0,40	
	Ø		2,25			4,6		84	72	71	0,86	0,83	7,7	0,26	
Votuz	m		2,06			3,7	10,30	40	38	33			3,2	0,20	5
	M		2,27			6,9	16,20	73	56	49			6,8	0,76	
	Ø		2,11			6,0		58					5,9	0,49	
Doubrava	m		1,91			3,4	7,40	19	21	23			2,5	0,43	6
	M		2,15			11,9	22,7	64	53	29			5,1	1,65	
	Ø		2,03			8,36		40					4,2	0,89	
Hořice v Podkrkonoší	m		2,00			6,3	13,00	21	12	10	0,57	0,48	2,2	0,41	7
	M		2,07			9,0	18,10	62	53	51	0,95	0,88	6,3	1,00	
Podhorní Újezd	m		1,89			5,45	12,30	17	13	10	0,40	0,40	1,1	0,87	8
	M		2,28			10,11	22,19	45	38	29	0,93	0,86	3,4	3,20	
	Ø		1,96			9,32	18,25	36	24	20	0,73	0,64	2,1	1,61	
Libná	m		2,16			4,6	10,32	33	26	28			2,7	0,23	9
	M		2,25			5,9	12,93	49	49	32			5,2	0,69	
	Ø		2,23			5,3		39	34		0,92	0,70	4,3	0,50	
Mšené lázně	m	2,619	1,85	70,33	26,25	10,8	20,90	23	19	16	0,83	0,70	0,9		10
	M	2,632	1,93	73,75	29,67	13,3	24,60	33	32	28	0,97	0,89	1,6		
Nučice		2,656	2,24	84,81	15,59	6,02	13,50	49	35	32	0,71	0,65	2,1	0,65	11
Úpice		2,646	2,27	85,90	14,1	4,34	9,87	67	46	41	0,69	0,61	7,4	0,52	12
Doksy		2,612	2,24	85,87	14,13	4,54	10,18	51	43	46	0,84	0,9	4,6	0,32	13

Tab. 1: Fyzikální vlastnosti hlavních pískovců v České republice [1]

Poznámky:
0) m = minimum, M = maximum, Ø = průměr
1 = křídový (střední turon) křemenný pískovec, vzorky z lomové stěny
2 = křídový (spodní turon) glaukonitický pískovec, vzorky z vrtů
3 = křídový (cenoman) silně vápnitý pískovec, vzorek z lomové stěny
4 = křídový (cenoman) arkózovitý až křemenný pískovec, vzorky z vrtů
5 = křídový (cenoman) křemenný pískovec, vzorky z vrtů
6 = křídový (cenoman) křemenný pískovec, vzorky z vrtů
7 = křídový (cenoman) křemenný pískovec, vzorky z lomové stěny

8 = křídový (cenoman) křemenný pískovec, vzorky z lomové stěny a vrtů
9 = křídový (cenoman) glaukonitický křemenný pískovec, vzorky z vrtů
10 = křídový (cenoman) křemenný pískovec, vzorky z lomové stěny
11 = permský arkózovitý pískovec až arkóza, vzorek z lomové stěny
12 = permský arkózovitý pískovec, vzorek z lomové stěny
13 = karbonská arkóza, vzorek z lomové stěny [1]

2.1.3 Výskyt pískovců na území České republiky

Pískovce se na našem území kromě kvartéru vyskytují ve všech nemetamorfovaných, případně slabě metamorfovaných útvarech Českého masívu i karpatské soustavy. V Českém masívu tvoří pískovce většinu (43 %), přičemž prachovce a jílovce tvoří (40 %) a ostatní sedimenty (17 %). Co se karpatské soustavy týče, tam je zastoupení pískovců slabší. Nutno ovšem podotknout, že se bavíme o pískovcích v obecném smyslu, tedy kromě křemenných pískovců i o arkózovitých pískovcích, arkóz a drobových pískovců a drob, přičemž jejich zastoupení se různých útvarech liší.

Největší využití z hlediska sochařského a kamenického mají pouze pískovce s vysokým obsahem křemene, tzn. křemenné pískovce, arkózovité pískovce a arkózy, v kvádrovitém nebo hrubě lavicovitém vývoji. Ovšem tyto druhy kamenů se v České republice vyskytují pouze v nemetamorfovaném pokryvu Českého masívu a částečně i v karpatské soustavě v přibližném časovém rozpětí od svrchního karbonu až do terciéru. Přehled výskytů těchto pískovců uvádí tab. 2, kde jsou jednotlivé druhy pískovce uvedeny jednak podle stáří, tak podle regionálně-geologické příslušnosti.

útvar		Český masív	Karpatská soustava
Terciér		Osek, Černovice	BRŇOV - KOZÁK, BRŇOV - MEDŮVKA
Svrchní křída	**střední turon**	BOŽANOV	
	spodní turon	Dolní Žleb (Niedergrund)	
		Malnice	ŘEKA, Čeladná, Zašová
	cenoman	Maletín, Mladějov	
		KUTNÁ HORA - Vyšatova skála, Škrovád	
		CHOUSTNÍKOVO HRADIŠTĚ - Ferdinandov	
		Dvůr Králové n. Labem, Stanovice, Kocbeře	
		Hořice, Vojice, PODHORNÍ ÚJEZD, DOUBRAVA	
		Březovice, Boháňka, Skála, VOTUZ	
		LIBNÁ	
		MŠENÉ - LÁZNĚ	
		Hloubětín	
		Horoušany, Nehvizdy, Vyšehořice	
		Kostelec n.L., Brandýs n.L., Zápy, Sluhy	
Spodní křída			Petřkovice
Trias		HAVLOVICE - KRÁKORKA (U DEVÍTI KŘÍŽKŮ)	
Perm		Drásov, Hluboké Dvory, Železné	
		Nučice, Konojedy, Jevany, Nesperská Lhota	
		ÚPICE, Dolní Lánov	
Svrchní karbon		Plzeňsko	
		Přílepy	
		Kamenné Žehrovice, DOKSY	

Tab. 2: Stratigraficko – regionální přehled hlavních výskytů a ložisek kamenicky a sochařsky využitelných pískovců v České republice [1]

2.2 Charakteristika vybraných druhů pískovců

2.2.1 Božanovský pískovec

V minulosti patřilo mezi jednu nejdůležitějších oblastí těžby pískovců především Broumovsko v severovýchodním cípu Čech. Tam se lámaly převážně svrchně křídové kvádrové pískovce, které se využívaly jak pro účely stavební, tak pro účely architektonické a sochařské a navíc i pro průmyslové účely. Německá vlastivěda Broumovska (1894) uvádí, že v 19. století byla nejvytíženější oblast těžby u obcí Libná (tehdy Liebenau) a Zdoňova (Merkelsdorf), neboť u Libné bylo šest a u Zdoňova čtyři lomy.

Pískovcových lomů bylo této oblasti samozřejmě víc, jako například lom u Honů (Hutberg), Teplic nad Metují (Weckersdorf), Martínkovic (Märzdorf), Božanova (Barzdorf) a Vernéřovic (Deutsch-Wernersdorf; tam se ale jednalo nikoliv o křídové, avšak o permské pískovce). Soupis lomů bývalého Rakouska uvádí z celého Broumovska, resp. tehdejšího okresu Broumov, jen šest lomů u Libné. Lámaly se tam kvádry a desky křídového nazelenale žlutého tzv. libnavského pískovce (Liebenauer-Sadnstein) pro pozemní, vodní a obecně veškeré inženýrské stavby. Vyráběli se tam také brusné kameny o průměru až 2,5 m, které byly mimo jiné vyváženy do Ruska.

Na severní české straně Boru (Spielberg) byly v letech 1873-1875 lámány kvádrové pískovce, které byly využity pro 300 m dlouhý tunel choceňsko-meziměstské dráhy a po roce 1884 na jižní kladské straně dokonce i na mohutné sloupy pro průčelní kolonádu novostavby říšského sněmu v Berlíně.

Druhá světová válka zapříčinila úpadek těžby pískovců na Broumovsku a díky vysídlení zdejšího německého obyvatelstva po válce úplně ustala. V polovině 20. století došlo k určité obnově a to jen u Libné a u Božanova. U Božanova se těžba postupně rozrůstala, u Libné probíhala těžba spíše sporadicky. Postupem času lom v Božanově nabýval na své důležitosti a po roce 1974 se stal hlavním zdrojem kvalitního pískovce u nás. Využíván byl pro stavební, architektonické a i sochařské účely a to včetně rekonstrukce historických památek. [12]

2.2.1.1 Historie těžby božanovského pískovce

Před historickým přehledem těžby tohoto kamene, se bude tento odstavec nejdříve věnovat současným faktům. Těžba božanovského (dříve též broumovského) pískovce probíhá v lomu v lese na severovýchodním svahu v kuestě Broumovských stěn, což je přibližně 3 km jihovýchodně od obce Božanov a necelých 400 m od hranice s Polskem. Lom i ložisko se nachází na katastrálním území Božanov v dobývacích prostorech Božanov a Božanov I. Celá tato oblast se pak nachází v II. zóně CHKO Broumovsko, přičemž základna lomu leží ve výšce 615 m. Božanovský lom je etážový.

Počátky těžby broumovského pískovce jsou neznámé. Pokud bychom se podívali na soupis lomů bývalého Rakouska, jeho lom tam nenajdeme. Lokální soupis lomů pro bývalý okres Broumovsko v rámci edice lomů pro ČSR nebyl nikdy vydán či zpracován. Božanovský kamenolom stejně tak ani není zmiňován v Schallerově (1790) ani Sommerově (1836) topografii království českého, resp. tehdejšího královehradeckého kraje. Kamenolom není ani zakreslen v mapách stabilního katastru Božanova a to z let 1840, 1885 a i 1938.

Ačkoli osídlení v lokalitě Božanova se datuje až do pravěku (podle nálezu archeologického kamenné sekerky), listinné falzum o Božanovu pochází od břevnovských benediktinů, kteří prakticky Božanov roku 1256 založili a jim vlastně i po té dlouhou dobu patřil. Benediktíni vedli jistou knihu účtů novostaveb, resp. přestaveb broumovského kláštera z let 1723-1733, kde je možno najít záznamy o kamenech, které byly použity pro tuto přestavbu a které byly vylomené v božanovském lese. Nutno ovšem podotknout, že kameny byly dle záznamů vylamovány převážně v lese u sousedních Martínkovic a pak i u Vernéřovic. I když se můžeme pouze domnívat, patrně byly kameny ze stejných míst použity i pro novostavbu kostela sv. Máří Magdalény v Božanově, i když písemné záznamy se nezabývají použitím kamene při stavbě tohoto klášterního velkostatku. Dalším faktem je, že německá božanovská obecní kronika z let 1906-1946 říká, že nejvíce kamene při obnově požárem poničeného broumovského kláštera v roce 1670 bylo z božanovského lesa. Nepřímo se o lámání kamene zmiňuje nová německá monografie o obci Božanov (Hofmann 1987). Část této publikace hovoří o místních povoznících, kteří se živili, vožením kamenů z lomu Weissa Stenn v božanovském lese. Spíše pro zajímavost uvedu, že podle publikace byl v roce 1900 odtud odvezen

16 páry koní 160 tun těžký pískovcový blok na nádraží do Mittelsteinu pro jistý památník v Berlíně. Další perlou jsou záznamy o odvezení 60 t bloku v roce 1934 pro válečný pomník v Broumově (dokumentováno i za pomocí fotografií). Zřejmě posledním dokladem o lámání na tomto území je blíže nedatovaná fotografie firmy Alois Pour (kamenoprůmysl v Broumově) s titulkem Lámání kamene v lesích božanovskýchu Broumova. Podle pamětníků tato firma dodávala pískovec na stavbu Právnické fakulty UK v Praze (1924-1927). [14] [12]

Podle veškerých zjištěných informací je zřejmé, že božanovský pískovec byl získáván nejprve rozlamováním balvanů v lese jihozápadně od obce, proto není možné nalézt záznamy o božanovském lomu. Následně byl založen lom, který je v dané lokalitě dodnes, avšak přesné datování založení tohoto lomu se nepodařilo zjistit. Jisté ovšem je, že musel existovat již na počátku 20. století. V roce 1948 se stal součástí národního podniku Severočeský průmysl a následně během komunistické éry se vlastníci tohoto lomu měnili. Od roku 1992 patřil lom firmě Českomoravský průmysl kamene Hradec Králove a od roku 2001 až do dneška patří lom společnosti Granit Lipnice s. r. o., která tam božanovský pískovec stále těží. [12]

2.2.1.2 Vlastnosti božanovského pískovce

Základní vlastností při popisu tohoto sedimentu je určitě jeho barva. Pro božanovský pískovec je nejvíce typické béžové zbarvení, v určitých omezených případech šedobílé nebo naopak rezavě hnědé zbarvení. Často na něm můžeme pozorovat rezavě hnědé šmouhy či skvrny. Co se týče samotné struktury, je stejnoměrně středně zrnitý, avšak občas můžeme nalézt určité omezené části hrubě zrnité. V jeho struktuře je možno makroskopicky nalézt minerály jako jsou světle šedá zrna křemene, růžová až červená zrna draselných živců a také bělavá zrna plagioklasů.

Nyní je třeba konkrétněji probrat zastoupení hlavních složek. Hlavní složkou tohoto pískovce jsou 0,5-1,6 mm velká a subangulárně omezená zrna křemene, které tvoří 71-80 %. Další součástí jsou samozřejmě zrna živců, přičemž 5-8% tvoří plagioklasy a draselné živce o velikosti 0,4-0,8 mm. 3-5 % tvoří úlomky hornin, převážně rohovce a kvarcity, tedy metamorfity. 3-4% může tvořit muskovit. Další

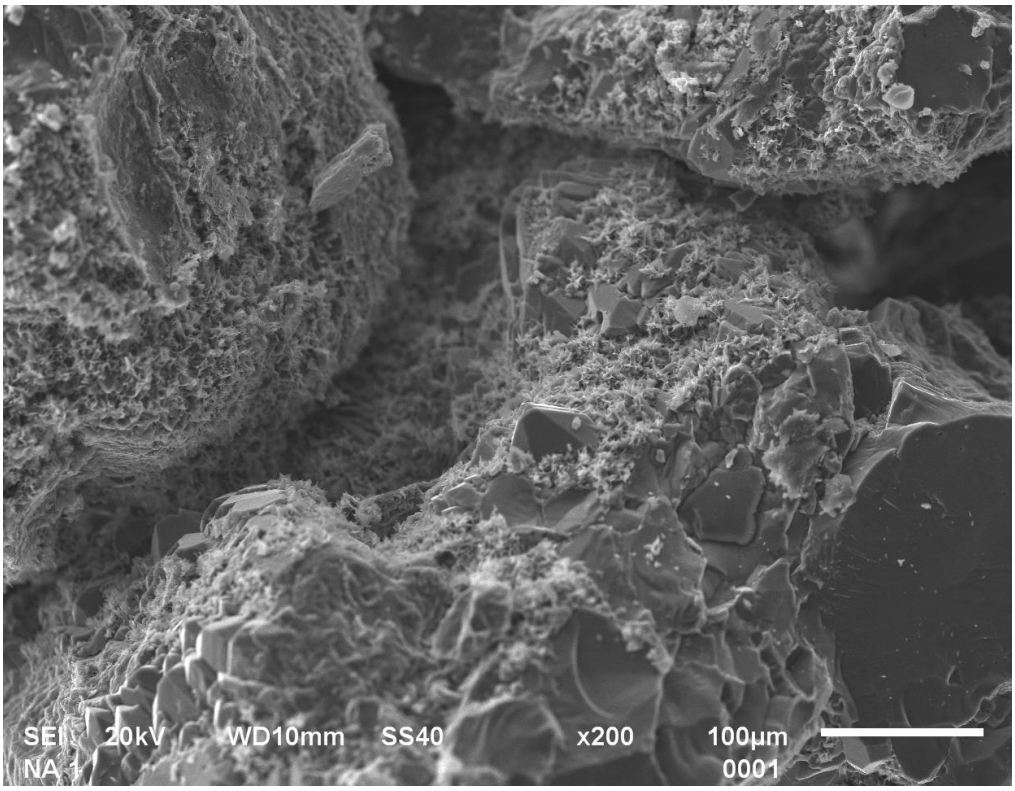
složky v menším zastoupení mohou být poměrně pestré, ať už to jsou šupinky biotitu, zrnka těžkých minerálů (rutil a turmalin), dále limonizovaný pyrit a v určitých případech u hrubších poloh i glaukonit. Mezerní hmota, tedy tmel je kaolnitický. V odborné literatuře se pak tedy hovoří o božanovském pískovci jako o *zrnitém arkózovém pískovci*.

Božanovský pískovec se dá zařadit mezi naše nejkvalitnější pískovce. Co se týče bližších technických vlastností, geologický průzkum a následné zkoušky vzorků z lomové stěny ukázaly tyto vlastnosti. Objemová hmotnost 2,16-2,21 g/cm^3, nasákavost 5,5-6,5 % hmotnosti, pevnost v tlaku po vysušení 65-72 MPa, po nasáknutí 57-62 MPa, po zmrazení 43-54 MPa, pevnost v tahu za ohybu po vysušení 4,5-4,8 MPa, po zmrazení 2,7-3,3 MPa a obrusnost 0,2-0,3 mm.

Samotné ložisko božanovského pískovce se z geologického hlediska nachází na okraji hejšovinské oblasti české křídové pánve a je částí turonského souvrství, přičemž úložné poměry jsou celkem komplikované. Souvrství se uklání pod úhlem 10-15° k severovýchodu. Toto souvrství je ovšem silně porušeno kernými zlomy ve směru severozápad-jihovýchod s posunem 14-17 m a ve směru severozápad-jihovýchod s posunem 1-5 m. Porušení zapříčiňuje tím podmíněnou sloupovitou odlučnost a těžba je značně náročná. Z tohoto důvodu se při těžbě musí aplikovat trhací práce (patní odstřely) a získané nepravidelné kusy horniny opracovat na kvádry odvrtáním či klínováním. Tyto opracované resp. ohraněné bloky se pak převážejí do kamenické provozovny v Teplicích nad Metují. Zbytková surovina se zpracovává rovnou v lomu za účelem hrubých kamenických výrobků, jakými jsou například štípané hranoly, kostky a regulační kámen. Odpad se dále drtí a slouží jako materiál k posypu a údržbě převážně lesních cest. Další ztěžující okolností těžby v této lokalitě je vysoká nadmořská výška, neboť není možné horninu dobývat celoročně. [12]

Obr. 3: Geologická mapa lokality Božanov [9]

Obr. 4: Struktura božanovského pískovce



Obr. 5: Vzorek božanovského pískovce – 200x zvětšeno

2.2.1.3 Použití božanovského pískovce

Realizací, kde byl použit božanovský pískovec, najdeme bezpochyby bezpočet, ať už se podíváme do sochařství, stavebnictví či architektury. Pravdou ovšem také je, že zpětně rekapitulovat a shrnout všechny tyto realizace není vůbec jednoduché, a proto se tato kapitola zaměří především na realizace v Praze, neboť ty byly do určité míry zaznamenány a je jich tam i nejvíce.

Pravděpodobně prvním a na delší čas i jediným použitím tohoto kamene byla novostavba Právnické fakulty UK mezi lety 1924-1927. Po této etapě je třeba se přesunout až na počátek 50. let, kdy začal být používán výhradně na obnovu památek, na které je používán až do dneška.

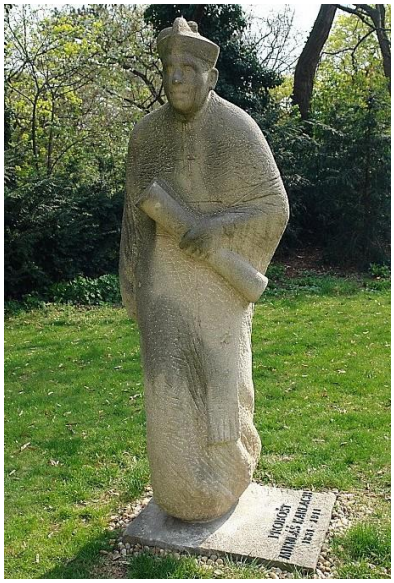
Jednou z nejvýznamnějších památek v Praze je Pražský hrad. Tam byl božanovský pískovec použit na několika místech. Za prvé to jsou obě boční předsunutá zaoblená schodiště v Matyášově bráně, dále v Nejvyšším purkrabství mnohá z dveřních ostěních, stupně a části dlažby na nádvoří, stupně schodiště na Černou věž a také na rohu Zlaté uličky a Jiřské ulice jako vysoký obklad soklu

domu. Z doby nedávné mohutná lavice u vchodu do Jiřského kláštera nebo také dlažba v hale a šatně nového vstupu do Rudolfovy a Nové galerie ve středním křídle a pár nových prvků na nedávno provedené obnově severního průčelí Starého královského paláce. Začátkem 80. let proběhla poslední velká rekonstrukce Národního divadla, kdy byl božanovský pískovec použit především na rekonstrukci balustrády na tzv. Schultzově domě, která zahrnovala i 10 kopií ozdobných váz a 4 obelisků na ní a dále i na masivní bosovanou zeď na východní straně Divadelní ulice. Na přelomu 80. a 90. let proběhla velká rekonstrukce rampy národního divadla, kde byl božanovský pískovec použit na rekonstrukci balustrád a na na nahrazení některých částí resp. kvádrů opěrných zdí.

Další pražské památky určitě nestojí v pozadí. Při rekonstrukci Lichtenštejnského paláce na Kampě na začátku 90. let byl božanovský pískovec použit ve velkém objemu a to na až 4 m vysoký hladký obklad soklu kolem celé budovy. Dalšími aplikacemi jsou kvádrový sokl a zábradlí ochozu v Týnském chrámu, fontána a schodiště Trojského zámku a také ostění a sokly Novoměstské radnice. V nebývalém rozsahu byl také použit při rekonstrukcích Karlova mostu. V letech 1966-1975 a 1986-1988 byl použit při obnově resp. náhradě vadných kvádrů a pak v letech 1996-1997 při rekonstrukci schodiště na Kampu a pak opět v roce 2005 při sanaci resp. zpevňování základů pilířů.

Stejné principy jako u stavebních rekonstrukcí platí i pro rekonstrukce sochařských děl. Největší oblibu si božanovský pískovec získal při rekonstrukcích barokních soch, které byly většinou původně zhotoveny z žehrovického hrubozrnného pískovce. V letech 1969-1970 vytesali z božanovského pískovce V. a K. Hořínkovi kopii sochy sv. Vojtěcha i s podstavcem, která byla následně roku 1973 osazena na Karlův most. Jednalo se pravděpodobně o první případ použití božanovského pískovce jakožto sochařského kamene. V roce 1999 byla stejně tak vytvořena kopie sochy sv. Anny i s podstavcem od sochařů V. Adamce a M. Pokorného. V několika případech soch z jiných různých kamenů (hořický pískovec, mramor atd.) na Karlově mostě je jejich podstavec z božanovského pískovce. Podstavec Braunovy sochy Noc v Královské zahradě Pražského hradu je také z božanovského pískovce nebo třeba i středový obelisk sousoší Nejsvětější Trojice na Malostranském náměstí. V letech 1995-1998 vysekal sochař P. Váňa z božanovského pískovce kopie čtyř soch a tří váz na průčelí kostela sv. Salvátora na Křižovnickém

náměstí a následně vytvořil v letech 2000-2003 kopii volnou kopii sochy P. Marie pro plánovanou obnovu mariánského sloupu na Staroměstském náměstí. Výčet děl by mohl být velmi dlouhý a není hlavním cílem této práce, proto tento odstavec bude ukončen příkladem nového sochařského díla sochy probošta Mikuláše Karlacha v Karlachových sadech na Vyšehradě z roku 2003 od sochaře P. Malovaného. [12]



Obr. 6: Pomník probošta Mikuláše Karlacha [11]

Postupem času vzrůstala obliba božanovského pískovce i v architektuře. Při výstavbě trasy metra B v roce 1985 byla obložena atika vestibulu stanice Smíchovské nádraží. Také byl použit jako materiál pro dlažbu a další drobné prvky jako jsou stupně schodišť, ozdobné zábradlí, koule a obruby v parku před Městským muzeem u stanice Florenc. V roce 1983 se zřítila část Smetanova nábřeží a při následné rekonstrukci byl božanovský pískovec použit na sloupky kovového zábradlí, i když je nutno podotknout, že to je použití spíše drobné. Další drobnou architekturou je i řada patníků z roku 1998 před Toskánským palácem na Hradčanském náměstí.

Novostavba hotelu Four Seasons na Alšově nábřeží byla velkým zlomem použití božanovského pískovce v pražské architektuře. V roce 1997 proběhlo společností Kámen Engineering s. r. o. obložení celé budovy deskami z božanovského pískovce. Jednalo se přibližně o 2600 m^2, přičemž některé desky byly z části hladké, ale většina z nich byla diagonálně rýhovaná. Jedná se o jedno z nejlepších příkladů využití domácího kamene v pražské architektuře po roce 1989. V letech 2000-2001 ta samá firma provedla i obložení novostavby komerční banky

hladkými deskami z božanovského pískovce v zahradě Slovanského domu a to ve množství 785 m^2. Ta samá firma pak v roce 2006 provedla obložení administrativní budovy Gamma v BB centru ve Vyskočilově ulici v Praze 4. Tato zakázka byla objemu 2800 m^2 a to 50 mm desek, parapetů a špalet, přičemž tato realizace je jedna z nejzásadnějších v posledních letech. V pozemním stavitelství ovšem našel božanovský pískovec i další uplatnění. Společnost Jež s. r. o. v provedla hladký obklad domů River Diamond v Karlíně. Provedla tam 1440 m^2 40 mm silných desek a parapetů. Dále bytový komplex Panorama na Strahově, kde se jednalo o 800 m^2 desek a parapetů a také luxusní hotel Mandarin Oriental, kde se jednalo přibližně o 880 m^2 obkladů, dlažeb, obrub a schodů.

Zajímavým použitím jsou i dlažby. Božanovský pískovec jakožto dlažební kámen byl použit například v Hotelu Oriental, Kampa parku a čínském velvyslanectví. Dále také u prezidentské vily v Lumbeho zahradě v množství přibližně 1400 m^2 nebo v Riegrových sadech, kde jednalo o 1200 m^2.

Obdobné realizace jako v Praze se dají najít i v jiných městech v České republice, avšak zajímavější bude se porozhlédnout v zahraničí a to v Německu. Nejzajímavějšími realizacemi tam byly nejspíše obnovy kostela Sv. Petra v Lipsku (Peterskirche) a Dómu v Kolíně nad Rýnem. Avšak je nutno přiznat, že pokud Německo vybírá pískovce ze zahraničí, většinou je bere z Polska a božanovský pískovec je využíván méně a to většinou pouze jako náhrada za pískovec z lokality Schönbuch. [12] [15] [16]

Obr. 7: Hotel Four Seasons Praha [17]

2.2.1.4 Shrnutí

Předpoklady božanovského pískovce jsou velmi dobré, a proto je v současnosti nejvyužívanějším pískovcem. Má dobré technické i estetické vlastnosti a tak je hojně používán v architektuře, stavitelství i sochařství. Samozřejmě je nutno uznat, že má určité neduhy a už z principu jsou sedimentární horniny svými vlastnosti místy nestálé, avšak tomu se nedá v jejich případě nikdy vyvarovat. Jeho potenciál je velký, ložisko má dostatečné zásoby a díky promyšleně prováděné těžbě a zpracování je nanejvíc eliminována přítomnost méně příznivých a nekvalitních partií této horniny. Realizace ze současnosti i z minulosti jasně ukázaly, že je tento pískovec jedním z nejzpůsobilejších a nejkvalitnějších pískovců na našem území. [12] [16]

2.2.2 Hořický pískovec

Tento kámen z Podkrkonoší patří mezi oblíbené svrchně křídové pískovce, které měly v českých zemích vždy dobrou pověst a postavení. Je lámaný na přibližně dvacet kilometrů dlouhém Hořickém hřbetu (dříve Chlumu), což je místo kde bylo v minulosti postupně založeno až sto padesát menších či větších lomů, jejichž význam byl spíše lokální. Lomy uspokojovaly jen místní potřebu, avšak později se jejich oblíbenost rozšířila a dodávali kámen pro stavební či sochařská díla i do vzdálenějších míst na našem území. Na Hořickém hřbetu byly lomy rozmístěny nepravidelně, někdy nahuštěné kolem jedné lokality, jindy zase docela osamocené, nicméně pro všechny platilo, že byly umístěny na jihozápadním úbočí hřbetu. Těžené pískovce v této lokalitě byly nejdříve nazývané podle konkrétních lokalit jejich těžby, takže tam byl těžen pískovec boháňský (obec Boháňka-Skála), újezdský (v minulosti nazýván oujezdský, obec Podhorní újezd), vojický (obec Vojice), doubravský (obec Doubrava) apod., nicméně vzhledem k blízkosti všech těchto lokalit se začaly všechny jednotně nazývat pískovec hořický. Některé menší lokální lomy postupem času zanikly a dnes probíhá těžba jen v lomu v Podhorním Újezdu, který je však největším pískovcovým lomem v České republice. [13]

2.2.2.1 Historie těžby hořického pískovce

Již v dávných dobách se v Podhorním Újezdu i v sousedních Vojicích lámal místní pískovec, ačkoli jen pro místní potřebu. Přesně datovat toto období je obtížné. Do roku 1879 byly tyto obce spojené a v roce 1627 byl v blízkých Valdicích založen klášter řádu kartuziánů, což zapříčinilo nebývalé zvýšení poptávky po místním pískovci, neboť tento řád začal místní pískovec využívat na rozvoj svých stavebních objektů. Tento řád získal v roce 1661 vsi Sobčice a Podhorní újezd a v roce 1718 statek Vojice a svobodný dvůr v Podhorním Újezdu. Z uvedeného výčtu je zřejmé, že řád spravoval relativně mnoho majetku, a proto pro stavební realizace nejen v obcích ale i v širokém okolí využíval právě místní zdroje. V roce 1872 byl řád a klášter zrušen a veškerý majetek byl konfiskován. Kníže Ferdinand z Trautmannsdorfu následně část tehdejšího majetku místního řádu koupil a zajímavostí je, že se stal i

mimo jiné majitelem tzv. Panského lomu, který pronajímal, přičemž výše nájemného byla ze začátku polovina nalámaného kamene. Až později místní platili nájemné penězi.

Císařský otisk mapy a doprovodný parcelní protokol obce Votice z roku 1842 tvořil v minulosti stabilní katastr této lokality. V něm jsou mimo jiné zdokumentovány právě i zdejší lomy. Je v něm zakresleno devět kamenolomů, z nichž největší byl Panský lom, o kterém již bylo zmíněno v minulém odstavci. Díky velké geologické atraktivnosti tohoto území a zájmu o místní pískovec, byla kolem roku 1870 dokončena trať z Chlumce nad Cidlinou do blízké Ostroměře. Dokončení umožnilo logisticky spojit Hořice až s Prahou. Tato možnost byla ve velmi krátkém čase okamžitě využita a hořickým pískovec byl použit při stavbě Národního divadla a od roku 1875 i pro stavbu katedrály sv. Víta. Postupem času přibývaly i další stavby a to nejen na našem území, ale i v zahraničí a hořický pískovec začínal nabývat na své důležitosti. V roce 1870 byl též otevřen tzv. Obecní lom (Obecnice), který byl vlastněn šestnácti místním starousedlíkům a tento lom byl po Panském lomu druhý největší na tomto území. Lomy a kamenictví dosáhly určité společenské důležitosti, lomy zde tvořily největšího zaměstnavatele a v roce 1877 byl v podhorním újezdě založen *Spolek kameníků v Újezdě Podhorním*, který až do roku 1927 vedl svojí kroniku. V kronice je možné dohledat údaje o množství či rozmístění lomů včetně informací o vlastnících či nájemnících. V roce 1896 bylo v Podhorním Újezdu založeno *I. výrobní družstvo samostatných živnostníků kamenických a sochařských v Újezdě Podhorním*. Jednalo se o podnikatelský subjekt, který měl za úkol vytvořit konkurenci místnímu dělnickému spolku. Jasně ukazuje stálý rozvoj tohoto území, neboť toto družstvo v roce 1903 vylomilo v tzv. Šulcově lomě neobyčejně velký pískovcový monolit. Tento monolit byl pak dopraven do Hořic a byl postaven na vrcholu Gothard jako tzv. Riegrův obelisk. Tento obelisk měl na výšku 12,4 m a váhu 39,6 t. Dalším zajímavým kouskem je vylomení masivního bloku o rozměrech 30 x 8 x 5 m v lomu v Podhorním Újezdu, který v této době vlastnil Jan Novotný, který již v roce 1910 začal se strojním zpracováním pískovce (brousící stroje, soustruh) a u státní silnice se zřídil i dílnu, která však byla na začátku první světové války uzavřena.

V průběhu první světové války musela velká část zaměstnanců lomů odejít na frontu a obecně došlo ke snížení poptávky po hořickém pískovci. Tyto skutečnosti

vedly k naprostému úpadku těžby nejen v Podhorním Újezdu ale na celém Hořicku. Místní rodák Alois Pour, který vlastnil dva lomy v Podhorním Újezdu, na konci dvacátých let začal v Ostroměři stavět vlečku, na kterou navazovala i stavba strojní kamenické dílna, což vedlo k určité obnově tohoto území. Problém však nastal nedlouho potom, neboť v roce 1928 přišla světová hospodářská krize a tato situace vedla k propouštění, stávkám a omezování těžby. Následně v roce 1931 si propuštění zaměstnanci založili vlastní společnost Kámensdruž, lidové výrobní a pracovní družstvo kameníků, které prakticky s určitými přestávkami fungovalo až do roku 1960. S příchodem komunismu bylo přičleněno k jinému družstvu v Turnově a pak k družstvu v Jaroměři. V roce 1963 bylo pak přiřazeno k JZD Budovatel v Podhorním Újezdu.

V druhé polovině 30. let začalo docházet k určitě obnově těžby a zpracování kamene na Hořicku. Problém však byl, že tato situace netrvala dlouho a znovuvzkříšení kamenictví bylo opět přerušeno, a to druhou světovou válkou. Po ní byla vyvlastněna Pourova dílna v Ostroměři, dva Pourovy lomy v Podhorním Újezdu a i další lomy (Úpice, Lánov) a převzala je národní správa. Provozovny v Ostroměři a Podhorním Újezdu, Pourovy lomy, Šulcův lom a lom Obecnice od roku 1948 spadaly pod společnost Severočeský průmysl kamene Česká Lípa, později Liberec, později lomy převzala společnost Stavební hmoty Náchod, poté do roku 1965 Východočeský průmysl kamene n. p. Skuteč. Lom Obecnice od roku 1963 spadal pod JZD v Podhorním Újezdu a takto by se dalo pokračovat neustále dál a dál. I dál v komunismu lomy postupně měnily své pomyslné majitele a není to v zásadě úplně podstatné. V roce 1996 konečně vznikla soukromá společnost Kámen Ostroměř s. r. o., která však v této lokalitě v současnosti provozuje jediný pískovcový lom a to je lom v Podhorním Újezdu. Z původních téměř sto padesáti lomů se tedy do dnešní doby zachovala těžba pouze v něm. [13]

2.2.2.2 Ložisko a vlastnosti Hořického pískovce

Na počátku dnešního lomu stály nejprve tři různé lomy. Byl to lom Šulc (Šulcovna), Pácal a Zadní (Pour). Postupným propojením vznikl 300 m dlouhý Podhorní Újezd, který leží na východ od stejnojmenné obce. Lom je odkryt do výšky

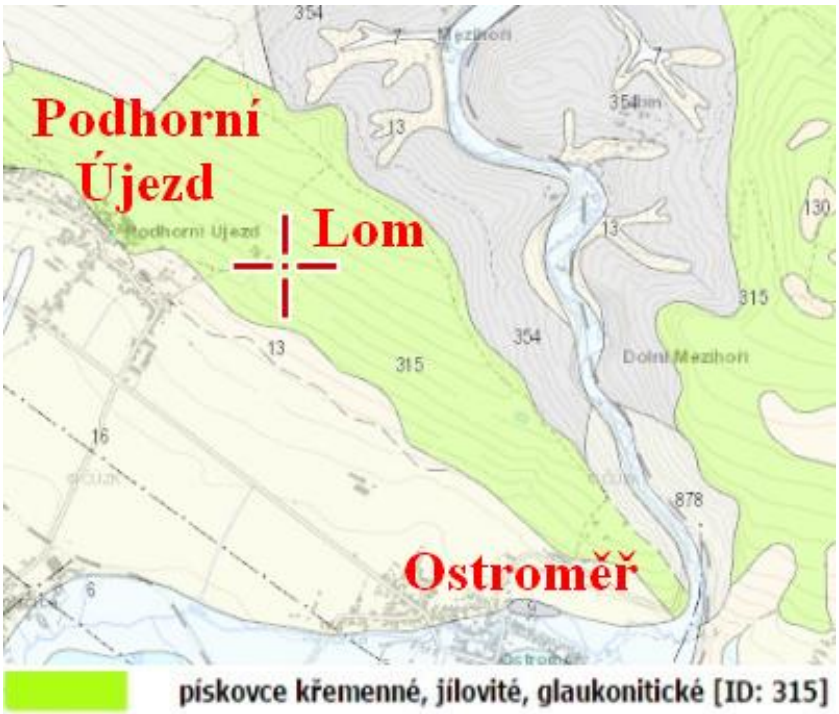
téměř 30 m a je podle všeho rozdělen na tři etáže. Ložisko je z geologického hlediska rozděleno na dvě hlavní části, přičemž v každé z částí v minulosti proběhl geologický průzkum. V letech 1956-1957 byl proveden geologický průzkum na jihovýchodním předpolí lomů Šulc a Zadní. Průzkum byl proveden na ploše přibližně 450 x 240 m, přičemž toto ložisko bylo pojmenováno jako Podhorní Újezd (dobývací prostor Podhorní Újezd). V letech 1972-1974 pak proběhl průzkum na dalším území, což bylo východní předpolí lomů Šulc a Pácal. Tento průzkum o rozloze 450 x 170 m první ložisko prakticky rozšířil a byl označen jako Podhorní Újezd I (dobývací prostor Ostroměř). Na celém ložisku byl ještě v letech 1986-1981 proveden jeden celkový průzkum, který potvrdil poznatky z minulých průzkumů, avšak tento průzkum nebyl zcela dokončen.

Mírně ukloněné souvrství kvádrových jemnozrnných křemenných pískovců mořského cenomanu jihozápadního křídla hořické antiklinály o mocnosti přibližně 12 až 14 m, které je ukloněné pod úhlem přibližně 8° k jihozápadu tvoří ložisko Hořického pískovce. Podkladní vrstvy jsou většinou jílovitého charakteru. Jedná se především o jílovité pískovce, písčité jíly a někdy i silně rezavé pískovce sladkovodního cenomanu, pod kterými jsou permské arkózovité pískovce a slepence. Nadloží je tvořeno kvartérními hlínami, písky a sutí do mocnosti 4 m. Dále je nadloží tvořeno také deskovitými pískovci mořského cenomanu o mocnosti 0,6-2,6 m. Již při prvním geologickém průzkumu bylo jasně třeba definovat kvalitu místních zdrojů. Proto bylo souvrství ložiska rozděleno na svrchní a spodní polohu. Svrchní poloha o mocnosti 8-9 m byla určena jako vhodná pouze pro hrubé kamenické výrobky. Spodní poloha o mocnosti 5-6 m byla určena pro ušlechtilé sochařské a kamenické výrobky. Mezi polohami ještě byla takzvaná shnilka, což byla nejméně mocná vrstva té nejhorší kvality. Rozdílné vlastnosti horniny v těchto polohách jsou způsobeny především rozdílným množstvím a rozmístěním pórů a dále také vzájemným sepětím klastických zrn s mezerní hmotou.

Hořický pískovec je tvořen z 60-80 % klastickými zrny křemene, 5-20 % mezerní hmotou, což je většinou směs kaolinitu ze skupiny jílovitých slíd a 10-20 % různě velkých pórů. Barva je ve většině případů světle béžová, avšak jak už to tak u pískovců bývá, zbarvení se může lokálně lišit, proto je možné ho najít i ve zbarvení okrovém s rezavým šmouhováním či mramorováním, narezavělém, nahnědlém, bílošedém, bílém a i nazelenalém pokud obsahuje glaukonit.

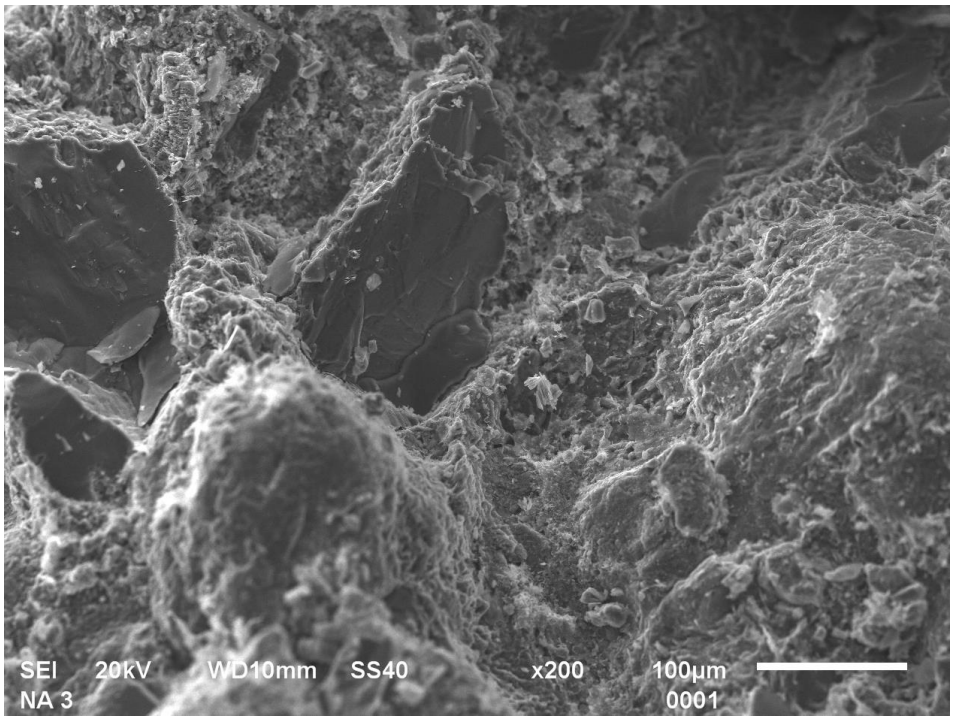
Jak již bylo řečeno, hořický pískovec má značně rozdílné vlastnosti, podle polohy, ze které ho těžíme. V letech 1956-1957 byl proveden první geologický průzkum, který však přinesl velmi rozdílné informace, resp. ukázal velmi proměnlivé mechanické vlastnosti. Různé laboratoře s různými vzorky tehdy přinesly rozdílná data. Hlavním důvodem takové rozmanitosti byl různý charakter a rozdílný odběr vzorků. Některé vzorky byly z lomové stěny, jiné zase z vrtného jádra, dále se také lišily odběry z vrstev a navíc každé laboratoře prováděli jinou metodiku zkoušek. Z uvedených důvodů je nutno říct, že poslední systematický dobře provedený geologický průzkum byl proveden v roce 1999, kdy z jednotlivých vrstev svrchní netěžené a východní těžené stěny lomu bylo vždy odebráno po šesti vzorcích. Tento průzkum ukázal tyto hodnoty: objemová hmotnost 1,8-2,0 (1,9-2,1) $g \cdot cm^{-3}$, nasákavost 7,2-11,1 %, pórovitost 13,6-19,9 %, pevnost v prostém tlaku po vysušení 10,7-28,2 MPa a pevnost v tahu za ohybu 1,1-4,1 MPa.

V ložisku je důležité zaznamenat pukliny a vrstevní plochy. Ty podmiňují samotnou blokovitost tohoto pískovce. Pukliny jsou buď svislé směrů SSZ-JJV až S-J či navzájem kosé ve směru SZ-JV a Z-V. Většina přirozených bloků není objemu většího než 4 m^3, nicméně pro zajímavost uvedu, že v roce 1993 vylomili a opracovali blok velikostí 435 x 200 x 160 cm, tj. 14 m^3. Tento obrovský blok byl použit na kopii Branova sousoší Vidění sv. Ludmily Karlova mostu. Další dva úspěšné kusy se povedly ještě v roce 2007, které měly 10 a 12 m^3 a ty byly použity pro novou Křížovou cestu u Kuksu. Dobývání bloků se provádí odvrtáním řady svislých vrtů a následným použitím trhavin. Pro představu, kolik může takový lom produkovat kamene, bude uvedena statistika z let 2006-2008. V těchto letech bylo vylomeno a zpracováno celkem 4257 bloků o průměrném objemu 1,79 m^3, navíc je ještě nutno přičíst vedlejší produkty jako jsou štípaný, záhozový a netříděný kámen, jejichž množství jsou v řádu stovek tun za rok. [13]



Obr. 8: Geologická mapa lokality Hořice [9]

Obr. 9: Struktura hořického pískovce



Obr. 10: Vzorek hořického pískovce – 200x zvětšeno

2.2.2.3 Použití Hořického pískovce

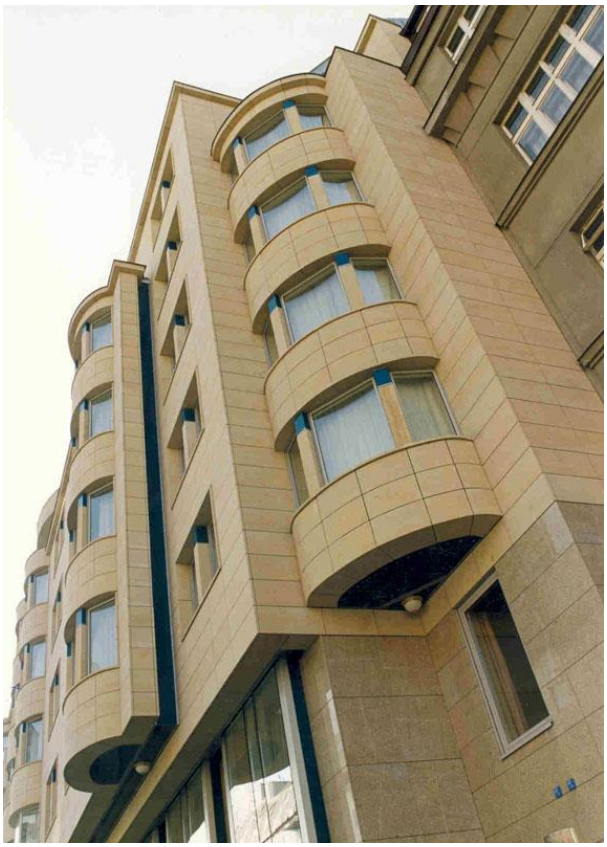
Hořický pískovec se s určitými přestávkami do dnešní doby těší přibližně 150 let těžby. Je jasné, že za tak dlouhé období byl použit na nespočetném množství stavebních objektů, v sochařství a ostatních jiných inženýrských děl ať už na našem území či v cizině. Jak již bylo řečeno, pískovec, který označujeme jako hořický, zahrnuje více lomů a lokalit a zpětně je velmi těžké určit, kde přesně byl z jakého lomu použit. Nejdůležitějším lomem je bezesporu lom u Podhorního újezdu, který je i uveden v soupisu lomů bývalého Rakouska z roku 1901. Tam je i uvedeno, na kterých stavebních objektech byl využit. Pískovec z Podhorního Újezdu byl tedy použit při novostavbách Národního divadla (po roce 1870), Národního divadla, Rudolfina, Živnostenské banky, dostavbě chrámu sv. Víta (od roku 1880), opravě Karlova mostu (po povodni v roce 1891) a Myslbekova sousoší na Palackého mostě (z Panského domu). Mimo Prahu to byla oprava chrámu sv. Barbory v Kutné Hoře, novostavby muzea a divadla v Plzni, novostavby muzeí v Liberci a novostavba muzea v Chrudimi. Ve Vojicích, sousední vesnici Podhorního Újezdu na první venkovský pomník a to Jana Husa a třeba také již výše uvedený Riegrův obelisk

v Hořicích. Obliba hořického pískovce trvala i v 20. století, jasným důkazem jsou tyto realizace. Novostavba Zemské banky, novostavba Městské spořitelny, oprava Prašné brány, novostavba Městské spořitelny a určitě ještě mnoho dalších. Pro úplnost je ovšem nutné dodat, že u těchto realizací nevíme přesný původ kamene, resp. víme, že se jednalo o hořický pískovec, ale konkrétní lom není znám.

Od roku 1963 je zdroj Hořického pískovce v zásadě jasný, neboť všechny lomy kromě lomů Podhorní Újezd a Obecnice byly uzavřeny. V roce 1987 pak byl uzavřen i lom Obecnice a v dnešní době funguje pouze jeden lom a to v Podhorním Újezdě. V tomto období byl místní pískovec asi nejvíce použit na rekonstrukci děkanského chrámu v Mostě, Národního divadla a Mlýnské kolonády v Karlových Varech. Hořický pískovec se v této době těšil oblibě i v sochařství. Byly z něj vytvořeny kopie soch sv. Mikuláše Toletinského, sv. Augustina, sv. Luitgardy a sv. Ludmily na Karlově mostě, dále kopie sochy sv. Václava na Vyšehradě nebo také sousoší Rozhovor ve Voršilské zahradě u Národního divadla. V roce 1966 bylo z bloků pískovce z Podhorního Újezdu vytvořeno mnoho děl, které jsou nyní rozmístěné na vrchu Gothard nad Hořicemi. Pokud se podíváme do současnosti, nejzásadnějším dílem bude nejspíše patnáct skulptur nové Křížové cesty u Nového lesa nad Stanovicemi nedaleko Kuksu. Dokončení a osazení těchto děl proběhlo v roce 2008.

Co se týče průmyslového využití, v provozovně v Ostroměři se hořický pískovec zpracovává na různě silné dlažební, obkladové, a parapetní desky. Ty mohou být řezané hladké či různě povrchově opracované. Další sortou je také štípaný obklad na veškeré architektonické či stavební prvky. Jelikož provozovna vlastní automatickou vyřezávací pilu, je schopna vyrobit jakékoliv profilované prvky na zakázku a pokud by byla zakázka atypická, je možné využít služeb sousední kamenické dílny, kde jsou výrobky tohoto typu zpracovány ručně.

V roce 2013 započala v Berlíně výstavba repliky původního císařského zámku (Berliner Stadtschloss), u kterého již byla dokončena hrubá stavba a nyní se provádí společně s interiéry i fasádní obklad. Na jeho fasádu bude použit jako jeden z obkladních kamenů i hořický pískovec. Přímo v Ostroměři ve zpracovatelské dílně se vyrábí kuželky, římsy a balustrády. Ostatní prvky jsou vyráběny v závodě v Bamberku v Německu, kam je pro tyto účely hořický pískovec dodáván. [13] [21] [22]



Obr. 11: Fasáda z hořického pískovce, Hotel Marriott Praha [17]

2.2.2.4 Shrnutí

Hořický pískovec je možno bezpečně zařadit mezi oblíbené pískovce na našem území ať už v minulosti, tak i v současnosti. Nejvíce je využíván na staticky nenamáhaných stavebních objektech a na různé architektonické aplikace. Tomuto využití samozřejmě nahrává jeho příjemný vzhled a jeho mechanické vlastnosti. V minulosti byl oblíbený na různá sochařská díla, což platí až do dneška, neboť se s ním můžeme setkat nejčastěji u kopií různých sochařských děl. Jediným zdrojem Hořického pískovce je lom v Podhorním Újezdu společnosti Ostroměř s. r. o., který je zároveň i největším lomem v České republice. Úložné i těžební poměry tohoto lomu jsou velmi příznivé. To znamená, že se tam nachází velké množství ověřených zásob, což zaručuje možnost těžby ještě na mnoho let do budoucnosti a také je tam možné vylamovat velmi velké bloky této horniny. Další výhodou je, že provozovna v Ostroměři je schopná vyrobit standartní, ale i atypické pískovcové výrobky. Hořický pískovec tedy splňuje všechny předpoklady být i nadále v budoucnosti oblíbeným a využívaným kamenem. [13]

2.2.3 Těšínský pískovec

Těšínské nebo takzvané godulské pískovce jsou velmi tvrdé horniny většinou zeleného či žlutého zbarvení. V minulosti se lámaly u Čeladné a Zašové. Je tedy možné se setkat s označením valašský či zašovský pískovec. Tento pískovec byl použit mimo jiné i na výzdobu radnice ve Zlíně. Dalším ložiskem je dvojice lomů Řeka u stejnojmenné obce Řeka. V této dvojici lomů v současnosti probíhá aktivní těžba a zároveň jsou největšími pískovcovými lomy na Moravě. [1]

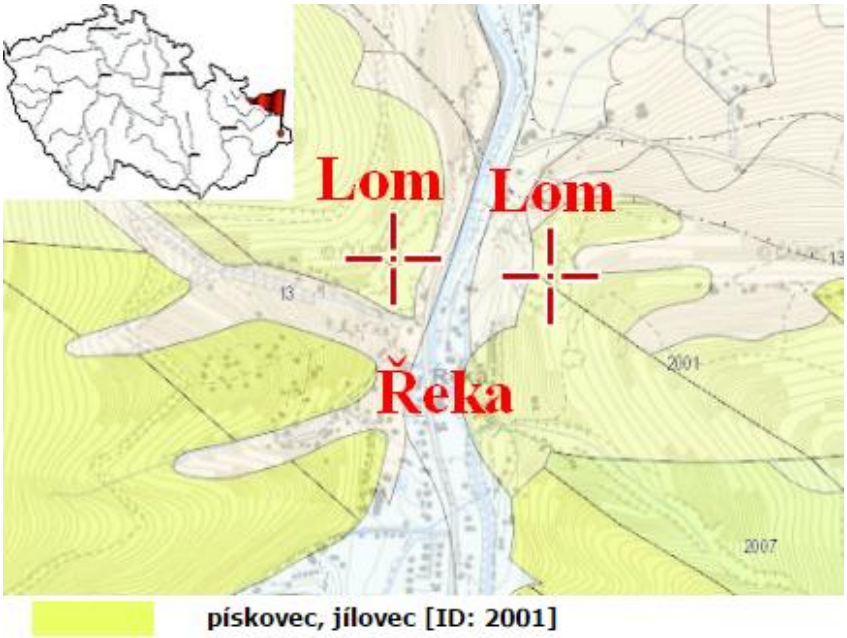
2.2.3.1 Ložisko těšínského pískovce

Na obou stranách údolí obce Řeky, v severním okraji Moravskoslezských Beskyd, jihovýchodně od vrcholu Godula (738 m. n. m.), můžeme najít hned dva aktivně těžené stěnové kamenolomy společnosti Slezský kámen. Lomy se nacházejí v hrubě rytmických pískovcích godulského souvrství (cenoman až senon) slezské jednotky. Samotný dobývací prostor lomů je přístupný po asfaltové komunikaci, odbočující vpravo ze silnice č. 476 Hnojník – Třinec do obcí Smilovice a Řeka. Pro vstup do této lokality je nutné povolení, neboť zde stále probíhá aktivní těžba.

V obou odkrytých lomech jsou pískovce oddílu godulského souvrství. Jedná se o hrubě lavicovitý pískovcový flyš s drobně rytmickým jílovcovo-pískovcovým flyšem v podloží i nadloží. Z geologického hlediska představuje facii podmořského turbiditního vějíře. Turbiditní sedimenty se ukládaly blíže ke zdrojové oblasti a k ústí podmořského kaňonu, kudy podmořské proudy transportovaly v podobě podmořských skluzů písek a bahno z šelfu do oblasti turbiditních vějířů.

Lomy mají výšku přibližně 30 m a těžba zde probíhá především za použití rozpínavé hmoty (Cevamit) a v menší míře i odstřelem. Ve spodní části lomů je možné dobývat i obrovské bloky, kdežto v horních partiích je hornina spíše zvětralá. Na stěnách lomu jsou vidět mělká i široká (až desítky metrů) koryta, která byla v minulosti erodovaná turbiditními proudy, které jsou nyní vyplněny pískovcem.

Na ložiskách byl v šedesátých letech minulého století proveden geologický průzkum, který potvrdil obrovské množství zásob (4681 tis. m^3) v této lokalitě. [1] [18] [19]

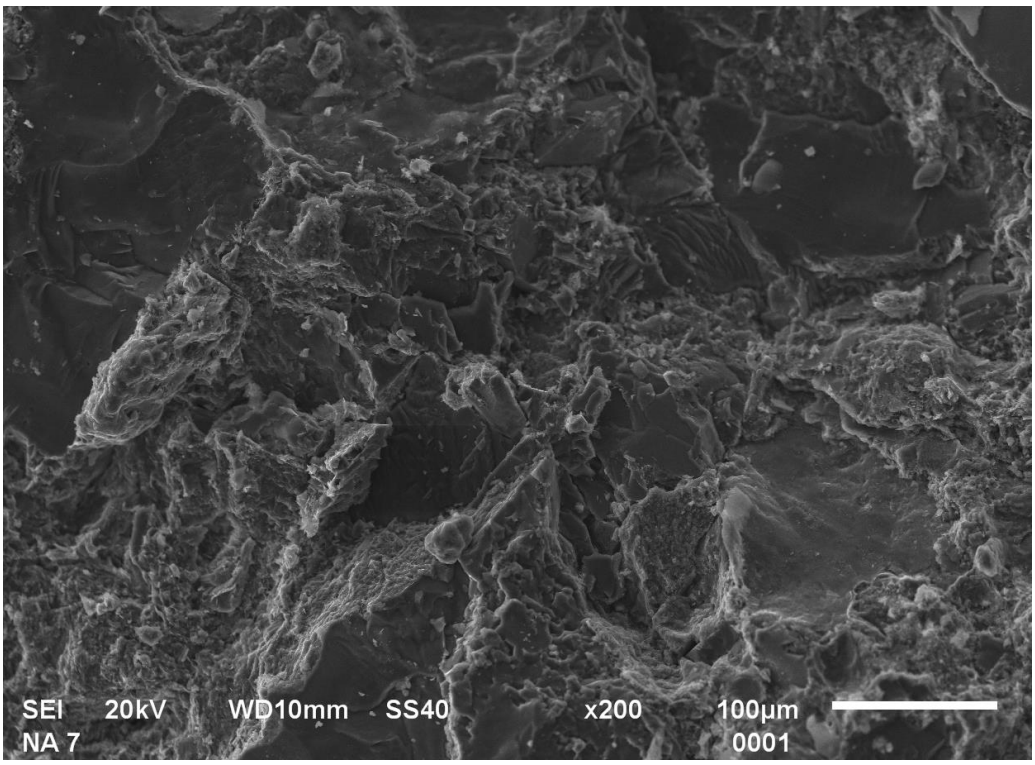


Obr. 12: Geologická mapa lokality Řeka [9]

2.2.3.2 Vlastnosti těšínského pískovce

Těšínský pískovec je z čistě petrografického hlediska zelenošedý až šedozelený středně zrnitý glaukonický až jemnozrný slídnato-glaukonický pískovec. Jeho zrnitost se pohybuje mezi 0,25-0,05 mm. Místy se v něm vyskytují nepravidelné polohy drobnozrnného slepence, který je vyvinut ve formě 0,3-6 m mocných lavic s úklonem 0-15° k severovýchodu. Mezi těmito lavicemi se nachází 0,2-1,7 m mocné polohy tmavošedých až zelenočerných křemeno-jílových břidlic, které jsou nevyužitelné. Souvrství je zde rozpukáno puklinami směrů S-J a V-Z, přičemž je většinou kolmé k vrstvám horniny. Zmíněné lavice vytvářejí řadu proudových struktur, které jsou jasné především na spodních vrstevních plochách. Jedná se především o proudové výmoly, úderové a vlečné stopy, proudové čeřiny a konvolutní zvrstvení. [1]

Obr. 13: Struktura těšínského pískovce



Obr. 14: Vzorek těšínského pískovce – 200x zvětšeno

2.2.3.3 Použití těšínského pískovce

Těšínský pískovec je již od minulosti v beskydském regionu jedním z nejtypičtějších stavebních a dekoračních kamenů. Z důvodu jeho tvrdosti a obtížné řezatelnosti se v současnosti používá především na hrubé kamenické výrobky. V minulosti byl například použit na průčelí staveb v Českém Těšíně, Ostravě, Zlíně (divadlo), Brně (VTA), Pardubicích (Chemoprojekt), Chebu (nové nádraží). Dalším příkladem může být také nedávná realizace dlažby a obložení přízemních částí bytového komplexu Vila Bianca v Praze Bubenči. Z obecného hlediska patří k dalším aplikacím vytváření opěrných patek, opěrných stěn, základových konstrukcí, zpevňování břehů a konstrukcí gabionových stěn. V určitých drobných případech je využíván i pro zdění. Tradičně je používán pro zahradní architekturu. Jeho funkce je tedy především inženýrská a architektonická a není možné ho brát jako ušlechtilý kámen vhodný například pro sochařství. [1] [19] [20]

Obr. 15: Obytný komplex Vila Bianca Praha [17]

2.2.3.4 Shrnutí

Těšínský pískovec je velmi tvrdý, druhohorní svrchně křídový pískovec většinou zeleného zbarvení. Je typickou horninou Moravskoslezských Beskyd. Největší naleziště se nachází v Těšínských Beskydech, z čehož vychází i jeho název. V současnosti je jeho jediným největším zdrojem dvojice lomů v údolí u obce Řeka. Tyto lomy tvoří dvojici největších pískovcových lomů na Moravě. Jeho opracování je náročné, proto není ušlechtilým kamenem a není využíván v sochařství. Jeho využití je především ve stavebnictví a zahradní architektuře. Jeho cena je relativně vysoká a můžeme ho označit jako spíše vzácnější kámen.

2.3 Opuky

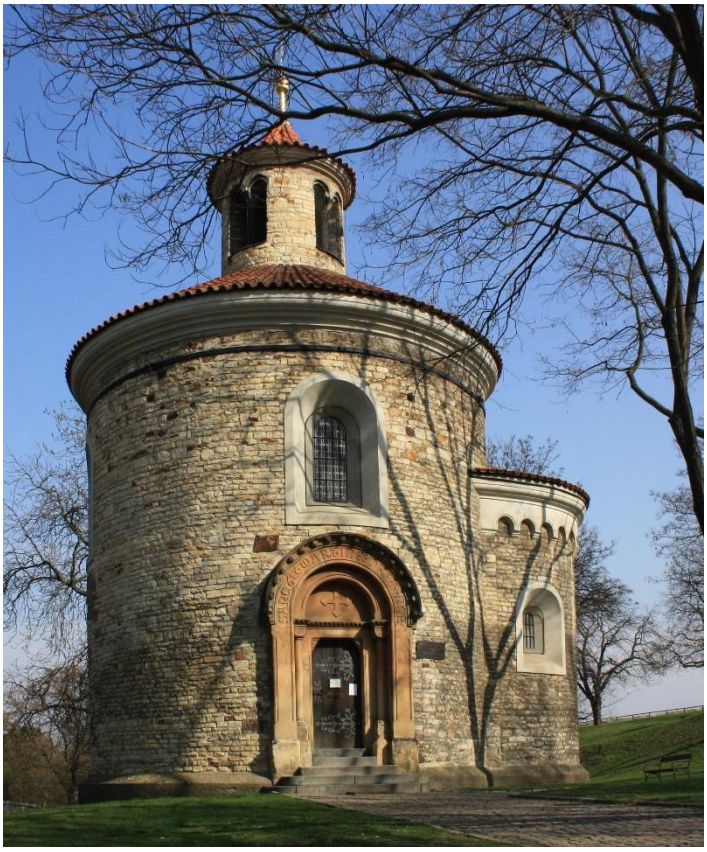
2.3.1 Úvod do opuk a historický přehled jejich používání v našich zemích

Opuky jsou prachovité až písčité slínovce, které jsou našimi tradičními stavebními a sochařskými kameny. Jsou doložené případy jejich použití již v pravěku, i když jejich největší rozkvět proběhl v románském období a v menší míře jsou používány i v současnosti. Opuky jsou oblíbené z důvodu jejich nenáročné opracovatelnosti, dobyvatelnosti a také jejich relativně častého výskytu.

V roce 1963 byla v Mšenských Žehrovicích na Novostrašecku nalezena hlava keltského boha z opuky, jejíž stáří bylo zhruba odhadnuto na rok 125 př. n. l., tedy období latén a je tedy nejzásadnější pravěkou kamennou plastikou na našem území.

Pro širší využití této opuky je třeba, se přesunout přibližně do konce 9. století, kdy hrála významnou roli v prvopočátcích našeho stavebnictví. Příkladem je rotunda sv. Klimenta, jejíž praktický význam byl sloužit jako první křesťanský kostel u nás, dále třeba také rotunda sv. Petra na hradišti v Buči a kostel Panny Marie na Pražském hradě. Mladší románské pražské rotundy jako je rotunda sv. Kříže (ul. Karoliny Světlé), sv. Longina (ul. Na Rybníčku), sv. Martina (Vyšehrad), bazilika sv. Jiří (Pražský hrad) a sv. Máří Magdaleny (Přední kopanina). Další stavby se dají nalézt i mimo Prahu a to nedaleko ve středních Čechách. Nejznámějším příkladem je rotunda

sv. Jiří (hora Říp). Opuka byla používaná i na další různé stavby, ať už to byly kláštery, Pražský hrad či snad i Juditin most. [1]



Obr. 16: Rotunda sv. Martina na Vyšehradě [23]

Z uvedených příkladů staveb je jasné, že opuka byla používána jako režné neomítané zdivo. Zdivo bylo pokládáno většinou nepravidelně, někdy dokonce jen na sucho, přičemž se jednalo o malé opracované kvádříky pro řádkové či kvádrové zdivo. Na architektonické prvky byla využívána zřídka, jednalo se pouze o ostění oken a vchodů. Opuka byla i největší měrou používána na tehdejší románské plastiky, z nichž je asi nejzajímavějším příkladem reliéf na věži Juditina mostu. Opuka byla oblíbená i jako dlažební kámen, přičemž v latinsky psané kronice z roku 1134 je možno najít záznam o příkazu opata sázavského kláštera, tamní kostel vydláždit kameny z hory Petřína (tedy určitě opuky). Pravděpodobně byla používána i jako krytina na střechy (tenké deskovité opuky), jako je to například v současnosti na věžích baziliky sv. Jiří na Pražském hradě.

V éře gotiky se do popředí dostal spíše pískovec než opuka. Důvodem byla jeho lepší trvanlivost a možnost jeho lámaní na větší bloky. I přes to, se ale stejně

opuka využívala jako stavební kámen. Konkrétní gotické stavby jsou například Anežský klášter, Týnský chrám, věž Staroměstské radnice, dům u Kamenného zvonu a Hladová zeď. I když v menší míře, je možné najít i gotická sochařská díla z ní vyrobená. Významnými díly jsou šest náhrobků Přemyslovců, socha sv. Václava, busta Václava z Radče v chrámu sv. Víta a náhrobek sv. Ludmily v bazilice sv. Jiří na Pražském hradě.

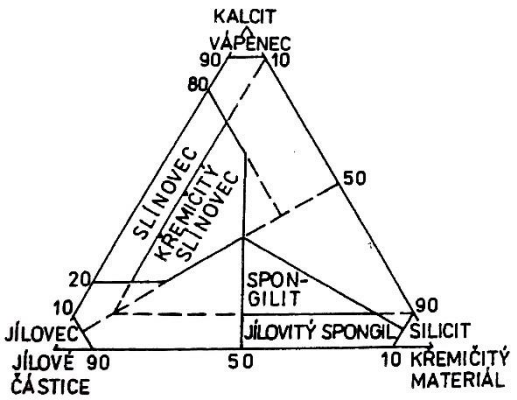
Následující staletí už byly pro pro opuku spíše nevýznamná a byla používaná jako běžný stavební materiál. V 19. století došlo k určité obnově, byla využita na velkých stavbách, jako byla stavba Národního divadla či Pražského hradu a vzrostl o ni zájem i v sochařství, když byla využita pro oltář chrámu sv. Víta či oltář a pro baldachýn v kostele sv. Cyrila a Metoděje v Karlíně.

V současné době se opuka využívá především pro rekonstrukce historických památek, které z ní byly původně zhotoveny a v menší míře i k architektonickým a sochařským účelům. [1]

2.3.2 Petrografická charakteristika opuk

Opuky jsou prachovité až písčité slínovce, které jsou příbuzné horninám spodnoturonského bělohorského souvrství české křídy. Jedná se o různé psamitické či aleurické sedimenty jílovo-karbonátového charakteru s proměnlivým obsahem organogenních příměsí (jehlice křemitých hub a schránky dírkovců), které přecházejí v karbonáty či silicity.

Konkrétně se jedná o prachovité slínovce, písčité slínovce, vápenatopísčité či vápenatoprachovité jílovce a písčité, prachovité nebo křemité vápence. Déle také ze silicitů zpevněné spongility, spongilitické slínovce, vápence a prachovce. Diagram na obr. 17 zobrazuje složení nejvýznamnějších petrografických typů opuk.



Obr. 17: Normativní složení opuk [1]

Z důvodu nepokojné sedimentace v dávné minulosti mají opuky různé technické vlastnosti a to jak v horizontálním, tak ve vertikálním směru. Tato různorodost se však neprojevuje pouze na různých území české křídy, ale je i možné najít rozdílné vlastnosti opuk lokálně v jednom ložisku napříč vrstvami.

Jednou ze základních popisných vlastností je barva. Zbarvení je samozřejmě různé, nicméně obecně můžeme říct, že opuky jsou bělavé, šedé, nažloutlé až okrové, žlutohnědé, načervenalé a někdy i bělavě proužkované. Běžně mají deskovitou odlučnost a v určitých omezených případech i lavicovitou odlučnost. Většinou jsou napříč pravidelně rozpukané, což usnadňuje těžbu celých kvádrových bloků i desek. Mají různé technické vlastnosti, avšak za nejhodnotnější opuky považujeme hutné spongilitické slínovce ze spodních poloh bělohorského souvrství. Nejméně kvalitní jsou lehké odvápněné spongilitické opuky (dříve označovaná jako „shnilá opuka“).

Z důvodu její pórovitosti absorbuje vzdušnou i zemní vlhkost. To má za důsledek, že není mrazuvzdorná. To s sebou nese také další nevýhodu a to komplikace při těžbě. V zimním období při mrazech vylamování není možné a je nutné lomovou stěnu zakrývat určitou formou izolace (například slámou). Další nevýhodou je také malá odolnost vůči chemickému zvětrávání, ať to zejména proti působení kysličníku siřičitému a uhličitému. Kompletní fyzikální vlastnosti pro vybrané opuky udává tab. 3. [1]

Lokalita	Břvany		Hředle	Přední kopanina			Přibylov		Zeměchy		
hodnota 1	m	M		m	M		m	M	m	M	
měrná hmotnost [g·cm^{-3}]	2,63	2,73	2,377	2,82	2,96	2,68			2,61	2,62	2,46
objemová hmotnost [g·cm-3]	1,61	1,86	1,06	2,05	2,13	2,06	2,1	2,24	1,75	1,98	1,43
hutnost [%]	59,9	68,8	44,8	68,8	75,5	77,12			66,8	75,1	58,1
pórovitost [%]	31,2	40,1	55,2	24,5	31,2	22,88			24,8	29,23	41,9
nasákavost v % hmotnosti	12,4	19,1	39,69	8,61	10,45	9,18	6,35	9,17	11,1	16,7	23,64
nasákavost v % objemu	22,7	31,3	42,27			18,94	14,04	19,11	22,03	29,23	33,83
pevnost v tlaku po vysušení [MPa]	20	45	11	27	51	49	94	155	34	82	37
pevnost v tlaku po nasáknutí [MPa]	18	40	8	25	41	38	78	101	33	72	29
pevnost v tlaku po zmrazení [MPa]	15	38	7	23	32	31	68	91	28	66	25
součinitel změknutí	0,87	1	0,73	0,8	0,93	0,93	0,55	0,96			0,78
součinitel vymrazení	0,75	1	0,64	0,63	0,85	0,63	0,48	0,9			0,68
pevnost v tahu za ohybu [MPa]			3,1	4	5,8		17,5	32,3			10,4
obrusnost [cm]	0,3	0,15	0,68	0,16	0,17	0,56	0,47	0,68			0,55
poznámka	2		3	4		5	6		7		5

Tab. 3: Fyzikální vlastnosti některých stavebních a sochařských opuk [1]

Poznámky: 1 – m = minimální hodnota, M = maximální hodnota. 2 – vzorky z vrtů, 3 – vzorek z lomové stěny, 4 – vzorky z lomové stěny, 5 – vzorek z lomové stěny, 6 – vzorky z lomové stěny

2.3.3 Výskyt opuk na území České republiky

Nejzásadnějším místem na našem území je Praha a pražská (vltavsko-berounská) faciální oblast, která se nachází severozápadně od ní. Právě tam byly v největší míře opuky vylamovány a staly se tak nejlevnějšími, nejdostupnějšími a nejsnáze opracovatelnými kameny. Je zřejmé, že největšími zdroji opuky byla ta nejvyšší místa Prahy, tedy například Bělohorské souvrství.

Velké množství lomů bylo na Petříně, kde se lomy zahlubovaly, ale následně byly zaváženy odpadky, čímž tam prakticky vznikla nepřehledná oblast. Tyto lomy patřily strahovskému klášteru, jehož archiv to dokládá dokumentem z roku 1587 Řád skály petřínské. To je dokument, který stanovoval povinnosti při těžbě, zpracování i prodeje kamene. Zachovaly se také účty z let 1648-1715 a i dalších jiných let. Těžba tam ustala koncem 19. století, pak sloužily jako vojenské cvičiště a v roce 1919 koupilo toto území hlavní město Praha a v roce 1925 ho poskytlo státu ke zřízení sletiště pro všesokolský slet a později tam byly vybudovány stadióny. Z petřínské plošiny se táhly další lomy prakticky až k Bílé Hoře. Dalšími zajímavými lokalitami byly Vidoule u Jinonic, Prosek a Bohnice.

Z lomů v širším okolí Prahy je nejzásadnějším místem lom u Přední kopaniny. Tam se lámala místní opuka již od 12. století, čehož je důkazem místní rotunda, postavená právě z kopaninské opuky. Na tomto místě nebylo jedinou aktivitou pouze vylamování kamene, ale také se tam zhotovovaly štípané i hrubě opracované schody, dlaždice, okenní překlady nebo třeba i koryta. U přední kopaniny bylo více lomů, avšak do dnešní doby se těžba zachovala pouze v jednom z nich.

Dalšími lokalitami mimo Prahu jsou především Hostivice, Litovice a Kladno, ovšem všechny tyto lomy byly již uzavřeny a ve většině případů rekultivovány.

Pro zachování stručnosti již uvedu pouze výčet dalších důležitých lokalit, avšak bez podrobného popisu. Dalšími důležitými ložisky mimo Prahu jsou Džbán (severně od Rakovníka), Břvany (okolí Loun), Vehlovice (u Mělníka), Chrudim a Přibylov (u Skutče). [1]

2.4 Charakteristika vybraných druhý opuk

2.4.1 Džbánská opuka

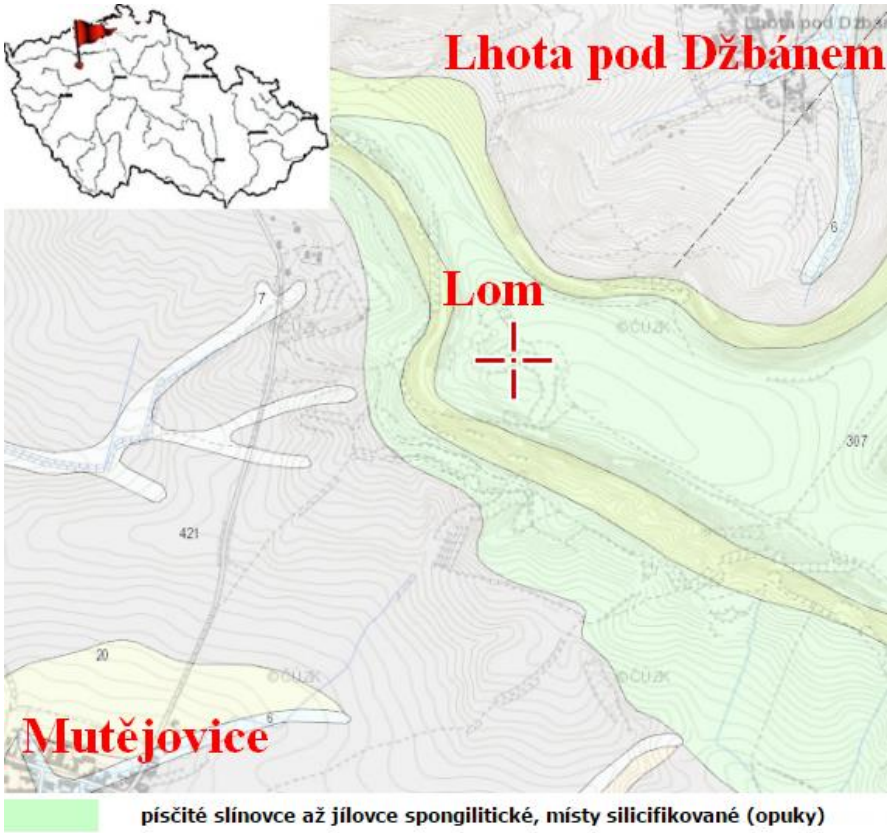
Džbánská opuka je prachovitý odvápněný spongilit světlého zbarvení. Její název vychází z názvu planiny Džbán, kde se v minulosti nacházel větší počet jejích lomů. Většina z těchto lomů je v současnosti uzavřena a jejím hlavním zdrojem je lom Třeboc nedaleko obcí Mutějovice, Hředle a Třeboc. Místní opuka je měkká a snadno opracovatelná. Velice snadno se z ní dají vyrobit zdící prvky, čímž si již v dávné minulosti získala svou oblibu. [26] [27]

2.4.1.1 Ložisko džbánské opuky

Západní výběžek pražské faciální oblasti je územím velmi podstatným pro opuky používané na našem území. Právě zde se nachází geomorfologická oblast Džbán, která se nachází v Poberounské soustavě. Částečně se rozkládá ve středních Čechách a částečně také v severních Čechách. Městy této oblasti jsou Rakovník,

Louny, Slaný, Kladno a Žatec. Pro tuto oblast jsou typické rozsáhlé náhorní roviny dělené hlubokými a širokými údolími. Právě zde spodnoturonské opuky vystupují v morfologicky zřetelných návrších a tím pádem jsou velice snadno těžitelné. Na zmíněných náhorních rovinách se vesměs nachází 3 až 12 m opuková vrstva, která leží na měkkých pískovcích. Historicky byla tato oblast silně využívána pro vylamování místní opuky a to například u obcí Mutějovice, Hředle a Třeboc. Většinou se jednalo o rozsáhlé lomy, jejichž kameny byly v okolí velice oblíbené a byly jedním z hlavních stavebních materiálů. Většina lomů je v současnosti uzavřená, hlavním zdrojem je nyní lom Třeboc.

Lom Třeboc leží na západní stráni kopce Džbán v hustém lese mezi obcemi Mutějovice, Hředle a Lhota pod Džbánem. Nejlepší přístupová cesta je lesní cesta východně od pozemní komunikace spojující Mutějovice se Lhotou pod Džbánem. Tento rozsáhlý lom je však v současnosti těžen jen na jeho západní straně, neboť produkce z této části je dostatečná. Dobývání respektive odlamování se provádí z lomové stěny bagrem. V minulosti tu probíhala těžba také bloků o hmotnosti několika tun, poté těžba ustala a v roce 2014 byla těžba znovu obnovena, ale pouze ve formě vylamování horních partií lomu v jeho západní části. [1] [3] [24]

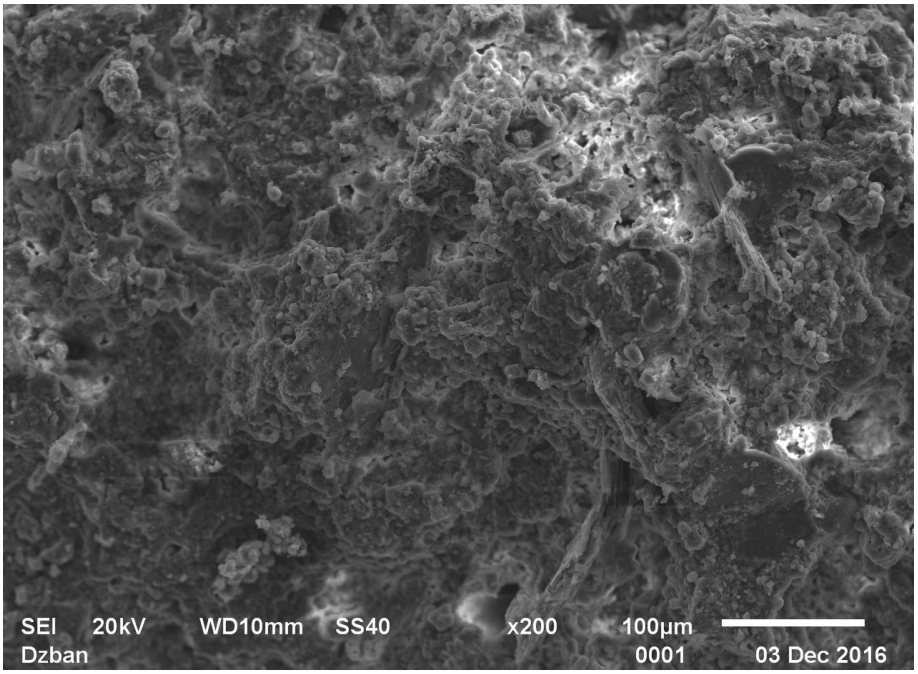


Obr. 18: Geologická mapa lokality Třeboc [9]

2.4.1.2 Vlastnosti džbánské opuky

Džbánská opuka je zpevněný sediment, který obsahuje velké množství jehlic hub (spongie) a je tedy možno říct, že se jedná o spongilit. Tyto jehlice jsou rekrystalizované, přičemž jejich největší průřezy jsou průměru 0,06 mm a délky až 1,2 mm. Mineralogicky se skládá především z detritického křemene, živce, detritické slídy a základní hmoty, která se skládá většinou z jílů se zbytky karbonátů a již zmíněných jehlic. V jejím složení je také velké množství mikrofosilií. Ojediněle je možné v její struktuře naleznout ortoklasy a destruované šupiny slíd. Její původní tmel tvořil kalcit, a právě proto jsou svrchní partie v ložisku této horniny více pórovité, neboť jsou odvápněné. Veškeré sedimenty ve Džbánu jsou povětšinou vodorovně uloženy. Džbánská opuka je tvárná a snadno se vylamuje. Její pigment vychází především z limonitu a má tedy sametovou, béžovou, okrovou, šedobílou a někdy až nazlátlou barvu. V určitých případech díky oxidům železa může být narezavělá. Je měkká a snadno se opracovává (i ručně). Jednoduše z ní jdou vyrobit zdící prvky, a to jak podle potřebného tvaru, tak i s požadovanou povrchovou úpravou. Její nevýhodou je určitě nízká otěruvzdornost. Díky těmto vlastnostem je vhodná jako zdící kámen, ale je velice nevhodná jako dlažba. Další možnou vhodnou aplikací může být jako obkladový kámen a to jak v interiéru, tak v exteriéru. [1] [26]

Obr. 19: Struktura džbánské opuky [27]



Obr. 20: Vzorek džbánské opuky – 200x zvětšeno

2.4.1.3 Použití džbánské opuky

Džbánská opuka byla již v minulosti velice oblíbený stavební materiál, který byl nejvíce používán jako zdící prvek a to ve většině případů neomítnutý. Neomítnuta byla zaprvé za účelem vyniknutí její krásy, zadruhé omítnutí nikdy dlouho nevydrželo z důvodu její jemnozrnnosti a hladkému povrchu. Byla tedy

klasickým stavebním kamenem, ale stejně tak i kamenem architektonickým a sochařským. Díky používání opuk nejen ze Džbánu, ale i jiných lokalit byl odvozen název „Zlatá Praha“, kvůli jejich béžové až nazlátlé barvě. Konkrétními příklady z historie jsou klasické lidové domy a statky v obcích Kounov, Mutějovice a Hředle vystavěné z nepravidelných kvádříků. Dále byla používána jako zdící prvek hradu Džbán (jeho hradby). Pokud se posuneme blíže současnosti, zajímavé je, že kvůli její lehkosti se na konci padesátých let minulého století uvažovalo o tom, že by byla použita pro výrobu lehčených staviv, ačkoli k tomu pak úplně nedošlo. Konkrétní realizací z nedávna je například obložení ve stanici metra Želivského v Praze, kde byla použita pro mozaiku V. Adamcové. Dále v budově Mercedesu na Praze 4 jako obkladní kámen.

V obecné rovině její použití v současnosti velice široké. Pro svojí tvárnost je oblíbená v sochařství, v galerii v Rakovníku či přímo v sídle společnosti Spongilit PP s. r. o. můžeme najít několik děl z ní vytvořených. Pokud se podíváme na stavby, používá se pro rekonstrukce historických objektů, dále jako obkladový materiál pro interiér i exteriér a také třeba pro stavby plotů či stabilizace příjezdových cest. Dalším důležitým prvkem je zahradní architektura, ať už ve formě modelací zahrad či suchých zídek či jako solitérního a dekorativního prvku. Dále se z ní vyrábí opuková drť, která se následně používá třeba i pro spárovací hmoty a bylo také zamýšleno i o využití do zemědělských substrátů, což je ovšem spíše vize. Poslední zajímavou aplikací, ačkoliv ne příliš rozšířenou je použití džbánské opuky jako filtrace vody v přírodním koupacím biotopu. [1] [24] [25]

Obr. 21: Realizace z džbánské opuky [28]

2.4.1.4 Shrnutí

Džbánská opuka je prachovitý odvápněný spongilit. Je lehká, velice tvárná a snadno se vylamuje. Většinou má sametovou, béžovou, okrovou, šedobílou a v určitých případech až nazlátlou barvu. V historii byla velmi oblíbeným stavebním i architektonickým kamenem a v lokalitě Džbán odkud pochází, bylo velké množství jejích lomů. Z důvodu postupného utlumení zájmu byly všechny lomy uzavřeny a jediným a nejpodstatnějším zdrojem zbyl lom Třeboc, který leží na západní stráni kopce Džbán v lese mezi obcemi Mutějovice, Hředle a Lhota pod Džbánem. V těchto zmíněných obcích můžeme nalézt staré domy tradiční lidové architektury, které jsou z ní postavené. Tato opuka je také oblíbená v sochařství a zahradní architektuře. Nejčastěji je používána jako obkladový kámen, zdící prvek či obecně pro rekonstrukce historických budov. Často také jako solitérní prvek a spíše zajímavou aplikací je použití jako filtrace přírodního koupacího biotopu. Džbánská opuka

nepatří mezi nejdůležitější a nejvyužívanější opuky v České republice, nicméně si na poli sedimentárních hornin stále drží své místo.

2.4.2 Přibylovská opuka

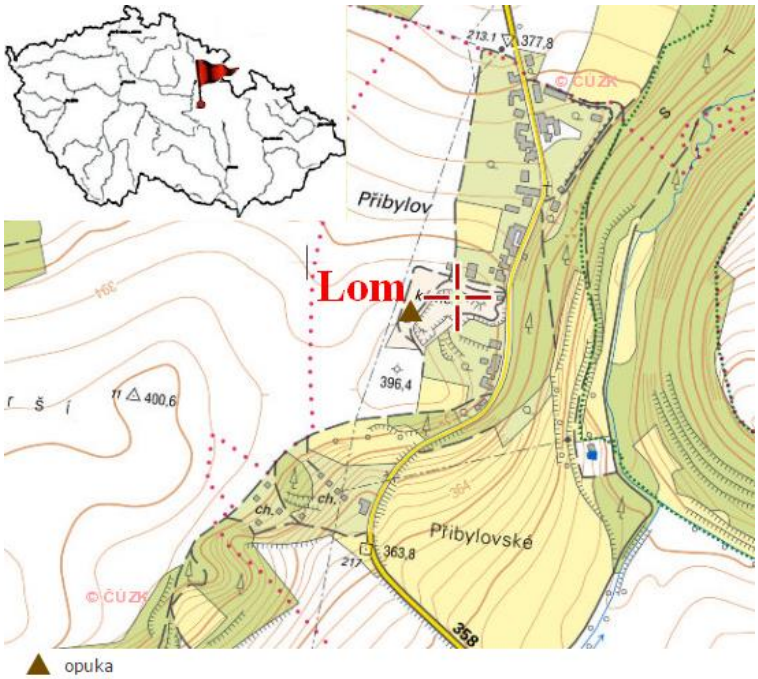
Přibylovská opuka z kolínské oblasti české křídy se s drobnými pauzami těží již od 19. století. Je to pevný sediment většinou šedobílého zbarvení. Díky jejím mechanicko-fyzikálním vlastnostem se těžko opracovává a je vhodná především pro staticky namáhané konstrukce. Zajímavostí je, že v její struktuře je možné naleznout zkamenělé živočichy. [1]

2.4.2.1 Ložisko přibylovské opuky

Kolínská oblast české křídové pánve byla vždy významný zdrojem kvalitní opuky. Relativně známým faktem je, že opuka byla lámána u Chrudimi a jejím okolím směrem na jih, avšak důležitějším místem je právě Přibylov u Skutče. Na začátku 19. století tam bylo založeno vícero jámových lomů, které postupně dosahovaly hloubky až 30 m. Před druhou světovou válkou, se ale těžba postupně utlumovala a po druhé světové válce byly všechny lomy uzavřeny. V roce 1969 byla panem O. Hrouzkem těžba obnovena v jižní části největšího lomu na okraji Přibylova. Obnova v severní části toho samého lomu nastala v roce 1974 společností ČMPK Hradec Králové a v roce 1975 tato společnost obnovila těžbu v celém rozsahu lomu. Mezi lety 1975 až 1976 proběhl důkladný a rozsáhlý geologický průzkum této lokality a bylo zjištěno, že je zde k dispozici zásoba 400 000 m^3 opuky pro hrubé a čisté kamenické výroby.

Lom je lokalizován na jih od obce Přibylov. Konkrétněji západně od silnice číslo 358, která obcí prochází. Podloží Přibylova je z geologického hlediska tvořeno svrchnokřídovými sedimenty české křídové pánve, a tedy litograficky se jedná o bělohorské souvrství. Na svrchních vrstvách lomu se nacházejí vrstvy o mocnostech v řádu cm a jednotlivé vrstvy se samovolně oddělují. Oproti tomu ve spodních partiích jsou vrstvy mnohem mocnější a je možné odsud těžit bloky v řádu 40 až 120 cm. Nadloží opukových vrstev je občas tvořeno hlínami a zvětralinami opuk,

podloží naopak šedým slínovcem (spodní turon) a glaukonitickým pískovcem (cenoman). Vytěžená surovina se třídí a po té se z ní vyrábějí v provozovně v obci Prosetín požadované prvky. Přibližná roční produkce tohoto lomu je 250 m^3 opuky. [1] [30]



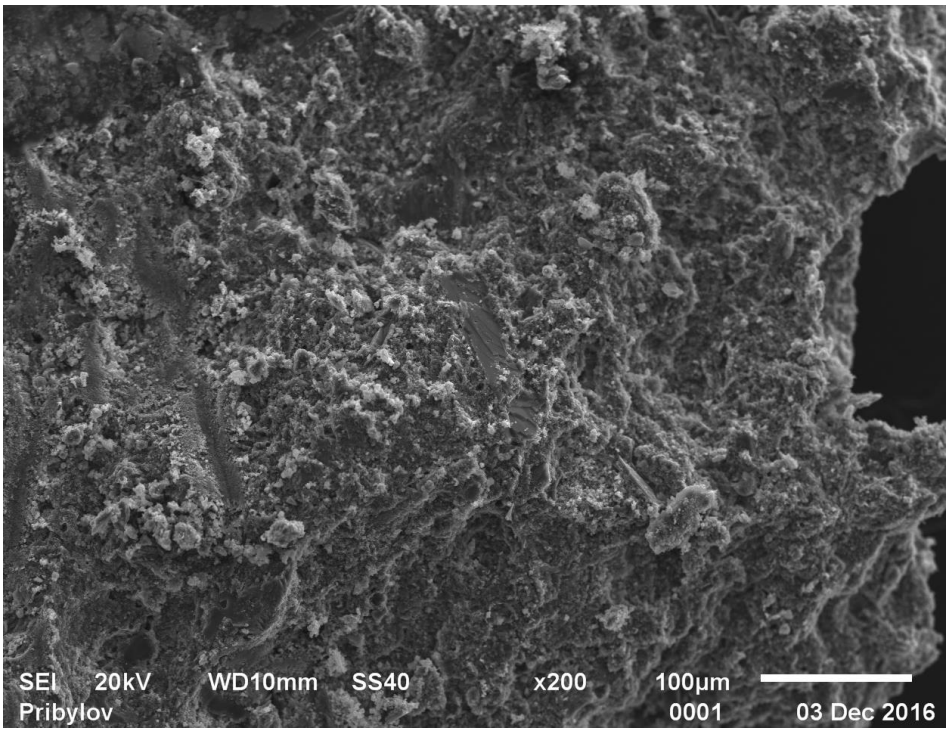
Obr. 22: Mapa lokality Přibylov [29]

2.4.2.2 Vlastnosti přibylovské opuky

Jedná se o zpevněný jemnozrnný sediment, který je většinou šedobílé až šedožluté barvy, který je občas nepravidelně rezavě šmouhovaný. Stratigraficky se jedná o kámen svrchní křídy resp. spodního turonu, který se z litografického hlediska nachází v bělohorském souvrství. Přesněji petrograficky také můžeme říct, že se jedná o písčito-prachovitý slínovec až vápnito-jílovitý prachovec, ve kterém se často vyskytují spongility. Jednoduše řečeno, občas se v něm vyskytují světle šedé místa a pecky s vyšším množstvím jehlic hub. Je nasákavý. V jeho struktuře také můžeme najít úlomky mikrofauny (dírkovci) a schránek mlžů. Hlavní hmota je tvořena ostrohrannými zrnky křemene, které nejsou větší než 0,05 mm. Dále obsahuje menší množství jílových minerálů, především kaolinit a druhotně i illit, v malé míře také částice glaukonitu a slíd. Druhou podstatnou složkou je kalcit, který spolu s opálovou

hmotou představuje jeho tmel. Jeho textura je masivní vrstevnatá. Po vybroušení horniny na ní nejsou viditelné trhliny či pukliny. Jeho lomné hrany jsou ostré, ale měkké. [30]

Obr. 23: Struktura přibylovské opuky [31]



Obr. 24: Vzorek přibylovské opuky – 200x zvětšeno

2.4.2.3 Použití přibylovské opuky

Historie těžby i užívání přibylovské opuky začíná na začátku 19. století. Lidé našli v místních lomech práci a rovnou vytěžený materiál využili na stavbu svých obydlí. Nejstarší aplikace byly tedy na lidových stavbách, následně byla v historii použita i jako kámen dlažební, anebo také jako kámen architektonický či sochařský. Příkladem mohou být dokumentované církevní artefakty (oltáře) či třeba koryta na lidových záhumenkách. Pokud se posuneme do současnosti, užití je velice široké a bude shrnuto v následujícím odstavci, nicméně zajímavými nedávnými realizacemi jsou například rekonstrukce románské rotundy svatého Jiří na Řípu, rekonstrukce ohradních zdí Břevnovského kláštera v Praze, anebo třeba obložení na spodní části fasády obchodního domu Prior v Brně.

Díky jejím mechanickým vlastnostem odolává statickému namáhání a tak je používána pro rekonstrukce historických staveb jako zdící prvek. Kvůli tomu, že je leštitelná a dobře odolává otěru, se také používá na pochozí dlažby a také jako omyvatelný obklad. V provozovně v Prosetíně se z ní vyrábí hrubé kamenické výrobky, jako jsou například haklíky, dlažby a lomový kámen pro soklové zdivo. Z větších vytěžených bloků se v provozně vyrábějí obkladové a podlahové desky, haklíkové zdivo, řemínkové obklady, parapety, schody či schodišťové desky anebo speciální prvky pro rekonstrukce historických staveb. V sochařství je využívána minimálně a pro architektonické jen zřídka kdy, například pro prvky městských kašen apod. [1] [30] [31]

Obr. 25: Rotunda sv. Jiří [23]

2.4.2.4 Shrnutí

Přibylovská opuka je šedobílý zpevněný jemnozrnný sediment, který odolává statickému zatížení, otěru a je leštitelný. Její opracování je náročnější. V lomu v obci Přibylov je s přestávkami těžena od 19. století. Na svrchních vrstvách lomu se nacházejí vrstvy o mocnostech v řádu cm a jednotlivé vrstvy se samovolně oddělují. Oproti tomu ve spodních partiích se nacházejí mocné vrstvy a tak je možné odsud těžit bloky v řádu 40 až 120 cm. Jeho hlavním využitím jsou rekonstrukce historických staveb (především zdiva) nebo také pochozí dlažby a obklady pozemních staveb. Také je využívána pro výrobu parapetů nebo schodišťových stupňů a desek. V architektuře se využívá méně a v sochařství téměř vůbec.

3 Vliv vody a solí na stavební materiály

3.1 Transport a popis chování solí v materiálech

Všechny stavební materiály či konstrukce obsahují vodu v určitém skupenství. Ta v nich především způsobuje fyzikální degradaci (mrazové poškození, abraze), ale hlavně podmiňuje chemickou degradaci (rozpouštění a transport solí). Pro úplnost je nutné dodat, že napomáhá i degradaci biologické.

Transport vody a látek v ní obsažených do konstrukcí a materiálů, se děje mnoha způsoby. Může to být vzlínáním spodní vody z podzákladí, posypem chodníků a vozovek, kyselými dešti nebo solemi v podzemních vodách. Nejvíce nebezpečné jsou ve vodě rozpustné soli. Ty obsahují kationy Na^{+}, Ca^{2+}, Mg^{2+} a aniony Cl^{-},SO_4^{2-}, CO_3^{2-} a NO_3^{-}. Samotné chování jednotlivých solí v daném materiálu je ovlivněno několika faktory. Důležitými faktory jsou obsah vlhkosti v materiálu, rozpustnost konkrétní soli, vlhkost okolního prostředí a teplota. Krystalizace jednotlivých solí záleží na rovnovážné vlhkosti nad jejím roztokem. Pokud se ustavuje na více než 75 %, pak krystalizace probíhá snadno a často, například se jedná o NaCl či KCl. Pokud se ustavuje na 50-75 %, pak krystalizace probíhá zřídka, například $NaNO_2$. Soli s rovnovážnou vlhkostí pod 50 % zůstávají v roztoku, ale jsou hygroskopické a způsobují zvýšení vlhkosti materiálu, příkladem je K_2CO_3. Pokud se proces navlhání a vysoušení konstrukce často opakuje, dochází k tvoření nasycených a přesycených roztoků, překročení prahu rozpustnosti a ke vzniku a růstu krystalů.

Nanejvýš nebezpečné jsou pro samotné stavební materiály soli, které mění své formy za běžných klimatických podmínek a to i nad bodem mrazu. Konkrétně je to třeba síran sodný, uhličitan vápenatý či uhličitan sodný. Tyto zmíněné soli jsou také schopné tvořit hydráty, tedy ve své krystalické mřížce navazují určitý počet molekul vody. Jak daný roztok přechází z jedné formy do druhé, váže či ztrácí molekuly, přičemž dochází k objemovým změnám a následně tedy i ke vzniku hydratačního tlaku. Dobrým příkladem je Na_2SO_4. Bezvodé krystaly Na_2SO_4 mají objem 0,373 cm^3/g, ale hydrát $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ má objem 0,683 cm^3/g, tedy téměř dvounásobek. Při přechodu 1 g bezvodého Na_2SO_4 na dekahydrát, se jeho hmotnost se zvýší na 2,27 g a jeho objem na 1,549 cm^3, to jest čtyřnásobný nárůst objemu.

Z těchto důvodů jsou následně póry stavebních materiálů zatěžovány vysokými krystalizačními tlaky. Následující tabulky pro představu uvádějí krystalizační tlaky některých solí. [4]

Sloučenina	Krystalizační tlak [MPa]
$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	28,2
$MgSO_4 \cdot 2H_2O$	10,5
$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$	7,2
NaCl	55,4

Tab. 4: Krystalizační tlaky některých druhů solí [4]

Sloučenina	Konečný produkt	Rekrystalizační tlak [MPa]
$CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O$	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	160
$MgSO_4 \cdot 6H_2O$	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	10
$Na_2CO_3 \cdot H_2O$	$Na_2CO_3 \cdot 7H_2O$	64

Tab. 5: Rekrystalizační tlaky některých druhů solí [4]

Existují také soli, které vážou vzdušnou vlhkost, tedy fyzikálně vázanou vodu, která je ovlivněna relativní vlhkostí okolí. Tyto soli jsou značně nebezpečné, neboť tyto soli okolní relativní vlhkost pohlcují a sami sebe tak ředí, přičemž dochází k poklesu koncentrace roztoku. Z těchto poznatků vyplývá, že množství solí v materiálu vždy ovlivňují jeho sorpční vlastnosti a je nutné počítat se změnou sorpční izotermy, přičemž sorpce roste s růstem množství solí. Hygroskopicita solí také vede k celkovému zavlhčení materiálu. Při následných aplikacích proti vzlínající vlhkosti většinou nikdy k úplnému vyschnutí zdiva nedojde.

Při rekonstrukcích historických staveb je na prvním místě nutné určit obsah solí v daném materiálu, třeba zdivu. Hodnocení je dáno v technických normách, např. ČSN P 33 0610 (Hydroizolace staveb – sanace vlhkého zdiva – klasifikace vlhkosti a salinity zdiva), viz tab. 6. Dalším nástrojem pro toto hodnocení je též klasifikace EU EUREKA EU – 1270, kterou udává tab. 7. Nejvíce problematickým faktorem porušení struktury není celková pórovitost, nýbrž distribuce a velikost pórů. Nejohroženějšími jsou materiály s velkým počtem malých pórů, ve kterých je udržována koncentrace nasyceného roztoku solí, ze kterého vznikají a rostou krystaly. Formování krystalů jde zastavit snížením koncentrace solného roztoku. [4]

Stupeň zasolení	Množství soli v mg/g vzorku materiálu a v hm. %					
	Chloridy		Dusičnany		Sírany	
	mg/g	hm. %	mg/g	hm. %	mg/g	hm. %
Nízký	< 0,75	< 0,075	< 1,0	< 0,1	< 5,0	< 0,5
Zvýšený	0,75 - 2,0	0,075 - 0,2	1,0 - 2,5	0,1 - 0,25	5,0 - 20	0,5 - 0,2
Vysoký	2,0 - 5,0	0,20 - 0,50	2,5 - 5,0	0,25 - 0,50	20 - 50	2,0 - 5,0
Extrémně vysoký	> 5,0	> 0,50	> 5,0	> 0,50	> 50	> 5,0

Tab. 6: Klasifikace salinity dle ČSN P 73 0610 [4]

Sůl	Stupeň 0	Stupeň 1	Stupeň 2	Stupeň 3	Stupeň 4
Chloridy	0 - 0,01	0,01 - 0,03	0,03 - 0,09	0,09 - 0,28	0,01 - 0,28
Dusičnany	0 - 0,01	0,01 - 0,05	0,05 - 0,15	0,15 - 0,50	0,01 - 0,50
Sírany	0 - 0,02	0,02 - 0,08	0,08 - 0,24	0,24 - 0,77	0,02 - 0,77

Tab. 7: Klasifikace salinity dle EUREKA EU – 1270, v hm. % [4]

Poznámky: Stupeň 0 - odpovídá nízké koncentraci solí. Obsaženo je pouze stopové množství solí a ohrožení poškození zdiva je zde vyloučeno.
Stupeň 1 - představuje velmi nízké zatížení stavební konstrukce solemi. Pouze v nepříznivých případech (např. u silné stěny se zdrojem konstatační kapilární vlhkosti) může dojít k poškození.
Stupeň 2 - udává střední zatížení solemi, kde je již snížena trvanlivost omítek a nátěrů.
Stupeň 3 - je považován za kritický vzhledem k trvanlivosti omítek a nátěrů. I přes aktivní vertikální izolační vrstvy zůstane zdivo díky hygroskopickým vlastnostem solí vlhké.
Stupeň 4 - znamená extrémně vysoké zasolení, při kterém se poruchy objevují ve velice krátkém časovém horizontu. [4]

3.2 Výkvěty

Pokud se ve stavebním materiálu (cihla, beton, kámen apod.) vyskytují rozpustné soli, vznikají v něm výkvěty neboli eflorescence. Tyto rozpustné soli se poté pohybem kapaliny porézní strukturou dostávají na povrch materiálu. Po odpaření vody na povrchu nebo reakcí s plyny, je možné, na povrchu daného

materiálu zřetelně vidět bílé či nažloutlé krystalické či amorfní výkvěty. Nejvíce jsou samozřejmě vidět na tmavých podkladech. [4]

3.2.1 Primární výkvěty

Primární výkvěty vznikají vzlínáním vody ze zdiva, jejíž součástí jsou výkvětotvorné soli. Tyto soli také může přijímat z podzákladové zeminy. Konkrétně se většinou jedná o sírany, uhličitany a křemičitany a v určitých případech i chloridy a dusičnany. Tyto látky přichází k vyústění kapilár, které procházejí strukturou materiálu až na jeho povrch a tam se odpaří. Příchozí roztok se tedy odpařuje a houstne. Proti tomuto jevu působí difúze, díky níž se koncentrace roztoku vyrovnává, nicméně její aktivita, kvůli příchodu dalších částí roztoku, přichází vniveč. Takovýto proces pokračuje až do doby, kdy koncentrace roztoku dosáhne bodu, kdy už začne vylučovat krystaly. Krystalizace těchto roztoků je značně ovlivněna rychlostí odpařování a tedy pokud odpařování probíhá velice rychle, dochází ke krystalizaci už v samotných kapilárách v povrchové zóně materiálu a dochází k nejničivější destrukci. Pro úplnost dodám, že tyto sole mohou být obsažené už v samotných materiálech, třeba v maltě vytvářející omítku (vápenné pojivo, kamenivo, záměsová voda či písek). Dalším polehčujícím faktorem může být dešťová voda. Ta výkvěty částečně rozpouští, nicméně není možné očekávat úplné smytí a odplavení a na druhou stranu se dešťová voda spolu s rozpuštěnými solemi dostává zpátky do povrchové zóny konstrukce a po vysušení se tedy celý proces znovu opakuje. [4]

3.2.2 Sekundární výkvěty

V kontaktní zóně provlhčené konstrukce (provlhčené omítky) vznikají působením pevných, kapalných či pevných látek v ovzduší, sekundární výkvěty. Za nejnebezpečnější látky v atmosféře se považuje oxid siřičitý SO_2. Ten se za spolupůsobení kyslíku rozpouští ve vlhkém ovzduší, vzniká kyselina sírová a ta následně reaguje právě s vápennou složkou omítky. Postupně tak klesá soudržnost omítky a podkladu a vzniká tak síran vápenatý $CaSO_4 \cdot 2H_2O$. Následně pak dochází

k silnému rozrušení omítky i podkladu. Napětí ve struktuře materiálu však nemusí být způsobeno pouze nárůstem objemu, ale i smrštěním, neboť třeba v dolomitických vápnech tvořících pojivo románských a gotických omítek, vzniká těžko rozpustný hydroxid hořečnatý $Mg(OH)_2$, který zaujímá pouze 70 % původního objemu hydroxidu vápenatého $Ca(OH)_2$. Pro úplnost dodám, že hořečnaté soli (např. $MgSO_4$) se mohou vyskytovat v omítce i vlivem nevhodného kopaného písku obsahujícího pyritickou složku.

Ničím neobvyklým jsou výkvěty způsobené oxidem uhličitým CO_2, neboť oxid vápenatý CaO, který je součástí pojiva omítek, se mění na nerozpustný uhličitan vápenatý $CaCO_3$ právě vlivem CO_2. Následně se na povrchu vytvoří drobný povlak tvořený krystaly, který uzavírá póry a zabraňuje tak difúzi vody. [4]

3.2.3 Typy výkvětů a jejich zdroje

Obzvlášť destruktivní jsou výkvěty síranu sodného, který při změně z bezvodého Na_2SO_4 na dekahydrát $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ nabývá na svém objemu. Hlavním zdrojem těchto výkvětů jsou alkálie v písku a kamenivu obsahujícím živce či další jiné přísady.

Na starých hospodářských budovách (stáje, chlévy) jsou velmi dobře známé bílošedé až nažloutlé výkvěty. Důvodem jejich vzniku jsou dusíkaté látky. Důležitou složkou těchto výkvětů je totiž dusičnan vápenatý $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$. Tyto typy výkvětů způsobují silnou destrukci vápenných omítek a lidově jsou označovány jako „sanytr“.

Obecně se dá říct, že dusík způsobuje problémové výkvěty u historických staveb z vícero důvodů. Prvním faktem je, že dusík je součástí ovzduší, ale je nutno říct, že hlavním problémem jsou splaškové vody. Příkladem je rekonstrukce Pražského hradu, kdy byly po celkem krátké době nalezeny výkvěty na nově opravené omítce v soklových partiích. Následně byla provedena analýza kontaminovaných částí a ukázalo se, že důvodem vzniku bylo používání močoviny jako posypové soli v letech 1983-1984. Analýzy ukázaly obsah dusičnanů v množství až 1,4 %. Jediným rozumným vysvětlením tohoto jevu je přeměna močoviny v alkalickém prostředí vápenných omítek nitrifikačními bakteriemi přes

dusitany až na dusičnan vápenatý $Ca(NO_3)_2$. Tato teorie byla pak potvrzena fotometrickou metodou.

Dalším důležitým typem výkvětu, je výkvět způsobený zimní posypovou solí. Ta je tvořena chloridem sodným NaCl, který reakcí s vápennou složkou dává za vznik oxichloridu vápenatého $3CaO \cdot CaCl_2 \cdot 16H_2O$. Ten tedy pak krystalizuje se značným množstvím vody při velkém nárůstu objemu, z čehož vzrůstá napětí a vznikají následné destrukce. Stejná sloučenina občas vzniká po někdy doporučovaném nepromyšleném odstraňování výkvětů omýváním povrchu omítek kyselinou chlorovodíkovou HCl. [5]

Obr. 26: Výkvěty na zdivu [32]

4 Experimentální část

Experimentální část této práce má za úkol zkoumat chemickou degradaci pórovitých sedimentárních hornin a má za úkol ověřit jejich trvanlivostní klasifikaci. Hlavním cílem všech testů a experimentů bylo stanovit a ověřit trvanlivost těchto hornin vůči působení krystalizace solí. Obvykle se jejich odolnost či trvanlivost zkoumá takovým způsobem, že jsou vzorky celé ponořené do solného roztoku. To ovšem neodpovídá realitě, a proto byly vzorky vždy v solném roztoku ponořeny pouze částečně. Účelem je porovnat takzvaný hmotnostní opad ze vzorků, určité mechanické vlastnosti a viditelnou degradaci kamenů vzhledem ke krystalizaci daných solí. Inspirací je testování trvanlivosti dle španělských norem UNE (Una Norma Española), nicméně upravené v již zmíněném neponoření celého vzorku. Hmotnostní opad ze vzorků a změny mechanických vlastností jsou samozřejmě vždy ovlivněny petrofyzikálními vlastnostmi jednotlivých kamenů a především závisí na jejich pórovitosti.

Krystalizací solí v pórové struktuře pórovitých sedimentárních hornin, se již zabývali francouzští a španělští vědci v publikaci *Thermodynamic modelling of changes induced by salt pressure crystallisation in porous media of stone* (Benavente, García del Cura, Fort, Odóñez, 1999), ve které se snažili vytvořit model popisující krystalizaci solí v pórech, přičemž se zabývali fyzikálními a chemickými mechanismy krystalizace. Stručně řečeno, zkoumaným fyzikálním mechanismem byl krystalizační tlak v pórech sedimentů včetně vlivu velikosti pórů. Zkoumaným chemickým mechanismem byla samotná reakce mezi vzorkem a danou solí, jednalo se tedy zkoumání vlivu mineralogických vlastností. Následně vydali pro tuto diplomovou práci publikaci podstatnější, a tou byla publikace *Durability estimation of porous building stones from pore structure and strength* (Benavente, García del Cura, Fort, Odóñez, 2004), kde bylo řešeno větší množství různých indikátorů, přičemž tato práce sama více trvanlivostních indikátorů zavádí. Ty byly vymyšleny jako poměr parametrů, kde v čitateli je parametr závislý na pórovém systému a ve jmenovateli je parametr závislý na mechanických vlastnostech. Podstatou těchto indikátorů, je ukázat vztah mezi pórovým systémem, určitou mechanickou vlastností a trvanlivostí. Publikace též zkoumá parametr DWL, což je takzvaný „opad materiálu ze vzorku“ vlivem krystalizace solí. Ten není typicky zkoumanou vlastností a je to

tedy zajímavý ukazatel. Experimenty v této práci byly prováděny na základě této publikace.

4.1 Provedené zkoušky a experiment

Na vzorcích byly provedeny nedestruktivní i destruktivní zkoušky. Veškeré zkoušky byly provedeny za účelem zjištění hodnot a parametrů vybraných hornin pro určení již zmíněného ukazatele trvanlivosti. Z nedestruktivních zkoušek to byla prakticky jen ultrazvuková metoda, z destruktivních zkoušek to byla pevnost v příčném tahu, tříbodový ohyb, metoda vertikální nasákavosti pro zjištění transportu kapalné vody a rtuťová porozimetrie. Experimentem je zatěžování sedimentů krystalizací solí v jejich pórovém systému v klimatické komoře. Vedle těchto zkoušek byla provedena i mikroskopie. Prakticky všechny uvedené zkoušky jsou běžně známé, proto bude stručně popsána jen rtuťová porozimetrie a následně bude detailně popsán krystalizační experiment.

Obr. 27: Měření transportu kapalné vody metodou vertikální nasákavosti [34]

Obr. 28: Tříbodový ohyb

4.1.1 Rtuťová porozimetrie

Rtuťová porozimetrie je metoda, která udává informace o porézní struktuře materiálu. Je založená na jevu kapilární deprese, kdy se provádí ponoření pórovitého materiálu do kapaliny, která jej špatně smáčí, tedy rtuť. Ta může do pórů daného materiálu vniknout pouze působením vnějšího tlaku. Z velikosti tlaku, který je nutný ke vtlačení určitého objemu rtuti do pórů, je určován poloměr pórů. Čím vyšší je tlak, tím více se rtuť dostane do menších pórů. Při našich pokusech na přístroji Pascal 140 a Pascal 440 byly použity dvě tlaková rozhraní. Jedno 0,003-0,13 MPa, pro zjištění pórů o poloměru 4-100 μm a druhé 0,13-400 MPa pro detekci pórů 3 nm až 4 μm. Rtuťová porozimetrie je vhodná pro materiály s póry o poloměrech menších než 3 nm a právě proto je vhodná pro sedimentární horniny. Pro úplnost dodám, že existují i další metody, jako je třeba plynová adsorpční porozimetrie či elektronová mikroskopie, nicméně plynová porozimetrie je vhodná pro mikro a mezopóry o poloměru menší 25 μm, což je pro sedimentární horniny nevhodné. [33]

Obr. 29: Rtuťový porozimetr PASCAL 140 a 440 [33]

4.2 Prováděné experimenty dle metodiky „Benavente“

Jak již bylo řečeno, hlavní inspirace byla na experimentu prováděným Benaventem. Pro náš experiment pro zjištění množství DWL („opadu ze vzorků“) bylo použito celkem 25 vzorků (5 ks božanovského pískovce, 5 ks hořického, 5 ks těšínského, dále 5 ks džbánské opuky a 5 ks přibylovské). Rozměry těchto vzorků byly 2,5 x 2,5 x 5 cm. Vzorky jednotlivých hornin byly vloženy do roztoku různých solí. Při celém trvání experimentu bylo zaručeno, že vzorky byly částečně ponořeny, přičemž hladina roztoku byla vždy minimálně 5 mm. Následně byly vzorky vloženy do klimatické komory, na které se nastavil program s dvěma teplotními úrovněmi T_1 a T_2 a řízenou rychlostí teplotní změny za předem předepsaných vlhkostí. Všechny tyto hodnoty byly inspirovány také podle Benaventeho experimentů a jejich hodnoty jsou tyto: Teplota T_1: 40°C, 80 % RH, teplota T_2: 10°C, 70 % RH. Pro porovnání účinků krystalizace při nižších teplotách, byl pro jednu vybranou sůl proveden pokus i při nižších teplotách a to takto: Teplota T_1: 25°C, 80 % RH, teplota T_2: 2°C, 70 % RH. Všechny tyto hodnoty budou jasně vidět na fázových diagramech v následující kapitole. Počet cyklů byl 20. Každá úroveň změny teploty trvala 12 hodin, a tedy jeden cyklus trval 24 hodin. Celkem tedy tato operace zabrala bez ostatních činností 20 dní z čehož je jasně vidět, jak časově náročný tento experiment byl. Po dokončení cyklování byly vzorky omyty vodou a znovu vloženy do vody,

aby se ze vzorků navázaly zbytky krystalizované soli. Následně byly znovu omyty vodou a vloženy do sušárny. Po vysušení byly vzorky váženy a byl sledován úbytek jejich hmotnosti, tedy již zmíněný DWL.

Stejným způsobem, jako byly zatěžovány vzorky pro zjištění DWL, byly zatěžovány i vzorky pro zkoušku pevnosti v příčném tahu. Ta byla prováděna na zatížených vzorcích o rozměrech 5 x 5 x 10 cm.

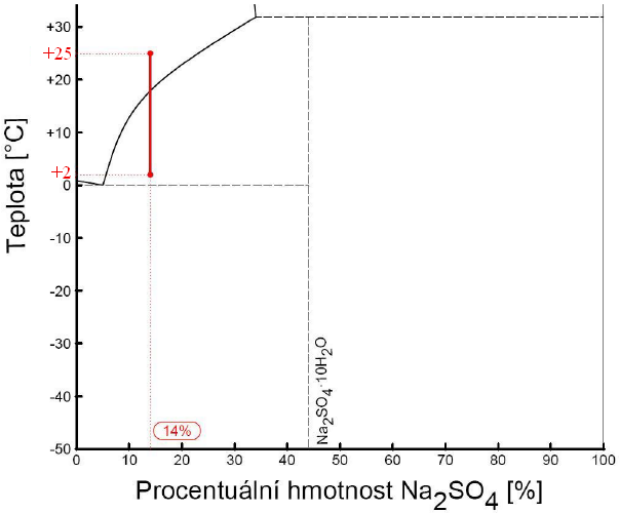
4.2.1 Fázové diagramy solí použitých pro experimenty

V této práci byly použity soli, které jsou na našem území nejrozšířenější a jsou jedněmi z hlavních činitelů při chemické degradaci porézních stavebních materiálů. Pro připomenutí uvedu pár faktů zmíněných již v teoretické části. Největším problémem, tedy nejvíce agresivními solemi jsou ty, které mění svoje skupenství za běžných klimatických podmínek (krystalizují), a které také tvoří hydráty, tedy ve své krystalové mřížce vážou molekuly vody. Tyto procesy jsou vždy doprovázeny objemovými změnami, které můžou dosáhnout až několikanásobku původního objemu. Z toho důsledku působí na póry materiálů velkým tlakem. Každý materiál odolává až do překročení jeho meze pevnosti. Nejvíce ovlivňujícím faktorem je distribuce a velikost jeho pórů.

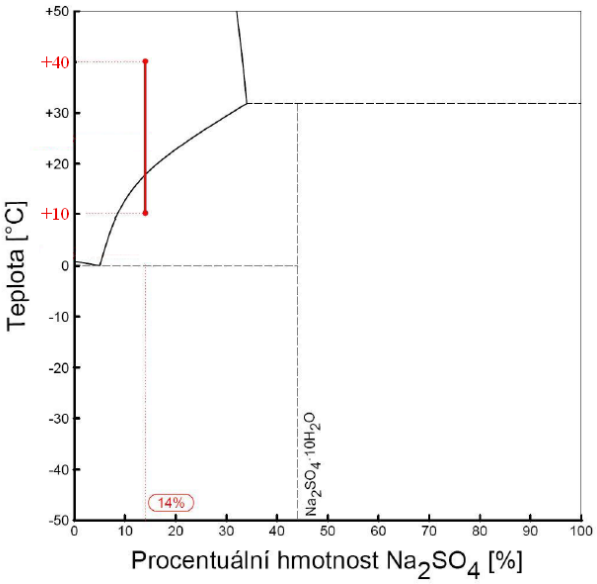
Podstatná je také koncentrace (hmotnostní) daných solí, neboť od té jsou dále ovlivněné její skupenské formy za určitých teplot, což je zřejmé z fázových diagramů, které jsou uvedeny na obrázcích 30, 31, 32 a 33. Koncentrace byly samozřejmě úmyslně vybrány tak, aby proběhla skupenská změna resp. krystalizace. Fázová změna v závislosti na koncentraci je vyznačena červeně. Konkrétně byly použity Na_2SO_4 a to ve dvou různých teplotách, dále NaCl a také Na_2CO_3. Koncentrace udává tabulka 8. [4]

Sůl	**Síran sodný**	**Chlorid sodný**	**Uhličitan sodný**
Vzorec	Na_2SO_4	NaCl	Na_2CO_3
Zvolená koncentrace roztoku	14%	30%	24%

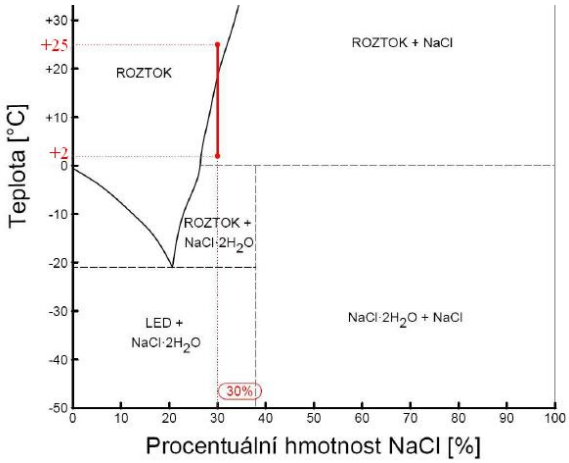
Tab. 8: Soli použité v experimentech



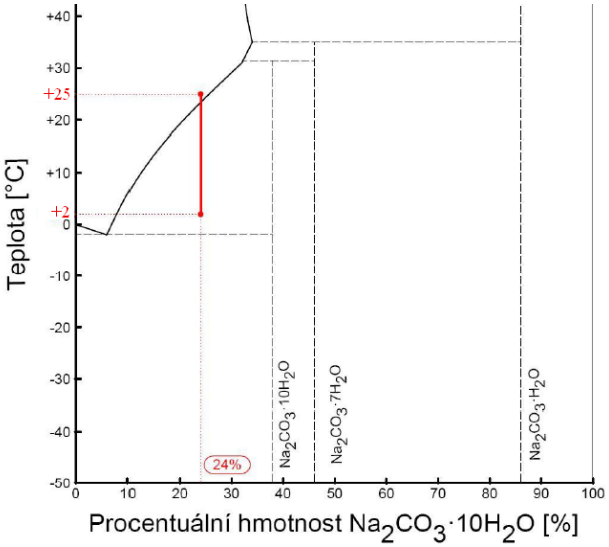
Obr. 30: Fázový diagram Na_2SO_4 - nižší teploty



Obr. 31: Fázový diagram Na_2SO_4



Obr. 32: Fázový diagram NaCl



Obr. 33: Fázový diagram $Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$

4.3 Metody pro výpočet krystalizačního tlaku

Krystalizace soli ve struktuře pórového materiálu vyvolává tlak a při překročení jeho pevnosti dochází následně k jeho poškození či úplné destrukci. Již na začátku 20. století proběhly pokusy za účelem kvantitavního popisu tohoto procesu. Velikosti krystalizačních tlaků, jsou ale velmi obtížně měřitelné, a tak byly tendence tyto tlaky určit výpočtem.

Pravděpodobně nejstarší vzorec pro výpočet krystalizačního tlaku publikoval v roce 1949 Carl Wilhelm Correns.

$$p_{corr} = \frac{\mathrm{RT}}{V_x} ln \frac{c_{298}}{c_{sat}} \qquad \text{Eq. 1 [7]}$$

Symbolem p_{corr} se myslí krystalizační tlak dle Corrense, R je univerzální plynová konstanta, T je teplota, při níž probíhá krystalizace, V_x je molární objem tvořícího se krystalu soli. Poměr v logaritmu znamená přesycení roztoku – c_{298} je molární koncentrace výchozího roztoku, se kterým se prováděl experiment, c_{sat} je koncentrace nasyceného roztoku při teplotě krystalizace. Pokud by tento poměr byl menší než 1, logicky nám z toho vyplívá, že by krystalizace neprobíhala, neboť krystaly rostou pouze v přesyceném roztoku. Vztah Eq. 1 má ale dvě hlavní nevýhody. Nezohledňuje druh soli, jen její molární objem a také nezohledňuje pórový prostor materiálu, ve kterém krystalizace probíhá.

Kvůli nevýhodám vztahu Eq. 1, přišli Fitzner a Snethlage s řešením, kdy by vzorec myslel na pórový systém daného materiálu a i na vlastnosti dané soli. Jejich názor byl takový, že krystaly primárně rostou ve větších pórech (poloměr R) a že po jejich zaplnění pokračují do pórů menších (poloměr r), proto jejich definiční vztah myslí na poloměry malých a velkých pórů. Počítají dále také s mezifázovým napětím σ, které se tvoří na rozhraní krystalu soli a nasyceného roztoku. Jejich vztah uvádí Eq. 2. [7]

$$p_{fs} = 2\sigma\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R}\right) \qquad \text{Eq. 2 [7]}$$

4.3.1 Metody výpočtu mezifázového napětí

Nejdůležitějšími údaji při výpočtu krystalizačního tlaku jsou velikosti pórů a hodnoty mezifázového napětí. Velikost a distribuce pórů se dá jednoduše zjistit z jedné z porozimetrických analýz, mezifázové napětí je určitelné obtížně. Pánové Nielsen a Söhnel odvodili vztah Eq. 3. V něm figuruje k, což je Bolztmanova konstanta, T je teplota při které probíhá krystalizace, c_x je molární koncentrace soli v krystalu (převrácená hodnota V_x), c_{sat} je koncentrace nasyceného roztoku při teplotě krystalizace, h je hydratační číslo kationtu soli (počet molekul vody, které vytváří jeho hydratační obal v nasyceném roztoku), M je molární hmotnost krystalizující soli, υ je počet iontů v jedné molekule soli, ρ je hustota krystalu a N_A je Avogadrova konstanta. Zmíněné hydratační číslo je problematické v tom směru, že je velice obtížné ho určit. Literatura udává, že se většinou pohybuje mezi hodnotami 1 až 10. Jednoduše odhadnout nelze a zjistit jeho hodnotu experimentálně je taky

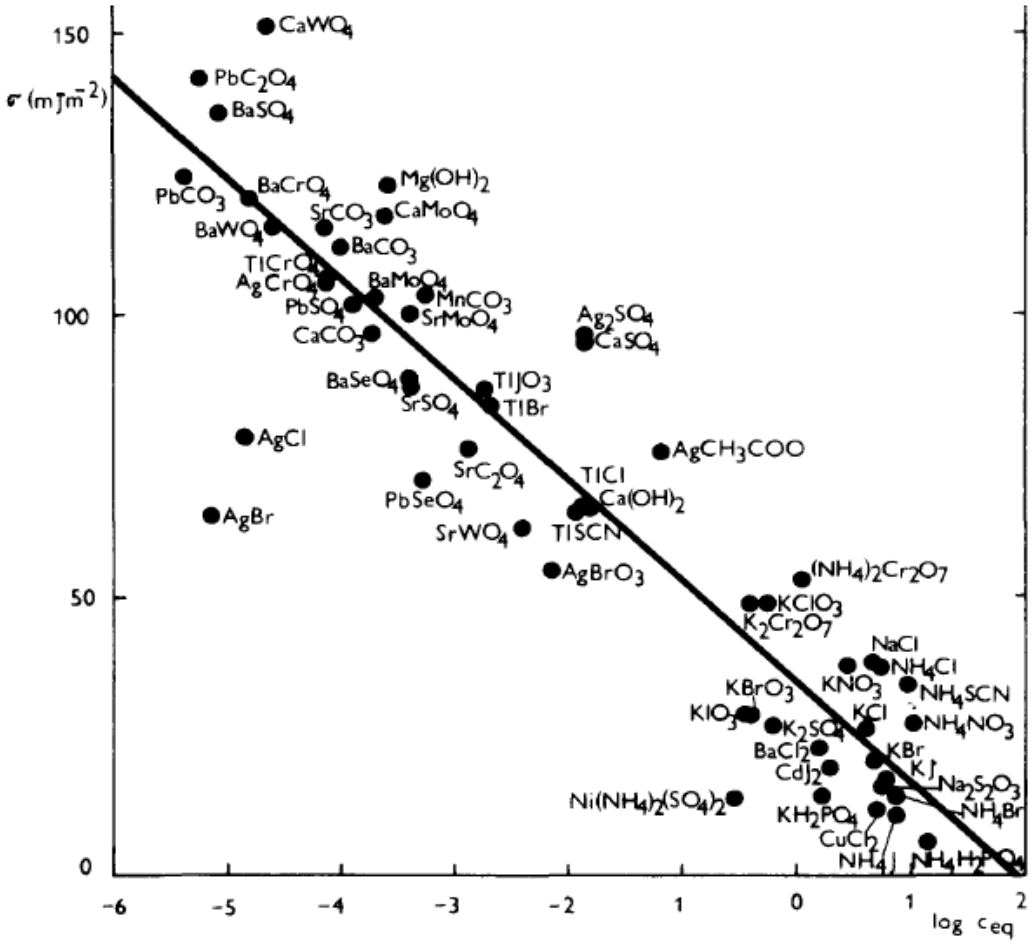
velice náročné. Söhnel pak vytvořil na základě množství experimentů korelační vztah, který je založen na lineární funkci mezifázového napětí a rozpustnosti dané soli. Vytvořil vztah Eq. 4, kde figurují konstanty A a B, jejíž hodnoty udává tabulka 9. Tuto korelaci je možné vidět na obr. 34. Vzhledem k tomu, že byl použit síran sodný, chlorid sodný a uhličitan vápenatý, budou uvažovány hodnoty koeficientů z tab. 9 pro rozpustné soli. [6]

$$\sigma = kT \frac{\left(\frac{c_x}{c_{sat}}\right)}{h\left(\frac{M}{\upsilon \rho N_A}\right)^{\frac{2}{3}}} \qquad \text{Eq. 3 [6]}$$

$$\sigma = A \cdot log c_{sat} + B \qquad \text{Eq. 4 [6]}$$

koeficient	A	B
málo rozpustné soli	-16,8	42,2
rozpustné soli	-9,0	29,8
celková korelace	-17,8	34,8

Tab. 9: Konstanty pro vztah Eq. 4 [6]



Obr. 34: Mezifázové napětí jako funkce rozpustnosti soli [6]

4.4 Trvanlivostní indikátory

Schopnost sedimentárních hornin vzdorovat nepříznivým vlivům okolního prostředí, je v jejich případě závislá nejen na stupni agresivity okolního prostředí, ale také na struktuře jejich pórového prostoru. Za účelem zkrácení času a zjednodušení procesu posuzování vhodnosti jednotlivých hornin, by bylo velkým přínosem zhodnotit vhodnost jejich použití na základě základních a relativně rychle dostupných informací resp. jejich parametrů. Proto je snahou definovat indikátory, které vystihují odolnost hornin na základě jejich fyzikálních vlastností, případně indikátory, které jsou závislé na jejich fyzikálních vlastnostech a určitých vlastnostech okolního prostředí. V případě sedimentárních hornin jsou tyto indikátory založené na vlastnostech pórového systému nebo jejich mechanických vlastnostech, anebo obojího.

Ordónez navrhl takzvaný „durability dimensional estimator“ DDE, což indikátor založený na struktuře pórového systému, viz Eq. 5, kde $D_v(r_i)$ vychází z distribuční křivky pórového systému a r_i je velikost daného póru. P_{conc} je celková pórovitost. Tento indikátor si klade za cíl charakterizovat horninu pouze jedním číslem na základě znalosti pórového systému. [8]

$$DDE = \sum \frac{D_v(r_i)}{r_i} P_{conc} \qquad \text{Eq. 5 [8]}$$

Jelikož z logiky věci vyplývá, že pórový systém přímo koresponduje s mechanickými vlastnostmi sedimentárních hornin, navrhli Benavente a kol. [8] petrofyzikální trvanlivostní indikátor PDE (petrophysical durability estimator). Ten reprezentuje vztah mezi krystalizačním tlakem a odolností toho daného materiálu v závislosti na distribuci pórů a jeho mechanickou vlastností. Oni navrhli jako reprezentativní mechanické vlastnosti pevnost v tlaku σ_C, pevnost v tahu za ohybu σ_F a dynamické modul pružnosti E. Jelikož pevnost v tlaku je v případě sedimentárních hornin parametr, který je spíše vzdálený skutečnému chování při namáhání krystalizací a dalo by se říct, že je jaksi nadhodnocen, byl v této práci

nahrazen pevností v příčném tahu σ_{ct}, která lepé charakterizuje namáhání sedimentů při krystalizací solí v pórech.

$$PDE_c[m/kg] = 10\frac{DDE}{\sigma_c} \qquad \text{Eq. 6 [8]}$$

$$PDE_{ct}[m/kg] = 10\frac{DDE}{\sigma_{ct}} \qquad \text{Eq. 7}$$

$$PDE_F[m/kg] = 10\frac{DDE}{\sigma_F} \qquad \text{Eq. 8 [8]}$$

$$PDE_E[m/kg] = 10\frac{DDE}{E} \qquad \text{Eq. 9 [8]}$$

5 Výsledky a diskuze

5.1 Výsledky absorpčního experimentu

Z výsledků experimentu vertikální nasákavosti je patrné, že nejvíce nasákavý je božanovský pískovec, přičemž o toto nejhorší umístění se dělí se džbánskou opukou. O trochu lépe vyšel z experimentu hořický pískovec, který si vedl obdobně či o trochu hůře než džbánská opuka. Přibylovská opuka a těšínský pískovec si vedli v zásadě obdobně. Z celkového hlediska je však nejméně nasákavým kamenem přibylovská opuka. Je nutno ještě dodat, že těšínský pískovec se jevil ze všech testovaných vzorků jako nejvíce homogenní materiál. Naměřené hodnoty uvádí tab. 10, kde jsou z hlediska nasákavosti seřazeny horniny vzestupně. Výsledky jsou uvedeny formou parametrické křivky, jejíž sklon ukazuje nasákavost té dané horniny.

Přibylovská opuka	y = 0,005x-0,012	R^2 = 0,972
Těšínský pískovec	y = 0,006x-0,006	R^2 = 0,974
Hořický pískovec	y = 0,033x-0,054	R^2 = 0,989
Džbánská opuka	y = 0,042x-0,025	R^2 = 0,992
Božanovský pískovec	y = 0,050x-0,011	R^2 = 0,988

Tab. 10: Výsledky absorpčního experimentu

5.2 Stanovení mezifázového napětí a krystalizačního tlaku

5.2.1 Vstupní data

Veškerá vstupní data byla zjištěna z tabulek nebo byla provedena výpočtem. Tab. 11 udává vstupní data potřebná pro výpočet krystalizačního tlaku dle Corrense, tab. 12 udává data nutná pro výpočet mezifázvého napětí podle Nielsena a Söhnela. Koeficienty A a B nutné pro výpočet mezifázového napětí dle Söhnela byly již uvedeny v tab. 9 v kapitole 4.3.1 Metody výpočty mezifázového napětí.

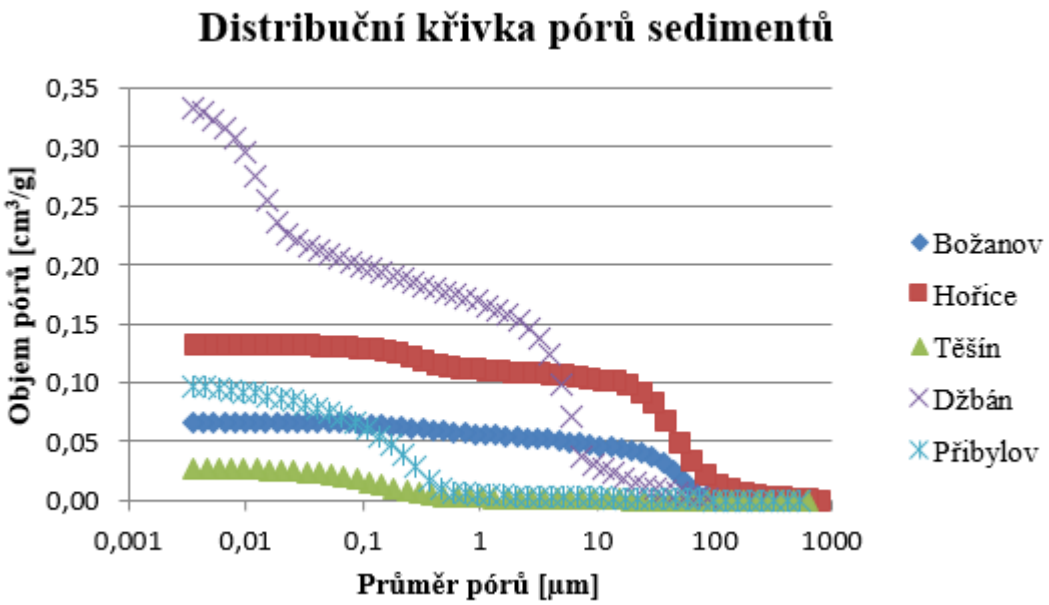
			Na_2SO_4	Na_2SO_4	NaCl	Na_2CO_3
T	Teplota	K	283	275	275	275
C_x	Koncentrace "v krystalu"	mol/l	4,544	4,544	37,072	5,068
V_x	Měrný objem krystalů	l/mol	0,2201	0,2201	0,0270	0,1973
C_{298}	Koncentrace roztoku	mol/l	1,084	1,084	6,010	2,604
C_s	Nasycená koncentrace	mol/l	0,625	0,414	5,314	0,670
r_s	Hustota nasyceného roztoku	g/ml	1,07	1,07	1,18	1,10
r_{298}	Hustota nenasyceného roztoku	g/ml	*1,10*	*1,10*	1,17	1,15
w_s	Nasycená koncentrace (bezv.	%	8,3	5,5	26,32	10,8
w	Hm. zlomek soli v roztoku	%	14	14	30	24

Tab. 11: Data pro výpočet krystalizačního tlaku dle Corrense

	Systém		Na_2SO_4	Na_2SO_4	NaCl	Na_2CO_3
	Krystalizující sůl		Na_2SO_4. $10H_2O$	Na_2SO_4. $10H_2O$	NaCl	Na_2CO_3 .$10H_2O$
w	Hm. zlomek soli v roztoku	%	14	14	30	24
T	Teplota	K	283	275	275	275
C_x	Koncentrace "krystalu"	mol/l	4,544	4,544	37,07	5,068
w_s	Nasycená koncentrace (283 K) bezvodý	%	8,3	5,5	26,3	6,4
ρ_s	Hustota nasyceného roztoku	g/ml	1,070	1,070	1,180	1,103
C_s	Nasycená koncentrace	mol/l	0,625	0,414	5,314	0,670
h	Hydratační číslo	-	1	1	3	1
M	Molární hmotnost krystalující soli	g/mol	322,9	322,9	58,4	286,1
M	Molární hmotnost krystalující soli - bezvodé	g/mol	142,0	142,0	58,4	106,0
ν	Počet iontů	-	3	3	2	3
ρ_x	Hustota krystalu	g/ml	1,464	1,464	2,165	1,45

Tab. 12: Data pro výpočet mezifázového napětí dle Nielsena a Söhnela

Proto, aby mohl být výpočet krystalizačního tlaku proveden dle Fitznera a Snethlageho, je nutné znát distribuční křivku. Tu představuje obr. 35. Vliv pórové struktury na odolnost vůči krystalizujícím solím bude ještě probrána v následujících kapitolách.



Obr. 35: Distribuční křivka pórů jednotlivých sedimentů

5.2.2 Výsledky mezifázového napětí a krystalizačních tlaků

Následující tab. 13 ukazuje hodnoty mezifázového napětí, potřebného pro výpočet krystalizačního tlaku podle Fitznera a Snethlageho. Hodnoty mezifázového napětí, které jsou označeny tučně, byly použity pro následný výpočet krystalizačních tlaků. Je vidět, že experimentální data vyjmutá z [8], se v případě NaCl liší od vypočtených hodnot. Konkrétní experimentální data pro konkrétní sůl jsou určitě věrohodnější než obecně definovaný vztah, proto budou uvažovány zmíněné experimentální hodnoty.

Systém		Na_2SO_4	Na_2SO_4	NaCl	Na_2CO_3
Mezifázové napětí dle Eq. 4 (Nielsen a Söhnel)	mJ/m^2	31	37	31	34
Mezifázové napětí dle Eq. 5 pro rozpustné soli (Söhnel)	mJ/m^2	32	32	23	29
Experimentální data [8]	mJ/m^2	-	-	38	-
Použité hodnoty mezifázového napětí	**mJ/m^2**	**31,5**	**34,5**	**38**	**33**

Tab. 13: Hodnoty mezifázových napětí

Tab. 14 jasně ukazuje, že výpočet krystalizačního tlaku s uvážením pouze dané soli (Correns), bez uvážení pórového systému materiálu, ve kterém se nachází, a tedy i bez uvážení mezifázových napětí, je špatný. Dostáváme z něj přehnané a nepravdivé hodnoty. Výsledky s uvážením pórového systému (Fitzner a Snethlage), velmi dobře reflektují velikosti krystalizačních tlaků v pórech, jejichž velikost je jednoduše řečeno ovlivněna velikostí pórů nepřímo úměrně. Je tedy vidět, že kameny s menšími póry, jsou namáhány většími krystalizačními tlaky.

Krystalizační tlaky					
Systém		Na_2SO_4	Na_2SO_4	NaCl	Na_2CO_3
Krystalizační tlak - p_{corr} Eq. 1 (Correns)	MPa	5,9	10,0	10,4	15,7
Božanovský pískovec p_{fs} dle Eq 2 (Fitzner a Snethlage)	MPa	1,3	1,4	1,5	1,3
Hořice pískovec p_{fs} dle Eq. 2 (Fitzner a Snethlage)	MPa	2,9	3,1	3,5	3,0
Těšínský pískovec p_{fs} dle Eq. 2 (Fitzner a Snethlage)	MPa	5,0	5,5	6,1	5,3
Džbánská opuka p_{fs} dle Eq. 2 (Fitzner a Snethlage)	MPa	4,7	5,1	5,6	4,9
Přibylovská opuka p_{fs} dle Eq. 2 (Fitzner a Snethlage)	MPa	10,4	11,4	12,6	10,9

Tab. 14: Hodnoty krystalizačních tlaků

5.3 Indikátor trvanlivosti a mechanické vlastnosti

Za účelem vypočtení hodnot indikátorů je třeba znát určité mechanické vlastnosti. Ty udává tabulka 15. Základní mechanické vlastnosti a především pórovitost, předem vypovídá o vlastnostech daného kamene a jeho odolnosti vůči krystalizujícím solím. Největší objemovou hmotnost a tedy nejnižší pórovitost má těšínský pískovec, který tedy zároveň i vykazuje nejlepší mechanické vlastnosti v nezatíženém stavu. Naopak největší pórovitost a tedy i nejhorší mechanické vlastnosti v nezatíženém stavu vykazuje džbánská opuka.

	Objemová hmotnost ρ [kg/m^3]	Celková pórovitost P [%]	Pevnost v příčném tahu σ_{ct} [MPa]	Pevnost v tahu za ohybu σ_F [MPa]	Modul pružnosti E [GPa]
Božanovský pískovec	2224	16,8	4,1	5,2	24,1
Hořický pískovec	1898	27,3	2,1	2,2	8,7
Těšínský pískovec	2500	7,2	10,5	14,7	30,4
Džbánská opuka	1215	40,4	2,0	3,6	4,0
Přibylovská opuka	2210	21,5	5,3	14,2	21,5

Tab. 15: Vlastnosti jednotlivých kamenů

Hodnoty indikátorů nezatížených vzorků, které ukazuje tab. 16, vypovídají o jejich značné problematice při použití na různých sedimentárních horninách. Zatímco na pískovcích vidíme v zásadě hodnoty, se kterými můžeme pracovat a porovnávat je, u opuk a to především té džbánské, to nelze. Z důvodu množství a distribuce jejích pórů, které ovlivňují výpočet a hodnotu indikátoru DDE, je jasně vidět, že je o dva řády jinde než ostatní sedimenty. Jelikož indikátor PDF vychází z indikátoru DDE, je jasné, že tento trend pak pokračuje i u indikátorů PDF. Na základě těchto poznatků si dovolím uvést názor, že indikátory DDE a PDF jsou pro opuky zcela nevhodné.

Nezatížené vzorky	DDE	PDF_{ct}	PDF_F	PDF_E
Božanovský pískovec	0,03	0,07	0,06	0,01
Hořický pískovec	0,09	0,44	0,40	0,10
Těšínský pískovec	0,07	0,07	0,05	0,02
Džbánská opuka	10,42	51,58	29,27	26,31
Přibylovská opuka	0,96	1,80	0,67	0,45

Tab. 16: Hodnoty indikátorů

Po uvážení, na který z indikátorů se nejvíce zaměřit, jsem došel k závěru, že nejzajímavějším indikátorem, který by mohl reflektovat realitu zatížení krystalizací

solí je indikátor PDF_{ct}, který pracuje s pevností v příčném tahu. Ta dle mého názoru nejlépe vystihuje namáhání stěn pórů krystalizací. Hodnoty indikátorů ukazují zajímavé trendy. Před shrnutím musím opět dodat, že nebude brán zřetel na džbánskou opuku, a že chybějící hodnota u zatížení uhličitanem vápenatým v tab. 17 znamená, že došlo k totálnímu rozpadu vzorku a nebylo tedy možné ho zmáčknout na lisu. Obecně pro indikátor DDE i PDF platí, že čím menší je jeho hodnota, tím vhodnější resp. trvanlivější by hornina měla být. Jasně podle této metodiky vypadává z hledáčku zajímavých hornin hořický pískovec, neboť ten dle tab. 15 disponuje nízkými mechanickými vlastnostmi, a dle tab. 18 i více opadává. Tento jeho nedobrý výsledek je i jasný z tab. 17, kde indikátory ukazují jeho vyšší hodnoty ve srovnání s ostatními kameny. Přibylovská opuka, dle tab. 17 je v indikátorech prakticky o řád jinde, což by se také dalo označit jako nesrovnatelná hodnota, nicméně trend, že čím vyšší je hodnota indexu DDE, tím horší vlastnosti hornina má, platí. Důkazem je tab. 18, kde je i jasně vidět značný pokles pevnosti v příčném tahu.

Samostatný odstavec bude věnován božanovskému a těšínskému pískovci. Jejich srovnání, může rozhodnout o kvalitě Benaventeho indikátorů. Ačkoli božanovský pískovec disponuje horšími mechanickými vlastnostmi než pískovec těšínský, lépe odolává zatížení krystalizací solí. Naopak těšínský pískovec, který disponuje lepšími mechanickými vlastnostmi, silně podléhá destrukci krystalizací. Těšínský pískovec má menší póry a má tedy lepší mechanické vlastnosti, ale právě tyto malé póry jsou namáhané větším krystalizačním tlakem. To potvrzují hodnoty krystalizačních tlaků v tab. 14. Indikátory tato fakta jasně potvrzují, navíc je z nich také patrné, že struktura božanovského pískovce je méně závislá na typu soli, která jí zatěžuje. Ze všech zjištěných dat se dá dedukovat, že při větším počtu cyklů než 20 (pozn. 20 cyklů bylo použito při těchto experimentech), by božanovský pískovec přibližně udržel své vlastnosti, ale těšínský pískovec by z hlediska mechanických vlastností upadal. V tab. 17 je z indikátoru PDF vidět, že se božanovský pískovec, svými mechanickými vlastnostmi tolik nevzdálil nezatíženému stavu, těšínský pískovec se vzdálil znatelně víc. Ačkoli „opady“ ze vzorků jsou pro oba tyto kameny srovnatelné, opět si dovolím uvést osobní názor, že při více cyklech by „opady“ těšínského pískovce v důsledku trendu ztráty jeho mechanických vlastností byly větší. Z těchto zjištěných poznatků si myslím, že božanovský pískovec je velice zajímavým materiálem, jehož popularita na našem území je více než oprávněná.

	Nezatížený vzorek	Nezatížený vzorek	Na_2SO_4 Nižší teplota	Na_2SO_4 Vyšší teplota	NaCl	Na_2CO_3
Indikátor	DDE	PDF_{ct}	PDF_{ct}	PDF_{ct}	PDF_{ct}	PDF_{ct}
Božanovský pískovec	0,03	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08
Hořický pískovec	0,09	0,44	0,53	0,47	0,53	-
Těšínský pískovec	0,07	0,07	0,08	0,12	0,13	0,14
Džbánská opuka	10,42	51,50	75,23	68,41	71,66	55,20
Přibylovská opuka	0,96	1,80	1,45	2,32	3,25	8,28

Tab. 17: Výsledky indikátorů DDE a PDF

Systém	Na_2SO_4 - nižší teplota	Na_2SO_4 - vyšší teplota	NaCl	Na_2CO_3
	Pokles pevnosti v příčném tahu v %			
Božanovský pískovec	3	4	9	13
Hořický pískovec	17	7	17	100
Těšínský pískovec	19	45	50	52
Džbánská opuka	31	25	28	7
Přibylovská opuka	0	23	45	78
	"Opad" ze vzorků po zatěžování v %			
Božanovský pískovec	0	17	0	"100"
Hořický pískovec	0	23	0	"100"
Těšínský pískovec	1	16	0	"100"
Džbánská opuka	0	32	0	"100"
Přibylovská opuka	1	25	0	"100"

Tab. 18: Výsledky experimentů

Aby bylo možné, udělat si určitý názor na výsledky experimentů, pro zajímavost uvedu výsledky indikátoru DDE z publikace Benaventeho a kol. [8]. V publikaci zkoumali více sedimentů, celkem jich bylo 18, což poslouží k relativně zajímavému srovnání. Benavente a kol. řešili tři typy vápenců, které jsou označené BR, což je „biocalcirudite“, BC, což je „biocalcarenite“ a BM, což je „biomicrite“ a dále ještě křemenný arenit (pískovec) označený QA, což znamená „quartz–arenite“. Druhů kamenů bylo 18, neboť každý z kamenů se mineralogicky trochu lišil. Z výsledků, které udává tab. 19 je zřejmé, že pískovce oproti vápencům dosahují nižších hodnot indikátoru DDE a tedy by měly být trvanlivější. Také je zřejmé, že již výše zmíněná džbánská opuka, u které bylo prohlášeno, že v indikátoru vyčnívá vysokou hodnotou indikátoru nad ostatními pískovci a přibylovskou opukou, vyčnívá i nad všemi vápenci a i nad křemenným arenitem. Z uvedených výsledků v tab. 19 je

také zřejmá rozmanitost vypočtených hodnot, což dle mého názoru vrhá spíše nedobrý stín na indikátor DDE a nejsem si jistý jeho použitelností.

Hornina	BR-1	BR-2	BR-3	BR-4	BR-5	BR-6	BR-7	BR-8
DDE	0.29	0.34	0.45	0.66	2.58	0.7	0.62	0.43
Hornina	BC-1	BC-2	BC-3	BC-4	BC-5	BC-6	BC-7	BC-8
DDE	6.7	4.58	3.34	2.69	7.57	1.89	1.23	5.42
Hornina	BM	QA	Božanovský pískovec	Hořický pískovec	Těšínský pískovec	Džbánská opuka	Přibylovská opuka	
DDE	3.4	0.55	0,03	0,09	0,07	10,42	0,96	

Tab. 19: Porovnání výsledků indikátoru DDE [8]

Na závěr diskuze se pokusím stručně znovu shrnout moje poznatky. Benaventeho indikátory v zásadě popisují realisticky trvanlivost kamenů při krystalizaci solí, ale pouze u pískovců, pro opuky si myslím, jsou naprosto nevhodné. Musím ale dodat, že i u pískovců je těžké rozeznat, co které hodnoty znamenají a kdy hodnota indikátoru už skutečně predikuje horninu nevhodnou. Nejlepším využitím je zřejmě srovnávání hornin za pomoci indikátorů, při alespoň určité znalosti mechanických vlastností. Pak se dají nalézt slušné závěry odpovídající realitě a určit tak trvanlivost pískovců při odolávání krystalizací solí. Indikátor PDE nijak dobře nepredikuje opad ze vzorků a to jak u pískovců, tak i u opuk. Určitě platí fakt, že znalost pórového systému je u sedimentárních hornin jedna z nejdůležitějších materiálových charakteristik.

6 Závěr

Předmětem této práce byla krystalizace solí v porézní struktuře pískovců a opuk a výpočet krystalizačních tlaků a trvanlivostních indikátorů.

V teoretické části práce byly obecně popsány vlastnosti pískovců na našem území a následně byly důkladně probrány vybrané pískovce, které byly použity při experimentech. Byly uvedeny klady a zápory jednotlivých kamenů, byla řešena historie jejich těžby a využití, jejich výskyt na našem území, současné využití a petrografické a mechanické vlastnosti. Byly také uvedeny příklady realizací ve

stavebnictví či v architektuře a sochařství. Stejně byly zpracovány i opuky. Bylo také obecně pojednáno o výkvětech na stavebních objektech.

V praktické části práce byl proveden obecný úvod do výpočtu krystalizačních tlaků a byly uvedeny naměřené fyzikální vlastnosti zkoumaných kamenů. Následně byl proveden výpočet krystalizačních tlaků a to dvěma způsoby. První způsob řešil jejich výpočet pouze na základě koncentrace dané soli a okolní teplotě. Druhý výpočet navíc přihlížel k pórovému systému daného materiálu. Také pracoval s pojmem mezifázové napětí, tedy napětí na pomezí krystalu a stěny póru. Při tomto výpočtu byla důležitým faktorem křivka distribuce pórů. To samozřejmě dává za vznik velmi rozdílným hodnotám, které ovšem dobře reflektují reálné vývoje krystalizačních tlaků, na rozdíl od prvně zmíněného výpočtu založeného pouze na koncentraci dané soli a okolní teplotě. Dále byl vypočten indikátor DDE, což je indikátor, který je založen pouze na znalosti pórového systému. Indikátor DDE se z mého pohledu jeví jako méně použitelný a zajímavější je indikátor PDE, který zahrnuje indikátor DDE a nějakou mechanickou vlastnost. Pro tuto práci byla vybrána pevnost v příčném tahu. Indikátory PDE a DDE absolutně nefungovaly pro opuky, z důvodu rozdílného pórového systému oproti pískovcům. U pískovců indikátor PDE fungoval v zásadě dobře, nicméně pro určité vyhodnocení trvanlivosti či kvality kamenů je vždy třeba zahrnout také znalost nějaké mechanické vlastnosti, neboť z indikátoru je poznat, jak kámen reaguje na krystalizaci, ale je už méně poznat jaké má mechanické charakteristiky. Byl také zkoumán opad materiálu ze vzorků, tedy takzvaný DWL. Indikátor PDE opad ze vzorků nijak dobře nepredikoval. Výsledkem je tedy fakt, že indikátor PDE při zatížení krystalizací solí dobře predikuje pouze změny pevnostních charakteristik pískovců nikoliv však opuk.

Literatura

[1] RYBAŘÍK V.: *Ušlechtilé stavební a sochařské kameny České republiky*. Nadace Střední průmyslové školy kamenické a sochařské v Hořicích v Podkrkonoší, 1994.

[2] ŠAMALÍKOVÁ, M.; LOCKER, J.; POSPÍŠIL, P.: *Geologie pro stavební inženýry*, CERM Brno, 1995.

[3] BÍNA, J.; DEMEK, J.: *Z nížin do hor. Geomorfologické jednotky České republiky*, Academia v Praze, 2012.

[4] PAVLÍKOVÁ, M.; PAVLÍK, Z.; HOŠEK, J.: *Materiálové inženýrství I*. Vydavatelství ČVUT v Praze, 2011.

[5] HOŠEK, J.; LOSOS, L.: *Historické omítky*. Grada Publishing, a. s., 2007.

[6] SÖHNEL, O.: *Electrolyte crystal-aqueous solution interfacial tensions from crystallization data*. Nort-Holland Publishing Company, 1981.

[7] BENAVENTE D.; GARCÍA C.; FORT. R.; ORDÓNEZ S.: *Thermodynamic modelling of changes induces by salt pressure crystallisation in porous media of stone*. Department of Earth and Enviromental Sciences, Complutense University, Madrid, Spain, 1999.

[8] BENAVENTE D.; GARCÍA C.; FORT. R.; ORDÓNEZ S.: *Durability estimation of porous building stones from pore structure and strenght.* Engineering geology, 2004.

Seznam elektronických studijních zdrojů

[9] ČESKÁ GEOLOGICKÁ SLUŽBA: LOKALIZAČNÍ APLIKACE, *Geologická mapa České republiky*. Dostupné z:

http://www.geology.cz/app/ciselniky/lokalizace/

[10] HISTORICKÝ INTERNETOVÝ PORTÁL, *Keltové*. Dostupné z:

http://www.pohanstvi.net/kelti/hlavazezavisti.jpg

[11] PORTÁL VYŠEHRADSKÉ KAPITULY, *Obrázky*. Dostupné z:

http://www.kkvys.cz/wp-content/uploads/2011/12/265.jpg

[12] RYBAŘÍK V.; *Božanovský pískovec*. Revue Kámen [online], 2001.

Dostupné z:

http://www.revuekamen.cz/bozanovsky-piskovec.htm

[13] RYBAŘÍK V.; *Hořický pískovec z Podhorního Újezdu*. Revue Kámen [online], 2001. Dostupné z:

http://www.revuekamen.cz/horicky-piskovec.htm

[14] PORTÁL OBCE BOŽANOV, *Historie Božanova*. Dostupné z:

www.obecbozanov.cz/index.php/historie.html

[15] PORTÁL NĚMECKÉ SPOLEČNOSTI NATURSTEIN-WERKSTÄTTE ERNST MATT. *Steinsorten*. Dostupné z:

https://www.ernstmatt.de/der-sandstein/steinsorten.html#

[16] PORTÁL ČESKÉ GEOLOGICKÉ SLUŽBY. *Dekorační kameny*.

Dostupné z:

http://dekoracni-kameny.geology.cz/dk_cz.pl?tt_=e&iddk_=10047&idobj_=50264&idpou_=70237

[17] PORTÁL SPOLEČNOSTI KÁMEN ENGINEERING S. R. O. *Reference*. Dostupné z:

http://www.kamenengineering.cz/reference.htm

[18] PORTÁL KAMENOLOMY. *Kamenolom Řeka*. Dostupné z:

http://kamenolomy.fzp.ujep.cz/index.php?page=record&id=205

[19] WEBOVÝ MINERALOGICKO-PETROGRAFICKÝ EXKURZNÍ PRŮVODCE. *Kamenolom Řeka*. Dostupné z:

http://pruvodce.geol.morava.sci.muni.cz/Reka/Reka_text.htm

[20] PORTÁL SPOLEČNOSTI STONEGLOBAL. *Práce*. Dostupné z:

http://www.stoneglobal.cz/aktuality.php

[21] PORTÁL SPOLEČNOSTI KÁMEN OSTROMĚŘ S. R. O. *Pískovce*. Dostupné z:

http://www.piskovce.cz/dokumenty/horice.pdf

[22] PORTÁL SPOLEČNOSTI LOMY A TEŽBA. *Aktuality*. Dostupné z:

http://lomyatezba.cz/2015/2015-4/item/643-horicky-piskovec-ozdobi-dominantu-berlina

[23] PORTÁL WIKIPEDIA. *Commons*. Dostupné z:

https://commons.wikimedia.org/wiki/Main_Page

[24] PORTÁL SPOLEČNOSTI SPONGILIT S. R. O., *Džbánská opuka*. Dostupné z:

http://www.spongilit.cz/index.htm

[25] BLAHOTA, J.: *Džbánská opuka znovu na scéně*. Revue Kámen [online], 2013

http://www.revuekamen.cz/marlitecz.htm

[26] PORTÁL KAMENOLOMY. *Kamenolom Třeboc*. Dostupné z:

http://kamenolomy.fzp.ujep.cz/index.php?page=record&id=342&tab=petro

[27] PORTÁL SANACE OPUKY. *Používané opuky*. Dostupné z:

http://sanaceopuky.cz/pouzivane-opuky/

[28] PORTÁL SPOLEČNOSTI SPONGILIT S. R. O. *Reference*. Dostupné z:

http://www.spongilit.cz/reference.htm

[29] MAPOVÝ SERVER UJEP. *Dekorační kameny*. Dostupné z:

http://mapserver.ujep.cz/Projekty/Databaze_dekoracniho_kamene/?level=10&center=-634848.42398921,-1082071.1754987,102067

[30] PORTÁL KAMENOLOMY. *Kamenolom Přibylov.* Dostupné z:

http://kamenolomy.fzp.ujep.cz/index.php?page=record&id=326

[31] PORTÁL SPOLEČNOSTI SATES ČECHY S. R. O. *Přibylovská opuka*. Dostupné z:

http://www.satescechy.cz/cs/8-kategorie-jedna-cs-cz/21-pribylovska-opuka

[32] ODBORNÝ STAVEBNÍ PORTÁL ASB. *Omítky*. Dostupné z:

http://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/materialy-a-vyrobky/omitky/vykvety-na-licovem-zdivu

[33] PŘEDMĚT 123MAIN – MATERIÁLOVÉ INŽENÝRSTVÍ. Prezentace: *Základní materiálové parametry*. Katedra materiálového inženýrství a chemie FSv ČVUT. Dostupné z:

http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/MAIN/MAIN_cviceni_2-zakladni_materialove_parametry.pdf

[34] PŘEDMĚT 123TVVM – TEPELNÉ A VLHKOSTNÍ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ. Prezentace: *Transport kapalné vody*. Katedra materiálového inženýrství a chemie FSv ČVUT. Dostupné z:

http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/TVVM/voda.pdf

Seznam obrázků

Obr. 1: Plastika hlavy keltského muže ze Závisti u Zbraslavi [10] 12
Obr. 2: Základní klasifikace pískovců 14
Obr. 3: Geologická mapa lokality Božanov [9] 24
Obr. 4: Struktura božanovského pískovce 24
Obr. 5: Vzorek božanovského pískovce – 200x zvětšeno 25
Obr. 6: Pomník probošta Mikuláše Karlacha [11] 27
Obr. 7: Hotel Four Seasons Praha [17] 29
Obr. 8: Geologická mapa lokality Hořice [9] 35
Obr. 9: Struktura hořického pískovce 35
Obr. 10: Vzorek hořického pískovce – 200x zvětšeno 36
Obr. 11: Fasáda z hořického pískovce, Hotel Marriott Praha [17] 38
Obr. 12: Geologická mapa lokality Řeka [9] 40
Obr. 13: Struktura těšínského pískovce 41
Obr. 14: Vzorek těšínského pískovce – 200x zvětšeno 41
Obr. 15: Obytný komplex Vila Bianca Praha [17] 42
Obr. 16: Rotunda sv. Martina na Vyšehradě [23] 44
Obr. 17: Normativní složení opuk [1] 46
Obr. 18: Geologická mapa lokality Třeboc [9] 50
Obr. 19: Struktura džbánské opuky [27] 51
Obr. 20: Vzorek džbánské opuky – 200x zvětšeno 51
Obr. 21: Realizace z džbánské opuky [28] 53
Obr. 22: Mapa lokality Přibylov [29] 55
Obr. 23: Struktura přibylovské opuky [31] 56
Obr. 24: Vzorek přibylovské opuky – 200x zvětšeno 56
Obr. 25: Rotunda sv. Jiří [23] 58
Obr. 26: Výkvěty na zdivu [32] 64
Obr. 27: Měření transportu kapalné vody metodou vertikální nasákavosti [34] ... 66
Obr. 28: Tříbodový ohyb 67
Obr. 29: Rtuťový porozimetr PASCAL 140 a 440 [33] 68
Obr. 30: Fázový diagram Na_2SO_4 - nižší teploty 70
Obr. 31: Fázový diagram Na_2SO_4 70

Obr. 32: Fázový diagram NaCl 71
Obr. 33: Fázový diagram $Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$ 71
Obr. 34: Mezifázové napětí jako funkce rozpustnosti soli [6] 74
Obr. 35: Distribuční křivka pórů jednotlivých sedimentů..... 77

Seznam tabulek

Tab. 1: Fyzikální vlastnosti hlavních pískovců v České republice [1] 17
Tab. 2: Stratigraficko – regionální přehled hlavních výskytů a ložisek kamenicky a sochařsky využitelných pískovců v České republice [1] 19
Tab. 3: Fyzikální vlastnosti některých stavebních a sochařských opuk [1] 47
Tab. 4: Krystalizační tlaky některých druhů solí [4] 60
Tab. 5: Rekrystalizační tlaky některých druhů solí [4] 60
Tab. 6: Klasifikace salinity dle ČSN P 73 0610 [4] 61
Tab. 7: Klasifikace salinity dle EUREKA EU – 1270, v hm. % [4] 61
Tab. 8: Soli použité v experimentech 70
Tab. 9: Konstanty pro vztah Eq. 4 [6] 73
Tab. 10: Výsledky absorpčního experimentu 75
Tab. 11: Data pro výpočet krystalizačního tlaku dle Corrense 76
Tab. 12: Data pro výpočet mezifázového napětí dle Nielsena a Söhnela 77
Tab. 13: Hodnoty mezifázových napětí 78
Tab. 14: Hodnoty krystalizačních tlaků 78
Tab. 15: Vlastnosti jednotlivých kamenů 79
Tab. 16: Hodnoty indikátorů 79
Tab. 17: Výsledky indikátorů DDE a PDF 81
Tab. 18: Výsledky experimentů 81
Tab. 19: Porovnání výsledků indikátoru DDE [8] 82