

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**Fakulta stavební**

**Katedra materiálového inženýrství a chemie**

**Diplomová práce**



**Květen, 2018**

**Bc. Karel Kubr**

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**Fakulta stavební**

**Katedra materiálového inženýrství a chemie**

**Diplomová práce**



**Poškození porézních hornin krystalizujícími solemi**

**Damage of porous rocks by crystalizing salts**

**Autor: Bc. Karel Kubr**

**Vedoucí práce: doc. Ing. Martin Keppert, Ph.D.**

**Datum odevzdání: 20. 5. 2018**



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

studijní program: Stavební inženýrství  
studijní obor: Materiálové inženýrství  
akademický rok: 2017/2018

Jméno a příjmení diplomanta: Bc. Karel Kubr  
Zadávací katedra: Katedra materiálového inženýrství a chemie  
Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Martin Keppert, Ph.D.  
Název diplomové práce: Poškození poréznych hornin krystalizujícími solemi  
Název diplomové práce  
v anglickém jazyce: Damage of porous rocks by crystalizing salts

Rámcový obsah diplomové práce: Diplomant provede literární rešerši na téma krystalizace solí v poréznych materiálech. V experimentální části provede testování odolnosti vybraných poréznych hornin vůči cyklické krystalizaci různých solí. Výsledky vyhodnotí ve vztahu k vlastnostem solí a hornin.

Datum zadání diplomové práce: 2. 10. 2017 Termín odevzdání: 20. 5. 2018  
(vyplňte poslední den výuky přísl. semestru)

Diplomovou práci lze zapsat, kromě oboru A, v letním i zimním semestru.

Pokud student neodevzdal diplomovou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání diplomové práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat diplomovou práci podruhé. Studentovi, který při opakovaném zápisu diplomovou práci neodevzdal v určeném termínu a tuto skutečnost řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, se ukončuje studium podle § 56 zákona o VŠ č.111/1998 (SZŘ ČVUT čl 21, odst. 4).

*Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.*

.....  
[redacted] diplomové práce

[redacted]  
.....  
vedoucí katedry

Zadání diplomové práce převzal dne: 2. 10. 2017

[redacted]  
.....

Formulář nutno vyhotovit ve 3 výtiscích – 1x katedra, 1x diplomant, 1x studijní odd. (zašle katedra)

Nejpozději do konce 2. týdne výuky v semestru odešle katedra 1 kopii zadání DP na studijní oddělení a provede zápis údajů týkajících se DP do databáze KOS.

DP zadává katedra nejpozději 1. týden semestru, v němž má student DP zapsanou.

(Směrnice děkana pro realizaci stud. programů a SZZ na FSV ČVUT čl. 5, odst. 7)

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně, pouze za odborného vedení vedoucího práce a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám námitek proti použití tohoto školního díla ve smyslu §60 zákona č. 121/2000 sb, O právu autorském, o právech související s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

.....

v Praze ..... května 2018

Bc. Karel Kubr

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Martinu Keppertovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a metodické vedení práce.

## **ANOTACE**

Předmětem diplomové práce bylo stanovení trvanlivosti a s tím souvisejících vlastností vybraných typů sedimentárních porézních hornin a nalezení rozhodujících parametrů ovlivňujících jejich odolnost. Trvanlivost zkoumaných vzorků českých pískovců byla laboratorně testována pomocí indukované krystalizace různých solí v pórovém prostoru hornin. Výsledky těchto měření byly vysvětleny ve vztahu k obecným vlastnostem hornin. Dále bylo sledováno, zda výpočet krystalizačních tlaků závisí na velikosti pórů a to, jak mikroporozita ovlivňuje trvanlivost zkoumaných vzorků.

### **KLÍČOVÁ SLOVA:**

porézní stavební horniny, pískovec, krystalizace solí, mechanické vlastnosti, miktorstruktura, porozita, trvanlivost

## **ANNOTATION**

The main aim of this thesis was to determine the durability and related properties of selected types of porous sedimentary rocks and finding critical parameters affecting their durability. The durability of the samples examined - Czech sandstones - were laboratory tested induced crystallization of variol salts in the pore space of the rocks. The results of these measurements were explained in relation to the the general characteristics of the sedimentary rocks. It was also observed that the calculation of the crystallization pressure depends on the pore size and how microporosity affects the durability of the examined samples.

### **KEY WORDS:**

porous building rocks, salt crystalization, sandstone, mechanical properties, microstructure, porosity, durability



## OBSAH

1	Úvod .....	11
2	Teoretická část.....	12
2.1	Pískovec.....	12
2.1.1.	Historický přehled používání pískovců v našich zemích .....	13
2.1.2.	Petrografická a technická charakteristika pískovců .....	15
2.1.3.	Rozšíření a hlavní výskyty pískovců v České republice .....	17
2.2	Charakteristika použitých druhů pískovců .....	20
2.2.1.	Božanovský pískovec .....	20
2.2.1.1.	Vlastnosti božanovského pískovce a jeho ložisko .....	20
2.2.1.2.	Použití božanovského pískovce .....	22
2.2.1.3.	Shrnutí.....	23
2.2.2.	Mšenský pískovec .....	25
2.2.2.1.	Historie těžby a využití mšenského pískovce .....	25
2.2.2.2.	Shrnutí.....	25
2.2.3.	Hořický pískovec.....	28
2.2.3.1.	Historie těžby pískovce v Podhorním Újezdu.....	28
2.2.3.2.	Lom a ložisko pískovce Podhorní Újezd .....	29
2.2.3.3.	Použití pískovce z Podhorního Újezdu .....	31
2.2.3.4.	Shrnutí.....	32
2.2.4.	Těšínský pískovec .....	34
2.2.4.1.	Charakteristika a vlastnosti těšínských pískovců.....	34
2.2.4.2.	Lom a ložisko pískovce Řeka .....	34
2.2.4.3.	Použití těšínského pískovce .....	35
2.2.4.4.	Shrnutí.....	35



2.3	Působení vody a solí .....	37
2.3.1.	Stupně salinity dle EUREKA EU-1270 .....	39
2.3.2.	Výkvěty (eflorescence) .....	40
2.3.3.	Primární výkvěty .....	40
2.3.4.	Sekundární výkvěty .....	41
2.3.5.	Typy výkvětů.....	41
2.4	Souhrn literatury zabývající se problematikou trvanlivosti pískovců .....	43
2.5	Růst krystalů v porézních materiálech dle metodiky „Steiger“ .....	45
2.5.1.	Krystalizační tlak velkých krystalů .....	45
2.5.2.	Vliv velikosti krystalů na krystalizační tlak .....	47
2.6	Krystalizace solí a ledu v porézních pískovcích dle J. Ruedricha a S. Siegesmunda 49	
2.7	Vliv cyklického vlhčení a vysušování na fyzikální a dynamické vlastnosti pískovců dle X. Cai a Y. Zhao.....	51
3	Experimentální část .....	54
3.1	Mechanické vlastnosti použitých vzorků .....	54
3.2	Základní fyzikální vlastnosti použitých vzorků.....	54
3.2.1.	Pórovitost .....	55
3.2.2.	Rtuťová porozimetrie .....	56
3.2.3.	Princip měření rtuťovým porozimetrem.....	57
3.2.4.	Postup při měření rtuťovým porozimetrem .....	58
3.3	Soli používané v experimentech.....	60
3.4	Absorbční experiment.....	64
3.4.1.	Průběh absorpčního experimentu .....	65
3.5	Popis experimentu dle metodiky „Benavente“ .....	66
3.6	Popis krystalizačních experimentů s pískovcem „Mšené“ .....	69
3.7	Metody výpočtu krystalizačního tlaku .....	71





3.8	Metody výpočtu mezifázového napětí krystal - nasycený roztok .....	72
3.9	Vztahy pro odhad trvanlivosti porézních hornin na základě jejich vlastností .....	74
4	Výsledky a diskuze.....	76
4.1	Studované materiály .....	76
4.2	Výsledky absorpčního experimentu .....	82
4.3	Stanovení mezifázového napětí krystal - nasycený roztok.....	84
4.4	Stanovení krystalizačního tlaku dle Corrense .....	85
4.5	Výsledky experimentů dle metodiky „Benavente“ .....	86
4.6	Výsledky zmrazovacího experimentu .....	92
4.7	Výsledky krystalizačních experimentů s pískovcem Mšené .....	93
4.8	Diskuze k uvedeným experimentům .....	94
5	Závěr.....	97
	Seznam tabulek .....	99
	Seznam obrázků .....	100
	Použité zdroje.....	103
	Literatura .....	103
	Internetové podklady.....	105
	Použitý software.....	106



## Seznam použitých symbolů

$\varphi$	[-]	relativní vlhkost
$\kappa$	[m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]	součinitel vlhkostní vodivosti
$\lambda$	[W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	součinitel tepelné vodivosti
$\mu$	[-]	faktor difúzního odporu
$r$	[m]	poloměr pórů
$R_g$	[J K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup> ]	molární plynová konstanta
$\rho$	[kg m <sup>-3</sup> ]	objemová hmotnost materiálu
$\sigma$	[N m <sup>-1</sup> ]	povrchové napětí kapaliny uvnitř pórového prostoru
$t$	[s]	čas
$T$	[K, °C]	teplota
$\psi$	[%]	pórovitost
$k$	[-]	Boltzmanova konstanta
$c$	[mol l <sup>-1</sup> ]	molární koncentrace
$h$	[-]	hydratační číslo
$N_A$	[-]	Avogardova konstanta
$DWL$	[%]	Dry weight loss - „opad ze vzorků“

# 1 Úvod

Porézní sedimentární horniny byly po století hojně používané jako stavební či umělecké materiály v mnoha zemích Evropy. Kvůli porézní struktuře, nevalným či průměrným mechanickým vlastnostem, je otázka jejich trvanlivosti důležitá záležitost. V minulosti se horniny používaly pro stavbu především z místních ložisek. V poslední době je ale na trhu poměrně široká nabídka produktů pro stavební a renovační práce. Paradoxně je ale míra dostupnosti místních kamenů omezena, protože spousta těžebních míst byla opuštěna nebo vytěžena. Výdrž kamenů je běžně testována na odolnost vůči cyklickým výkyvům teploty a krystalizaci solí. Tyto testy jsou časově náročné a nezahrnují všechny možné faktory, které ovlivňují kameny především v městském prostředí. Záměrem práce je popsat obecný vztah mezi vlastnostmi materiálu porézních sedimentárních hornin a jejich výdrží, charakterizovanou zavedenými metodami.

Hlavními záměry této práce bude výběr kamenů (pískovců), které jsou nejvíce využívány na území České republiky. Výběr iontů, které nejvíce ohrožují stavby v městském prostředí. Zjištění výdrže jednotlivých vybraných vzorků laboratorními testy, které budou simulovat působení počasí, v různých roztocích solí, na dané vzorky. V závěru práce se pak také pokusím změřit hodnoty krystalizačních tlaků, které vznikají v porézním systému, či na povrchu materiálu během krystalizace solí.

## 2 Teoretická část

### 2.1 Pískovec

Pískovec je zpevněný klastický sediment, jehož nejcharakterističtější složkou jsou zrna pískové frakce (tj. 0,06 až 2 mm velké), jichž má být nejméně 25 % (podle jiných klasifikací 50 %). Z ostatních klastických složek bývá přítomen především jíl a silt, někdy i částice větší než 2 mm, úlomky schránek živočichů apod. Klasifikace pískovců je proto značně složitá a názvosloví nejednotné (opírá se především o klasifikační diagramy trojúhelníkového typu). Podle zrnitosti se rozlišují pískovce jemnozrné, středozrné a hrubozrné (hranice zrnitosti jsou stejné jako u viz písku). Hlavními klasifikačními kritériem je složení klastických částic (stabilní či nestabilní minerální zrna, úlomky hornin), základní hmota (nejčastěji jílovitá), tmel (tj. druhotně vyloučená neboli chemogenní substance diagenetického původu, tmelící klastická zrna), příměs akcesorických minerálů, úlomků organických zbytků apod. Také vyřídění klastického materiálu a stupeň jeho opracování jsou důležitým znakem (viz. tvar klastických částic). Pro klasifikaci běžných pískovců se u nás nejčastěji užívá trojúhelníkového diagramu (Obr. 2.1), podle něhož hlavními typy pískovců jsou křemenný pískovec, arkóza a droba. Křemenný pískovec je složený z nejodolnějšího materiálu (především křemene), obsahuje jen malý podíl jílové nebo siltové frakce, tj. jde o horninu o vysokém stupni mineralogické i strukturní viz zralosti. Vzniká zejména rozpadem hornin bohatých křemenem a dlouhodobým opracováním a tříděním zrn, v jehož průběhu nestabilní (především měkkí) materiál byl rozrušen a jemnější frakce odplaveny. S křemennými pískovci se setkáváme hlavně tam, kde se dlouhodobě uplatňovala abraze zrn a jejich třídění, jako tomu bývá např. u plážových sedimentů (včetně pláží velkých jezer), nebo v pouštním prostředí (pískovce vzniklé zpevněním eolických písků). Také arkózy jeví vysoký stupeň strukturní zralosti (tj. jsou dobře velikostně vyříděné, obsahují jen malé množství jílovité základní hmoty), avšak mají nízkou mineralogickou zralost, neboť obsahují velice četná zrna nestabilních minerálů nebo úlomky nestabilních hornin (arkóz); nejčastější nestabilní složkou arkóz bývají živce; arkózy často vznikají při zvětrávání granitoidů. Přechodným typem mezi křemenným pískovcem a arkózou jsou arkózovité pískovce. Třetím vyhraněným typem jsou droby, jejichž charakteristickým znakem je nedostatek

strukturní zralosti (vytřídění), v menší míře nedostatečná mineralogická zralost. Přejídným typem je drobovitý pískovec. V průběhu diagenese se z cirkulujících roztoků ukládaly minerální složky tmelící jednotlivá zrna (tmel), a to především v dobře propustných, tj. vytříděných psamitických sedimentech. Nejčastější bývá kalcitový nebo křemíový tmel (opálový, chalcedonový, křemenný). Křemíový tmel může tmelit křemenný písek, ale může také zatlačovat méně stálý tmel starší generace, např. kalcitový. Silicifikace tohoto druhu může vést v krajních případech až ke vzniku křemenců (nazývaných též ortokvarcity k odlišení od křemenců metamorfního původu neboli metakvarcitů). Protože křemenný tmel orientovaně dorůstá na křemenná zrna, vznikají při nejvyšším stupni silicifikace křemence složené z mozaiky izometrických zrn, u nichž již často nelze rozeznat tvar původních zrn. Méně intenzivní silicifikací vznikají přechodné horniny nazývané pískovcovité křemence a křemencovité pískovce. Praktické použití pískovců je mnohem menší než písku a většinou o něm rozhoduje povaha tmelu. Nejodolnější jsou pískovce s křemíovým tmelem, a proto nalézají poměrně časté uplatnění ve stavebnictví. [22]

### **2.1.1. Historický přehled používání pískovců v našich zemích**

Pískovce, pevné klastické sedimentární horniny, jsou jedněmi z našich nejrozšířenějších a zejména v minulosti nejoblíbenějších užitkových kamenů. Jsou vhodné především pro stavební účely a tak se také dříve hlavně užívaly, zejména v místech staveb samotných. Některé jejich druhy jsou však barvou, zrnitostí, pevností, blokovitostí, opracovatelností apod. vhodné navíc i pro architektonické a sochařské, případně i průmyslové účely a patří tedy mezi ušlechtilé kameny. Nejsou sice leštěné, ale dají se poměrně snadno ručně nebo strojně kamenicky nebo sochařsky opracovávat a bezprostředně potom mají i příjemný a zajímavý vzhled, odkrývající přírodní podobu kamene. To vše a také poměrně častý a různorodý výskyt jsou důvodem toho, že pískovce jsou našim tradičním kamenickým a sochařským kamenem, těsně spjatým s vývojem našeho kamenictví a sochařství.

Sám termín pískovec je poměrně mladý (existoval sice v naší řeči už v 15. století, ale v jiném významu), neboť pochází až z obrozeneckého období v první polovině 19. století. Předtím (ale často i potom) se pískovec v praxi nazýval jen jako „kámen“ nebo „pískový kámen“, obvykle s přívlastkem podle místa původu, např. „žehrovický kámen“ z Kamenných Žehrovic apod..

Pískovce byly u nás používány už od pravěku (neolitu) k výrobě různých kamenných industrií, zejména k mletí obilí. Nalezly však uplatnění i v tehdejší výtvarném umění, jak dokládá plastika z jemnozrnného arkózovitého pískovce, nalezená v roce 1957 na hradišti Závist u Zbraslavi (Jansová 1966). Znázorňuje hlavu keltského muže, pochází z nejmladšího pravěku (latén) a je zřejmě našim nejstarším známým pískovcovým artefaktem.

K stavebním účelům se pískovců u nás začalo používat až na přelomu tisíciletí při stavbách prvních kostelů a klášterů. Nejstarším známým dochovaným pískovcovým výtvozem z té doby jsou zřejmě pletenci zdobené sloupky z krypty Spytihněvovy baziliky na Pražském hradě (založena roku 1060) z červeného až hnědočerveného pískovce, nalezené v roce 1877 (Podlaha 1905). Pro takovéto i podobné účely (ostění oken a dveří, portály aj.) a někdy i pro samotné zdivo se pískovců používalo i u dalších našich románských staveb.

Hlavního rozmachu však dosáhlo používání pískovců k architektonickým a navíc sochařským účelům v gotice, zhruba od poloviny 14. století. Bylo to především zásluhou kamenické hutě k stavbě chrámu sv. Víta na Pražském hradě, kde se používal prakticky jen pískovec. Z té doby (z let 1372-1378) se také zachovaly její latinsky psané účty za dovoz a opracování pískovců ze středních Čech (Neuwirth 1890), které jsou zřejmě našim nejstarším písemným dokladem o používání tohoto kamene.

Po určité stagnaci v období renesance našel pískovec opět oblibu v baroku. Tehdy byl takřka výhradním kamenem sochařským a to nejen u takových mistrů, jakým byl např. M. Braun, ale i u prostých lidových umělců z konce tohoto období (tzv. selské baroko; Scheybal - Scheybalová 1984). Významně se uplatňoval i v architektuře, zejména v portálech, schodištích, ostěních apod.

Poslední velký rozmach používání pískovců u nás spadá do poslední třetiny 19. století do období tzv. historizujících slohů. Jeho počátkem byla stavba novorenesanční budovy Národního divadla v Praze (1867-83), za níž následovaly slohově stejné stavby budov Domu umělců (1878-85), Zemského, nyní Národního muzea (1885-91) a některých dalších v Praze i mimo ni. Současně byla zahájena i obnova a novogotická dostavba chrámu sv. Víta v Praze a později i obnova chrámu sv. Barbory v Kutné Hoře. To vše vedlo k rozšiřování starých a k zakládání nových pískovcových lomů. Oblibu pískovců v té době, resp. Na přelomu století, názorně ilustruje soupis lomů bývalého Rakouska z roku 1901 (Hanisch-Schmid). Z 630 lomů,

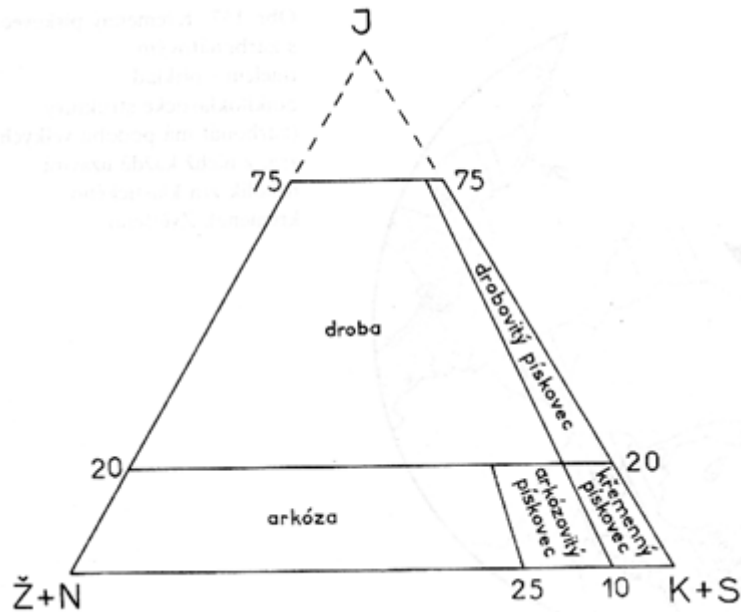
uváděných v něm z našich zemí, je jich 227 (157 v Čechách, 52 na Moravě a 18 ve Slezsku), tzn. více než třetina, v pískovcích. I když uvedený soupis nebyl zdaleka úplný, zdá se být výše uvedený poměr pískovcových lomů k ostatním výstižný. Od té doby trvá obliba pískovců v sochařství, ale v architektuře nalézá uplatnění spíše výjimečně. V poslední době se používá především pro obnovu památek, vytvořených původně ze stejného nebo podobného kamene. [1]

### **2.1.2. Petrografická a technická charakteristika pískovců**

Z praktického hlediska označujeme jako pískovce pevné úlomkovité (klastické) usazené horniny různého petrografického charakteru, zejména co se týče nerostného složení a zrnitosti.

Z petrografického hlediska je definice a zejména klasifikace pískovců složitější a navíc nejednotná. Obecně jako pískovec označujeme pevné klastické sedimenty, tvořené pískovými (psamitovými, tj. velikosti 0,063-2,0 mm) zrny a základní hmotou (jíl, prach, úlomky slíd; též matrix).

Základní klasifikace pískovců vychází z jejich nerostného složení a rozděluje se na křemenné pískovce, arkózy a droby. Kritériem je přitom vzájemný poměr obsahu křemene a úlomků stabilních hornin k obsahu živců a úlomků nestabilních hornin a k obsahu základní hmoty. Vzájemné poměry unifikuje ČSN 72 1001-69 (Pojmenování a popis hornin) a graficky vyjadřuje diagram v obr. 2.1. Z uvedených hornin jsou ušlechtilé kamenické a sochařské účely vhodné křemenné pískovce, částečně arkózovité pískovce a arkózy a jen výjimečně drobovité pískovce a droby.



**Obr. 2.1** Základní klasifikace pískovců (podle Petránka, resp. Kukala) [1].

**J** - jíl, silt a slídy (tj. základní hmota neboli matrix), **K + S** - křemen a zrna stabilních hornin, **Ž + N** - živce a úlomky nestabilních hornin.

Důležitou nerostnou součástí pískovců je tmel, spojující jednotlivá písková zrna a ovlivňující tak technické vlastnosti kamene. Podle rozmístění rozeznáváme tmel základní (bazální), mezerní, dotykový a obalový, podle složení tmel křemičitý, jílovitý, vápnnitý, slínnitý, železitý apod. Podle nerostného charakteru tmele také bývají pískovce podrobněji označovány stejně jako podle přítomnosti některého typického minerálu v základní hmotě. Například společně s hematitem jsou červené, s limonitem žluté až hnědé, s kaolinitem bílé s glaukonitem zelené.

Další základní klasifikace pískovců vychází z velikosti klastického podílu. Podle průměrné velikosti pískových zrn anebo podle jejich převládající frakce rozeznáváme pískovce jemnozrné s velikostí zrna 0,063-0,25 mm, středně zrnité (střednozrné) s velikostí zrna 0,25-1,0 mm a hrubozrné s velikostí zrna 1,0-2,0 mm. Uvedené hraniční velikosti odpovídají ČSN 72 1001-69 (Pojmenování a popis hornin), ale v naší sedimentologii jsou částečně odlišné (např. spodní hranice jemnozrných pískovců a tím i hamitových zrn 0,5 mm, hranice mezi středně a hrubě zrnitými 0,5 mm apod.).



U některých méně vytříděných pískovců bývají kromě pískových zrn přítomna i zrna větší, nazývaná šterková (psefitová ; podle ČSN 72 1001-69 velikosti 2-128 mm). Potom horninu nazýváme slepenčítý pískovec (podle ČSN 72 1001-69 0-25 % psefitových zrn), písčítý 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 předchozí horniny analogicky přesněji označovat jako drobnozrné, střednozrné anebo hrubozrné. Pro ušlechtilé kamenické a sochařské účely jsou však z nich použitelné nanejvýš drobnozrné varianty.

V důsledku výše uvedené petrografické variability, zejména co se týče nerostného složení, zrnitosti a charakteru tmele, mají pískovce i různé technické vlastnosti. Typickou je pro ně především proměnlivá a zvýšená pórovitost a tím i objemová hmotnost, podle níž je ČSN 72 1800-87 (Přírodní stavební kámen pro kamenické výrobky) rozděluje na pískovce hutné s objemovou hmotností větší než  $2,5 \text{ g.cm}^{-3}$  (podskupina II/a) a pískovce pórovité s objemovou hmotností do  $2,5 \text{ g.cm}^{-3}$  (podskupina II/b). Jinak mají obvykle také nižší mrazuvzdornost i pevnost v tlaku a v tahu za ohybu, které (spolu s nasákavostí) se však po vyschnutí kamene obvykle zvyšují. Některé druhy pískovců hůře odolávají povětrnostním vlivům, zejména kyslíčniku siřičitému. Celkově jsou tedy pískovce vhodné jen pro určité, praxí osvědčené účely, kde mohou uplatnit své přednosti, především snadnou opracovatelností. [1]

Technické vlastnosti hlavních druhů našich pískovců uvádí tabulka 2.1.

### 2.1.3. Rozšíření a hlavní výskyty pískovců v České republice

Pískovce se na území České republiky vyskytují kromě kvartéru ve všech nemetamorfovaných, příp. i slabě metamorfovaných útvarech Českého masívu i karpatské soustavy. V Českém masívu (podle Kukala - 1985) přitom mezi sedimenty převládají (43 %) nad prachovci a jílovci (40 %) a ostatními sedimenty (17 %), v karpatské soustavě bude jejich zastoupení o něco nižší. Týká se to ovšem pískovců v obecném smyslu, tedy kromě křemenných pískovců i arkózovitých pískovců a arkóz a drobovitých pískovců a drob, jejichž zastoupení a vzájemný poměr bývají v různých variantách různé. [1]



Tab. 2.1 Fyzikální vlastnosti hlavních druhů pískovců v České republice [1].

Fyzikální vlastnosti hlavních druhů pískovců v České republice															
lokality	hodnota <sup>0</sup>	měrná hmotnost [g·cm <sup>-3</sup> ]	objemová hmotnost [g·cm <sup>-3</sup> ]	hmotnost [%]	pórovitost [%]	nasákavost v % hmotnosti	nasákavost v % objemu	pevnost v tlaku po vysušení [MPa]	pevnost v tlaku po nasáknutí [MPa]	pevnost v tlaku po zmrazení [MPa]	součinitel změknutí [-]	součinitel výmrazení [-]	pevnost v tlaku za ohybu [MPa]	obrusnost [cm]	poznámka
Božanov	m		2,16			5,5	12,1	58	47	35	0,81	0,6	4,5	0,17	1
	M		2,21			6,5	14	72	62	56	0,87	0,77	4,8	0,31	
	Ø		2,18			6,1	13,2	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	2,7	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	10,8	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		2,3			6,3		109	106	86	0,98	0,94	9,9	0,4	
	Ø		2,25			4,6		84	72	71	0,86	0,83	7,7	0,26	
Votuz	m		2,06			3,7	10,3	40	38	33			3,2	0,2	5
	M		2,27			6,9	16,2	73	56	49			6,8	0,76	
	Ø		2,11			6		58					5,9	0,49	
Doubrava	m		1,91			3,4	7,4	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 (sv. Josef)	m		2			6,3	13	21	12	10	0,57	0,48	2,2	0,41	7
	M		2,07			9	18,1	62	53	51	0,95	0,88	6,3	1	
Podhorní Újezd	m		1,89			5,45	12,3	17	13	10	0,4	0,4	1,1	0,87	8
	M		2,28			10,11	22,19	45	38	29	0,93	0,86	3,4	3,2	
	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	0,7	4,3	0,5	
Mšene - lázně	m	2,619	1,85	70,33	26,25	10,8	20,9	23	19	16	0,8	0,7	0,9		10
	M	2,632	1,93	73,75	29,67	13,3	24,6	33	32	28	0,97	0,89	1,6		
Nučice		2,656	2,24	84,81	15,59	6,02	13,5	49	35	32	0,71	0,65	2,1	0,65	11
Úpice		2,646	2,27	85,9	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

**Poznámky k Tab. 2.1:**

0) m = minimum; M = maximum; Ø = průměr

1 = křídový (střední turon) křemenný pískovec, vzorky z lomové stěny

(K. Návrátová aj. 1978)

2 = křídový (spodní turon) glaukonitický křemenný pískovec, vzorky z vrtů

(M. Marková aj. 1961)

3 = křídový (cenoman) silně vápnitý pískovec, vzorek z lomové stěny

(V. Rybařík 1987)

4 = křídový (cenoman) arkózovitý až křemenný pískovec, vzorky z vrtů

(J. Středa aj. 1984)

5 = křídový (cenoman) křemenný pískovec, vzorky z vrtů

(A. Nedomlel aj. 1984)

6 = dtto

7 = křídový (cenoman) křemenný pískovec, vzorky z lomové stěny

(A. Nedomlel aj. 1984)

8 = křídový (cenoman) křemenný pískovec, vzorky z lomové stěny a vrtů

(A. Nedomlel aj. 1974)

9 = křídový (cenoman) glaukonitický křemenný pískovec, vzorky z vrtů

(R. Tásler aj. 1985)

10 = křídový (cenoman) křemenný pískovec, vzorky z lomové stěny

(V. Rybařík aj. 1994)

11 = permský arkózovitý pískovec až arkóza, vzorek z lomové stěny

(Geoindustria n.p. 1986)

12 = permský arkózovitý pískovec, vzorek z lomové stěny

(K. Návrátová aj. 1979)

13 = karbonská arkóza, vzorek z lomové stěny

(V. Rybařík 1987) [1]

## 2.2 Charakteristika použitých druhů pískovců

### 2.2.1. Božanovský pískovec

Jednou z našich nejvýznamnějších oblastí těžby a zpracování pískovců bylo v minulosti Broumovsko v severovýchodním cípu Čech. Na řadě míst se zde lámaly hlavně svrchně křídové kvádrové pískovce a využívaly pro stavební, architektonické a sochařské, ale také pro průmyslové účely. Podle německé vlastivědy Broumovska (1894) byla koncem 19. století tato činnost nejintenzivnější u obcí Libná (tehdy Liebenau) a Zdoňova (Merkelsdorf), když u Libné bylo šest a u Zdoňova čtyři lomy.

Další pískovcové lomy pak byly u Honů (Hutberg), Teplic n. Metují (Weckersdorf), Martínkovic (Märzdorf), Božanova (Barzdorf) a Verněřovic (Deutsch-Wernersdorf; zde ale šlo pravděpodobně nikoliv o křídové, ale o permské pískovce). V soupisu lomů býv. Rakouska (Hanisch-Schmid 1901) je ale z celého Broumovska, resp. z tehdejšího okresu Broumov, uvedeno jen šest lomů u Libné, s výjimkou jediného pronajatých. Lámaly se v nich kvádry a desky křídového nazelenale žlutého tzv. libnavského pískovce (Liebenauer-Sandstein) pro pozemní, vodní a inženýrské stavby a také pro výrobu v průměru až 2,5 m velkých brusných kamenů, často vyvážených do Ruska.

V letech 1873-75 se na severní české straně Boru (Spielberg) lámaly kvádrové křídové pískovce pro 300 m dlouhý tunel choceňsko-meziměstské dráhy a po roce 1884 na jižní kladské straně i na mohutné sloupy pro průčelní kolonádu novostavby říšského sněmu v Berlíně (Zídka 1927).

Těžba pískovců na Broumovsku během druhé světové války postupně ustávala a s vysídlením zdejšího německého obyvatelstva po ní ustala docela. Obnovila se až v polovině 20. Století, a to jen u Libné a Božanova. Zatímco u Libné to bylo spíše jen příležitostně, u Božanova ve stále větším rozsahu. Božanovský lom se tak postupně, zejména po roce 1974, stal jedním z hlavních našich zdrojů kvalitního pískovce pro stavební, architektonické i sochařské účely a pro obnovu památek. [28]

#### 2.2.1.1. Vlastnosti božanovského pískovce a jeho ložisko

Božanovský pískovec je převážně béžový, někdy ale až šedobílý nebo naopak až rezavě hnědý. Často obsahuje neostře, ale i ostře ohraničené nepravidelné rezavě



hnědé polohy, šmouhy nebo skvrny. Je převážně středně a stejnoměrně zrnitý, místy se ale vyskytují nepravidelně omezené polohy hruběji zrnité. Makroskopicky jsou v něm rozeznatelná zejména světle šedá zrna křemene, bělavá zrna plagioklasů a růžová až červená zrna draselných živců.

Podle Návrátové aj. (1978) ve složení božanovského pískovce převládají v průměru 0,5-1,6 mm velká a subangulárně omezená zrna křemene (přibližně 71-80 %), dále zrna živců (5-8 % plagioklasů, zpravidla silně rozložených, a draselných živců o průměrné velikosti 0,4-0,8 mm), úlomky hornin (3-5 % především rohovců a kvarcitů), šupinky biotitu, méně často muskovitu (3-4 %), zrnka těžkých minerálů (převážně turmalin a rutil) a limonitizovaný pyrit, u hruběji zrnitých poloh i glaukonit. Mezerní hmota je zpravidla tvořena kaolinitem. Podle toho je horninu možno označit za středně zrnitý arkózový pískovec, což potvrzují i výsledky chemických rozborů (Procházka 1984).

Z technického hlediska patří božanovský pískovec k našim nejkvalitnějším pískovcům. Při geologickém průzkumu jeho ložiska (viz dále) byla zkouškami tří vzorků z lomové stěny zjištěna objemová hmotnost 2,16-2,21 g/cm<sup>3</sup>, nasákavost 5,5-6,5 % hmotnosti, pevnost v tlaku po vysušení 65-72 MPa, po nasáknutí 57-62 MPa a po zmrazení 43-54 MPa, pevnost v tahu za ohybu po vysušení 4,5-4,8 MPa a po zmrazení 2,7-3,3 MPa a obrusnost 0,2-0,3 mm.

Ložisko božanovského pískovce je částí středně turonského souvrství na okraji hejšovinské oblasti české křídové pánve. Jeho úložné poměry jsou poměrně složité. Souvrství má základní úklon 10-15° k severovýchodu, ale je intenzivně porušeno kernými zlomy směru SZ-JV s posunem o 14-17 m a směru SV-JZ s posunem o 1-5 m. Tím podmíněná sloupovitá odlučnost horniny komplikuje její těžbu (Lorencová 1954). Proto je nutné dobývat ji trhacími pracemi (patní odstřely) a takto získané nepravidelné bloky upravovat na kvádry odvrtáváním, případně i klínováním. Ohraněné bloky (ročně cca 1000 m<sup>3</sup> o průměrné velikosti 1,5-2,2 m<sup>3</sup>) se odvázejí ke zpracování do kamenické provozovny v Teplicích nad Metují. Ostatní surovina se zpracovává přímo v lomu na hrubé kamenické výrobky (štípané hranoly a kostky, regulační kámen) a odpad drtí na materiál k posypu a údržbě zejména lesních cest. Druhým faktorem, nepříznivě ovlivňujícím využitelnost ložiska, je jeho vysoká nadmožská výška, komplikující celoroční dobývání.



Ložisko božanovského pískovce bylo vymezeno v jihozápadním předpolí lomu na základě předběžného geologického průzkumu (4 svislé a 4 šikmé vrty, výlomy z lomové stěny, geofyzika) Božanov 511 1384 704 z let 1976-77 (Návrátová aj. 1978), kterým v něm bylo vyhodnoceno 811 tis. m<sup>3</sup> zásob suroviny v kategorii C1 a 2753 tis. m<sup>3</sup> v kategorii C2. [28]

#### **2.2.1.2. Použití božanovského pískovce**

Božanovský pískovec měl a má široké uplatnění ve stavebnictví, v architektuře, v sochařství i při obnově památek. Příkladů použití božanovského (dříve též broumovského) pískovce je nespočet a je obtížné je zpětně rekapitulovat. Proto jsou v následujícím textu uváděny alespoň příklady realizací v Praze, už proto, že jich je zde nejvíce.

Zřejmě prvním a na dlouhou dobu i jediným použitím tohoto pískovce v Praze byla novostavba Právnické fakulty UK v letech 1924-27. Potom se zde začal objevovat až počátkem padesátých let, a to výhradně na obnovu památek nebo jejich úpravu; tak tomu bylo až donedávna.

Na Pražském hradě jsou z něho obě boční předsunutá zaoblená schodiště v Matyášově bráně, v Nejvyšším purkrabství některá dveřní ostění, stupně a části dlažby na nádvoří a stupně schodiště na Černou věž, vysoký obklad soklu domu na rohu Jiřské ulice a Zlaté uličky, z novější doby mohutná lavice u vchodu do Jiřského kláštera nebo dlažba v hale se šatnou nového vstupu do Rudolfovy a Nové galerie ve středním křídle, a nejnověji některé nové prvky na obnoveném severním průčelí Starého královského paláce. Na počátku osmdesátých let, při poslední velké rekonstrukci Národního divadla, bylo božanovského pískovce použito zejména na obnovu balustrády na tzv. Schulzově domě, včetně kopií 10 ozdobných váz a 4 obelisků na ní, a také na masivní bosovanou zeď na východní straně Divadelní ulice. Při rozsáhlé rekonstrukci rampy Národního muzea na přelomu osmdesátých a devadesátých let z něho byla obnovena převážná část balustrád a nahrazeny některé kvádry opěrných zdí.

Ve velkém rozsahu bylo božanovského pískovce použito i na obnovu Lichtenštejnského paláce na Kampě počátkem devadesátých let (až 4 m vysoký hladký obklad soklu kolem celé budovy aj.), Týnského chrámu (kvádrový sokl, zábradlí

ochozu aj.), Trojského zámku (fontány, schodiště aj.), Toskánského paláce (ostění, kašny), Novoměstské radnice (ostění, sokly aj.) a na řadu dalších pražských památek.

Ve zcela mimořádném rozsahu pak bylo božanovského pískovce použito k náhradě vadných kvádrů pláště Karlova mostu při jeho velké rekonstrukci v letech 1966-75 a pak v letech 1986-88. Na Karlův most se tento pískovec vrátil při obnově schodiště na Kampu v letech 1996-97 a znovu při zpevňování základů pilířů č. 8 a 9 v roce 2005. [28]

### 2.2.1.3. Shrnutí

Božanovský pískovec je v současné době našim nejvyužívanějším pískovcem, a to nejen pro obnovu stavebních a sochařských památek, jako tomu bylo dříve, ale i pro architektonické účely. Má k tomu příznivé estetické i technické vlastnosti, i když – jako u každé klastické sedimentární horniny – místy variabilní i méně příznivé. Jeho ložisko má ale dostatečné zásoby suroviny, nyní racionálně a ve velkém rozsahu těžené, umožňující eliminaci méně příznivých partií při těžbě nebo zpracování na minimum. Nespočetná řada starších i nejnovějších realizací z božanovského pískovce u nás a zčásti i v zahraničí dokládá, že tento pískovec byl a zůstává jedním z našich nejvhodnějších a nejkvalitnějších pískovců vůbec. [28]



Obr. 2.2 Oblast těžby božanovského pískovce - Božanov.





**Obr. 2.3 Příklad užití božanovského pískovce - Hotel Four Seasons Praha [26].**



**Obr. 2.4 Struktura božanovského pískovce [23].**



### 2.2.2. Mšenský pískovec

Mšenský pískovec je materiál s velmi širokou škálou využití. V poslední době se stále častěji uplatňuje v zahradní architektuře jako vhodný doplněk pro dotvoření jedinečného rázu zahrady.

Charakter této suroviny je ale přímo předurčen pro restaurátorské práce při opravě památek. Homogenní struktura a snadná opracovatelnost krátce po vytěžení umožňuje vytváření i těch nejjemnějších detailů, které se ale ani časem nevytratí díky přirozenému postupnému vytvrzování povrchu kamene. [20]

#### 2.2.2.1. Historie těžby a využití mšenského pískovce

Lom nazývaný Brožova skála, ve kterém se láme náš pískovec, je jedním z řady lomů v okolí Mšeného lázní. Pískovec se zde těžil již ve 14. století. Největšího rozmachu však dosáhlo lámání pískovce v okolí Mšeného ve 20. a 30. letech století dvacátého. V té době byl použit na řadě významných staveb v Praze, např. budova Ministerstva obchodu a průmyslu (kvádrový obklad a architektonická výzdoba budovy), Ministerstva financí (hladký obklad průčelí), Strahovský stadion (obklady, zábradlí a květináče, obklad v prezidentské lóži) aj.. Dále byl mšenský pískovec použit při dostavbě chrámu sv. Víta, na úpravy prezidentského domu i na samotném pražském hradě (např. spodní část Herkulovy kašny v Královské zahradě). Mimo Prahu byl mšenský pískovec použit na novostavbu budovy školy v Sušici, budovu Okresního úřadu v Domažlicích aj.. Po druhé světové válce byl mšenský pískovec použit při restaurování řady významných památek, zejména na reliéfy tympanonů vchodů v hlavním průčelí chrámu sv. Víta, při opravě arkýřové kaple Staroměstské radnice, na zhotovení kopie sousoší sv. Bernarda na Karlově mostě, na zhotovení kopie sousoší sv. Tomáše Akvinského se sv. Dominikem na Karlově mostě a na zhotovení kopie sousoší Wimmerovy kašny na Uhelném trhu v Praze. [20]

#### 2.2.2.2. Shrnutí

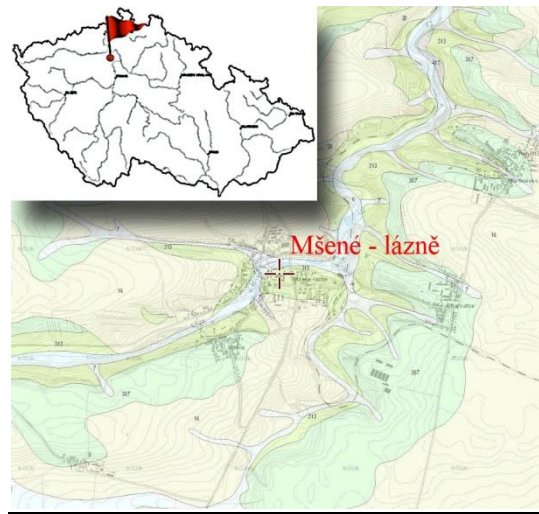
Mšenský pískovec je vhodnou surovinou pro většinu ručně i strojně opracovávaných kamenických výrobků, ale zejména pro sochařské práce. Je jedním z našich nejvhodnějších pískovců pro obnovu památek.

Bloková surovina se těží vysokotlakým vodním zařízením tak, že je možné

vyříznout ze skalní stěny téměř jakýkoliv tvar. Tato metoda je šetrná k surovině i k životnímu prostředí a nenarušuje strukturu kamene. Svými vlastnostmi je mšenský pískovec obzvláště vhodný k sochařským dílům.

Po vylomení ze stěny je kámen lehce opracovatelný. Po čase působení povětrnosti na kaolinitový a křemenný tmel dochází k vytvoření krusty, která nedovolí zvětvávání kamene tak, jak je to běžné u pískovců s tmely hlinitými a jílovitými (dolíčkování).

Mšenský pískovec se vyskytuje v barvě čistě bílé, ale také probarvený okrovými až hnědými kysličníky železa. Vzhledem k tomu, že se jedná o přírodní materiál, nelze vždy sto procentně garantovat jednu barvu. [20]



**Obr. 2.5 Oblast těžby mšenského pískovce - Mšené-lázně .**



**Obr. 2.6 Příklad užití mšenského pískovce - bývalý Okresní úřad v Domažlicích.**



**Obr. 2.7** Příklad užití mšenského pískovce - koupie sousoší sv. Tomáše Akvinského se sv. Dominikem na Karlově mostě [23].



**Obr. 2.8** Struktura mšenského pískovce.

### 2.2.3. Hořický pískovec

Mezi našimi stavebními a sochařskými pískovci měly a stále ještě mají prvořadě postavení svrchně křídové kvádrové pískovce, lámané v téměř dvacet kilometrů dlouhém Hořickém hřbetu (dříve Chlumu) v severovýchodním sousedství Hořic v Podkrkonoší. Zde bylo postupně založeno na půldruhé stovky větších či menších lomů („skal“), využívajících zdejší pískovce zpočátku jen pro místní potřebu, později pro stavby i sochařská díla v blízkém i vzdálenějším okolí. Lomy zde byly rozmístěny prakticky jen na jihozápadním úbočí hřbetu, ale nerovnoměrně, někdy zcela osamoceně, jindy soustředěné blízko sebe. K těm druhým patřily lomy u Boháňky-Skály, u Hořic a lomy u Vojic a sousedního Podhorního Újezdu. Pískovce se zpočátku nazývaly podle místa původu boháňský, doubravský, hořický, vojický, újezdský (oujezdský, podhornoújezdský) apod., časem se však většině z nich začalo říkat jednotně pískovec hořický. V současné době se takovýto pískovec láme už jen v lomu společnosti Kámen Ostroměř, s. r. o. v Podhorním Újezdu, který je největším těženým pískovcovým lomem v České republice vůbec. [25]

#### 2.2.3.1. Historie těžby pískovce v Podhorním Újezdu

Pískovec se v Podhorním Újezdu i sousedních Vojicích, které až do roku 1879 tvořily jedinou katastrální obec Vojice, lámal od nepaměti, i když zpočátku jen pro místní potřebu. Větší rozvoj této činnosti nastal až po založení kláštera řádu kartuziánů v nedalekých Valdčicích v roce 1627. Klášter totiž získal v roce 1661 vsi Sobčice a Podhorní Újezd a v roce 1718 statek Vojice a svobodný dvůr v Podhorním Újezdu a samozřejmě se snažil využívat zdejší pískovce pro svoje i další stavby v širokém okolí. V roce 1872 byl ale řád a klášter zrušen a jeho majetek zkonfiskován (Štětina 1925-1926). V roce 1824 jeho část, panství Radim se statkem Sobčice-Vojice, koupil v dražbě kníže Ferdinand z Trautmannsdorfu. Stal se tak majitelem i největšího zdejšího, tzv. Panského lomu, který pronajímal, zpočátku za polovinu nalámaného kamene, později za nájemné.

Koncem roku 1879 bylo z katastrálního území Vojice odděleno nové samostatné katastrální území Újezd Podhorní. Tomu z devíti lomů zaznamenaných ve stabilním katastru v roce 1842 připadly tři, včetně největšího Panského lomu. V soupisu lomů bývalého Rakouska (Hanisch-Schmid) z roku 1901 je jich z tohoto území uvedeno už devět (č. 1092-1100), provozovaných vesměs místními majiteli nebo nájemci. Pro šest





z nich je ale uváděná stejná parcela (č. 1025), takže šlo nejspíš o jediný (obecní?) lom, rozdělený a těžený po jednotlivých dílech. Největší roční těžbu, 1390 m<sup>3</sup>, z nich vykazoval lom Jana Novotného a Františka Pácala (č. 1098) a pak (po 1200 m<sup>3</sup>) lomy Josefa Chudoby a Václava Pácala (č. 1095) a Aloise Khuna a Aloise Stýbla (č. 1096). Pískovec je v soupisu už nazýván jednotně jako pískovec hořický.

Oživení těžby a zpracování kamene na Hořicku započalo až v druhé polovině 30. let, ale zanedlouho bylo přerušeno druhou světovou válkou. Po jejím skončení byla Pourova dílna v Ostroměři, jeho dva lomy v Podhorním Újezdu i další lomy (Úpice, Lánov) zkonfiskované a byla na ně uvalena národní správa. Od 1. ledna 1948 byla (se zpětnou platností) provozovna v Ostroměři a v Podhorním Újezdu oba Pourovy lomy, Šulcův lom a také lom Obecnice zahrnuty do nově vzniklého národního podniku Severočeský průmysl kamene Česká Lípa, později Liberec. Od 1. ledna 1959 do 30. června 1960 tento majetek spravovaly Stavební hmoty Náchod, pak do konce roku 1965 Východočeský průmysl kamene n. p. Skuteč. Ten už v té době provozoval v Podhorním Újezdu jediný lom, protože lom Obecnice v roce 1963 připadl místnímu JZD. Od 1. ledna 1966 provozovnu v Ostroměři a lom v Podhorním Újezdu převzal nově vzniklý Českomoravský průmysl kamene n. p. Hradec Králové, který provozovnu v letech 1970-1973 výrazně zmodernizoval, od 1. ledna 1991 rovněž nově vzniklý státní podnik Kámen Ostroměř a konečně od 1. června 1996 společnost Kámen Ostroměř s. r. o. Lom této společnosti v Podhorním Újezdu je v současnosti jediným provozovaným pískovcovým lomem nejen v Podhorním Újezdu, ale z původních téměř půldruhé stovky pískovcových lomů na Hořicku vůbec. [29]

### 2.2.3.2. Lom a ložisko pískovce Podhorní Újezd

Lom Podhorní Újezd leží ve východním sousedství obce a vznikl prostupným propojením tří starých lomů s historickými názvy Šulc (Šulcovna), Pácal a Zadní (Pour). V současné době má lom celkovou délku (ve směru SZ-JV) asi 300 m a je odkryt v celkové výšce 30 m, rozdělené na zhruba tři etáže.

Jeho ložisko se skládá ze dvou sousedních navazujících částí, vymezených na základě dvou geologických průzkumů. Prvním, který proběhl v letech 1956-1957 (Hašlar aj. 1957), bylo v jihovýchodním předpolí lomů Šulc a Zadní na ploše cca 450 x 240 m zajištěno celkem 1296 tis. m<sup>3</sup> suroviny a ložisko označeno jako Podhorní



Újezd (dobývací prostor Podhorní Újezd). V letech 1972-1974 pak následoval další průzkum (Nedomlel aj. 1974), který ve východním předpolí lomů Šulc a Pácal na ploše cca 450 x 170 m původní ložisko rozšířil o dalších 923 tis. m<sup>3</sup> suroviny a tato část byla označena jako ložisko Podhorní Újezd I (dobývací prostor Ostroměř). Konečně v letech 1986-1991 byl na celém ložisku proveden poslední, předčasně ukončený průzkum (Nedomlel aj. 1991), který upřesnil poznatky obou předchozích průzkumů.

Ložisko je tvořeno mírně ukloněným (cca 8° k JZ) souvrstvím kvádrových jemnozrnných křemenných pískovců mořského cenomanu (korycanské vrstvy, dolní oddíl) jihozápadního křídla hořické antiklinály o mocnosti cca 12-14 m. Jeho podloží tvoří jílovité pískovce, písčité jíly a případně i intenzivně rezavé pískovce sladkovodního cenomanu (perucké vrstvy) a pod nimi permské arkózovité pískovce a slepence. Nadloží tvoří deskovité pískovce (mocnost 0,6-2,6 m) mořského cenomanu (korycanské vrstvy-horní oddíl) a kvartérní hlíny, písky a sutě o mocnosti do 4 m. Při prvním geologickém průzkumu byla v ložiskovém souvrství rozlišena svrchní poloha (mocnost 8-9 m), vhodná jen pro hrubé kamenické výrobky, spodní poloha (mocnost 5-6 m), vhodná pro ušlechtilé kamenické a sochařské výrobky a mezi nimi shnilka, nejméně mocná a nejméně kvalitní poloha. Odlišné vlastnosti jednotlivých poloh jsou podmíněny především množstvím a rozmístěním pórů v hornině a způsobem sepětí mezerní hmoty s klastickými zrny.

Pískovec tvoří 60-80 % klastických zrn (v naprosté většině křemen), 5 -20 % mezerní hmoty (směs kaolinitu ze skupiny jílovitých slíd) a 10-20 % nepravidelně velkých pórů. Barevně je značně variabilní, převážně světle béžový až okrový s rezavým šmouhováním nebo mramorováním, někdy bělošedý až bílý, jindy nahnědlý až narezavělý, výjimečně nazelenalý příměsí glaukonitu.

Fyzikálně-mechanické vlastnosti zdejšího pískovce jsou značně proměnlivé. Od prvního geologického průzkumu v letech 1956-57 byly zkoumány v různých laboratořích na mnoha vzorcích a přinesly často značně rozdílné výsledky. Bylo to způsobeno různými charakterem a způsobem odběru vzorků (z lomové stěny, z vrtného jádra), různou metodikou zkoušek v různých laboratořích a především tím, z jaké vrstvy ložiskového souvrství byl vzorek odebrán. Naposledy a systematicky byly fyzikálně mechanické vlastnosti suroviny zkoumány v roce 1999 (Slivka aj. 1999), když z jednotlivých vrstev svrchní netěžené a z východní těžené



stěny lomu bylo odebráno po šesti vzorcích. Zjištěné hodnoty jsou pro srovnání uvedené (v závorce) s hodnotami zjištěnými při posledním geologickém průzkumu (Nedomlel aj. 1991) : objemová hmotnost 1,8-2,0 (1,9-2,1) g.cm<sup>-3</sup>, nasákavost 7,2-11,1 (6,4-10,3) %, pórovitost 13,6-19,9 (12,9-19,7) %, pevnost v prostém tlaku po vysušení 10,7-28,2 (20-41) MPa a pevnost v tahu za ohybu 1,1-4,1 (1,9-3,6) MPa.

Blokovitost suroviny je podmíněna jednak vrstevními plochami (interval 0,4-1 m, často ale i více), jednak svislými, navzájem kosými puklinami směrů SZ-JV (velmi strmý úklon převážně k SV) a Z-V (velmi strmý úklon k J) a podružnými rovněž svislými puklinami směrů SSZ-JJV až S-J a ZJZ-VSV. Objem přirozených bloků se pohybuje nejčastěji mezi 0,5 až 4 m<sup>3</sup>, výjimečně i více. Například v roce 1993 zde byl vylomen a opracován blok o velikosti 435 x 200 x 160 cm, tj. 14 m<sup>3</sup>, pro kopii Braunova sousoší Vidění sv. Ludmily z Karlova mostu v Praze. Další jen o něco menší bloky (10 a 12 m<sup>3</sup>) byly v roce 2007 vylomeny i pro novou Křížovou cestu u Kuksu (viz dále).

Pro úplnost je nutné připomenout, že popisované ložisko Podhorní Újezd není jediným ložiskem pískovce na katastrálním území této obce. V roce 1990 bylo na základě rozborů několika technologických vzorků a dokumentace lomové stěny vymezeno v severním předpolí od roku 1987 netěženého lomu Obecnice ložisko Podhorní Újezd-Obecnice a v něm 175 tis. m<sup>3</sup> suroviny (Nedomlel aj. 1990). Ložisko na severovýchodě těsně sousedí s ložiskem Podhorní Újezd-Kvasničkův lom, které bylo vymezeno na základě průzkumu Hořický hřbet 01 78 2523 (Nedomlel aj. 1984), ale které leží převážně už na katastrálním území Mlázovice. [29]

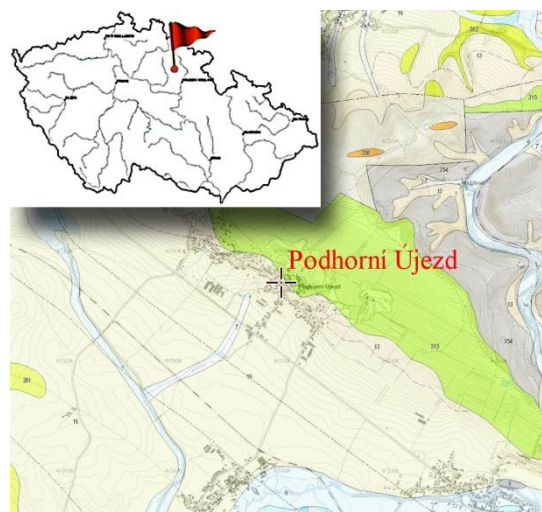
### 2.2.3.3. Použití pískovce z Podhorního Újezdu

Pískovec se u Podhorního Újezdu láme ve větším rozsahu přinejmenším půldruhého století a za tu dobu byl použit na bezpočet stavebních, sochařských, inženýrských i jiných děl u nás i v cizině. Spolehlivý a úplný výčet alespoň nejdůležitějších z nich je obtížné sestavit už proto, že kámen použitý na těchto objektech byl až na výjimky označován jako pískovec hořický bez ohledu na to, zda pocházel z Podhorního Újezdu (resp. předtím z Vojic), nebo z Hořic, z Doubravy apod. Celkem spolehlivé údaje o použití pískovce z Podhorního Újezdu z konce 19. století poskytuje soupis lomů bývalého Rakouska (Hanisch-Schmid) z roku 1901.

Zde jsou uvedené zejména novostavby Národního divadla (po roce 1870), Rudolfiny, Národního muzea, Živnostenské banky, dostavba chrámu sv. Víta (od roku 1880), oprava Karlova mostu (po povodni 1891), Myslbekova sousoší na Palackého mostě (z Panského lomu), dále oprava chrámu sv. Barbory v Kutné Hoře, novostavby muzea a divadla v Plzni, muzeí v Liberci a Chrudimi aj. [29]

#### 2.2.3.4. Shrnutí

Hořický pískovec z Podhorního Újezdu byl v minulosti a je i v současnosti jedním z našich nejoblíbenějších pískovců pro staticky nenamáhané stavební a architektonické účely. Má k tomu příjemný vzhled a odpovídající fyzikálně-mechanické vlastnosti. Velmi oblíbený byl a stále je jako kámen sochařský pro tvorbu nových i kopie starých děl. Láme se ve velkém lomu společnosti Kámen Ostroměř s. r. o. v Podhorním Újezdu, který je jediným těženým pískovcovým lomem na Hořicku a největším u nás vůbec. Lom má příznivé úložné i těžební poměry, které umožňují výlom i mimořádně velkých bloků. Velké množství ověřených zásob suroviny zajišťuje jeho provoz a tím pokrytí požadavků na tento pískovec na prakticky neomezenou dobu. Moderně vybavená provozovna v Ostroměři z něho vyrábí a je i nadále schopná vyrábět nejen standardní, ale i atypické kvalitní pískovcové výrobky. Staletá tradice hořického pískovce má tedy všechny předpoklady pro pokračování i do budoucna. [29]



Obr. 2.9 Oblast těžby hořického pískovce - Podhorní Újezd.





**Obr. 2.10** Příklad užití hořického pískovce - Hotel Marriott v Praze [26].



**Obr. 2.11** Struktura hořického pískovce [23].

## 2.2.4. Těšínský pískovec

Těšínské neboli též nazývané godulské pískovce, žluté, zelené, velmi tvrdé, se ve velkém rozsahu lámaly u Čeladné, Zašové (valašský nebo zašovský pískovec, použit mj. na architektonickou a sochařskou výzdobu radnice ve Zlíně) a v Řece. Zde je taktéž do dnes v provozu největší pískovcový lom na Moravě vůbec, patřící nyní společnosti a. s. Slezský kámen Jeseník. [1]

### 2.2.4.1. Charakteristika a vlastnosti těšínských pískovců

Zdejší pískovec, nazývaný (podle sídla původního majitele lomu) těšínský je petrograficky (Bretfeld 1956) zelenošedý až šedozelený středně zrnitý, glaukonitický až jemnozrný slídnato-glaukonitický pískovec, s ojedinělými nepravidelnými polohami drobnozrného slepence. Pískovec je vyvinut v 0,3-6 m mocných lavicích s úklonem 0-15° k SV. Mezi nimi se vyskytují 0,2-1,7 m mocné polohy nepoužitelných tmavošedých až zelenošedých křemeno-jílových břidlic. Souvrství je rozpuháno puklinami směrů S-J a V-Z, obvykle kolnými k vrstvám. Nadloží tvoří svahové hlíny a sutě. Na ložisku byl v letech 1960-1961 proveden geologický průzkum (Marková aj. 1961), který zajistil mimořádně vysoké množství (4681 tis. m<sup>3</sup>) zásob tohoto kamene. [1]

### 2.2.4.2. Lom a ložisko pískovce Řeka

Na severním okraji Moravskoslezských Beskyd se po obou stranách údolí Řeky, jihovýchodně od vrcholu Goduly (738 m), nacházejí dva činné stěnové kamenolomy akciové společnosti Slezský kámen. Lomy jsou založeny v hrubě rytmických pískovcích godulského souvrství (cenoman až senon) slezské jednotky (godulský vývoj). Dobývací prostor je přístupný po asfaltové komunikaci, odbočující vpravo ze silnice č. 476 Hnojník – Třinec do obcí Smilovice a Řeka. Lokalita je od křižovatky vzdálena asi 3,5 km. Vzhledem k aktivní těžbě je před vlastní návštěvou nezbytné získat povolení vstupu.

Pískovcové lavice vykazují řadu proudových struktur. Tyto jsou nejzřetelnější na spodních vrstevních plochách i uvnitř jílovců. Jde zejména o proudové výmoly, vlečné a úderové stopy, proudové čeřiny a konvolutní zvrstvení. Proudové struktury mohou být lokálně doprovázeny různými druhy bioglyfů, z nichž k nejrozšířenějším patří stopy po lezení organismů.

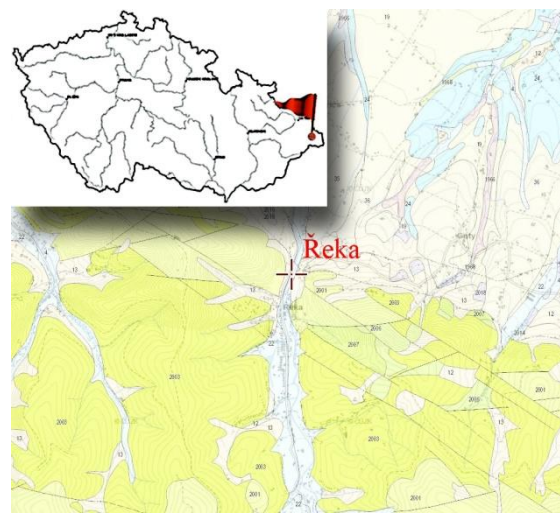
Na lomových stěnách lze pozorovat i mělká, desítky metrů široká koryta, erodovaná na povrchu turbiditního vějíře turbiditními proudy a vyplněná v současnosti pískovcem. [1]

#### 2.2.4.3. Použití těšínského pískovce

Těšínský pískovec se v současné době používá pro hrubé kamenické výrobky, jen ojediněle se získávají bloky pro obkladové desky nebo sochařské účely. Většímu použití pro ušlechtilé výrobky brání značná tvrdost a tím i obtížná řezatelnost pískovce. Dříve byl použit na průčelí staveb v Českém Těšíně, Ostravě, Zlíně (divadlo), Brně (VTA), Pardubicích (Chemoprojekt), Chebu (nové nádraží) aj. Je škoda, že tento barevně zajímavý a kvalitní pískovec nenalézá většího uplatnění v naší soudobé architektuře. Podobný pískovec se ke stejným účelům těží v menším rozsahu v nedalekém dalším lomu a. s. Lesostavby Frýdek-Místek (divize Kamenor). [27]

#### 2.2.4.4. Shrnutí

Nazelenalý druhohorní pískovec, jenž nese název godulský, je charakteristickou horninou Moravskoslezských Beskyd. Tvoří mj. masiv Lysé hory, nejvyšší hory Moravskoslezských Beskyd. Jeho největší naleziště se nachází v Těšínských Beskydech, kde pískovcové vrstvy vycházejí na povrch. Dříve se těžil v kamenolomu Godula v Komorní Lhotce. Dnes se poslední otevřený lom nachází v obci Řeka. I proto je v současnosti godulský pískovec jako stavební kámen vzácný a drahý. Dříve byl však velmi rozšířený a najdeme jej na mnoha historicky cenných stavbách na Těšínsku.



Obr. 2.12 Oblast těžby těšínského pískovce - Řeka.





Obr. 2.13 Příklad užití těšínského pískovce - Obytný komplex Vila Bianca Praha [26].



Obr. 2.14 Struktura těšínského pískovce [27].

## 2.3 Působení vody a solí

Voda se v podobě plynné i kapalné vyskytuje ve všech stavebních materiálech a působí na všechny typy stavebních konstrukcí. Primárně zapříčiňuje fyzikální degradaci (mrazové poškození, abraze), podmiňuje degradaci chemickou (rozpuštění, transport solí) a podporuje existenci živých organismů, tedy degradaci biologickou.

Látky obsažené ve vodě rozrušují zdivo, korodují koty atd. Silnou korozi kovů způsobuje kyslík obsažený ve vodě při vyšších teplotách a tlacích, např. parní kotle.

Vzlínáním spodní vody z podzákladí, posypem vozovek a chodníků, či ve formě metabolických produktů živých organismů se do konstrukce dostávají vodorozpustné soli. Jedná se zejména o kationy  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  a  $\text{NH}_4^+$  a aniony  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  a  $\text{NO}_3^-$ . Chování solí v pórech závisí na obsahu vlhkosti v materiálu, na rozpustnosti konkrétní soli, na teplotě a vlhkosti okolního prostředí atd. Soli, na jejichž roztoky se ustavuje rovnovážná vlhkost  $> 75 \%$  snadno a často krystalizují ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$ ), soli s rovnovážnou vlhkostí 50-75 % krystalizují zřídka ( $\text{NaNO}_2$ ) a soli s rovnovážnou vlhkostí pod 50 % zůstávají v roztoku ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ), jsou však hygroskopické a způsobují nárůst vlhkosti materiálu. Opakované navlhání a vysoušení konstrukce způsobuje krystalizaci a rozpouštění solí obsažených v pórovém roztoku, dochází ke vzniku nasycených až přesycených roztoků, překročení prahu rozpustnosti a k růstu krystalů.

Pro stavební materiály jsou nejvíce nebezpečné soli, které mění své formy během běžných klimatických podmínek, např. síran sodný, uhličitán sodný, dusičnan vápenatý. Jedná se o soli schopné vázat ve své krystalové mřížce daný počet molekul vody, tvoří tzv. hydráty. Přejít z jedné hydratované formy do druhé je vždy spojen s vázáním nebo ztrátou určitého množství molekul vody, což je doprovázeno i značnými změnami objemu. V důsledku toho dochází ke vzniku hydratačních tlaků. Např. bezvodý  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  má objem  $0,373 \text{ cm}^3/\text{g}$ , zatímco hydrát  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  má specifický objem  $0,683 \text{ cm}^3/\text{g}$ . Pokud 1 g bezvodého  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  přejde na dekahydrát, vzroste jeho hmotnost na 2,27 g a objem o 0,373 na  $1,549 \text{ cm}^3$ , to je více než čtyřnásobně. Schopnost pohlcovat a vázat za určitých klimatických podmínek vlhkost se u jednotlivých solí liší a je limitována relativní vzdušnou vlhkostí a množstvím vody, které schopna sůl přijmout. Na stěnu pórů tak působí poměrně vysoké krystalizační tlaky, viz tab. 2.2. [2]

**Tab. 2.2 Krystalizační tlaky některých druhů solí [2].**

Sloučenina	Krystalizační tlak [MPa]
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	28,2
$\text{MgSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	10,5
$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	7,2
NaCl	55,4

**Tab. 2.3 Rekrystalizační tlaky některých druhů solí [2].**

Sloučenina	Konečný produkt	Rekrystalizační tlak [MPa]
$\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	160
$\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	10
$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	64

Další nebezpečí představují soli, které jsou schopné přijímat vzdušnou vlhkost. V tomto případě se nejedná o chemickou vodu (viz hydráty), ale o vodu fyzikálně vázanou, jejíž množství silně kolísá s relativní vlhkostí okolí. Při okolní relativní vlhkosti vzduchu dochází k pohlcování vody a k poklesu koncentrace roztoku. Obsah solí v minerálu tedy významně ovlivňuje jeho sorpční vlastnosti, musíme počítat se změnou průběhu sorpční izotermy a předpokládáme nárůst sorpce vlhkosti s nárůstem obsahu solí. Hygroskopicitata solí také přispívá k celkovému zavlhčení materiálu. Často ani při aplikaci radikálních opatření proti vzlínající vlhkosti nedojde k vyschnutí zdiva.

Z hlediska volby způsobu sanace konstrukce je rozhodující znalost obsahu solí ve zdivu. Hodnocení je začleněno v technických normách, např. dle ČSN P 73 0610 (Hydroizolace staveb - sanace vlhkého zdiva - klasifikace vlhkosti a salinity zdiva, Tab. 2.4) případně podle klasifikace projektu EU EUREKA EU - 1270 (Tab. 2.5). [2]

**Tab. 2.4 Klasifikace salinity dle ČSN P 73 0610 [2].**

Stupeň zasolení	Množství soli v mg/g vzorku materiálu a v hm. %					
	Chloridy		Dusičnany		Sířany	
	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
Extremně vysoký	> 5,0	> 0,50	> 5,0	> 0,50	> 50	> 5,0

**Tab. 2.5 Klasifikace salinity dle EUREKA EU - 1270, v hm. % [2].**

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
Sířany	0 - 0,02	0,02 - 0,08	0,08 - 0,24	0,24 - 0,77	0,02 - 0,77

### 2.3.1. Stupně salinity dle EUREKA EU-1270

- 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. [2]

### 2.3.2. Výkvěty (eflorescence)

Původním jevem svědčícím o zavlhčení historického objektu jsou výkvěty solí na omítce. Výkvěty znehodnocují budovu nejen z estetického hlediska, ale ve svých důsledcích vedou až k úplnému rozpadu omítky. Na neudržovaných stavbách lze téměř s jistotou očekávat výskyt výkvětů v soklových partiích a v místech poruch okapů a svodů dešťové vody ze střech. Výjimkou nejsou ani případy, kdy výkvěty vzniknou na opravované části fasády díky chybám při provádění.

Objasnění příčin, které vedly k vytvoření výkvětů má zásadní význam pro návrh způsobu jejich trvalého odstranění. Pokud není správně zjištěn zdroj vytvoření výkvětů a jejich chemická podstata, nelze se spolehnout, že sanace bude úspěšná a především trvalá. Je nezbytné provést analýzu výkvětů a z výsledků posoudit jejich potenciální škodlivost. Do značné míry je destrukční účinnost výkvětů úměrná krystalizačním tlakům vyvíjeným při přechodu dané chemické sloučeniny z bezvodé formy na krystalickou.

Omítka provlhlá do značné výše není řídkým úkazem na neizolovaných památkových objektech. Ve vlhkém počasí je pak jasně patrná výše vzlínání vody. Po vyschnutí omítky jsou vidět bílé pásy obtížně rozpustných solí a na horním okraji provlhčení vykvétají i lehce rozpustné hygroskopické soli často v intenzivní linii. Názor, že výkvěty jsou záležitostí pouze novostaveb nebo nevhodně rekonstruovaných přezděných částí historických staveb objektů s novou omítkou není správný. K výkvětům solí může dojít i v důsledku změn vodního režimu v základové zóně, změnou funkce stavby spojenou s izolačními úpravami. Tyto zdánlivě nevýznamné změny způsobené neuváženými rekonstrukcemi a architektonickými úpravami jsou pak řešitelné většinou pouze obtížně realizovatelnými stavebními zásahy do celého souboru památkových objektů. [4]

### 2.3.3. Primární výkvěty

Vzlínání vody ze zdiva, které ve své podstatě obsahuje výkvětovorné soli nebo je přijímá z podzákladové zeminy vede ke vzniku primárních výkvětů. Voda obsahující nejčastěji sírany, uhličitany a křemičitany a někdy i chloridy a dusičnany přichází k vyústění kapilár protínajících strukturu omítky na povrch, kde se odpařuje a roztok se na povrchu zahušťuje. Difuzí se sice koncentrace částečně vyrovná, ale trvalým přísunem dalších podílů roztoku zahušťování pokračuje, až koncentrace



roztoku dosáhne stupně, jehož vylučování krystalů solí vyžaduje. Odpařováním vody z povrchu omítky je souvisejícím procesem vykvétání solí. Je-li odpařování příliš rychlé, drobné krystalky se tvoří již uvnitř kapilár v povrchové zóně omítky. Tyto výkvěty solí jsou z hlediska destrukce omítky zvláště nebezpečné. Je potřeba poznamenat, že zdrojem primárních výkvětů mohou být sole obsažené v surovinách původní malty vytvářející omítku - vápenném pojivu, písku a kameninu i v záměsové vodě.

Dešťová voda částečně výkvěty rozpouští. Nelze však očekávat, že je zcela smyje a odplaví. Značný podíl dešťové vody s rozpuštěnými solemi prolínají zpět do povrchové zóny omítky a nakonec i do zdiva, aby se po vysušení znovu zúčastnily cyklického procesu překrystalování výkvětů jak v podpovrchové zóně, tak i na povrchu omítky. [4]

#### 2.3.4. Sekundární výkvěty

Sekundární výkvěty vznikají na kontaktní zóně provlhčené omítky působením pevných, kapalných či plyných látek obsažených v ovzduší. Za nejnebezpečnější složku atmosféry se v tomto smyslu považuje oxid siřičitý  $\text{SO}_2$ . Rozpouští se ve vlhkém ovzduší a za spolupůsobení kyslíku vzniká kyselina sírová, která reaguje s vápennou složkou omítky. Dochází k postupné ztrátě soudržnosti omítky se zdivem za vzniku síranu vápenatého  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Rozpad omítky i podkladu je razantní. Napětí ve struktuře omítky vedoucím k rozpadu však nevyvolává vždy nárůst objemu vylučovaných solí. Reakcí snadno rozpustných hořečnatých solí, přítomných například v dolomitických vápnech tvořících pojivo románských a gotických omítek v některých oblastech našeho území, s vodou vzniká obtížně rozpustný hydroxid hořečnatý  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , který zajímá pouze 70 % původního objemu hydroxidu vápenatého  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  a narušuje omítku kontrakcí. Hořečnaté soli v podobě síranu hořečnatého  $\text{MgSO}_4$  mohou být přítomny v omítce i vlivem nevhodného kopaného písku obsahujícího pyritickou složku. [4]

#### 2.3.5. Typy výkvětů

Destrukční aktivitou jsou zvláště nebezpečné výkvěty síranu sodného, jehož škodlivost spočívá v přeměně bezvodého  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  na dekahydrát  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$

provázené objemovým nárůstem o 84 %. Jako zdroj těchto výkvětů se uvádí obsah alkálií v písku a kamenivu obsahujícím živce nebo i některé přísady.

Zdroje dobře známých šedobílých až žlutavých výkvětů na hospodářských budovách (chlěvy, stáje) historických objektů jsou dusíkaté látky. Výkvěty, jejichž podstatnou složkou je dusičnan vápenatý  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , jsou lidově označovány jako „sanytr“. Vlivem těchto výkvětů dochází k razantnímu rozpadu vápenných omítek.

V dnešní době, kdy dusík je nejen součástí ovzduší, ale negativně působí formou splaškových vod v přímém kontaktu s objekty, je nutno počítat s výkvěty na zdech památkových objektů. V souvislosti s opravou Pražského hradu byly po relativně krátké době zjištěny výkvěty na nově opravované omítce v soklových partiích. Analýzy vzorků z kontaminovaných částí omítek ukázaly souvislost s užíváním močoviny jako posypové soli v období 1983-84. Při kontrolních analýzách byl zjištěn obsah dusičnanů v množství až 1,4 %. Ukázalo se, že jediným schůdným vysvětlením této překvapivé skutečnosti je přeměna močoviny v alkalickém prostředí vápenných omítek nitrifikačními bakteriemi přes dusitany až na dusičnan vápenatý  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ . Tento proces byl pak fotometrickou metodou potvrzen.

Specifické jsou výkvěty na omítce způsobené zimní posypovou solí, jejíž podstatou je chlorid sodný ( $\text{NaCl}$ ). Reakcí s vápennou složkou omítky vzniká oxichlorid vápenatý  $3\text{CaO} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 16\text{H}_2\text{O}$  krystalizující se značným množstvím vody při podstatném nárůstu objemu a z toho odvozeným destrukčním účinkem. Stejná krystalická sloučenina vzniká po někdy doporučovaném neuváženém odstraňování výkvětů omýváním povrchu omítky kyselinou chlorovodíkovou  $\text{HCl}$ . [4]

## 2.4 Souhrn literatury zabývající se problematikou trvanlivosti pískovců

Přírodní sedimentární horniny představují vysoce pestrou skupinu materiálů. Rybařík (1994) publikoval první základní přehled těžebních míst a vlastností českých kamenů používaných jako stavební materiály historických budov či výrobě uměleckých předmětů. V tomto výzkumu byly publikovány jejich základní geomorfologické a fyzické vlastnosti. V roce 2000 byl publikován výzkum Kotlíka o českých slínovcích.

Doposud byla trvanlivost sedimentárních kamenů studována především vzhledem ke klimatickým podmínkám. Je obecně známo že sůl a krystalky ledu, které vznikají v porézním systému je hlavní příčinou zhoršení vlastností porézních hornin včetně kamenů. Vzhledem k nesourodosti kamenů (texturních a mechanických) se citlivost na prostředí liší případ od případu. Bylo publikováno několik studií na téma krystalizace solí na českých pískovcích Schweigstilová a Hradil (2007) zjistili, že sírany jsou hlavní urychlovače krystalizace solí na pískovcích ze západní části České křídové pánve. Mineralogické složení těchto solných krust bylo předem stanovené chemickým složením a kyselostí dešťové vody. Příkryl a kol. (2007) studovali prostorové rozložení vzniklých solí jako korozní produkty zvětralého pískovce v Českém Švýcarsku. Jejich výsledek souvisí s nárůstem porozity a vodní absorpce studované horniny. Williams and Robinson (1998) poukázali na spolupůsobení některých solí na zvětrávání pískovců.

Některé další studie byly publikovány na téma životnost sedimentárních hornin podrobených zkoušce, která urychluje povětrností vlivy. Török a Vásárhelyi (2010) srovnali dva maďarské travertiny s odlišnou mikrostrukturou. V této práci byl demonstrován vliv mikrostruktury na mechanické vlastnosti použitých vzorků. Akin a Özsan (2011) zkoušeli trvanlivost žlutého tureckého travertinu pomocí zmrazovacích- rozmrazovacích, zvlhčovacích- vysušujících a krystalizačních cyklů. Rekrystalizační tlak  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  má špatný efekt na celistvost horniny. Van a kol. (2007) srovnali chování dvou druhů vápenců s odlišnou porézní strukturou, opakovaně ponořených do agresivního roztoku NaCl. Zaznamenali také změny ve struktuře hornin během „zvětrávacích“ zkoušek. Laycock a kolektiv (2008) testovali trvanlivost osmi vápenců použitých při renovaci „Trura“ - anglické katedrály. Poukázali na odlišné výsledky trvanlivosti jednotlivých vzorků získané různými metodami a doporučili využití realističtějších zkoušek životnosti. Reudrich a Siegesmund (2007)

provedli rozsáhlou studii německých pískovců zaměřenou na jejich zvětrávání - viz. kapitola 2.6. Došli k závěru, že odolnost pískovce vůči vlivům počasí závisí na mnoha parametrech jako jsou například charakteristika pórového prostoru (zjistili, že ten je nejdůležitější), mechanických vlastnostech a vlastnostech týkajících se transportu vody v materiálu. Příkryl a kol. (2003) studovali v laboratorních podmínkách zvětrávání českého slínovce z Přední Kopaniny. Shledali tento materiál více citlivým na poškození solemi než vystavení materiálu zmrazovacím- rozmrazovacím cyklům. Zoghalmi a Gómez-Gras (2009) studovali trvanlivost tuniského pískovce a jako hlavní faktor trvanlivosti označili zatížení materiálu agresivními solemi. Kromě rozkladu hornin kamenů mají soli negativní efekt na nástěnné malby v sakrálních i jiných historických budovách.

Voda je hlavním faktorem způsobujícím degradaci materiálu. Napomáhá také rozpouštění solí v materiálech. Reudrich a kol. (2011) studovali vliv šíření vlhkosti materiálem v závislosti na zhoršení vlastností osmi vybraných typů německých pískovců. Mechanismus solí, které vyvolávají degradaci materiálu, závisí jak na vlastnostech kamene a druhu přítomných solí (iontů solí), tak i na vnějších podmínkách. Zehnder a Arnold (1989) zkoumali a popsali čtyři druhy výkvětů krystalů na materiálech. V jejich práci vyvodili závěr, že způsob krystalizace závisí na zavlhčení daného materiálu. Thaulow a Sahu (2004) analyzovali tři možné mechanismy krystalizace solí, které zhoršují vlastnosti betonu. Došli k závěru, že krystalizační tlak způsobený růstem krystalů solí z plně nasyceného roztoku je důvodem pro solnou korozi betonu. Předpokládá se, že v porézních horninách by mohl být tento mechanismus také rozhodujícím faktorem. Ruiz-Agudo a kolektiv (2007) porovnali poškození hornin způsobené síranem hořečnatým a síranem sodným a zjistili odlišné chování. Vysvětlili to odlišnou viskozitou nasycených roztoků těchto solí. Benavente a kol. (2004) porovnávali rozdílné vzorce krystalizace chloridu sodného a síranu sodného v biocalcarenitech. Problém byl zkoumán termodynamicky a porézní struktura se ve výsledku jeví jako hlavní parametr krystalizujícího vzorce. Změny ve struktuře porézního systému způsobené krystalizací solí v pórech byly zkoumány pronikáním pomocí rtuťové porozimetrie (Angeli - 2008). Hodnoty transportu vody a iontů v porézních materiálech jsou ze široka studovány především kvůli jejich chování v betonu. Karoglou (2005) studoval nárůst pohybu v kapilárách

v několika řeckých pískovcích. Obsáhlá studie na téma transportních vlastností na téma mšenských pískovců byla publikována Pavlíkem (2007).

Bylo také publikováno několik článků (především španělského a francouzského původu) ohledně jejich fyzikálních vlastností. Verstrynge (2012) sestavil model vývoje mechanických vlastností pískovců v čase. Benavente (2007) analyzoval statistické faktory ovlivňující strukturu porézních kamenů v závislosti na počasí. Síla kamenů má větší důležitost pro jejich trvanlivost než jejich systém porézní struktury a vlastnosti transportu vody. Autoři článku (Angeli 2007) navrhovali dva základní parametry kvantifikace zhoršení vlastností kamenů (vápenců a pískovců) - alterační index a alterační rychlost. Míra kapilarity, vypařování a pevnosti v tahu byly shledány nejrelevantnějšími parametry pro odhad trvanlivosti. Buj a Gisbert (2010) studovali vztah mezi morfologií pórů španělských stavebních kamenů a jejich trvanlivostí testem rozpadu solí.

## 2.5 Růst krystalů v porézních materiálech dle metodiky „Steiger“

### 2.5.1. Krystalizační tlak velkých krystalů

Práce obsahuje shrnutí stávající literatury, která popisuje téma růstu krystalizačního tlaku v porézních materiálech. V dostupné literatuře se využívá mnoha výpočetních postupů a rovnic. K dispozici je odvozená rovnice pro výpočet krystalizačního tlaku založená na chemických potenciálech nasycených a nenasycených povrchů v rostoucích krystalech. Tato rovnice se porovnává s ostatními dostupnými rovnicemi a rozdíly mezi postupy jsou zde detailně popsány. Tento postup také zahrnuje neideální chování kapalné fáze za použití postupu iontové interakce (Pitzerova rovnice), která je dobře zavedena v problematice termodynamiky roztoků. Zahrnutí rovnice iontové interakce do rovnice pro výpočet krystalizačního tlaku nabízí poměrně jednoduché vyjádření, které se zdá být praktičtější. Tato rovnice je použita pro výpočet krystalizačního tlaku přesycených vodných roztoků NaCl, NaNO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a MgSO<sub>4</sub>, včetně hydrátů těchto solí. V závislosti na povaze soli zanedbávání neideálního chování může způsobit velkou chybu při výpočtu krystalizačního tlaku. Zároveň je zdůrazněno, že základní předpoklad nerovnoměrného tlaku je základem pro porozumění dynamiky krystalizačního tlaku vyvíjeného v porézních materiálech.

Je známo, že růst krystalu ve stavebních materiálech, jako je třeba kámen, cihla, keramika, je hlavní příčinou poškození a limituje tak trvanlivost světového architektonického dědictví. Nutnou podmínkou proto, aby nějaké poškození nastalo je to, že uzavřený krystal pokračuje v růstu přes tlak, který vytváří napětí. Experimentální důkazy, že růst krystalu může vytvářet napětí, byly poprvé poskytnuty před padesáti lety Lavallem. Ten si všiml, že krystaly vznikající během růstu z roztoků byly tlačeny vzhůru srážením látek v místech jejich okrajové vrstvy. Později Becker a Day zjistili, že rostoucí kamencový krystal ponořený v nasyceném roztoku nejenže nadzvedne sám sebe, ale i podstatnou přidanou zátěž.

Při dalších experimentech bylo zjištěno, že aby krystal pokračoval v růstu, na jeho nasyceném povrchu musí být přítomna vrstva, která odděluje nasycený povrch od hmoty, která ho obklopuje. Jinak není možné, aby k růstu došlo v místech styku s okolím. Tato vrstva funguje jako difuzní dráha, která umožňuje výměnu iontů mezi roztokem a krystalem. To je způsobeno meziodpudivými silami mezi krystalem a obklopující hmotou.

Růst na nasyceném povrchu krystalu může vytvářet tlak jedině tehdy, když tento přijde do kontaktu s přesyceným roztokem. Stupeň přesycení nutný pro růst se zvyšuje s rostoucím zatížením. Vyjádření maximálního tlaku jako funkce přesycení roztoku poprvé odvodili Correns a Steinborn.

Termodynamicky konzistentní rovnice pro výpočet tlaku vytvářeného rostoucími krystaly v porézních materiálech může být odvozena za použití výrazů pro chemické potenciály nasycených a nenasycených povrchů krystalů, které jsou uzavřeny v porézním materiálu. Uzavřený krystal může vytvářet napětí jedině tehdy, když přijde do kontaktu s porézním roztokem, který je přesycený, při zohlednění nenasycených povrchů krystalů. Existují různé způsoby pro vyjádření stupně nasycení porézního roztoku. Jak se ukázalo tak poměry aktivit tak  $a/a_0$ , i poměr  $K/K_0$  se dají použít pro měření stupně přesycení, a to za předpokladu, že je zohledněna stechiometrie rozpustné reakce, např. rozpuštění soli. Nicméně formulace na základě koncentračních poměrů, jako třeba Corrensova rovnice vede k chybným výsledkům.

V závislosti na povaze soli může zanedbávání neideálního chování vést k chybným výsledkům výpočtu krystalizačního tlaku. Pitzerův postup výpočtu iontové interakce je vhodný pro výpočet působení vody a působení součinitelů v přesycených roztocích, aby došlo k popisu neideálního chování. Další výhodou tohoto postupu je,

že lze snadno zahrnout teplotní závislost interakčních parametrů. Dále se dá tento postup použít pro výpočet tlaku vytvářeného rostoucími krystaly v různě přesycených roztocích.

Rovnice krystalizačního tlaku použitá v tomto článku je založena na předpokladu, že uzavřený krystal je pod anisotropickým tlakem, např. že má nenasycené a nasycené stěny, které mají různé chemické potenciály. Nerovnoměrný tlak rostoucího krystalu je základním předpokladem nejen pro odvození vhodného výrazu pro krystalizační tlak, ale také pro porozumění jeho dynamickému chování. Předpokládáme-li, že krystal je pod rovnoměrným tlakem, vede k chybným výsledkům krystalizačního tlaku, jestliže zároveň předpokládáme, že jsou krystal a roztok pod stejným tlakem. Další přístup založený na rovnoměrném tlaku počítá s tím, že porézní roztok je pod atmosférickým tlakem. Z toho vychází rovnice, která je ve shodě v rovnici předloženou v tomto článku. Nicméně fyzický základ modelů je různý, protože model Xieho a Bedauna počítá s rovnovážným stavem. Především rozdíly v mezifázových energiích jednotlivých povrchů rostoucího krystalu nemohou být zjištěny v modelu rovnoměrného tlaku. Naproti tomu rozšíření současné rovnice, která zahrnuje mezifázové vlivy, je srozumitelná a je předmětem následující práce. [18]

### 2.5.2. Vliv velikosti krystalů na krystalizační tlak

V současnosti je k dispozici termodynamicky konzistentní rovnice pro výpočet tlaku vytvořeného během růstu krystalů v porézních materiálech. Metoda využívá výpočet, který je založený na chemickém potenciálu nasycených a nenasycených roztoků uzavřených krystalů v porézních materiálech. Vliv rozhraní krystalu na chemický potenciál je zanalyzovatelný a je od něj odvozeno několik obecných rovnic, které můžeme použít pro výpočet krystalizačního tlaku při zvážení jak stupně supersaturace roztoku, tak způsobu zakřivení styčné plochy krystalické kapaliny. Ukázalo se, že při určité koncentraci roztoku se krystalizační tlak zvyšuje s hmotností krystalu. Rovnice se dá také použít na výpočet rovnovážného růstu tlaků za předpokladu smyšlených tvarů pórů – sférických, či kónických vstupních otvorů. Dále ukazuje, že již Everettova rovnice může být odvozena jako speciální případ z více obecnějšího řešení v tomto článku. Čím menší je vstupní otvor krystalu, tím větší je růst krystalizačního tlaku. Dále je zodpovězena otázka nepravidelných tvarů pórů a





vysoce anisotropických povrchů volné energie solí v porézních stavebních materiálech.

Doposud se nepočítalo s vlivem mezifázové energie, kterou produkuje krystalická kapalina na svém rozhraní. Proto se rovnice omezují na velikosti krystalů větší než přibližně 0,1-1 mikrometr, kde je dopad velikosti zanedbatelný.

Vliv výparů na povrchu nenasyčených porézních materiálů je v tomto článku zanedbáván. Porézní stěny jsou stále smáčeny, což vede ke snížení tlaku ve fázi roztoku. Tento tlak by mohl částečně kompenzovat tlak, který tvoří rostoucí krystal v tomtéž samém póru. Pro tuto rovnici jsou navýšené limity stresového napětí. Pro tento tvar je možné s tímto počítat. Kapalná fáze také ovlivňuje termodynamické vlastnosti porézních roztoků, které by mohly ovlivnit výpočet.

Uzavřený krystal v porézních materiálech může vyvolat napětí pouze tehdy, když přijde do kontaktu s přesyceným roztokem. Vrstva roztoku mezi krystalem a porézní stěnou funguje jako přenosná cesta pro rozpuštěné ionty. Měl by se vždy počítat růst tlaku v každém povrchu krystalu, který přijde do styku s přesyceným roztokem. V případě nepravidelných tvarů anisotropických krystalů je výpočet komplikovanější, protože rovnice potřebuje správné definování plochy povrchu během růstu. Povrch je definovaný vztahem  $\delta A/\delta V$ . Za předpokladu, že se volná povrchová energie chová izotropicky, je možné studovat účinek určitých idealizovaných tvarů pórů na krystalizační tlak malých krystalů. Růst krystalů ve válcových (dutinových) pórech se dá dopočítat, pokud se správně vyjádří vliv tvorby povrchu. Ve všech případech vytváří napětí přesycení roztoku. Nicméně v tomto případě je krystalizační tlak výsledkem rovnovážného stavu. Zvýšená rozpustnost čelní plochy povrchu krystalu je kvůli vlivu jeho povrchové volné energie rovna rozpustnosti čelní plochy jiného objektu podléhajícího zvýšenému tlaku. Tento princip funguje také pro nepravidelné anisotropické krystaly. Rovnovážený stav krystalizačního tlaku vyžaduje uzavřený krystal v póru jakéhokoliv tvaru s velmi malými vstupními otvory. Pokud je daná jedna velikost vstupního otvoru tlak se zvyšuje s velikostí krystalu, protože je dosaženo většího přesycení. Trvalý rovnovážný stav krystalizačního tlaku, který je tak velký, aby byl schopen poškodit porézní stavební materiály, se může vyvinout jen v případě velmi malých vstupních otvorů od 10 - 50 nm i menších, což závisí na hodnotě volné povrchové energie. Póry o takové velikosti se nejčastěji nacházejí v betonech. V těchto typech materiálů, jako jsou pískovce, je nalezneme jen zřídka.



Uzavřený krystal v hrubých pórech kamenů nebo podobných materiálů může také vytvářet napětí, pokud přijde do styku s přesyceným roztokem. Nicméně v tomto případě nedosáhneme rovnovážného stavu mezi nasycenými a nenasycenými stěnami krystalu a vývoj krystalizačního tlaku je výsledkem nerovnovážného stavu. V tomto případě je napětí dynamický proces závisející na kynetických vlivech jako je vypařování, rozptyl a hodnoty růstu. Nicméně přechodné napětí je vytvářeno tím, jak se vysoké přesycení v porézním roztoku vytváří postupně. V tomto případě pro danou koncentraci roztoku se stupeň přesycení zvyšuje s velikostí krystalu a dosahuje konstantní maximální hodnoty ve velikosti nad cca 0,2 mikrometru. V dané koncentraci porézního roztoku je tedy růst velkých krystalů účinnější při vytváření tahového tlaku. [19]

## **2.6 Krystalizace solí a ledu v porézních pískovcích dle J. Ruedricha a S. Siegesmunda**

Krystalizace solí a ledu v prostorách pórů způsobuje velké fyzické poškození přírodních stavebních hornin. Míra poškození těmito procesy se vztahuje k fyzickému napětí vyvolanému uvnitř horniny při krystalizaci. Vědecký výzkum provedený během minulého století ukázal, že existuje řada parametrů, které mají vliv na zvětrávání způsobené těmito procesy. Mechanismy vývoje napětí v horninách a závislost na použitém materiálu jsou však stále předmětem diskuse. Tento článek poskytuje přehled o vlivech solí a ledu. Dále jsou prezentovány laboratorní výsledky různých zkoumaných pískovců. Byly provedeny testy krystalizace solí a testy zmrazení/rozmrazování pro získání představy o závislosti krystalizace solí na vlastnostech materiálu, jako je např. velikost pórů, pohyb vody a mechanické vlastnosti. Souběžné měření délky během krystalizace soli a ledu odhalilo podrobné informace o vývoji krystalu v porézních materiálech a také o vývoji napětí. Tato zjištění mohou pomoci pochopit poškozující vlivy.

V mnoha případech je poškození porézních stavebních kamenů způsobeno krystalizací solí a ledu uvnitř pórů. Navzdory množství pozorování, laboratorních výsledků a teoretických úvah v této oblasti se stále diskutuje o skutečném průběhu poškození. Je zřejmé, že souběžně působící poškozující mechanismy ovlivňují stavby různým způsobem. Kromě toho je kvalita přírodního kamene těžko definovatelná kvůli jeho heterogennímu charakteru a časté anizotropii petrofyzikálních vlastností.

Pro získání větších znalostí o působení krystalizace solí a ledu jsou potřebné laboratorní experimenty pro testování průběhu poškození a působících sil souvisejících s různorodostí a anizotropií přírodního kamene.

Cílem tohoto článku je poskytnout obecný přehled dostupných poznatků o povětrnostních podmínkách, které vznikají při krystalizaci solí a ledu v pórovitých materiálech. Jako příklad jsou uvedeny doplňkové výsledky laboratorních testů solí a mrazuvzdornost pískovců. Bylo vybráno dvanáct typů pískovců různých mineralogických složení a různých struktur: Cotta, Ruethen, Bentheim, Velpke, Ostlutter, Obernkirchen, Hockeln, Heersum, Ibbenbueren, Schoetmar, Karlshafen a Barkhausen (všechny z lomů v Německu). Studie se zaměřila na závislost vlivů solí a ledu na struktuře materiálů. Komplexní analýzy struktury a petrofyzikální charakteristiky byly spojeny s běžnými zkouškami povětrnostních vlivů a měřením změn délek velikosti během krystalizace solí a ledu.

Nejdříve byly určeny vlastnosti materiálu, jako třeba mikroskopické zkoušky skalní struktury (mineralogický obsah, velikost zrna, uspořádání, tvar zrna apod.) a petrofyzikální vlastnosti (pórovitost, rozložení pórů, kapilární absorpce vody, difúze vodní páry, mezní obsah vody, pevnost v tahu a rychlost kompresního vlnění).

Zkoumání fyzikálních povětrnostních vlivů krystalizací solí a ledu v pórech pískovců ukázalo, že vlastnosti materiálu mají zásadní vliv na jejich trvanlivost. Mineralogické složení a specifická struktura určují fyzikální vlastnosti pískovců. Na základě této skutečnosti nemůžeme určit jeden prvek zodpovědný za citlivost hornin vůči povětrnostním vlivům. Je zřejmé, že na proces zvětrávání má vliv mnoho různých vlastností materiálu.

Ačkoli již byly získány obsáhlé poznatky o principu destrukce krystalizací solí a ledu, stále probíhají diskuse o skutečných poškozujících mechanismech, zkoumaných v terénu. Bezpochyby za to může být zodpovědná složitá struktura budovy, stejně tak i rozmanitost působících vlivů. Nedostatek vstupních informací nám brání spolehlivě předpovědět rozsah poškození. To má značné praktické důsledky: používání stavebních kamenů, které nevyhovují konkrétním účelům. Navíc máme omezený přístup k materiálům vhodným ke konkrétnímu užití v dané lokaci (např. pro zachování historických budov a monumentů).

Aby bylo možné lépe porozumět povětrnostním vlivům solí a krystalizace, je zapotřebí rozšíření víceoborového výzkumu. Možnost předpovědět poškozující

mechanismy by vedla ke zvýšení trvanlivosti přírodních stavebních kamenů, díky čemuž by bylo možné lépe zachovávat a ošetřovat historické budovy. [20]

## 2.7 Vliv cyklického vlhčení a vysušování na fyzikální a dynamické vlastnosti pískovců dle X. Cai a Y. Zhao

Účinky cyklického smáčení a sušení, které jsou součástí procesu zvětrávání, hrají zásadní roli ovlivňující vlastnosti skalních materiálů. Pro zjištění účinků cyklů navlhčování a sušení na fyzikální a dynamické kompresní vlastnosti hornin byly měřeny některé základní fyzikální vlastnosti pískovcových vzorků včetně hustoty, absorpce vody, pórovitosti, rychlosti P-vlny a indexu trvanlivosti (SDI), po každých 10 cyklech (celkem 50 cyklů). U všech vzorků zkoumaných hornin byly provedeny dynamické kompresní testy za použití modifikované techniky Hopkinsonova tlaku (SHPB). Výsledky laboratorních testů ukázaly, že s nárůstem počtu smáčecích a sušicích cyklů se zvyšuje pórovitost a absorpce hornin, zatímco hustota, rychlost P-vlny, SDI, dynamická pevnost v tlaku a modul pružnosti se snižují. Dále byly mikroskopické povrchové charakteristiky vzorků vyšetřeny pomocí skenovacího elektronového mikroskopu (SEM). Bylo zjištěno, že mikrotrhlíky rostou a v hornině se zvětšují po cyklickém smáčení a sušení, což je hlavní příčinou snížení dynamické pevnosti v tlaku. Na základě experimentálních výsledků byla vytvořena empirická rovnice popisující vliv rychlosti deformace a počtu cyklů smáčení a sušení na dynamickou pevnost v horninách.

Je obecně známo, že zhoršování kvalitativních vlastností horniny je obvykle spojeno s vodou v mnoha technologiích v oblasti horninového inženýrství, jako je tunelování, těžba a skalní vykopávky, kde jsou horniny periodicky vlhčeny. Denní i sezónní změny hladiny podzemní vody, vlhkost nebo jiné důvody by mohly vést k cyklickým činnostem smáčení a sušení a urychlení procesu zvětrávání hornin, které by v průběhu roku nakonec mohly vést k mnoha geologickým katastrofám, jako jsou sesuvy půdy, kolaps, degradace pilířů v důlní technice a deformace základů hrází (Wu a kol., 2005). Mnoho z těchto nebezpečí se navíc vyskytuje za podmínek dynamického zatížení. Proto je zapotřebí zkoumat dynamické mechanické vlastnosti horniny vystavené cyklickému vlhčení a sušení.

V posledních letech zkoumalo vliv cyklického smáčení a sušení na fyzikální a statické mechanické vlastnosti skalních materiálů mnoho odborníků. Zhoršení

mechanických vlastností hornin po smáčení a sušení bylo vyhodnoceno změnami fyzikálních vlastností, včetně sypané hmotnosti, ztrátou hmotnosti, absorpce vody, pórovitosti a rychlosti P-vlny (Pardini a kol., 1996; Sumner and Loubser, 2008; Özbek, 2014; Khanlari a Abdilor, 2015). Výsledky těchto výzkumů ukázaly, že s rostoucím počtem zvlhčovacích a sušících cyklů se snižuje objemová hustota a P-vlnová rychlost, zatímco se zvyšuje absorpce vody a efektivní pórovitost. Gökceoğlu a kol. (2000) také prozkoumali faktory ovlivňující index odolnosti proti šoku (SDI) na 17 druzích horninových ložisek a zdůraznili vliv počtu cyklů smáčení a sušení na hodnoty SDI.

Zkoumání mechanických vlastností skalních materiálů ovlivněných cyklickým smáčením a sušením byla zaměřena především na jednostupňovou pevnost v tlaku (Hale a Shakoor, 2003, Özbek, 2014, Khanlari a Abdilor, 2015), pevnost v tahu (Liu et al., 2016) (Zhang et al., 2015) a lomovou houževnatost (Hua et al., 2015).

Všechny tyto výsledky ukázaly, že mechanické vlastnosti horninových materiálů mají po cyklickém zvlhčování a sušení jiný stupeň poškození. Nicméně všechny výše uvedené mechanické vlastnosti jsou založeny na statických testech a lze nalézt omezené studie vlivu cyklického smáčení a sušení na dynamické vlastnosti hornin. Zkoumání dynamických vlastností horniny po cyklickém zvlhčování a sušení mají tedy velký smysl pro posouzení bezpečnosti a stability skalní struktury a pro eliminaci nebezpečí geologického inženýrství.

V této studii byla pro zkoumání a kvantifikaci účinku cyklického zvlhčování a sušení na fyzikální a dynamické mechanické vlastnosti pískovce provedena řada testů na vzorcích z pískovce po různých počtech cyklických procesů smáčení a sušení. Konkrétní experimentální podrobnosti jsou uvedeny následovně:

1. U vzorků pískovců podrobených různým počtům cyklického smáčení a sušení byly stanoveny zejména hustota, pórovitost, absorpce vody, rychlost P-vlny a index trvanlivosti (SDI).

2. Za účelem získání mikroskopických morfologických charakteristik byl povrch pískovcových vzorků pozorován technikou skenovacího elektronového mikroskopu (SEM) a také byly vyšetřeny mikrotrhlíky vzorků po každých 10 cyklech.

3. Nárazové zkoušky pískovců po různých počtech cyklického smáčení a sušení byly provedeny pomocí rozštěpené tlakové lišty Hopkinson (SHPB).

V této studii byl zkoumán vliv cyklů smáčení a sušení na fyzikální a dynamické tlakové vlastnosti zkoumaných vzorků pískovců. Byly získány snímky SEM pískovcových vzorků po každých deseti cyklech smáčení a sušení. Byla měřena řada fyzikálních vlastností včetně hustoty, absorpce vody, pórovitosti, rychlosti P-vln, SDI a za použití systému SHPB byl experimentálně studován účinek poškození vodou cyklickým smáčením a sušením na dynamickou pevnost hornin v tlaku při různých deformačních rychlostech (v rozmezí od 61 do 127 s<sup>-1</sup>). Výsledky testů ukazují, že s nárůstem počtu cyklů se snižuje hustota, rychlost P-vln a SDI horninových vzorků, zatímco se zvyšuje absorpce vody a pórovitost. Dynamická odolnost pískovce se zvyšuje s nárůstem deformační rychlosti daného cyklu. Zároveň dynamická pevnost v tlaku a modul pružnosti při stejné rychlosti deformace klesají při zvyšujícím se počtu cyklů smáčení a sušení. Analýza SEM-obrazů ukázala, že cyklické zvlhčování a sušení přispívá k vnitřnímu růstu mikroskopických trhlin v horninách, což umožňuje větší absorpci vody a vede k vyšší pórovitosti. Pórovitost byla použita k vyčíslení poškození vodou v důsledku cyklického zvlhčování a sušení. Z experimentálních výsledků byla také odvozena empirická rovnice pro popis vlivu rychlosti deformace a počtu cyklů smáčení a sušení na dynamickou pevnost horninových materiálů v tlaku, které by mohly být aplikovány na technické postupy, jako je ražba tunelů, těžba a skalní hloubení. [21]

## 3 Experimentální část

### 3.1 Mechanické vlastnosti použitých vzorků

Mechanické vlastnosti materiálu udávají vztah mezi mechanickým namáháním a odporem, kterým materiál účinkům tohoto namáhání vzdoruje.

V případě namáhání, představovaného pouze mechanickým napětím, se tyto mechanické vlastnosti dělí na přetvárné (deformační) nebo pevnostní, podle toho, popisují-li chování materiálu zachovávajícího si ještě svou celistvost, nebo nacházejícího se již ve fázi porušování.

Vlastnosti, jimiž povrch materiálu vzdoruje kombinovaným účinkům mechanického napětí, tření a vnikání cizích těles, lze souhrnně nazvat jako odolnost materiálu proti opotřebení. [3]

### 3.2 Základní fyzikální vlastnosti použitých vzorků

Do skupiny základních fyzikálních vlastností zahrnujeme všechny materiálové vlastnosti, k jejichž určení postačí stanovení hmotnosti a rozměrů, resp. objemu vzorku materiálu. Jsou to vlastnosti, které jsou do značené míry charakteristické, a na základě jejich znalostí můžeme předpovědět, jaké budou ostatní vlastnosti materiálu, ať už z pohledu mechanické odolnosti materiálu nebo například jeho tepelně-vlhkostní funkce. Je tedy evidentní, že všechny materiálové vlastnosti jsou v přímé vazbě se základními fyzikálními vlastnostmi a je možné prokázat jejich funkční závislost na změně těchto základních parametrů.

Mezi základní fyzikální vlastnosti řadíme objemovou hmotnost, hustotu (dříve označovaná jako měrná či specifická hmotnost), hutnost, pórovitost, měrný (specifický) povrch a zrnitost. [2]

V rámci této práce byly podrobněji naměřeny hodnoty pórovitosti a distribuce jednotlivých velikostí pórů. Tyto hodnoty byly potřebné pro další části práce, konkrétně pro přibližný výpočet krystalizačních tlaků, které vznikají v použitých vzorcích. Z toho důvodu je dále podrobněji popsána pouze pórovitost (distribuce pórů v materiálu) a metoda pro její určení.

### 3.2.1. Pórovitost

Pórovitost je materiálový parametr, který je v přímé vazbě k hutnosti materiálu. Na základě známé hodnoty pórovitosti je možné předpovědět chování materiálu při přenosu hybnosti, tepla, vlhkosti, vzduchu a chemických látek obsažených v jednotlivých transportních mediích. Je definována u pevných látek, eventuelně u zrn sypkých látek, jako poměr objemu pórů k celkovému objemu vzorku. Stejně jako hutnost se nejčastěji vyčísluje v procentech objemu. [2]

Platí tedy:

$$\Psi = \frac{V_p}{V} \cdot 100\% = \frac{V - V_h}{V} \cdot 100\% = \left(1 - \frac{V_h}{V}\right) \cdot 100\% = (1 - h) \cdot 100\% ,$$

kde  $\Psi$  [%] je celková pórovitost materiálu,  $V_p$  objem pórů,  $V_h$  objem pevné fáze a  $V$  celkový objem materiálu.

Pórovitost, jako doplněk hutnosti do 100 % objemu materiálu, v sobě zahrnuje všechny póry a dutiny v látce tj. póry otevřené i uzavřené. Otevřené póry můžeme definovat jako póry, které jsou propojeny s povrchem materiálu. Tyto póry jsou zodpovědné například za pronikání vlhkosti do stavebních materiálů, případně také za přítomnost solí ve stavebních materiálech a konstrukcích. Na druhé straně umožňuje vysychání vlhkosti i odsolování materiálů. Otevřené póry mohou vznikat např. únikem plynů během výroby (lehčené materiály), postupným odpařováním (vysušováním) vody z materiálů (beton, omítky, keramika, cementové kompozity), záměrným provzdušněním (lehké betony) a napěněním materiálů (perlit). Uzavřené póry nejsou propojeny s povrchem materiálů. Vznikají například slinutím keramického střepu, nebo jako gelové póry při hydrataci cementu. Tyto póry neumožňují přijímat do struktury materiálů vzdušnou vlhkost ani jiné molekuly plynů, nicméně z pohledu mechanických vlastností se podílejí na celkové mechanické pevnosti materiálů. Vzhledem k tomu, že termín uzavřený pór může být termínem relativním, lze například definovat uzavřenost pórů jako prostor, který není přístupný pro molekuly helia (průměr 0,2 nm). Jiná definice uzavřených pórů říká, že jde v podstatě o póry otevřené, jejichž šířka je menší nežli velikost molekuly média použitého pro měření pórovitosti (tzv. ultrapóry). Tato definice poté tyto účinně uzavřené a chemicky uzavřené póry označuje jako póry latentní. [2]





Otevřené póry díky spojení s vnějším prostředím, ve kterém se materiál nachází, přímo ovlivňují tyto vlastnosti stavebních materiálů:

- navlhavost a vysychavost materiálů,
- schopnost difúze kapalin a plynů materiálu,
- zvukově izolační vlastnosti (schopnost pohlcovat zvuk),
- tepelně izolační vlastnosti (schopnost vést a akumulovat teplo),
- mechanické vlastnosti.

Póry nejsou jednoduché kapiláry, ale jejich tvar je složitý a proměnlivý. Z toho důvodu si nevystačíme pouze s hodnotou celkové otevřené pórovitosti, ale musíme znát také tvary pórů, jejich propojení a rozměr. Pro zjednodušení a hlavně pro jejich nepravidelnou geometrii jsou tvary pórů zařazovány dle modelových systémů. V závislosti na zdroji použité literatury můžeme póry třídit například pomocí následujících geometrických tvarů (klasifikace dle Kaneka): válec, destička (štěrbina), kužel a inkoustová lahvička (dva válce různých průměrů na sobě). Jak je tedy zřejmé, jsou modelové systémy s výhodou popisovány v termínech různých geometrických tvarů. Pro popis tvaru pórů se také často využívá kombinace těchto geometrických forem, a to v závislosti na uspořádání strukturních elementů jednotlivých stavebních materiálů. Pro podrobný popis systému pórů je možné využít modelování porézní struktury na základě více kritérií, například geometrie, velikosti pórů, jejich orientace, umístění a propojení.

Porézní materiály, vykazující stejnou hodnotu celkové otevřené pórovitosti a mající póry o různé velikosti a geometrii, reagují za stejných podmínek různým způsobem. Z tohoto pohledu je nezbytné kategorizovat póry nejen podle jejich otevřenosti či uzavřenosti a geometrického tvaru, ale také podle jejich rozměrů. Velikost pórů je tedy velmi důležitý parametr při praktické aplikaci porézních stavebních materiálů v praxi. Proto se pórovitost materiálů popisuje pomocí distribuční křivky pórů, což je funkce stanovující velikost a objemové zastoupení pórů specifického rozměru. Pro stavební hmoty se nejčastěji předpokládají póry kruhového průřezu. Poté tedy hovoříme o poloměru či průřezu pórů. [2]

### 3.2.2. Rtut'ová porozimetrie

Pórovitost nedává ucelenou informaci o porézní struktuře materiálu. Proto se používají další metody pro stanovení objemového zastoupení pórů o dané velikosti.



Nejpoužívanější metodou je rtuťová porozimetrie, dále pak plynová porozimetrie, ve které se používá plyn, např. hélium nebo dusík. Plynová adsorpční porozimetrie se využívá pro stanovení objemu velmi jemných pórů, typicky o poloměru kapiláry  $< 25$  nm (mikro a mezopóry). Rtuťová porozimetrie pracuje na stejném způsobu s tím rozdílem, že penetrujícím médiem je rtuť a detekovány jsou póry o poloměrech  $> 2$  nm. Obě porozimetrické metody se tedy vhodně doplňují a jsou schopny poskytnout ucelený obraz o distribuci pórů v měřeném materiálu.

Pro stanovení tvaru, velikosti a distribuce pórů lze také využít metod elektronové mikroskopie. V kombinaci s programy pro analýzu získaného obrazového záznamu je možné provést stanovení zastoupení jednotlivých typů pórů a to s ohledem na jejich tvar i velikost.

Znalost velikosti pórů představuje velmi cennou informaci pro praktickou aplikaci stavebních materiálů zejména s ohledem na jejich předpokládané použití. Na základě naměřených distribučních křivek můžeme póry z hlediska jejich rozměru (za předpokladu kruhového tvaru pórů) rozdělit do následujících kategorií:

- Submikroskopické (ultrakapilární) póry - poloměr  $< 10^{-9}$  m, rozměry těchto pórů jsou porovnatelné s rozměry molekul, mohou se zde vytvářet řetězce vody a voda se nemůže těmito póry pohybovat,
- Kapilární póry - rozměr  $10^{-9}$  -  $10^{-3}$  m, voda a plyny se zde chovají jako v soustavě kapilár, pohyb vody je vyvolán povrchovým napětím (kapilárními silami),
- Makropóry a vzdušné póry - již se neuplatňují kapilární síly neboť dutiny (póry) jsou příliš rozsáhlé a převládá vliv gravitace.

Kapilární póry můžeme dále dělit následovně:

- Kapilární mikropóry:  $2 \cdot 10^{-9}$  -  $2 \cdot 10^{-6}$  m,
- Kapilární přechodové póry:  $2 \cdot 10^{-6}$  -  $60 \cdot 10^{-6}$  m,
- Kapilární makropóry:  $60 \cdot 10^{-6}$  -  $2 \cdot 10^{-3}$  m. [2],[30]

### 3.2.3. Princip měření rtuťovým porozimetrem

Princip měření rtuťovým porozimetrem spočívá v dynamické změně (zvyšování) tlaku rtuti a sledování množství úbytku objemu rtuti v nádobce v závislosti na tlaku. Tímto se určí závislost tlaku na objemu rtuti vtačené do vzorku tzv. intruzního objemu. Intruzní objem se v moderních přístrojích určuje například ze změny kapacity

kondenzátoru, který je tvořen kovovou vrstvou nanesenou na skleněné kapiláře z vnější strany a rtuť, která kapiláru částečně zevnitř zaplňuje.

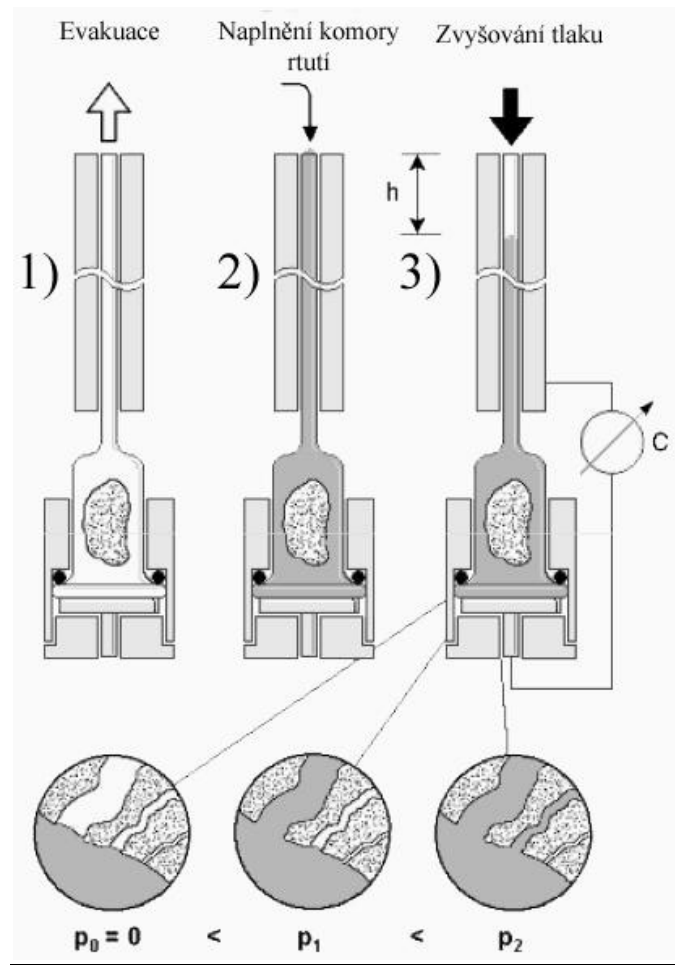
Vysokých tlaků (200 - 400 MPa) je dosaženo pomocí tlakových násobičů (multiplikátorů). Čím je tlak vyšší, tím se rtuť dostane do menších pórů. Při použití nižších tlaků (0,003 - 0,13MPa) je tato metoda schopna detekovat množství otevřených pórů o poloměru 4 $\mu$ m - 100 $\mu$ m. Při vyšších tlacích (0,13 - 400MPa) póry o poloměru

3 nm - 4 $\mu$ m. Pro stanovení množství pórů s menším poloměrem je třeba použít jiné metody měření jako např. absorpci plynů (dusíku). [30]

### 3.2.4. Postup při měření rtuťovým porozimetrem

- 1) Evakuace vysušeného vzorku - póry jsou zaplněné vzduchem.
- 2) Naplnění komory rtuť - do vzorku se vtlačí (hydrostatickým tlakem výšky sloupce) malé množství rtuť. Naplní se největší póry.
- 3) Zvyšujícím se externím tlakem se postupně zaplní póry (od největších po nejmenší) - při použití nižších tlaků (0,003-0,13MPa) je možné detekovat množství otevřených pórů o poloměru 4 $\mu$ m-100 $\mu$ m. Při vyšších tlacích (0,13-400 MPa) je možné detekovat póry o poloměru 3nm-4 $\mu$ m.

Celý postup je ilustrativně znázorněn na obr. 3.1, na obr. 3.2 je pak vyfocen vlastní přístroj, na kterém bylo měření provedeno. [30]



Obr. 3.1 Postup měření rtuťovým porozimetrem [30].



Obr. 3.2 Rtuťový porozimetr PASCAL 140 a 440 [30].

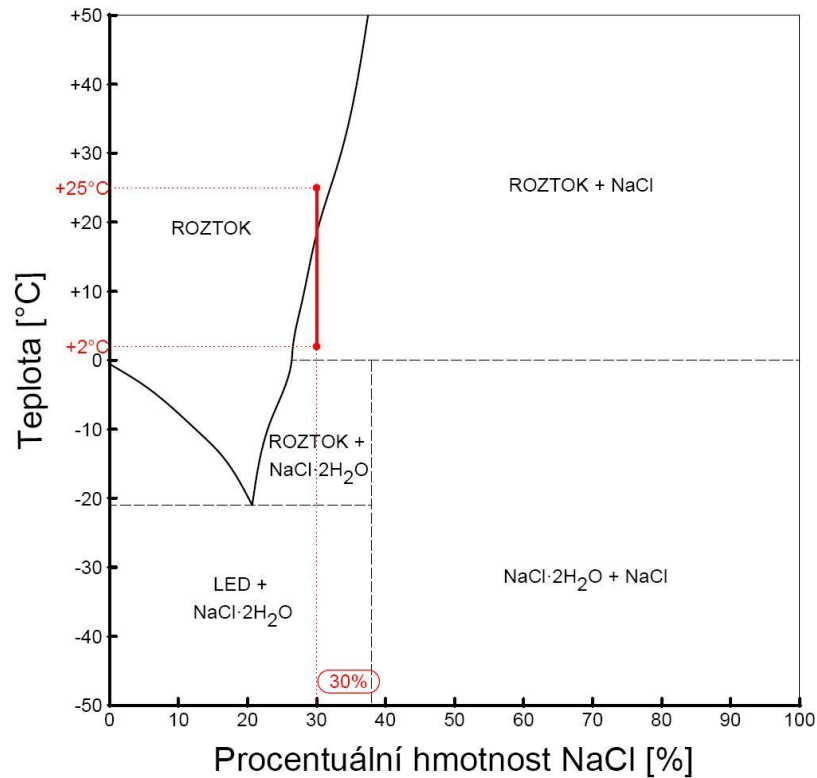
### 3.3 Soli používané v experimentech

V rámci této diplomové práce byly v experimentální části použity soli, které se v našich podmínkách nejvíce podílejí na degradaci porézních stavebních materiálů použitých ve stavebních konstrukcích. Problematika vlivu solí na stavební materiály je řešena hlavně v souvislosti se stále agresivnějším okolním prostředím. Stavební materiály s pórovitou strukturou nejvíce ohrožují soli, které mění svou formu za běžných klimatických podmínek, přičemž v krystalové mřížce chemicky vážou molekuly vody, tj. tvoří hydráty. Tento jev doprovázejí velké objemové změny. Při krystalizaci tak soli působí na stěny pórů značným tlakovým účinkem. Značný tlak vyvíjí kromě síranů také chlorid sodný, což dokazuje, že velikost vyvozeného tlakového účinku pravděpodobně ovlivňuje zároveň mezivětrná vzdálenost v krystalu. I tyto síly, dosahující vysokých hodnot, mohou být z počátku kompenzovány pórovitým systémem materiálu. Po překročení meze pevnosti však způsobují mechanické poškození, trhliny. Limitujícím faktorem pro destrukci materiálu je jeho specifické rozložení a distribuce jednotlivých pórů. [5]

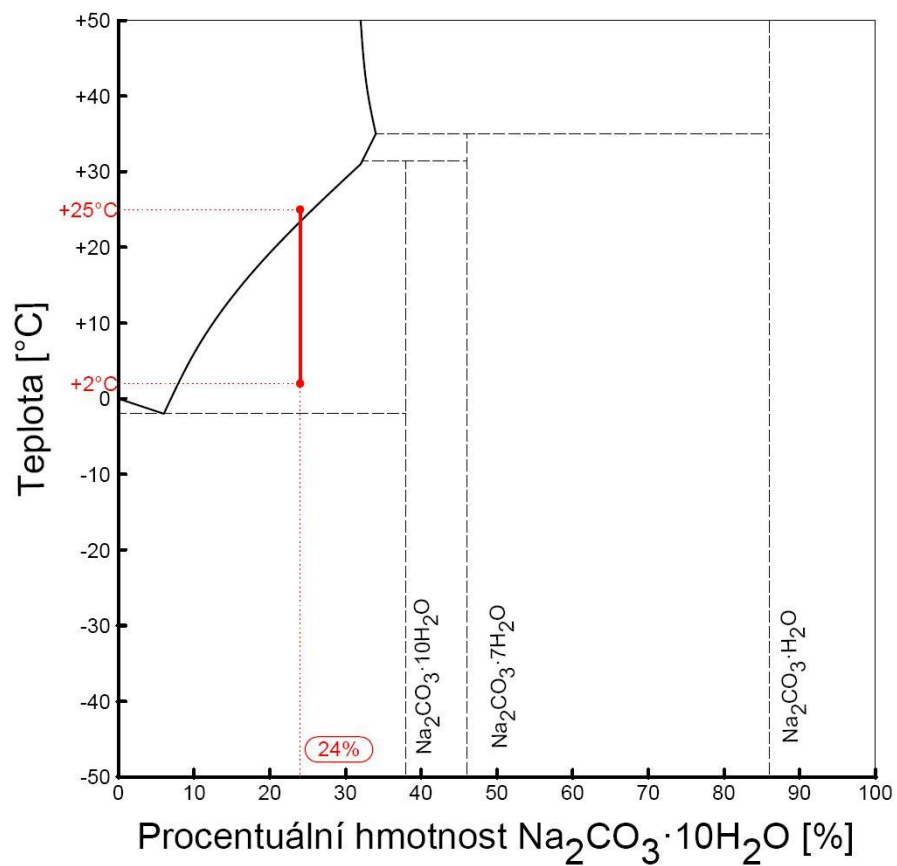
Na následujících obrázcích (3.3-3.8) jsou zobrazeny fázové diagramy solí, použitých v experimentech. Pomocí těchto diagramů byly stanoveny vhodné koncentrace jednotlivých roztoků. Fázová změna je vyznačena červenou čarou, která protíná přechod jednotlivých fází. Diagramy jsou uceleny v jednotný formát, pro větší přehlednost. Pro experimentální část byly vybrány tyto soli: síran hořečnatý, síran sodný, síran vápenatý, uhličitán sodný, chlorid sodný a dusičnan sodný. Uvedené soli byly namíchány v koncentracích předem určených podle fázových diagramů. Seznam jednotlivých solí a jejich zvolených koncentrací je uveden v tabulce 3.1.

**Tab. 3.1 Použité soli a jejich koncentrace.**

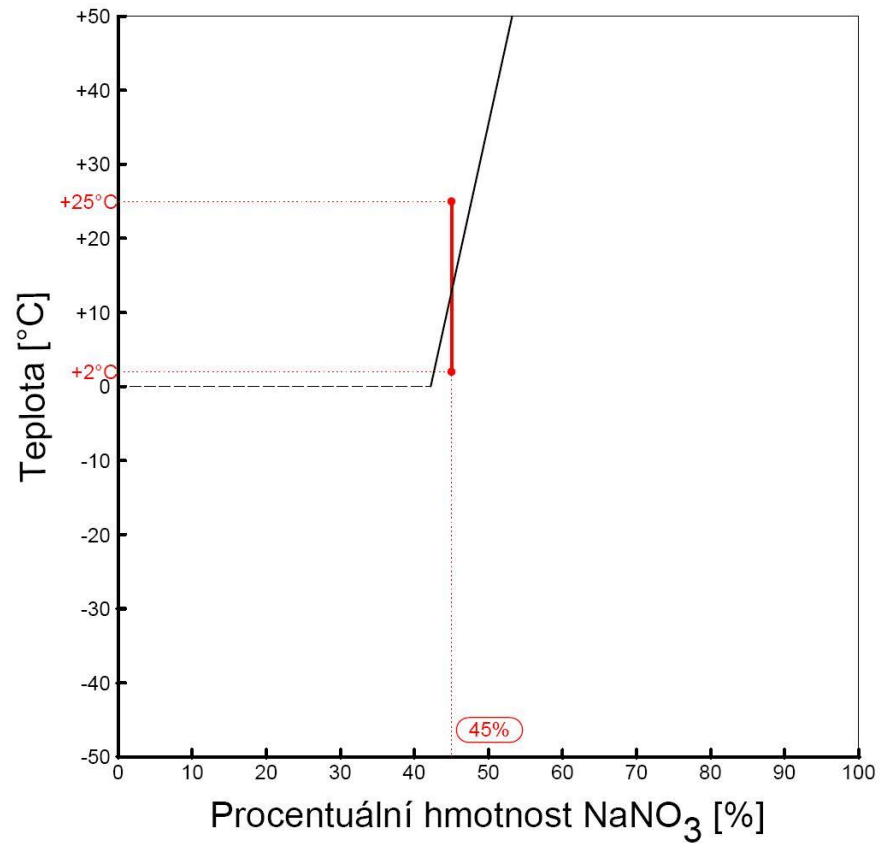
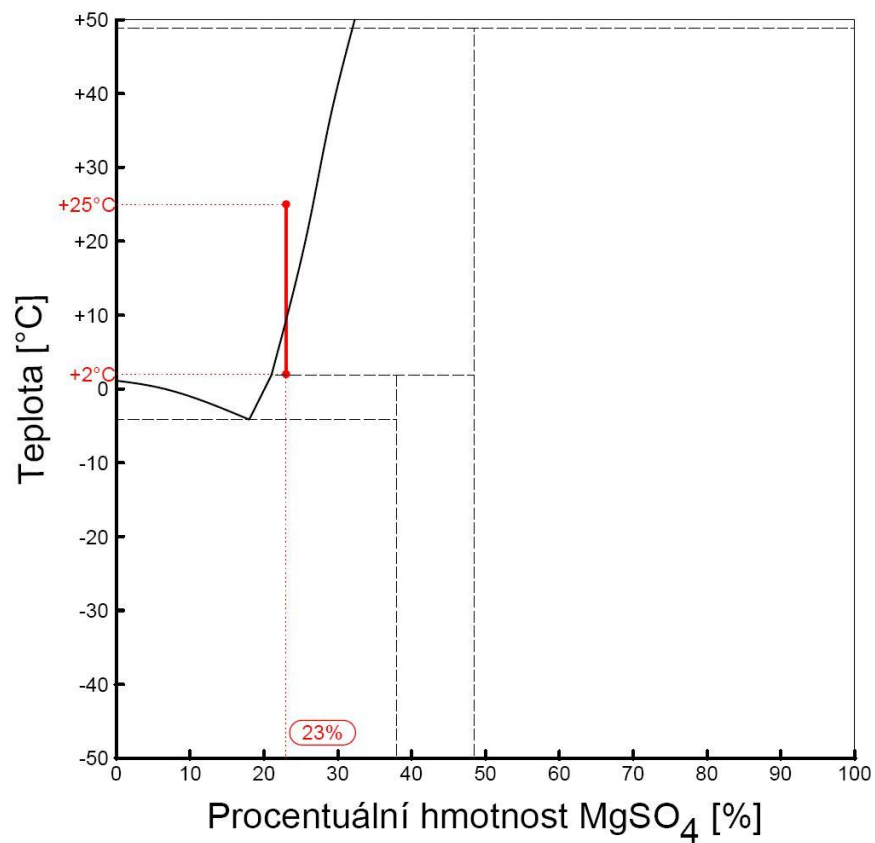
Sůl	Chlorid sodný	Uhličitán sodný	Dusičnan sodný	Síran hořečnatý	Síran sodný	Síran vápenatý
Vzorec	NaCl	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	NaNO <sub>3</sub>	MgSO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	CaSO <sub>4</sub>
Zvolená koncentrace roztoku	30%	24%	45%	23%	14%	100% (nasycený roztok)



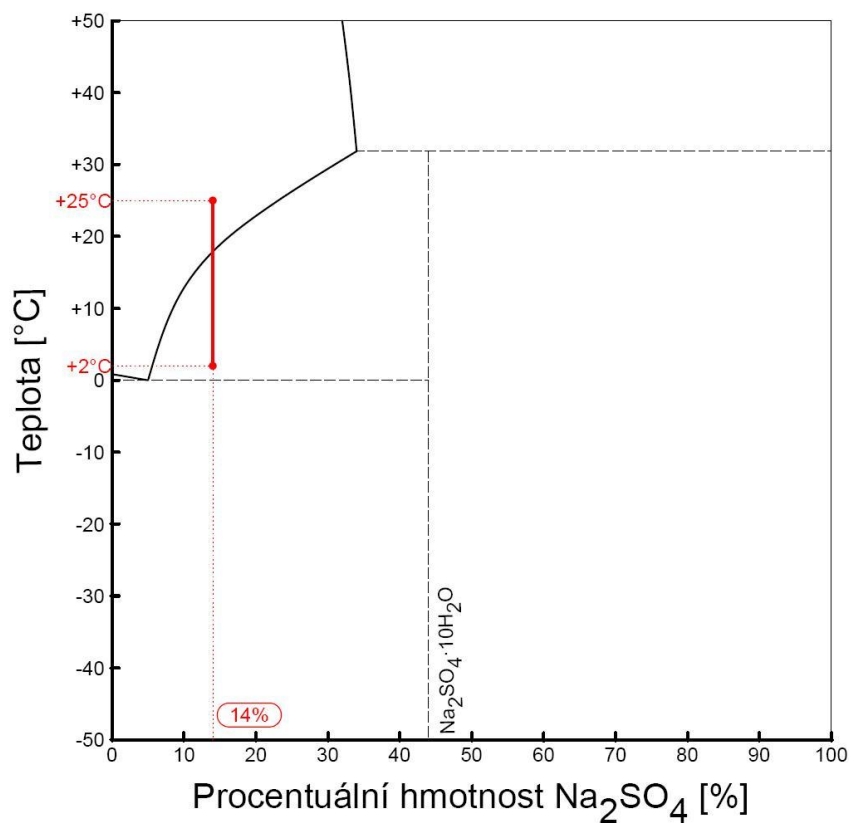
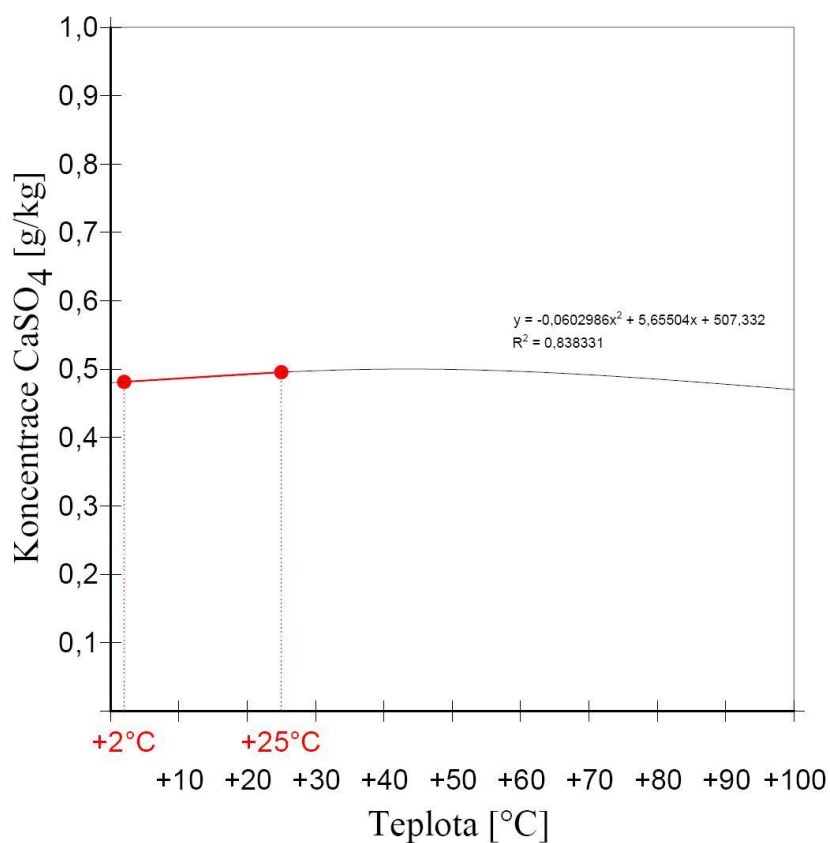
Obr. 3.3 Fázový diagram chloridu sodného.



Obr. 3.4 Fázový diagram uhličitanu sodného.

**Obr. 3.5 Fázový diagram dusičnanu sodného.****Obr. 3.6 Fázový diagram síranu hořečnatého.**



**Obr. 3.7 Fázový diagram síranu sodného.****Obr. 3.8 Fázový diagram síranu vápenatého.**

### 3.4 Absorbční experiment

Voda se ve stavebním materiálu může vyskytovat také v kapalném skupenství. V tomto případě můžeme transport vlhkosti popsat například pomocí sorptivity. Experimentální stanovení sorptivity na základě absorpčního experimentu představuje pravděpodobně nejjednodušší způsob jak charakterizovat schopnost porézních materiálů absorbovat kapalnou vodu a transportovat ji pomocí kapilárních sil. Během posledních dvaceti let je možné v odborné literatuře zabývajících se problematikou transportu kapalně vlhkosti vysledovat celou řadu aplikací tohoto jednoduchého konceptu sorptivity. Na jejich základě je možné prohlásit měření sorptivity a absorpčního koeficientu pro kapalnou vodu za obecně uznávanou a metodicky dostatečně zvládnutou metodu pro charakterizaci transportu kapalně vody porézní strukturou materiálů. [2]

Sorptivita  $S$  ( $\text{m/s}^{1/2}$ ) je definována pomocí vztahu:

$$I = S \cdot t^{1/2}$$

Kde  $I$  (m) je kumulativní absorpce vody a  $t$  (s) čas odpovídající této absorpci. Výše uvedená rovnice představuje zjednodušení obecného vztahu pro kumulativní hmotnost vody vyjádřenou pomocí principu odmocniny času, který se běžně používá v teorii difúze. Získáme ji vydělením následujícího vztahu objemovou hmotností vody při specifické teplotě měření  $\rho_w(T)$ .

$$i = A \cdot t^{1/2}$$

Zde  $i$  ( $\text{kg/m}^2$ ) je kumulativní hmotnost vody a  $A$  ( $\text{kg/m}^2\text{s}^{1/2}$ ) absorpční koeficient pro kapalnou vodu. Vztah mezi sorptivitou a absorpčním koeficientem pro kapalnou vodu pak popíšeme rovnicí:

$$A = S \cdot \rho_w(T)$$

### 3.8.1. Průběh absorpčního experimentu

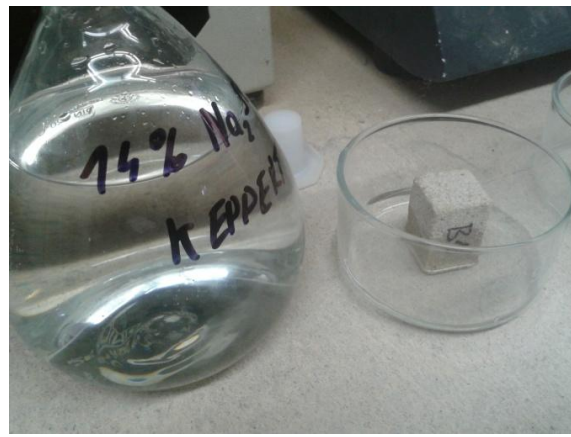
Během vývoje metodiky měření byla vyvinuta celá řada experimentálních uspořádání. V současné době se používají v zásadě dva principy měření, manuální a automatický. Měřené vzorky jsou ve formě krychlí či trámečků a na obvodových stranách se vodotěsně a parotěsně izolují z důvodu zajištění jednorozměrného transportu vlhkosti. Vzorky se poté dají do kontaktu s vodou, přičemž je nezbytné zajistit udržení stálé vodní hladiny. Za tímto účelem se nejčastěji používá Marriotova láhev. Hladina vody by měla být více než 5 mm nad kontaktem vzorku s vodou. V případě manuálního měření je ve zvolených časových intervalech provedeno vážení vzorků, díky čemuž se stanoví přírůstek vlhkosti v materiálu jako funkce času. Každé manuální vážení by mělo být dokončeno přibližně do 30s. Autoři uvádějí, že minimální počet vážení při manuálním měření je pět, přičemž doporučují provést více měření. Při automatickém měření je základní uspořádání stejné s tím rozdílem, že je měřený vzorek zavěšen na automatické digitální váhy a nárůst jeho hmotnosti vlivem absorpce vody je zaznamenávám automaticky.

Manuální měření může v některých případech, především u materiálů s vyšší a rychlejší nasákavostí, vést k hodnotám sorptivity či absorpčního koeficientu podstatně menším než v případě měření automatického. Příčinou je přerušování kontaktu vzorku s vodou během vážení či příliš dlouhá doba vážení. Vyhodnocení experimentu se provádí následujícím způsobem. Na horizontální osu vyneseme odmocninu z času příslušného měření hmotnosti a na osu vertikální kumulativní obsah vlhkosti vztažený na plochu průřezu vzorku v kontaktu s vodní hladinou. [2]

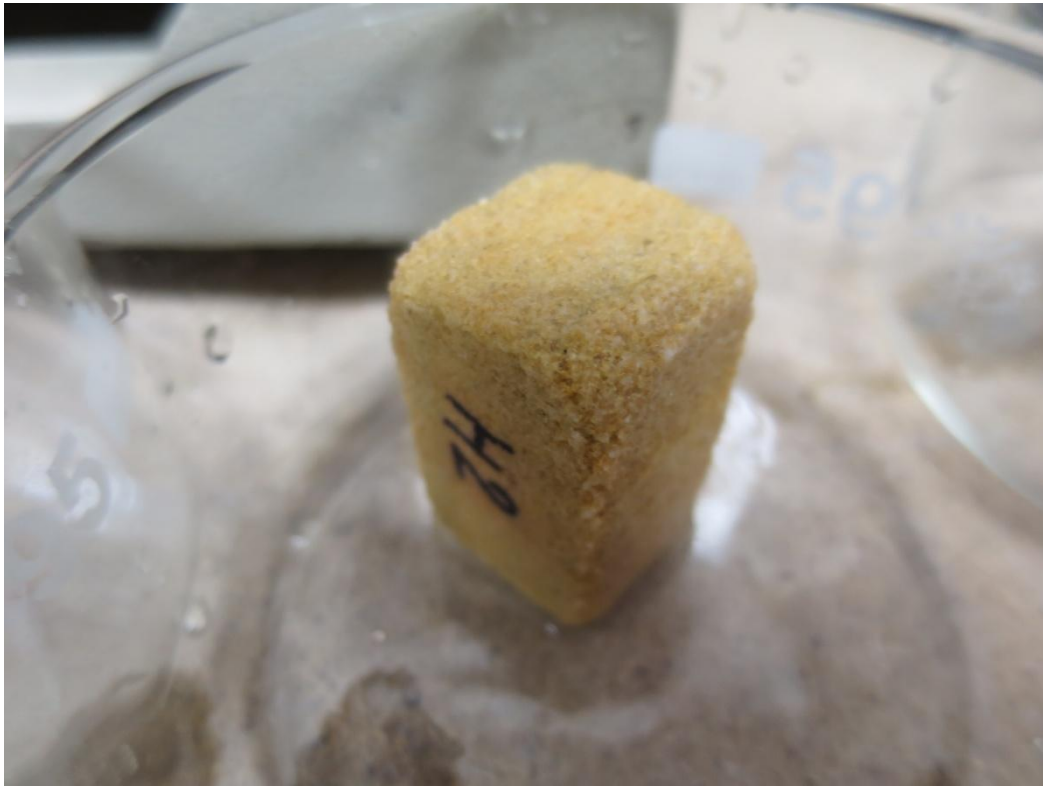
V případě našeho experimentu jsem použil plastovou nádobu, kterou jsem naplnil destilovanou vodou. Do ní jsem vložil předem připravený nasákový materiál (v našem případě houbu na mytí), ten jsem nechal důkladně nasáknout vodou, aby byla zcela nasycena. Poté jsem vzal vždy jeden vzorek, který jsem v intervalech minimálně 30 s nechal položený na houbě (vzorek byl ponořený minimálně 5 mm, jak předepisuje experiment) a poté jsem daný vzorek zvážil na laboratorní váze a přírůstek váhy jsem zaznamenal do tabulky. Časový interval nebyl u všech vzorků stejný. Například u vzorků božanovského a hořického pískovce byl cyklus prodloužen na 60s, u těšínského pískovce pak dokonce na 120s. Učinil jsem tak proto, aby byl vidět patrný nárůst hmotnosti vlhkosti v daném vzorku, což by v případě volby 30s cyklu u těchto pískovců patrné nebylo, kvůli menší pórovitosti těchto vzorků.

### 3.5 Popis experimentu dle metodiky „Benavente“

Tento experiment byl inspirován a prováděn dle metodiky, která je uvedena a popsána v článku [6]. Pro tento experiment bylo použito celkem 15 vzorků (4 ks božanovského, 4 ks hořického, 4 ks mšenského a 3 ks těšínského pískovce) o rozměrech 2,5 x 2,5 x 4,0 cm. Nejdříve byla na těchto vzorcích změřena nasákavost pomocí absorpčního experimentu (metodika je popsána v kapitole 3.4). Následně byly všechny vzorky vysušeny. Poté byly jednotlivé vzorky vloženy do laboratorních misek, do kterých byl nalit 14% roztok  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Po celou dobu experimentu byla dodržována hladina roztoku minimálně 5 mm, aby byly vzorky neustále ponořené v roztoku. Pak byly všechny vzorky vloženy do klimatické komory. Na klimatické komoře (Climacell®) byl nastaven program *P4*, což je program se dvěma teplotními úrovněmi  $T_1$  a  $T_2$ , s řízenou rychlostí teplotní změny, s nastavením relativní vlhkosti *RH* pro každou z teplotních úrovní a s možností cyklování. Obě úrovně byly nastaveny dle článku [6]. První úroveň: 40°C, 80 % *RH* a druhá úroveň: 10°C, 70 % *RH*. Počet cyklů byl zvolen na 15. Každá z úrovní trvala 12 hodin, tudíž jeden cyklus pak 24 hodin. Po dokončení cyklování byly sledované vzorky omyty destilovanou vodou a umístěny do sušárny, která byla nastavena na 60 °C. Po vysušení byly vzorky rozdrceny pomocí kladiva a umístěny zpět do laboratorních misek, do kterých byla nalita voda, která měla z rozdrcených vzorků navázat zbytky zkrystalizované soli. Tento proces byl opakován ještě jednou zhruba po 48 hodinách. Poté byly rozdrcené vzorky znovu umístěny do sušárny (nastavené na 60 °C) dokud nebyly zcela vysušeny. Na vysušených vzorcích byl pomocí laboratorních vah sledován rozdíl (úbytek) váhy *DWL*, který vznikl během celého experimentu a který byl potřebný pro další výpočty.



Obr. 3.9 Vzorek božanovského pískovce ponořený do roztoku na začátku experimentu.

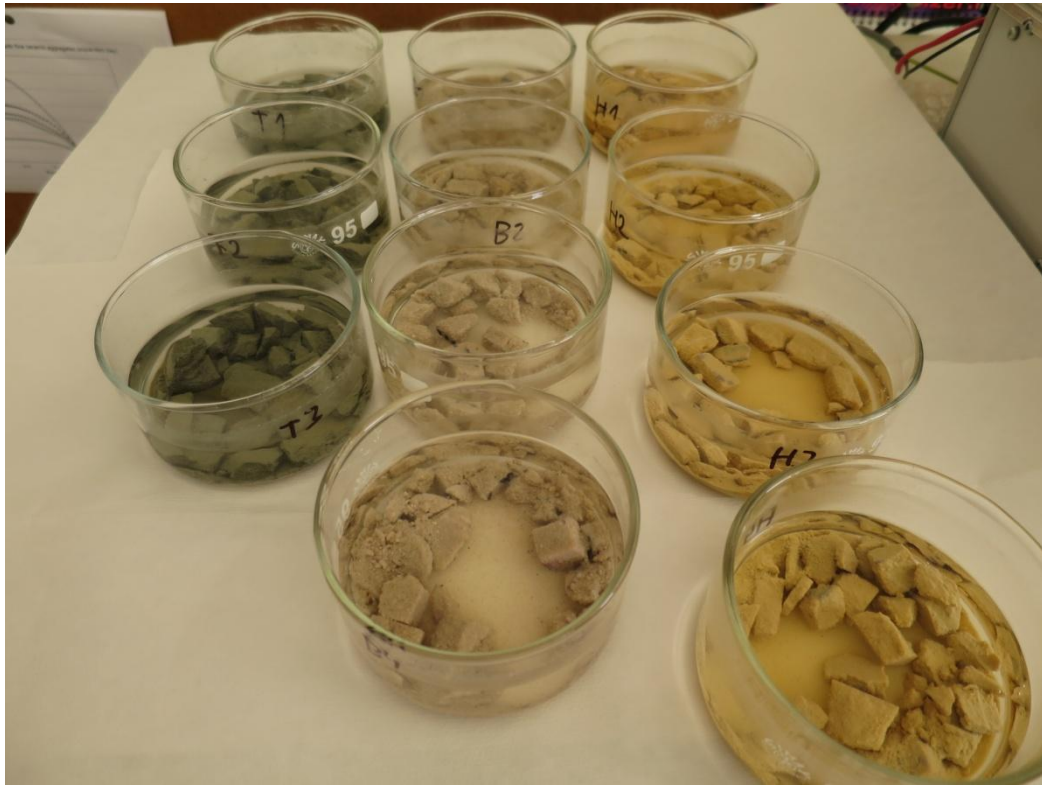


**Obr. 3.10 Viditelný úbytek materiálu (hmotnosti) po cyklování na vzorku hořického pískovce.**



**Obr. 3.11 Rozdrcený vzorek hořického pískovce.**





Obr. 3.12 Vzorky ponořené ve vodě kvůli navázání zbylé zkrystalizované soli.

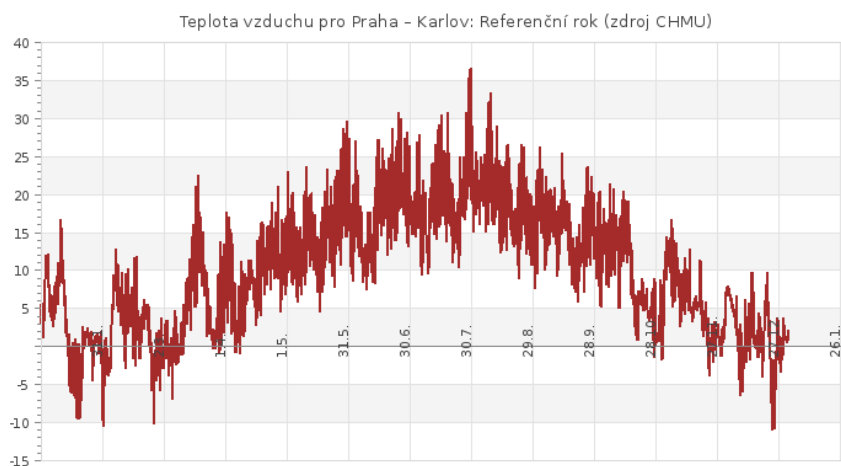


Obr. 3.13 Vzorky v konečné fázi experimentu připravené na vážení (zjištění *DWL*).

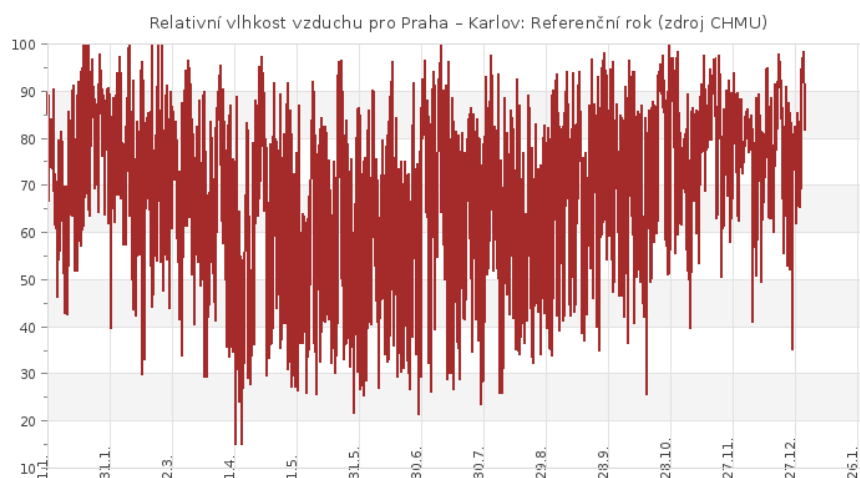


### 3.6 Popis krystalizačních experimentů s pískovcem „Mšené“

Krystalizační experimenty „Mšené“ spočívaly v cyklické krystalizaci různých solí v pískovci Mšené. Metodika experimentu se lišila od metodiky Benavente jinou volbou teplot a vlhkostí tak, aby tyto více odpovídaly podmínkám ČR (obr. 3.14 a 3.15). Vhodná volba teplot a relativních vlhkostí byla určena pomocí dat získaných z českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ) pro referenční klimatický rok. Krystalizace probíhala při 2 °C, rozpouštění při 25 °C. Všechny použité roztoky (tab. 3.1) v tomto teplotním intervalu prodělávají fázovou změnu (viz kapitola 3.3). Relativní vlhkost byla nastavena u teploty 2 °C na 80 % a u 25 °C na 55 %.



**Obr. 3.14** Teplota vzduchu (Praha - Karlov) - referenční rok [31].



**Obr. 3.15** Relativní vlhkost vzduchu (Praha - Karlov) - referenční rok [31].

Pro experiment bylo vybráno 18 vzorků mšenského pískovce (tři pro každý roztok) o rozměrech 2,5 x 2,5 x 4,0 cm. Ty byly poté jednotlivě vloženy do laboratorních misek, do kterých byl nalit roztok jednotlivých solí vždy o minimální hladině 5 mm, aby bylo docíleno stálého ponoření vzorků. Takto připravené vzorky putovaly do klimatické komory, ve které byly ponechány po dobu 25 cyklů. Jeden cyklus trval 24 hodin (12 hodin pro krystalizaci při 2 °C a 12 hodin pro rozpouštění při 25 °C). Vždy po dokončení pěti cyklů byly vzorky z klimatické komory vyjmuty a byl k nim dolit příslušný roztok. Bylo tak učiněno proto, že po pěti cyklech se daný roztok z části překrystalizoval na sůl do vzorku a zbylá část roztoku se vypařila. Během experimentu došlo k úplnému rozpadu vzorků (obr. 3.17) ponořených do roztoku 14 % Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a to již po deseti cyklech. Tyto vzorky byly proto z experimentu vyřazeny. U zbylých vzorků bylo možné sledovat probíhající krystalizaci a úbytek jejich hmotnosti. Po dokončení všech 25 cyklů byly vzorky vyjmuty a omyty v destilované vodě. Poté byly rozdrceny a uloženy zpět do misek s čistou vodou stejně jako u experimentu „Benavente“. Následně byly vysušeny v sušárně a byl změřen úbytek hmotnosti pomocí laboratorních vah.



**Obr. 3.16** Vzorky v klimatické komoře po prvních pěti cyklech.



**Obr. 3.17** Rozpadlý vzorek uložený v 14% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> po deseti cyklech.

### 3.7 Metody výpočtu krystalizačního tlaku

Krystalizace pevné látky (soli, ledu) v pórovitém prostoru materiálu zde vyvolává tlak, který může překročit pevnost materiálu a dojde tedy k jeho poškození. Tento mechanismus je znám odedávna, první pokusy o jeho kvantitativní popis se datují do začátku 20. století [10]. Jelikož hodnoty krystalizačního tlaku jsou přímo jen obtížně měřitelné, byly hledány cesty k jeho stanovení pomocí výpočtu. Nejstarší vzorec pro výpočet krystalizačního tlaku publikoval Correns v roce 1949 [11] (Eq. 1).

$$p_{corr} = \frac{RT}{V_x} \ln \frac{c_{298}}{c_s} \quad (\text{Eq. 1})$$

Symbol  $p_{corr}$  znamená krystalizační tlak dle Corrense,  $R$  je univerzální plynová konstanta,  $T$  teplota, při níž probíhá krystalizace,  $V_x$  je molární objem tvořícího se krystalu soli. Poměr v logaritmu má význam přesycení roztoku –  $c_{298}$  je molární koncentrace výchozího roztoku, pomocí něhož byly prováděny experimenty a  $c_{sat}$  je koncentrace nasyceného roztoku při teplotě krystalizace. Je zřejmé, že pokud by tento poměr byl menší než 1, krystalizace by neprobíhala – krystaly rostou pouze z přesyceného roztoku. Tento vztah (Eq. 1) nezohledňuje druh soli (vyjma jejího molárního objemu) a zejména ani charakter pórového prostoru, v němž krystalizace probíhá. Tento nedostatek odstranili Fitzner a Sneathlaga [12] (Eq. 2). Vztah vychází z představy, že krystaly primárně rostou ve větších pórech (poloměr  $R$ ) a po jejich zaplnění krystalizace pokračuje do pórů menších (poloměr  $r$ ). Vlastnosti krystalizující soli zde charakterizuje mezifázové napětí  $\sigma$ , které se vytváří na rozhraní krystal soli – její nasycený roztok.

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

Metodu dle Fitznera a Sneathlaga (Eq. 2) rozpracovali Rossi-Manaresi a Tucci [13]. Navrhují distribuční křivku rozdělit na 5 (obecně  $i$ ) intervalů a pro každý z nich spočítat krystalizační tlak  $p_i$  podle (Eq. 2). Jako hodnotu  $R$  navrhují používat konstantní poloměr největších přítomných pórů. Výsledný krystalizační tlak je pak součtem „efektivních krystalizačních tlaků“ z jednotlivých intervalů, jež se získají dle (Eq. 3), kde  $V_r$  a  $V_R$  jsou objemy pórů největší a  $i$ -té frakce (intervalu).

$$p_{rmt} = \sum_i p_i \left( \frac{V_{ri}}{V_R} \right) \quad (\text{Eq. 3})$$

### 3.8 Metody výpočtu mezifázového napětí krystal - nasycený roztok

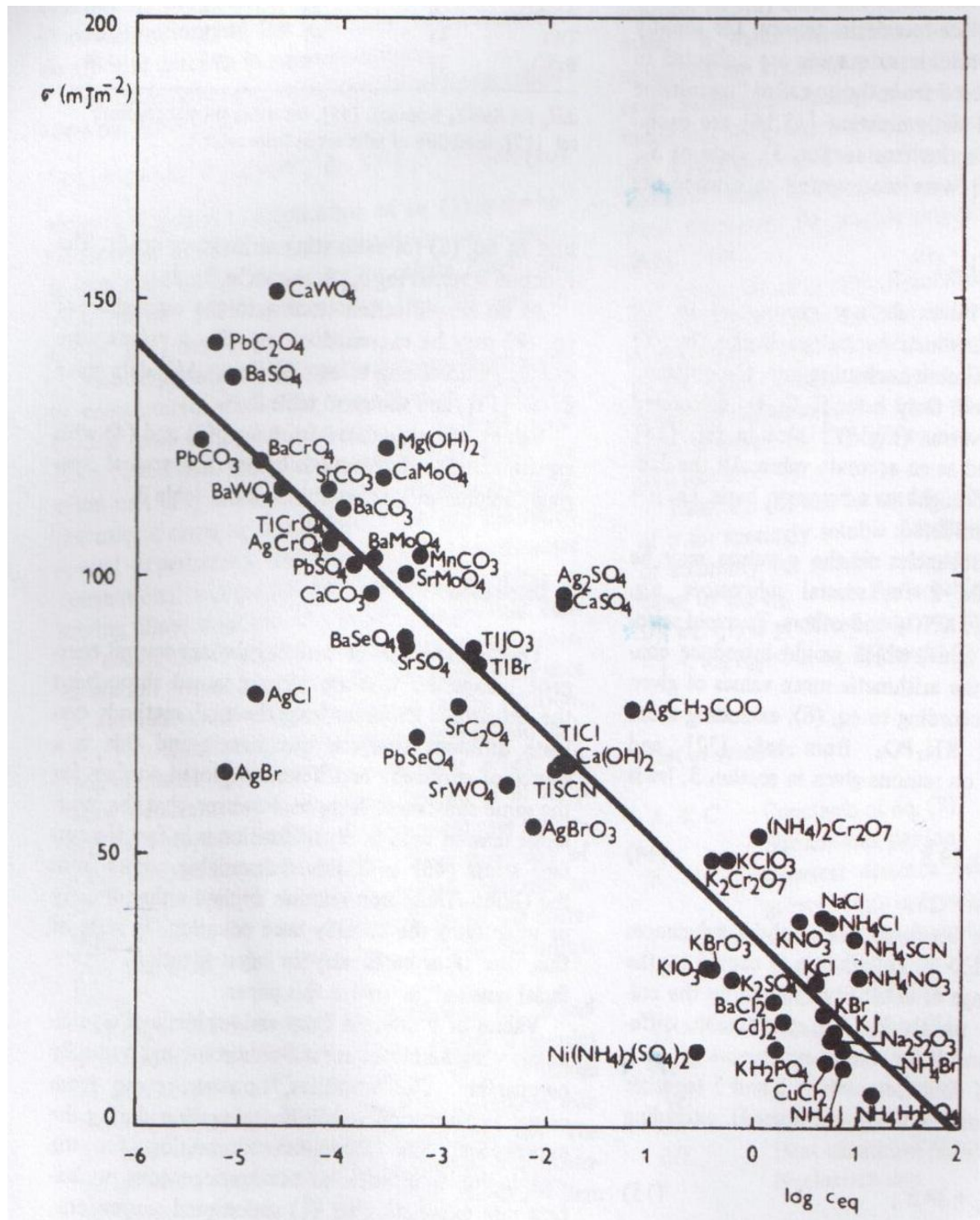
Zatímco hodnoty  $r$  a  $R$  jsou poměrně snadno dostupné pomocí některé porozimetrické techniky, hodnota  $\sigma$  není snadno měřitelná. Nielsen a Söhnel [14] odvodili vztah (Eq. 4), kde  $k$  je Boltzmanova konstanta,  $T$  teplota, při níž probíhá krystalizace,  $c_x$  molární koncentrace soli v krystalu (převrácená hodnota  $V_x$ ),  $c_{283}$  je koncentrace nasyceného roztoku při teplotě krystalizace,  $h$  je hydratační číslo kationtu přítomné soli (počet molekul vody, tvořících jeho hydratační obal v nasyceném roztoku),  $M$  molární hmotnost krystalizující soli,  $v$  počet iontů v jedné „molekule“ soli,  $\rho$  hustota krystalu a  $N_A$  Avogadrova konstanta. Bohužel, hydratační číslo  $h$  je experimentálně velmi obtížně dostupné a neexistuje jednoduchý způsob jeho odhadu. Závisí nejen na druhu kationu, ale i anionu a samozřejmě koncentraci roztoku. Nemusí být nutně celočíselné, publikované hodnoty se pro různé systémy pohybují od 1 do cca 10, s rostoucí koncentrací roztoku hydratační číslo dle očekávání klesá. Söhnel [9] sesbíral rozsáhlý soubor experimentálních dat (obr. 3.18) a vytvořil korelační vztahy, založené na linearizované rovnici (Eq. 4), udávající závislost mezifázového napětí na nasycené koncentraci soli (Eq. 5). Hodnoty konstant  $A$  a  $B$  jsou uvedeny v tab. 3.2. Přímka v obr. 3.9 odpovídá celkové korelaci.

$$\sigma = kT \frac{\ln\left(\frac{c_x}{c_{sat}}\right)}{h\left(\frac{M}{v\rho N_A}\right)^{2/3}} \quad (\text{Eq. 4})$$

$$\sigma = A \cdot \log c_{sat} + B \quad (\text{Eq. 5})$$

Tab. 3.2 Konstanty (Eq. 5) [9].

	<b>A</b>	<b>B</b>
<b>málo rozpustné soli</b>	-16.0	42.2
<b>rozpustné soli</b>	-9.0	29.8
<b>celková korelace</b>	-17.8	34.8



Obr. 3.18 Mezifázové napětí krystal – nasycený roztok jako funkce nasycené koncentrace soli [9].

### 3.9 Vztahy pro odhad trvanlivosti porézních hornin na základě jejich vlastností

Trvanlivost, tedy schopnost materiálu odolávat nepříznivým vlivům prostředí, je v případě anorganických porézních látek, tedy i sedimentárních hornin, ovlivňována, kromě agresivity prostředí, i jejich strukturou pórového prostoru a mechanickými vlastnostmi. Z důvodu zkrácení času potřebného pro posuzování trvanlivosti hornin jsou hledány způsoby, jak jejich trvanlivost zhodnotit na základě rychle dostupných fyzikálních vlastností, na místo zdlouhavého měření vlastních trvanlivostních parametrů (odolnost vůči mrazovým cyklům, odolnost CHRL, odolnost krystalizaci solí...). Za tímto účelem jsou navrhovány indikátory, které nějakým způsobem postihují fyzikální vlastnosti hornin a mají nějaký definovaný vztah k jejich trvanlivosti. Tyto indikátory obsahují buď charakteristiky pórového systému, nebo mechanické vlastnosti, nebo obojí [6].

Nejjednodušším trvanlivostním indikátorem je přímo porozita materiálu ( $P$ ), jakožto objemový zlomek pórů, protože je v přímé souvislosti s transportem kapalin materiálem i jeho odolností vůči krystalizaci solí a ledu. Kromě porozity je možné podobným způsobem použít i měrný povrch, který je s porozitou v přímém vztahu. V práci [10] byl zaveden koeficient nasycení  $C_{sat}$ , jakožto poměr porozity zjištěné měřením nasákavosti ( $P_{abs}$ ) a celkové porozity  $P_t$  (Eq. 6).

$$C_{sat} = \frac{P_{abs}}{P_t} \quad (\text{Eq. 6})$$

V práci [15] byl zaveden indikátor  $D$  (Eq. 7) obsahující koeficient nasycení a porozitu  $P_t$ . Byl publikován i experimentálně zjištěný vztah mezi  $DWL$  (dry weight loss) a  $D$  (Eq. 8).

$$D = C_{sat}^2 P_t \quad (\text{Eq. 7})$$

$$DWL[\%] = 3.19D - 9.6 \quad (\text{Eq. 8})$$

Modd a kol. [16] definovali několik trvanlivostních indikátorů na bázi pórového systému. Zavedli výraz „mikroporozita“  $P_{micro}$  ve smyslu „část porozity připadající na póry o průměru menším než 5  $\mu\text{m}$ “. V [6] byl tento výraz používán pro póry o průměru menším než 2  $\mu\text{m}$ , což není výrazný rozdíl.  $P_{micro}$  může být indikátorem





sama o sobě, nebo v následujících vztazích (Eq. 9-11), přičemž Eq. 11 označují autoři jako nejlepší.

$$P_{micro} \cdot C_{sat} \quad (\text{Eq. 9})$$

$$P_{micro}^{C_{sat}} \quad (\text{Eq. 10})$$

$$(P_{micro}^{C_{sat}})^{0.5} \quad (\text{Eq. 11})$$

Dalším pokusem, jak použít jako indikátor trvanlivosti pórový systém, je „durability dimensional estimator“ *DDE* [17], vycházející z distribuční porozimetrické křivky  $D_v(r_i)$  a  $P_t$  (Eq. 12), který má popisovat celý pórový systém jedním číslem.

$$DDE = \sum \frac{D_v(r_i)}{r_i} P_t \quad (\text{Eq. 12})$$

Benavente a kol. [6] navrhuji trojici nových indikátorů *PDE* – „petrophysical durability estimator“, které obsahují i mechanické vlastnosti a pórový systém popisují pomocí *DDE*. Jako reprezentativní mechanické vlastnosti byly autory použity pevnost v tahu za ohybu  $\sigma_F$ , pevnost v tlaku  $\sigma_C$  a dynamický modul pružnosti  $E$ . Navržené indikátory pak jsou (pro *DDE* v  $\mu\text{m}^{-1}$ ) Eq. 13-15. Vyšší hodnota *PDE* znamená nižší odolnost vůči krystalizujícím solím (vyšší *DWL*).

$$PDE_F [m/kg] = 10 \frac{DDE}{\sigma_F} \quad (\text{Eq. 13})$$

$$PDE_C [m/kg] = 10 \frac{DDE}{\sigma_C} \quad (\text{Eq. 14})$$

$$PDE_E [mm/kg] = 10 \frac{DDE}{E} \quad (\text{Eq. 15})$$

## 4 Výsledky a diskuze

### 4.1 Studované materiály

Souhrnné označení stavební pískovce zahrnuje řadu typů hornin sedimentárního původu. Definovat je lze jako pevné úlomkové (klastické) sedimenty tvořené pískovými zrny a základní hmotou, kterou je jíl, prachová zrna a úlomky slíd. Z petrografického hlediska jsou to horniny nestejného chemického složení, různého stáří a stupně zpevnění. Hlavními klasifikačními principy jsou poměrná zastoupení: a) křemene spolu s úlomky hornin typu křemence, buližníku a rohovce, b) živců s nestabilními úlomky hornin, c) jílovitého podílu.

Důležitou nerostnou součástí pískovců je tmel spojující písková zrna a do značné míry ovlivňující vlastnosti daného druhu kamene. Podle složení tmele rozeznáváme tmel křemičitý, jílovitý, vápnitý, slinitý, železitý apod. Podle přítomnosti některého typického minerálu ve struktuře kamene lze tyto materiály rozlišovat i barevně - přítomnost hematitu udělí pískovcům červené zbarvení, s limonitem jsou žluté až hnědé, s glaukonitem zelené a bílé pískovce obsahují podíl kaolinitu. [2]

**Tab. 4.1 Materiálové složení jednotlivých vzorků**

		Klasy		Tmel a matrice		Porozita (%)
		Druh	Obsah [%]	Druh	Obsah [%]	
vápnitý pískovec	Těšín	Křemen	65	Kalcit	7	7,2
		Muskovit		Muskovit	celkově 10	
		Živec		Živec	celkově 10	
				Chlorit	5	
				slabá silifikace		
jílovitý pískovec	Hořice	Křemen	84	Kaolinit	14	27,3
				Illit	2	
				variabilní silifikace		
křemitý pískovec	Mšené	Křemen	99	Kaolinit	1	28,2
				slabá silifikace		
jílovitý pískovec	Božanov	Křemen	84	Montmorinolit	4	16,8
		mikroklín	7	Kaolinit	3	
				Illit	1	

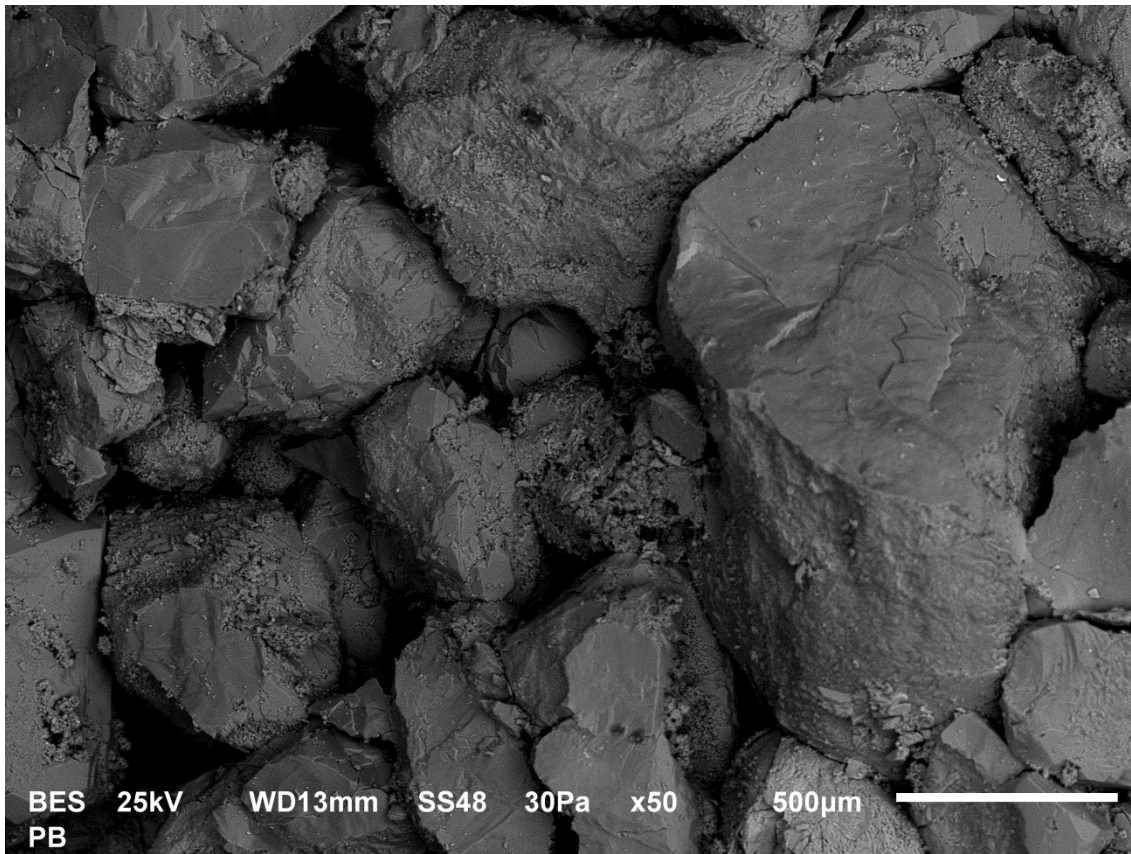
Pevnost v tlaku popisuje mezní napětí, při němž dojde k rozrušení zkušebního vzorku. Tato pevnost se stanovuje pouze u materiálů, u nichž dojde vlivem tlakového zatěžování k rozdrčení. Toto kritérium pískovce splňují. Pevnost v tahu za ohybu se počítá z obecného napětí za ohybu jako jeho mezní hodnota. Při ohybových zkouškách se porušení materiálu šíří převážně od tažené části průřezu, celkem výjimečně u přírodních anizotropních materiálů může porušení nastat rozdrčením tlačené části průřezu. V tabulce 4.2 jsou uvedeny hodnoty naměřené pro pískovce používané v experimentech.

**Tab. 4.2 Vybrané základní vlastnosti kamenů.**

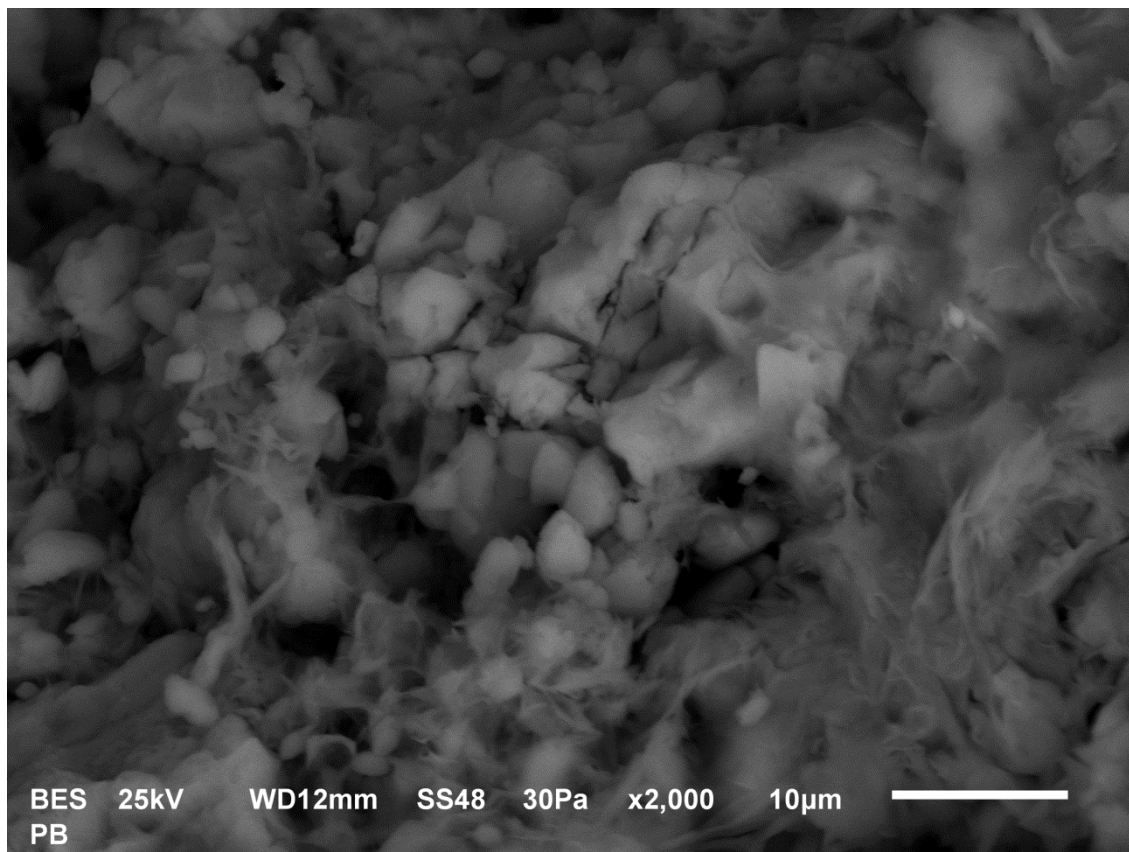
	ohyb	tlak	porozita
	MPa	MPa	%
<b>Božanov</b>	3,1	22,6	16,8
<b>Hořice</b>	3,3	14,6	27,3
<b>Mšené</b>	1,3	8,7	28,2
<b>Těšín</b>	11,7	65,7	7,2

Dále byly v rámci této práce jednotlivé vzorky pozorovány pod elektronovým mikroskopem. Bylo tak učiněno proto, abychom si lépe představili mikrostrukturu, rozložení a velikost pórů v použitých vzorcích pískovců. Snímky jsou uvedeny níže a to v minimálním (50x zvětšeno) a maximálním (2000x zvětšeno) přiblížení.

U božanovského pískovce můžeme primárně pozorovat velká zrna křemene. Konkrétně v případě vzorku použitého v experimentech činí obsah křemene 84%. Dále je možné pozorovat zrna živců a úlomků hornin. Matrice a tmel je tvořen kaolinitem. Hořický pískovec je podobný svým složením pískovci božanovskému. Křemen tvoří v tomto případě majoritní složku v tomto případě taktéž 84% klastických zrn. Tato zrna jsou od sebe více vzdálena, tudíž byla naměřena i vyšší porozita těchto vzorků. Mezerní hmotu tvoří opět kaolinit. U mšenského pískovce jsou dobře rozeznatelná jednotlivá, pravidelná zrna křemene, která tvoří hlavní složku- v tomto případě 99%. V tmelu není k vidění prakticky žádná jílovitá frakce. U těšínského pískovce tvoří kostru úlomkovitá zrna křemene a živců. V tmelu a matrici je zastoupen kalcit, muskovit a živec. Zrna se dotýkají v ploškách i bodech. To má za následek jeho nízkou porozitu.

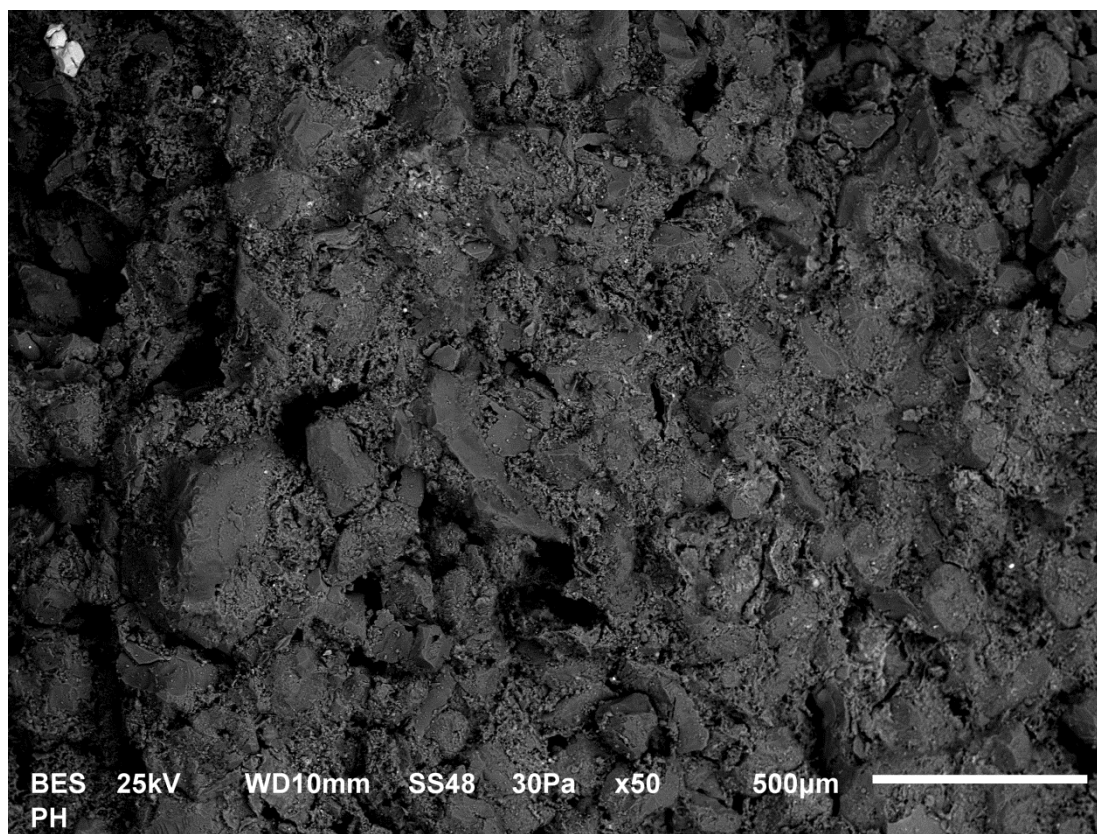


**Obr. 4.1** Vzorek božanovského pískovce použitého v experimentu - 50x zvětšeno.

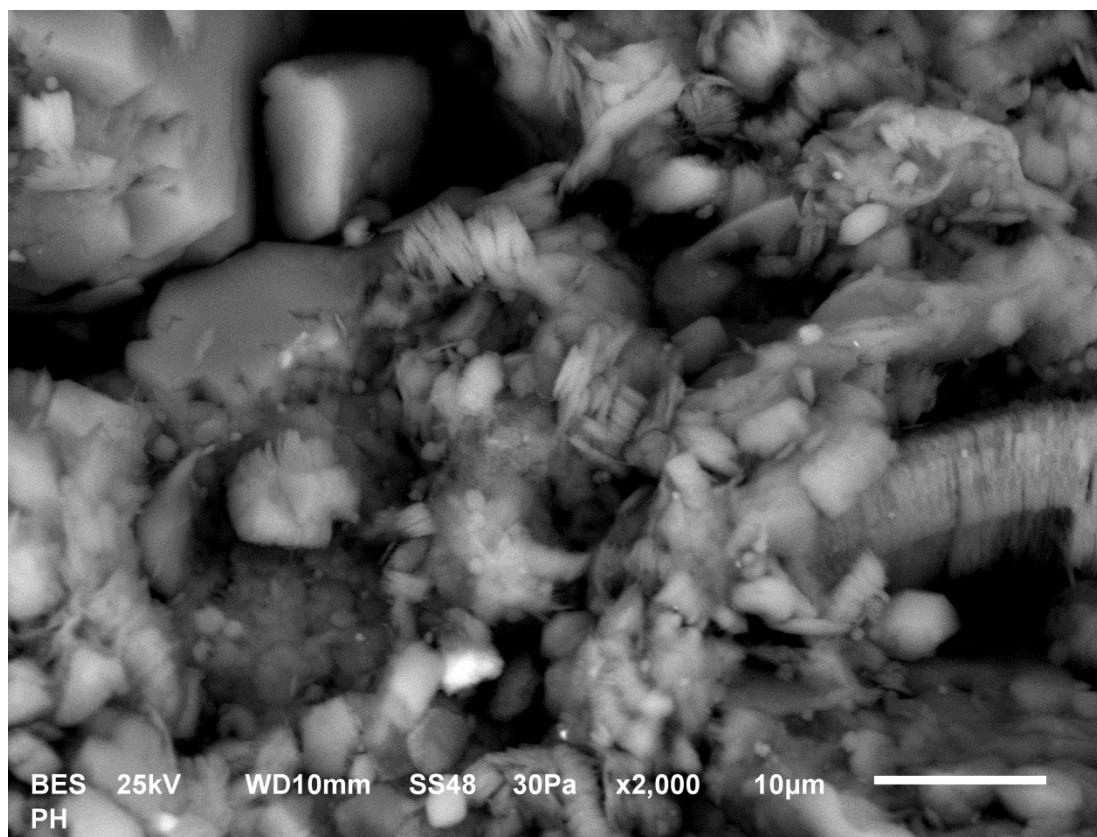


**Obr. 4.2** Vzorek božanovského pískovce použitého v experimentu - 2000x zvětšeno.



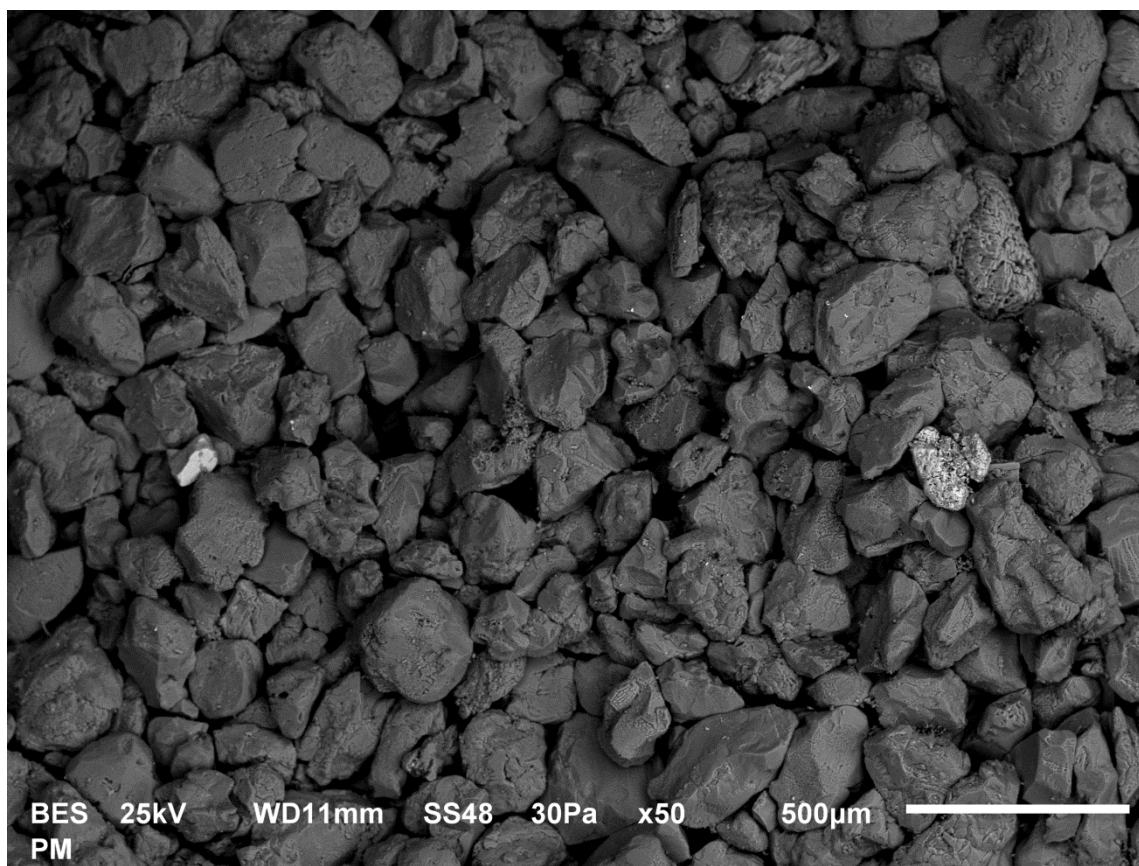


**Obr. 4.3** Vzorek hořického pískovce použitého v experimentu - 50x zvětšeno.

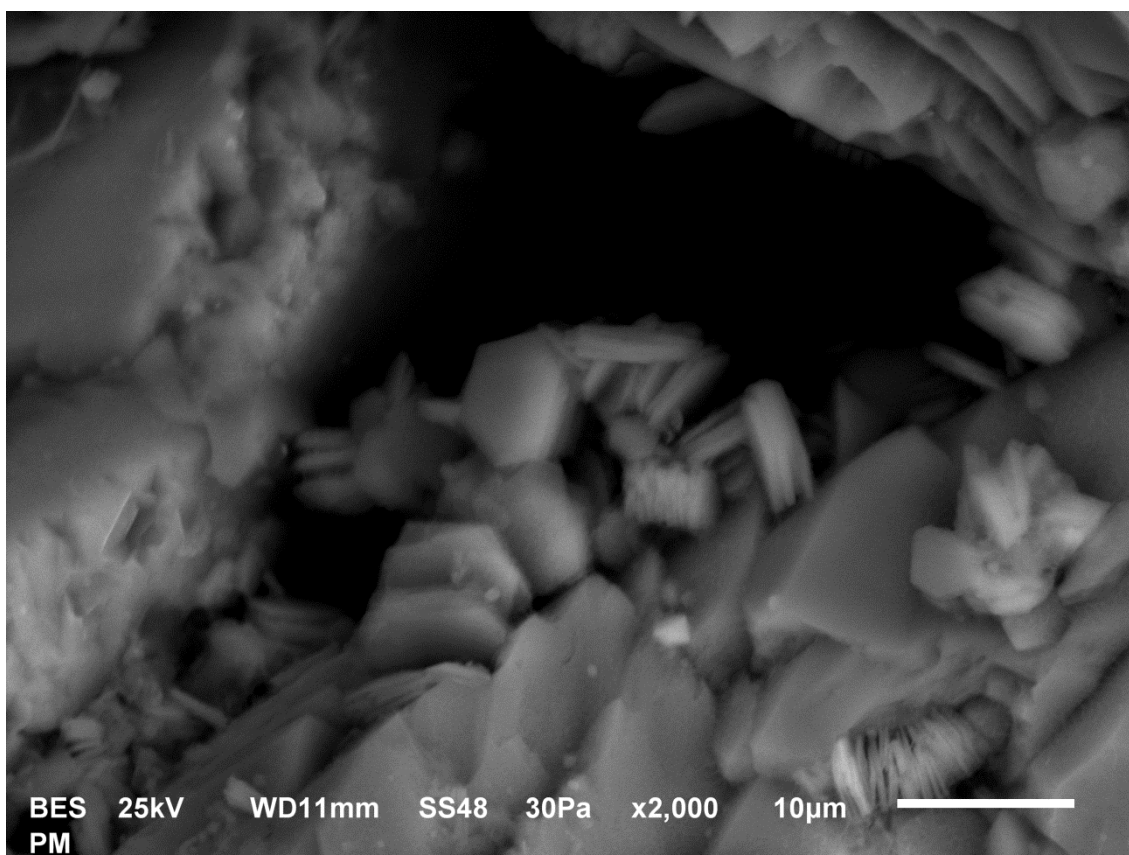


**Obr. 4.4** Vzorek hořického pískovce použitého v experimentu - 2000x zvětšeno.



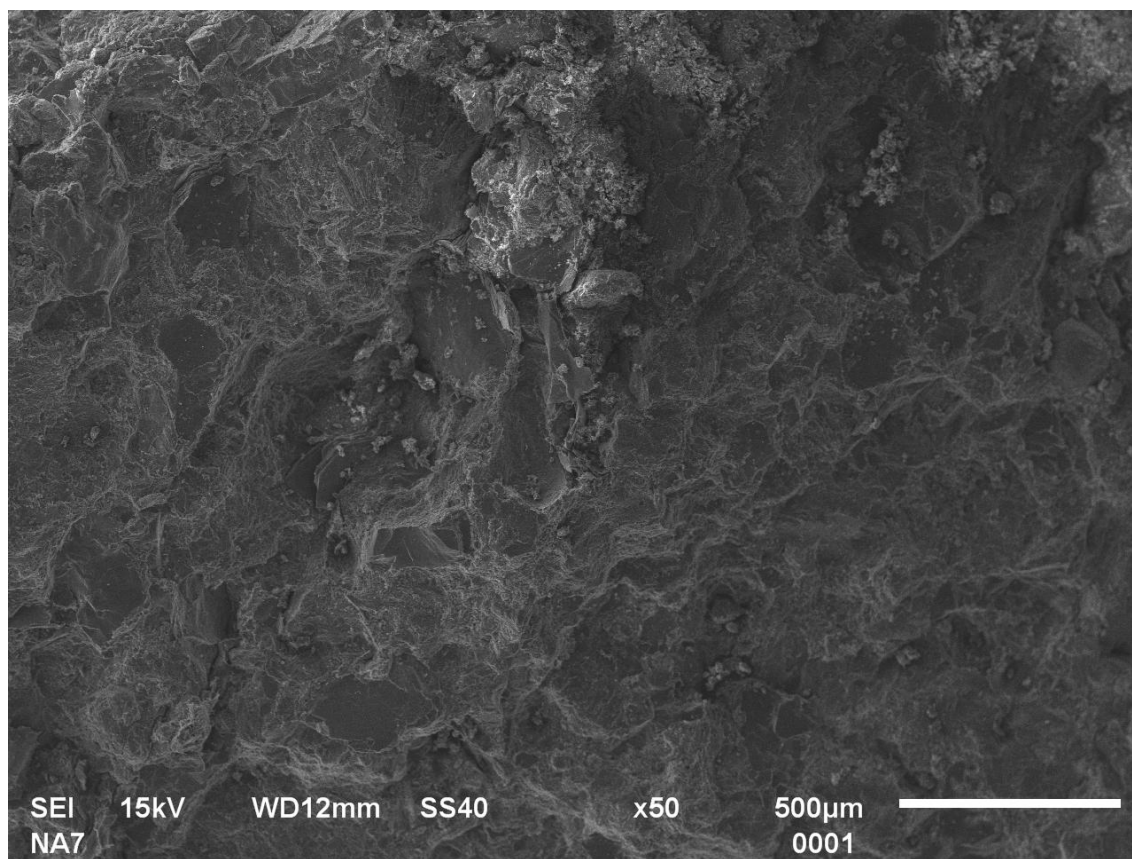


**Obr. 4.5** Vzorek mšenského pískovce použitého v experimentu - 50x zvětšeno.

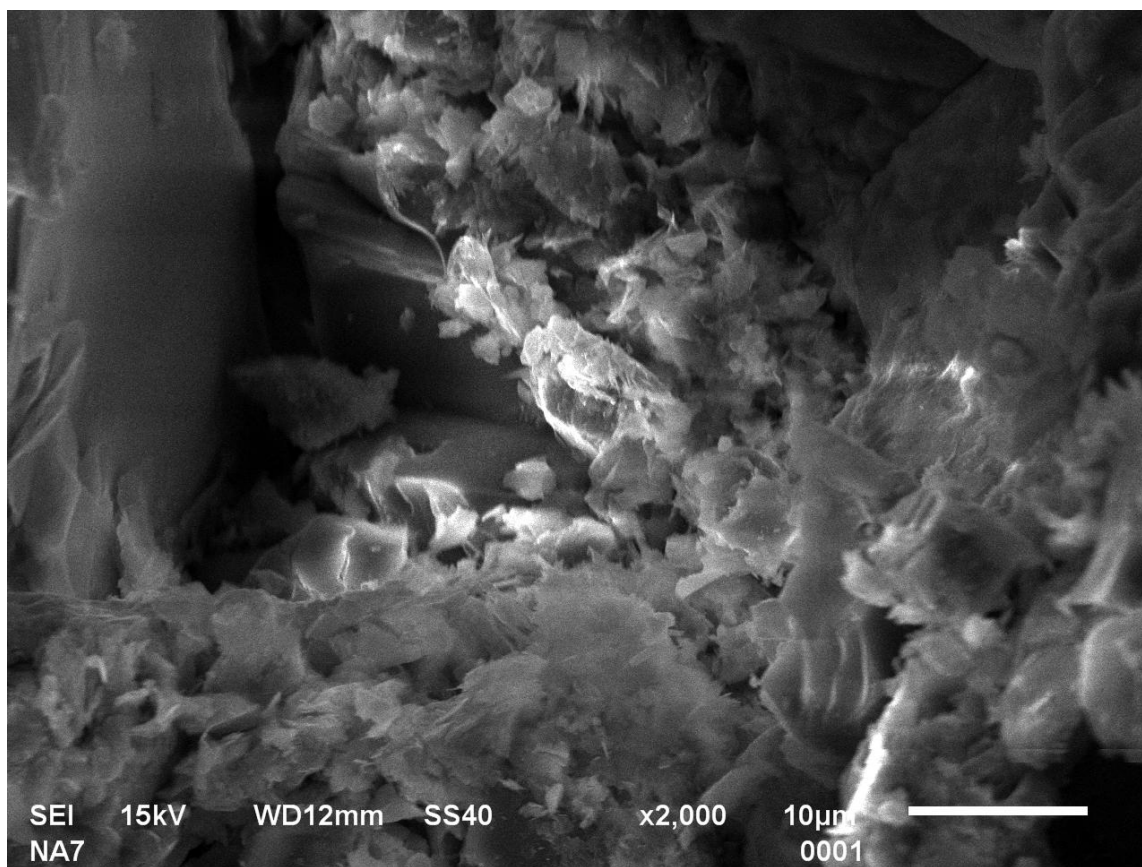


**Obr. 4.6** Vzorek mšenského pískovce použitého v experimentu - 2000x zvětšeno.





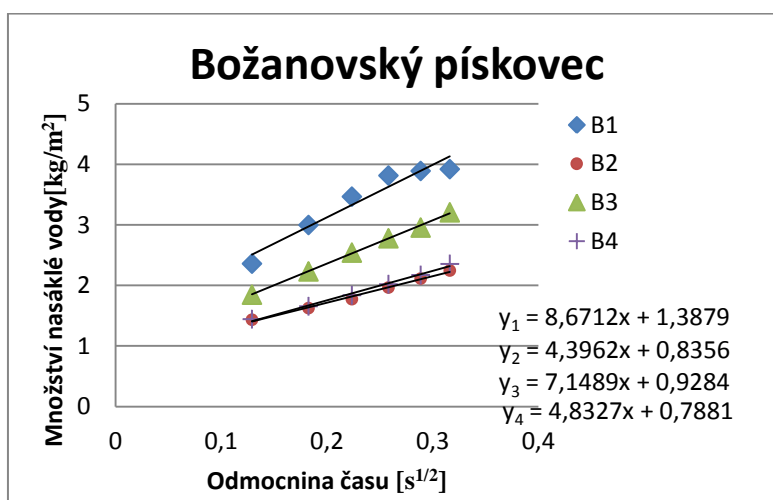
**Obr. 4.7** Vzorek těšínského pískovce použitého v experimentu - 50x zvětšeno.



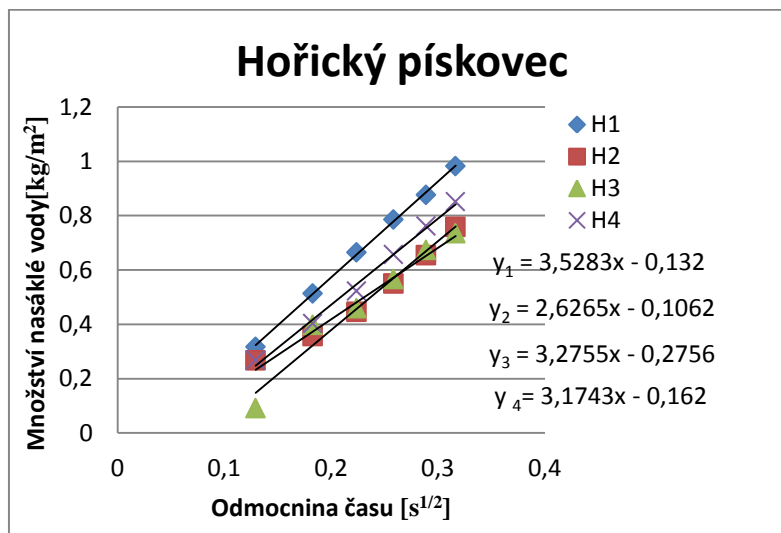
**Obr. 4.8** Vzorek těšínského pískovce použitého v experimentu - 2000x zvětšeno.

## 4.2 Výsledky absorpčního experimentu

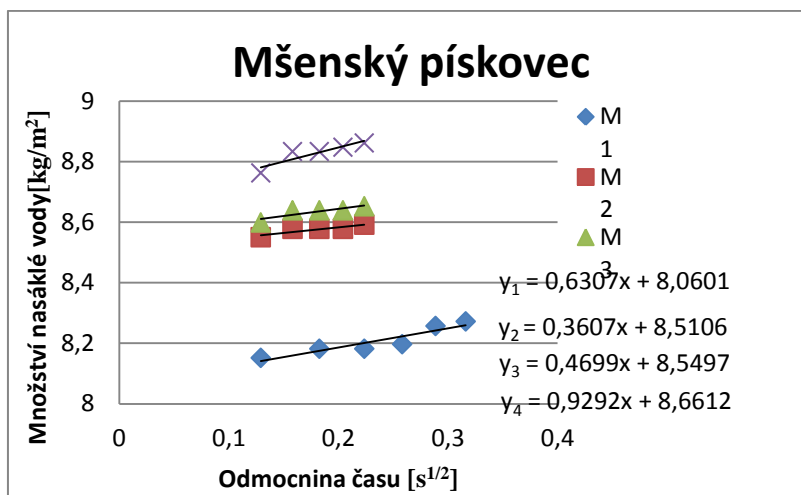
Jak je patrné z následujících obrázků (grafů) největší nasákavost má mšenský pískovec, následuje pískovec božanovský, dále pískovec hořický a nejmenší nasákavost vykazuje pískovec těšínský. Vše souvisí s vnitřní strukturou a rozložením pórů v jednotlivých druzích pískovců. Tyto parametry jsou popsány a udány v tabulce 4.2 a na obrázcích 4.1 až 4.8 můžeme dále pozorovat odlišnou strukturu, velikost a rozložení pórů. V tabulce 4.3 jsou uvedeny zprůměrované hodnoty absorpčního koeficientu naměřeného pro jednotlivé vzorky.



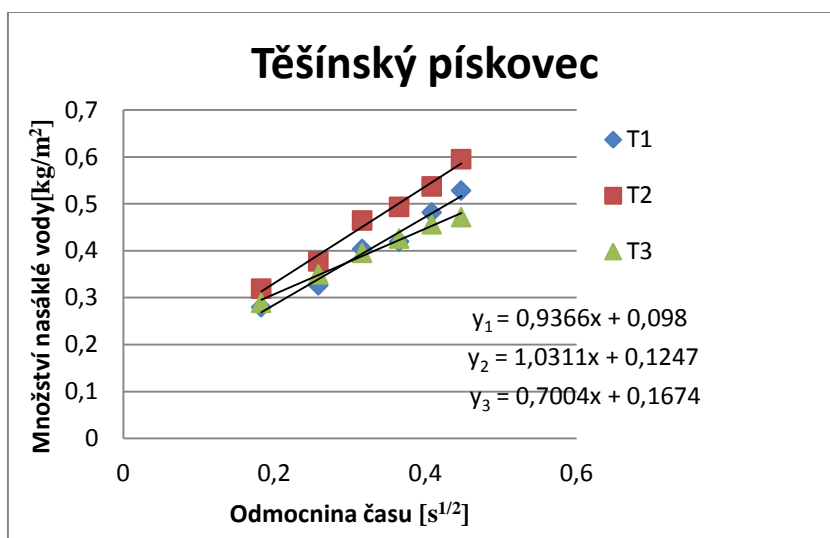
Obr. 4.9 Výsledky absorpčního experimentu pro božanovský pískovec.



Obr. 4.10 Výsledky absorpčního experimentu pro hořický pískovec.



Obr. 4.11 Výsledky absorpčního experimentu pro mšenský pískovec.



Obr. 4.12 Výsledky absorpčního experimentu pro těšínský pískovec.

Tab. 4.3 Průměrné hodnoty absorpčního koeficientu

	Absorpční koeficient
	$\text{kg/m}^2\text{s}^{1/2}$
<b>Božanov</b>	6,262
<b>Hořice</b>	3,151
<b>Mšené</b>	0,598
<b>Těšín</b>	0,889

### 4.3 Stanovení mezifázového napětí krystal - nasycený roztok

Hodnota mezifázového napětí  $\sigma$  je klíčová pro výpočet krystalizačního tlaku podle (Eq. 2) a (Eq. 3). V tab. 4.4 jsou sumarizována data pro systémy použité v této diplomové práci, nezbytná pro výpočet dle (Eq. 4). Data uvedená kurzívou představují odhadnutou hodnotu. Týká se to zejména hodnot hydratačního čísla  $h$ , které jsou pro studované systémy nedostupné. Hodnoty  $h$  byly odhadovány tak, aby výpočet dle (Eq. 4) poskytl realistickou hodnotu mezifázového napětí. Tato realističnost byla posuzována podle souladu s výsledky výpočtu dle korelačních rovnic (Eq. 5), případně s experimentálními daty z literatury.

V tab. 4.5 jsou shrnuty hodnoty  $\sigma$  získané pomocí korelačních vztahů s konstantami z tab. 3.2. Dále jsou zde prezentována dostupná experimentální data [9]. Tučně zvýrazněné hodnoty mohou být považovány za relevantní pro další práci. Kromě systému  $\text{CaSO}_4$  je vhodný korelační vztah pro rozpustné soli, nebo „celková korelace“. V systému  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (283 K – Benavente) byla používána hodnota  $32 \text{ mJ/m}^2$ , jakožto „prostřední“ hodnota ze tří uvažovaných. Pro tuto sůl při 275 K byla použita hodnota  $37 \text{ mJ/m}^2$ , opět jako „prostřední“ ze tří relevantních. Nižší teplota znamená nižší rovnovážnou (nasycenou) koncentraci a tedy vyšší mezifázové napětí. Pro  $\text{NaCl}$  byla použita přímo experimentálně zjištěná hodnota, korelační i teoretický vztah poskytují výrazně nižší hodnoty. Pro  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NaNO}_3$  a  $\text{MgSO}_4$  byly použity opět „prostřední“ hodnoty. Pro síran vápenatý byla použita experimentálně zjištěná hodnota  $95 \text{ mJ/m}^2$ .

**Tab. 4.4 Souhrn hodnot mezifázového napětí. Tučně hodnoty zasluhující pozornost, podbarveny v práci použité výsledné hodnoty.**

		jedn.	$\text{Na}_2\text{SO}_4$	$\text{Na}_2\text{SO}_4$	$\text{NaCl}$	$\text{Na}_2\text{CO}_3$	$\text{NaNO}_3$	$\text{MgSO}_4$	$\text{CaSO}_4$
		T	K	283	275	275	275	275	275
	$c_s$	mol/l	0,625	0,414	5,314	0,670	6,553	1,845	0,014
<b>podle (Eq. 3)</b>	$\sigma$	$\text{mJ/m}^2$	<b>31</b>	<b>37</b>	<b>31</b>	<b>34</b>	<b>27</b>	<b>37</b>	<b>84</b>
<b>podle (Eq. 4)</b>									
málo rozpustné soli	$\sigma$	$\text{mJ/m}^2$	45	48	31	45	29	38	<b>72</b>
rozpustné soli	$\sigma$	$\text{mJ/m}^2$	<b>32</b>	<b>33</b>	<b>23</b>	<b>31</b>	<b>22</b>	<b>27</b>	46
celková korelace	$\sigma$	$\text{mJ/m}^2$	<b>38</b>	<b>42</b>	<b>22</b>	<b>38</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>68</b>
<b>exp. data [6]</b>	$\sigma$	$\text{mJ/m}^2$	-	-	<b>38</b>	-	-	-	<b>95</b>
<b>použitá data</b>	$\sigma$	$\text{mJ/m}^2$	<b>32</b>	<b>37</b>	<b>38</b>	<b>34</b>	<b>22</b>	<b>30</b>	<b>95</b>

**Tab. 4.5 Data pro výpočet mezifázového napětí v použitých systémech podle (Eq. 4).**

	systém		Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	NaCl	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	NaNO <sub>3</sub>	MgSO <sub>4</sub>	CaSO <sub>4</sub>
	krystalizující sůl		Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .10H <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .10H <sub>2</sub> O	NaCl	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> .10H <sub>2</sub> O	NaNO <sub>3</sub>	MgSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O
T	teplota	K	283	275	275	275	275	275	275
W <sub>298</sub>	hm. zlomek soli	%	14	14	30	24	45	23	0.205
C <sub>x</sub>	koncentrace "krystalu"	mol/l	4,544	4,544	37,072	5,068	26,553	10,795	13,473
W <sub>s</sub>	nasycená koncentrace (bezv. sůl)	%	8,3	5,5	26,3	6,4	42,2	18,5	0,191
ρ <sub>283</sub>	hustota nasyceného roztoku	g/ml	1,1	1,1	1,18	1,103	1,32	1,2	1
C <sub>s</sub>	nasycená koncentrace	mol/l	0,625	0,414	5,314	0,670	6,553	1,845	0,014
h	hydratační číslo	-	1	1	3	1	2	1	2
M	molární hmotnost soli	g/mol	322,9	322,9	58,4	286,1	85,0	246,4	172,2
M	molární hmotnost soli (bezvodá)	g/mol	142,0	142,0	58,4	106,0	85,0	120,3	136,2
v	počet iontů	-	3	3	2	3	2	2	2
ρ <sub>x</sub>	hustota krystalu	g/ml	1,464	1,464	2,165	1,450	2,257	2,660	2,320
σ	mezifázové napětí	mJ/m <sup>2</sup>	31	37	31	34	27	37	84

#### 4.4 Stanovení krystalizačního tlaku dle Corrense

Dle Corrense (Eq. 1) je krystalizační tlak  $p_{corr}$  nezávislý na vlastnostech pórového systému, ale pouze na vlastnostech krystalizující soli a zprostředkovaně také na teplotě, při níž krystalizace soli probíhá (určuje koncentraci nasyceného roztoku a jeho hustotu). Vypočtené hodnoty, jakož i použitá data, jsou uvedeny v tab. 4.6.



**Tab. 4.6 Výpočet krystalizačních tlaků dle Corrense (Eq. 1).**

			Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	NaCl	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	NaNO <sub>3</sub>	MgSO <sub>4</sub>	CaSO <sub>4</sub>
T	teplota	K	283	275	275	275	275	275	275
C <sub>x</sub>	koncentrace „v krystalu“	mol/l	4,544	4,544	37,072	5,068	26,553	10,795	13,473
V <sub>x</sub>	měrný objem krystalů	l/mol	0,2201	0,2201	0,0270	0,1973	0,0377	0,0926	0,0742
C <sub>298</sub>	koncentrace roztoku	mol/l	1,084	1,084	6,010	2,604	7,147	2,294	0,015
C <sub>s</sub>	nasyčená koncentrace	mol/l	0,625	0,414	5,314	0,670	6,553	1,845	0,014
ρ <sub>s</sub>	hustota nasyceného roztoku	g/ml	1,07	1,07	1,18	1,10	1,32	1,20	1,00
ρ <sub>298</sub>	hustota nenasyčeného roztoku	g/ml	1,10	1,10	1,17	1,15	1,35	1,20	1,00
w <sub>s</sub>	nasyčená koncentrace (bezv. sůl)	%	8,3	5,5	26,32	10,8	44,4	21,7	0,191
w	hm. zlomek soli v roztoku	%	14	14	30	24	45	23	0,2
<b>p<sub>corr</sub></b>	<b>krystalizační tlak</b>	<b>MPa</b>	<b>5,9</b>	<b>10,0</b>	<b>10,4</b>	<b>15,7</b>	<b>5,3</b>	<b>5,4</b>	<b>1,4</b>

#### 4.5 Výsledky experimentů dle metodiky „Benavente“

Před jednotlivými experimenty jsem naměřil pomocí posuvného měřidla a laboratorních vah rozměry a váhy vzorků českých pískovců použitých v experimentech. Dále jsou uvedeny ještě váhy misek, ve kterých byly vzorky uloženy v průběhu experimentů. Souhrnný přehled rozměrů a jednotlivých vah je uveden v tab. 4.7. Vzorky jsou označeny počátečními písmeny použitých pískovců a seřazeny v abecedním pořadí a to: B - božanovský pískovec, H - hořícký pískovec, M - mšenský pískovec a T - těšínský pískovec.

Experimenty dle Benaventeho pracují s cyklováním (15x) v oblasti 40–10 °C s roztokem 14% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, z něhož krystalizuje Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·10H<sub>2</sub>O. Byly použity čtyři druhy kamene, pískovce Božanov, Hořice, Mšené a Těšín (v abecedním pořadí). Po cyklování získané hodnoty *DWL* (dry weight loss, tedy „odpad ze vzorků“) a jejich odhady směrodatné odchylky jsou uvedeny v tab. 4.8. Odlehlé hodnoty byly vyloučeny DD testem na hladině významnosti 95 %. Je zřejmé, že získané hodnoty jsou poměrně hodně rozptýlené, jak lze u přírodního materiálu očekávat.



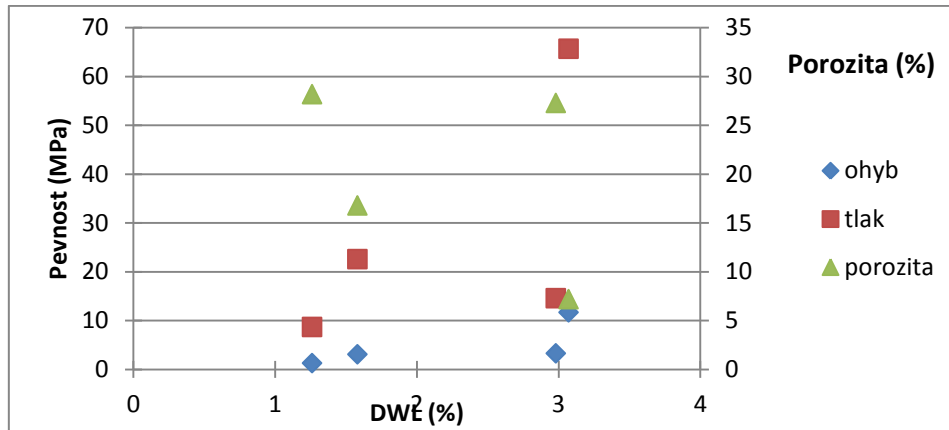
**Tab. 4.7 Rozměrové a váhové charakteristiky pískovců a laboratorních misek použitých v experimentech dle metodiky „Benavente“**

	Rozměry vzorku [mm]			Plocha vzorku "AxB" [mm <sup>2</sup> ]	Váha vzorku [g]	Váha suché misky [g]
	A	B	C			
<b>B1</b>	25,50	25,92	39,94	660,96	55,52	90,16
<b>B2</b>	25,73	26,29	41,33	676,44	58,71	89,88
<b>B3</b>	26,31	25,71	41,87	676,43	60,26	148,16
<b>B4</b>	25,53	25,78	41,72	658,16	59,27	93,47
<b>H1</b>	25,63	25,81	42,48	661,51	64,15	118,66
<b>H2</b>	25,59	26,26	41,87	671,99	66,17	106,30
<b>H3</b>	25,47	25,62	40,83	652,54	62,53	99,94
<b>H4</b>	26,07	25,67	43,66	669,22	66,97	126,96
<b>M1</b>	25,79	25,78	39,15	664,87	46,20	80,13
<b>M2</b>	27,65	26,14	39,05	722,77	50,08	85,69
<b>M3</b>	26,82	27,88	38,95	747,74	51,07	108,20
<b>M4</b>	25,79	27,39	37,98	706,39	47,24	78,50
<b>T1</b>	25,22	25,51	42,85	643,36	67,29	114,17
<b>T2</b>	26,15	26,34	40,81	688,79	66,18	95,93
<b>T3</b>	25,44	25,83	41,78	657,12	66,80	94,89

**Tab. 4.8 Hodnoty *DWL* „Benavente“ a jejich odhady směrodatné odchylky.**

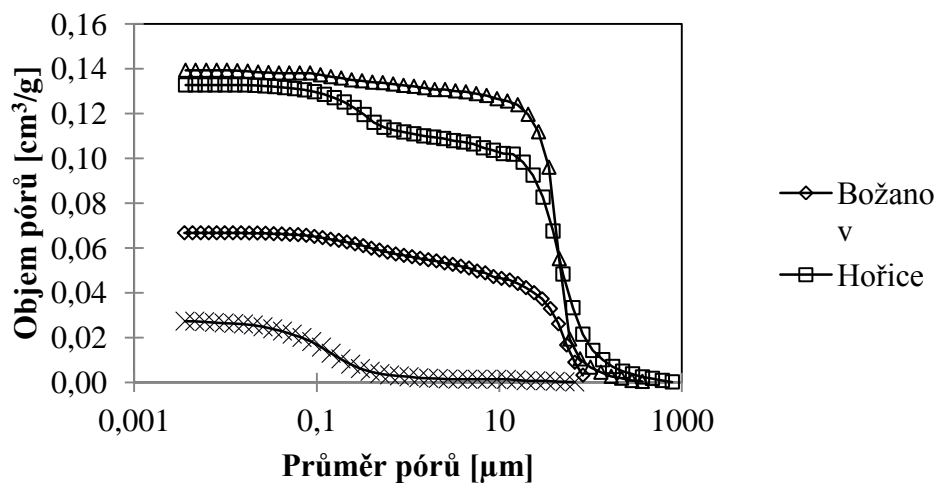
	<i>DWL</i> [%]	s
<b>Božanov</b>	1,58	0,44
<b>Hořice</b>	2,98	2,32
<b>Mšené</b>	1,26	0,69
<b>Těšín</b>	3,07	1,31

Výsledky *DWL* byly interpretovány s cílem zjistit souvislost mezi vlastnostmi jednotlivých kamenů, krystalizačním tlakem a právě *DWL*. Z obr. 4.13 je zřejmé, že pro studované kameny nevystačíme při popisu vlivu krystalizující soli na trvanlivost pouze s jednoduchým srovnáním kamenů podle pevnosti nebo porozity (číselné hodnoty v tab. 4.2) podle jednoduchého předpokladu nízká porozita = vysoká pevnost = vysoká trvanlivost = nízké *DWL*. Nejvyšší *DWL* vykázal pískovec Těšín, přičemž má nízkou porozitu a vysokou pevnost, naopak pískovec mšenský vykázal nejnižší *DWL*, přestože má nízkou pevnost a vysokou porozitu.

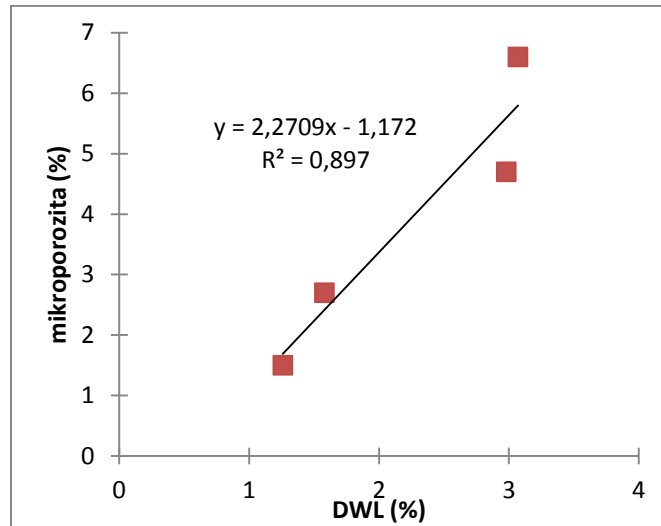


Obr. 4.13 Vztah pevnosti v tlaku, ohybu a celkové porozity s DWL.

Proto byl hledán jiný vztah mezi *DWL* a vlastnostmi kamenů. Klíčem je distribuce velikosti pórů jednotlivých kamenů (obr. 4.14). Nejméně porézní je těšínský pískovec a jeho pórový systém je tvořen téměř výhradně póry o průměru řádově 0,1  $\mu\text{m}$ . Božanovský pískovec má porozitu vyšší, jeho pórový systém obsahuje zejména póry o průměru v desítkách  $\mu\text{m}$ . Hořícký a mšenský pískovec mají hodnoty celkové porozity prakticky srovnatelné, ovšem hořícký pískovec obsahuje dva druhy pórů (obě dvě výše zmíněné skupiny), kdežto mšenský téměř výhradně pouze póry velké. Z výše uvedených hodnot *DWL* je tedy možné kvantitativně dovodit, že nízkou odolnost vůči krystalizujícím solím mají na svědomí „malé“ póry v oblasti 0,1  $\mu\text{m}$  v kamenech Těšín a Hořice, bez ohledu na jejich rozdílnou celkovou porozitu a pevnost.

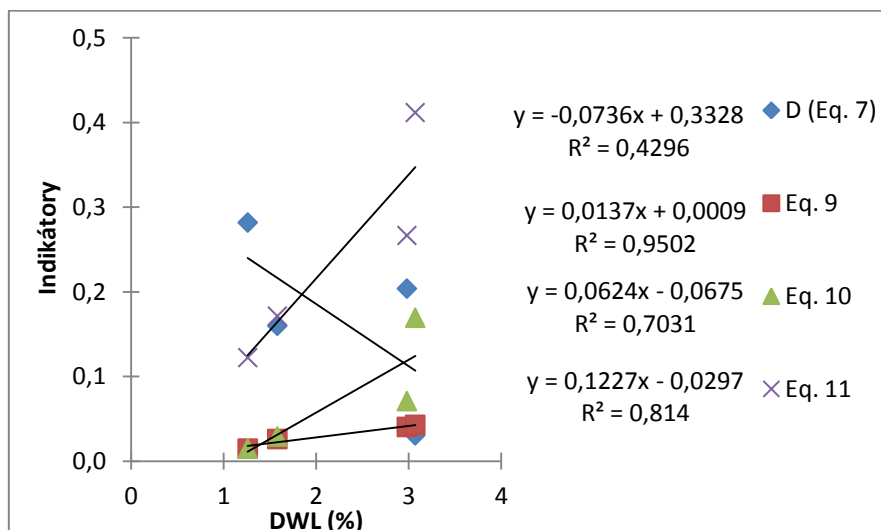


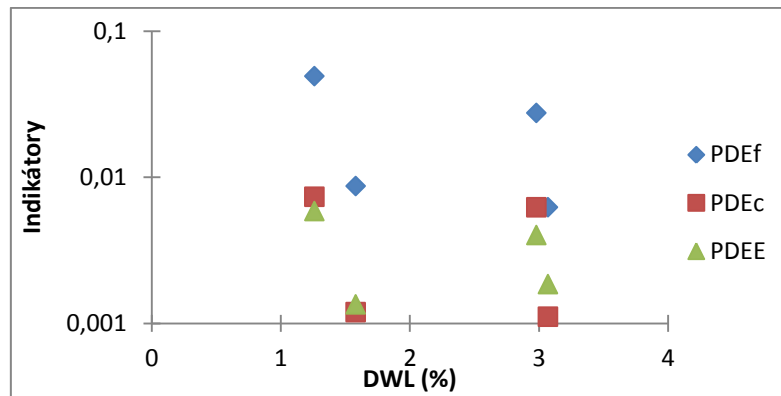
Obr. 4.14 Distribuce velikosti pórů ve studovaných kamenech.


 Obr. 4.15 Vztah mikroporozity a *DWL*.

Tab. 4.9 Vybrané vlastnosti a trvanlivostní indikátory podle rovnic Eq. 7-11.

	DWL	porozita	porozita z nasákavosti	mikro-porozita	$C_{sat}$	D (Eq. 7)	Eq. 9	Eq. 10	Eq. 11
	%	%	%	%	-	-	-	-	-
<b>Božanov</b>	1,58	16,8	16,4	2,7	0,976	0,160	0,026	0,029	0,172
<b>Hořice</b>	2,98	27,3	23,6	4,7	0,864	0,204	0,041	0,071	0,267
<b>Mšené</b>	1,26	28,2	28,2	1,5	1,000	0,282	0,015	0,015	0,122
<b>Těšín</b>	3,07	7,2	4,7	6,6	0,653	0,031	0,043	0,170	0,412


 Obr. 4.16 Vztah mezi *DWL* a trvanlivostními indikátory podle Eq. 7 a 9-11.



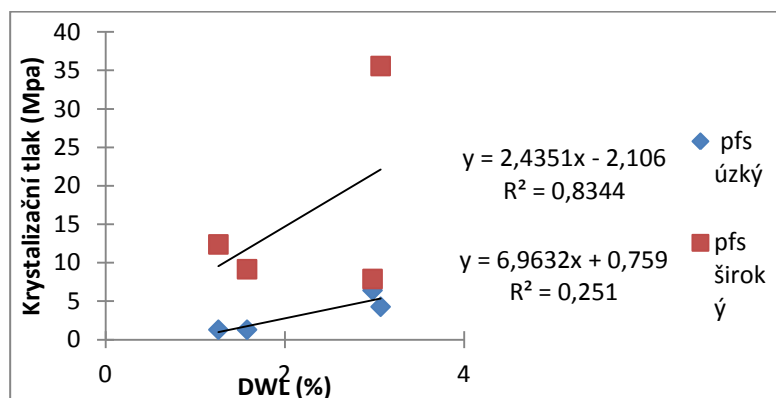
Obr. 4.17 Vztah mezi *DWL* a trvanlivostními indikátory podle Eq. 13-15.

Trvanlivostní indikátory podle rovnic Eq. 13-15, zahrnující mechanické vlastnosti a *DDE*, jsou zobrazeny v obr. 4.17. Také tyto indikátory selhávají, pro sledované vzorky hornin nevykazují žádný zřejmý trend.

Tab. 4.10 Výsledky výpočtu krystalizačních tlaků dle Fitznera a Snethlageho.

širší	R	r	$p_{fs1}$
	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$	MPa
Božanov	41	0,007	9,14
Hořice	392	0,008	7,88
Mšené	184	0,005	12,37
Těšín	33	0,002	35,55

užší	R	r	$p_{fs2}$
	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$	MPa
Božanov	41	0,050	1,28
Hořice	200	0,015	4,27
Mšené	60	0,050	1,28
Těšín	25	0,010	6,40



Obr. 4.18 Závislost krystalizačních tlaků dle Fitznera a Snethlageho a *DWL*.

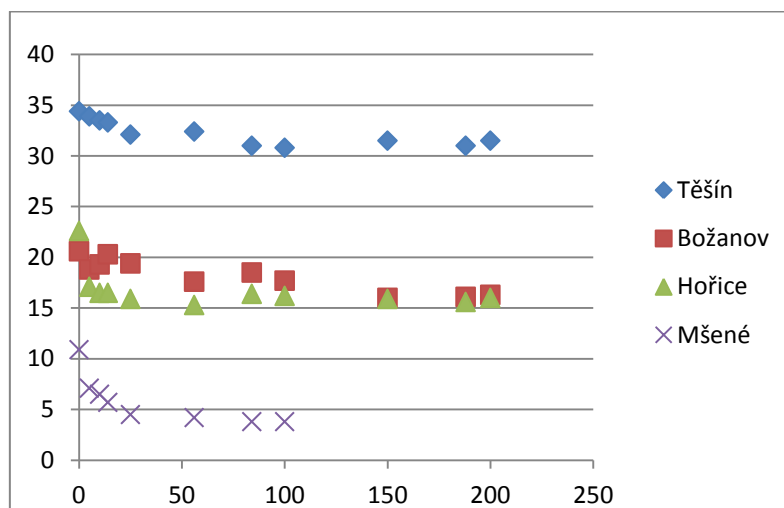
Na podobném principu je založena metoda dle autorů Rossi-Manaresi a Tucci (Eq. 3), kteří porozimetrickou křivku rozdělili do intervalů a počítali krystalizační tlak jako součet efektivních krystalizačních tlaků, jež se ustavily v jednotlivých velikostních frakcích pórů. V originální verzi autoři používali konstantní hodnotu  $R$ , vycházející z předpokladu, že krystalizace vždy počíná v tomto „velkém póru“ a postupuje do jednotlivých skupin (frakcí) malých pórů. Tato podmínka ale nemusí být nutně splněna, krystalizace může postupovat i přes více velikostí pórů postupně (viz SEM snímky kamenů). V reálném materiálu budou nastávat obě situace a je otázkou, zda je možné jejich podíly kvantifikovat. Proto jsem tuto metodu modifikoval a jako hodnotu  $R$  použil střed intervalu vyššího. Autoři metody použili rozdělení porozimetrické křivky na intervaly odpovídající jednotlivým řádům poloměru pórů; já jsem použil dvě rozdělení podle průměru pórů – na intervaly podle řádů a dále na 50 intervalů. V tab. 4.11 jsou shrnuty zjištěné krystalizační tlaky podle těchto čtyř způsobů výpočtu. Z výsledků je zřejmé, že hodnota krystalizačního tlaku silně závisí na zvoleném počtu intervalů, na nichž se provádí výpočet. Žádná se čtyř použitých výpočtových metod neposkytuje přesvědčivou korelaci mezi  $DWL$  a vypočteným krystalizačním tlakem.

**Tab. 4.11 Porovnání výsledků - původní a modifikovaná metodika.**

	výpočet dle původní metodiky		výpočet dle modifikované metodiky	
	intervaly podle řádů	50 intervalů	intervaly podle řádů	50 intervalů
<b>Božanov</b>	0,16	3,26	0,8	7,5
<b>Hořice</b>	1,08	118,77	1,01	6,4
<b>Mšené</b>	0,09	35,49	3,53	10,63
<b>Těšín</b>	36,33	584,7	6,89	25,69

## 4.6 Výsledky zmrazovacího experimentu

Zkouška mrazuvzdornosti byla prováděna dynamickou metodou v souladu s EN 12371 v mrazicím boxu, kdy byla zkušební tělesa (trámce) cyklicky zmrazována a rozmrazována. Jeden zkušební cyklus se skládal z šestihodinové fáze zmrazování na  $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$  a šestihodinovém rozmrazování, které se provádí úplným ponořením zkušebních těles do vody o teplotě  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Zkušební cyklus se provádí v automaticky zaplavované a chladicí komoře až do porušení vzorků, nebo do uplynutí předepsaného počtu cyklů (200). Degradace byla dále monitorována ultrazvukovým měřením Youngova modulu pružnosti ve směru rovnoběžném s uložením vzorků. Jednotlivé vzorky byly hranoly a rozměrech  $50 \times 50 \times 300\text{ mm}$ .



Obr. 4.19 Naměřené hodnoty - závislost modulu pružnosti a počtu cyklů

Tab. 4.12 Naměřené hodnoty modulu pružnosti

			počet cyklů										
			0	5	10	14	25	56	84	100	150	188	200
modul pružnosti [GPa]	NA7	Těšín	34,4	33,9	33,5	33,3	32,1	32,4	31	30,8	31,5	31	31,5
	NA1	Božanov	20,6	18,8	19,3	20,3	19,4	17,6	18,5	17,7	16	16,1	16,3
	NA3	Hořice	22,6	17,1	16,5	16,5	15,9	15,3	16,4	16,2	15,9	15,6	16
	NA6	Mšené	10,9	7,1	6,5	5,7	4,5	4,2	3,8	3,8			



## 4.7 Výsledky krystalizačních experimentů s pískovcem Mšené

V tab. 4.13 jsou uvedeny pouze váhy vzorků mšenského pískovce a váhy misek použitých při experimentech s pískovcem Mšené. Pro tyto experimenty nebylo zapotřebí znát rozměry vzorků, proto jsou v tabulce uvedeny pouze váhové charakteristiky.

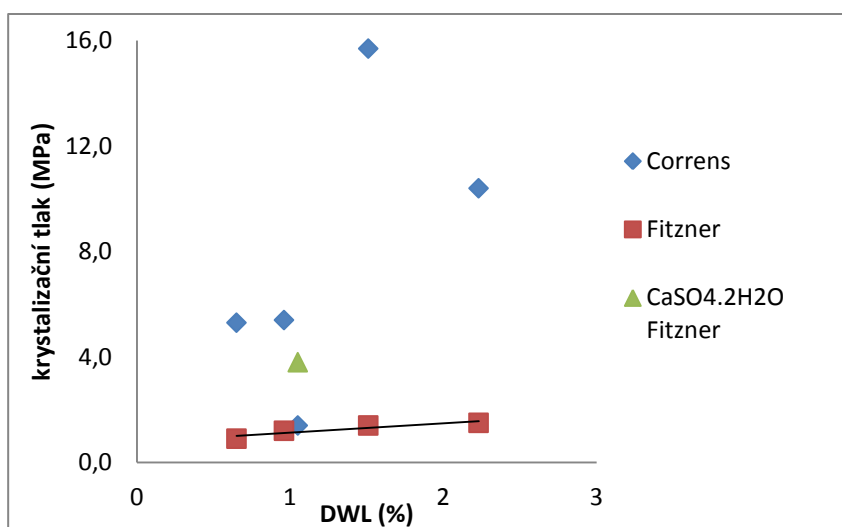
**Tab. 4.13 Váhové charakteristiky pískovců a laboratorních misek použitých v experimentech s pískovcem „Mšené“**

	Váha vzorku [g]	Váha suché misky [g]
<b>M1</b>	46,20	99,94
<b>M2</b>	50,08	95,92
<b>M3</b>	46,16	118,65
<b>M4</b>	55,58	94,88
<b>M5</b>	48,63	89,88
<b>M6</b>	51,41	126,96
<b>M7</b>	50,78	114,16
<b>M8</b>	45,43	106,29
<b>M9</b>	52,45	93,46
<b>M10</b>	48,24	90,16
<b>M11</b>	52,24	148,15
<b>M12</b>	45,82	102,47
<b>M13</b>	46,24	85,66
<b>M14</b>	52,19	78,47
<b>M15</b>	44,94	108,20
<b>M16</b>	46,53	109,64
<b>M17</b>	50,43	117,8
<b>M18</b>	45,69	122,24

Hodnoty *DWL* se pohybovaly od mírných 0,65 % pro  $\text{NaNO}_3$  až po totální rozpad vzorků v  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (viz obr. 3.17). Vysvětlení, proč při experimentu Benavente nedošlo k rozpadu pískovce Mšené, spočívá v o 8 °C nižší teplotě, která vede k vyššímu přesycení i vyššímu mezifázovému napětí, což způsobí vyšší krystalizační tlak.

**Tab. 4.14 Data pro experimentální sérii „Mšené“.**

systém	NaNO <sub>3</sub>	MgSO <sub>4</sub>	CaSO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	NaCl	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
krystalizuje	NaNO <sub>3</sub>	MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ·10H <sub>2</sub> O	NaCl	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·10H <sub>2</sub> O
w <sub>298</sub>	45	23	0,2	24	30	14
DWL (%)	0,65	0,96	1,05	1,51	2,23	"100"
σ (mJ/m <sup>2</sup> )	22	30	95	34	38	37
ρ <sub>x</sub> (g/ml)	2,257	1,68	2,32	1,45	2,165	1,464
přesycení	1,09	1,24	1,05	3,89	1,13	2,62
p <sub>cor</sub> (MPa)	5,3	5,4	1,4	15,7	10,4	10,0
p <sub>fs</sub> (MPa)	0,9	1,2	3,8	1,4	1,5	1,5


**Obr. 4.20 Souvislost DWL pískovce Mšené a krystalizačních tlaků jednotlivých solí.**

#### 4.8 Diskuze k uvedeným experimentům

Studované vzorky českých pískovců, které byly použity v této práci jsem volil po konzultaci s vedoucím diplomové právě s ohledem na výskyt a velikost ložisek nacházejících se na území České republiky. Při porovnání se zahraničními pracemi, které se touto problematikou také zabývají, shledávám počet čtyř vzorků jako relevantní k posouzení a porovnání výsledků s ostatními autory. Při rozsáhlejší výzkumu, či samostatné práci věnující se pouze jednomu z témat této práce by bylo možné detailněji zkoumat i další ložiska a vzorky českých pískovců a tím i detailně popsat celou geologickou mapu, která by vystihovala vlastnosti všech pískovců těžených českých lomech, či použitých jak na novostavbách, tak i na stavbách historizujících, na kterých je tento materiál velmi hojně využíván.

Absorbční experiment potvrdil materiálové charakteristiky a složení použitých vzorků. Rozdílnou strukturu i složení je možné sledovat i na SEM snímcích pořízených pro tuto práci. Nízká porozita u těšínského pískovce odpovídá jeho pevnému a pravidelnému propojení klastů s matricí. Oproti tomu mšenskému pískovci s největší naměřenou porozitou odpovídá složení tvořené především křemenem, který je přítomný jako dominantní minerál. Výše uvedené skutečnosti potvrdily i výsledky zmrazovacího experimentu, ze kterého jsou patrné odlišné vlastnosti a naměřené moduly pružnosti při zvyšujícím se počtu cyklů zmrazování a rozmrazování.

V rámci experimentů dle metodiky Benavente jsem dospěl k následujícím závěrům. Z výše uvedených vztahů pro výpočet krystalizačních tlaků soli v závislosti na velikosti pórů (Eq. 2 a 3) je zřejmé, že větší krystalizační tlak se generuje v menších pórech. Nabízí se tedy jako indikátor trvanlivosti zvolit mikroporozitu. V této práci byla mikroporozita definována jako objemový zlomek pórů o průměru menším než 1  $\mu\text{m}$  (tab. 4.9). Obr. 4.18 ukazuje, že korelace mezi mikroporozitou kamenů a jejich *DWL* je velmi dobrá. Dále byla zjišťována korelace mezi *DWL* a koeficienty nasycení a trvanlivostními indikátory podle rovnic Eq. 7 a Eq. 9-11 (tab. 4.9, obr. 4.16). Indikátor *D* naprosto selhal, protože nepracuje s mikroporozitou, která se ukázala klíčová. Indikátory Eq. 9-11 se ukázaly výrazně úspěšnější, nejlépe fungoval vztah Eq. 9 (součin mikroporosity a koeficientu nasycení).

Dále je diskutován odhad trvanlivosti pomocí krystalizačního tlaku, jež se ustaví v pórech během krystalizace  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ . Dle Corrense (Eq. 1) je krystalizační tlak  $p_{corr}$   $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  roven 5,9MPa (tab. 4.6). Tato metoda nebere v úvahu charakter pórového systému a nemůže tedy vysvětlit sledované rozdíly v *DWL* jednotlivých kamenů. Při použití postupu dle Fitznera a Sneathageho (Eq. 2) byly uvažovány dva různé rozsahy pórového systému, tedy dvě různé dvojice *r* a *R* pro každý kámen. Hodnota mezifázového napětí  $\sigma$  byla uvažována 32  $\text{mJ/m}^2$ . V horní části Tab. 4.10 jsou uvedeny rozsahy a vypočtený tlak pro širší interval, v dolní pak pro užší interval. Širší interval odpovídá veškerým přítomným pórům, užší pak pouze oblasti, kde se odehrává nejvýraznější nárůst objemu pórů. Nikoliv překvapivě nejvyšší hodnoty krystalizačního tlaku se vykytují v těšínském pískovci, který obsahuje nejmenší póry. Při uvažování celého spektra přítomných pórů jsou dosahovány poměrně vysoké hodnoty krystalizačních tlaků ve všech kamenech, které výrazně převyšují ohybové

pevnosti kamenů. Dále je možné sledovat obrovský rozptyl těchto „širokých“ hodnot pro Hořice a Těšín, ačkoliv jejich *DWL* jsou prakticky shodné. To vede k pochybám o vhodnosti použití tak širokého intervalu. Pokud se zaměříme jen na oblast „dominantně přítomných“ pórů, získáme „úzké“ hodnoty, jež mnohem lépe korelují se sledovanými výsledky (obr. 4.18).

V rámci experimentů s pískovcem Mšené byl krystalizační tlak určován jednak dle Corrense (Eq. 1), jednak dle Fitznera a Sneathageho s omezením uvedeným a zdůvodněným již v tab. 4.11. Corrensovu metodu (Eq. 1) je zde možné použít, protože se pracuje stále s jedním kamenem a liší se jen působící roztoky. Dle Corrense krystalizační tlak roste s přesycením roztoku a s hustotou ( $\rho_x = 1/V_x$ ) krystalu. Hustota krystalů je obecně nižší u solí tvořících hydráty. Hodnoty přesycení se ve studovaných systémech velmi lišily, od velmi mírného u sádrovce a  $\text{NaNO}_3$  až po značné u  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Mezi hodnotami krystalizačního tlaku dle Corrense a *DWL* není zřejmý vztah (obr. 4.20). Při výpočtu krystalizačního tlaku dle Fitznera a Sneathageho (Eq. 2) hraje, v případě, že se jedná o stejný materiál, roli pouze mezifázové napětí  $\sigma$ . Hodnoty *DWL* a krystalizačních tlaků dle FS pro systémy  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  a  $\text{NaCl}$  tvoří přímkovou závislost (obr. 4.20). Důvodem, proč z ní vybočuje sádrovec, je nízká rozpustnost  $\text{CaSO}_4$  a tedy při jeho krystalizaci se z jednotkového objemu roztoku vyloučí o dva řády menší množství krystalů, než u „hodně rozpustných“ solí. Proto i přes poměrně vysokou hodnotu krystalizačního tlaku došlo jen k poměrně malé destrukci kamene. V systémech  $\text{NaCl}$  a  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  je prakticky stejný krystalizační tlak, přesto  $\text{NaCl}$  nedestruoval vzorek tak výrazně, jako  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Důvodem je krystalizace druhé soli ve formě dekahydrátu, s výrazně vyšším měrným objemem krystalů, než je tomu u  $\text{NaCl}$ .

## 5 Závěr

Hlavním cílem této práce bylo experimentálně ověřit vlastnosti nejčastěji používaných českých pískovců, které se v konstrukcích mohou vyskytovat buď jako nosné konstrukce nebo se používají jako dekorační prvky stavebních konstrukcí. Většina stavebních materiálů (včetně pískovců) obsahuje soli, které primárně vznikají jako reakční produkty vytržovacího procesu, zatímco jejich sekundární výskyt je spojován s transportem solných roztoků do porézní struktury, tedy se zatížením konstrukce vlhkostí. Solný roztok proniká do porézního materiálu kapilárním vztlínáním. Po následné změně okolního prostředí dochází k odpaření vlhkosti a krystalizaci solí jak uvnitř pórů, tak na povrchu materiálu, a ke vzniku výkvětů.

Tyto zkušenosti jsem si prakticky ověřil v sériích pokusů, které jsem prováděl jak dle metodiky „Benavente“, tak následně i na vzorcích mšenského pískovce, u kterých byly použito několik rozdílných roztoků solí. Pro rekapitulaci uvádím, že byly použity vzorky božanovského, hořického, mšenského a těšínského pískovce, které jsou na českém území nejvíce využívány pro stavební, či dekorační účely. Z počátku bylo zajímavé zjištění, že se této problematice česká literatura moc nevěnuje. Bylo zapotřebí čerpat ze zahraniční literatury a článků, ze kterých právě moje experimenty vycházejí. Konkrétně pak z článku [6], ze kterého byla navržena celá série experimentů nazvaná v práci zkráceně metodika „Benavente“. Z tohoto experimentu vyplynulo, jaké druhy pískovců jsou odolnější vůči krystalizaci soli (konkrétně v tomto případě 14% roztoku  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) a které naopak vykazují malou odolnost vůči těmto změnám vznikajícím jak uvnitř, tak i na povrchu materiálu.

U experimentu s pískovcem „Mšené“ byly naopak použity vzorky pouze mšenského pískovce, které byly vystaveny působení (krystalizaci) šesti roztokům solí, které jsem vybral jako nejčastěji se vyskytující na území České republiky. Soli obsažené v konstrukci nemusí nutně vyvolat poškození stavebního materiálu, pokud při krystalizaci výrazně nezvětší objem. Příkladem může být uhličitan sodný, který během experimentu tvořil pouze výkvěty soli na povrchu vzorku. Z tohoto pohledu jsou nejnebezpečnější dusičnany, sírany a chloridy. Konkrétně pak síran sodný, který během experimentu daný vzorek zcela „rozložil“.

Opakované navlhání a vysoušení materiálu přispívá ke krystalizaci a rozpouštění solí, dochází ke vzniku nasycených až přesycených roztoků, překročení prahu rozpustnosti



a k růstu krystalů. Schopnost pohlcovat a vázat za určitých klimatických podmínek vlhkost je u jednotlivých solí limitována relativní vzdušnou vlhkostí a množstvím vody, které je sůl schopna přijmout. Obsah solí v materiálu tedy významně ovlivňuje jeho sorpční vlastnosti.

Při vypracovávání této diplomové práce jsem si prakticky vyzkoušel průběh navrženého experimentu od hledání zdrojů, přes výběr vzorků, navržení vhodných metod až po konečné vyhodnocení daných experimentů. Překvapením bylo, že navržené a použité experimenty nevykazovaly velké chyby či odchylky a výsledky poskytují reálné hodnoty, které se dají použít jako například vstupní data do matematických modelů apod.





## Seznam tabulek

<b>Tab. 2.1</b> Fyzikální vlastnosti hlavních druhů pískovců v České republice .....	18
<b>Tab. 2.2</b> Krystalizační tlaky některých druhů solí .....	38
<b>Tab. 2.3</b> Rekrystalizační tlaky některých druhů solí .....	38
<b>Tab. 2.4</b> Klasifikace salinity dle ČSN P 73 0610 .....	39
<b>Tab. 2.5</b> Klasifikace salinity dle EUREKA EU - 1270, v hm. % .....	39
<b>Tab. 3.1</b> Použité soli a jejich koncentrace .....	60
<b>Tab. 3.2</b> Konstanty (Eq. 5) .....	72
<b>Tab. 4.1</b> Materiálové složení jednotlivých vzorků .....	76
<b>Tab. 4.2</b> Vybrané základní vlastnosti kamenů .....	77
<b>Tab. 4.3</b> Průměrné hodnoty absorpčního koeficientu .....	83
<b>Tab. 4.4</b> Souhrn hodnot mezifázového napětí .....	84
<b>Tab. 4.5</b> Data pro výpočet mezifázového napětí v použitých systémech podle (Eq. 4) .....	85
<b>Tab. 4.6</b> Výpočet krystalizačních tlaků dle Corrense (Eq. 1) .....	86
<b>Tab. 4.7</b> Rozměrové a váhové charakteristiky pískovců a laboratorních misek použitých v experimentech dle metodiky „Benavente“ .....	87
<b>Tab. 4.8</b> Hodnoty <i>DWL</i> „Benavente“ a jejich odhady směrodatné odchylky .....	87
<b>Tab. 4.9</b> Vybrané vlastnosti a trvanlivostní indikátory podle rovnic Eq. 7-11 .....	89
<b>Tab. 4.10</b> Výsledky výpočtu krystalizačních tlaků dle Fitznera a Snethlageho .....	90
<b>Tab. 4.11</b> Porovnání výsledků - původní a modifikovaná metodika .....	91
<b>Tab. 4.12</b> Naměřené hodnoty modulu pružnosti .....	92
<b>Tab. 4.13</b> Váhové charakteristiky pískovců a laboratorních misek použitých v experimentech s pískovcem „Mšené“ .....	93
<b>Tab. 4.14</b> Data pro experimentální sérii „Mšené“ .....	94

**Seznam obrázků**

<b>Obr. 2.1</b> Základní klasifikace pískovců (podle Petránka, resp. Kukala) .....	16
<b>Obr. 2.2</b> Oblast těžby božanovského pískovce - Božanov .....	23
<b>Obr. 2.3</b> Příklad užití božanovského pískovce - Hotel Four Seasons Praha .....	24
<b>Obr. 2.4</b> Struktura božanovského pískovce .....	24
<b>Obr. 2.5</b> Oblast těžby mšenského pískovce - Mšené-lázně .....	26
<b>Obr. 2.6</b> Příklad užití mšenského pískovce - bývalý Okresní úřad v Domažlicích .....	26
<b>Obr. 2.7</b> Příklad užití mšenského pískovce - koupie sousoší sv. Tomáše Akvinského se sv. Dominikem na Karlově mostě .....	27
<b>Obr. 2.8</b> Struktura mšenského pískovce .....	27
<b>Obr. 2.9</b> Oblast těžby hořického pískovce - Podhorní Újezd .....	32
<b>Obr. 2.10</b> Příklad užití hořického pískovce - Hotel Marriott v Praze .....	33
<b>Obr. 2.11</b> Struktura hořického pískovce .....	33
<b>Obr. 2.12</b> Oblast těžby těšínského pískovce - Řeka .....	35
<b>Obr. 2.13</b> Příklad užití těšínského pískovce - Obytný komplex Vila Bianca Praha .....	36
<b>Obr. 2.14</b> Struktura těšínského pískovce .....	36
<b>Obr. 3.1</b> Postup měření rtuťovým porozimetrem .....	59
<b>Obr. 3.2</b> Rtuťový porozimetr PASCAL 140 a 440 .....	59
<b>Obr. 3.3</b> Fázový diagram chloridu sodného .....	61
<b>Obr. 3.4</b> Fázový diagram uhličitanu sodného .....	61
<b>Obr. 3.5</b> Fázový diagram dusičnanu sodného .....	62
<b>Obr. 3.6</b> Fázový diagram síranu hořečnatého .....	62
<b>Obr. 3.7</b> Fázový diagram síranu sodného .....	63



<b>Obr. 3.8</b> Fázový diagram síranu vápenatého .....	63
<b>Obr. 3.9</b> Vzorek božanovského pískovce ponořený do roztoku na začátku experimentu.....	66
<b>Obr. 3.10</b> Viditelný úbytek materiálu (hmotnosti) po cyklování na vzorku hořického pískovce.....	67
<b>Obr. 3.11</b> Rozdrcený vzorek hořického pískovce .....	67
<b>Obr. 3.12</b> Vzorky ponořené ve vodě kvůli navázání zbylé zkrystalizované soli .....	68
<b>Obr. 3.13</b> Vzorky v konečné fázi experimentu připravené na vážení (zjištění <i>DWL</i> ).....	68
<b>Obr. 3.14</b> Teplota vzduchu (Praha-Karlov)-referenční rok.....	69
<b>Obr. 3.15</b> Relativní vlhkost vzduchu (Praha-Karlov)-referenční rok.....	69
<b>Obr. 3.16</b> Vzorky v klimatické komoře po prvních pěti cyklech .....	70
<b>Obr. 3.17</b> Rozpadlý vzorek uložený v 14% roztoku $\text{Na}_2\text{SO}_4$ po deseti cyklech .....	70
<b>Obr. 3.18</b> Mezifázové napětí krystal - nasycený roztok jako funkce nasycené koncentrace soli [9] .....	73
<b>Obr. 4.1</b> Vzorek božanovského pískovce použitého v experimentu - 50x zvětšeno.....	78
<b>Obr. 4.2</b> Vzorek božanovského pískovce použitého v experimentu - 2000x zvětšeno.....	78
<b>Obr. 4.3</b> Vzorek hořického pískovce použitého v experimentu - 50x zvětšeno.....	79
<b>Obr. 4.4</b> Vzorek hořického pískovce použitého v experimentu - 2000x zvětšeno.....	79
<b>Obr. 4.5</b> Vzorek mšenského pískovce použitého v experimentu - 50x zvětšeno .....	80
<b>Obr. 4.6</b> Vzorek mšenského pískovce použitého v experimentu - 2000x zvětšeno .....	80
<b>Obr. 4.7</b> Vzorek těšínského pískovce použitého v experimentu - 50x zvětšeno.....	81
<b>Obr. 4.8</b> Vzorek těšínského pískovce použitého v experimentu - 2000x zvětšeno.....	81
<b>Obr. 4.9</b> Výsledky absorpčního experimentu pro božanovský pískovec. ....	82
<b>Obr. 4.10</b> Výsledky absorpčního experimentu pro hořický pískovec .....	82



<b>Obr. 4.11</b> Výsledky absorpčního experimentu pro mšenský pískovec .....	83
<b>Obr. 4.12</b> Výsledky absorpčního experimentu pro těšínský pískovec .....	83
<b>Obr. 4.13</b> Vztah pevnosti v tlaku, ohybu a celkové porozity s <i>DWL</i> .....	88
<b>Obr. 4.14</b> Distribuce velikosti pórů ve studovaných kamenech .....	88
<b>Obr. 4.15</b> Vztah mikroporozity a <i>DWL</i> .....	89
<b>Obr. 4.16</b> Vztah mezi <i>DWL</i> a trvanlivostními indikátory podle Eq. 7 a 9-11 .....	89
<b>Obr. 4.17</b> Vztah mezi <i>DWL</i> a trvanlivostními indikátory podle Eq. 13-15 .....	90
<b>Obr. 4.18</b> Závislost krystalizačních tlaků dle Fitznera a Snethlageho a <i>DWL</i> .....	90
<b>Obr. 4.19</b> Naměřené hodnoty - závislost modulu pružnosti a počtu cyklů .....	92
<b>Obr. 4.20</b> Souvislost <i>DWL</i> pískovce Mšené a krystalizačních tlaků jednotlivých solí .....	94

## Použité zdroje

### Literatura

- [1] RYBAŘÍK, Václav: *Ušlechtilé stavební a sochařské kameny České republiky*. Nadace Střední průmyslové školy kamenické a sochařské v Hořicích v Podkrkonoší, 1994, str. 66-68.
- [2] PAVLÍKOVÁ, Milena; PAVLÍK, Zbyšek; HOŠEK, Jiří: *Materiálové inženýrství I*. Vydavatelství ČVUT v Praze, 2011, str. 65-69, 79-80, 118-120.
- [3] SVOBODA, Luboš: *Stavební hmoty*. Vydavatelství JAGA GROUP, s. r. o. Bratislava, 2007.
- [4] HOŠEK, Jiří; LOSOS, Ludvík: *Historické omítky*. Grada Publishing, a. s., 2007
- [5] BENEŠOVÁ, Hannah; PAVLÍKOVÁ, Milena: *Dynamická sorpce solí v porézních stavebních materiálech*. Stavební obzor, 2011, 4, str. 110-112.
- [6] BENAVENTE, D.; GARCÍA DEL CURA, M.A.; FORT, R.; ORDÓÑEZ, S.: *Durability estimation of porous buildings stones from pore structure and strength*. Engineering Geology, 2004, 74, str. 113-127.
- [7] BENAVENTE, D.; GARCÍA DEL CURA, M.A.; BERNABÉU, A.; ORDÓÑEZ, S.: *Quantification of salt weathering in porous stones using an experimental continuous partial immersion method*. Engineering Geology, 2001, 59, str. 313-325.
- [8] LA IGLESIA, A.; GONZÁLEZ, V.; LÓPEZ-ACEVEDRO, V.; VIEDMA, C.: *Salt crystallization in porous construction materials / Estimation of crystallization pressure*. Journal of Crystal Growth, 1997, 177, str. 111-118.
- [9] SÖHNEL, Otakar: *Electrolyte crystal - aqueous solution interfacial tensions from crystallization data*. Journal of Crystal Growth, 1982, 57, str. 101-108.
- [10] HIRSCHAWALD, J.: *Die Prüfung der natürlichen Bausteine auf ihre Wetterbeständigkeit*. Berlin, 1908.
- [11] CORRENS, C.W.: *Growth and dissolution of crystals under linear pressure*. Faraday Discussions, 1949, 5, str. 267-271.



- [12] FITZNER, B., SNETHLAGE, R.; *Über Zusammenhänge zwischen Salzkristallisationsdruck und Porenradienverteilung*. G. P. Newsletter, 1982, 3, str. 13-24.
- [13] ROSSI-MANARESI, R., TUCCI, A.; *Pore structure and the disruptive or cementing effect of salt crystallization in various types of stone*. Studies in conservation, 1991, 36, str. 53-58.
- [14] NIELSEN, A.E., SÖHNEL, O.; *Interfacial tensions electrolyte crystal-aqueous solution, from nuclear data*. Journal of Crystal Growth, 1971, 11, str. 233.
- [15] RICHARDSON, B.A.; *The durability of porous stones*. Stone Industries, 1991, 26, str. 22-25
- [16] MODD, B.K., HOWARTH, R.J., BLAND, C.H.; *Rapid prediction of building research establishment limestone durability class from porosity and saturation*. Quarterly Journal of Engineering Geology, 1996, 29, str. 285-297.
- [17] ORDÓÑEZ, S., FORT, R., GARCÍA DEL CURA, M.A.; *Pore size distribution and durability of porous limestone*. Quarterly Journal of Engineering Geology, 1999, 30, str. 221-230.
- [18] STEIGER, M.; *Crystal growth in porous materials I: The crystallization pressure of large crystals*. Journal of Crystal Growth, 2005, 282, str. 455-469.
- [19] STEIGER, M.; *Crystal growth in porous materials II: Influence of crystal size on the crystallization pressure*. Journal of Crystal Growth, 2005, 282, str. 470-481.
- [20] RUEDRICH, J., SIEGESMUND, S.; *Salt and ice crystallisation in porous sandstones*. Environ Geology, 2007, 52, str. 225-249.
- [21] CAI, X., ZHAO, Y.; *Influence of cyclic wetting and drying on physical and dynamic compressive properties of sandstone*. Engineering Geology, 2017, 220, str. 1-12.





## Internetové podklady

[22] ONLINE GEOLOGICKÁ ENCYKLOPEDIIE, *Internetová online geologická encyklopedie*. Dostupné z:

<http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie/term.pl>

[23] DEKORAČNÍ KAMENY - ONLINE INFORMACE O DĚDICTVÍ UŠLECHTILÝCH A STAVEBNÍCH KAMENŮ ČESKÉ REPUBLIKY, *Internetová online databáze České geologické služby shromažďující informace o horninách České republiky*. Dostupné z:

[http://dekoracni-kameny.geology.cz/index\\_cz.pl?tt=s&spocitej=A](http://dekoracni-kameny.geology.cz/index_cz.pl?tt=s&spocitej=A)

[24] MŠENSKÉ PÍSKOVCE ®, *Internetové online stránky společnosti Mšenská pískovce, s.r.o.*. Dostupné z:

<http://www.msenskepiskovce.cz>

[25] KAMENOSOCHAŘSTVÍ TOMÁŠ HÁLA, *Internetové online stránky společnosti Kamenosochařství Tomáš Hála*. Dostupné z:

<http://www.kamen-hala.cz/piskovce.php>

[26] KÁMEN ENGINEERING S.R.O., *Internetové online stránky společnosti Kámen Engoneering s.r.o. producenta výrobků z přírodního kamene*. Dostupné z:

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

[27] MINERALOGICKO-PETROGRAFICKÝ EXKURZNÍ PRŮVODCE PO ÚZEMÍ MORAVY A SLEZSKA; *Internetové online stránky komplexně mapující území Moravy a Slezska z hlediska mineralogického a petrografického*. Dostupné z:

[http://pruvodce.geol.morava.sci.muni.cz/seznam\\_abec.htm](http://pruvodce.geol.morava.sci.muni.cz/seznam_abec.htm)

[28] RYBAŘÍK V.; *Božanovský pískovec*. *Revue Kámen* [online], 2001. Dostupné z:

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

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

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



[30] PŘEDMĚT 123MAIN - MATERIÁLOVÉ INŽENÝRSTVÍ; *Prezentace k 2. cvičení: Základní materiálové parametry*. Katedra materiálového inženýrství a chemie ČVUT FSv [online], 2014. Dostupné z:

[http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/MAIN/MAIN\\_cviceni\\_2-zakladni\\_materialove\\_parametry.pdf](http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/MAIN/MAIN_cviceni_2-zakladni_materialove_parametry.pdf)

[31] PORTÁL ČESKÉHO HYDROMETEOROLOGICKÉHO ÚSTAVU (ČHMÚ); *Referenční klimatický rok pro území ČR jako součást národní přílohy ČSN EN ISO 15927-4*. Dostupné z:

[http://www.chmi.cz/portal/dt?portal\\_lang=cs&menu=JSPTabContainer/P3\\_0\\_Informace\\_pro\\_Vas/P3\\_10\\_Ref\\_klim\\_rok&last=false](http://www.chmi.cz/portal/dt?portal_lang=cs&menu=JSPTabContainer/P3_0_Informace_pro_Vas/P3_10_Ref_klim_rok&last=false)

## **Použitý software**

NEMETSCHEK: *Allplan 2014*

MICROSOFT OFFICE 2007: *Aplikace Word a Excel*

ADOBE: *Adobe Reader 8.0*

PDFCreator: *PDFCreator 1.7.0*