

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta Stavební

Katedra pozemních staveb



**Reziduální mechanické vlastnosti vybraných stavebních
materiálů po požáru**

**Residual mechanical properties of selected building
materials after fire**

Bakalárska práca

Vypracovala: Ema Jankovičová
Vedúci práce: Ing. Radek Zigler, Ph.D.
Študijný program: Stavební inženýrství
Špecializácia: Pozemní stavby
Rok: 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Jankovičová** Jméno: **Emá** Osobní číslo: **501652**
Fakulta/ústav: **Fakulta stavební**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra konstrukcí pozemních staveb**
Studijní program: **Stavební inženýrství**
Specializace: **Pozemní stavby**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Reziduální mechanické vlastnosti vybraných stavebních materiálů po požáru

Název bakalářské práce anglicky:

Residual mechanical properties of selected building materials after fire

Pokyny pro vypracování:

Zpracujte rešerši stávajícího stavu problematiky reziduálních mechanických vlastností stavebních materiálů po jejich vystavení vysokým teplotám při požáru. Pro vybrané stavební materiály navrhnete, provedte a vyhodnoťte experimentální program stanovení těchto vlastností. Proveďte formulaci závěrů.

Seznam doporučené literatury:

1. Witzany, J., Čejka, T.: Výzkum fyzikálně mechanických vlastností poréznych zdělcích prvků, Stavební obzor 2008, roč. 17, č. 10, Praha 2008
2. Witzany, J., Čejka, T., Zigler, R.: Stanovení zbytkové únosnosti existujících zděných konstrukcí, Stavební obzor 2008, roč. 17, č. 9, Praha 2008
3. Witzany, J. a kol: Sanace a rekonstrukce zděných budov I., Stavební informace, Praha 2005
4. Witzany, J.; Wasserbauer, R.; Čejka, T.; Kroftová, K.; Zigler, R. Obnova rekonstrukce staveb. Poruchy, degradace, sanace Praha: CTU, 2018. ISBN 978-80-01-06360-6.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Radek Zigler, Ph.D. katedra konstrukcí pozemních staveb FSv

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **13.02.2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: **20.05.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Radek Zigler, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Jiří Pazdérka, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Jiří Máca, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

23.-02-2024

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

Prehlásenie

Prehlasujem, že som svoju prácu vypracovala samostatne a použila som iba literatúru uvedenú v priloženom zozname.

Ďalej prehlasujem, že nemám závažný dôvod proti použitiu tohto školského diela v zmysle § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorskom, o právach súvisujúcich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon)

V Prahe dňa

.....

Ema Jankovičová

Podakovanie

Rada by som podakovala môjmu vedúcemu práce Ing. Radkovi Ziglerovi, Ph.D. za vedenie mojej bakalárskej práce, spoluprácu pri získavaní údajov pre experimentálnu časť, cenné pripomienky a ústretovosť pri konzultáciách.

Ema Jankovičová

Abstrakt

Účinky požiaru na konštrukciu z prírodného kameňa boli záujmom viacerých štúdií. V tejto práci je skúmaný efekt vysokých teplôt na mechanické vlastnosti dvoch prírodných hornín, pieskovca a opuky. Vzorky boli podrobené testom v jednoosom tlaku, na základe ktorých boli vyhodnotené základné mechanické vlastnosti. Analýzou výsledkov bola odhalená klesajúca závislosť pevnosti v tlaku so zvyšujúcou sa teplotou v prípade oboch materiálov. Pieskovec navyše vykazoval aj závislosť pozdĺžneho pomerného pretvorenia na teplote a taktiež aj modulu pružnosti. V prípade opuky bol sledovaný vznik siete trhlín vplyvom vzdušnej vlhkosti po zahriatí vzoriek na teploty vyššie ako 900°C. U oboch vzoriek bola taktiež pozorovaná zmena farby, ktorá by ovplyvnila estetickú funkciu. Význam experimentov tohto charakteru bol preukázaný rozdielnym správaním oboch materiálov za rovnakých podmienok.

Kľúčové slová

mechanické vlastnosti, opuka, pieskovec, vysoké teploty

Abstract

The effects of fire on the constructions made of natural stone have been the focus of several studies. This work examines the effect of high temperatures on the mechanical properties of two natural rocks, sandstone and marlstone (opuka). The samples were subjected to uniaxial compression tests, based on which the basic mechanical properties were evaluated. Analysis of the results revealed a decreasing dependence of compressive strength with increasing temperature for both materials. Additionally, sandstone exhibited a dependence of longitudinal strain on temperature as well as modulus of elasticity. In the case of marlstone, the formation of a crack network due to air humidity was observed after heating the samples to temperatures above 900°C. Both samples also showed a change in color, which would affect the aesthetic function. The significance of these experiments was demonstrated by the different behavior of both materials under the same conditions.

Key words

mechanical properties, marlstone, sandstone, high temperatures

Obsah

Zoznam použitých symbolov a skratiek	8
Zoznam obrázkov	9
Zoznam tabuliek	12
Úvod	13
1 Teoretická časť	15
1.1 Vybrané stavebné materiály	15
1.1.1 Opuka	15
1.1.2 Pieskovec	16
1.2 Predchádzajúci výskum	17
1.2.1 Možnosti ohrevu vzoriek	17
1.2.2 Účinky vysokých teplôt na vzhľad materiálu	19
1.2.3 Účinky vysokých teplôt na štruktúru materiálu	19
1.2.4 Účinky vysokých teplôt na mechanické a fyzikálne vlastnosti	19
1.2.5 Možnosti ochladzovania vzoriek	25
1.2.6 Zhrnutie	26
2 Experimentálna časť	28
2.1 Príprava vzoriek	28
2.1.1 Opuka	28
2.1.2 Pieskovec	30
2.2 Metódy	32
2.2.1 Ohrievanie a chladenie vzoriek	32
2.2.2 Skúšky v tlaku	33
2.2.3 Digitálna obrazová korelácia	34
2.2.4 Rýchlosť ultrazvukovej vlny	35
2.3 Vyhodnotenie	36
2.3.1 Ohrev vzoriek	36
2.3.2 Vizuálna zmena po zahriatí vzoriek	37
2.3.3 Skúška pevnosti v jednoosom tlaku	44
2.3.4 Vyradené vzorky	50
2.3.5 Vzorky zahrievané na teplotu 1060°C	50
2.3.6 Porušenie štruktúry vzoriek vplyvom vysokej teploty	52
2.3.7 Porušenie vzoriek počas skúšok v tlaku	54
3 Diskusia	62
Záver	64
Literatúra	65

Zoznam použitých symbolov a skratiek

A	Plocha vzorky [mm^2]
c	Rýchlosť ultrazvukovej vlny [m/s]
E_S	Statický modul pružnosti [GPa]
F	Sila [kN]
h	Výška vzorky [mm]
m	Hmotnosť vzorky [g]
T	Teplota [°C]
t	Čas [s]
ε_v	Pomerné pozdĺžne pretvorenie [-]
δ^{NP2}	Súčiniteľ tvaru podľa ČSN EN 772-1+A1 [-]
Δh	Pozdĺžne pretvorenie vzorky [mm]
σ	Napätie, pevnosť v tlaku [MPa]
\varnothing	Priemer prierezu vzorky [mm]
ČVÚT	České vysoké učení technické
O	Označenie vzoriek opuky
P	Označenie vzoriek pieskovca

Zoznam obrázkov

1	Katedrála Notre Dame, Paríž, FR, zdroj: [4]	13
2	Hrad Krásna hôrka, Krásnohorské Podhradie, SR, zdroj: [5]	13
1.1	Bazilika sv. Jiří, Praha, ČR	16
1.2	Rotunda sv. Martina, Praha, ČR	16
1.3	Rotunda sv. Logina, Praha, ČR	16
1.4	Katedrála sv. Víta, Praha, ČR	17
1.5	Muflová pec, zdroj: [10]	18
1.6	Maximálne napätie	24
2.1	Opuka-lokalita, legenda farieb viď zdroj [41]	28
2.2	Vzorky opuky	29
2.3	Vzorky opuky	29
2.4	Pieskovec-lokalita, legenda farieb viď zdroj [42]	30
2.5	Vzorka P6 s vyznačenou trhlinou	30
2.6	Vzorky pieskovca, $h \approx 55\text{mm}$	31
2.7	Vzorky pieskovca, $h \approx 70\text{mm}$	31
2.8	Ohrev vzoriek	32
2.9	Elektická muflovacia pec	32
2.10	Termočlánok OMEGA	32
2.11	Vľavo: osadenie do sadrovej lôžy, vpravo: vzorka s klbovým pripojením	33
2.12	Opuka, schematické zaznačenie bodiek	34
2.13	Zostava	34
2.14	Schéma zapojenia	35
2.15	Prístroj na meranie ultrazvukovej rýchlosti	35
2.16	Krivky ohrevu vzoriek pre jednotlivé teploty	37
2.17	Vzorky v peci pred ohrevom	37

2.18	Vzorky v peci po ohreve	37
2.19	O1, O2, O17, T26	38
2.20	O18, O19, O20, T180	39
2.21	O7, O8, O9, T460	39
2.22	O11, O12, O13, T620	40
2.23	O14, O15, O16, T900	40
2.24	P1, P2, P7, T26	41
2.25	P3, P4, P5, T180	41
2.26	P14, P15, P16, T460	42
2.27	P11, P12, P13, T620	42
2.28	P8, P9, P10, T900	43
2.29	Pieskovec, závislosť σ na T	45
2.30	Opuka, závislosť σ na T	45
2.31	Pieskovec, závislosť ε_v na T	46
2.32	Opuka, závislosť ε_v na T	47
2.33	Pieskovec, závislosť E_S na T	48
2.34	Opuka, závislosť E_S na T	48
2.35	Pieskovec, závislosť σ na ε_v	49
2.36	Opuka, závislosť σ na ε_v	49
2.37	Ohrev vzoriek na T1060	50
2.38	O6, po vytiahnutí z pece	51
2.39	T1060, závislosť σ na ε_v	51
2.40	O5, P6, T1060	52
2.41	Teplota a vlhkosť	52
2.42	P9, 1 týždeň po ohreve	53
2.43	O15, 1 týždeň po ohreve, detail	53
2.44	O15, 2 týždne po ohreve	53
2.45	O16, 2 týždne po ohreve	53
2.46	Vzorka zohrievaná na 900°C	53
2.47	Vzorka zohrievaná na 1060°C	53
2.48	P3: Neporušená vzorka, vzorka s trhlinou na pravom okraji, porušenie vzorky	54
2.49	P12: Vzorka s trhlinou, rozvoj trhliny, porušenie vzorky	54

2.50	Odlúpenie časti povrchovej vrstvy: O2, O9, O11	54
2.51	O1: Neporušená vzorka, vzorka s trhlinami, vzorka pri porušení . . .	55
2.52	O7: Vzorka s trhlinou, odštiepenie časti vzorky, porušenie vzorky . . .	55
2.53	O15: Vzorka s trhlinami pri dolnom okraji, rozvoj trhlín po výške vzorky, vzorka s trhlinami pri porušení	56
2.54	O1, O2, O17, T26	56
2.55	O18, O19, O20, T180	57
2.56	O7, O9, T460	57
2.57	O11, O12, T620	58
2.58	O14, O15, O16, T900	58
2.59	P1, P2, P7, T26	59
2.60	P3, P4, P5, T180	59
2.61	P14, P15, P16, T460	60
2.62	P11, P12, P13, T620	60
2.63	P8, P9, P10, T900	61
3.1	Analýza pevnosti v tlaku	62

Zoznam tabuliek

2.1	Rozmery vzoriek opuky	29
2.2	Rozmery vzoriek pieskovca	31
2.3	Rýchlosť ultrazvukovej vlny	36
2.4	Mechanické vlastnosti jednotlivých vzoriek opuky a pieskovca	44

Úvod

V minulosti bol jedným z najvýznamnejších materiálov v stavebníctve a architektúre prírodný kameň. Používal sa na výstavbu obytných budov, kostolov, hradov či mostov a veľké množstvo z týchto stavieb dnes považujeme za historické pamiatky. Ochrana takýchto budov je dôležitá, pretože rozprávajú o histórii a kultúre jednotlivých národov a veľké množstvo z nich tu stojí už stáročia. Existuje mnoho organizácií po celom svete, ktorých snahou je pamiatky chrániť a zachovať pre budúce generácie, medzi najznámejšie patrí napríklad UNESCO, Európske dedičstvo, ICOMOS či ICCROM.

Rovnako, ako iné materiály, aj kameň podlieha zmenám spôsobeným vonkajšími vplyvmi, ako napríklad zvetrávanie, mrazové cykly, degradácia vplyvom nečistôt z prostredia či požiar, a práve rozsiahly požiar môže vážne narušiť stabilitu konštrukcií [1]. Hrozba požiaru nie je vôbec nereálna, pretože takéto budovy majú častokrát vysoké požiarne zataženie, spôsobené historickým vybavením, napríklad drevený nábytok či sviečky. Navyše, sa historické budovy väčšinou nachádzajú v historických centrách miest, čo sťažuje prístup protipožiarnych zložiek k objektu a zabraňuje rýchlemu zásahu.[2] Existuje mnoho príkladov ničivých požiarov z minulosti, napríklad Notre Dame v Paríži, Hrad Krásna hôrka na východnom Slovensku, brána Namdaemun v Soule, Hrad Moncalieri neďaleko Turína a veľa ďalších. [3]



Obr. 1: Katedrála Notre Dame, Paríž, FR, zdroj: [4]



Obr. 2: Hrad Krásna hôrka, Krásnohorské Podhradie, SR, zdroj: [5]

V dnešnej dobe je bežné, že pri výrobe stavebných materiálov výrobcovia sledujú reakciu materiálov na požiar. V prípade takéhoto nešťastia má materiál očakávané vlastnosti, ktoré sú najčastejšie dohľadateľné v technickom liste výrobcu. V prípade prírodného kameňa to také jednoduché nie je. Kameň je vo všeobecnosti kompozitná hornina, pričom môže mať rôzny pôvod, poznáme napríklad horniny sedimentárne alebo premenené, taktiež môžu mať rozdielne mineralogické zloženie, textúru, rôzne fyzikálne a mechanické vlastnosti.[1] Z týchto dôvodov je mimoriadne zložité predpokladať, ako sa jednotlivé horniny budú v prípade požiaru správať.

Snaha o zachovanie kultúrneho dedičstva ďalším generáciám vedie stavebných

inžinierov a študentov z celého sveta k výskumu mechanických a fyzikálnych vlastností hornín po vystavení vysokým teplotám. Vďaka týmto štúdiám bude, aspoň čiastočne, možné predpokladať, aký dopad by mal požiar na celistvosť konštrukcií, a taktiež na ich architektonickú stránku. Na základe týchto predpokladov následne realizovať určité opatrenia, ktoré zabezpečia ochranu pamiatok.

Kapitola 1

Teoretická časť

1.1 Vybrané stavebné materiály

Pri výbere materiálov sledovaných v tejto štúdií bolo zohľadnených viacero dôležitých faktorov, medzi ktoré patrilo napríklad využitie materiálov v stavebnom obore na území Českej republiky, dostupnosť vzoriek či predchádzajúci výskum v tejto oblasti. Po zvážení všetkých možností boli vybrané dva druhy stavebných kameňov, ktoré boli v minulosti značne využívané, opuka a pieskovec. V prípade opuky je v literatúre zmienka o správaní tohto kameňa v prípade požiaru, ktorá opisuje najmä vizuálne zmeny vplyvom požiaru, problémy hasenia vodou či zmenu minerálnych fáz účinkom vysokej teploty [6]. V rámci viacerých štúdií boli sledované vlastnosti pieskovca vystaveného podmienkam, ktoré sú podobné podmienkam, akým budú materiály vystavené v tomto experimente, avšak žiadna z nich neskúmala vlastnosti pieskovca z Česka.

1.1.1 Opuka

Prvým skúmaným materiálom je opuka, hornina s premenlivým zložením a vlastnosťami. Býva taktiež označovaná ako slínovec alebo spongilit, obsahuje rôzne formy minerálov na báze oxidu kremičitého ako napríklad opál, chalcedón, cristobalit, kremičité zrná ale aj sludu, laukonit, limonit, spevnený íl a taktiež aj zbytky morských živočíchov, pričom spojivovú zložku tvorí uhličitan vápenatý. Jej nízka odolnosť voči poveternostným vplyvom je dôsledkom vrstevnatosti a rozmanitého mineralogického zloženia, ktoré je dané sedimentárnym pôvodom. Má pomerne veľkú nasiakavosť a vysoký obsah rovnovážnej vlhkosti, spôsobený veľkým obsahom ílovitých minerálov. Aj napriek vysokej nasiakavosti má opuka pomerne malú vztlínavosť. Bežne sú opuky belavej až sivej farby no s prítomnosťou rozdielnych minerálov ako napríklad limonit môžu obsahovať aj odtiene zlato-žltej farby, takéto sa nazývajú aj zlaté opuky a sú považované za cenné horniny. [6],[7],[8]

Opuka sa na území Česka v minulosti používala najmä v stredoveku, kedy bola hlavným stavebným kameňom, pretože bola dobre dostupným materiálom. Svojou lámavosťou umožňovala jednoduché spracovanie horniny vtedajšími primitívnymi nástrojmi. Momentálne sa opuka stále ťaží v piatich lomoch na území Českej republiky, ktoré sa nachádzajú na Prednej Kopanine neďaleko Prahy, kde sa lámala tzv. zlatá opuka, v oblasti Džbán u Rakovníka, Břvan a Zeměch u Loun či z Příbylova u Skutče. Práve příbylovská opuka je charakteristická svojim špecifickým sfarbením, ktoré môže byť šedožlté, šedobiele a šedomodré tzv. modráky, má taktiež lepšie

mechanické vlastnosti a je odolnejšia voči zvetrávaniu ako ostatné opuky. [6],[7],[8]

Z opuky bolo postavených mnoho románskych kostolov, napríklad bazilika sv. Jiří na Pražskom hrade či rotunda sv. Kříže, sv Longina a sv. Martina na Vyšehrade. [6],[7],[8]



Obr. 1.1: Bazilika sv. Jiří, Praha, ČR

Obr. 1.2: Rotunda sv. Martina, Praha, ČR

Obr. 1.3: Rotunda sv. Longina, Praha, ČR

1.1.2 Pieskovec

Pieskovec možno charakterizovať ako sedimentárnu klastickú horninu, ktorá z petrografického hľadiska nemá rovnaké chemické zloženie. Jeho typickou zložkou sú kremenné alebo kalcitické zrná a priestor medzi nimi môže byť voľný alebo vyplnený spojivom. Rozlišujeme primárne spojivo, nazývané aj základnou hmotou, ktoré je usadené zároveň s klastickými zrnami, a druhotné spojivo, nazývané tmel, ktoré vzniká vylúčením minerálnych látok z pravých alebo koloidných roztokov a je usadené dodatočne. Mechanicko-fyzikálne vlastnosti kameňa predovšetkým ovplyvňuje tmel. Rozlišujeme napríklad vápenatý alebo kaolinitický tmel, ktorý sfarbuje pieskovec do belava a do siva. Železitý tmel, ktorý sfarbuje pieskovec predovšetkým do hnedo-červena, glaukonit vyvolá prítomnosť zeleného odtieňa, ale aj kremičitý či ílovitý tmel. Kvalitné pieskovce majú tmel tvorený predovšetkým oxidmi kremíka. Pieskovce s obsahom živcov nad 20% a obsahom ílovej hmoty menej ako 20% sa nazývajú arkózy a arkózové pieskovce. Možno ich vidieť napríklad na Sázavskom kláštore, a taktiež boli použité aj na architektonické prvky na hrade Vizmburg. [7],[8]

V Česku sa nachádza viacero lokalít, kde sa láme pieskovec. Medzi významné ložiská patria napríklad hořické pieskovce, ktoré sa ťažia v oblasti Podhorního Újezdu v Podkrkonoší, a božanovské pieskovce, ktoré sa ťažia v najjužnejšej časti Broumovských stien na hranici s Poľskom. [7], [8]

Božanovský pieskovec je považovaný za najkvalitnejší pieskovec z dostupných pieskovcov v Českej republike. Obsahuje najmä zrná kremeňa, živcov, či úlomky hornín a tmel je prevažne tvorený kaolinitom. [7],[8]

Medzi stavby, na ktoré bol použitý pieskovec patrí napríklad Chrám sv. Víta na Pražskom hrade, taktiež bol použitý na obnovu chrámu sv. Barbory v Kutnej Hore. Veľké uplatnenie božanovského pieskovca je v architektúre, a to vo forme obkladu, ktorý možno vidieť napríklad na Smíchovskom nádraží či Národnom divadle v Prahe. [7],[8]



Obr. 1.4: Katedrála sv. Víta, Praha, ČR

1.2 Predchádzajúci výskum

Výskum zmeny vlastností prírodných materiálov po vystavení vysokým teplotám je aktuálna téma, ktorou sa zaoberá mnoho štúdií po celom svete. Niektoré štúdie sa venujú výskumu fyzikálnych vlastností jednotlivých hornín po vystavení vysokým teplotám, zameriavajú sa na pórovitosť či objemovú hmotnosť alebo zmenu farby. Iné sa naopak zameriavajú na zmenu mechanických vlastností, ako napríklad pevnosť v tlaku či ťahu, modul pružnosti, šírenie seizmických vln, akustická emisivita. Viacero štúdií porovnáva vlastnosti pri rôznych druhoch chladenia, napríklad vodou a vzduchom, ale aj ohrievania. Existujú štúdie ktoré poukazujú na fakt, že sa vlastnosti menia aj časom, a teda záleží či sa skúšajú horúce vzorky, ochladené vzorky skúšané po dvoch hodinách alebo dvoch dňoch.

1.2.1 Možnosti ohrevu vzoriek

Väčšina štúdií, ktorá sa zaoberá vyšetrovaním vlastností hornín po vystavení vysokým teplotám použila na ohrev vzoriek laboratórne muflové, elektrické pece, ktoré zohrievajú vzorky pomocou šírenia tepla kondukciou. V takomto prípade ohrevu je možné jednoducho kontrolovať teploty na ktoré sú vzorky zohrievané, rýchlosť zohrievania vzoriek, a taktiež je možné zabezpečiť ohriatie celej vzorky. Vďaka týmto výhodám je možné opakovať experimenty a následne porovnávať výsledky. [9]

V prípade požiaru sa však konštrukcie nezahrievajú uniformne, ako sa predpokladá pri výskume v laboratóriu. Častokrát sa konštrukcie, vďaka svojej hrúbke,



Obr. 1.5: Muflová pec, zdroj: [10]

nezohrejú celé na rovnakú teplotu, taktiež môžu prísť do kontaktu s plameňmi a nie sa iba zohrievať ako predpokladajú experimenty v laboratóriu. Navyše, v budovách sa nachádza aj rôzne zariadenie, ako napríklad drevené podlahy a nábytok, knižnice s knihami, ktoré v procese horenia vytvárajú popol, ten sa lepí na kamenné materiály a zhoršuje ich vlastnosti. Experimentu, ktorý porovnával vlastnosti pieskovca po zahriatí v peci a v reálnom ohni sa venoval McCabe a kolektív [11], pričom poukazujú na fakt, že prítomnosť sadzí mala negatívny vplyv na testované vzorky. Na povrchu vzoriek sa vytvoril nepriepustný povlak, ktorý by na historickej stavbe zničil jej architektonickú funkciu, a taktiež svojou nepriepustnosťou zabránil vyplaveniu solí na povrch. Z tohto dôvodu by sa soli koncentrovali a kryštalizovali pod vrstvou sadze a spôsobili by odlupovanie povrchovej vrstvy. Aj napriek tomu, že takáto forma testovania vzoriek je najbližšia reálnemu požiaru, nevýhodou je, že skúšky vykonané takýmto spôsobom nie sú opakovateľné.

V prípade dostupnosti iba veľmi malých vzoriek možno využiť laserového ožiarenia, pričom laser emituje lúče infračerveného žiarenia koncentrované na malú plochu vzorky. Využíva sa infračervené žiarenie s podobnou vlnovou dĺžkou, akú možno pozorovať aj v prípade požiaru. Vďaka tomu je možné sledovať mikroskopické zmeny na materiáli spôsobené sálaním. Na druhej strane je takýto typ testovania nevhodný na testovanie veľkých vzoriek a zmeny mechanických vlastností, taktiež nie je cenovo dostupný pre bežné laboratórium.[12]

1.2.2 Účinky vysokých teplôt na vzhľad materiálu

V prípade historických pamiatok je okrem celkovej stability konštrukcie po pozíari dôležité aj ovplyvnenie estetickej stránky konštrukcie. Viacero štúdií poukazuje na farebnú nestálosť materiálov po vystavení vysokým teplotám. Tento nežiadúci jav je závislý na zložení horniny a v skratke je spôsobený fyzikálne-chemickými zmenami pod účinkom vysokých teplôt. V závislosti od mineralogického zloženia možno pozorovať zmeny farieb, napríklad prítomnosť minerálov železa môže zahriatím na vysoké teploty sfarbiť materiál do červena, glaukonit sa zo zelenej farby zmení postupne na hnedú a rovnako aj hematit [11],[13],[14].

Tento jav pozorovali aj Biró a kolektív [15], vzorky mramoru stratili všetken svoj lesk a ich farba sa zmenila na matne bielu. Okrem toho, u vzoriek s vysokým obsahom kalcitu, mramoru a vápenca, bolo na druhý deň od tepelného zaťaženia na 800°C a následného ochladenia, pozorované odlúpenie vrchnej vrstvy vzorky, ktorá bola ľahko rozmrvitelná v ruke. Príčinou bola premena uhličitanu vápenatého na oxid vápenatý vplyvom vysokej teploty. Po vybratí vzoriek z pece sa aspoň časť oxidu vápenatého vplyvom vzdušnej vlhkosti premenila na hydroxid vápenatý, ktorý zapríčinil zväčšenie objemu vzorky o cca 44%, čo spôsobilo odlupovanie povrchovej vrstvy. Rovnaký efekt pozorovali aj Daoudi a kolektív [16] u vzoriek vápenca z oblasti Yonne vo Francúzsku, po tom čo bol ohriaty na 700°C a následne vystavený bežným podmienkam na vzduchu (vlhkosti) tri dni.

1.2.3 Účinky vysokých teplôt na štruktúru materiálu

Vplyvom obsahu minerálov v horninách dochádza k zmene celistvosti štruktúry hornín po vystavení vysokým teplotám. Je to z dôsledku nerovnakej tepelnej rozťažnosti jednotlivých minerálov, ku ktorej dochádza pri rôznych teplotách.

Medzi minerály s takýmito vlastnosťami možno zaradiť kremeň a jeho zmenu z alfa na beta modifikáciu pri 575 °C, pri ktorej dochádza k tepelnému rozpínaniu vplyvom zmeny tvaru kryštalickej mriežky [17],[18]. V prípade dolomitu dochádza ku tepelnej dekarbonizácii pri teplote cca 650°C, kedy spolu s ďalšími zložkami vzniká oxid horečnatý, ktorý po kontakte s vodou reaguje za vzniku hydroxidu horečnatého, čo má za následok zväčšenie objemu. K dekarbonizácii uhličitanu vápenatého dochádza približne pri 700°C a zjednodušený proces je uvedený v kapitole 1.2.2. Zmena objemu jednotlivých minerálov má za následok vznik vnútorného napätia, a následne trhlin a mikrotrhlin, v štruktúre materiálu, ktoré narúšajú kompatibilitu hmoty.[18]

1.2.4 Účinky vysokých teplôt na mechanické a fyzikálne vlastnosti

Medzi jeden z najaktuálnejších výskumov patrí aj výskum, ktorý realizovali Liu a kolektív [19]. V svojej experimentálnej štúdii sledovali správanie vzoriek vápenca z oblasti Hebei v Číne, po zaťažení siedmimi rôznymi teplotami v rozmedzí od 100°C do 475°C. Vzorky s rozmermi $\varnothing 50$ mm x 100 mm boli po ochladení zaťažené v prostom tlaku. Na (Brazílske) skúšky pevnosti v priečnom ťahu sa použili vzorky s rozmermi $\varnothing 50$ mm x 25 mm. Taktiež bola zaznamenaná deformácia vzoriek pri oboch typoch skúšok pomocou technológie digitálnej korelácie obrazu. Štúdia dokázala, že vplyvom pôsobenia vysokých teplôt sa mechanické vlastnosti zhoršili o

niekoľko desiatok percent v porovnaní s hodnotami pri pôvodnej teplote 25°C. Na záver bola skúmaná otázka vzájomného ovplyvňovania sa fyzikálnych a mechanických vlastností a pomocou citlivostných analýz.

Teplotami v podobnom rozmedzí od 25°C do 500°C boli zaťažované aj vzorky pieskovca z oblasti Chunar v Indii. Tento experiment realizoval Singh a kolektív [20]. Tím expertov sledoval mechanické vlastnosti vzoriek po zaťažení prostým tlakom, na vzorkách s rozmermi 50 mm x 110 mm a vlastnosti vzoriek s rozmermi $\varnothing 50$ mm x 25 mm po zaťažení ťahom. Taktiež bola sledovaná aj zmena fyzikálnych vlastností napríklad hodnôt objemu či rýchlosť P vlny po vystavení vzoriek vysokým teplotám, v porovnaní s hodnotami týchto vlastností pri referenčnej teplote. V prípade mechanických vlastností, hodnota pevnosti v ťahu rovnako aj pevnosti v tlaku, najprv ukázala nárast pre vzorky zahriate na 200°C, a následne prudký pokles hodnôt oboch mechanických vlastností po zahriatí vzoriek na viac ako 200°C.

Taktiež pieskovcom, avšak z oblasti Jiangxi v Číne sa zaoberal Yu a kolektív [21]. Vo svojej štúdii zahriali vzorky na 4 rôzne teploty v rozmedzí 200°C až 800°C, avšak vzorky zahriate na 800°C mali natolko narušenú štruktúru, že boli vylúčené z experimentu. U vzoriek zahriatych na rozdielne teploty, a ich následnom ochladení, boli sledované zmeny v parametroch, ktoré boli porovnané s hodnotami týchto parametrov pri počiatkovej teplote 20°C. V rámci experimentu boli vykonané skúšky na overenie prostej pevnosti v tlaku, realizované boli aj skúšky pomocou triaxiálneho šmykového prístroja. Skúšobné telesá zaťažované iba prostým tlakom dosahovali nižších hodnôt pretvorenia pod maximálnym napätím v tlaku, ako vzorky skúšané pomocou triaxiálneho šmykového prístroja.

Rao a kolektív [22] sledovali vlastnosti pieskovca zahriateho na 7 rôznych teplôt, v rozmedzí od 60°C do 300°C. Vzorky po vychladení podstúpili tri typy testov. Pomocou (Brazílskeho) testu pevnosti v priečnom ťahu bola overovaná pevnosť v ťahu na valcových vzorkách s rozmermi $\varnothing 50$ mm x 50 mm. Na vzorkách v tvare kocky s rozmermi 50 mm x 50 mm x 50 mm bola overovaná pevnosť v tlaku a posledná bola trojbodová skúška v ohybe na vzorkách v tvare hranolu s rozmermi 50 mm x 50 mm x 250 mm. Vo výsledkoch sa porovnávali mechanické vlastnosti po zahriatí na vysoké teploty s pôvodnými mechanickými vlastnosťami pri teplote 20°C.

Vzorky pieskovca odobrané z oblasti Shanxi v Číne vo svojej štúdii použil Liu a kolektív [23]. V prípade tejto štúdie boli vzorky ohrievané na 5 rôznych teplôt v rozmedzí od 100°C do 1000°C. Následne bola nedeštruktívnym spôsobom odmeraná rýchlosť seizmických vln, ktorá sa najprv zvýšila, u vzoriek zahriatych na 100°C, a následne sa rýchlosť znižovala, pričom čím vyššia bola teplota, tým rýchlejšie klesala rýchlosť seizmických vln. Taktiež bola sledovaná závislosť napätia od pretvorenia, so zvyšujúcou sa teplotou sa znižovali hodnoty maximálneho napätia, avšak hodnoty pretvorenia pri porušení sa zvyšovali.

Zhang a kolektív [24] skúmali zmeny vlastností pieskovca po vystavení 5 teplotám, v rozmedzí 200°C až 1000°C. Vzorky boli po dosiahnutí požadovanej teploty ponechané v tejto teplote 2 hodiny, a potom ochladené v peci na referenčnú teplotu. Následne boli vzorky testované v prostom tlaku, s rýchlosťou zaťaženia 500 N/s, a pomocou senzorov akustickej emisie bol zachytávaný vznik akustických vln, spôsobený vznikom trhlín v štruktúre vzorky.

Zmeny vlastností ílovca z oblasti Severného Porýnia Vestfálska v Nemecku sledoval Tian a kolektív [13]. Použité skúšobné telesá boli zahrievané na 8 rozdielnych teplôt, v rozmedzí 80°C až 1000°C. Po zahriatí na požadovanú teplotu, boli vzorky

udržiavané v tejto teplote po dobu 2 hodín, a potom ochladené na izbovú teplotu. Následne boli u vzoriek s rozmermi $\varnothing 38$ mm x 76 mm overované hodnoty prostej pevnosti v tlaku, a taktiež pevnosť v tlaku po použití triaxiálneho šmykového prístroja. Po zaťažení vzoriek prostým tlakom, sa u vzoriek zahriatych na teplotu 800°C a nižšiu zvýšila maximálna pevnosť, no u vzoriek zahriatych na teplotu 1000°C dosahovala maximálna pevnosť cca 40% pôvodnej pevnosti pri izbovej teplote.

Štúdiom talianskeho mramoru z oblasti Valdieri v Severovýchodných talianskych Alpách sa zaoberal Vagnon a kolektív [25]. Testované vzorky s rozmermi 50 mm x 100 mm boli vystavené zahrievaniu na teploty od 105°C do 600°C , zotrvaaniu v požadovanej teplote po dobu 24 hodín, a následnému pomalému ochladeniu v peci na izbovú teplotu. Nato boli sledované zmeny fyzikálnych aj mechanických vlastností, ako napríklad pórovitosť, hustota, pevnosť v prostom tlaku či rýchlosť seizmických vln. Vďaka prevedeným testom bolo možné porovnať modul pružnosti odmeraný pomocou deštruktívnych skúšok a modul pružnosti vypočítaný z rýchlosti seizmických vln.

Žulu z oblasti Ningbo v Číne zahrievali, a potom sledovali zmenu jej mechanických vlastností Chen a kolektív [26]. Vzorky boli podrobené zahrievaniu na teploty 200°C až 1000°C , a po ochladení boli vzorky skúšané na pevnosť v prostom tlaku. Bolo pozorované, že pevnosť klesala s narastajúcou teplotou, rovnaký trend možno pozorovať aj v prípade maximálneho napätia, zatiaľ čo hodnoty pretvorenia sa zvyšovali so zvyšujúcou sa teplotou. Únava materiálu bola sledovaná pomocou cyklického zaťažovania, pričom únava materiálu vzoriek zahriatych na menej ako 400°C bola závislá iba na pôsobiacom napätí, avšak so vzrastajúcou teplotou sa hodnoty zhoršovali.

Pevnosť v priečnom ťahu vzoriek žuly z oblasti Laurentian z Kanady po vystavení vysokým teplotám sledoval Yin a kolektív [27]. Vzorky s rozmermi $\varnothing 40$ mm x 18 mm boli ohrievané na 5 teplôt, v rozmedzí 100°C až 850°C . Následne bola sledovaná zmena hodnôt v dynamickej a statickej pevnosti v priečnom ťahu. V prípade statickej pevnosti v ťahu bol zaznamenaný pokles hodnôt pevnosti so zvyšujúcou sa teplotou, no v prípade dynamickej pevnosti v ťahu boli pozorované tri štádia zmeny. Pre vzorky zahriate na 100°C sa pevnosť v ťahu trocha zvýšila, nato pre vzorky zahriate na 100°C až 450°C sa pevnosť v ťahu príliš nemenila, a u vzoriek zahriatych na 450°C až 850°C bol pozorovaný značný pokles pevnosti v ťahu s porovnaním s pevnosťou v ťahu pri referenčnej teplote. Pri skúškach dynamickej pevnosti v ťahu bola taktiež použitá vysoko-rýchlostná kamera, ktorá zachytávala kolaps vzoriek v pôsobiacom ťahu.

Yang a kolektív [28] sa vo svojom výskume venovali zmene mechanických a fyzikálnych vlastností žuly z oblasti Shandong v Číne, po vystavení vysokým teplotám, v rozmedzí 200°C až 800°C a následnom pomalom ochladení späť, na referenčnú teplotu. Ukázalo sa, že vzorky zahriate na menej ako 300°C vykazovali zvýšenie hodnôt v prípade elastického modulu a prostej pevnosti v tlaku. U vzoriek zahriatych na viac ako 300°C sa však tieto hodnoty znižovali. V prípade hodnôt pretvorenia pred kolapsom, bol u vzoriek so zvyšujúcou sa teplotou pozorovaný nárast veľkosti pretvorenia a u vzoriek zahriatych na viac ako 600°C , prudký nárast hodnôt pretvorenia. V štúdiu bola taktiež odmeraná rýchlosť seizmických vln. Na základe rýchlosti seizmických vln bol vyhodnotený dynamický modul pružnosti, ktorý klesal so zvyšujúcou sa teplotou a dynamická poissonova konštanta, ktorá nebola na zmene teploty závislá.

Porovnaniu mechanických vlastností vzoriek žule po zahriatí na vysoké teploty, a následnom ochladení so vzorkami, ktoré mali vysokú teplotu zachovanú aj počas

testov sa venovali Yin a kolektív [29]. Všetky vzorky boli zahrievané na teploty v rozmedzí od 100°C do 800°C, a potom boli rozdelené na dve skupiny. Prvá skupina vzoriek bola voľne ochladzovaná na izbovú teplotu, zatiaľ čo druhá skupina vzoriek ihneď podstúpila mechanické skúšky. Správanie skupín vzoriek nebolo rovnaké, poškodenie vzoriek z druhej skupiny, ktoré boli testované pod vysokou teplotou bolo vyššie ako u vzoriek, ktoré boli ochladené na izbovú teplotu. Vzorky testované ihneď po zahriatí preukázali nižšie hodnoty maximálneho napätia a elastického modulu a vyššie hodnoty pretvorenia ako vzorky testované po ochladení.

Mnoho štúdií sa zaoberalo výskumom viac ako jedným typom horniny, aby bolo možné porovnať správanie sa materiálov za rovnakých podmienok. Veľmi dobrý príklad takejto štúdie je od pána Vigroux a kolektívu [30], ktorí sa zaoberali výskumom šiestich rôznych vápencov a jedného pieskovca. Vzorky boli odobrané z viacerých lokalít vo Francúzku. Skúšobné telesá boli rozdelené na dve skupiny, pričom prvá skupina sledovala zmenu lineárnej tepelnej rozťažnosti, relatívnej hmotnosti a tepelného toku, po zaťažení teplotami 250°C, 500°C a 750°C v porovnaní s referenčnou teplotou. V druhej skupine vzoriek, bola skúmaná zmena hodnôt pevnosti v tlaku, v ťahu a zmena rýchlosti P vlny po zaťažení teplotami 200°C, 400°C, 600°C a 800°C v porovnaní s referenčnou teplotou. V závere bolo poukázané na fakt, že je veľmi zložité generalizovať trend zmeny mechanických vlastností jednotlivých hornín. Možno povedať, že u všetkých vzoriek okrem jednej, ktorá bola viac zrnitá a obsahovala menej spojiva, sa mechanické vlastnosti po zahriatí telies na 400°C veľmi nemenili, no po zahriatí na vyššie teploty bol pozorovaný výrazný negatívny vývoj mechanických vlastností.

Biró a kolektív [15] testovali 4 rôzne typy prírodného kameňa, ktorý bol používaný v stavebníctve v Maďarsku. Materiály pôvodne pochádzajú z lomov, ktoré sa nachádzajú vo viacerých krajinách Európy (Rosa beta žula, Labradorit z Poľska, Travertín z Maďarska a Mramor z Talianska). Vzorky boli vystavené 6 rôznym teplotám, v rozmedzí 50°C až 800°C, a následne boli sledované zmeny vlastností v pevnosti v tlaku, ťahu a v ohybe. Rovnako ako v predchádzajúcom experimente, aj tu bola sledovaná zmena relatívnej hmotnosti po zahriatí vzoriek v rozmedzí teplôt 20°C až 1000°C. Výsledky ukázali, že labradorit mal aj po zahriatí na najvyššiu teplotu 800°C a následnom ochladení, najmenší pokles v pevnosti v tlaku, hodnota sa pohybovala na približne 70% pôvodnej hodnoty pevnosti v tlaku. Veľmi podobné výsledky boli zaznamenané aj u vzoriek travertínu a najväčší pokles pevnosti v prostom tlaku bol zaznamenaný u vzoriek mramoru. V prípade vzoriek žule, bola počiatočná pevnosť v prostom tlaku najvyššia zo všetkých skúšaných materiálov, no po zahriatí vzoriek na 800°C klesla na cca 40% svojej pôvodnej hodnoty.

Problematike zmeny mechanických a fyzikálnych vlastností po pôsobení vysokých teplôt sa venovali aj Zhang a kolektív [31]. V rámci experimentu skúmali tri druhy hornín (mramor, vápenec a pieskovec) z oblasti Xuzhou v Číne, ktorých vlastnosti boli sledované po zahriatí na 8 rôznych teplôt od 100°C do 800°C a následnom ochladení. Prostá pevnosť v tlaku mramoru dosiahla svoju maximálnu hodnotu pri teplote 100°C, v prípade vápenca sa pôvodná pevnosť znížila pri teplote 100°C, pri zahriatí na teploty 100°C až 700°C sa príliš nemenila, potom sa však drasticky znížila pri zohriatí vzorky na 800°C. V prípade pieskovca sa počiatočná pevnosť znižovala po zohriatí vzorky na 200°C, no pri ďalšom zohrievaní do 600°C sa pevnosť zvýšila. Ovplyvnenie elastického modulu bolo taktiež zaznamenané, pri vzorkách mramoru je maximálna hodnota elastického modulu dosiahnutá pri zohriatí vzorky na teplotu 100°C, následne hodnota elastického modulu kolíše a pri zohriatí vzorky na 400°C

až 800°C hodnota elastického modulu postupne klesá. Vzorky vápenca prejavovali len malé zmeny hodnôt elastického modulu pri zohriatí na teploty do 600°C, nasledoval však rapidný pokles hodnôt elastického modulu pri zohriatí vzoriek na 600°C až 800°C. Hodnoty elastického modulu pieskovca pri zohriatí vzorky do 600°C kolísali, no so vzrastajúcou teplotou zohriatia nastal rapidný pokles hodnôt elastického modulu, ktorý pri zohriatí vzorky na 800°C dosahoval o 35% nižšie hodnoty ako pôvodná vzorka.

Štúdiá od El Jazouli a kolektívu [32] sa od vyššie spomenutých štúdií líši tým, že porovnáva prírodné materiály s materiálom umelo vyrobeným v laboratóriu. V experimente sa skúmajú 4 druhy vzoriek z Belgicka: modrý vápenec, pieskovec, kremeň z oblasti Staneux a umelý kameň. Vzorky s rozmermi 120 mm x 30 mm x 26 mm boli testované pomocou viacerých skúšok. V experimente bola overovaná pevnosť v ohybe a lomová energia pomocou trojbodovej skúšky v ohybe. Počas zaťažovania vzoriek bola meraná aj ich akustická emisia, teda vznik a šírenie akustických vln za vzniku trhlín. Po kolapse sa jednotlivé vzorky rozdelili na dve časti, ktoré boli následne použité na test v tlaku. Všetky vzorky po cykle ohriatia a chladenia ukázali zmenu v porušení, u vzoriek bez tepelného zaťaženia dochádzalo ku krehkému porušeniu, avšak u tepelne upravených vzoriek dochádzalo k plastickejšiemu porušeniu.

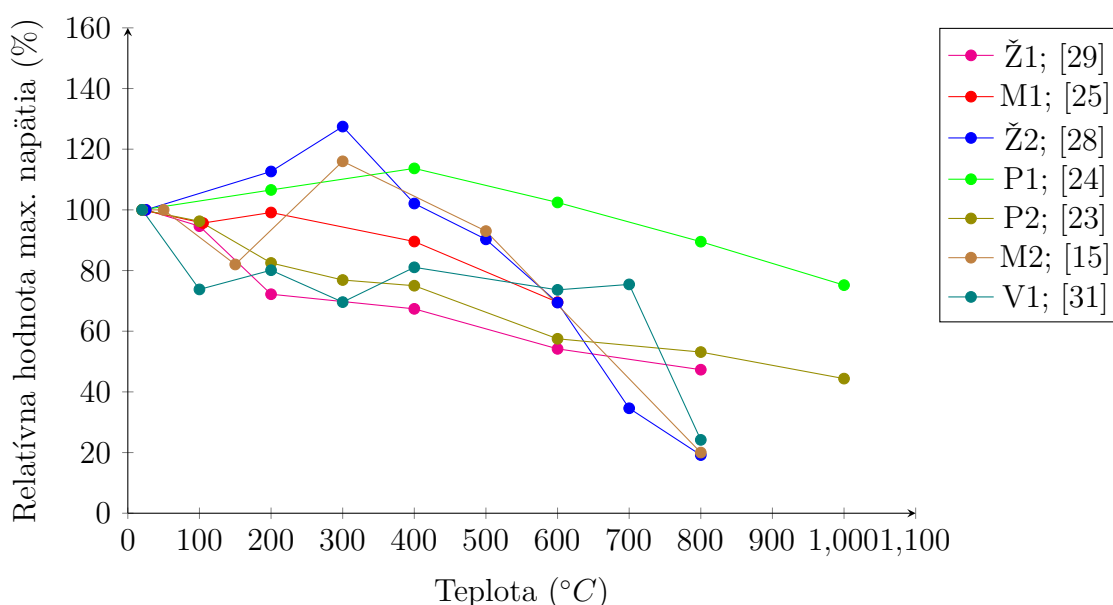
Z lomov v štáte Yucatán boli odobraté štyri druhy vzoriek vápenca s rôznym zložením, ktoré boli súčasťou experimentu realizovaného González-Gomézom a kolektívom [33]. V tomto experimente boli vzorky s rozmermi 21 mm x 10.5 mm x 10.5 mm podrobené tepelným ohrevom na teploty 100°C, 200°C, 300°C, 400°C, 500°C a 600°C, a po vychladnutí testované v tlaku. Taktiež boli pozorované zmeny fyzikálnych vlastností, ako napríklad pórovitosť či hustota. Ďalej bola pozorovaná zmena spektra difúznej odrazivosti vzoriek po zahriatí na rozdielne teploty. Zníženie spektier odrazivosti bolo pozorované pri vzorkách zohriatych na viac ako 200°C, pretože farba vápenca so zvyšujúcou teplotou tmavne.

Pieskovec a žulu z oblasti Qinlingských hôr v Číne skúmali Liu a kolektív [34]. Vzorky boli postupne zahriate na sedem teplôt (izbová teplota, 100°C, 200°C, 400°C, 600°C, 800°C, 1000°C) s rýchlosťou ohrevu 10°C/min, po dosiahnutí požadovanej teploty, boli vzorky v tejto teplote udržiavané po dobu 2 hodín. Po vychladnutí, boli jednotlivé vzorky zaťažené osovým zaťažením s rýchlosťou zaťaženia 0.8MPa/s až kým nenastal kolaps. Pri porovnaní kriviek napätia a deformácie pri rozličných teplotách, možno pozorovať zmenu krehkosti a ťažnosti. V prípade žule dochádza ku krehkému porušeniu pri vzorkách zohriatych na menej ako 600°C, pri zahriatí vzoriek na vyššie teploty je ťažnosť materiálu lepšia a vzorka sa aj po dosiahnutí maximálneho napätia ďalej pretvára. Pri vzorkách pieskovca je krehkosť významná aj pre vzorky zahriate na 800°C, ťažnosť sa zlepši až pre vzorky zahriate nad 800°C.

Prírodnými horninami, ktoré sa bežne používajú v stavebníctve v Turecku sa zaoberali Ozguven a kolektív [35]. Boli vybrané vzorky 4 druhov vápenca a 4 druhov mramoru, ktoré boli zahrievané na 5 rôznych teplôt, v rozmedzí od 200°C do 1000°C. Po zahriatí vzoriek na požadovanú teplotu, boli skúšobné telesá udržiavané v tejto teplote, a potom voľne ochladené v peci na referenčnú teplotu. Následne boli vzorky vystavené viacerým testom na overenie zmeny mechanických a fyzikálnych vlastností. V prípade pórovitosti sa so zvyšujúcou teplotou zvyšovala aj pórovitosť, v prípade vzoriek mramoru boli pozorované väčšie zmeny hodnôt pórovitosti ako v prípade vápenca. Pevnosť v ťahu mala u vzoriek mramoru klesajúci trend s narastajúcou teplotou, u vzoriek vápenca je však trend nepravidelný, možno pozorovať aj nárast aj pokles pevnosti, pre vzorky zahriate na menej ako 400°C, resp. 600°C.

Po zahriatí vzoriek na vyššie teploty je taktiež pozorovaný iba pokles pevnosti v ťahu. Pevnosť v prostom tlaku u vzoriek vápenca nevykazovala rozsiahle zmeny u vzoriek zahriatych na menej ako 400°C, po zahriatí na vyššie teploty však prudko klesala. V prípade mramoru bol najprv pozorovaný nárast pevnosti u vzoriek zahriatych na 200°C, a následne pevnosť v prostom tlaku klesala.

1.2.4.1 Analýza výsledkov



Obr. 1.6: Maximálne napätie

Na Obr. 1.6 sú uvedené relatívne hodnoty maximálneho napätia vzoriek pieskovca, žule, vápenca a mramoru z niektorých z vyššie uvedených štúdií [23], [24], [25], [15], [28], [29], [31]. Na začiatok je nutné uviesť, že nie všetky experimenty prebiehali v rovnakých podmienkach, boli použité iné požadované teploty, vzorky boli vystavené požadovaným teplotám rozdielne dlhý čas, používala sa iná rýchlosť ohrevu či ochladenia, vzorky boli zatažované rôznou rýchlosťou zataženia, a mali rozdielne rozmery. Všetky tieto faktory mohli čiastočne ovplyvniť výsledky. Rozdiely sú spôsobené nedostatkom noriem, ktoré sa venujú skúškam prírodného kameňa po zahriatí na vysoké teploty.

U všetkých vzoriek, okrem vápenca V1, možno pozorovať klesajúci trend pri vzorkách zahriatych na viac ako 400 °C. V prípade vzoriek vápenca V1, zmeny maximálneho napätia kolíšu v rozmedzí cca 30% pri zahriatí na teploty do 700°C, u vzoriek zahriatych na 800°C je pozorovaný prudký pokles v hodnote maximálneho napätia, a to na cca 25% z pôvodnej hodnoty maximálneho napätia pri referenčnej teplote.

V prípade vzoriek pieskovca P1 možno pozorovať najmenší pokles v hodnote maximálneho napätia. Celkovo u vzoriek pieskovca P1 možno pozorovať postupný nárast pri vzorkách zahriatych na menej ako 400°C, a následne pozvoľný pokles hodnôt na cca 75% pôvodnej hodnoty maximálneho napätia, pri zahriatí vzoriek na 1000°C. U vzoriek P2 bol pozorovaný iba klesajúci trend, pričom najväčší pokles bol zaznamenaný medzi teplotami 100 °C až 200 °C, pri teplote 1000 °C dosahovali hodnoty maximálneho napätia približne 45%.

V prípade vzoriek žule Ž1 bol pozorovaný veľmi podobný trend zmeny hodnoty maximálneho napätia, ako u vzoriek P2. Vzorky zahriate na 800°C dosahovali približne 47 % z pôvodnej hodnoty maximálneho napätia pri referenčnej teplote. U vzoriek Ž2 bol pri zahriatí na 300°C pozorovaný najvyšší nárast maximálneho napätia z porovnávaných vzoriek, a to až na cca 127% z pôvodného maximálneho napätia, následne trend prudko klesal a u vzoriek zohriatych na 800°C dosahovali hodnoty maximálneho napätia okolo 19% z pôvodnej hodnoty, čo je najväčší pokles v maximálnom napätí porovnávaných vzoriek.

V prípade vzoriek mramoru, bol u vzoriek M1 zohriatych na menej ako 300°C spočiatku pozorovaný klesajúci trend, a potom stúpajúci trend hodnôt, pričom pri 300 °C dosiahli hodnoty maximálneho napätia maximum, cca 116 % pôvodnej hodnoty. U vzoriek zohriatych na 300°C až 800°C bol pozorovaný prudký pokles hodnôt maximálneho napätia, pričom pri 800°C dosahovali hodnoty maximálneho napätia iba cca 20 % z pôvodnej hodnoty. U vzoriek M2 boli pozorované menšie výkyvy pri zahriatí do 200 °C ako u vzoriek M1, následne mali zmeny hodnôt klesajúci trend a u vzoriek zohriatych na 600°C dosahovali hodnoty maximálneho napätia cca 70%

Z predchádzajúceho porovnania je zrejmé, že zmeny hodnôt maximálneho napätia jednotlivých materiálov nie sú rovnaké a majú spoločný iba klesajúci trend hodnôt maximálneho napätia po zahriatí vzoriek na viac ako 400°C (okrem vzoriek vápenca V1). Rozdielne správanie môže byť z veľkej časti ovplyvnené iným pôvodom a zložením jednotlivých hornín. Na základe predchádzajúcich experimentov preto nemožno presne určiť ako by sa správali horniny s iným mineralogickým zložením.

1.2.5 Možnosti ochladzovania vzoriek

V predchádzajúcich experimentoch sa autori zaoberali následkami pôsobenia vysokých teplôt na materiál, no v prípade požiaru je dôležité sledovať aj spôsob hasenia. Pri veľkých požiaroch sa na hasenie konštrukcií často používa voda, ktorá síce požiar skrotí rýchlejšie, avšak tepelný šok zo studenej vody dopadajúcej na konštrukciu s teplotami niekoľko stoviek stupňov môže mať veľmi vážne následky na jej celistvosť. Z tohto dôvodu sa niektoré štúdie viac zamerali na spôsob ochladzovania vzoriek vystavených vysokým teplotám, a následné porovnanie viacerých typov ochladzovania.

Brotóns a kolektív [36] sledovali vzorky San Julian vápenca odobraného z oblasti Alicante v Španielsku. Vzorky po zahriatí na 5 rôznych teplotách, v rozmedzí 200°C až 600°C, ochladzovali dvoma spôsobmi. Prvá skupina vzoriek bola ochladzovaná najprv v peci pri konštantnej rýchlosti -0.5°C/min a po dosiahnutí 300°C boli vzorky ďalej ochladzované na vzduchu v laboratóriu. Druhá skupina vzoriek bola po vybratí z pece umiestnená do 10 litrovej nádoby s vodou, kde bola ochladzovaná po dobu 5 minút. Po ochladení, boli u oboch skupín sledované zmeny viacerých fyzikálnych aj mechanických vlastností ako napríklad pórovitosť, rýchlosť seizmických vln, Youngov modul pružnosti či pevnosť v tlaku, v porovnaní s vlastnosťami pri počiatkovej teplote 20°C. Experti dospeli k záveru, že pri oboch typoch chladenia dochádza k negatívnym zmenám vo vlastnostiach materiálu, avšak pri šokovom ochladzovaní studenou vodou boli tieto zmeny významnejšie.

Shao a kolektív [37] taktiež porovnávali vlastnosti materiálu po rozdielnom chladení. Vo svojej štúdií použili tri typy vzoriek žule z juhovýchodnej Austrálie, pričom jednotlivé typy sa od seba líšili veľkosťou zrn matrice. Vzorky boli následne zahriate na 4 rôzne teploty v rozmedzí od 200°C do 800°C, a po viac ako 12 hodinách vy-

braté z pece. Ochladzovanie opäť prebiehalo dvoma spôsobmi, pričom prvá skupina vzoriek bola ochladená v 25 litrovej nádobe s vodou z vodovodu a druhá skupina vzoriek bola ochladená na vzduchu. Následne boli experimentálne overené niektoré mechanické vlastnosti, ako napríklad elastický modul, pevnosť v tlaku či maximálnu veľkosť pretvorenia. V závere sa ukázalo, že rozdielne typy ochladzovania mali najväčší vplyv na vzorky žule s veľkými zrnami matrice, zatiaľ čo pre vzorky s malými zrnami matrice, bol rozdiel medzi zmenami vlastností po ochladení na vzduchu a po ochladení vzoriek vo vode veľmi malý.

V prípade experimentu realizovaného Wangom a kolektívom [38] boli sledované vlastnosti žule z oblasti Hubei v Číne, ktoré boli zahrievané na 4 rôzne teploty, v rozmedzí 200°C až 800°C. Po zahriatí boli vzorky ponechané v peci v požadovanej teplote po dobu 3 hodín, a potom boli ochladené. V tejto štúdii sa autori zaoberali vplyvom rozdielneho ochladzovania vzoriek pričom bolo sledovaných 6 rôznych typov ochladenia. Ochladenie v peci, kombinácia chladenia vzoriek vo vode a na vzduchu, kde boli vzorky najprv chladené určitý čas vo vode (0.5, 1, 3 a 5 minút), a po vytiahnutí z vody chladené na vzduchu. Posledný skúmaný typ chladenia vzoriek bolo ochladenie na izbovú teplotu vo vode. Následne bolo vykonaných viacero testov vrátane sledovania zmeny pevnosti v prostom tlaku.

Troma typmi ochladzovania žule z oblasti Hunan v Číne sa zaoberal Wu a kolektív [39]. Vzorky, zahriate na 5 rôznych teplôt v rozmedzí od 200°C do 800°C, boli rozdelené na tri skupiny, pričom prvá skupina vzoriek bola ochladzovaná v peci pomalým ochladením, druhá skupina vzoriek bola ochladzovaná na vzduchu a tretia skupina vzoriek bola ochladzovaná rýchlym ochladením vo vode. Následne boli u vzoriek sledované zmeny mechanických a fyzikálnych vlastností, pevnosť v priečnom ťahu, rýchlosť P vlny a drsnosť povrchu po kolapse pri skúškach v ťahu. V prípade pevnosti v ťahu mali najhoršie výsledky vzorky zahriate na viac ako 600°C a chladené vo vode. Vzorky zahriate na 400°C a menej mali približne rovnaké zmeny hodnôt pevnosti v ťahu. V prípade rýchlosti P vlny bol najvyšší pokles v rýchlosti sledovaný u vzoriek ochladzovaných vo vode.

Pires a kolektív [40] sa vo svojej štúdii zaoberali tromi typmi žule z Portugalska, ktorá sa celosvetovo využíva pri obkladaní fasád budov. V rámci experimentu boli použité dva sety vzoriek. Prvý set s rozmermi 120 mm x 60 mm x 10 mm slúžil na výskum zmeny vlastností po ohreve na vysokú teplotu (500°C) a následnom rýchlom ochladení vo vode na izbovú teplotu. Druhý set vzoriek s rozmermi 150 mm x 30 mm x 25 mm bol využitý na určenie referenčných hodnôt. Štúdia ukázala, že na každý typ žule malo tepelné zaťaženie iný účinok, a taktiež že v prípade požiaru je nutné zohľadniť hrúbku materiálu.

1.2.6 Zhrnutie

Uvedené štúdie sa zaoberali rôznymi druhmi prírodných kameňov z rozdielnych oblastí po celom svete, napríklad žulou z kanadskej oblasti Laurentian, pieskovcom z oblasti Shanxi v Číne, vápencami z rôznych oblastí vo Francúzsku, mramorom z talianskej oblasti Valdieri a do jedného experimentu bol zapojený aj umelo vyrobený materiál. Vzorky podstupovali ohrev v peci rôznymi rýchlosťami, na rozdielne teploty, a taktiež rôzne spôsoby chladenia. V žiadnej zo štúdií však nebol skúmaný kameň pochádzajúci z Česka.

Tento experiment sa preto zaoberá dvoma v minulosti najviac využívanými materiálmi na Českom území, pieskovcom a opukou. Na vzorkách s rozmermi približne

Ø35mm x 50 mm - 70 mm, budú po zohriatí a následnom ochladení vykonané skúšky pevnosti v tlaku za účelom odhalenia zmeny základných mechanických vlastností vplyvom vysokej teploty.

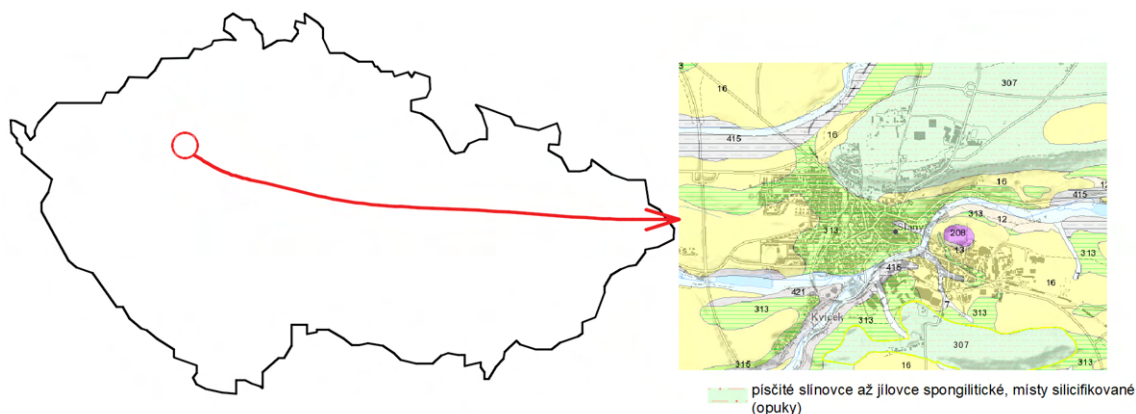
Kapitola 2

Experimentálna časť

Experimentálne overenie vlastností vybraných materiálov prebehlo v technickom laboratóriu ČVUT s asistenciou pána Ing. Radka Ziglera, PhD., ktorý mal na starosti obsluhu prístrojov. Presný pracovný postup zaťažovania prírodného kameňa po ohriatí na vysoké teploty, a následnom ochladení, nie je popísaný v žiadnej norme. Z tohto dôvodu bol pracovný postup zostavený najmä na základe rešerše, uvedenej v teoretickej časti tejto práce.

2.1 Príprava vzoriek

2.1.1 Opuka



Obr. 2.1: Opuka-lokalita, legenda farieb viď zdroj [41]

Vzorky opuky boli odobrané z lomu v okolí mesta Slaný, viď obrázok 2.1. Použité vzorky boli valcového tvaru s priemerom cca 35 mm a výškou cca 70 mm, presné hodnoty boli vypočítané ako priemerná hodnota z troch meraní a sú uvedené v tabuľke 2.1. Celkom bolo skúšaných 15 vzoriek, 3 referenčné vzorky, ktoré neboli zahrievané, a následne po 3 vzorky pre každú skúšanú teplotu (180°C, 460°C, 620°C a 900°C). U niektorých vzoriek opuky (O3, O5, O6, O14, O15) je možné vidieť prítomnosť iného materiálu formou žilky hnedej farby, ktorý môže ovplyvniť správanie vzoriek pri skúškach pevnosti v tlaku. Skúšky v jednoosom tlaku môže taktiež ovplyvniť orientácia jednotlivých vrstiev, a teda či sila pôsobí kolmo na vrstvy alebo rovnobežne s vrstvami, no prípade vzoriek opuky nie je voľným okom možné určiť orientáciu jednotlivých vrstiev.



Obr. 2.2: Vzorky opuky

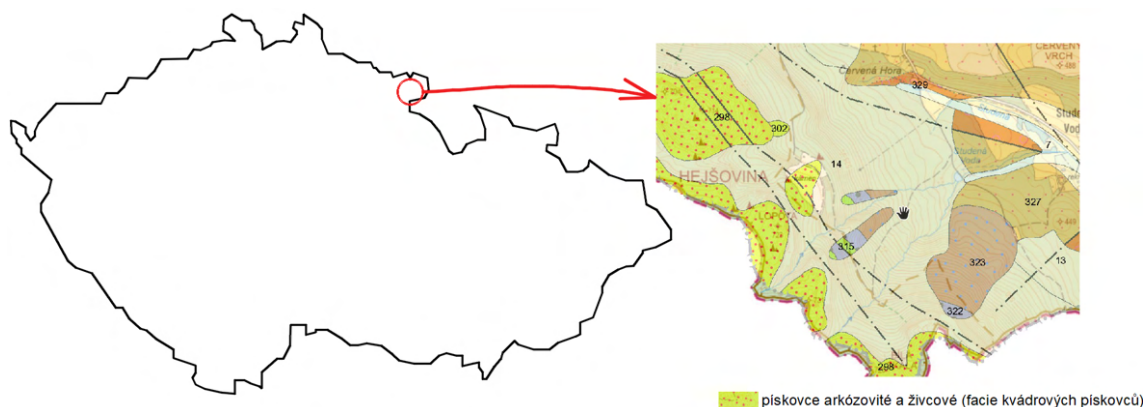


Obr. 2.3: Vzorky opuky

Vzorka	$\varnothing(mm)$	$h(mm)$	$A(mm^2)$	$m(g)$
O1	35.02	69.05	963.08	-
O2	35.02	70.59	963.08	-
O5	35.02	73.87	963.21	137.08
O6	35.05	71.89	964.86	140.85
O7	35.08	70.12	966.24	125.80
O8	35.05	70.71	964.73	130.99
O9	34.60	71.68	940.25	122.79
O11	34.92	69.91	957.58	139.91
O12	34.94	70.70	958.68	137.02
O13	34.71	70.99	946.10	142.89
O14	34.88	70.46	955.39	122.98
O15	34.94	70.43	958.54	138.22
O16	34.85	70.76	953.61	131.01
O17	34.97	71.07	960.46	-
O18	34.82	70.02	951.97	123.23
O19	34.92	70.48	957.72	138.27
O20	34.94	71.21	958.82	144.42

Tabuľka 2.1: Rozmery vzoriek opuky

2.1.2 Pieskovce



Obr. 2.4: Pieskovce-lokalita, legenda farieb viď zdroj [42]

Druhou vybranou horninou bol božanosvský pieskovce, pochádzajúci z lomu v oblasti Broumovských stien na hranici s Poľskom, viď obrázok 2.4. Celkom bolo skúšaných 15 vzoriek, z toho 3 referenčné vzorky, ktoré neboli zahrievané, a po 3 vzorky, ktoré boli zahrievané na teploty 180°C, 460°C, 620°C a 900°C. V prípade vzoriek pieskovca možno vidieť orientáciu jednotlivých vrstiev, pričom vrty boli robené kolmo na vrstvy. U vzorky číslo 6 možno pozorovať priečnu trhlinu, viď. obrázok 2.5.



Obr. 2.5: Vzorka P6 s vyznačenou trhlinou

Skúšobné telesá boli valcového tvaru s priemerom približne 35 mm a výškou v rozmedzí od 55 mm do 70 mm. Presné rozmery boli vypočítané ako priemerná hodnota z troch meraní a sú uvedené v tabuľke 2.2. U vzoriek pieskovca s výškou okolo 55 mm by bolo vhodné upraviť namerané hodnoty pevnosti v tlaku, tak aby ich bolo možné porovnávať s ostatnými vzorkami. Existuje viacero spôsobov, ktoré možno použiť. V tejto práci budú hodnoty upravené súčiniteľom tvaru δ^{NP2} stanoveným podľa normy ČSN EN 772-1+A1 [43], ktorého hodnota je približne 91% nameranej hodnoty pevnosti v tlaku.

Obr. 2.6: Vzorky pieskovca, $h \approx 55\text{mm}$ Obr. 2.7: Vzorky pieskovca, $h \approx 70\text{mm}$

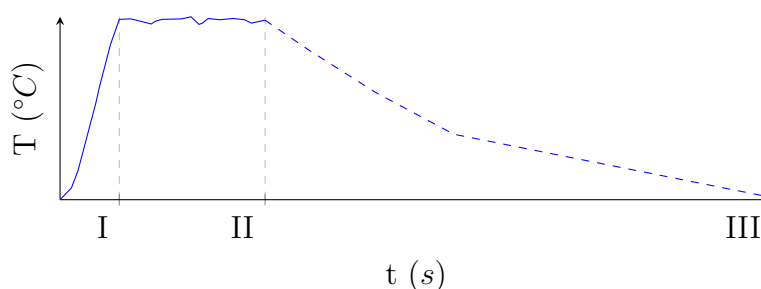
Vzorka	$\varnothing(\text{mm})$	$h(\text{mm})$	$A(\text{mm}^2)$	m (g)
P1	35.35	62.92	981.45	125.81
P2	35.34	62.01	980.90	123.88
P3	35.37	70.16	982.42	139.10
P4	35.35	70.10	981.17	139.02
P5	35.35	70.10	981.31	140.93
P6	35.36	70.01	982.15	139.12
P7	35.33	69.95	980.34	140.81
P8	35.35	53.95	981.17	106.69
P9	35.34	53.64	980.90	107.29
P10	35.35	54.76	981.45	109.50
P11	35.35	54.88	981.17	108.63
P12	35.33	55.38	980.34	110.35
P13	35.33	54.25	980.34	107.97
P14	35.34	55.12	980.76	109.84
P15	35.33	54.99	980.34	109.70
P16	35.33	57.34	980.34	114.11

Tabuľka 2.2: Rozmery vzoriek pieskovca

2.2 Metódy

2.2.1 Ohrievanie a chladenie vzoriek

Zahrievanie vzoriek bolo uskutočnené pomocou elektrickej muflovej pece vid obr. 2.9. Vzorky boli zahrievané na 4 rôzne teploty, a to 180°C, 460°C, 620°C a 900°C, ktoré boli zvolené na základe predchádzajúcich štúdií. Zohrievanie jednotlivých vzoriek pozostávalo z troch štádií, prvé štádium bol ohrev vzoriek na požadovanú teplotu. Potom boli vzorky približne hodinu ponechané v zapnutej peci, aby sa zabezpečilo dostatočné prehriatie vzoriek, a nato nasledovalo voľné ochladenie vzoriek v peci na referenčnú teplotu, vid obr. 2.8.



Obr. 2.8: Ohrev vzoriek

Na základe štúdií uvedených v kapitole 1.2.5 je však nutné zobrať do úvahy negatívny vplyv chladenia materiálu vodou, a teda predpokladať horšie mechanické vlastnosti jednotlivých materiálov po tejto forme chladenia. Teploty vzoriek boli počas ohrevu v peci sledované pomocou dvoch termočlánkov typu CL3512A od spoločnosti Omega (obr.2.10).



Obr. 2.9: Elektrická muflovacia pec



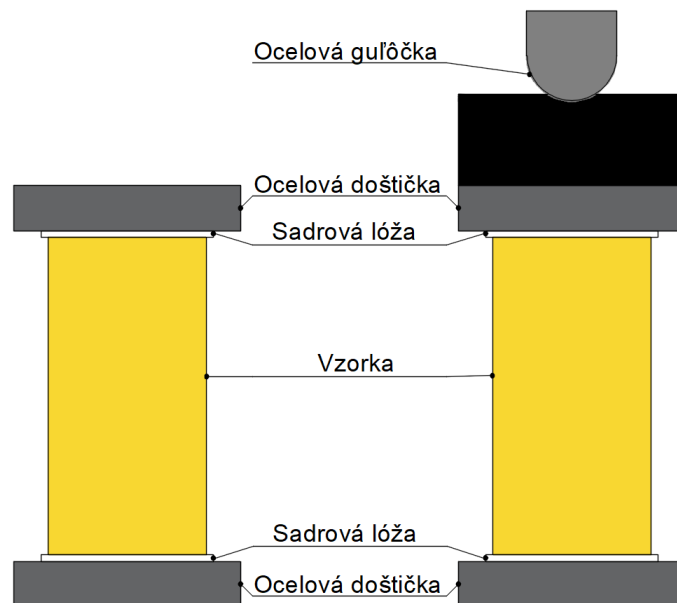
Obr. 2.10: Termočlánok OMEGA

2.2.2 Skúšky v tlaku

Vzorky boli skúšané v prostom tlaku pomocou univerzálneho skúšobného prístroja LabTest 4.100.SP1, ktorý má maximálne menovité zaťaženie 100 kN, viď obr. 2.13. Bola zvolená konštantná rýchlosť zaťažovania s hodnotou 1 mm/min u referenčných vzoriek, no táto rýchlosť bola príliš vysoká, a preto bola u ohrievaných vzoriek zvolená konštantná rýchlosť zaťažovania 0.25 mm/min. Vzorky boli pred skúškou v tlaku osadené do sadrovej lóže, na ocelové doštičky, viď obr. 2.11, aby bolo zabezpečené rovnomerné pôsobenie tlaku na celú plochu vzorky. Pre zabezpečenie kĺbového pripojenia bola na hornú ocelovú doštičku umiestnená ocelová doštička s ocelovou guľôčkou, viď schéma 2.11. Výsledky merania boli zaznamenávané pomocou krivky závislosti maximálneho zaťaženia k pozdĺžnemu pretvoreniu. Aby bolo možné vzorky navzájom porovnať, bola maximálna sila v kN pomocou vzťahu 2.1 prevedená na pevnosť v tlaku v MPa, a pozdĺžne pretvorenie v mm pomocou vzťahu 2.2 na bezrozmerné pomerné pozdĺžne pretvorenie.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

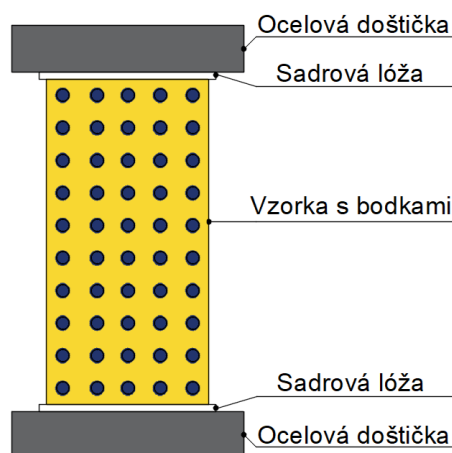
$$\varepsilon_v = \frac{\Delta h}{h} \quad (2.2)$$



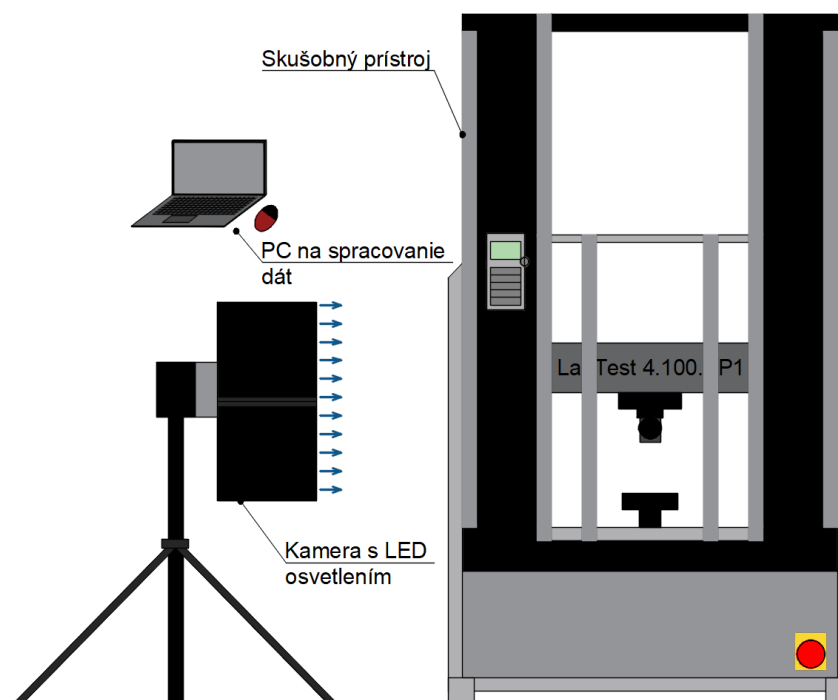
Obr. 2.11: Vľavo: osadenie do sadrovej lóže, vpravo: vzorka s kĺbovým pripojením

2.2.3 Digitálna obrazová korelácia

Počas skúšok v prostom tlaku bola využitá technológia digitálnej obrazovej korelácie, vďaka ktorej bolo možno získať informácie o priestorových pomerných deformáciách a posunutiach u jednotlivých vzoriek. Počas tohto procesu je vytvorená virtuálna mriežka, ktorá rozdelí pozorovanú oblasť na menšie časti tzv. fazety. Aby bolo možné sledovať deformácie jednotlivých bodov, tak musia fazety obsahovať charakteristické črty (napr. vzor alebo body). Z tohto dôvodu, boli v prípade opuky, pred začiatkom zaťažovania, na jednotlivé vzorky nakreslené malé bodky, viď obr. 2.12. V prípade pieskovca toto opatrenie nebolo nutné z dôvodu vzorovaného povrchu vzoriek. Meracia zostava sa skladala z kamery, LED osvetlenia a software na zaznamenávanie a spracovanie informácií (obr.2.13). Rýchlosť zaznamenávania bola uvažovaná 50 snímok za sekundu. [44], [45]



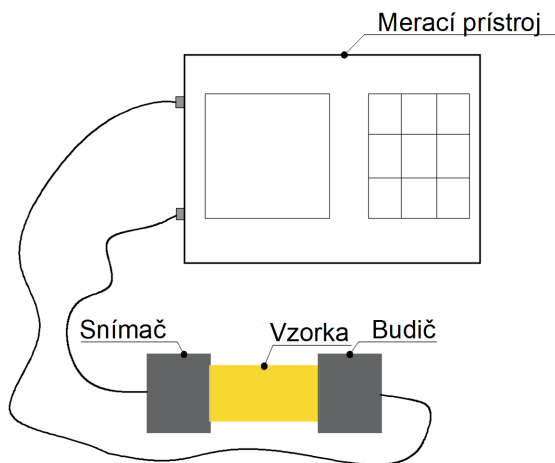
Obr. 2.12: Opuka, schematické zaznačenie bodiek



Obr. 2.13: Zostava

2.2.4 Rýchlosť ultrazvukovej vlny

Rýchlosť ultrazvukovej vlny v pozdĺžnom smere bola u vzoriek sledovaná pomocou prístroja Tico od firmy Proceq. Rýchlosť ultrazvukovej vlny bola zmeraná u všetkých vzoriek pri referenčnej teplote, okrem vzoriek P1 a P2, O1, O2 a O17.



Obr. 2.14: Schéma zapojenia



Obr. 2.15: Prístroj na meranie ultrazvukovej rýchlosti

Hodnoty rýchlosti ultrazvukovej vlny sú uvedené tabuľke 2.3. Možno konštatovať, že u vzoriek pieskovca sa rýchlosť ultrazvukovej vlny pohybuje v rozmedzí 3030 m/s až 3170 m/s, z čoho možno predpokladať podobné mineralogické zloženie všetkých vzoriek. U vzoriek opuky je však rozptyl hodnôt rýchlosti ultrazvukovej vlny pomerne veľký. Najmenšiu hodnotu rýchlosti ultrazvukovej vlny mala vzorka O9 ($c=2680$ m/s) a najvyššia hodnota rýchlosti ultrazvukovej vlny bola nameraná u vzorky O20 ($c=4250$ m/s). U ostatných vzoriek sa hodnota rýchlosti ultrazvukovej vlny pohybovala v rozmedzí 2900 m/s až 3610 m/s. Dôvodom rozdielnych rýchlostí jednotlivých vzoriek by mohlo byť nerovnaké mineralogické zloženie vzoriek. Ďalším dôvodom by mohla byť aj anizotropia materiálu, pretože opuka je sedimentárna hornina, a predpokladá sa, že bude mať rozdielne vlastnosti v smere pôsobiacom kolmo na vrstvy a rovnobežne s vrstvami. Orientácia vrstiev však nebola u vzoriek použitých v tomto experimente voľným okom viditeľná.

Pieskovec	$c(m/s)$	Opuka	$c(m/s)$
P1	-	O1	-
P2	-	O2	-
P3	3060	O5	3100
P4	3030	O6	3380
P5	3110	O7	3310
P6	3070	O8	2900
P7	3100	O9	2680
P8	3110	O11	3300
P9	3090	O12	3350
P10	3090	O13	3610
P11	3110	O14	2950
P12	3090	O15	3510
P13	3180	O16	3000
P14	3130	O17	-
P15	3090	O18	3070
P16	3170	O19	3440
		O20	4250

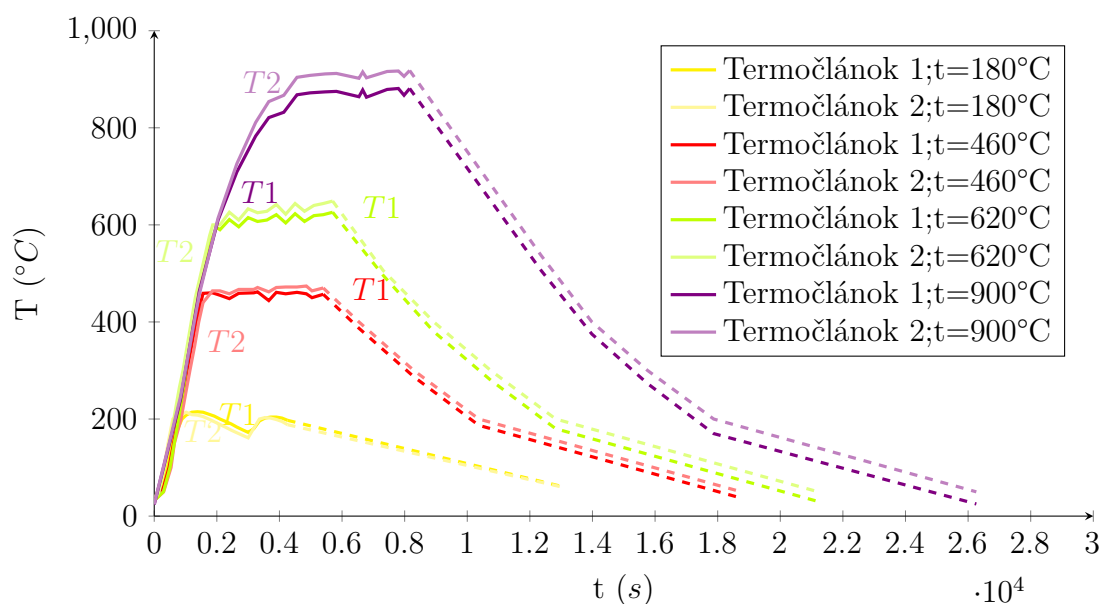
Tabuľka 2.3: Rýchlosť ultrazvukovej vlny

2.3 Vyhodnotenie

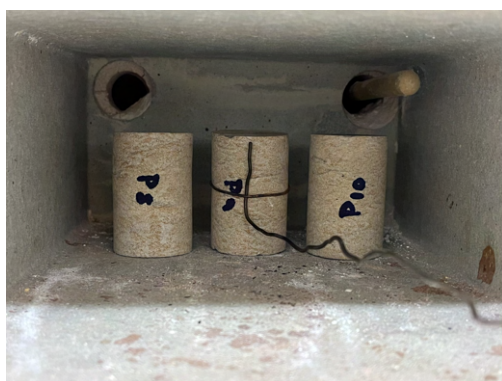
2.3.1 Ohrev vzoriek

V nasledujúcom grafe na obr.2.16 sú uvedené krivky ohrevu a ochladzovania vzoriek pre sledované teploty (180°C, 460°C, 620°C, 900°C). Rýchlosť ohrevu vzoriek sa pohybovala v rozmedzí od 16°C/min do 18°C/min. Po dosiahnutí požadovanej teploty vzoriek, boli vzorky ponechané v zapnutej peci približne hodinu, pričom teplota vzoriek sa pohybovala v rozmedzí $\pm 50^\circ\text{C}$. Následne bola pec vypnutá a vzorky sa voľne chladili pri otvorených dverkách pece.

Nárast teploty počas reálneho požiaru je značne rýchlejší ako počas laboratórnych skúšok. Konštrukcie budov sú však, v porovnaní so vzorkami použitými v experimentoch, masívnejšie a zaberie dlhší čas kým sa celé zahrejú. Z tohto dôvodu by pomalší ohrev vzoriek pri experimentálnych skúškach nemal mať významný vplyv na konečné mechanické vlastnosti.



Obr. 2.16: Krivky ohrevu vzoriek pre jednotlivé teploty



Obr. 2.17: Vzorky v peci pred ohrevom



Obr. 2.18: Vzorky v peci po ohreve

2.3.2 Vizuálna zmena po zahriatí vzoriek

V nasledujúcej sekcii sú pre porovnanie uvedené obrázky jednotlivých vzoriek pri referenčnej teplote a po vytiahnutí z pece.

V prípade vzoriek pieskovca možno vidieť viacero vrstiev, ktoré sú rovnobežné po výške vzorky. U referenčných vzoriek možno pozorovať farbu jednotlivých vrstiev, ktorá je biela až svetlo sivá a okrová (obr.2.24). V prípade vzoriek opuky nemožno určiť jednotlivé vrstvy voľným okom. Vzorky majú pri referenčnej teplote bielu až bielosivú farbu, prípadne je u niektorých vzoriek možno vidieť hnedasté žilky (obr.2.19).

Na obrázkoch 2.55 a 2.25 vidieť vzorky po zahriatí na teplotu 180°C. U vzoriek oboch druhov kameňa nie sú voľným okom pozorované takmer žiadne rozdiely vo farbe, v porovnaní s neohrievanými vzorkami.

Po zahriatí vzoriek na teplotu 460°C bola viditeľná zmena ich farby. Vzorky opuky sa z pôvodnej svetlo sivej farby po zahriatí zmenili na svetlo oranžovo-červenú farbu, vid obr.2.21. Zatiaľčo u vzoriek opuky sa farba zmenila pomerne rovnomerne, u vzoriek pieskovca sa viditeľne zmenila farba len niektorých vrstiev, a to na výraznejšiu oranžovo-červenú farbu, vid obr.2.26.

Pri ďalšom zohrievaní na teplotu 620°C vzorky stmavli v porovnaní so vzorkami zahriatych na teplotu 460°C. Vzorky opuky boli po vytiahnutí z pece tehlovo hnedej farby, viď obr.2.22. V prípade vzoriek pieskovca boli niektoré vrstvy ešte výraznejšej, tmavšej červenej farby, viď obr.2.27.

Posledná sada vzoriek zohrievaná na teplotu 900°C mala po vytiahnutí z pece veľmi podobnú farbu ako mala sada vzoriek zohrievaná na teplotu 620°C ako možno vidieť na obrázkoch 2.23 v prípade opuky a 2.28 v prípade pieskovca. Zmena farby po zahriatí vzoriek mohla byť spôsobená prítomnosťou rôznych minerálov ako napríklad železa, ktoré vplyvom vysokej teploty menia svoju farbu.



Obr. 2.19: O1, O2, O17, T26



Obr. 2.20: O18, O19, O20, T180



Obr. 2.21: O7, O8, O9, T460



Obr. 2.22: O11, O12, O13, T620



Obr. 2.23: O14, O15, O16, T900



Obr. 2.24: P1, P2, P7, T26



Obr. 2.25: P3, P4, P5, T180



Obr. 2.26: P14, P15, P16, T460



Obr. 2.27: P11, P12, P13, T620



Obr. 2.28: P8, P9, P10, T900

2.3.3 Skúška pevnosti v jednoosom tlaku

Výsledky skúšok v jednoosom tlaku pri referenčnej teplote a po tepelných cykloch sú uvedené v tabuľke 2.4 a pracovné diagramy jednotlivých vzoriek možno vidieť na obrázkoch 2.35, 2.36. Výsledky pevnosti v tlaku sú taktiež uvedené aj v závislosti na teplote, a to na obrázkoch 2.29, 2.30 a závislosť pozdĺžneho pomerného pretvorenia od teploty je uvedená na obrázkoch 2.31, 2.32.

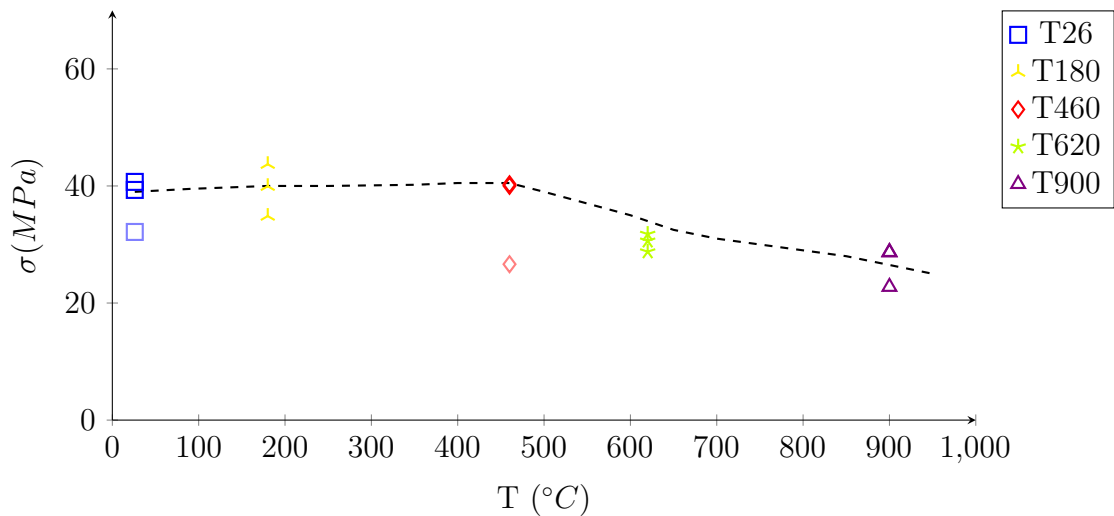
$T(^{\circ}C)$	Vzorka	$\sigma(MPa)$	$\varepsilon_v(-)$	$E_S(GPa)$
26	P1	*440.694	0.00175	23.44
	P2	*39.322	0.00339	17.58
	P7	32.143	0.0014	20.73
	O1	33.812	0.00265	17.74
	O2	24.031	0.00441	13.49
	O17	60.272	0.00224	30.10
180	P3	34.878	0.00204	20.74
	P4	39.954	0.00235	22.20
	P5	43.742	0.00205	21.00
	O18	31.957	0.00166	24.40
	O19	53.951	0.00201	28.34
	O20	61.239	0.00222	32.05
460	P14	*26.631	0.00158	18.67
	P15	*40.288	0.00298	20.66
	P16	*40.031	0.00297	19.12
	O7	37.462	0.00231	15.80
	O9	37.501	0.00555	10.51
620	P11	*28.777	0.00385	15.15
	P12	*31.781	0.00598	12.13
	P13	*30.627	0.00527	12.45
	O11	48.267	0.00325	15.18
	O12	53.548	0.00341	14.46
900	P8	*28.722	0.00745	7.77
	P9	*22.761	0.0055	6.18
	P10	*28.646	0.0074	8.17
	O14	40.198	0.00321	14.67
	O15	21.143	0.00226	9.76
	O16	37.234	0.00133	28.50

Tabuľka 2.4: Mechanické vlastnosti jednotlivých vzoriek opuky a pieskovca
* označené vzorky, ktorých hodnoty boli upravené korekčným súčiniteľom δ^{NP2}

Ako je možné vidieť na obrázku 2.29, tak hodnota pevnosti v tlaku vzoriek pieskovca sa vplyvom pôsobiacej teploty výrazne menila až u vzoriek zohriatych na teploty 620°C a 900°C. U týchto vzoriek možno pozorovať klesajúcu tendenciu

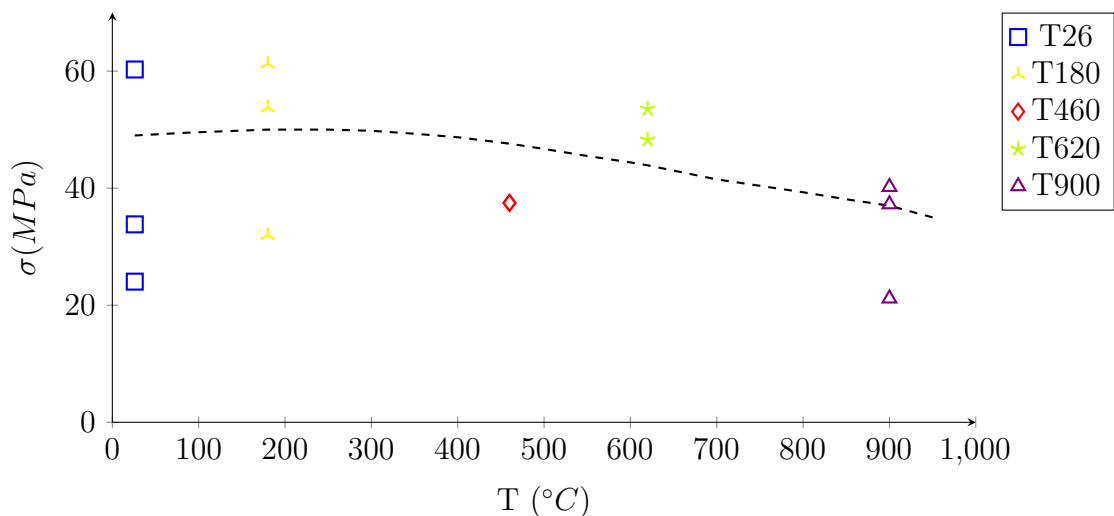
hodnôt pevnosti v tlaku so zvyšujúcou sa hodnotou teploty. Hodnota maximálnej pevnosti vzoriek zohriatych na teplotu 620°C sa pohybovala v rozmedzí 28.8 MPa až 31.8 MPa (72% – 79%) a vzoriek zohriatych na teplotu 900°C v rozmedzí 22.8 MPa až 38.7 MPa (57% – 72%).

V prípade vzoriek zohriatych na nižšiu teplotu ako 460°C, však neboli pozorované výrazné zmeny v pevnosti v tlaku. Hodnoty sa pohybovali v rozmedzí 34.9 MPa až 43.7 MPa (87% – 109%) u vzoriek zohriatych na teplotu 180°C a vzoriek zohriatych na teplotu 460°C boli hodnoty pevnosti v tlaku približne 40 MPa (100.5%). Výsledky boli preto porovnateľné s hodnotami referenčných vzoriek, kedy maximálna pevnosť dosahovala približne 40 MPa (100%, $\pm 2\%$). Vzorky P7 a P14 boli uvažované ako odľahlé meranie.



Obr. 2.29: Pieskovec, závislosť σ na T

V prípade vzoriek opuky boli, vplyvom povahy tejto horniny, hodnoty pevnosti v tlaku pri jednotlivých teplotách viac rozptýlené, viď 2.30. Z dôvodu obmedzeného počtu vzoriek je však komplikované určiť odľahlé merania. No aj napriek tomu je možné pozorovať mierne klesajúci trend v hodnotách pevnosti v tlaku u vzoriek zohriatych na teploty 460°C, 620°C a 900°C.

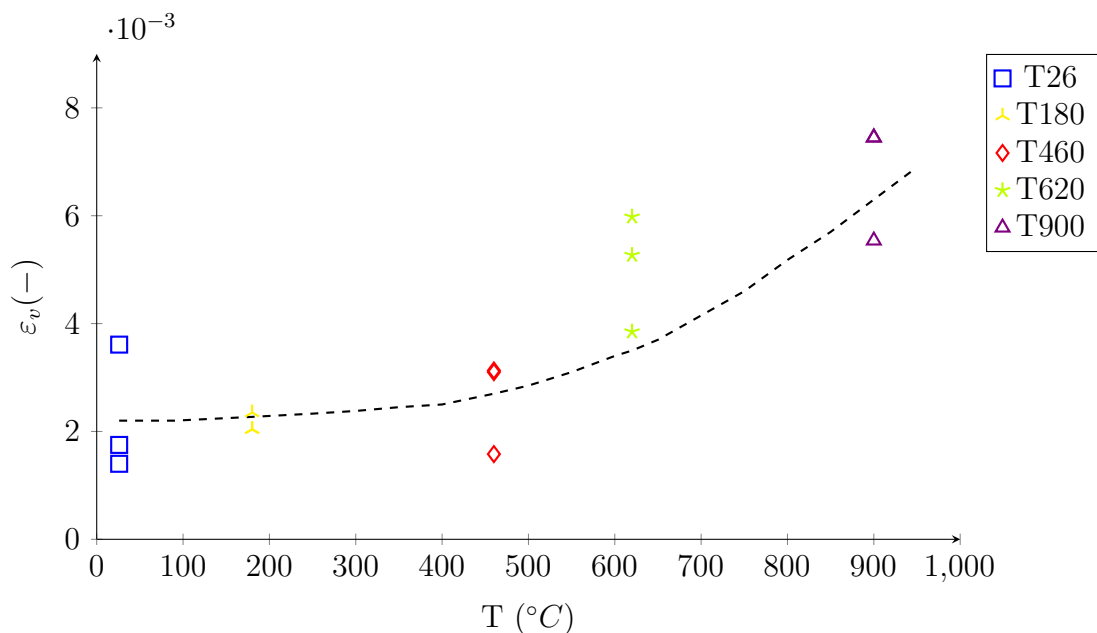


Obr. 2.30: Opuka, závislosť σ na T

U referenčných vzoriek opuky boli namerané hodnoty pevnosti v tlaku 24 MPa (49%), 33.8 MPa (69%) a 60.3 MPa (123%). Po zahriatí na teplotu 180°C, boli hodnoty pevnosti v tlaku 32 MPa (65%), 54 MPa (110%) a 61.2 MPa (125%). V prípade vzoriek zohriatych na teplotu 460°C, boli namerané hodnoty približne 37.5 MPa (76.5%). Vzorky zahriate na teplotu 620°C dosahovali pevnosti v tlaku v rozmedzí 48.3 MPa až 53.5 MPa (98% – 109%) a vzorky zahriate na teplotu 900°C dosahovali hodnoty pevnosti v tlaku 21.1 MPa (43%), 37.2 MPa (76%) a 40.2 MPa (82%).

Závislosť pomerného pozdĺžneho pretvorenia na teplote u vzoriek pieskovca je vyjadrená na obrázku 2.31. Vzorky pieskovca vykazovali zreteľný nárast hodnôt pomerného pozdĺžneho pretvorenia pri zahriatí na teploty 620°C a 900°C, v porovnaní s hodnotami nameranými pre referenčné vzorky. Hodnoty pomerného pozdĺžneho pretvorenia po zahriatí na teplotu 620°C boli 0.00385 (175%), 0.00527 (240%) a 0.00598 (272%) a po zahriatí na teplotu 900°C boli hodnoty 0.0055 (250%), 0.0074 (336%) a 0.00745 (339%).

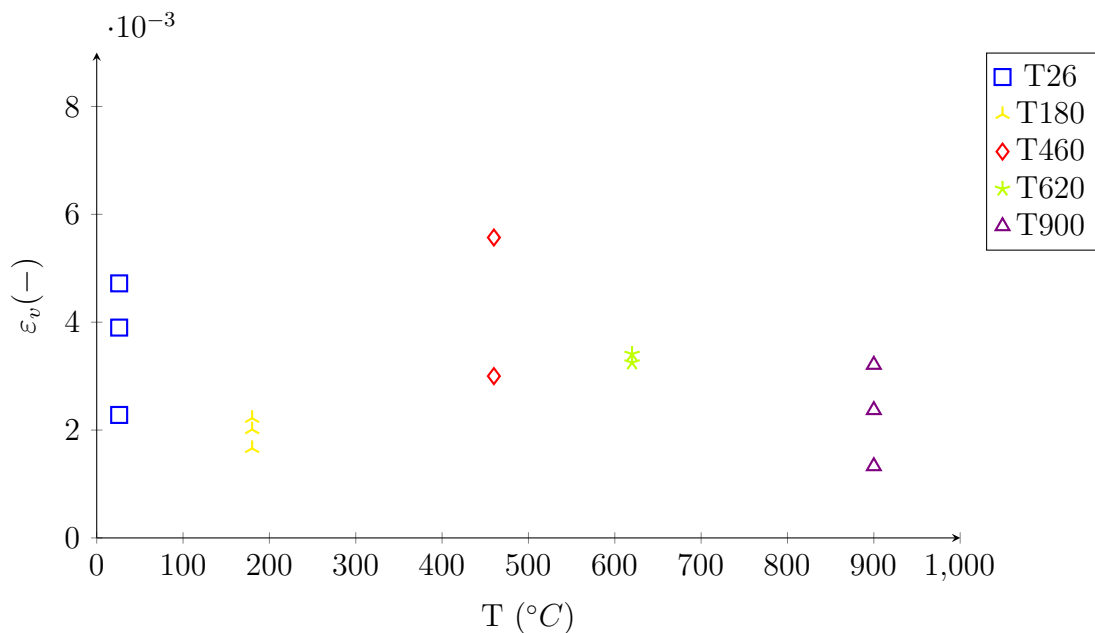
V prípade vzoriek zohriatych na nižšie teploty sa hodnoty pomerného pozdĺžneho pretvorenia pohybovali na hodnotách porovnateľných s hodnotami nameranými u referenčných vzoriek. U neohrievaných vzoriek, boli namerané hodnoty pomerného pozdĺžneho pretvorenia 0.0014 (64%), 0.00175 (80%) a 0.00339 (154%). U vzoriek zohriatych na teplotu 180°C sa hodnoty pohybovali v rozmedzí 0.00204 až 0.00235 (93% – 107%). Vzorky zahriate na 460°C dosahovali hodnôt pomerného pozdĺžneho pretvorenia 0.00158 (72%), 0.00297 (135%) a 0.00298 (135.5%).



Obr. 2.31: Pieskovec, závislosť ε_v na T

Závislosť hodnôt pomerného pozdĺžneho pretvorenia od meniacej sa teploty nebola v prípade vzoriek opuky presvedčivá, viď obr. 2.32. Hodnoty pomerného pozdĺžneho pretvorenia sa u všetkých vzoriek pohybovali v rozmedzí od 0.00133 do 0.00555.

Neohrievané vzorky dosahovali hodnoty 0.00224 (77%), 0.00265 (91%) a 0.00441 (152%). Vzorky zahrievané na teplotu 180°C mali hodnoty pomerného pozdĺžneho pretvorenia v rozmedzí od 0.00166 do 0.00222 (57% – 77%). V prípade vzoriek zohriatych na teplotu 460°C boli namerané hodnoty pomerného pozdĺžneho pretvorenia 0.00231 (80%) a 0.00555 (191%). U vzoriek ohrievaných na 620°C boli hodnoty 0.00325 (112%) a 0.00341 (118%) a vzorky zahriate na teplotu 900°C dosahovali hodnôt pomerného pozdĺžneho pretvorenia 0.00133 (46%), 0.00226 (78%) a 0.00321 (111%).

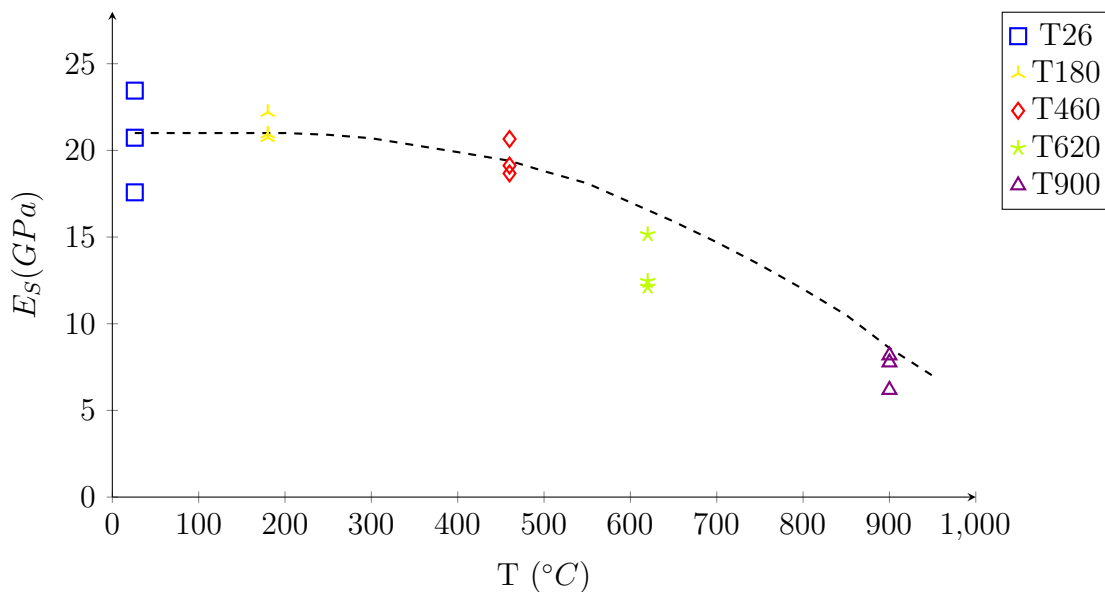
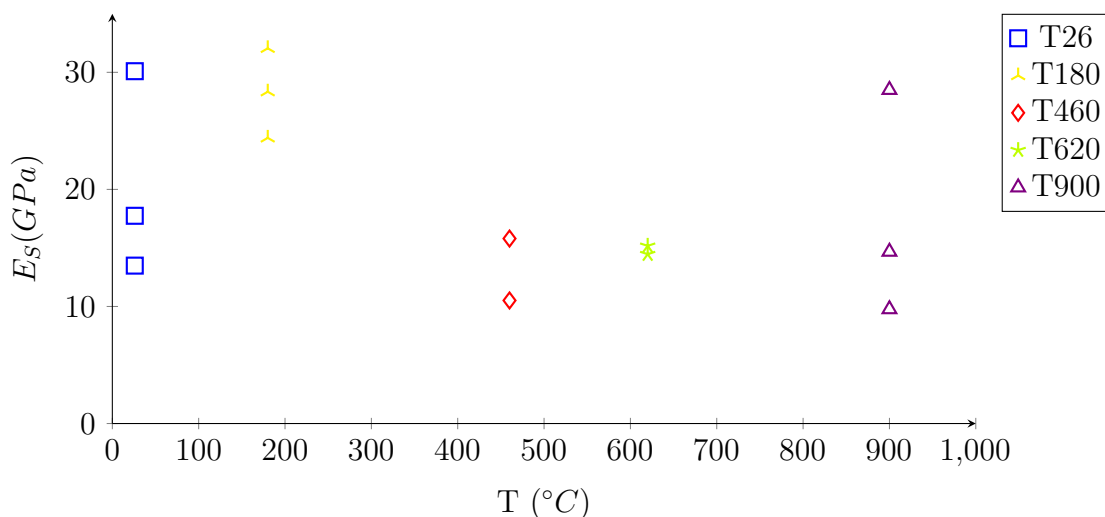


Obr. 2.32: Opuka, závislosť ε_v na T

Hodnoty Youngovho modulu pružnosti v prípade vzoriek pieskovca postupne klesali so zvyšujúcou sa teplotou ohrevu (2.33). Hodnoty sa u referenčných vzoriek pohybovali v rozmedzí 17.5 GPa až 23.4 GPa (80% – 107%). Podobné hodnoty modulu pružnosti boli aj u vzoriek zohriatych na teploty 180°C a 460°C, a to v rozmedzí 20.7 GPa až 22.2 GPa (94% – 101%), u vzoriek zohriatych na teplotu 180°C a v rozmedzí 18.7 GPa až 20.7 GPa (85% – 94%) u vzoriek zohriatych na teplotu 460°C.

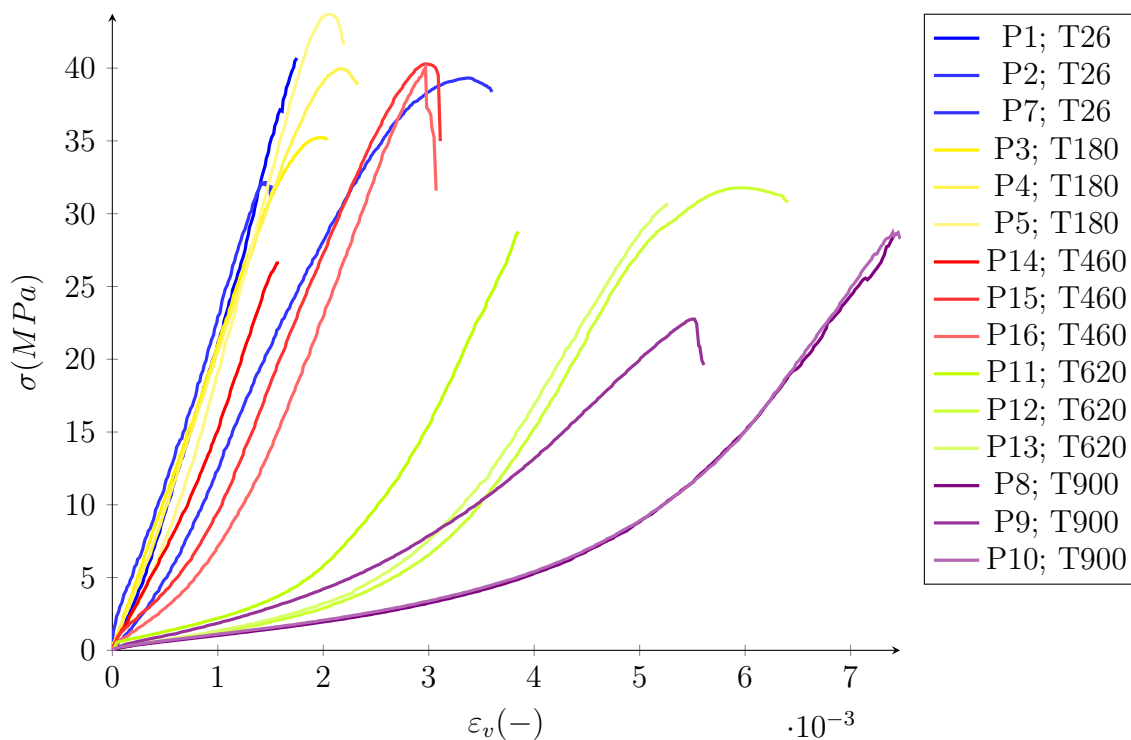
V prípade vzoriek zohriatych na teplotu 620°C bol pozorovaný pokles hodnôt modulu pružnosti, pričom hodnoty sa pohybovali v rozmedzí od 12.1 GPa do 15.1 GPa (55% – 69%). Klesajúci trend pokračoval aj u vzorkách zohriatych na teplotu 900°C, kedy sa hodnoty modulu pružnosti pohybovali v rozmedzí od 6.2 GPa do 8.2 GPa (28% – 37%).

Youngov modul pružnosti v prípade vzoriek opuky nevykazoval značnú závislosť na teplote (2.34). U všetkých vzoriek, modul pružnosti nadobúdal hodnoty od 9.7 GPa u vzorky O14 zahrievanej na teplotu 900°C až po 32.1 GPa u vzorky O20 zahrievanej na teplotu 180°C.

Obr. 2.33: Pieskovec, závislosť E_S na T Obr. 2.34: Opuka, závislosť E_S na T

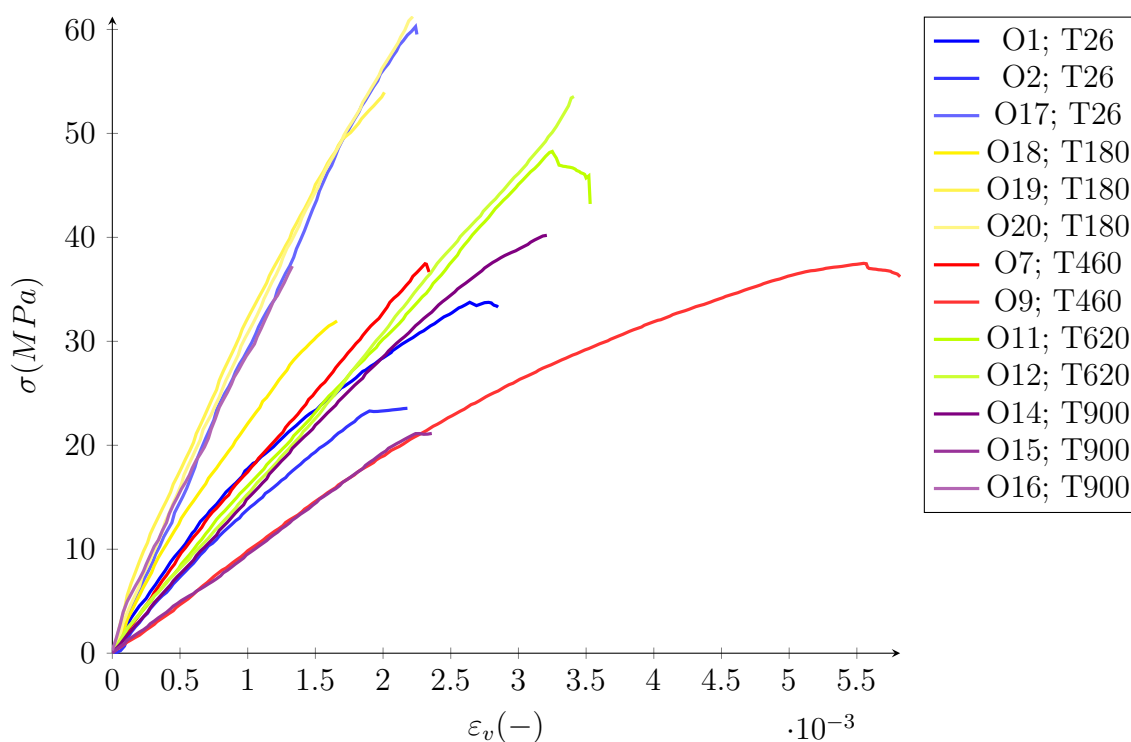
Zmenu modulov pružnosti jednotlivých vzoriek odrážajú aj krivky pracovného diagramu pieskovca a opuky (2.36 a 2.35). V prípade vzoriek pieskovca je značná zmena sklonu kriviek vplyvom teploty, zatiaľčo v prípade vzoriek opuky zmena sklonu kriviek u jednotlivých vzoriek, nie je konzistentná so zmenou teploty.

Ako možno vidieť na obrázku 2.35, krivky pieskovca sledujú pri referenčnej teplote stúpajúci trend so strmým sklonom a takmer lineárnym priebehom nárastu, pričom hodnota pomerného pretvorenia je relatívne nízka. Podobný trend sledujú aj krivky vzoriek zohriatych na teploty 180°C a 460°C. U vzoriek zohriatych na teploty 620°C a 900°C je sklon kriviek značne miernejší, s takmer exponenciálnym nárastom, pričom na začiatku zaťažovania rýchlo stúpa pomerné pretvorenie vzoriek.



Obr. 2.35: Pieskovec, závislosť σ na ε_v

Krivky napätia od pretvorenia vzoriek opuky sa nachádzajú na obrázku 2.36. Rovnako ako v prípade referenčných vzoriek pieskovca, aj v prípade vzoriek opuky je sklon kriviek pomerne strmý, s takmer lineárnym priebehom nárastu. V prípade ohrievaných vzoriek majú krivky taktiež takmer lineárny priebeh nárastu narozdiel od vzoriek pieskovca.



Obr. 2.36: Opuka, závislosť σ na ε_v

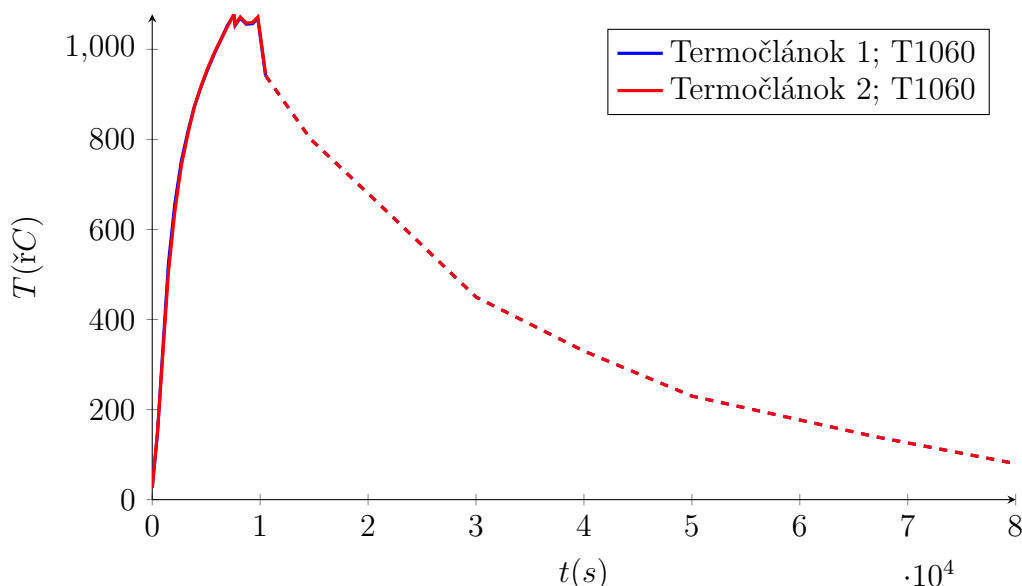
2.3.4 Vyradené vzorky

Z experimentu boli vyradené dve vzorky opuky z rôznych dôvodov. Prvá vyradená vzorka bola vzorka O8, ktorá bola zohrievaná na teplotu 460°C. U tejto vzorky boli pozorované neadekvátne výsledky počas merania.

Druhá vzorka vyradená z experimentu bola O13, ktorá bola zohrievaná na teplotu 620°C. V tomto prípade bolo uvažované odľahlé meranie, pretože nenastalo porušenie vzorky ani pri zatažení silou 76 kN. V záujme experimentu bola vzorka zatažovaná naďalej, pričom vzorka bola odťažená a znova zatažená maximálnou silou 72 kN, ani pri druhom zatažení nenastal kolaps. Pri treťom zatažovaní nastal kolaps pri zatažení silou 92.5 kN.

2.3.5 Vzorky zahrievané na teplotu 1060°C

Na teplotu 1060°C boli z nedostatočného množstva vzoriek zahrievané dve vzorky opuky, O6 a O5, a jedna vzorka pieskovca, P6. Vzorky boli ohrievané rovnakým postupom ako ostatné vzorky a ohrev vzoriek sledoval krivku uvedenú na obrázku 2.37.

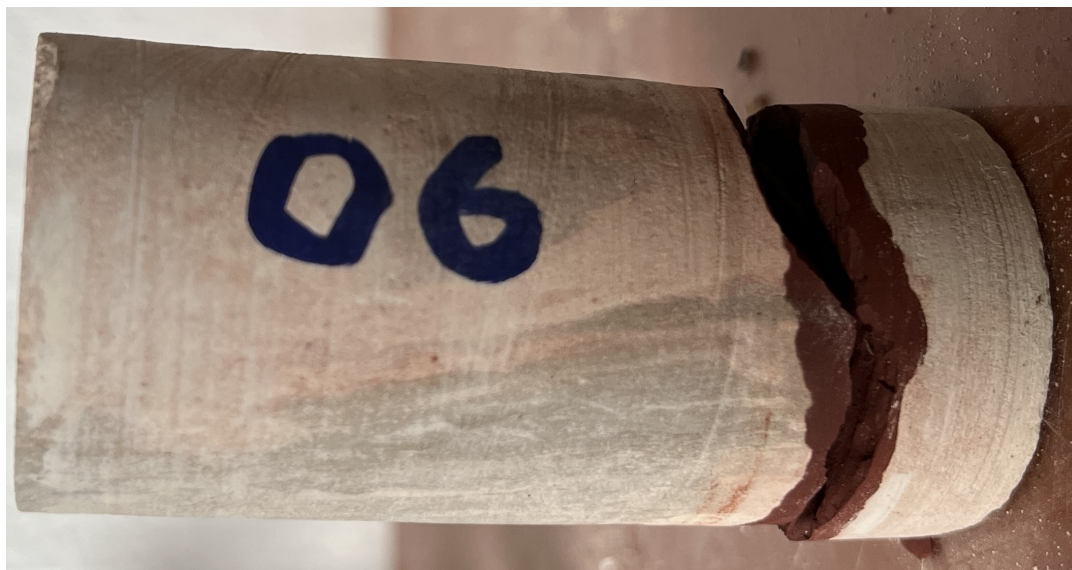


Obr. 2.37: Ohrev vzoriek na T1060

Vzorka O6 sa však porušila už pri ohreve na takú vysokú teplotu, a preto nemohla byť podrobená skúškam v jedosom tlaku, viď obr. 2.38. Z každého materiálu bola teda skúšaná jedna vzorka. Na obrázku 2.39 možno vidieť krivky napätia od pozdĺžneho pomerného pretvorenia oboch skúšaných vzoriek.

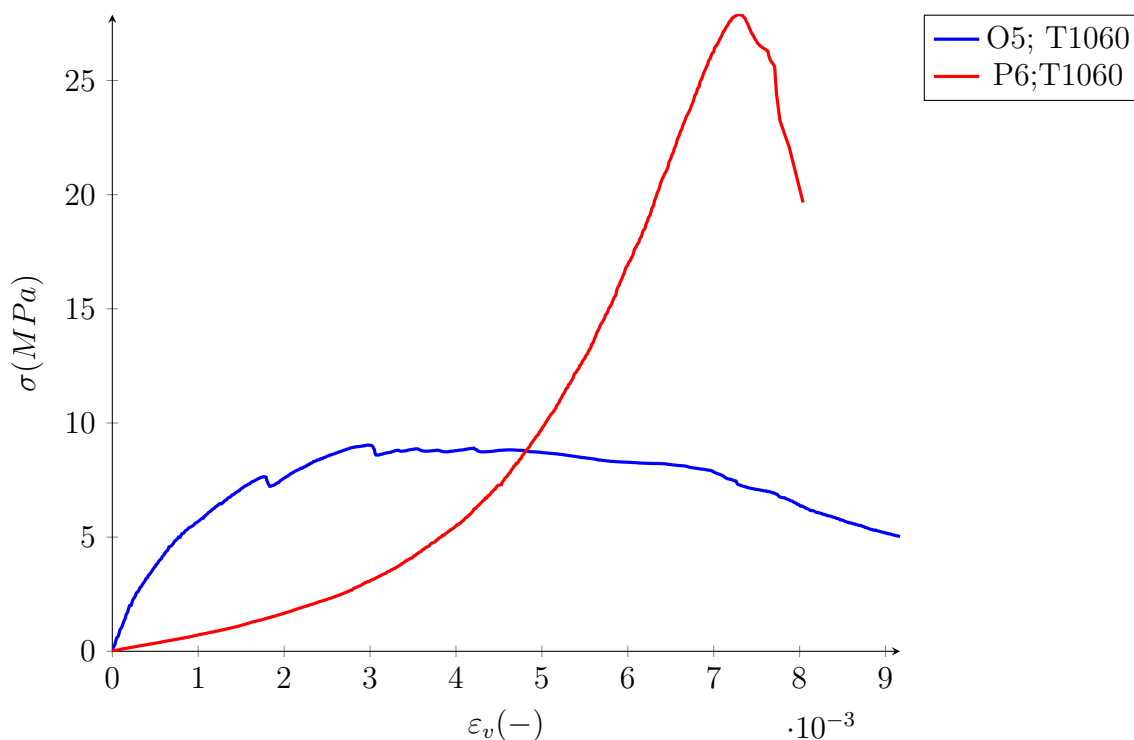
Vzorka pieskovca P6 dosahovala pevnosť v tlaku 31.24 MPa, pri pomernom pozdĺžnom pretvorení 0.00847 a module pružnosti 7.43 GPa. Priebeh krivky bol s takmer exponenciálnym nárastom, podobne ako pri vzorkách pieskovca zohriatych na teploty 620°C a 900°C, avšak vzorka dosahovala vyššiu hodnotu pomerného pozdĺžneho pretvorenia ako vzorky zahriate na teploty 900°C.

Vzorka opuky O5 dosahovala pevnosť v tlaku 9.03 MPa, pri pomernom pozdĺžnom pretvorení 0.00298 a module pružnosti 5.23 GPa. Trend krivky spočiatku prudko stúpala a po dosiahnutí maximálnej pevnosti v tlaku začal mierne klesať, pričom sa zvyšovali hodnoty pomerného pozdĺžneho pretvorenia a mierne znižovali



Obr. 2.38: O6, po vytiahnutí z pece

hodnoty maximálneho tlaku. V porovnaní s hodnotami, ktoré dosahovali vzorky opuky zahriate na teplotu 900°C , dosahovala vzorka O5 značne nižšiu hodnotu maximálnej pevnosti v tlaku. Pri pohľade na obrázok 2.39 je taktiež hneď vidieť, že správanie oboch hornín bolo počas testu v prostom tlaku úplne rozdielne.



Obr. 2.39: T1060, závislosť σ na ϵ_v

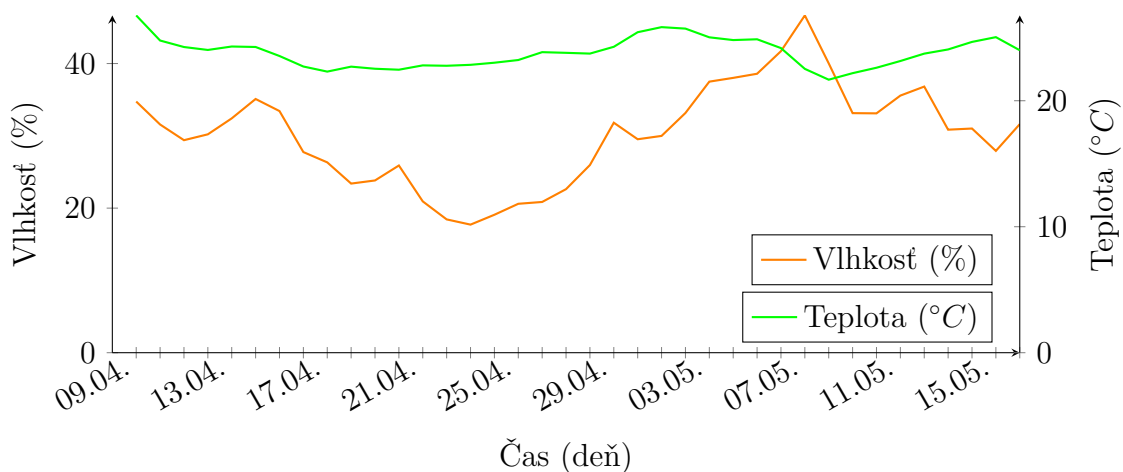
U oboch typoch hornín nastalo iné porušenie. V prípade vzorky pieskovca sa vzorka úplne rozsypala. U vzorky opuky však vznikli pozdĺžne trhliny a časť vzorky sa odtrhla, viď obrázok 2.40.



Obr. 2.40: O5, P6, T1060

2.3.6 Porušenie štruktúry vzoriek vplyvom vysokej teploty

Okrem vzoriek, ktoré boli podrobené skúškam v jednoosom tlaku, boli v každej sérii ohrievané aj menšie vzorky, na ktorých bolo sledované možné porušenie spôsobené vysokou teplotou. Tieto vzorky boli po vytiahnutí z pece voľne umiestnené v laboratóriu a ponechané na vzdušnej vlhkosti. Vlhkosť vzduchu a teplota v laboratóriu bola počas celého experimentu zaznamenávaná a hodnoty veličín sú uvedené v grafe 2.41.



Obr. 2.41: Teplota a vlhkosť

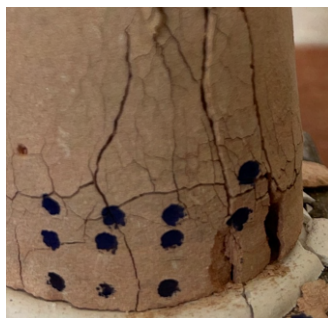
V prípade vzoriek opuky bola pozorovaná zmena stavu vzorky približne po týždni od zahriatia na teplotu 900°C a 1100°C. Na povrchu týchto vzoriek sa začala postupne objavovať sieť trhliniek, ktorá sa každým dňom rozširovala po povrchu vzorky. Trhlinky sa zároveň prehĺbovali až nakoniec spôsobili porušenie vzoriek ako možno vidieť na obrázkoch 2.46 a 2.47. Tento jav sa samozrejme objavil aj u vzoriek opuky, ktoré boli skúšané v jednoosom tlaku, viď obr. 2.43, 2.44 a 2.45.

Jednou z možných príčin tohto správania môže byť aj vysoký obsah uhličitanu vápenatého vo vzorkách opuky, ktorý sa po zohriatí na teploty nad 700°C premieňa na oxid vápenatý. Ten po kontakte s vzdušnou vlhkosťou reaguje, a premieňa sa na hydroxid vápenatý s vyšším objemom, čo zapríčiní postupné vznikanie trhlín na materiáli.

U vzoriek pieskovca sa tento jav nevyskytol ako možno vidieť na obrázku 2.42 (trhlina na obrázku je spôsobená skúškou v jednoosom tlaku). Vzorky pieskovca totiž neobsahujú uhličitan vápenatý v takom množstve, aby sa prípadná zmena objemu mohla na vzorkách prejavíť.



Obr. 2.42: P9, 1 týždeň po ohreve



Obr. 2.43: O15, 1 týždeň po ohreve, detail



Obr. 2.44: O15, 2 týždne po ohreve



Obr. 2.45: O16, 2 týždne po ohreve



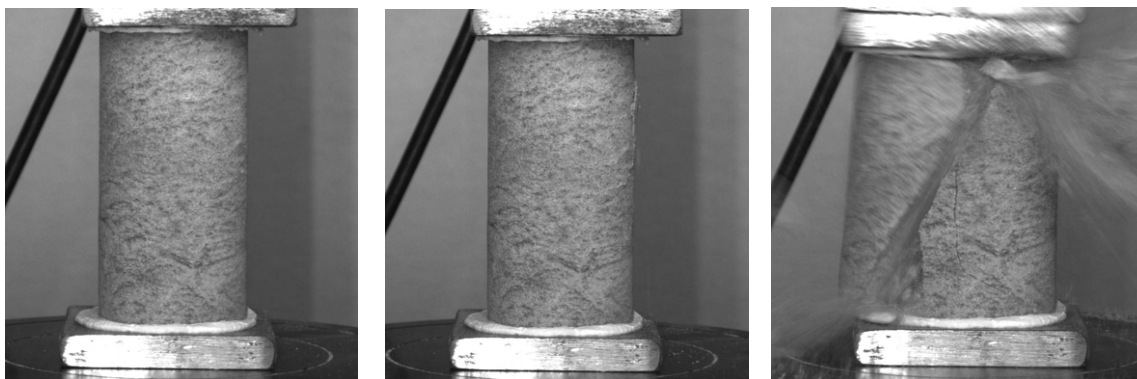
Obr. 2.46: Vzorka zohrievaná na 900°C



Obr. 2.47: Vzorka zohrievaná na 1060°C

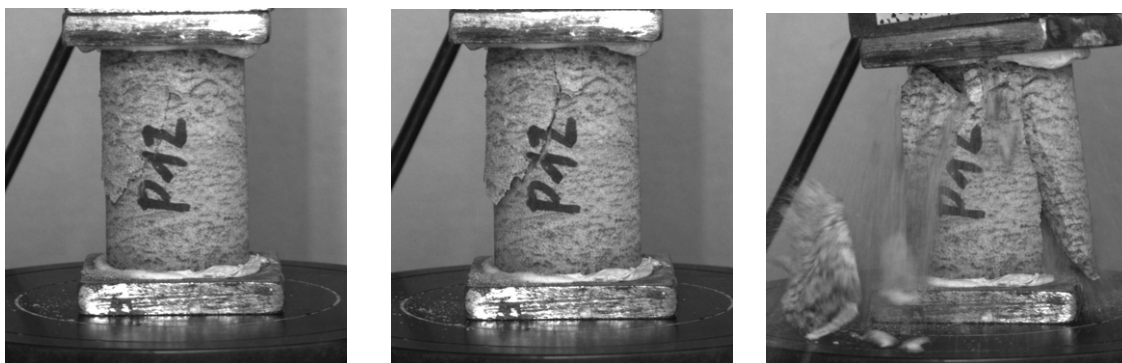
2.3.7 Porušenie vzoriek počas skúšok v tlaku

V prípade vzoriek pieskovca bolo náhle porušenie vzoriek, sprevádzané rozpadom vzoriek na veľké kusy a prach, sledované najmä u referenčných vzoriek (obr.2.59), vzoriek zohriatych na teplotu 180°C (obr.2.60) a u vzoriek P15 a P16 ohrievaných na teplotu 460°C (obr.2.61).



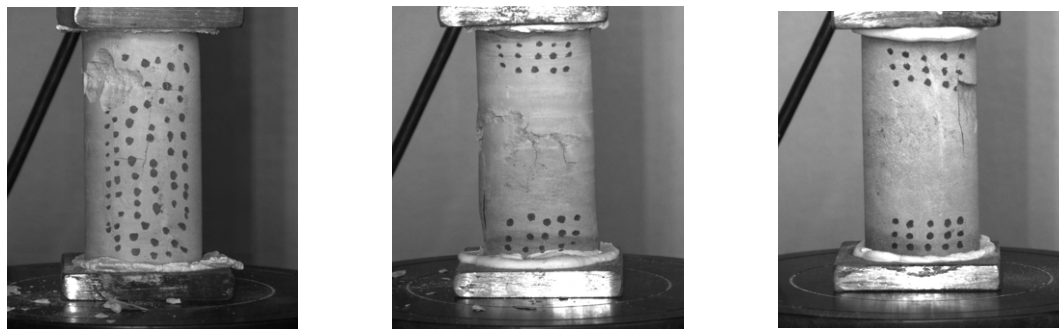
Obr. 2.48: P3: Neporušená vzorka, vzorka s trhlinou na pravom okraji, porušenie vzorky

Naopak pomalšie porušenie, pri ktorom najprv vznikla trhlinka (trhliny), ktorá sa so zvyšujúcou silou zväčšovala a až následne nastal kolaps vzorky bolo sledované u vzoriek zohriatych na teplotu 620°C (obr.2.62) a 900°C (obr.2.63).



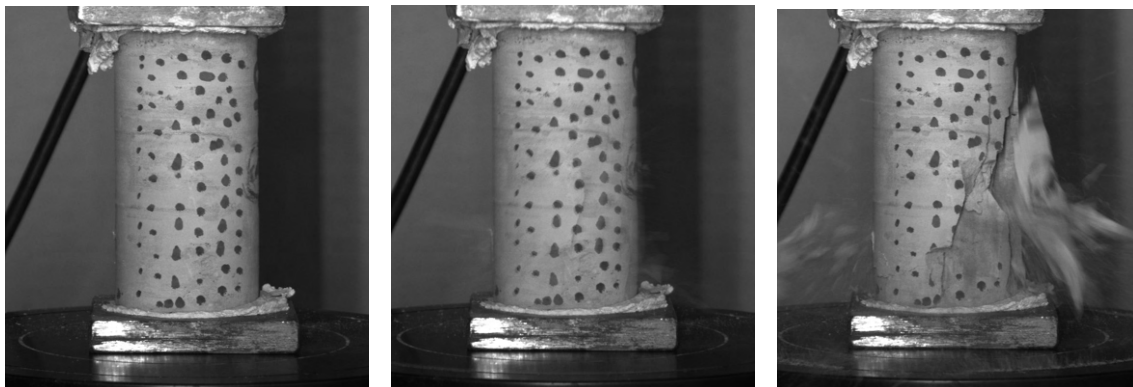
Obr. 2.49: P12: Vzorka s trhlinou, rozvoj trhliny, porušenie vzorky

Charakteristická vlastnosť viacerých vzoriek opuky bola odlúpenie časti (alebo viacerých častí) povrchovej vrstvy, ku ktorému po väčšinou dochádzalo pred kolapsom vzorky, viď obr.2.50.



Obr. 2.50: Odlúpenie časti povrchovej vrstvy: O2, O9, O11

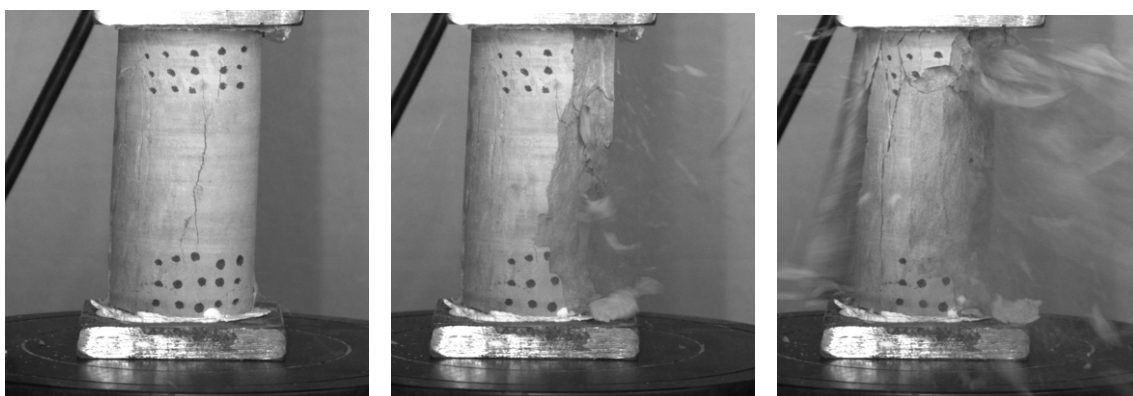
U referenčných vzoriek O1 a O17 došlo k náhlemu porušeniu vzoriek spôsobeného vznikom viacerých trhlín, viď obr.2.51 a 2.54, vzorky sa však nerozleteli ako to bolo sledované u vzoriek pieskovca. Podobný trend bol sledovaný aj u vzorky O18 ohriatej na teplotu 180°C, (obr.2.55).



Obr. 2.51: O1: Neporušená vzorka, vzorka s trhlinami, vzorka pri porušení

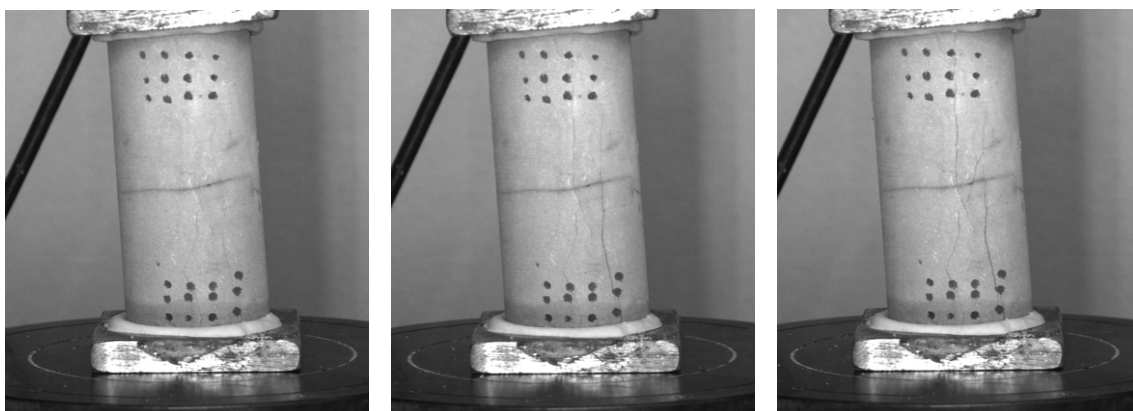
V prípade ostatných vzoriek zohriatych na teplotu 180°C sa vzorka O19 porušila náhle avšak sa rozletela, podobne ako to bolo sledované u vzoriek pieskovca. Vzorka O20 sa porušila pomalšie, pričom bol pozorovaný postupný vznik pozdĺžnych trhlín, bez rozpadnutia vzorky.

U vzoriek O7 a O9 ohrievaných na teplotu 460°C (obr.2.56) a O11 a O12 ohrievaných na teplotu 620°C (obr.2.57) bolo sledované pomalšie porušenie, ktoré bolo sprevádzané vznikom trhliny a až následne odštiepenie časti vzorky, viď obr.2.52.



Obr. 2.52: O7: Vzorka s trhlinou, odštiepenie časti vzorky, porušenie vzorky

Zo setu vzoriek ohrievaných na teplotu 900°C, bol u vzoriek O15 a O16 sledovaný vznik trhlín, no vzorky sa nerozpadli. Naopak v prípade vzorky O14 sa pri maximálnej sile skoro polovica vzorky odštiepila, vid' obr.2.58.



Obr. 2.53: O15: Vzorka s trhlinami pri dolnom okraji, rozvoj trhlín po výške vzorky, vzorka s trhlinami pri porušení



Obr. 2.54: O1, O2, O17, T26



Obr. 2.55: O18, O19, O20, T180



Obr. 2.56: O7, O9, T460



Obr. 2.57: O11, O12, T620



Obr. 2.58: O14, O15, O16, T900



Obr. 2.59: P1, P2, P7, T26



Obr. 2.60: P3, P4, P5, T180



Obr. 2.61: P14, P15, P16, T460



Obr. 2.62: P11, P12, P13, T620



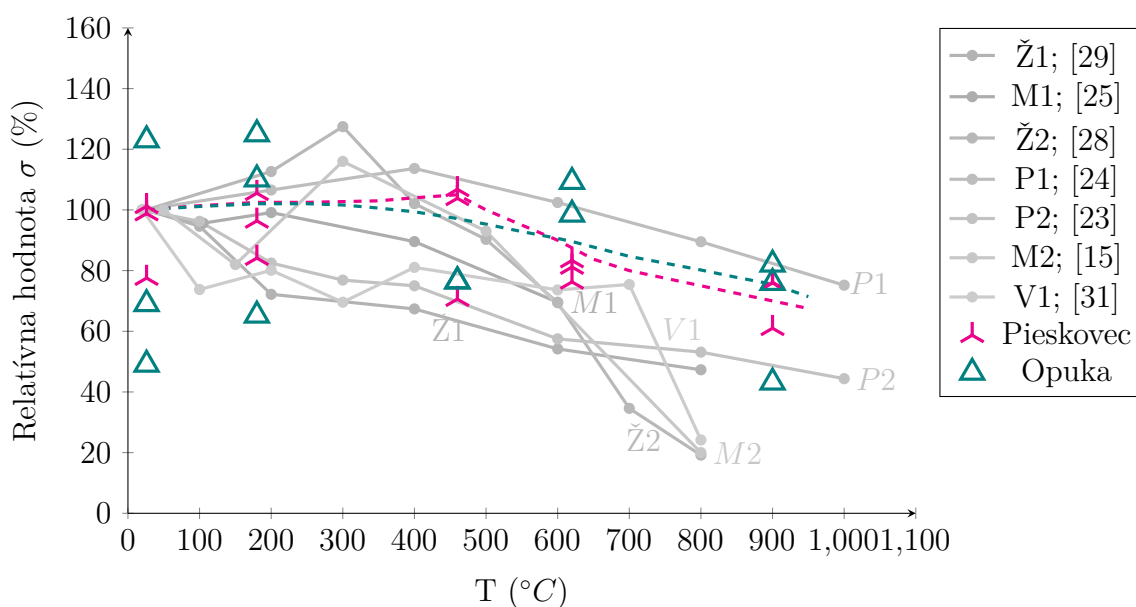
Obr. 2.63: P8, P9, P10, T900

Kapitola 3

Diskusia

V rámci tohto experimentu bola nameraná zmena mechanických vlastností hornín pieskovca a opuky po zaťažení tepelným cyklom v porovnaní s mechanickými vlastnosťami pri referenčných vzorkách. V prípade oboch typov horniny sa ukázal klesajúci trend pevnosti v tlaku v závislosti na teplote. Takýto trend nie je ojedinelý a potvrdzuje ho viacero iných štúdií, na horninách rôzneho typu.

Na obrázku 3.1 sú pre porovnanie uvedené výsledky pevnosti v tlaku zo štúdií uvedených v kapitole 1.2.4 s výsledkami vzoriek pieskovca a opuky tohto experimentu. Podobný trend ako u vzoriek pieskovca tejto štúdie, bol sledovaný aj v experimente od Zhang a kolektívu [24]. Ako možno vidieť na obrázku 3.1 u krivky P1, tak relatívna hodnota maximálneho tlaku spočiatku mierne rástla do teploty 400°C, na približne 110% pôvodnej pevnosti v tlaku, a následne klesala, na cca 75% pôvodnej hodnoty pevnosti v tlaku, po zahriatí na teplotu 1000°C. Aj napriek tomu, že v prípade vzoriek tohto experimentu boli hodnoty pevnosti v tlaku do teploty 460°C pomerne rovnaké (85% – 108%), tak trend poklesu pevnosti v tlaku je podobný ako bol v prípade experimentu Zhanga a kolektívu. U vzoriek opuky bol taktiež pozorovaný pokles hodnôt maximálnej pevnosti v tlaku so zvyšujúcou sa teplotou ohrevu vzoriek, rovnako ako v prípade ostatných experimentov.



Obr. 3.1: Analýza pevnosti v tlaku

Vo viacerých štúdiách, napríklad [21] bola taktiež sledovaná závislosť napätia od pretvorenia hornín pieskovca po tepelných cykloch. Spomenutá štúdia uvádza zvýšenie hodnôt pretvorenia a zníženie hodnôt maximálnej sily pri porušení v závislosti so zvyšujúcou sa teplotou ohrevu, rovnako ako v tejto štúdii. Pozorované správanie môže indikovať fyzikálne-chemické zmeny v štruktúre horniny spôsobené vysokými teplotami.

V štúdií Yu a kolektívu [21], bol spomenutý trend sledovaný až po zahriatí vzoriek na teploty 400°C až 600°C, u vzoriek zohriatych na teplotu 200°C sa maximálna pevnosť mierne zvýšila (na cca 110% pôvodnej pevnosti), zatiaľčo hodnoty pretvorenia sa mierne znížili oproti hodnotám pri referenčnej teplote. V rámci tohto experimentu, bol spomenutý trend najviac viditeľný pri zahriatí vzoriek na teploty 620°C až 900°C, pri nižších teplotách sa pracovné diagramy jednotlivých vzoriek prekrývajú.

V prípade vzoriek opuky zohriatych na teplotu 900°C sa ukázalo, že pevnosť v tlaku nameraná ihneď po vychladnutí vzoriek sa môže časom znižovať. U vzoriek O15 a O16 sa po určitom čase objavilo popraskanie. Podobný efekt bol sledovaný aj v iných štúdiách, pri použití iných hornín s vyšším obsahom uhličitanu vápenatého, ktorý tvorí spojivovú zložku opuky.

Príkladom môže byť experiment od Daoudi a kolektívu [16], kde boli skúmané vzorky vápencov z rôznych lokalít a jeden typ, z oblasti Yonne, vykazoval po zahriatí na teplotu 850°C, ochladení a pobyte na vzduchu 3 dni, podobné popraskanie aké sa objavilo u vzoriek v tomto experimente. Podobný jav sa vyskytol aj v experimente Biró a kolektívu [15], no v tejto štúdii sa jednalo o vzorky mramoru a vápenca po zahriatí na teplotu 800°C.

Zmena farby po zahriatí na vysoké teploty bola viditeľná v oboch prípadoch skúmaných hornín najmä po zahriatí na teploty 460°C a vyššie. Vzorky opuky sa postupne zafarbili na svetlo oranžovú po zahriatí na teplotu 460°C až na tehlovú po zahriatí na teplotu 900°C. V prípade vzoriek pieskovca sa zafarbili len niektoré vrstvy, postupne zo svetlejšej červenej na tmavo červenú. Podobný efekt v svojej štúdii sledoval aj Tian a kolektív [13]. Vzorky ílovca mali pôvodne tmavo sivú farbu a po zohriatí vzoriek na teplotu 400°C sa ich farba zmenila na svetlejšiu sivú. Výraznejšie zmeny začali byť pozorované pri ohreve vzoriek na teploty 800°C a 1000°C, kedy sa vzorky zafarbili najprv na svetlo červeno a následne na tmavú hnedočervenú farbu.

Záver

V rámci tejto štúdie bola sledovaná zmena reziduálnych mechanických vlastností dvoch hornín po vystavení vysokým teplotám v rozmedzí od 26°C do 900°C. Sledované materiály boli ohrievané v elektrickej muflovej peci a po vychladnutí skúšané v jednoosom tlaku.

Na základe analýzy výsledkov boli vyvedené jednotlivé závery. V prípade vzoriek pieskovca bola odhalená závislosť mechanických vlastností na teplote pri vzorkách zahriatych na teploty vyššie ako 460°C. Vzorky pieskovca dosahovali nižšie pevnosti v tlaku a vyššie hodnoty pomerného pretvorenia so zvyšujúcou sa teplotou. V prípade vzoriek zahriatych na teploty 180°C až 460°C nebola pozorovaná značná zmena vlastností vzoriek.

V prípade vzoriek opuky bola odhalená závislosť na teplote len u hodnôt maximálnej pevnosti, pričom hodnoty mali mierne klesajúci trend u vzoriek zahriatych na teploty viac ako 460°C. U vzoriek zahriatych na teplotu 900°C bolo taktiež pozorované popraskanie povrchu po určitom čase na vzduchu. Toto popraskanie sa objavilo približne týždeň od ohrievania vzoriek a po 4 týždňoch boli vzorky značne poškodené. Pri analýze ostatných sledovaných vlastností však nebola odhalená značná závislosť týchto hodnôt na teplote.

Okrem zmeny mechanických vlastností, bola sledovaná aj zmena vzhľadu vzoriek. Zmena farby vzoriek so zvyšujúcou sa teplotou bola spoločnou vlastnosťou u oboch sledovaných hornín avšak charakter zmeny farieb bol v prípade jednotlivých horninách rozdielny.

Výsledky tejto práce ukázali, že aj za rovnakých podmienok sa obe horniny správajú rozdielne. Práve tento fakt poukazuje na dôležitosť skúmať správanie každej horniny samostatne. V náväznosti na túto prácu by bolo vhodné rozvinúť štúdiu, ktorá by sa zaoberala opukou, s použitím väčšieho množstva vzoriek, pretože pri takomto malom množstve boli výsledky nekonzistentné. Taktiež by sa rozvinula rozsiahlejšia štúdia o samovoľnom porušení horniny a jeho vplyve na výslednú pevnosť, po zahriatí na teploty vyššie ako 600°C a následnom pobyte na vzdušnej vlhkosti. V neposlednom rade by bolo možné skúmať rôzne spôsoby chladenia, ako napríklad chladenie vodou.

Literatúra

1. MIBEI, Geoffrey. Introduction to types and classification of rocks. *Geothermal Development Company*. 2014, roč. 1374011. Dostupné tiež z: <https://gogn.orkustofnun.is/unu-gtp-sc/UNU-GTP-SC-19-0302.pdf>.
2. GARCIA-CASTILLO, E.; PAYA-ZAFORTEZA, I.; HOSPITALER, A. Fire in heritage and historic buildings, a major challenge for the 21st century. *Developments in the Built Environment*. 2023, roč. 13, s. 100102. ISSN 2666-1659. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2022.100102>.
3. VENEGAS VÁSCONEZ, Diego; AYABACA SARRIA, César; ERAZO, Oswaldo; MEDINA, Ana; FARIAS, Oscar. Fires in World Heritage Buildings. *Artificial Intelligence*. 2021, roč. 1, s. 1–15. ISBN 978-3-030-68079-4. Dostupné z DOI: [10.1007/978-3-030-68080-0_32](https://doi.org/10.1007/978-3-030-68080-0_32).
4. OBR. *Obr. Notre Dame*. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://s.abcnews.com/images/International/France_Notre_Dame_File_hpMain_20200415-044437_16x9_992.jpg. cit. 02/04/2024.
5. OBR. *Obr. Hrad Krásna hôrka*. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://static.hnonline.sk/images/slike/2022/03/10/o_7c5da568-204a-45ef-972f-4c44ec2fc61e_1024.jpg. cit. 02/04/2024.
6. KOTLÍK, Petr; ŠRÁMEK, Jan; KAŠE, Jiří. *OPUKA. STOP*, Praha, 2000. ISBN 80-902668-5-1.
7. PAVLÍKOVÁ, Milena; PAVLÍK, Zbyšek; HOŠEK, Jiří. *Materiálové inženýrství 1 druhé rozšířené vydání*. Praha, 2011.
8. KOTLÍK, Petr. Stavební materiály historických objektu-materiály, koroze, sanace. In: *Vysoká škola chemicko-technologická*, 1999, kap. Horniny usazené. Dostupné tiež z: http://147.33.74.135/knihy/uid_isbn-80-7080-347-9/pages-img/003.html.
9. GOMEZ-HERAS, Miguel; MCCABE, Stephen; SMITH, Bernard J; FORT, Rafael. Impacts of fire on stone-built heritage: An overview. *Journal of Architectural Conservation*. 2009, roč. 15, č. 2, s. 47–58. Dostupné tiež z: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13556207.2009.10785047>.
10. OBR. *Obr. Muflová pec*. [B.r.]. Dostupné tiež z: <https://buildex.decorexpro.com/wp-content/uploads/elektricheskaya-mufelnaya-pech.jpg>. cit. 02/04/2024.

11. MCCABE, Stephen; SMITH, BJ; WARKE, PA. Sandstone response to salt weathering following simulated fire damage: a comparison of the effects of furnace heating and fire. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*. 2007, roč. 32, č. 12, s. 1874–1883. Dostupné tiež z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/esp.1503>.
12. GÓMEZ-HERAS, Miguel; FORT, Rafael; MORCILLO, Miguel; MOLPECE-RES, Carlos; OCAÑA, José Luis. Laser heating: a minimally invasive technique for studying fire-generated heating in building stone. *Materiales de Construcción*. 2008, roč. 58, č. 289-290, s. 203–217. Dostupné tiež z: <https://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/view/82/111>.
13. TIAN, H.; ZIEGLER, M.; KEMPKA, T. Physical and mechanical behavior of claystone exposed to temperatures up to 1000°C. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2014, roč. 70, s. 144–153. ISSN 1365-1609. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.04.014>.
14. OBOJES, Ulrich; TROPPER, Peter; MIRWALD, Peter W; SAXER, Andreas. The effects of fire and heat on natural building stones: first results from the Groden Sandstone. *Heritage, weathering and conservation*. 2006, s. 521–524. Dostupné tiež z: https://www.researchgate.net/publication/287758608_The_effects_of_fire_and_heat_on_natural_building_stones_First_results_from_the_Groden_Sandstone.
15. BIRÓ, András; HLAVIČKA, Viktor; LUBLÓY, Éva. Effect of fire-related temperatures on natural stones. *Construction and Building Materials*. 2019, roč. 212, s. 92–101. ISSN 0950-0618. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.333>.
16. DAOUDI, Ayoub; ESLAMI, Javad; BEAUCOUR, Anne-Lise; VIGROUX, Martin; NOUMOWÉ, Albert. High-temperature behaviour of various limestones at the block scale. *Construction and Building Materials*. 2024, roč. 416, s. 135109. ISSN 0950-0618. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135109>.
17. HAJPÁL, Mónika. Changes in sandstones of historical monuments exposed to fire or high temperature. *Fire Technology*. 2002, roč. 38, s. 373–382. Dostupné tiež z: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1020174500861>.
18. SCIARRETTA, Francesca; ESLAMI, Javad; BEAUCOUR, Anne-Lise; NOUMOWE, Albert. State-of-the-art of construction stones for masonry exposed to high temperatures. *Construction and Building Materials*. 2021, roč. 304, s. 124536. Dostupné tiež z: [vhttps://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821022923](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821022923).
19. LIU, Dengkai; CHEN, Hongniao; SU, Ray Kai Leung. Effects of heat-treatment on physical and mechanical properties of limestone. *Construction and Building Materials*. 2024, roč. 411, s. 134183. Dostupné tiež z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061823039016>.

20. SINGH, Anand; VERMA, AK; KUMAR, Abhinav; SINGH, CS; ROY, Sanjay Kr. Effect of Temperature on Physico-Mechanical Properties of Chunar Sandstone, Mirzapur, UP, India. *Journal of Mining Science*. 2023, roč. 59, č. 1, s. 53–62. Dostupné tiež z: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1062739123010064>.
21. YU, Jin; CHEN, Shao-jie; CHEN, Xu; ZHANG, Ya-zhou; CAI, Yan-yan. Experimental investigation on mechanical properties and permeability evolution of red sandstone after heat treatments. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*. 2015, roč. 16, s. 749–759. Dostupné tiež z: <https://link.springer.com/article/10.1631/jzus.A1400362>.
22. RAO, Qiu-hua; WANG, Zhi; XIE, Hai-feng; XIE, Qiang. Experimental study of mechanical properties of sandstone at high temperature. *Journal of Central South University of Technology*. 2007, roč. 14, č. Suppl 1, s. 478–483. Dostupné tiež z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11771-007-0311-x>.
23. LIU, Zhen; YAO, Qingguo; KONG, Biao; YIN, Jueli. Macro-micro mechanical properties of building sandstone under different thermal damage conditions and thermal stability evaluation using acoustic emission technology. *Construction and Building Materials*. 2020, roč. 246, s. 118485. ISSN 0950-0618. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118485>.
24. ZHANG, Zhibo; WANG, Enyuan; LI, Nan; ZHANG, Hongtu; BAI, Zhiming; ZHANG, Yinghua. Research on macroscopic mechanical properties and microscopic evolution characteristic of sandstone in thermal environment. *Construction and Building Materials*. 2023, roč. 366, s. 130152. ISSN 0950-0618. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130152>.
25. VAGNON, Federico; COLOMBERO, Chiara; COLOMBO, Fabrizio; COMINA, Cesare; FERRERO, Anna Maria; MANDRONE, Giuseppe; VINCIGUERRA, Sergio Carmelo. Effects of thermal treatment on physical and mechanical properties of Valdieri Marble - NW Italy. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2019, roč. 116, s. 75–86. ISSN 1365-1609. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2019.03.006>.
26. CHEN, You-Liang; NI, Jing; SHAO, Wei; AZZAM, Rafig. Experimental study on the influence of temperature on the mechanical properties of granite under uni-axial compression and fatigue loading. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2012, roč. 56, s. 62–66. ISSN 1365-1609. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.07.026>.
27. YIN, Tubing; LI, Xibing; CAO, Wenzhuo; XIA, Kaiwen. Effects of thermal treatment on tensile strength of Laurentian granite using Brazilian test. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2015, roč. 48, s. 2213–2223. Dostupné tiež z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00603-015-0712-3>.
28. YANG, Sheng-Qi; RANJITH, P.G.; JING, Hong-Wen; TIAN, Wen-Ling; JU, Yang. An experimental investigation on thermal damage and failure mechanical behavior of granite after exposure to different high temperature treatments. *Geothermics*. 2017, roč. 65, s. 180–197. ISSN 0375-6505. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2016.09.008>.

29. YIN, Tu-bing; SHU, Rong-hua; LI, Xi-bing; WANG, Pin; LIU, Xi-ling. Comparison of mechanical properties in high temperature and thermal treatment granite. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2016, roč. 26, č. 7, s. 1926–1937. ISSN 1003-6326. Dostupné z DOI: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(16\)64311-X](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(16)64311-X).
30. VIGROUX, Martin; ESLAMI, Javad; BEAUCOUR, Anne-Lise; BOURGES, Ann; NOUMOWE, Albert. High temperature behaviour of various natural building stones. *Construction and Building Materials*. 2021, roč. 272, s. 121629. Dostupné tiež z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820336333>.
31. ZHANG, LianYing; MAO, XianBiao; LU, AiHong. Experimental study on the mechanical properties of rocks at high temperature. *Science in China Series E: Technological Sciences*. 2009, roč. 52, č. 3, s. 641–646. Dostupné tiež z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11431-009-0063-y>.
32. EL JAZOULI, Bassim; TSANGOURI, Eleni. Fire-exposed stones in constructions: Residual strength, performance loss and damage mode shift due to mineralogical transformation and micro-cracking. *Engineering Geology*. 2022, roč. 302, s. 106638. ISSN 0013-7952. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106638>.
33. GONZÁLEZ-GÓMEZ, W.S.; QUINTANA, P.; MAY-PAT, A.; AVILÉS, F.; MAY-CRESPO, J.; ALVARADO-GIL, J.J. Thermal effects on the physical properties of limestones from the Yucatan Peninsula. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2015, roč. 75, s. 182–189. ISSN 1365-1609. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.12.010>.
34. LIU, Shi; XU, Jinyu. An experimental study on the physico-mechanical properties of two post-high-temperature rocks. *Engineering Geology*. 2015, roč. 185, s. 63–70. Dostupné tiež z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795214003196>.
35. OZGUVEN, A.; OZCELIK, Y. Effects of high temperature on physico-mechanical properties of Turkish natural building stones. *Engineering Geology*. 2014, roč. 183, s. 127–136. ISSN 0013-7952. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.10.006>.
36. BROTONS, Vicente; TOMÁS, Roberto; IVORRA, SAJC; ALARCÓN, JC. Temperature influence on the physical and mechanical properties of a porous rock: San Julian's calcarenite. *Engineering Geology*. 2013, roč. 167, s. 117–127. Dostupné tiež z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001379521300286X>.
37. SHAO, Shishi; WASANTHA, P.L.P.; RANJITH, P.G.; CHEN, B.K. Effect of cooling rate on the mechanical behavior of heated Strathbogie granite with different grain sizes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2014, roč. 70, s. 381–387. ISSN 1365-1609. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.04.003>.

38. WANG, Haohan; ZHOU, Lei; ZHU, Zheming; CHEN, Jianxing; MA, Leijun; SHUI, Xin; ZHANG, Hongdan. Investigation of fracture characteristics of cracked granite suffered from different thermal treatments and water-cooling time. *Journal of Materials Research and Technology*. 2024, roč. 29, s. 286–302. ISSN 2238-7854. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.01.060>.
39. WU, Qihong; WENG, Lei; ZHAO, Yanlin; GUO, Baohua; LUO, Tao. On the tensile mechanical characteristics of fine-grained granite after heating/cooling treatments with different cooling rates. *Engineering Geology*. 2019, roč. 253, s. 94–110. ISSN 0013-7952. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.03.014>.
40. PIRES, Vera; ROSA, L.G.; DIONÍSIO, A. Implications of exposure to high temperatures for stone cladding requirements of three Portuguese granites regarding the use of dowel-hole anchoring systems. *Construction and Building Materials*. 2014, roč. 64, s. 440–450. ISSN 0950-0618. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.035>.
41. OBR. Opuka, lokalita. [B.r.]. Dostupné tiež z: <https://mapy.geology.cz/geocr50/?extent=-769403.6136%2C-1026222.1301%2C-756962.0337%2C-1020901.4545%2C102067>. cit. 08/05/2024.
42. OBR. Pieskovec, lokalita. [B.r.]. Dostupné tiež z: <https://mapy.geology.cz/geocr50/?extent=-604383.7454%2C-1015168.6777%2C-598162.9555%2C-1012508.3399%2C102067>. cit. 08/05/2023.
43. ČSNEN, 772-1+A1. Zkušební metody pro zdicí prvky - Část 1: Stanovení pevnosti v tlaku. 2016.
44. MCCORMICK, Nick; LORD, Jerry. Digital Image Correlation. *Materials Today*. 2010, roč. 13, č. 12, s. 52–54. ISSN 1369-7021. Dostupné z DOI: [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(10\)70235-2](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(10)70235-2).
45. TREBUŇA, František; HAGARA, Martin; SCHRÖTTER, Martin. Využitie optických metód pri vyšetovaní rôznych problémov mechaniky tuhých telies. The use of optical methods by investigation of various solid mechanics problems. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://www.researchgate.net/profile/Martin-Hagara/publication/270566008_VYUZITIE_OPTICKYCH_METOD_PRI_VYSETROVANI_ROZNYCH_PROBLEMOV_MECHANIKY_TUHYCH_TELIES/links/54ad2dd20cf2828b29fa93f3/VYUZITIE-OPTICKYCH-METOD-PRI-VYSETROVANI-ROZNYCH-PROBLEMOV-MECHANIKY-TUHYCH-TELIES.pdf.