

# Koeficijent linearnog toplinskog širenja kamena

---

**Milanović, Nikolina**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2021**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:169:547545>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-26**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Studij geološkog inženjerstva

**KOEFICIJENT LINEARNOG TOPLINSKOG ŠIRENJA KAMENA**

Diplomski rad

Nikolina Milanović

GI417

Zagreb, 2021

## KOEFICIJENT LINEARNOG TOPLINSKOG ŠIRENJA KAMENA

NIKOLINA MILANOVIĆ

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za rudarstvo i geotehniku  
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

### Sažetak

Koeficijent linearnog toplinskog širenja kamena određen je na kvarc arenitu prema europskoj normi HRN EN 14581:2004. Mjerenja su izvedena na dva suha, nesaturirana uzorka. Sukladno normi, mjerenja su provedena mjernim trakama (tenziometarskim trakama) kao mjeracima deformacija. Za ovu metodu potrebni su pećnica s cirkulacijom zraka te uređaj za mjerenje naprezanja tenziometarskim trakama. Uz spomenuta dva uzorka u pećnicu se postavlja i kalibrirani referentni uzorak s poznatim koeficijentom toplinskog širenja. Rezultati oba uzorka prikazuju kako raznolik mineralni sastav utječe na različito širenje mineralnih zrna pri zagrijavanju. Ovo ispitivanje je pokazalo kako je primijenjena metoda pogodna za istraživanje budući da su rezultati u skladu s dosadašnjim rezultatima istraživanja.

Ključne riječi: koeficijent linearnog toplinskog širenja kamena, HRN EN 14581:2004, mjerne (tenziometarske) trake, izlazni mjerni napon, temperatura

Diplomski rad sadrži: 35 stranica, 7 tablica, 28 slika, i 15 referenci.

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta  
Pierottijeva 6, Zagreb

Voditelj: Dr. sc. Želimir Veinović, izvanredni profesor RGNF

Suvoditelj: Dr. sc. Tomislav Korman, docent RGNF

Pomoć pri izradi: Dr. sc. Dalibor Kuhinek, izvanredni profesor RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Želimir Veinović, izvanredni profesor RGNF

Dr. sc. Tomislav Korman, docent RGNF

Dr. sc. Ana Maričić, izvanredni profesor RGNF

Dr. sc. Dalibor Kuhinek, izvanredni profesor RGNF

Datum obrane: 17. rujna 2021.

## COEFFICIENT OF LINEAR THERMAL EXPANSION OF STONE

NIKOLINA MILANOVIĆ

Thesis completed in: University of Zagreb  
Faculty of Mining, Geology and Petroleum engineering  
Department of mining engineering and geotechnics  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

### Abstract

The coefficient of linear thermal expansion of stone is determined on quartz arenite according to the European standard HRN EN 14581: 2004. Measurements were performed on two dry, unsaturated samples. According to the norm, measurements were performed with measuring tapes (tensiometer tapes) as strain gauges. This method requires an oven with air circulation and a device for measuring stress with strain gauges. In addition to the two samples mentioned, a calibrated reference sample with a known coefficient of thermal expansion is placed in the oven. The results of both samples show how the different mineral composition affects the different spread of mineral grains when heated. This study showed that the applied method is suitable for research since the results are consistent with previous research results.

Keywords: coefficient of linear thermal expansion of stone, HRN EN 14581: 2004, strain gauges, output measuring voltage, temperature

Thesis contains: 35 pages, 7 tables, 28 figures and 15 references.

Original in: Croatian

Thesis deposited in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,  
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: PhD Želimir Veinović, Associate Professor  
Co-supervisor: PhD Tomislav Korman, Assistant Professor  
PhD Dalibor Kuhinek, Associate Professor

Reviewers: PhD Želimir Veinović, Associate Professor  
PhD Tomislav Korman, Assistant Professor  
PhD Ana Maričić, Associate Professor  
PhD Dalibor Kuhinek, Associate Professor

Date of defense: September 17, 2021.

## ZAHVALA

*Prvenstveno zahvaljujem mentoru izv. prof. dr. sc. Želimiru Veinoviću što mi je pružio priliku sudjelovati u ovom projektu te pod istim obraniti svoj rad. Hvala mu jer je bez obzira na sve prepreke bio uvijek spreman pomoći i udijeliti koristan savjet kad god mi je to trebalo.*

*Hvala doc. dr. sc. Tomislavu Kormanu koji je strpljivo odgovarao na sva moja pitanja. Hvala što ste dio svojih znanja podijelili sa mnom.*

*Hvala Vam svima jer ste uljepšali završetak mog studija.*

*Hvala mojim prijateljicama Boženi, Bruni i Ivani koje su svojim prijateljskim savjetima i druženjima ovo iskustvo studiranja učinile nezaboravnim.*

*Na kraju, hvala mojim roditeljima i sestrama, najbližima i najdražima, bez kojih sve ovo ne bi bilo moguće. Vama koji ste me u stopu pratili tijekom cijelog studiranja. Bilo je teških trenutaka, ali zbog Vas nisam odustala. Hvala Vam jer ste bili i jer ćete uvijek bit moj oslonac, moja motivacija i moj razlog.*

## SADRŽAJ:

1 UVOD.....	1
1.1 Predmet, svrha i ciljevi diplomskog rada.....	1
1.2 Pregled dosadašnjih istraživanja .....	1
2 MINERALOŠKO-PETROLOŠKA ANALIZA STIJENSKOG MATERIJALA .....	3
2.1 Mineraloško-petrološka analiza stijenskog materijala.....	3
2.2 Toplinsko širenje kamena .....	10
2.3 Mineralni sastav uzorka prema rendgenskoj analizi .....	12
3 ODREĐIVANJE LINEARNOG KOEFICIJENTA ŠIRENJA PRIRODNOG KAMENA .....	13
3.1 Linearni koeficijent širenja kamena .....	13
3.2 Norma HRN EN 14581-2004 .....	15
3.3 Uređaj za mjerenje naprezanja.....	16
3.4 Priprema uzoraka .....	18
3.5 Metoda ispitivanja nesaturiranih (suhih) uzoraka.....	21
4 REZULTATI I ANALIZA .....	28
4.1 Rezultati mjerenja .....	28
4.2 Izračun deformacija uzoraka.....	30
4.3 Izračun linearnog temperaturnog koeficijenta uzorka kamena.....	31
5 ZAKLJUČAK.....	33
6 LITERATURA .....	34
6.1 Objavljena literatura .....	34
7.2 Neobjavljena literatura.....	35
7.3 Web izvori.....	35

## POPIS SLIKA:

<b>Slika 2-1.</b> Uzorak jezgre uzete s mikrolokacije eksperimenta. ....	3
Hem = hematit, Sd = siderit, Py = pirit, Qtz = kvarc.....	3
<b>Slika 2-2.</b> Sitno zrnati kvarc prošaran brojnim pukotinama ispunjenim s kvarcom i sideritom (+N). ....	4
Qtz = kvarc, Sd = siderit.....	4

<b>Slika 2-3.</b> Polikristalno zrno kvarca (+N). .....	5
Qtz = kvarc .....	5
<b>Slika 2-4.</b> Pukotina ispunjena kvarcom po rubovima i sideritom u centralnom dijelu (+N). Sd = siderit.....	6
<b>Slika 2-5.</b> Minerali kvarca i siderita kao ispune većih šupljina (+N). .....	6
Sd = siderit, Qtz = kvarc.....	6
<b>Slika 2-6.</b> Deformacijske lamele i undulozno potamnjenje u kvarcu (+N). .....	7
<b>Slika 2-7.</b> Sulfidni minerali impregnirani u stijeni domaćinu i koncentrirani u pukotini (N). .....	8
<b>Slika 2-8.</b> Idiomorfni kristali sulfida (N). .....	8
<b>Slika 2-9.</b> Sitno zrnati tinjac (sericit) udružen s mineralima sulfida (+N). .....	9
<b>Slika 2-10.</b> Difrakcijske slike uzorka .....	12
<b>Slika 3-1.</b> Promjena debljine i širine kamena tijekom djelovanja temperature (RAM, 2005). .....	13
<b>Slika 3-2.</b> Klima komora s opcijom grijanja, hlađenja i kontrole vlažnosti, zapremine 1 m <sup>3</sup> tvrtke Memmert (1 – kontrolna ploča, 2- prekidač za paljenje, 3 – komora s ventilatorom, 4 – čelična rešetka, 5 – radna komora, 6 – ploča s podacima, 7 – ručka za otvaranje, 8 – kontrolno-upravljački gumb, 9 – USB priključak).....	17
<b>Slika 3-3.</b> Shema postavljanja ispitnih uređaja za mjerenje deformacija.....	18
<b>Slika 3-4.</b> Referentni uzorak. ....	18
<b>Slika 3-5.</b> HBM QuantumX MX840A. ....	19
<b>Slika 3-6.</b> Raspored parova tenzometarskih traka na uzorku (1 – tri para tenziometarskih traka učvršćenih na suprotnim stranama). .....	20
<b>Slika 3-7.</b> Uzorci odabrani za određivanje koeficijenta linearnog toplinskog širenja stijene. .....	22
<b>Slika 3-9.</b> Nanošenje trake na prozirnu foliju .....	24
<b>Slika 3-10.</b> Lijepljenje trake selotejpom na prozirnu foliju .....	24
<b>Slika 3-11.</b> Priprema elektrootpornih mjernih traka. ....	25
<b>Slika 3-11.</b> Priprema uzorka brušenjem. ....	26
<b>Slika 3-12.</b> Zalemljeni konektor.....	26
<b>Slika 3-13.</b> Postupak lijepljenja mjerne trake. ....	27
<b>Slika 3-14.</b> Zalijepljene mjerne trake. ....	27
<b>Slika 4-1.</b> Izlazni omjer napona mosta za trake na referentnom uzorku. ....	28
<b>Slika 4-2.</b> Izlazni omjer napona mosta za trake na prvom suhom uzorku. ....	29
<b>Slika 4-3.</b> Porast temperature od 15 °C do 78 °C u vremenu od 21 000 sekundi. ....	29
<b>Slika 4-4.</b> Izlazni omjer napona mosta za trake na drugom suhom uzorku. ....	30

POPIS TABLICA:

<b>Tablica 2-1.</b> Toplinsko širenje glavnih vrsta kamena pri 100 °C temperaturne razlike (Bilbija, 1984).....	10
<b>Tablica 2-2.</b> Vrijednosti linearnog toplinskog širenja minerala u temperaturnom intervalu od 20 do 100 °C. ....	11
<b>Tablica 3-1.</b> Tipičan raspon toplinskih koeficijenata linearnog širenja za neke vrste kamena (Obrada kamena, 2007). ....	14
<b>Tablica 4-1.</b> Usporedba približne i pune jednadžbe za prvi uzorak. ....	31
<b>Tablica 4-2.</b> Usporedba približne i pune jednadžbe za drugi uzorak. ....	31
<b>Tablica 4-3.</b> Proračun srednjih početnih i srednjih završnih vrijednosti za prvi uzorak. ...	32
<b>Tablica 4-4.</b> Proračun srednjih početnih i srednjih završnih vrijednosti za drugi uzorak. .	32



# 1 UVOD

## 1.1 Predmet, svrha i ciljevi diplomskog rada

Predmet ovog diplomskog rada je ispitati toplinsko širenje stijenskog materijala, točnije odrediti koeficijent linearnog toplinskog širenja stijene. U ovom slučaju riječ je o kvarc arenitu. Ispitivanja su izvedena na dva suha, nesaturirana uzorka. Cilj istraživanja je određivanje utjecaja zagrijavanja na stijenu. Zagrijavanje stijene pojavljuje se u više slučajeva, između ostalog kod korištenja kamena za vanjsko oblaganje građevina, izradu grijaćih tijela od kamena kao i u slučaju odlaganja visokoradioaktivnog otpada i istrošenog nuklearnog goriva.

## 1.2 Pregled dosadašnjih istraživanja

Prema Harveyu (1967), toplinska naprezanja su izravnija i prenose se granicama zrna između vrlo sitnozrnatog kalcita brže nego između velikih čestica kalcita. Poroznost, bilo makro- ili mikroporoznost, nije u korelaciji sa opaženim karakteristikama ekspanzije ni vapnenaca ni dolomita. Također nije poznato zašto se mijenja ekspanzivnost krupnozrnatih vapnenaca tako brzo u rasponu od 60 do 80 ° F ili od 33,36 do 44,48 °C. Razlog vjerojatno leži u činjenici da na poremećaje valova naprezanja nastalih u kristalima toplinskom energijom utječu pravilne veze granica zrna ili određeni nedostaci u kristalima, poput tekućine i dislokacije, koje su i same povezane s veličinom zrna. Izražene promjene brzine ekspanzije s temperaturom krupnozrnatih vapnenaca u ispitivanom temperaturnom rasponu su značajni i mogu utjecati na trajnost određenih betonskih konstrukcija. Svaka od dobivenih krivulja ekspanzije ukazuje na ekspanzivnost tako da raste s porastom temperatura s time da je nelinearnost sitnozrnatih vapnenaca (srednja veličina zrna 0,040 mm i manje), a i većina dolomita, manja u usporedbi s brzim povećanjem ekspanzije krupnozrnatog vapnenca (0,072 mm i više). Krivulje širenja deset ispitivanih krupnozrnatih vapnenaca pokazuju vrlo niska brzina širenja ispod 60 ° F (33,36 °C) i mnogo veća brzina iznad 100 ° F (55,6 °C) dok brzina širenja sitnozrnatih uzoraka ostaje gotovo konstantna. Ovi podaci pokazuju jasnu vezu između teksture stijene i karakteristika toplinskog širenja vapnenaca (i donekle dolomita) koje do sada nisu zabilježeni. Taj odnos može značajno utjecati na performanse korištenja za ugradnju kamena i betonskih agregata. Konkretno, podaci ukazuju na to da postoje izrazite razlike u ponašanju čistih vapnenaca i dolomita kada se koriste u betonu koji je

podložan klimatskim uvjetima u rasponu od smrzavanja do preko 100 ° F (55,6 °C) iako su temperature zraka rijetko iznad 100 ° F (55,6 °C).

Delage (2013) u svom radu govori o toplinskom utjecaju na iskop oštećene zone oko dubokih geoloških odlagališta istrošenog nuklearnog goriva, naime, ovaj pristup obuhvaćao je potrebu pravilnog zasićenja uzoraka pod in situ stresom prije ispitivanja, osiguranja zadovoljavajućih uvjeta odvodnje s izazovom u niskoj propusnosti materijala. To je dobiveno razvojem novih uređaja karakteriziranih kratkom drenažnom duljinom, osobito novog šupljeg cilindra (toplinski troosni aparat). Eksperimentalno istraživanje provedeno je na tri gline i glinenom kamenu koje se smatraju potencijalnim stijenama domaćinom: Boom Clay iz URL –a (Underground Research Laboratory) Mol (Belgija), glina Opalinus s URL-a Mont-Terri (Švicarska) i glinjak iz COx s URL -a Bure (Francuska). Prvi niz testova koje je provodio aparat sa šupljim cilindrima su potpuno ispražnjena termomehanička ispitivanja koja su omogućila dovršetak razumijevanje promjena toplinskog volumena u glinama i glinenim kamenjem. Nakon što je prethodno opterećen ciklusom stresa, Cox glina pokazuje termo-elasto-plastični odgovor s početnim termoelastičnim širenjem, nakon čega slijedi skupljanje na višoj temperaturi. Opalinus glina također je pokazala termo-elasto-plastični odgovor s toplinskim širenjem do maksimalne podržane temperature slojem tijekom geološke povijesti, nakon čega slijedi plastična kontrakcija. Toplinsko stvrđavanje također je dokazano tijekom kasnijeg temperaturnog ciklusa. Ni temperatura ni prekidi smicanja ne utječu na ograničavajući učinak glina i glinenog kamena što je očekivano u krutim plastičnim glinama poput Boom Clay -a. U glinjacima, ovo je povezano sa frakcijom smektita za koju se čini da je mobilizirana duž posmičnih diskontinuiteta.

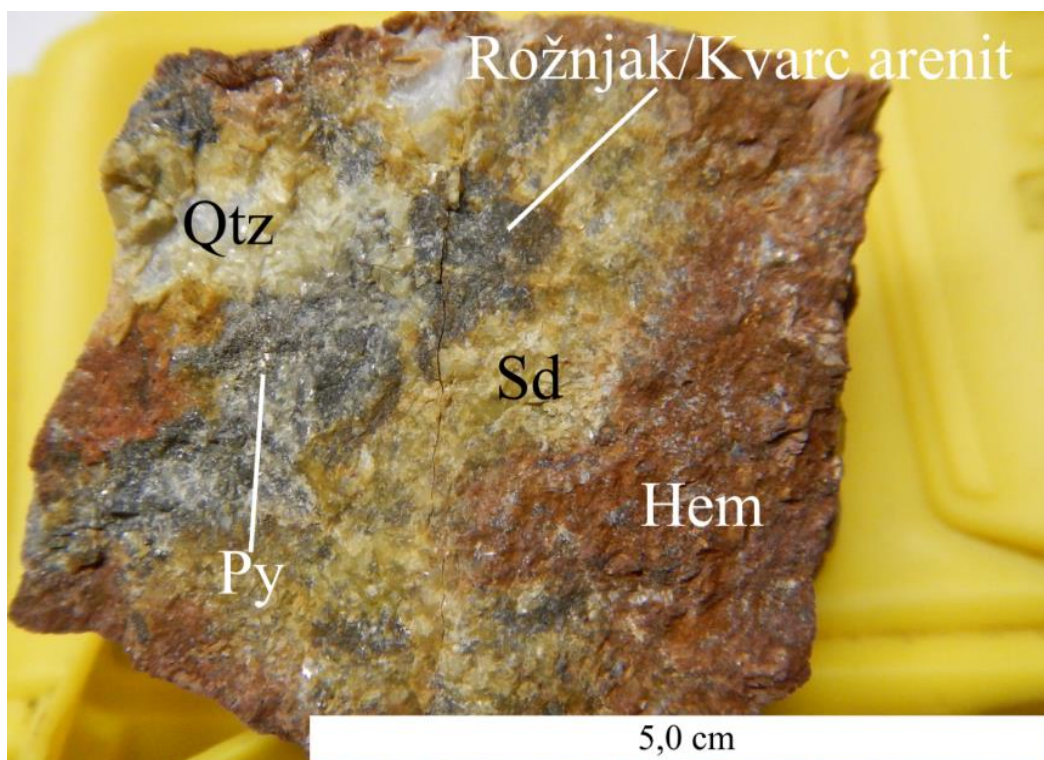
Beran (2015) govori o razlici u koeficijentu toplinskog širenja što uzrokuje nastanak visokih toplinskih naprezanja u žbuci i kamenu tijekom toplinskih ciklusa. Polumjer zakrivljenosti kamenih uglova značajno je utjecao na vrijednosti toplinskog naprezanja prilikom zidanja. Budući da su kameni blokovi često najvrjedniji dio povijesnog građenja, prilikom zidanja kod kamenih blokova s uglovima s većim radijusom zakrivljenosti povećanje naprezanja zbog različitih toplinskih ekspanzija je mnogo manje nego kod zidanja s kamenim blokovima sa šiljatim uglovima. Tijekom zagrijavanja dolazi do pritiska kamena, dok je veću štetu može prouzročiti napetost tijekom hlađenja. Visoki tlakovi u kamenim uglovima ljeti uslijed viših temperatura, mogu se promijeniti u velika vlačna naprezanja zimi. To može uzrokovati stvaranje pukotina u kamenju. Razlika između toplinskog koeficijenta širenja

žbuke i kamena mora biti što je moguće manja jer se u protivnom mogu pojaviti pukotine u zidu.

## 2 MINERALOŠKO-PETROLOŠKA ANALIZA STIJENSKOG MATERIJALA

### 2.1 Mineraloško-petrološka analiza stijenskog materijala

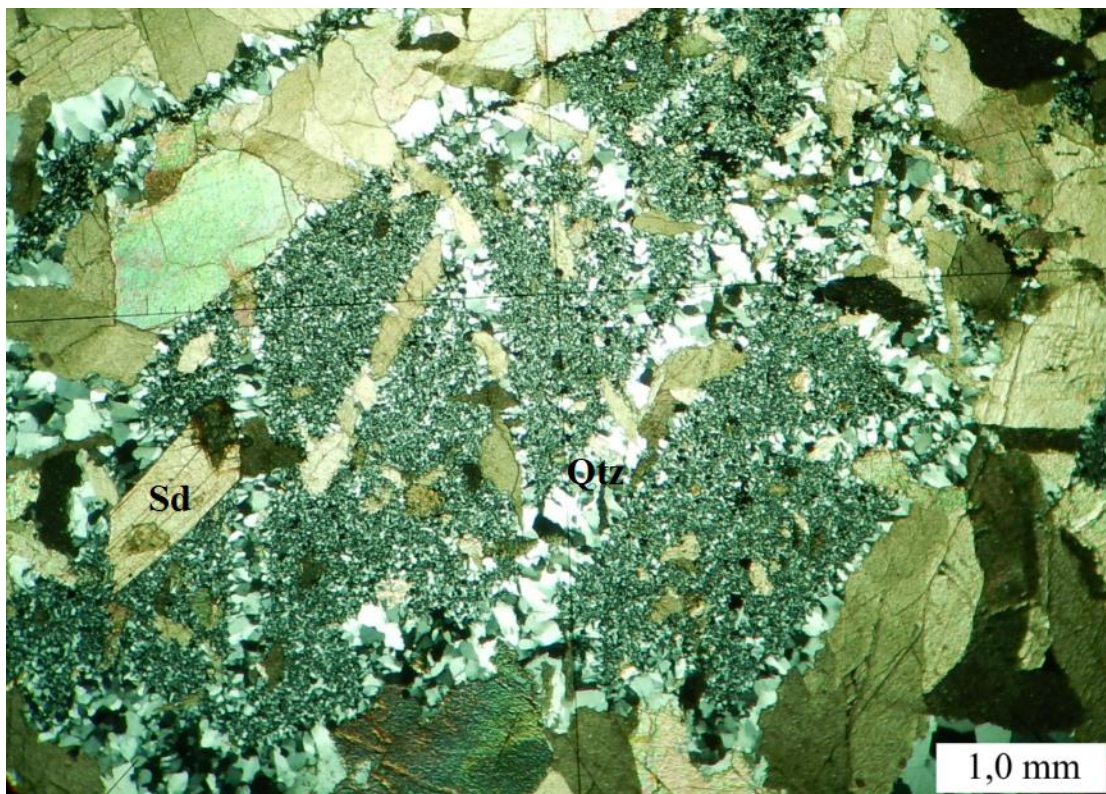
Odabrana stijena je dio Sideritno – polisulfidno – baritno – hematitnog ležišta u Rudama. Stijena domaćin mineralizacije je permski siliciklastični sediment koji se nalazi ispod slojeva gipsa i anhidrita (Palinkaš et al., 2010). Spomenute permske naslage najčešće su izgrađene od sitno do krupno zrnatih, svijetlih i gustih pješčenjaka te kvarcnih konglomerata, a kao proslojci i ulošci na mjestima se javljaju uz šejlove i siltiti (Šinkovec, 1971). Detaljnom petrološkom analizom bušotinske jezgre uočeno je intenzivno orudnjenje stijene domaćina (**slika 2-1**) budući da gotovo cijeli volumen ispitanog uzorka (~50 dm<sup>3</sup>) predstavlja rudna mineralizacija dok je ostatak stijene domaćina u obliku nepravilnih fragmenata.



**Slika 0-1.** Uzorak jezgre uzete s mikrolokacije eksperimenta.

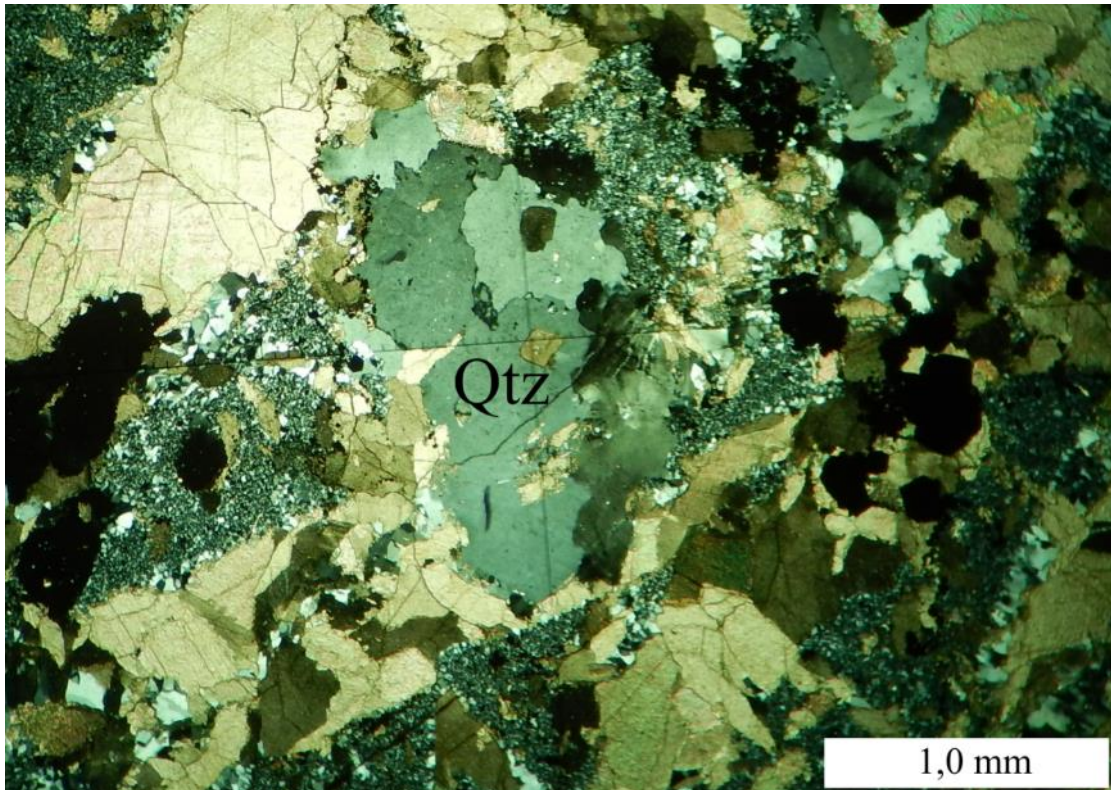
Hem = hematit, Sd = siderit, Py = pirit, Qtz = kvarc

Najzastupljeniji rudni minerali siderit i kvarc čine više od 70 % jezgre. Manje su prisutni hematit i sulfidni minerali, najvjerojatnije pirit i halkopirit. Stijena domaćin skoro je u potpunosti izmijenjena i pretežno se sastoji od sitno zrnatog kvarca (< 0,05 mm) koje odgovaraju rožnjaku (**slika 2-2**) međutim, rijetka polikristalna zrna kvarca (**slika 2-3**) većih dimenzija (1-2 mm) ukazuju na to da se možda radi i o pješčenjaku sa sitno kristalastim kvarcnim cementom, odnosno kvarc arenitu.



**Slika 0-2.** Sitno zrnati kvarc prošaran brojnim pukotinama ispunjenim s kvarcom i sideritom (+N).

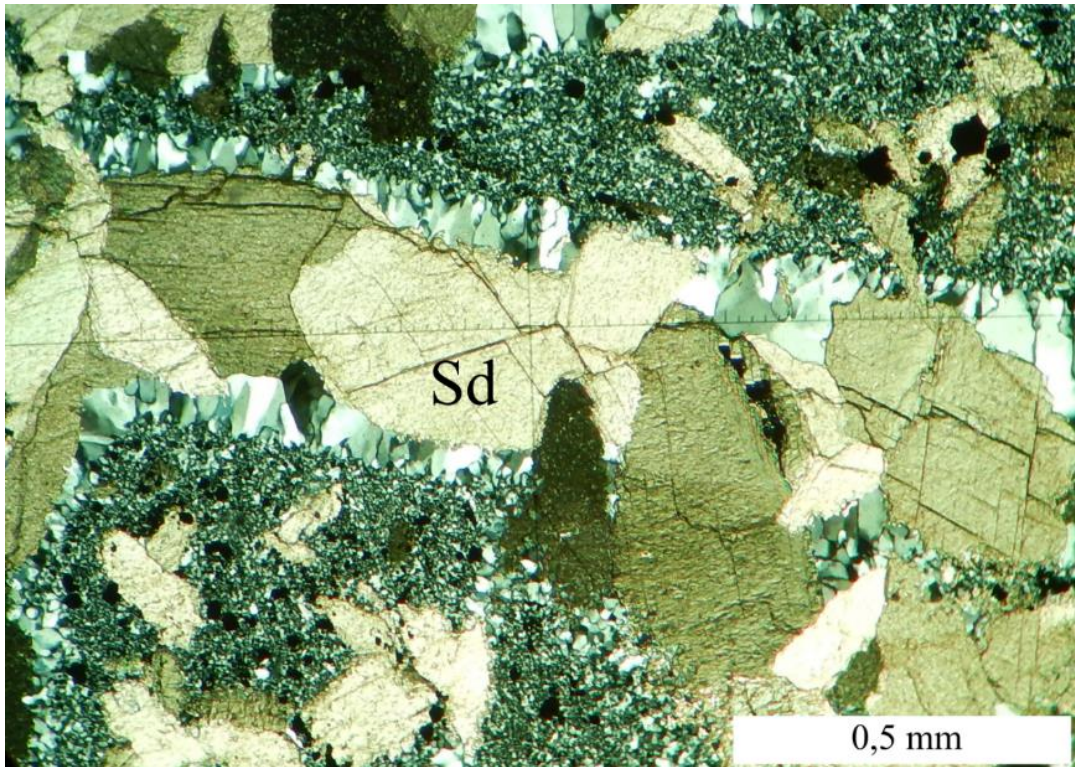
Qtz = kvarc, Sd = siderit



**Slika 2-3.** Polikristalno zrno kvarca (+N).

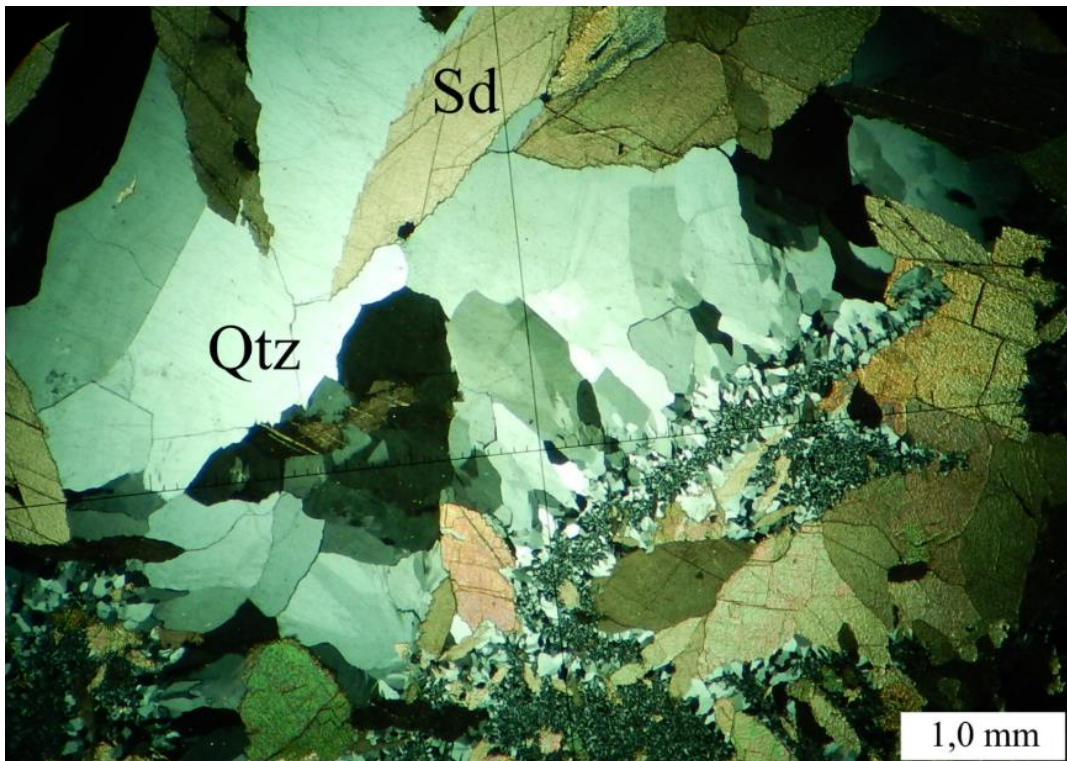
Qtz = kvarc

Siderit na uzorku uočavaju se u karakterističnim listićavim kristalnim formama smeđe boje (**slika 2-1**). Pojavljuje se u različitim dimenzijama i formama ali najčešće s kvarcom i hematitom ispunjava šupljine i pukotine. U pukotinama se rijetko nalazi sam jer zauzima centralni dio pukotine u nepravilnim do lećastim formama dimenzija do 1,3 mm uz kvarc na rubovima (**slika 2-4**). U većim šupljinama siderit može formirati kristale i do 3 mm (**slika 2-5**).



**Slika 2-4.** Pukotina ispunjena kvarcom po rubovima i sideritom u centralnom dijelu (+N).

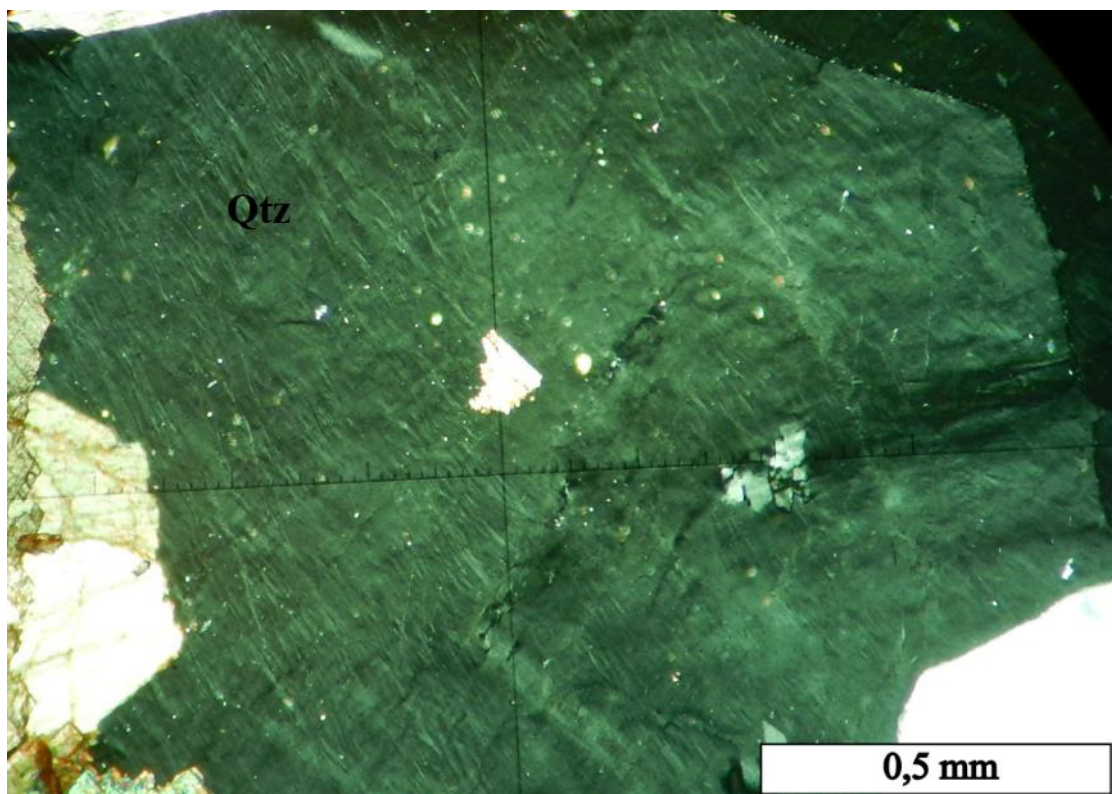
Sd = siderit



**Slika 2-5.** Minerali kvarca i siderita kao ispune većih šupljina (+N).

Sd = siderit, Qtz = kvarc

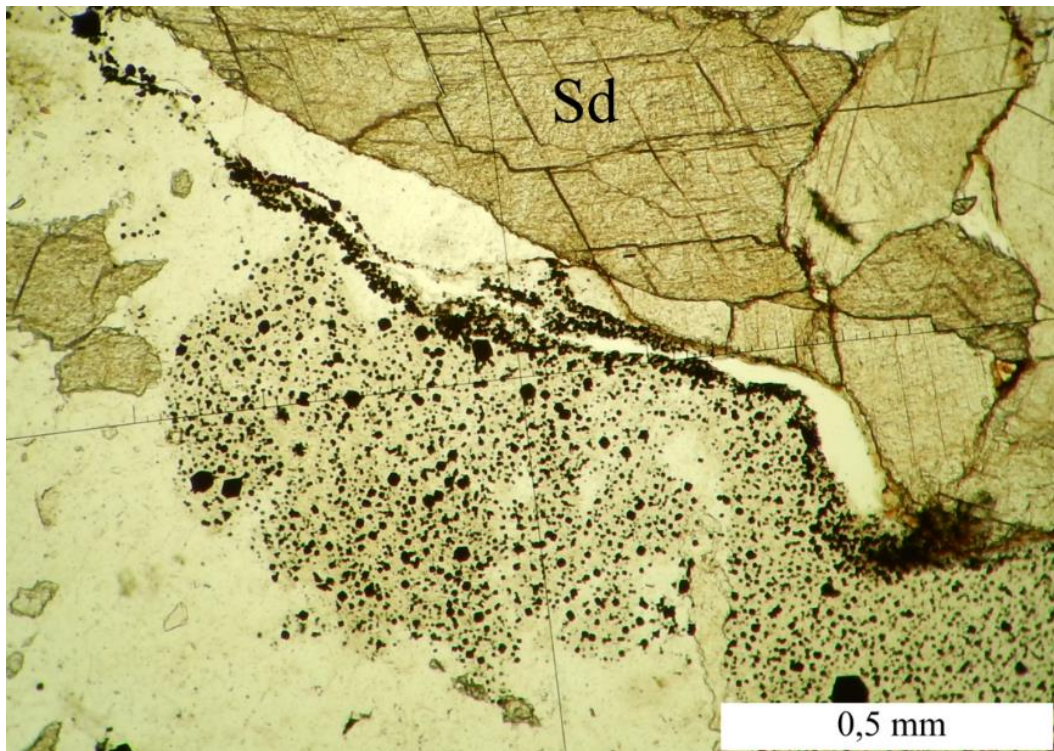
Kvarc sa sideritom ispunjava, kako je već rečeno, pukotine i šupljine unutar stijene. Glavni je rudni mineral te je u najvećoj mjeri prisutan u stijeni domaćinu. Kvarc formira i sitno zrnati agregat dimenzija manjih od 0,05 mm, koji u ovom slučaju ima ili ulogu cementa ili formira vlastitu stijenu, rožnjak (**slika 2-2**). Nadalje, u manjim pukotinama čini jedinu ispunu dok je u većim zajedno sa sideritom na način da siderit zauzima centralni dio a kvarc stijenke pukotine odnosno rubni dio (**slika 2-4**, **slika 2-5**). U većim šupljinama kvarc formira kristale dimenzija i do 2 mm (**slika 2-5**). Veća zrna kvarca prošarana su inkluzijama, a vidljivi su i tragovi deformacija kao što su undulozno potamnjenje i deformacijske lamele (**slika 2-6**).



**Slika 2-6.** Deformacijske lamele i undulozno potamnjenje u kvarcu (+N).

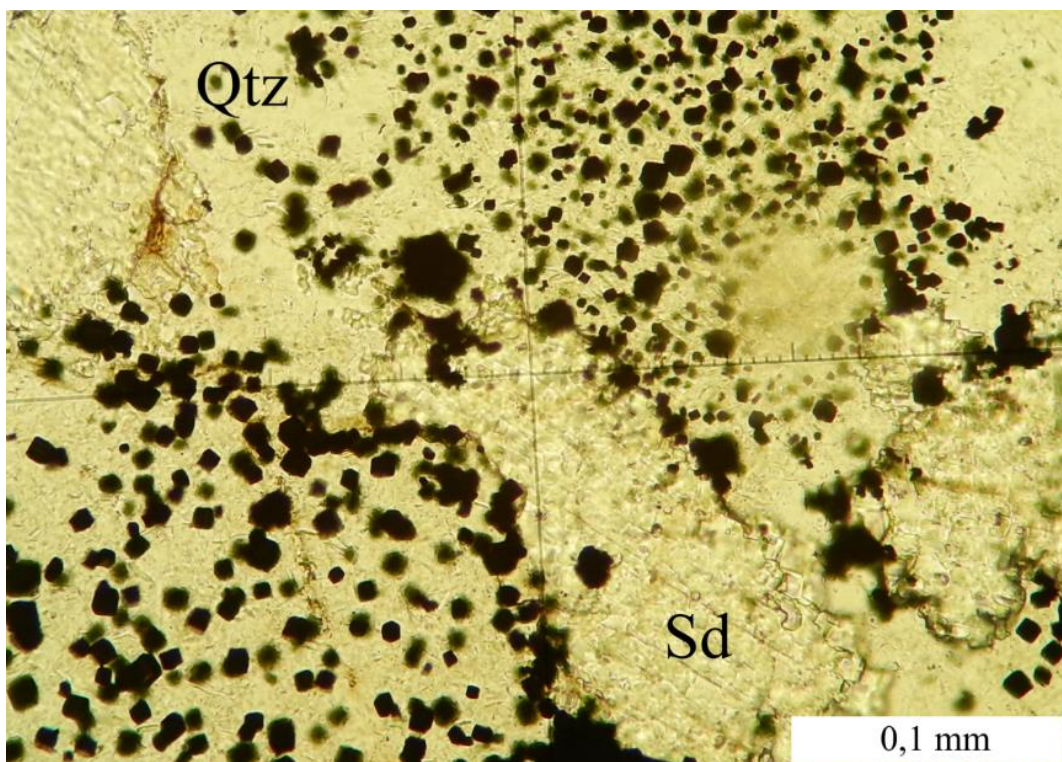
Qtz = kvarc

Sulfidi su na **slici 2-1**. označeni sa Sd te su sitnozrnati agregati zlatnožute boje metalnog sjaja. U najvećoj mjeri se javljaju kao impregnacija u sitno zrnatom kvarcnom cementu pješčenjaka te kao pukotinska ispuna (**slika 2-7**). Vrlo su malih dimenzija, do 0,2 mm, a često su razvijeni idiomorfni oblici heksaedra i dodekaedra tipični za pirit (**slika 2-8**).



**Slika 2-7.** Sulfidni minerali impregnirani u stijeni domaćinu i koncentrirani u pukotini (N).

Sd = siderit

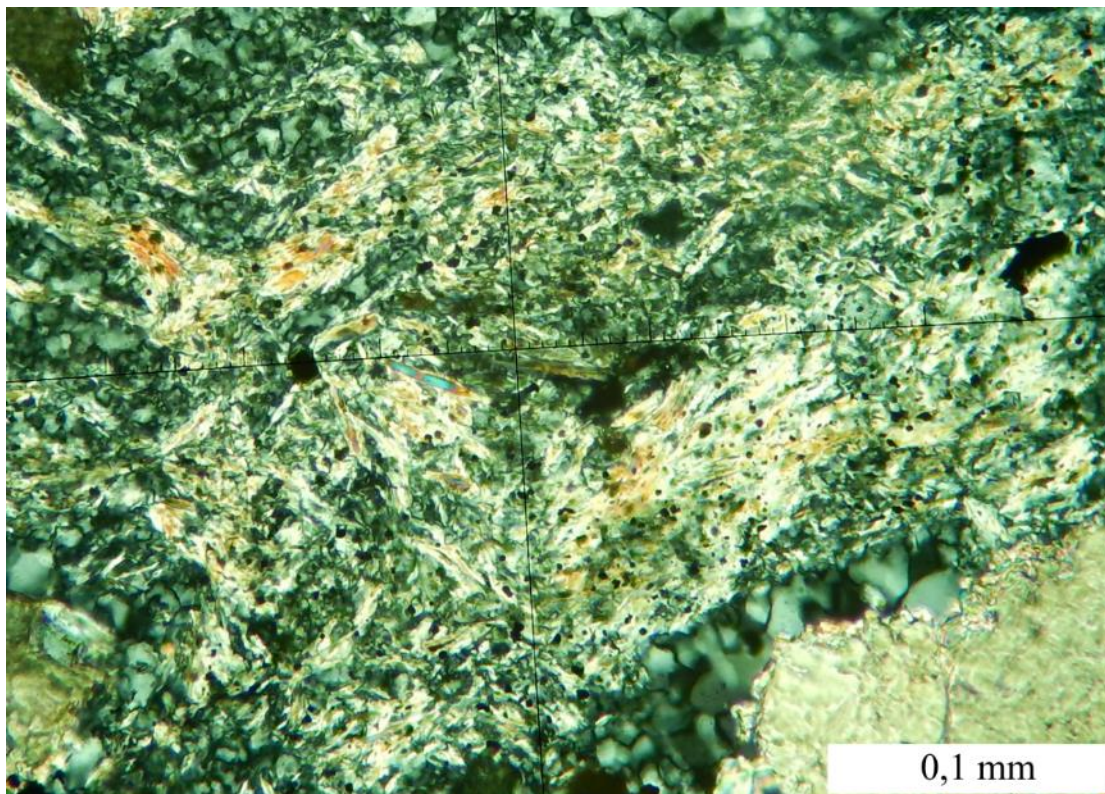


**Slika 2-8.** Idiomorfni kristali sulfida (N).

Sd = siderit, Qtz = kvarc



Od ostalih minerala prisutni su tinjci, od kojih se ističe sitno zrnati listićavi sericit dimenzija manjih od 0,035 mm uz manje pukotine i/ili sa sulfidima (**slika 2-9**).



**Slika 2-9.** Sitno zrnati tinjac (sericit) udružen s mineralima sulfida (+N).

Iz obavljene petrografske analize ustanovljeno je da je grijaće tijelo eksperimenta smješteno u rudnom tijelu koje sadrži sljedeće minerale: siderit, kvarc, hematit i sulfidne faze, najvjerojatnije pirit. Stijena domaćin potpuno je dezintegrirana i u rudnom tijelu nalaze se tek relikti koji dokazuju da se radi o rožnjaku ili o pješčenjaku sa sitno zrnatim kvarcnim cementom, odnosno o kvarc arenitu. Nije moguće odrediti stupanj zrelost, kao ni porijeklo pješčenjaka/rožnjaka budući da je mala količina relikata. No prema dominantno kvarcnom sadržaju te deformacijskim strukturama minerala može se pretpostaviti da su barem dijelom iz kiselih metamornih protolita.

## 2.2 Toplinsko širenje kamena

Prema Bilbija 1984., toplinska vodljivost je svojstvo materije da prenosi toplinu kroz svoju sredinu. Kod kamena se odvija kondukcijom ili vodljivosti. To je proces razmjene kinetičke energije pri sudaru elektrona ili predaje promjene kristalne rešetke od jedne čestice ka drugoj. Vođenje topline sudarom slobodnih elektrona sa atomima i ionima je znatno brže od onog koje se vrši elastičnom promjenom čestica rešetke. Prvo spomenuto je karakteristično za metale kao dobre vodiče dok je drugo karakteristično za izolatore u koje spada i kamen.

Prilikom izlaganja kamena visokim temperaturama on podliježe određenim promjenama koje se ogledaju u promjenama njegovih svojstava te naposljetku kemijskom i/ili fizičkom uništavanju. Prema koeficijentu linearnog toplinskog širenja, glavne vrste kamena mogu se razvrstati u tri grupe (**tablica 2-1**).

**Tablica 2-1.** Toplinsko širenje glavnih vrsta kamena pri 100 °C temperaturne razlike (Bilbija, 1984).

<i>Širenje kamena do 0,75 mm/m</i>	<i>Širenje kamena do 1 mm/m</i>	<i>Širenje kamena do 1,25 mm/m</i>
Mramor	Gabro	Kvarcit
Vapnenac	Diorit	Pješčenjak
Dolomit	Granit	Porfirit
Dijabaz	Trahit	Kvarcporfirit

Prema (Bilbiji, 1984), laboratorijskim ispitivanjima koeficijenta toplinskog linearnog širenja dokazano je da se nakon nekoliko ciklusa zagrijavanja i hlađenja može očekivati i do 20 % trajne deformacije u odnosu na izračunato izduženje. Pri izlaganju kamena visokim temperaturama (npr. požar) kod svih minerala dolazi do različitog širenja. Kvarc se širi četiri puta više nego feldspati i dva puta više od hornblenda stoga se pri intenzivnom zagrijavanju on smatra najkritičnijim mineralom čvrstih stijena. Kvarc se najviše širi pri temperaturi od 573 °C pri kojoj niskotemperaturni ( $\alpha$ ) kvarc prelazi u visokotemperaturni ( $\beta$ ) kvarc.

Povećanjem sadržaja vlage u poroznim stijenama smanjuje se njihova izolacijska sposobnost. Zrak koji je bio dobar izolator zamjenjuje se vodom koja je 25 puta bolji vodič topline. Prilikom prelaska vode u čvrsto stanje tj. led, toplinska vodljivost kamena se povećava. Među stijenama izdvaja se plovuĉac kao vrlo dobar temperaturni izolator zbog niske toplinske vodljivosti. Kamen koji bolje provodi toplinu hladan je na dodir te na njegovoj površini moŹe doći do kondenzacije vlage sadržane u zraku (Bilbiji, 1984).

Promjena dimenzija kamena, širenje ili skupljanje, prilikom povećanja temperature naziva se koeficijent toplinskog širenja. Po definiciji, koeficijent linearnog toplinskog širenja predstavlja izduženje tijela jediniĉne duŹine pri povišenju temperature za 1 °C. Minerali se uglavnom ne šire podjednako u svim pravcima, osim kod amorfnih minerala, jer su anizotropni. Vrijednosti linearnog toplinskog širenja nekih minerala u temperaturnom intervalu 20 °C do 100 °C prikazane su u **tablici 2-2**.

**Tablica 2-2.** Vrijednosti linearnog toplinskog širenja minerala u temperaturnom intervalu od 20 do 100 °C.

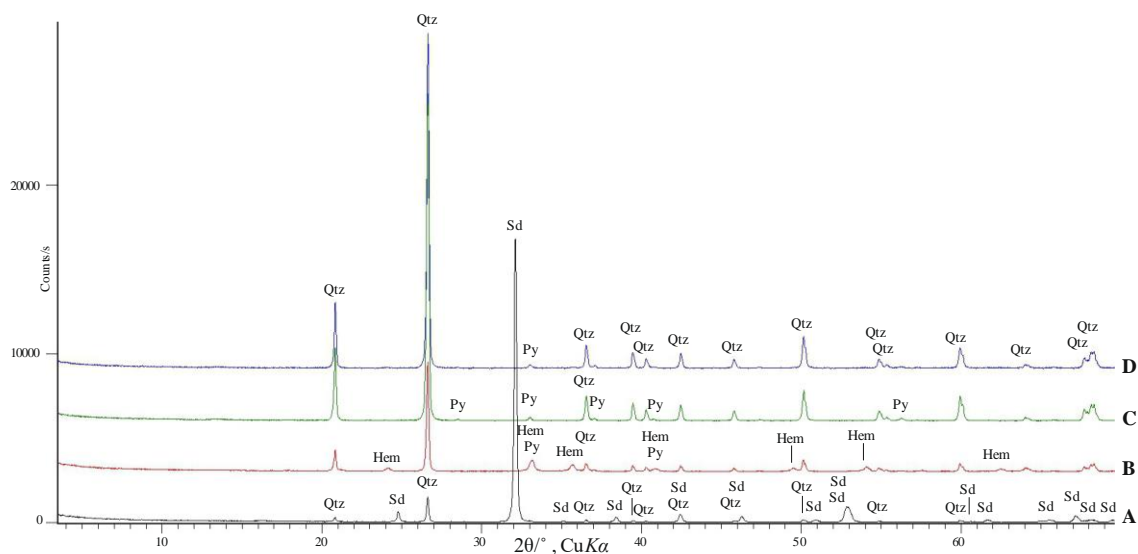
Mineral	Linearno širenje u %	Zapreminsko širenje u %
Kalcit	0,189	0,105
Hematit	0,068	0,202
Aragonit	0,05	0,36
Kvarc	0,14	0,36
Olivin	0,04	0,19

Koeficijent linearnog toplinskog širenja u najvećoj mjeri ovisi o mineralnom sastavu, poroznosti i naĉinu slaganja minerala. Kod magmatskih stijena, povećanjem sadržaja SiO<sub>2</sub> koeficijent se povećava. Prisustvo pora i njihova ravnomjerna raspodjela u prostoru omogućuje širenje mineralnih zrna u porni prostor.

Naime, poroznost ima vaŹan utjecaj na toplinsku vodljivost kamena. Kamen s velikim brojem kapilarnih i ravnomjerno raspoređenih pora slabije će provoditi toplinu od istog kamena koji ih ne sadrŹi. Plovuĉac poradi meĉusobno izoliranih pora ima najbolje toplinske izolirajuće osobine. U poroznom kamenu prijenos topline vrši se putem kondukcije kroz čvrstu fazu, konvekcijom kroz plinoviti dio i zraĉenjem unutar istog tog prostora (Bilbija, 1984).

## 2.3 Mineralni sastav uzorka prema rendgenskoj analizi

Difrakcijske slike praha snimljene su pomoću Philipsovog difraktometra s brojačem,  $\text{CuK}\alpha$  zračenjem ( $U=40$  kV,  $I=35$  mA). Snimljena je difrakcijska slika originalnog uzorka laboratorijske oznake 8052 te slika neotopljenog ostatka dobivenog otapanjem uzorka u 5 postotnoj octenoj kiselini, kojom su uklonjeni karbonati (siderit). Radi uklanjanja oksida željeza i provjere prisutnosti pirita, navedeni neotopljeni ostatak otapan je u 18 %-tnoj klorovodičnoj kiselini (HCl-u) i u ditionit-citrat-bikarbonatu (DCB-u). Nakon svakog otapanja snimljene su difrakcijske slike dobivenih neotopljenih ostataka. Sve difrakcijske slike prikazane su na **slici 2.10**. Mineralni sastav uzorka (orijentacijski udjeli u % tež.). Dominantan mineral u uzorku je **siderit**, udio kojeg je 73 % tež., a također sadrži i **kvarc**, (otprilike 8 % tež.), **hematit** ( $\approx 9$  % tež.) i **pirit**, udio kojeg je vrlo nizak ( $< 5$  % tež.). Na difrakcijskim slikama uočljivo je i nekoliko linija izuzetno niskih intenziteta. One pripadaju mineralima koje, zbog njihovog vrlo niskog udjela, nije moguće odrediti.



**Slika 1.** Difrakcijske slike uzorka 8052:

A - difrakcijska slika originalnog uzorka

B - difrakcijska slika neotopljenog ostatka dobivenog otapanjem uzorka u 5 %-tnoj octenoj kiselini

C - difrakcijska slika neotopljenog ostatka dobivenog 24-satnim otapanjem uzorka u toploj 18 %-tnoj HCl (uzorak je prethodno otapan u 5 %-tnoj octenoj kiselini)

D - difrakcijska slika neotopljenog ostatka dobivenog otapanjem uzorka u DCB-u (uzorak je prethodno otapan u 5 %-tnoj octenoj kiselini)

Legenda:

Sd - siderit

Hem - hematit

Qtz - kvarc

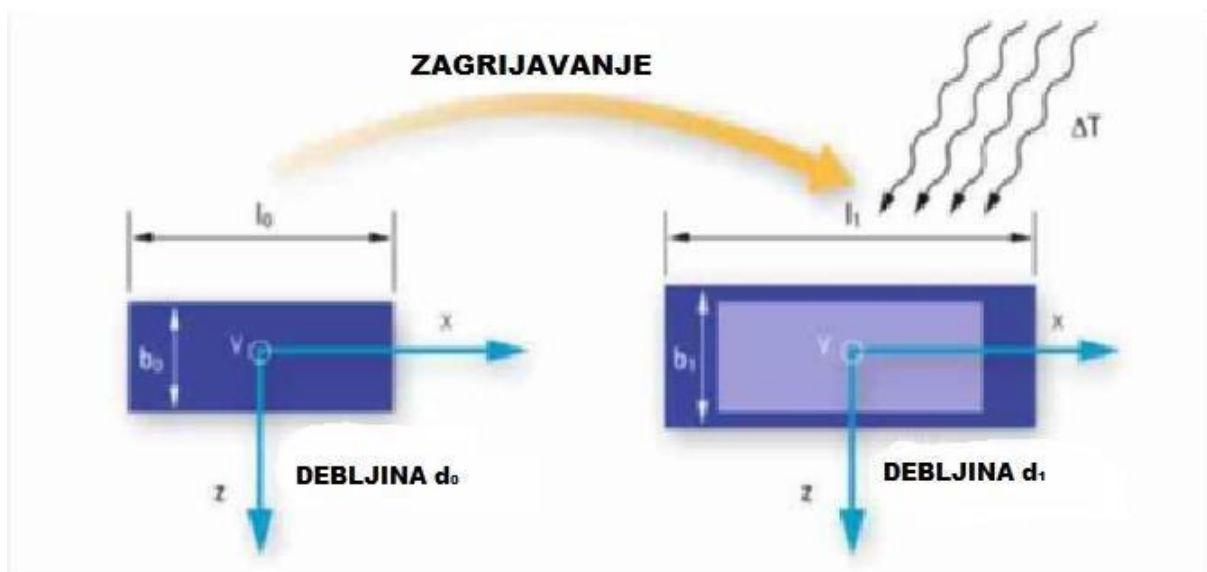
Py - pirit

**Slika 2-10.** Difrakcijske slike uzorka

### 3 ODREĐIVANJE LINEARNOG KOEFICIJENTA ŠIRENJA PRIRODNOG KAMENA

#### 3.1 Linearni koeficijent širenja kamena

Linearni koeficijent širenja je svaka promjena volumena tijela u odnosu na njegovo početno stanje prilikom povećavanja temperature. Tijelo se širi u sve tri dimenzije, ali najčešće se promatra širenje u dvije dimenzije. Zagrijavanjem s neke početne temperature  $T_0$  (npr. 20 °C) na krajnju temperaturu  $T$  (npr. 80 °C), promatra se promjena njegove dimenzije s neke početne duljine  $l_0$  na duljinu  $l$ . **Slika 3-1.** prikazuje promjenu na kamenu tijekom djelovanja temperature. Različite vrste kamena imaju drukčiji linearni koeficijent širenja što ovisi o smjeru širenja samog kamena. Kod nekih se vrsta može širiti po jednoj osi, dok po drugoj sužavati, a to se događa zbog anizotropije stijena. Pri projektiranju i gradnji važno je uzeti u obzir da kamen ima puno manji koeficijent toplinskog širenja od betona ili čelika. U **tablici 3-1.** prikazan je tipičan raspon toplinskih koeficijenata linearnog širenja za neke vrste kamena.



**Slika 3-1.** Promjena debljine i širine kamena tijekom djelovanja temperature (RAM, 2005).

Duljina na nekoj temperaturi može se izračunati iz formule (3-1) ako je poznata dimenzija pri referentnoj temperaturi, razlika temperature te koeficijent linearnog širenja:

$$l = l_0(1 + \alpha\Delta T), \quad (3-1)$$

$$\Delta T = T - T_0, \quad (3-2)$$

gdje je:

$l_0$ - početna duljina tijela na temperaturi  $T_0$  ,

$l$ - duljina na temperaturi  $T$  ,

$\alpha$ - koeficijent linearnog širenja ,

$\Delta T$ - razlika temperature u °C.

**Tablica 3-1.** Tipičan raspon toplinskih koeficijenata linearnog širenja za neke vrste kamena (Obrada kamena, 2007).

Vrste kamena	$\alpha$ ( $10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ )
vapnenac	17-68
mramor	27-51
gabro, diorit	20-30
granit	37-60
pješčenjak	37-63

Obzirom da nije bilo izvedivo provesti in situ određivanje koeficijenta linearnog toplinskog širenja stijene, zbog osjetljivosti mjerne opreme, visoke cijene potrošnog materijala i mogućnosti oštećenja opreme i mjernih traka prilikom ugradnje, ispitivanja su provedena u Laboratoriju za rudarsku mehanizaciju i arhitektonsko-građevni kamen uz pomoć Laboratorija za električna mjerenja i instrumentaciju na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.

Prema Studiji „Thermal Expansion Properties of Rocks: literature Survey and Estimation of Thermal Expansion Coefficient for Olkiluoto Mica Gneiss“ (Posiva, 2004) izrađenoj u sklopu finskog programa zbrinjavanja ING-a, koja predstavlja istraživanje toplinskog širenja stijene, kao jedan od glavnih problema postavljena je mineralizacija koja se pojavljuje kod vode i stijene na 4 °C i uzrokuje širenje stijene. Nadalje, termičko širenje uzrokovat će pojavu termičkih naprezanja u stijeni. Zbog zagrijavanja stijenske mase pod uvjetima povećanih naprezanja doći će do promjena u strukturi stijene i fizičkih svojstava stijene. Očekivana je pojava dviju vrsta pukotina: 1) pukotine uzrokovane termičkim gradijentom zbog nehomogenosti stijene i 2) pukotine termičkih ciklusa nastalih poradi nehomogenošću stijene uzrokovanih različitim naprezanja – razlika u termičkoj ekspanziji na granicama mineralnih zrna. Mjerenja su provedena korištenjem tenziometarskih traka.

Zapažene su ozbiljne posljedice uzrokovane različitim širenjem pojedinih mineralnih zrna: koeficijent širenja kvarca je 16,67 ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ), plagioklasa 4,17 ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ), muskovita/biotita 12,13 ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ) i feldspata 3,69 ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ). Zaključeno je kako količina kvarca i muskovita/biotita ima najznačajniju ulogu uzrokujući najveće širenje i poradi njihovog anizotropnog širenja (Veinović et al., 2020).

### 3.2 Norma HRN EN 14581-2004

Mjerenja su provedena u skladu s europskom normom HRN EN 14581:2004., metodom B: mjernim trakama kao mjeračima deformacija (tenziometarske trake). Nakon sušenja uzorka do konstantne mase, uzorak se podvrgava mjerenju u definiranom smjeru pri najmanje dvjema održanim temperaturama. Koeficijent linearnog toplinskog širenja među dvjema ekstremnim temperaturama izražava se kao promjena jedinice mjere pri promjeni temperature za 1  $^{\circ}\text{C}$ .

Zbog anizotropije stijena, koeficijent toplinskog širenja može se mijenjati u smjeru u kojem se provodi mjerenje. Također, u nekim slučajevima koeficijent toplinskog širenja može biti u nekim smjerovima negativan, a u nekima pozitivan. Koeficijent toplinskog širenja nije linearan s temperaturama. Raspon temperatura u ovoj normi je od 20  $^{\circ}\text{C}$  do 80  $^{\circ}\text{C}$ , i pretpostavit će se da je  $\alpha_i$  linearan u ovom rasponu. Ukoliko linearnost koeficijenta toplinskog širenja treba biti procijenjena, potrebno je izvršiti dodatna mjerenja na različitim temperaturama i ucrtati ih na grafikon.

Veličine bitne za provođenje eksperimenta po normi su:

- $l_{s20}$  – početna duljina uzorka na temperaturi od  $(20 \pm 0,5)$   $^{\circ}\text{C}$  u mm.
- $l_{s80}$  – konačna duljina uzorka na temperaturi od  $(80 \pm 0,5)$   $^{\circ}\text{C}$  u mm.
- $\Delta l_s = (l_{s80} - l_{s20})$  – promjena duljine uzorka u mm. Ako je s  $\Delta l$  pozitivna, predstavlja proširenje, ako je negativna skupljanje.
- $l_{r20}$  – početna duljina referentnog uzorka na temperaturi od  $(20 \pm 0,5)$   $^{\circ}\text{C}$  u mm.
- $l_{r80}$  – konačna duljina referentnog uzorka na temperaturi od  $(80 \pm 0,5)$   $^{\circ}\text{C}$  u mm.
- $\Delta l_s = (l_{r80} - l_{r20})$  – promjena duljine referentnog uzorka u milimetrima.

- $\Delta T - (60 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$ , promjena u temperaturi od  $(20 \pm 0,5) \text{ }^\circ\text{C}$  do  $(80 \pm 0,5) \text{ }^\circ\text{C}$ .
- $\varepsilon_r$  – jedinstveno linearno toplinsko širenje referentnog uzorka u  $10^{-6}$  (mm/mm).
- $\varepsilon_{si} = \frac{\Delta l_s}{l_{s20}}$  – jedinstveno linearno toplinsko širenje uzorka u smjeru "i" u  $10^{-6}$  (mm/mm).
- $\varepsilon_{s1}, \varepsilon_{s2}, \varepsilon_{s3}$  – jedinstveno linearno toplinsko širenje uzorka u tri pravokutna smjera u  $10^{-6}$  (mm/mm).
- $\alpha_i$  – koeficijent linearnog toplinskog širenja uzorka u smjeru "i" u  $^\circ\text{C}^{-1}$
- $\alpha_r$  – koeficijent linearnog toplinskog širenja referentnog uzorka u  $^\circ\text{C}^{-1}$ .
- $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  – koeficijent linearnog toplinskog širenja uzorka duž tri pravokutna smjera, u  $^\circ\text{C}^{-1}$ .

Za odabranu metodu, metodu B, potrebna oprema predstavlja pećnicu s cirkulacijom zraka i uređaj za mjerenje naprezanja tenziometarskim trakama. Pećnica s cirkulacijom zraka treba biti sposobna povisiti temperaturu s  $(20 \pm 0,2) \text{ }^\circ\text{C}$  na  $(80 \pm 0,2) \text{ }^\circ\text{C}$  brzinom od  $0,5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$  i održavati temperaturu unutar tog raspona najmanje dva sata s točnošću od najmanje  $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### 3.3 Uređaj za mjerenje naprezanja

Kako bi proveli pokus, u Laboratoriju za rudarsku mehanizaciju i arhitektonsko-građevni kamen na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu koristi se klima komora s opcijom grijanja, hlađenja i kontrole vlažnosti, zapremine  $1 \text{ m}^3$  tvrtke Memmert (**slika 3-2**).

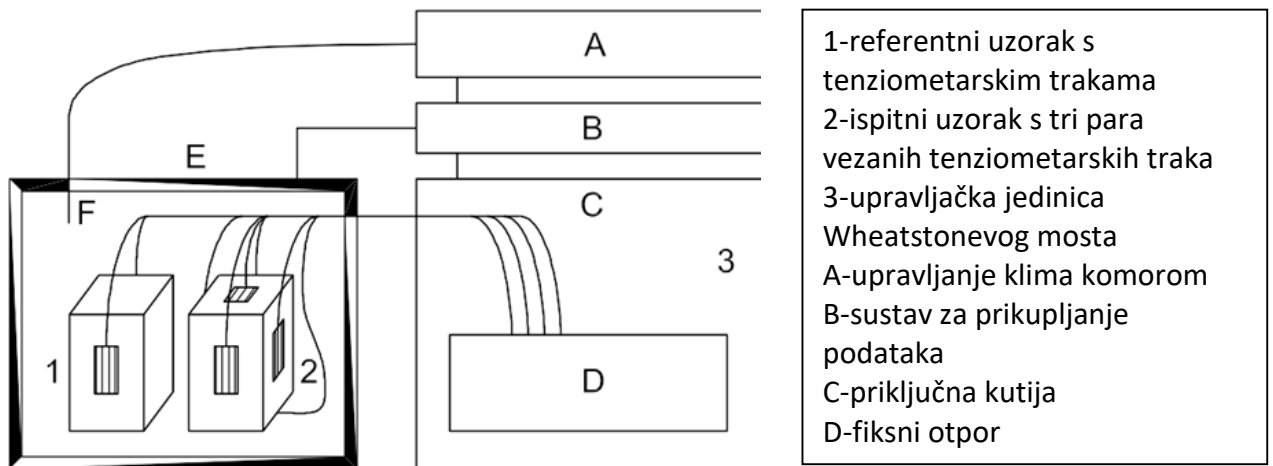
Prema normi HRN EN 1481-204, uređaj za mjerenje naprezanja (**slika 3-3**), koji se koristi za mjerenja metodom B uključuje mjerni uređaj HBM QuantumX MX840A i MX840B te elektrootporne (tenziometarske) trake prema specifikacijama proizvođača i iskustvu laboratorija za ispitivanje. Duljina elektrootpornih traka treba biti najmanje osam puta veća od maksimalne veličine zrna stijene koja se ispituje te u slučaju izuzetno velikih zrna, ova duljina treba biti 3 puta veća od najveće veličine zrna. Mjerni sustav sastoji se od električnog



mosta (Wheatstoneov most) i mjernog uređaja, s najmanje četiri mjerna kanala pri čemu točnost uređaja mora biti najmanje  $5 \times 10^{-6}$  (mm/mm).



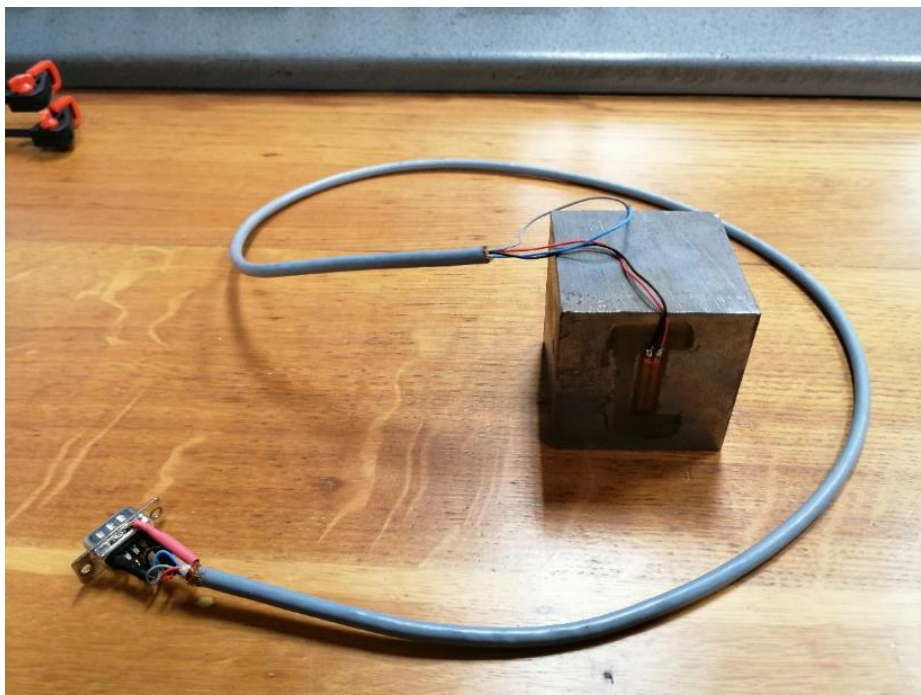
**Slika 0-2.** Klima komora s opcijom grijanja, hlađenja i kontrole vlažnosti, zapremine  $1 \text{ m}^3$  tvrtke Memmert (1 – kontrolna ploča, 2- prekidač za paljenje, 3 – komora s ventilatorom, 4 – čelična rešetka, 5 – radna komora, 6 – ploča s podacima, 7 – ručka za otvaranje, 8 – kontrolno-upravljački gumb, 9 – USB priključak).



**Slika 0-3.** Shema postavljanja ispitnih uređaja za mjerenje deformacija.

### 3.4 Priprema uzoraka

Kalibrirani referentni uzorak, s poznatim koeficijentom toplinskog širenja u rasponu ispitnih temperatura (20 do 80) °C može biti izrađen od različitih materijala s niskim koeficijentom toplinskog širenja (npr. invar čelik tj. legura željeza i nikla, itd.). Duljina stranica referentnog uzorka mora biti dvostruko veća od duljine tenziometarskih traka, odnosno najmanjih dimenzija 50 mm x 50 mm. Za potrebe ovog ispitivanja korišten je referentni uzorak prikazan na **slici 3-4**.



**Slika 0-4.** Referentni uzorak.

Kao uređaj za mjerenje temperature potrebno je koristiti mjerni instrument s točnošću od najmanje 0,2 °C. Za potrebe ovog eksperimenta korišten je kalibrirani mjerni uređaj integriran u klima komori, te dodatne sonde za mjerenje temperature spojene na mjerni uređaj HBM QuantumX MX840A (slika 3-5).



**Slika 0-5.** HBM QuantumX MX840A.

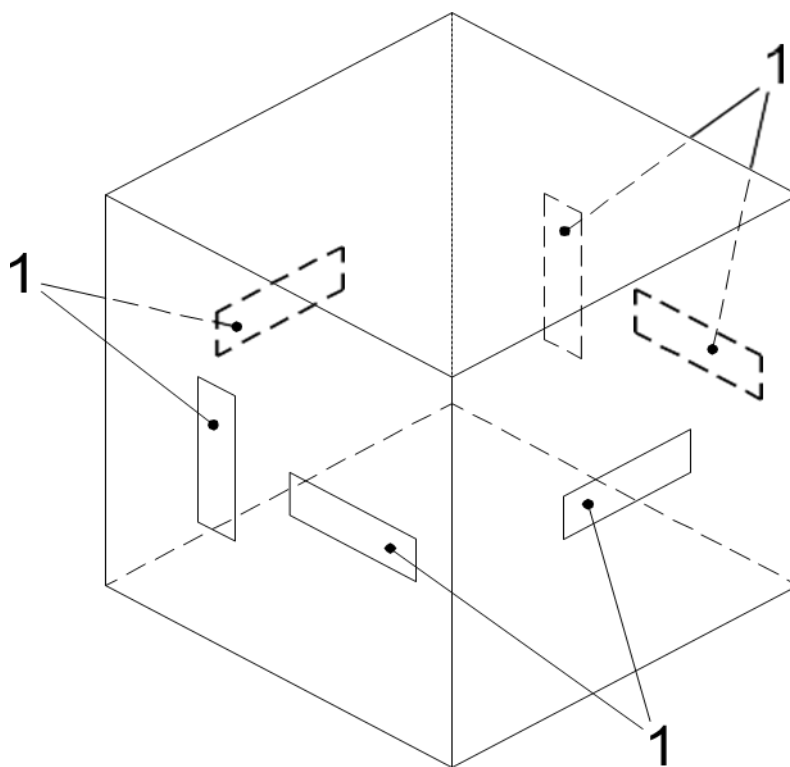
Pri uzorkovanju je bitno da položaj slojeva ili anizotropije mora biti označen na uzorku ili na svakom uzorku s najmanje dvije paralelne crte. Za svaki se smjer iz homogene serije odabiru najmanje dva uzorka. U slučaju da je stijena heterogena treba povećati broj ispitivanja. Koeficijent toplinskog širenja kod mnogih vrsta stijena ovisi o smjeru, stoga, toplinsko širenje treba mjeriti u nekoliko pravaca kako bi se procijenio stupanj anizotropije. Diskontinuiteti u prirodnom kamenu, poput spojeva, inkluzija, žila, itd., mogu utjecati na toplinsko širenje. Preporučeno je izbjegavati proizvodnju mikropukotina tijekom uzorkovanja ili pripreme uzorka.

Test se može provesti kao identifikacijski ili kao tehnološki test. Ispitivanja identifikacije provode se prilikom upotrebe kamena s obzirom na položaj ravnina teksturne anizotropije, a debljina i površinska obrada kamenih elemenata nisu poznati. Tehnološka ispitivanja su ona koja se provode prilikom upotrebe kamena s obzirom na položaj ravnina teksturnih anizotropija, a debljina i površinska obrada kamenih elemenata su poznati. U ovom slučaju, duljine uzoraka moraju imati istu orijentaciju kao i najrelevantniji smjerovi najveće ravnine.

Dimenzija ispitnog uzorka mora biti u skladu s minimalnom veličinom mjerne duljine, koja je vezana za točnost mjernog uređaja i za maksimalnu veličinu zrna stijene. Pri mjerenju s tenziometarskim trakama, uzorci za ispitivanje identifikacije moraju biti kocke ili

pravokutne prizme sa duljinom, debljinom i širinom najmanje 70 mm. Svaka od ovih dimenzija mora biti najmanje 10 puta veća veličina zrna stijene. Za tehnološka ispitivanja debljina mora biti jednaka debljini komercijalnih jedinica, pa prema tome može biti i uzorak nedovoljno debeo da omogući određivanje toplinskog širenja prema ovoj dimenziji. U ovom slučaju, test se provodi samo po širini i duljini uzorka.

Lice uzoraka, na kojima će biti učvršćene zakovice ili mjerači naprezanja, moraju biti obrađeni veličinom zrna 600 (FEPA) brusnog papira. Ljepilo za učvršćivanje koje se koristi mora biti stabilno u rasponu ispitnih temperatura (20 °C do 80 °C). Za identifikacijske testove pomoću tenziometarskih traka, na svaki uzorak moraju se pričvrstiti tri para traka, u tri različita okomita smjera. Mjerači u svakom paru moraju biti pričvršćeni u istom rasporedu na suprotnim stranama (**slika 3-6**). Drugi par mjerača mora biti pričvršćen na suprotnim stranama referentnog uzorka. Za tehnološka ispitivanja, tenziometarske trake bit će instalirane u skladu s proizvođačevim uputama.



**Slika 0-6.** Raspored parova tenzometarskih traka na uzorku (1 – tri para tenziometarskih traka učvršćenih na suprotnim stranama).

Za identifikacijske testove, uzorci se moraju osušiti na  $(70 + 5) ^\circ\text{C}$  do konstantne mase prije učvršćivanja tenziometarskih traka. Pretpostavlja se da je konstantna masa postignuta kada je razlika između dva vaganja napravljena na intervalu od  $(24 + 2)$  h, koja nije veća od 0,1% prve od ove dvije mase. U stvarnim uvjetima, kod mnogih vrsta kamena, toplinsko širenje ometa širenje kontrolirano vlagom. Stoga bi moglo biti korisno u izvođenju tehnoloških ispitivanja koristiti uzorke koji nisu sušeni.

Mjerenje se provodi postavljanjem uzoraka i referentnog uzorka, opremljenih tenziometarskim trakama, u klima komoru na temperaturu od  $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$  do stabilizacije temperature od najmanje  $\pm 0,5 ^\circ\text{C}$ , tijekom 2 sata prije ispitivanja.

Potrebno je spojiti četiri para tenziometarskih traka (tri za uzorak i jedan za referentni uzorak) na mjerni uređaj. Moguće je istodobno testirati više uzoraka ako mjerni uređaj ima dovoljno kanala. Temperatura se podiže na  $(80 \pm 1) ^\circ\text{C}$  s brzinom od  $0,5 ^\circ\text{C}/\text{min}$  te se na toj razini održava najmanje 2 sata. Potrebno je zabilježiti linearno toplinsko širenje uzorka za svaki od tri pravokutna smjera ( $\varepsilon_{s1}$ ,  $\varepsilon_{s2}$ ,  $\varepsilon_{s3}$ ) i linearno toplinsko širenje referentnog uzorka ( $\varepsilon_r$ ).

Za svaki ciklus grijanja i hlađenja treba izračunati jedinstveni linearni koeficijent toplinskog širenja za svaki od tri smjera prema formulama:

$$\alpha_1 = \frac{\varepsilon_{s1} - \varepsilon_r}{\Delta t} + \alpha_r \text{ u } ^\circ\text{C}^{-1} \quad [3-3]$$

$$\alpha_2 = \frac{\varepsilon_{s2} - \varepsilon_r}{\Delta t} + \alpha_r \text{ u } ^\circ\text{C}^{-1} \quad [3-4]$$

$$\alpha_3 = \frac{\varepsilon_{s3} - \varepsilon_r}{\Delta t} + \alpha_r \text{ u } ^\circ\text{C}^{-1} \quad [3-5]$$

Pri tome treba navesti smjerove parova tenziometarskih traka koji odgovaraju  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  i  $\alpha_3$ .

### 3.5 Metoda ispitivanja nesaturiranih (suhih) uzoraka

Uzorci sa **slike 3-7**. odabrani su za izvođenje eksperimenta, a kao konkretne epruvete korišteni su samo oni s čim pravilnijim oblikom.



**Slika 3-7.** Uzorci odabrani za određivanje koeficijenta linearnog toplinskog širenja stijene.

Za provedbu mjerenja korištene su elektrootporne mjerne trake (**slika 3-8**), (eng. strain gauge), pretvornici koji deformaciju uzorka pretvaraju u relativnu promjenu otpora. Aktivni dio nalijepljen je na podlogu od papira, može biti promjera žice 0,0254 mm ili od folije naparene na podlogu debljine oko 20  $\mu\text{m}$ . Otpor elektrootpornih traka je u rasponu od 30  $\Omega$  do 3 k $\Omega$ , dok su tipične veličine 120  $\Omega$ , 350  $\Omega$  ili 1000  $\Omega$ .

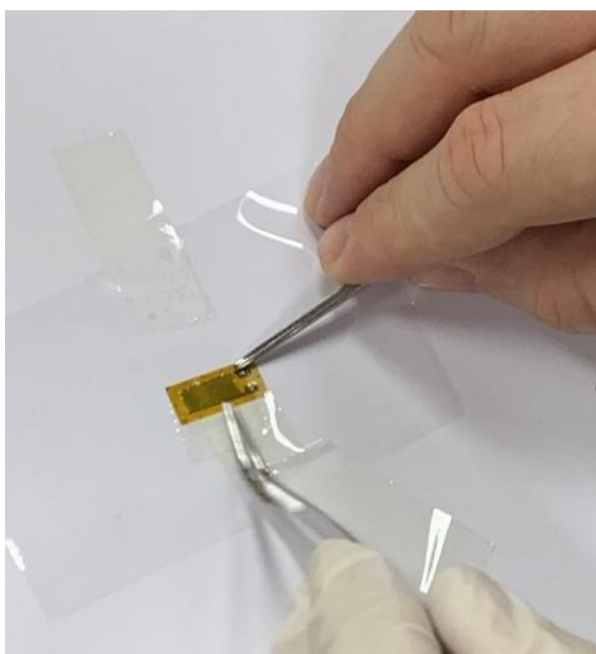


**Slika 3-8.** Elektrootporne mjerne trake.

Postupak pripreme traka za lijepljenje dvokomponentnim ljepilom na uzorak je osjetljiv i dugotrajan, budući da trake ne smiju biti dodirivane prstima niti kontakti na njima kasnije prekriveni ljepilom. Postupak pripreme traka prikazan je na **slikama 3-9, 3-10 i 3-11**. Kompletna manipulacija provodi se pomoću alata, a traka se prije pripreme čisti korištenjem trikloretilena, a zatim nanosi na posebnu prozirnu foliju na koju se pričvršćuje selotejpom, s koje će se kasnije nanijeti na ljepilo i uzorak.



**Slika 3-9.** Nanošenje trake na prozirnu foliju



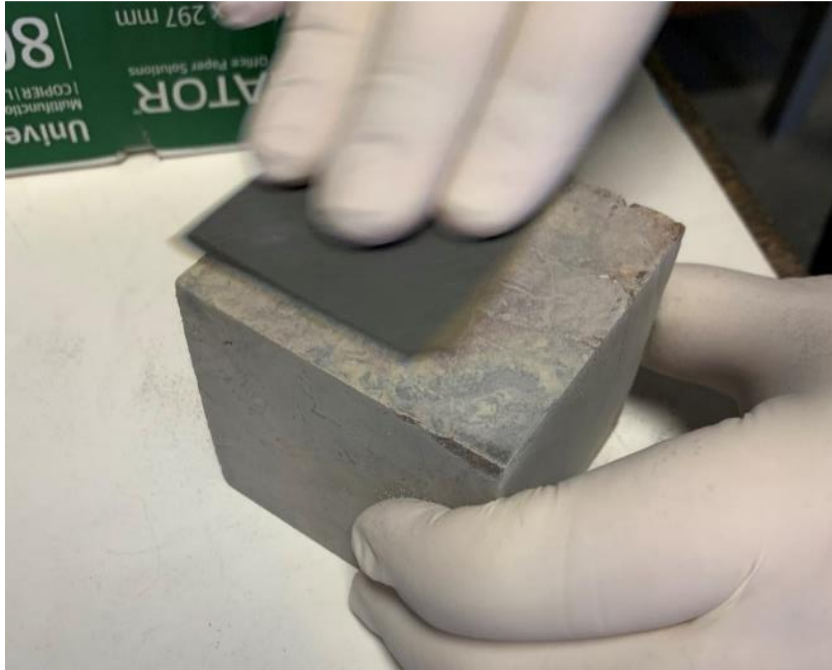
**Slika 3-10.** Lijepljenje trake selotejpom na prozirnu foliju





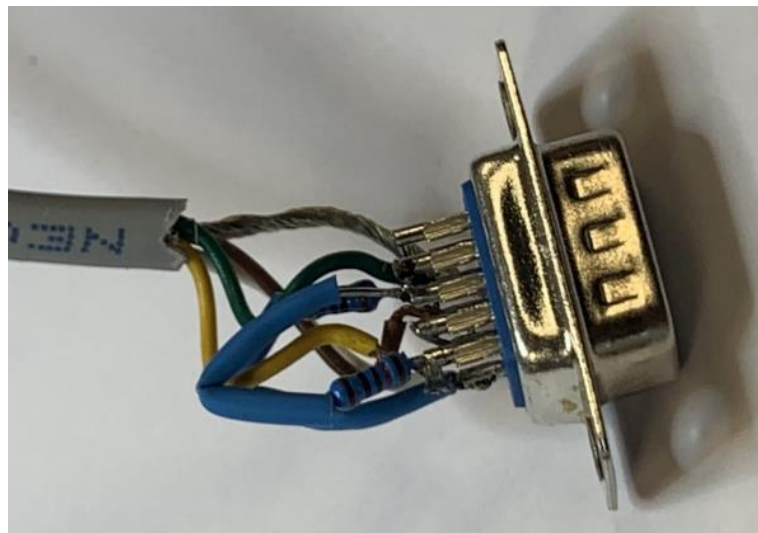
**Slika 3-11.** Priprema elektrootpornih mjernih traka.

Dok se pripremaju mjerne trake, nužno je pripremiti i uzorke brušenjem s brusnim papirom hrapavosti „600“ (slika 3-12), nakon čega se uzorci peru i dekontaminiraju od masnoća i prašine. Podloga za lijepljenje traka mora biti potpuno čista.



**Slika 3-11.** Priprema uzorka brušenjem.

Spoj između traka i mjernog uređaja ostvaruje se oklopljenim kablom i konektora koji se moraju pripremiti za svaki kanal (**slika 3-12**).



**Slika 3-12.** Zalemljeni konektor.

Na **slici 3-13** prikazan je primjer lijepljenja mjernih traka na uzorak kamena.



**Slika 3-13.** Postupak lijepljenja mjerne trake.

Na **slici 3-14** prikazane su zalijepljene mjerne trake na uzorak kamena.

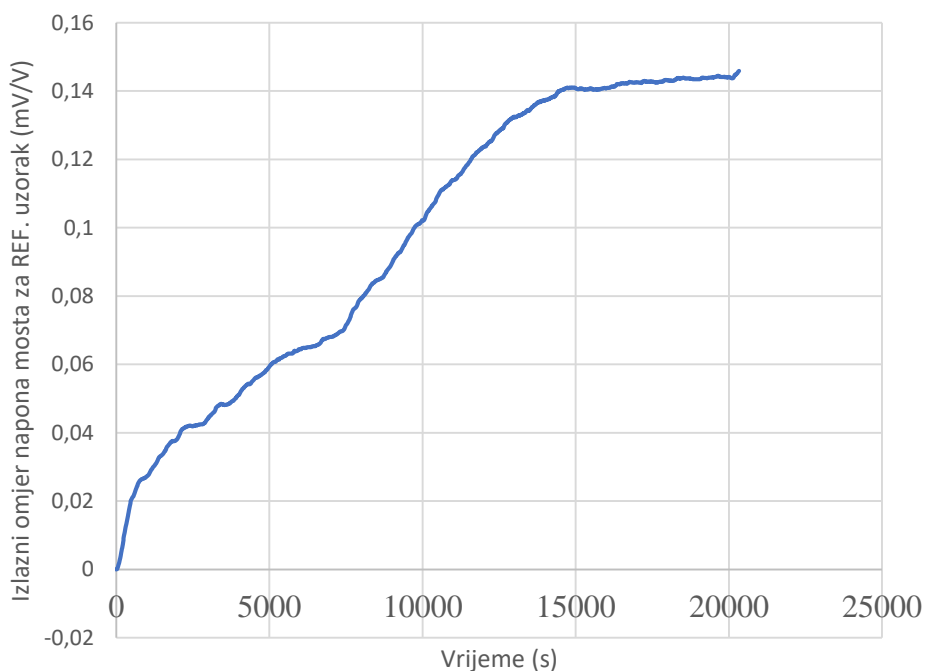


**Slika 3-14.** Zalijepljene mjerne trake.

## 4 REZULTATI I ANALIZA

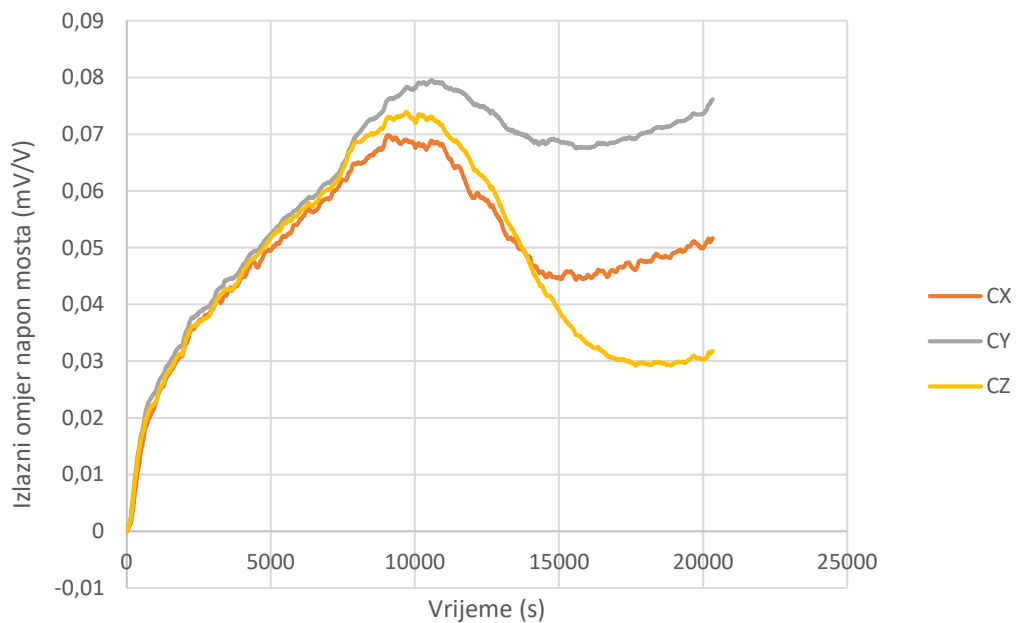
### 4.1 Rezultati mjerenja

U ovom poglavlju prikazani su rezultati mjerenja na dijagramima. Na dva suha, nesaturirana uzorka te na referentnom uzorku. Na slici **4-1** prikazan je izlazni omjer napona mosta za trake na referentnom uzorku na kojem od 7000 do 15000 s uzorak raste tj. širi se povećanjem temperature pravilno što je očekivano budući da je homogen. Od 15000 do 20000 s izlazni omjer napona je konstantan.



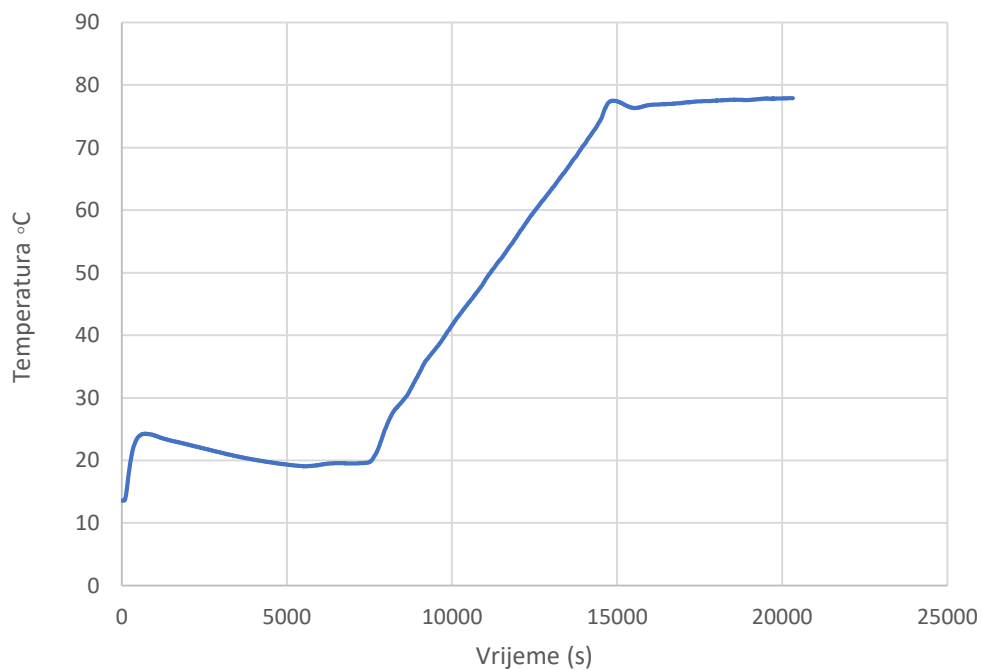
**Slika 4-1.** Izlazni omjer napona mosta za trake na referentnom uzorku.

Na priloženom dijagramu prvog uzorka trake su se trebale širiti kao posljedica rasta napona i temperature kroz tri kanala (CX,CY i CZ), međutim ona raste do 11000 s, sa tim da Y os nastavlja rasti, dok se X i Z osi skupljaju pri temperaturi od 40 °C i padaju (**slika 4-2**). Između 15000 i 20000 s izlazni omjer napona mosta je konstantan. Razlog tome su velika zrna i samo postavljanje traka (direktno na zrno ili između dva zrna) odnosno heterogenost uzorka. Sve tri osi se ponašaju drukčije upravo zbog raznolikog mineralnog sastava.



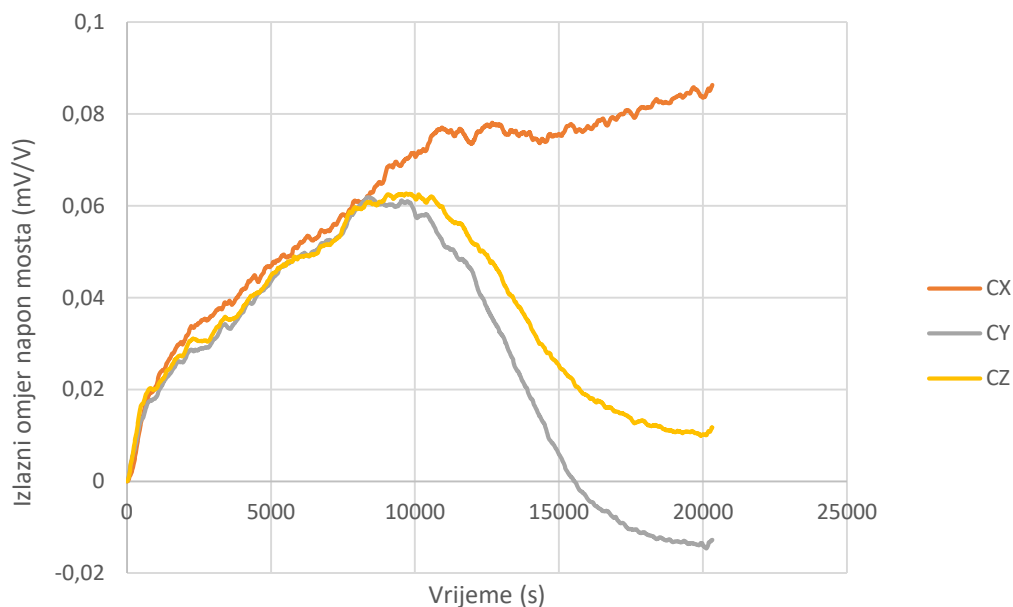
**Slika 4-2.** Izlazni omjer napona mosta za trake na prvom suhom uzorku.

Na **slici 4-3** prikazan je porast temperature od 20 °C do 80 °C, odnosno temperatura počinje rasti na 7500 s do 15000 s te je dalje konstantna.



**Slika 4-3.** Porast temperature od 15 °C do 78 °C u vremenu od 21 000 sekundi.

Na dijagramu za drugi suhi uzorak također su prikazana tri kanala (CX,CY,CZ). Na **slici 4-4** kao rezultat porasta napona i temperature X os nastavlja rasti i širiti se dok se Y os i Z os na 11000 sekundi, kao što je slučaj i s prvim uzorkom, skupljaju i padaju. Ovakvi rezultati posljedica su heterogenosti uzorka odnosno raznolikog mineralnog sastava.



**Slika 4-4.** Izlazni omjer napona mosta za trake na drugom suhom uzorku.

## 4.2 Izračun deformacija uzoraka

Deformacije računamo iz izmjerenih omjera napona približnom (4-1) i punom jednadžbom (4-2) (Kuhinek, 2009). Iz proračuna je vidljivo da je razlika između dvije jednadžbe zanemarivo mala te će se koristiti približna jednadžba. Za proračun je korišten faktor trake  $K=2,1$  kao što je navedeno u specifikacijama korištenih traka. Iz **tablica 4-1** i **4-2** vidljivo je kako je razlika manja od 0,5 %.

Približna jednadžba za dijagonalni most dana je izrazom (4-1) :

$$\varepsilon = -\frac{2}{K} \times \frac{U_0}{U_S} \quad (4-1)$$

Puna jednadžba za dijagonalni most dana je izrazom (4-2)

$$\varepsilon = \frac{-2 \frac{U_0}{U_S}}{K(1 + \frac{U_0}{U_S})} \quad (4-2)$$

$\varepsilon$  – deformacija uzorka ,

$K$  (gauge factor) - omjer promjene otpora po jedinice nazivnog otpora u odnosu na deformaciju,

$U_0$ - izlazni napon (V),

$U_s$ -napon napajanja mosta (V).

**Tablica 4-1.** Usporedba približne i pune jednadžbe za prvi uzorak.

	Približna jednadžba	Puna jednadžba	Razlika
Početna vrijednost	-6,8367E-05	-6,8362E-05	
Krajnja vrijednost	-0,000134347	-0,000134328	
Delta	0,000138964	0,000138944	-2,027E-08
Postotak			-0,014586509

**Tablica 4-2.** Usporedba približne i pune jednadžbe za drugi uzorak.

	Približna jednadžba	Puna jednadžba	Razlika
Početna vrijednost	-6,90405E-05	-6,90355E-05	
Krajnja vrijednost	-0,000134322	-0,000134303	
Delta	0,000138964	0,000138944	-2,027E-08
Postotak			-0,014586509

### 4.3 Izračun linearnog temperaturnog koeficijenta uzorka kamena

Nakon izračuna deformacija i temperature slijedi izračun linearnog temperaturnog koeficijenta za oba uzorka u dva poprečna smjera u skladu sa uputom iz norme. Za proračun srednjih početnih vrijednosti koristit će se prvih 200 sekundi. Srednje završne vrijednosti dobivene su od uzorka između 15000 s i 15300 s. Nadalje, u proračun je uvršten i linearni toplinski koeficijent referentnog uzorka koji je iznosio  $11,8 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ . Korištenjem tih podataka dobivaju se rezultati prikazani u **tablicama 4-3 i 4-4**.

**Tablica 4-3.** Proračun srednjih početnih i srednjih završnih vrijednosti za prvi uzorak.

	Referentni uzorak	Prvi uzorak			Temperatura T1 (°C)	Temperatura T2 (°C)	Temperatura T3 (°C)
		X-OS	Y-OS	Z-OS			
Početna (mikrostrain)	64,59	55,78	58,33	57,17	19,53	19,84	19,65
Završna (mikrostrain)	133,92	42,97	65,29	35,96	77,06	77,16	76,96
Z-P (mikrostrain)	69,33	- 12,81	6,96	- 21,20	57,53	57,32	57,32
$\alpha$ ( $\times 10^{-6}$ x 1/K)	11,8	<b>10,37</b>	<b>10,71</b>	<b>10,22</b>			

**Tablica 4-4.** Proračun srednjih početnih i srednjih završnih vrijednosti za drugi uzorak.

	Referentni uzorak	Drugi uzorak			Temperatura T1 (°C)	Temperatura T2 (°C)	Temperatura T3 (°C)
		X-OS	Y-OS	Z-OS			
Početna (mikrostrain)	64,59	55,78	58,33	57,17	19,53	19,84	19,65
Završna (mikrostrain)	133,92	42,97	65,29	35,96	77,06	77,16	76,96
Z-P (mikrostrain)	69,33	- 12,81	6,96	-21,20	57,53	57,32	57,32
$\alpha$ ( $\times 10^{-6}$ x 1/K)	11,8	<b>10,95</b>	<b>9,7932</b>	<b>10,138</b>			

Linearni temperaturni koeficijent dva uzorka kamena se razlikuje za oko  $9,14 \cdot 10^{-6}$  1/K. Na oba uzorka po X, Y i Z osi, vrijednosti linearnog temperaturnog koeficijenta su slične što ukazuje kako uzorci imaju sličan mineralni sastav (prosječni iznosi  $10,5 \cdot 10^{-6}$  C<sup>-1</sup>). Uzrok ovakvim rezultatima su minerali različitih temperaturnih koeficijenta koji se različito šire u pojedinim osima ovisno o temperaturi, stoga svaka os ima različitu vrijednost.



## 5 ZAKLJUČAK

Prosječni linearni temperaturni koeficijent za uzorke iznosi približno  $10,5 \cdot 10^{-6} \text{ C}^{-1}$ , a prema tablici za pješčenjake iznosi  $11,6 \cdot 10^{-6} \text{ C}^{-1}$  (preuzeto iz The Engineering ToolBox). Dakle razlika je  $1 \cdot 10^{-6} \text{ C}^{-1}$ , budući da uzorci na kojima su izvedena mjerenja nisu čisti pješčenjaci već sadrže udio kvarcnih konglomerata te proslojke šejlova i silita. Prema Hartlieb et al. (2016), u pješčenjacima s velikim udjelom kvarca značajne promjene se događaju pri temperaturi od  $570 \text{ }^\circ\text{C}$ , budući da se kvarc pri toj temperaturi izrazito širi. Mogu zaključiti kako su dobiveni rezultati, odnosno izmjerene vrijednosti napona posljedica nejednolikog širenja elektrootpornih traka zbog heterogenosti uzorka npr. prisutnosti pukotina. Poradi različitog mineralnog sastava, pri istoj temperaturi, dobivene su različite vrijednosti izlaznog napona. Ovo ispitivanje je pokazalo kako je primijenjena metoda pogodna za istraživanje budući da su rezultati u skladu s dosadašnjim rezultatima istraživanja. Ispitivanja u Rudama su odrađena jednim dijelom in situ, mjerenjem temperature uslijed zagrijavanja stijenske mase, dok su u ovom radu odrađena laboratorijska istraživanja kako bi doznali kakav utjecaj imaju pukotine kao i sam heterogeni sastav uzoraka na linearni toplinski koeficijent širenja. Na samom kraju, terenska (in situ) i laboratorijska istraživanja pri povećanju temperature odnosno zagrijavanju ruda su povezana, te se mogu raditi usporedbe.

## 6 LITERATURA

### 6.1 Objavljena literatura

Beran, P. (2015, March). *The impact of stone shape to the thermal stress of ashlar masonry*. In AIP Conference Proceedings (Vol. 1648, No. 1, p. 090005). AIP Publishing LLC.

Bilbija, N. (1984). *Tehnička petrografija: svojstva i primene kamena*. Naučna knjiga.

Bodružić, N. (2017). *Određivanje linearnog koeficijenta širenja kamena*. Završni rad. Zagreb: RGNF.

HRN EN 14581 (2004): Metode ispitivanja prirodnoga kamena -- Određivanje koeficijenta linearnog termičkog širenja. Norma.

Espion, B., & Halleux, P. (2000). *Long-term measurements of strains with strain gauges and stability of strain gauge transducers*. HBM.

Hartlieb, P., Toifl, M., Kuchar, F., Meisels, R., & Antretter, T. (2016). *Thermo-physical properties of selected hard rocks and their relation to microwave-assisted comminution*. Minerals Engineering, 91, 34-41.

Harvey, R. D. (1967). *Thermal expansion of certain Illinois limestones and dolomites*. Circular no. 415.

Kuhinek, D. (2009). *Virtualni instrumenti za mjerenje deformacija uzoraka kamena*, doktorska disertacija, Zagreb: FER

Palinkaš, L. A., Šoštaric, S. B., Palinkaš, S. S., Prochaska, W., Spangenberg, J., Cuna, S., & Šinkovec, B. (2010). *Permian–polysulphide–siderite–barite–haematite deposit Rude in Samoborska Gora Mts., Zagorje–Transdanubian zone of the Inner Dinarides*. Geologia Croatica, 63(1), 93-115.

Delage, P. (2013). *On the thermal impact on the excavation damaged zone around deep radioactive waste disposal*. Journal of rock mechanics and geotechnical engineering, 5(3), 179-190.

Robertson, E.C. (1988). *Thermal Properties of Rocks*. United States Geological Survey (Open-File Report, 88–441).

Šinkovec, B. (1971). *Geology of the iron and copper ore deposit at Rude near Samobor*. Geološki vjesnik, 24, 165-181.

## **7.2 Neobjavljena literatura**

Veinović, Ž., Korman, T., Kuhinek, D., Milanović, N., & Uroić, G. (2020). *In situ simulacija termičko-hidro-mehaničkih efekata na stijenu i materijal ispune odlagališta istrošenog nuklearnog goriva i provjera koncepta numeričkim modelom*. Elaborat. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu.

## **7.3 Web izvori**

[https://www.engineeringtoolbox.com/linear-expansion-coefficients-d\\_95.html](https://www.engineeringtoolbox.com/linear-expansion-coefficients-d_95.html) , preuzeto 3.9.2021.



KLASA: 602-04/21-01/208  
URBROJ: 251-70-14-21-2  
U Zagrebu, 9.9.2021.

**Nikolina Milanović, studentica**

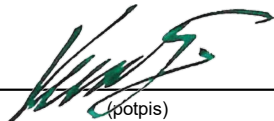
## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/21-01/208, URBROJ: 251-70-14-21-1 od 9.6.2021. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

### KOEFICIJENT LINEARNOG TOPLINSKOG ŠIRENJA KAMENA

Za voditelja ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada Izv. prof. dr. sc. Želimir Veinović nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu i suvoditelja Doc.dr.sc. Tomislav Korman.

Voditelj:

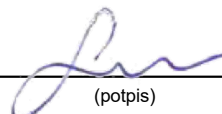


(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Želimir Veinović

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za  
završne i diplomske ispite:

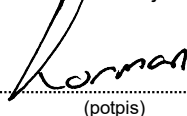


(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Stanko  
Ružičić

(titula, ime i prezime)

Suvoditelj

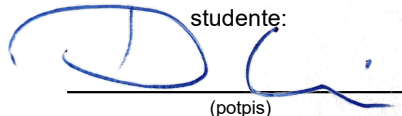


(potpis)

Doc.dr.sc. Tomislav Korman

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i  
studente:



(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Dalibor  
Kuhinek

(titula, ime i prezime)