

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

*Janova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si*



Visokošolski program Gradbeništvo,
Prometnotehnična smer

Kandidat:

Matej Zavasnik

Toplotno-hidrična kompatibilnost izbranih vrst naravnega kamna in betona za uporabo v gradbeništvu

Diplomska naloga št.: 336

Mentor:

izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

Somentor:

dr. Ana Mladenovič

Ljubljana, 24. 4. 2009

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **MATEJ ZAVASNIK** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge: »**TOPLOTNO-HIDRIČNA KOMPATIBILNOST IZBRANIH VRST NARAVNEGA KAMNA IN BETONA ZA UPORABO V GRADBENIŠTVU**«.

Izjavljam, da se odpovedujem vsem materialnim pravicam iz dela za potrebe elektronske separatoteke Fgg.

Ljubljana, 02.02.2009

KAZALO

1 UVOD IN CILJI DIPLOMSKEGA DELA 7

1.1	Lepljene fasade in obloge iz naravnega kamna	7
1.2	Kamini iz naravnega kamna	8
1.2.1	Postopek izdelave kamina iz naravnega kamna.....	8
1.2.2	Težave, ki nastajajo pri vgrajevanju in uporabi kaminov	9
1.3	Namen preiskav in cilji diplomske naloge.....	10

2 TEORETIČNI DEL 11

2.1	Naravni kamen v gradbeništvu.....	11
2.2	Lastnosti naravnega kamna	12
2.3	Toplotne lastnosti naravnega kamna-toplotni raztezek.....	17
2.3.1	Toplotni raztezek mineralov.....	19
2.3.2	Toplotni raztezek kamnin	21
2.3.3	Parametri, ki vplivajo na vrednost toplotnega raztezka kamnine	23
2.3.4	Toplotni raztezek v povezavi z elastičnim modulom	25
2.4	Zaostale deformacije.....	26
2.5	Kombinirani vpliv vlage in toplote na raztezanje naravnega kamna	27
2.6	Beton v gradbeništvu	29
2.6.1	Vrste betona.....	30
2.6.2	Sestava in lastnosti betona.....	32
2.6.3	Lastnosti betona.....	33
2.6.4	Toplotne deformacije in raztezki betona	35
2.6.5	Vpliv temperature na mehanske lastnosti navadnega betona	36

2.6.6	Mehanizmi krčenja pri navadni temperaturi.....	45
2.6.7	Vpliv visokih temperatur na beton	46
2.7	Kompatibilnost kamna in betona.....	47

3 EKSPERIMENTALNI DEL 48

3.1	Izbira in priprava vzorcev.....	48
3.1.1	Vzorci kamnin	48
3.1.2	Vzorci betona	50
3.2	Priprava vzorcev	52
3.2.1	Priprava betonske mešanice	52
3.2.2	Priprava vzorcev za merjenje	55
3.3	Opis metod in delovnih postopkov.....	57
3.3.1	Določanje mokrega toplotnega raztezka in zaostale deformacije – meritve v vodi.....	57
3.3.2	Določanje suhega toplotnega raztezka in zaostale deformacije – suhe meritve	60

4 REZULTATI 61

4.1	Rezultati meritve suhe toplotne deformacije kamnin	61
4.1.1	Graniti	61
4.1.2	Marmorji in apnenci	65
4.1.3	Peščenjaki	71

5 VREDNOTENJE REZULTATOV 95

5.1	Celotna deformacija naravnega kamna ϵ_{max10}	95
5.2	Celotna deformacija betona ϵ_{max10}	97
5.3	Primerjava celotne deformacije med kamnom in betonom ϵ_{max10}.....	98
5.4	Toplotni raztezek naravnega kamna ϵ_{10}	99
5.5	Toplotni raztezek betona ϵ_{10}	102

5.6 Primerjava maksimalne toplotne deformacije vzorcev kamnin in vzorcev betona $\varepsilon_{\max 10}$103

5.7 Primerjava toplotnega raztezka ε_t vzorcev kamnin in vzorcev betona104

6 DISKUSIJA 110

7 SKLEP 114

8 VIRI 118

SEZNAM SLIK 121

SEZNAM PREGLEDNIC 125

SLOVAR IZRAZOV 126

1 UVOD IN CILJI DIPLOMSKEGA DELA

Načini graditve so se razvili iz človekove želje in potrebe, da bi se trajno kar najbolje zavaroval pred zunanji vplivi. Da bi se to uresničilo, je treba poznati lastnosti materialov, ki sestavljajo konstrukcijo, in fizikalno-kemične procese, ki nastajajo v konstrukciji zaradi delovanja različnih vplivov.

Vlogo nosilnega elementa v arhitekturi imel že od nekdaj naravni kamen. Njegova trajnost je bila sicer odvisna od vrste uporabljenega kamna, na splošno pa je bila dobra. Z razvojem konstrukcij iz litega železa in jekla ter razvojem armiranobetonskih konstrukcij konec 19. stoletja se je končalo obdobje prevlade masivnih kamnitih nosilnih elementov, njihovo vlogo pa so precej prevzele armirano-betonske konstrukcije. Z uporabo betona se je povsem spremenila tehnologija graditve. Od takrat je uporaba naravnega kamna v gradbeništvu omejena predvsem na plošče za tlake in vertikalne obloge. Te so zaključni element gradbene lupine in imajo estetsko vlogo, poleg tega pa morajo biti tudi dolgoročno funkcionalne in trajne. Zaradi nove vloge naravnega kamna je bilo treba tudi na novo določiti zahteve glede značilnosti materiala ter tehnologije predelave in vgrajevanja – vendar predpisane zahteve v praksi pogosto niso bile upoštevane. Posledica so bile napake in poškodbe kamnitih kompozitov, ki so vplivale tako na estetski videz in tudi na funkcionalnost. To kažejo na primer poškodbe fasad, nastale zaradi nekompatibilnih raztezkov kamna in betona, pod vplivom temperaturnih (od -20 do $+60$ °C) in nihanj vlažnosti.

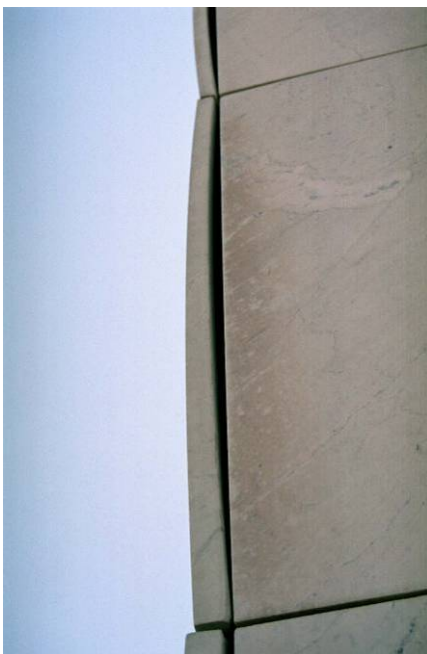
Podobna nekompatibilnost raztezkov se pojavlja tudi pri kamnitih kaminskih oblogah, kjer je kamen povezan z betonskimi elementi. Kamniti in betonski elementi kamina so izpostavljeni temperaturam od 20 do 200 °C.

1.1 Lepljene fasade in obloge iz naravnega kamna

O lepljenih kamnitih oblogah ali fasadah govorimo, kadar so tanke kamnite plošče lepljene neposredno na nosilno konstrukcijo. V tem se takšne fasade ali obloge razlikujejo od zračenih (sidranih), pri katerih so plošče pritrjene na podkonstrukcijo s kovinskimi sidri in kjer je med nosilno konstrukcijo in kamnitim ovojem zračna reža.

Nekatere težave, ki nastajajo pri lepljenih kamnitih oblogah, povzročajo predvsem nihanje temperature in vlage. Pri tem se kamnite plošče krčijo in raztezajo, njihovi robovi pa pokajo ali se stiskajo. To bi bilo mogoče delno odpraviti z večjimi dilatacijskimi regali, vendar se večina projektantov s tem ne bi strinjala, saj po navadi zahtevajo minimalne presledke med ploščami.

Ena od težav je tudi dinamika graditve, saj pogosto nosilna podkonstrukcija ni ustrezno osušena. Zato se vlaga pri sušenju prenaša v kamnite plošče, podkonstrukcija se potem krči, kamnita obloga pa razteza. Posledica tega so pokanje, ukrivljanje ali celo izpadanje plošč. Plošče pa se ukrivijo tudi tedaj, če so fasade zračene, in to vidimo na sliki 1.



Slika 1: Ukrivljanje fasadne plošče iz marmorja na objektu v Ljubljani (foto: arhiv ZAG)

1.2 Kamini iz naravnega kamna

1.2.1 Postopek izdelave kamina iz naravnega kamna

Postopek izdelave kamina se začne v biroju, tam izrišejo in izberejo material in skice za izdelavo

kamina. Kamini so lahko tipski (kaminski vložek in kamnito oblogo lahko kupimo že izdelano) ali pa izdelani po naročilu. Tedaj najprej izberemo kaminski vložek (na voljo je več kot 50 različnih tipov) in določimo lokacijo kamina v prostoru. Nato izberemo ustrezno kaminsko oblogo, ki je večinoma iz naravnega kamna in še nekaterih spremljajočih materialov (beton, siporeks, plošče ortner z vlakni-liti beton). Ko so vsi podatki v biroju obdelani in pripravljeni (izbira kaminskega vložka, izbira naravnega kamna, izdelan načrt kamina), gre projekt v izdelavo ali proizvodnjo.

V proizvodnji se naravni kamen za kaminsko oblogo razreže in spolira, pripravi se betonska preklada in kaminski vložek, in sestavni deli so pripravljeni za montažo. Izdelava celotnega kamina v proizvodnji traja od 3 do 7 dni, odvisno od zahtevnosti projekta.

1.2.2 Težave, ki nastajajo pri vgrajevanju in uporabi kaminov

Pri vgrajevanju in uporabi kamina nastanejo težave: razpoke, odpadanje kosov kamnine, pokaenje betona. Takšne težave so posledica lastnosti materialov in njihove toplotne nekompatibilnosti. Pri uporabi kamina se razvijejo dokaj visoke temperature, in materiali se začnejo segrevati in raztezati. Razpoke lahko nastanejo samo v betonski prekladi ali pa tudi v kamnu samem (slika 2). Kamnina poka tudi zaradi neustrezno pripravljene podlage (podlaga ni dovolj toga, zato se kamnina poseda in v njej nastanejo razpoke).

Razpoke so pri sobni temperaturi sprva tanke kakor las, vendar se pri segrevanju razširijo do 1 mm.



Slika 2: Počena kamnita preklada

1.3 Namen preiskav in cilji diplomske naloge

Namen preiskav in cilji diplomske naloge so:

- 1 opredeliti toplotno-hidrične lastnosti (mokri toplotni raztezek, suhi toplotni raztezek, zaostalo deformacijo po ogrevanju in ohlajanju v vodi, največjo deformacijo po ogrevanju in ohlajanju suhih preskušancev) izbranih vrst naravnega kamna in betona;
- 2 ugotoviti razlike v toplotno-hidričnih in toplotnih lastnostih med različnimi tipi kamnin in betonov;
- 3 opredeliti kompatibilnost naravnega kamna in betona za tehnologijo izdelave kaminov in lepljenih kamnito-betonskih fasad.

2 TEORETIČNI DEL

2.1 Naravni kamen v gradbeništvu

Značilni sledovi človekove dejavnosti na zemlji so stari več kot pol milijona let. To so sledovi ognja, lova in ostanki kamnitega orodja. Ohranili so se zaradi trdnosti in trajnosti materiala – kamna, ki je bil na začetku in v vsej človekovi zgodovini simbol in tvorec kontinuitete. Pred približno petnajst tisoč leti je kamen tako postal najdragocenejša surovina časa (Kresal, 2002).

Približno 8000 let pr. n. š. se je podnebje otoplilo, ljudje so se lotili živinoreje ter poljedelstva in se začeli za stalno naseljevati. Potrebovali so stalno prebivališče, ki bi stanovalce zavarovalo in jim izpolnilo potrebo po domu.

Kamen kot najtrajnejši material je tako dobil funkcijo gradbenega materiala. V zgodnjih civilizacijah je postal pomemben gradnik pomnikov, npr. megalitov, velikih kamnitih znamenj, ki so označevala deželo in simbolizirala trajnost civiliziranega življenja. Pojavila so se 5000 let pred našim štetjem v zahodni Evropi. Megaliti so bili odvzeti blizu kraja, ali s samega kraja postavitve, ali pa pripeljani od daleč – tudi po vodi. Največji med njimi (Anglija) je bil visok 21 metrov in težak 330 ton. Najveličastnejši dosežek kamna te dobe so vsekakor egipčanske piramide, ki jih po smelosti in popolnosti izdelave doslej ni prekosila še nobena podobna stvaritev. Glede na tedanjo hitrost razvoja se je tehnologija te graditve pojavila hipoma. Med prvo kamnito stopničasto Džoserjevo piramido (2680 let pr. n. š.) in veliko Keopsovo je komaj poldrugo stoletje. Egipčani so svojo zgodovino zapisali v najodličnejši kamen (granit, porfirit, porfir), čeprav so bili kamnolomi granita pri Asuanu oddaljeni od kraja vgraditve tudi do 1000 km. Lahko rečemo, da v izdelavi in transportu velikih monolitov – obeliskov doslej Egipčanov še ni prekosil nihče. Veliko obeliskov so Rimljani pozneje prenesli v svojo prestolnico, egipčanski obeliski krasijo danes tudi Pariz, London in New York. Največji med njimi, Laterano, ki stoji v Rimu, je bil izdelan v 15. stoletju pr. n. š., visok je več kot 32 m, njegov volumen je 175 m³ in masa 460 ton.

Uporabo kamna v gradbeništvu so zaznamovali tudi Grki. Po uporabi marmorja daleč presegajo prejšnje rodove, saj je marmor po njihovi zaslugi postal eden najpomembnejših materialov v arhitekturi in tudi v skulpturni umetnosti. V 5. stoletju pr. n. š. so v petdesetih letih (večinoma pod

Fidijevim vodstvom) zgradili Akropolo.

Etruščani, sodobniki Grkov, so bili začetniki kakovostnih inženirskih konstrukcij iz kamna. Gradili so mostove, utrdbe, mesta z vodovodi in kanalizacijo iz avtohtonih kamnin (tuf, peščenjak, apnenec, travertin). V konstrukcijah sta se uveljavila lok in obok, ki izražata italsko mentaliteto.

Zgodovinsko gledano se je vloga kamna kot konstruktivnega materiala počasi zmanjševala, povečevala pa se je njegova dekorativna vloga. Če primerjamo na primer velikost blokov v zgodovini, vidimo, da so se le-ti postopno zmanjševali – v primerjavi z megaliti in piramidami prek tankih gracioznih lokov v gotiki do tankih obložnih plošč v današnjih dneh. Kamnite obloge ameriških nebotičnikov iz preloma 19. in 20. stoletja so debele še 10 cm in več, nekatere zdajšnje kamnite fasadne plošče pa le še 1–3 cm.

2.2 Lastnosti naravnega kamna

Glede na okoliščine nastanka ločimo tri velike skupine kamnin:

1. magmatske,
2. sedimentne,
3. metamorfne.

Magmatske kamnine so nastale s kristalizacijo magme. Glede na mesto kristalizacije v zemeljski skorji ločimo globočnine, predornine in žilnine. Za globočnine je značilno enakomerno zrnata struktura – vsa zrna so približno enako velika, nepravilnih ali pravilnih oblik in zraščena. Predornine so kamnine, nastale iz magme na površju Zemlje in jih označuje porfirska struktura – z vtrošniki mineralov v steklasti ali mikrokristalni podlagi. Za žilnine je značilna porfiroidna struktura, ki nastane z vtiskavanjem magme v že deloma litoficirano (okamnjeno) magmo.

Sedimentne kamnine nastajajo z litifikacijo sedimentov. Po nastanku ločimo klastične sedimentne kamnine (npr. peščenjaki, breče, konglomerati), biokemične (npr. apnenec, dolomit) in kemične (npr. travertin, lehnjak).

Metamorfne kamnine so nastale s preobrazbo magmatskih in sedimentnih kamnin. Metamorfoza se dogaja večinoma globlje v litosferi, ob večjih pritiskih in višji temperaturi. Te kamnine je najtežje klasificirati zaradi številnih kompleksnih fizikalno-kemičnih sprememb. Na splošno jih delimo na masivne (npr. marmor) in skrilave (npr. gnajs).

Kamnine uporabljamo v gradbeništvu, metalurgiji, kemični industriji, izdelavi nekovin, stekla itn. Menijo, da znaša letna poraba kamnitih materialov 3 tone na prebivalca (Kresal, 2002). Poraba je največja v gradbeništvu, saj so kamnine material za graditev ali surovina za druge gradbene materiale (beton, asfalt). Kamen, ki se uporablja v gradbeništvu in arhitekturi, delimo na tehnični in naravni kamen (arhitekturni kamen).

Tehnični kamen se uporablja predvsem za predelavo v agregate za pripravo betona, asfalta, tolčenca za železniške proge, nevezanih nosilnih plasti v graditvi cest in malt.

Naravni kamen je kamnina, ki je po estetskih, tehničnih in obstojnostnih značilnostih primerna za vgrajevanje in funkcionalno uporabo v nepredelani, le z obdelavo poudarjeni obliki.

Za določitev optimalne uporabe naravnega kamna je poleg določitve vplivov okolja pomembna tudi določitev njegovih značilnosti. Temeljno izhodišče uporabe je, da naravnega kamna kot surovine ne moremo spremeniti. Njegova geneza in morebitne poznejše spremembe v geološki zgodovini določajo njegovo mineralno sestavo in teksturno-strukturne značilnosti: te predstavljajo ključne parametre, od katerih so odvisne mehansko-fizikalne značilnosti naravnega kamna. Za nadrobno določitev omenjenih značilnosti in njihovo razumevanje ali interpretacijo je torej treba poznavati kamen v tehničnem pomenu.

Preiskave naravnega kamna narekujejo dve poglavitni strokovni področji, ki sta na splošno definirani z namenom uporabe. Prvo je sodobno projektiranje v gradbeništvu, kjer je naravni kamen obravnavan kot konstrukcijski element v določenem okolju, na katerega delujejo različne napetosti in sile. To je lahko tradicionalno projektiranje, pri katerem prevzame naravni kamen po navadi neko nosilno vlogo, ali projektiranje kamnitih oblog (tlaki in vertikalne fasadne obloge), ki so lahko po tehniki pritrjevanja obešene ali lepljene. Drugo področje je osredotočeno na probleme degradacije kamna v konzervatorstvu pri zaščiti in varovanju kulturne dediščine iz kamna.

Kakovost naravnega kamna presojamo po standardiziranih metodah (včasih gre tudi za modifikacijo metod, ki se uporabljajo za druge gradbene materiale), s katerimi določamo tele bistvene značilnosti:

- **mineralno sestavo in druge petrografske parametre:** Poudarek je na določanju morebitne vsebnosti manj stabilnih komponent, ki lahko dolgoročno vplivajo na videz in kakovost vgrajene kamnine. Pomembno je tudi evidentiranje teksture; usmerjena ali nehomogena tekstura je namreč bistven podatek pri izpeljavi večine fizikalnih preiskav;
- **odpornost proti atmosferilijam:** Preiskava simulira zunanje atmosferske razmere in se navezuje na izsledke mineraloške analize. Z njo preverjamo stopnjo občutljivosti manj stabilnih komponent za preperevanje ter določimo obseg in vrsto sprememb v kamnini;
- **odpornost proti zmrzovanju:** S tem postopkom lahko ugotovimo sposobnost kamnine, da prenaša kristalizacijske pritiske, ki nastajajo v njenem pornem in razpoklinskem sistemu pri zmrzovanju in zlasti pri zimskem soljenju;
- **poroznost in sposobnost vpijanja vode:** Nedvomno je poglavina povzročiteljica propadanja kamna voda. Vpliv vode na kamnino je odvisen predvsem od njene mineralne sestave in fizikalnih lastnosti. Deluje predvsem fizikalno, le deloma tudi kemijsko, vendar je to delovanje veliko počasnejše. Fizikalni procesi so tesno povezani z razvrstitvijo, medsebojno povezanostjo in velikostjo por. V kamnu potekata navlaževanje in transport vode v tekoči fazi zaradi neposrednega močenja ali vsrkavanja vlage iz podlage zaradi kapilarnosti. Hidrofilna narava kamna namreč omogoča prodiranje vode v najfinejše pore. Kapilara s premerom 10 μm omogoča dvig vode za 1,5 m. Ta je še višji, če se pojavi osmoza in se po vodni raztopini izenačujejo različne količine soli v kamnu. Navlaževanje in transport vode lahko potekata tudi v plinasti fazi z difuzijo vodnih molekul. Vlažnost kamna se spreminja celo z nihanjem atmosferske vlage.

Voda, ki prodre v kamen, slabi kohezijo med mineralnimi zrnji ali plastmi. Koheziji izredno škodujeta izmenično vlaženje in sušenje kamna, saj se mineralna zrna pri tem krčijo in širijo. Določitev vsebnosti in velikosti por v kamnini ter njena sposobnost za vpijanje vode sodijo med najpomembnejše dejavnike pri oceni, ali je neka kamnina primerna za uporabo v zunanji atmosferi.

V praksi se sposobnost penetracije vode preverja s stopnjo omočljivosti - to je funkcija geometrijskih razmer, ki jih povzroči kapljica adheziva zaradi površinske napetosti na površini kamna;

- **tlačna trdnost:** Na splošno je zelo dobro merilo za kohezijo med zrnji. Kamnine, ki so položene v tlak in zato izpostavljene statičnim in dinamičnim obremenitvam morajo biti dovolj tlačno trdne; to trdnost naj bi kamnino ohranila tudi tedaj, ko je izpostavljena zmrzovanju in nasičena z vodo;
- **odpornost proti obrabi:** To lastnost morajo imeti kamnine, ki se uporabljajo za tlake, zlasti za močno obremenjene. Odvisna je predvsem od trdote mineralov, ki gradijo kamnino, deloma tudi od strukture. Najodpornejše so polimineralne, neenakomerno zrnate kamnine iz trdih mineralov;
- **odpornost proti zdrsu:** Kamnine, ki so vgrajene v tlak, morajo imeti površino, na kateri ni nevarnosti, da bi komu v mokri obutvi zdrsnilo. V tej zahtevi sta zajeti mikrohrapavost sveže kamnine in njena sposobnost, da ohrani mikrohrapavost tudi pod vplivom obremenitev v daljšem časovnem obdobju. Pri tem je pomembnejša kakor sama struktura kamnine njena površinska obdelava. Pokazalo se je, da so vse polirane površine premalo odporne proti zdrsu;
- **upogibna trdnost:** Izjemno pomemben podatek, na podlagi katerega presojujemo ustreznost kamnine za uporabo vertikalnih obložnih plošč in je tudi podlaga za projektiranje ustrezne debeline kamnitih elementov.

Pomembni parametri pri vrednotenju uporabnosti naravnega kamna so tudi

- **razpokanost:**

Večino kamninske mase so v njeni geološki zgodovini prizadeli razni pritiski (tektonski premiki), in ti so povzročili razpoke, izmike, razlome, diskontinuitete. Zato je razpokanost ena od temeljnih

značilnosti vsake kamninske mase. Razpoke so lahko velike ali pa zelo fine in goste;

- **barva:**

Barva kamna je posledica barve prevladujočega minerala ali pa sumarni učinek mešanja barv različnih mineralov. Monohromne kamnine (v katerih prevladuje ena barva) so navadno karbonatne (bele, sive, črne, rdeče) in drobnozrnate magmatske kamnine (npr. granit, ki dobi sivo barvo od kremenca in glincev, ki so belkasti). Polihromne so tiste, pri katerih tudi z oddaljenega opazovališča zaznamo različne barvne sestavine (npr. breče z velikimi zrni, migmatiti, metamorfne kamnine). Trdne kamnine, ki jih uporabljamo v arhitekturi, na splošno niso živih barv, so bele, sive, črne, rdečkaste, zelenkaste ali rumene. Barva kamna nima posebnega pomena, le da svetel kamen vpija manj toplote. Dekorativna vrednost barve je pomembna le za oblikovanje, določa pa tudi ceno kamna;

- **odpornost kamnine proti kemičnemu razpadanju:**

- a) občutljivost kamnine za ogljikov dioksid**

CO₂ je neznatna sestavina atmosfere (0,034 do 0,27 odstotka), ki se topi v dežnih kapljah in megli. Pri 0 °C se v deževnici raztopi dvakrat več CO₂ kot pri 25 °C. Voda, ki vsebuje CO₂, razgrajuje vse karbonatne kamnine in vse karbonatne sestavine katerega koli materiala. Iz trdega kalcita nastane s sodelovanjem ogljikove kisline razgradljiv kalcijev bikarbonat, ki se v vodi topi. Zaradi te reakcije površje karbonatnega kamna izgublja lesk in postaja hrapavo. Ugotovljeno je, da se v neurbanem okolju v petdesetih letih raztopi 1 mm apnenca;

- b) občutljivost kamnine za žveplov dioksid**

SO₂ je ena najagresivnejših sestavin atmosfere. Nastaja zlasti v sodobnem času pri zgorevanju premoga in drugih vrst fosilnega goriva (nafta, bencina, plina). Z vodo se spremeni v razredčeno žveplovo kislino, ki jo poznamo pod izrazom »kisli dež« in je močan destruktivni agens, zlasti za karbonatne kamnine;

- c) občutljivost kamnine za topne soli**

Topne soli se pojavljajo v kamnu vedno v zvezi z vlago (vodo). Redko izhajajo iz kamna, večinoma izvirajo iz matičnih tal ali okolnega gradbenega materiala (cement, opeka, malta, idr). Ko voda izhlapeva, odlaga soli na površje kamna, tam se kristalizirajo, nastanejo raznobarni madeži.

č) občutljivost kamnine za kloride

Kloridi, ki sestavljajo atmosfero, izvirajo iz morja, puščave in industrije. V vlažnem zraku se delno spreminjajo v zelo agresivno solno kislino. Voda v primorskih krajih, ki vsebuje natrijev klorid in druge soli, zaide v pore, tam ob kristalizaciji povzroča porne pritiske na material in kamnina razpade.

d) občutljivost kamnine ta saje, prah, aerosol

Aerosoli, ki sedajo na površje kamna, povzročajo nastanek skorjastih prevlek in te se sčasoma spremenijo v trdno sivkastočrno skorjo, debelo navadno manj kot 1 mm (patina).

e) občutljivost kamnine za železove okside

Železo pri oksidaciji v železove okside (rja) poveča prostornino in s tem napetosti na okolico. Železo moramo pred vgrajevanjem v kamen zelo dobro zavarovati, najboljša je, če ga zalijemo s svincem;

f) občutljivost kamnine za delovanje mikroorganizmov

Mikroorganizmi, kot so alge, plesni, mahovi, se naselijo na vlažne površine. Kamnu škodijo neposredno (sprememba videza) in posredno z nitrati in/ali sulfati, ki nastajajo pri metabolizmu teh organizmov.

2.3 Toplotne lastnosti naravnega kamna-toplotni raztezek

Poznavanje, kaj se dogaja z naravnim kamnom pri temperaturnih nihanjih, je eden od najpomembnejših parametrov pri načrtovanju njegove uporabe in tehnologije vgrajevanja. Iz podatkov o vrednosti koeficienta linearnega toplotnega raztezka in prožnostnega modula kamnine lahko namreč predvidimo obseg deformacij vgrajene kamnine, ki jih povzročajo napetosti, nastale zaradi temperaturnih nihanj. To je izjemno pomembno tedaj, ko je kamen vgrajen v konstrukcijo tako, da so možnosti njegovega raztezanja omejene. Nevarnost nastanka deformacij, ki vplivajo na varnost, stabilnost in estetski videz materiala, je namreč tedaj veliko večja. Vpogled v proces pa nam obenem omogoča, da z ustreznimi projektantskimi rešitvami napetosti korigiramo in nadzorujemo (dilatacije, povečanje debeline plošč, uporaba kompatibilnih materialov).

O vrednostih toplotnega razteznostnega koeficienta kamna, ki je bil določen na podlagi številnih ciklusov ogrevanja in ohlajanja, pišejo Grimšičar (1974), Ramana in Sarma (1980), Sage (1988) Widhalm s sodelavci y003C(1996) in Mauko (2004).

Sage je raziskoval srednje zrnati marmor in ugotovil, da se pri sušenju pri 66 °C v primerjavi s sušenjem pri 24 °C precej poveča absorpcija vode (tudi do 177 odstotkov). To se dogaja zaradi nastanka razpok, velikih od 0,060 do 2,09 µm. Hkrati je dognal, da se zaradi ogrevanja na 66 °C zmanjša upogibna trdnost do 49 odstotkov, modul prožnosti pa do 64 odstotkov. Franzini (1995) je ugotovil povečanje absorpcije vode pri ogrevanju vzorcev na 100 °C in dokazal popolno dezintegracijo marmorja po 2 do 14 ciklih ogrevanja na 500 °C. Dognal je, da marmor s poligonalnimi zrnji razpade hitreje kakor marmor ksenoblastične sestave. Domneva, da se lastnosti marmorja spremenijo zaradi spremenjenih oblik kalcitnih zrn; te pa so posledica toplotnih in napetostnih sprememb, saj sta termični razteznostni koeficient in razteznostni koeficient kalcita anizotropna.

Mladenovič (1998) povzema po Bilbiji (1984) tri skupine kamnin, glede na velikost toplotnega raztezanja, kot jih definirajo nemški gradbeni predpisi. Podatki so podani v preglednici 1, in sicer v območju temperaturne razlike 100 K. Bilbija (1984) omenja tudi, da je pri laboratorijskem preskušanju po nekaj ciklih (ne navaja koliko) ogrevanja in ohlajanja mogoče pričakovati tudi do 20 odstotkov trajne deformacije v primerjavi z začetnim stanjem.

Preglednica 1: Toplotni raztezek kamna pri temperaturnem gradientu 100 K (Bilbija, 1984 v Mladenovič, 1998)

1. skupina širjenje do 0,75 mm/m	2. skupina širjenje do 1,0 mm/m	3. skupina širjenje do 1,25 mm/m
marmor	trahit	kvarcit
apnenec	gabro	porfirit
dolomit	diorit	kremenov porfir
diabaz	granit	peščenjak
travertin	sienit	

Kladnik (1969) pojasnjuje, da se zaradi povišane temperature (ob nespremenljivem pritisku) nihanje atomov okoli ravnovesnih leg intenzivira, pri tem pa se poleg segrevanja poveča tudi volumen snovi.

Razmerje med spremembo temperature in raztezkom podajata dve enačbi (Kladnik, 1969):

Prva enačba:

$$\frac{dV}{V} = \beta dT,$$

pomeni, da je sprememba prostornine snovi (dV) sorazmerna prostornini (V) in povišanju temperature (dT). Parameter β je koeficient prostorninskega temperaturnega raztezka. Pove nam relativno spremembo prostornine (dV/V), če se snov segreje za en K.

Če ima telo poudarjeno eno dimenzijo, se najbolj razteza v smeri te dimenzije, raztezek v drugih dveh smereh pa skoraj ni pomemben. Gornjo enačbo modificiramo v enačbo:

$$\frac{dL}{L} = \alpha dT,$$

kjer je parameter α koeficient linearnega (dolžinskega) raztezka in podaja raztezek telesa pri povečanju temperature za en K.

Koeficienta toplotnega in prostorninskega raztezanja sta najpomembnejša toplotno-fizikalna parametra kamnin in mineralov ter izražata sposobnost minerala ali kamnine, da spremeni toplotno energijo v mehansko (Rzhevsky in Novik, 1971).

2.3.1 Toplotni raztezek mineralov

Po van Vlackeru (1970) je toplotni raztezek mineralov kot zunanja manifestacija intenziviranja atomskih nihanj odvisen predvsem od kristalne strukture. V amorfnih snoveh in simetrični strukturi je intenzivnost nihanj primerljiva v vseh treh dimenzijah. V strukturi z anizotropnimi lastnostmi je toplotni raztezek anizotropen in v nekaterih primerih celo negativen (npr. kalcit se

pravokotno na os c pri segrevanju krči). To pomeni, da toplotni raztezek v mineralu ni enak v vseh kristalografskih smereh. Toplotni raztezek minerala je lahko različen tudi za različne polimorfne mineralne oblike. Linearni toplotni razteznostni koeficient kremenca narašča s temperaturo do 573 °C. Polimorfno transformacijo iz oblike β v α spremlja ostra sprememba naklona krivulje. Pri tem kristalografski presek ni pomemben.

V preglednici 2 so podane vrednosti toplotnega raztezka mineralov, objavila sta jih Rzhovsky in Novik (1971).

Preglednica 2: Koeficienti toplotnega raztezanja mineralov (Rzhovsky in Novik, 1971)

Mineral	α ($\times 10^{-6}$)/K
azbest	7,0
halit	32,0
grafit	7,2
sadra	2,2
dolomit	12,0
kalcit	
• razkolnosti	26,0
• \perp na razkolnost	-5,4
kremen	
• glavni osi	13,7
• \perp na glavno os	7,5
kaolinit	5,3
pirit	8,4
sljude	21,0-34,0
žveplo	74,0-80,0

Koeficient linearnega toplotnega raztezka se zmanjšuje z naraščanjem energije mreže oziroma gostote minerala. Na primer: Žveplo, fluorit in kremen imajo visoke vrednosti α .

2.3.2 Toplotni raztezek kamnin

V literaturi je na voljo množica podatkov o vrednostih toplotnih razteznostnih koeficientov kamnin, ki so bili izmerjeni z različnimi metodami in v različnih temperaturnih območjih. Najpogosteje je bila meritev opravljena v klasičnem visokotemperaturnem dilatometru, v temperaturnem območju od sobne temperature do nekaj 100 °C. Nekaj podatkov takih meritev je podanih v preglednici 3.

Preglednica 3: Linearni razteznostni koeficient kamnin (v Mladenovič, 1998)

Kamnina	α ($\times 10^{-6}$)/K
granit	3,7-6,0 ⁽¹⁾
	6,0-9,0 ⁽²⁾
	2,9-6,6 ⁽³⁾ (21 vz.)
	5,8-9,4 ⁽⁶⁾
kremenov sienit	3,7 ⁽³⁾
sienit	4,2 ⁽⁶⁾
granodiorit	4,2 ⁽³⁾
dacit	2,8 ⁽³⁾
diorit	2,0-3,0 ⁽¹⁾
	6,2 ⁽⁶⁾
rogovačni andezit	2,3 ⁽³⁾
diabaz	2,0-3,0 ⁽¹⁾
	5,4 ⁽²⁾
	3,1-3,5 ⁽³⁾
bazalt	2,2-3,5 ⁽¹⁾
	5,4 ⁽²⁾
rogovačni bazalt	2,6 ⁽³⁾
olivinski bazalt	2,2-3,3 ⁽³⁾
gabro	2,0-3,0 ⁽¹⁾
	6,9-8,5 ⁽⁶⁾
peridotit	4,5 ⁽¹⁾

kvarcit	6,0 ⁽¹⁾ 11,0 ⁽²⁾
gnajs	1,3-4,4 ⁽³⁾ (5 vz.)
marmor	2,7-5,1 ⁽³⁾ (10 vz.) 3-15 ⁽²⁾ 3,2-8,1
peščenjak	3,7-6,3 ⁽¹⁾ 5-12 ⁽²⁾ 5,1-6,5 ⁽³⁾ (8 vz.)
roženec	6,4 ⁽³⁾
glinasti peščenjak	4,7 ⁽³⁾
glinovec	4,5-4,9 ⁽¹⁾
apnenec	5-8,9 ⁽²⁾ 1,7-6,8 ⁽³⁾ (14 vz.) 1,9-3,9 ⁽⁴⁾ (16 vz., \perp na plastovitost) 3,24 - 5,06 ⁽⁵⁾ 2,8-9,4 ⁽⁶⁾ (17 vz., pov. $\alpha = 5,2$) 3,4-8,1 ⁽⁷⁾ (od -20°C do 80°C)
porozni apnenec	9,2 ⁽⁶⁾
dolomitni apnenec	5,8 ⁽³⁾
dolomit	7,7-9, ⁽⁷⁾ (od -20°C do 80°C)
glinasti skrilavec	9,0 ⁽²⁾ 6,6 ⁽⁶⁾
apnena breča	5,2 ⁽³⁾ 3,9-5,3 ⁽⁶⁾
travertin	4,4-6,2 ⁽³⁾ 4,9-6,0 ⁽⁶⁾
porozni apneni konglomerat	6,7 ⁽⁶⁾

Viri: ⁽¹⁾Bilbija (1984), ⁽²⁾Rzhevsky in Novik (1971), ⁽³⁾Griffith (1936), ⁽⁴⁾Harvey (1966), ⁽⁵⁾Venečanin (1986),
⁽⁶⁾Müller (1993), ⁽⁷⁾Winkler (1975)

V praksi se vrednost toplotnega linearnega razteznostnega koeficienta pogosto podaja tudi kot relativna deformacija vzorca glede na temperaturno spremembo. Tedaj ga izrazimo v m/mK ali mm/mK.

Koeficient linearnega toplotnega raztezka kamnin je velikostnega reda 10^{-6} ali manj (Rzhevsky in Novik, 1971). V primerjavi s kamninami imajo drugi gradbeni materiali nižje koeficiente linearnega toplotnega raztezka (preglednica 4):

Preglednica 4: Temperaturni razteznostni koeficient nekaterih gradbenih materialov (Kladnik, 1969)

Material	α ($\times 10^{-5}$)/ K
baker	1,7
svinec	0,06
aluminij	2,3
cement, beton	1,2
jeklo	1,1
opeka	0,5
polivinil	7,0
steklo, navadno	0,85
steklo, kremenovo	0,06

2.3.3 Parametri, ki vplivajo na vrednost toplotnega raztezka kamnine

Na vrednost toplotnega razteznostnega koeficienta kamnin vplivajo zlasti:

- tekstura,
- mineralna sestava,
- temperatura,
- triosni pritisk,
- velikost zrn,
- poroznost,

- toplotni cikli ali rezteznostne lastnosti kamnine.

Vpliv teksture kamnine

Kamnine z usmerjeno teksturo (kristalografsko orientacijo zrn) imajo praviloma različno vrednost raztezka v posameznih smereh (Rzhevsky in Novik, 1971). Če je tekstura masivna, privzamemo, da sta porazdelitev mineralov in njihova usmerjenost v vseh smereh enaki in da na splošno zaradi kompenzacije ni razlik v posameznih smereh. Previdno je treba presojati karbonatne kamnine, v katerih je poglaviti mineral kalcit. Ta se pri segrevanju vzdolž dveh kristalografskih osi razteza, vzdolž tretje pa krči. Če so v kamnini kristali kalcita enako usmerjeni, se bo zakonitost v raztezanju minerala pokazala tudi na kamnini. Podobno velja tudi za marmor.

Vpliv mineralne sestave

Iz koeficientov linearnega toplotnega raztezka mineralov (preglednica 2) vidimo, da se njihove vrednosti pojavljajo v razmeroma širokem intervalu. Zlasti če je v kamnini kremen, se njen toplotni razteznostni koeficient zelo zviša.

Vpliv temperature

Enak pojav, kot ga ponazarjajo ugotovitve o naraščanju linearnih temperaturnih koeficientov s temperaturo pri mineralih, je izmerjen tudi pri kamninah: razteznostni koeficient narašča s temperaturo zaradi povečanega števila napak v kristalih (Rzhevsky in Novik, 1971). Na linearni temperaturni razteznostni koeficient vpliva tudi hitrost segrevanja: ob hitrejšem segrevanju dobimo višje vrednosti toplotnega raztezka.

Vpliv triosnega pritiska

S povečanjem triosnega pritiska vrednost koeficienta temperaturnega raztezka nelinearno upada.

Vpliv velikosti zrn

Z zmanjševanjem velikosti zrn se vrednost linearnega temperaturnega razteznostnega koeficienta zmanjšuje (Rzhevsky in Novik, 1971). Bilbija (1984) navaja, da imajo debelozrnati različki kvarcита višje vrednosti temperaturnega razteznostnega koeficienta kakor drobnozrnati, vendar konkretnih številčnih vrednosti ne podaja.

Vpliv poroznosti

Z večanjem poroznosti razteznostni koeficient upada. Minerali se namreč lahko širijo v porni prostor, zato je zunanji raztezek telesa manjši, kot bi bil sicer v gosti kamnini (Bilbija, 1984). Vlaženje pornega prostora nekoliko zviša vrednost toplotnega razteznostnega koeficienta. Zvečanje nastane samo zaradi vlage v zaprtih porah, ki se pod pritiskom ne more gibati skozi kamnino (Bilbija, 1984). Vpliv vlage v pornem prostoru je omejen v poglavju 2.2.3.

Vpliv barve kamnine

Temperatura, ki jo doseže površina kamna, je neposredno povezana z njegovo barvo (McGrevy, 1985). Temen kamen bolje vpija toplotne žarke, zato se segreje hitreje, doseže višjo temperaturo kakor svetlejši in ima zato tudi večje raztezke.

Vpliv toplotnih ciklov

Vrednost koeficienta toplotnega raztezka se z naraščanjem števila toplotnih ciklov zmanjšuje (Ramana in Sarma, 1980). Vzrok je v nastanku novih razpok, ki so posledica segrevanja in ohlajanja ter s primarnimi razpokami povečajo neprožnost medija.

2.3.4 Toplotni raztezek v povezavi z elastičnim modulom

Po Bilbiji (1984) nastane v kamnini, ki je na najmanj dveh straneh vpeta v konstrukcijo, pri segrevanju tudi toplotna napetost σ_T . Izražaja jo enačba:

$$\sigma_T = \varepsilon E = (\Delta L/L) E = E \alpha \Delta t,$$

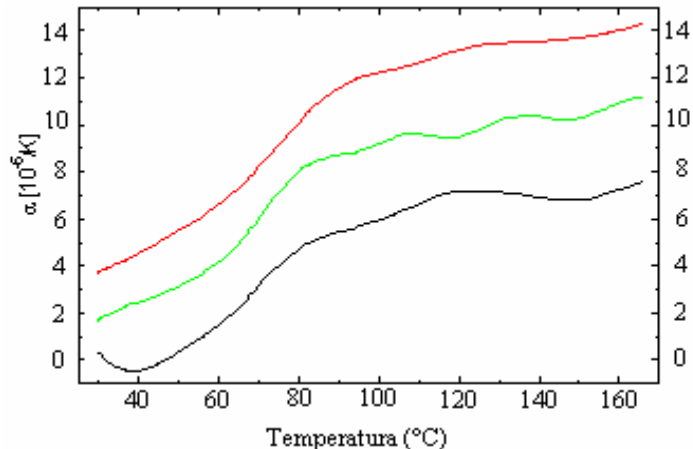
kjer je E modul razteznosti in ε deformacija. Notranja napetost v kamnu, povzročena zaradi dovajanja toplote, se ne more manifestirati kot raztezek. Ko notranje napetosti presežejo trdnost materiala, nastanejo razpoke, plošče kamna v konstrukciji se zvijejo. Nove razpoke se pojavijo po mejah med zrni ali/in po razkolnih ploskvah mineralov. Prvotne razpoke se lahko povečajo ali, to je redkeje, celo zaprejo. Zaradi razpok se poveča poroznost, ta pa zniža modul razteznosti in trdnost kamnine ter vpliva na anizotropne lastnosti (Cooper in Simmons, 1977, Bauer in Johnson, 1979 ter Wong in Brace, 1979).

V tej povezavi je pomembno tudi poznavanje toplotnih raztezkov drugih gradbenih materialov (zlasti betona in cementa). V konstrukciji, kjer materiali niso toplotno kompatibilni, - ali če njihove toplotne lastnosti ob projektiranju niso bile upoštevane - nastajajo ob nihanju temperature napetosti, ki sčasoma povzročijo mehanske poškodbe.

2.4 Zaostale deformacije

Opisane napetosti, ki so neposredno povezane z moduli razteznosti, povzročijo zaostale deformacije v kamnini (Ramana in Sarma, 1980). Če je L_1 začetna dolžina vzorca, L_3 dolžina vzorca pri najvišji doseženi temperaturi in L_2 končna dolžina vzorca po ohlajanju, velja $L_2 - L_1 = \Delta L_p$. Pri tem je ΔL_p trajna ali zaostala (tudi rezidualna) deformacija. Več ciklov segrevanja in ohlajanja lahko povzroči tudi do 20 odstotkov trajne deformacije (Bilbija, 1984).

Ukrivljanje marmornih fasadnih plošč je spodbudilo raziskave anizotropnega raztezanja in toplotne histereze (nastanek zaostale deformacije) marmorja. Widhalm s sodelavci (1996) je za tovrstne preiskave izbral dva kalcitna marmorja in pri tem ugotovil, da: (i) je toplotni raztezek marmorjev vzdolž usmerjenih zrn dvakrat večji kot prečno na zrna (slika 3); (ii) je po prvem toplotnem ciklusu vrednost zaostale deformacije največja; (iii) je zaostala deformacija največja v smeri najmanjšega raztezka, iv) se sposobnost kamnine za vpijanje vode povečuje s številom temperaturnih ciklov, to pa kaže na slabljenje vezi med mineralnimi zrni (slabša kohezija med zrni).

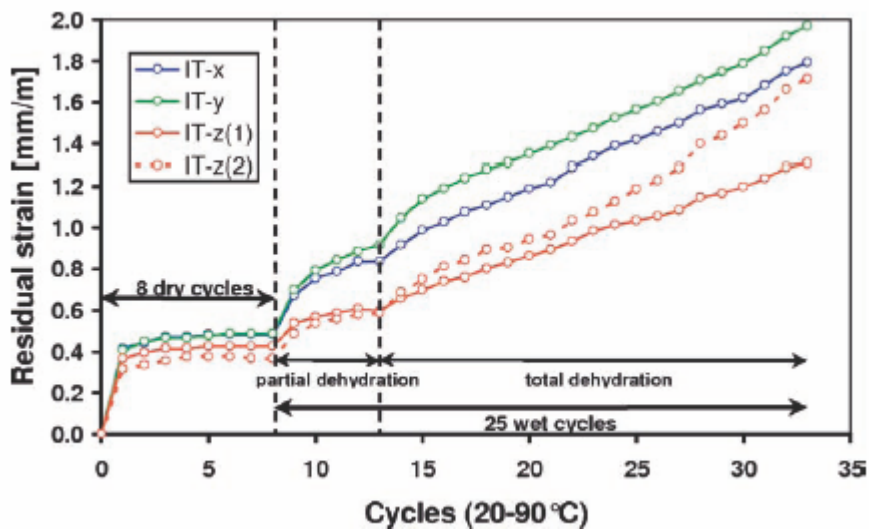


Slika 3: Koefficient toplotnega raztezka v smeri največjega (rdeča krivulja) in najmanjšega (črna krivulja) raztezanja (Widhalm et al. 1996)

2.5 Kombinirani vpliv vlage in toplote na raztezanje naravnega kamna

Raziskav o kombiniranem vplivu vlage in toplote na raztezanje naravnega kamna je bilo doslej opravljenih bolj malo.

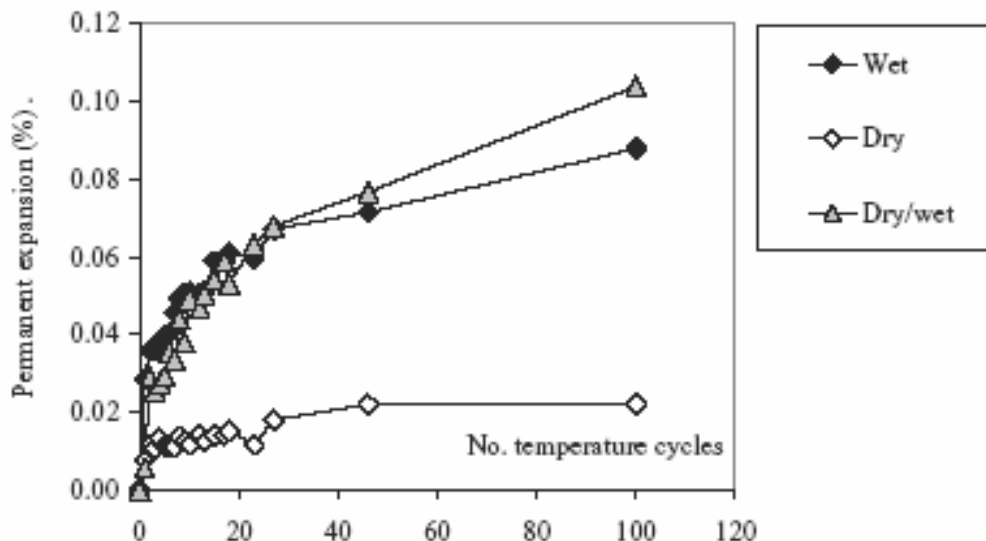
Kombiniran vpliv temperaturnih ciklov, ki ponazarjajo spremembo dnevnih in nočnih temperatur, kakšnim je izpostavljen fasadni element, ter vlage na propadanje fasadnih plošč iz izbranih vrst kalcitnega marmorja sta proučevala Koch in Siegesmund (2004). Za proučevane vrste marmorja je predvsem značilno propadanje, ki se kaže kot ukrivljanje. Ugotovila sta, da ciklično ogrevanje marmorja, kadar ni vlage, povzroči nastanek zaostale deformacije samo po prvem ciklu ogrevanja, pri nadaljnjem ogrevanju v vodi pa se zaostala deformacija povečuje (slika 4). Na podlagi tega sta sklepala, da vlaga pospešuje hitrost propadanja marmorja, izpostavljenega dnevnim ciklom ogrevanja in ohlajanja ter močenja in sušenja.



Slika 4: Zaostala deformacija po cikličnem ogrevanju vzorcev marmorja v različnih razmerah. Z različno barvo so označeni različni preskušanci vzorca kamnine glede na njihovo usmerjenost. Preskušanci so bili najprej ogrevani v suhem (8 ciklov) in nato v vodi (nadaljnjih 25 ciklov) v temperaturnem območju od 20 do 80 °C (vir: Koch & Siegesmund, 2004)

Omenjena avtorja sta proučevala tudi vpliv kristalografske usmerjenosti in oblike kalcitnih zrn na obseg propadanja. Ugotovila sta, da ta dva dejavnika vplivata na intenzivnost in anizotropnost propadanja, zato je usmeritev razreza bloka v plošče izjemno pomembna.

Raztezanje marmorja v suhih in vlažnih razmerah je bilo raziskano tudi ob izpeljavi evropskega projekta TEAM (Testing and assessment of marble and limestone), pri katerem je sodeloval tudi Zavod za gradbeništvo Slovenije. Grelk s sodelavci (2004) opisuje metodo, razvito pri tem projektu, za določanje toplotno-hidričnega raztezka. Ugotovili so, da zaostala deformacija preskušancev nepretrgoma narašča z naraščajočim številom ciklov tedaj, ko poteka ogrevanje v vodi, pri suhem ogrevanju pa se zaostala deformacija po nekaj ciklih ustali (slika 5).



Slika 5: Razlika v zaostali deformaciji izbranega marmorja iz Norveške v odvisnosti od števila ciklov – razmer staranja (wet – ogrevanje v vodi, dry – suho ogrevanje, dry/wet – ogrevanje z vodo nasičenih preskušancev) – vir: Grell et al., 2004

2.6 Beton v gradbeništvu

V zgodovini je bilo prevladujoče (in najboljše) vezivo za zidane konstrukcije apno, ki pa je zračno vezivo. Rimljani so apneni malti začeli dodajati pucolan in zdrobljeno staro opeko. S tem so vnesli silikatne snovi, in malta je dobila hidravlične lastnosti. Ob dobri tehnologiji vgrajevanja, je dobila ta malta podobne lastnosti, kot jih ima beton. Z nadaljnjim razvojem gradbenih tehnik se je razvila tehnologija vlivanja enovite mase v leseni opaž, s tem pa so bile dosežene tudi tlačne trdnosti do 40 MPa in poroznost, zrnavostna sestava in permeabilnost, ki so primerljive z današnjimi normativi.

Rimski beton (*opus cementium*) je bil tudi temelj stoletnega obstoja rimskega imperija. Teh zgradb ni uničil čas, podrli so jih poznejši graditelji, ki so te objekte uporabili kot kamnolome. V rimski provinci Norik (ki je obsegala velik del današnje Avstrije), ki je že pred prihodom Rimljanov slovela po odličnem železu in železarjih – Keltih, so bili najdeni tudi ostanki prvega armiranega betona in sicer v ostankih vile, ki je imela vgrajene kanale za ogrevanje s toplim

zrakom. Pokrovi so bili iz ulitega betona, okrepljenega z železnimi palicami v prečni smeri (profil okoli 2–3 cm x 0,4 – 0,6 cm).

Leta 1414 so v nekem švicarskem samostanu našli rokopis Vitruvija in v njem med drugim tudi opis rimskega betona in različnih naravnih pucolanskih dodatkov. Leta 1486 je Giocondo natisnil Vitruvijevo delo in uporabil pucolansko malto za graditev podpornika mostu Notre Dame v Parizu. Tu se začne zgodovina modernega betona kot nadaljevanje rimske tehnologije. Za velika obrežna dela na Nizozemskem so pozneje uporabljali renski tras, uporaba betona se je uveljavila za graditev dokov, temeljev in valobranov. Ta tehnologija se je v 19. stoletju dokončno uveljavila z iznajdbo portlandskega cementa, ki ga je leta 1824 patentiral Anglež Joseph Aspdin.

V prvi polovici 19. stoletja so patentirali armaturo iz palic kovanega železa. Na svetovni razstavi v Parizu (1854) so razstavili čoln iz armiranega betona, pozneje (1867) pa prav tam še armirana korita za rože, posode, cevi in železniške pragove. Danes je beton eden poglavitnih gradbenih materialov.

Današnji ali sodobni beton se uporablja skoraj povsod pri graditvi, saj se je sčasoma njegova kakovost zelo izboljšala. Na podlagi izsledkov raziskav so ugotovili, da prav vse njegove temeljne sestavine (voda, agregat, cement) vplivajo na kakovost. Z različnimi dodatki postaja beton še uporabnejši, saj ga je s pomočjo le-teh mogoče prilagoditi zahtevam zgradbe (npr. beton odporen proti kislini, je primeren za kemijske laboratorije) in tehnikam vgrajevanja (dodatki plastifikatorjev za boljšo plastičnost betonov).

2.6.1 Vrste betona

Poleg navedenega poznamo še veliko različnih vrst betona, ki jih razdelimo na tri skupine:

a) **beton za posebne namene**

To je beton, ki je narejen za posebne konstrukcije: ceste, predore, podvodna dela, pregrade, prednapete konstrukcije, cestne zavese ipd;

b) beton s posebno obdelavo

Poznamo nekaj vrst betona, narejenega s posebno tehnologijo.

AERIRANI BETON – ponavadi v zmes betona z uporabo kemijskega dodatka tipa aerant vpeljemo zračne mehurčke;

VAKUUMIRANI BETON - na površini sušечеlega se betona se naredi vakuum; pri tem se beton skrči (za okoli 4 odstotke), voda se odcedi, zato se beton hitreje strjuje in postaja trdnejši. Ta tehnologija je postala z razvojem kemičnih dodatkov – plastifikatorjev in superplastifikatorjev nepotrebna, saj dosežemo zmanjšanje razmerja med vodo in cementov preprosteje.

PARJENI BETON - višja temperatura pospešuje hidratacijo, zato se beton pri različnih pritiskih obda s paro, da se ne izsuši. Beton postane hitro zelo trden in tako posebno primeren za izdelavo serijskih predelanih elementov.

Razvoj tehnologije prinaša vedno nove rešitve pri izdelavi betonov, pojavljajo se nove substance za agregat, armaturo in dodatke (npr. beton, ki je impregniran s polimerom);

c) lahki beton

Konstruktivni beton mora imeti visoko maso in biti kompakten. Prostorninska masa takega betona znaša 2100–2500 kg/m³. Poleg konstruktivnega betona se v gradbeništvu uporablja tudi beton, ki ni konstruktiven: za izravnave, pode, nenosilne zidove ... Za te namene so razvili posebne vrste lahkega betona, ki ima prostorninsko maso praviloma nižjo od 2000 kg/m³. Je poroznejši, boljši toplotni izolator in manj trden. Za kakovost lahkega betona ni odločilna le stopnja poroznosti (skupni volumen por), temveč so pomembne tudi oblika, velikost in povezanost por.

Zaradi napredka tehnologije betona pa smo danes sposobni narediti tudi lahki beton velike nosilnosti, ki je konstrukcijski.

Celičasti beton sodi med lahki beton. Izdelujejo ga iz drobno zrnatega agregata, cementa in vode. Dodatki omogočajo oblikovanje velikih količin zračnih mehurčkov. Celičasti beton

dobro izolira, je lahek in ima majhno trdnost. Iz celičastega betona je na primer tudi izdelek, ki ga v pogovoru še vedno imenujemo siporeks. Danes ga pri nas na trg pošilja Ytong. Narejen je iz drobnega kremenčevega peska, portlandskega (ali žlindrene) cementa in vode, posebnega dodatka, v ustreznih toplotnih razmerah in ob primernem pritisku. Siporeks ni težak (400–700 kg/m³), je dober izolator, lahek za obdelavo, obstojen v mrazu. Uporablja se za izdelavo blokov, plošč in mednadstropnih plošč.

Penobeton se izdeluje iz drobnega peska (frakcija do 8 mm), vode, cementa in penila. Penilo (industrijsko milo) dodajajo vodi, nato z mešanjem in tresenjem ustvarijo peno ter dodajo še cement in agregat. Ko se beton strdi, pore ostanejo, s tem pa se zmanjša prostorninska masa samega betona.

2.6.2 Sestava in lastnosti betona

Beton je kompozit, ki ga naredijo z mešanjem veziva (cementa), vode in agregata. Je torej umetni konglomerat ali strjena mešanica veziva in polnila. Lastnosti betona se izboljšajo z različnimi dodatki.

Vezivo ali cement s svojo kakovostjo pomaga pri povezovanju agregata med seboj, zato sta njegova vloga in količina tako zelo pomembni.

Agregat ločimo glede na vrsto (petrografija agregata, ki je vezana na nahajališče) in njegovo granulometrično sestavo (velikost zrn).

Voda vpliva na beton vpliva s svojo količino (vodocementni faktor) in čistostjo (organske ali kakšne druge primesi).

Dodatki so pomembni predvsem tedaj, kadar je treba betonu izboljšati nekatere lastnosti, kot npr. zmrzlinsko obstojnost, plastičnost, hitrejše strjevanje idr. Dodatki so plastifikatorji, pospeševala vezanja aeranti, idr., veliko se uporabljajo zaradi povečane hitrosti graditve. Dodatki maltam in betonu spremenijo nekatere lastnosti, izboljšajo kakovost in olajšajo delo pri vgraditvi. Posebno veliko se uporabljajo pospeševalna sredstva, ki pospešijo strjevanje betona, in gostila,

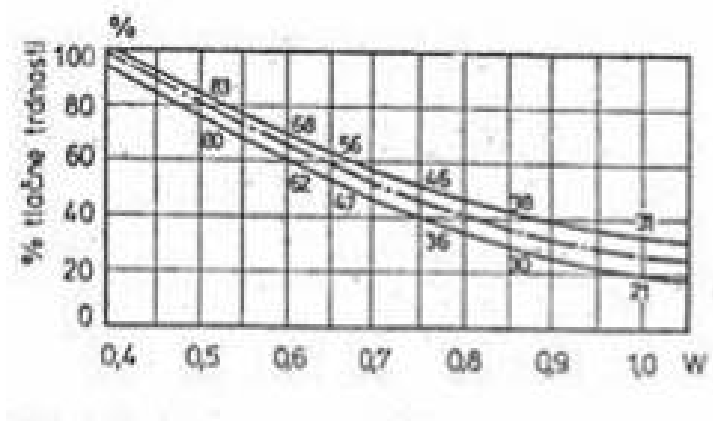
namenjena zmanjšanju prepustnosti za vodo.

Dejavniki, ki vplivajo na kakovost betona, izhajajo iz kakovosti njegovih sestavin, medsebojnih razmerij pa tudi armature, posebnih dodatkov in razmer pri vgrajevanju.

2.6.3 Lastnosti betona

Vodo-cementno razmerje

To je masno razmerje med vodo in cementom, ki zelo vpliva na trdnost betona. Vrednosti vodo-cementnega razmerja (v/c) so bile včasih v razponu od 0,3 do 1,4, zdaj pa zaradi zahteve po ustrezni obstojnosti betona, vodo-cementno razmerje konstrukcijskih betonov praviloma ni večje od 0,65. Na sliki 6 je podano razmerje med deležem trdnosti in vodo-cementnim razmerjem. Iz diagrama vidimo, da so betoni z nižjim vodo-cementnim razmerjem trdnejši.



Slika 6: Vpliv vodo-cementnega razmerja na tlačno trdnost (povzeto po Kresal, 2002)

Načeloma mora beton vsebovati toliko vode, kolikor je potrebuje za hidratacijo cementa. Če je vode manj, popolna hidratacija cementa ni mogoča, če je vode več, bo iz betona izhlapela in pustila za seboj kapilarne pore. Idealna količina vode se navadno ravna po načelu čim boljšega vgrajevanja. Velja pravilo: **Boljše dobro vgrajen slabši beton kakor slabo vgrajen boljši beton.** To pravilo zadnja leta nekoliko izgublja pomen, saj s kemijskimi dodatki, kakršni so plastifikatorji in superplastifikatorji dosegamo odlično sposobnost vgrajevanja tudi pri nizkem vodo-cementnem razmerju.

Razred tlačne trdnosti

Razred tlačne trdnosti je določen kot značilna tlačna trdnost betona pri starosti 28 dni in 5-odstotni fraktili. Označujemo jo kot $C = f_{c,cyl}/f_{c,cube}$, kjer je $f_{c,cyl}$ - to je značilna tlačna trdnost na standardnem valju s premerom 15 cm in višino 30 cm, $f_{c,cube}$ pa značilna tlačna trdnost, določena na standardni kocki z robom 15 cm.

Poroznost

Vsak beton vsebuje neko količino por in votlin. Največja »gneзда« por nastanejo zaradi neustrezne oblike kamnitih zrn, neustrezne granulometrijske sestave in slabega vgrajevanja. Manjše pore nastanejo zaradi zračnih mehurčkov, ki so posledica premajhne zgoščenosti, premalo vode ali izhlapele vode. Porozni beton ima nižjo trdnost, bolj prepušča vodo in je zato manj odporen proti zmrzovanju - tajanju pa tudi drugim agresivnim vplivom. Porozni betoni so sicer lažji a boljši toplotni izolatorji. Če je beton izpostavljen zmrzovanju, ga je treba zavarovati pred vodo ali vanj načrtno vnesti zračne mehurčke. Konstruktivni betoni morajo imeti čim manj kapilarnih por.

Korozija armature v betonu

Začetek dobe modernih armiranobetonskih konstrukcij je leto 1867, zato je ta tehnologija še dokaj mlada in vseh učinkov staranja še ne poznamo. Vendar ni dvoma, da je treba resno računati z nevarnostjo korozije armature pri konstrukcijah, ki so izpostavljene vplivom iz ozračja, zlasti ob morju. Armaturi najbolj škodujeta sol in zmrzal, zato so vse mostne konstrukcije nevarno izpostavljene koroziji. Agresivna voda, ki vsebuje raztopljene pline, kot sta SO_2 in CO_2 , ter talilne soli (od soljenja cest) prodira v beton in povzroča rjavenje armature. Zaradi kristalizacijskega pritiska nastanejo razpoke, te se večajo in nazadnje zaščitna plast betona odpade. Zato je treba izpostavljene konstrukcije, še posebno prednapete konstrukcije, dobro zavarovati pred vplivom vode.

Spremembe volumna

Tako kot se razteza navlažen les, se širi tudi beton, če je vlažen. Raztezanje zaradi vlage za trden

beton ni nevarno, krčenje pa lahko povzroča razpoke. Te nastanejo, ker sile presežejo natezno trdnost betonske mase, ki je razmeroma majhna. Beton se bo manj krčil, če bomo za njegovo izdelavo uporabili manj cementa, manj vode in več grobo mletega cementa.

Krčenje in raztezanje nastajata tudi zaradi temperaturnih razlik, značilnih za okolje, ki mu je beton izpostavljen. Nastanek razpok zaradi toplotnih razlik preprečimo z armaturo; - ta prevzame natege – in dilatacijami, ki preprečujejo prevelike raztezke po celotnem betonskem elementu.

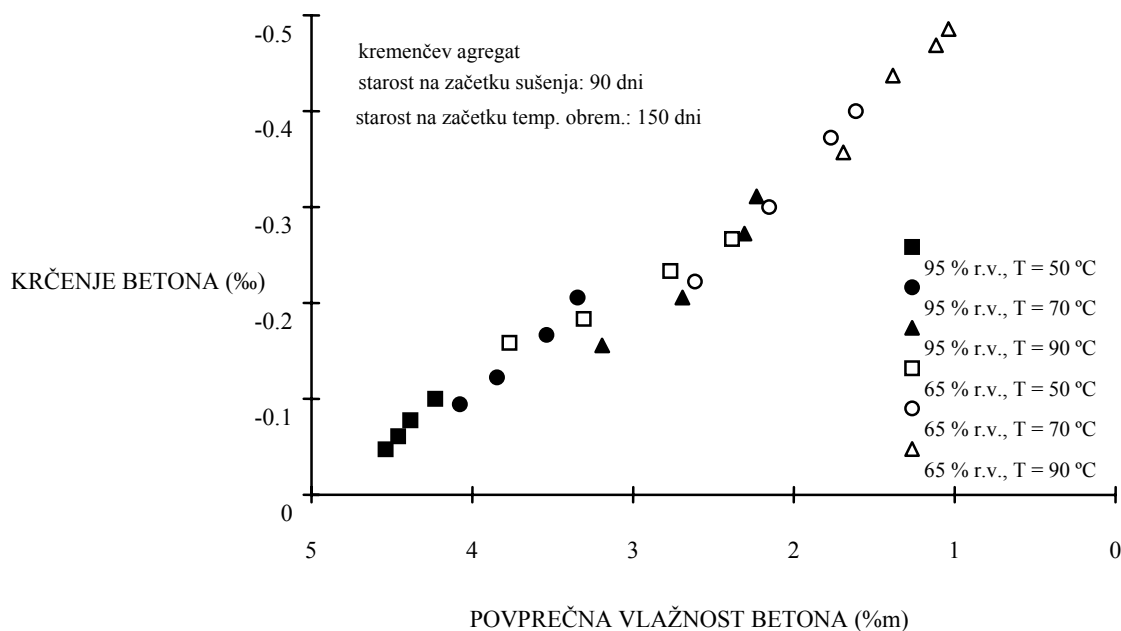
Betonski elementi se deformirajo tudi zaradi obremenitve. Najprej se oblikujejo raztezne deformacije, te se sčasoma večajo zaradi pojava, ki ga imenujemo lezenje betona. Lezenje je največje na začetku, torej takoj po obremenitvi, potem pa se sčasoma zmanjšuje in postopno ustali – se nagiba k neki končni vrednosti. Lezenje praviloma ni nevarno, ker zmanjša napetost na obremenjenih mestih, škodljivo pa je lahko v prednapetih konstrukcijah, kjer se zaradi lezenja izgublja prednapetost v kabljih.

2.6.4 Toplotne deformacije in raztezki betona

Vpliv temperature na krčenje navadnega betona

Krčenje navadnega betona pri temperaturah, bistveno višjih od 100 °C, je drugotnega pomena (Schneider, 1982), saj so deformacije zaradi krčenja pri teh temperaturah majhne v primerjavi s toplotnim deformiranjem betona.

To pa ne velja za temperaturni interval med 50 in 100 °C, kjer je začetna hitrost deformacij zaradi krčenja betona toliko večja, kolikor večja je temperatura. Pri stalno vzdrževani, okoli 65-odstotni vlagi doseže deformacija zaradi krčenja betona v temperaturnem intervalu med 70 in 100 °C svojo končno vrednost že po 60 dneh (Budelmann, 1989). Na splošno pa je velikost končne deformacije zaradi krčenja betona tako funkcija temperature kot funkcija vlažnosti betona. V temperaturnem intervalu med 50 in 90 °C in vlažnostnem intervalu med 65- in 100 odstotno relativno vlago pa obstaja tudi skoraj linearna koleracija med krčenjem in trenutno vlažnostjo betona (slika 7).



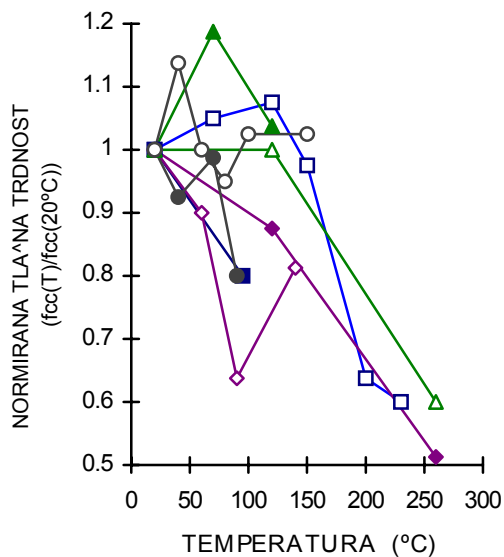
Slika 7: Sovisnost med krčenjem in vlažnostjo betona pri povišanih temperaturah po 24, 100, 500 in 1440 urah sušenja (Budelmann, 1989)

2.6.5 Vpliv temperature na mehanske lastnosti navadnega betona

V preteklosti so bile opravljene številne raziskave vpliva temperatur do 300 °C na mehanske lastnosti navadnega betona različne sestave (Irving, 1975; Lankard, 1968; Schneider, 1982; Seeberger, 1985). Pri vseh preiskavah se kot bistveni vplivni parameter pojavlja vlažnost betona, ki je funkcija vodo-cementnega razmerja in stopnje hidratacije cementa, to je osnovnih parametrov, ki določajo poroznost cementnega kamna, pa tudi funkcija relativne vlage okolja pred učinkovanjem temperaturne obremenitve in med njo, njenim trajanjem in višino, ter funkcija dimenzij preskušanca.

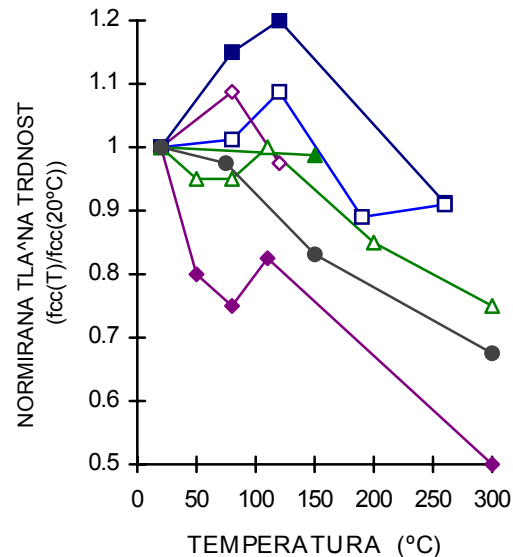
a) preprečeno sušenje

- Hannant, s= 80 dni, o= 3-540 dni, a
- Nasser, Lohtia, s= 14 dni, o= 91 dni, r
- ▲ Diederichs, s= 90 dni, o= 8 ur, k
- △ Lankard s soav., s= 90 dni, o= 8 ur, k
- ◆ Lankard s soav., s= 90 dni, o= 8 ur, a
- ◇ Browne s soav., s= 100 dni, o= 40 dni, a
- Nishizawa, s= 28 dni, o= 40 dni, a
- Kasami, s= 90 dni, o< 7 dni, k



b) neovirano sušenje

- Lankard s soav., s= 28 dni, o= 90 dni, k
- Lankard s soav., s= 28 dni, o= 90 dni, a
- ▲ Bertero, Polivka, s= 90 dni, o= 90 dni, a
- △ Kasami s soav., s= 90 dni, o= 90 dni, k
- ◆ Kasami s soav., s= 90 dni, o= 90 dni, a
- ◇ Diederichs, s= 90 dni, o= 90 dni, b
- Carette s soav., s= 140 dni, o= 30 dni, a



Oznake pomenijo: s-starost betona, o-trajanje ogrevanja

a-apnenec, k-kremenčev agregat, b-bazalt, r-rogovača

Slika 8: Preostala tlačna trdnost betonov: (a) ogrevanih v zapečatenem stanju, (b) ki so se med ogrevanjem neovirano sušili.

Izsledki preiskav tlačne trdnosti, natezne trdnosti in modula razteznosti preizkušancev, ki so bili pri poprejšnji temperaturni obremenitvi ohlajeni na 20 °C, so prikazani na slikah 8, 9 in 10. Večina raziskovalcev podaja rezidualne mehanske lastnosti, saj je te preiskave lažje izpeljati, hkrati pa so zaradi že opisanih dodatnih poškodb strukture materiala med ohlajanjem tudi upravičene. Vidimo, da so bile preiskave velikokrat izpeljane na dveh mejnih primerih: na zapečatenih vzorcih, kjer se ne bi izmenjevala vlaga betona z vlogo v okolici, in na vzorcih, ki se lahko med ogrevanjem prosto sušijo. Ker je popolno zapečatenje težko doseči, še posebno pri

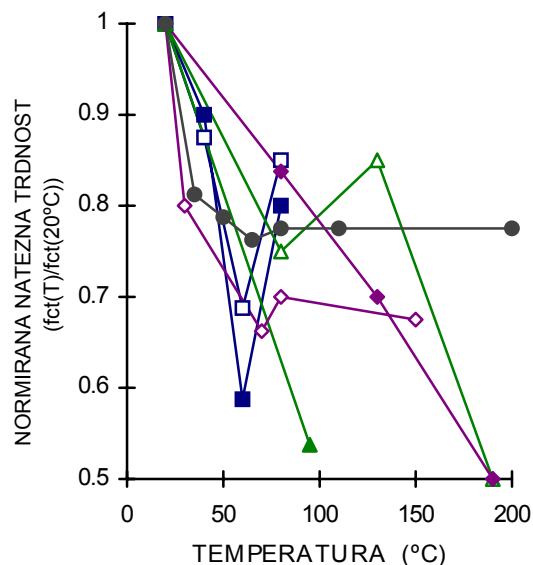
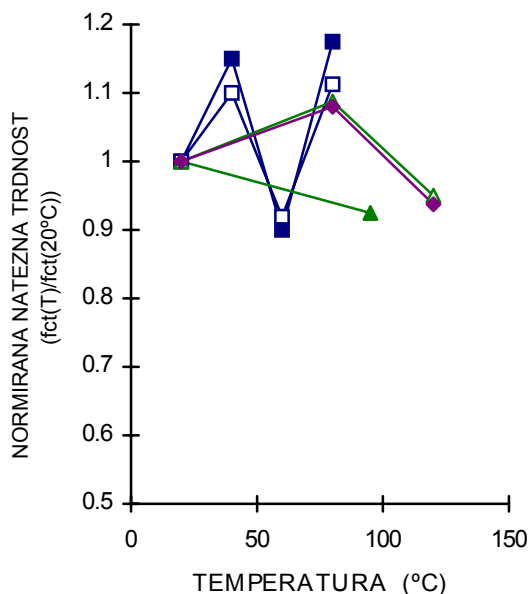
temperaturi, višji od 100 °C, ko pritisk vodne pare močno naraste, je to lahko razlog za nasprotujoče si rezultate v takšnih primerih. Pri prostem izsuševanju v okolico imamo sorazmerno slabo definirane vlažnostne razmere. Skoraj vedno pa se ob prosti izsušitvi že pri temperaturah, bistveno nižjih od 100 °C, vsa izparljiva voda izgubi (slika 11).

a) preprečeno sušenje

- Harada s soav., s= 28 dni, o= 90 dni, k, 40 in 60C - DN, 80C - CN
- Harada s soav., s= 28 dni, o= 180 dni, k, 40, 60C - DN, 80C - CN
- ▲ Rostasy s soav., s= 120 dni, o= 90 dni, k, CN
- △ Lankard s soav., s= 90 dni, o= 90 dni, a, UN
- ◆ Lankard s soav., s= 90 dni, o= 90 dni, a, UN

b) neovirano sušenje

- Harada s soav., s= 28 dni, o= 90 dni, k, 40 in 60C - DN, 80C - CN
- Harada s soav., s= 28 dni, o= 180 dni, k, 40, 60C - DN, 80C - CN
- ▲ Rostasy s soav., s= 120 dni, o= 90 dni, k, CN
- △ Lankard s soav., s= 28 dni, o= 90 dni, a, UN
- ◆ Lankard s soav., s= 28 dni, o= 90 dni, a, UN
- ◇ Saeman, Washa, s= 28 dni, o= 1 dan, k, CN
- Kasami s soav., s= 90 dni, o= 90 dni, k, CN

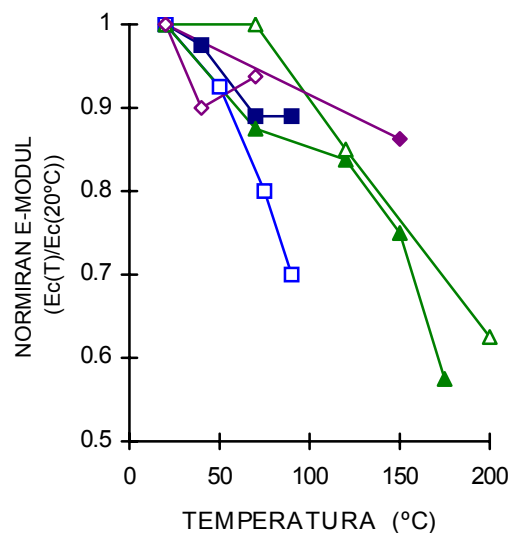


Oznake pomenijo: s-starost betona, o-trajanje ogrevanja, a-apnenec, k-kremenčev agregat, DN-neposredni natezni preskus, CN-cepilni preskus, UN-upogibni preskus

Slika 9: Preostala natezna trdnost betonov: (a) ogrevanih v zapečatenem stanju, (b) ki so se med ogrevanjem neovirano sušili

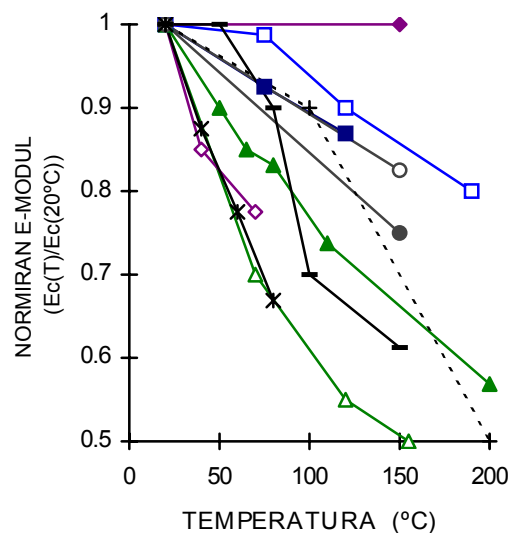
a) preprečeno sušenje

- Nishizawa, s= 28 dni, o= 40 dni, a
- Hannant, s= 180 dni, o= 1 dan, a
- ▲ Nasser, Lohtia, s= 14 dni, o= 28 dni, b
- △ Diederichs, s= 90 dni, o= 28 dni, a
- ◆ Bertero, Polivka, s= 90 dni, o= 7 dni, a
- ◇ Seki, Kawasumi, s= 28 dni, o= 56 dni, k



b) neovirano sušenje

- Lankard s soav., s= 28 dni, o= 90 dni, k
- Lankard s soav., s= 28 dni, o= 90 dni, a
- ▲ Kasami s soav., s= 90 dni, o= 90 dni, k
- △ Diederichs, s= 90 dni, o= 28 dni, a
- ◆ Bertero, Polivka, s= 90 dni, o= 7 dni, a
- ◇ Seki, Kawasumi, s= 28 dni, o= 56 dni, k
- Cruz, s= 28 dni, o= 1 ura, k
- Cruz, s= 28 dni, o= 1 ura, a
- ✱ Harada s soav., s= 28 dni, o= 90 dni, k
- Marechal, s= 500 dni, o= 1 ura, k
- - + - - Marechal, s= 500 dni, o= 1 ura, a



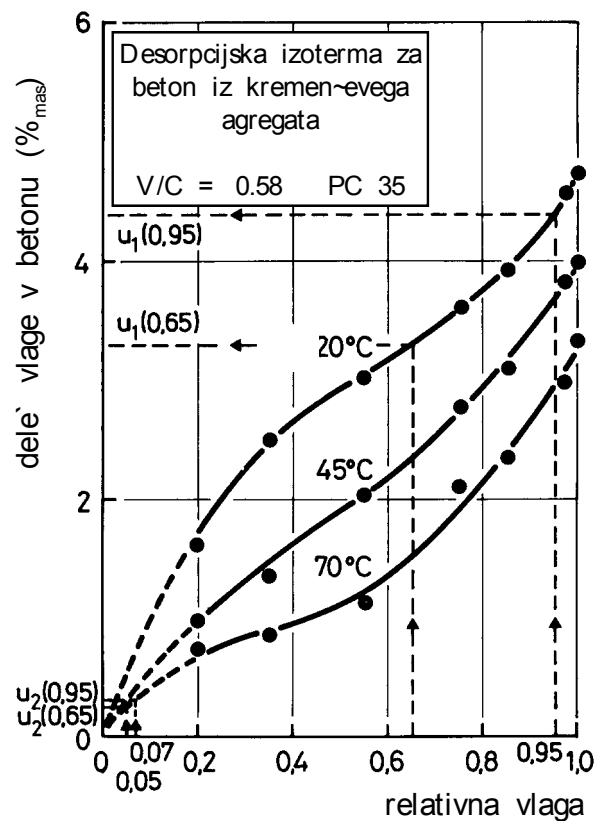
Oznake pomenijo: s-starost betona, o-trajanje ogrevanja
a-apnenec, k-kremenčev agregat, b-bazalt

Slika 10: Preostali modul razteznosti betonov: (a) ogrevanih v zapečatenem stanju, (b) ki so se med ogrevanjem neovirano sušili

Rezultati na slikah 8, 9 in 10 kažejo, da je za oba mejna primera, zapečatenje in prosto izsuševanje, raztros rezultatov velik za vse prikazane mehanske količine. Na splošno lahko rečemo, da povzročijo temperature višje od 100 °C padec tlačne trdnosti, ki pa ga težko kvantitativno ovrednotimo. Zelo pa si nasprotujejo rezultati v temperaturnem območju do 100 °C, kjer rezidualna tlačna trdnost niha med 20-odstotnim zvišanjem in približno enako velikim padcem, v primerjavi s trdnostjo neogrevanega betona. Se pravi, da v tem temperaturnem

območju na toplotno pogojeno spreminjanje tlačne trdnosti vpliva več parametrov, ne le vlažnostne razmere in višina temperature. Po Budelmannu (Budelmann, (1989) v delu Bokana-Bosiljkova, 1996) na spreminjanje mehanskih lastnosti betona v temperaturnem območju do 100 °C vplivajo tile parametri:

1. aktiviranje hidratacije cementa s povišano temperaturo, posledica tega je pospešen razvoj trdnosti;
2. oblikovanje novih CSH-faz zaradi kemične reakcije $\text{Ca}(\text{OH})_2$ v cementnem kamnu s SiO_2 v finem agregatu, če je v njem voda;
3. spreminjanje strukture por v cementnem kamnu;
4. sprememba površinske energije cementnega kamna in ločilnega pritiska vode zaradi spreminjanja količine vlage v betonu;
5. oblikovanje mikrorazpok v cementnem kamnu in v stičnem območju med cementnim kamnom in agregatom zaradi toplotne in vlažnostne nekompatibilnosti obeh komponent.



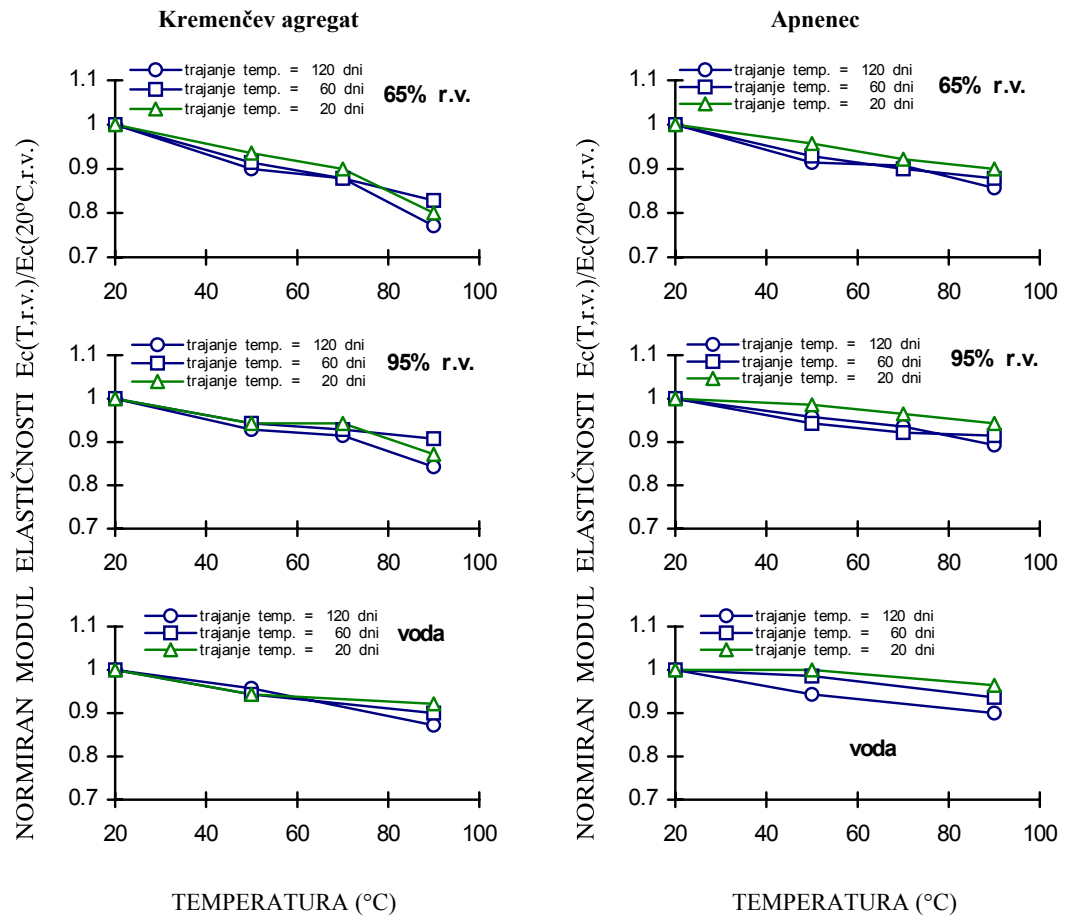
Slika 11: Delež vlage v betonu po prosti izsušitvi pri visoki temperaturi (v Bokan-Bosiljkov, 1996)

Pri višjih temperaturah postane takšen celostni pregled na dogajanje v betonu vse manj potreben, saj imajo toplotno povzročene razgraditvene reakcije v cementnem kamnu prevladujoč vpliv na trdnost. Poleg tega pa v cementnem kamnu ni več na voljo fizikalno vezane vode, tako da je nadaljevanje hidratacije cementa preprečeno.

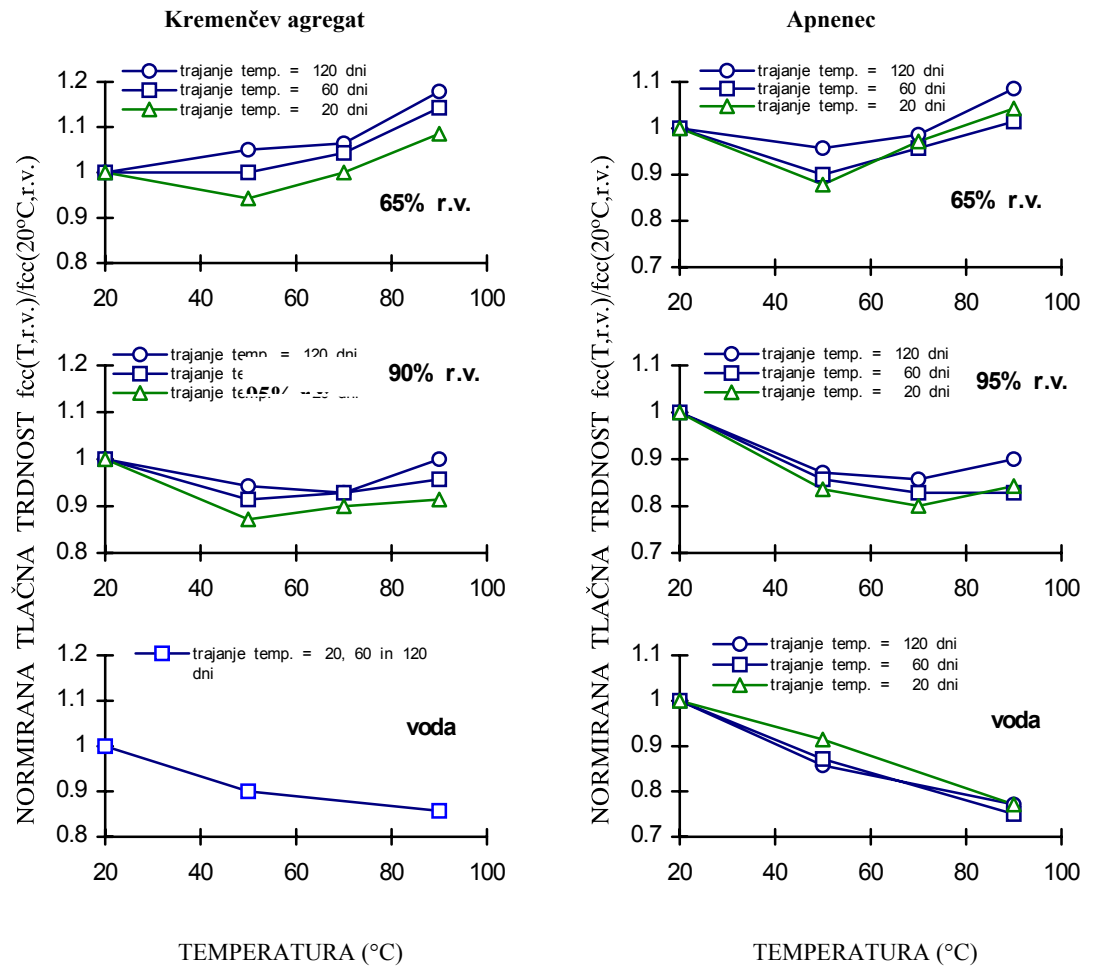
Ugotovitve preiskav natezne trdnosti betonov, ki so bili segreti na določeno temperaturo, potem pa ohlajeni na 20 °C, so bili dobljeni večinoma s cepilnim nateznim preskusom, saj je tega najlažje opraviti. Kot vemo, pa daje le neposredni natezni preskus dejanske natezne trdnosti, s cepilnim ali upogibnim preskusom pa dobimo t. i. tehnološke natezne trdnosti.

Vendar pa je način preiskave tedaj, ko raziskujemo spreminjanje natezne trdnosti s temperaturo glede na vrednost, pri navadni temperaturi drugotnega pomena. Res pa je, da dobimo pri temperaturah višjih od 300 °C, s cepilnim preskusom primerjalno manjši padeč natezne trdnosti kakor pri neposrednem nateznem ali upogibnem preskusu (Budermann, 1989). Zdi se, da oblikovanje razpok bolj vpliva na ti dve trdnosti, kakor na cepilno natezno trdnost.

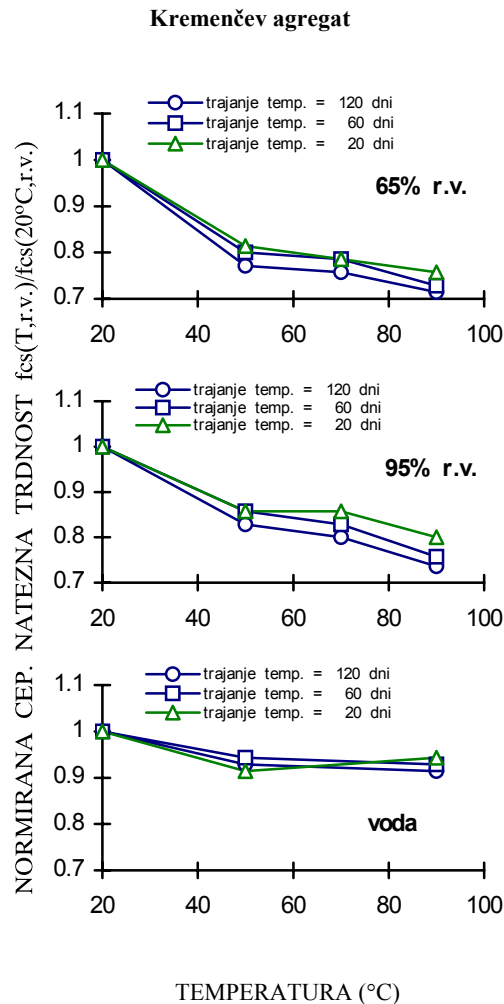
Nekaj izidov preskusov, ki jih je opravil Budermann (Budermann 1989) glede na različne mehanske lastnosti betona, prikazujejo slike 12, 13 in 14.



Slika 12: Modul razteznosti betona po obremenitvi s stacionarno temperaturo (Budelmann1989)



Slika 13: Tlačna trdnost betona po obremenitvi s stacionarno temperaturo (Budelman, 1989)



Slika 14: Cepilna natezna trdnost betona po obremenitvi s stacionarno temperaturo (Budelmann, 1989)

Na podlagi teh izidov lahko sklepamo, da je zmanjšanje trdnosti z vodo zasičenih betonov posledica spreminjanja strukture kapilarnih por cementnega kamna in oblikovanja mikrorazpok zaradi razlik v koeficientih linearnega temperaturnega raztezka posameznih komponent betona. To tudi potrjuje, da cepilna natezna trdnost in tlačna trdnost nista odvisni od trajanja temperaturne obremenitve.

Pri ogrevanju bolj suhih betonov (65- in 95 odstotni relativni vlagi) je trdnost funkcija trajanja temperaturne obremenitve. Obstaja namreč jasna korelacija med trdnostjo in količino vlage v betonu v trenutku obremenitve. Tlačna trdnost se najbolj poveča v območju vlažnosti pod tremi masnimi odstotki, to pa ustreza približno 50 odstotkom celotne izparljive vode iz zasičenega betona pri 105 °C. V tem vlažnostnem območju je kapilarna voda že odstranjena, količina vode v absorbiranih plasteh pa močno zmanjšana. Povečana trdnost je torej poleg zniževanja ločilnega pritiska vode, predvsem posledica povečanja površinske energije pri manjši količini vlage.

2.6.6 Mehanizmi krčenja pri navadni temperaturi

Za krčenje, ki ga spremlja sušenje cementnega kamna, so odgovorni trije mehanizmi, ki so posledica vezanja vode v sistemu por cementnega kamna:

1. zmanjšanje površinske energije cementnega kamna v območju relativnih vlažnosti med 0 in 40 odstotki;
2. povečanje ločilnega pritiska v območju relativnih vlažnosti med 40 odstotki in 100 odstotki;
3. kapilarno delovanje.

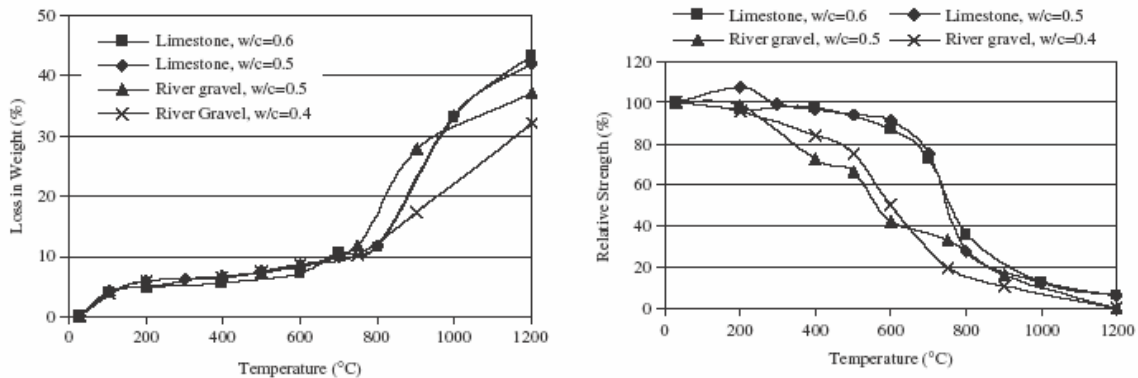
Idealno tanek element cementnega kamna, katerega vlažnost sledi zniževanju vlage v okolici, se nagiba k neoviranemu krčenju. Neovirano krčenje je materialna lastnost, ki je funkcija vodo-cementnega razmerja in stopnje hidratacije cementa, to je količin, ki določajo poroznost cementnega kamna, pa tudi funkcija relativne vlage in temperature okolja. V območju med 100-odstotno in 30-40 odstotno relativno vlago, to je v območju mehanizma krčenja zaradi spreminjanja ločilnega pritiska, je krčenje sorazmerno izgubi vode iz materiala. Z nadaljnjim zniževanjem relativne vlage, to je v območju povečevanja površinske energije cementnega kamna, postane krčenje cementnega kamna precej intenzivnejše.

Povprečno deformiranje betonskega elementa zaradi krčenja cementnega kamna se razlikuje od neoviranega krčenja cementnega kamna. Med sušenjem preskušanca nastanejo v materialu notranje napetosti zaradi razlik v vlažnosti betona med posameznimi točkami prečnega prereza preskušanca. Poleg tega pa agregat, ki se ne krči, ovira krčenje cementnega kamna in s tem inducira dodatne napetosti. Posledica opisanih mehanizmov je lahko nastanek mikrorazpok v še

neobteženih betonskih elementih. Proporcionalna zveza med hitrostjo sušenja in krčenjem velja približno tudi za beton.

2.6.7 Vpliv visokih temperatur na beton

Arioz (2007) je proučeval vpliv povišane temperature (200-1200 °C) na fizikalno-mehanske lastnosti različnih mešanic betona. Izsledki preiskave so pokazali, da se je masa preskušancev signifikantno zmanjšala z naraščanjem temperature in prav tako njihova trdnost (slika 15).



Slika 15: Izguba mase (slika a) in zmanjšanje relativne trdnosti (slika b) betona pri povišanju temperature (Arioz, 2007)

Propadanje betona zaradi povišane temperature je vidno tudi na sliki 16.

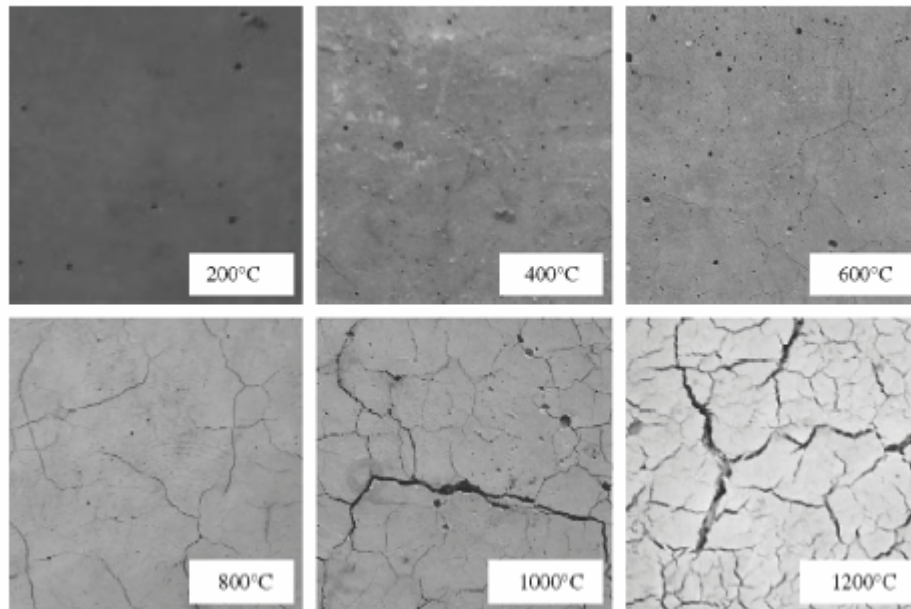


Fig. 2. Surface texture of the concrete samples exposed to elevated temperatures.

Slika 16: Površinska tekstura betonskega preskušanca, izpostavljenega visoki temperature (Arioz, 2007).

2.7 Kompatibilnost kamna in betona

Pri samem združevanju kamna in betona se marsikdaj pozablja, da se združujeta dva različna materiala z popolnoma drugačnimi lastnostmi (raztezki, skrčki, trdnost, poroznost itn). Prav pri skrčkih in raztezkih pa se kamen in beton najbolj poškodujeta. Materiala se pri segrevanju ali ohlajanju različno razobličita in pri tem pokata. Ker pa na samo lastnost kamna zelo težko vplivamo, saj je to naravni material, je treba z različnimi dodatki in vrstami agregata lastnosti betona uravnati.

3 EKSPERIMENTALNI DEL

3.1 Izbira in priprava vzorcev

Za raziskave v okviru diplomske naloge je bilo treba pripraviti različne vzorce naravnega kamna in betona različnih mešanic. Betone smo pripravili v konstrukcijsko-prometnem laboratoriju na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani, vzorce kamna pa pridobili v podjetju AZUR TRADE v Kamniku. V okviru diplomske naloge smo preiskali skupaj 16 vzorcev, 11 vzorcev različnih kamnin in 5 vzorcev različnih betonov.

3.1.1 Vzorci kamnin

Izbrali smo različne vzorce granitov, marmorjev in peščenjakov. Vzorci kamnin so bili izbrani glede na to, katere od teh kamnin se najpogosteje uporabljajo za kamnite kaminske obloge. Pri razrezu vzorcev so bile uporabljene diamantne rezalke. Dimenzije vzorcev so 30 x 3 x 3 cm, takšna je namreč zahteva standarda za določanje raztezkov. Pregled vzorcev je podan v preglednici 5.

Preglednica 5: Seznam vzorcev kamnin, poreklo, ime in opis

Komericalna oznaka skupine kamnin	Komercialno ime	Oznaka vzorca	Država porekla	Petrografsko ime	Makroskopski opis
Graniti	Imperial White	IW	Indija	granit	kamnina z belo matrico in sivimi vključki temnejših mineralov
	Multicolor mc.	MC	Brazilija	granit	rdečkasto rjav s črnimi lisami

	Juparana Indija Ji.	Ji	Indija	granit	belosiva in marelična barva (včasih zelo marelična včasih zelo belosiva barva)
	Paradisio Par.	PAR	Italija	granit	temno vijolične barve s temnosivimi do črnimi odtenki
Marmor	Rosa portogalo rdeč	RP- rdeči	Portugalska	marmor	rožnato bela kamnina s črnimi črtami – prevladuje roza barva
	Rosa portogalo svetli	RP-svetli	Portugalska	marmor	rožnato bela kamnina s črnimi črtami - prevladuje bela barva
	Repen	REP	Italija	apnenec	siva kamnina z vključki školjk
	Carrara cd.	CAR	Italija	marmor	sivkastobela kamnina s temnosivimi črtami ali lisami
	Sylvia	SYL	Egipt	apnenec	rumena kamnina s tankimi rjavimi črtami ali lisami
Peščenjak	Travertin svilary	SVIL	Makedonija	travertin	rumenorjava kamnina s posameznimi rdečkastimi primesmi
	Golden sinay	GS	Egipt	apnenec	temnorumena do svetlo oranžna kamnina s temnosivimi venami
	Giallo siena	GSI	Bosna	apnenčev	rumena, porozna

				peščenjak	mehka kamnina, ki je ni mogoče spolirati
--	--	--	--	-----------	---

3.1.2 Vzorci betona

Za vzorce betona smo izbrali pet različnih mešanic, sestava za te betone je bila izbrana glede na sestavine, uporabljene v proizvodnji preklad in na podlagi predvidevanj, kateri materiali bi lahko bistveno vplivali na raztezanje betona med segrevanjem. Recepture malt, ki smo jih izločili iz ustrezno sprojektiranih betonov, so podane v preglednici 6.

Preglednica 6: Seznam vzorcev betonov in njihova sestava.

Oznaka vzorca	Vrsta betona	Vrsta cementa	Vrsta agregata	Masa komponent [kg]				Vrsta dodatka	v/c
				Cement	Moka	Pesek [<1mm]	Voda		
Rec 1	beton iz črnega cementa	črni cement	savski pesek	1	-	3,1	0,7	-	0,7
Rec 2	beton iz črnega cementa	črni cement	savski pesek	0,75	0,25	3,1	0,7	-	0,93
Rec 3	vibrirani beton	CEM II	agregat Laže	1,928	-	1,108	0,868	-	0,45
Rec 4	samozgošče valni beton	CEM II	agregat Laže	1,642	1,026	0,828	0,706	9,6 g superplastifikator	0,43
Rec 5	aerirani samozgošče valni beton	CEM II	agregat Laže	1,480	0,896	0,668	0,578	2,13 g superplastifikatorja + aerant	0,39

3.2 Priprava vzorcev

3.2.1 Priprava betonske mešanice

Izbrali smo različne agregate (karbonatni savski pesek iz gramoznice Stari grad na Krškem polju, apnenčevo moko in apnenčev agregat iz kamnoloma Laže). Izmed cementov smo izbrali dva različna, in sicer cement z oznako CEM-II/A-S 42,5 R (v nadaljevanju CEM II) in črni cement z oznako CEM I 42,5R.

Savski pesek smo razdelili po frakcijah, in sicer: granulati > 4 mm, granulati med 4–2 mm, granulati med 2-1 mm in granulati < 1 mm. Nato smo posamezne frakcije stehtali, da smo lahko določili zrnavostno sestavo peska. Opravili smo tudi sejhalno analizo agregata Laže, in ga razdelili na frakcije: granulacija > 2 mm, granulacija med 2-1 mm in granulacija < 1 mm. V mešanicah za izdelavo preskušancev smo uporabili samo granulacije, manjše od 1 mm. Mešanice zelo finih malt smo določili tako, da smo iz sestave ustrezno projektiranih betonov z izbranimi lastnostmi izločili vse frakcije agregata, večje od 1 mm. Domnevali smo, da lahko na tako fini malti ustrezno določimo toplotno-hidrične lastnosti cementnega kamna v izbranih betonih. Nato smo zamešali pet različnih mešanic finih malt. Paziti je bilo treba na vodo-cementni faktor, na konsistenco ter na dobro homogenost in zgoščenost mešanic. Posamezno mešanico smo vlili v kalupe dimenzij 4 x 4 x 16 cm.

Pri tem smo uporabili: standardni mešalnik za malte (slika 17), digitalno tehtnico (natančnost 2 g, kapacitete 12 kg (slika 18), stresalno mizico za določanje konsistence (slika 19), sejhalna sita za določanje zrnavostne sestave agregatov (slika 20), standardni tridelni kalup za izdelavo prizmic 4*4*16 ccm³ (slik 21).



Slika 17: Standardni mešalnik za malto



Slika 18: Digitalna tehtnica (natančnost 2 g, zmogljivost 12 kg)



Slika 19: Stresalna mizica za določanje konsistence



Slika 20: Sejalna sita za določanje zrnastne sestave agregatov



Slika 21: Standardni tridelni kalup za izdelavo prizmic 4*4*16 cm³

Negovanje vzorcev

- Po enem dnevu v kalupih smo maltne prizmice razkalupili in jih položili v vodo s temperaturo $(20 \pm 1) \text{ } ^\circ\text{C}$. Tam so odležale približno 30 dni, da so postale ustrezno trdne in obstojne.

3.2.2 Priprava vzorcev za merjenje

Vzorci kamnin in betonov smo razdelili na dve skupini preskušancev:

- skupina 1 - **preskušanci za suho toplotno segrevanje**, ki so bili postopno ogrevani v sušilniku do $80 \text{ } ^\circ\text{C}$ in nato hlajeni na $20 \text{ } ^\circ\text{C}$;
- skupina 2 - **preskušanci za mokro toplotno segrevanje**, ki so bili ogrevani v vodi do $80 \text{ } ^\circ\text{C}$ in ohlajeni na $20 \text{ } ^\circ\text{C}$.

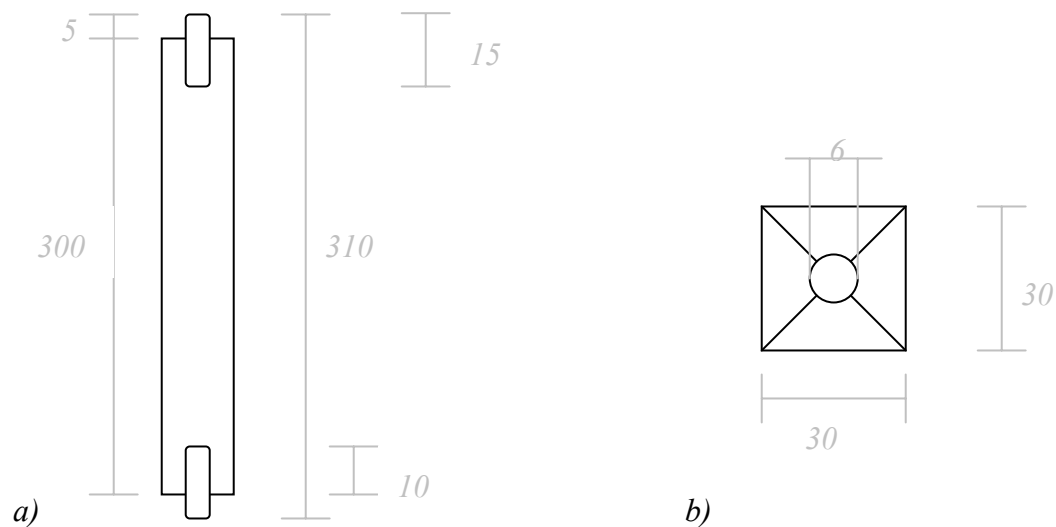
Pri vseh preskušancih je bilo treba namestiti reperje, z uporabo teh smo vpeli vzorce v aparaturo za merjenje deformacij (slike 22, 23 in 24).



Slika 22: Toplotna kopel za ogrevanje vzorcev med določanjem toplotno-hidrične ekspanzije



Slika 23: Naprava za merjenje spremembe dolžine



Slika 24: Skica preskušanca za določanje toplotno – hidrične ekspanzije (a – stranski ris, b – tloris)

3.3 Opis metod in delovnih postopkov

Preskuse in delovne postopke smo opravili na Zavodu za gradbeništvo Slovenije (ZAG Ljubljana), v laboratoriju za kamen in agregat, in sicer po postopku za določanje toplotno-hidričnega raztezka in zaostale deformacije, razvitem v okviru evropskega projekta TEAM (G5RD-CD-2000-00233) za marmorje in apnence – postopek TEAM WP6 2 – uge – 050228. Postopek smo prilagodili tudi za suho določanje toplotnega raztezka in zaostale deformacije v sušilniku. Vzorce smo ciklično ogrevali in hladili 10-krat, po vsakem ciklu pa je bila izmerjena deformacija preskušanca. Oba postopka sta podrobno opisana v nadaljevanju.

3.3.1 Določanje mokrega toplotnega raztezka in zaostale deformacije – meritve v vodi

Toplotno-hidrično deformacijo in raztezke izbranih kamnin smo določili po predlogu standarda

za določanje toplotno-hidrične ekspanzije kamnin (TEAM WP6 2 – uge – 050228). Z vodo zasičene vzorce, ki smo jih sušili teden dni pri temperaturi 40 °C, smo ogrevali v termostatni kopeli Huber cc 2 (slika 22) v temperaturnem intervalu od 20 do 80 °C. Preskušance velikosti 30 x 3 x 3 cm smo merili z merilno uro *elle* z natančnostjo 2 µm. Hitrost postopnega ogrevanja preskušancev je bila 10 °C/h. Po šestih urah ogrevanja smo termostatno kopal izklopili, tako da so se vzorci v 18 urah ohladili na temperaturo 20–23 °C. En cikel ogrevanja in ohlajanja je trajal 24 ur. Po vsakem ciklu smo izmerili dolžino preskušanca, določili spremembo njegove dolžine $\Delta l_{20,n}$ in določili trajno deformacijo $\varepsilon_{p,n}$, podano v mm/m, po enačbi:

$$\varepsilon_{p,n} = \frac{\Delta l_{20,n}}{l_{20,0}} \quad [\text{mm/m}]$$

Pri tem je:

$\Delta l_{20,n}$ sprememba dolžine preskušanca po n-tem cikla, merjena pri 20 °C,

$l_{20,0}$ začetna dolžina preskušancev v suhem stanju pri 20 °C.

Postopek ogrevanja in ohlajanja preskušancev smo ponovili desetkrat. V zadnjem, desetem ciklu smo izmerili dolžino preskušanca pri 80 °C. Iz tega smo izračunali toplotni raztezek ε_t .

$$\varepsilon_t = \frac{l_{80,10} - l_{20,9}}{l_{20,0}} \quad [\text{mm/m}]$$

kjer je:

$l_{80,10}$ dolžina preskušanca po 10. ciklu, izmerjena pri temperaturi 80 °C,

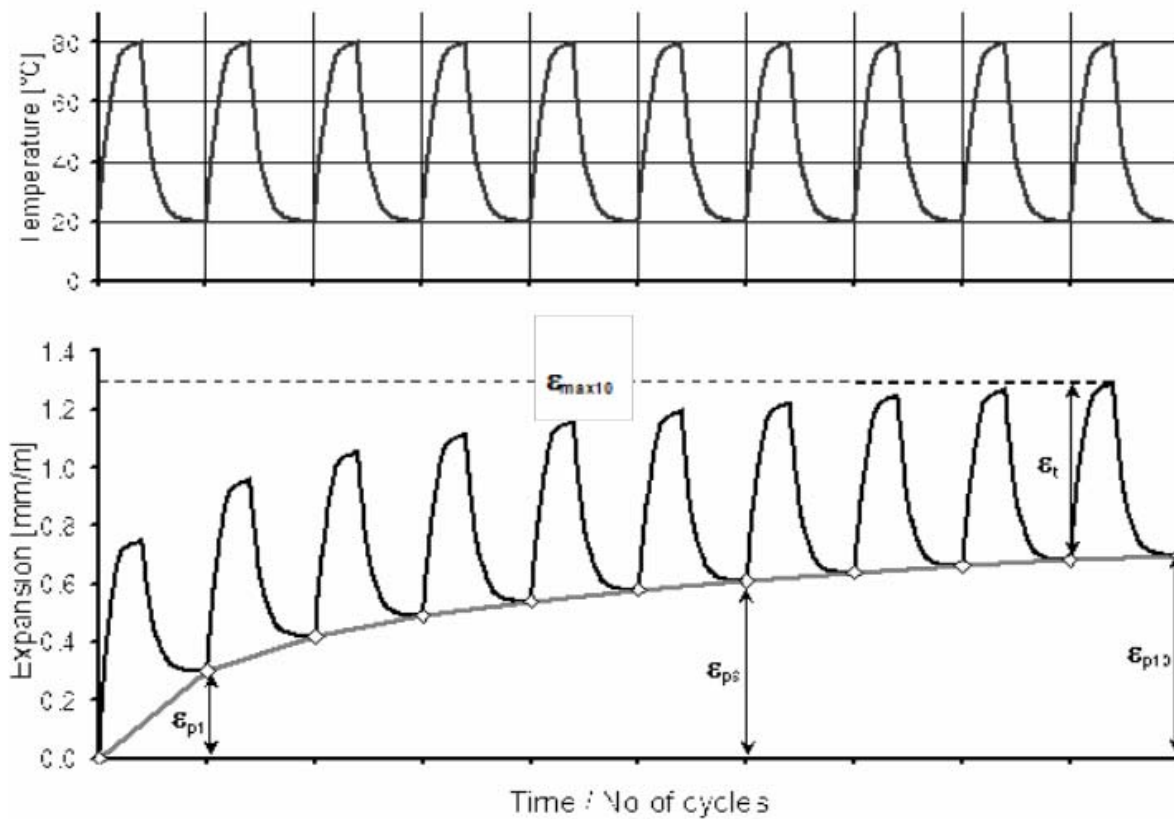
$l_{20,9}$ dolžina preskušanca po 9. ciklu, izmerjena pri temperaturi 20 °C.

Določili smo tudi maksimalno ekspanzijo preskušanca ε_{max} po 10. ciklu po formuli:

$$\varepsilon_{max,10} = \frac{l_{80,10} - l_{20,0}}{l_{20,0}} \quad [\text{mm/m}]$$

Pri tem se upoštevata raztezek med ogrevanjem in tudi zaostala deformacija zaradi ogrevanja v prejšnjih ciklih.

Pomen posameznih oznak je prikazan na sliki 25.



Slika 25: Shematski prikaz temperaturne krivulje ogrevanja in ohlajanja (zgoraj) in ekspanzijske krivulje s prikazanimi parametri (spodaj). Pri tem je ε_{max10} celotna deformacija, ε_{pn} trajna deformacija in ε_t toplotni raztezek.

3.3.2 Določanje suhega toplotnega raztezka in zaostale deformacije – suhe meritve

Pred začetkom suhih meritev je bilo treba vzorce 48 ur sušiti pri temperaturi 40 °C. Pri samih meritvah je bil postopek podoben kot pri mokri ekspanziji, le da je segrevanje potekalo v peči, in sicer v enakem intervalu kot prej od 20 °C do 80 °C. Temperaturni prirastek je bil približno enak 10 °C/h. Izpeljali smo 10 ciklov ogrevanja in ohlajanja. Med zadnjim ciklom smo tako kot pri mokri ekspanziji opravili meritev pri temperaturi 80 °C; na podlagi tega smo določili suhi toplotni raztezek ε_{tsuh} in suho maksimalno ekspanzijo $\varepsilon_{max,suh}$.

4 REZULTATI

4.1 Rezultati meritve suhe toplotne deformacije kamnin

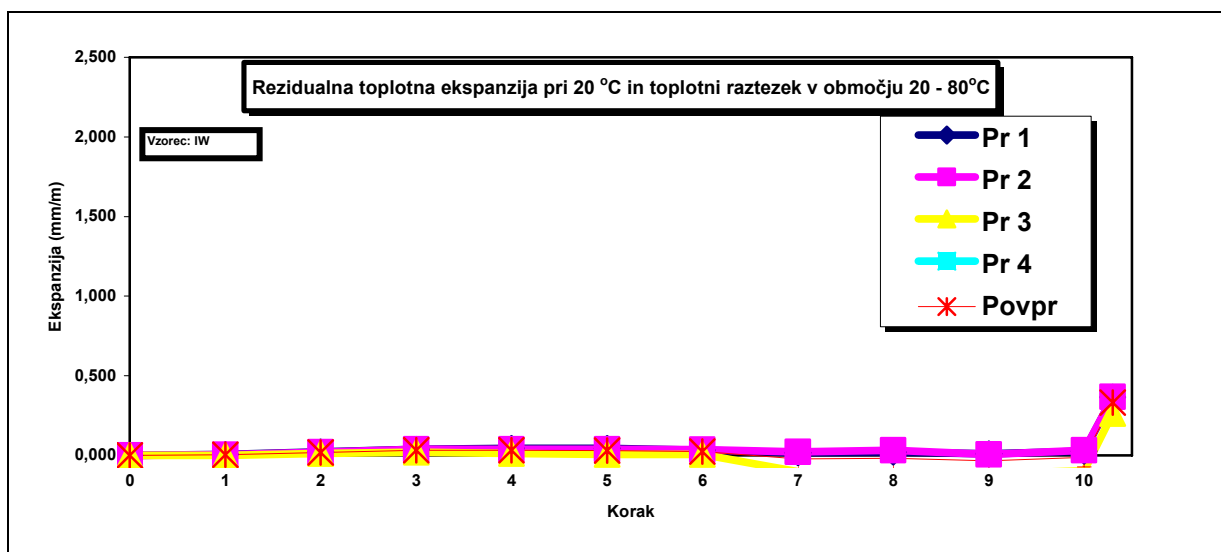
4.1.1 Graniti

4.1.1.1 Vzorec IW

Rezultati meritev so podani na slikah 26 in 27.

Cikel št.	ϵ_0	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6	ϵ_7	ϵ_8	ϵ_9	ϵ_{10}	ϵ_{max10}	ϵ
	mm/m												
vzorec 1	0,000	0,006	0,022	0,039	0,045	0,045	0,032	0,016	0,019	0,010	0,026	0,366	0,341
vzorec 2	0,000	0,003	0,019	0,039	0,039	0,039	0,035	0,023	0,032	0,006	0,032	0,367	0,335
vzorec 3	0,000	0,000	0,013	0,019	0,013	0,006	0,006	-0,103	-0,103	-0,116	-0,096	0,263	0,360
vzorec 4													
Min	0,000	0,000	0,013	0,019	0,013	0,006	0,006	-0,103	-0,103	-0,116	-0,096	0,263	0,335
Max	0,000	0,006	0,022	0,039	0,045	0,045	0,035	0,023	0,032	0,010	0,032	0,367	0,360
Ave	0,000	0,003	0,018	0,032	0,032	0,030	0,025	-0,021	-0,017	-0,033	-0,013	0,332	0,345
Stdev	0,000	0,003	0,005	0,011	0,017	0,021	0,016	0,071	0,074	0,071	0,072	0,060	0,013

Slika 26: Raztezki in suha toplotna deformacija vzorca IW



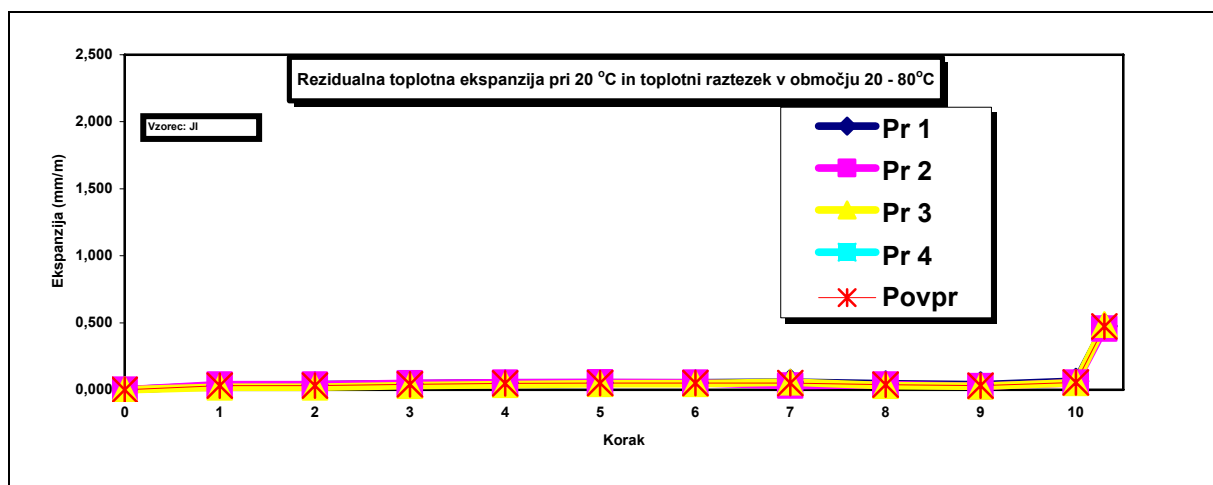
Slika 27: Rezidualna toplotna deformacija vzorca IW

4.1.1.2 Vzorec JI

Rezultati meritev so podani na slikah 28 in 29.

Cikel št.	ϵ_0	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6	ϵ_7	ϵ_8	ϵ_9	ϵ_{10}	ϵ_{max10}	ϵ
	mm/m												
vzorec 1	0,000	0,032	0,039	0,045	0,051	0,051	0,051	0,058	0,045	0,039	0,064	0,476	0,412
vzorec 2	0,000	0,039	0,039	0,048	0,051	0,055	0,051	0,032	0,039	0,026	0,051	0,456	0,405
vzorec 3	0,000	0,019	0,019	0,032	0,039	0,045	0,045	0,058	0,032	0,026	0,051	0,488	0,437
vzorec 4													
Min	0,000	0,019	0,019	0,032	0,039	0,045	0,045	0,032	0,032	0,026	0,051	0,456	0,405
Max	0,000	0,039	0,039	0,048	0,051	0,055	0,051	0,058	0,045	0,039	0,064	0,488	0,437
Ave	0,000	0,030	0,032	0,042	0,047	0,050	0,049	0,049	0,039	0,030	0,056	0,473	0,418
Stdev	0,000	0,010	0,011	0,009	0,007	0,005	0,004	0,015	0,006	0,007	0,007	0,016	0,017

Slika 28: Raztezki in suha toplotna deformacija vzorca JI.



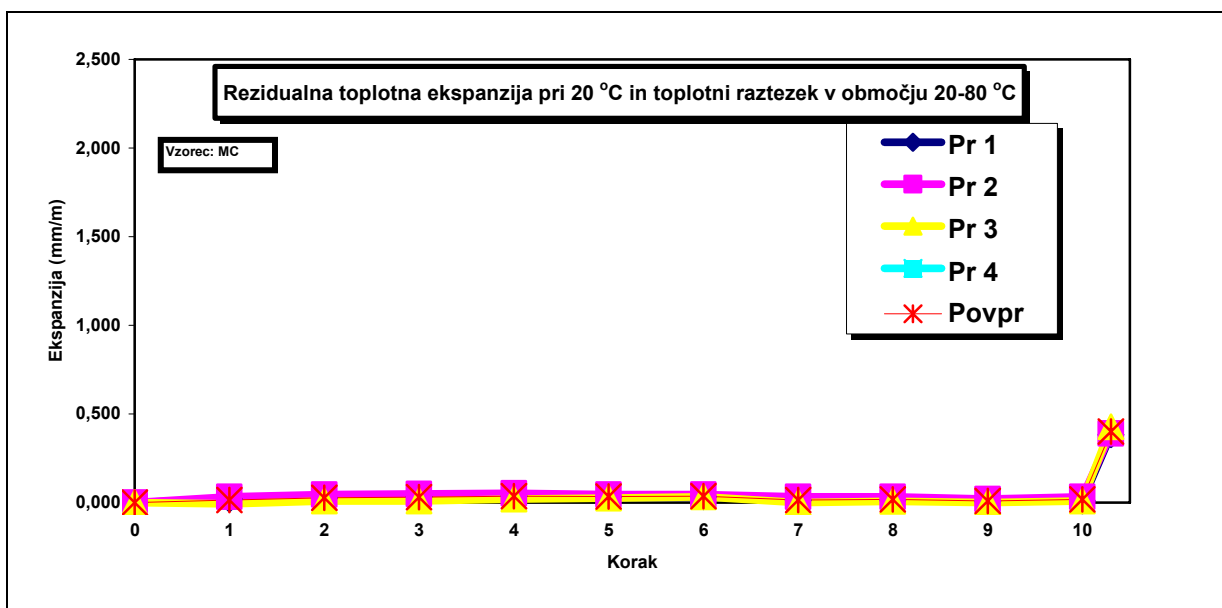
Slika 29: Rezidualna toplotna deformacija vzorca JI

4.1.1.3 Vzorec MC

Rezultati meritev so podani na slikah 30 in 31.

Cikel št.	ϵ_0	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6	ϵ_7	ϵ_8	ϵ_9	ϵ_{10}	ϵ_{max10}	ϵ_t
	mm/m												
vzorec 1	0,000	0,019	0,026	0,032	0,035	0,032	0,032	0,013	0,013	0,006	0,010	0,383	0,373
vzorec 2	0,000	0,032	0,045	0,048	0,052	0,045	0,045	0,032	0,032	0,019	0,032	0,390	0,358
vzorec 3	0,000	-0,006	0,010	0,010	0,019	0,026	0,032	0,000	0,006	0,000	0,010	0,428	0,418
vzorec 4													
Min	0,000	-0,006	0,010	0,010	0,019	0,026	0,032	0,000	0,006	0,000	0,010	0,383	0,358
Max	0,000	0,032	0,045	0,048	0,052	0,045	0,045	0,032	0,032	0,019	0,032	0,428	0,418
Ave	0,000	0,015	0,027	0,030	0,035	0,034	0,036	0,015	0,017	0,009	0,017	0,400	0,383
Stdev	0,000	0,020	0,018	0,019	0,016	0,010	0,007	0,016	0,013	0,010	0,013	0,024	0,032

Slika 30: Raztezki in suha toplotna deformacija vzorca MC



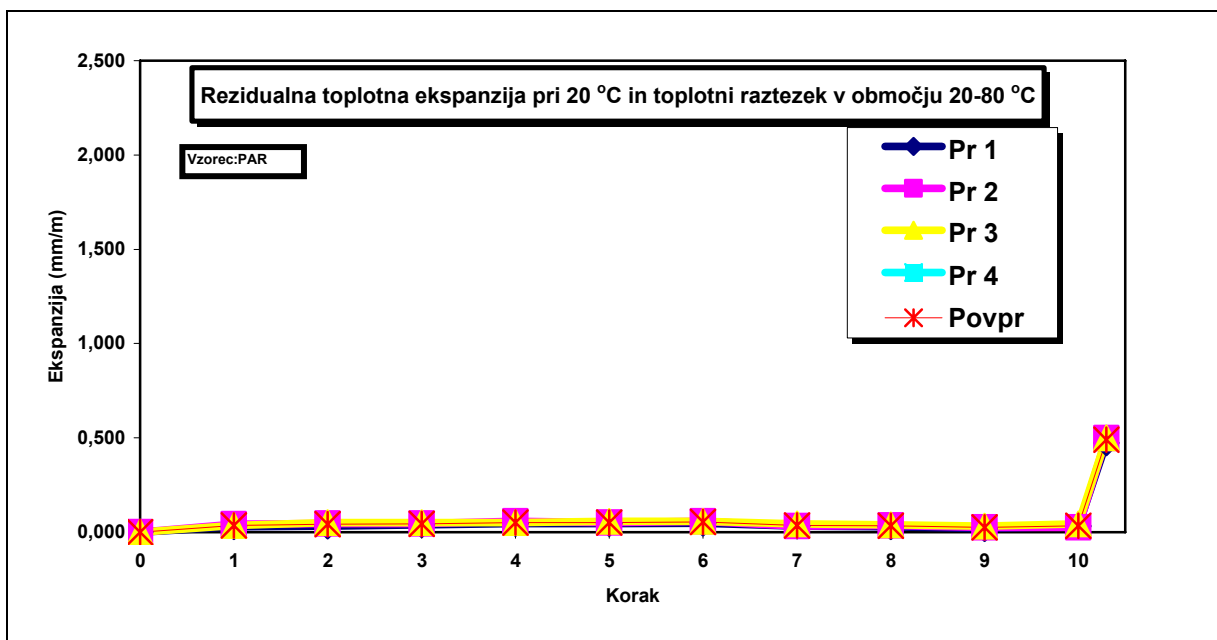
Slika 31: Rezidualna toplotna deformacija MC

4.1.1.4 Vzorec PAR

Rezultati meritev so podani na slikah 32 in 33.

Cikel št.	ϵ_0	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6	ϵ_7	ϵ_8	ϵ_9	ϵ_{10}	ϵ_{max10}	ϵ
	mm/m												
vzorec 1	0,000	0,029	0,032	0,039	0,045	0,045	0,048	0,032	0,029	0,019	0,032	0,473	0,441
vzorec 2	0,000	0,042	0,045	0,045	0,058	0,051	0,058	0,032	0,035	0,026	0,026	0,499	0,473
vzorec 3	0,000	0,035	0,051	0,051	0,051	0,057	0,057	0,045	0,038	0,032	0,045	0,500	0,456
vzorec 4													
Min	0,000	0,029	0,032	0,039	0,045	0,045	0,048	0,032	0,029	0,019	0,026	0,473	0,441
Max	0,000	0,042	0,051	0,051	0,058	0,057	0,058	0,045	0,038	0,032	0,045	0,500	0,473
Ave	0,000	0,035	0,043	0,045	0,051	0,051	0,055	0,036	0,034	0,026	0,034	0,491	0,457
Stdev	0,000	0,006	0,010	0,006	0,006	0,006	0,005	0,007	0,005	0,006	0,010	0,015	0,016

Slika 32: Raztezki in suha toplotna deformacija vzorca PAR



Slika 33: Rezidualna toplotna deformacija PAR

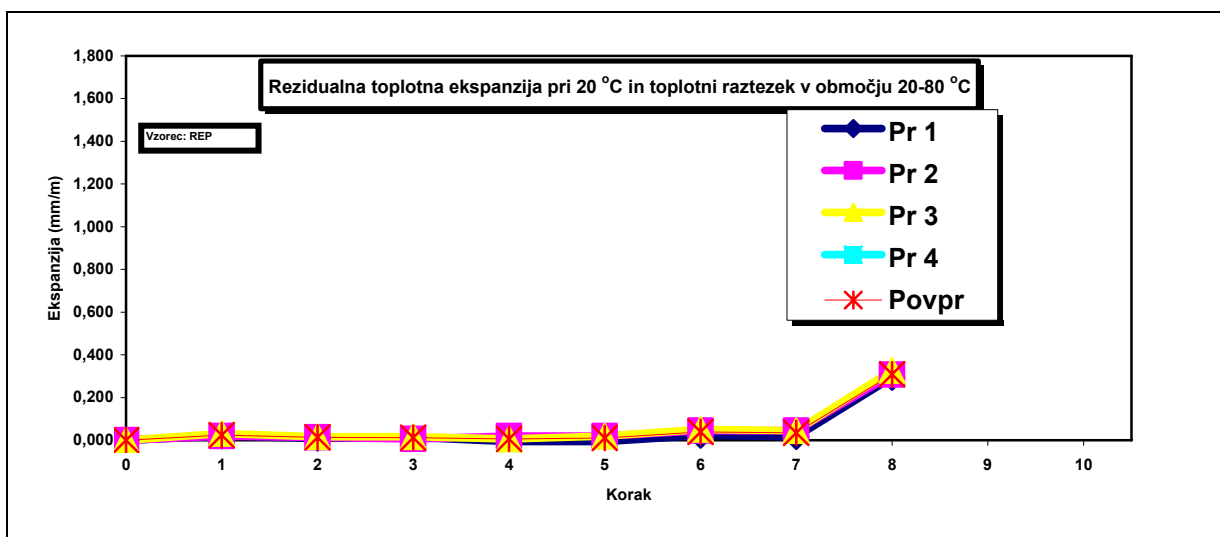
4.1.2 Marmorji in apnenci

4.1.2.1 Vzorec REP

Rezultati meritev so podani na slikah 34 in 35.

Cikel št.	ϵ_0	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6	ϵ_7	ϵ_8	ϵ_9	ϵ_{10}	ϵ_{max10}	ϵ_k
	mm/m												
vzorec 1	0,000	0,019	0,010	0,013	-0,006	-0,006	0,022	0,016	0,294				0,278
vzorec 2	0,000	0,019	0,013	0,006	0,019	0,019	0,045	0,045	0,307				0,262
vzorec 3	0,000	0,032	0,016	0,016	0,006	0,019	0,051	0,045	0,326				0,282
vzorec 4													
Min	0,000	0,019	0,010	0,006	-0,006	-0,006	0,022	0,016	0,294				0,262
Max	0,000	0,032	0,016	0,016	0,019	0,019	0,051	0,045	0,326				0,282
Ave	0,000	0,023	0,013	0,012	0,006	0,011	0,039	0,035	0,309				0,274
Stdev	0,000	0,007	0,003	0,005	0,013	0,015	0,015	0,017	0,016				0,010

Slika 34: Raztezki in suha toplotna deformacija vzorca REP



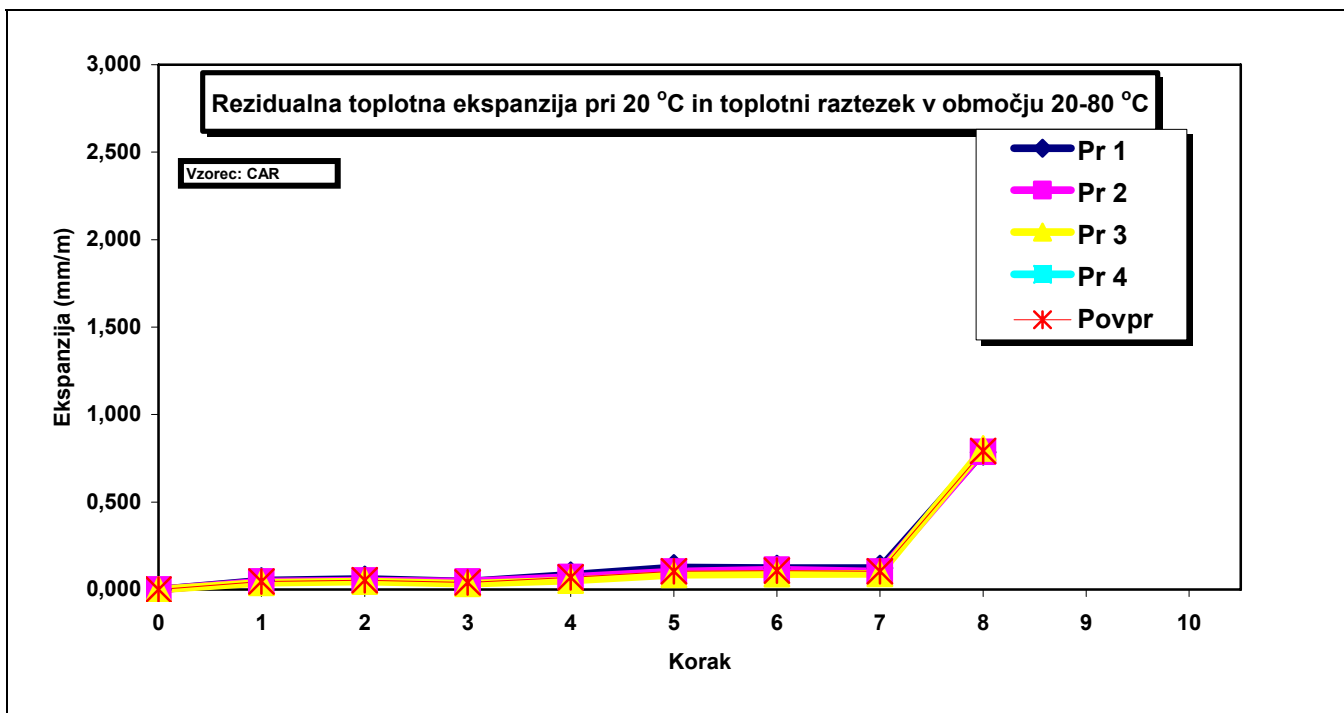
Slika 35: Rezidualna toplotna deformacija REP

4.1.2.2 Vzorec CAR

Rezultati meritev so podani na slikah 36 in 37.

Cikel št.	ε_0	ε_1	ε_2	ε_3	ε_4	ε_5	ε_6	ε_7	ε_8	ε_9	ε_{10}	ε_{max10}	ε_t
	mm/m												
vzorec 1	0,000	0,051	0,061	0,045	0,084	0,125	0,122	0,122	0,784				0,662
vzorec 2	0,000	0,045	0,052	0,045	0,071	0,103	0,113	0,103	0,786				0,683
vzorec 3	0,000	0,039	0,045	0,032	0,052	0,084	0,087	0,090	0,807				0,716
vzorec 4													
Min	0,000	0,039	0,045	0,032	0,052	0,084	0,087	0,090	0,784				0,662
Max	0,000	0,051	0,061	0,045	0,084	0,125	0,122	0,122	0,807				0,716
Ave	0,000	0,045	0,053	0,041	0,069	0,104	0,107	0,105	0,792				0,687
Stdev	0,000	0,006	0,008	0,007	0,016	0,021	0,018	0,016	0,013				0,027

Slika 36: Raztezki in suha toplotna deformacija vzorca CAR



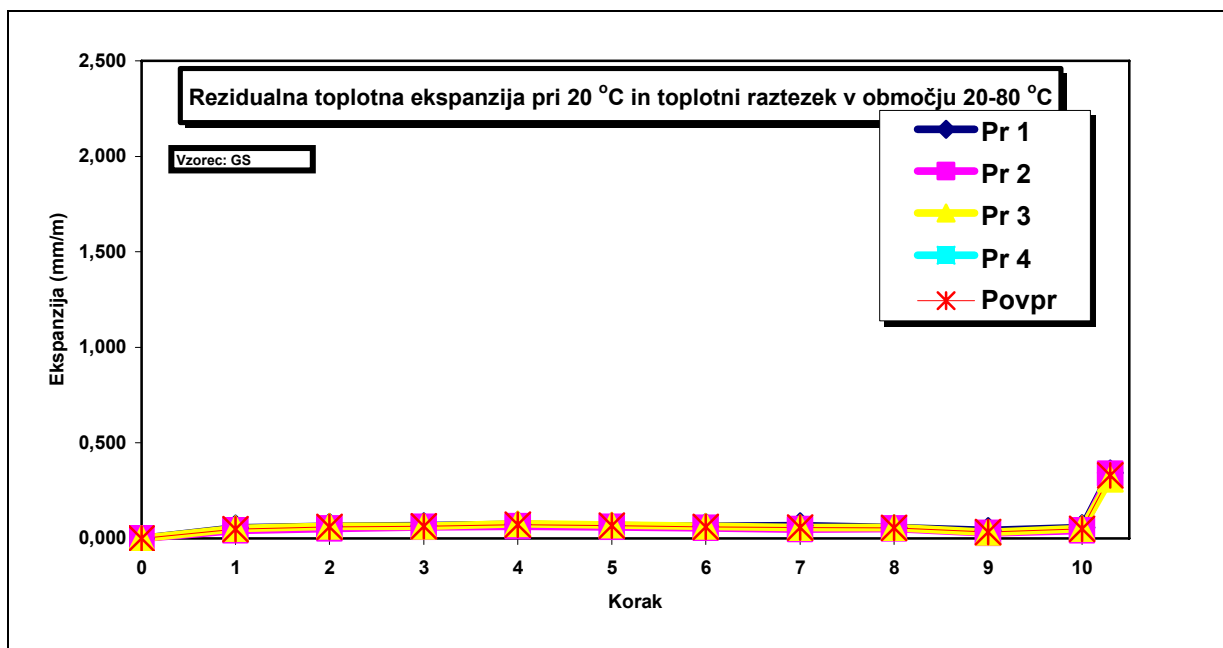
Slika 37: Rezidualna toplotna deformacija CAR

4.1.2.3 Vzorec GS

Rezultati meritev so podani na slikah 38 in 39.

Cikel št.	ϵ_0	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6	ϵ_7	ϵ_8	ϵ_9	ϵ_{10}	ϵ_{max10}	ϵ
	mm/m												
vzorec 1	0,000	0,054	0,064	0,067	0,074	0,067	0,064	0,067	0,058	0,042	0,058	0,343	0,285
vzorec 2	0,000	0,042	0,051	0,061	0,064	0,061	0,055	0,048	0,051	0,029	0,042	0,338	0,296
vzorec 3	0,000	0,051	0,064	0,064	0,077	0,070	0,064	0,058	0,058	0,032	0,051	0,311	0,259
vzorec 4													
Min	0,000	0,042	0,051	0,061	0,064	0,061	0,055	0,048	0,051	0,029	0,042	0,311	0,259
Max	0,000	0,054	0,064	0,067	0,077	0,070	0,064	0,067	0,058	0,042	0,058	0,343	0,296
Ave	0,000	0,049	0,060	0,064	0,072	0,066	0,061	0,058	0,056	0,034	0,050	0,330	0,280
Stdev	0,000	0,007	0,007	0,003	0,007	0,005	0,005	0,010	0,004	0,007	0,008	0,017	0,019

Slika 38: Raztezki in suha toplotna deformacija vzorca GS



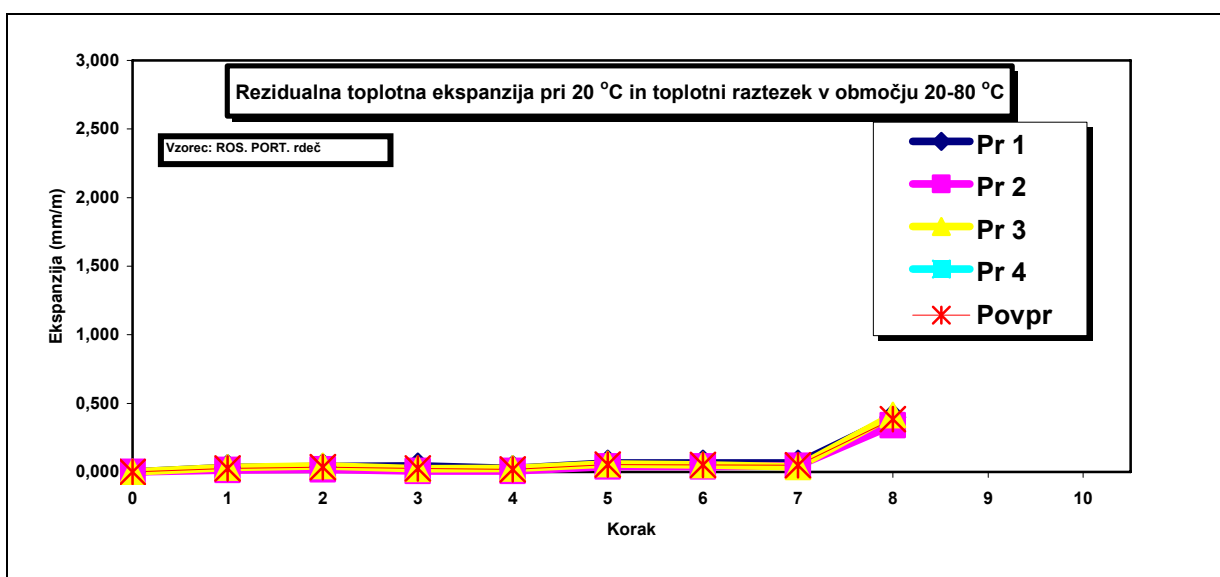
Slika 39: Rezidualna toplotna deformacija GS

4.1.2.4 Vzorec ROSO-POR-RDEČI

Rezultati meritev so podani na slikah 40 in 41.

Cikel št.	ϵ_0	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6	ϵ_7	ϵ_8	ϵ_9	ϵ_{10}	ϵ_{max10}	ϵ_t
	mm/m												
vzorec 1	0,000	0,032	0,039	0,045	0,026	0,064	0,064	0,064	0,399				0,335
vzorec 2	0,000	0,013	0,019	0,006	0,006	0,039	0,039	0,045	0,341				0,296
vzorec 3	0,000	0,032	0,045	0,022	0,026	0,057	0,051	0,038	0,414				0,376
vzorec 4													
Min	0,000	0,013	0,019	0,006	0,006	0,039	0,039	0,038	0,341				0,296
Max	0,000	0,032	0,045	0,045	0,026	0,064	0,064	0,064	0,414				0,376
Ave	0,000	0,026	0,034	0,025	0,019	0,053	0,051	0,049	0,385				0,336
Stdev	0,000	0,011	0,013	0,019	0,011	0,013	0,013	0,014	0,039				0,040

Slika 40: Raztezki in suha toplotna deformacija vzorca ROSO-POR-RDEČI



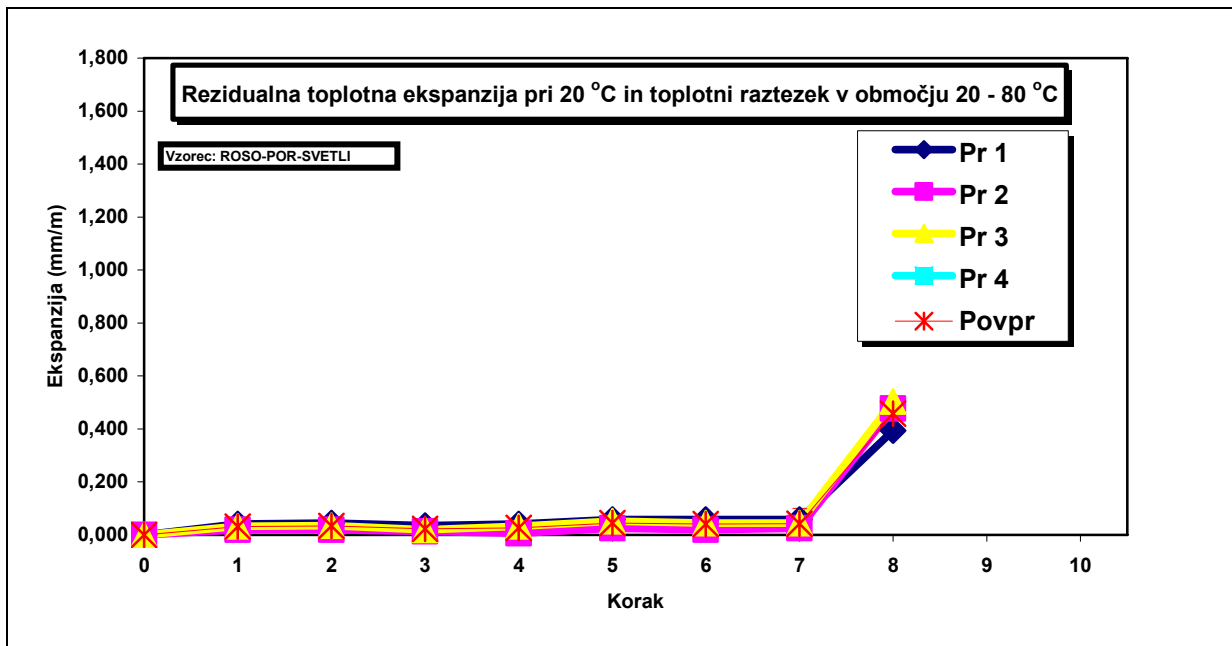
Slika 41: Rezidualna toplotna deformacija ROSO- POR-RDEČI

4.1.2.5 Vzorec ROSO-POR-BELI

Rezultati meritev so podani na slikah 42 in 43.

Cikel št.	ϵ_0	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6	ϵ_7	ϵ_8	ϵ_9	ϵ_{10}	$\epsilon_{\max 10}$	ϵ_t
	mm/m												
vzorec 1	0,000	0,042	0,045	0,035	0,042	0,058	0,058	0,058	0,394				0,336
vzorec 2	0,000	0,019	0,019	0,013	0,006	0,026	0,019	0,026	0,478				0,452
vzorec 3	0,000	0,032	0,035	0,019	0,032	0,052	0,045	0,045	0,503				0,458
vzorec 4													
Min	0,000	0,019	0,019	0,013	0,006	0,026	0,019	0,026	0,394				0,336
Max	0,000	0,042	0,045	0,035	0,042	0,058	0,058	0,058	0,503				0,458
Ave	0,000	0,031	0,033	0,022	0,027	0,045	0,041	0,043	0,458				0,415
Stdev	0,000	0,011	0,013	0,011	0,018	0,017	0,020	0,016	0,057				0,069

Slika 42: Raztezki in suha toplotna deformacija vzorca ROSO-POR.-SVETLI



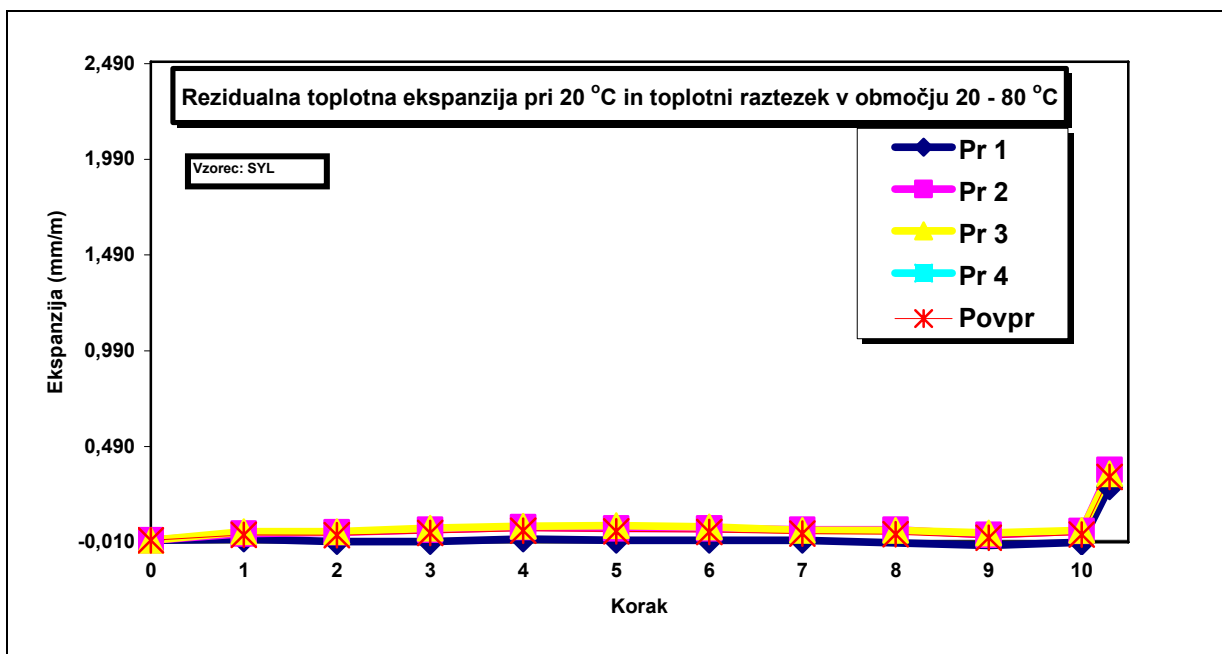
Slika 43: Rezidualna toplotna deformacija ROSO-POR-SVETLI

4.1.2.5 Vzorec SYL

Rezultati meritev so podani na slikah 44 in 45.

Cikel št.	ϵ_0	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6	ϵ_7	ϵ_8	ϵ_9	ϵ_{10}	ϵ_{max10}	ϵ_t	
	mm/m													
vzorec 1	0,000	0,006	-0,006	-0,006	0,006	0,000	0,000	0,000	-0,013	-0,026	-0,010	0,279	0,289	
vzorec 2	0,000	0,036	0,042	0,055	0,068	0,062	0,062	0,055	0,055	0,029	0,049	0,367	0,318	
vzorec 3	0,000	0,045	0,045	0,064	0,074	0,077	0,071	0,051	0,051	0,039	0,051	0,347	0,296	
vzorec 4														
Min	0,000	0,006	-0,006	-0,006	0,006	0,000	0,000	0,000	-0,013	-0,026	-0,010	0,279	0,289	
Max	0,000	0,045	0,045	0,064	0,074	0,077	0,071	0,055	0,055	0,039	0,051	0,367	0,318	
Ave	0,000	0,029	0,027	0,038	0,050	0,046	0,044	0,036	0,031	0,014	0,030	0,331	0,301	
Stdev	0,000	0,020	0,029	0,039	0,037	0,041	0,038	0,031	0,038	0,035	0,035	0,046	0,015	

Slika 44: Raztezki in suha toplotna deformacija vzorca SYL



Slika 45: Rezidualna toplotna deformacija SYL

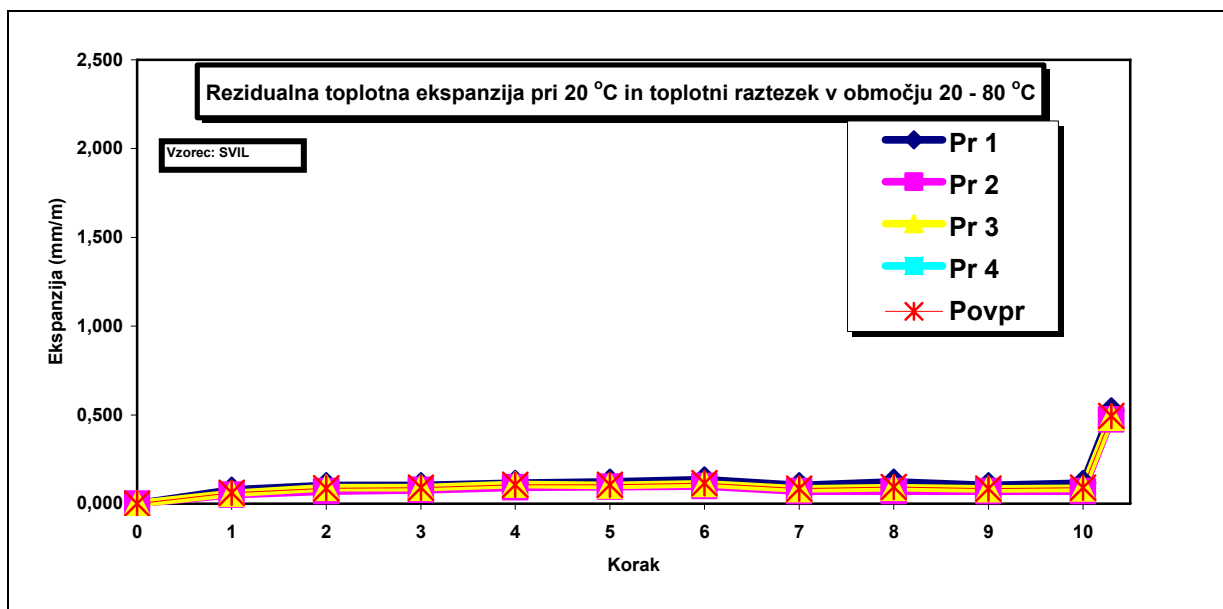
4.1.3 Peščenjaki

4.1.3.1 Vzorec SVIL

Rezultati meritev so podani na slikah 46 in 47.

Cikel št.	ϵ_0	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6	ϵ_7	ϵ_8	ϵ_9	ϵ_{10}	$\epsilon_{\max 10}$	ϵ_t
	mm/m												
vzorec 1	0,000	0,077	0,102	0,102	0,115	0,122	0,135	0,102	0,122	0,102	0,115	0,525	0,410
vzorec 2	0,000	0,051	0,070	0,077	0,093	0,096	0,099	0,070	0,070	0,070	0,070	0,473	0,403
vzorec 3	0,000	0,057	0,089	0,089	0,109	0,102	0,112	0,083	0,089	0,083	0,086	0,485	0,399
vzorec 4													
Min	0,000	0,051	0,070	0,077	0,093	0,096	0,099	0,070	0,070	0,070	0,070	0,473	0,399
Max	0,000	0,077	0,102	0,102	0,115	0,122	0,135	0,102	0,122	0,102	0,115	0,525	0,410
Ave	0,000	0,062	0,087	0,090	0,106	0,107	0,115	0,085	0,094	0,085	0,091	0,495	0,404
Stdev	0,000	0,013	0,016	0,013	0,012	0,013	0,018	0,016	0,026	0,016	0,023	0,027	0,006

Slika 46: Raztezki in suha toplotna deformacija vzorca SVIL



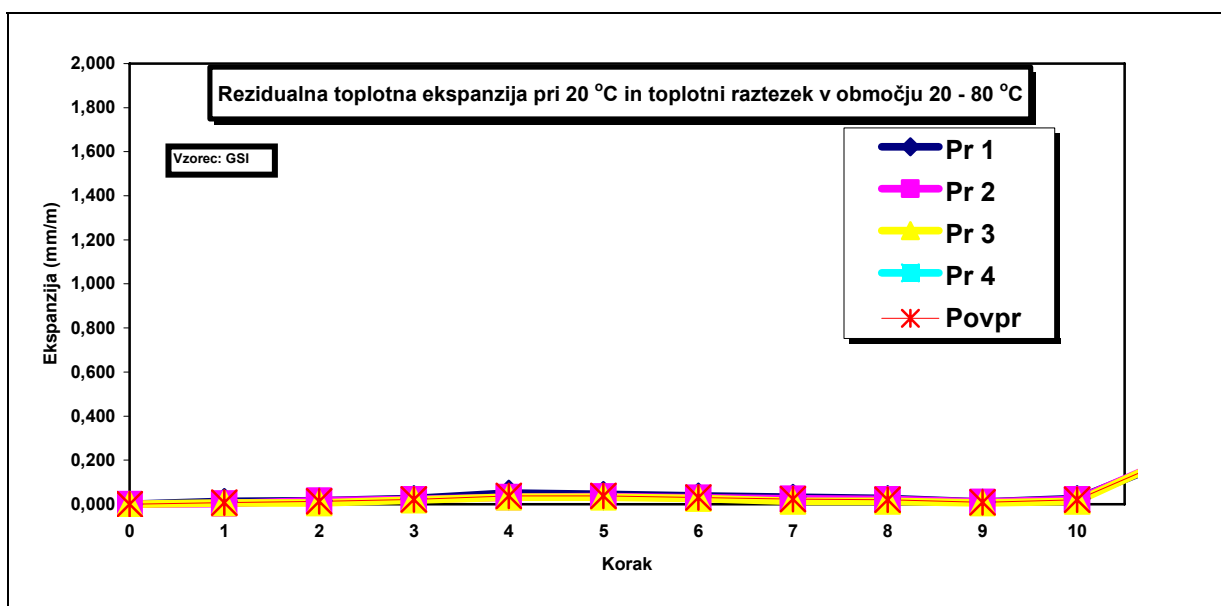
Slika 47: Rezidualna toplotna deformacija SVIL

4.1.2.5 Vzorec GSI

Rezultati meritev so podani na slikah 48 in 49.

Cikel št.	ϵ_0	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6	ϵ_7	ϵ_8	ϵ_9	ϵ_{10}	ϵ_{max10}	ϵ_t	
	mm/m													
vzorec 1	0,000	0,013	0,016	0,026	0,051	0,045	0,038	0,032	0,026	0,010	0,026	0,370	0,345	
vzorec 2	0,000	0,003	0,016	0,022	0,032	0,035	0,029	0,025	0,022	0,010	0,022	0,396	0,374	
vzorec 3	0,000	0,006	0,006	0,019	0,032	0,032	0,026	0,013	0,013	0,006	0,013	0,409	0,396	
vzorec 4														
Min	0,000	0,003	0,006	0,019	0,032	0,032	0,026	0,013	0,013	0,006	0,013	0,370	0,345	
Max	0,000	0,013	0,016	0,026	0,051	0,045	0,038	0,032	0,026	0,010	0,026	0,409	0,396	
Ave	0,000	0,007	0,013	0,022	0,038	0,037	0,031	0,023	0,020	0,008	0,020	0,392	0,372	
Stdev	0,000	0,005	0,005	0,003	0,011	0,007	0,007	0,010	0,007	0,002	0,007	0,020	0,026	

Slika 48: Raztezki in suha toplotna deformacija vzorca GSI



Slika 49: Rezidualna toplotna deformacija GSI

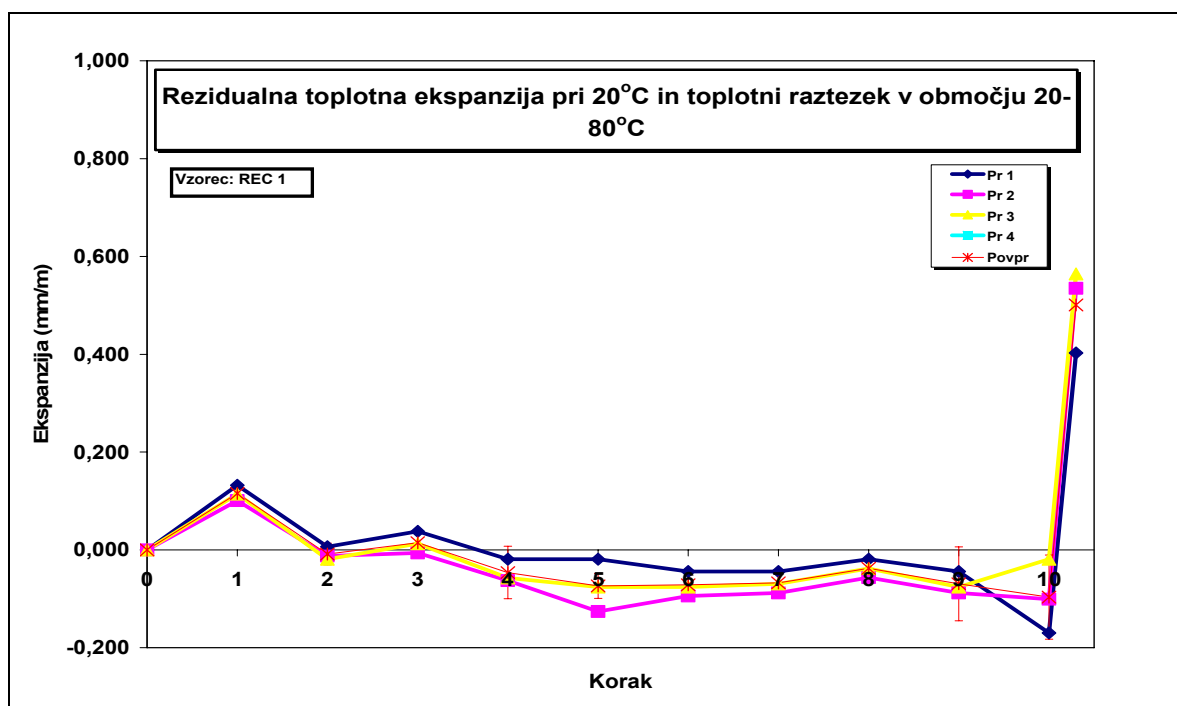
4.2 Rezultati suhe toplotne razteznosti betonov

4.2.1 Vzorec REC 1

Rezultati meritev so podani na slikah 50 in 51.

Cikel št.	ϵ_0	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6	ϵ_7	ϵ_8	ϵ_9	ϵ_{10}	ϵ_{max10}	ϵ_t
	mm/m												
vzorec 1	0,000	0,132	0,006	0,038	-0,019	-0,019	-0,044	-0,044	-0,019	-0,044	-0,170	0,403	0,573
vzorec 2	0,000	0,101	-0,013	-0,006	-0,063	-0,126	-0,094	-0,088	-0,057	-0,088	-0,101	0,535	0,635
vzorec 3	0,000	0,114	-0,019	0,013	-0,057	-0,076	-0,076	-0,070	-0,038	-0,076	-0,019	0,564	0,583
vzorec 4													
Min	0,000	0,101	-0,019	-0,006	-0,063	-0,126	-0,094	-0,088	-0,057	-0,088	-0,170	0,403	0,573
Max	0,000	0,132	0,006	0,038	-0,019	-0,019	-0,044	-0,044	-0,019	-0,044	-0,019	0,564	0,635
Ave	0,000	0,116	-0,008	0,015	-0,046	-0,074	-0,071	-0,067	-0,038	-0,069	-0,097	0,501	0,597
Stdev	0,000	0,016	0,013	0,022	0,024	0,053	0,025	0,022	0,019	0,023	0,076	0,086	0,033

Slika 50: Raztezki in suha toplotna deformacija vzorca REC 1.



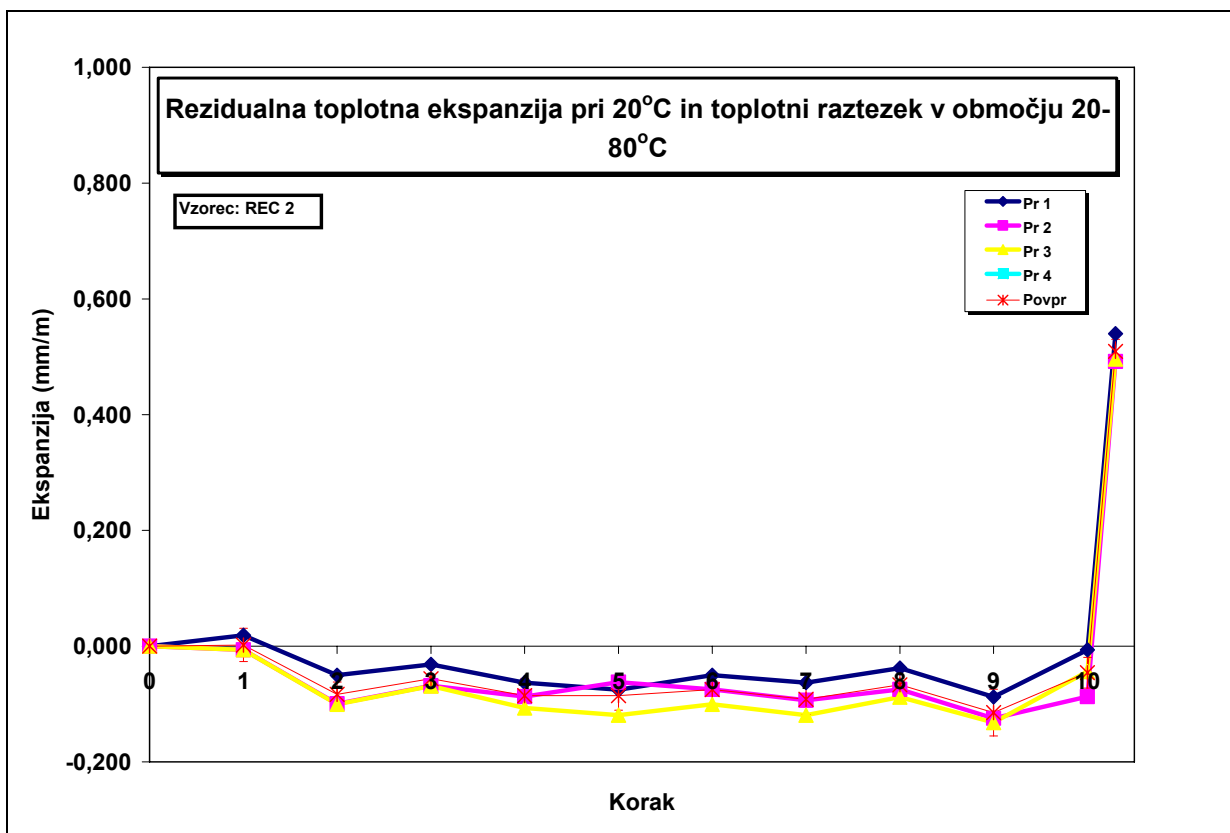
Slika 51: Rezidualna toplotna deformacija REC 1

4.2.2 Vzorec REC 2

Rezultati meritev so podani na slikah 52 in 53.

Cikel št.	ϵ_0	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6	ϵ_7	ϵ_8	ϵ_9	ϵ_{10}	ϵ_{max10}	ϵ_t
	mm/m												
vzorec 1	0,000	0,019	-0,050	-0,031	-0,063	-0,075	-0,050	-0,063	-0,038	-0,088	-0,006	0,540	0,546
vzorec 2	0,000	-0,006	-0,100	-0,068	-0,087	-0,062	-0,075	-0,093	-0,075	-0,124	-0,087	0,492	0,579
vzorec 3	0,000	-0,006	-0,100	-0,069	-0,107	-0,119	-0,100	-0,119	-0,088	-0,132	-0,044	0,496	0,540
vzorec 4													
Min	0,000	-0,006	-0,100	-0,069	-0,107	-0,119	-0,100	-0,119	-0,088	-0,132	-0,087	0,492	0,540
Max	0,000	0,019	-0,050	-0,031	-0,063	-0,062	-0,050	-0,063	-0,038	-0,088	-0,006	0,540	0,579
Ave	0,000	0,002	-0,083	-0,056	-0,086	-0,086	-0,075	-0,092	-0,067	-0,115	-0,046	0,509	0,555
Stdev	0,000	0,014	0,029	0,022	0,022	0,030	0,025	0,028	0,026	0,024	0,040	0,027	0,021

Slika 52: Raztezki in suha toplotna deformacija vzorca REC 2



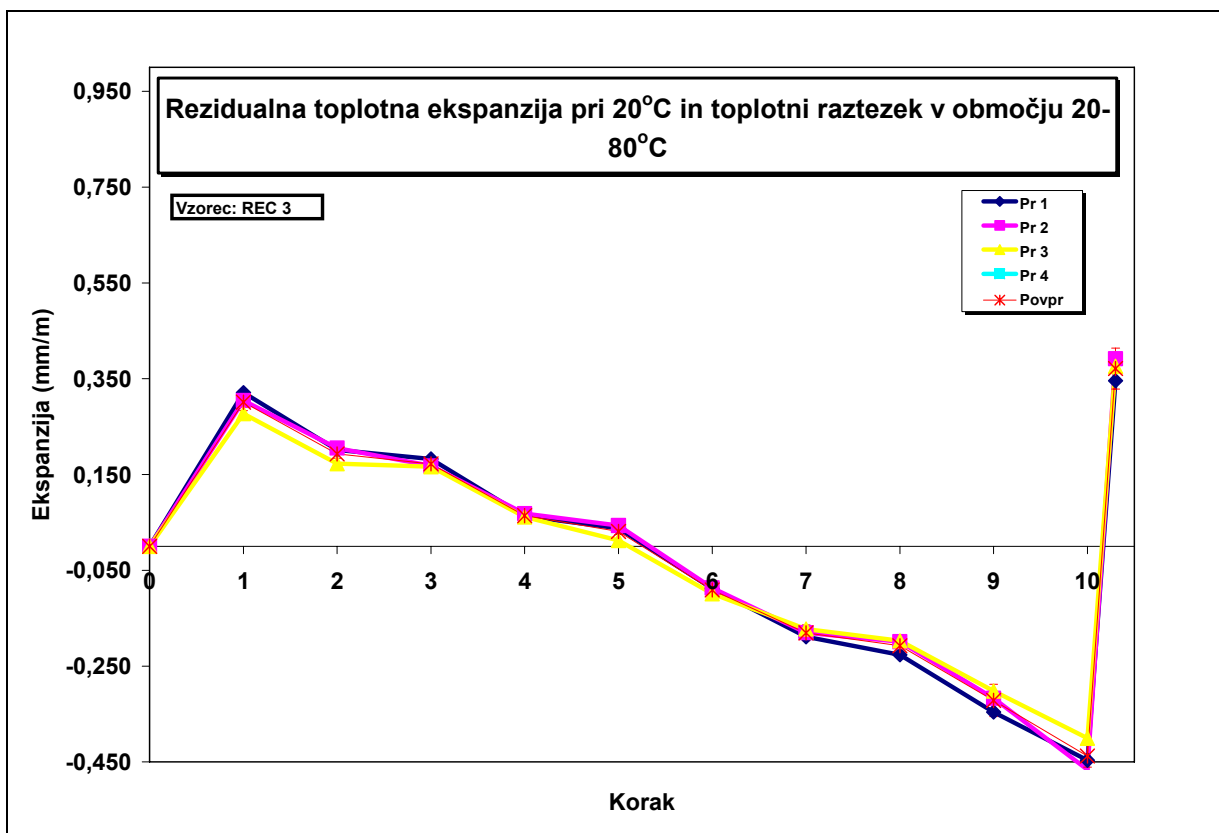
Slika 53: Rezidualna toplotna deformacija REC 2

4.2.3. Vzorec REC 3

Rezultati meritev so podani na slikah 54 in 55.

Cikel št.	ϵ_0	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6	ϵ_7	ϵ_8	ϵ_9	ϵ_{10}	$\epsilon_{\max 10}$	ϵ_t
	mm/m												
vzorec 1	0,000	0,321	0,201	0,182	0,063	0,038	-0,088	-0,189	-0,226	-0,346	-0,447	0,346	0,793
vzorec 2	0,000	0,305	0,205	0,168	0,068	0,044	-0,087	-0,180	-0,199	-0,317	-0,466	0,392	0,858
vzorec 3	0,000	0,277	0,173	0,166	0,062	0,012	-0,099	-0,173	-0,197	-0,302	-0,401	0,376	0,776
vzorec 4													
Min	0,000	0,277	0,173	0,166	0,062	0,012	-0,099	-0,189	-0,226	-0,346	-0,466	0,346	0,776
Max	0,000	0,321	0,205	0,182	0,068	0,044	-0,087	-0,173	-0,197	-0,302	-0,401	0,392	0,858
Ave	0,000	0,301	0,193	0,172	0,064	0,031	-0,091	-0,180	-0,208	-0,322	-0,438	0,371	0,809
Stdev	0,000	0,022	0,018	0,009	0,004	0,017	0,006	0,008	0,016	0,022	0,034	0,023	0,043

Slika 54: Raztezki in suha toplotna deformacija vzorca REC 3



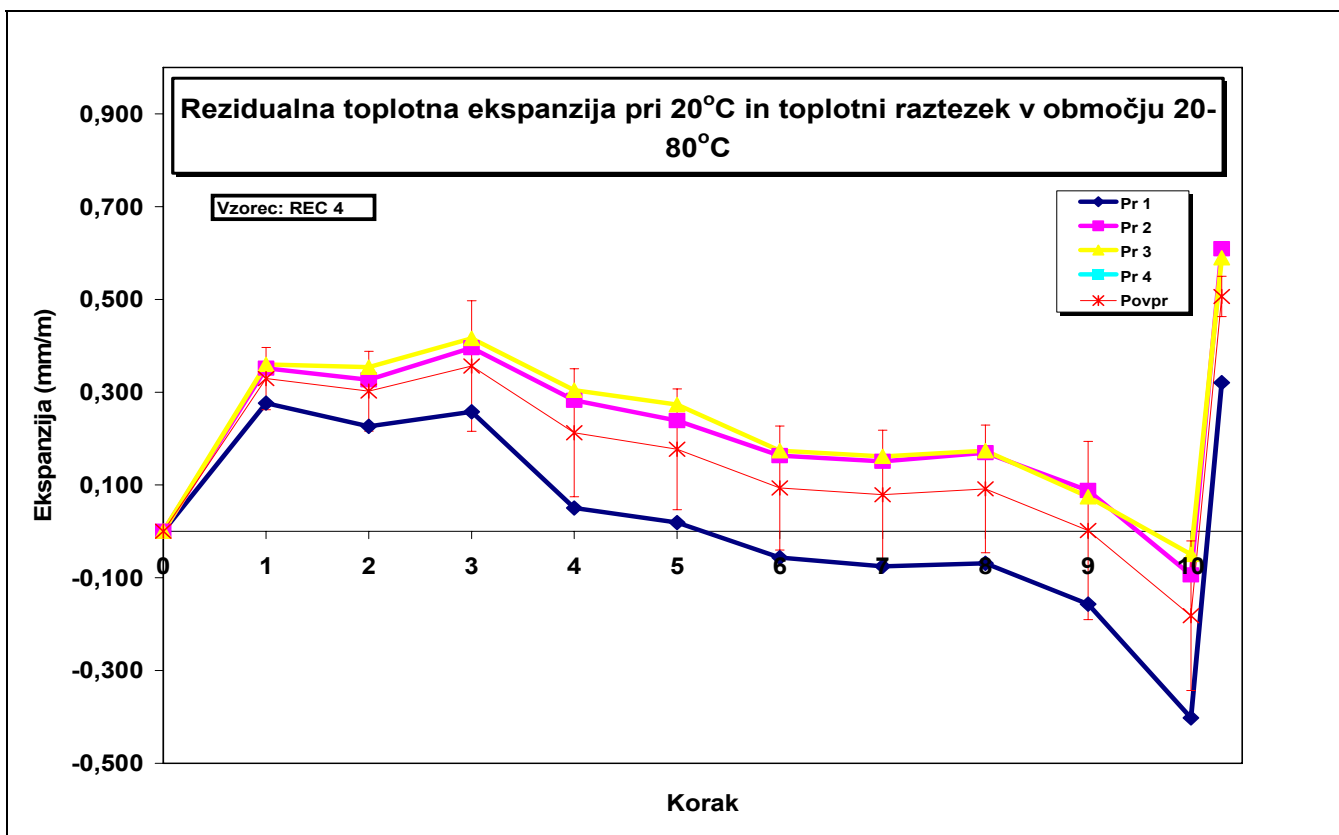
Slika 55: Rezidualna toplotna deformacija REC 3

4.2.4. Vzorec REC 4

Rezultati meritev so podani na slikah 56 in 57.

Cikel št.	ϵ_0	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6	ϵ_7	ϵ_8	ϵ_9	ϵ_{10}	ϵ_{max10}	ϵ_t
	mm/m												
vzorec 1	0,000	0,276	0,226	0,258	0,050	0,019	-0,057	-0,075	-0,069	-0,157	-0,402	0,320	0,723
vzorec 2	0,000	0,352	0,327	0,396	0,283	0,239	0,163	0,151	0,170	0,088	-0,094	0,609	0,703
vzorec 3	0,000	0,360	0,354	0,416	0,304	0,273	0,174	0,161	0,174	0,074	-0,050	0,590	0,639
vzorec 4													
Min	0,000	0,276	0,226	0,258	0,050	0,019	-0,057	-0,075	-0,069	-0,157	-0,402	0,320	0,639
Max	0,000	0,360	0,354	0,416	0,304	0,273	0,174	0,161	0,174	0,088	-0,050	0,609	0,723
Ave	0,000	0,329	0,302	0,356	0,212	0,177	0,094	0,079	0,091	0,002	-0,182	0,506	0,688
Stdev	0,000	0,046	0,067	0,086	0,141	0,138	0,130	0,134	0,139	0,138	0,192	0,161	0,044

Slika 56: Raztezki in suha toplotna deformacija vzorca REC 4



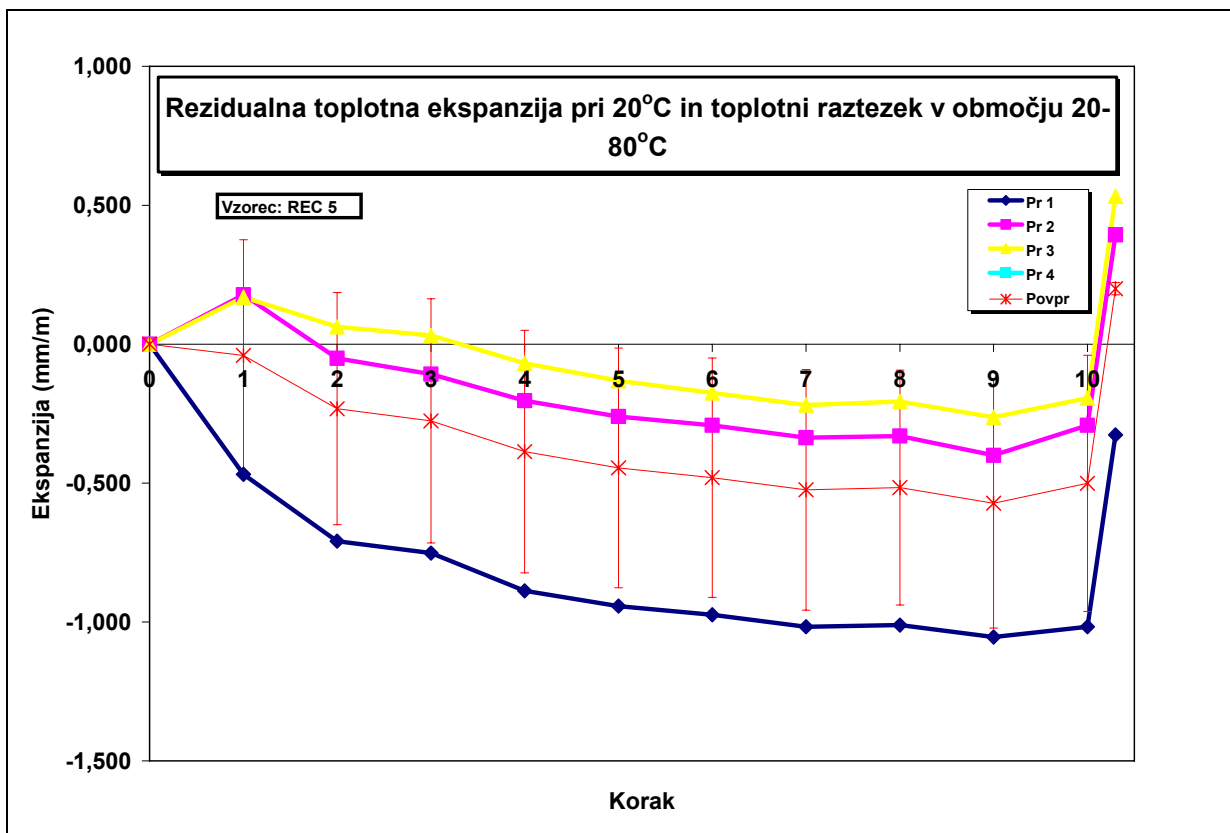
Slika 57: Rezidualna toplotna deformacija REC 4

4.2.5 Vzorec REC 5

Rezultati meritev so podani na slikah 58 in 59.

Cikel št.	ϵ_0	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6	ϵ_7	ϵ_8	ϵ_9	ϵ_{10}	$\epsilon_{\max 10}$	ϵ_t
	mm/m												
vzorec 1	0,000	-0,468	-0,709	-0,752	-0,888	-0,943	-0,974	-1,017	-1,011	-1,054	-1,017	-0,327	0,690
vzorec 2	0,000	0,178	-0,051	-0,108	-0,203	-0,260	-0,292	-0,337	-0,330	-0,400	-0,292	0,394	0,686
vzorec 3	0,000	0,169	0,063	0,031	-0,069	-0,132	-0,175	-0,219	-0,207	-0,263	-0,194	0,532	0,726
vzorec 4													
Min	0,000	-0,468	-0,709	-0,752	-0,888	-0,943	-0,974	-1,017	-1,011	-1,054	-1,017	-0,327	0,686
Max	0,000	0,178	0,063	0,031	-0,069	-0,132	-0,175	-0,219	-0,207	-0,263	-0,194	0,532	0,726
Ave	0,000	-0,041	-0,232	-0,276	-0,387	-0,445	-0,480	-0,524	-0,516	-0,572	-0,501	0,200	0,701
Stdev	0,000	0,371	0,417	0,418	0,439	0,436	0,431	0,431	0,433	0,423	0,449	0,461	0,022

Slika 58: Raztezki in suha toplotna deformacija vzorca REC 5



Slika 59: Rezidualna toplotna deformacija REC 5

4.3 Rezultati toplotno-hidrične razteznosti kamna

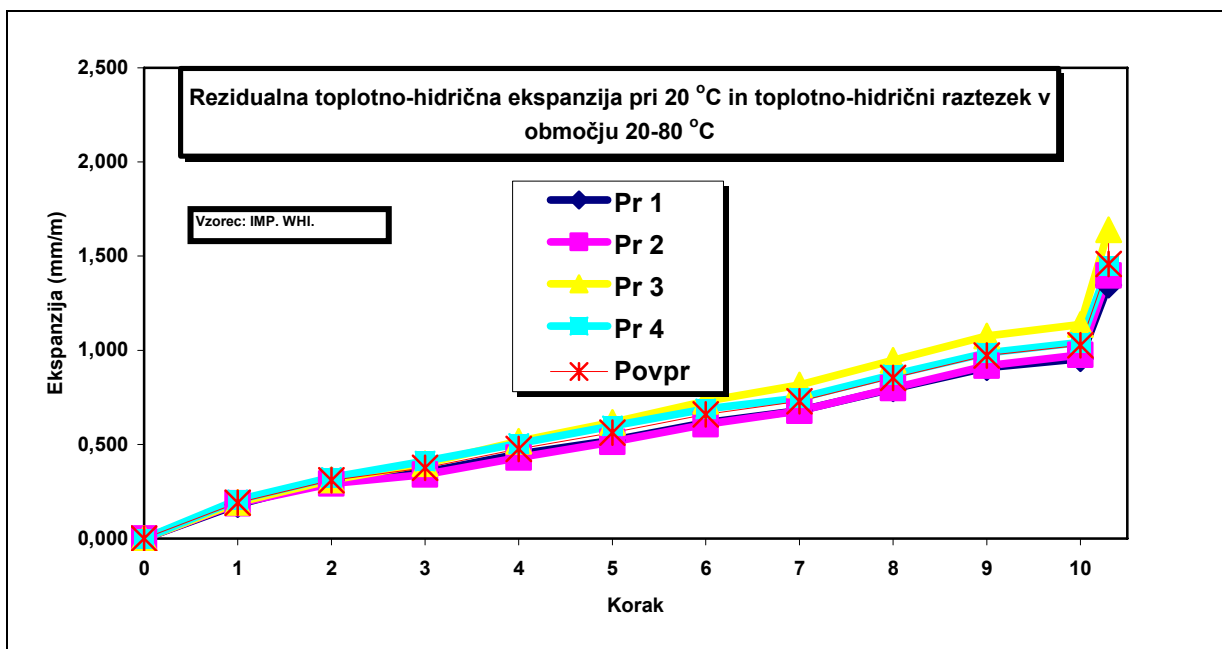
4.3.1 Graniti

4.3.1.1 Vzorec IW

Rezultati meritev so podani na slikah 60 in 61.

Cikel št.	ϵ_0	ϵ_{0kontr}	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6	ϵ_7	ϵ_8	ϵ_9	ϵ_{10}	ϵ_{max10}	ϵ_t
	mm/m													
vzorec 1	0,000	0,035	0,179	0,311	0,353	0,449	0,522	0,615	0,679	0,795	0,907	0,955	1,346	0,439
vzorec 2	0,000	0,035	0,186	0,292	0,340	0,430	0,514	0,607	0,677	0,799	0,918	0,976	1,397	0,478
vzorec 3	0,000	0,032	0,193	0,311	0,398	0,517	0,616	0,729	0,815	0,947	1,075	1,136	1,640	0,565
vzorec 4	0,000	0,013	0,206	0,325	0,411	0,505	0,598	0,688	0,746	0,871	0,987	1,041	1,449	0,463
Min	0,000	0,013	0,179	0,292	0,340	0,430	0,514	0,607	0,677	0,795	0,907	0,955	1,346	0,439
Max	0,000	0,035	0,206	0,325	0,411	0,517	0,616	0,729	0,815	0,947	1,075	1,136	1,640	0,565
Ave	0,000	0,029	0,191	0,310	0,376	0,475	0,563	0,660	0,729	0,853	0,972	1,027	1,458	0,486
Stdev	0,000	0,011	0,011	0,013	0,034	0,042	0,052	0,059	0,065	0,072	0,077	0,081	0,128	0,055

Slika 60: Raztezki in toplotno-hidrična deformacija vzorca IW



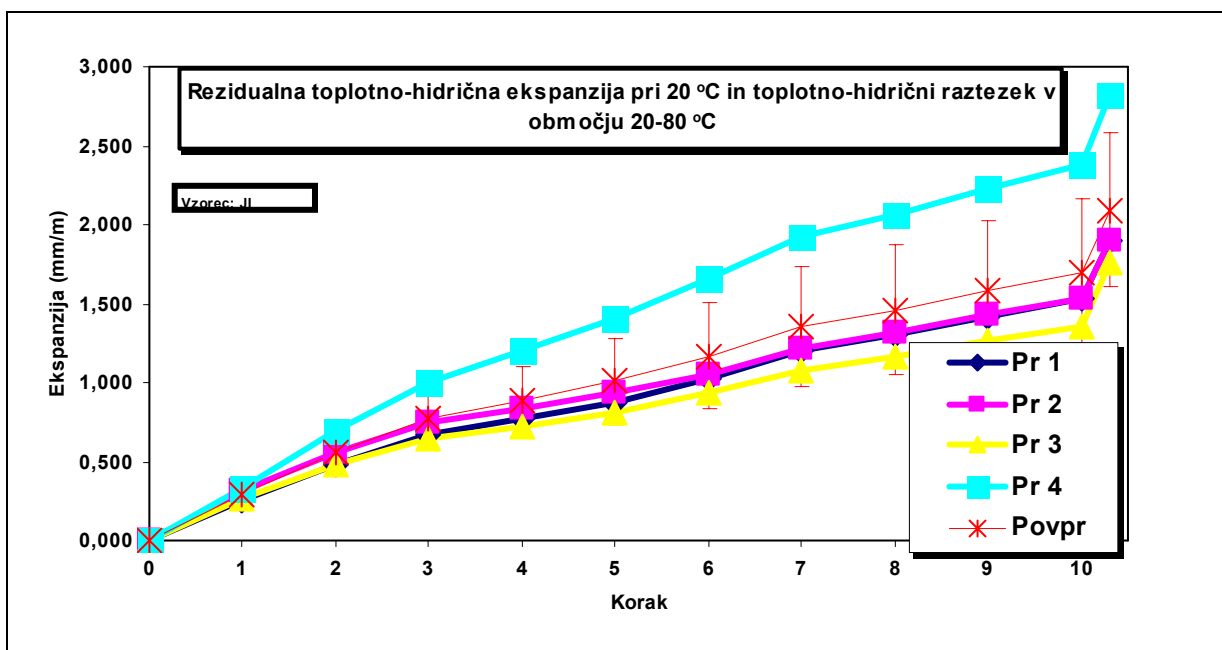
Slika 61: Rezidualna toplotna deformacija IW

4.3.1.2 Vzorec JI

Rezultati meritev so podani na slikah 62 in 63.

Cikel št.	ϵ_0	ϵ_{0kontr}	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6	ϵ_7	ϵ_8	ϵ_9	ϵ_{10}	ϵ_{max10}	ϵ_t
	mm/m													
vzorec 1	0,000	0,039	0,248	0,483	0,673	0,766	0,869	1,021	1,198	1,298	1,417	1,536	1,900	0,483
vzorec 2	0,000	0,067	0,316	0,563	0,745	0,837	0,933	1,048	1,221	1,317	1,425	1,534	1,899	0,473
vzorec 3	0,000	0,054	0,266	0,483	0,643	0,723	0,816	0,935	1,072	1,165	1,264	1,360	1,754	0,490
vzorec 4	0,000	0,032	0,335	0,702	1,005	1,199	1,410	1,662	1,920	2,067	2,233	2,376	2,820	0,587
Min	0,000	0,032	0,248	0,483	0,643	0,723	0,816	0,935	1,072	1,165	1,264	1,360	1,754	0,473
Max	0,000	0,067	0,335	0,702	1,005	1,199	1,410	1,662	1,920	2,067	2,233	2,376	2,820	0,587
Ave	0,000	0,048	0,291	0,558	0,766	0,882	1,007	1,166	1,353	1,462	1,585	1,702	2,093	0,508
Stdev	0,000	0,016	0,041	0,103	0,164	0,217	0,273	0,334	0,384	0,409	0,438	0,457	0,489	0,053

Slika 62: Raztezki in toplotno-hidrična deformacija vzorca JI



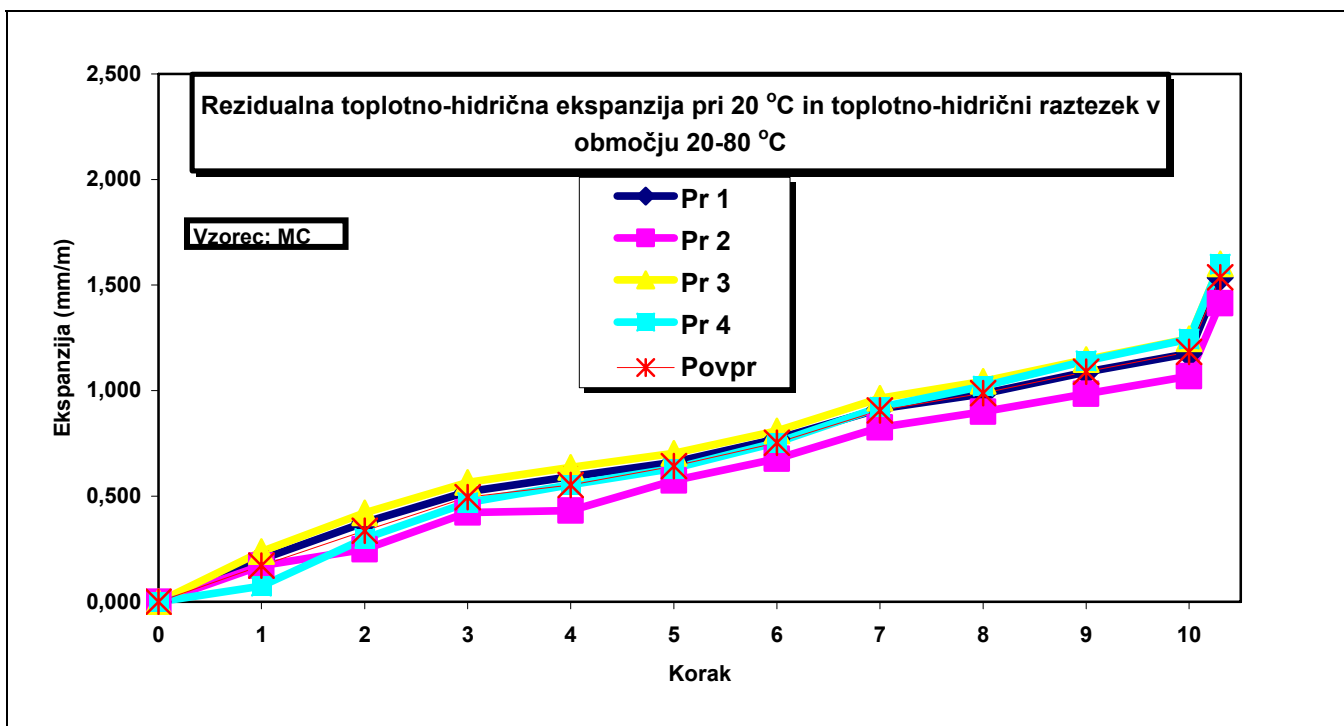
Slika 63: Rezidualna toplotna deformacija JI

4.3.1.3 Vzorec MC

Rezultati meritev so podani na slikah 64 in 65.

Čikel št.	ϵ_0	ϵ_{0kontr}	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6	ϵ_7	ϵ_8	ϵ_9	ϵ_{10}	ϵ_{max10}	ϵ_t
	mm/m													
vzorec 1	0,000	0,039	0,201	0,376	0,521	0,593	0,661	0,771	0,913	0,985	1,088	1,176	1,535	0,447
vzorec 2	0,000	0,032	0,171	0,248	0,423	0,432	0,574	0,678	0,826	0,900	0,984	1,068	1,413	0,429
vzorec 3	0,000	0,090	0,238	0,421	0,565	0,636	0,703	0,809	0,964	1,044	1,147	1,246	1,599	0,453
vzorec 4	0,000	-0,023	0,074	0,300	0,470	0,554	0,632	0,754	0,921	1,021	1,141	1,244	1,598	0,458
Min	0,000	-0,023	0,074	0,248	0,423	0,432	0,574	0,678	0,826	0,900	0,984	1,068	1,413	0,429
Max	0,000	0,090	0,238	0,421	0,565	0,636	0,703	0,809	0,964	1,044	1,147	1,246	1,599	0,458
Ave	0,000	0,035	0,171	0,336	0,495	0,554	0,642	0,753	0,906	0,987	1,090	1,183	1,536	0,447
Stdev	0,000	0,046	0,070	0,077	0,062	0,088	0,054	0,055	0,058	0,063	0,075	0,084	0,087	0,012

Slika 64: Raztezki in toplotno-hidrična deformacija vzorca MC



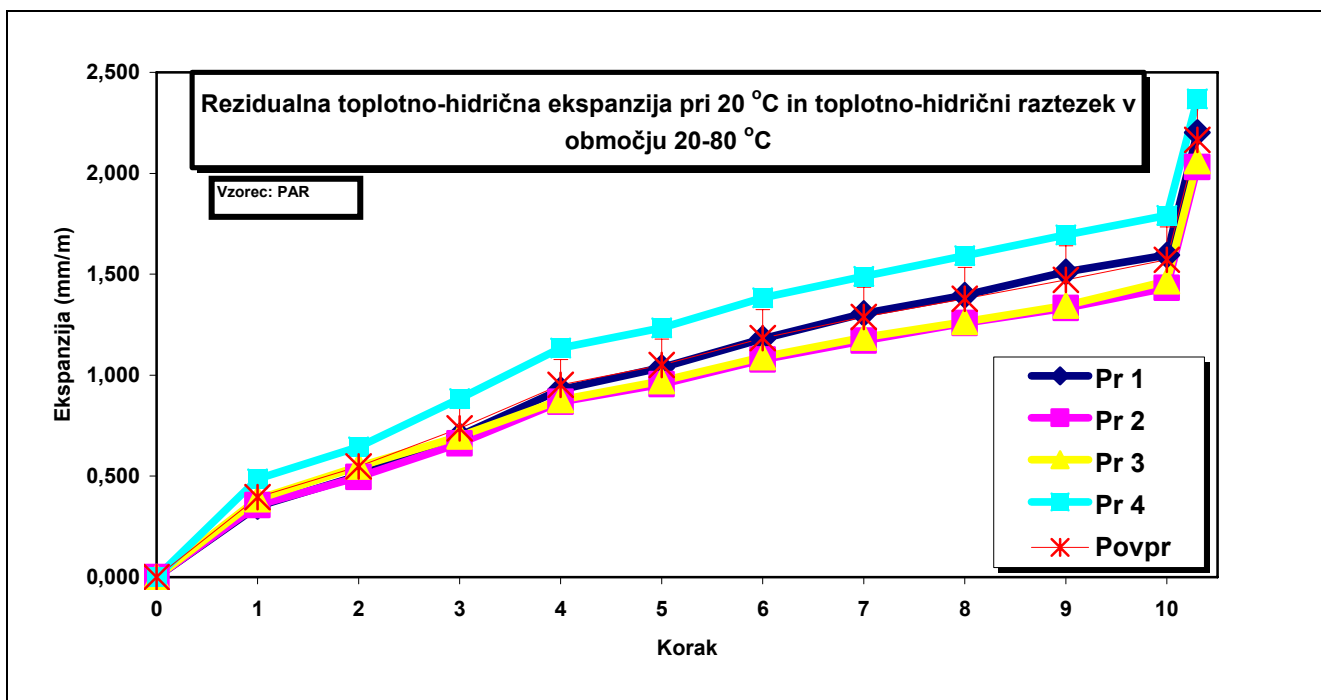
Slika 65: Rezidualna toplotna deformacija MC

4.3.1.4 Vzorec PAR

Rezultati meritev so podani na slikah 66 in 67.

Cikel št.	ϵ_0	ϵ_{0kontr}	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6	ϵ_7	ϵ_8	ϵ_9	ϵ_{10}	ϵ_{max10}	ϵ_t
	mm/m													
vzorec 1	0,000	0,087	0,350	0,502	0,701	0,929	1,038	1,180	1,305	1,395	1,511	1,595	2,202	0,691
vzorec 2	0,000	0,109	0,357	0,496	0,663	0,869	0,956	1,078	1,171	1,258	1,332	1,432	2,031	0,698
vzorec 3	0,000	0,077	0,387	0,549	0,697	0,878	0,971	1,091	1,187	1,265	1,345	1,465	2,062	0,716
vzorec 4	0,000	0,093	0,487	0,645	0,883	1,135	1,235	1,383	1,489	1,592	1,696	1,792	2,369	0,674
Min	0,000	0,077	0,350	0,496	0,663	0,869	0,956	1,078	1,171	1,258	1,332	1,432	2,031	0,674
Max	0,000	0,109	0,487	0,645	0,883	1,135	1,235	1,383	1,489	1,592	1,696	1,792	2,369	0,716
Ave	0,000	0,092	0,395	0,548	0,736	0,953	1,050	1,183	1,288	1,378	1,471	1,571	2,166	0,695
Stdev	0,000	0,013	0,063	0,069	0,100	0,124	0,128	0,141	0,147	0,156	0,170	0,163	0,155	0,018

Slika 66: Raztezki in toplotno-hidrična deformacija vzorca PAR



Slika 67: Rezidualna toplotna deformacija PAR

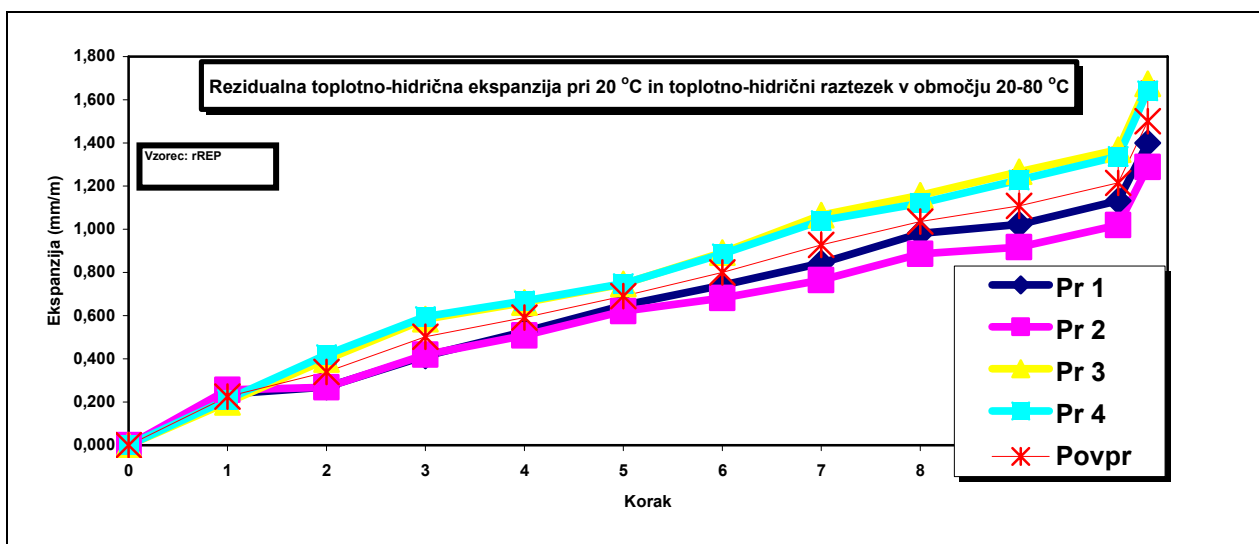
4.3.2 Marmorji

4.3.2.1 Vzorec REP

Rezultati meritev so podani na slikah 68 in 69.

Cikel št.	ϵ_0	ϵ_{0kontr}	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6	ϵ_7	ϵ_8	ϵ_9	ϵ_{10}	ϵ_{max10}	ϵ_t
	mm/m													
vzorec 1	0,000	0,003	0,237	0,269	0,413	0,526	0,647	0,740	0,843	0,981	1,022	1,131	1,401	0,378
vzorec 2	0,000	-0,003	0,256	0,269	0,419	0,508	0,620	0,681	0,764	0,886	0,918	1,020	1,288	0,371
vzorec 3	0,000	0,051	0,199	0,398	0,584	0,661	0,747	0,891	1,065	1,158	1,267	1,369	1,674	0,407
vzorec 4	0,000	0,064	0,211	0,419	0,595	0,669	0,749	0,886	1,040	1,120	1,228	1,337	1,641	0,413
Min	0,000	-0,003	0,199	0,269	0,413	0,508	0,620	0,681	0,764	0,886	0,918	1,020	1,288	0,371
Max	0,000	0,064	0,256	0,419	0,595	0,669	0,749	0,891	1,065	1,158	1,267	1,369	1,674	0,413
Ave	0,000	0,029	0,226	0,339	0,503	0,591	0,691	0,800	0,928	1,036	1,109	1,214	1,501	0,392
Stdev	0,000	0,034	0,026	0,081	0,100	0,086	0,067	0,106	0,147	0,126	0,167	0,167	0,187	0,021

Slika 68: Raztezki in toplotno-hidrična deformacija vzorca REP



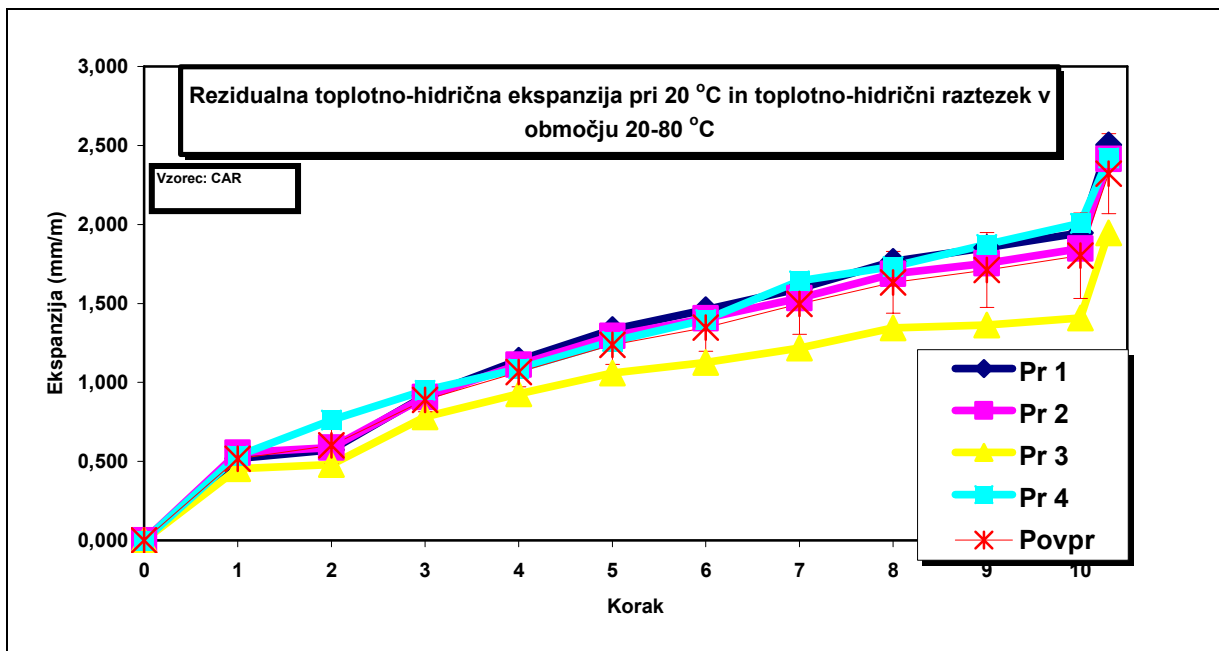
Slika 69: Rezidualna toplotna deformacija REP

4.3.2.2 Vzorec CAR

Rezultati meritev so podani na slikah 70 in 71.

Cikel št.	ϵ_0	ϵ_{0kontr}	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6	ϵ_7	ϵ_8	ϵ_9	ϵ_{10}	ϵ_{max10}	ϵ_t
	mm/m													
vzorec 1	0,000	-0,006	0,519	0,573	0,916	1,140	1,335	1,460	1,594	1,767	1,854	1,946	2,504	0,650
vzorec 2	0,000	-0,013	0,556	0,588	0,907	1,112	1,294	1,406	1,534	1,687	1,754	1,847	2,416	0,661
vzorec 3	0,000	-0,006	0,455	0,480	0,781	0,928	1,060	1,127	1,217	1,345	1,364	1,409	1,946	0,583
vzorec 4	0,000	0,032	0,535	0,762	0,950	1,086	1,261	1,397	1,643	1,734	1,874	2,007	2,421	0,548
Min	0,000	-0,013	0,455	0,480	0,781	0,928	1,060	1,127	1,217	1,345	1,364	1,409	1,946	0,548
Max	0,000	0,032	0,556	0,762	0,950	1,140	1,335	1,460	1,643	1,767	1,874	2,007	2,504	0,661
Ave	0,000	0,002	0,516	0,601	0,888	1,066	1,237	1,347	1,497	1,633	1,711	1,802	2,322	0,610
Stdev	0,000	0,021	0,044	0,117	0,074	0,095	0,122	0,150	0,192	0,195	0,237	0,270	0,253	0,054

Slika 70: Raztezki in toplotno-hidrična deformacija vzorca CAR



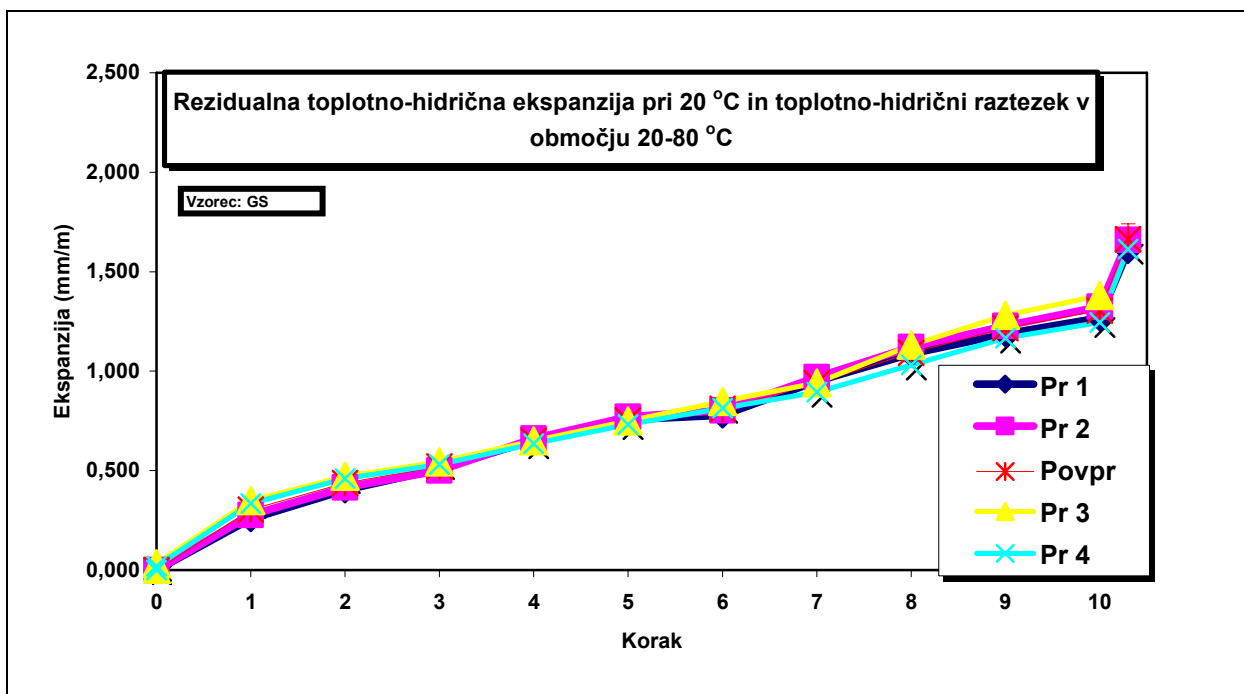
Slika 71: Rezidualna toplotna deformacija CAR

4.3.2.3 Vzorec GS

Rezultati meritev so podani na slikah 72 in 73.

Cikel št.	ϵ_0	ϵ_{0kontr}	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6	ϵ_7	ϵ_8	ϵ_9	ϵ_{10}	ϵ_{max10}	ϵ_t
	mm/m													
vzorec 1	0,000	0,019	0,257	0,402	0,508	0,653	0,756	0,779	0,949	1,088	1,188	1,268	1,606	0,418
vzorec 2	0,000	0,039	0,277	0,416	0,500	0,661	0,770	0,803	0,970	1,122	1,228	1,325	1,660	0,432
vzorec 3	0,000	0,032	0,349	0,471	0,544	0,650	0,749	0,849	0,941	1,130	1,281	1,380	1,774	0,493
vzorec 4	0,000	0,019	0,334	0,460	0,532	0,635	0,733	0,814	0,895	1,031	1,167	1,245	1,614	0,447
Min	0,000	0,019	0,257	0,402	0,500	0,635	0,733	0,779	0,895	1,031	1,167	1,245	1,606	0,418
Max	0,000	0,039	0,349	0,471	0,544	0,661	0,770	0,849	0,970	1,130	1,281	1,380	1,774	0,493
Ave	0,000	0,027	0,304	0,437	0,521	0,650	0,752	0,811	0,939	1,093	1,216	1,304	1,663	0,448
Stdev	0,000	0,010	0,044	0,033	0,021	0,011	0,016	0,029	0,032	0,045	0,050	0,061	0,077	0,033

Slika 72: Raztezki in toplotno-hidrična deformacija vzorca GS



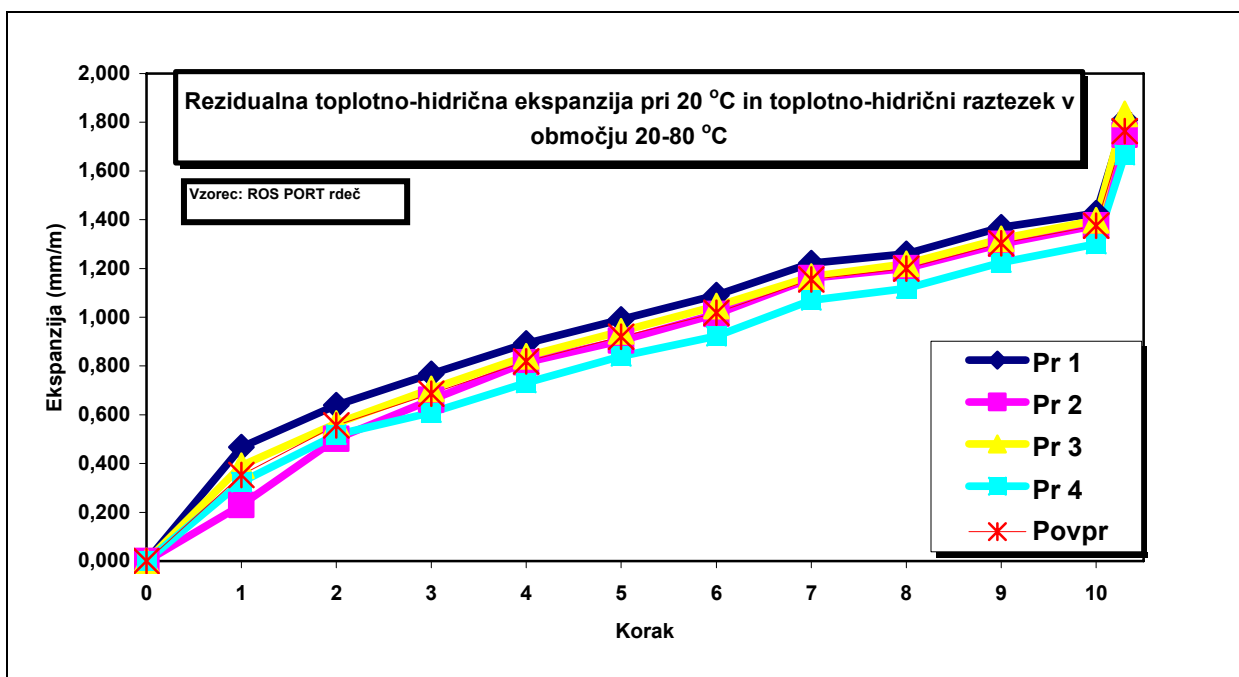
Slika 73: Rezidualna toplotna deformacija GS

4.3.2.4 Vzorec ROSO-POR-RDEČI

Rezultati meritev so podani na slikah 74 in 75.

Cikel št.	ϵ_0	ϵ_{0kontr}	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6	ϵ_7	ϵ_8	ϵ_9	ϵ_{10}	ϵ_{max10}	ϵ_t
	mm/m													
vzorec 1	0,000	0,000	0,467	0,640	0,767	0,892	0,991	1,090	1,221	1,260	1,369	1,426	1,810	0,441
vzorec 2	0,000	-0,157	0,230	0,502	0,661	0,815	0,904	1,013	1,160	1,201	1,300	1,377	1,748	0,447
vzorec 3	0,000	0,000	0,391	0,564	0,705	0,840	0,943	1,045	1,167	1,219	1,321	1,398	1,834	0,513
vzorec 4	0,000	-0,016	0,324	0,519	0,609	0,730	0,839	0,923	1,070	1,118	1,224	1,301	1,666	0,442
Min	0,000	-0,157	0,230	0,502	0,609	0,730	0,839	0,923	1,070	1,118	1,224	1,301	1,666	0,441
Max	0,000	0,000	0,467	0,640	0,767	0,892	0,991	1,090	1,221	1,260	1,369	1,426	1,834	0,513
Ave	0,000	-0,043	0,353	0,556	0,686	0,819	0,919	1,018	1,155	1,199	1,303	1,375	1,764	0,461
Stdev	0,000	0,076	0,101	0,062	0,067	0,067	0,064	0,071	0,063	0,060	0,060	0,054	0,075	0,035

Slika 74: Raztezki in toplotno-hidrična deformacija vzorca ROSO-POR-RDEČI



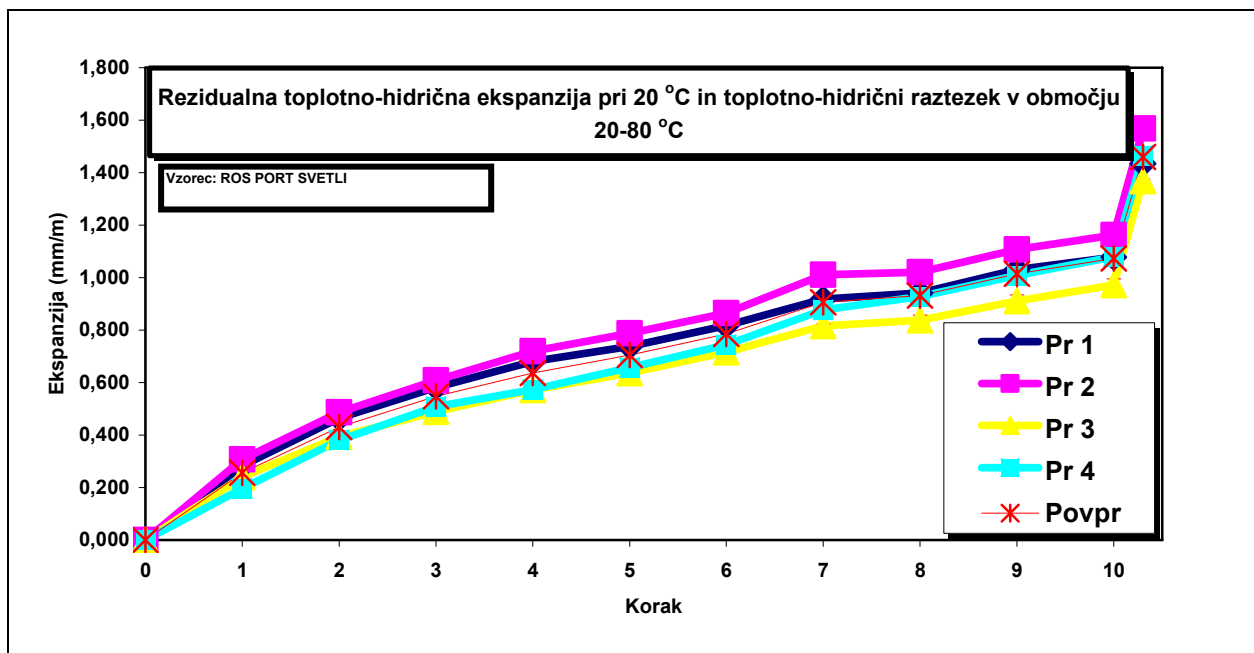
Slika 75: Rezidualna toplotna deformacija ROSO-POR-RDEČI

4.3.2.5 Vzorec ROSO-POR-BELI

Rezultati meritev so podani na slikah 76 in 77.

Cikel št.	ϵ_0	ϵ_{0kontr}	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6	ϵ_7	ϵ_8	ϵ_9	ϵ_{10}	ϵ_{max10}	ϵ_t
	mm/m													
vzorec 1	0,000	-0,010	0,283	0,464	0,582	0,680	0,738	0,817	0,919	0,941	1,030	1,078	1,434	0,404
vzorec 2	0,000	0,000	0,307	0,486	0,608	0,720	0,787	0,864	1,011	1,021	1,107	1,162	1,568	0,461
vzorec 3	0,000	-0,010	0,240	0,393	0,489	0,572	0,636	0,716	0,815	0,838	0,911	0,972	1,369	0,457
vzorec 4	0,000	0,023	0,197	0,380	0,509	0,574	0,657	0,744	0,876	0,928	1,009	1,079	1,466	0,458
Min	0,000	-0,010	0,197	0,380	0,489	0,572	0,636	0,716	0,815	0,838	0,911	0,972	1,369	0,404
Max	0,000	0,023	0,307	0,486	0,608	0,720	0,787	0,864	1,011	1,021	1,107	1,162	1,568	0,461
Ave	0,000	0,001	0,257	0,431	0,547	0,637	0,705	0,785	0,906	0,932	1,014	1,073	1,459	0,445
Stdev	0,000	0,015	0,049	0,052	0,057	0,075	0,070	0,067	0,082	0,075	0,081	0,078	0,083	0,027

Slika 76: Raztezki in toplotno-hidrična deformacija vzorca ROSO-POR-SVETLI



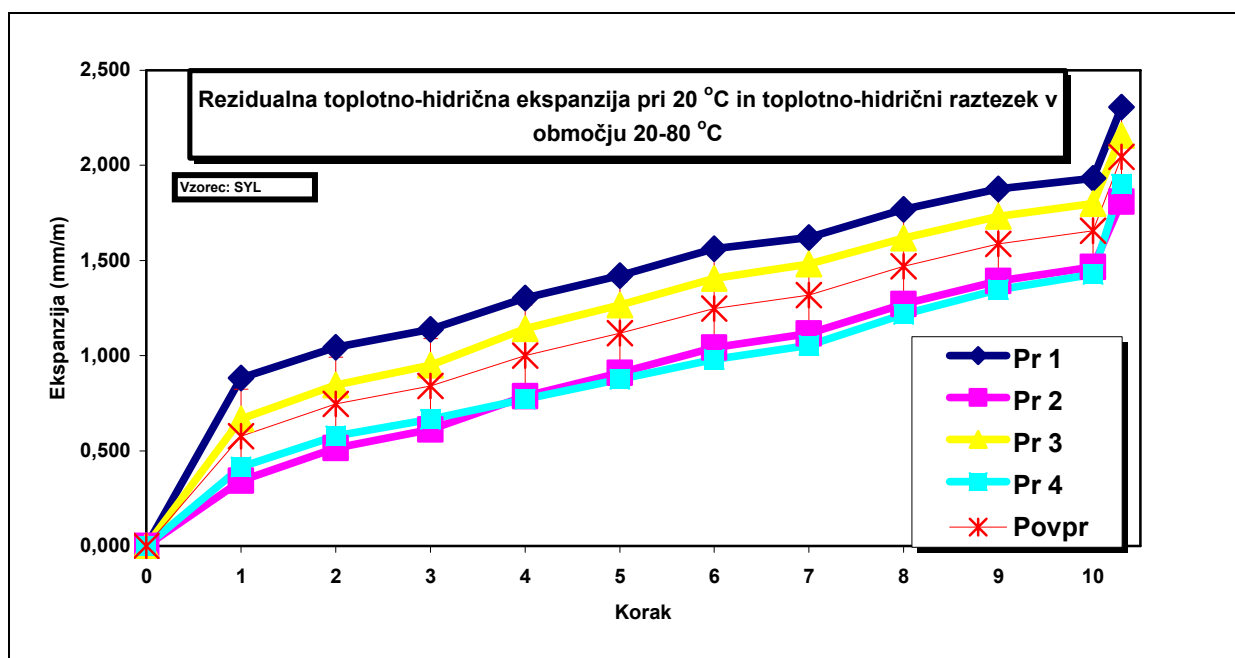
Slika 77: Rezidualna toplotna deformacija ROSO-POR-SVETLI

4.3.2.6 Vzorec SYL

Rezultati meritev so podani na slikah 78 in 79.

Cikel št.	ϵ_0	ϵ_{0kontr}	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6	ϵ_7	ϵ_8	ϵ_9	ϵ_{10}	ϵ_{max10}	ϵ_t
	mm/m													
vzorec 1	0,000	0,611	0,883	1,045	1,139	1,304	1,420	1,562	1,621	1,769	1,876	1,931	2,306	0,430
vzorec 2	0,000	0,029	0,343	0,514	0,612	0,786	0,909	1,042	1,116	1,272	1,391	1,466	1,809	0,417
vzorec 3	0,000	0,358	0,667	0,846	0,950	1,142	1,266	1,406	1,481	1,617	1,731	1,800	2,158	0,426
vzorec 4	0,000	0,019	0,415	0,578	0,665	0,772	0,876	0,980	1,055	1,217	1,347	1,428	1,902	0,555
Min	0,000	0,019	0,343	0,514	0,612	0,772	0,876	0,980	1,055	1,217	1,347	1,428	1,809	0,417
Max	0,000	0,611	0,883	1,045	1,139	1,304	1,420	1,562	1,621	1,769	1,876	1,931	2,306	0,555
Ave	0,000	0,254	0,577	0,746	0,841	1,001	1,118	1,248	1,318	1,469	1,586	1,656	2,044	0,457
Stdev	0,000	0,285	0,247	0,246	0,248	0,265	0,268	0,282	0,276	0,268	0,258	0,248	0,229	0,065

Slika 78: Raztezki in toplotno-hidrična deformacija vzorca SYL



Slika 79: Rezidualna toplotna deformacija SYL

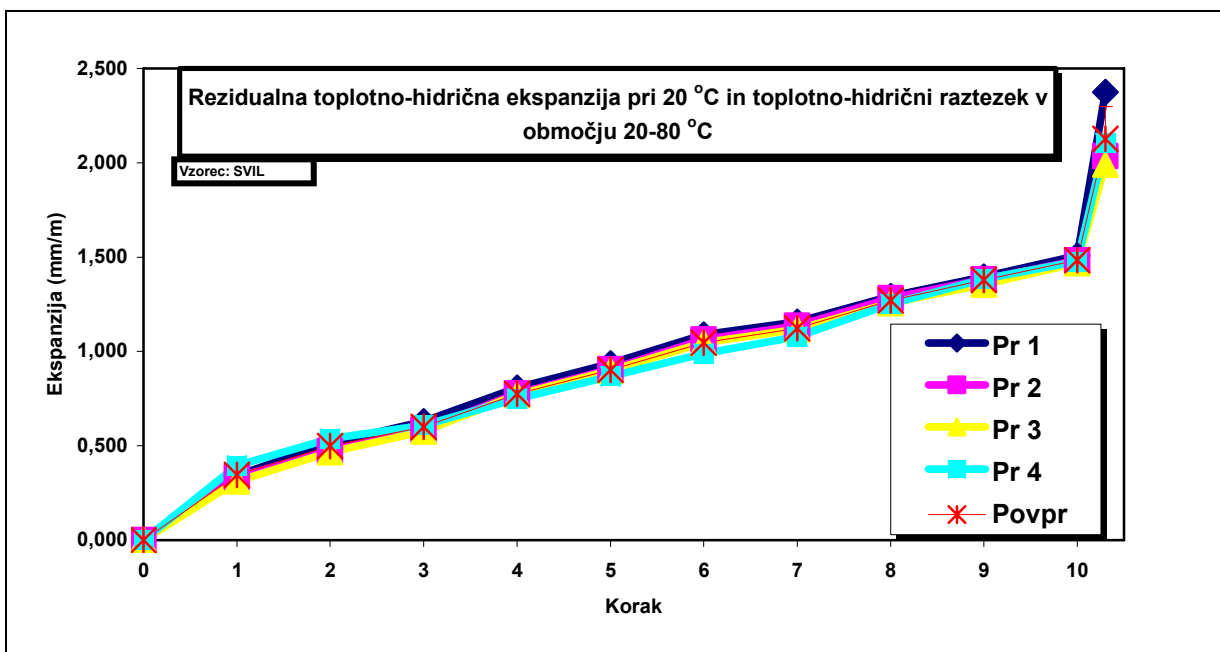
4.3.3 Peščenjaki

4.3.3.1 Vzorec SVIL

Rezultati meritev so podani na slikah 80 in 81.

Cikel št.	ϵ_0	ϵ_{0kontr}	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6	ϵ_7	ϵ_8	ϵ_9	ϵ_{10}	ϵ_{max10}	ϵ_t
	mm/m													
vzorec 1	0,000	-0,048	0,342	0,514	0,630	0,807	0,937	1,088	1,156	1,292	1,395	1,508	2,374	0,979
vzorec 2	0,000	-0,003	0,335	0,473	0,586	0,776	0,905	1,063	1,137	1,282	1,382	1,482	2,036	0,654
vzorec 3	0,000	-0,026	0,312	0,467	0,576	0,770	0,899	1,047	1,118	1,256	1,356	1,469	1,990	0,634
vzorec 4	0,000	0,016	0,396	0,538	0,608	0,750	0,869	0,988	1,078	1,252	1,384	1,477	2,105	0,721
Min	0,000	-0,048	0,312	0,467	0,576	0,750	0,869	0,988	1,078	1,252	1,356	1,469	1,990	0,634
Max	0,000	0,016	0,396	0,538	0,630	0,807	0,937	1,088	1,156	1,292	1,395	1,508	2,374	0,979
Ave	0,000	-0,015	0,346	0,498	0,600	0,776	0,902	1,047	1,122	1,271	1,379	1,484	2,126	0,747
Stdev	0,000	0,028	0,035	0,034	0,024	0,024	0,028	0,043	0,033	0,019	0,017	0,017	0,172	0,159

Slika 80: Raztezki in toplotno-hidrična deformacija vzorca SVIL



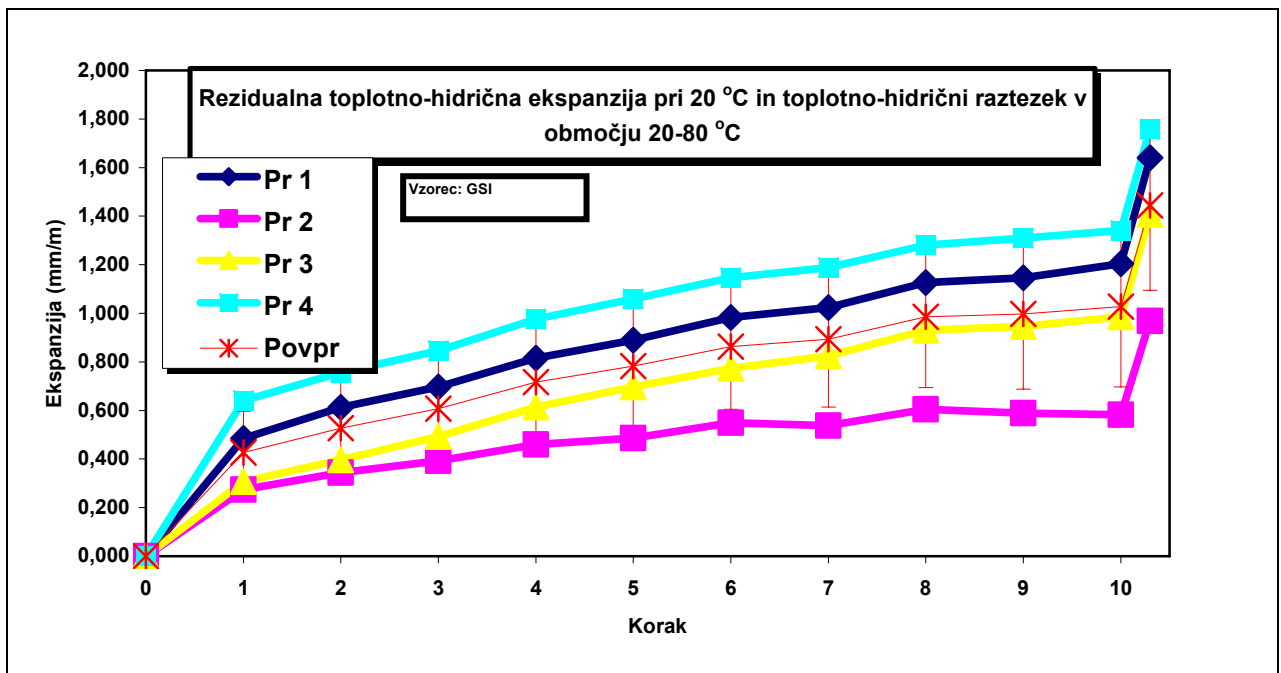
Slika 81: Rezidualna toplotna deformacija SVIL

4.3.3.2 Vzorec GSI

Rezultati meritev so podani na slikah 82 in 83.

Cikel št.	ϵ_0	ϵ_{0kontr}	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6	ϵ_7	ϵ_8	ϵ_9	ϵ_{10}	ϵ_{max10}	ϵ_t
	mm/m													
vzorec 1	0,000	0,183	0,485	0,613	0,697	0,815	0,889	0,982	1,024	1,127	1,146	1,204	1,640	0,494
vzorec 2	0,000	0,071	0,273	0,344	0,392	0,460	0,486	0,550	0,537	0,605	0,589	0,582	0,968	0,380
vzorec 3	0,000	0,019	0,307	0,397	0,492	0,614	0,697	0,774	0,825	0,931	0,947	0,985	1,407	0,461
vzorec 4	0,000	0,323	0,640	0,756	0,845	0,977	1,060	1,146	1,188	1,281	1,310	1,342	1,758	0,448
Min	0,000	0,019	0,273	0,344	0,392	0,460	0,486	0,550	0,537	0,605	0,589	0,582	0,968	0,380
Max	0,000	0,323	0,640	0,756	0,845	0,977	1,060	1,146	1,188	1,281	1,310	1,342	1,758	0,494
Ave	0,000	0,149	0,426	0,527	0,607	0,717	0,783	0,863	0,894	0,986	0,998	1,028	1,443	0,446
Stdev	0,000	0,135	0,170	0,192	0,203	0,226	0,247	0,258	0,280	0,292	0,311	0,332	0,349	0,048

Slika 82: Raztezki in toplotno-hidrična deformacija vzorca GSI.



Slika 83: Rezidualna toplotna deformacija GSI

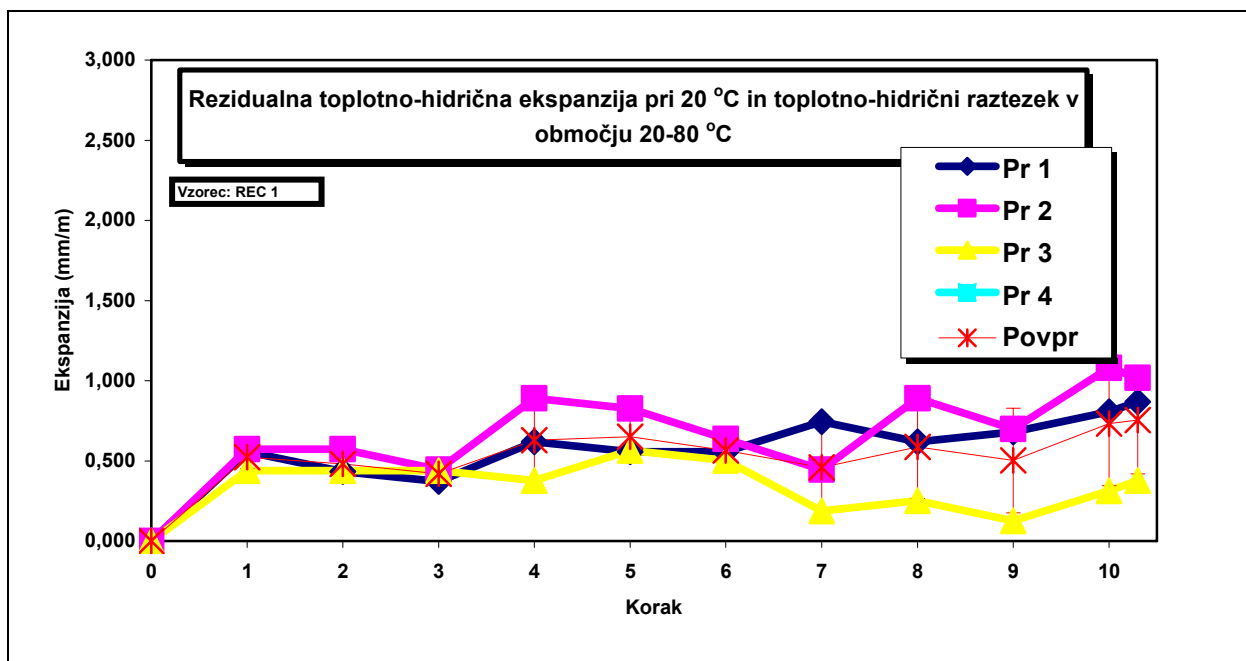
4.4 Rezultati toplotno-hidrične razteznosti betona

4.4.1 Vzorec REC 1

Rezultati meritev so podani na slikah 84 in 85.

Cikel št.	ϵ_0	ϵ_{0kontr}	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6	ϵ_7	ϵ_8	ϵ_9	ϵ_{10}	ϵ_{max10}	ϵ_t
	mm/m													
vzorec 1	0,000	0,310	0,558	0,434	0,372	0,620	0,558	0,558	0,744	0,620	0,682	0,806	0,867	0,186
vzorec 2	0,000	0,191	0,572	0,572	0,445	0,890	0,826	0,636	0,445	0,890	0,699	1,081	1,017	0,318
vzorec 3	0,000	0,126	0,440	0,440	0,440	0,377	0,566	0,503	0,189	0,251	0,126	0,314	0,377	0,251
vzorec 4														
Min	0,000	0,126	0,440	0,434	0,372	0,377	0,558	0,503	0,189	0,251	0,126	0,314	0,377	0,186
Max	0,000	0,310	0,572	0,572	0,445	0,890	0,826	0,636	0,744	0,890	0,699	1,081	1,017	0,318
Ave	0,000	0,209	0,523	0,482	0,419	0,629	0,650	0,565	0,459	0,587	0,502	0,733	0,754	0,252
Stdev	0,000	0,093	0,073	0,078	0,041	0,257	0,153	0,067	0,278	0,321	0,326	0,388	0,335	0,066

Slika 84: Raztezki in toplotno-hidrična deformacija vzorca REC 1



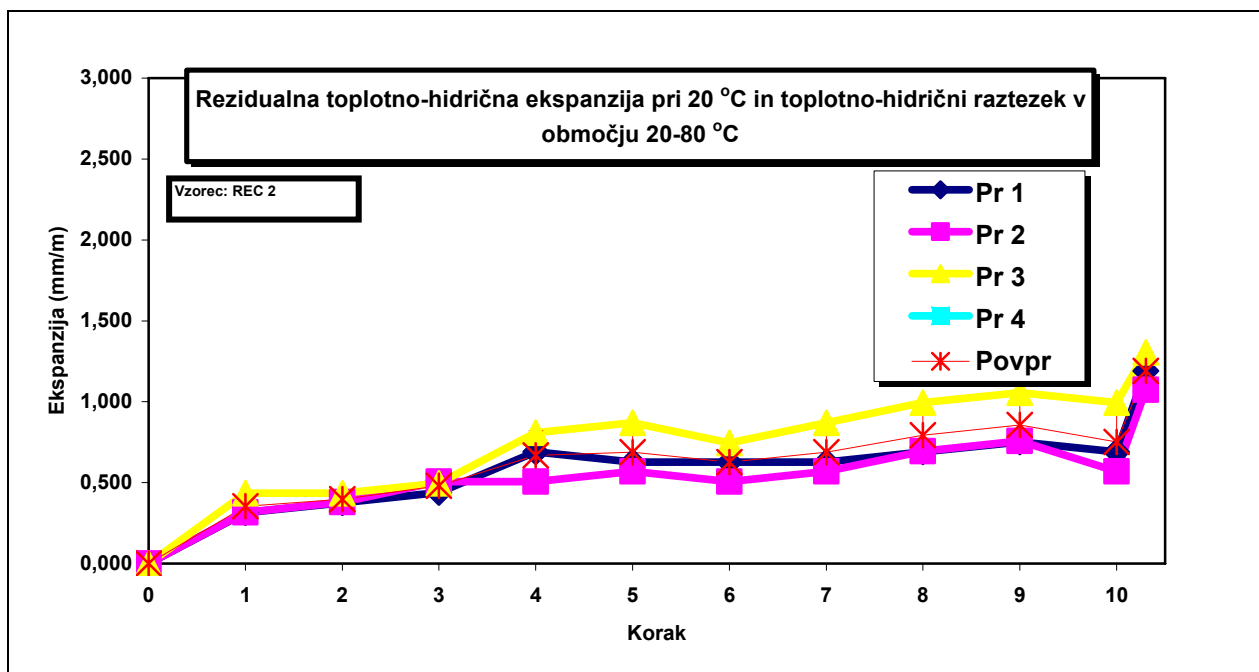
Slika 85: Rezidualna toplotna deformacija REC 1

4.4.2 Vzorec REC 2

Rezultati meritev so podani na slikah 86 in 87.

Cikel št.	ϵ_0	ϵ_{0kontr}	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6	ϵ_7	ϵ_8	ϵ_9	ϵ_{10}	ϵ_{max10}	ϵ_t
	mm/m													
vzorec 1	0,000	0,251	0,313	0,376	0,439	0,690	0,627	0,627	0,627	0,690	0,752	0,690	1,191	0,439
vzorec 2	0,000	0,253	0,316	0,379	0,505	0,505	0,569	0,505	0,569	0,695	0,758	0,569	1,074	0,316
vzorec 3	0,000	0,124	0,435	0,435	0,497	0,808	0,870	0,746	0,870	0,995	1,057	0,995	1,305	0,249
vzorec 4														
Min	0,000	0,124	0,313	0,376	0,439	0,505	0,569	0,505	0,569	0,690	0,752	0,569	1,074	0,249
Max	0,000	0,253	0,435	0,435	0,505	0,808	0,870	0,746	0,870	0,995	1,057	0,995	1,305	0,439
Ave	0,000	0,209	0,355	0,397	0,481	0,668	0,689	0,626	0,689	0,793	0,856	0,751	1,190	0,334
Stdev	0,000	0,074	0,070	0,033	0,036	0,153	0,160	0,120	0,160	0,175	0,174	0,220	0,116	0,096

Slika 86: Raztezki in toplotno-hidrična deformacija vzorca REC 2



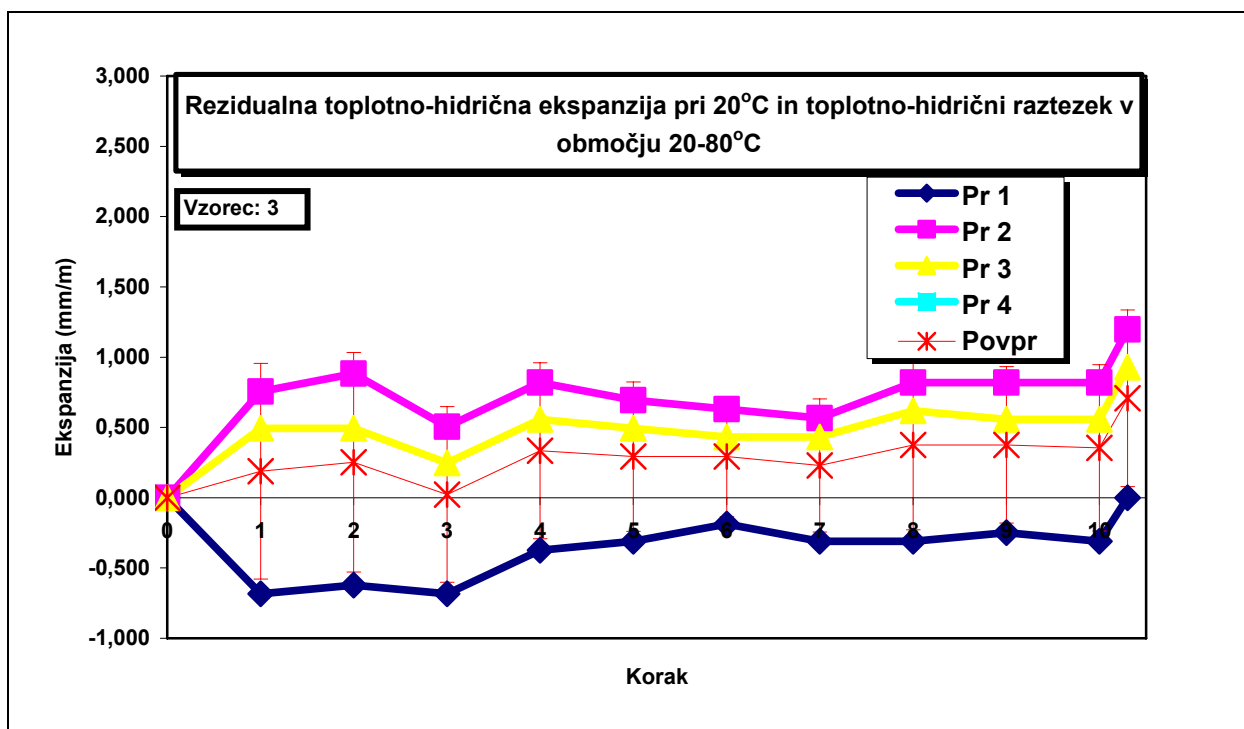
Slika 87: Rezidualna toplotna deformacija REC 2

4.4.3 Vzorec REC 3

Rezultati meritev so podani na slikah 88 in 89.

Cikel št.	ϵ_0	ϵ_{0kontr}	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6	ϵ_7	ϵ_8	ϵ_9	ϵ_{10}	ϵ_{max10}	ϵ_t
	mm/m													
vzorec 1	0,000	-0,932	-0,684	-0,622	-0,684	-0,373	-0,311	-0,186	-0,311	-0,311	-0,249	-0,311	0,000	0,249
vzorec 2	0,000	0,315	0,756	0,882	0,504	0,819	0,693	0,630	0,567	0,819	0,819	0,819	1,197	0,378
vzorec 3	0,000	0,124	0,495	0,495	0,247	0,556	0,495	0,433	0,433	0,618	0,556	0,556	0,927	0,371
vzorec 4														
Min	0,000	-0,932	-0,684	-0,622	-0,684	-0,373	-0,311	-0,186	-0,311	-0,311	-0,249	-0,311	0,000	0,249
Max	0,000	0,315	0,756	0,882	0,504	0,819	0,693	0,630	0,567	0,819	0,819	0,819	1,197	0,378
Ave	0,000	-0,165	0,189	0,252	0,022	0,334	0,292	0,292	0,230	0,375	0,376	0,355	0,708	0,332
Stdev	0,000	0,672	0,767	0,781	0,625	0,626	0,532	0,426	0,473	0,603	0,556	0,591	0,628	0,073

Slika 88: Raztezki in toplotno–hidrična deformacija vzorca REC 3



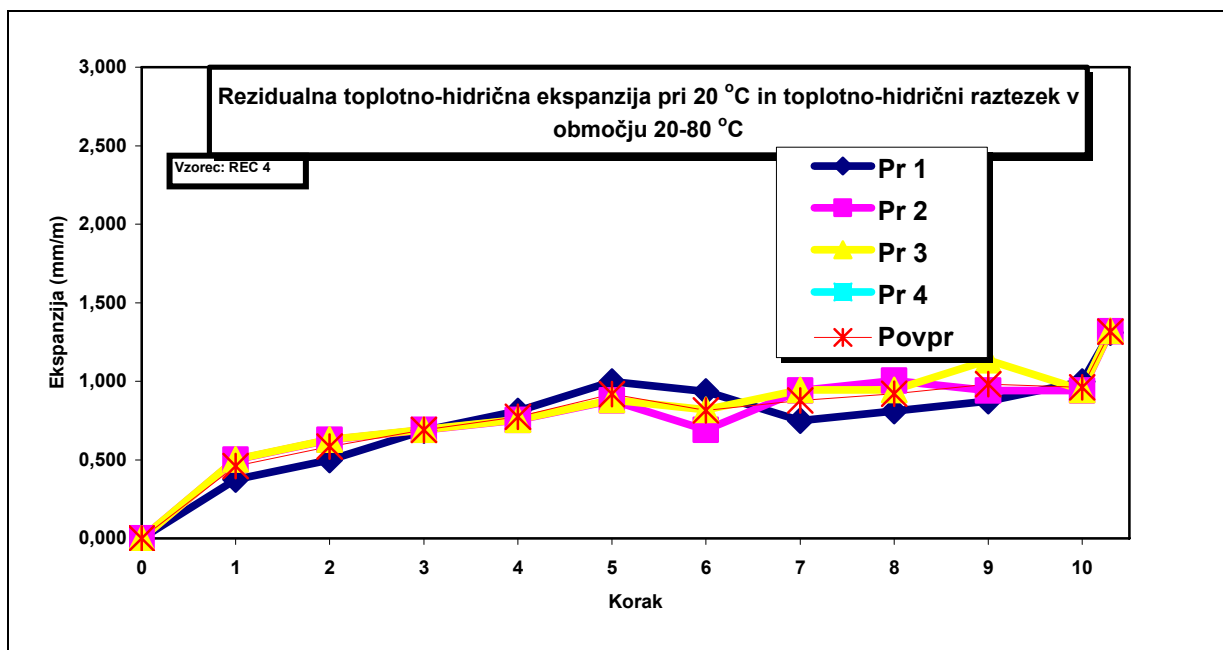
Slika 89: Rezidualna toplotna deformacija REC 3

4.4.4 Vzorec REC 4

Rezultati meritev so podani na slikah 90 in 91.

Cikel št.	ϵ_0	ϵ_{0kontr}	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6	ϵ_7	ϵ_8	ϵ_9	ϵ_{10}	ϵ_{max10}	ϵ_t
	mm/m													
vzorec 1	0,000	0,125	0,374	0,499	0,686	0,811	0,998	0,936	0,749	0,811	0,873	0,998	1,310	0,437
vzorec 2	0,000	0,690	0,502	0,627	0,690	0,753	0,878	0,690	0,941	1,004	0,941	0,941	1,317	0,376
vzorec 3	0,000	0,252	0,504	0,630	0,693	0,756	0,882	0,819	0,945	0,945	1,134	0,945	1,322	0,189
vzorec 4														
Min	0,000	0,125	0,374	0,499	0,686	0,753	0,878	0,690	0,749	0,811	0,873	0,941	1,310	0,189
Max	0,000	0,690	0,504	0,630	0,693	0,811	0,998	0,936	0,945	1,004	1,134	0,998	1,322	0,437
Ave	0,000	0,356	0,460	0,585	0,690	0,773	0,919	0,815	0,878	0,920	0,983	0,961	1,317	0,334
Stdev	0,000	0,297	0,074	0,075	0,003	0,033	0,068	0,123	0,112	0,099	0,135	0,032	0,006	0,129

Slika 90: Raztezki in toplotno-hidrična deformacija vzorca REC 4



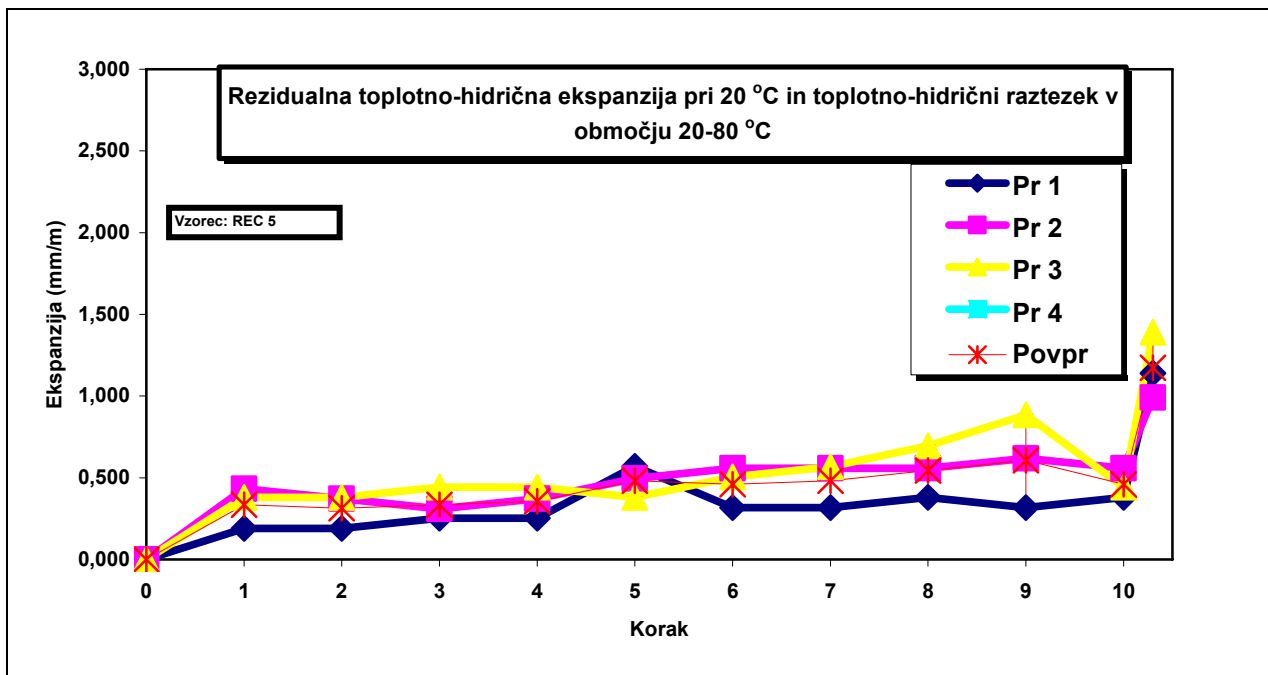
Slika 91: Rezidualna toplotna deformacija REC 4

4.4.5 Vzorec REC 5

Rezultati meritev so podani na slikah 92 in 93.

Cikel št.	ϵ_0	ϵ_{0kontr}	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6	ϵ_7	ϵ_8	ϵ_9	ϵ_{10}	ϵ_{max10}	ϵ_t
	mm/m													
vzorec 1	0,000	0,127	0,190	0,190	0,253	0,253	0,570	0,317	0,317	0,380	0,317	0,380	1,140	0,823
vzorec 2	0,000	0,124	0,434	0,372	0,310	0,372	0,496	0,557	0,557	0,557	0,619	0,557	0,991	0,372
vzorec 3	0,000	0,063	0,379	0,379	0,442	0,442	0,379	0,505	0,568	0,695	0,884	0,442	1,390	0,505
vzorec 4														
Min	0,000	0,063	0,190	0,190	0,253	0,253	0,379	0,317	0,317	0,380	0,317	0,380	0,991	0,372
Max	0,000	0,127	0,434	0,379	0,442	0,442	0,570	0,557	0,568	0,695	0,884	0,557	1,390	0,823
Ave	0,000	0,105	0,334	0,314	0,335	0,356	0,481	0,460	0,481	0,544	0,607	0,460	1,173	0,567
Stdev	0,000	0,036	0,128	0,107	0,097	0,095	0,096	0,127	0,142	0,158	0,284	0,090	0,201	0,232

Slika 92: Raztezki in toplotno-hidrična deformacija vzorca REC 5



Slika 93: Rezidualna toplotna deformacija REC 5

5 VREDNOTENJE REZULTATOV

5.1 Celotna deformacija naravnega kamna ϵ_{max10}

Celotna deformacija (maksimalni raztezek) vzorca je deformacija, pri kateri so upoštevane prejšnje zaostale deformacije, in tudi raztezek, ki nastane pri ogrevanju v območju od 20 do 80 °C. Celotno deformacijo smo določili pri zadnjem (desetem) ciklu. Celotno deformacijo smo ugotavljali tako v mokrem in tudi suhem ciklu. Pri naših vzorcih kamna so se deformacije razlikovale glede na vrsto kamnine (graniti, marmorji in peščenjaki) in glede na pogoje meritev (suho ali mokro).

Največje deformacije smo zasledili pri marmorju z oznako CAR v mokrem ciklu, ta kamen pa se je bistveno razlikoval od drugih vzorcev. Najmanjšo deformacijo v mokrem ciklu smo zasledili pri peščenjaku GSi. Prikaz celotne deformacije vzorcev, merjene pri mokrem ciklu, je podana v preglednici 7.

Preglednica 7: Prikaz celotne deformacije vzorcev, merjene v mokrem

Vzorec	ϵ_{max10} [mm/m]	Skupina
GSI	1,443	apnenčev peščenjak
IW	1,458	granit
ROSO-POR- BELI	1,459	marmor
REP	1,501	apnenec
MC	1,536	granit
GS	1,663	apnenec
ROSO-POR- RDEČI	1,764	marmor
SYL	2,044	apnenec
JI	2,093	granit
SVIL	2,126	travertin
PAR	2,166	granit
CAR	2,322	marmor

Tudi v suhem ciklu je največja skupna deformacija v pri vzorcu CAR, najmanjša pa pri vzorcu REP. Razvrstitev celotne deformacije vzorcev, izmerjene pri suhem ciklu, je podana v preglednici 8.

Preglednica 8: Prikaz celotne deformacije preskušancev, merjene v mokrem.

Vzorec	$\epsilon_{\max 10}$ [mm/m]	Skupina
REP	0,309	apnenec
GS	0,33	apnenec
SYL	0,331	apnenec
IW	0,332	granit
ROSO- POR- RDEČI	0,385	marmor
GSI	0,392	apnenčev peščenjak
MC	0,4	granit
JI	0,473	granit
ROSO- POR- BELI	0,485	marmor
PAR	0,491	granit
SVI	0,495	travertin
CAR	0,792	marmor

To nam kaže, da je izmed vseh vzorcev kamnin vzorec CAR najdejavnejši kamen: najobčutljivejši je za nihanje temperatur in s tem tudi na način vgrajevanja v gradbeništvu.

Primerjava rezultatov celotne deformacije, določene s suhim in mokrim postopkom, pa kaže, da je celotna deformacija 3- do 6-krat pri mokrem segrevanju kakor pri suhem postopku.

5.2 Celotna deformacija betona ϵ_{max10}

Trajno celotno deformacijo betonov smo merili enako kakor deformacije pri naravnem kamnu.

Pri mokrem toplotnem ciklu so se na vseh vzorcih pojavili raztezki, vendar med temi glede na različne recepture betonov ni bilo opaziti izredno velikih nihanj.

Maksimalna deformacija vzorcev pri mokrem ciklu:

Preglednica 9: Prikaz celotne deformacije betona, določene v mokrem ciklu

VZOREC	ϵ_{max10} [mm/m]
REC 3	0,708
REC 1	0,754
REC 5	1,173
REC 2	1,190
REC 4	1,317

Pri suhem ciklu se je povsod pojavil skrček vzorcev, vendar so se betoni razlikovali v intenzivnosti krčenja.

Preglednica 10: Prikaz celotne deformacije betona, določene v suhem ciklu

VZOREC	ϵ_{max10} (mm/m)
REC 5	0,200
REC 3	0,371
REC 1	0,501
REC 4	0,506
REC 2	0,509

Pri betonih so bili izmerjeni bistveno manjši raztezki v primerjavi s kamninami v mokrem in tudi v suhem. Prav tako iz preglednic 9 in 10 vidimo, da se vzorci betonov, ogrevani v vodi, bistveno bolj raztezajo ali deformirajo, in to celo za faktor več kot 10-krat.

5.3 Primerjava celotne deformacije med kamnom in betonom ϵ_{max10}

Kadar primerjamo kamen in beton, moramo primerjati ločeno suho in mokro deformacijo, kajti pri betonih je bilo zaznati bistveno manjše raztezke kot pri kamnih, tako v mokrem kot tudi v suhem.

Pri suhi deformaciji kamnin se je kamnina deformirala – povprečno za okoli 0,440 mm/m, pri betonih pa smo v povprečju izmerili raztezek v vrednosti **0,417 mm/m**. Pri mokri toplotni deformaciji se je v povprečju kamnina deformirala - raztegnila za okoli 1,850mm/m, betoni pa so dosegli povprečno celotno deformacijo v vrednosti 1,012 mm/m. Vedeti je treba, da smo med seboj primerjali povprečja betonov in povprečja kamnin, ki pa so za uporabo v praksi preveč posplošena. Če namreč primerjamo posamezne vzorce kamnin in betonov, dobimo pri posameznih kombinacijah bistveno večje medsebojne odmike kot jih prikazujejo povprečne vrednosti.

Primer:

1. mokra toplotna deformacija – povprečje:

kamnina	1,798 mm/m
beton	1,028 mm/m
razlika	0,77 mm/m

2. mokra deformacija – primerjava posameznega vzorca:

kamnina CAR	2,322 mm/m
beton REC 3	0,708 mm/m
razlika	1,614 mm/m

Zato menim, da je treba med seboj primerjati posamezne vzorce betona in vzorce kamna in da ne smemo pri načrtovanju uporabljati povprečnih vrednosti za beton ali kamen na splošno.

Pri primerjavi v vodi ogrevanih vzorcev se vzorci kamnin raztegnejo oziroma deformirajo za 20- do 100-krat več kot betoni, pri zračno ogrevanih vzorcih pa se kamnine raztegnejo oziroma deformirajo za 3- do 7-krat več, bi lahko bila posledica skrčkov betona, ki se praviloma oblikujejo po vsakem toplotnem ciklu in se velikokrat z naraščanjem števila ciklov večajo.

5.4 Toplotni raztezek naravnega kamna ϵ_{10}

MERJENO PRI OGREVANJU V VODI

Izmed 12 vzorcev kamnin smo največje toplotne raztezke izmerili pri vzorcu **CAR**, ki je dosegel 1,802 mm/m. Podobne, za spoznanje manjše raztezke so imeli vzorci **granit JI.** 1,702 mm/m, **marmor SYL.** 1,656 mm/m in **granit PAR.** 1,571 mm/m.

Naslednja ali druga skupina kamnin je dosegla raztezke do 1,2 mm/m: **peščenjak SVI.** 1,484mm/m, **marmor RP.** – rdeč 1,375mm/m, **marmor GS** 1,304 mm/m in **marmor REP.** 1,214 mm/m.

Tretja skupina kamnin pa so kamnine, ki so dosegle raztezke pod 1,2 mm/m: **granit mc.** 1,183 mm/m, **marmor RP.** –beli 1,073 mm/m, **GSI.** 1,028 mm/m. Najmanjši raztezek je dosegel **IW.** 1,027 mm/m.

Razlika med največjim in najmanjšim raztezkom je 0,775 mm/m, kar pomeni, da je marmor **CAR** od granita **IW.** dosegel za 57 odstotkov večji raztezek od granita IW.

Razvrstitev vzorcev glede na toplotni raztezek je podana v preglednici 11.

Povprečni toplotni raztezek vseh vzorcev zanaša 1,368 mm/m.

Preglednica 11: Razvrstitev vzorcev kamna glede na raztezek, merjen v mokrem

VZOREC	ε_{10} [mm/m]	Petrografski tip
CAR	1,802	marmor
JL	1,702	granit
SYL	1,656	apnenec
PAR.	1,571	granit
SVI	1,484	travertin
ROSO-POR- RDEČI	1,375	marmor
GS	1,304	apnenec
REP	1,214	apnenec
MC	1,183	granit
ROSO-POR- BELI	1,073	marmor
GSI	1,028	apnenčev peščenjak
IW	1,027	granit

MERJENO V SUHEM

Pri meritvah v suhem smo največje raztezke prav tako dosegli pri marmorju **CAR**, to je 0,105 mm/m. Edini vzorec, ki se je približal marmorju **CAR.**, je bil **peščenjak SVI.** z 0,091mm/m. Pri merjenju v suhem se drugi vzorci niso tako približali rezultatom **CAR.** in **svilarya: Granit JL.** 0,056 mm/m, **marmor GS.** 0,05 mm/m, **RP – rdeči** 0,049 mm/m, **RP – beli** 0,043 mm/m, **marmor REP.** 0,035 mm/m, **granit PAR.** 0,034 mm/m, **marmor SYL.** 0,03 mm/m, **peščenjak GSI.** 0,02 mm/m, **granit MC.** 0,017 mm/m. Prav tako kot v mokrem je tudi v suhem najmanjše raztezke ali celo skrčke dosegel granit **IW.** -0,013 mm/m.

Razlika med največjim in najmanjšim raztezkom ali skrčkom je bila 0,118 mm/m; to pomeni, da je CAR dosegel 12,3 odstotka večji raztezek kot IW.

Razvrstitev vzorcev kamna glede na raztezek, merjenih v suhem, prikazuje preglednica 12. Povprečni toplotni raztezek vseh vzorcev je znašal 0,043 mm/m.

Preglednica 12. Razvrstitev vzorcev kamna glede na raztezek, merjenih v suhem

VZOREC	ε_{10} [mm/m]	Petrografski tip
CAR	0,105	marmor
SVI.	0,091	travertin
JI	0,056	granit
GS	0,050	apnenec
ROSO-POR- RDEČI	0,049	marmor
ROSO-POR- BELI	0,043	marmor
REP	0,035	apnenec
PAR	0,034	granit
SYL	0,030	apnenec
GSI	0,020	apnenčev peščenjak
MC	0,017	granit
IW	-0,013	granit

5.5 Toplotni raztezek betona ϵ_{10}

MERJENO V VODI

Betonski vzorci v vodi so dosegli te rezultate:

Največje raztezke je dosegel vzorec **REC 4** z 0,961 mm/m, nekoliko manjši rezultat sta dosegla **REC 2** z 0,751 mm/m in **REC 1** z 0,733 mm/m, vzorca **REC 5** z 0,46 mm/m in **REC 3**. z 0,355 mm/m pa sta se nekoliko bolj razlikovala od drugih

Razlika med največjim in najmanjšim raztezkom je bila 0,606 mm/m ali: beton **REC 4** je dosegel 2,7-krat večji raztezek kakor **REC 3**.

Povprečna vrednost vseh petih receptur ali vzorcev betonov je znašala 0,652 mm/m. Iz teh rezultatov lahko sklepamo, da na toplotni raztezek najverjetneje vpliva vrsta uporabljenega cementa in vrsta polnila ter delež cementa v fini malti, ki je bila predmet preiskav.

Preglednica 13: Razvrstitev vzorcev betona glede na raztezek, merjenih v mokrem

VZOREC	ϵ_{10} (mm/m)
REC 4	0,961
REC 2	0,751
REC 1	0,733
REC 5	0,46
REC 3	0,355

MERJENO V SUHEM

Pri meritvah v suhem smo pri vseh betonskih vzorcih oziroma recepturah po 10 ciklih dobili skrček, vendar so se skrčki pojavljali v različnih ciklih. Najpozneje je skrček dosegel vzorec REC 4.

Rezultati so bili taki: vzorec **REC 2** je dosegel $-0,046$ mm/m, **REC 1** $-0,097$ mm/m, **REC 4** $-0,182$ mm/m, **REC 3** $-0,438$ mm/m, in kot zadnji je največji skrček dosegel beton **REC 5** $-0,501$ mm/m. Povprečni skrček betonov je bil $-0,2528$ mm/m.

Razlika med največjim in najmanjšim raztezkom oziroma skrčkom betona je bila $0,455$ mm/m oziroma za več kot 10-krat se je beton **REC 5** bolj skrčil kot **REC 2**.

Najmanjši skrček sta dosegla betona REC 2 in REC 1, pri obeh je bil delež cementa precej manjši kot pri drugih mešanicah, vodo-cementno razmerje pa najvišje, poleg tega pa je mešanica REC 4 pri približno enakem vodo-cementnem razmerju imela bistveno manjši delež cementa kot REC 3. Lahko sklepamo, da sta pri neaeriranih mešanicah osnovna parametra, ki vplivata na velikost skrčkov, količina cementa in vodo-cementno razmerje. Vnesen zračne pore krčenje očitno še dodatno povečajo.

Preglednica 14: Razvrstitev vzorcev betona glede na raztezek, merjenih v suhem

VZOREC	ϵ_{10} (mm/m)
REC 2	-0,046
REC 1	-0,097
REC 4	-0,182
REC 3	-0,438
REC 5	-0,501

5.6 Primerjava maksimalne toplotne deformacije vzorcev kamnin in vzorcev betona ϵ_{max10}

Pri primerjavi rezultatov meritev med vzorci betona in kamnin moramo ločiti vzorce, merjene v suhem, in vzorce, merjene v mokrem, ker so med njimi velike razlike.

Pri toplotno-hidričnih deformacijah lahko med seboj primerjamo maksimalne in minimalne

deformacije vzorcev betona in kamnin.

Maksimalna trajna deformacija $\varepsilon_{\max,10}$ kamnine **CAR** je zanašala 2,322 mm/m, maksimalna trajna deformacija betonske mešanice REC 4 pa 1,317 mm/m. Razlika je bila 1,005 mm/m. Kamnina z največjim $\varepsilon_{\max,10}$ je torej dosegla kar za 76,3 odstotka večji raztezek kakor beton z največjim $\varepsilon_{\max,10}$.

Vsi vzorci kamnin so dosegli večje raztezke kakor vzorci betona in sicer v povprečju za 57 odstotkov.

Pri suhi toplotni deformaciji betona in kamnin se je največji raztezek pojavil pri kamnini **CAR** 0,105 mm/m, največji skrček pa pri betonu **REC 5** –0,501 mm/m. Razlika med tema dvema vzorcema je znašala 0,606 mm/m.

Pri vseh drugih vzorcih betona se je pojavil skrček, pri kamninah pa raztezek, in sicer v povprečju za 60 odstotkov.

5.7 Primerjava toplotnega raztezka ε_t vzorcev kamnin in vzorcev betona

Pri primerjavi toplotnega raztezka ε_t med vzorci kamnin in betona, pri katerih smo ugotavljali spremembe deformacij med 20–80 °C, smo dobili te rezultate:

Pri samem segrevanju z 20 na 80 °C v suhem ciklu se je izkazalo, da se beton v samih temperaturnih konicah razteza bolj kot kamnina (toplotni raztezek je večji pri betonu, kakor pri kamnini), trajna deformacija pa je večja pri kamninah (pri betonih dobimo v povprečju celo skrčke).

Maksimalni povprečni raztezek betona je znašal 0,809 mm/m, in sicer pri **REC 3**, maksimalni povprečni toplotni raztezek kamnine pa znaša 0,687 mm/m (vzorec **CAR**). Minimalni povprečni toplotni raztezek betona je bil 0,555 mm/m (**REC 2**) minimalni povprečni toplotni raztezek kamnine pa je znašal 0,274 mm/m (vzorec **REP**).

Rezultati kažejo, da se beton v temperaturnih konicah raztezajo bolj kot kamnine.

Velika težava nastane tudi pri združevanju betonov in kamnin, saj če ne poznamo raztezkov materialov in združimo beton **REC 3** in kamnino REP dobimo bistvene razlike v deformacijah, to pa povzroči poškodbe v materialih.

Zgled: suhi toplotni raztezek

Toplotni raztezek REC 3: 0,809 mm/m

 REP. : 0,274 mm/m

Razlika: 0,535 mm/m

Komentar: Beton se raztegne za 300 odstotkov bolj kot kamnina.

Pri mokrem ciklu pa se zadeva obrne: rezultati namreč kažejo, da se kamnine v temperaturnih območju 20–80 °C deformirajo bolj kakor betoni.

Maksimalni toplotni raztezek kamnine v mokrem je znašal 0,747mm/m (vzorec **SVI**), maksimalni povprečni toplotni raztezek betona pa 0,567 mm/m (**REC 5**). Minimalni povprečni toplotni raztezek kamnine je bil 0,392mm/m (vzorec **REP**) minimalni povprečni raztezek betona pa 0,252 (**REC 1**).

Tu se deformacije kažejo v prid kamnini, vseeno pa tako kot pri suhem ogrevanju tudi pri mokrem velja, da so deformacije zelo različne, in če deformacije kamnin in betonov niso upoštevane, se materiali poškodujejo.

Zgled: mokri toplotni raztezek

Trenutni raztezek REC 1: 0,252 mm/m

 SVI: 0,747 mm/m

Razlika: 0,495 mm/m

Komentar: Kamnina se raztegne za 300 odstotkov bolj kot beton.

Pri samem združevanju betona in kamnin je treba upoštevati njihove raztezke pri temperaturnih spremembah, saj je le tako mogoče zagotoviti ustrezno kakovost in varnost vgrajenih materialov. V naslednjih preglednicah so podani rezultati naših izmerjenih kamnin in betonov v suhem in

mokrem cikličnem ogrevanju.

Preglednica 15: Povprečni toplotni raztezek kamnin pri suhem ogrevanju z 20 na 80 °C

VZOREC	ϵ_t [mm/m]	SKUPINA
CAR	0,687	marmor
PAR	0,457	granit
JI	0,418	granit
ROSO-POR-BELI	0,415	marmor
SVIL	0,404	travertin
MC	0,383	granit
GSI	0,372	apnenčev peščenjak
IW	0,345	granit
ROSO-POR-RDEČI	0,336	marmor
SYL	0,301	apnenec
GS	0,280	apnenec
REP	0,274	apnenec

Preglednica 16: Povprečni toplotni raztezek betonov pri suhem ogrevanju z 20 na 80 °C

VZOREC	ϵ_t (mm/m)
REC 3	0,809
REC 5	0,701
REC 4	0,688
REC 1	0,597
REC 2	0,555

Preglednica 17: Povprečni toplotno-hidrični raztezek kamnin pri segrevanju z 20 na 80 °C

VZOREC	ϵ_t [mm/m]	SKUPINA
SVIL	0,747	travertin
PAR	0,695	granit
CAR	0,610	marmor
JI	0,508	granit
IW	0,486	granit
ROSO-POR- RDEČI	0,461	marmor
SYL	0,457	apnenec
GS	0,448	apnenec
MC	0,447	granit
GSI	0,446	apnenčev peščenjak
ROSO-POR- BELI	0,445	marmor
REP	0,392	apnenec

Preglednica 18: Povprečni toplotno-hidrični raztezek betonov pri segrevanju z 20 na 80 °C

VZOREC	ϵ_t (mm/m)
REC 5	0,567
REC 4	0,334
REC 2	0,334
REC 3	0,332
REC 1	0,252

Če upoštevamo linearno naraščanje deformacije z večanjem temperature, potem lahko upoštevamo naslednje podatke:

Kamnine, segrevane v suhem:

Preglednica 19: Povprečni toplotni raztezek kamnin pri segrevanju z 20 na 80 °C v (mm/°C)

VZOREC	$\epsilon_t / ^\circ\text{C}$	SKUPINA
CAR	0,0114	marmor
PAR	0,00761	granit
JI	0,00696	granit
ROSO-POR- BELI	0,00691	marmor
SVIL	0,00673	travertin
MC	0,00638	granit
GSI	0,0062	apnenčev peščenjak
IW	0,00575	granit
ROSO-POR- RDEČI	0,0056	marmor
SYL	0,00501	apnenec
GS	0,00466	apnenec
REP	0,00456	apnenec

Preglednica 20: Povprečni toplotni raztezek betonov pri segrevanju z 20 na 80 °C v (mm/°C)

VZOREC	$\epsilon_t / ^\circ\text{C}$
REC 3	0,0134
REC 5	0,0116
REC 4	0,0114
REC 1	0,00995
REC 2	0,00925

Preglednica 21: Povprečni toplotno-hidrični raztezek kamnin pri segrevanju z 20 na 80 °C v (mm/°C)

VZOREC	$\epsilon_t/^\circ\text{C}$	SKUPINA
SVIL	0,0124	travertin
PAR	0,0116	granit
CAR	0,0101	marmor
JI	0,00846	granit
IW	0,0081	granit
ROSO-POR- RDEČI	0,00768	marmor
SYL	0,00761	apnenec
GS	0,00746	apnenec
MC	0,00745	granit
GSI	0,00743	apnenčev peščenjak
ROSO-POR- BELI	0,00741	marmor
REP	0,00653	apnenec

Preglednica 22: Povprečni toplotno-hidrični raztezek betonov pri segrevanju z 20 na 80 °C v (mm/°C)

VZOREC	$\epsilon_t/^\circ\text{C}$
REC 5	0,00945
REC 4	0,00556
REC 2	0,00556
REC 3	0,00553
REC 1	0,0042

6 DISKUSIJA

Kamnine

Pri izpeljavi preiskav smo skušali biti čim bolj natančni, da bi dobili za preskušane kamnine čim bolj stvarne izsledke, ki bi jih lahko primerjali z izsledki drugih avtorjev.

Začnemo lahko pri toplotnem raztezkcu $\epsilon_{\max 10}$ kamnin. Mladenovič (1998) povzema po Bilbiji (1984) tri klasifikacijske skupine kamnin: širjenje do 0,75mm/m; širjenje do 1,0 mm/m in širjenje do 1,25 mm/m. Vrednosti so določene za temperaturni razpon 100 K, raztezki v diplomski nalogi pa so določeni v razponu 60 °C. To pomeni, da lahko primerjamo samo relativno razvrstitev po skupinah.

Bilbija razvršča v skupino do 0,75 mm/m med drugim tudi marmor, apnenec in travertin. Tudi večina naših preskušancev iz marmorja (ROSO-POR-RDEČI, ROSO-POR-BELI, GSI), apnenca (REP, SYL) in travertin (SVI) je imela raztezke v tem območju. Izjema je marmor carrara, ki je nekoliko prekoračil zgornjo mejo. Izsledke sicer težko primerjamo neposredno, saj je bilo naše temperaturno območje skoraj dvakrat manjše kot pri Bilbiji. Ker pa raztezki za prej navedene kamnine praviloma niso večji od 0,4 mm/m (izjema sta marmorja CAR in ROSO-POR-BELI), lahko sklepamo, da bi tudi pri temperaturnem intervalu 100 K, ostali v mejah za prvo skupino, če so raztezki $\epsilon_{\max 10}$ linearno odvisni od velikosti temperaturnega intervala. Če enako sklepamo tudi pri granitnih bi se granit MC najverjetneje uvrstil v 1. skupino, to je do 0,75 mm/m, granit JI in PAR pa bi najverjetneje izpolnila zahtevo za 2. skupino. To velja tudi za peščenjak svi.

Po analogiji z Bilbijo bi lahko postavili mejo 1. skupine kamnin pri 0,45 mm/m, 2. skupine pri 0,6 mm/m in 3. skupine pri 0,75 mm/m. V prvo skupino sodijo apneneci, apnenčev peščenjak in dva marmorja (GS in ROSO-POR-RDEČI) ter granita MC in IW. V drugi skupini sta granita JI in PAR, travertin in marmor ROSO-POR-BELI. Marmor CAR je zunaj tretje skupine, saj je njegova celotna deformacija skoraj 0,8 mm/m. To pomeni, da v našem primeru posamezne vrste kamnin ni mogoče razvrstiti v razrede. V prvo skupino z raztezkom do 0,75 mm/m sodijo med

drugim tudi marmorji, apnenci in travertini.

Bilbija (1984) omenja, da poroznost vpliva na vrednost toplotnega raztezka kamnine, in sicer zato, ker se minerali lahko raztezajo v porne prostore - to se izraža v manjšem zunanjem raztezeku telesa. Pri našem preskusu, kjer smo uporabili zelo porozni travertin (SVIL), pa smo ugotovili, da se je ta kamnina raztegnila ali deformirala celo bolj kot večina marmorjev in granitov. Mogoče je to zgolj izjema in bi preiskave drugih poroznih kamnin teorijo Bilbije (1984) potrdile.

Vpliva barve kamnine na toplotni raztezek nismo preskušali. Lahko pa domnevamo, da se ta vpliv izraža v samem načinu določanja raztezka, torej v vodi in na zraku. Bistvena razlika je v toplotni prevodnosti medija, vode in zraka. Ker zrak slabše prevaja toploto, je končna temperatura 80 °C dosežena hitreje pri ogrevanju v vodi kot pa pri zračnem ogrevanju, zato je za končno doseženo temperaturo 80 °C potrebno malo več časa. Ta ugibanja in ugotavljanja le-tega so predmet še nadaljnjih preiskav.

Ramana in Sarma (1980) ugotavljata, da se z naraščanjem števila toplotnih ciklov vrednost toplotnega raztezka znižuje. Pri naših poskusih smo ugotovili, da je prirastek deformacije med enim in drugim ciklom največji po prvih nekaj ogrevanjih, pozneje se zmanjšuje, vendar je to zelo odvisno od vzorca in načina ogrevanja. Prirastki zaostale deformacije so na splošno večji pri ogrevanju v vodi in naraščajo tudi po 10 ciklih, pri suhem ogrevanju pa se po nekaj ciklih ustalijo in ponekod celo zmanjšajo.

Bilbija (1984) govori o 20-odstotnih trajnih deformacijah, vendar ne navaja števila ciklov in načina določanja.

Pri naših preskusih so bile zaostale deformacije pri suhem toplotnem ogrevanju minimalne, in zato naj ne bi bistveno vplivale na druge gradbene materiale, s katerimi je kamen povezan, kadar ni vode. Zaradi zaostalih deformacij se je prvotna dolžina preskušancev povečala za okoli 0,04 odstotka.

Drugačen je obseg zaostalih deformacij v povezavi z vodo. Pri nekaterih kamninah namreč znaša toplotno-mokra deformacija, izmerjena pri 20 °C, po desetih ciklih 0,669 odstotka prvotne

dolžine preskušanca; to pomeni, da se 1 m velika plošča, vgrajena ob zunanjih razmerah, lahko poveča za 0,67 cm.

Koch in Sigismund (2004) dokazujeta podobno: da se zaostale deformacije ob suhem toplotnem ogrevanju pojavljajo samo v prvem in drugem cikličnem ogrevanju. Pri toplotno-mokrem ogrevanju pa se te deformacije pojavljajo celotno ciklično obdobje in se povečujejo celo do 35. cikla, kjer trend naraščanja še vedno ne kaže nobenih znakov, da bi se te deformacije ustalile, ampak še vedno enakomerno naraščajo.

Lahko sklenemo, da na hitrost propadanja kamnin vplivajo vrsta kamnine, nihanje temperatur, k še hitrejšemu propadanju pa pripomore vlaga ali voda. Enako so ugotovili tudi pri projektu TEAM (2005).

Betoni

Pri betonih govorimo o umetnih mešanicah različnih sestavin, na katere pa lahko vplivamo: nadziramo količino vgrajenih sestavin, njihovo kakovost, uporabimo različne dodatke, da beton prilagodimo zahtevnosti objekta in podobno. Skratka, pri umetnih mešanicah, kakršna je beton, lahko z ustrezno uporabo sestavin naredimo konglomerat, z bolj ali manj nadzorovanim in predvidljivim razmeram.

Kresal (2002) je v svoji literaturi pri poglavju o spremembi volumna navedel, da se volumen betonske mešanice spremeni že ob samem stiku z vlago. Z našim poskusom smo potrdili tezo, da se volumen betona v povezavi z vlago spremeni. Volumen naravno osušenih vzorcev se je – če so bili namočeni v vodi – po enem dnevu pri sobni temperaturi spremenil ali deformiral.

Budelmann (1989) omenja, da so deformacije betona v temperaturnem razponu 50 °C in 100 °C tem večje, čim večja je temperatura in če je relativna vlaga okolja vzdrževana. Pri tem misli na končno deformacijo zaradi krčenja, ki je posledica sušenja vzorcev pri izbrani temperaturi v tem temperaturnem območju. Pri naših poskusih smo vzorce prej sušili 48 ur pri temperaturi 40 °C, pri tem pa vsakokrat izločili del vode, ki je bila v večjih kapilarnih porah. Z ogrevanjem do 80 °C

smo potem izločali še vodo iz manjših kapilarnih por, in to v vsakem ciklu nekaj vode, tako da se je pri takšni suhi toplotni obravnavi krčenje betona z naraščanjem števila ciklov praviloma večalo.

Drugače pa je bilo, ko so temperaturni cikli potekali v vodi. Tedaj so se betonski vzorci raztezali, saj so bili na začetku razmeroma suhi vzorci prepuščeni delovanju vode. Vodo so postopno vpijali, tako da je bila količina vpite vode iz cikla v cikel praviloma večja do petega cikla; to se je pokazalo v raztezanju betonskih preskušancev. Dodaten razlog za raztezke bi bile lahko tudi mikrorazpoke, ki bi se lahko oblikovale v materialu zaradi temperaturnih ciklov v povezavi z vodo.

7 SKLEP

Namen naših preiskav je bil opredeliti toplotno–hidrične in toplotne lastnosti posameznih vzorcev kamnin in betonov, razlike med posameznimi skupinami ter ugotoviti, kakšna je kompatibilnost naravnih kamnin in različnih mešanic betonov glede na njihove deformacije pri cikličnem ogrevanju (z vodo in brez nje).

Ugotovili smo naslednje:

A) - Različne vrste kamnin in betonov imajo različne raztezke, različne celotne deformacije in različne zaostale deformacije.

- Ogrevanje kamnin brez vlage učinkuje bistveno na samo delovanje kamnine ali na njeno deformacijo, saj je zaostala deformacija potem, ko se temperatura zniža na 20 °C, minimalna in se po nekaj ciklih ogrevanja celo ustali.

- Pri toplotno-hidričnem ogrevanju kamnin, torej ogrevanju v vodi, so deformacije kamnin naraščale, saj se je z vsakim ciklom segrevanja trajna deformacija povečala in se po desetem ciklu ni končala ali ustalila.

- Pri toplotnem ogrevanju betonskih mešanic so se na vzorcih pri prvih dveh ciklih pokazali minimalni raztezki, pozneje pri nadaljnjih ciklih, pa so se vzorci začeli krčiti. Krčenje se je nadaljeval in se po končanih desetih ciklih ni ustalilo. Sklepamo lahko, da bi se tak trend nadaljeval, dokler se večina fizikalno vezane vode ne bi izločila iz preskušancev.

- Pri toplotno-hidričnem ogrevanju betonskih mešanic so deformacije naraščale do približno petega cikla ogrevanja, pozneje pa so se ustalile in le še minimalno nihale. Z nadaljnjimi cikli ne bi dosegli bistvenih sprememb; betoni so očitno do približno petega cikla vpili večino vode, kolikor so jo v teh razmerah lahko.

B) – Toplotno-hidrične lastnosti in toplotne lastnosti so med posameznimi vzorci kamnin tako velike, da na splošno ne moremo govoriti o lastnostih posamezne vrste kamnin (npr. marmorji v

preiskavi imajo tako višje kot tudi nižje vrednosti raztezkov, celotne deformacije in zaostale deformacije).

- Ugotovljeno je bilo, da na deformiranje betonov v obravnavanih razmerah najbolj vplivata količina in vrsta cementa ter vodo-cementno razmerje, vpliva pa tudi količina zračnih mehurčkov.

C) - Pred izdelavo diplomske naloge je bilo sprva videti, da prihaja do poka kamen pri povezavi z betonom predvsem zaradi raztezanja betona. Izkazalo pa se je, da se v suhih razmerah po več ciklih kamnina bistveno bolj deformira kakor beton, in nasprotno: da se betoni po posameznih ciklih ogrevanja raztezajo bolj kakor kamnina. To pomeni, da pokanje verjetno bolj povzročajo razlike v odzivanju obeh materialov, zato je treba le-te z ustrezno izbiro kamna in betonske mešanice kar najbolj zmanjšati. Zelo pomembno je torej opraviti poprejšnje preiskave ali vsaj pregledati literaturo, ki je o tem na voljo, in ugotoviti, kateri materiali imajo približno enake lastnosti ali deformacije. Lastnosti kamnin sicer ne moremo spreminjati, lahko pa izberemo tisto, ki je najmanj občutljiva za temperaturne cikle. Lahko pa spreminjamo lastnosti betona v nekem intervalu, zato je smiselno določiti takšno sestavo betonske mešanice, da se odziv betona na temperaturne cikle čim bolj približa odzivu izbranega kamna.

7 CONCLUSION

The aim of our examination was to characterise the thermal-hydric and thermal properties of particular samples of rock and concrete materials together with the differences between the groups, and also to establish the level of compatibility between natural rocks and different concrete mixtures as regards deformations under cyclic heating (in the presence/absence of water).

The findings are as follows:

A) - different types of rocks and concretes differ in dilatations, total deformations and residual deformations;

- the heating of rocks in the absence of humidity does not substantially affect the performance of the rock, i.e. its deformation, since once the temperature has returned to 20 °C, the residual deformation is minimal; and following several heating cycles, even settles;

- in the case of the thermal-hydric heating of rocks, i.e. heating in the presence of water, the rocks exhibit an increasing trend toward deformation, for, with each heating cycle, the permanent deformation increases and does not cease or settle after the 10th cycle;

- in the case of the thermal heating of concretes, the samples exhibited certain minimal dilatations in the first two cycles, and in subsequent cycles, began to shrink. The trend of shrinking continued and did not settle following the completion of 10 cycles. One might therefore conclude that the trend would continue up to the separation of most of the physically bonded water from the test samples;

- in the case of the thermal-hydric heating of concrete mixtures, the trend of increasing deformations was observed up to approximately the fifth heating cycle, then the deformations settled and exhibited minimal fluctuations. We can state at this point that the continuation of cycles would not produce any significant changes, as prior to approximately the 5th cycle the concretes obviously had absorbed the greater part of such water they were capable of absorbing under the given conditions..

B) - thermal-hydric properties and thermal properties differ so much between individual rock samples that it is practically impossible to establish properties for a particular type of rock in general (e.g., examined marble samples exhibit both high and low values of dilatations, total deformations and residual deformations);

- it was established that the deformations of concrete under examination conditions are mostly affected by the quantity and type of cement and w/c ratio, as well as, to a certain degree,

by the presence of air bubbles.

C) - my original opinion, prior to undertaking this diploma work, was that the cracking of rock joined with concrete was due in the main to the dilatation of concrete. Yet, it turned out that, under dry conditions, following several cycles, the deformations of rocks significantly exceed those of concretes; and vice versa, following individual heating cycles, the dilatations of concretes exceed those of rocks. This suggests that the cracking is more likely due to the differences in the behaviour of the two materials, hence, such differences should be minimised by the appropriate selection of the rock and of the concrete mixture. Accordingly, it is of the utmost importance to carry out preliminary examinations or at least review available literature to establish which materials are similar in characteristics, i.e. deformations. While one cannot change the characteristics of the rock materials, one can select the one least susceptible to temperature cycles. In the case of concrete, we are in a position to manipulate material characteristics within a certain range; hence, it is sensible to specify the concrete mixture so as to obtain the concrete response to temperature cycles similar to that of the selected rock.

8 VIRI

Arioz, O. (2007): Effects of elevated temperatures on properties of concret. Fire Fire Safety Journal 42, str. 516–522. Elsevier.

Bauer, S. J. & Johnson, B. (1979): Effects of slow uniform heating on the physical properties of the Westerley and Charcoal granites. Proc. Symp. Rock Mech., 20, 7–18.

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

Bokan-Bosiljkov, V. (1996): Modificirani betoni pri visokih temperaturah. Doktorska disertacija. Ljubljana.

Budelman, H.: Verhalten von Beton bei maßig erh ohten Betriebs Temperaturen DAfS, zvezek 404.

Cooper, F. & Simmons, G. (1977): The effect of cracks on the thermal expansion of rock. Earth Planet. Sci. Lett., 36, 404–412.

Franzini, M. (1995): Stones in monuments. Natural and anthropogenic deterioration of marble artifacts. Eur. J. Mineral, 1995, št. 7, str 735–743.

Grelk, B., Golterman, P., Schouenborg, B., Koch, A. & Alnæsm L. (2004): The laboratory testing of potential bowing and expansion of marble. In: Prykril, R. (ed.) Dimension Stone 2004, 253–260. AA Balkema Publishers.

Grimšičar, A. (1974): Odpornost marmorja, izpostavljenega temperaturnim spremembam pri laboratorijskih preiskavah z aplikacijo na objektih, Simpozijum Ukrasni i tehnički kamen, Beograd.

Irving, I. (1975): The effect of elevated temperatures on concred and concrete structures fip 3/1 september

Kladnik, R. (1969): Osnove fizike – II. del. Druga, popravljena in dopolnjena izdaja. Državna založba Slovenije. Ljubljana, str. 342.

Koch, A. & Siegesmund, S. (2004): The combined effect of moisture and temperature on the anomalous expansion behaviour of marble. *Environmental Geology*, 46, 350–363. Springer-Verlag.

Kresal, J. (2002): Gradnja v arhitekturi. Učbenik za arhitekturo. Univerza v Ljubljani.

Lankard, D. R, Birkimer D. L, Fondrist F. F, Snyder M. J. (1968): Effect of moisture content on the structural properties of portland cement concrete exposed to temperatures up to 500 F. *Ali, Sp-25*, str. 59–103.

Mauko, A. (2004): Ukrivljanje fasadnih plošč iz slovenskega naravnega kamna. Diplomsko delo. Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta

McGrevy, J. P. (1985): Thermal properties as controls on rock surface temperature maxima, and possible implications for rock weathering. *Earth Surface Processes and Landforms*, 10, 125–136. John Wiley and Sons.

Mladenovič, A. (1998): Toplotne in elastične lastnosti izbranih vrst slovenskega naravnega kamna. Magistrsko delo. Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta.

Radič, J. (2006): Betonske konstrukcije – Priročnik. Hrvatska sveučilišna naklada: Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet.

Ramana, Y. V. & Sarma, L. P. (1980): Thermal expansion of a few indian granitic rocks. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 22, (1), 36–41.

Rzhevsky, V. & Novik, G. (1971): The Physics of rocks. 320 str. Mir Publishers. Moskva.

Sage, J. D. (1988): Thermal microfracturing of marble. *Engineering Geology of Ancient works*,

Monuments and Historical Sites, str. 1013–1018.

Schneider, V. (1982): Verhalten von Beton bei hohen Temperaturen DAfS, zvezek 337.

Seeberger, J. Kropp, J. Hilsedorf H. K. (1985): Festigkeitverhalten und Strukturanderungen von Beton bei Temperaturbeanspruchung bis 250 °C DAfS zvezek 360.

TEAM – Testing and assessment of marble and limestone – Final technical report (2005).
SP Swedish National Testing and Research Institute.

Van Vlack, L. H. (1970): Materials science of engineers. Adison-Wesley Publishing Company.

Widhalm, C., Tschegg, E. & Eppensteiner, W. (1996): Anisotropic thermal expansion causes deformation of marble claddings. Journal of Performance of Constructed Facilities, 10/1, str. 5–10.

Wong, T. F. & Brace (1979): Thermal expansion of rock: some measurements at high pressure. Tectonophysics, 57, 95.

Seznam slik

Slika 1: Ukrivljanje fasadne plošče iz marmorja na objektu v Ljubljani (foto: arhiv ZAG).....	8
Slika 2: Počena kamnita preklada.....	10
Slika 3: Koefficient toplotnega raztezka v smeri največjega (rdeča krivulja) in najmanjšega (črna krivulja) raztezanja (Widhalm et al. 1996).....	27
Slika 4: Zaostala deformacija po cikličnem ogrevanju vzorcev marmorja v različnih razmerah. Z različno barvo so označeni različni preskušanci vzorca kamnine glede na njihovo usmerjenost. Preskušanci so bili najprej ogrevani v suhem (8 ciklov) in nato v vodi (nadaljnjih 25 ciklov) v temperaturnem območju od 20 do 80 °C (vir: Koch & Siegesmund, 2004)	28
Slika 5: Razlika v zaostali deformaciji izbranega marmorja iz Norveške v odvisnosti od števila ciklov – razmer staranja (wet – ogrevanje v vodi, dry – suho ogrevanje, dry/wet – ogrevanje z vodo nasičenih preskušancev) – vir: Grelk et al., 2004.....	29
Slika 6: Vpliv vodo-cementnega razmerja na tlačno trdnost (povzeto po Kresal, 2002).....	33
Slika 7: Sovisnost med krčenjem in vlažnostjo betona pri povišanih temperaturah po 24, 100, 500 in 1440 urah sušenja (Budelmann, 1989).....	36
Slika 8: Preostala tlačna trdnost betonov: (a) ogrevanih v zapečatenem stanju, (b) ki so se med ogrevanjem neovirano sušili.....	37
Slika 9: Preostala natezna trdnost betonov: (a) ogrevanih v zapečatenem stanju, (b) ki so se med ogrevanjem neovirano sušili.....	38
Slika 10: Preostali modul razteznosti betonov: (a) ogrevanih v zapečatenem stanju, (b) ki so se med ogrevanjem neovirano sušili.....	39
Slika 11: Delež vlage v betonu po prosti izsušitvi pri visoki temperaturi (v Bokan-Bosiljkov, 1996).....	40
Slika 12: Modul razteznosti betona po obremenitvi s stacionarno temperaturo (Budelmann1989)	42
Slika 13: Tlačna trdnost betona po obremenitvi s stacionarno temperaturo (Budelman, 1989) ...	43
Slika 14: Cepilna natezna trdnost betona po obremenitvi s stacionarno temperaturo (Budelmann, 1989).....	44
Slika 15: Izguba mase (slika a) in zmanjšanje relativne trdnosti (slika b) betona pri povišanju temperature (Arioz, 2007)	46
Slika 16: Površinska tekstura betonskega preskušanca, izpostavljenega visoki temperature (Arioz,	

2007).....	47
Slika 17: Standardni mešalnik za malto	53
Slika 18: Digitalna tehtnica (natančnost 2 g, zmogljivost 12 kg).....	53
Slika 19: Stresalna mizica za določanje konsistence.....	54
Slika 20: Sejalna sita za določanje zrnastostne sestave agregatov.....	54
Slika 21: Standardni tridelni kalup za izdelavo prizmic 4*4*16 ccm ³	55
Slika 22: Toplotna kopel za ogrevanje vzorcev med določanjem toplotno-hidrične ekspanzije ..	56
Slika 23: Naprava za merjenje spremembe dolžine.....	56
Slika 24: Skica preskušanca za določanje toplotno – hidrične ekspanzije (a – stranski ris, b – tloris).....	57
Slika 25: Shematski prikaz temperaturne krivulje ogrevanja in ohlajanja (zgoraj) in ekspanzijske krivulje s prikazanimi parametri (spodaj). Pri tem je $\epsilon_{\max 10}$ celotna deformacija, ϵ_{pn} trajna deformacija in ϵ_t toplotni raztezek.	59
Slika 26: Raztezki in suha toplotna deformacija vzorca IW	61
Slika 27: Rezidualna toplotna deformacija vzorca IW	61
Slika 28: Raztezki in suha toplotna deformacija vzorca JI.....	62
Slika 29: Rezidualna toplotna deformacija vzorca JI	62
Slika 30: Raztezki in suha toplotna deformacija vzorca MC	63
Slika 31: Rezidualna toplotna deformacija MC	63
Slika 32: Raztezki in suha toplotna deformacija vzorca PAR.....	64
Slika 33: Rezidualna toplotna deformacija PAR.....	64
Slika 34: Raztezki in suha toplotna deformacija vzorca REP	65
Slika 35: Rezidualna toplotna deformacija REP	65
Slika 36: Raztezki in suha toplotna deformacija vzorca CAR	66
Slika 37: Rezidualna toplotna deformacija CAR	66
Slika 38: Raztezki in suha toplotna deformacija vzorca GS	67
Slika 39: Rezidualna toplotna deformacija GS	67
Slika 40: Raztezki in suha toplotna deformacija vzorca ROSO-POR–RDEČI.....	68
Slika 41: Rezidualna toplotna deformacija ROSO- POR–RDEČI.....	68
Slika 42: Raztezki in suha toplotna deformacija vzorca ROSO-POR.-SVETLI.....	69
Slika 43: Rezidualna toplotna deformacija ROSO-POR-SVETLI.....	69
Slika 44: Raztezki in suha toplotna deformacija vzorca SYL	70
Slika 45: Rezidualna toplotna deformacija SYL	70

Slika 46: Raztezki in suha toplotna deformacija vzorca SVIL.....	71
Slika 47: Rezidualna toplotna deformacija SVIL.....	71
Slika 48: Raztezki in suha toplotna deformacija vzorca GSI.....	72
Slika 49: Rezidualna toplotna deformacija GSI.....	72
Slika 50: Raztezki in suha toplotna deformacija vzorca REC 1.....	73
Slika 51: Rezidualna toplotna deformacija REC 1.....	73
Slika 52: Raztezki in suha toplotna deformacija vzorca REC 2.....	74
Slika 53: Rezidualna toplotna deformacija REC 2.....	74
Slika 54: Raztezki in suha toplotna deformacija vzorca REC 3.....	75
Slika 55: Rezidualna toplotna deformacija REC 3.....	75
Slika 56: Raztezki in suha toplotna deformacija vzorca REC 4.....	76
Slika 57: Rezidualna toplotna deformacija REC 4.....	76
Slika 58: Raztezki in suha toplotna deformacija vzorca REC 5.....	77
Slika 59: Rezidualna toplotna deformacija REC 5.....	77
Slika 60: Raztezki in toplotno-hidrična deformacija vzorca IW.....	78
Slika 61: Rezidualna toplotna deformacija IW.....	78
Slika 62: Raztezki in toplotno-hidrična deformacija vzorca JI.....	79
Slika 63: Rezidualna toplotna deformacija JI.....	79
Slika 64: Raztezki in toplotno-hidrična deformacija vzorca MC.....	80
Slika 65: Rezidualna toplotna deformacija MC.....	80
Slika 66: Raztezki in toplotno-hidrična deformacija vzorca PAR.....	81
Slika 67: Rezidualna toplotna deformacija PAR.....	81
Slika 68: Raztezki in toplotno-hidrična deformacija vzorca REP.....	82
Slika 69: Rezidualna toplotna deformacija REP.....	82
Slika 70: Raztezki in toplotno-hidrična deformacija vzorca CAR.....	83
Slika 71: Rezidualna toplotna deformacija CAR.....	83
Slika 72: Raztezki in toplotno-hidrična deformacija vzorca GS.....	84
Slika 73: Rezidualna toplotna deformacija GS.....	84
Slika 74: Raztezki in toplotno-hidrična deformacija vzorca ROSO-POR-RDEČI.....	85
Slika 75: Rezidualna toplotna deformacija ROSO-POR-RDEČI.....	85
Slika 76: Raztezki in toplotno-hidrična deformacija vzorca ROSO-POR-SVETLI.....	86
Slika 77: Rezidualna toplotna deformacija ROSO-POR-SVETLI.....	86
Slika 78: Raztezki in toplotno-hidrična deformacija vzorca SYL.....	87

Slika 79: Rezidualna toplotna deformacija SYL	87
Slika 80: Raztezki in toplotno-hidrična deformacija vzorca SVIL	88
Slika 81: Rezidualna toplotna deformacija SVIL.....	88
Slika 82: Raztezki in toplotno-hidrična deformacija vzorca GSI.....	89
Slika 83: Rezidualna toplotna deformacija GSI	89
Slika 84: Raztezki in toplotno-hidrična deformacija vzorca REC 1	90
Slika 85: Rezidualna toplotna deformacija REC 1	90
Slika 86: Raztezki in toplotno-hidrična deformacija vzorca REC 2	91
Slika 87: Rezidualna toplotna deformacija REC 2.....	91
Slika 88: Raztezki in toplotno–hidrična deformacija vzorca REC 3.....	92
Slika 89: Rezidualna toplotna deformacija REC 3.....	92
Slika 90: Raztezki in toplotno-hidrična deformacija vzorca REC 4	93
Slika 91: Rezidualna toplotna deformacija REC 4.....	93
Slika 92: Raztezki in toplotno-hidrična deformacija vzorca REC 5	94
Slika 93: Rezidualna toplotna deformacija REC 5.....	94

Seznam preglednic

Preglednica 1: Toplotni raztezek kamna pri temperaturnem gradientu 100 K (Bilbija, 1984 v Mladenovič, 1998).....	18
Preglednica 2: Koeficienti toplotnega raztezanja mineralov (Rzhevsky in Novik, 1971)	20
Preglednica 3: Linearni razteznostni koeficient kamnin (v Mladenovič, 1998)	21
Preglednica 4: Temperaturni razteznostni koeficient nekaterih gradbenih materialov (Kladnik, 1969).....	23
Preglednica 5: Seznam vzorcev kamnin, poreklo, ime in opis.....	48
Preglednica 6: Seznam vzorcev betonov in njihova sestava.	50
Preglednica 7: Prikaz celotne deformacije vzorcev, merjene v mokrem	95
Preglednica 8: Prikaz celotne deformacije preskušancev, merjene v mokrem.....	96
Preglednica 9: Prikaz celotne deformacije betona, določene v mokrem ciklu.....	97
Preglednica 10: Prikaz celotne deformacije betona, določene v suhem ciklu.....	97
Preglednica 11: Razvrstitev vzorcev kamna glede na raztezek, merjen v mokrem	100
Preglednica 12: Razvrstitev vzorcev kamna glede na raztezek, merjenih v suhem	101
Preglednica 13: Razvrstitev vzorcev betona glede na raztezek, merjenih v mokrem	102
Preglednica 14: Razvrstitev vzorcev betona glede na raztezek, merjenih v suhem	103
Preglednica 15: Povprečni toplotni raztezek kamnin pri suhem ogrevanju z 20 na 80 °C	106
Preglednica 16: Povprečni toplotni raztezek betonov pri suhem ogrevanju z 20 na 80 °C	106
Preglednica 17: Povprečni toplotno-hidrični raztezek kamnin pri segrevanju z 20 na 80 °C.....	107
Preglednica 18: Povprečni toplotno-hidrični raztezek betonov pri segrevanju z 20 na 80 °C.....	107
Preglednica 19: Povprečni toplotni raztezek kamnin pri segrevanju z 20 na 80 °C v (mm/°C)..	108
Preglednica 20: Povprečni toplotni raztezek betonov pri segrevanju z 20 na 80 °C v (mm/°C).	108
Preglednica 21: Povprečni toplotno-hidrični raztezek kamnin pri segrevanju z 20 na 80 °C v (mm/°C).....	109
Preglednica 22: Povprečni toplotno-hidrični raztezek betonov pri segrevanju z 20 na 80 °C v (mm/°C).....	109

Slovar izrazov

Anizotropija – pojav, da imajo nekatere snovi v raznih smereh različne fizikalne lastnosti. Npr. kalcit ima različne toplotne raztezke v različni kristalografski smeri.

Dezintegracija marmorja – izpadanje zrn v marmorju zaradi anizotropnega raztezka kalcitnih poligonalnih zrn.

Lepljene kamnite obloge – kamnita plošča, lepljena na nosilno podlago brez zračne plasti.

Zračene kamnite obloge – kamnita obloga sidrana na nosilno konstrukcijo z vmesno zračno plastjo.

Dilatacijska rega – razmik med dvema ploščama

Ukrivljenje kamnitih plošč (angl. bowing) – ukrivitev kamnite plošče zaradi povečanja vlage ali temperature.

Toplotno–hidrični raztezek – raztezek, ki se pojavi v vlažnih–mokrih razmerah pri povišani temperaturi.

Toplotni raztezek – raztezek, ki se pojavi v suhih razmerah pri povišani temperaturi.

Rezidualna (trajna) deformacija – deformacija po desetih končanih ciklih pri elementu ohlajenem, na 20 oC.

Porfirska struktura – struktura, značilna za predornine z vtrošniki (večjimi dobro razvitimi kristali) v steklasti ali mikrokristalni osnovi.

Porfiroidna struktura – struktura žilnin in subvulkanskih globočin z velikimi vtrošniki in debelozrnato osnovo.

Litifikacija – spreminjanje na novo odloženih sedimentov v trdno kamnino.

Tekstura – prostorska razvrščenost in/ali usmerjenost sestavin v kamnini ali na površini kamnine ali v nekaterih primerih kristalografska orientacija kristalov v kamnini.

Porni sistem – sistem por v kamnini.

Moker toplotni raztezek – raztezek preskušanca v določenem temperaturnem intervalu, ki je bil ogrevan s segrevanjem vode. V tej nalogi smo ga podali v mm/m.

Celotna deformacija – je maksimalna ekspanzija (deformacija), kamnine, pri čemer se upošteva tako raztezek med ogrevanjem kot tudi zaostala deformacija zaradi poprejšnjega ogrevanja in ohlajanja. V nalogi smo določali mokro maksimalno ekspanzijo (preskušanci so bili ogrevani v vodi) in suho maksimalno ekspanzijo (preskušanci so bili ogrevani v sušilniku).

Razpoklinski sistem – sistem razpok v kamnini.

Kohezija zrn – stik med zrn.

Poligonalna zrna – zrna z rahlo ukrivljenimi mejami med zrn.

Ksenoblastična struktura – struktura nepravilnih zrn, pri katerih niso vidne kristalne ploskve.

Amorfna snov – snov brez kristalne strukture.

Anizotropna lastnost – lastnost materiala, ki ima zaradi notranje zgradbe v različnih smereh različne fizikalne lastnosti.

Toplotni raztezek α – raztezek minerala, kamnine zaradi ogrevanja. Včasih je lahko toplotni raztezek tudi negativen (torej gre za skrčec) zaradi anizotropnih lastnosti mineralov (npr. kalcit) ali poliformne spremembe minerala (npr. kremen). Izražamo ga kot 10^{-6} m/K. V praksi se toplotni raztezek podaja kot relativna deformacija glede na temperaturno spremembo (kot v našem primeru). V tem primeru ga podamo v m/m K ali v mm/mK.

Razkolne ploskve – ploskve v kristalu, vzporedne značilnim kristalografskim smerem, po katerih se kristal razkolje

Konstruktivni beton – beton za nosilne konstrukcije ali elemente konstrukcij.

Kristalizacijski pritisk – pritisk, ki nastane zaradi prehoda iz plinastega, tekočega ali disperznega stanja v trdno kristalno zgradbo.

BIBLIOGRAFSKO–DOKUMENTACISKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 691.2/.3(043.2)
Avtor: Matej Zavasnik
Mentorica: Violeta Bokan Bosiljkov
Naslov: Toplotno-hidrična kompatibilnost izbranih vrst naravnega kamna in betona za uporabo v gradbeništvu

Obseg in oprema: 130 str., 22 preglednic, 93 slik, 7 enačb.

Ključne besede: naravni kamen, beton, toplotno-hidrična kompatibilnost

Izvleček

Diplomsko delo obravnava kompaktilnost naravnega kamna in betona, ki se v gradbeništvu pojavljata skupaj pri vgrajevanju. Za zgled smo vzeli 12 različnih vrst naravnega kamna in pripravili 5 različnih betonskih mešanic. Vzorce smo nato ciklično segrevali in ohlajali. Testirali smo jih v suhem (ogrevanje v peči) in mokrem (ogrevanje vzorcev v vodi). Izbrane vzorce smo preskušali po predlogu standarda za določanje toplotno-hidrične ekspanzije kamnin (TEAM WP6 2 – uge – 050228).

Po končani prvi fazi in vseh opravljenih meritvah smo vse testirane vzorce analizirali in jih medsebojno primerjali. Iz analize meritev smo ugotovili, da se vzorci pri povišani temperaturi odzivajo zelo različno, in to v suhem ali v mokrem. Zato je treba, preden jih uporabimo, preveriti njihove termične lastnosti.

BIBLIOGRAPHY AND DOCUMENTATION PAGE INCLUDING THE ABSTRACT

UDK: 691.2/.3(043.2)
Author: Matej Zavasnik
Mentor: Violeta Bokan Bosiljkov
Title: Thermal and Hydric Compatibility of the Chosen Types of Natural Stone and Concrete in Building Industry Applications

Scope and supporting material: 130 pp., 22 spreadsheets, 93 images, 7 equations

Key words: natural stone, concrete, thermal and hydric compatibility

Abstract

This diploma thesis deals with the compatibility of natural stone and concrete which are used together in building industry applications. As examples we prepared 12 different types of natural stone and 5 different concrete mixes. The samples were then subjected to heating and cooling cycles. They were tested in dry (heated in an oven) and wet (cooled in water) environments. The selected samples were tested on the basis of the standard for determining the thermal and hydric expansion of rocks (TEAM WP6 2 – uge – 050228).

After the completion of phase one and the measurements, all tested samples were analysed and compared to each other. The measurement analyses have led us to conclude that the samples react very differently to increased temperatures, both in dry and wet environments. This means that their thermal properties have to be examined prior to using them.