

## POROČILO

o PREISKAVAH IZVEDENIH na REPLIKI OBELISKA ROBOVEGA  
VODNJAKA na MESTNEM TRGU v LJUBLJANI

Naročnik: ZVKDS, Restavratorski center  
Poljanska 40  
1000 LJUBLJANA

Naročilo: naročilnica št. 3-342/2013 ze dne 07.10.2013

DN: 02-114-13/IL

Nosilec naloge:

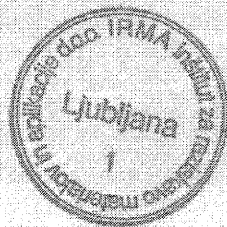
Iztok Leskovar, univ. dipl. inž. grad.

Direktor:

dr. Jakob Šušteršič, univ. dipl. inž. grad.

Sodelavec:

Jan Celar



november 2013

Slovenčeva 95, 1000 Ljubljana  
Laboratorij: OIC Trzin  
Špruha 18, 1236 Trzin  
www.irma.si

tel +386 1 562 10 19  
fax +386 1 562 10 13  
okrožno sodišče v Ljubljani  
štev. reg. vpisa: 1/20145/00  
osnovni kapital: 12.519,00 eur  
ID številka za DDV: S187584239  
matična številka: 5672872  
TRR: 03131-1009678565  
pri SKB d.d. Ljubljana  
IBAN: SI56 0313 1100 9678 565  
SWIFT (BIC KODA): SKBAS12X



irma inštitut za raziskavo  
materialov in aplikacije d.o.o  
ljubljana, slovenčeva 95  
slovenija

## 1.0 UVOD

Robbov vodnjak, ki ga je med letoma 1743 in 1751 izdelal beneški kipar in arhitekt Francesco Robba je bil v preteklosti večkrat popravljen, še posebej po potresu leta 1895 in ob urejanju sedanjega Mestnega trga po Plečnikovih načrtih. Zadnjo prenovo je spomenik doživel leta 2006, ko so original zaradi ogroženosti odstranili in restavriranega postavili v Narodni galeriji, na njegovo mesto pa postavili repliko.

Replika je izdelana iz istih materialov, kot original.

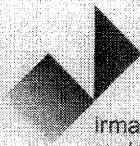
Obelisk in njegova replika sta izdelana iz apnenca Lesno Brdo. Kamen je v osnovi sive in rožnato rdeče barve ( železovi oksidi ), njegovo dekorativnost pa poudarjajo žile in leče belega ter rumenkastega sparitnega kalcita, kakor tudi rdeča, rožnata, rumenkasta ali bela gnezda zrnatega poznodiagenetskega dolomita, ki nastopa v obliki romboedrskih kristalov. Številne so žilice in žile, ki so zapolnjene z rdečkastim in zelenkastim glinastim laporovcem, kar vpliva na zmanjšanje trdnosti kamnine. Mestoma se pojavljajo posamezna drobna zrna pirita in kremenca ter stilolitni šivi.



Sl.1: Pogled na Robbov vodnjak s strani Tromostovja

V oktobru 2013 so strokovnjaki Restavratorski centra v okviru rednih vzdrževalnih del na spomeniku registrirali poškodbe, predvsem v obliki razpok in luščenja površinskih plasti kamna.





Irma inštitut za raziskavo  
materialov in aplikacije d.o.o  
Ljubljana, slovenčeva 95  
slovenija

## 2.0 PREISKAVE

Da bi ugotovili vzroke za nastanek poškodb smo na obelisku izvedli preiskave, ki so obsegale:

- pregled projekta in dokumentacije o izdelavi in postavitvi nadomestne kopije spomenika v letu 2006,
- detajlni pregled in izdelavo katastra razpok ( kataster je izdelala predstavnic RS ),
- ugotavljanje pozicije, premera in globine vgrajenih armaturnih palic s profometersko metodo,
- meritve globine razpok ,
- izvedbo sondažnih vrtn v liniji poteka armaturnih palic z namenom preverjanja ev. korozije armaturnih palic,
- numerično analizo z izračunom vpliva temperaturnih obremenitev in sprememb na nastanek razpok.

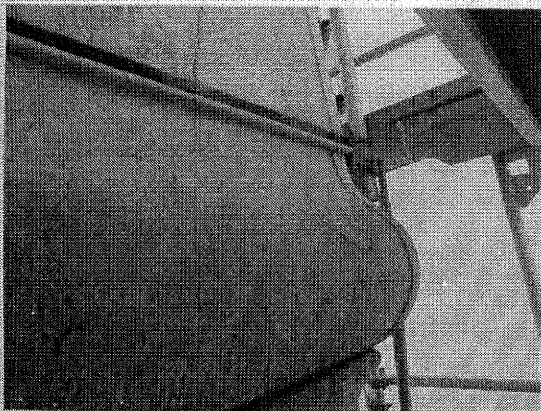
### 2.1 Detajlni pregled obeliska- kataster poškodb

Detajlni pregled obeliska je bil izveden iz gradbenega odra, ki je bil za potrebe vzdrževanja postavljen po celotni višini obeliska.

Poškodbe registrirane med pregledom so bile detajlno posnete in so prikazane v katastru razpok, ki ga izdelala sodelavka Restavratorskega centra. V katastru so detajlno prikazane pozicije in širine razpok.

Sicer pa lahko na osnovi detajlnega pregleda ugotovimo, da so na obelisku prisotne razpoke, ki jih glede na njihov potek razdelimo v dve skupini in sicer:

a) razpoke v liniji žil in žilic v kamnu, ki so sporadično razdeljene po celotni površini obeliska

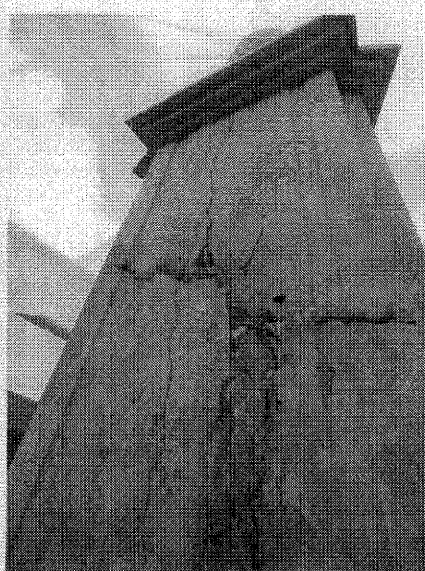


Sl. 2a in 2b: Razpoke v liniji žil v kamnu



irma inštitut za raziskavo  
materialov in aplikacije d.o.o  
ljubljana, slovenčeva 95  
slovenija

b) kontinuirane razpoke, ki potekajo v navpični smeri v sredinskem delu posameznih mejnih ploskev obeliska in sicer nad vgrajenimi armaturnimi palicami. Najizrazitejša je razpoka na ploskvi, ki je locirana proti Tromostovju in poteka po celotni višini obeliska. Razpoke potekajo do globine vgrajene armaturne palice in so širine reda velikosti 0,5 do 1mm.



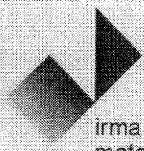
Sl. 3a in 3b: Vertikalne razpoke

Na posameznih delih obeliska je prisotno površinsko luščenje kamna. Lokacije so vezane predvsem na področja v kamnu, kjer je prisotna gosta mreža žil in žilic v njem.

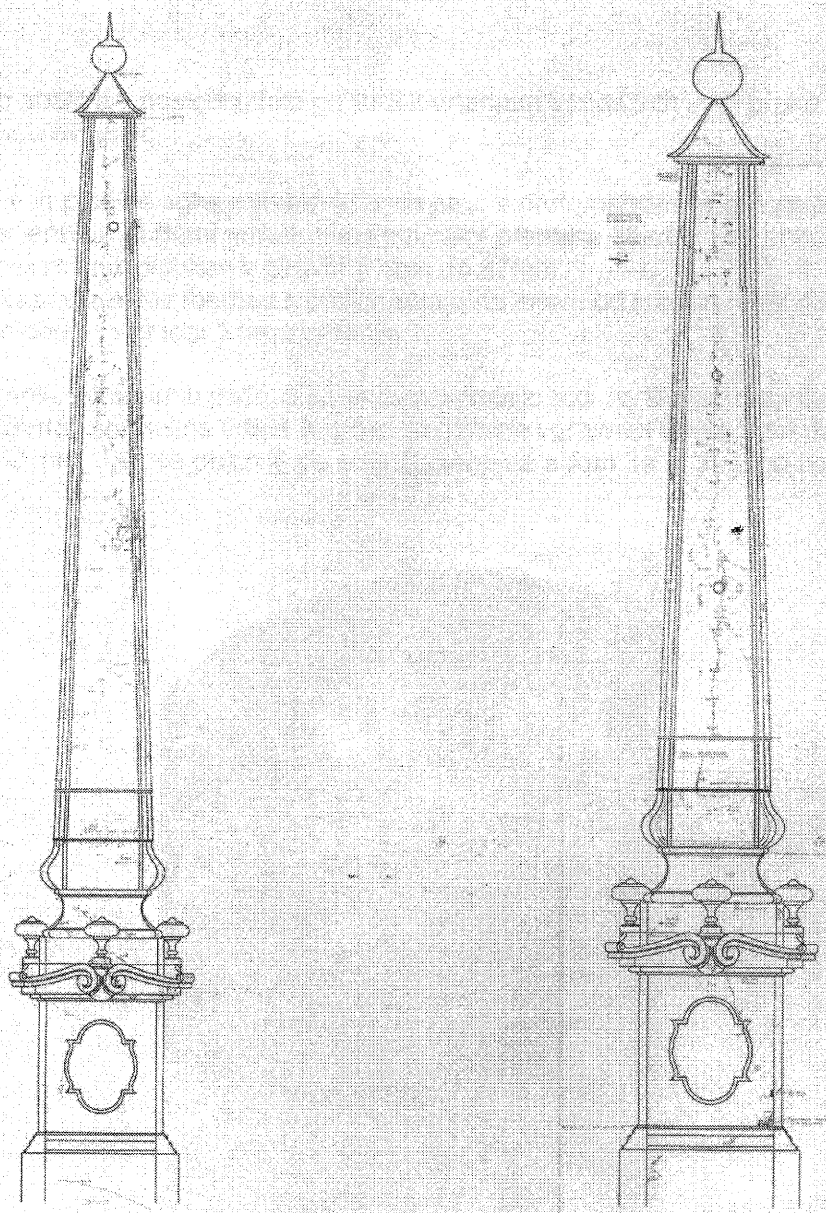


Sl. 4a in 4b: Začetek luščenja kamna na površini z gosto mrežo žil ter luščenje kamna





irma inštitut za raziskavo  
materialov in aplikacije d.o.o  
ljubljana, slovenčeva 95  
slovenija



Sl. 5a in 5b : Kataster razpok na stranicah proti stolnici in Tromostovju z oznako izvedenih sondažnih vrtin

## 2.2 Premer, pozicija in vrsta vgrajenih armaturnih palic ter globina razpok

Glede na to, da razpoke opisane pod tč 2.1. a potekajo v izrazito vertikalni smeri smo predvidevali, da razpoke potekajo nad armaturnimi palicami, kar smo preverili najprej s



irma Inštitut za raziskavo  
materialov in aplikacije d.o.o  
ljubljana, slovenčeva 95  
slovenija

profometersko analizo v naslednji fazi pa tudi z vrtnjem sondažnih vrtin preko razpok do vgrajenih armaturnih palic.

Meritve pozicije in globine vgrajenih armaturnih palic s profometrom so pokazale, da je kamniti presek armiran s tremi armaturnimi palicami premera 36 mm, ki potekajo navpično v sredini vseh treh mejnih ploskev v globini 61mm do 87mm.

Detajnejši prikaz rezultatov meritev s profometrom na enem od mernih mest na stranici proti Tromostovju je podan v prilogi 1 tega poročila.

V liniji registriranih armaturnih palic, s katerimi sovpadajo tudi vertikalne razpoke, smo na treh pozicijah izvržali sondažne vrtine in sicer do globine vgrajenih armaturnih palic. Vrtine so bile premera 50 mm, njihove pozicije pa so prikazane na slikah 3a in 3b tega poročila.



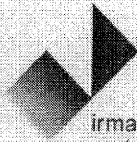
Sl.6: Armaturna palica v sondažni vrtini V2

Sondiranje je potrdilo, da je premer vgrajenih armaturnih palic 36mm armaturne palice pa so izdelane iz rebrastega železa s spiralnimi rebri.

Med sondiranjem je bila na stiku med armaturnimi palicami in kamnom registrirana tanka plast epoksidne smole, s katero so bili zatesnjeni prazni prostori med izvrtino in vgrajeno armaturno palico (injektiranje vrtin po vstavitvi armaturnih palic).

Na mestih izvedenih sond je bila registrirana površinska korozija armaturnih palic, a je le-ta omejena po globini in obsegu.





irma inštitut za raziskavo  
materialov in aplikacije d.o.o  
ljubljana, slovenčeva 95  
slovenija

Sondiranje je pokazalo tudi, da vertikalne razpoke potekajo do globine vgrajene armaturne palice.

### 2.3 Numerična analiza in izračun vpliva temperature na nastanek razpok

Numerično analizo je izdelala Elea iC. Rezultati analize so v celoti podani v prilogi 2 tega poročila, na tem mestu pa povzemamo bistvene zaključke izdelane analize:

Temperaturne spremembe na monolitnem kamnu, brez žil ne bi mogle povzročiti nastanek vertikalnih razpok, predstavljajo pa dodatno obremenitev, ki lahko vpliva na nadaljne širjenje in daljšanje že nastale razpoke oz. lahko povzročijo nastanek razpok v delu kamna, z bistveno zmanjšano natezno trdnostjo ( žile v kamnu ) .

Z analizo je ugotovljeno, da armaturne palice ne vplivajo bistveno na razporeditev temperature po prerezu obeliska, primerjava deformacijskega stanja armiranega in nearmiranega preseka pa, da armaturne palice ne vplivajo bistveno na velikost in smer deformacij in da je v obeh primerih prekoračena natezna trdnost kamnine z žilami.

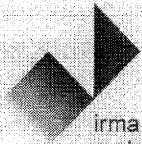
### 3.0 ZAKLJUČEK

Na kamnitem bloku, iz katerega je bil izdelan obelisk, so bile v linijah žil najverjetneje že v osnovi prisotne mikrorazpoke, ki so se zaradi vpliva atmosferskih dejavnikov v času eksploatacije povečevale. Razpoke v žilah so lahko nastale tudi zaradi procesov izmeničnega zmrzovanja in odtaljevanja, saj je material v žilah kamna ( glinasti laporovec ) porozen in vodovpojen.

Tudi luščenje površinskih slojev je vezano na površine, na katerih je prisotna gosta mreža žil in žilic v kamnu. Luščenje je posledica zmrzovanja .

Izrazite razpoke v navpičnih linijah, ki potekajo kontinuirano na vseh treh mejnih ploskvah obeliska, imajo po našem mnenju prav tako inicial v žili kamna. Nastala razpoka se je tekom eksploatacije širila in daljšala pod vplivom temperaturnih obremenitev ter zmrzovanja vode, ki je prodrla v razpoko. Voda je tako preko razpok v žilah prodrla tudi do vgrajenih armaturnih palic, na kar kažejo začetki korozije na armaturi. Pritiski zaradi zmrzovanja vode, ki je prodrla ob armaturno palico so v nadaljevanju povzročili širjenje in napredovanje razpoke vzdolž vgrajene armaturne palice. Proces se je najhitreje odvil na zgornjih površinah obeliska, kjer je sam presek obeliska najmanjši najmanjše pa so tudi debeline plasti kamna nad vgrajeno armaturo.

Razpoka se širi od zgoraj navzdol, na kar kaže razporeditev razpok na posameznih stranicah ( glej kataster razpok ) Na stranici proti Tromostovju poteka razpoka po celotni višini obeliska, na stranici proti Stolnici pa vertikalna razpoka poteka od vrha do približno polovice višine obeliska.



irma inštitut za raziskavo  
materialov in aplikacije d.o.o  
ljubljana, slovenčeva 95  
slovenija

Opisan potek razpok dokazuje tudi to, da ima relativno velik vpliv na širjenje razpoke temperatura, saj so ravno na stranici proti Tromostovju temperaturne obremenitve največje ( južna stran ).

V okviru **sanacije** bi bila na obstoječem obelisku potrebno izvesti tesnitev vseh razpok ( mikroinjektiranje in površinska tesnitev z restavriranjem saniranih površin ), reparacije poroznega in vodovpojnega materiala v žilah kamna ter zaščito vseh površin proti prodoru vlage - zaščitni brezbarvni impregnacijski premaz )

Alternativa sanaciji je, glede na veliko število razpok in potencialnih mest za njihov nastanek ( žile v kamnu ), kot tudi glede na to, da bo zaradi nastalih poškodb ne glede na izvedeno sanacijo potrebno povečati obseg rednega vzdrževanja, izdelava novega obeliska iz umetnega kamna.

#### **PRILOGI:**

1. Rezultati meritev s profometrom
2. Numerična analiza vzrokov za razpokanost obeliska ( Elea iC)



Quickscan:

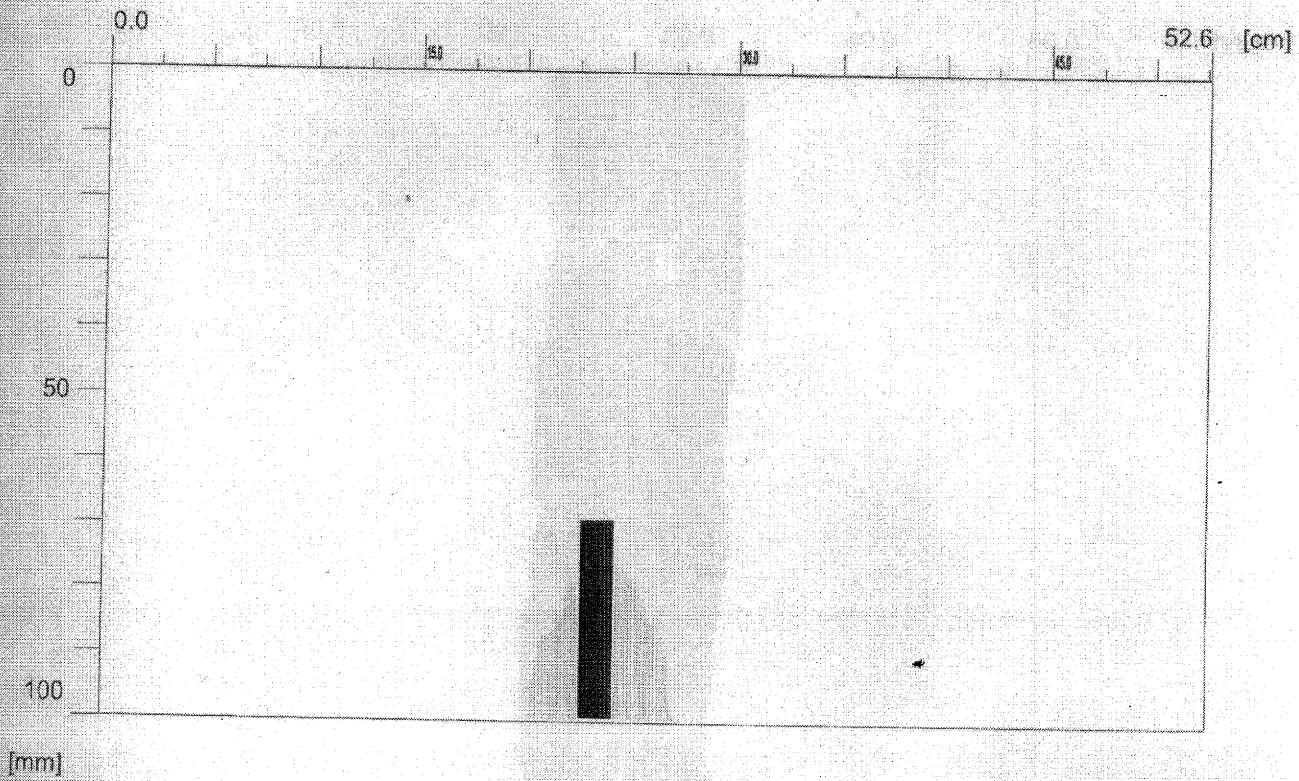
FQ000199.XFF

Date / Time:

2013-10-11 08:20:37

Bar: 16mm

SSN: 19207006



Quickscan Statistics:

Minimum Coverage: 69 mm

Maximum Coverage: 69 mm

Mean Coverage: 69 mm

Standard Deviation: 0 mm

Cut-Off: 100 mm

#Bars at Cut-Off: 1

T1: 100 mm

#Bars at T1: 1

T2: 100 mm

#Bars at T2: 1

T3: 100 mm

#Bars at T3: 1

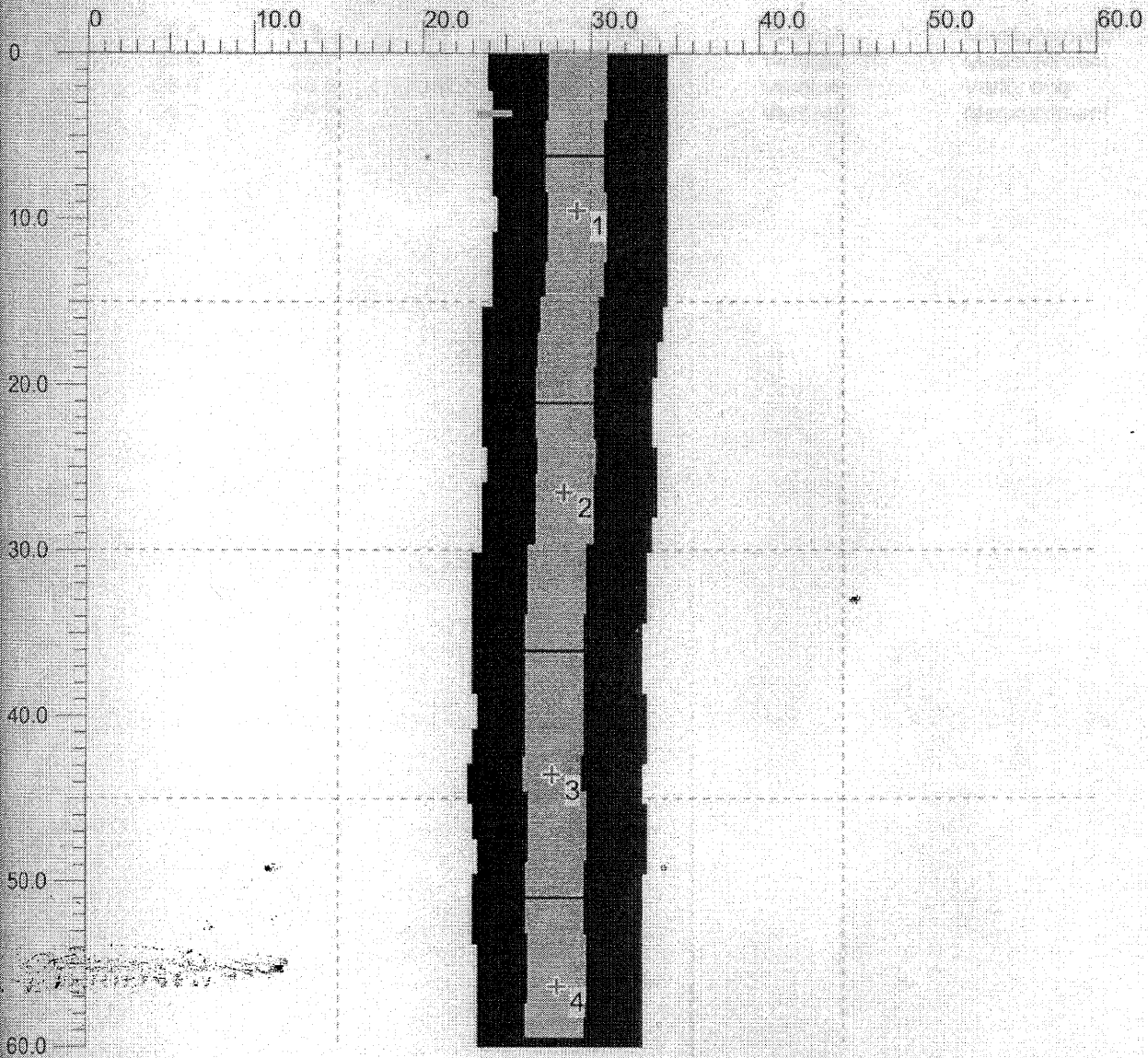
Customer: IRMA

Location: Ljubljana

Operator: Boris Majkić

Comment:

Pozicioniranje in zaznava krovne sloja nad armaturno palico



Customer: IRMA d.o.o.

Location: Ljubljana

Operator: Boris Majkič

Comment:

Analiza obstoječe armature v obelisku na repliki Robbovega vodnjaka



Imagescan:

FS000201.XFF

Point:	x: [cm]	y: [cm]	Cov.: [mm]	Bar:	Orientation:	Usage:
1	29.5	9.6	81	36mm	Vertical	Measurement
2	28.8	26.7	86	36mm	Vertical	Measurement
3	28.0	43.9	86	36mm	Vertical	Verify only
4	28.2	56.7	91	36mm	Vertical	Measurement

Režija Robboj vednjak

Projekt: analiza stanja in projekt obelisk

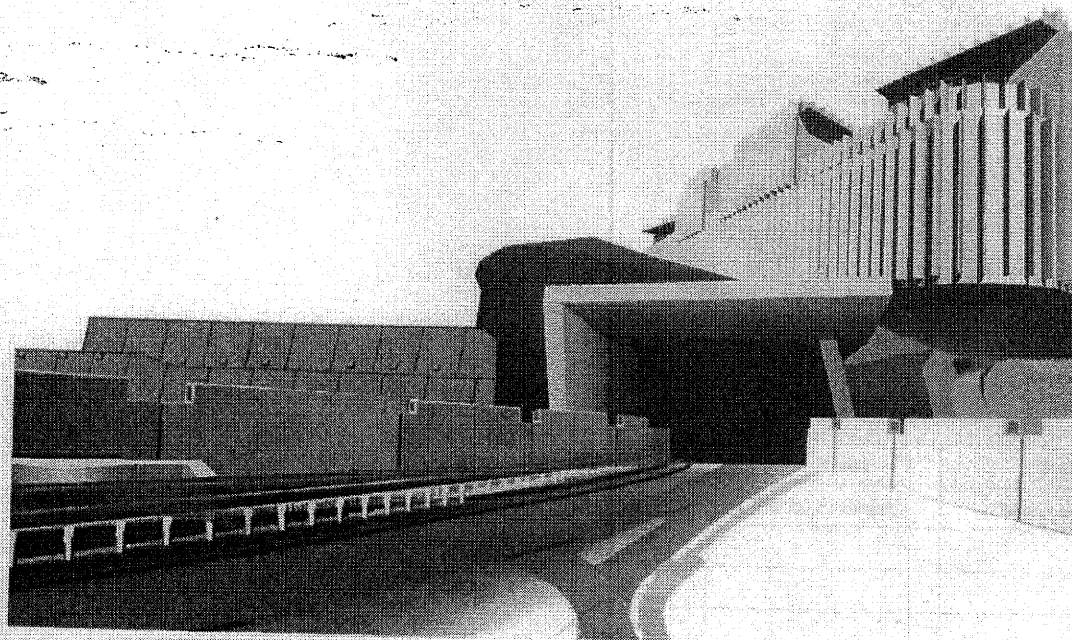
File Storage: C:\Users\majkbor\Desktop\Prj00005\FS000201.XFF

Project: Robboj vednjak

# Replika Robbovega vodnjaka

## Numerična analiza vzrokov za razpokanost obeliska

Odgovorna projektanta	dr. Jaka Zevnik, univ. dipl. inž. grad. (IZS G-2925) Angelo Žigon, univ. dipl. inž. grad. (IZS G-0680)
Projektant	dr. Jaka Zevnik, univ. dipl. inž. grad. (IZS G-2925)
Številka načrta	311130106
Številka projekta	311130106
Vrsta projekta	strokovno mnenje
Kraj in datum	Ljubljana, 12. november 2013
Številka dokumenta	TCR 0001
Različica	00







## Kazalo vsebine

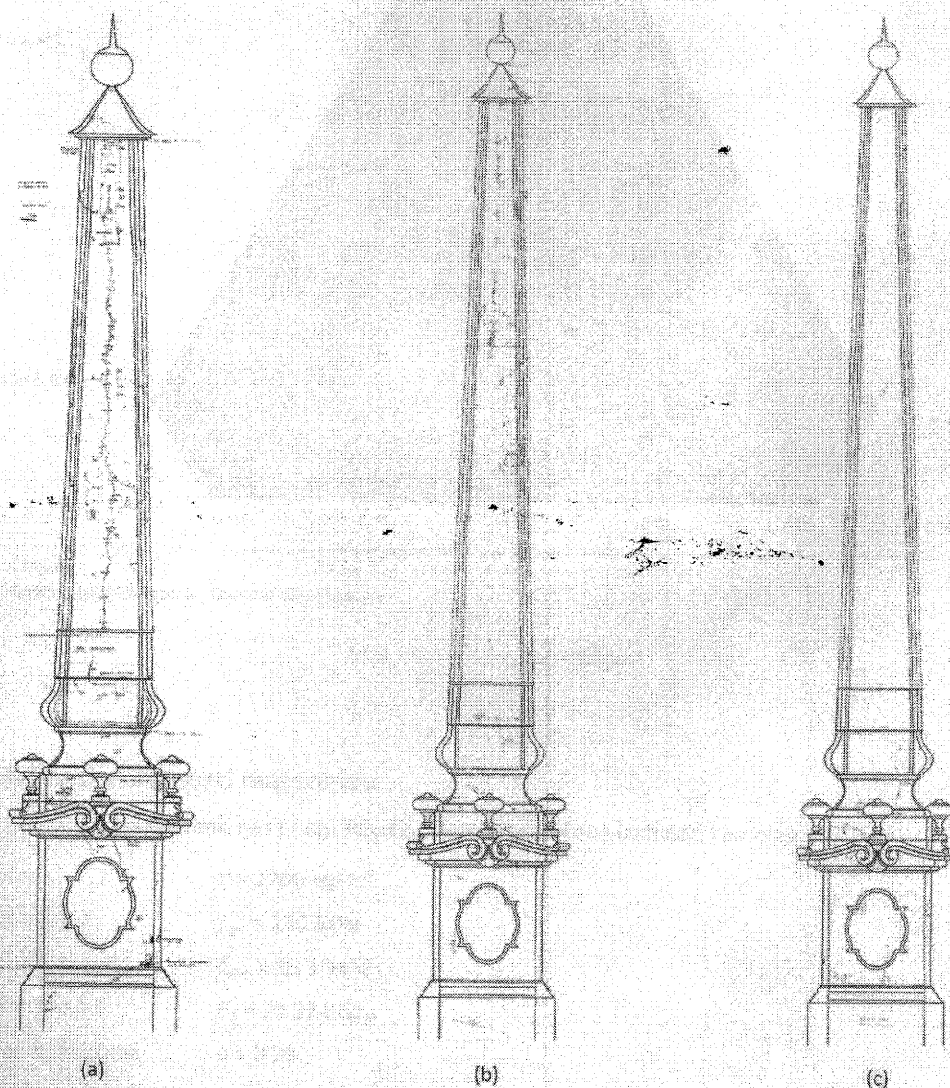
1	Uvod .....	4
2	Računski model .....	5
2.1	Mehanske lastnosti materialov .....	5
2.2	Temperaturne lastnosti materialov .....	6
2.3	Obtežba .....	7
2.4	Numerična analiza .....	8
3	Rezultati analize .....	9
4	Reference .....	13



## 1 Uvod

Na obelisku replike Robbovega vodnjaka so se pojavile vertikalne razpoke (slika 1), ki so najbolj očitne na južni strani, ki je obrnjena proti Tromostovju. Ta površina je zaradi svoje lege najbolj izpostavljena sončnemu obsevanju in se v poletnih mesecih, v času največje vročine, lahko segreje tudi do 65°C.

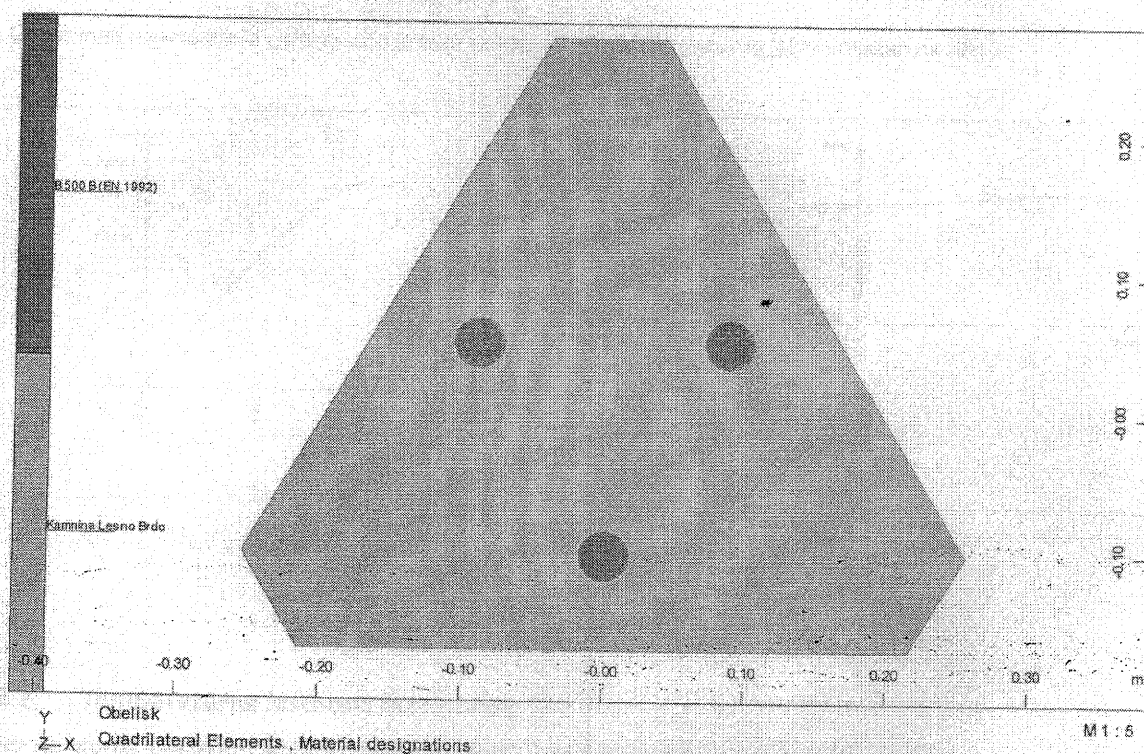
Namen študije je bil ugotoviti ali lahko temperaturne obremenitve povzročijo nastanek takšnih razpok. Pri tem smo upoštevali dejstvo, da so v obelisk uvrtnane in z epoksidnim lepilom fiksirane tri rebraste armaturne palice premera 36 mm. Njihov položaj je razviden s slike 2. V zgornjem delu obeliska, kjer so razpoke najbolj očitne, znaša nadkritje nad posamezno armaturno palico zgolj 50 mm.



Slika 1: Razpoke na obelisku replike Robbovega vodnjaka  
(a) stranica proti Tromostovju; (b) stranica proti stalnici; (c) stranica proti mestni hiši

## 2 Računski model

Analizirali smo zgornji odsek obeliska, kjer so razpoke najbolj očitne. Uporabili smo ravninski model karakterističnega prečnega prereza s stranico dolžine 600 mm ter vodoravno dolžino prisekanega roba 80 mm (slika 2). Prečni prerez je bil modeliran s ploskovnimi elementi enotske debeline. Uporabljena je bila nelinearna analiza, pri čemer so se upoštevale dejanske lastnosti materialov.



Slika 2: Analiziran prečni prerez

### 2.1 Mehanske lastnosti materialov

V skladu z [2] so bile upoštevane naslednje eksperimentalno določene lastnosti kamnine:

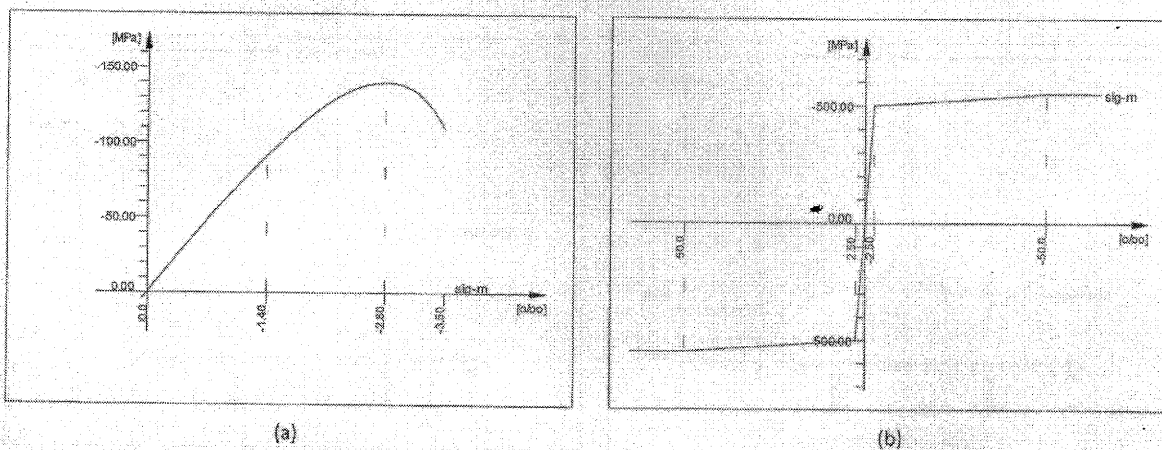
gostota:	$\gamma = 2706 \text{ kg/m}^3$
tlačna trdnost:	$f_{cm} = 140 \text{ MPa}$
natezna trdnost:	$f_{ctm} = 15.1 \text{ MPa}$
elastični modul:	$E_c = 71.374 \text{ GPa}$
Poissonov količnik:	$\nu = 0.29$
temperaturni koeficient:	$k = 0.9 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$



Tlačna in natezna trdnost kamnine sta bili določeni v stanju po zmrzovanju. Lastnosti armaturnega jekla so bile upoštevane v skladu s standardom SIST EN 1992-1-1:

- gostota:  $\gamma = 7850 \text{ kg/m}^3$
- meja tečenja:  $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$
- elastični modul:  $E_s = 200 \text{ GPa}$
- Poissonov količnik:  $\nu = 0,30$
- temperaturni koeficient:  $k = 1,2 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$

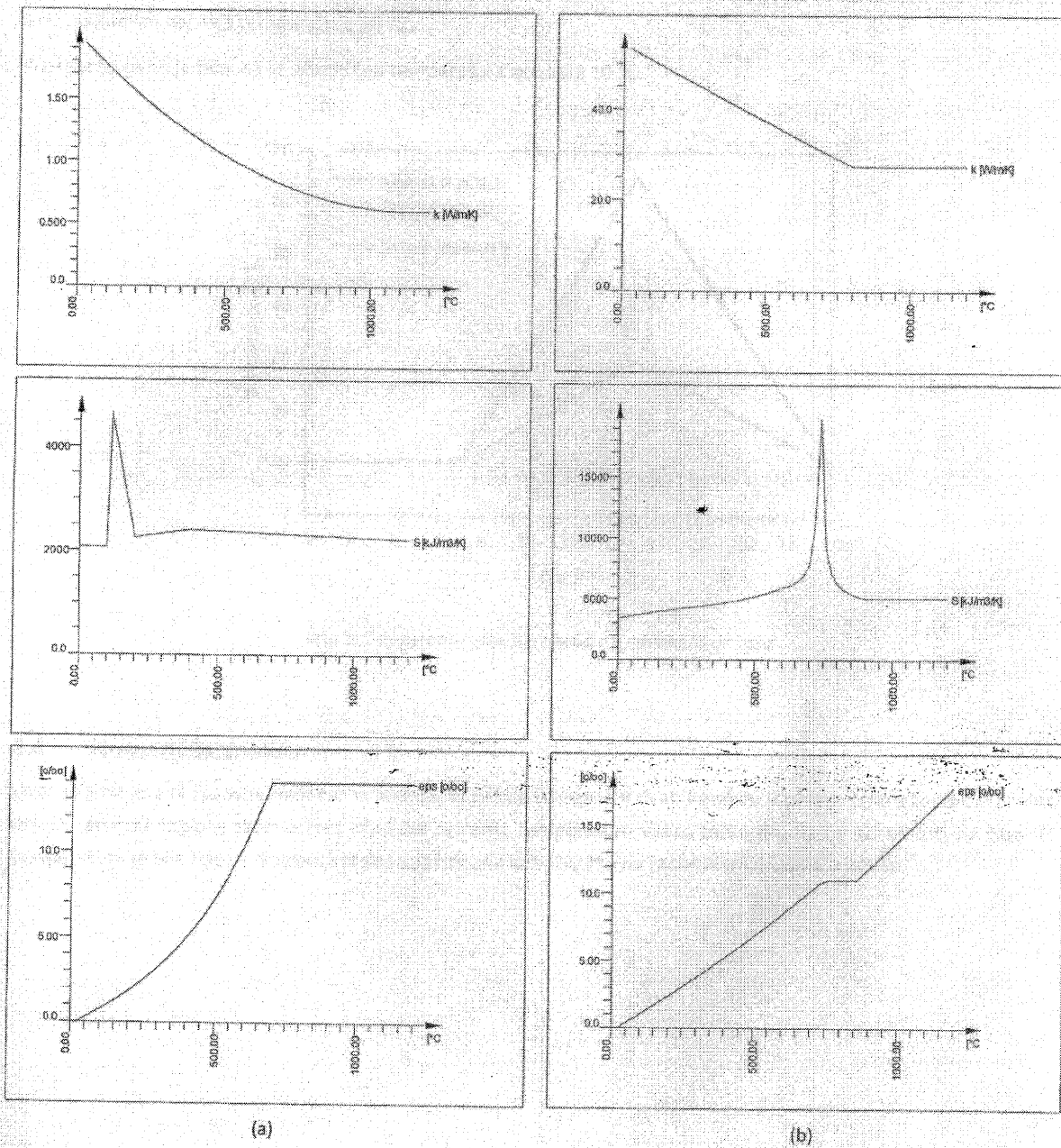
Odnos med napetostjo in deformacijo je tako za kamnino kot za armaturno jeklo prikazan na sliki 3.



Slika 3: Analiziran prečni prerez

## 2.2 Temperaturne lastnosti materialov

Temperaturne lastnosti kamnine in armaturnega jekla, predstavljene na sliki 4, so bile določene na podlagi priporočil standarda SIST EN 1992-1-2. V odsotnosti natančnejših podatkov smo privzeli, da se kamen obnaša podobno kot beton s primerljivimi mehanskimi lastnostmi.



Slika 4: Temperaturne lastnosti materialov  
(a) kamnina Lesno Brdo; (b) armaturno jeklo

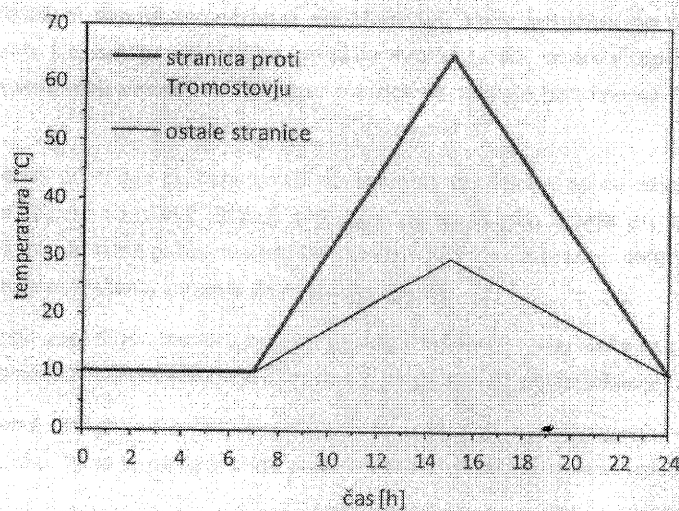
### 2.3 Obtežba

Prečni prerez obeliska je bil na robovih obremenjen s temperaturno obtežbo, ki ustreza pričakovani temperaturi površine v naravi. Upoštevali smo, da je temperatura površine odvisna od časa, kar je prikazano na sliki 5. Glede na



dostopne meritve znaša najvišja temperatura ploskve, obrnjene proti Tromostovju, 65°C. Na ostalih dveh stranica  
smo upoštevali najvišjo temperaturo 30 °C.

Predpostavljeno je bilo, da je izhodiščna temperatura obeliska 10 °C.



Slika 5: Temperatura površin obeliska v odvisnosti od časa

## 2.4 Numerična analiza

Uporabljena je bila časovna nelinearna analiza, ki je bila izvedena v dveh korakih. V prvem smo s toplotno analizo določili prehod toplote skozi prerez obeliska oziroma temperaturo vsake točke prereza v odvisnosti od časa. Ta temperatura je bila nato v drugem koraku upoštevana kot obtežba na računskem modelu prereza.

### 3 Rezultati analize

Na sliki 6 je prikazana primerjava med temperaturnima gradientoma v prečnem prerezu obeliska z in brez armaturnih palic pri doseženi najvišji temperaturi ob 15:00 uri. Vpliv armature na obliko gradienta je jasno razviden, saj se na mestih, kjer so vgrajene palice, pojavijo motnje zaradi razlike v toplotnih lastnostih kamna in jekla. Primerjava samih vrednosti pokaže, da armaturne palice ne vplivajo bistveno na razporeditev temperature po prerezu obeliska.

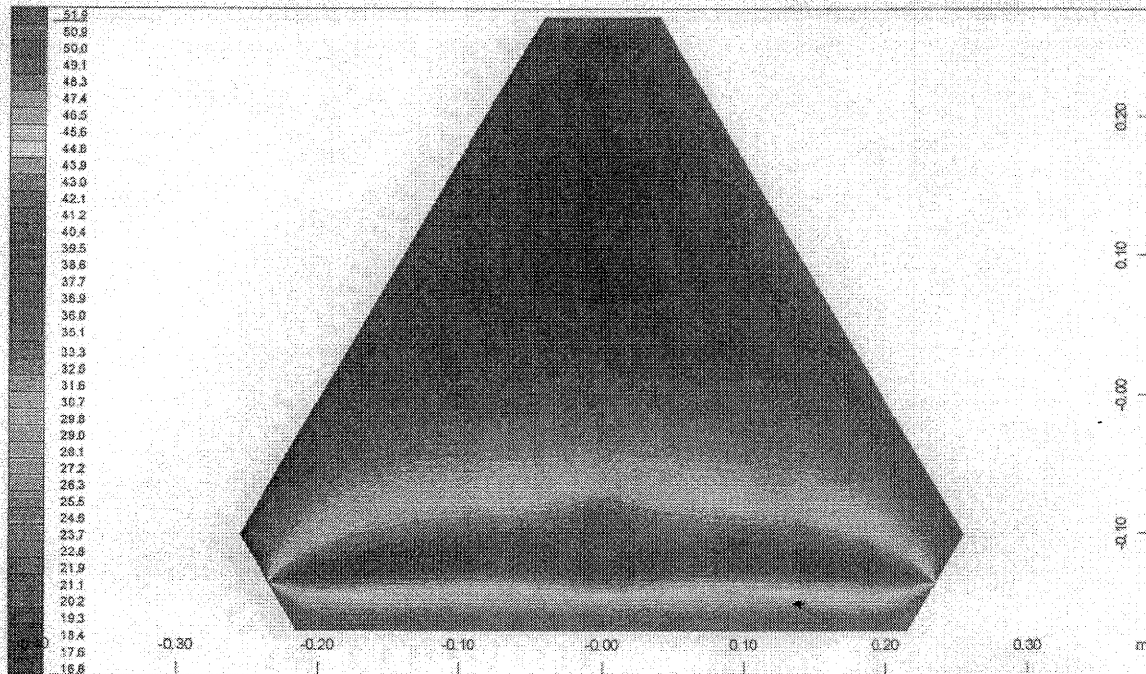
Glavne deformacije znotraj prečnega prereza zaradi temperature obtežbe so za dejansko stanje z vgrajenimi armaturnimi palicami prikazane na sliki 7. Slika 8 prikazuje deformacijsko stanje prereza brez vgrajenih palic. Primerjava ponovno pokaže, da same palice ne vplivajo bistveno na velikost in smer deformacij. V obeh primerih je natezna trdnost kamnine prekoračena, kar vodi do nastanka razpok.

Poudariti je treba, da je bil uporabljen model s porazdeljeno plastičnostjo, zato lahko na podlagi rezultatov analize ugotovimo zgolj ali je natezna nosilnost kamna prekoračena, ne pa tudi dejanske lokacije razpok ali njihove širine.

Zaključimo lahko, da same armaturne palice, ki so vgrajene v obelisk, ne morejo biti edini razlog za nastanek vertikalnih razpok v obelisku. Te so se najverjetneje pojavile zaradi sočasnega vpliva naslednjih dejavnikov:

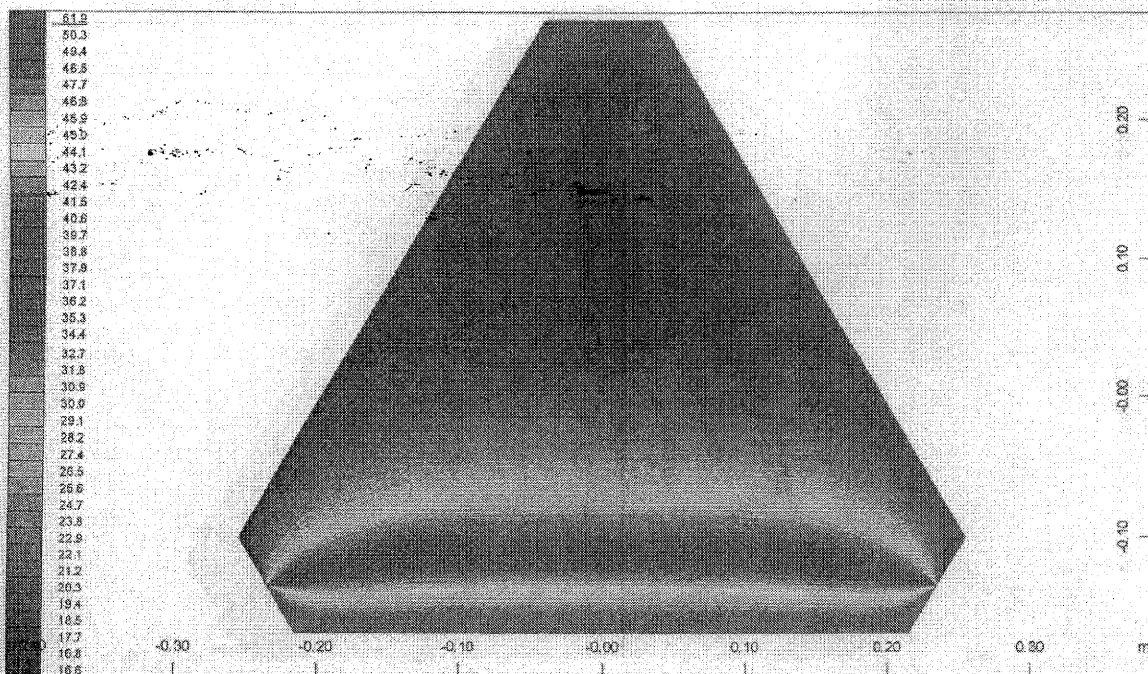
- 1) Kamniti blok, iz katerega je bil izdelan obelisk, je najverjetneje že v osnovi vseboval oslabilitev in (mikro)razpoke, kar lahko sklepamo iz navedb v [2]. Te so se zaradi vpliva atmosferskih dejavnikov kot so kisel dež, onesnažen zrak, ciklično zmrzovanje vode in taljenje nastalega ledu le še povečevale.
- 2) Vpliv sončnega obsevanja in s tem cikličnega segrevanja in ohlajanja obeliska ne deluje ugodno na nastanek razpok, kar kažejo rezultati naše analize. Vsaka obstoječa razpoka ima multiplikativen učinek, saj povzroča koncentracijo napetosti in s tem hitrejšo degradacijo prereza.
- 3) Vrtanje lukenj za vgradnjo armaturnih palic je s tresljaji najverjetneje dodatno oslabilo prerez. Neugodno je tudi dejstvo, da je v zgornjem delu obeliska nad armaturnimi palicami ostalo zgolj 50 mm nadkritja, kar ima pomemben vpliv pri penetraciji vode v notranost prereza, kar kažejo tudi začetki korozije na armaturi, in s tem na vplive zmrzovanja. Bistveno bolje bi bilo, da bi se ojačitev izvedla z eno samo palico, locirano v težišču prereza. Z vidika nosilnosti in stabilnosti namreč ni nobenega razloga za uporabo treh palic.





Y Obelisk  
 Z X temperature in Node, Loadcase 9 Step 9: 15:00 - 16:00 Time step 9:00:00 h  
 from 16.8 to 51.9 step 0.878 °C

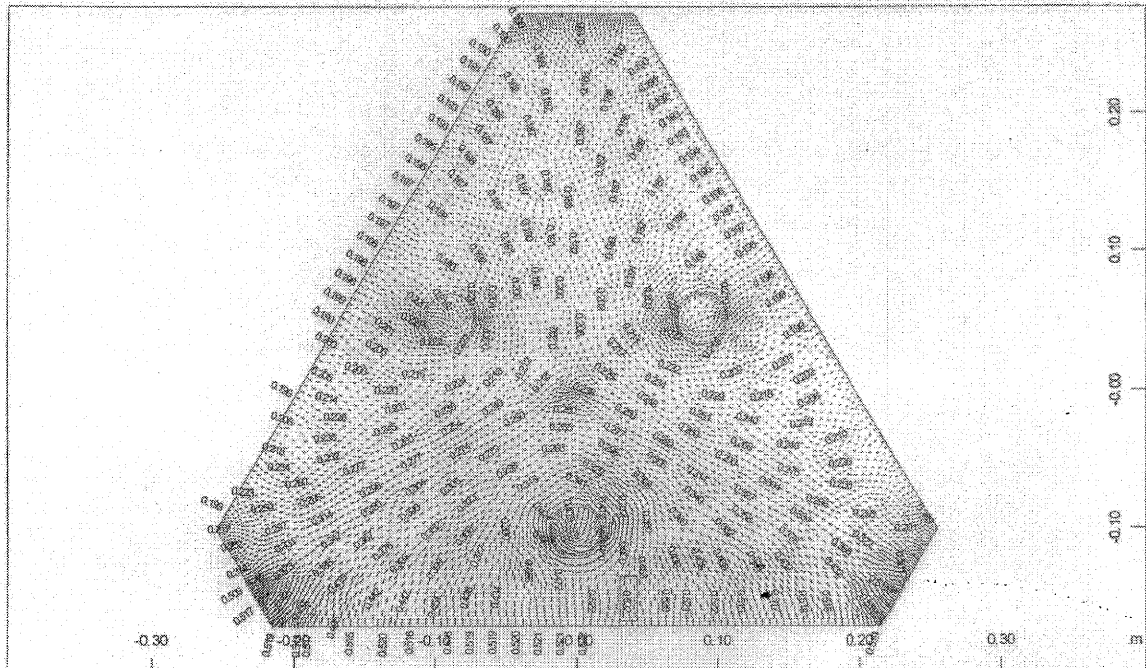
M 1 : 5



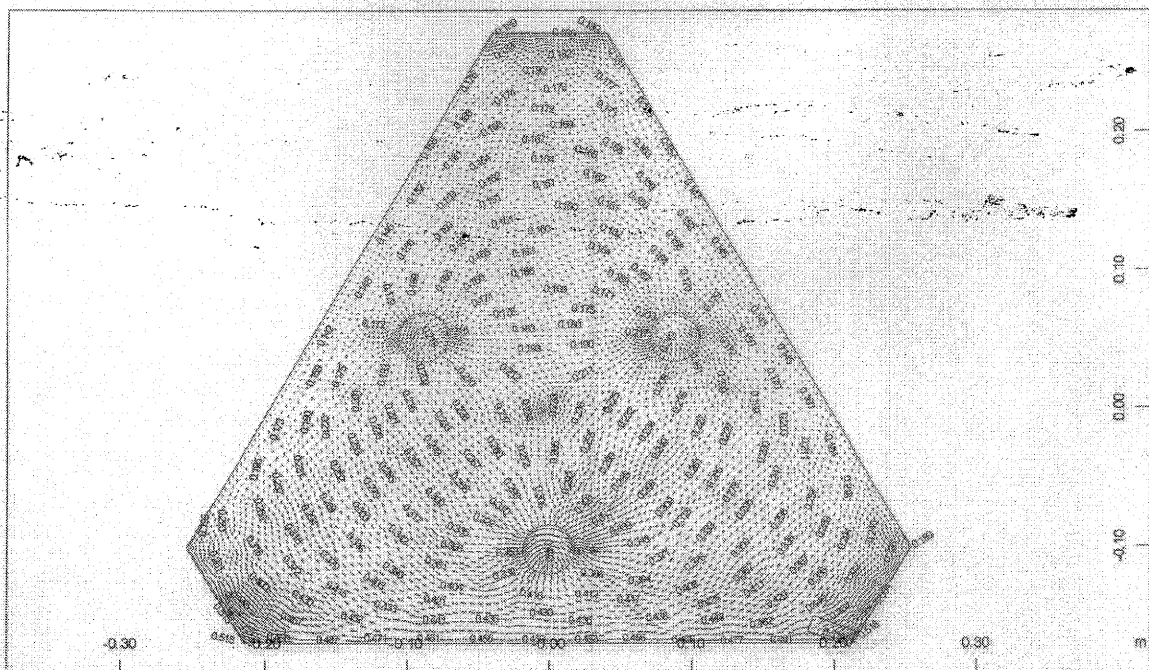
Y Obelisk brez armaturnih palic  
 Z X temperature in Node, Loadcase 9 Step 9: 15:00 - 16:00 Time step 9:00:00 h  
 from 16.6 to 51.9 step 0.883 °C

M 1 : 5

Slika 6: Temperaturni gradient v prečnem prerezu obeliska



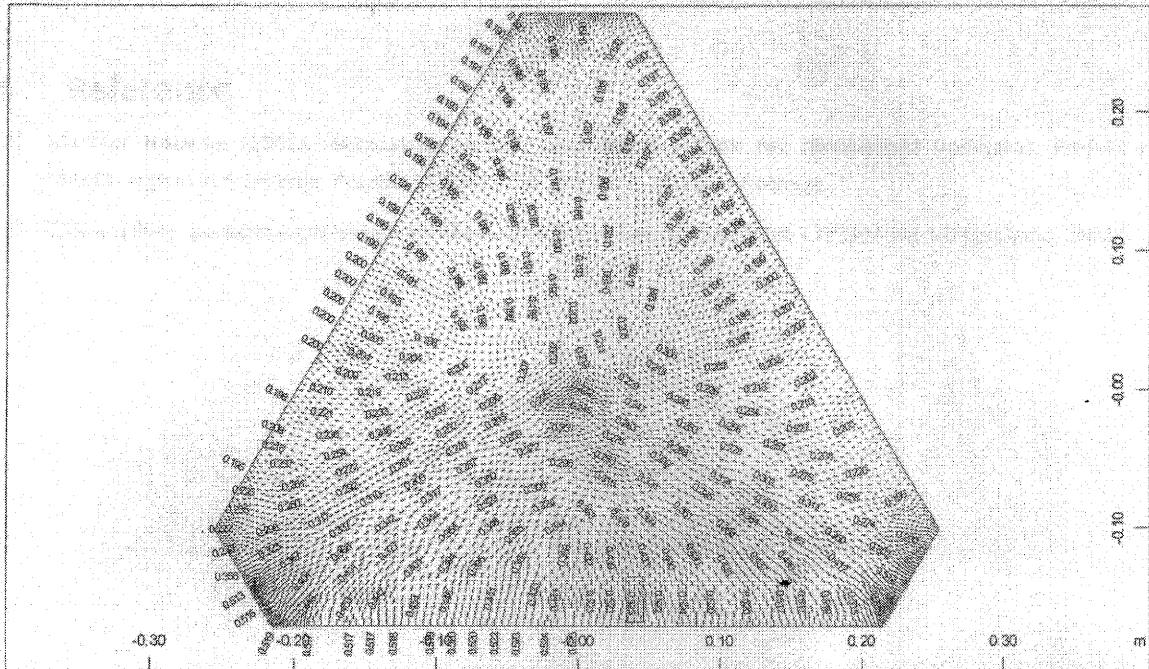
Y Obelisk M 1:5  
 Z-X Top Total principal strains I In Element, nonlinear Loadcase 1001 Stresses and Deformation, 1 cm 3D = 5.71 o/oo (Max=0.522)



Y Obelisk M 1:5  
 Z-X Top Total principal strains II In Element, nonlinear Loadcase 1001 Stresses and Deformation, 1 cm 3D = 5.71 o/oo (Max=0.519)

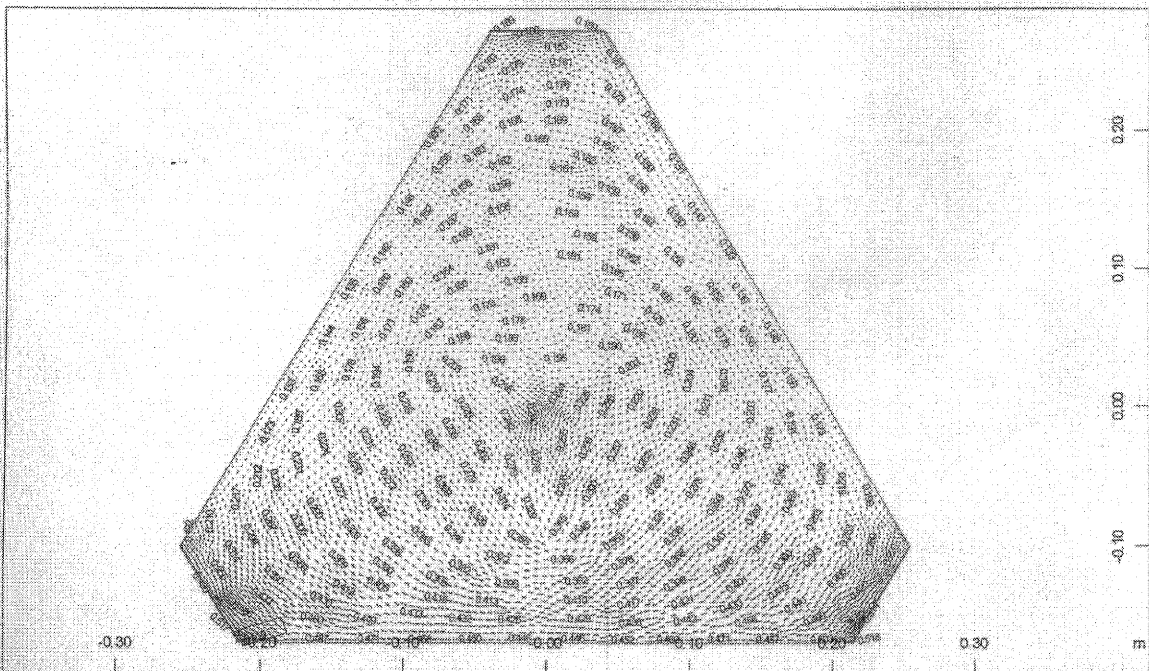
Slika 7: Glavne napetosti v prečnem prerezu obeliska z vgrajenimi armaturnimi palicami





Y Obelisk brez armaturnih palic  
 Z-X Top Total principal strains I in Element, nonlinear Loadcase 1001 Stresses and Deformation, 1 cm 3D = 5.71 o/oo  
 (Max=0.525)

M 1 : 5



Y Sector of system Quadrilateral Elements Group 30  
 Z-X Top Total principal strains II in Element, nonlinear Loadcase 1001 Stresses and Deformation, 1 cm 3D = 5.71 o/oo  
 (Max=0.519)

M 1 : 5

Slika 8: Glavne napetosti v prečnem prerezu obeliska brez vgrajenih armaturnih palic

## 4 Reference

- [1] Marmor Hotavlje (2006): Rekonstrukcija Vodnjaka treh kranjskih rek (Robbovega vodnjaka). Projekt za obratovanje in vzdrževanje. Projekt MHFM15/06. Hotavlje: Marmor Hotavlje.
- [2] ZRMK (1994): poročilo o preiskavi kamnine Lesno Brdo. Poročilo 5320/DN 1273/94-NK 14. Ljubljana: ZRMK.