





## Izdajatelj:

**Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije (ZDGITS)**, Leskoškova 9e, 1000 Ljubljana, telefon 01 52 40 200; faks 01 52 40 199 v sodelovanju z **Matično sekcijo gradbenih inženirjev Inženirske zbornice Slovenije (MSG IZS)**, ob podpori **Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije, Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani in Zavoda za gradbeništvo Slovenije**

## Izdajateljski svet:

ZDGITS: **mag. Andrej Kerin**  
**prof. dr. Matjaž Mikoš**  
**Jakob Presečnik**  
 MSG IZS: **Gorazd Humar**  
**mag. Črtomir Remec**  
**doc. dr. Branko Zadnik**  
 FGG Ljubljana: **doc. dr. Marjan Žura**  
 FG Maribor: **Milan Kuhta**  
 ZAG: **prof. dr. Miha Tomaževič**

## Glavni in odgovorni urednik:

**prof. dr. Janez Duhovnik**

## Sodelavec pri MSG IZS:

**Jan Kristjan Juteršek**

## Lektor:

**Jan Grabnar**

## Lektorica angleških povzetkov:

**Darja Okorn**

## Tajnica:

**Anka Holobar**

## Oblikovalska zasnova:

**Mateja Goršič**

## Tehnično urejanje, prelom in tisk:

**Kočevski tisk**

## Naklada:

**3000 izvodov**

Podatki o objavah v reviji so navedeni v bibliografskih bazah COBISS in ICONDA (The Int. Construction Database) ter na

<http://www.zveza-dgits.si>

Letno izide 12 števil. Letna naročnina za individualne naročnike znaša 22,95 EUR; za študente in upokojence 9,18 EUR; za družbe, ustanove in samostojne podjetnike 169,79 EUR za en izvod revije; za naročnike iz tujine 80,00 EUR. V ceni je všteti DDV.

Poslovni račun ZDGITS pri NLB Ljubljana:  
 SI56 0201 7001 5398 955

# Gradbeni vestnik • GLASILO ZVEZE DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV IN TEHNIKOV SLOVENIJE in MATIČNE SEKCIJE GRADBENIH INŽENIRJEV INŽENIRSKO ZBORNICE SLOVENIJE

UDK-UDC 05 : 625; ISSN 0017-2774  
 Ljubljana, junij 2009, letnik 58, str. 145-168

## Navodila avtorjem za pripravo člankov in drugih prispevkov

1. Uredništvo sprejema v objavo znanstvene in strokovne članke s področja gradbeništva in druge prispevke, pomembne in zanimive za gradbeno stroko.
2. Znanstvene in strokovne članke pred objavo pregleda najmanj en anonimen recenzent, ki ga določi glavni in odgovorni urednik.
3. Besedilo prispevkov mora biti napisano v slovenščini.
4. Besedilo mora biti zapisano z znaki velikosti 12 točk in z dvojnimi presledkom med vrsticami.
5. Prispevki morajo vsebovati naslov, imena in priimke avtorjev ter besedilo.
6. Besedilo člankov mora obvezno vsebovati: naslov članka v slovenščini (velike črke); naslov članka v angleščini (velike črke); oznako, ali je članek strokoven ali znanstven; imena in priimke avtorjev; naslov POVZETEK in povzetek v slovenščini; naslov SUMMARY in povzetek v angleščini; naslov UVOD in besedilo uvoda; naslov naslednjega poglavja (velike črke) in besedilo poglavja; naslov razdelka in besedilo razdelka (neobvezno); ... naslov SKLEP in besedilo sklepa; naslov ZAHVALA in besedilo zahvale (neobvezno); naslov LITERATURA in seznam literature; naslov DODATEK in besedilo dodatka (neobvezno). Če je dodatkov več, so ti označeni še z A, B, C itn.
7. Poglavlja in razdelki so lahko oštevilčeni. Poglavlja se oštevilčijo brez končnih pik. Denimo: 1 UVOD; 2 GRADNJA AVTOCESTNEGA ODSEKA; 2.1 Avtocestni odsek ... 3 ...; 3.1 ... itd.
8. Slike, preglednice in fotografije morajo biti omenjene v besedilu prispevka, oštevilčene in opremljene s podnapisi, ki pojasnjujejo njihovo vsebino. Vse slike in fotografije v elektronski obliki (slike v običajnih vektorskih grafičnih formatih, fotografije v formatih .tif ali .jpg visoke ločljivosti) morajo biti v posebnih datotekah, običajne fotografije pa priložene.
9. Enačbe morajo biti na desnem robu označene z zaporedno številko v okroglem oklepaju.
10. Kot decimalno ločilo je treba uporabljati vejico.
11. Uporabljena in citirana dela morajo biti navedena med besedilom prispevka z oznako v obliki oglatih oklepajev: **(priimek prvega avtorja, leto objave)**. V istem letu objavljena dela istega avtorja morajo biti označena še z oznakami a, b, c itn.
12. V poglavju LITERATURA, ki se je ne oštevilčuje, so uporabljena in citirana dela opisana z naslednjimi podatki: priimek, ime prvega avtorja (lahko krajšano), priimki in imena drugih avtorjev, naslov dela, način objave, leto objave.
13. Način objave je opisan s podatki: knjige: založba; revije: ime revije, založba, letnik, številka, strani od do; zborniki: naziv sestanka, organizator, kraj in datum sestanka, strani *od do*; raziskovalna poročila: vrsta poročila, naročnik, oznaka pogodbe; za druge vrste virov: kratek opis, npr. v zasebnem pogovoru.
14. Pod črto na prvi strani – pri prispevkih, krajših od ene strani, pa na koncu prispevka – morajo biti navedeni podrobnejši podatki o avtorjih: znanstveni naziv, ime in priimek, strokovni naziv, podjetje ali zavod, navadni in elektronski naslov.
15. Prispevke je treba poslati glavnemu in odgovornemu uredniku prof. dr. Janezu Duhovniku na naslov: FGG, Jamova 2, 1000 LJUBLJANA, oziroma po e-pošti: janez.duhovnik@fgg.uni-lj.si. V spremnem dopisu mora avtor članka napisati, kakšna je po njegovem mnenju vsebina članka (pretežno znanstvena, pretežno strokovna) oziroma za katero rubriko je po njegovem mnenju prispevek primeren. Prispevke je treba poslati v elektronski obliki v formatu MS WORD in v 8. točki določenih grafičnih formatih.

Uredništvo

# Vsebina • Contents

## In memoriam

stran **146**  
Ivan Ambrož 1919–2009

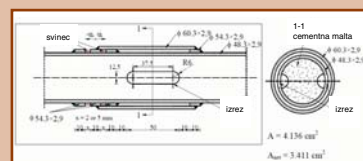
## Članki • Papers

stran **147**

asist. dr. Peter Skuber, univ. dipl. inž. grad.  
prof. dr. Darko Beg, univ. dipl. inž. grad.

### **EKSPERIMENTALNA ANALIZA DUŠILCA ZA DISIPACIJO POTRESNE ENERGIJE**

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF EARTQUAKE ENERGY ABSORBER  
DEVICE



stran **160**

Samo Lubej, univ. dipl. inž. grad.  
mag. Andrej Ivanič, univ. dipl. inž. grad.

### **MOŽNOST UTRDITVE BETONA Z ZAKASNELO TVORBO ETRINGITA** POSSIBILITY FOR CONCRETE STRENGTHENING WITH DELAYED ETTRINGITE FORMATION



## Napovednik ZAG Ljubljana

stran **168**

Zaključni seminar projektov SPENS in ARCHES



## Novi diplomanti

J. K. Juteršek, univ. dipl. inž. grad.

## Koledar prireditev

J. K. Juteršek, univ. dipl. inž. grad.

Slika na naslovnici: Center Merkur v Šentvidu nad Ljubljano, foto: Janez Duhovnik



## IN MEMORIAM

### IVAN AMBROŽ (1919–2009)

V začetku marca smo se na dobravskem pokopališču v Mariboru poslovili od spoštovanega gospoda Ivana Ambroža. Množica prijateljev, nekdanjih sodelavcev, stanovskih kolegov in njegovih nekdanjih dijakov se je ob številnih sorodnikih in njegovi družini še zadnjič neposredno poslovila od velikega Mariborčana.

Rodil se je pred devetdesetimi leti, avgusta 1919, v družini cenjenega čevljarkega mojstra v vasi Senik pri Svetem Tomažu v Prlekiji. Družinske načrte, da mladi Ivan postane naslednik v domači čevljarški delavnici, je spremenila druga svetovna vojna. Iz vojnega ujetništva se je vrnil šele po letu zdravljenja. Posledice vojnih ran mu niso omogočale fizičnega dela na domači kmetiji in delavnici, zato je vlogo družinskega naslednika prevzel mlajši brat, sam pa se je podal v gradbeno šolo. Najprej je končal delovodsko šolo, po nekaj letih delovnih izkušenj pa je šolanje nadaljeval na Srednji gradbeni šoli in kasneje na takratni Višji tehnični šoli ter si tako pridobil naziv višji gradbeni tehnik. Svojo delovno pot je začel v tedanjem vseslovenskem gradbenem podjetju Gradis na gradbišču hidrocentrale Mariborski otok. Po izločitvi skupine za izvajanje nizkih in hidro gradenj pa je prešel v novonastalo podjetje Tehnogradnje.

Obogatenega z izkušnjami iz mnogih gradbišč so ga v šestdesetih letih prejšnjega stoletja povabili na pedagoško pot. Najprej je svoje znanje prenašal na mlade kot učitelj strokovnih predmetov, nato pa veliko let tudi kot predstojnik tedanjega Gradbenega šolskega centra v Mariboru. Prav gotovo med nekdanjimi dijaki te srednje tehnične in poklicne šole ni nikogar, ki se ne bi z veseljem in spoštovanjem spominjal ur njegovega pouka. Ivan Ambrož je imel redko in zelo zeleno lastnost: znal je posredovati znanje na prav poseben, le njemu lasten način, z nepozabnimi vložki osebnih izkušenj in humorja. Pri tem pa je tudi povsem neprisiljeno in učinkovito vzgajal. Zanj je resnično veljalo, da so ga imeli dijaki iskreno radi in se njegovih ur veselili.

Mnogi smo ostali v spoštljivem stiku z gospodom Ambrožem še dolgo po tem, ko smo zapustili srednješolske klopi ob Smetanovi ulici. Nanj smo se obračali tudi kasneje kot stanovski kolegi. V uspehih mnogih slovenskih gradbenikov, ki smo se ob njem strokovno in človeško bogatili, je vtakano tudi Ivanovo ime, čeprav nevidno, a vendar globoko.

Iskreno pripadnost gradbeni stroki in željo po njenem napredku je pokojni Ivan Ambrož neposredno živel tudi s svojim predanim delom v Društvu gradbenih inženirjev in tehnikov Maribor. Kot aktiven član izvršnega odbora in dolgoletni tajnik društva je bil njegova duša in srce. Zato je neprecenljiv tudi njegov prispevek h kvalitetni stanovski organiziranosti gradbenikov v tem delu države. Bil je tudi med najaktivnejšimi pobudniki za ustanovitev višjega gradbenega šolstva – današnje fakultete za gradbeništvo pri Univerzi v Mariboru. Pred leti je za svoje delo prejel naziv zaslužnega člana, lani ob šestdesetletnem jubileju Društva gradbenih inženirjev in tehnikov pa posebno priznanje za njegove izjemne dosežke ter prispevek k razvoju gradbeništva in našega društva.

Njegovo brezmejno pripravljenost pomagati so živo občutili tudi mariborski planinci. Kot navdušen oboževalec narave in stvarstva je dolga leta predano skrbel za Mariborsko kočo, priljubljeno planinsko postojanko na Pohorju. V obdobju, ko je bil njen gospodar, je sam in s prijatelji ali sodelavci veliko postoril za njeno vzdrževanje in ohranitev, posledično pa za prijetno počutje pohodnikov.

Gospod Ivan Ambrož je bil spoštovan in uspešen gradbeni strokovnjak, učitelj, vzgojitelj, vzornik, sodelavec, dolga leta aktiven član različnih strokovnih in ljubiteljskih organizacij, zaželen in upoštevan svetovalec v sredini, kjer je bival ali se občasno družil, vedno in povsod pa iskren prijatelj in ČLOVEK z veliko začetnico. V našem spominu upravičeno ostaja kot nestor slovenskega gradbenega šolstva. Ko nas prevevajo občutki žalosti, da smo ga izgubili, nad njimi zmaga je tolažilna misel o sreči, da smo ga imeli. Zaradi svojega človeško toplega, spoštljivega, iskrenega pa tudi iskrivega pristopa k stroki je marsikomu med nami dal povod in pogum, da smo se pridružili in vztrajali v panogi.

Čeprav je veliko zadnjih let živel mirno in na videz umaknjeno od zunanosti in stroke, ki ji je iskreno pripadal, smo vsi, ki smo razloge za to poznali, vedeli, da jo je še vedno spremljal podobno kot nekoč. Gospod Ivan Ambrož je bil moder in pokončen, spravljen in povezujoč mož. Na podlagi svojega dela in zaradi življenjske dobrote in skrbnosti ostaja med slovenskimi gradbeniki kot zgled in legenda!

DGIT Maribor

# EKSPERIMENTALNA ANALIZA DUŠILCA ZA DISIPACIJO POTRESNE ENERGIJE

## EXPERIMENTAL ANALYSIS OF EARTQUAKE ENERGY ABSORBER DEVICE

asist. dr. Peter Skuber, univ. dipl. inž. grad.

pskuber@fgg.uni-lj.si

prof. dr. Darko Beg, univ. dipl. inž. grad.

dbeg@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo  
Jamova 2, 1000 Ljubljana

Znanstveni članek

UDK: 624.014.2:624.042.7:624.072

**Povzetek** | V članku je predstavljena eksperimentalna raziskava jeklenega dušilca s komercialnim imenom DC90, ki je namenjen protipotresni zaščiti stavb. Dušilec, izdelan iz votle cevi, je narejen iz mehkega konstrukcijskega jekla. Nosilnost dušilca je določena z natezno in s tlačno osno nosilnostjo oslabiljenega prereza cevi, ki je posebej oblikovan in predstavlja jedro naprave. Duktilnost je določena z vzdolžnimi plastičnimi deformacijami jedra, kjer je lokalno izbočenje stene jedra preprečeno. Sposobnost disipacije potresne energije je odvisna od odpornosti proti nizkocikličnemu utrujanju. Dušilec je vgrajen v centrično povezje, ki ga lahko pod pogojem, da je uklonska nosilnost diagonale povezja večja od nosilnosti dušilca, uvrstimo v skupino povezij – znano pod imenom BRB (Buckling Restrained Bracing).

Kljub temu da je dušilec v preteklosti že bil testiran, patentiran kot sistem DC90 in tudi uporabljen v praksi, smo se v okviru evropskega raziskovalnega projekta PROHITECH (Eartquake Protection of Historical Buildings by Reversible Mixed Technologies) odločili za dodatne preiskave in naredili serijo cikličnih testov na vzorcih dušilcev. Z različnimi obremenilnimi protokoli smo ugotovili najvažnejše lastnosti, kot so obnašanje dušilca pri različnih amplitudah vzdolžnih pomikov in pri različnih hitrostih obremenjevanja ter vpliv lokalnega izbočenja pločevine.

Na osnovi analize eksperimentalnih rezultatov smo predlagali nekatere izboljšave tako glede konstrukcijskih detajlov kot tudi oblikovanja samega jedra v območju oslabiljenega prereza cevi. Na novi seriji testov smo učinkovitost izboljšav tudi eksperimentalno potrdili.

Predstavljena raziskava je jasno pokazala, da je uporaba izboljšanega dušilca omejena, in sicer na primere, kjer imamo opravka z relativno majhnimi pomiki.

**Summary** | Detailed experimental investigation of the steel dissipative device with a commercial name DC90 for the seismic protection of buildings is presented. The DC90 system belongs to a family of yield metal devices, made of mild steel hollow tubular sections. The strength is defined with axial load resistance in tension and compression of the weakened cross-section, acting as a dog bone system and representing the core element of the device. Ductility is governed by longitudinal plastic strain and the dissipation capability depends on the low cycle fatigue resistance, provided that local and global buckling is prevented. The device is intended to be used with concentric bracing, which belongs to the family of buckling restrained bracings (BRB). The common characteristic of BRB is buckling prevention of the compressed element.

Although the device has already been tested in the past, patented as a DC90 system and has been also used in practice, a new set of tests with different cyclic loading protocols was carried out in the framework of the European research project PROHITECH (Earthquake protection of historical buildings by reversible mixed technologies). The main aim of the experimental research was to establish the most important characteristics, such as device behaviour at different displacement amplitudes and strain rates, and local buckling resistance in compression.

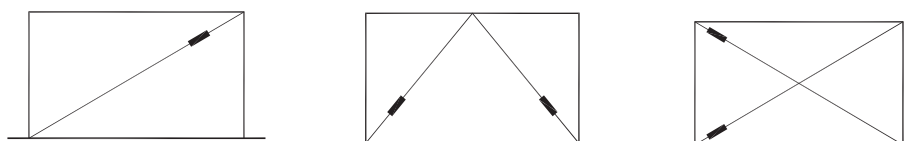
After the analysis of results some improvements were proposed related to construction details and to the shape of cut-outs in the dog bone area. The improvements in the device behaviour were confirmed by the second set of tests. The presented investigation clearly indicates that the improved device can be successfully used only in the range of small displacements.

## 1 • UVOD

V okviru evropskega raziskovalnega projekta PROHITECH (Earthquake Protection of Historical Buildings by Reversible Mixed Technologies, VI. okvirni program) smo v laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani naredili obširno eksperimentalno raziskavo dušilca, ki je namenjen protipotresni ojačitvi objektov (Skuber, 2008). Uporaba dušilca kot del centričnega povezja je v svetu poznana, največkrat se uporablja za ojačitev stavb, ki imajo nosilno konstrukcijo, narejeno iz jeklenih ali iz armiranobetonskih okvirjev. Dušilec je bil razvit v podjetju Sistem DC 90 iz Beograda in bil v preteklosti že testiran in tudi že uporabljen v praksi (Petrašković, 1997). Je sestavni del jeklenega centričnega povezja, s katerim je stavba ojačana. Uporabljen je bil za ojačitev zidov opečnih in kamnitih stavb. Povezje je bilo v večini primerov vgrajeno v sam zid (slika 2).

Vemo, da so zidane stavbe veliko ranljivejše kot jeklene ali armiranobetonske. Pri ojačitvah zidanih stavb z jeklenimi povezji moramo biti še posebej pozorni na velikost pomikov. Horizontalni pomiki, ki v jeklenem povezju povzročijo samo linearne raztezke, lahko v zidovju povzročijo že resne razpoke. Še več, dušilec, vgrajen v povezje, dovoljuje še dodatne pomike.

DC90 spada v skupino dušilcev, kjer se potresna energija disipira s plastičnimi deformacijami jeklenega elementa. Dušilec je narejen iz jeklene okrogle votle cevi. Prerez cevi je na določenem mestu oslabilen tako, da je iz dveh strani izrezana ovalna luknja. Oslabljeni del cevi predstavlja jedro naprave, kjer so pri potresu dovoljene plastične deformacije. Prerezan dušilec je prikazan na sliki 3.



Slika 1 • Protipotresna ojačitev armiranobetonskih okvirjev z vertikalnim jeklenim povezjem in dušilcem

Glavna lastnost dušilca se odraža v sposobnosti disipiranja potresne energije. Pri ciklični obtežbi, ki povzroči plastifikacijo jedra, nastopi nizkociklično utrujanje materiala (Beg in Skuber, 2003). Raziskali smo tiste lastnosti, ki najbolj vplivajo na nizkociklično utrujanje

materiala. Življenjska doba dušilca in kapaciteta disipirane energije sta v prvi vrsti odvisni od štirih parametrov: nosilnost prereza jedra, velikost plastičnih deformacij, hitrost plastičnih raztezkov (Beg, 2000) in število ciklov histereznih zank.



Slika 2 • Dva primera vgradnje jeklenih povezij z dušilci v steno zidanega objekta

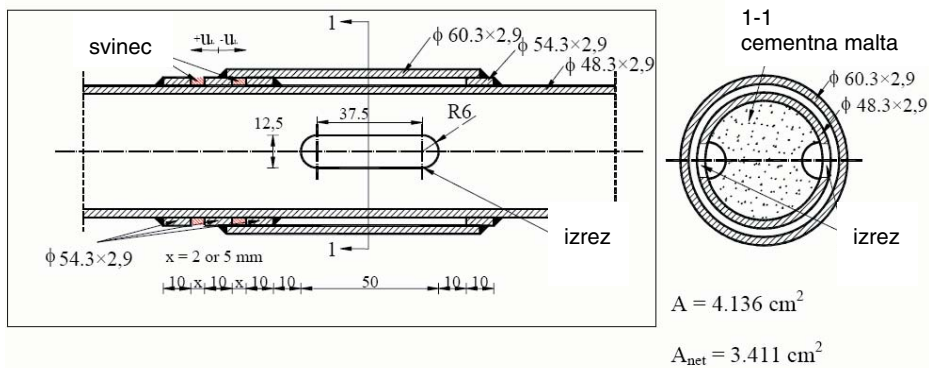
Eksperimentalni rezultati so odkrili nekatere pomanjkljivosti, ki so ključnega pomena za učinkovito uporabo. Na osnovi lastnih testov in analiz smo dušilec delno spremenili in s tem izboljšali njegovo obnašanje. Izkazalo se je, da je treba posebno skrb nameniti oblikovanju jedra, kjer igra odločilno vlogo sama oblika izreza.



Slika 3 • Originalni dušilec, prerezan na dva dela

## 2 • TESTI NA ORIGINALNIH DUŠILCIH

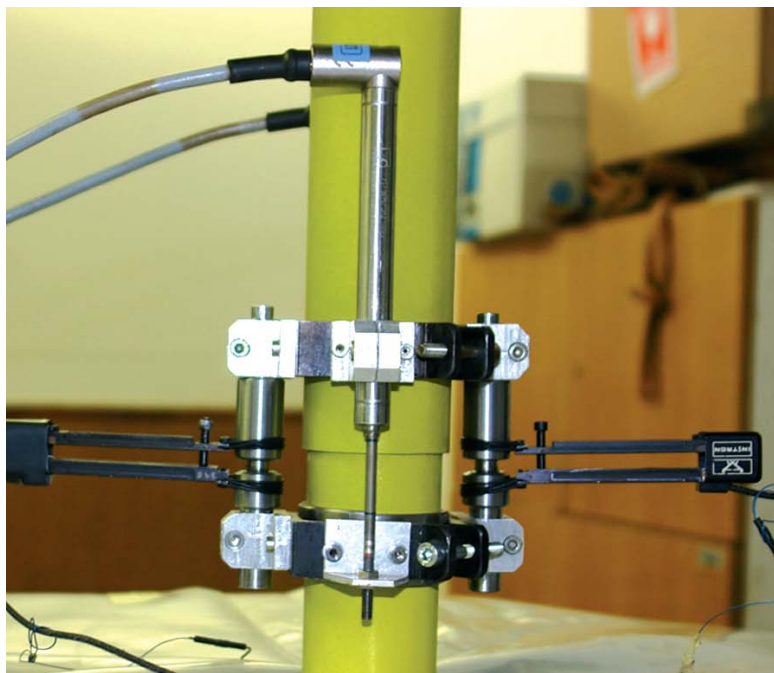
Prva serija testov je bila narejena na 12 enakih preizkušancih. Vzdolžni in prečni prerez dušilca sta prikazana na sliki 4. Sestavljen je iz dveh cevi, notranje in zunanje. Notranja cev je oslABLJENA z dvema ovalnima izrezoma. V območju oslABLITVE je cev zapolnjena s cementno malto, ki preprečuje lokalno izbočenje pločevine navznoter. Lokalno izbočenje na zunanjo stran je preprečeno z zunanjo cevjo, vendar je vmes 2,9 mm praznega prostora. Med polnilom in cevjo ni ločilne plasti, ki bi zagotavljala neovirano drsenje med cementno malto in notranjo steno jeklene cevi. Zunanja cev je na desni strani izreza privarjena na notranjo, medtem ko je na levi strani prosta. Tako je omogočeno prosto gibanje dušilca v vzdolžni smeri do mejnega pomika  $\pm 2$  milimetra, pri nekaterih vzorcih pa  $\pm 5$  milimetrov. Pomike, ki so večji od omenjenih, preprečujejo jekleni obroči, privarjeni na notranjo cev. Jekleni obroči v primeru pretrganja jedra dušilca predstavljajo varovalko, ki preprečuje porušitev celotnega sistema. V rego med obroči je vstavljen svinec, ki blaži udarec med pločevinami. Nosilnost dušilca v nategu je enaka osni nosilnosti oslABLjenega



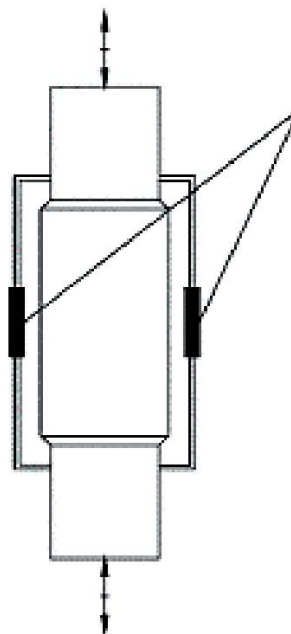
Slika 4 • Shematski prikaz originalnega dušilca za prvo serijo testov

prereza, tlačna nosilnost pa je odvisna od nevarnosti lokalnega izbočenja stene notranje cevi. Največji pomik dušilca je določen z razmikom med obroči. Cevi so iz jekla S235. Testi so bili narejeni na preizkuševalni napravi INSTRON s kapaciteto 1000 kN statične obtežbe in  $\pm 500$  kN dinamične obtežbe. Preizkušanci so na obeh straneh vpeti v čeljusti preizkuševalne naprave. Obremenitev v obliki vsiljenih pomikov je vodena preko

dveh dinamičnih ekstenziometrov, merilcev pomikov. Skupaj še z dvema dodatnima merilcema pomikov sta ekstenziometra pritrjena na preizkušanece preko posebnega pritržilnega sistema, kot prikazuje slika 5. Tak način kontrole vodenih pomikov nam omogoča meritev neposredno v območju jedra dušilca. S tem se izognemo napaki v meritvah, ki so posledica elastičnih deformacij preizkušanca izven merilnega območja kot tudi zdrsa v čeljustih.



Slika 5 • Merilni instrumenti, pritrjeni na preizkušane



Merilci pomikov,  
pritrjeni na  
preizkušane

Obremenilni protokol je prikazan v preglednici 1.

Številka testa	Vrta obremenitve	Frekvenca (Hz)	Hitrost deformacij ( $s^{-1}$ )
1M	Monotono natezno test		
1C	Stohastično, $u^* = +/- 0,5, 1,0, 2,0$ mm	0,1, 0,5, 1, 2, 4	0,005–0,43
2C	Ciklični test, $u = +/- 1$ mm	1	0,11
3C	Ciklični test, $u = +/- 1$ mm	4	0,43
4C	Ciklični test, $u = +/- 1$ mm	3	0,32
5C	Ciklični test, $u = +/- 1$ mm	0,025	0,003
6C	Ciklični test, $u = +/- 2$ mm	1	0,21
7C	Ciklični test, $u = +/- 1$ mm	0,025	0,003
8C	Ciklični test, $u = +/- 0,5$ mm	1	0,05
9C	Ciklični test, $u = +/- 0,5$ mm	4	0,21
10C	Ciklični test, $u = +/- 0,35$ mm, do 4,9 mm, po 3 cikle	0,005–0,07	0,002
11C			

\* Amplituda vsiljenih pomikov pri cikličnem obremenjevanju

Preglednica 1 • Obremenilni protokol prve serije testov

Narejenih je 11 cikličnih testov in en monotono natezni. Dva preizkušanca, 10C in 11C, imata dovoljene pomike do 5 milimetrov, ostali 2 milimetra. Ciklični testi se med seboj razlikujejo po amplitudi vsiljenih pomikov v obliki sinusne krivulje in po hitrosti obremenjevanja. Hitrost deformacij je tako regulirana preko frekvenca cikličnega obremenjevanja. Pri testih 1C, 10C in 11C je amplituda pomikov spreminjajoča, pri drugih je konstantna; pri testu 1C se amplituda spreminja stohastično, pri testu 10C in 11C pa po priporočilih ECCS (ECCS, 1986). Po priporočilu se po vsakih treh ciklih s konstanto amplitudo ta poveča za dvakratnik prvotne amplitude, ki predstavlja mejo plastifikacije jedra. Preizkušanci so bili testirani do porušitve. Poleg oblike porušitve so glavni rezultat testov histerezne zanke sila–pomik ( $F-u$ ). Vsako stotinko sekunde je odčitana sila  $F$  na bat INSTRON-a in pomik  $u$  na merilnem območju, in predstavlja povprečje vseh štirih merilcev pomika. Iz oblike porušitve in iz histereznih zank lahko ugotovimo, ali se dušilci pri cikličnem obremenjevanju obnašajo ustrezno ali ne. Testi so pokazali, da je samo pri petih cikličnih testih od enajstih prišlo do pravilne porušitve, pretrganja oslabljenega dela cevi. Pri teh testih je doseženo večje število ciklov pred porušitvijo, histerezne zanke so simetrične in stabilne. Pri vseh ostalih testih je porušitev izven oslabljenega prereza. Vzrokov je več: nepravilna oblika izreza oslabitve, nekvalitetna izdelava samih preizkušancev.

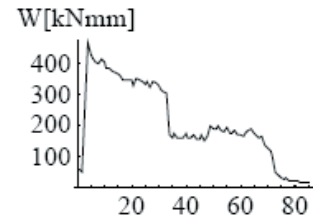
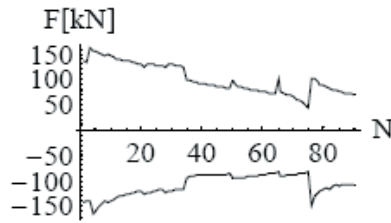
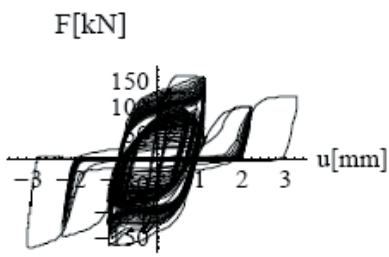


Test številka

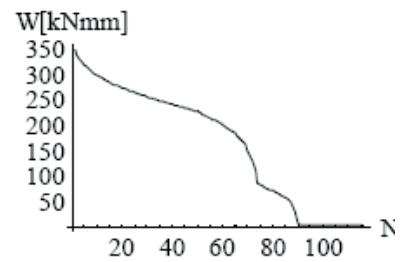
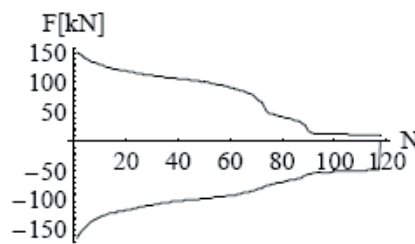
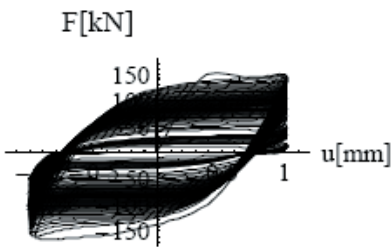
Histerezna zanka  $F-u$

Diagram  $F-N$

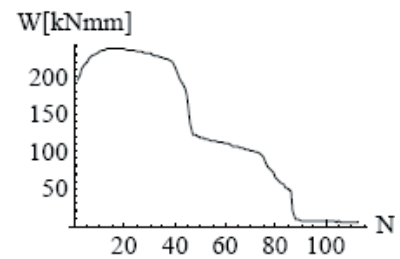
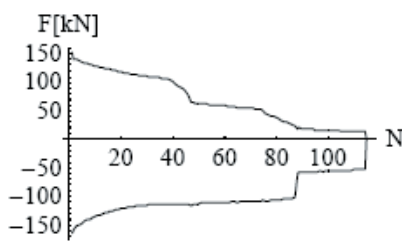
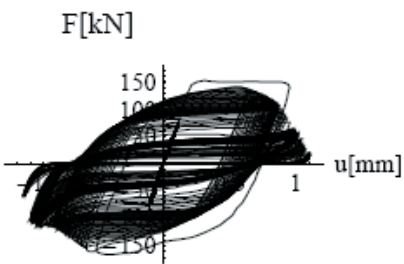
Diagram  $W-N$



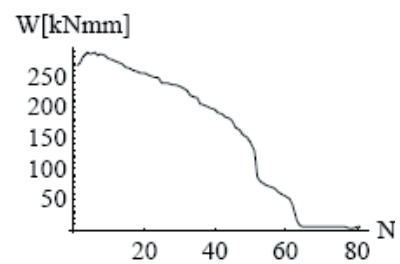
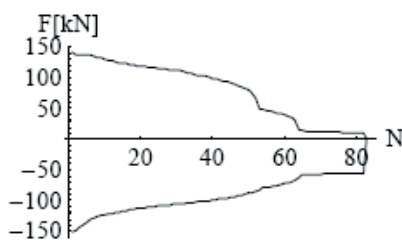
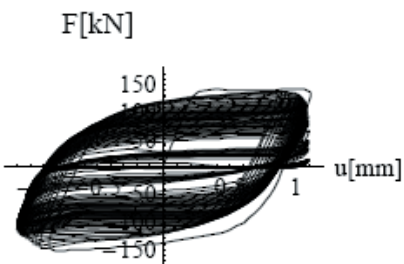
1C



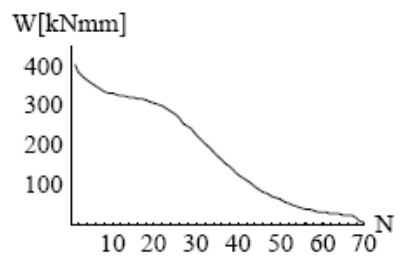
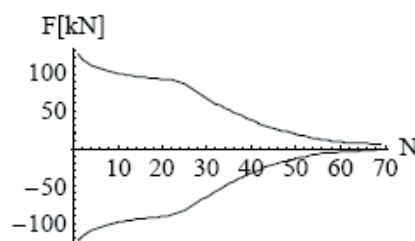
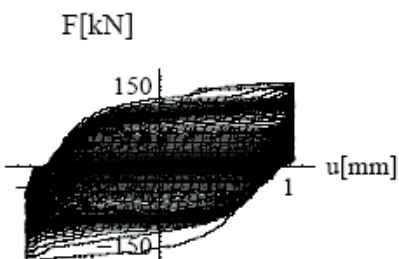
2C



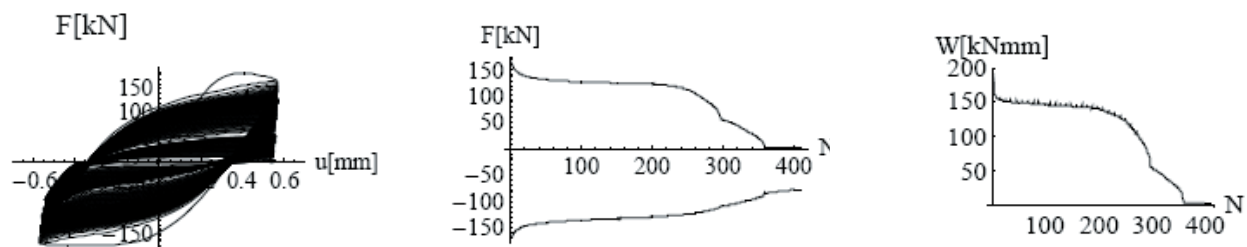
3C



4C



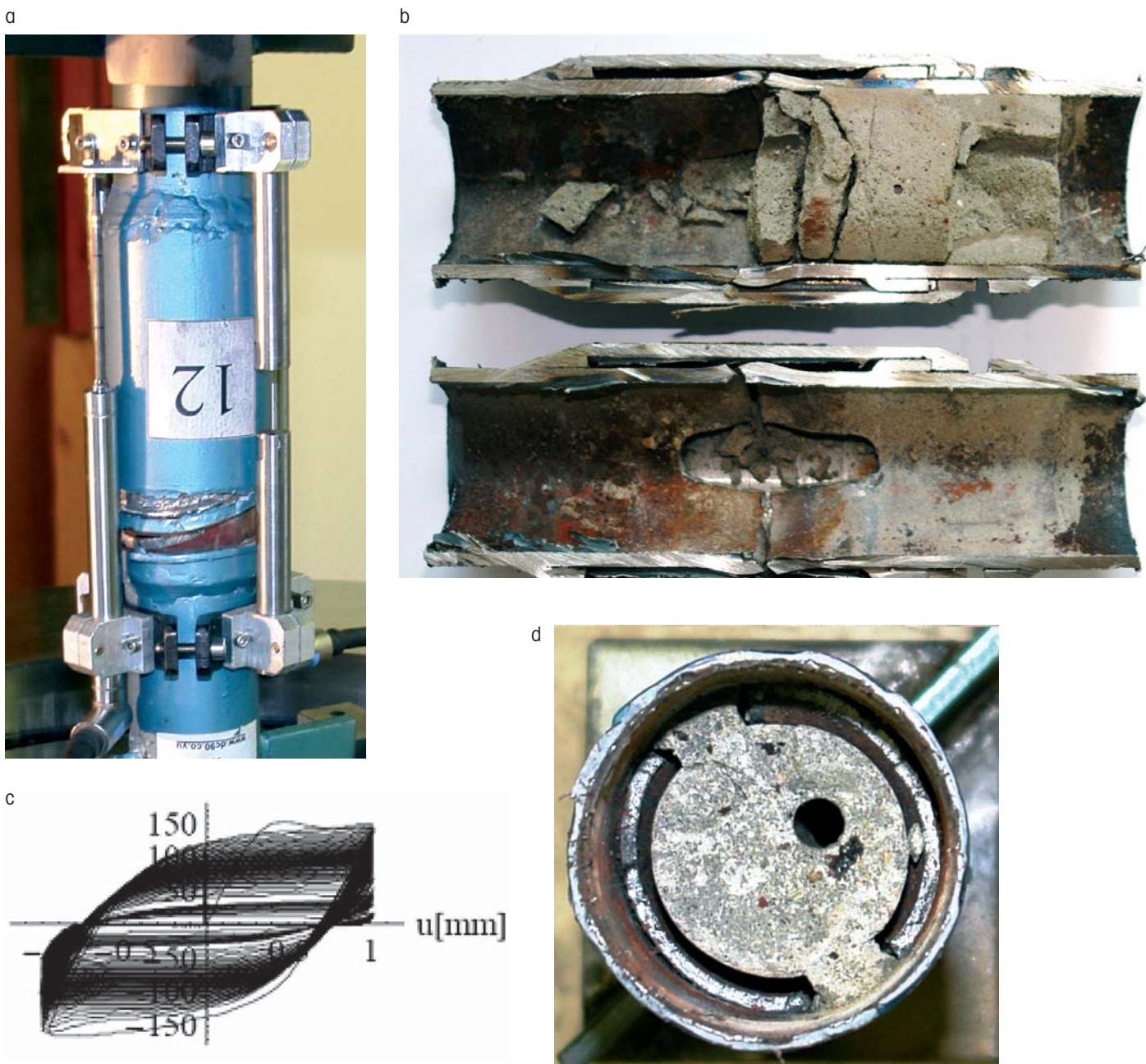
7C



8C

Legenda:  $F$  ... sila,  $u$  ... pomiki,  $N$  ... število ciklov,  $W$  ... energija

Preglednica 2 • Eksperimentalni rezultati cikličnih testov prve serije



Slika 6 • Ciklični test 2C s konstantno amplitudo pomika  $u = \pm 1$  mm; pretrganje cevi v območju oslabiljenega prereza

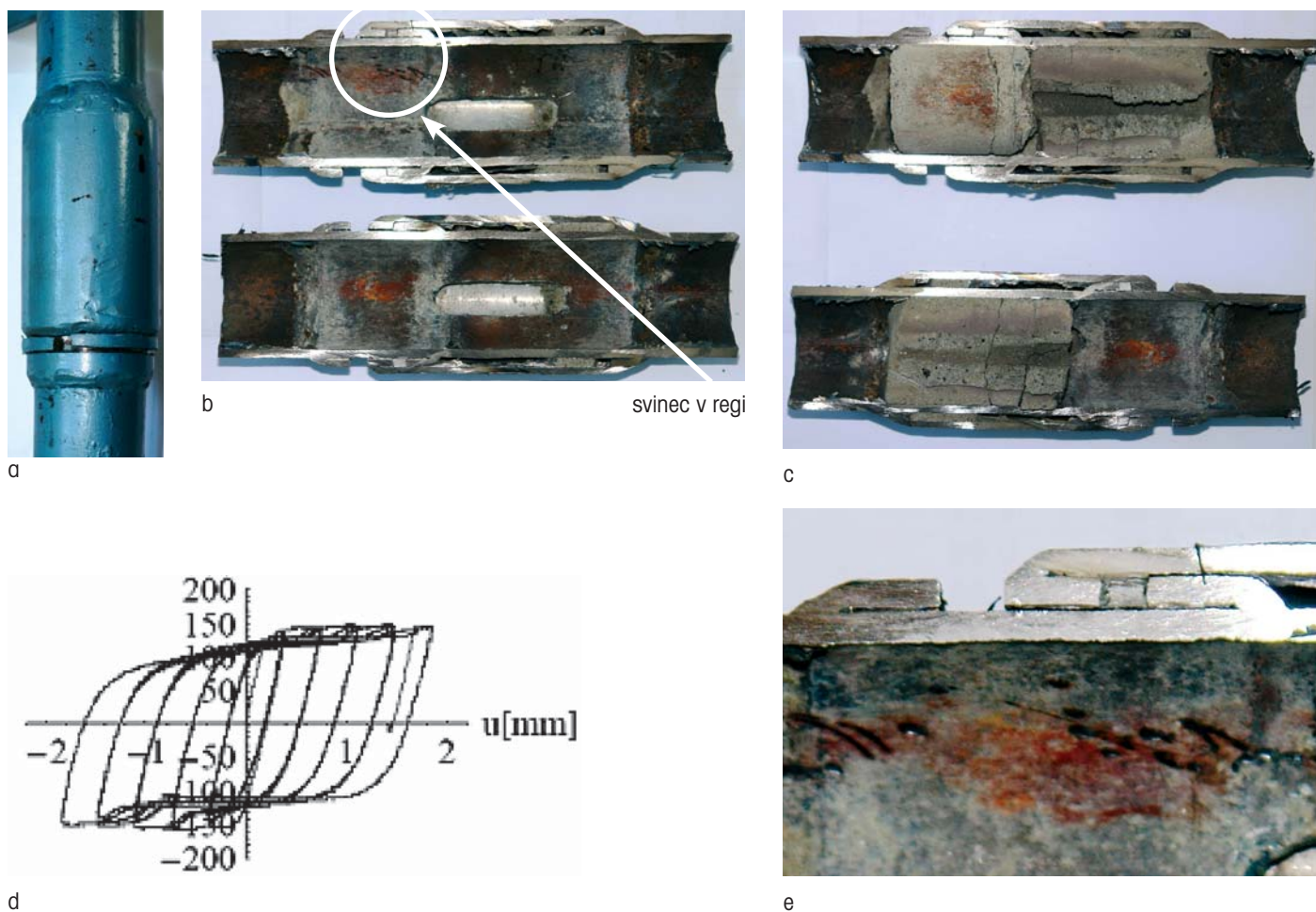
V preglednici 2 so prikazani rezultati cikličnih testov; histerezne zanke, diagrami  $F-N$ , in diagrami  $W-N$ . V diagramih  $F-N$  je  $F$  največja sila v posameznem ciklu  $N$ , v diagramih  $W-N$  pa je  $W$  energija posameznega cikla  $N$ . Energija  $W$  je definirana kot površina pod histereznimi zankami.

Na sliki 6a je prikazan porušen preizkušanelec z oznako 2C po končanem testu. Dušilec je bil obremenjen s cikličnimi vsiljenimi pomiki s konstantno amplitudo  $\pm 1$  milimeter. Porušil se je po 71 ciklih. Oblika porušitve je pravilna; zaradi nizkocikličnega utrujanja nastane razpoka v steni cevi v območju oslabljenega prereza (glej sliko 6b). Na isti sliki vidimo močno deformirano steno notranje cevi, tik ob pretrganju. Ta je posledica lokalnega

izbočenja pločevine navzven. Lokalno izbočenje navznoter je uspešno preprečeno s polnilom iz cementne malte (slika 6d). Zaradi lokalnega izbočenja pločevine se povečajo plastične deformacije, kar ima neposredni vpliv na zmanjšanje življenjske dobe materiala oz. število ciklov do porušitve. Poleg tega nosilnost dušilca z večanjem števila ciklov hitro pada, kar je razvidno iz histereznih zank sila–pomik na sliki 6c.

Na sliki 7 je porušen preizkušanelec z oznako 11C po končanem cikličnem testu z naraščajočo amplitudo pomikov. Porušitev je nastopila v 14. ciklu pri amplitudi pomikov 1,75 mm, kljub temu da je imel dušilec omogočene pomike do petih milimetrov. Še več, do porušitve ni prišlo v oslabljenem,

ampak v polnem prerezu (slika 17a). Na oslabljenem delu prereza ni opaziti razpoka (slika 17b, 17c). Med cikličnim obremenjevanjem je pri določenem pomiku prišlo do preskoka plastičnega polja deformacij iz neto v bruto prerez. Do preskoka plastičnega polja je prišlo tako zaradi izotropnega utrjevanja, ki je značilno za utrujanje materiala, kot tudi zaradi svinca v regi, ki ovira prosto gibanje dušilca v vzdolžni smeri tudi pri pomikih, ki so manjši od petih milimetrov (slika 7d). Pri počasnem obremenjevanju svinec lahko služi kot dodatni dušilec in se pri povečani obremenitvi iztisne iz rege. Pri dinamičnem, hitrejšem obremenjevanju pa se svinec upira skoraj kot togo telo in ne vrši predvidene funkcije.



Slika 7 • Ciklični test 11C z naraščajočo amplitudo pomika  $u$ ; pretrganje cevi izven oslabljenega prereza

Glavni razlog za preskok polja plastičnih deformacij iz neto v bruto prerez cevi je nepravilna oblika izreza oslabitve. Če razmerje med dolžino in širino izreza ni pravilno, obstaja nevarnost, da je zaradi utrjevanja materiala v plastičnem področju nosilnost neto prereza

večja od nosilnosti bruto prereza. Že z enostavnim računom natezne nosilnosti bruto  $N_{pl, Rd}$  in neto  $N_{net, Rd}$  prereza cevi lahko ugotovimo, da sta si obe vrednosti preveč blizu. Z enačbo (1) in (2) je izračunana nosilnost z nominalno mejo tečenja  $f_y$  in nominalno

natezno trdnostjo  $f_t$ .

$$N_{pl, Rd} = A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{m0}} = 4.136 \text{ cm}^2 \cdot \frac{23.5 \text{ kN / cm}^2}{1.0} = 97.2 \text{ kN} \quad (1)$$

$$N_{net,Rd} = 0.9 \cdot A_{net} \frac{f_u}{\gamma_{M2}} = 0.9 \cdot 3.411 \frac{36}{1.25} = 88.4kN \quad (2)$$

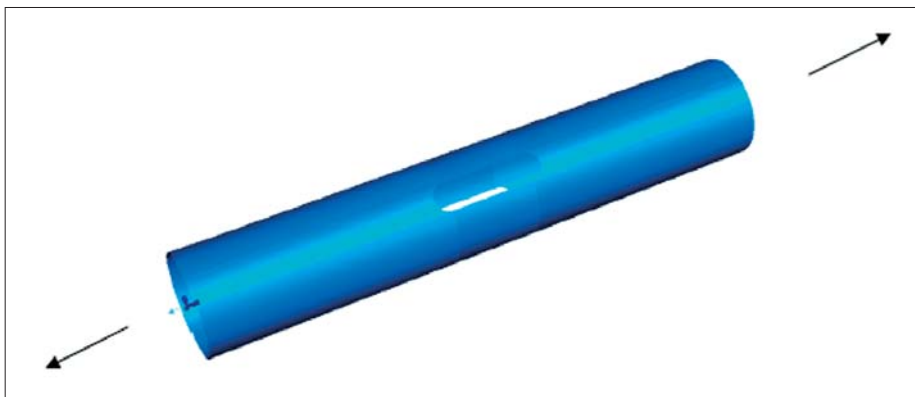
Če upoštevamo eksperimentalno določeno mejo tečenja  $f_y$  in pričakovano mejno nosilnost  $f_w$  je nosilnost bruto in neto prereza skoraj enaka:

$$N_{pl,t} = A \cdot f_y = 4.136cm^2 \cdot 31.5kN / cm^2 = 130.3kN \quad (3)$$

$$N_{net,Rd} = A_{net} \cdot f_u = 3.411cm^2 \cdot 37.8kN / cm^2 = 128.9kN \quad (4)$$

Poleg kriterija nosilnosti igra pomembno vlogo tudi dolžina oslabitve. Iz literature (Pilusso, 2005) je poznan analitični izraz za izračun potrebne dolžine oslabljenega prereza. Predlagana dolžina oslabitve ne sme biti manjša od  $5,65 \sqrt{A_{net}}$ . V našem primeru je dejanska dolžina oslabitve 37,5 milimetra, kar je veliko manj od priporočene vrednosti  $5,65 \sqrt{341,1} = 104$  milimetra.

Vpliv oblike izreza na preskok polja plastičnih deformacij iz neto v bruto prerez je prikazan z numerično analizo. V računalniškem pro-



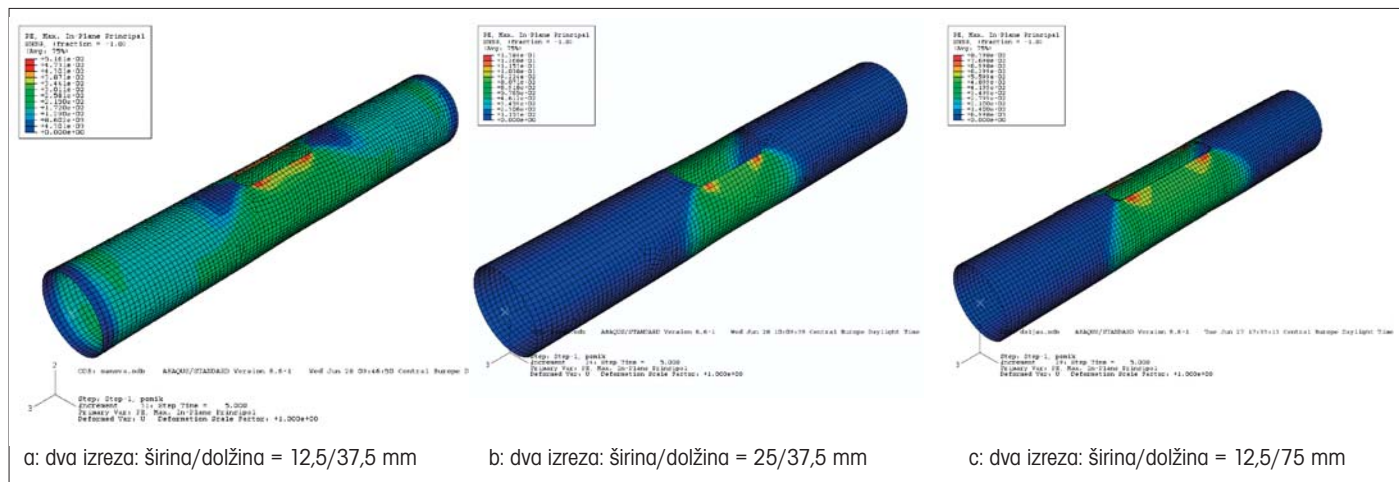
Slika 8 • Numerični model cevi dušilca z dvema izrezoma

gramu ABAQUS so modelirane cevi dušilca s tremi različnimi oblikami izreza. Stena cevi je modelirana s ploskovnimi končnimi elementi, nelinearni materialni model pa z eksperimentalno določenimi mehanskimi lastnostmi materiala, iz katerega so izdelane cevi. Model je na eni strani nepomično podprt, na drugi strani pa je obremenjen z vzdolžnim pomikom 5 milimetrov (slika 8).

Na sliki 9 vidimo polje plastičnih deformacij za tri različne oblike oslabitev cevi. V primeru izreza, ki je enak originalnim dušilcem, je

plastificirana celotna cev (slika 9a). Na sliki 9b je širina luknje dvakrat večja od prvotne. Omejitev plastifikacije v območju oslabitve dobimo, če spremenimo bodisi širino luknje (slika 9b) ali dolžino izreza (slika 9c).

Ker z rezultati ne moremo biti zadovoljni, smo se odločili za izdelavo nove serije dušilcev. Poskušali smo odpraviti čim več pomanjkljivosti in tako izboljšati obnašanje samega dušilca. Izdelana je bila nova serija preizkušancev sistema DC90.



Slika 9 • Plastične deformacije pri pomiku 5 milimetrov za tri različne oblike izreza

### 3 • TESTI NA NOVIH DUŠILCIH

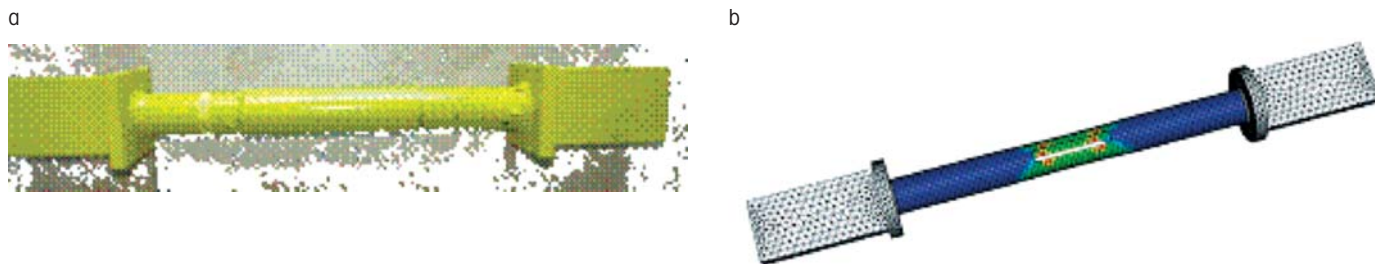
Novi izrez v steni lukenj omejuje plastifikacijo dušilca samo na območje oslabljenega prereza za razliko od originalnega dušilca, kjer se je plastificirala cev tudi v polnem, bruto prerezu (slika 10).

Lokalno izbočenje notranje cevi navzven je preprečeno z zunanjo cevjo, ki tesno ob-

jema notranjo cev brez praznega prostora, kot je to bil slučaj na prvotnih dušilcih. Polnilo iz cementne malte preprečuje lokalno izbočenje stene cevi navznoter. Med polnilom in cevjo dušilca je vgrajen ločilni sloj v obliki tanke jeklene pločevine. Med delovanjem dušilca naj bi ločilni sloj omogočil

neovirano drsenje med cevjo dušilca in polnilom.

V novih dušilcih nismo vgradili svinca zaradi omenjenih negativnih učinkov pri ciklični obtežbi. Poleg tega so novi dušilci brez reg, ki bi sicer omejevale vzdolžne pomike dušilca. To na rezultate nima nobenega vpliva, ker nas v naši raziskavi ne zanima obnašanje sistema po porušitvi neto prereza notranje cevi. Na obeh straneh je na preizkušanece privarjena dodatna pločevina,



Slika 10 • 10a Preizkušavec 10b Polje plastičnih deformacij pri vzdolžnem pomiku 5 milimetrov

preko katere je dušilec vpet v napravo za preizkušanje.

Za določitev osnovnih mehanskih lastnosti materiala, iz katerih so izdelane cevi, so bili narejeni trije standardni natezni testi. Izmerjena je napetost na meji elastičnosti  $f_y = 399$  MPa, natezna trdnost  $f_u = 430$  MPa in deformacija

na meji porušitve  $\varepsilon_{porušitev} = 0,19$ . Razlika med izmerjeno napetostjo na meji tečenja in med natezno trdnostjo je mala, kar na plastifikacijo, ki mora biti omejena samo na neto prerez, ne vpliva ugodno.

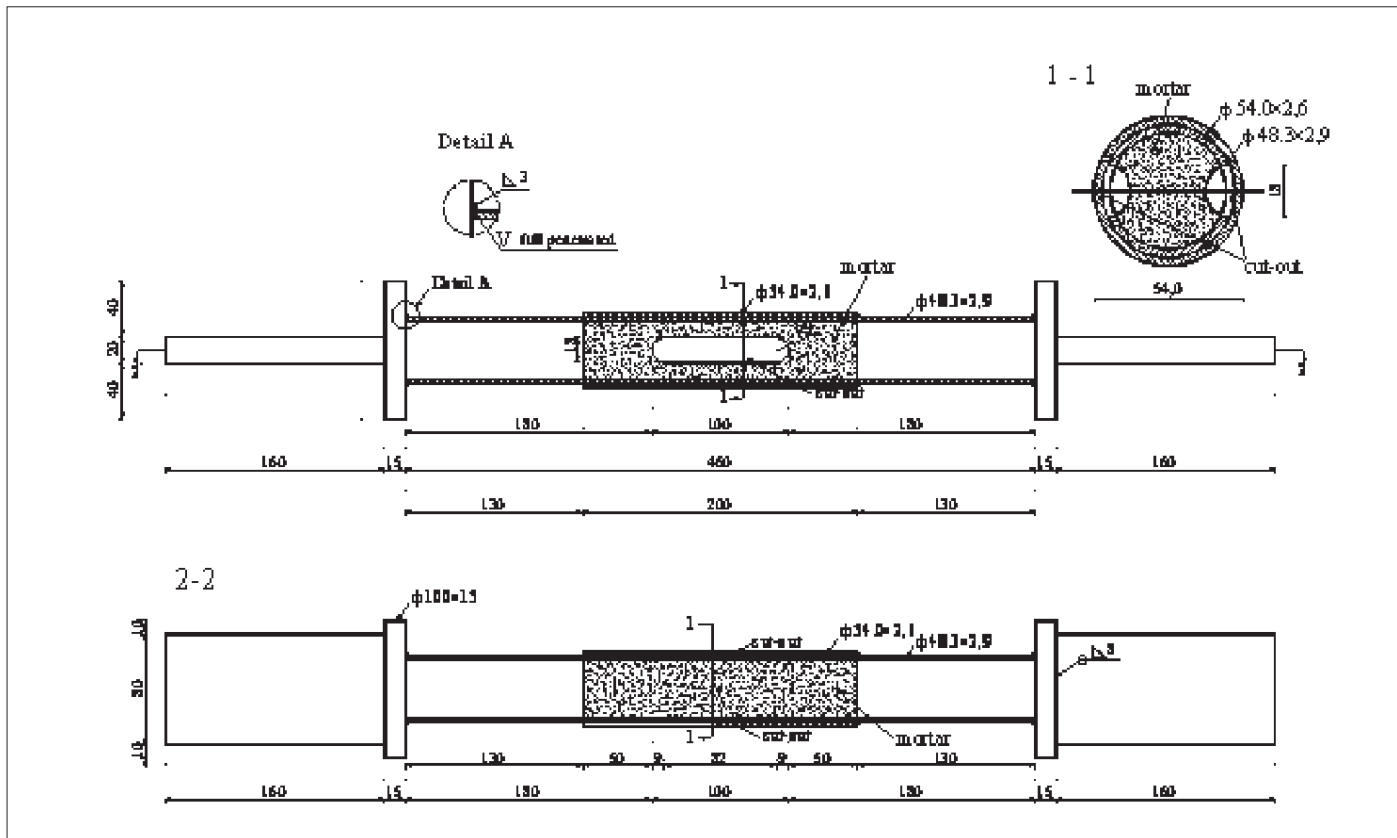
Na osnovi kemične analize je ugotovljeno, da je cev izdelana iz maloogljiknega jekla, ki se

uporablja največkrat za hladno preoblikovanje. Kemična sestava cevi  $\varnothing 48,3 \times 2,9$  je prikazana v preglednici 3.

Obremenilni protokol je podoben prvi seriji, narejenih je 12 novih testov: en natezni test, ostali so ciklični z različno amplitudo in z različno frekvenco (preglednica 4).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Al
0,09	< 0,013	0,500	0,010	0,015	0,013	0,010	0,03	0,012	0,038

Preglednica 3: Kemična sestava cevi dušilca (%) druge serije testov



Slika 11 • Shematski prikaz druge serije preizkušancev

Številka testa	Vrsta obremenitve	Frekvenca (Hz)	Hitrost deformacij (s <sup>-1</sup> )
1	Monotono natezni test		
2	Ciklični test, $u^* = +/- 0,5$ mm	0,1	0,002
3		4	0,1
4	Ciklični test, $u = +/- 1$ mm	0,05	0,002
5		1	0,05
6		1	0,05
7		2	0,1
8	Ciklični test, $u = +/- 2$ mm	0,025	0,002
9		1	0,1
10	Ciklični test, $u = +/- 4$ mm	0,0125	0,002
11		0,5	0,1
12	Ciklični test, $u = +/- 0,35$ do $- +/- 3,50$ mm, po tri cikle	0,01 do 0,1	0,002

\*Amplituda vsiljenih pomikov pri cikličnem obremenjevanju

Preglednica 4 • Obremenilni protokol druge serije testov



a

Ciklični test številka 4, amplituda pomikov  $u = +/- 1,0$  mm

b

Ciklični test številka 10, amplituda pomikov  $u = +/- 4,0$  mm

Slika 12 • Porušitev vzorcev v neto prerezu cevi; a) nepoškodovano betonsko polnilo; b) porušeno betonsko polnilo in lokalno izbočenje pločevine

Amplituda vsiljenih pomikov je med 0,5 milimetra in 4 milimetri. Frekvenca ustreza hitrosti deformacij od 0,002 s<sup>-1</sup> do 0,1 s<sup>-1</sup>. Pri testu številka 12 je amplituda pomikov vsake tri cikle povečana za dvakratnik pomika, ki povzroči plastifikacijo neto prereza dušilca. Pri ostalih cikličnih testih je amplituda pomikov konstantna vse do porušitve vzorca.

Pri vseh testih je prišlo do enake vrste porušitve, pretrganja v neto prerezu cevi zaradi nizkocikličnega utrujanja. Pri vzorcih, kjer je bila amplituda pomikov manjša (0,5 in 1,0 milimeter), je razpoka v steni cevi nastala brez lokalnega izbočenja pločevine. Na sliki 12a je lepo vidna razpoka v steni cevi, betonsko polnilo je nepoškodovano, pločevina ni vidno deformirana. Pri večjih pomikih pa je prišlo do nezaželenega pojava, lokalnega izbočenja pločevine. Na sliki 12b vidimo pretrganje cevi v oslabiljenem delu, pločevina je močno deformirana. Vzrok je polnilo iz cementne malte, ki se je porušilo in povzročilo lokalno izbočenje. Porušitev polnila je posledica slabega delovanja ločilnega sloja v obliki tanke pločevine med polnilom in cevjo dušilca.

V Preglednici 5 so zbrani rezultati cikličnih testov, število ciklov pri porušitvi  $N$ , za različne amplitude pomikov in hitrosti deformacij. V literaturi (Skuber, 2003) je poznanih več kriterijev za izbiro števila ciklov pri porušitvi. Izbrana sta dva, ki sta v literaturi največkrat uporabljena, nosilnost in energija. V preglednici je podano število ciklov, kjer nosilnost oz. energija pade za 10 %, 30 % in 50 % glede na vrednost v drugem ciklu obremenjevanja. Izračun je narejen na osnovi histereznihih zank sila-pomik. Za porušitev pri nizkocikličnem utrujanju materiala štejemo nastanek makrorazpoke, kateri sledi hitra porušitev prereza. Nastanek makrorazpoke lahko dovolj dobro ocenimo iz diagramov F-N in W-N, kjer je narisana največja sila v posameznem ciklu F oz. energija W v odvisnosti od števila ciklov N. Tu je energija W definirana kot površina pod histereznihi zankami. Če primerjamo med seboj oba kriterija, padanje nosilnosti in energije, ugotovimo, da je število ciklov do porušitve približno enako. Za vse teste je značilno, da se 10-odstotni padec nosilnosti zgodi zelo hitro, v prvih nekaj ciklih, medtem ko se 50-odstotni padec nosilnosti zgodi tik pred porušitvijo neto prereza cevi. V našem primeru za porušitev lahko predpostavimo 30-odstotno redukcijo nosilnosti ali energije.

Iz rezultatov testov, ki so podani v preglednici 4, lahko ugotovimo tudi vpliv hitrosti deformacij na nizkociklično utrujanje materiala. Pri vseh testih lahko ugotovimo, da je število

Številka testa	Amplituda pomikov (mm)	Hitrost deformacij ( $s^{-1}$ )	Zmanjšanje nosilnosti na cikel za			Zmanjšanje energije na cikel za		
			10 %	30 %	50 %	10 %	30%	50 %
2C	$u = +/- 0,5$	0,002	12	<b>147</b>	671	17	<b>164</b>	687
3C		0,1	13	<b>98</b>	845	18	<b>121</b>	862
4C	$u = +/- 1$	0,002	11	<b>241</b>	255	8	<b>245</b>	258
5C		0,05	14	<b>115</b>	142	17	<b>134</b>	145
6C		0,05	9	<b>204</b>	211	15	<b>211</b>	212
7C		0,1	7	<b>192</b>	238	16	<b>201</b>	237
8C	$u = +/- 2$	0,002	9	<b>35</b>	39	7	<b>34</b>	40
9C		0,1	6	<b>30</b>	37	11	<b>32</b>	38
10C	$u = +/- 4$	0,002	8	<b>10</b>	11	8	<b>10</b>	11
11C		0,1	7	<b>9</b>	10	7	<b>9</b>	10

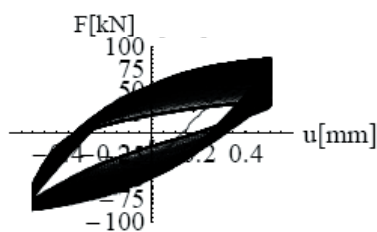
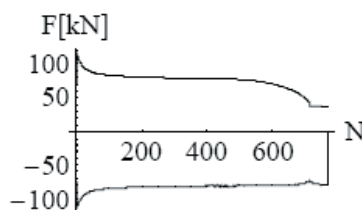
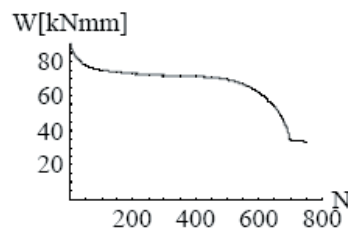
Preglednica 5 • Število ciklov do porušitve  $N$ , druge serije preizkušancev

ciklov do porušitve večje pri počasnejšem utrujanju oz. pri manjši hitrosti deformacij kot pri utrujanju z večjo hitrostjo vsiljenih pomikov. Število ciklov do 30 % redukcije nosilnosti ali energije je pri hitrosti deformacij  $0,002 s^{-1}$  pri isti amplitudi pomikov največje in pri hitrosti deformacij  $0,1 s^{-1}$  najmanjše. Izjema v pravilu se pojavi samo enkrat, in sicer pri amplitudi pomikov 1,0 milimeter, kjer je najmanjše

število ciklov pri hitrosti deformacij  $0,05 s^{-1}$  in ne pri  $0,1 s^{-1}$ , kot je to slučaj pri vseh ostalih amplitudah. V vseh primerih je število ciklov do porušitve zelo veliko.

Rezultati cikličnih testov z amplitudo 0,5 milimetra (2C in 3C) so prikazani v preglednici 6 in izkazujejo dobro obnašanje dušilca. Histerezne zanke sila-pomik ( $F-u$ ) so simetrične, kar pomeni enako obnašanje

dušilca v nategu in v tlaku. Poleg tega so zanke stabilne, kar se kaže v počasnem padanju nosilnosti z večanjem števila ciklov. Porušitev nastopi v neto prerezu brez lokalnega izbočenja pločevine. V preglednici 6 so prikazane tudi histerezne zanke pri obremenilnem protokolu, kjer je vsake tri cikle povečana amplituda vsiljenih pomikov (12C).

Histerezna zanka  $F-u$ Diagram  $F-N$ Diagram  $W-N$ 

Test  
številka

2C

Legenda:  $F$  ... sila,  $u$  ... pomiki,  $N$  ... število ciklov,  $W$  ... energija

Preglednica 6 • Eksperimentalni rezultati cikličnih testov druge serije 2C, 3C in 12C

Nekoliko slabše obnašanje dušilca je pri amplitudi 1 milimeter in več. Porušitev je pričakovana, v neto prerezu. Zaradi slabe kvalitete polnila nastopi lokalno izbočenje pločevine in s tem večje plastične deformacije. Proces utrujanja je zaradi tega pospešen,

kar se kaže v hitrejšem padanju nosilnosti in energije z večanjem števila ciklov. Ta pojav nastopi pri testih z večjo amplitudo, 2 milimetra in več. Histerezne zanke po določenem številu ciklov postanejo nesimetrične zaradi lokalnega izbočenja stene cevi navznoter. Pri

testih 8C do 11 C sila  $F$  v tlaku nepričakovano naraste, tik preden doseže končni pomik (preglednica 7). Pojav se lepo vidi na diagramih  $F-N$ . Povečanje sile pripisujemo trenju, ki nastane med notranjo in zunanjo cevjo, ki sicer tesno nalegata ena na drugo.

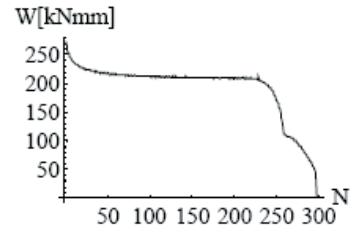
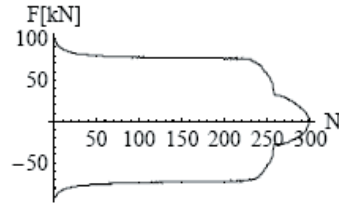
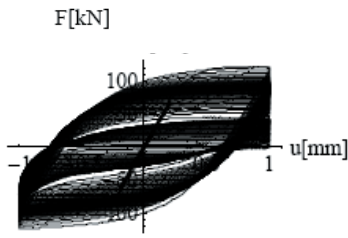
Preglednica 6 • Število ciklov do porušitve  $N$ , druge serije preizkušancev

Test številka

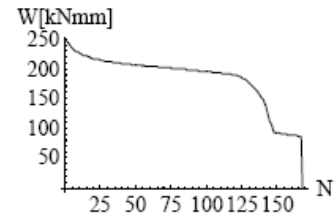
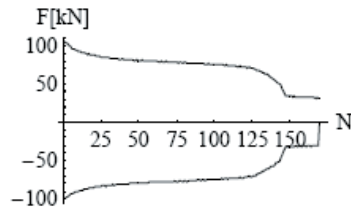
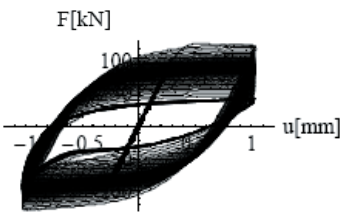
Histerezna zanka  $F-u$

Diagram  $F-N$

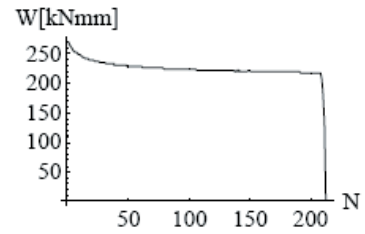
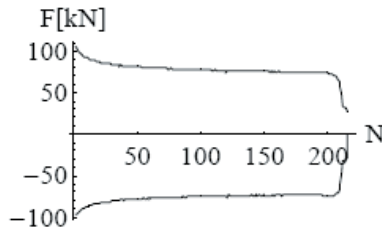
Diagram  $W-N$



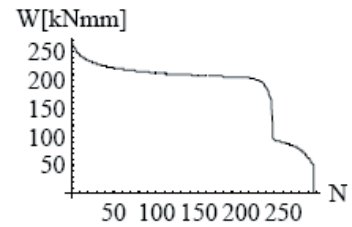
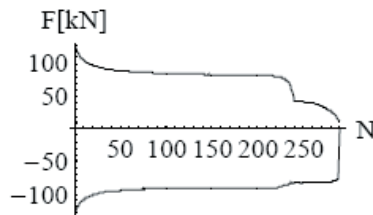
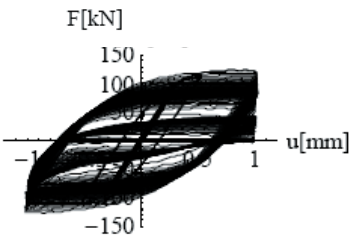
4C



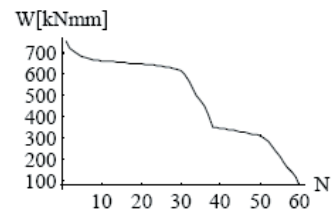
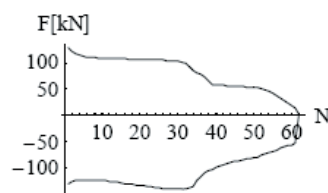
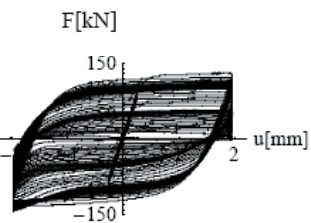
5C



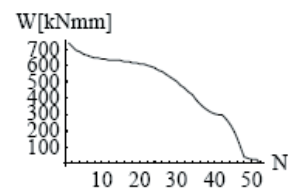
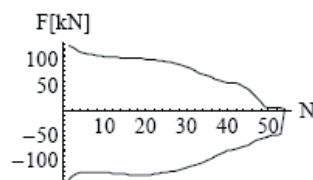
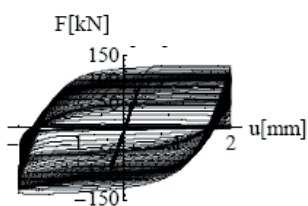
6C



7C

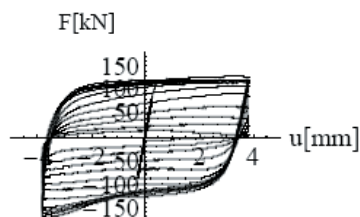
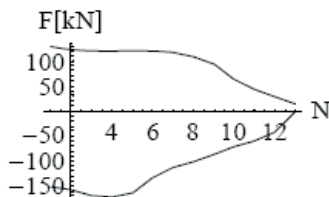
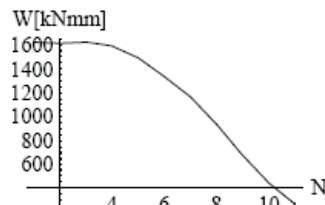


8C

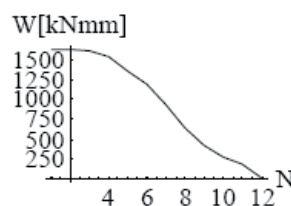
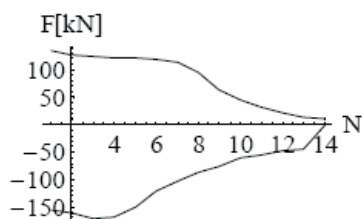
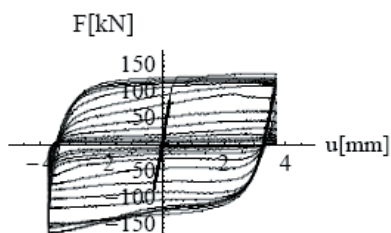


9C



Histerezna zanka  $F-u$ Diagram  $F-N$ Diagram  $W-N$ 

10C



11C

Preglednica 7 • Eksperimentalni rezultati cikličnih testov druge serije (od 4C do 11C)

#### 4 • SKLEP

Naše raziskave so bile omejene zgolj na testiranje dušilca, ki je sicer sestavni del centričnega povezja. S centričnim povezjem in s tem povezanim problemom uklona tlačnih palic se nismo ukvarjali. Dušilec disipira potresno energijo na način, ki ga imenujemo nizkociklično utrujanje materiala. Jedro dušilca predstavlja oslabljeni jekleni prerez, ki je oblikovan tako, da se v primeru potresa plastificira. V članku so predstavljeni izsledki raziskav in izpostavljeni problemi, povezani s pravilnim delovanjem naprave. Na osnovi lastnih raziskav so se pokazale številne pomanjkljivosti, ki smo jih delno uspešno odpravili.

Nazorno je izpostavljen problem, povezan s pravilnim oblikovanjem oslabljenega dela prereza. Poleg neto prereza igra pomembno vlogo tudi dolžina, na kateri je prerez oslabljen. Če je ta dolžina prekratka, pride do preskoka plastifikacije iz neto v bruto prerez, kar ima lahko resne posledice za varnost objekta.

Življenjska doba dušilca je v prvi vrsti odvisna od velikosti plastičnih deformacij in od števila ciklov pri dinamični obtežbi. Zaradi tega je pomembno, da je dušilec načrtovan tako, da je preprečeno lokalno izbočenje pločevine tudi pri velikih tlačnih plastičnih deformacijah.

Izvedli smo dve seriji testov, prvo na originalnih in drugo na novih, izpopolnjenih dušilcih. Testi potrjujejo, da novi dušilci izkazujejo boljše obnašanje kljub določenim problemom, ki ostajajo. Tako lahko rečemo, da je delovanje izpopolnjenih dušilcev v območju pomikov do dva milimetra ustrezno. Pri večjih pomikih se notranje betonsko polnilo poruši, posledica tega je lokalno izbočenje pločevine in s tem pospešeno nizkociklično utrujanje materiala. Ocenjujemo, da so za uporabo dušilcev v območju pomikov, večjih od dveh milimetrov, potrebne nadaljnje izboljšave, zlasti kar se tiče izbire veznega sloja med polnilom in cevjo kot tudi same izbire materiala tako za cevi dušilcev kot tudi za polnila. V vsakem primeru je uporaba predstavljenega sistema omejena, in sicer je primerna za protipotresno ojačitev togih konstrukcij.

#### 5 • LITERATURA

- Beg, D., Plumier, A., Remec, C., Sanchez, L., Influence of strain rate, Moment Resistant Connections of Steel Frames in Seismic Areas, (F.M. Mazzolani), E&FN SPON, pp. 343–367, 2000.
- Beg, D., Skuber, P., Low-cycle fatigue of steel frames under seismic loading, International journal of steel structures, vol. 3, št. 1, str. 19–27, 2003.
- ECCS, Recommended testing procedure for assessing the behaviour of structural steel elements under cyclic loads, Technical Committee 1 – Structural Safety and Loading, TWG1.3 – Report NO 45, 1986.
- Petrašković, Z., Seizmičko pojačenje i obezbedenja objekta System DC90, Monografija, str. 121, Beograd, 1997.
- Piluso, V., Montuori, R., Longo, A., An innovative conception for bracing members: The reduced brace section solution. Proceedings of 4th European Conference on Steel and Composite Structures, EUROSTEEL 2005, Maastricht, Netherlands, 2005.
- Skuber, P., Analiza nizkocikličnega utrujanja jeklenih konstrukcij na osnovi mehanike poškodb, doktorat, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2003.
- Skuber, P., Beg, D., Sinur, F., Experimental analysis of DC90 energy absorber device, PROHITECH WP7 internal report, 2008.

# MOŽNOST UTRDITVE BETONA Z ZAKASNELO TVORBO ETRINGITA

## POSSIBILITY FOR CONCRETE STRENGTHENING WITH DELAYED ETTRINGITE FORMATION

Samo Lubej, univ. dipl. inž. grad.,

samo.lubej@uni-mb.si

mag. Andrej Ivanič, univ. dipl. inž. grad.,

andrej.ivanic@uni-mb.si

Fakulteta za gradbeništvo, Maribor

Znanstveni članek

UDK: 691.32

**Povzetek** | Zakasnela tvorba etringita v strjenem betonu navadno povzroči poškodbe betona. Na maltnih preskušancih, ki so bili izdelani z dodatkom elektrofiltrskega pepela, je bilo z načrtovano zakasnelo tvorbo etringita izmerjeno nabrekanje, trdnostne lastnosti in opravljena analiza mikrostrukture. Nastajanje etringita na nukleacijskih mestih, ki jih predstavljajo zračni mehurčki aeranta, je povzročilo utrditev, ki se odraža s povečanjem trdnosti betona.

**Summary** | The delayed ettringite formation in already hidratized concrete usually causes the degradation of concrete. On the samples of concrete, which were manufactured with the addition of electro-filter ashes, the swelling, and strength characteristics, with the planned delayed formation of ettringite, were measured and the control of microstructure was made. The formation of ettringite on the nucleation places, which are presented by air bubbles of aerant, caused strengthening, which is presented by the improvement of concrete strength.

### 1 • UVOD

V gradbeni praksi se za proizvodnjo betonov in malt najpogosteje uporabljajo cementi na bazi Portland cementnega klinkerja. V kemijskem procesu hidratacije klinkerskih mineralov nastajajo hidrati in hidroksidi. Ker pa je v mešanici vedno prisotna tudi določena količina sadre, se – kot rezultat reakcije med trikalcijevim aluminatom ( $C_3A$ ) in sadro ter vodo – tvori tudi mineral etringit ( $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaOSO_4 \cdot 31H_2O$ ). Sprememba prostornine pri tej reakciji je pozitivna. Kristali etringita rastejo hitro in tvorijo ovojnice okoli zrn cementa, kar upočasnjuje hidratacijo. Prisotnost minerala etringita v tekočem sistemu mešanice cementa in vode nima bistvenega

vpliva na končne lastnosti betona. Nasprotno pa je nastanek etringita v strjenem betonu nezaželen in nevaren. V cementnem kamnu se lahko mineral etringit pojavi, če je beton izpostavljen vplivu sulfatov. Ker je pri tej reakciji volumen reakcijskega produkta – etringita – večji kot volumen reaktantov, nastanejo v togem cementnem kamnu notranje napetosti, kar ima lahko za posledico razpad betona. Pri ovirani rasti kristalov etringita lahko te napetosti dosežejo vrednost do 8 MPa (Colepardi, 2003). Ta vpliv imenujemo sulfatna korozija betona. Znano je, da so cementi z nizkim odstotkom komponente  $C_3A$  obstojnejši proti sulfatni koroziji. Ob količini komponente  $C_3A$

pa na potek sulfatne korozije vpliva tudi oblika te komponente. Kristaliničen  $C_3A$  je bolj reaktiven od steklastega (Gerbec, 2005). Pojav povečanja prostornine pri nastanku mineralov etringita v cementnem kamnu, ki je bogat s kalcijevim sulfoaluminatom  $C_4A_3\bar{S}$ , pa se lahko koristi za kompenzacijo krčenja cementnega kamna zaradi sušenja. Ekspanzijo v cementni pasti, ki nastopi po končanem procesu strjevanja, lahko koristimo pri razvoju kemijskega prednapenjanja v ekspanzijskih cementih (Colepardi, 2003). Manj znano pa je, da bi lahko rast kristalov etringita izkoristili tudi za kontrolirano utrditev betona.

#### 1.1 Zakasnela tvorba etringita

Zakasnela tvorba etringita, znana tudi pod terminom Delayed Ettringite Formation (DEF), je poznana kemijska reakcija, ki je v znanosti

še vedno uvrščena v skupino nerešenih problemov. Intenziteta ekspanzije pri zakasneli tvorbi etringita v strjenem betonu je pogojena s tremi pomembnimi faktorji, ki so: kemijski vplivi (od njih je odvisno, koliko etringita bo pri kemijski reakciji nastalo), mikrostruktura cementne paste (od katere je odvisno, kakšne napetosti bodo nastopile) in mikrostruktura betona (od katere je odvisno, kakšen bo odgovor materiala na te napetosti) (Taylor, 2001).

Kot je poznano, da v procesu hidratacije betona bazični reagenti pospešujejo ta proces, velja to tudi pri zakasneli tvorbi etringita v betonu (Bauer, 2006). Bistveni faktorji, ki povzročajo zakasnelo tvorbo etringita, pa so: visoka temperatura (več kot 70 °C), obstoj mikrorazpok, ki so posledica proizvodnje, nege ali alkalno silikatne reakcije, izpostavljenost cikličnim spremembam – moko/suho, pozno izstopanje sulfatov iz cementnega klinkerja ali iz drugih virov, prehajanje reaktantov –  $SO_4$ , Al in Ca ionov – skozi pore betona, ki so nasičene z vodo ali vodno paro,

ter ostanki etringita znotraj obstoječih razpok in kasnejše odpiranje razpok zaradi rasti kristalov etringita (Bauer, 2006). Za z zakasnelo tvorbo etringita inducirano ekspanzijo je potrebna zadostna količina elektrofiltrskega pepela (Foliard, 2006). Od količine prostega CaO v elektrofiltrskem pepelu in cementu je odvisna intenziteta ekspanzije. Uporaba manjših količin elektrofiltrskega pepela in takšnega, ki vsebuje več kot 25 % prostega CaO, pa lahko tudi zatre ekspanzijo (Foliard, 2006).

### 1.2 Opredelitev problema

V članku je prikazana možnost, da z načrtovano zakasnelo tvorbo kristalov etringita v strjenem betonu izboljšamo njegove trdnostne lastnosti. Ciljna mikrostruktura betona je bila dosežena z dodatkom fino razpršenih mehurčkov, ki so nastali z delovanjem dodatka aeranta. Mehurčki so predstavljali nukleacijska mesta za tvorbo kristalov etringita. Tako je bila dosežena krajevno kontrolirana tvorba etringita – utrjevalnih delcev. Etringit, katere-

ga tvorba v strjenem betonu je v splošnem nezaželeno, nastaja na mestih razpok, por ali drugih napak. Ker je prostornina produkta pri tej kemijski reakciji večja od prostornine reaktantov, nastopi sila na steno razpoke ter koncentracija napetosti na njenem ustju. Posledica je rast oziroma širjenje razpoke. Rast kristalov etringita je povzročila napetosti v matrici betona. Nastajanje etringita na nukleacijskih mestih ob razpoki pa ima lahko za posledico tudi njeno zapiranje. Pri raziskavi so bili uporabljeni ena vrsta cementa in en tip aeranta z dodatkom dveh tipov elektrofiltrskega pepela različnih kemijskih sestav. Elektrofiltrski pepel je dodatek, ki ga navadno dodajamo že cementom, saj ima latentne hidravlične ali pucolanske lastnosti. Maksimalno zrno mineralnega agregata je bilo 2 mm. Vodovezivno razmerje, količina dodatkov ter pogoji za potek hidratacije pa so bili določeni na osnovi laboratorijskih preizkusov. Prav tako so bili določeni tudi potrebni klimatski pogoji okolja za načrtovano tvorbo kristalov etringita v strjenem betonu.

## 2 • EKSPERIMENTALNO DELO

Prvi del preiskav je bil opravljen na cementni pasti standardne konsistence, iz katere so bile izdelane pogačice, ki so bile negovane 24 ur v vlažni komori pri relativni vlažnosti zraka  $98 \pm 2\%$  in temperaturi  $20 \pm 2\text{ °C}$ . Po tem času so bile pogačice tri ure izpostavljene vrenju v vodi. Nato je bila polovica vzorcev negovana v vodi pri temperaturi  $20 \pm 2\text{ °C}$ , druga polovica pa na zraku pri temperaturi  $20 \pm 2\text{ °C}$  ter relativni vlažnosti zraka  $65 \pm 2\%$ .

Pri izdelavi teh vzorcev je bil uporabljen cement CEM I 42,5 R in elektrofiltrski pepel dveh različnih kemijskih sestav (tip (a) in tip (b)), ki se uporablja kot dodatek za betone in je skladen s standardom SIST EN 450-1. Rezultati laboratorijskih analiz pepelov, ki so nam jih posredovali proizvajalci, so podani v preglednici 1.

Cementni pasti je bil dodan še aerant, ki bazira na vodni raztopini abietinske kisline. Masni deleži posameznih komponent cementne paste, pri kateri je bila dosežena standardna konsistenca po standardu SIST EN 196-3, je podan v preglednici 2.

Komponenta	Vsebnost komponent za EFP tip (a) (% (m/m))	Vsebnost komponent za EFP tip (b) (% (m/m))
Žarilna izguba pri 950 °C	2,63	0,41
Netopni ostanek	10,23	16,67
SiO <sub>2</sub> v netopnem ostanku	5,77	13,08
SiO <sub>2</sub> čisti	42,82	47,62
SiO <sub>2</sub> raztopljen	0,48	0,64
SiO <sub>2</sub> celokupni	43,30	48,26
SiO <sub>2</sub> reaktivni	37,53	35,18
CaO reaktivni	8,01	7,56
SO <sub>3</sub>	1,88	1,88
CaO prosti	1,22	2,00

Preglednica 1 • Rezultati laboratorijskih analiz elektrofiltrskih pepelov

Oznaka vzorca	C (g)	EPF (g)	V (g)	D (g)
1	413,3	186,7 tip (a)	159,5	18
2	413,3	186,7 tip (b)	154,5	18

Preglednica 2 • Masni deleži komponent cementne paste standardne konsistence za posamezni preskušaneč – pogačico

Oznake v preglednici 2 pomenijo:

- C, masa cementa CEM I, 42,5 R,
- EPF, masa elektrofiltrskega pepela,
- V, masa vode, in
- D, masa dodanega aeranta.

Na preskušancih iz cementnega kamna – pogačicah – je bila v časovnih intervalih 7, 14 in 28 dni opravljena vizualna kontrola površine, analiza mikrostrukture na prelomnih površinah preskušancev pa je bila opravljena z elektronskim vrstičnim mikroskopom Quanta 200 3D oziroma Sirion 400 NC.

Malta za preskušance, namenjene preiskavam trdnosti in ekspanzije, je bila izdelana z

laboratorijskim mešalcem, ki ustreza zahtevam standarda SIST EN 196-1. Preskušanci so bili izdelani iz malt dveh različnih receptur in z vodovezivnim razmerjem, enakim tistemu za standardno konsistenco cementne paste. Sveža malta je bila vgrajena v standardne kalupe 4/4/16 cm s pomočjo vibracijske mize, s časom vibriranja 5 sekund, frekvenco 50 Hz in amplitudo 0,75 mm. Privzeti čas vibriranja je bil določen na 5 sekund zaradi zmanjšanja učinka koalescence in izhajanja zračnih mehurčkov na površino maltnih preskušancev.

Masni deleži komponent maltnih mešanic z oznakama BI in CI so podani v preglednici 3.

Receptura	A (g)	C (g)	EPF (g)	V (g)	D (g)
BI	1350	310	140 tip (a)	218,2	6,8
CI	1350	310	140 tip (b)	218,2	6,8

Preglednica 3 • Masni deleži komponent obravnavanih malt

Oznake v preglednici 3 pomenijo:

- A, masa agregata (standardni pesek) SIST EN–196-1,
- C, masa cementa CEM I, 42,5 R,
- EPF, masa elektrofiltrskega pepela,
- V, masa vode, in
- D, masa dodanega aeranta.



Slika 1 • Merilni komplet za merjenje ekspanzije na preskušancih v klimatski komori

Količina dodanega aeranta je znašala 0,3 % (m/m) glede na skupno maso cementa in elektrofiltrskega pepela. Preskušanci so bili negovani 28 dni v klimatski komori pri temperaturi  $20 \pm 2$  °C in relativni vlažnosti zraka  $98 \pm 2$  %. Na preskušancih iz malt BI in CI sta bili pri starostih 7, 14, 28, 56 in 113 oziroma 122 dni določeni tlačna ( $f_c$ ) in upogibna trdnost ( $f_m$ ) po določenih standarda SIST EN 196-1 na po 3 preskušancih. Po 28 dneh pri temperaturi  $20 \pm 2$  °C ter relativni vlagi  $98 \pm 2$  % je bil na dodatnih 12 preskušancih vsake serije, ki so bili izdelani po recepturah BI ter CI, opravljen Dugganov test (Ramadan, 2000). Dugganov test se uporablja za pospešeno oblikovanje etringita, saj z vplivi cikličnega segrevanja in vlaženja izzovemo reakcijo zakasnele tvorbe etringita. Pri Dugganovem testu izpostavimo preskušance naslednjemu zaporedju pogojev okolja:

- 3 dni namakanja vzorcev v demineralizirani vodi pri temperaturi  $20 \pm 2$  °C,
- 1 dan sušenja v sušilniku brez prisilne ventilacije pri temperaturi  $81 \pm 2$  °C,
- 1 dan namakanja v demineralizirani vodi pri temperaturi  $20 \pm 2$  °C,
- 1 dan sušenja v sušilniku brez prisilne ventilacije pri temperaturi  $81 \pm 2$  °C,
- 1 dan namakanja v vodi pri temperaturi  $20 \pm 2$  °C in
- 3 dni sušenja v sušilniku brez prisilne ventilacije pri temperaturi  $81 \pm 2$  °C.

Med posameznimi fazami so bili preskušanci 4 ure kondicionirani v eksikatorju. Po opravljenem Dugganovem testu je bilo treba vzorce še en dan namakati v demineralizirani vodi, da so se kapilare v betonu ponovno napolnile z vodo. Preskušanci iz malt BI in CI so bili nato vstavljeni v napravo za merjenje ekspanzije, ki je bila izdelana po določenih standarda ASTM C490-86. Ti preskušanci so označeni kot BI/DT in CI/DT. Naprava je bila nameščena v klimatski komori s temperaturo  $20 \pm 2$  °C ter relativno vlažnostjo zraka  $98 \pm 2$  %.

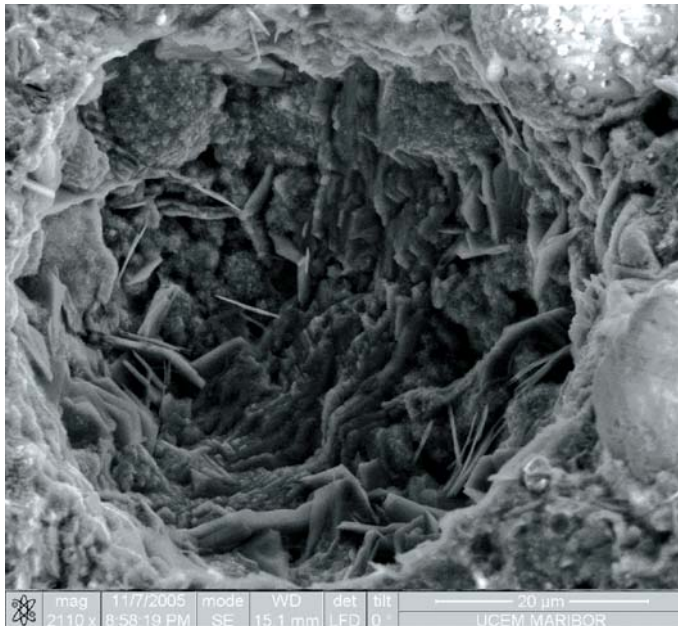
Nabrekanje preskušancev smo spremljali z merjenjem deformacij v smeri daljše osi prizem z digitalnimi mikrometri MarCator 1080/12,5/0,005 mm proizvajalca Mahr, z natančnostjo  $\pm 0,005$  mm. Rezultate smo zapisovali s pomočjo programske opreme Comlogger in računalnika. Meritve deformacij so potekale istočasno na dvanajstih preskušancih v 15-minutnih časovnih intervalih. Meritve so bile končane, ko na napravi za merjenje ekspanzije nismo zabeležili bistvenih sprememb. Po tem smo določili gostoto preskušancev ter njihovo tlačno in

upogibno trdnost. Primerjalno so bile v istem časovnem obdobju določene tudi tlačne in upogibne trdnosti na serijah 6 preskušancev,

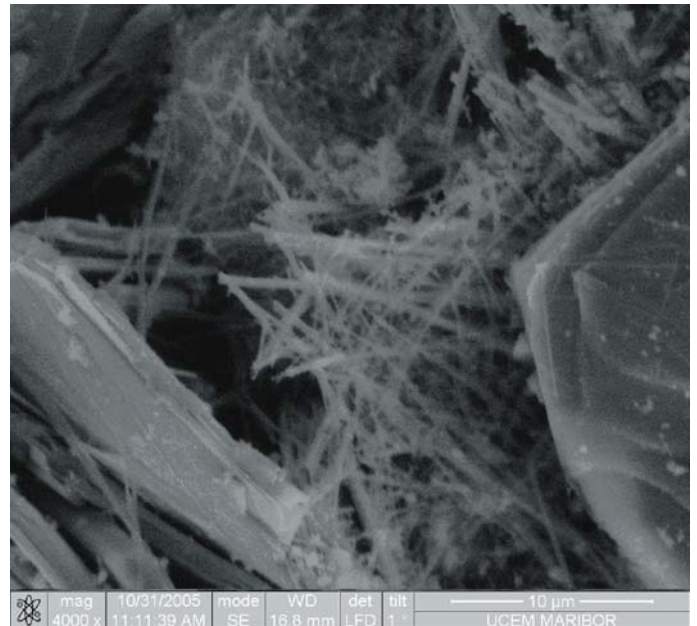
ki niso bili izpostavljeni Dugganovemu testu. Na vseh preskušancih je bila opravljena še kontrola mikrostrukture z optičnim stereo-

mikroskopom Olympus SZX ter elektronskim vrstičnim mikroskopom QUANTA 200 3D, SIRION 400 NC in JEOL JSM 5610.

### 3 • REZULTATI IN DISKUSIJA



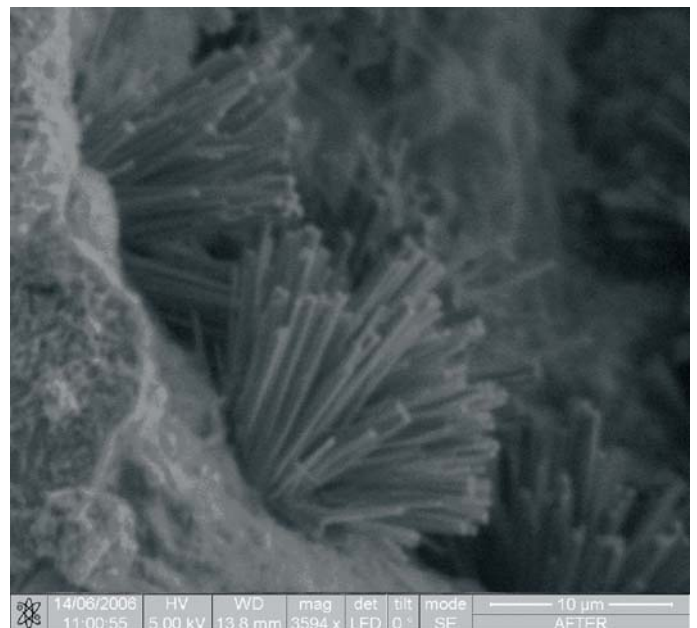
Slika 2 • Mikrostruktura cementnega kamna s pepelom tipa (a), povečana 2110-krat



Slika 3 • Mikrostruktura cementnega kamna s pepelom tipa (a), povečana 4000-krat

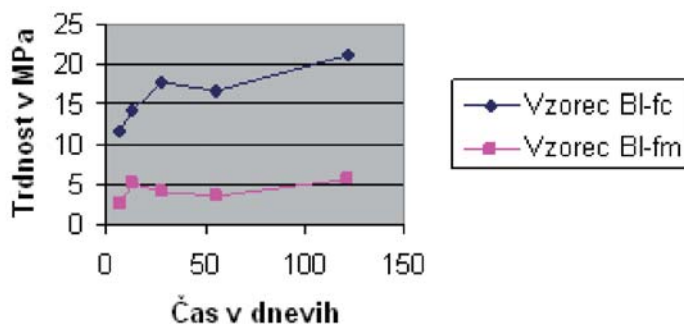


Slika 4 • Mikrostruktura cementnega kamna s pepelom tipa (b), povečana 996-krat



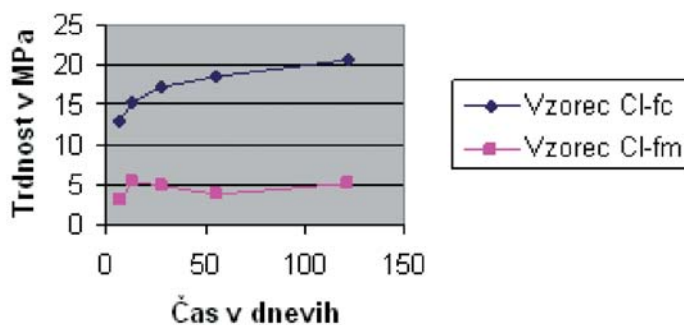
Slika 5 • Mikrostruktura cementnega kamna s pepelom tipa (b), povečava 3594-krat

### ČASOVNI RAZVOJ TRDNOSTI ZA VZORCE IZDELANE PO RECEPTURI BI



Slika 6 • Tlačna in upogibna trdnost maltnih prizem BI

### ČASOVNI RAZVOJ TRDNOSTI ZA VZORCE IZDELANE PO RECEPTURI CI



Slika 7 • Tlačna in upogibna trdnost maltnih prizem CI

### 3.1 Analiza mikrostrukture na pogačicah iz cementne paste standardne konsistence

Znano je, da se etringit v strjenem betonu lahko pojavlja v različnih oblikah, zelo pogosto v skupkih igličastih kristalov različnih velikosti. Kristale etringita navadno ločimo po dveh tipičnih oblikah, ki pa se razlikujeta od pogojev nastanka. Ločimo kristale tipa I, ki so lahko dolgi od 10 do 100  $\mu\text{m}$  in debeline nekaj  $\mu\text{m}$ , ter kristale, ki so dolgi od 1 do 2  $\mu\text{m}$ , z debelino od 0,1 do 0,2  $\mu\text{m}$  (tip II). Oblika kristalov etringita tipa I naj bi bila manj ekspanzivna od oblike II (Mehta, 1983).

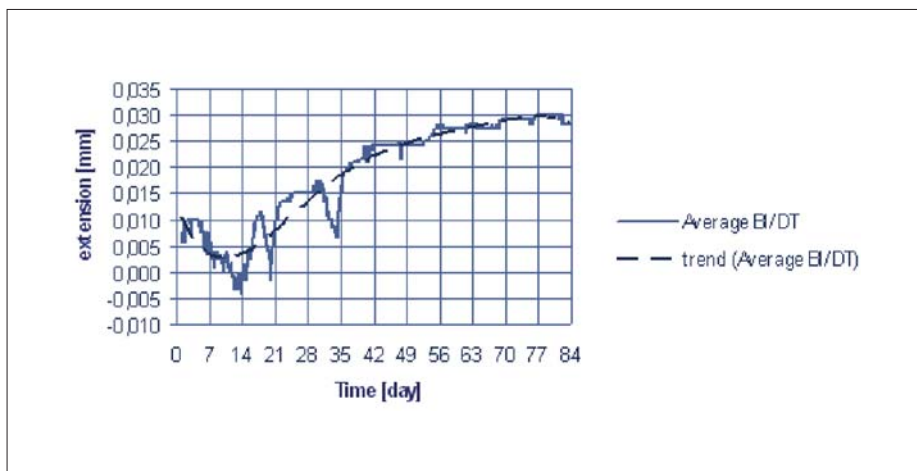
Na slikah 2 in 3 je prikazana mikrostruktura prelomne površine cementnega kamna – pogačice, izdelane s pepelom tipa (a), po 28 dneh nege v vodi. Posnetek SEM pri 2110-kratni povečavi (slika 2) kaže steno mehurčka zraka, kjer na porozni površini stene nastajajo kristali CSH in drobni igličasti kristali etringita. Posnetek SEM pri 4000-kratni povečavi (slika 3) pa kaže, da prevladujejo kristali dolžine do 10  $\mu\text{m}$  in debeline manj kot 1  $\mu\text{m}$ , igličaste oblike. Oblika kristalov je pri zakasneli tvorbi etringita pogojena tudi s pogoji kristalizacije. Če ni prostorskih ovir, etringit kristalizira v tipično igličasti obliki (Stark, 2000).

Na slikah 4 in 5 je prikazana mikrostruktura prelomne površine cementnega kamna – pogačice, izdelane s pepelom tipa (b), prav tako po 28 dneh nege v vodi. Drobni igličasti kristali etringita nastajajo prav tako med kristali CSH v skupkih. Posnetek SEM na sliki 4 prikazuje kristale na steni zračnega mehurčka v cementnem kamnu pri 996-kratni povečavi, posnetek SEM na sliki 5 pa skupek kristalov pri 3594-kratni povečavi.

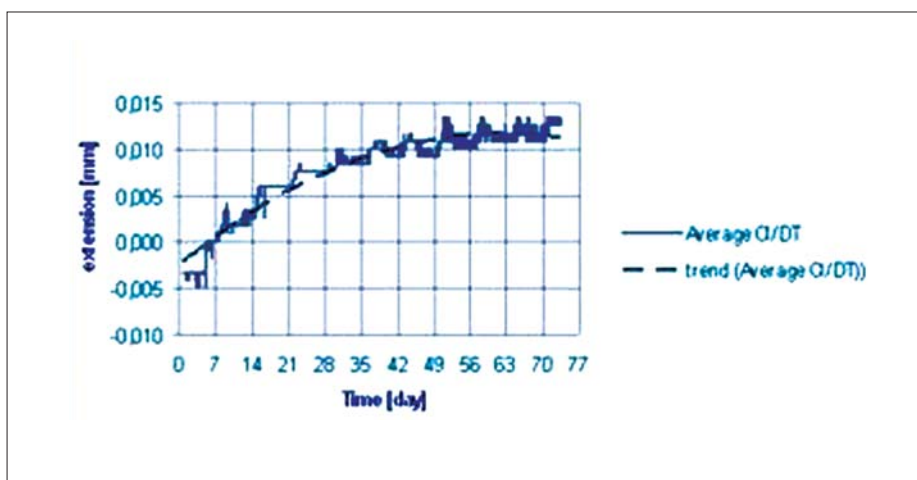
Pri analizi mikrostrukture preskušancev, ki so bili negovani v vodi ali v klimatski komori, niso bile ugotovljene bistvene razlike v mikrostrukturi.

Oznaka vzorca	7 dni $f_c/\rho$ MPa/kg/m <sup>3</sup>	14 dni $f_c/\rho$ MPa/kg/m <sup>3</sup>	28 dni $f_c/\rho$ MPa/kg/m <sup>3</sup>	56 dni $f_c/\rho$ MPa/kg/m <sup>3</sup>	113 dni $f_c/\rho$ MPa/kg/m <sup>3</sup>	122 dni $f_c/\rho$ MPa/kg/m <sup>3</sup>
BI	11,60/1801	14,30/1807	17,70/1803	16,70/1817	–	21,00/1818
BI/DT	–	–	–	–	–	22,45/1810
CI	13,00/1819	15,30/1822	17,30/1804	18,50/1823	20,50/1799	–
CI/DT	–	–	–	–	21,90/1781	–

Preglednica 4 • Povprečne vrednosti tlačnih trdnosti in gostot preskušancev z opravljenim Dugganovim testom (oznake BI/DT in CI/DT) ter brez opravljenega Dugganovega testa (oznake BI in CI)



Slika 8 • Ekspanzija preskušancev z oznako BI/DT po opravljenem Dugganovem testu



Slika 9 • Ekspanzija preskušancev z oznako CI/DT po opravljenem Dugganovem testu

### 3.2 Rezultati tlačnega in upogibnega preskusa maltnih prizem

Rezultati tlačnega in upogibnega preskusa maltnih prizem, izdelanih iz malt BI in CI, pri starosti malt 7, 14, 28, 56 ali 113 oziroma 122 dni, so prikazani na slikah 6 in 7.

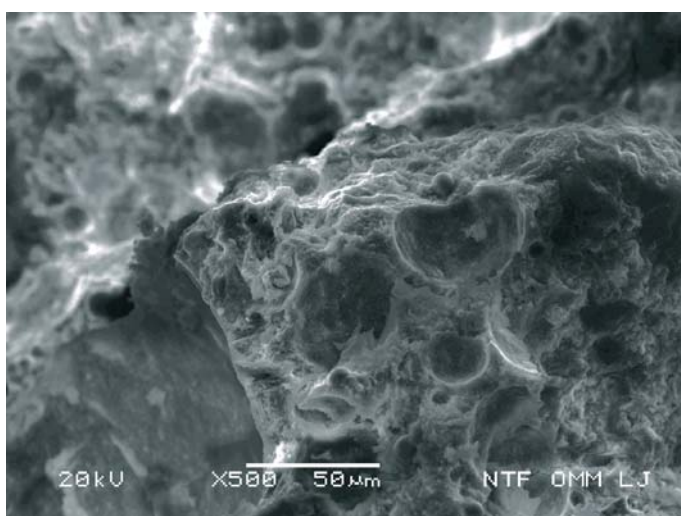
Časovni razvoj trdnosti malt je za preskušance obeh receptur najintenzivnejši do starosti 28 dni, nadaljnji razvoj trdnosti do 56 dni je počasnejši. Tlačne trdnosti in upogibne trdnosti se za preskušance obeh receptur v opazovanem obdobju bistveno ne razlikujejo. Prav tako ni bistvenih razlik pri izmerjenih gostotah strjenih malt.

Tlačne trdnosti ter gostote preskušancev, na katerih je bil predhodno opravljen Dugganov test, so podane v preglednici 4 skupaj z vrednostmi teh karakteristik na preskušancih, pri katerih ta test ni bil opravljen. V preglednici 4 niso podane upogibne trdnosti, ker med njimi ni bistvenih razlik, kar je razvidno iz diagramov na slikah 6 in 7.

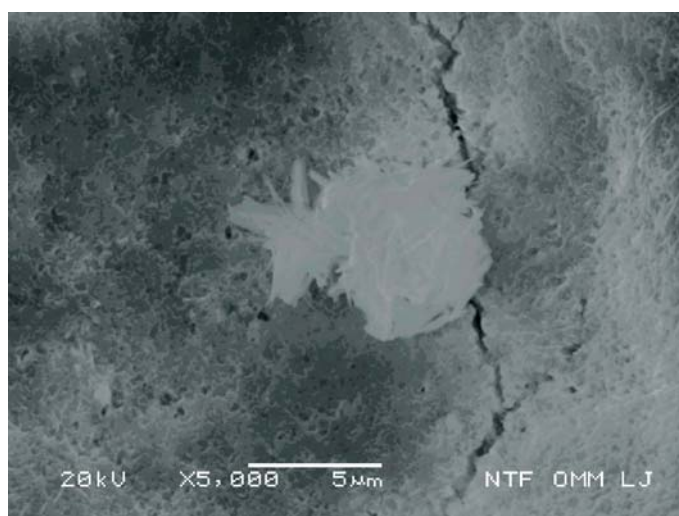
Iz rezultatov v preglednici 4 je razvidno, da imajo preskušanci BI/DT po končanih meritvah ekspanzije 6,9 % večjo tlačno trdnost kot primerjalni preskušanci BI, preskušanci CI/DT pa 6,8 % večjo tlačno trdnost od primerjalnih preskušancev z oznako CI. Za obe primerjavi velja, da so imeli analizirani vzorci zelo podobno gostoto.

### 3.3 Rezultati meritve ekspanzije preskušancev po Dugganovem testu

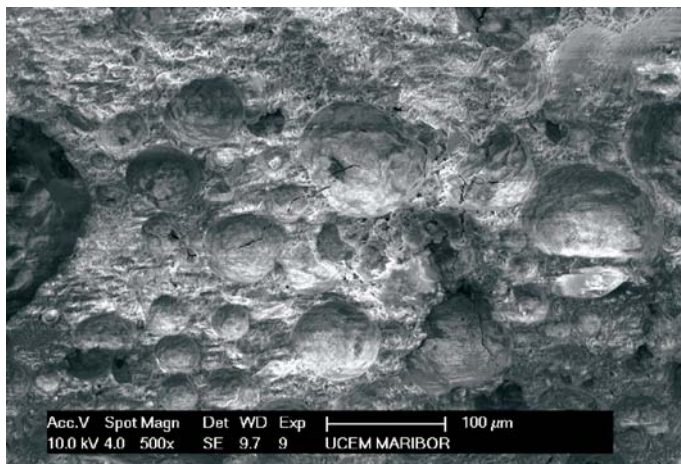
Ekspanzijo preskušancev smo spremljali do trenutka, ko na napravi za merjenje deformacij tri dni zapored na več kot polovici preskušancev



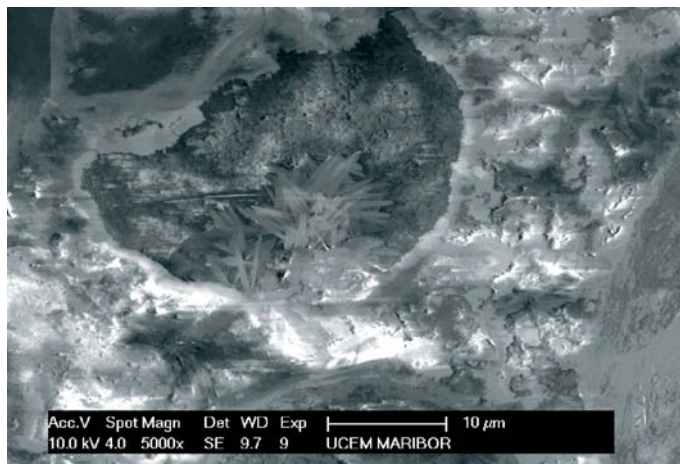
Slika 10 • Mikrostruktura preskušancev – maltnih prizem, na katerih je bil opravljen Dugganov test (500-kratna povečava preskušanca CI/DT)



Slika 11 • 5000-kratna povečava mehurčka z razpokano steno



Slika 12 • Mikrostruktura preskušancev BI/DT po 121 dneh, povečana 500-krat



Slika 13 • Mikrostruktura preskušancev BI/DT po 121 dneh, povečana 5000-krat

nismo izmerili nobenih sprememb. V primeru preskušancev z oznako BI/DT se je to dogodilo po 122 dneh, pri preskušancih z oznako CI/DT pa po 113 dneh.

Na preskušancih z oznako BI/DT je bilo izmerjeno povprečno 0,018 % ekspanzije, na preskušancih z oznako CI/DT pa 0,011 %.

Rezultati meritev so v obliki diagramov prikazani na slikah 8 in 9. Podana je srednja vrednost zabeleženih meritev na vseh 12 preskušancih ter regresijska krivulja v obliki polinoma, ki je bila generirana s programsko opremo Excel.

Nabrekanje strjene malte je posledica nabrekanja hidratacijskih produktov zaradi učinka

sulfatnih ionov. Sulfatna agresija v strjenem betonu lahko nastopi le, če je beton dovolj porozen. Uporaba aeranta povzroči nastanek zaprtih zračnih mehurčkov v cementni matrici. Pri analizi mikrostrukture preskušancev, ki so bili izpostavljeni Dugganovemu testu, pa smo ugotovili, da so na stenah zračnih mehurčkov nastale razpoke. Iz teh razpok pa v notranjost mehurčka rastejo kristali etringita – glej slike 10 in 11.

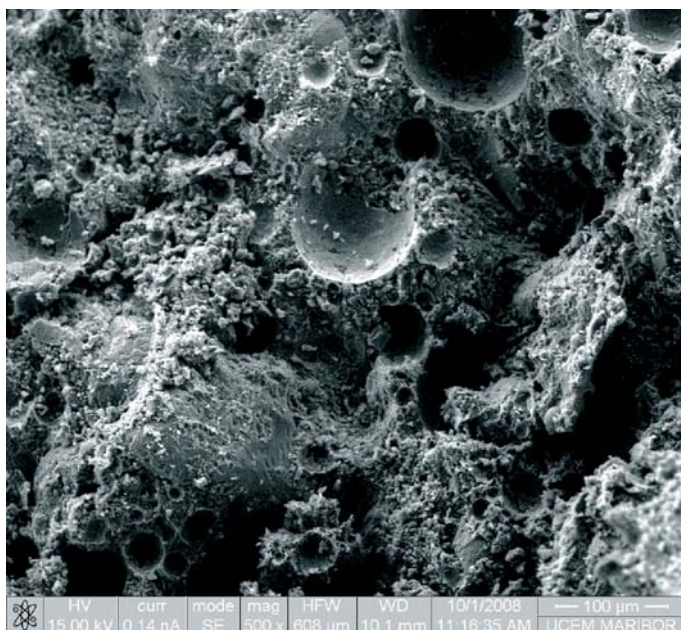
Iz diagramov, podanih na slikah 8 in 9, je razvidno, da linearno večanje ekspanzije pri obeh skupinah preskušancev nastopi po 56 dnevih meritve. Znano je, da visoka ekspanzija zanesljivo poslabša tudi mehanske lastnosti

betona. Povečanje ekspanzije, ki pa mora biti manjše od 0,2 %, pa tlačne trdnosti betona ne znižuje (Brunetaud et al., 2008).

Ekspanzija pri preskušancih iz malte BI/DT, ki je bila izdelana s pepelom tipa (a), je nekoliko večja kot pri preskušancih s pepelom tipa (b). Menimo, da je vzrok za razliko v dejstvu, da imajo pepeli z nižjo vsebnostjo prostega CaO večjo nagnjenost k nabrekanju (Foliard K. J. et. al., 2006).

### 3.4 Analiza mikrostrukture na maltah

Mikrostrukturo malt smo analizirali na prelomnih površinah maltnih prizem po opravljenem preskusu trdnosti.



Slika 14 • Mikrostruktura preskušancev CI/DT po 121 dneh, povečana 500-krat



Slika 15 • Mikrostruktura preskušancev CI/DT po 121 dneh, povečana 5000-krat



Na mestih nastanka etringita – nukleacijskih mestih, ki jih tvorijo vneseni zračni mehurčki, je bila ugotovljena zelo podobna mikrostruktura kot na pogačicah, ki so bile izdelane iz cementne paste standardne konsistence.

Iz slik 12 in 13, ki prikazujeta posnetek SEM prelomne površine preskušanca BI/DT pri

500- in 5000-kratni povečavi, je razvidno, da so kristali etringita tanki in manjši od 10  $\mu\text{m}$ . Ti kristali so nastali na mestu porozne strukture stene zračnega mehurčka v malti.

Iz slik 14 in 15, ki prikazujeta posnetek SEM prelomne površine preskušanca CI/DT pri 500 in 5000-kratni povečavi, je razvidno, da

so kristali etringita še manjši. Tudi ti skupki kristalov zelo majhne rasti nastajajo na mestih porozne strukture stene zračnega mehurčka. Oblika teh kristalov nakazuje, da njihova rast verjetno še ni končana in se bo nadaljevala v primeru optimalnih pogojev, kot sta prisotnost vode in povišana temperatura.

#### 4 • SKLEP

Z vizualnim pregledom preskušancev po opravljenem Dugganovem testu in preiskavah v klimatski komori na preskušancih niso bile ugotovljene nobene poškodbe oziroma razpoke, ki bi lahko bile posledica vpliva zakasnele tvorbe etringita. Z analizo mikrostrukture prelomnih površin preskušancev je bilo ugotovljeno, da so na mestih zračnih mehurčkov, ki so nastali kot posledica delovanja aeranta, zrasli drobni in tanki kristali etringita, za katere je znano, da lahko povzročajo

nabrekanje. Lokalna koncentracija napetosti na teh nukleacijskih mestih, kjer je prišlo do rasti kristalov etringita, ni povzročila lokalnih razširitev mikrorazpok, kar bi lahko povzročilo znižanje tlačnih trdnosti. Rast kristalov etringita na poroznih stenah zračnih mehurčkov je povzročila spremembo mikrostrukture betona. Ta sprememba predstavlja transformacijo obstoječe porozne mikrostrukture v fino, z drobnimi kristali etringita zgoščeno mikrostrukturo. Zaradi spremembe strukture

malt na teh mestih se je cementna matrica utrdila. Posledica je povečanje tlačne trdnosti preskušancev z oznako BI/DT za 6,9 % v primerjavi s preskušanci BI in preskušancev z oznako CI/DT za 6,8 % v primerjavi s preskušanci CI.

Za potrditev prikazanega mehanizma otrditve betona z načrtovano zakasnelo tvorbo etringita bo treba opraviti še analizo mikrostrukture ter meritve mehanskih lastnosti:

- maltnih preskušancev obravnavane sestave brez Dugganovega testa in
- maltnih preskušancev brez dodanega aeranta oziroma brez opravljenega Dugganovega testa.

#### 5 • LITERATURA

- Bauer, S., Cornell, B., Figurski, D., Ley, T., Miralles, J., Folliard, K., AlkaliSilica Reaction and Delayed Ettringite Formation in Concrete: Literature Review, Center for Transportation Research and Technology, Austin, februar 2006.
- Brunetaud, X., Divet, L., Damidot, D., Impact of unrestrained Delayed Ettringite Formation – induced expansion on concrete mechanical properties, Cement and Concrete Research, Volume 38, Issue 11, str. 1343–1348, november 2008.
- Colepardi, M., A state-of-the-art review on delayed ettringite attack on concrete, Cement and Concrete Composites, Volume 25, Issues 4–5, str. 401–407, maj–julij 2003.
- Folliard, K. J., Barborak, R., Drimalas, T., Du, L., Garber, S., Ideker, J., Ley, T., Williams, S., Juenger, M., Thomas, M. D. A., Fournier, B., Preventing Alkali-Silica Reaction and Delayed Ettringite Formation in New Concrete, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, Project Summary Report 0-4085-S, marec 2006.
- Gerbec, B., Proučevanje in dokazovanje korozijske odpornosti betona v čistilni napravi Zalog, GI ZRMK, 2005.
- Stark, J., Bollmann, K., Delayed Ettringite Formation in Concrete, Bauhaus University Weimar/Germany, <http://www.itn.is/ncr/publications/doc-23-2.pdf>, 2000.
- Mehta, P. K., Mechanism of Sulfate Attack on Portland Cement Concrete – Another Look, Cement and Concrete Research 13, str. 401–406, 1983.
- Ramadan, E., Experimental and Theoretical Study of Delayed Ettringite Damage in Concrete, Dissertation submitted to the faculty of the Graduate School of the University of Maryland, USA, 2000.
- Taylor, H. F. W., Famy, C., Scrivener, K. L., Delayed ettringite formation, Cement and Concrete Research, Volume 31, Issue 5, str. 683–693, maj 2001.
- Taylor, H., Cement chemistry, 2nd edition, Thomas Telford, London, 1997.

## NAPOVEDNIK

Dogodek:

**Zaključni seminar projektov SPENS (Sustainable Pavements for European New Member States) in ARCHES (Assessment and Rehabilitation of Highway Structures) iz 6. okvirnega programa Evropske komisije**

**Uradni jezik: angleški**

**Organizator: Zavod za gradbeništvo Slovenije**

**Datum: 27. in 28. avgust 2009**

**Lokacija: Austria Trend Hotel Ljubljana, Dunajska 154, 1000 Ljubljana**

**Prijave** so možne prek spletne strani: <http://certain.fehrl.org/registration/>

**Kotizacije ni.**

Seminar sicer finančno podpira projekt iz 6. Okvirnega Programa Evropske komisije **CERTAIN**, katerega primarni cilj je širjenje rezultatov tovrstnih projektov med uporabnike.

Projekt **SPENS** se ukvarja z vozišči, **ARCHES** se ukvarja z objekti na cestah, predvsem se osredotoča na mostove. Združeni s projektom CERTAIN tvorijo grozd projektov namenjen novim in bodočim članicam Evropske Unije, ki je vreden približno **7 mio EUR**.

### **Dodatne informacije:**

Nina Gartner

Zavod za gradbeništvo Slovenije

Dimičeva 12, 1000 Ljubljana

**T:** (01) 2804 388

**E:** [nina.gartner@zag.si](mailto:nina.gartner@zag.si)

Polonca Štritof,

Zavod za gradbeništvo Slovenije

Dimičeva 12, 1000 Ljubljana

**T:** (01) 2804 280

**E:** [polonca.stritof@zag.si](mailto:polonca.stritof@zag.si)

# NOVI DIPLOMANTI

## UNIVERZA V LJUBLJANI, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJO

### VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

**Stanislav Leben**, Metodologija za izbor optimalne ureditve križišča – preveritev na konkretnem primeru, mentor doc. dr. Tomaž Maher

### UNIVERZITETNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

**Andraž Rakušček**, Energetska izkaznica – orodje za sanacijo stavbe, mentor prof. dr. Roko Žarnić, somentor dr. Marjana Šijanec Zavrli

**Jasmin Mustafić – Marjetič**, Projekt jeklene industrijske hale z dvema žerjavima progama, mentor prof. dr. Darko Beg, somentor asist. dr. Peter Skuber

### UNIVERZITETNI ŠTUDIJ VODARSTVO IN KOMUNALNO INŽENIRSTVO

**Sabina Arh**, Vpliv gojitvenih ribnikov na eutrofikacijo površinskih voda, mentor prof. dr. Boris Kompare, somentor doc. dr. Nataša Atanasova

**Matija Jurko**, Statistična analiza trendov značilnih pretokov slovenskih rek, mentor prof. dr. Matjaž Mikoš, somentor asist. dr. Mira Kobold

## UNIVERZA V MARIBORU, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO

### VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

**Aleksander Batič**, Preveritev ustreznosti izvedbe krožnega križišča na cesti R2/409 v naselju Kozina, mentor izr. prof. dr. Tomaž Tollazzi

**Sanja Cigler**, Geotehnična analiza konstrukcije za varovanje gradbene jame garažne hiše pod Kongresnim trgom v Ljubljani, mentor izr. prof. dr. Stanislav Škrabl, somentor Vukašin Ačanski, univ. dipl. inž. grad.

**Damir Omerović**, Analiza razlik med nizkoenergijsko in pasivno individualno hišo, mentor doc. Uroš Lobnik

**Bojan Preložnik**, Konstruiranje in analiza poslovnega objekta s programoma ALLPLAN in SCIA, mentor viš. pred. Milan Kuhta, somentor red. prof. dr. Branko Bedenik

**Darko Slana**, Opaževanje in podporne konstrukcije, mentor doc. dr. Andrej Štrukelj

### UNIVERZITETNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

**Tanja Božič**, Naprave in ukrepi za umirjanje prometa v okolici šol, mentor izr. prof. dr. Tomaž Tollazzi, somentor viš. pred. mag. Marko Renčelj

**Sonja Likar**, Tehnološka prilagoditev odlagališča nenevarnih odpadkov Pragersko glede na zahteve okoljskih predpisov, mentor doc. dr. Branka Trček

**Mihael Peternelj**, Reologija jekleno-betonskih sovprežnih mostov, mentor red. prof. dr. Stojan Kravanja, somentorja viš. pred. Milan Kuhta in Janjic Dorian, univ. dipl. inž. grad.

**Tomaž Stropnik**, Analiza in dimenzioniranje poslovnega objekta s programom SCIA ENGINEER, mentor red. prof. dr. Branko Bedenik, somentor viš. pred. Milan Kuhta

### DOKTORSKI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

**Tomaž Žula**, Sinteza konstrukcije jeklenih hal z mešanim celoštevilskim nelinearnim programiranjem, mentor red. prof. dr. Stojan Kravanja

## UNIVERZA V MARIBORU, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO – EKONOMSKO POSLOVNA FAKULTETA

### UNIVERZITETNI ŠTUDIJ GOSPODARSKEGA INŽENIRSTVA

**Franc Rezar**, Uporaba informacijskih tehnologij na področju komunikacije v gradbeništvu, mentorja red. prof. dr. Danijel Rebolj – FG in doc. dr. Andreja Lutar Skerbinjek – EPF

**Mladen Simić**, Dimenzioniranje jeklene hale 70 x 45 m izdelane iz hladnovaljanih profilov, mentorja red. prof. dr. Stojan Kravanja – FG in red. prof. dr. Duško Uršič – EPF, somentor doc. dr. Simon Šilih

Rubriko ureja • **Jan Kristjan Juteršek**, univ. dipl. inž. grad.

### Vsem diplomantom čestitamo!

Skladno z dogovorom med ZDGITS in FGG-UL vsi diplomanti gradbenega oddelka Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani prejemaajo Gradbeni vestnik (12 števil) eno leto brezplačno. Vse, ki bodo želeli po prejemu 12. številke postati redni naročniki, prosimo, naj to čimprej sporočijo uredništvu na naslov: GRADBENI VESTNIK, Leskoškova 9E, 1000 Ljubljana; telefon: (01) 52 40 200; faks: (01) 52 40 199; e-mail: [gradb.zveza@siol.net](mailto:gradb.zveza@siol.net).

ZDGITS in Uredništvo Gradbenega vestnika

# KOLEDAR PRIREDITEV

**13.-15.7.2009**

**FRPRCS-9**

**9th International Symposium on Fibre Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures**

Sidney, Avstralija  
[www.iceaustralia.com/frprcs9](http://www.iceaustralia.com/frprcs9)

**19.-23.7.2009**

**5th European & African Conference on Wind Engineering**

Firenca, Italija  
[www.eacwe5.org](http://www.eacwe5.org)

**26.-29.7.2009**

**2nd international conference on Fatigue and Fracture in the Infrastructure Bridges and Structures of the 21st Century**

Philadelphia, Pennsylvania, ZDA  
<http://ffconf.atlss.lehigh.edu/index.html>

**16.-21.8.2009**

**ICSMA-15**

**15th International Conference on the Strength of Materials**

Dresden, Nemčija  
[www.icsma-15.org](http://www.icsma-15.org)

**8.-9.10.2009**

**SDGK 2009**

**Zborovanje gradbenih konstrukterjev Slovenije**

Rogaška Slatina, Slovenija  
[www.sdgk.si](http://www.sdgk.si)

**6.-11.9.2009**

**IABSE Annual Meetings and IABSE Symposium**

**Sustainable Infrastructure – Environment Friendly, Safe and Resource Efficient**

Bangkok, Tajska  
[www.iabse.ethz.ch/conferences/calendarofevents](http://www.iabse.ethz.ch/conferences/calendarofevents)

**20.-23.9.2009**

**8th International Symposium on Cable Dynamics**

Pariz, Francija  
<http://www.aimontefiore.org/iscd2009>

**23.-25.9.2009**

**14th European Parking Association Congress**

Dunaj, Avstrija  
[www.europeanparking.eu](http://www.europeanparking.eu)

**25.9.2009**

**10. jubilejni Šukljetoj dan**

Brdo pri Kranju, Slovenija  
[www2.fgg.uni-lj.si](http://www2.fgg.uni-lj.si)

**5.-9.10.2009**

**17th International Conference for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering**

Alexandria, Egipt  
[www.2009icsmge-egypt.org](http://www.2009icsmge-egypt.org)

**14.-16.10.2009**

**EVACES'09**

**Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures**

Wroclaw, Poljska  
[www.evaces09.pwr.wroc.pl/index.html](http://www.evaces09.pwr.wroc.pl/index.html)

**11.-12.11.2009**

**Road Expo Scotland**

Edinburgh, Škotska  
<http://www.road-expo.com/re2008s/landing.html>

**3.-5.5.2010**

**IABSE Conference**

**International Structural Codes**

Dubrovnik, Hrvaška  
[www.iabse.ethz.ch/conferences/calendarofevents](http://www.iabse.ethz.ch/conferences/calendarofevents)

**23.-27.5.2010**

**5th International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE 2010)**

Chapel Hill, Severna Karolina, ZDA  
[www.cwe2010.org](http://www.cwe2010.org)

**29.5.-2.6.2010**

**The Third International fib Congress and Exhibition "Think Globally, Build Locally"**

Washington D.C., ZDA  
[www.fib2010washington.com](http://www.fib2010washington.com)

**20.-23.6.2010**

**8th fib International PhD Symposium in Civil Engineering**

Kopenhagen, Danska  
<http://conferences.dtu.dk/conferenceDisplay.py?confId=21>

**21.-23.7.2010**

**ICSA 2010**

**International Conference on Structures and Architecture**

Guimares, Portugalska  
[www.arquitectura.uminho.pt](http://www.arquitectura.uminho.pt)

**22.-24.9.2010**

**34th IABSE Annual Meetings and IABSE Symposium**

Benetke, Italija  
[www.iabse.ethz.ch/conferences/calendarofevents](http://www.iabse.ethz.ch/conferences/calendarofevents)

**10.-15.7.2011**

**13th International Conference on Wind Engineering**

Amsterdam, Nizozemska  
[www.icwe13.org](http://www.icwe13.org)

**20.-23.9.2011**

**IABSE Annual Meetings and IABSE Symposium**

London, Anglija  
[www.iabse.ethz.ch/conferences/calendarofevents](http://www.iabse.ethz.ch/conferences/calendarofevents)

Rubriko ureja • **Jan Kristjan Juteršek**, ki sprejema predloge za objavo na e-naslov: [msg@izs.si](mailto:msg@izs.si)