

# Gradbeni vestnik • GLASILO ZVEZE DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV IN

TEHNIKOV SLOVENIJE in MATIČNE SEKCIJE GRADBENIH

INŽENIRJEV PRI INŽENIRSKI ZBORNICI SLOVENIJE

UDK-UDC 05 : 625; ISSN 0017-2774

Ljubljana, marec 2004, letnik 53, str. 45-68

Izdajatelj:

**Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije (ZDGITS)**, Karlovška 3, 1000 Ljubljana, telefon/faks 01 422 4622 v sodelovanju z **Matično sekcijo gradbenih inženirjev pri Inženirski zbornici Slovenije (MSG IZS)**, ob podpori **Ministrstva RS za šolstvo, znanost in šport, Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani** in **Zavoda za gradbeništvo Slovenije**

Izdajateljski svet:

ZDGITS: **mag. Andrej Kerin**

izr. **prof. dr. Matjaž Mikoš**

**Jakob Presečnik**

MSG IZS: **Gorazd Humar**

**mag. Črtomir Remec**

**doc. dr. Branko Zadnik**

FGG Ljubljana: **doc. dr. Marijan Žura**

FG Maribor: **Milan Kuhta**

ZAG: **prof. dr. Miha Tomažević**

Glavni in odgovorni urednik:

**prof. dr. Janez Duhovnik**

Sodelavec pri MSG IZS:

**Jan Kristjan Juteršek**

Lektorica:

**Alenka Raič Blažič**

Lektorica angleških povzetkov:

**Darja Okorn**

Tajnica:

**Anka Holobar**

Oblikovalska zasnova:

**Mateja Goršič**

Tehnično urejanje, prelom in tisk:

**Kočevski tisk**

Naklada:

**2750 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 5500 SIT; za študente in upokojece 2200 SIT; za družbe, ustanove in samostojne podjetnike 40.687,50 SIT za en izvod revije; za naročnike iz tujine 100 USD. V ceni je všteti DDV.

Poslovni račun ZDGITS pri NLB Ljubljana: 02017-0015398955

## Navodila avtorjem za pripravo člankov in drugih prispevkov

- Uredništvo sprejema in objavo znanstvene in strokovne članke s področja gradbeništva in druge prispevke, pomembne in zanimive za gradbeno stroko.
- Znanstvene in strokovne članke pred objavo pregleda najmanj en anonimen recenzent, ki ga določi glavni in odgovorni urednik.
- Besedilo prispevkov mora biti napisano v slovenščini.
- Besedilo mora biti izpisano z znaki velikosti 12 pik z dvojnim presledkom med vrsticami.
- Prispevki morajo imeti naslov, imena in priimke avtorjev ter besedilo prispevka.
- Besedilo člankov mora obvezno imeti: naslov članka v slovenščini (velike črke); naslov članka v angleščini (velike črke); oznako ali je članek strokoven ali znanstven; nazive, imena in priimke avtorjev ter njihove naslove; 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 dodatki označeni še z A, B, C, itn.
- Poglavja in razdelki so lahko oštevilčeni.
- 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.
- Enačbe morajo biti na desnem robu označene z zaporedno številko v okroglem oklepaju.
- Kot decimalno ločilo je treba uporabiti vejico.
- Uporabljena in citirana dela morajo biti navedena med besedilom prispevka z oznako v obliki: (priimek prvega avtorja, leto objave). V istem letu objavljena dela istega avtorja morajo biti označena še z oznakami a, b, c, itn.
- V poglavju LITERATURA so uporabljena in citirana dela opisana z naslednjimi podatki: priimek, ime prvega avtorja (lahko okrajšano), priimki in imena drugih avtorjev, naslov dela, način objave, leto objave.
- 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.
- Prispevke je treba poslati glavnemu in odgovornemu uredniku prof. dr. Janezu Duhovniku na naslov: FGG, Jamova 2, 1000 LJUBLJANA oz. [janez.duhovnik@fgg.uni-lj.si](mailto: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 enem izvodu na papirju in v elektronski obliki v formatu MS WORD in v 8. točki določenih grafičnih formatih.

Uredništvo



# Vsebina • Contents

## Članki • Papers

stran **46**

mag. Marko Završki, univ. dipl. inž. grad.

### PROJEKTIRANJE IN IZVEDBA VIADUKTA PETELINJEK

DESIGN AND CONSTRUCTION OF THE VIADUCT PETELINJEK



stran **52**

asist. dr. Sebastjan Bratina, univ. dipl. inž. grad.,

doc. dr. Igor Planinc, univ. dipl. inž. grad.

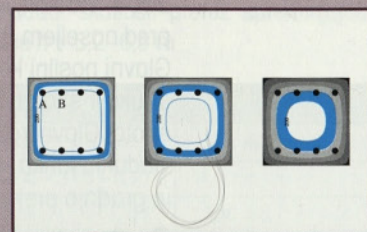
### ANALIZA PRIMERNOSTI POSTOPKA

### ZA DOLOČITEV POŽARNE ODPORNOSTI AB STEBROV PO EUROCODE 2

ACCURACY OF CALCULATION METHOD FOR ASSESING FIRE

RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS ACCORDING TO

EUROCODE 2



stran **58**

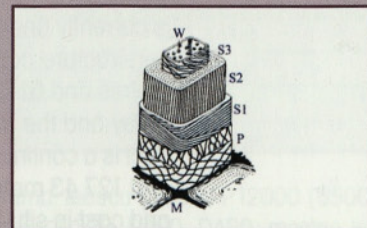
Jožica Gričar, univ. dipl. inž. les.,

Miro Tomažič, univ. dipl. inž. les.,

prof. dr. Željko Gorišek

### VISKOELASTO-PLASTIČNO IN MEHANOSORPTIVNO LEZENJE LESA

VISCOELASTIC-PLASTIC AND MECHANO-SORPTIVE CREEP OF WOOD



## Seminarji

stran **65**

### PRIPRAVLJALNI SEMINARJI IN IZPITNI ROKI ZA STROKOVNE IZPITE

ZA GRADBENO STROKO V LETU 2004

## Novi diplomanti gradbeništva

stran **67**

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

## Koledar prireditev

stran **67**

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

Slika na naslovnici: Viadukt Petelinjek, foto Marko Završnik



# PROJEKTIRANJE IN IZVEDBA VIADUKTA PETELINJEK

## DESIGN AND CONSTRUCTION OF THE VIADUCT PETELINJEK

mag. Marko Završki, univ. dipl. inž. grad.

Strokovni članek UDK 624.21:625.745.1

GRADIS Biro za projektiranje Maribor, d.o.o.,  
Lavričeva 3, 2000 MARIBOR

**Povzetek** | V prispevku sta opisana projektiranje in izvedba viadukta Petelinjek, ki se gradi na odseku AC Trojane-Blagovica in bo predvidoma predan v uporabo oktobra 2004. Viadukt, ki ga tvorita dva vzporedna objekta dolžine 630,0 in 617,5 m, se nahaja pred naseljem Blagovica, kjer premošča dolino in magistralno cesto na višini 20–40 m. Glavni nosilni konstrukciji obeh viaduktov sta zasnovani kot kontinuirni prednapeti konstrukciji škatlastega prereza, ki potekata čez 6 polj in predstavljata po eno zavorno enoto. Glavni razponi so 130,0 m pri levem oziroma 127,43 m pri desnem viaduktu. Pri viaduktu lahko kot značilnosti poudarimo: temeljenje s polnimi vodnjaki delno v pobočju in gradnjo prekladne konstrukcije po sistemu prostokonzolne gradnje.

**Summary** | In the paper, design and construction of the viaduct Petelinjek, is described. The viaduct is located on the motorway section Trojane – Blagovica. The viaduct is currently under construction and will be completed in October 2004. The viaduct superstructure consisting of two separated parallel viaducts of a total length of 630,0 metres and 617,0 metres, is located just before the settlement Blagovica. It bridges the valley and the main road at a height of 20–30 metres. The superstructure of each viaduct is a continuous prestressed box girder that has 6 fields of maximal spans of 130,0 and 127,43 metres. Some typical features are emphasized: well foundations in the slope and cast-in-situ free cantilever construction of the deck.

### 1 • UVOD

Viadukt premošča ozko dolino pred naseljem Blagovica na višini 20–40 m (slika 1). V dolini poteka obstoječa magistralna cesta Celje-Ljubljana, potok Radomlja ter glavni plinovod. Avtocesta in magistralna cesta na mestu križanja potekata v radiju. Avtocesta prečka dolino in magistralno cesto z dvema vzporednima viaduktoma z glavnimi razponi 130 (levi viadukt), oziroma 127,43 m (desni viadukt). Viadukta doline ne zapirata, ampak delujeta v veduti krajine lahko in odprto. Pri viaduktu Petelinjek lahko kot značilnosti poudarimo temeljenje s polnimi vodnjaki delno v pobočju in gradnjo prekladne konstrukcije po sistemu prostokonzolne gradnje. Viadukt je v izvedbi in bo predvidoma končan do oktobra leta 2004.



Slika 1 • Pogled na gradnjo viadukta Petelinjek z ljubljanske strani



**PODATKI O UDELEŽENCIH PRI GRADITVI VIADUKTA PETELINJEK**

Naročnik:	DARS, Družba za avtoceste v Republiki Sloveniji d.d.
Projektant:	GRADIS Biro za projektiranje Maribor d.o.o. Vodja projekta: prof. Vukašin Ačanski, univ. dipl. inž. grad. Odgovorni projektant: mag. Marko Završki, univ. dipl. inž. grad.
Izvajalec:	GRADIS Nizke gradnje Maribor d.d. Odgovorni vodja gradbišča: Aleksander Milojević, univ. dipl. inž. grad.
Inženir:	DDC Družba za državne ceste Ljubljana d.o.o. Nadzorni inženir: Jože Herga, univ. dipl. inž. grad.
Izročitev v promet:	leto 2004

**2 • SPLOŠNI PODATKI O OBJEKTU**

Površina objekta: **17.264 m<sup>2</sup>**  
Število podpor: 7+7=14

Razponi in dolžina:  
90,00+130,00 +130,00 +90,00 +59,9 =  
**629,26 m** – levi viadukt  
88,224+127,424+127,424 +88,224+58,912  
= **617,662 m** – desni viadukt

Trasirni elementi ceste:

Trasirni potek trase:

os avtoceste: od km 85,0 + 60,00 do km 85,6 + 83,62 (sistemске osi); R=700,00 m  
levi viadukt: od km 85,0 + 60,00 do km 85,6 + 83,62 (sistemске osi); R = 707,18 m  
desni viadukt od km 85,0 + 60,00 do km 85,6 + 83,62 (sistemске osi); R = 693,22 m

Niveleta:

levi viadukt: vzdolžni padec 3,07 % konst.,  
prečni nagib: 4,5 %

**Karakteristični prečni prerez ceste**

<i>Levi viadukt:</i>		
zunanj rob (ogroja NJ + hodnik)	0,25 + 0,75 + 0,46	1,44 m
vozišče	0,50 + 3,30 + 3,50 + 3,50 + 0,50	11,30 m
notranji rob + ogroja	0,50 + 0,36 + 0,54	1,40 m
Skupaj		<b>14,14 m</b>
<i>vmesni viadukt:</i>		
zunanj rob (ogroja NJ + hodnik)	0,25 + 0,75 + 0,46	1,44 m
vozišče	0,50 + 2,50 + 3,50 + 3,50 + 0,50	10,50 m
notranji rob + ogroja	0,50 + 0,36 + 0,54	1,40 m
Skupaj		<b>13,34 m</b>

desni viadukt: vzdolžni padec 3,13 % konst.,  
prečni nagib: 4,5 %

Značilnosti konstrukcije:

Način temeljenja: globoko s polnimi vodnjaki  
premera D = 7,1–9,1 m, D = 5,50–8,0 m

Podpore: votli stebri poligonalnega prereza  
4,0 x 5,0 m (4,0 x 4,0) m  
Preklada: škatlasti prerez spreminjajoče se  
višine h = 3,2–6,5 m

Oprema: ležišča (lončna P12000 (6500), dilatacije: D320, D400, D480, mostna kanalizacija, ogroja  
Materiali: betoni MB30-MB45, armatura RA400/500-2, jeklo za prednapenjanje 1570/1770  
Tehnologija gradnje prekladne konstrukcije: prostokonzolna gradnja

**3 • KONSTRUKCIJSKA ZASNOVA****3.1 Splošno**

Sedanja varianta zasnove viadukta (slika 2) je nastala na osnovi variantnih študij v predhodnih fazah projektiranja. V zasnovi konstrukcije v PGD in PZI so bili ohranjeni osnovni gabariti objekta: dolžina, širina, lokacije in število podpor, dolžine razpetin, oblika prereza in način temeljenja. Manjše spremembe so bile izvedene v smislu prilaganja tehnologiji gradnje izvajalca, kot so: poševne stojine škatlastega prereza preklade, zmanjšanje premera vodnjakov z uporabo polnih vodnjakov, sprememba oblike stebra glede na razpoložljive opaže izvajalca. Z zasnovo konstrukcije so bile upoštevane

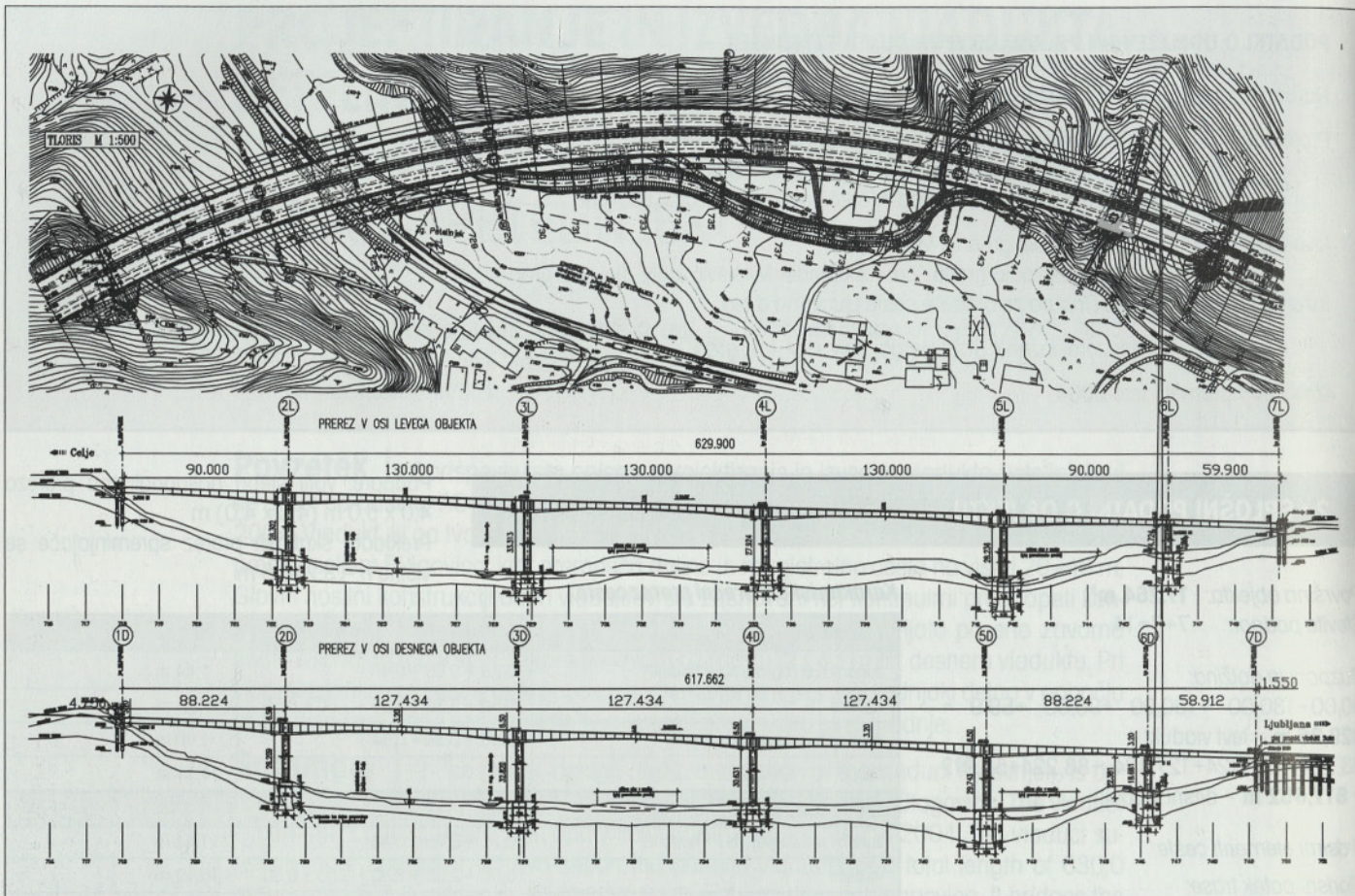
topografske in geološke značilnosti terena in prostora. Večji del konstrukcije tvori preklada z velikimi razponi do 130,0 m in krajšimi razponi 60,0–90,0 m v krajnjih poljih. Zagotovljena je svetla višina in predpisani odmiki stebrov od magistralne ceste in od visokotlačnega plinovoda, ki poteka pod viaduktom.

**3.2 Prekladna konstrukcija**

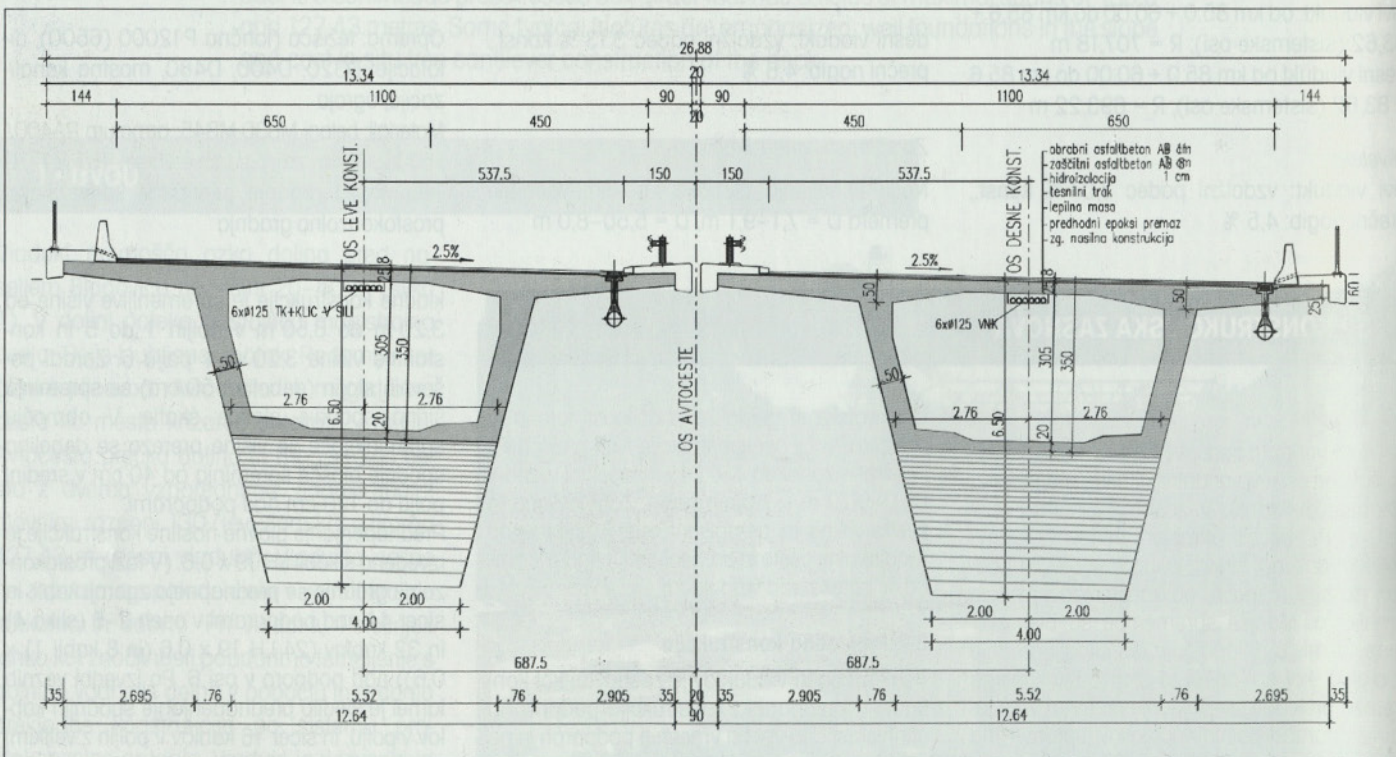
Vsak od obeh viaduktov je zasnovan kot kontinuirna prednapeta konstrukcija podprta na štirih elastično vpetih vmesnih podporah in na eni podpori, na kateri sta enostransko pomični ležišči. Škatlasti prečni prerez (slika 3) pre-

kladne konstrukcije je spremenljive višine od 3,20 m do 6,50 m v poljih 1 do 5 in konstantne višine 3,20 m v polju 6. Zaradi poševnih stojin (debelina 50 cm) se spreminja širina spodnje plošče škatle. V območju spreminjajoče se višine prereza se debelina spodnje plošče spreminja od 40 cm v sredini polja do 120 cm nad podporami. Prednapenjanje glavne nosilne konstrukcije je izvedeno s kabli LH 19 x 0,6. (V fazi prostokonzolne gradnje se prednapnejo zgornji kabli, in sicer 44 nad podporami v oseh 2–5 (slika 4) in 32 kablov (24 LH 19 x 0,6 (in 8 kabli 11 x 0,6)) nad podporo v osi 6. Po izvedbi veznih lamel je sledilo prednapenjanje spodnjih kablov v polju, in sicer 16 kablov v poljih z velikimi razponi (130,0 m) in 8 oz. 10 kablov v predzadnjem polju.





Slika 2 • Tloris in vzdolžni prerez viadukta



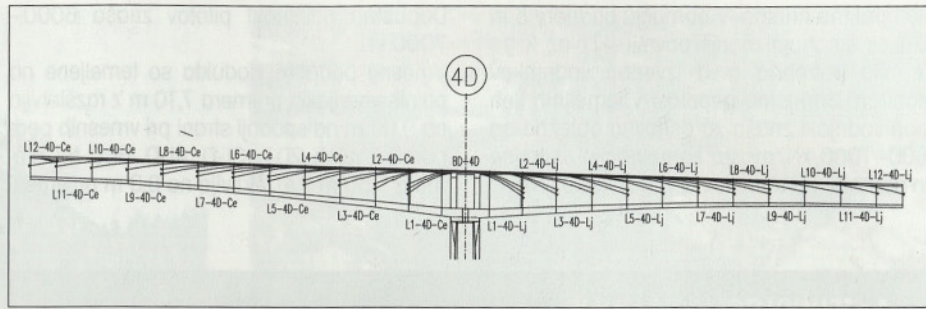
Slika 3 • Škatlasti prečni prerez prekladne konstrukcije



Prekladna škatlasta konstrukcija je izvedena v betonu MB 45. Zaradi tehnologije gradnje je bila zahtevana minimalna tlačna trdnost po 3 dneh  $30 \text{ MN/m}^2$ . Za armiranje je bila uporabljena rebrasta armatura RA 400/500-2 in za prednapenjanje visokovredno jeklo kvalitete 1570/1770 MN/m<sup>2</sup>.

### 3.3 Podporna konstrukcija s temelji

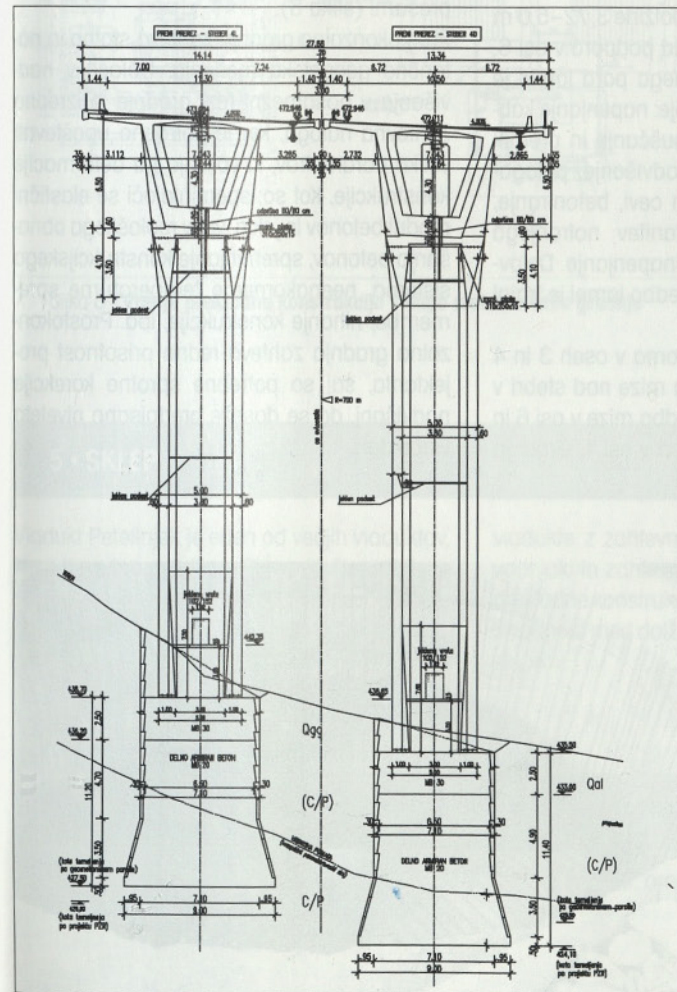
Viadukt je zasnovan kot ena zavorna enota, z dilatacijami samo na krajnih opornikih. Vzdržne sile, ki jih povzročajo krčenje in lezenje betona, zaviranje vozil, temperaturne spremembe in potres, se prenašajo preko štirih vmesnih stebrov (stebri 2, 3, 4, 5), ki so zgoraj toga vpeti v prekladno konstrukcijo. Stebra podpore 6 imata na vrhu enostransko pomična ležišča P1 12000. Obtežba, ki deluje prečno na viadukt (veter, potres), se prenaša na vse podpore. Posredni vplivi (krčenje in lezenje betona, temperatura) in vplivi prednapenjanja se prenašajo v skladu s togostmi posameznih podpor, upoštevajoč tudi reološko obnašanje betona in padec togosti.



Slika 4 • Shematski prikaz konzolnih kablov velikih miz

Stebri vmesnih podpor so visoki od 22,0 do 33,0 m (slika 5). Imajo votli, poligonalni prerez, z dimenzijami 4,0 x 5,0 m (4,0 x 4,0 m) s "prisekanimi" vogali in debelino stene 40 cm na daljši stranici in 60 cm na krajši stranici. Na mestih vpenjanja v preklado in polni vodnjak se stene vutasto razširijo. Na vrhu stebrov je izvedena kapa z razširitvijo s stranskimi rebri, ki so enaka širini stebra  $b = 4,0 \text{ m}$ . Krajni oporniki so škatlaste oblike z revizijskim hodnikom pod dilatacijo ter ustreznim dostopom.

Geološko osnovo tvorijo permokarbonski skladi. Pod dolino reke Radomlje in v južnih pobočjih najdemo skrilste glinovec z vložki meljevca in peščenjaka, na severni strani (začetek viadukta) pa prevladuje ploščati meljevec, kremenov peščenjak in konglomerat. Nosilna hribina se nahaja v globini okoli 7–8 m. Zgornji preperinski sloj je porozen in nehomogen, tako da ni primeren za temeljenje, zato je viadukt temeljen na vodnjakih in uvrtnih pilotih, ki segajo najmanj 4,0 m v



Slika 5 • Značilna vmesna podpora





kompaktno hribino. V območju podpore 5 in 6 je se je nahajal manjši površinski plaz, ki ga je bilo potrebno pred izvedbo vodnjakov sanirati. Dopustna napetost v temeljnih tleh pod vodnjaki znaša za osnovno obtežbo od 800–1000 kN/m<sup>2</sup>, za kombinacijo osnovne in posebne obtežbe pa od 1500–1800 kN/m<sup>2</sup>.

Dopustna nosilnost pilotov znaša 6000–7000 kN.

Vmesne podpore viadukta so temeljene na polnih vodnjakih premera 7,10 m z razširitvijo na 9,00 m na spodnji strani pri vmesnih podporah v oseh 2D-L, 3L-D, 4L-D, 5L-D ter premera 5,50 m z razširitvijo na 8,0 m pri vmes-

nih podporah 6L-D. Globina vodnjakov znaša od 11 do 18 m, odvisno od globine kompaktne hribinske podlage. Krajne podpore so temeljene na pilotih premera 150 cm v permo-karbonski hribini. Krajne podpore so temeljene na pilotih. Ti imajo premer 150 cm in so dolgi od 13,00 do 18,0 m.

## 4 • TEHNOLOGIJA GRADNJE

### 4.1 Izvedba temeljenja in podpor

Varovanje izkopa vodnjaka na vrhu v zgornjih preperinskih slojih je bilo izvedeno z AB prstani (2–3 prstani višine  $h = 1,0$  m). Pri podporah v nagnjenem terenu so se prvi obroči izvedli kot polmeseci in z začasnimi pasivnimi sidri sidrali v zaledno hribino. Pri nadaljnjem izkopu vodnjaka se je zaščita izvajala z armiranim brizganim (torkret) betonom debelim 15 cm. Po potrebi so se izvedla pasivna sidra po bodu izkopa. Ukrepi za varovanja izkopa so se določali sproti na podlagi ugotavljanja dejanske kategorije tal ob prisotnosti geomehanika. Izkop v območju razširitve se je izvedel postopno po korakih z napredovanjem v globino po 1,0 m in izvajanjem izkopa po delih 1/4 obsega vodnjaka. Poševnine izkopa so se ščitile s torkret betonom in pasivnimi SN-sidri. Sledila je izvedba polnilnega dela vodnjaka in temelja pod stebrom. Nad polnilnim delom se je izvedla temeljna plošča stebra z nastavki za izvedbo stebra (slika 6).

Izvedba vmesnih podpor je potekala s pomočjo sistemskih plezajočih opažev, višina kampade je bila 4,0 m. Notranji del opaža je s klasičnim polnilom (z lesenimi remenati) oblikovan tako, da ustreza razširitvam sten (na-

vznoter) kampade. Kape so se izvedle s pomočjo prilagojenih plezajočih sistemskih opažev ter AB montažnimi ploščami, ki služijo kot opaž dna kape stebra.

### 4.2 Prostokonzolna gradnja prekladne konstrukcije

Gradnja prekladne konstrukcije se je skoraj v celoti izvajala s postopkom prostokonzolne gradnje z dvema do tremi pari opažnih vozičkov (slika 7). Na vsakem od obeh viaduktov je bilo potrebno izvesti po 4 velike mize s po dvanajstimi lamelami dolžine 3,72–5,0 m in t.i. eno majhno mizo nad podporo v osi 6. Delovni cikel izvedbe enega para lamel je obsegal naslednje operacije: napenjanje kablov predhodne lamele, spuščanje in premik vozičkov, izravnava ter nadvišanje, polaganje armature in kabelskih cevi, betoniranje, strjevanje betona, odstranitev notranjega opaža in priprava za prednapenjanje. Delovni cikel za simetrično izvedbo lamel je trajal 7 dni.

Po izdelavi miz nad stebroma v oseh 3 in 4 so se vozički prestavili na mize nad stebri v oseh 2 in 5. Sledila je izvedba mize v osi 6 in odseka na odru ob podpori v osi 1. Gradnja

dela konstrukcije v zadnjem polju med podporama 6 in 7 se je izvajala po principu nesimetrične prostokonzolne gradnje s pomožno podporo. Vezne lamele dolžine 5,0 m so se izvedle v zaporedju VL3-4 (vezna lamela v 3. polju), VL2-3, VL5-6, VL1-2 in VL6-7 ter vezne lamele VL5-6. Po zabetoniranju veznega dela in doseženi zadostni trdnosti betona veznih delov je bilo izvršeno napenjanje spodnjih sovprežnih kablov v poljih. Vpetje prekladne konstrukcije v kapo stebra v osi 6 (miza M6) v času prsto konzolne gradnje se je izvedlo s prednapetimi palicami iz visokovrednega jekla (Dywidag) (36 mm in podpiranjem z začasnimi ležišči – hidravličnimi prešami (slika 8).

Prostokonzolna gradnja zahteva stalna in natančna geodetska merjenja. Določitev nadvišanja v posamezni fazi gradnje je izredno zahtevna naloga, ker je potrebno upoštevati veliko parametrov, ki vplivajo na deformacije konstrukcije, kot so: speminjajoči se elastični modul betonov in jekla, vpliv reološkega obnašanja betonov, spreminjanje konstrukcijskega sistema, neenakomerne temperaturne spremembe, nihanje konstrukcije, ipd. Prostokonzolna gradnja zahteva redno prisotnost projektanta, saj so potrebne sprotne korekcije nadvišanj, da se doseže predpisana niveleta viadukta.



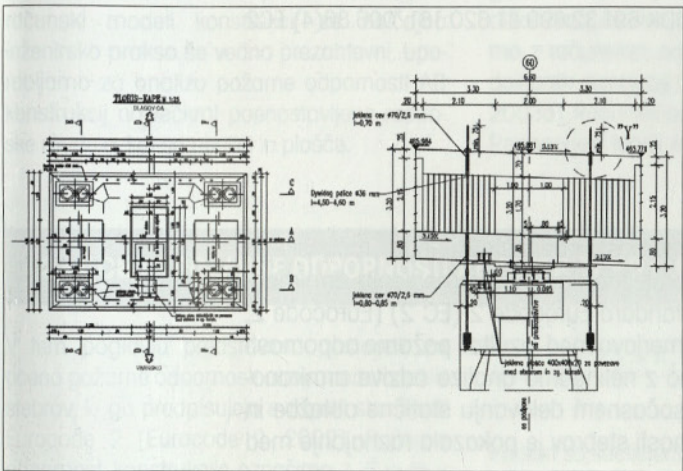
Slika 6 • Izvedba vodnjaka vmesne podpore







Slika 7 • Prostokonzolna gradnja prekladne konstrukcije



Slika 8 • Vpetje prekladne konstrukcije v kapo stebra v času gradnje



## 5 • SKLEP

Viadukt Petelinjek je eden od večjih viaduktov, ki se trenutno gradijo v Sloveniji. Uporabljene so bile številne zanimive rešitve na področju projektiranja, tehnologije in izvedbe objekta. Objekt lahko uvrstimo med značilne pobočne

viadukte z zahtevnim temeljenjem s polnimi vodnjaki in zahtevno prostokonzolno gradnjo prekladne konstrukcije. Objekt odlikuje izredna skladnost med dolžinami razponov in višinami stebrov.

## 6 • LITERATURA

Viadukt 6-9, PETELINJEK, PGD PZI, GRADIS BP Maribor d. o. o., št. projekta 3740, 2002-2003.



# ANALIZA PRIMERNOSTI POSTOPKA ZA DOLOČITEV POŽARNE ODPORNOSTI AB STEBROV PO EUROCODE 2

## ACCURACY OF CALCULATION METHOD FOR ASSESING FIRE RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS ACCORDING TO EUROCODE 2

asist. dr. Sebastjan Bratina, univ.  
dipl. inž. grad., sbratina@fgg.uni-lj.si  
doc. dr. Igor Planinc, univ. dipl. inž.  
grad., iplaninc@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, FGG, Jamova 2,  
1000 LJUBLJANA

Znanstveni članek

UDK 691.32:699.81:620:181, 006.86(4) EC2

**Povzetek** | V članku analiziramo primernost poenostavljenega računskega postopka za določitev požarne odpornosti pretežno tlačno obremenjenih armirano-betonskih stebrov, ki ga priporoča evropski standard Eurocode 2 (EC 2) (Eurocode 2, 2002). Primernost postopka ocenjujemo s primerjavo med rezultati požarne odpornosti stebrov po EC 2 in rezultati, ki jih izračunamo z nelinearno analizo odziva armirano-betonskih ravninskih linijskih konstrukcij pri sočasnem delovanju statične obtežbe in požara. Primerjava rezultatov požarne odpornosti stebrov je pokazala razhajanje med obema računskima postopkoma.

**Summary** | In this paper we present a study of the accuracy of calculation method for assessing fire resistance of reinforced concrete columns, mainly subjected to compressive loading according to European standard Eurocode 2. The results of simple method for assessing fire resistance are compared with the results of nonlinear analysis of the mechanical response of reinforced planar structures due to simultaneous action of static and fire load. The numerical example shows the disagreement of fire resistance, evaluated by simple method according to EC 2, in comparison with results of fire resistance evaluated by nonlinear analysis.

### 1 • UVOD

Požarna odpornost gradbenih konstrukcij predstavlja pomemben del njene varnosti. Armiranobetonske (AB) konstrukcije so glede požarne varnosti v primerjavi z nekaterimi drugimi gradbenimi konstrukcijami sorazmerno varne. To je predvsem posledica velike mase in velike specifične toplote betona ter relativno slabe toplotne prevodnosti. Požarno odpornost konstrukcij lahko v splošnem določamo na dva načina. Eksperimentalno določamo

požarno odpornost konstrukcij v posebej za to prirejenih požarnih pečeh ali pa na objektu v naravi. Takšno določanje požarne odpornosti konstrukcij je nezanesljivo, ker smo omejeni z velikostjo in s številom vzorcev, razen tega pa je zelo težko sklepati na podlagi požarne odpornosti vzorca na požarno odpornost celotne konstrukcije. Splošnejši način določanja požarne odpornosti predstavlja nelinearna analiza odziva konstrukcije pri sočasnem vpli-

vu statične obtežbe in požara. Ker pa velja, da so nelinearne analize požarne odpornosti AB konstrukcij računsko zelo zahtevne, lahko v literaturi zasledimo številna priporočila za poenostavljeno oceno požarne odpornosti, predvsem za enostavne konstrukcije (Dotreppe, 1999), (Eurocode 2, 2002), (Lie, 1991). Matematično modeliranje interakcije med požarom in konstrukcijo je v splošnem zelo zahtevno. Glede na priporočila v literaturi lahko analizo požarne odpornosti konstrukcij razdelimo v tri fizikalno smiselne in matematično nepovezane faze. V prvi fazi določimo ča-



sovnno porazdelitev temperature po požarnem prostoru. V drugi fazi izračunamo časovno spreminjanje temperature v posameznih konstrukcijskih elementih zaradi spreminjanja temperature požarnega prostora. V tretji fazi pa določimo časovno odvisno napetostno in deformacijsko stanje konstrukcije, ki je posledica sočasnega vpliva statične in temperaturne obtežbe. Ker je določitev porazdelitve temperature po požarnem prostoru zelo zahtevna, jo v analizi predpostavimo skladno s predpisanimi požarnimi krivuljami. Za določitev temperaturnega polja ter napetostnega in deformacijskega stanja konstrukcije večina raziskovalcev uporablja metodo končnih elementov. Natančnejše analize požarne odpornosti konstrukcij temeljijo na uporabi 3D končnih elementov. Ker pa so zaenkrat ti računski modeli konstrukcij za običajno inženirsko prakso še vedno prezahtevni, uporabljamo za analizo požarne odpornosti AB konstrukcij največkrat poenostavljene računске modele, kot so nosilci in plošče.

V tem članku analiziramo primernost poenostavljenega računskega postopka za oceno požarne odpornosti pretežno tlačno obremenjenih izoliranih armiranobetonskih stebrov, ki ga podajajo evropski standardi Eurocode 2. Primernost postopka ocenjujemo s primerjavo med rezultati požarne odpornosti stebrov po EC 2 in rezultati, ki jih izračunamo z nelinearno analizo odziva AB linijskih konstrukcij pri sočasnem vplivu statične in temperaturne obtežbe. Uporabljena nelinearna analiza je razdeljena, kot smo že opisali, na tri fizikalno smiselne in matematično ločene faze. Porazdelitev temperature po požarnem prostoru predpostavimo skladno s predpisanimi požarnimi krivuljami, temperaturno polje po konstrukciji izračunamo z računalniškim programom HEATC (Saje, 1987), napetostno in deformacijsko stanje konstrukcije pa izračunamo z računskim postopkom, ki ga je v svoji doktorski disertaciji predstavil Bratina (Bratina, 2003a). Računski postopek je zasnovan na t.i. Reissnerjevi teoriji ravninskih nosilcev. S tem

modelom upoštevamo v analizi odziva AB konstrukcij med požarom neomejeno velikost pomikov, zasukov in deformacij ter upogibno in osno deformiranje nosilca. Dodatno smo predpostavili tudi kompatibilnost deformacij na stiku med armaturo in betonom ter nelinearna konstitucijska zakona za beton in armaturo. Ustrezen računalniški program je izdelan v programskem okolju *Matlab*. Računski postopek pa je dobro umerjen z dosegljivimi eksperimentalnimi rezultati (Bratina, 2003a). Članek ima razen uvoda še štiri kratka poglavja. V drugem poglavju predstavljamo poenostavljen postopek za oceno požarne odpornosti armiranobetonskih stebrov po evropskih standardih EC 2. V tretjem poglavju na kratko predstavimo računski postopek za nelinearno analizo odziva AB ravninskih konstrukcij med požarom. V četrtem poglavju analiziramo primernost poenostavljenega postopka za določitev požarne odpornosti AB stebrov skladno z EC 2 za dva različno obremenjena vrtiljivo podprta stebra. Na koncu podajamo zaključke.

## 2 • OCENA POŽARNE ODPORNOSTI AB STEBROV PO EUROCODE 2

V tem poglavju predstavimo postopek za oceno požarne odpornosti armiranobetonskih stebrov, ki ga predpisujejo evropski standardi Eurocode 2 (Eurocode 2, 2002). Požarno odpornost konstrukcije označimo z  $R$  in je v EC 2 definirana s tem, koliko časa lahko konstrukcija ali njen del kljubuje standardni požarni obremenitvi. Požarne odpornosti so označene z  $R 30$ ,  $R 60$ ,  $R 120$ , kjer številke 30, 60 ali 120 predstavljajo časovno odpornost konstrukcije, izraženo v minutah. Standardna požarna obtežba je predstavljena s požarno krivuljo, ki jo določa gorenje lesne snovi. Skladno s požarno krivuljo po Eurocode 1 (Eurocode 1, 1995) je časovno spreminjanje temperature podano z izrazom

$$T = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (1)$$

Pri tem je  $T$  (v °C) temperatura požarnega prostora,  $t$  pa čas v minutah (slika 3a). Evropski standard EC 2 (Eurocode 2, 2002) predpisuje računski postopek za določitev požarne odpornosti izoliranih armiranobetonskih elementov, ki so izpostavljeni standardnemu požaru, oziroma minimalne dimenzije prereza, ki so potrebne za zagotovitev ustrezne požarne odpornosti stebra. Za pretežno tlačno obremenjene elemente je izraz za račun požarne odpornosti podan z enačbo:

$$R = 120 \left( \frac{R_{\eta_{fi}} + R_a + R_1 + R_a + R_a}{120} \right)^{1.8} \quad (2)$$

Pri tem so koeficienti določeni z izrazi:

$$\begin{aligned} R_{\eta_{fi}} &= 83 \left[ 1.0 - \mu_{fi} \frac{1 + \omega}{\frac{0.85}{\alpha_{cc}} + \omega} \right], \\ R_a &= 1.6(a - 30), \\ R_1 &= 9.6(5 - l_{0,fi}), \\ R_b &= 0.09b', \end{aligned} \quad (3)$$

$$R_n = \begin{cases} 0 & \text{za } n = 4 \text{ (armatura samo v vogalih)} \\ 12 & \text{za } n > 4 \text{ (armatura po celem obodu prereza)}. \end{cases}$$

Pomen oznak v izrazih (3) je:  $a$  (mm) je oddaljenost vzdolžne armature od najbližje zunanje, požaru izpostavljene površine,  $l_{0,fi}$  (m) je dolžina stebra, ki je izpostavljena požaru,  $b' = 2A_c / (b + h)$  (mm),  $\omega = A_s f_{yd} / A_c f_{cd}$ ,  $\alpha_{cc}$  pa je koeficient tlačne trdnosti ( $\alpha_{cc} = 0.85$ ).

Redukcijski faktor za obtežbo stebra ( $\mu_{fi}$  pa izračunamo z enačbo

$$\mu_{fi} = \frac{N_{Ed,fi}}{N_{Rd}} \quad (4)$$

kjer je  $N_{Ed,fi}$  računska obtežba med požarom,  $N_{Rd}$  pa računska nosilnost stebra pri sobni temperaturi.

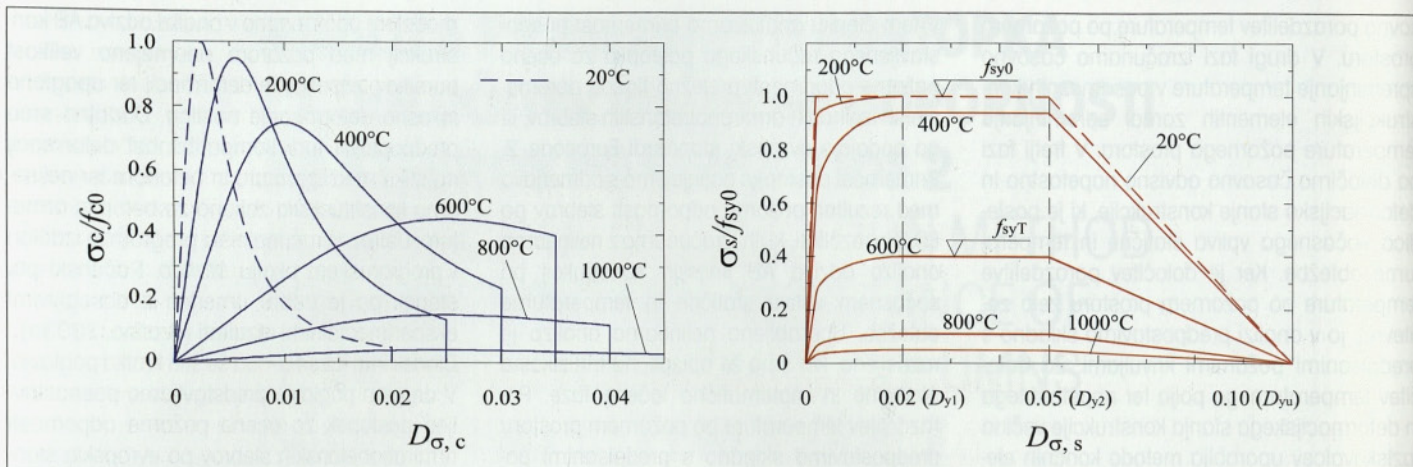
## 3 • NELINEARNA ANALIZA ODZIVA AB KONSTRUKCIJE MED POŽAROM

Splošnejši in natančnejši način določitve požarne odpornosti AB konstrukcij, kot jo predpisuje EC 2, je nelinearna analiza AB konstrukcij med požarom. Podrobnejši prikaz računskega postopka za določitev časovno odvisnega napetostnega in deformacijskega stanja AB konstrukcij med požarom oziroma požarne odpornosti AB konstrukcij je prikazan

v doktorski disertaciji S. Bratine (Bratina, 2003a). Ker pa ima materialna nelinearnost velik vpliv na obnašanje AB konstrukcij med požarom, in ker je ta vpliv v literaturi pogosto pomanjkljivo opisan, ga v nadaljevanju na kratko predstavimo.

Kot smo že povedali, je obnašanje konstrukcije med požarom izrazito materialno in geometrij-





Slika 1 • Konstitucijski modeli betona in armature v skladu z evropskimi standardi Eurocode 2 (Eurocode 2, 2002).

sko nelinearno. Zato moramo konstitucijske zveze med napetostmi, deformacijami, temperaturami in časom izraziti v inkrementni obliki. Skladno z EC 2 (Eurocode 2, 2002) v analizi predpostavimo aditivni razcep prirastka t.i. geometrijske deformacije,  $\Delta D = \Delta \epsilon + z \Delta \kappa$ , ki ga izrazimo z vsoto prirastkov mehanske  $\Delta D_{\sigma}$ , temperaturne  $\Delta D_{tr}$  in prehodne deformacije betona,  $\Delta D_{tr,c}$  ter prirastkov deformacij zaradi lezenja betona in armature,  $\Delta D_{cr,c}$  in  $\Delta D_{cr,s}$ . Fizikalna napetost  $\sigma$  in mehanska deformacija  $D_{\sigma}$  poljubnega vzdolžnega vlakna AB konstrukcije, ki jo sestavljata prispevek elastične in plastične deformacije,  $D_{\sigma} = D_e + D_p$ , sta povezana s konstitucijskim zakonom  $\sigma = \sigma(D_{\sigma})$ . Parametre izbranega materialnega modela, ki so odvisni od temperature, določimo z eksperimenti. V okviru predstavljene nelinearne analize odziva AB konstrukcij na sočasen vpliv statične obtežbe in požara izberemo konstitucijski model za beton in meh-

ko armaturo skladno z evropskimi standardi Eurocode 2 (slika 1). V izbranih modelih upoštevamo tudi izotropno utrjevanje materialnega vlakna.

Temperaturne deformacije betona,  $D_{tr,c}$ , in armature,  $D_{tr,s}$ , prav tako izračunamo skladno z evropskim standardom Eurocode 2 (Eurocode 2, 2002).

Deformacije zaradi lezenja betona pri povišanih temperaturah,  $D_{cr,c}$ , izračunamo s poenostavljenim modelom, ki ga je predlagal kanadski raziskovalec Harmathy (Harmathy, 1993). Deformacije zaradi lezenja betona so odvisne od nivoja napetosti v betonskem vlaknu, temperature, pretečenega časa in dveh materialnih parametrov. Velikosti obeh parametrov določimo s pomočjo eksperimentov, ki jih je opravil raziskovalec Cruz (Cruz, 1968).

Pomemben vpliv na obnašanje tlačnega dela betonske konstrukcije med požarom

imajo t.i. prehodne deformacije,  $D_{tr,c}$ . Z njimi v analizi upoštevamo tiste deformacije, ki jih pri hitrem segrevanju in sušenju betona ne upoštevamo s temperaturnimi in mehanskimi deformacijami. Po Harmathy-ju (Harmathy, 1993) izračunamo prispevek prehodnih deformacij z empiričnim izrazom, ki je odvisen od nivoja napetosti, temperaturnih deformacij ter od materialnega parametra  $k_2$ . Vrednosti parametra  $k_2$  se gibljejo v razponu od 1,8 do 2,35.

Pomemben vpliv na mehansko obnašanje armiranobetonskih konstrukcij med požarom ima tudi viskozno lezenje armature,  $D_{cr,s}$ . To je še posebej izrazito, ko je temperatura jekla višja od 400°C. V okviru uporabljene analize odziva AB konstrukcij med požarom uporabimo za določitev prispevka viskoznega lezenja armature računski model, ga je razvil Harmathy, poenostavil pa Williams-Leir (Williams-Leir, 1983).

## 4 • RAČUNSKA PRIMERA

Za oceno primernosti postopka za požarno odpornost armiranobetonskih stebrov skladno z Eurocode 2 analiziramo obnašanje dveh AB stebrov s kvadratnima prečnima prerezoma dimenzij 30 x 30 cm z višino 4 m (primer  $S_1$ ) oziroma 4,5 m (primer  $S_2$ ). Požarna obtežba stebrov je predpostavljena s požarno krivuljo skladno z EC 1 (slika 3(a)). Geometrijske in materialne podatke za oba stebra ter podatke o obtežbi in načinu podpiranja prikazuje slika 2.

### Ocena požarne odpornosti AB stebrov po EC 2

Količino armature in mejno nosilnost stebrov  $S_1$  in  $S_2$  smo določili s postopkom za dimen-

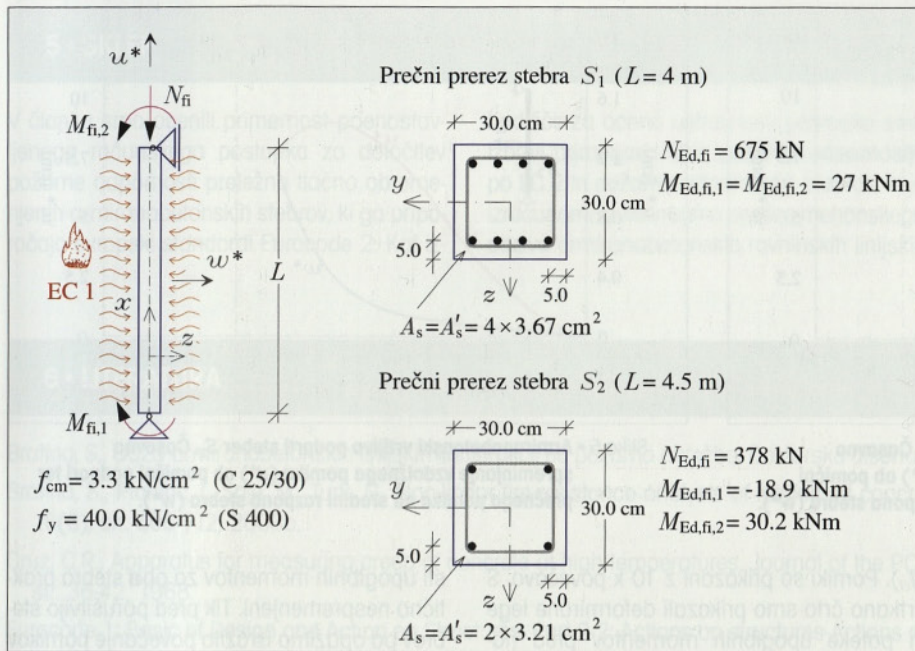
ziranje vitkih elementov po EC 2 (Eurocode 2, 1991). Pri tem smo uporabili naslednje parcialne varnostne faktorje: za obtežbo,  $\gamma_{G,Q} = 1,35$ , za beton  $\gamma_c = 1,5$  in za armaturo  $\gamma_s = 1,15$ . Izračunana mejna nosilnost stebra  $S_1$  pri sobni temperaturi je  $N_{Rd,s} = 1350$  kN in  $M_{Rd,s} = 54$  kNm, mejna nosilnost stebra  $S_2$  pa je  $N_{Rd,s} = 945$  kN in  $M_{Rd,1,s} = -47,3$  kNm oziroma  $M_{Rd,2,s} = 75,6$  kNm. Za velikost redukcijskega faktorja računске obtežbe pri požaru smo za steber  $S_1$  izbrali vrednost  $\mu_{fi} = 0,5$ , za steber  $S_2$  pa  $\mu_{fi} = 0,4$ . To pomeni, da smo steber  $S_1$  pri nelinearni analizi obremenili s tlačno silo  $N_{Ed,fi,s} = 675$  kN in upogibnim momentom  $M_{Ed,fi,s} = 27$  kNm, steber  $S_2$  pa s

silo  $N_{Ed,fi,s} = 378$  kN in momentom  $M_{Ed,fi,s} = -18,9$  kNm oziroma  $M_{Ed,fi,2,s} = 30,2$  kNm. Tako je po evropskih standardih Eurocode 2 (Eurocode 2, 2002) požarna odpornost za steber  $S_1$  enaka,  $R_s = 123,8$  min, za steber  $S_2$  pa  $R_s = 108,7$  min.

### Nelinearna analiza požarne odpornosti AB stebrov

Tudi v primeru nelinearne analize požarne odpornosti AB konstrukcij izberemo časovno spreminjanje temperature požarnega prostora skladno s požarno krivuljo po EC 1. Temperaturno polje po stebru smo izračunali s programom HEATC (Saje, 1987). Pri tem smo spreminjanje temperature vzdolž stebra zane-marili. Glede na to, da sta prečna prereza obeh stebrov enaka, imata v istem času tudi enako razporeditev temperature. Ker je prečni pre-



Slika 2 • Računski podatki za vrtljivo podprta AB stebra z oznakama  $S_1$  in  $S_2$ .

stebra simetričen, smo analizirali samo polovico prereza. Izbrali smo 512 štirivozliščnih končnih elementov. Za velikost časovnega koraka pri računu temperaturnega polja smo izbrali 1 minuto. Za parametra konvekcije in radiacije smo izbrali vrednosti, ki jih priporočajo evropski standardi Eurocode 2 (Eurocode 2, 2002), in sicer  $\alpha_c = 25$  W/m<sup>2</sup>K oziroma  $\epsilon_r = 0,56$ . Spreminjanje toplotne prevodnosti betona,  $k_v$ , specifične toplote,  $c_v$ , in gostote betona,  $\rho_v$  v odvisnosti od temperature smo prav tako upoštevali v skladu z EC 2. Pri tem smo za parametre izbrali vrednosti, ki ustrezajo betonu s silicijevim agregatom pri vsebnosti vlage 1,5 % glede na težo betona. Slika 3 pri-

kazuje časovno spreminjanje temperature po prečnem prerezu na mestu armaturnih palic ter temperaturno polje prečnega prereza stebra med požarom pri različnih časih. Evropski standard Eurocode 2 (Eurocode 2, 2002) podaja za določene dimenzije prečnih prerezov v določenih časovnih intervalih standardnega požara razporeditev temperature po prečnem prerezu. Rezultati našega računa spreminjanja temperature po prečnem prerezu se odlično ujemajo z rezultati iz EC 2.

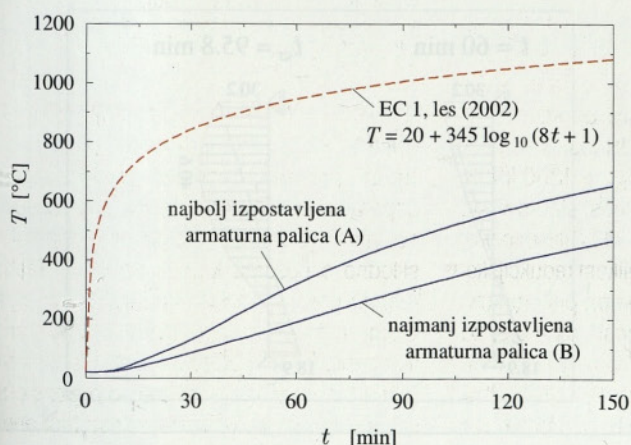
V nadaljevanju smo glede na izračunano razporeditev temperature v stebri izračunali tudi pripadajoče napetostno in deformacijsko stanje. S tem namenom smo stebra modelirali

s šestimi deformacijskimi končnimi elementi (Bratina, 2003a). Za določitev rezultant napetosti po prečnem prerezu, tj. za določitev osne sile in upogibnega momenta, smo polovico prečnega prereza razdelili na 20 podprerezov in za integracijo napetosti po vsakem podprezu izbrali 9-točkovo Gaussovo ploskovno integracijo. Pri izbiri materialnih parametrov konstitucijskih zakonov za beton in armaturo smo predpostavili, da je stebra izdelan iz betona s silicijevim agregatom in armiran s hladno valjano armaturo.

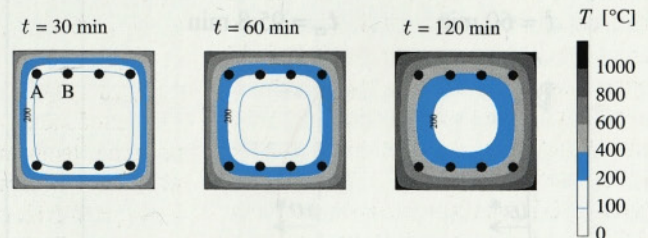
Dodatno smo pri analizi mehanskega odziva stebrov na sočasen vpliv statične in temperaturne obtežbe upoštevali tudi prispevke temperaturnih deformacij betona in armature ( $D_{th}$ ), prispevke deformacij zaradi lezenja betona ( $D_{cr,c}$ ), prispevke t.i. prehodnih deformacij ( $D_{tr,c}$ ,  $k_2 = 2,0$ ) ter vpliv viskoznega lezenja armature pri povišanih temperaturah ( $D_{cr,s}$ ) in sicer z materialnimi parametri za jeklo z najmanj izrazitim lezenjem (Bratina, 2003b). Rezultati nelinearne analize so pokazali, da se je stebra  $S_1$  upogibno porušil, in sicer po 115,4 minutah trajanja požara. To je za 8,4 minut prej, kot je ocenjena požarna odpornost stebra po EC 2. Na sliki 4 prikazujemo primerjavo požarne odpornosti, ki ju izračunamo z obema računskima postopkoma, in časovno spreminjanje vzdolžnega pomika stebra ob pomični podpori ( $u^*$ ) ter prečnega pomika na sredini razpona stebra ( $w^*$ ).

Tudi stebra  $S_2$  se je upogibno porušil, in sicer že po 95,8 minutah. To je kar za 12,9 minut prej, kot smo izračunali s poenostavljenim postopkom po EC 2. Na sliki 5 prikazujemo primerjavo požarne odpornosti ter časovno spreminjanje vzdolžnega in prečnega pomika še za stebra  $S_2$ .

(a) Časovno spreminjanje temperature v armaturnih palicah



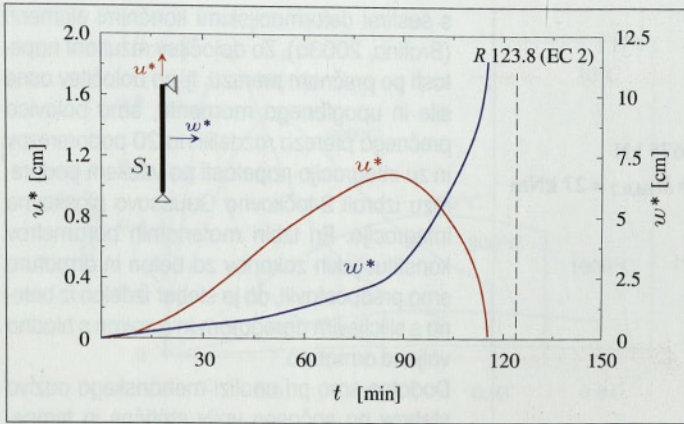
(b) Razporeditev temperature v stebri



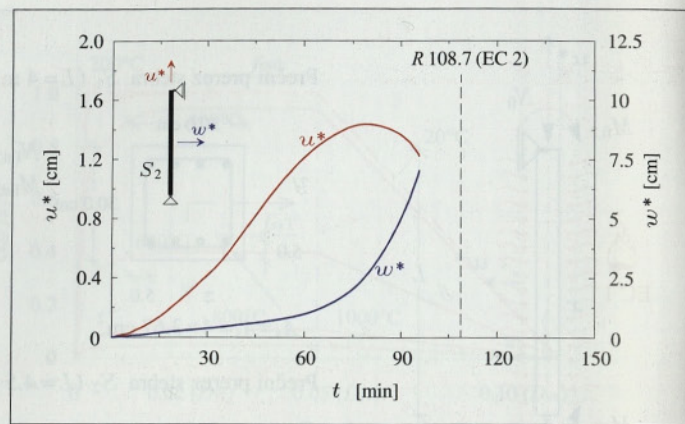
Slika 3 • Armiranobetonski vrtljivo podprti stebra:

(a) časovno spreminjanje temperature v armaturnih palicah z oznakama A in B ter požarna krivulja po EC 1, (b) razporeditev temperature v stebri med požarom pri  $t = 30$ , 60 in 120 minut.





Slika 4 • Armiranobetonski vrtljivo podprti stebel  $S_1$ . Časovno spreminjanje vzdolžnega pomika stebra ( $u^*$ ) ob pomični podpori ter prečnega pomika na sredini razpona stebra ( $w^*$ ).

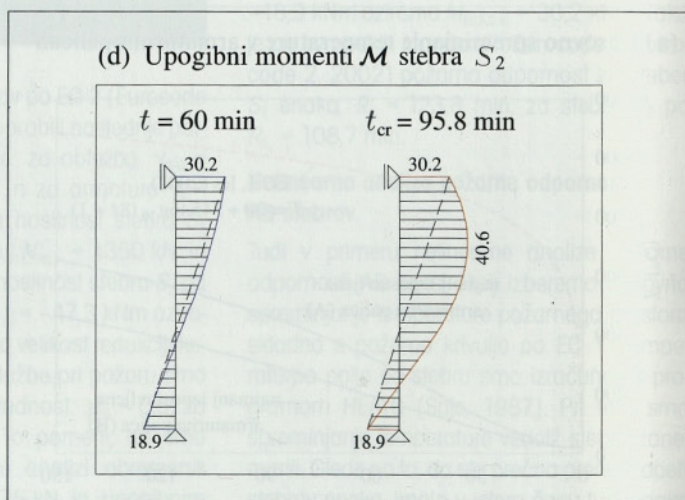
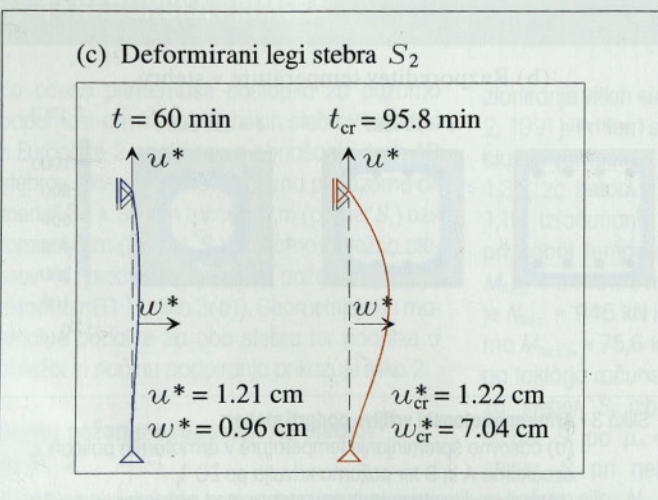
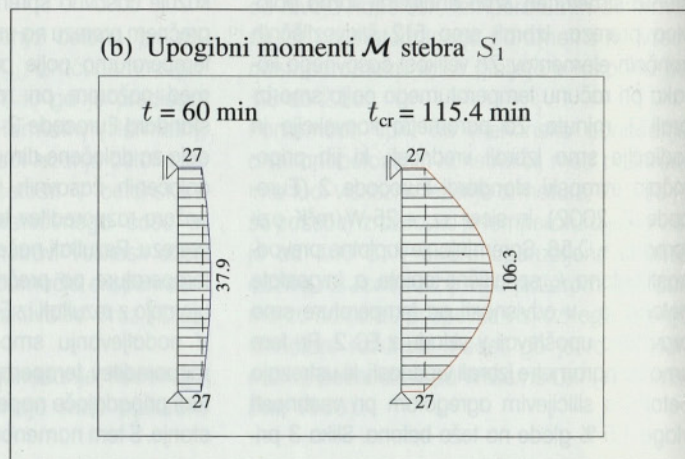
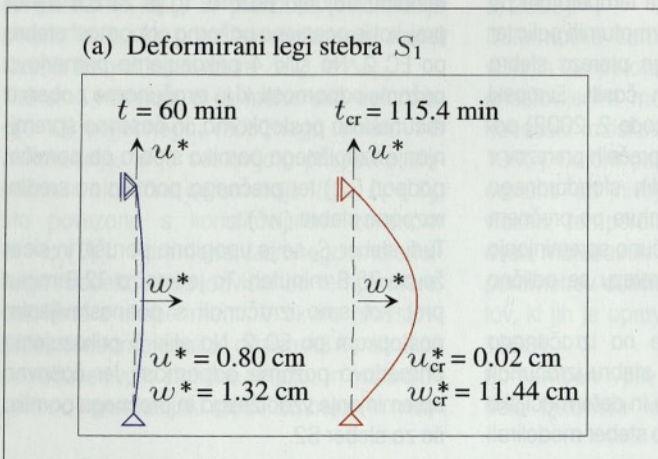


Slika 5 • Armiranobetonski vrtljivo podprti stebel  $S_2$ . Časovno spreminjanje vzdolžnega pomika ( $u^*$ ) ob pomični podpori ter prečnega pomika na sredini razpona stebra ( $w^*$ ).

Na koncu kot zanimivost prikažemo na sliki 6 tudi deformirane lege ter poteke upogibnih momentov vzdolž referenčne osi stebra  $S_1$  oziroma stebra  $S_2$ , in sicer po eni uri požara ( $t = 60$  min) ter tik pred porušitvijo stebra

( $t_{cr}$ ). Pomiki so prikazani z 10 x povečavo. S črtkano črto smo prikazali deformirane lege in poteke upogibnih momentov pred nastopom požara, torej pri  $t = 0$  min. Kot vidimo, so po eni uri trajanja požara pomiki in veliko

sti upogibnih momentov za oba stebra praktično nespremenjeni. Tik pred porušitvijo stebrov pa opazimo izrazito povečanje pomikov in upogibnih momentov vzdolž referenčne osi stebra.



Slika 6 • Deformirane lege in razporeditev upogibnih momentov AB stebrov  $S_1$  in  $S_2$ .



## 5 • SKLEP

V članku smo ocenili primernost poenostavljenega računskega postopka za določitev požarne odpornosti pretežno tlačno obremenjenih armiranobetonskih stebrov, ki ga priporočajo evropski standardi Eurocode 2. Kot iz-

hodišče za oceno ustreznosti postopka smo izbrali primerjavo med požarno odpornostjo po EC 2 in požarno odpornostjo stebrov, ki jo izračunamo z nelinearno analizo mehanskega odziva armiranobetonskih ravninskih linijskih

konstrukcij pri sočasnem delovanju statične in požarne obtežbe. Primerjava je pokazala razhajanje med rezultati obeh računskih postopkov. Glede na to, da je nelinearna analiza požarne odpornosti relativno dobro umerjena z eksperimentalnimi rezultati, sklepamo, da bi bilo potrebno postopek računa požarne odpornosti stebrov po EC 2 dopolniti.

## 6 • LITERATURA

- Bratina, S., Odziv armiranobetonskih linijskih konstrukcij na požarno obtežbo, Doktorska disertacija, FGG, Univerza v Ljubljani, 2003a.
- Bratina, S., Planinc, I., Saje, M., Turk, G., Non-linear fire-resistance analysis of reinforced concrete beams, *Structural Engineering and Mechanics*, 16(6), str. 695-712, 2003b.
- Cruz, C.R., Apparatus for measuring creep of concrete at high temperatures, *Journal of the PCA Research and Development Laboratories*, 10(3), str. 36-42, 1968.
- Eurocode 1: Basic of Design and Action on Structures, Part 2-2: Actions on structures-Actions on structures exposed to fire, ENV 1991-2-2, 1995.
- Eurocode 2: Design of Concrete Structures, Part 1: General rules and rules for buildings, ENV 1992-1-1, 1991.
- Eurocode 2: Design of Concrete Structures, Part 1-2: General rules-Structural fire design, prEN 1992-1-2, 2002.
- Dotreppe, J.-C., Franssen J.-M., Vanderzeypen Y., Calculation method for design of reinforced concrete columns under fire conditions, *ACI Structural Journal*, 96(1), str.9-18, 1999.
- Harmathy, T.Z., *Fire safety design and concrete*, London: Longman, 1993.
- Lie, T.T., Celikkol, B., Method to calculate the fire resistance of circular reinforced concrete columns, *ACI Materials Journal*, 88(1), str. 84-91, 1991.
- Saje, M., Turk, G.: HEATC, Program za račun nelinearnega in nestacionarnega prevajanja toplote, FGG, Univerza v Ljubljani, 1987.
- Williams-Leir, G., Creep of structural steel in fire: Analytical expressions, *Fire and Materials*, 7(2), str. 73-78, 1983.



# VISKOELASTO-PLASTIČNO IN MEHANOSORPTIVNO LEZENJE LESA

## VISCOELASTIC-PLASTIC AND MECHANO-SORPTIVE CREEP OF WOOD

Jožica Gričar, univ. dipl. inž. les.,

jozica.gricar@bf.uni-lj.si,

Miro Tomažič, univ. dipl. inž. les.,

miro.tomazic@bf.uni-lj.si,

prof. dr. Željko Gorišek,

zeljko.gorisek@bf.uni-lj.si

Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo,  
Rožna dolina, Cesta VIII/34, 1000 LJUBLJANA

Znanstveni članek UDK 674.01:620.17

**Povzetek** | V prispevku je opisano viskoelasto-plastično ter mehanosorptivno lezenje lesa. Za računsko modeliranje lezenja lesa je podanih več različnih matematičnih izrazov, ki temeljijo na eksperimentalno določljivih parametrih materiala. Predstavljene so tudi nekatere fizikalne podlage mehanosorptivnega obnašanja lesa, ki izhajajo iz specifične zgradbe materiala.

**Summary** | Viscoelastic-plastic and mechano-sorptive creep behaviour of wood is described in the paper. For the modelling of creep of wood, several different mathematical expressions based on experimentally established parameters of wood are provided. Some physical bases of mechano-sorptive creep of wood, that arise out of specific structure of material, are introduced.

### 1 • UVOD

Viskoelasto-plastično in mehanosorptivno lezenje lesa sta zelo kompleksna pojava, ki ju je zaradi vpliva številnih dejavnikov mogoče

ovrednotiti le s pomočjo ustreznih matematičnih izrazov, ki vsebujejo ustrezno število eksperimentalno določljivih parametrov materia-

la. V strokovni literaturi je znanih več različnih predlogov matematičnega modeliranja viskoelasto-plastičnega in mehanosorptivnega lezenja lesa, kar kaže na zahtevnost problema in nedorečenost tovrstnih raziskav.

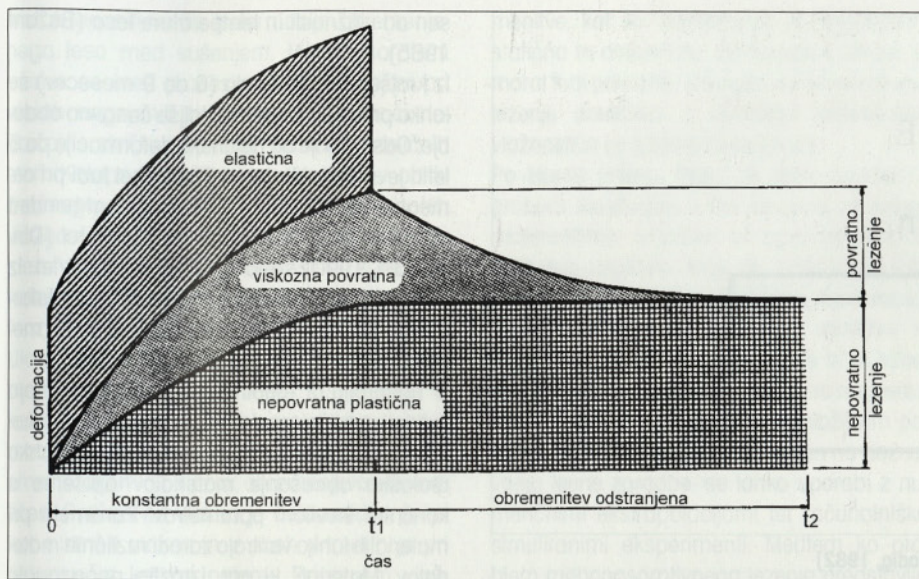
### 2 • VISKOELASTO-PLASTIČNO LEZENJE LESA

Pri konstantnih klimatskih pogojih je obnašanje lesa in lesnih materialov viskoelasto-plastično, torej časovno odvisno (Ranta-Maunus, 1975), (Bodig, 1982), (Dinwoodie, 2000). Časovna odvisnost se kaže v lezenju in relaksaciji ter odvisnosti trdnosti materiala od trajanja obremenitve. Lezenje je pojav, pri katerem se pri stalni obremenitvi deformacija s časom povečuje. Celotno deformacijo lezenja lahko razdelimo na povratni ali elastični in nepovratni ali plastični del (slika 1). Trenutna elastična deformacija je povratna. Zapoznena oziroma viskozna elastič-

na deformacija je časovno odvisna in povratna. Viskozna deformacija je časovno odvisna in je delno povratna delno pa nepovratna oziroma trajna. Pri linearnem viskoelasto-plastičnem lezenju lesa so trenutne in viskozne povratne ter viskozne nepovratne deformacije linearno odvisne od napetosti. Linearna soodvisnost med vsemi deli deformacije in napetostjo pa z zadostno natančnostjo velja le v primeru majhnih napetosti. Pri večjih napetostih pa ta soodvisnost postane izrazito nelinearna. Meja soodvisnosti med lezenjem in napetostjo lesa je

odvisna od načina obremenjevanja, temperature, vlažnosti ter vrste lesa oziroma vrste lesnega materiala (Schniewind, 1966), (Schniewind, 1968), (Schniewind, 1972), (Ranta-Maunus, 1975), (Dinwoodie, 2000), (Torelli, 2003). Pri tlaku in upogibu je odstopanje od linearosti navadno večje kot v primeru natezne obremenitve. Velik del viskozne prilagoditve nastopi v nepovratni komponenti lezenja. Povezana je s progresivnimi strukturnimi spremembami, vključno z lokalno začetno porušitvijo materiala, zaradi česar je nepovratna. Povečanje stopnje obremenitve, temperature ter vlažnosti povzroči zgodnejši pričetek nelinearnosti ter izrazitejši odmik od nje (Dinwoodie, 2000), (Torelli, 2003).





Slika 1 • Sprememba elastične in plastične komponente deformacije pri stalni obremenitvi (Dinwoodie, 2000)

Lezenje je mogoče prikazati z različnimi modeli. V kolikšni meri so uporabni, lahko ocenimo iz njihove natančnosti napovedovanja deformacij v daljšem časovnem obdobju. Nekateri avtorji uporabljajo za prikaz lezenja matematične enačbe (Bodig, 1982), (Dinwoodie, 2000). Lezenje v lesu je po obnašanju podobno lezenju v večini drugih višjih polimerov. Reološki modeli ga opisujejo kot različne kombinacije vzmeti in dušilk. Vzmeti posnemajo elastične komponente deformacije, medtem ko dušilke simulirajo viskoznost oziroma tok tekočine, s čimer se je mogoče dokaj natančno približati realnemu obnašanju lesa.

## 2.1 EMPIRIČNI MODELI

Obstaja veliko metod, s katerimi lahko opišemo lezenje in relaksacijo pri kompozitnem

materialu. Ena izmed metod je prilagajanje empiričnih izrazov eksperimentalnim podatkom. Ustreznost empiričnega izraza je odvisna zlasti od ustreznosti uporabljenih eksperimentalno določenih parametrov (Dinwoodie 2000). Bodig in Jayne (Bodig, 1982) navajata nekaj najbolj uporabljenih tipov enačb za računsko modeliranje lezenja lesa (preglednica 1).

Potenčna funkcija matematično najbolje opisuje lezenje lesa pri konstantni relativni vlagi in temperaturi zraka:

$$\varepsilon(t) = e_0 + at^m \quad (1)$$

Tu je  $\varepsilon(t)$  časovno odvisna deformacija,  $e_0$  je začetna deformacija,  $a$  in  $m$  sta parametra materiala, ki se ju da določiti eksperimentalno ter  $t$  je čas (Dinwoodie 2000). Schniewind

(Schniewind, 1966) je enačbo 1 uporabil pri lezenju bukovine v tangencialni smeri. Tissaoui (Tissaoui, 1996) je ugotovil, da s potenčno funkcijo lahko opišemo obnašanje lesne strukture v daljšem časovnem obdobju.

## 2.2 REOLOŠKI MODELI

Časovno odvisne deformacije lesa in lesnih kompozitov lahko opišemo tudi na podlagi privzetih reoloških modelov snovi. Pri njih je uporabljen Boltzmannov princip superpozicije, ki predpostavlja, da je material linearno viskoelastičen pri normalni temperaturi in relativni zračni vlažnosti. Navadno kombinirajo elastično, viskoelastično in viskozno komponento lesa, pri čemer je viskoelastična komponenta lesa razdeljena v serije Kelvinovih elementov (Voightovih elementov, vzmeti in dušilke vezane vzporedno). Dobro lahko napovedo kvantitativno lezenje, vendar pa ne obrazložijo osnovnega dogajanja v ozadju, kot so npr. poškodbe. Ti modeli poskušajo obrazložiti samo proces lezenja, npr. matematična krivulja daje dobro predvidevanje lezenja, a ne obrazloži dogajanja v lesu. Modeli natančno predvidevajo deformacije pod konstantno obremenitvijo in v konstantni klimi, niso pa primerni za napovedovanje deformacij v variabilni klimi, saj so prirejeni za časovno konstantne razmere (Bonfield, 1996).

Najbolj enostaven mehanski model snovi, ki se uporablja za opisovanje časovnega poteka linearnega lezenja lesa pri konstantnih pogojih in kratkotrajnih obremenitvah, je tako imenovani Burgerjev model (slika 2). Sestavljen je iz zaporedno vezanih Maxwellovega in Kelvinovega telesa oziroma modela snovi (Bodig, 1982), (Dinwoodie, 2000).

Deformacijo v poljubnem času pri stalni obremenitvi lahko izračunamo z izrazom:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E_1} + \sigma \left[ 1 - \exp\left(\frac{-tE_2}{\eta_2}\right) \right] + \frac{\sigma t}{\eta_1} \quad (2)$$

Pri tem je  $\varepsilon(t)$  deformacija v času  $t$  (s),  $E_1$  ( $\text{N/m}^2$ ) elastičnost vzmeti 1,  $E_2$  ( $\text{N/m}^2$ ) elastičnost vzmeti 2,  $\sigma$  ( $\text{N/m}^2$ ) napetost,  $\eta_1$  ( $\text{Ns/m}^2$ ) viskoznost dušilke 1 ter  $\eta_2$  ( $\text{Ns/m}^2$ ) viskoznost dušilke 2.

Prvi člen enačbe (2) predstavlja trenutno elastično deformacijo, drugi člen opisuje zapoznelo elastično deformacijo, tretji pa plastično viskozno deformacijo. Kombinacija drugega in tretjega člena enačbe predstavlja lezenje, prvi del pa elastično obnašanje.

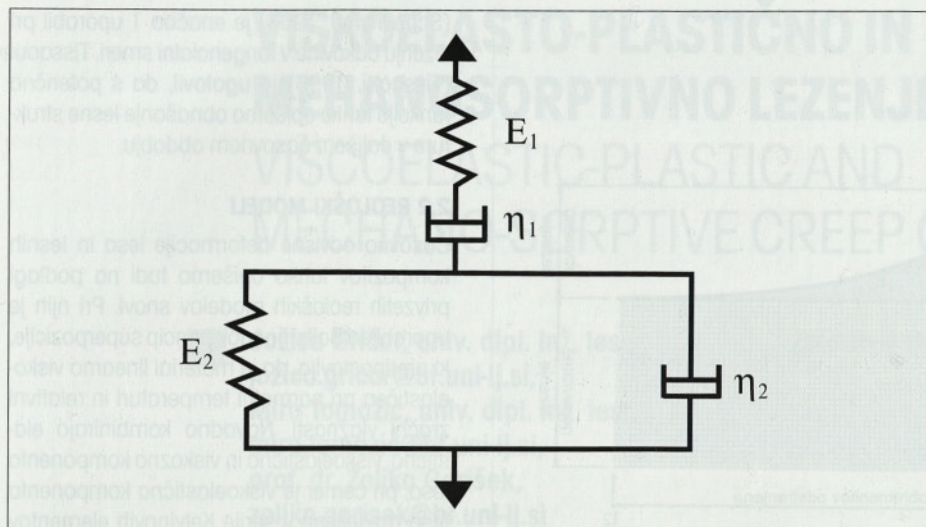
## 2.3 PARAMETRIČNI MATEMATIČNI MODELI

Težja zahteva za posamezen model je ta, da omogoča ustrezno ekstrapolacijo lezenja v

ime	enačba	konstante
Potenčna	$\varepsilon(t) = e_0 + at^m$	a,m
Andrade prvi-tretji zakon	$\varepsilon(t) = e_0 \left( 1 + at^{\frac{1}{3}} \right) e^{mt}$	a,m
Logaritmična	$\varepsilon(t) = a + b \log t$	a,b
Mc Vetty	$\frac{d\varepsilon}{dt} - \frac{de_0}{dt} = ae^{-bt}$	a,b
Marion-Pao	$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E} + a\sigma^m (1 - be^{-nt}) + c\sigma^p t$	a,b,c,m,n,p

Preglednica 1 • Nekaj najbolj uporabljenih empiričnih enačb (Bodig, 1982)





Slika 2 • Burgerjev reološki model viskozne snovi (Bodig, 1982)

daljšem časovnem obdobju na podlagi kratkih časovnih merenj (Dinwoodie 2000). Z večjim številom parametrov je mogoče natančneje opisati obnašanje lezenja tudi v daljšem časovnem obdobju.

Pierce s sodelavci (Pierce, 1979) je najprej predlagal 3-parametrični matematični linearni računski model lezenja:

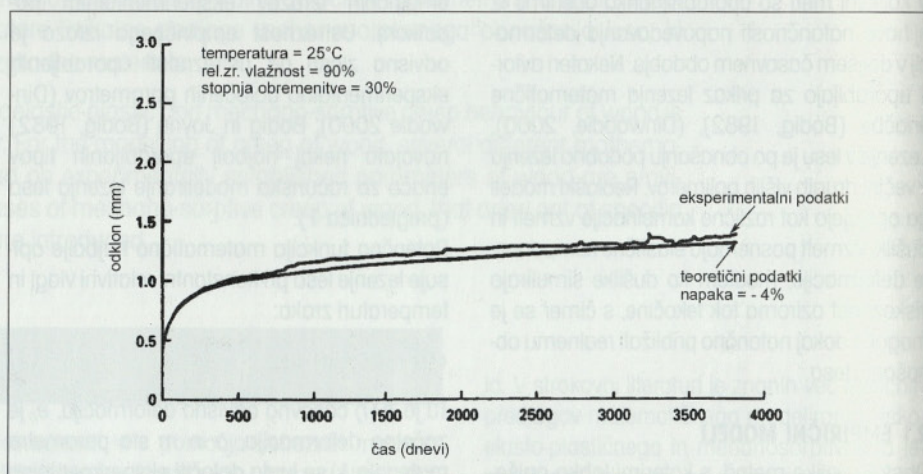
$$\varepsilon(t) = \beta_1 + \beta_2 [1 - \exp(\beta_3 t)] \quad (3)$$

Isti avtorji (Pierce, 1985) so kasneje predlagali tudi 5-parametrični nelinearni matematični model:

$$\varepsilon(t) = \beta_1 + \beta_2 [1 - \exp(\beta_3 t)] + \beta_4 t^{\beta_5} \quad (4)$$

Pri tem je  $\beta_5$  vizkozni modifikacijski faktor z vrednostjo  $0 < \beta_5 < 1$ . Model so uporabili pri računu lezenja vzorcev obremenjenih 44 mesecev. 5-parametrični model z nelinearnim

obnašanjem plastičnega lezenja je boljši kot 3-parametrični model. Koeficient viskoznosti v Maxwellovem modelu se spreminja in je odvi-



Slika 3 • Napovedovanje dolgoletnih deformacij s pomočjo modela na podlagi devetmesečnih meritev

sen od vlažnosti in temperature lesa (Bažant 1985).

Iz krajšega opazovanja (6 do 9 mesecev) se lahko predvidi lezenje za daljše časovno obdobje. Odstopanje od dejanske deformacije po 5 letih je  $\pm 10\%$ . Model se je obnesel tudi pri cementno iverni plošči (CBPB – cement-bonded particleboard). Dinwoodie in sodelavci (Dinwoodie, 1990) so jo obremenili za 10 let. Iz merjenj prvih 9 mesecev so izračunali deformacijo po 10 letih. Rezultati računa so od meritev odstopali za 4% (slika 3).

V nasprotju z empiričnimi krivuljami imajo modeli nedefinirano časovno odvisnost mehanskih lastnosti. Pri uporabi modelov lahko reološko obnašanje materialov opišemo s končnim številom parametrov. Parametri pri materialih lahko variirajo zaradi različnih materialov. Materiali, ki npr. izrazito ponazarjajo lezenje, imajo nizke koeficiente viskoznosti, materiali z omejenim lezenjem (dušilka), pa lahko zamrznejo, saj je viskoznost ekstremno velika (Bodig, 1982).

### 3 • MEHANOSORPTIVNO LEZENJE

Spreminjanje vlažnosti lesa pospešuje lezenje obremenjenega lesa (Armstrong, 1960). Končna deformacija je večja kot v primeru konstantne vlažnosti. Ta pojav imenujemo mehanosorptivni učinek (Grossman, 1976), (Hunt, 1984), (Dinwoodie, 1992). Viskoelastično lezenje je odvisno od trajanja obremenjevanja, medtem ko so mehanosorptivne deformacije odvisne od obsega vlažnostnih sprememb pod točko nasičenja celičnih sten (Grossman, 1976), (Hoffmeyer, 1989). Za mehanosorptivno lezenje je značilno povečanje

deformacij lezenja med procesom desorpcije in povečanje deformacij med prvo adsorpcijo in vsemi nadaljnjimi, pri katerih se vlažnost poveča nad predhodno. Povečanje deformacije je večje ob obremenitvi pri prvotno vlažnem kot pri prvotno suhem lesuu. Ob razbremenitvi je trenutna elastična deformacija, ki se povrne, večja od začetne elastične deformacije. Hitrost spremembe vlažnosti vpliva na hitrost spremembe deformacije, ne vpliva pa na njeno velikost. Velikost deformacije je proporcionalna celotni spremembi vlažnosti. Po razbremenitvi

ter povrniti trenutne elastične deformacije se velik delež celotne deformacije ohrani. Deformacija, ki se ohrani po razbremenitvi, v resnici ni trajna, saj se je pri ponovni izpostavitvi vlažnostnemu ciklu velik del izniči. Med procesom adsorpcije se povrne večji del deformacije kot med procesom desorpcije. Konstantni gradient vlažnosti, ki vodi k neprekinjenemu gibanju vodnih molekul skozi material brez kakšnih koli lokalnih sprememb v vsebnosti vlage, ne povzroči mehanosorptivnih deformacij. Obremenjeni nosilec se poruši v krajšem času in/ali pri nižjih obremenitvah. Pri mehanosorptivnem lezenju se modul elastičnosti zmanjša. Nad točko nasičenja celičnih sten, kjer ni običajnega krčenja, so pri nekaterih



vrstah opazili velike deformacije obremenjenega lesa med sušenjem. Mehanosorptivni učinek se med procesom sušenja pojavi pri vrstah nagnjenih h kolapsu in povzroči neobičajne skrčke nad točko nasičenja celičnih sten. Kolaps je sušilna napaka lesa v obliki močnega nepravilnega krčenja pri visokih vlažnostih, t.j. nad točko nasičenja celičnih sten. Vzrok so sušilne napetosti ali kapilarna tenzija. Les oz. celice kolabirajo, ko kapilarna tenzija preseže prečno tlačno trdnost lesa. Ukrepi, kot je npr. zamrzovanje, ki zmanjša dimenzijske spremembe lesa, nagnjenega h kolapsu, zmanjša tudi mehanosorptivne deformacije. Mehanosorptivni učinek je glede na smer vlaken ali način obremenjevanja različen. Prečno na vlakna je deformacija večja kot v smeri vlaken in v obeh primerih je pri tlaku večja kot pri nategu. Pri prvem vlažnostnem ciklu je odklon večji kot pri kasnejših ciklih, razen v primeru porušitve. Ponavljajoči vlažnostni cikli celo pri zmernih obremenitvah vodijo do porušitev. Deformacije, ki se pojavijo pred porušitvijo, so zelo velike, znatno večje kot maksimalne deformacije, zabeležene pri kratkotrajnih testih. Omejen vpliv drevesnih vrst na mehanosorptivni efekt so opazovali na precejšnjem številu različnih drevesnih vrst, tako iglavcih kot listavcih in razen kolapsa se zdi, da med vrstami ni kvalitativnih razlik. Mehanosorptivni efekt je izrazitejši pri vlaknenih in ivernih ploščah kot pri masivnem lesu. Mehanosorptivno obnašanje lesa je linearno zgolj pri nizkih stopnjah obremenjevanja. Spremembe vsebnosti vlage povzročijo tudi dimenzijske spremembe lesa oz. lesnega sestavljenca, kar je potrebno pri računanju mehanosorptivnih deformacij upoštevati (Schniewind, 1968), (Armstrong, 1972), (Ranta-Maunus, 1975), (Grossman, 1976), (Hunt, 1988), (Hoffmeyer, 1989).

Za prikaz mehanosorptivnega lezenja lesa in lesnih materialov so bili v literaturi predlagani številni računski modeli. Grossman (Grossman, 1976) je podal zahteve, ki jim naj bi takšen model zadoščal. Model, ki bi razlagal mehanosorptivno obnašanje lesa na podlagi molekulske zgradbe oziroma zgradbe lesa, bi moral biti kompatibilen, vsaj kvalitativno, z vsemi eksperimentalnimi ugotovitvami. Boyd (Boyd, 1982) je dodal, da bi model moral biti kompatibilen tudi z viskoelastičnim obnašanjem lesa in lesnih materialov. Zlasti bi moral upoštevati, da v primeru mehanosorptivnih vplivov pride do porušitve pri dosti nižjih napetostih oziroma v krajšem času kot pa v primeru odsotnosti teh vplivov. Omogočati bi moral upoštevaje vplivov različnih načinov obre-

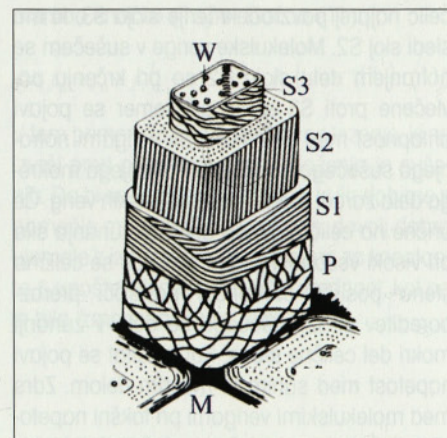
menitve, kot so: kratkotrajna in dolgotrajna, statična in dinamična obremenitev. Model bi moral tudi pokazati, zakaj je mehanosorptivno lezenje določeno z velikostjo spremembe vlažnosti in ne s hitrostjo vlažnosti.

Po Huntu (Hunt, 1997) bi lahko modele v grobem klasificirali v štiri skupine: reološke, matematične, tehniške ter pojasnjevalne, ki opisujejo strukturo lesa na različnih nivojih (molekularnem, mikroskopskem, makroskopskem,...). Med prvimi tremi tipi modelov in četrtim je nedvomna razlika. Prve tri bi lahko šteli kot interpolacijske modele, ki so narejeni z namenom, da se prilegajo razpoložljivim podatkom. Strukturni model, osnovan na poznavanju lesne zgradbe, se lahko uporabi z numeričnimi ekstrapolacijami ter računalniško simuliranimi eksperimenti. Medtem ko problem mehanosorptivnega lezenja predstavlja izziv v razvoju strukturnega modela, mora model zadostiti različnim dimenzijskim spremembam ter drugim zahtevam. Mehanosorptivni učinek se potemtakem ne sme preučevati izolirano glede na druge tipe dimenzijskih sprememb (Hunt, 1997).

### 3.1 FIZIKALNE PODLAGE LEZENJA LESA

Boyd (Boyd, 1982) je pojasnil lezenje pri konstantni ter spreminjajoči se vlažnosti z napetostno induciranimi fizikalnimi interakcijami med kristalinitimi ter nekristalinitimi komponentami celične stene. Osnovne strukturne enote naj bi razvile obliko lečaste rešetke, ki naj bi vsebovala hidrofilni gel. Celulozne mikrofibrile so torej kot rešetke, ki imajo lečaste odprtine, zapolnjene z amorfno matrično substanco. Med vlažnostnimi spremembami ter obremenitvami naj bi ta hidrofilni gel spreminjal obliko, s čimer Boyd razlaga deformacije lezenja. Ob zmanjšanju vlažnosti naj bi se hidrofilni gel skrčil, s tem bi se zmanjšala prečna opora in povzročila odklon mikrofibril. Odklon bi lahko bil tako velik, da bi povzročil tok matrike. V splošnem je širina teh lečastih odprtin majhna v primerjavi z višino in narašča sorazmerno z odklonom mikrofibril glede na vzdolžno os. Hoffmeyer in Davidson (Hoffmeyer, 1989) sta razlagala mehanosorptivno obnašanje lesa, ki je obremenjen z zmernimi do visokimi tlačnimi ali upogibnimi napetostmi v prečni smeri vlaken z nastankom mikroporušitev oz. drsnih ravnin ("slip planes") v celični steni. Izraz drsna ravnina, ki izhaja iz porušitvenega mehanizma, pri katerem en del sloja S2 celične stene zdrsne glede na drugi del sloja S2 (slika 4), je prvi uporabil Bienfait leta 1926 (Hoffmeyer, 1989). Nastanek drsne ravnine naj bi bil pogojen z razklapljanjem in ponov-

nim sklapljanjem vodikovih vezi. Sprememba orientacije mikrofibril v območju drsne ravnine spremeni mehanske ter fizikalne lastnosti lesa. Modul elastičnosti se zmanjša, longitudinalno krčenje in nabrekanje pa se povečata sorazmerno z intenziteto drsnih ravnin. Število drsnih ravnin je v sorazmerju s stopnjo napetosti, vlažnostjo ter trajanjem obremenjevanja. Longitudinalno krčenje (nabrekanje) narašča skladno s številom drsnih ravnin in torej skladno z velikostjo vlažnostnih sprememb. Elastične, viskoelastične in neelastične viskozne lastnosti lesa se spreminjajo sorazmerno s številom drsnih ravnin in torej skladno z velikostjo vlažnostnih sprememb (Hoffmeyer, 1989).



Slika 4 • Model strukture celične stene.

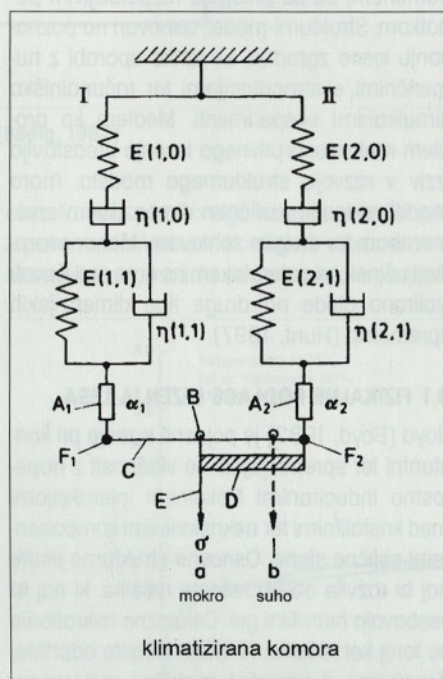
**M** – srednja lamela,  
**P** – primarna stena,  
**S1** – zunanji sloj 1 sekundarne stene,  
**S2** – srednji sloj 2 sekundarne stene,  
**S3** – notranji sloj 3 sekundarne stene,  
**W** – bradavičasti sloj (Fengel, 1989)

Mukudai in Yata (Mukudai, 1986) sta mehanosorptivno delovanje lesa razlagala z zdrsom med zunanjim slojem (S1) ter srednjim slojem (S2) celične stene pri določeni vlažnosti (slika 4). Avtorja sta predpostavljala, da je vzrok za mehanosorptivno obnašanje lesa v inherentni mikrostrukturi celične stene, ki je sestavljena iz srednje lamele, primarne stene ter slojevite sekundarne stene (S1, S2, S3). Orientacija mikrofibril, sestavljenih iz higroskopske celuloze, določa diferencialno krčenje in nabrekanje različnih slojev celične stene, in sicer sta krčenje in nabrekanje znatno večja prečno na mikrofibrile kot pa vzdolžno. V sloju S1 je usmerjenost mikrofibril skorajda pravokotna na vzdolžno os, zato je krčenje (nabrekanje) v tej smeri zanemarljivo, v osni smeri pa veliko. V sloju S2 je usmerjenost mikrofibril skoraj vzporedna z vzdolžno osjo. Krčenje (na-



brekanje) v sloju S2 vpliva na dimenzijske spremembe celotne celične stene, saj je sloj S2 bistveno debelejši od ostalih in predstavlja več kot 70% celotne celične stene. V sloju S3 je usmerjenost mikrofibril skorajda pravokotno na vzdolžno os in posledično je krčenje (nabrekanje) v tej smeri veliko. Velikost lumnov se med sušenjem oziroma navlaževanjem praktično ne spreminja, kar naj bi kazalo na krčenje oziroma nabrekanje sloja S3 v okolico. Potemtakem sloj S2 nabreka proti sloju S1 pri navlaževanju in se krči proti sloju S3 pri sušenju. Srednja lamela, primarna stena ter sloj S1 sekundarne stene naj bi bili zelo fleksibilni, saj se premeri teh slojev hitro zmanjšajo ali narastejo odgovarjajoč na krčenje ali nabrekanje sloja S2. V procesu sušenja suh zrak v lumnih celic najprej povzroči krčenje sloja S3, ki mu sledi sloj S2. Molekulske verige v sušičem se notranjem delu sloja S2 so pri krčenju povlečene proti S3 sloju, pri čemer se pojavi ohlapnost med molekulskimi verigami notranjega sušičega se dela ter zunanjega mokrega dela zaradi premikov molekulskih verig. Če prične na celično steno delovati zunanja sila pri visoki vsebnosti vlage, nato pa se celična stena posuši, ohlapnost povzroči prerazporeditev sil iz sušičega se dela v zunanji mokri del celične stene. Kot rezultat se pojavi napetost med suhim in mokrim delom. Zdrs med molekulskimi verigami pri takšni napetosti poteka hitro na začetku vlažnostnih sprememb na meji med slojema S1 in S2. V zadnjih fazah sušenja celične stene napetost v notranjih slojih celične stene (M+P+S1) doseže maksimum, napetost v slojih S2 ter S3 pa je minimalna. Takšna prerazporeditev napetosti v celični steni povzroči zdrs na meji med slojema S2 ter S1, kjer je razlika v napetostih največja. Velikost takšnih napetosti je odvisna od obsega vlažnostnih sprememb. Na koncu, pri nizki ravnovesni vlažnosti, so vsi sloji S2 ter S3 in M+P+S1 tesno povezani z vodikovimi vezmi in delujejo kot celota, da ublažijo razlike v napetostih med sloji. Povečanje deformacije pri prvem povečanju vlažnosti naj bi bilo dočela rezultat zdrsa molekulskih verig zaradi ohlapnosti med slojema S1 ter S2 kot posledica sušenja pred obremenitvijo. Stičnih točk med slojema S1 ter S2 naj bi bilo v celični steni najmanj, kar naj bi hipotezo podpiralo (Mukudai, 1986). Avtorja sta predlagala tudi enostaven mehanski model, osnovan na tej hipotezi, ki ponazarja obnašanje posamezne celične stene (slika 5). Model je sestavljen iz dveh delnih reoloških modelov, ki vključujeta Maxwelllove in Voightove enote ter elemente krčenja in nabrekanja. Delni model I predstav-

lja sloja S2 ter S3 sekundarne celične stene, delni model II pa sloje srednje lamele, primarne stene ter sloj S1 sekundarne stene. Elementa A<sub>1</sub> in A<sub>2</sub> sta higroskopska materiala s koeficientoma krčenja in nabrekanja  $\alpha_1$  in  $\alpha_2$ , B je premikajoči se blok, D higroskopski material, ki uravnava napetost med krčenjem in nabrekanjem ter F<sub>1</sub> in F<sub>2</sub> povezavi. Za interpretacijo sta s pomočjo računalnika simulirala obnašanje posamezne celične stene pri natezni in upogibni obremenitvi ter razbremenitvi pri spreminjajoči se vlažnosti (Mukudai, 1986), (Mukudai, 1987), (Mukudai, 1988).



Slika 5 • Model simulacije obnašanja lesa pri spreminjajoči se vlažnosti (Mukudai, 1986)

### 3.2 MATEMATIČNI MODELI LEZENJA

Matematični modeli običajno celotno deformacijo razdelijo na štiri komponente: elastično deformacijo, deformacijo lezenja, ki zajema normalno časovno odvisno viskoelastično obnašanje lesa, deformacijo krčenja oziroma nabrekanja in deformacijo, ki zajema mehanosorptivno obnašanje lesa (Dinwoodie 2000). Matematični modeli navadno vključujejo Maxwelllove ter Kelvinove reološke enote. Eden izmed prvih modelov, ki je poskušal kvantitativno opisati mehanosorptivno obnašanje lesa, je bil Ranta-Maunusov v letu 1973 (Ranta-Maunus, 1975), (Hunt, 1986), (Dinwoodie, 2000)) s hidroviskoelastično teorijo. Teorija hidroviskoelastičnosti izraža funkcijsko zvezo med deformacijo in napetostjo v odvisnosti od časa, temperature in vsebnosti vlage.

$$\varepsilon(t) = \sum_{\Psi=0}^{\dot{\Psi}} [\sigma(\Psi), \mu(t), T(\Psi)] \quad (5)$$

pri čemer je  $\sigma$  napetost,  $\mu$  vsebnost vlage,  $T$  temperatura in  $\Psi$ ,  $t$  časovni spremenljivki. Ta teorija temelji na predpostavki, da je med normalnim ter mehanosorptivnim lezenjem osnovna razlika brez interakcije (Hunt 1986). Avtor je razdelil lesne materiale v dve skupini brezi-podobne ter smreki-podobne materiale – odvisno od tega, ali imajo spremembe v vsebnosti vlage kumulativni učinek ali ne. Teorijo hidroviskoelastičnosti je preizkusil na že objavljenih eksperimentalnih rezultatih, ki se nanašajo na različne drevesne vrste ter vezan les (Ranta-Maunus 1975). V letu 1989 je Ranta-Maunus (Dinwoodie, 2000) objavil enačbo v diferencialni obliki, ki opisuje mehanosorptivno deformacijo v linearni zvezi s spremembo vlage, vendar pa enačba vsebuje koeficiente, ki zavzemajo različne vrednosti v odvisnosti od tipa spremembe vlage:

$$f = f_E + f_N + f_{EO} \sum_{i=1}^n a(u_i - u_{i-1}) \quad (6)$$

Pri tem je  $f_E$  elastični povos,  $f_N$  normalni povos lezenja strnjen glede na čas testiranja in vsebnost vlage,  $f_{EO}$  je referenčni elastični povos pri 0 % vsebnosti vlage,  $u$  vsebnost vlage in  $a$  hidroviskoelastična konstanta. Mårtensson (Mårtensson, 1988) je poskušal razviti model in testirati lesni material pod različnimi obremenitvami pri spreminjajoči se vlažnosti. Soodvisnost med napetostjo in deformacijo pri enoosni natezni obremenitvi v diferencialni obliki je zapisal z izrazom:

$$\dot{\varepsilon}_x = \frac{\dot{\sigma}_x}{E(w)} + \dot{\varepsilon}_c + \dot{\varepsilon}_s \quad (7)$$

Pri tem je  $\varepsilon_x$  celotna deformacija,  $\sigma_x/E(w)$  elastična deformacija, ki je odvisna od vsebnosti vlage  $w$ ,  $\varepsilon_c$  osnovno lezenje lesa  $\varepsilon_s$  pa deformacija, ki je odvisna od obremenitve in vlage.

$$\dot{\varepsilon}_s = \dot{\varepsilon}_{s0} + k \frac{\sigma_x}{\sigma_u} \left| \dot{\varepsilon}_{s0} \right| \quad (8)$$

V izrazu (10) je  $\varepsilon_{s0}$  prosta, od spreminjanja vlage odvisna deformacija, izmerjena na neobremenjenem vzorcu,  $\sigma_u$  natezna trdnost lesa,  $k$  pa parameter, ki opisuje mehanosorptivno obnašanje materiala. Model kaže dobro ujemanje z obnašanjem lesa pod konstantno napetostjo, slabše pa pri relaksaciji pri konstantni deformaciji.

Hunt (Hunt, 1989) je predlagal linearni model lezenja. Hunt in Shelton (Hunt, 1987) sta me-



nila, da obstaja neka mejna vrednost oziroma končna vrednost lezenja lesa. Če je les pod obremenitvijo izpostavljen cikličnemu spreminjanju vlage, se prirastek lezenja z vsakim ciklom zmanjšuje, tako da naj bi se celotno mehanosorptivno lezenje asimptotično približevalo neki mejni vrednosti lezenja. Mejo bi lahko kvantitativno napovedali, pod pogojem, da bi zagotovili zadostno število ciklov (Hunt, 1988). Hunt in Shelton (Hunt, 1987) sta dokazala, da pri iglavcih obstaja mejna vrednost lezenja. Pri tej vrednosti so bile pod natezno obremenitvijo longitudinalne dimenzijske spremembe nižje kot v neobremenjenem stanju. Iz tega sta avtorja sklepala, in kasneje to tudi potrdila (Hunt, 1988), da bi bile pod tlačno obremenitvijo longitudinalne dimenzijske spremembe večje kot v neobremenjenem stanju. Navadno so mejo lezenja dosegli z zmanjševanjem obremenjevanja po enem vlažnostnem ciklu. Hunt (Hunt, 1989) je predpostavljal, da je mejo lezenja, v primeru, da resnično obstaja, mogoče določiti z ekstrapolacijo rezultatov večcikličnega eksperimenta. Tej ekstrapolaciji se je mogoče približati na različne načine. Hunt (Hunt, 1989) je povzel Gibsonovo (Gibson, 1965) domnevo, da vlažnostne spremembe in napetost povzročijo pre-

razporeditev molekulskih vezi. Lezenje lesa z upoštevanjem vpliva cikličnega spreminjanja vlage lahko približno simuliramo z eksponentno funkcijo:

$$f = (f_E + f_c) + f_\infty (1 - e^{-n/N}) \quad (9)$$

Pri tem je  $n$  število ciklov,  $N$  karakteristično število ciklov,  $f_E$  elastični povese,  $f_c$  konstanta ter  $f_\infty$  mejna vrednost povesa ob upoštevanju mehanosorptivnega lezenja. Konstanta  $f_c$  je dobljena iz najboljšega približka enačbe (9) eksperimentalnim podatkom. Ker  $f_c$  ni ne elastični ne mehanosorptivni povese, bi lahko domnevali, da predstavlja normalni povese lezenja. Enačba (9) ne upošteva vpliva časa na normalni povese zaradi lezenja  $f_c$ , zato je samo aproksimacija. Glede na to, da je mehanosorptivno lezenje bistveno večje od normalnega, je uporaba aproksimacije po enačbi (9) za namene prilagajanja podatkov upravičena. Nadalje je Hunt (Hunt, 1989) opazil, da utegne biti konstanta  $f_c$  vedno določen delež celotnega lezenja, tako da je bilo razmerje  $f_c / (f_c + f_\infty)$  konstantno okoli 0,4. Edina ustrezná razlaga tega bi bila, da obstajata vsaj dva različna mehanosorptivna lezna mehanizma mehanosorptivnega lezenja le-

sa, ki imata različno karakteristično število ciklov. To lahko opišemo z izrazom:

$$f = f_E + f_N + f_1 (1 - e^{-n/N_1}) + f_2 (1 - e^{-n/N_2}) \quad (10)$$

Pri tem je mejna vrednost mehanosorptivnega lezenja  $f_\infty = (f_1 + f_2) f_N$  komponenta lezenja in je funkcija časa in vlažnosti. Z iterativno metodo so bile določene primerne vrednosti za  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $N_1$  ter  $N_2$  (Hunt, 1989). Analize so temeljile na predpostavki, da se viskoelastično lezenje razlikuje od mehanosorptivnega in se le-ta med seboj kvantitativno ločita. Nekateri avtorji pa menijo, da je spreminjanje vlage zgolj povod za pospešeno normalno viskoelastično lezenje. Na tej podlagi je mogoče prav tako učinkovito prilagoditi izmerjene podatke s spremembo enačbe (10) v enačbo (11):

$$f = f_E + f_0 + f_1 (1 - e^{-n/N_1}) + f_2 (1 - e^{-n/N_2}) \quad (11)$$

V tem primeru je  $f_0$  viskoelastično lezenje, ki se izvrši pred pričetkom ciklov vlaženja in sušenja. Da bi se vrednosti pomikov, ki jih dobimo s pomočjo matematičnega izraza, dovolj dobro ujemale z izmerjenimi, je potrebno za konstanto  $f_0$  upoštevati nekoliko večjo vrednost, kot pa je bila izmerjena (Hunt, 1989).

#### 4 • SKLEP

Lezenje lesa je kompleksen pojav, ki še ni v celoti pojasnjen. Dosedanje študije lezenja

so bile v glavnem opravljene na lesu brez napak, nadaljnje raziskave pa se vse bolj

usmerjajo v proučevanje lezenja lesa, ki vsebuje tudi napake (grče, reakcijski les, juvenilni les, ...), kot je npr. konstrukcijski les, zlasti v smislu nastalih deformacij ter trajne statične trdnosti lesa.

#### 5 • LITERATURA

- Armstrong, L. D., Grossman, P. U. A., The behaviour of particle board and hardboard beams during moisture cycling, *Wood Science and Technology*, 6, 128-137, 1972.
- Armstrong, L. D., Kingston, R. S. T., Effect of moisture changes on creep in wood, *Nature*, 185 (4716), 862-863, 1960.
- Bažant, Z., Constitutive equation of wood in variable humidity and temperature. *Wood Science and Technology*, 19, 159-177, 1985.
- Bodig, J., Jayne, B. A., *Mechanics of Wood and Wood Composites*, Van Nostrand Reinhold Company Inc., New York, 1982.
- Bonfield, P. W. in sod., The modelling of time-dependant deformation in wood using chemical kinetics, *Wood Science and Technology*, 30, 105-115, 1996.
- Boyd, J.D., An anatomical explanation for visco-elastic and mechano-sorptive creep in wood, and effects of loading rate on strenght. *New perspectives in Wood anatomy*, Ed. P. Baas Martinus Nijhoff/Dr W. Junk, The Hague, 171-222, 1982.
- Dinwoodie, J. M. W., Higgins, J.-A., Robson, D.J., Paxton, B.H., Creep research on particleboard. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 48, 5-10, 1990.
- Dinwoodie, J. M. W., Higgins, J.-A., Robson, D.J., Paxton, B.H., Creep in chipboard. *Wood Science and Technology*, 24, 181-189, 1990.
- Dinwoodie, J. M. W., Higgins, J.-A., Robson, D.J., Paxton, B.H., Creep in chipboard, Part 11: The effect of cyclic changes in moisture content and temperature on the creep behaviour of range of boards at different levels of stressing. *Wood Science and Technology*, 26, 429-448, 1992.
- Dinwoodie, J. M., *Timber, its nature and behavior*, Second edition, E & FN SPON, London, New York, 2000.



- Fengel, D., Wegener, G., Wood: chemistry, ultrastructure, reactions. Berlin, Walter de Gruyter, 1989.
- Grossman, P. U. A., Requirements for a model that exhibits mechano-sorptive behaviour. *Wood Science and Technology*, 10, 163-168, 1976.
- Hoffmeyer, P., Davidson, R. W., Mechano-sorptive creep mechanism of wood in compression and bending, *Wood Science and Technology*, 23, 215-227, 1989.
- Hunt, D. G., The mechano-sorptive creep susceptibility of two softwoods and its relation to some other materials properties, *Journal of Materials Science*, 21, 2088-2096, 1986.
- Hunt, D. G., Shelton, C. F., Logitudinal moisture-shrinkage coefficients of softwood at the mechano-sorptive creep limit, *Wood Science and Technology*, 22, 199-210, 1988.
- Hunt, D. G., Linearity and non-linearity in mechano-sorptive creep of softwood in compression and bending, *Wood Science and Technology*, 23, 323-333, 1989.
- Hunt, D. G., Dimensional changes and creep of spruce, and consequent model requirements, *Wood Science and Technology*, 31, 3-16, 1997.
- Kingston, R. S. T., Beverley, B., Some aspects of the rheological behaviour of wood, Part IV: Non-linear behaviour at high stress in bending and compression. *Wood Science and Technology*, 6, 230-238, 1972.
- Mårtensson, A., Tensile behaviour of hardboard under combined mechanical and moisture loading, *Wood Science and Technology*, 22, 129-142, 1988.
- Mukudai, J., Yata, S., Modeling and stimulation of viscoelastic behavior (tensile strain) of wood under moisture change, *Wood Science and Technology*, 20, 335-348, 1986.
- Mukudai, J., Yata, S., Further modeling and stimulation of viscoelastic behavior (bending deflection) of wood under moisture change, *Wood Science and Technology*, 21, 49-63, 1987.
- Mukudai, J., Yata, S., Verification of Mukudai's mechano-sorptive model, *Wood Science and Technology*, 22, 43-58, 1988.
- Pierce, C. B., Dinwoodie, J. M. W., Paxton, B. H., Creep in chipboard, Part 5, An improved model for prediction of creep deflection, *Wood Science and Technology*, 19, 83-91, 1985.
- Pierce, C. B., Dinwoodie, J. M. W., Paxton, B. H., Creep in chipboard, Part 2, The use of fitted response curves for comparative and predictive purposes, *Wood Science and Technology*, 13, 265-282, 1985.
- Ranta-Maunus, A., The viscoelasticity of wood at varying moisture content, *Wood Science and Technology*, 22, 189-205, 1975.
- Schniewind, A. P., Über den Einfluß von Feuchtigkeitsänderungen auf das Kriechen von Buchenholz quer zur Faser unter Berücksichtigung von Temperatur und Temperaturänderungen, *Holz als Roh- und Werkstoff*, 24, 87-98, 1966.
- Schniewind, A. P., Recent progress in the study of the rheology of wood, *Wood Science and Technology*, 2, 188-206, 1968.
- Schniewind, A. P., Barrett, J. D., Wood as a linear orthotropic viscoelastic material, *Wood Science and Technology*, 6, 43-57, 1972.
- Tissaoui, J., Effects of long-term creep on the integrity of modern wood structures, Blacksburg, Virginia, 1996.
- Torelli, N., Les kot viskoelastičen material, *Les*, 55, 3, 48-58, 2003.

LITERATURA



## PRIPRAVLJALNI SEMINARJI IN IZPITNI ROKI ZA STROKOVNE IZPITE ZA GRADBENO STROKO V LETU 2004

SEMINAR		IZPIT		
Časovni termin		Osnovni in dopolnilni	Revidiranje	ZGO - C
marec	22. - 25.		22.03.	
april		19.04. 20.04.	13.04.	
maj	17. - 20.			
junij		07.06. 08.06.	28.06.	Pisni: 19.06. Ustni: 30.06.
september	13. - 16.		15.09.	
oktober	18. - 19. (za ZGO-C)	11.10.		Pisni: 02.10. Ustni: 14.10.
november	15. - 18.		29.11.	Pisni: 13.11. Ustni: 24.11.
december		13.12. 14.12.		

**A. PRIPRAVLJALNI SEMINARJI:**

Pripravljalne seminarje organizira **Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije (ZDGITS), Karlovska 3, 1000 Ljubljana;**

Telefon/fax: (01) 422-46-22; e-naslov: [gradb.zveza@siol.net](mailto:gradb.zveza@siol.net).

Seminar vključuje **izpitne programe** za:

1. odgovorno projektiranje (osnovni in dopolnilni strok. izpit)
2. odgovorno vodenje del (osnovni in dopolnilni strok. izpit)
3. odgovorno vodenje posameznih del
4. tehnike in inženirje, ki so vpisani v posebni imenik odgovornih projektantov pri IZS po 100.e čl. ZGO - (**ZGO-C**).

(Vsi posamezni programi so dostopni na spletni strani IZS - MSG: <http://www.izs.si>, v rubriki »Strokovni izpiti«, pod naslovom »Gradiva«!)

**Cena** za udeležence **seminarja** po izpitnih programih 1., 2. in 3. točke znaša 102.000,00 SIT z DDV, po izpitnem programu 4. točke pa 51.600,00 SIT z DDV.

Seminar ni obvezen, zato je izvedba seminarja odvisna od števila prijav (najmanj 20).

Udeleženca prijavi k seminarju plačnik (podjetje, družba, ustanova, sam udeleženec ...). Prijavo v obliki dopisa je potrebno poslati organizatorju (ZDGITS) najkasneje 15 dni pred pričetkom določenega seminarja.

Prijava mora vsebovati: priimek, ime, poklic (zadnja pridobljena izobrazba), izpitni program (1./2./3./4./ - Glej zgoraj!), naslov udeleženca ter natančni naslov in davčno številko plačnika. Samoplačnik mora k (enaki) prijavi priložiti še kopijo dokazila o plačilu kotizacije. Poslovni račun ZDGITS je 02017-0015398955; davčna številka 79748767.

**B. STROKOVNI IZPITI**

potekajo pri **Inženirski zbornici Slovenije (IZS), Jarška 10-B, 1000 Ljubljana**. Informacije je mogoče dobiti na spletni strani IZS <http://www.izs.si> (kjer se nahajajo vse informacije o strokovnih izpiti, izpitni programi in prijavnimi obrazci!) in po telefonu (01) 547-33-15 vsak delavnik od 9.00 do 13.00 ure.



**S**trokoven ažuriran in celovit informacijski sistem, sistematično urejen po knjigi popisov del, namenjen predvsem projektnim vodjem, projektantom (arhitektom, gradbenikom,...), popisovalcem, kalkulantom,...

## Pregled podjetij

celovita informacija o ponudnikih gradbenih izdelkov in materialov na slovenskem trgu (več 100 ponudnikov)

## Pregled proizvodov

sistematičnizirana uvrstitev gradbenih proizvodov in materialov po knjigi popisov del ter predstavitev njihovih tehničnih značilnosti

## Detalji

rešitve konstrukcijskih vozlišč predstavljene v črtnih detaljih (DWG)

## Predpisi in pravilniki

predstavitev nekaterih predpisov in pravilnikov, povezave na spletu,...

## Uradne objave

izvlečki objav iz Uradnega lista RS za področje graditeljstva

## Ocene investicij - demo verzija

knjižnica različnih že zgrajenih objektov, cenovno ovrednotenih po konstrukcijskih sklopih (demonstracijska verzija - priprava v sodelovanju z IZS)

## Raziskave trga

strokovne in cenovne primerjave različnih gradbenih materialov in izdelkov

## Stroškovne skupine

določitev in opis kriterijev za razvrščanje gradbenih elementov oz. stroškovnih skupin v kategorije

## Klepetalnica

zbir zanimivih vprašanj in odgovorov iz spletne klepetalnice



# NAROČILNICA

naročam zgoščenko PeG 2003/2004    število izvodov:

po ceni:  
 5.950,00 SIT (vključuje poštnino) + 20% DDV za člane IZS - evidenčna številka: -  
 8.500,00 SIT (vključuje poštnino) + 20% DDV za nečlane

## Podatki o naročniku (tiskane črke):



podjetje / oseba: \_\_\_\_\_  
 kontaktna oseba (ime, priimek): \_\_\_\_\_  
 ulica: \_\_\_\_\_  
 poštna številka:  , kraj: \_\_\_\_\_  
 davčna številka: \_\_\_\_\_ (za davčne zavezanca)  
 način plačila: po povzetju  po predračunu   
 e-naslov: \_\_\_\_\_

datum: \_\_\_\_\_    podpis, žig: \_\_\_\_\_

Zgoščenko lahko naročite tudi na spletu:  
<http://www.peg-online.net>

Naročilnico pošljite na naslov:  
**PeG podatkovniki d.o.o., Dunajska 21, 1000 - Ljubljana**





# NOVI DIPLOMANTI GRADBENIŠTVA

## UNIVERZA V LJUBLJANI, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJO

### VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

**Ivan Bevk**, Vzpostavitev sistema zagotavljanja kakovosti pri proizvodnji in vgrajevanju betona, mentor doc. dr. Janez Reflak

**Igor Cerovšek**, Samozgoščevalni betoni – sovisnosti med napetostmi in deformacijami od zgodnjih do karakteristične starosti, mentorica doc. dr. Violeta Bokan Bosiljkov

**Valentin Povirk**, Analiza lokacijskih informacij izdanih v letu 2003 v občini Dol pri Ljubljani, mentorica doc. dr. Maruška Šubic Kovač

**Branko Hostnik**, Transparentne profihrupne ograje, mentor doc. dr. Tomaž Maher

### UNIVERZITETNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

**Jure Sirk**, Ureditev vodooskrbe vasi Krn in pašnih planin nad vasjo, mentor izr. prof. dr. Boris Kompare

**Jure Dolenc**, Programska orodja za simulacijo prometnih tokov VISSIM in CORSIM v slovenskih razmerah, mentor doc. dr. Tomaž Maher, somentor Andrej Cvar

### UNIVERZITETNI ŠTUDIJ VODARSTVA IN KOMUNALNEGA INŽENIRSTVA

**Damjan Sever**, Vsebina relacijske podatkovne baze za GIS-orodje za vodenje katastra vodovoda in kanalizacije v JP Komunala Metlika d.o.o., mentor doc. dr. Anton Prosen, somentor as. mag. Samo Drobne

## UNIVERZA V MARIBORU, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO

### VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

**Boris Korošec**, Difuzija vodne pare v gradbenih konstrukcijah, mentor red. prof. dr. Jurij Kropce, somentor red. prof. dr. Mirko PŠunder

**Tijana Lukić**, Odvodnjavanje v predorih, mentor izr. prof. dr. Tomaž Tollazzi

**Aleksander Merc**, Tehnološki postopki izvedbe drenažnega betona, polnilnega betona med piloti in izdelava recepture cementne malte za suhi postopek brizganja opornih zidov na avtocestnem programu, mentor pred. Samo Lubej, somentorica mag. Darja Lazar

**Aleksander Morano**, Vloga upravljavca avtoceste v sistemu zaščite, reševanja in pomoči ob naravnih in drugih nesrečah v predorih, mentor izr. prof. dr. Tomaž Tollazzi

### UNIVERZITETNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

**Marko Hojnik**, Odvisnost koeficientov kapilarnosti od viskoznosti tekočin, mentor red. prof. dr. Radomir Ilič, somentorica mag. Lucija Hanžič

**Nina Podvornik**, Vpliv kemijskih dodatkov na poroznost betona, mentor red. prof. dr. Radomir Ilič, somentorica mag. Lucija Hanžič

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

## KOLENDAR PRIREDITEV

4.4. - 7.4.2004

### 9th International Symposium on Concrete Roads

Istanbul, Turčija  
secretariat@cembureau.be

6.4. - 10.4.2004

### MEGRA 2004 gradbeni sejem

Gornja Radgona, Slovenija  
info@pomurski-sejem.si

7.4. 2004

### Gradbeni proizvodi pri gradnji cest in drugih objektov, novosti, zahteve za kakovost, tržišče EU

Gornja Radgona, Slovenija  
DRC, Masarykova 14, Ljubljana

12.4. - 15.4.2004

### Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures

Vail, Colorado, ZDA

13.4. - 17.4.2004

### 5th International Conference on Case Histories in Geotechnical

New York, ZDA  
www.web.umn.edu  
prakash@umn.edu

17.4. - 22.4.2004

### North American Tunneling Conference 2004

Atlanta, Georgia, ZDA  
<http://balkema.ima.nl/instructions.htm>

26.4. - 28.4.2004

### Concrete Structures: The Challenge of Creativity

Avignon, Francija  
www.afgc.asso.fr/fib2004  
francoise.raban@equipement.gouv.fr

2.5. - 7.5.2004

### CIB World Building Congress 2004

Toronto, Ontario, Kanada  
www.cib2004.ca  
cib2004@nrc.ca

3.5. - 7.5.2004

### 1st International Building and Construction Expo Libya 2004

Tripoli, Libija  
<http://buildexpo.africantigers.com>  
info@africantigers.com

12.5. - 14.5.2004

### 3rd Euroasphalt and Eurobitume Congress

Dunaj, Avstrija  
www.eecongress.org  
info@eecongress.org



16.5. - 19.5.2004

**Conference IWCE 2004 Cold Regions Engineering**  
Edmonton, Kanada

22.5. - 27.5.2004

**World Tunnel Congress 2004**

Singapur, Singapur  
[www.tucss.com/wtc2004](http://www.tucss.com/wtc2004)  
<http://wtc2004@tucss.com>

24.5. - 28.5.2004

**MIPRO 2004**

Opatija, Hrvaška  
[www.mipro.hr](http://www.mipro.hr)  
[mipro@ri.htnet.hr](mailto:mipro@ri.htnet.hr)

9.6. - 11.6.2004

**4. Posvetovanje slovenskih geoteknikov in 5. Šukljjetov dan**  
Rogaška Slatina, Slovenija

14.6. - 17.6.2004

**8th World Conference on Timber Engineering**

Lahti, Finska  
[www.ril.fi/wcte2004](http://www.ril.fi/wcte2004)  
[kaisa.vanhalainen@ril.fi](mailto:kaisa.vanhalainen@ril.fi)

23.6. - 25.6.2004

**OTUA Symposium 2004: Steel Bridges Conference**

Millau, Francija  
[www.otua.org/millau](http://www.otua.org/millau)  
[wasoodev.hoorpah@otua.ffa.fr](mailto:wasoodev.hoorpah@otua.ffa.fr)

24.6. - 26.6.2004

**Bridges across the Danube- Bridges in Danube Basin**  
Novi Sad, Srbija in Črna Gora

5.7. - 7.7.2004

**SEMC 2004 Conference Structural Engineering, Mechanics and Computation**

Cape Town, Južna Afrika

6.7. - 7.7.2004

**Intelligent Transport Systems Conference**

Winchester, Anglija  
[www.its-uk.org.uk](http://www.its-uk.org.uk)  
[mailbox@its-uk.org.uk](mailto:mailbox@its-uk.org.uk)

18.7. - 23.7.2004

**Composite Construction V International Conference**

Mpumalanga, Južna Afrika  
[www.engconfintl.org/4ab.html](http://www.engconfintl.org/4ab.html)  
[a\\_kemp@civil.wits.ac.za](mailto:a_kemp@civil.wits.ac.za)

20.7. - 23.7.2004

**Conference ACMBS-IV Advanced Composite Materials in Bridges and Structures**

Calgary, Kanada

1.8. - 6.8.2004

**13th World Conference on Earthquake Engineering**

Vancouver, Kanada  
[www.venuewest.com/13wcee](http://www.venuewest.com/13wcee)  
[13wcee@venuewest.com](mailto:13wcee@venuewest.com)



USTVARJAMO AVTOMOBILE.

Ne-omejena serija!





**23.8. - 25.8.2004**

**Technologies for Deep Water and Remote Offshore Developments**

Lizbona, Portugalska  
www.oceanresearchconference.com

**7.9.2004**

**ITC@EDU WORKSHOP**

Istanbul, Turčija  
http://2004.ecppm.org

**8.9. - 10.9.2004**

**ECPPM Conference  
European Conference on Product and  
Process Modelling in the AEC Industry**

Istanbul, Turčija  
http://2004.ecppm.org

**12.9 - 16.9.2004**

**8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa with the  
theme Roads- the Arteries of Africa**

Sun City, Južna Afrika  
http://asac.csir.co.za/capsa  
patfoots@iafrica.com

**19.9 - 24.9.2004**

**Metropolitan Habitats and Infrastructure IABSE Symposium**

Shanghai, Kitajska  
www.iabse.ethz.ch/conferences/Shanghai/Shanghai\_f.html  
secretariat@iabse.ethz.ch

**29.9 - 1.10.2004**

**Interoute 2004 Congress and Trade Fair**

Montpellier, Francija  
www.exposium.fr

**19.10 - 22.10.2004**

**IABMAS Conference Bridge Maintenance, Safety and Management**

Kyoto, Japonska

**20.10 - 22.10.2004**

**7. Slovenski kongres o cestah in prometu**

Portorož, Slovenija  
DRC, Masarykova 14, Ljubljana

**21.10 - 23.10.2004**

**Durability and Maintenance of Concrete Structures**

Dubrovnik, Hrvaška  
secon@grad.hr

**28.10 - 31.10.2004**

**ISEAT 2004**

**4th International Symposium on Asphalt Emulsion Technology**

Washington DC, ZDA  
www.aema.org  
krissoff@aema.org

**9.2 - 12.2.2005**

**IABSE Conference**

**Role of Structural Engineers  
Towards Reduction of Poverty**

New Delhi, Indija  
www.iabse.org

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

# RENAULT

**OMEJENE SERIJE LAHKIH GOSPODARSKIH VOZIL  
RENAULT z neomejenimi možnostmi udobja.**

Poleg zunanje prenovljene podobe, funkcionalne prostornosti in učinkovite prilagodljivosti vas bo presenetila tudi notranjost - **KLIMA** in **RADIO s CD-jem**. Tako boste za enako ceno prejeli več. Zaradi ugodnih pogojev financiranja in prihranka **do 580.000 SIT** je sedaj najprimernejši čas, da si izberete novega pomočnika.

Renault - vodilna znamka  
lahkih gospodarskih vozil v Evropi.

[www.renault.si](http://www.renault.si)

Slika je simbolična. Navedeni znesek predstavlja popust na najvišjo priporočeno ceno.



Schiedel  
ABSOLUT



# Nam ni vseeno...

...kakšen dimnik imate!

A large, grey, rectangular boiler unit with a textured surface. It features two circular openings on top, each with a metal cap. Two vertical pipes protrude from the top. On the front, there are two rectangular access doors with the 'schiedel' logo embossed on them. The unit is mounted on a concrete base with a circular hole and a black cap. The background is a wall with vertical wooden slats.

***schiedel***<sup>®</sup>

[www.schiedel.si](http://www.schiedel.si)