

# GRADBENI VESTNIK

april 2004



GLASILO ZVEZE DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV IN TEHNIKOV SLOVENIJE IN  
MATIČNE SEKCIJE GRADBENIH INŽENIRJEV PRI INŽENIRSKI ZBORNICI SLOVENIJE

Poštnino plačana pri pošti 1102 Ljubljana



# 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, april 2004, letnik 53, str. 69-96

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 Kristijan Juteršek**

Lektorica:

**Alenka Raič Blažič**

Lektorica angleških povzetkov:

**Darja Okorn**

Tajnica:

**Anka Holobar**

Oblikovalska zasnova:

**Mateja Goršič**

Tehnično urejanje, prelom in tisk:

**Kočeviski 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 upokojene 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 vstet DDV.

Poslovni račun ZDGITS pri NLB Ljubljana:

02017-0015398955

## Navodila avtorjem za pripravo člankov in drugih prispevkov

- Uredništvo sprejema v 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 dvojnimi 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 70

Aljoša Klobučar, univ. dipl. inž. grad.,  
prof. Vukašin Ačanski, univ. dipl. inž. grad.,  
Dobroslav Čabrilo, univ. dipl. inž. grad.,  
Edib Miralem, univ. dipl. inž. grad.,  
mag. Marko Završki, univ. dipl. inž. grad.

### PRVONAGRAJENA NATEČAJNA REŠITEV MOSTA PREKO DONAVE PRI BEŠKI NA LEVEM PASU AVTOCESTE NOVI SAD – BEOGRAD

FIRST PRIZE WINNING SOLUTION FOR BRIDGE OVER THE DANUBE RIVER NEAR BEŠKA ON THE LEFT TRACK OF HIGHWAY NOVI SAD – BEOGRAD

stran 78

dr. Jakob Šušteršič, univ. dipl. inž. grad.,  
doc. dr. Andrej Zajc, univ. dipl. fiz.,  
Iztok Leskovar, univ. dipl. inž. grad.

### OSNOVNI PRINCIPI OJAČANJA BETONA Z VLAKNI

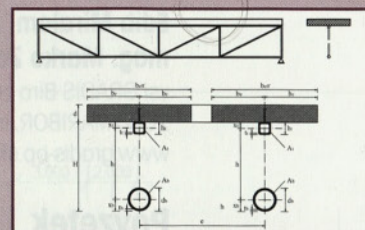
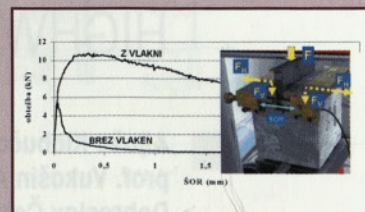
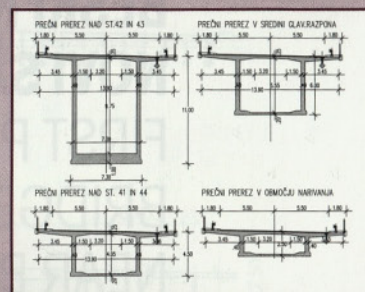
BASIC PRINCIPLES OF CONCRETE REINFORCEMENT WITH FIBRES

stran 86

Uroš Klanšek, univ. dipl. gosp. inž.,  
izr. prof. dr. Stojan Kravanja, univ. dipl. inž. gradb.

### PRIMERJAVA SOVPREŽNIH NOSILCEV

COMPARISON OF COMPOSITE BEAMS



## Raziskovalni projekti

stran 94

as. dr. Matevž Dolenc, univ. dipl. inž. grad.,  
Tomaž Pazlar, univ. dipl. inž. grad.

### PREDSTAVITEV REZULTATOV EVROPSKEGA PROJEKTA PRODAEC

## Seminarji

stran 95

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

## Novi diplomanti gradbeništva

stran 96

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

## Koledar prireditev

stran 96

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

Slika na naslovnici: Most čez Donavo pri Beški, računalniška predstavitev, GRADIS BP Maribor

# PRVONAGRAJENA NATEČAJNA REŠITEV MOSTA PREKO DONAVE PRI BEŠKI NA LEVEM PASU AVTOCESTE NOVI SAD – BEOGRAD

## FIRST PRIZE WINNING SOLUTION FOR BRIDGE OVER THE DANUBE RIVER NEAR BEŠKA ON THE LEFT TRACK OF HIGHWAY NOVI SAD – BEOGRAD

**Aljoša Klobučar, univ. dipl. inž. grad.,**  
**prof. Vukašin Ačanski, univ. dipl. inž. grad.,**  
**Dobroslav Čabrilo, univ. dipl. inž. grad.,**  
**Edib Miralem, univ. dipl. inž. grad.,**  
**mag. Marko Završki, univ. dipl. inž. grad.,**

vs GRADIS Biro za projektiranje d. o. o., Lavričeva 3,  
2000 MARIBOR, ime.priimek@gradis-bp.si,  
www.gradis-bp.si.

Strokovni članek UDK 624.21:625.745.1

**Povzetek** | Direkcija za ceste Republike Srbije je v letu 2002 razpisala javni anonimni mednarodni natečaj za izdelavo najugodnejše rešitve mosta dvojčka preko Donave pri Beški na avtocesti E75 Novi Sad – Beograd. V članku bo predstavljena prvo-nagrajena natečajna rešitev.

**Summary** | Company for Roads of Republic of Serbia issued a public anonymus tender for design of a bridge over the river Danube at Beška on a highway E75 Novi Sad – Beograd. In the paper, the first prize winning solution for the bridge is presented.

## 1 • UVOD

Republiška direkcija za ceste republike Srbije je razpisala javni anonimni natečaj za izdelavo najugodnejše rešitve mosta preko Donave pri Beški na avtocesti E75 Novi Sad – Beograd. Pogoji natečaja so bili naslednji:

- predlagana rešitev mora predstavljati most dvojček obstoječemu mostu na osnem razmaku 19,40 m oziroma na čistem razmaku med robovi robnih vencev 5,00 m
- silhueta, skupna dolžina, število in velikost posameznih razponov morajo v popolnosti slediti silueti obstoječega mosta
- statični sistem konstrukcije mosta, izbor osnovnih materialov, način temeljenja in tehnološki postopki grajenja so prosti po osebnem izboru in prepričanju udeležencev natečaja.

## 2 • OSNOVNI PODATKI MOSTA

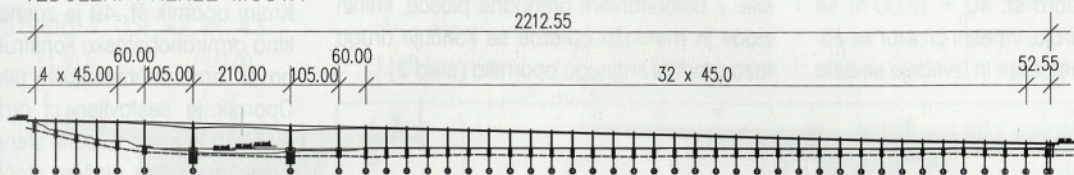
Skupna dolžina mosta znaša  $L = 2122,55$  m in je sestavljena iz dolžine na levem bregu Donave  $L_L = 52,55 + 32 \times 45,00 = 1492,55$  m, dolžine, ki premošča Donavo  $L_c = 60,00 + 105,00 + 210,00 + 105,00 + 60,00 = 540,00$  m in dolžine na desnem bregu Donave  $L_D = 4 \times 45,00$  m = 180,00 m. Skupna širina mosta je

14. decembra 2002 je komisija sporočila svojo odločitev o delitvi prve nagrade med betonsko in jekleno varianto izvedbe:

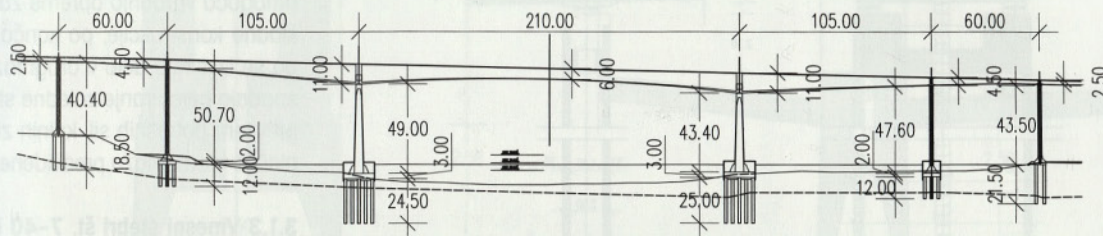
- MostB (Gradis Biro za projektiranje)
- 12345 (COWI & CIP)

14,60 m in je sestavljena iz širine robnih vencev, robnikov in hodnikov za pešce  $2 \times 1,80$  m = 3,60 m ter širine vozišča 11,00 m (slika 1). Začetek mosta na Bački strani je v vertikalnem radiju, prvih 216,90 m pa je florisno v klotoidi. Ostali del mosta je florisno v premii, vzdolžno pa v vertikalnem nagibu nivelete 2,3 %.

### VZDOLŽNI PREREZ MOSTA



### VZDOLŽNI PREREZ GLAVNEGA RAZPONA



Slika 1 • Vzdolžni prerez mosta

## 3 • OPIS KONSTRUKCIJE MOSTA

Konstrukcija mosta je sestavljena iz dveh krajnih opornikov št. 6 in 49, vmesnih podpor št. 7 do 48 in glavne prekladne konstrukcije od dilatacije na oporniku št. 6 do opornika št. 49.

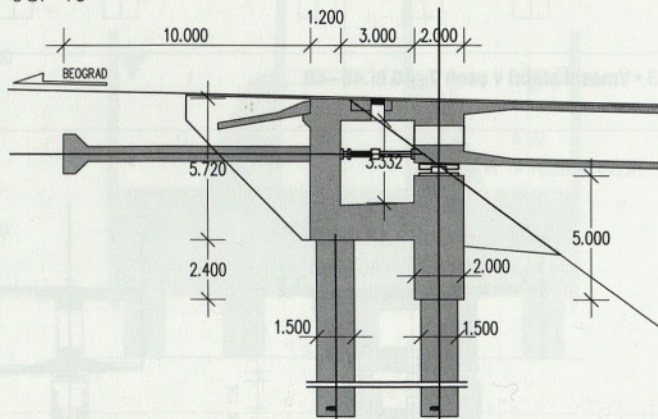
### 3.1 Opis podporne konstrukcije

#### 3.1.1 Krajni opornik št. 6

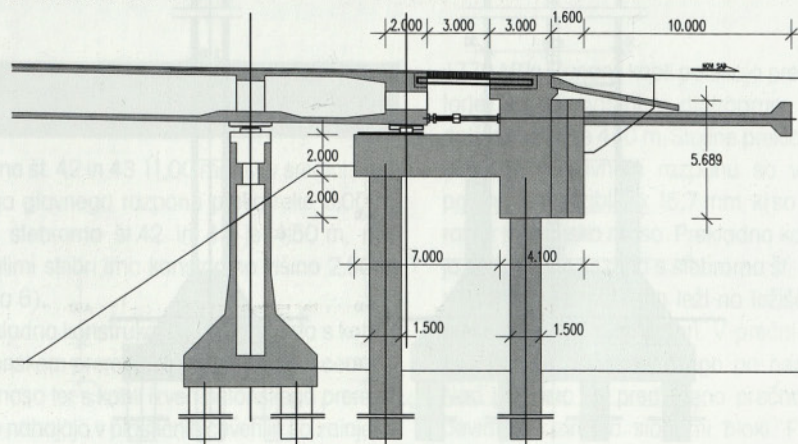
Krajni opornik št. 6 je zasnovan kot masivna armiranobetonska konstrukcija, temeljena na 6 uvrtnih armiranobetonskih pilotih  $\varnothing 150$  cm. Opornik sestoji iz armiranobetonske plošče nad piloti, zaledne stene, bočnih kričnih zidov, prehodne plošče, plošče za prevzemanje potresne sile v vzdolžni smeri in komore za montažo opreme. Izvede se v dveh fazah. V prvi fazi se izvedejo deli, ki skrbijo za prevzem horizontalnih sil od narivanja prekladne konstrukcije. Te sile se prenašajo preko hidravličnih stiskalnic na armiranobetonski zid oziroma na teren za zidom. Stiskalnice nosilnosti 2000 kN se montirajo v vmesni prostor med zaledno steno krajnega opornika in pomožega zidu ter sinhrono povežejo s stiskalnicami v osrednji postaji za narivanje.

Dimenzije armiranobetonske plošče nad piloti omogočajo vgradnjo predvidene dilatacije, hidravličnih potresnih izolatorjev in drsnih ležišč oziroma kompletne opreme, ki omogoča izvršitev predvidenih pomikov prekladne konstrukcije v vzdolžni smeri.

### OPORNIK V OSI 49



### OPORNIK V OSI 6



Slika 2 • Krajni opornika

Po končani izdelavi in narivanju prekladne konstrukcije do stebra št. 40 + 15,00 m se stiskalnice demontirajo, vmesni prostor se zapolni z armiranim betonom in izvedejo se dela

za betoniranje plošče, ki prevzema potresne sile. Z betoniranjem prehodne plošče, krilnih zidov in montažo opreme se končuje druga faza gradnje krajnjega opornika (slika 2).

### 3.1.2 Krajni opornik št. 49

Krajni opornik št. 49 je zasnovan kot monolitna armiranobetonska konstrukcija, temeljena na 6 armiranobetonskih pilotih  $\varnothing 150$  cm. Opornik je sestavljen iz armiranobetonske plošče nad piloti, zaledne stene, bočnih krilnih zidov, prehodne plošče, plošče za prevzem potresnih sil in komore za montažo opreme. Opornik je zgrajen v dveh fazah. V prvi fazi je opornik prilagojen in oblikovan tako, da omogoča vgradnjo opreme za narivanje prekladne konstrukcije, po končanem narivanju pa se izvedejo dela v drugi fazi. Med ta dela spadajo betoniranje zaledne stene, plošče za prevzem potresnih sil, krilnih zidov, prehodne plošče ter montaža predvidene opreme.

### 3.1.3 Vmesni stebri št. 7-40 in 4548

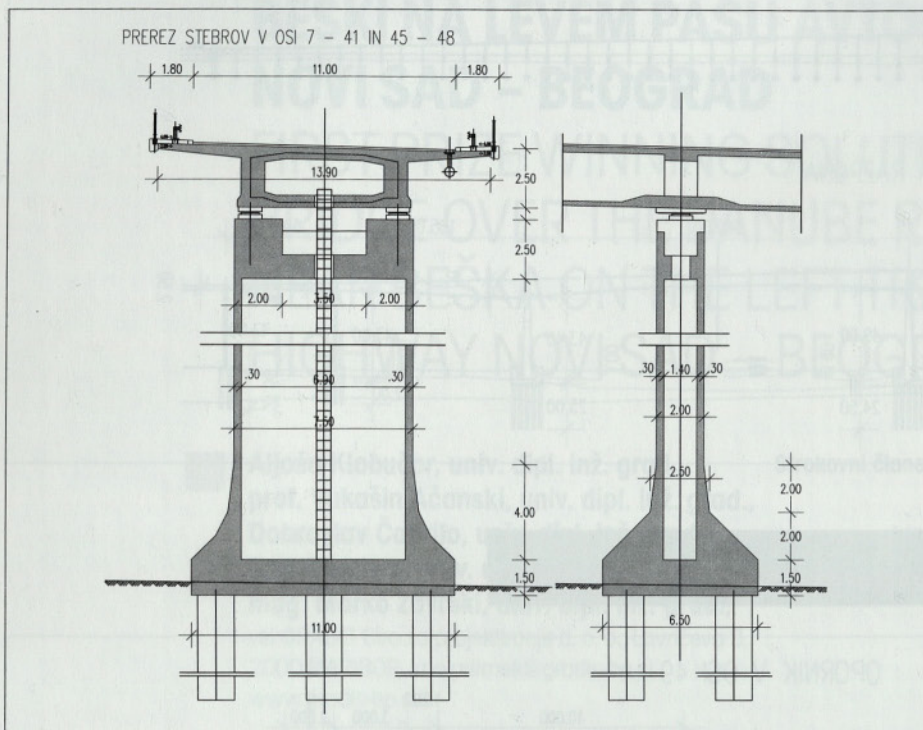
Vmesni stebri št 7-40 in 45-48 so zasnovani kot masivne armiranobetonske konstrukcije, temeljene na po 6 pilotih  $\varnothing 150$  cm. Steber je sestavljen iz armiranobetonske plošče nad piloti, zunanjih zidov debeline 30 cm in plošče na vrhu stebra, na kateri so vgrajena ležišča in puščena odprtina za pregled in morebitno zamenjavo med uporabo. Stebri imajo škatlast pravokoten prerez velikosti 2,0 x 7,50 m. Na višini 4,0 m od temeljne plošče so bočni zidovi vutasto odebeljeni iz 30 na 100 cm (slika 3).

### 3.1.4 Vmesna stebra št. 41 in 44

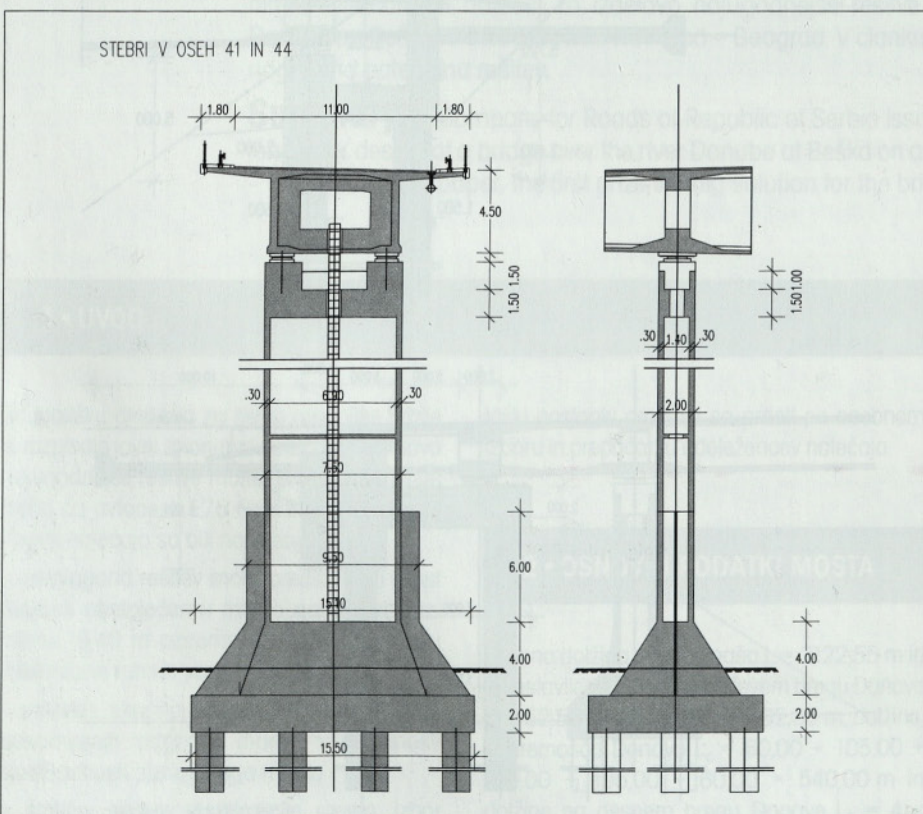
Stebra sta zasnovana kot masivni armiranobetonski konstrukciji, temeljeni na po 12 pilotih  $\varnothing 150$  cm. Steber ima pravokoten škatlast prerez velikosti 2,0 x 7,50 m, na spodnjem koncu do višine 6 m pa ima hidravlično ugodno obliko. Steber se končuje z armiranobetonsko ploščo, na katero se vgradijo ležišča. Debeline zidov so 30 cm, debelina spodnje plošče nad piloti je 2,00 m, nad njo pa je 4,0 m visoka prisekana piramida (slika 4).

### 3.1.5 Vmesna stebra št. 42 in 43

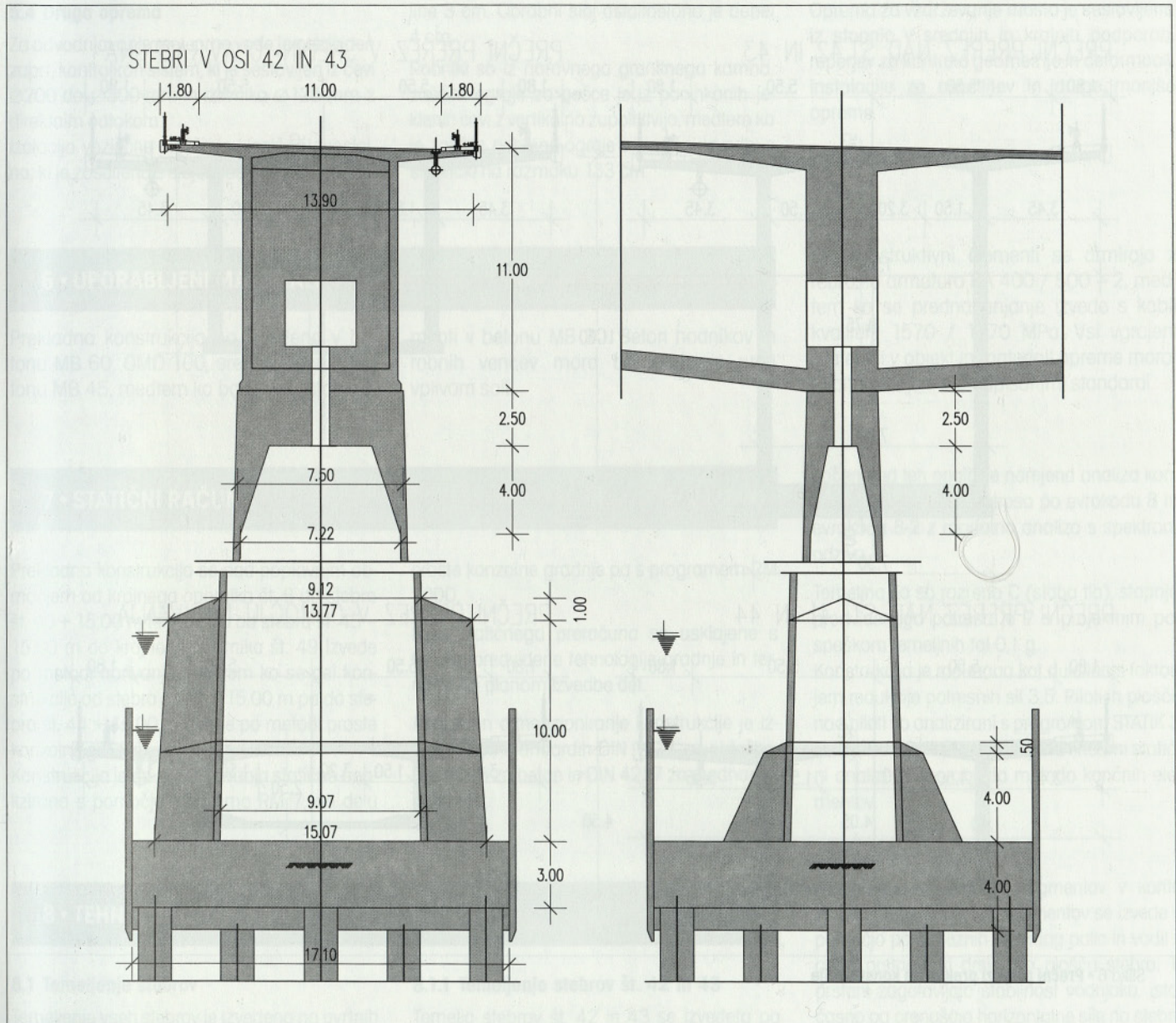
Stebra sta projektirana kot masivni armiranobetonski konstrukciji, temeljeni na 25 uvrtnih pilotih  $\varnothing 150$  cm. Konstrukcija stebrov sestoji iz temeljne plošče nad piloti debeline 3,0 m, zidov škatlastega prereza debeline 30 cm in plošče na vrhu stebra debeline 2,5 m. Spodnji del stebra je posebej hidravlično oblikovan (slika 5). Temeljni del stebra se bo izvajal po posebnem postopku, ki je podrobneje opisan v razdelku o tehnologiji gradnje objekta.



Slika 3 • Vmesni stebri v oseh 7-40 in 45-48



Slika 4 • Stebra v oseh 41 in 44



Slika 5 • Stebra v osi 42 in 43

#### 4 • PREKLADNA KONSTRUKCIJA

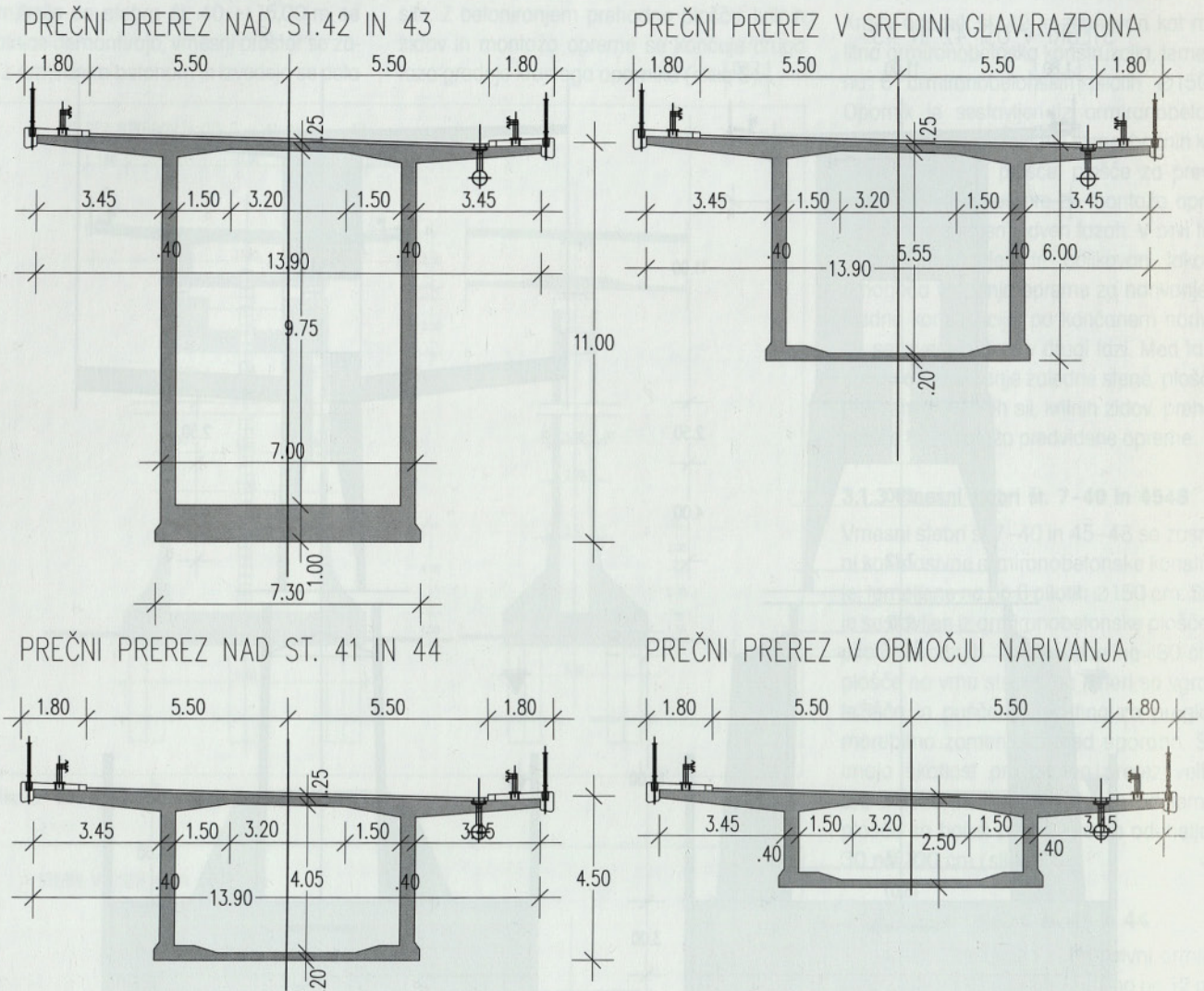
Prekladna konstrukcija je zasnovana kot kontinuirna armiranobetonska prednapeta konstrukcija z razponi 52,24 + 32 x 45,00 m na levem bregu reke, 4 x 45,00 m na desnem bregu reke in 60,00 + 105,00 + 210,00 + 105,00 + 60,00 m na glavnem delu preko reke. Skupna dolžina mosta znaša od osi dilatacije na oporniku št. 6 do osi dilatacije na oporniku št. 49 2212,55 m.

Prečni prerez prekladne konstrukcije je škatlast, višina škatle znaša nad vmesnima ste-

broma št. 42 in 43 11,00 metov, v sredini srednjega glavnega razpona preko reke 6,00 m, nad stebroma št.42 in 43 je 4,50 m, nad ostalimi stebri ima konstantno višino 2,50 m (slika 6).

Prekladna konstrukcija je prednapeta s kabli v betonskem prerezu, ki se injektirajo s cementno maso ter s kabli izven betonskega prereza, ki se nahajajo v plastičnih cevih in so zainjektirani z mastjo. Kabli so iz vrvi 15 x 15,7 mm oziroma 12 x 15,7 mm, kvalitete jekla 1570 /

1770 MPa. Zunanji kabli potekajo preko deviatorjev in so sidrani v diafragme. Največja dolžina kabla je 440 m. Stojine prekladne konstrukcije v glavnem razponu so vertikalno prednapete s kabli 9 x 15,7 mm, ki so zainjektirani z injekcijsko maso. Prekladna konstrukcija je elastično vezana s stebroma št. 42 in 43, na vseh ostalih stebrih leži na ležiščih, ki so pomična v vzdolžni smeri. V prečni smeri je eno ležišče pomično, drugo pa nepomično. Nad podporo so predvidena prečna rebra z deviatorji oziroma sidrnimi bloki. Prekladna konstrukcija se na krajnih opornih končuje z dilatacijama D 2160 in D 560.



Slika 6 • Prečni prerezi prekladne konstrukcije

## 5 • OPREMA MOSTA

Oprema mosta sestavljajo dilatacije na koncih mosta, ležišča na stebrih, seizmični izolatorji, sistem kontroliranega odvodnjavanja, izolacija z asfaltnimi sloji, razsvetljava, robniki z robnimi venci in hodniki za pešce, ograja na hodniku za pešce, zaščitne jeklene ograje, oprema za vzdrževanje mosta, reperji za kontrolo geometrije in deformacij mosta, instalacije, ki prehajajo preko mosta ter sistem za označevanje plovne poti.

### 5.1 Dilatacije

Dilatacije so predvidene samo na krajnih opornikih. Na oporniku št. 6 je predvidena vo-

doneprepustna dilatacija "mageba" tip LR 27 (D2160) z dovoljenimi pomiki 2160 mm. Na krajnem oporniku št. 49 je predvidena vodoneprepustna dilatacija "mageba" tip LR 7 (D560) z dovoljenimi pomiki 560 mm.

### 5.2 Ležišča

Na podporah št. 6 do 41 in 44 do 49 so predvidena teflonska ležišča, ki so pomična v vzdolžni smeri, v prečni smeri pa je eno ležišče pomično, drugo pa nepomično. Na stebrih št. 42 in 43 je konstrukcija monolitno povezana s stebri. Prečne sile potresa in/ali vetra prevzemajo vsi stebri z nepomičnimi le-

žišči. Vzdolžne sile prevzemata stebra št. 42 in 43 ter krajna opornika št. 6 in 49 s svojimi seizmičnimi izolatorji. Velike deformacije v vzdolžni smeri so omogočene z jeklenimi ploščami, ki so vgrajene nad vsakim stebrom.

Na delu objekta, ki bo grajen s pomočjo narivanja, se lahko predvidijo začasna ležišča, ki se nato zamenjajo ali pa se narivanje izvrši takoj preko končnih ležišč.

### 5.3 Potresni izolatorji

Horizontalne sile potresa, ki delujejo v vzdolžni smeri, prevzemajo izolatorji. V komore v krajnih opornike št. 6 in 49 se vgradijo izolatorji kapacitete 2500 kN.



## 5.4 Druga oprema

Za odvodnjavanje meteorne vode je predviden zaprt, kontroliran sistem, ki je sestavljen iz cevi  $\varnothing 200$  do  $\varnothing 300$  mm in izlivnika  $\varnothing 125$  mm z direktnim odtokom.

Izolacija voziščne plošče je klasična enoslojna, ki je zaščitena s slojem asfaltbetona debe-

line 3 cm. Obrabni sloj asfaltbetona je debel 4 cm.

Robniki so iz naravnega granitnega kamna, zaščita ograje za pešce je iz pocinkanih jeklenih cevi z vertikalno zapolnitvijo, medtem ko je zaščita odbojne ograje v klasični izvedbi s stebrički na razmaku 133 cm.

Oprema za vzdrževanje mosta je sestavljena iz stopnic v srednjih in krajnih podporah, reperjev za kontrolo geometrije in deformacij, instalacije za osvetlitev in druge manjše opreme.

## 6 • UPORABLJENI MATERIALI

Prekladna konstrukcija bo izvedena v betonu MB 60, OMO 100, srednji stebri v betonu MB 45, medtem ko bodo vsi ostali ele-

menti v betonu MB 30. Beton hodnikov in robnih vencev mora biti odporen proti vplivom soli.

Vsi konstruktivni elementi se armirajo z rebrasto armaturo RA 400 / 500 – 2, medtem ko se prednapenjanje izvede s kabli kvalitete 1570 / 1770 MPa. Vsi vgrajeni materiali v objekt in materiali opreme morajo biti usklajeni s predpisanimi standardi.

## 7 • STATIČNI RAČUN

Prekladna konstrukcija se nad poplavnim območjem od krajnega opornika št. 6 do stebra št. 40 + 15,00 m ter na delu od stebra št. 45 – 15,00 m do krajnega opornika št. 49 izvede po metodi narivanja, medtem ko se del konstrukcije od stebra št. 40 + 15,00 m pa do stebra št. 44 + 45,00 m izvede po metodi proste konzolne gradnje.

Konstrukcija je na delu narivanja statično analizirana s pomočjo programa RM 7, na delu

proste konzolne gradnje pa s programom RM 2000.

Faze statičnega preračuna so usklajene s fazami predvidene tehnologije gradnje in termiskim planom izvedbe del.

Analiza in dimenzioniranje konstrukcije je izvedeno po standardih DIN 1072 za obtežbe, DIN 1045 za beton in DIN 4227 za prednapeti beton.

Ločeno od teh analiz je narejena analiza konstrukcije za obtežbo potresa po evrokodu 8 in evrokodu 8-2 z modalno analizo s spektrom odziva.

Temeljna tla so razreda C (slaba tla), stopnja predvidenega potresa je 7 s projektnim pospeškom temeljnih tal 0,1 g.

Konstrukcija je računana kot duktilna s faktorjem redukcije potresnih sil 3,5. Piloti in plošče nad piloti so analizirani s programom STATIK 3 in CEDRUS 3, ki sta namenjena linearni statični analizi in uporabljata metodo končnih elementov.

## 8 • TEHNOLOGIJA IZVEDBE

### 8.1 Temeljenje stebrov

Temeljenje vseh stebrov je izvedeno na uvrtnih pilotih Benotto  $\varnothing 150$  cm. Pri temeljih stebrov št. 6 do 40 in 45 do 49 se piloti izvedejo na klasičen način z delovne ploščadi na terenu. Za temelje stebrov št. 41 in 44 je potrebno izdelati začasni nasip, s katerega se izvedejo uvrtni piloti. Piloti za stebra št. 42 in 43 se izvedejo s pontonske ploščadi.

Temeljne plošče stebrov št. 6 do 40 in 45 do 49 se izvedejo na klasičen način. Pri temeljih stebrov št. 41 in 44 je potrebno izvesti zaščito gradbene jame s pomočjo jeklenih zagatnic Larsen, ki omogočajo normalni izkop v začasnem nasipu in betoniranje temelje plošče nad piloti v suhi gradbeni jami.

Gradnja temeljev stebrov št. 42 in 43 v koritu reke zahteva uporabo posebne tehnologije, ki je v krajši obliki predstavljena v naslednjem razdelku.

#### 8.1.1 Temeljenje stebrov št. 42 in 43

Temelja stebrov št. 42 in 43 se izvedeta po naslednji tehnologiji in zaporedju:

– S pontonske ploščadi se izvede 25 uvrtnih pilotov  $\varnothing 150$  cm. Piloti temeljev št. 2, 4, 12, 14, 22, 24, 6–10 in 16–20 se končujejo na koti 62,50 m, medtem ko se betoniranje pilotov temeljev št. 1, 3, 5, 11, 13, 15, 21, 23, in 25 nadaljuje v zaščitni koloni do kote +78,0 m oziroma do kote, ki je okoli 4,0 m nad nivojem vode. Ta kota zagotavlja izvajanje del za izdelavo posameznih segmentov vodnjaka brez vpliva toka v reki.

– Montaža pomožne jeklene konstrukcije preko stebrov v x – x in y – y smeri in izdelava delovne ploščadi za betoniranje segmentov vodnjaka. Ploščad se pričrvi s Dywidag palicami  $\varnothing 36$  mm na pomožno jekleno konstrukcijo.

– Izdelava segmentov betonskega zaščitnega vodnjaka višine 2,5 do 3,0 m po fazah in

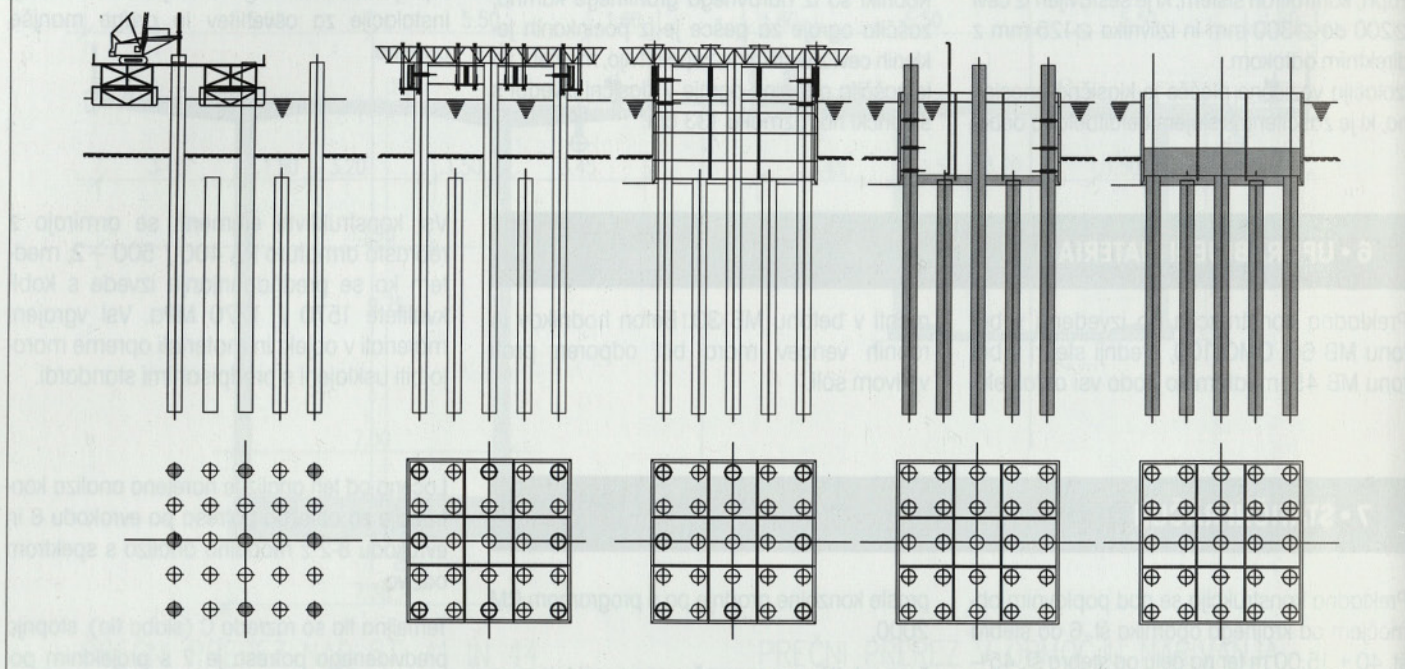
spuščanje posameznih segmentov v korito Donave. Spuščanje teh segmentov se izvede s pomočjo posameznih Dywidag palic in vodil v obliki prstana, ki drsijo po plašču stebra. Ti prstani zagotavljajo stabilnost vodnjaka, istočasno pa prenašajo horizontalne sile na stebre – pilote, ki nastajajo zaradi vpliva toka vode ali udarca posameznih plavajočih predmetov.

– Po spuščanju vodnjakov do predvidene kote 65,0 m se izvede podvodno odstranjevanje betona na pilotih v višini 30 do 50 cm in podvodno betoniranje betonskega čepa debeline 1,0 m, s katerim se zagotovi neprepustnost dna vodnjaka in prenos sile vzgona na pilote, ko se voda iz vodnjaka izčrpa.

– Izčrpanje vode iz vodnjaka, vgradnja moznika na kolone stebrov v višini betona temeljne plošče, čiščenje, vgrajevanje armature plošče in armature za priključek stebra in betoniranje plošče temelja stebra.

– Betoniranje spodnjega dela stebra, odstranjevanje kolon in betona stebrov nad zgornjo koto temeljne plošče ter odstranitev betona zidov zaščitnega vodnjaka.

## TEHNOLOGIJA GRADNJE TEMELJEV V OSI 42 IN 43



Slika 7 • Tehnologija gradnje temeljev v oseh 42 in 43

### 8.2 Gradnja stebrov

Zgornji deli stebra so pravokotne oblike, škafstega prečnega prereza z debelino betonskih zdov 30 cm. Prečni prerez dimenzij 2,0 x 7,5 m je konstanten po celotni višini na vseh stebrih dela mostu nad poplavnim območjem, edino glavna stebra št. 42 in 43 imata spremenljiv prečni prerez. Višine stebrov so spremenljive od 10,75 m pri stebri št. 8 do 50,70 m pri stebri št. 44. Betoniranje stebrov se izvede na klasični način s pomočjo prestavljivega opaža v segmentih višine 4,0 m.

### 8.3 Gradnja prekladne konstrukcije

Pri izvedbi prekladne konstrukcije mosta sta uporabljeni dve tehnologiji gradnje. Na delu od krajnega opornika št. 6 do stebra št. 40 + 15,00 m v dolžini 1507,55 m ter od krajnega opornika št. 49 do stebra št. 45 + 15,00 m v dolžini 195,00 m se prekladna konstrukcija izvede po tehnologiji postopnega narivanja. Na srednjem delu objekta od stebra št. 41 + 45,00 m pa do stebrov št. 44 + 45,00 m v dolžini 510,00 m se prekladna konstrukcija gradi po tehnologiji proste konzolne gradnje.

#### 8.3.1 Gradnja po postopku narivanja

Tehnologija gradnje mostov po postopku postopnega narivanja je v svetu zelo razširjena za gradnjo dolgih kontinuirnih betonskih pred-

napetih mostov z razponi do 60 m in skupne dolžine do 2000 m. Po tej tehnologiji se prekladna konstrukcija izvaja v segmentih na stalni proizvodni ploščadi, od koder se po prednapetju nazadnje zgrajenega segmenta s pomočjo hidravličnih stiskalnic narine celotno doslej zgrajeno prekladno konstrukcijo v nov začasen položaj, v opažu na delovni ploščadi pa se lahko izdelata naslednji segment.

Tehnologija gradnje se izvede s pomočjo naslednje tehnološke opreme:

- betonska delavnica: ploščad z odrom in opažem, jeklenim predalčjem in sinhrono delujočo hidravlično opremo za spuščanje odra in opaža;
  - sinhrono delujoča hidravlična oprema z izvotlenimi jeklenimi ploščami in nosilci za narivanje;
  - jeklena konzolna konstrukcija – kljun;
  - naprave za pridrževanje prekladne konstrukcije;
  - drsna začasna ležišča na stebrih s teflonskimi vložki;
  - bočna hidravlična vodila s senzorji na stebrih in ploščadijo na vrhu stebra za kontrolo med narivanjem;
  - oprema za prednapenjanje segmentov in celotne prekladne konstrukcije.
- Postopek gradnje s postopnim narivanjem spada v industrijski način gradnje mostov.

Ekonomičnost gradnje je v zmanjšani delovni sili, izvajanju del v vseh vremenskih pogojih in izdelavi enega takta dolžine  $L_s = 22,5$  m. Prekladna konstrukcija, ki se betonira po segmentih na istem mestu in se postopno nariva v končni položaj, na svoji poti prehaja skozi različne statične sisteme, in to kot kozola, prostoležeč nosilec in na koncu kot kontinuirni nosilec, tako da se v istem prerezu pojavljajo negativni in pozitivni momenti. Za prevzem obtežb v fazi gradnje se napnejo centrični kabli, ki v celoti pokrivajo obremenitve zaradi lastne teže konstrukcije. Za prevzem vplivov koristne obtežbe se vgradijo kabli zunaj betonskega prereza v notranjosti škafle. Kabli potekajo poligonalno in se vodijo preko deviatorjev.

#### 8.3.1.1 Ploščadi za izdelavo in narivanje prekladne konstrukcije

Za izdelavo segmentov prekladne konstrukcije sta predvideni dve ploščadi. Ena je postavljena za krajnim opornikom št. 49 v smeri Beograda, druga pa med stebri št. 13 in 14. Temeljenje ploščadi mora zagotavljati kar najmanjše posedke, zato bosta obe ploščadi temeljeni na uvrtenih piloti  $\varnothing 150$  cm. Lokacija ploščadi med stebri št. 13 in 14 je izbrana zaradi spremenljive geometrije trase in nivelete na delu do krajnega opornika št. 6. Z manjšo korekcijo

nivelete bi se lahko platforma izdelala na krajnem oporniku št. 6, s čimer bi se bistveno zmanjšali stroški.

Najprej se zgradijo in prilagodijo geometrije ploščadi za izdelavo in narivanje dela konstrukcije od stebra št. 13 do krajnega opornika št. 6 ter od krajnega opornika št. 49 do stebra št. 45 + 15,00 m. Na pripravljenih ploščadih se betonirajo posamezni segmenti dolžine 22,5 m. Skupne dolžine narivanja in predvidene sile trenja ustrezajo sistemu Eberspacher. Izdelava in narivanje se ponavljata po istem postopku, vse dokler prvotno zgrajeni segmenti ne zavzamejo svojega končnega položaja (slika 8). Sile narivanja prevzemamo z betonsko konstrukcijo ploščadi za narivanje. Največja sila narivanja znaša 3000 kN.

Po končanem narivanju na delu od ploščadi do stebra št. 6 se izvede novo prilagajanje ploščadi geometriji konstrukcije med stebri 14 – 40. Po tem se posamezni segmenti postopno narivajo do stebra št. 40 + 15,00 m. Glede na dolžino prekladne konstrukcije  $L = 1170$  m in silo narivanja 13000 kN je treba uporabiti posebno opremo. Predvidena je oprema firme Enerpac, ki se uspešno uporablja za narivanje konstrukcij dolžine do 3000 m, s silami narivanja do 30000 kN. Princip delovanja tega sistema je v tem, da se jekleni nosilec postavi pod segment v njegovi osi, na njegovi zgornji strani pa je zavarjena perforirana prirobnica, preko katere se postavi pomična jeklena ploščad s sinhrono delujočimi stiskalnicami. Jeklena ploščad je vezana z Dywidag palicami na spodnjo stran segmenta.

Za vodenje prekladne konstrukcije v vzdolžni smeri je potrebno na stebrih vgraditi hidravlične stiskalnice za bočno vodenje konstrukcije. Med vodila in prekladno konstrukcijo se postavlja teflonske vložke za zmanjšanje trenja. Za primer napake ali nepredvidenih okoliščin se na vrhove stebrov vgradijo senzorji, ki zaustavijo proces narivanja. Naprave za bočno vodenje se vgradijo na izhodu iz ploščadi in na vsakem stebri. Na vrhovih stebrov se montirajo ploščadi za delavce, ki spremljajo postopek narivanja.

Med opremo, ki se uporablja med narivanjem, spadajo tudi drsna ležišča. Ležišča so sestavljena iz armiranobetonskega bloka, podstavka za

drsenje, ki je pričvrščen na betonski blok in izdelan iz nerjavnega jekla in se postavi v nagibu spodnje plošče prekladne konstrukcije. Teflonski vložki so iz neoprena debeline 10 mm, jeklene plošče 20 mm in teflona 1 mm z dimenzijami, ki so odvisne od obremenitve. V času narivanja konstrukcije je predvidena tudi oprema za pridržanje konstrukcije, saj je niveleta v vzdolžnem nagibu 2,3 %.

### 8.3.2 Prosta konzolna gradnja

Za gradnje mostov z velikimi razponi se največ uporablja tehnologija proste konzolne gradnje. Ta tehnologija je uporabljena za del konstrukcije od stebra št. 41 + 45,00 m do stebra št. 44 + 45,00 m.

Po zgraditvi stebrov št. 42 in 43 se postavi oder in opaž za betoniranje baznih delov. Po prednapenjanju baznih delov se postavijo vozčki nosilnosti 2500 kN, s čimer so ustvarjeni pogoji za betoniranje posameznih lamel dolžine 5,0 m.

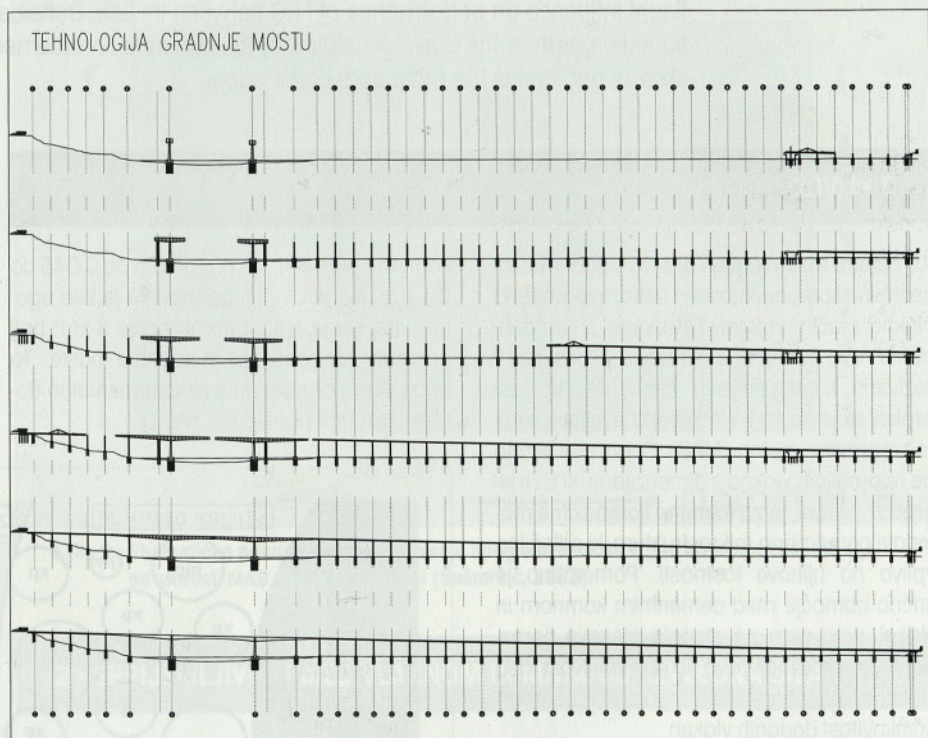
Betoniranje se izvede simetrično na obeh straneh, vse do vezne lamele v sredini glav-

nega razpona oziroma do veznih lamel na stiku s konstrukcijo, izvedeno po postopku narivanja.

Ključna naloga pri prosti konzolni gradnji je pravilno nadvišanje konstrukcije v času gradnje, s katerim zagotovimo željen potek nivelete mosta po zgraditvi. Pri računu nadvišanja je potrebno upoštevati vplive krčenja in lezenja betona, trenja, relaksacije, temperature, različno starost betona in različne module elastičnosti betona, kar predstavlja zahteven problem, ki ga je potrebno reševati z zavesno kontrolo kvalitete materiala pred in v toku gradnje, z dobro programsko opremo, geodetskim spremljanjem v fazi gradnje, kontrolo sile napenjanja in deformacij.

Po končanem betoniranju veznih lamel in vzpostavitvi kontinuitete prekladne konstrukcije nastopi finalizacija objekta.

Vgrajujejo se končna ležišča, položi se izolacija, betonirajo se robni venci in hodniki za pešce, vgrajujejo ograje in dilatacije, polagajo asfaltni sloji, oprema za odvodnjavanje in razsvetljavo ter izvede poskusna obtežitev mosta.



Slika 7 • Postopnost gradnje mostu

## 9 • SKLEP

Predlagana nosilna konstrukcija mosta, izbira materiala in opreme, upoštevanje ukrepov, s katerimi se poveča trajnost, način temeljenja,

posebej stebrov v Donavi, tehnološki postopki gradnje mosta so sodobne rešitve, ki v celoti upoštevajo tehnološki napredek gradbeništva

v svetu v času od izgradnje starega do novega mosta. Tako koncipirana integralna konstrukcija zagotavlja ob normalnem vzdrževanju dobo trajanja več kot sto let.

# OSNOVNI PRINCIPI OJAČANJA BETONA Z VLAKNI

## BASIC PRINCIPLES OF CONCRETE REINFORCEMENT WITH FIBRES

**dr. Jakob Šušteršič, univ. dipl. inž. grad.,**  
**doc. dr. Andrej Zajc, univ. dipl. fiz.,**  
**Iztok Leskovar, univ. dipl. inž. grad.,**

vsi IRMA Inštitut za raziskavo materialov in  
aplikacije, Slovenčeva 95, 1000 Ljubljana;  
ime.priimek@guest.arnes.si

Znanstveni članek

UDK: (691.34 + 677.536.4):620.1

**Povzetek** | Medsebojno delovanje vlaken in matrice ter odpornost proti širjenju razpok sta dve osnovni lastnosti mikroarmiranega betona, ki imata velik vpliv na njegovo obnašanje med uporabo. Z obravnavo teh dveh lastnosti je možno prikazati osnovne principe ojačevanja strukture betona z vlakni, kar je glavni namen članka.

**Summary** | Fundamental properties of fibre reinforced concrete (FRC) are interaction between fibres and matrix, as well as crack opening resistance, which have significant influence on performance of FRC between its use. Considering both above-mentioned properties, the basic principles for the concrete reinforcement with fibres might be shown, and that is the main goal of the paper.

### 1 • UVOD

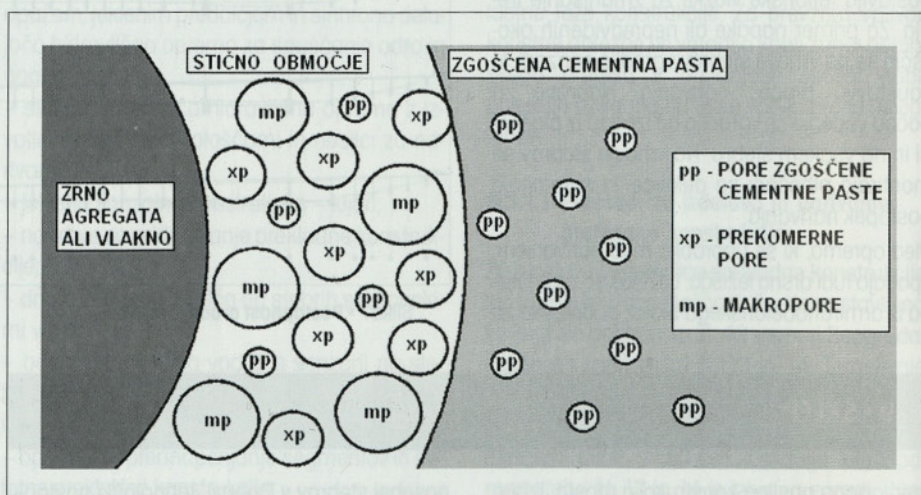
Ko betonu med njegovo pripravo dodamo kot sestavno komponento med seboj nepovezana vlakna, ojačimo njegovo strukturo. S tem dobi beton nove lastnosti, ki jih lahko izkoristimo v različnih konstrukcijskih elementih. V naši praksi se je za to vrsto betona uveljavil izraz mikroarmirani beton (MAB). Čeprav se vedno ne uporabljajo vlakna z dimenzijami, ki jih merimo z mikroni, je za tovrstne kompozitne materiale pomembna mikrostruktura, ki odločilno vpliva na njihove lastnosti. Pomembno je stično območje med cementnim kamnom in vlakni, predvsem pa stopnja njegove poroznosti. Ta odločilno vpliva na sprejemljivost med vlakni in strjeno cementno pasto in s tem na učinkovitost dodanih vlaken.

Stično območje med vlaknom in cementno pasto je podobno stičnemu območju med zrnem agregata in cementno pasto, kot je prikazano na sliki 1 (Bourdette, 1995).

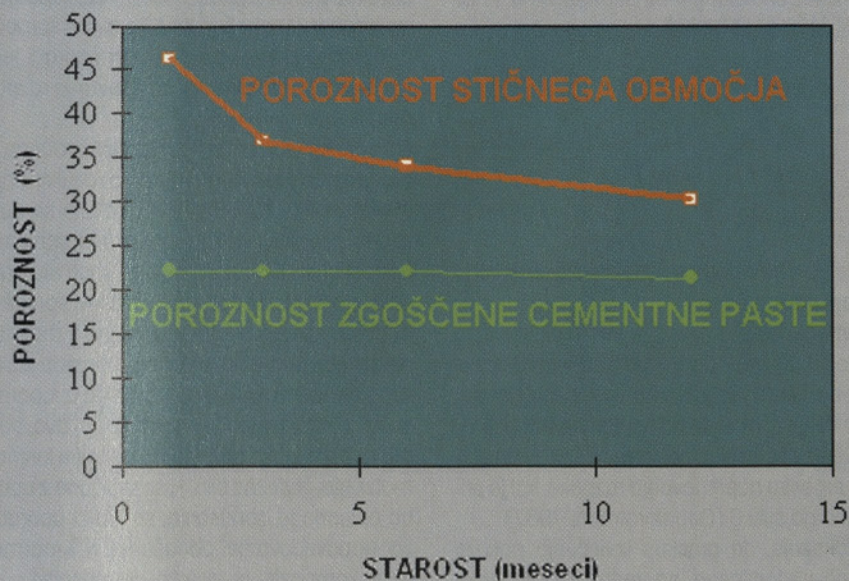
V stičnem območju je razporeditev por enaka kot v zgoščeni cementni pasti (na sliki 1 so te pore označene s "pp"). Poleg teh por pa se v stičnem območju nahajajo še makropore ("mp") s premerom od 0,1 do 5 µm in pre-

komerne pore ("xp") s premerom od 0,045 do 0,1 µm. Na podlagi tega modela je bilo ugotovljeno, da je prehodno območje 3-krat bolj porozno od zgoščene cementne paste. To ugotovitev potrjujejo tudi eksperimentalno dobljeni rezultati (Scrivener, 1988).

S starostjo se poroznost stičnega območja zmanjšuje, medtem ko ostaja poroznost zgoščene cementne paste približno enaka (slika 2) (Bourdette, 1995). Zaradi gradienta poroznosti poteka difuzija ionov vode od zgoščene cementne paste proti stičnemu območju (Maso, 1980), s čimer je omogočena hidratacija nehidratiziranih delcev cementa. Na ta način se zmanjšuje poroznost stičnega



Slika 1 • Modelna predstavitev stičnega območja med cementno pasto in zrnem agregata ali vlakna (Bourdette, 1995).



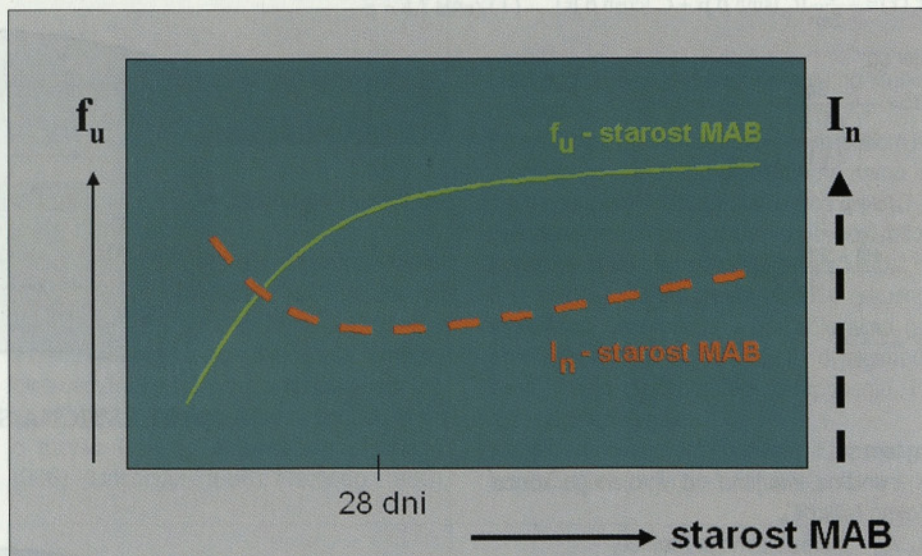
Slika 2 • Poroznost stičnega območja in zgoščene cementne paste v odvisnosti od starosti (Bourdette, 1995).

območja. Ker vsebuje cementna pasta manj vode kot stično območje, je kinetika hidratacije manjša, njena poroznost pa se s starostjo bistveno ne spreminja.

Zgoraj podane lastnosti mikrostrukture MAB odločilno vplivajo na obnašanje MAB v odvisnosti od starosti. Dobljeni rezultati raziskav (Šušteršič, 2000) indeksov žilavosti po ASTM C 1018 kažejo, da se žilavost MAB zmanjšuje do starosti 28 dni in po tej starosti žilavost MAB ponovno narašča (slika 3) (Šušteršič, 2003). Trdnost MAB s starostjo narašča, zato postaja njegov odziv s starostjo vse bolj krhek, toda samo do starosti 28 dni (slika 3). Zdi se, da se sprjemnost jeklenih vlaken s strjeno cementno pasto izboljšuje od starosti 28 dni naprej, ker postaja stično območje okoli vlaken vse gostejše, kot je bilo že prej opisano. Zaradi tega se v MAB povečuje vpliv vlaken in s tem tudi njegova žilavost, in to kljub višjim tlačnim in upogibnim trdnostim MAB.

Ena od osnovnih funkcij vlaken v betonu je oviranje širjenja razpok, ki bo učinkovitejše, če dosežemo to oviranje že na mikronivoju. Iz tega sledi, da strukture betona ne bomo ojačili v zadostni meri samo s tem, da betonu dodamo določeno količino vlaken, ampak s kompleksnim reševanjem celotne sestave betona. Glede na želene lastnosti MAB bomo izbrali vrsto vlaken s pripadajočo matrico, ki bo v optimalni meri omogočila kar največjo učinkovitost vlaken med delovanjem zunanje obtežbe in notranjih obremenitev konstrukcijskega elementa iz MAB.

Za pripravo normalnih MAB se v praksi najpogosteje uporabljajo jeklena in polipropilenska vlakna, vsaka vrsta vlaken posebej ali skupaj. Možna je tudi uporaba drugih vrst vlaken, kar je predvsem odvisno od cene vlaken in njihove učinkovitosti ter povezano s posebnimi tehnologijami za izdelavo določenih konstrukcijskih elementov (npr. alkalno odporna steklena vlakna za izdelavo tankostenskih elementov po postopku brizganja). MAB s posebnimi lastnostmi, ki so vezani na uporabo posebnih vrst komponent in vlaken ali tehnologij, se v tem prispevku ne bodo obravnavali, ker presegajo predvideni okvir obravnavane tematike. V prispevku so prikazani nekateri osnovni principi ojačevanja strukture betona z vlakni. Na splošno sta obdelani dve osnovni lastnosti MAB (kot kompozitnega materiala), ki imata zelo velik vpliv na obnašanje MAB med uporabo. To sta: medsebojno delovanje vlaken in matrice ter odpornost proti širjenju razpok.



Slika 3 • Shematičen prikaz odvisnosti največje upogibne trdnosti ( $f_u$ ) in indeksov žilavosti ( $I_n$ ) od starosti MAB z jeklenimi vlakni (Šušteršič, 2003).

## 2 • SPRIJEMLJIVOST MED VLAKNOM IN MATRICO, IZVLEČNA SILA

Medsebojno delovanje vlaken in matrice je osnovna lastnost, ki vpliva na obnašanje mikroarmiranega kompozitnega materiala. Razumevanje tega medsebojnega delovanja je potrebno za oceno prispevka vlaken in napovedovanje obnašanja kompozita. Medsebojno delovanje vlaken z nerazpokano matrico ima v aplikaciji omejeno pomembnost, ker bo v večini primerov matrica počila med uporabo.

Študija teh medsebojnih delovanj daje uporabne informacije za razumevanje celovitega obnašanja kompozita. Poleg tega nerazpokani deli konstrukcije vplivajo na celotno obnašanje konstrukcijskega sestava, ko se že razvijejo razpoke v kompozitu.

Stik med vlaknom in matrico se lahko proučuje na podlagi rezultatov direktnih in indirektnih preskusov. Z indirektnimi preskusi se kompozit

preskuša na nateg ali na upogib in ocenjuje se prispevek vlaken. Nato se uporablja obširna matematična analiza, da bi se ločil vpliv vlaken od vpliva matrice. S temi postopki dobljeni rezultati so zelo odvisni od matematičnega modela, ki se uporablja pri analizi.

Mehanizem izgube sprijemljivosti na stiku med vlaknom in matrico je pomemben parameter za razumevanje zveze med obtežbo in zdrsom. Zelo pomembno vlogo ima stik med vlaknom in matrico po razpokanju matrice. Shematični prikaz ocene izvlečenja posameznega vlakna je podan na sliki 4 (Balaguru, 1992).

Ko je obtežba majhna, se sprijemljivost lahko opazuje kot elastičen pojav. Porazdelitev strižne napetosti se lahko izračuna po teoriji elastičnosti z rešitvijo enačb ravnotežja, kompatibilnosti in mejnih pogojev. S predpostavko, da se vpliv vlakna širi do polmera velikosti ene polovice medsebojne razdalje vlaken, se lahko napiše enačba za elastično sprijemno napetost  $\tau_e$ , kot sledi (Gopalratman, 1987):

$$\tau_e(x) = -\frac{\beta}{2\pi r} (C_1(\sinh \beta)x + C_2(\cosh \beta)x) \quad (1)$$

kjer so:

$$\beta^2 = \frac{2\pi G_m}{\ln\left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{V_{vl}}}\right) A_{vl} E_{vl}} \quad (2)$$

$$C_1 = -\Psi P \quad (3)$$

$$C_2 = \frac{P[1 - \Psi(1 - \cosh \frac{\beta l}{2})]}{\sinh \frac{\beta l}{2}} \quad (4)$$

$$\Psi = \frac{A_{vl} E_{vl}}{A_m E_m} \quad (5)$$

Pri tem so:

$x$  – dolžina, merjena od vgrajenega konca vlakna (slika 4),

$A_{vl}$ ,  $A_m$  – prerez vlakna in matrice,

$G_m$  – strižni modul matrice,

$E_{vl}$ ,  $E_m$  – elastični modul vlakna in matrice,

$V_{vl}$  – prostorninski delež vlaken,

$r$  – polmer vlakna,

$l$  – dolžina vlakna.

Porazdelitev strižne napetosti, ki je izražena z enačbo (1), rezultira v največji strižni napetosti na razpokani površini matrice. Ko ta strižna napetost preseže strižno trdnost stika med vlaknom in matrico  $\tau_s$ , pride do odpiranja razpoke. Razpoka napreduje vzdolž vlakna (slika 4 b). V coni razpoke nudi trenje  $\tau$  določeni odpor proti izvlečenju. Ta odpor trenja je manjši od trdnosti sprijemljivosti matrice, pogosto se predpostavlja, da je konstanten (slika 5) (Balaguru, 1992).

V primeru delnega odpiranja razpoke se lahko sila izvlečenja izrazi kot:

$$P = \frac{2\pi r \tau_s}{1 - \Psi} \tanh \frac{\beta ml}{2} + \frac{\pi r l \tau_i (1 - m)}{1 - \Psi} \quad (6)$$

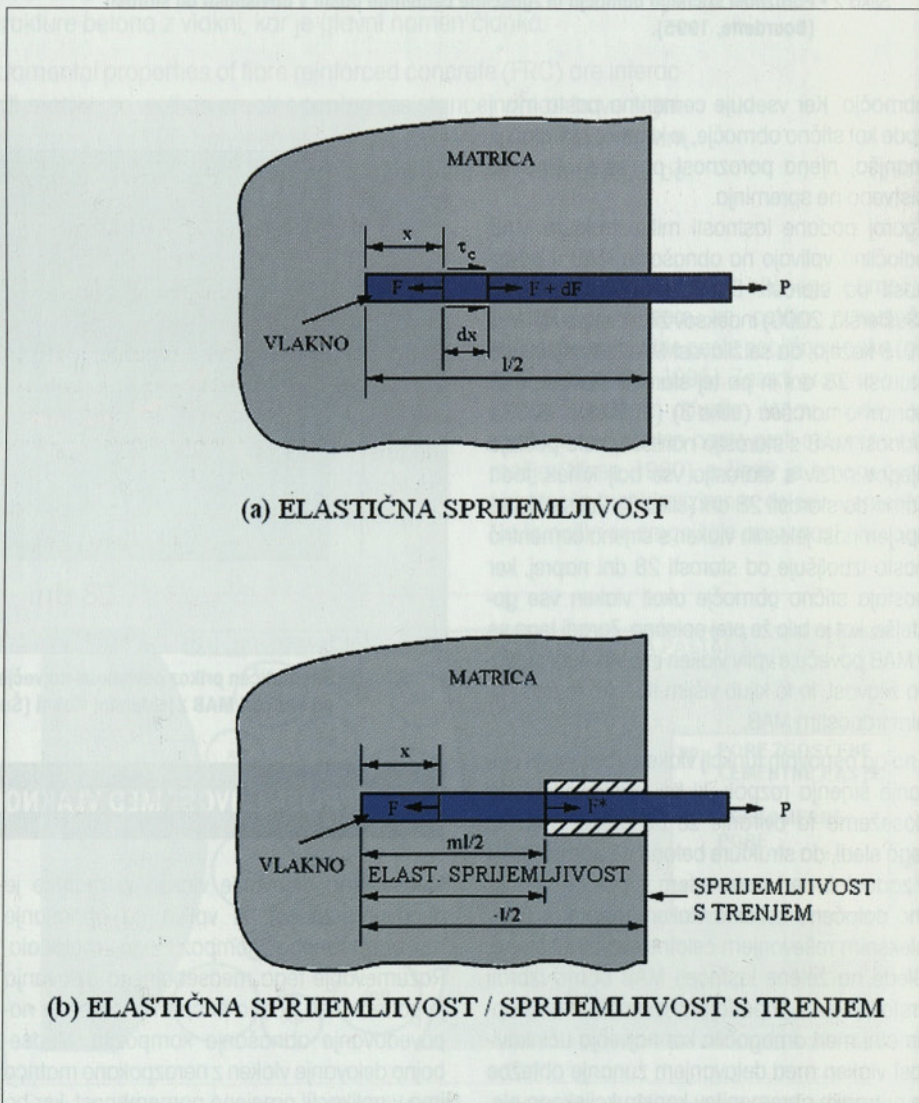
kjer je  $(1-m)l/2$  dolžina, na kateri je sprijemna trdnost prekoračena.

V območju od 0 do  $ml/2$  je zveza elastična, v območju od  $ml/2$  do  $l/2$  pa nudi odpor le trenje. Enačba (6) velja samo za jeklena vlakna. Če je trenje  $\tau_i$  manjše od sprijemne trdnosti  $\tau_s$ , doseže izvlečna sila maksimum šele po stabilnem procesu napredovanja razpoke, kot je prikazano na sliki 6 (Gopalratman, 1987).

To dokazuje, da preskus izvlečenja pokaže področje stabilnega napredovanja razpoke

pred točko, na kateri se doseže mejna sprijemna trdnost. Povprečna krivulja  $\sigma - \epsilon$  kompozita postane nelinearna predvsem zaradi tega, ker se začne stabilni proces odpiranja razpoke pred izvlečenjem vlakna.

Na splošno se sprijemna trdnost izračuna ob predpostavki enakomerne porazdelitve nape-tosti na stiku. Največja izvlečna sila se deli s stično površino vlakna in se dobi sprijemna trdnost stika. Gopalratman in Shah sta pokazala, da je ta pristop za določitev sprijemne trdnosti odvisen od dolžine vlakna v matrici in njegovega premera. Alternativni pristop je uporaba dvoparameterskega modela z uporabo  $\tau_s$  in  $\tau_i$  kot lastnosti materiala. Ta dva para-metra bi se lahko privzela kot osnovni lastnosti materiala. Natezna sila, ki se izračuna z upo-rabo opisanega obnašanja, se lahko uporablja za napovedovanje obnašanja mikroarmirane kompozita pri natezni obremenitvi.

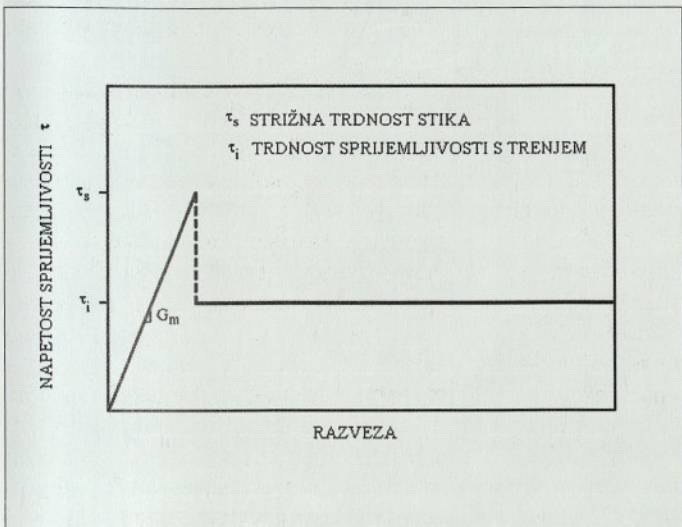


Slika 4 • Shema izvlečenja vlakna, ki prikazuje definicije parametrov modela (Balaguru, 1992).

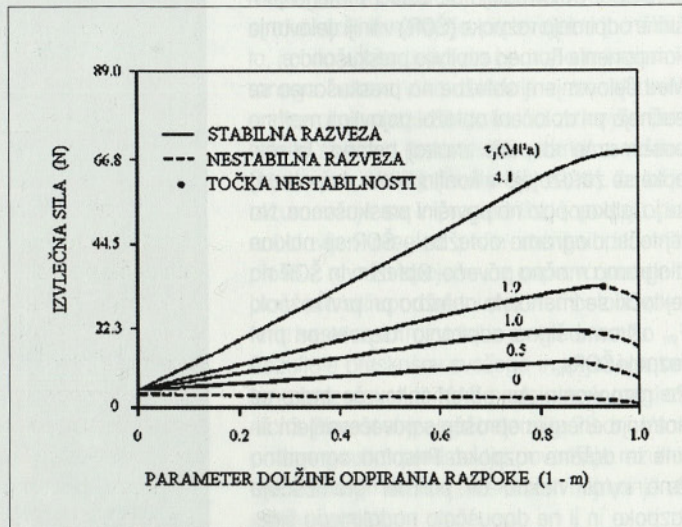
Raziskujejo se tudi modeli na osnovi mehanike loma, pri katerih je proces popuščanja in izvl-

čenja modeliran kot razvoj razpoke stika. Uporablja se energetski kriterij širjenja razpoke.

Energetski pristop je geometrijsko bolj neodvisen od pristopa preko stanja napetosti.



Slika 5 • Idealizirani diagram lastnosti stika. Razvidno je popolno elastično obnašanje, dokler ni dosežena strižna trdnost stika  $\tau_s$ , ki se nadaljuje s konstantno sprjemljivostjo zaradi trenja  $\tau_i$  (Balaguru, 1992).



Slika 6 • Model izvlečne sile v odvisnosti od parametra dolžine razpoke  $(1 - m)$ , ki prikazuje stabilne in nestabilne režime napredovanja razpoke odvisno od razmerja  $\tau_s / \tau_i$  (Gopalaratman, 1987) (premer vlakna = 0,4 mm, vgrajena dolžina  $l/2 = 13$  mm,  $\tau_s = 4,1$  MPa).

### 3 • ODPORNOSTI MAB PROTI ŠIRJENJU RAZPOK

Takoj po zamešanju betona se pričnejo interaktivni procesi med posameznimi komponentami. Pri uporabi primerne sestave betona in po popolni zgoštevni (po dodatnem zgoščanju) posamezni delci komponent zavzamejo končen položaj. Nato se začne proces izločanja vode iz betona in hidratacija cementsa, zaradi česar se spreminja prostornina vgrajenega betona (beton se krči). Če so deformacije zaradi krčenja betone tako velike, da povzročijo napetosti, ki presegajo natezno trdnost betona, nastanejo razpoke. Nadaljnje širjenje razpok je odvisno od velikosti in trajanja obremenitev, ki so povzročile njihov nastanek ter od zunanjih obtežb. Beton se temu širjenju upira s premoščanjem razpok z agregatnimi zrni in dodatno z vlakni v MAB ali s polimerom v betonu, modificiranim s polimerom. Govori se o odpornosti betona proti širjenju razpok oziroma sposobnosti betona, da absorbira čim več energije do določene (izbrane) širine razpoke.

#### 3.1 • Metoda preskusa

Kot mero za odpornost betona proti širjenju razpok je možno privzeti ekvivalentno trdnost do izbrane širine razpoke, ki se določi iz diagrama obtežba - ŠOR (širina odpiranja razpoke) (slika 7). Diagram obtežba - ŠOR se

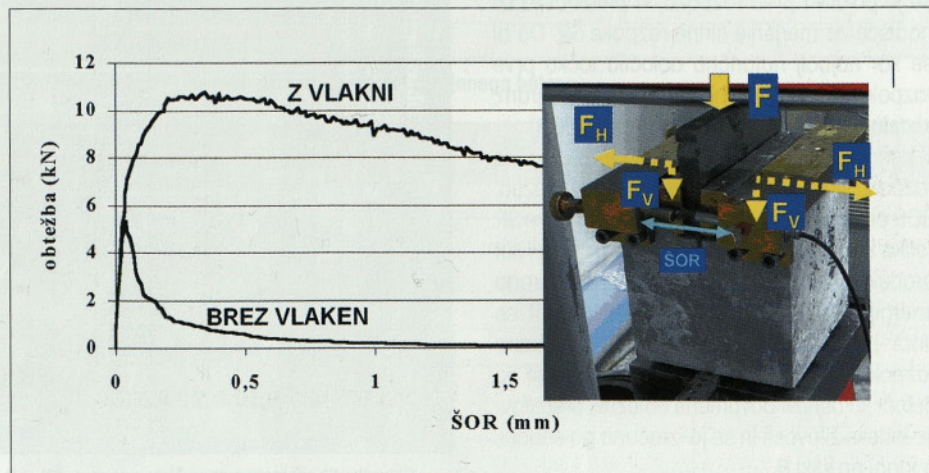
dobi med preskusom betona po metodi cepitve z zagozdo.

Metoda preskusa cepitve z zagozdo, s katero se dobi diagram obtežba - ŠOR je ena od mnogih metod preskusov, ki so bile razvite z namenom, da se ugotovi obnašanje kompozitov s cementnim vezivom v razpokanem stanju. Metoda preskusa cepitve z zagozdo, ki sta jo razvila Tschegg in Linsbauer (Tschegg, 1986), (Linsbauer, 1986), (Tschegg, 1990),

(Tschegg, 1991), je v nadaljevanju na kratko opisana.

Preskušane (kocko) s pravokotnim žlebom in z zarezo na dnu žleba položimo na ravno linijsko podporo v tlačno stiskalnico (slika 7). Prenosna dela, ki sta vložena v žleb, povzročata cepitev preskušanca z vtiskanjem klina. Sila  $F$  (slika 7), ki jo povzroča preskusna stiskalnica, se prenese s pomočjo klina na preskušane tako, da se razdeli v dve komponenti. Večja horizontalna komponenta  $F_H$  razcepi preskušane.

Manjša vertikalna komponenta  $F_V$  pomaga uravnovati smer širjenja razpoke v ravnini, ki



Slika 7 • Diagrama obtežba - ŠOR dveh različnih betonov (brez in z vlakni) in princip metode preskusa cepitve z zagozdo

povezuje podporo in zarezo. Ker je kot klina majhen, komponenta  $F_v$  ne vpliva na rezultat preskusa. Deformacija se določi z merjenjem širine odpiranja razpoke (ŠOR) v liniji delovanja komponente  $F_H$  med cepitvijo preskušanca.

Med delovanjem obtežbe na preskušane se začnejo pri določeni obtežbi pojavljati majhne posamezne razpoke znotraj betona. Te razpoke se združujejo v kontinuirano razpoko, ki se jo lahko opazi na površini preskušanca. Na tej točki diagrama obtežba – ŠOR se naklon diagrama močno poveča. Obtežba in ŠOR na tej točki se imenujeta obtežba pri prvi razpoki  $F_{PR}$  oziroma širina odpiranja razpoke pri prvi razpoki  $ŠOR_{PR}$ .

Po razpokanju, ko obremenitev še traja, se notranja energija sprošča s povečevanjem širine in dolžine razpoke. Prisotna agregatna zrna in/ali vlakna ali polimer premoščajo razpoko in ji ne dopuščajo nadaljnega širjenja. Zato se v betonu absorbira energija. Zrna ali vlakna ali polimer prenašajo notranje napetosti od enega dela razpokane matrice na drugi del in odvisno od njihove sposobnosti ne dovoljujejo preloma betona. Pojav je izrazitejši pri bolj žilavem betonu.

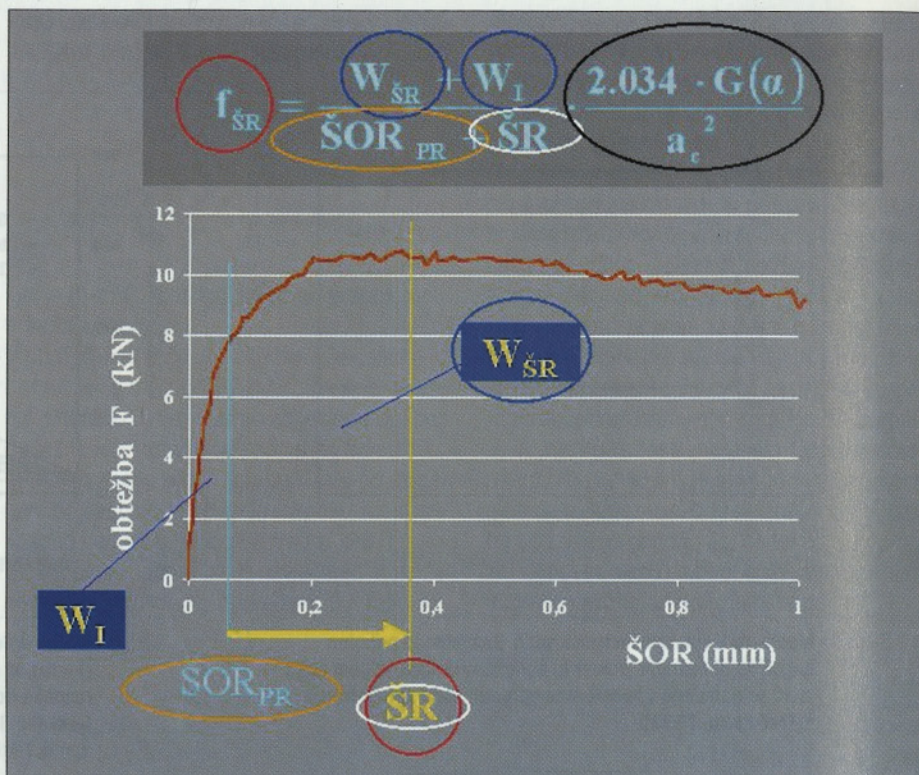
### 3.2 • Ekvivalentna trdnost

Površina pod diagramom obtežba – ŠOR je merilo za absorbirano energijo betona. To žilavost se lahko uporabi za določitev ekvivalentne trdnosti do izbrane širine razpoke. Zato se lahko odpornost betona proti širjenju razpoke meri z ekvivalentno trdnostjo. Beton bo imel večjo odpornost proti širjenju razpoke do izbrane širine razpoke, če bo imel večjo ekvivalentno trdnost do te širine razpoke.

Za določitev ekvivalentne trdnosti do izbrane širine razpoke pa se mora najprej ugotoviti točko na diagramu obtežba – ŠOR, pri kateri se je pojavila prva razpoka, ki predstavlja izhodišče za merjenje širine razpoke ŠR. Da bi se kar najbolj natančno določila točka prve razpoke PR, se uporabi računalniški program, ki deluje v grafični obliki (Šušteršič, 2000).

V trenutku, ko je dosežena točka PR, se začne razpoka širiti, če se povečuje zunanja obtežba. ŠOR preko  $ŠOR_{PR}$  predstavlja širino razpoke ŠR (slika 8). Absorbirana energija  $W$  se izrazi kot produkt obtežbe in ŠOR. Če se absorbirana energija  $W$  deli z izbrano širino razpoke ŠR, se dobi povprečna obtežba do izbrane širine razpoke ŠR. Ekvivalentna trdnost, ki se jo določi na osnovi povprečne obtežbe, predstavlja indeks žilavosti in se jo izračuna po enačbi, podani na sliki 8.

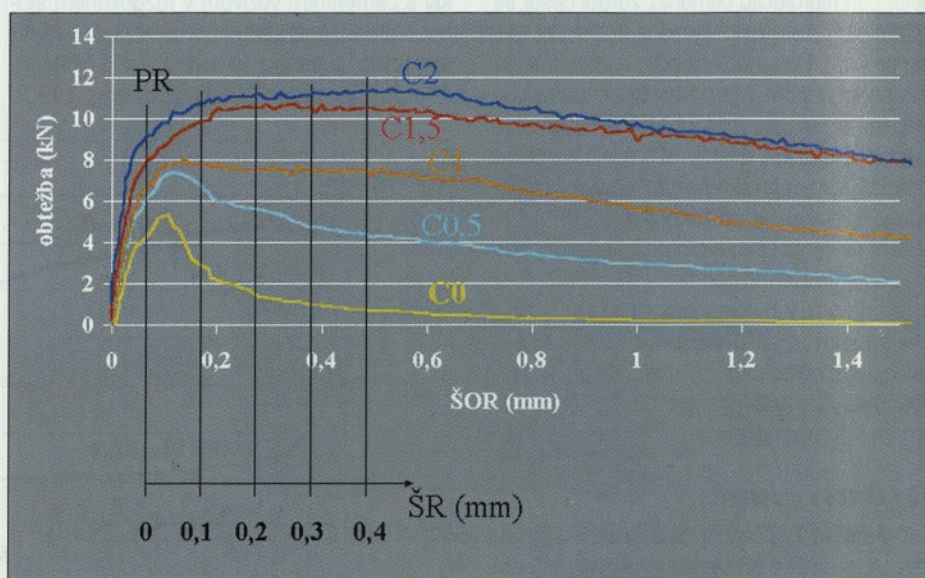
Velikost zadnjega parametra v enačbi (slika 8) je odvisna od oblike in velikosti preskušanc-



Slika 8 • Določitev enačbe za izračun ekvivalentne trdnosti do izbrane širine razpoke  $f_{SR}$ .

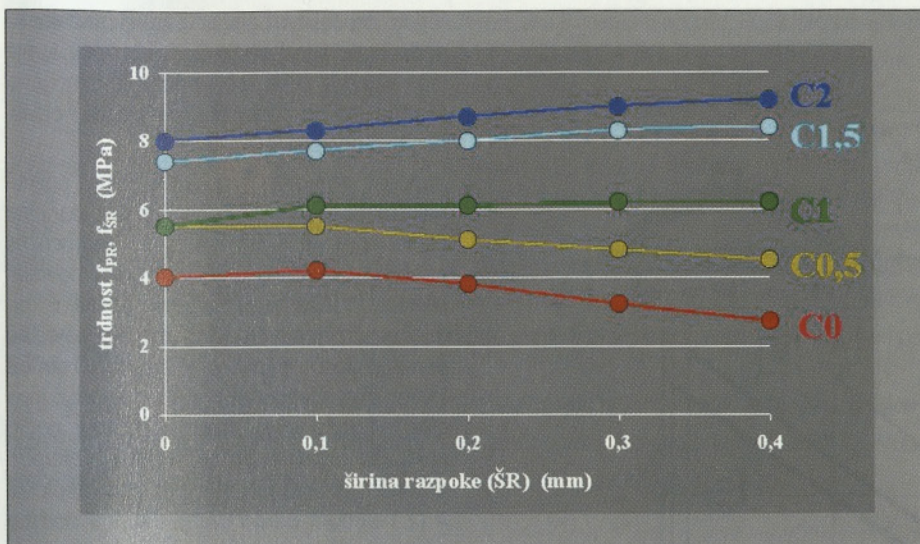
ca. Za določitev ekvivalentne trdnosti do izbrane širine razpoke se predlaga preskus cepitve z zagazdo na kocki z robom 15 cm in globino zareze 5 cm. Širina razpoke ŠR, do katere se izračuna ekvivalentna trdnost, je lahko 0,1, 0,2, 0,3 ali 0,4 mm, odvisno od vrste betona, ki se mu ocenjuje odpornost proti šir-

jenju razpok, kot je shematsko prikazano na sliki 9. Kot primer so podani diagrami betona brez vlaken (C0) in mikroarmiranih betonov z različnimi količinami dodanih jeklenih vlaken (0,5, 1,0, 1,5 in 2,0 vol.%) z dolžino 32 mm in s faktorjem oblike  $l/d = 64$ . Parametri vseh sestav od C0 do C2 so enaki:  $v/c = 0,35$ ;



Slika 9 • Shematski prikaz širine razpok  $ŠR = 0,1, 0,2, 0,3$  in  $0,4$  mm do katerih se izračuna ekvivalentna trdnost, odvisno od vrste betona, ki se mu ocenjuje odpornost proti širjenju razpok.





Slika 10 • Zmanjševanje in povečevanje ekvivalentne trdnosti v odvisnosti od širine razpoke do širine razpoke 0,4 mm različnih vrst betonov (brez in z dodanimi jeklenimi vlakni).

mikrosilika = 8,5 % od mase cementa; agregat: drobljeni prodnati – frakcija 0/4 mm (42 %), drobljeni eruptivni – frakcije: 4/8 mm (18 %), 8/11 mm (16 %) in 11/16 mm (24 %); superplastifikator = 2 % od mase cementa; aerant = 0,1 % od mase cementa. Sestave se medsebojno razlikujejo glede na prostornino dodanih jeklenih vlaken (JV) in maso portland cementa (PC): C0 (0 % JV, 320 kg/m<sup>3</sup> PC), C0,5 (0,5 % JV, 330 kg/m<sup>3</sup> PC), C1 (1,0 % JV, 348 kg/m<sup>3</sup> PC), C1,5 (1,5 % JV, 375 kg/m<sup>3</sup> PC) in C2 (2,0 % JV, 393 kg/m<sup>3</sup> PC).

Če se izračuna ekvivalentne trdnosti betonov iz slike 9 do vseh izbranih širin razpoke (od 0,1 do 0,4 mm) in se jih nariše v odvisnosti od  $\check{S}R$ , se dobi predstava o zmanjševanju ali povečevanju ekvivalentne trdnosti pri širjenju razpoke (slika 10). Razvidno je, da se pri širjenju razpoke ekvivalentne trdnosti povečujejo (utrjevanje) pri MAB z večjimi količinami vlaken.

Pri betonu brez vlaken pa se ekvivalentna trdnost zmanjšuje s širjenjem razpoke ("mehčanje"). Ti rezultati dokazujejo, da bi bilo možno po predlagani metodi ocenjevati odpornost betona proti širjenju razpok, kar bi lahko v veliki meri pomagalo pri izboru primerne sestave betona.

### 3.3 • Povečanje nosilnosti elementov iz MAB zaradi omejevanja širjenja razpok – panelne plošče iz mikroarmiranega betona za podgrajevanje jamskih prehodov

Zaradi strižnih porušitev klasično armiranih panelnih plošč v Premogovniku Velenje je bilo potrebno modificirati beton in armaturo, da bi se lahko zgradila trajnejša obloga jamskih pre-

hodov s temi ploščami. V okviru tripartitnega razvojnega projekta (Premogovnik, Kograd IGEM in IRMA), v katerem so aktivno sodelovali strokovnjaki investitorja, proizvajalca in inštituta, je bilo ugotovljeno, da uporaba mikroarmiranega betona v kombinaciji z zmanjšanim premerom armaturnih palic in z zmanjšanjem števila stremen predstavlja optimalno rešitev (Makovšek, 1994), (Šušteršič, 1994). Za lažje razumevanje se v preglednici 1 podaja ponostavljen pregled prvih meritev panelnih plošč z ravnim spojem. Za pripravo panelnih plošč sta bili uporabljeni dve vrsti betonov, katerih sestavi sta razvidni iz preglednice 2. Rezultate preskusov svežega in strjenega betona brez vlaken in MAB podajamo v preglednici 3. Starost strjenega betona je 28 dni. Vsak podan rezultat predstavlja povprečje rezultatov, ki smo jih dobili s preskusom najmanj treh preskušancev.

oznaka panelne plošče	D <sub>max</sub> (mm)	jeklena vlakna (vol. %)	armatura		F <sub>max, povpr</sub> (kN)	način porušitve
			palice	stremen a		
A	32	0	2×3Ø12mm	Ø6mm/15cm	245,6	strižna
B	16	0,5	–	–	335,5	upogibna
C	16	0,5	2×3Ø8mm	Ø6mm/50cm	345,8	duktilno obnašanje

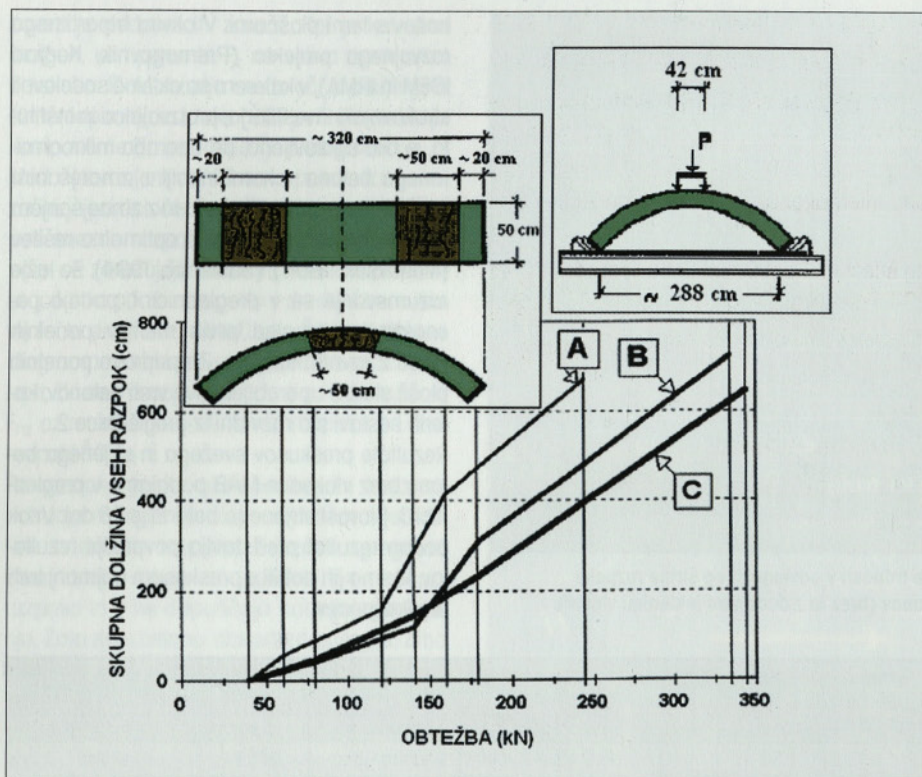
Preglednica 1 • Pregled prvih meritev panelnih plošč z ugotovitvami.

parameter	beton brez vlaken (za panelne plošče A)	mikroarmirani beton (za panelne pl. B in C)	
cement (CEM I)	kg	420	
v/(cem. + MS)	–	0,36	
mikrosilika MS	mas. % od cem.	–	
jeklena vlakna (l = 32 mm, l/d = 100)	vol. %	–	
superplastifikator	mas. % od cem.	1,5	
frakcije drobljenega dolomitnega agregata (mm)	0–4	vol. %	26
	4–8	vol. %	10
	8–16	vol. %	19
	16–32	vol. %	45

Preglednica 2 • Sestavi betonov (za 1 m<sup>3</sup> vgrajenega betona)

lastnosti svežega in strjenega betona	beton brez vlaken (za panelne plošče A)	MAB (za panelne pl. B in C)
posed	cm	1,0
vodo-cementno razmerje (v/c)	–	0,42
vsebnost zraka	vol. %	1,2
prostorninska masa svežega betona	kg/m <sup>3</sup>	2473
tlačna trdnost	MPa	64,9
upogibna trdnost pri prvi razpoki	MPa	6,2
indeks žilavosti I <sub>10</sub>	–	1,0
udarna žilavost	kJ/m <sup>2</sup>	–
		30,5

Preglednica 3 • Povprečne vrednosti rezultatov preskusov svežega in strjenega betona brez vlaken in MAB.



Slika 11 • Skupna dolžina vseh razpok panelne plošče A, B in C v odvisnosti od obtežbe.

Vidna izboljšava nove rešitve predstavlja sposobnost omejevanja širjenja razpok, kar je lepo vidno iz slike 11, ki prikazuje izmerjeno skupno dolžino razpok panelne plošče v odvisnosti od obtežbe.

Razpoke smo merili na obeh stranskih površinah (razpoke so se na spodnjem delu panelne plošče pojavljale na srednjem področju s približno dolžino 50 cm) in na zgornji površini panelne plošče (razpoke so se pojavljale na dveh področjih – četrtinah zgornje površine panelne plošče: približno 20 cm do 70 cm od levega in desnega robu) (slika 11 zgornja leva slika). Desna slika zgoraj prikazuje način preskusa panelne plošče. Najdaljšo skupno dolžino razpok smo izmerili na panelni plošči A (z betonom brez vlaken). Skupna dolžina vseh razpok panelne plošče C je približno 60 % krajša od skupne dolžine razpok panelne plošče A.

V nadaljevanju razvojnega projekta smo razvili nove vrste in oblike panelnih plošč, ki so optimirane glede na različne velikosti obtežbe in potrebni notranji premer rudniških prehodov (Kolenc, 1998), (Šušteršič, 1998) ali predorov (Hudej, 2002).

#### 4 • SKLEP

Vlakna imajo največji vpliv na obnašanje MAB, ko se v obremenjenem elementu pojavijo razpoke. S povečevanjem trdnosti se mora povečevati sprijemljivost in dosežena mora biti dobra razporeditev kar največjega števila vlaken na prelomni površini, če se želi doseči žilavost MAB na visokem nivoju trdnosti. Opisana metoda določanja odpornosti betona proti širjenju razpok bi lahko veliko pomagala

predvsem pri izboru vrste sestave betona in po vgraditvi tudi za dokazovanje dosežene stopnje tovrstne odpornosti betona. Po izkušnjah se s preskusno metodo cepitve z zagozdo dobijo primerni diagrami za ocenjevanje obnašanja različnih vrst betona v razpokanem stanju. Izbor, do katere širine razpoke se bo izračunala ekvivalentna trdnost, je odvisen od vrste konstrukcije, v katero bo vgrajen beton in

od pogojev okolja, v katerem se bo ta konstrukcija uporabljala.

Osnovno načelo vključevanja MAB v projekte betonskih konstrukcij je, da ga je potrebno reševati kompleksno in interdisciplinarno (investitor, projektant, tehnolog, izvajalec). To dokazujejo številni primeri uspešno vpeljanih novih proizvedenih MAB in novih načinov grajenja konstrukcij iz MAB. Pri tem pa je potrebno optimalno izkoristiti vse lastnosti MAB, ki se lahko dosežejo z različnimi spremembami sestave.

#### 5 • LITERATURA

Balaguru, P.N., Shah, S.P., Fiber – Reinforced cement Composites, McGraw-Hill, Inc., 1992.  
 Bourdette, B., Ringot, E., Ollivier, J.P., Modelling of the Transition Zone Porosity, Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 4, str. 741-751, 1995.  
 Gopalaratman, V., Shah, S.P., Failure Mechanisms and Fracture of Fiber Reinforced Concrete. Fiber Reinforced Concrete Properties and Applications. ACI, SP – 105. Detroit. str. 1-25, 1987.  
 Hudej, M., Šušteršič, J., Zajc-Pogorelnik, M., Osnovni principi izgradnje odvodnega rova Drtjiščica in rešitev dodatnih tehnoloških problemov. Zbornik referatov 6. slovenskega kongresa o cestah in prometu – 2. del. DRC. str. 271-279, 2002.  
 Kolenc, M., Blažič, A., Zajc, A., Šušteršič, J., Možnost povečanja nosilnosti panelne podgradnje v Premogovniku Velenje. Proceedings of Fourth International Symposium on Tunnel Construction and Underground Structures, Ljubljana, str. 397-405, 1998.  
 Linsbauer, H., Tschegg, E.K., Die Bestimmung der Bruchenergie an W(rfelproben, Zement und Beton, 31, 1, str. 38-40, 1986.  
 Makovšek, B., Riček, F., Dobljšek, B., Šušteršič, J., Leskovar, I., Zajc, A., Prša, M., Steel Fibre Reinforced Concrete Panels for Roadway Support. Proceedings of Second International Symposium on Tunnel Construction and Underground Structures, Ljubljana, str. 275-283, 1994.

Maso, J.C., 7ème Congrès International de la Chimie des Ciments, Septima, Paris, str. VII-1-3, 1980.

Scrivener, K.L., Crumble, A.K., Pratt, P.L., Bonding in Cementitious Materials, MRS, 114. Ed. Mindess, S., Shah, S.P., str. 87, 1988.

Šušteršič, J., Kolenc, M., Zajc, A., Blažič, A., Riček, F., Zajc - Pogorelnik, M., High-Performance Fiber Reinforced Concrete for Mine Roadway Support Panels Proceedings of Fourth International Symposium on Tunnel Construction and Underground Structures, Ljubljana, str. 407-419, 1998.

Šušteršič, J., Leskovar, I., Zajc, A., Ribarič, M., Makovšek, B., Riček, F., Doblšek, B., Prša, M., Properties of SFRC as input data for analysis of panels for mine roadway support. Proceedings of Second International Symposium on Tunnel Construction and Underground Structures, Ljubljana, str. 284-295, 1994.

Šušteršič, J., Ukrainczyk, V., Zajc, A., Šajna, A., Ageing Effect on Post-Crack Behaviour of SFRC. Proceedings of the Fifth International RILEM Symposium Fibre-Reinforced Concretes (FRC), BEFIB'2000. Ed.: Rossi, P. and Chanvillard, G., RILEM Publications S.A.R.L. str. 623-631, 2000.

Šušteršič, J., Zajc, A., Duktilnost betona kot merilo za projektiranje oblog predorov in rudniških prehodov, Gradbeni vestnik, letnik LII/9, str. 223-229, 2003.

Tschegg, E.K., AT-390328: Prü feinrichtung zur Ermittlung von bruchmechanischen Kennwerten sowie hierfür geeignete Prüfkörper, 1986.

Tschegg, E.K., New Equipments for Fracture Tests on Concrete, Materialprüfung 33, 11-12, München, pp. 338-342, 1991.

Tschegg, E.K., Patent application No. 48/1990, Lasteinleitungsvorrichtung, 1990.

# PRIMERJAVA SOVPREŽNIH NOSILCEV

## COMPARISON OF COMPOSITE BEAMS

**Uroš Klanšek, univ. dipl. gosp. inž.,  
izr. prof. dr. Stojan Kravanja,  
univ. dipl. inž. gradb.,**

oba Univerza v Mariboru, Fakulteta za  
gradbeništvo, Smetanova 17, 2000 MARIBOR  
ime.primek@uni-mb.si

Znanstveni članek UDK 624.016+624.072.2

**Povzetek** | V prispevku je predstavljena primerjava treh različnih sovprežnih sistemov: sovprežnih I nosilcev, sovprežnih paličnih nosilcev z zaprtimi profili in sovprežnih paličnih nosilcev z odprtimi profili. Primerjava je bila izvedena za različne razpore prostoležečih nosilcev, obteženih z lastno težo in s spremenljivo koristno obtežbo. Sovprežni nosilci so bili dimenzionirani v skladu z evrokodi 1, 2, 3 in 4 za mejno stanje nosilnosti in mejno stanje uporabnosti. Primerjavo med sovprežnimi nosilci smo izvedli na podlagi rezultatov optimiranja vseh treh sovprežnih sistemov z minimizacijo lastnih izdelavnih stroškov konstrukcij. Optimiranje je bilo izvedeno z nelinearnim programiranjem (NLP). Prispevek vsebuje teoretični opis problema in praktični primer z rezultati optimiranja.

**Summary** | The paper presents the comparison between three different composite systems: composite I beams, composite trusses composed of hollow sections, and composite trusses designed by channel sections. The comparison was made for different spans of simply supported beams, subjected to the self-weight and the variable imposed load. The composite systems were designed in accordance with Eurocodes 1, 2, 3 and 4 for the conditions of both ultimate and serviceability limit states. The comparison between three composite systems was achieved on the basis of optimization results, subjected to minimization of self-manufacturing costs. The optimization was performed by the nonlinear programming (NLP) approach. The paper includes the theoretical basis and a practical example with the results of the optimization.

### 1 • UVOD

V prispevku je predstavljena primerjava treh različnih sovprežnih sistemov: sovprežnih I nosilcev, sovprežnih paličnih nosilcev z zaprtimi jeklenimi profili in sovprežnih paličnih nosilcev z odprtimi jeklenimi profili. Primerjava je bila izvedena za različne razpore prostoležečih nosilcev, obremenjenih z lastno težo in s spremenljivo koristno obtežbo. Namen prispevka je določiti razpore nosilcev, pri katerih se posamezni sovprežni sistem izkaže za najbolj ekonomično rešitev. Dimenzioniranje sovprežnih nosil-

cev smo izvedli v skladu z evropskimi predstandardi Eurocode 1, 2, 3 in 4 (Eurocode 1, 1993), (Eurocode 2, 1992), (Eurocode 3, 1992), (Eurocode 4, 1992), pri čemer so bili zadovoljeni vsi pogoji mejnega stanja nosilnosti (MSN) in mejnega stanja uporabnosti (MSU). Optimiranje nosilcev je bilo izvedeno z nelinearnim programiranjem (NLP). V ta namen smo razvili tri optimizacijske modele za optimiranje vseh treh različnih sovprežnih sistemov z minimizacijo proizvodnih stroškov konstrukcij.

Lastni proizvodni stroški konstrukcij so obsegali materialne stroške (konstrukcijskega jekla, betona, armaturnega jekla, valjčnih možnikov), stroške opaževanja, rezanja pločevin, varjenja, antikorozijske zaščite in protipožarne zaščite.

Rezultati optimiranja sovprežnih nosilcev za različne razpore in obtežbe so optimalne geometrijske karakteristike, tlačna trdnost betona, meja plastičnosti jekla in masa nosilca pri minimalnih lastnih izdelavnih stroških. Potem ko smo pridobili rezultate optimizacije za vse tri tipe prostoležečih sovprežnih nosilcev, smo izvedli medsebojno primerjavo rezultatov za vsak posamezni razpon in obtežbo.

## 2 • SOVPREŽNI I NOSILCI

Sovprežni I nosilci so sestavljeni iz jeklenega dvojnosiometričnega varjenega I preseza in armiranobetonske plošče konstantne višine. Armiranobetonska plošča in I prerez sta medsebojno povezana preko valjčnih moznikov, ki so privarjeni na zgornjo pasnico I preseza in zabetonirani v ploščo. Pri tem smo zadostili vsem pogojem polne sovprežnosti. Med montažo so nosilci v celoti podprti z vmesnimi podporami tako, da se po strditvi betona lastna in koristna obtežba v celoti prenese na sovprežni prerez.

Dimenzioniranje sovprežnih I nosilcev je izvedeno v skladu s standardom (Eurocode 4, 1992), po katerem moramo upoštevati še dodatne zahteve za jekleni del preseza v skladu z (Eurocode 3, 1992), za armiranobetonske plošče pa dodatne zahteve po (Eurocode 2, 1992). Obtežbe na sovprežnih nosilcih smo kombinirali v skladu z (Eurocode 1, 1993).

Armiranobetonska plošča je dimenzionirana kot kontinuirna plošča, nosilna v eni smeri. Sovprežne prerese smo dimenzionirali pri mejnem stanju nosilnosti (MSN) in mejnem stanju uporabnosti (MSU). Pri MSN smo zadostili vsem pogojem za:

- upogibno nosilnost preseza,
- strižno nosilnost preseza,
- lokalno izbočenje stojine zaradi striga,
- interakcijo upogibnega momenta in prečne sile,

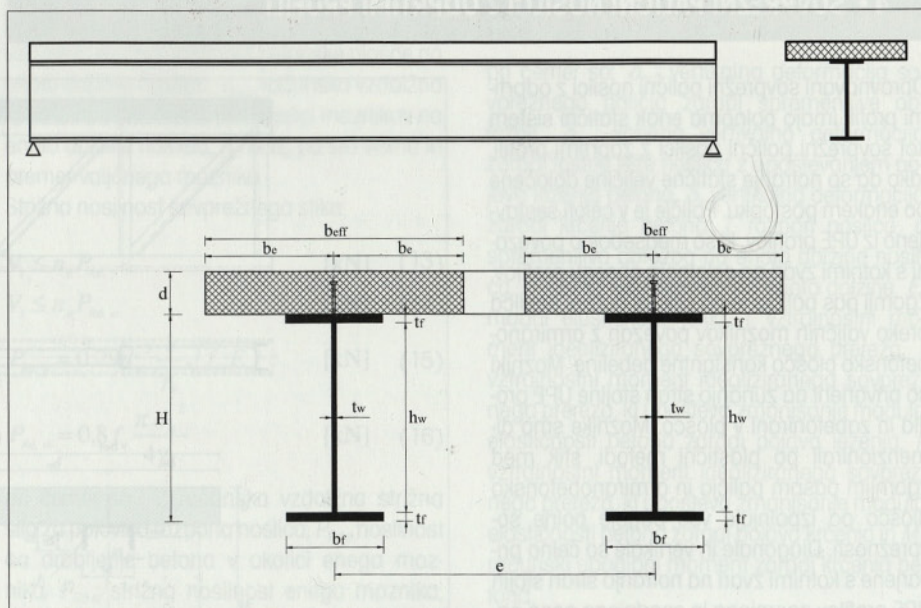
– strig med stojino in pasnico sovprežnega preseza.

Pri dimenzioniranju smo upoštevali, da nevtralna os leži v betonskem delu preseza, kar se najpogosteje zgodi pri statičnem sistemu prostoležečega sovprežnega I nosilca z dvojnosiometričnim jeklenim I presekom. Za določitev upogibnih nosilnosti sovprežnih preseza smo upoštevali njihovo polno plastifikacijo. Pri MSU smo upogibke nosilcev računali po elastični

metodi z upoštevanjem lezenja in krčenja betona pod vplivom stalne obtežbe. Pri dimenzioniranju sovprežnih I nosilcev po MSU so ti izpolnili naslednje pogoje:

- maksimalni upogibki nosilcev  $\delta_{max}$  zaradi stalnih obtežb, spremenljivih obtežb in časovno odvisnih pojavov niso presegli predpisanega mejnega upogibka,
- maksimalni upogibki  $\delta_2$  zaradi spremenljivih obtežb niso presegli predpisanega mejnega upogibka.

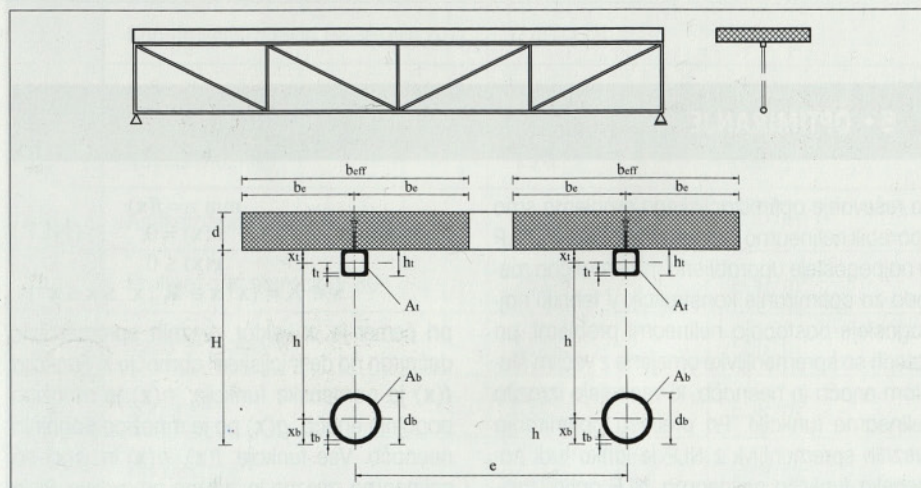
Valjčne moznike smo dimenzionirali po plastični metodi v skladu s standardom (Eurocode 4, 1992).



Slika 1 • Sovprežni I nosilec

## 3 • SOVPREŽNI PALIČNI NOSILCI Z ZAPRTIMI PROFILI

Sovprežni palični nosilci so sestavljeni iz armiranobetonske plošče konstantne debeline in jeklenega paličja z nateznimi diagonalami. Zgornji pas paličja je pravokotni cevni profil, ki je preko valjčnih moznikov povezan z armiranobetonsko ploščo. Podobno kot pri sovprežnem I nosilcu so mozniki privarjeni na zgornji pas in dimenzionirani po plastični metodi. Stik med armiranobetonsko ploščo in zgornjim pasom paličja izpolnjuje vse pogoje polne sovprežnosti. Diagonale, vertikale in spodnji pas paličja so sestavljeni iz okroglih jeklenih cevni profilov. Vertikale in diagonale so čelno privarjene s kotnimi zvari na zgornji in spodnji pas paličja po celotnem obsegu profilov. Stiki elementov so dimenzionirani v skladu z dodatkom K standarda (Eurocode 3, 1992).



Slika 2 • Sovprežni palični nosilec z zaprtimi profili

Ker (Eurocode 4, 1992) ne podaja posebnih zahtev za izračun notranjih statičnih količin sovprežnih paličnih nosilcev, smo privzeli postopek izračuna notranjih sil iz britanskega standarda (BS 5950, 1990). Dimenzioniranje elementov sovprežnih paličnih nosilcev je bilo izvedeno v skladu z (Eurocode 3, 1992) in (Eurocode 4, 1992).

Sovprežni palični nosilci so dimenzionirani po MSN na upogibno in strižno nosilnost, pri MSU pa smo izvedli kontrolo vertikalnih defor-

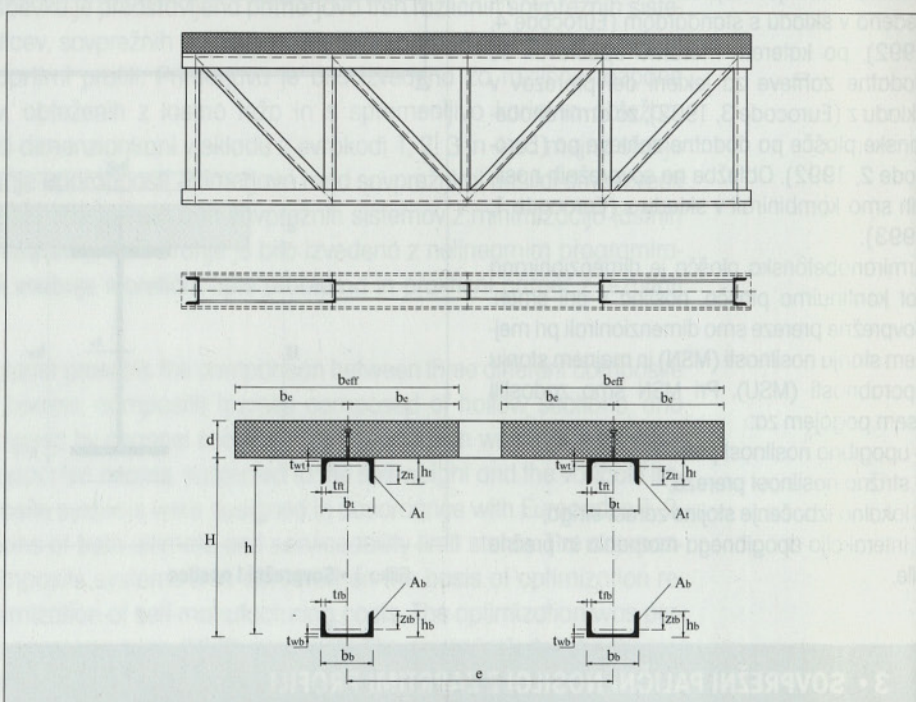
macij. Pri izračunu upogibne nosilnosti sovprežnega prereza smo zanemarili prispevek zgornjega pasu paličja. Tlačno osno silo tako prenaša le armiranobetonska plošča. Zgornji pas paličja je dimenzioniran na vpliv lokalnih upogibnih momentov. Strižno obremenitev v celoti prenesejo polnilne diagonale paličja, v katerih se pojavijo natezne oz. tlačne sile. Diagonale in vertikale smo dimenzionirali glede na natezne oz. uklonske nosilnosti po standardu (Eurocode 3, 1992). Ver-

tikalne deformacije smo izračunali po elastični metodi, upoštevajoč vztrajnostni moment idealiziranega prečnega prereza sovprežnega paličnega nosilca ter vplive lezenja in krčenja betona zaradi dolgotrajnega delovanja stalne obtežbe. Palični nosilec je v fazi betoniranja popolnoma podprt z vmesnimi podporami. Armiranobetonska plošča je dimenzionirana po enakem postopku kot pri sovprežnih I nosilcih.

#### 4 • SOVPREŽNI PALIČNI NOSILCI Z ODPRTIMI PROFILI

Obravnavani sovprežni palični nosilci z odprti profili imajo polnoma enak statični sistem kot sovprežni palični nosilci z zaprtimi profili, tako da so notranje statične veličine določene po enakem postopku. Paličje je v celoti sestavljeno iz UPE profilov, ki so medsebojno povezani s kotnimi zvari po celotnem obsegu profilov. Zgornji pas paličja je po celotni dolžini nosilca preko valjčnih moznikov povezan z armiranobetonsko ploščo konstantne debeline. Mozniki so privarjeni na zunanjo stran stojine UPE profila in zabetonirani v ploščo. Mozniki smo dimenzionirali po plastični metodi, stik med zgornjim pasom paličja in armiranobetonsko ploščo pa izpolnjuje vse pogoje polne sovprežnosti. Diagonale in vertikale so čelno privarjene s kotnimi zvari na notranjo stran stojin UPE profilov zgornjega in spodnjega pasa paličja po celotnem obsegu profilov.

Dimenzioniranje po MSN in MSU smo izvedli po polnoma enakem postopku kot za sovprežne nosilce z zaprtimi profili, upoštevajoč razlike v geometrijskih karakteristikah prečnih prereзов jeklenih elementov.



Slika 3 • Sovprežni palični nosilec z odprti profili

#### 5 • OPTIMIRANJE

Za reševanje optimizacijskega problema smo uporabili nelinearno programiranje (NLP). NLP je najpogosteje uporabljena matematična metoda za optimiranje konstrukcij. V tehniki najpogosteje nastopajo nelinearni problemi, pri katerih so spremenljivke omejene z večjim številom enačb in neenačb, ki vsebujejo izrazito nelinearne funkcije. Pri procesu optimiranja zveznih spremenljivk z NLP je lahko tudi namenska funkcija nelinearna. NLP optimizacijski problem lahko v osnovi zapišemo:

$$\begin{aligned} \min z &= f(\mathbf{x}) \\ \text{pri pogojih: } & h(\mathbf{x}) = 0 \quad (\text{NLP}) \\ & g(\mathbf{x}) \leq 0 \\ & \mathbf{x} \in X = \{\mathbf{x} \mid \mathbf{x} \in \mathbf{R}^n, \mathbf{x}^L \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}^U\} \end{aligned}$$

pri čemer je  $\mathbf{x}$  vektor zveznih spremenljivk, definiran na definicijskem območju  $X$ . Funkcija  $f(\mathbf{x})$  je namenska funkcija,  $h(\mathbf{x})$  je množica pogojnih enačb,  $g(\mathbf{x})$  pa je množica pogojnih neenačb. Vse funkcije  $f(\mathbf{x})$ ,  $h(\mathbf{x})$  in  $g(\mathbf{x})$  so nelinearne, zvezne in zvezno odvedljive.  $\mathbf{R}^n$  je  $n$ -dimenzijski prostor realnih števil.

V primeru optimiranja konstrukcij predstavljajo zvezne spremenljivke predvsem geometrijske karakteristike konstrukcije (npr. dimenzije in karakteristike prečnih prereзов elementov, površina in volumen konstrukcije), napetosti in deformacije konstrukcije, materialne karakteristike (npr. tlačno trdnost, mejo plastičnosti, elastični in strižni modul) in tudi ekonomske parametre (npr. proizvodne stroške, stroške požarne in protikorozijske zaščite). Množico pogojnih enačb in neenačb pa predstavlja sistem linearnih in nelinearnih (ne)enačb, potrebnih za statično analizo in dimenzioniranje konstrukcije.

Za optimiranje sovprežnih nosilcev smo izdelali NLP optimizacijske modele COMBOPT (Composite Beam OPTimization) za sovprežne I nosilce, COMTOPH (COMposite Trusses OPTimization / Hollow sections) za sovprežne palične nosilce z zaprtimi profili in COMTOPTC (COMposite Trusses OPTimization / Channel sections) za sovprežne palične nosilce z odprtimi profili. Modele smo zapisali v višjem algebrskem modelnem jeziku GAMS (General Algebraic Modeling System) (Brooke, 1988). Za NLP optimiranje smo uporabili program CONOPT (splošna metoda reduciranih gradientov) (Drudd, 1994). Na podlagi izdelanih modelov so bile izvršene obsežne raziskave optimiranja sovprežnih konstrukcij (Kravanja, 1999), (Šilih, 2000), (Šilih, 2002), (Kravanja, 2001), (Kravanja, 2003).

Osnovne omejitve v optimizacijskem modelu COMTOPTC so pogojne (ne)enačbe MSN in MSU za sovprežni palični nosilec z odprtimi profili. Pogojne (ne)enačbe pri MSN so naslednje. Upogibna nosilnost sovprežnega prereza:

$$M_{Sd} \leq M_{pl,Rd} \quad [\text{kNcm}] \quad (1)$$

$$M_{pl,Rd} = \left( h + (h_t - z_n) + d - \frac{A_b f_y \gamma_c}{4b_e \alpha f_{ck} \gamma_a} \right) \frac{A_b f_y}{\gamma_a} \quad [\text{kNcm}] \quad (2)$$

pri čemer so:  $M_{Sd}$  računski upogibni moment,  $M_{pl,Rd}$  računski plastični upogibni moment sovprežnega prereza,  $f_y$  meja plastičnosti konstrukcijskega jekla,  $f_{ck}$  tlačna trdnost betonskega valja,  $\alpha$  koeficient, ki upošteva zmanjšanje tlačne trdnosti betona zaradi časovnih in neugodnih obtežnih vplivov (0.85),  $\gamma_c$ ,  $\gamma_a$  faktorja varnosti za beton in konstrukcijsko jeklo. Druge oznake so prikazane na sliki 3.

Natezna nosilnost diagonal paličja:

$$N_{Sd,i,j} \leq N_{pl,Rd,i,j} \quad [\text{kN}] \quad (3)$$

$$N_{pl,Rd,i,j} = \frac{A_{i,j} f_y}{\gamma_{M0}} \quad [\text{kN}] \quad (4)$$

pri čemer indeksa  $i$  in  $j$  označujeta krajni vozlišči obravnavanega elementa paličja.  $N_{Sd,i,j}$ ,  $N_{pl,Rd,i,j}$  in  $A_{i,j}$  predstavljajo računsko osno silo, računsko natezno nosilnost in površino prečnega prereza obravnavanega elementa.

Uklonska nosilnost vertikal paličja:

$$N_{Sd,i,j} \leq N_{b,Rd,y,i,j} \quad [\text{kN}] \quad (5)$$

$$N_{Sd,i,j} \leq N_{b,Rd,z,i,j} \quad [\text{kN}] \quad (6)$$

$$N_{b,Rd,y,i,j} = \chi_{y,i,j} \frac{A_{i,j} f_y}{\gamma_{M1}} \quad [\text{kN}] \quad (7)$$

$$N_{b,Rd,z,i,j} = \chi_{z,i,j} \frac{A_{i,j} f_y}{\gamma_{M1}} \quad [\text{kN}] \quad (8)$$

pri čemer so:  $N_{b,Rd,y,i,j}$ ,  $N_{b,Rd,z,i,j}$  računski uklonski nosilnosti obravnavanega elementa paličja glede na  $y$ - $y$  in  $z$ - $z$  os,  $\chi_{y,i,j}$  in  $\chi_{z,i,j}$  pa sta uklonska koeficienta za obe osi.

Strig med betonsko ploščo in jeklenim paličjem:

$$V_{Sd} \leq V_{Rd,p} \quad [\text{kN/cm}] \quad (9)$$

$$V_{Sd} \leq V_{Rd,st} \quad [\text{kN/cm}] \quad (10)$$

$$V_{Rd,p} = \frac{0,2d f_{ck}}{\gamma_c} \quad [\text{kN/cm}] \quad (11)$$

$$V_{Rd,st} = \frac{0,2(2h_{st} + d_{st})f_{ck}}{\gamma_c} \quad [\text{kN/cm}] \quad (12)$$

pri čemer so:  $V_{Sd}$  računski vzdolžna strižna sila na enoto dolžine nosilca,  $V_{Rd,p}$  računski vzdolžna strižna nosilnost betonske plošče na enoto dolžine nosilca,  $V_{Rd,st}$  računski vzdolžna strižna nosilnost betona v okolici moznikov na enoto dolžine nosilca,  $h_{st}$  in  $d_{st}$  pa sta višina in premer valjčnega moznika.

Strižna nosilnost sovprežnega stika:

$$V_i \leq n_{st} P_{Rd,p} \quad [\text{kN}] \quad (13)$$

$$V_i \leq n_{st} P_{Rd,st} \quad [\text{kN}] \quad (14)$$

$$P_{Rd,p} = 0,29d_{st}^2 \frac{1}{\gamma_v} \sqrt{f_{ck} E_{cm}} \quad [\text{kN}] \quad (15)$$

$$P_{Rd,st} = 0,8f_u \frac{\pi d_{st}^2}{4\gamma_v} \quad [\text{kN}] \quad (16)$$

pri čemer so:  $V_i$  računski vzdolžna strižna sila za polovico razpona nosilca,  $P_{Rd,p}$  nosilnost na drobljenje betona v okolici enega moznika,  $P_{Rd,st}$  strižna nosilnost enega moznika,  $n_{st}$  število moznikov do polovice razpona,  $f_u$  natezna trdnost moznika,  $E_{cm}$  sekantni modul elastičnosti betona in  $\gamma_v$  faktor varnosti za moznike.

Pogojne (ne)enačbe za sovprežni palični nosilec pri MSU so:

$$\delta_{\max} \leq \frac{L}{250} \quad [\text{cm}] \quad (17)$$

$$\delta_2 \leq \frac{L}{300} \quad [\text{cm}] \quad (18)$$

$$\delta_{\max} = \delta_{q,0} + \delta_{g,\infty} + \delta_k \quad [\text{cm}] \quad (19)$$

$$\delta_2 = \delta_{q,0} \quad [\text{cm}] \quad (20)$$

$$\delta_{q,0} = \frac{5qL^4}{384E_a I_i} \quad [\text{cm}] \quad (21)$$

$$\delta_{g,\infty} = \frac{5gL^4}{384E_a I_i} \quad [\text{cm}] \quad (22)$$

$$\delta_k = \frac{M_{st} L^2}{8E_a I_k} \quad [\text{cm}] \quad (23)$$

pri čemer so:  $\delta_{q,0}$  vertikalna deformacija sovprežnega paličja zaradi spremenljive obtežbe,  $\delta_{g,\infty}$  končna vertikalna deformacija zaradi lastne teže nosilca z upoštevanjem pojava lezenja betona,  $\delta_k$  vertikalna deformacija zaradi krčenja betona,  $L$  razpon nosilca,  $q$  spremenljiva obtežba na enoto dolžine nosilca,  $g$  lastna teža nosilca na enoto dolžine,  $E_a$  modul elastičnosti jekla,  $I_i$  vztrajnostni moment idealiziranega sovprežnega prereza,  $I_k$  vztrajnostni moment idealiziranega sovprežnega prereza, ki upošteva zmanjšanje modula elastičnosti betona zaradi pojava lezenja,  $I_k$  vztrajnostni moment idealiziranega sovprežnega prereza, ki upošteva zmanjšanje modula elastičnosti betona zaradi pojava krčenja in  $M_{st}$  računski upogibni moment zaradi krčenja betona.

Pri optimiranju konstrukcij se pojavljajo različni kriteriji, po katerih se lahko te optimirajo. V tej raziskavi smo postavili minimizacijo lastnih proizvodnih stroškov kot osnovni kriterij optimi-

$C_c$	Beton C 25/30-C50/60	85.00-120.00	EUR/m <sup>3</sup>
$C_s$	Konstrukcijsko jeklo Fe 360-Fe 510	0.40-0.75	EUR/kg
$C_r$	Armaturno jeklo S 400	0.70	EUR/kg
$C_{st}$	Valjčni moznik	1.20	EUR
$C_{oc}$	Antikorozijski zaščitni premaz	7.50	EUR/m <sup>2</sup>
$C_f$	Protipožarni premaz (F 30)	25.00	EUR/m <sup>2</sup>
$C_{cr}$	Rezanje pločevin	3.00	EUR/m <sup>1</sup>
$C_w$	Varjenje	5.00	EUR/m <sup>1</sup>
$C_p$	Opaževanje	12.00	EUR/m <sup>2</sup>

Preglednica 1 • Vrednosti posameznih stroškov namenske funkcije

ranja sovprežnih sistemov. Namen raziskave je določitev optimalnih geometrijskih in materialnih karakteristik sovprežnih sistemov pri minimizaciji lastnih proizvodnih stroškov, glede na pogoje dimenzioniranja, ki jih predpisujejo standardi Eurocode. Pri razvoju optimizacijskih modelov smo upoštevali betone tlačnih trdnosti od 25 MPa do 50 MPa (C 25/30 do C 50/60) in tri razrede konstrukcijskih jekel Fe 360, Fe 430 in Fe 510. Vhodni podatki vključujejo poleg razpona in koristne obtežbe še šte-

vilo vozlišč in delitev (topologijo) paličnega nosilca. Namensko funkcijo smo oblikovali kot funkcijo lastnih proizvodnih stroškov:

$$\begin{aligned} \min: \text{COST} = & [C_c V_c + C_s \rho_s V_s + & (24) \\ & + C_p \rho_s V_r + C_{st} n_{st} + \\ & + (C_{ac} + C_f) A_{ac, f} + C_{ct} L_{ct} + \\ & + C_w L_w + C_p e L] / (eL) \end{aligned}$$

[EUR/m<sup>2</sup>]

Pri tem *COST* predstavlja lastne izdelavne stroške na m<sup>2</sup> uporabne površine sovprežnega sistema; označbe *C* z indeksom (npr. *C<sub>c</sub>*, *C<sub>s</sub>*

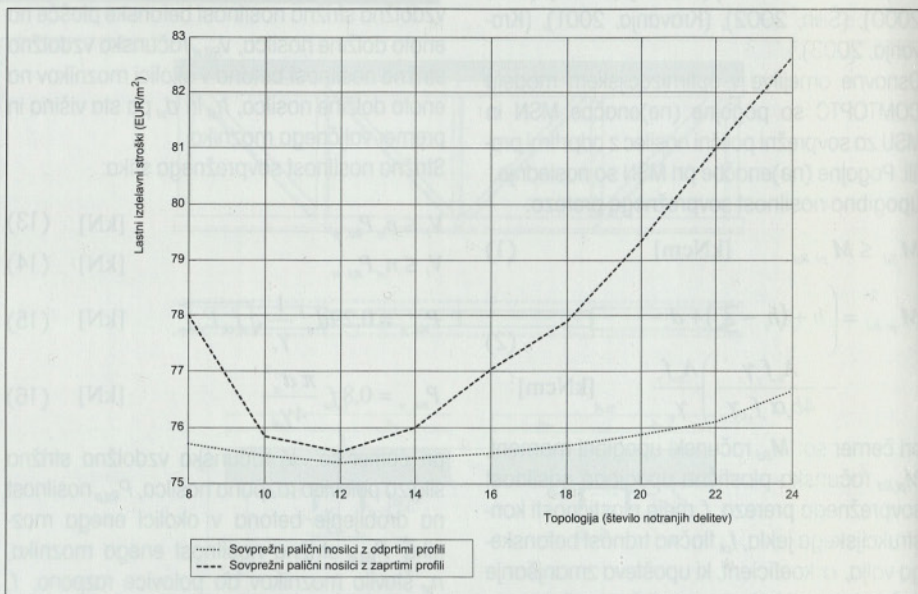
itd.) so materialni stroški in stroški dela, ki so predstavljeni v preglednici 1; označbe *V<sub>c</sub>*, *V<sub>s</sub>* in *V<sub>r</sub>* so volumni betonske plošče, konstrukcijskega jekla in jekla za armaturo; *ρ<sub>s</sub>* je gostota jekla; *n<sub>st</sub>* je število moznikov za en sovprežni nosilec; *A<sub>ac, f</sub>* je izpostavljena površina jeklenih delov za antikorozijsko in požarno zaščito; *L<sub>ct</sub>* skupna dolžina rezanja pločevin; *L<sub>w</sub>* je skupna dolžina zvarov; *e* predstavlja razdaljo med jeklenimi nosilci in označba *L* razpon sovprežnih nosilcev.

## 6 • PRIMERJAVA REZULTATOV

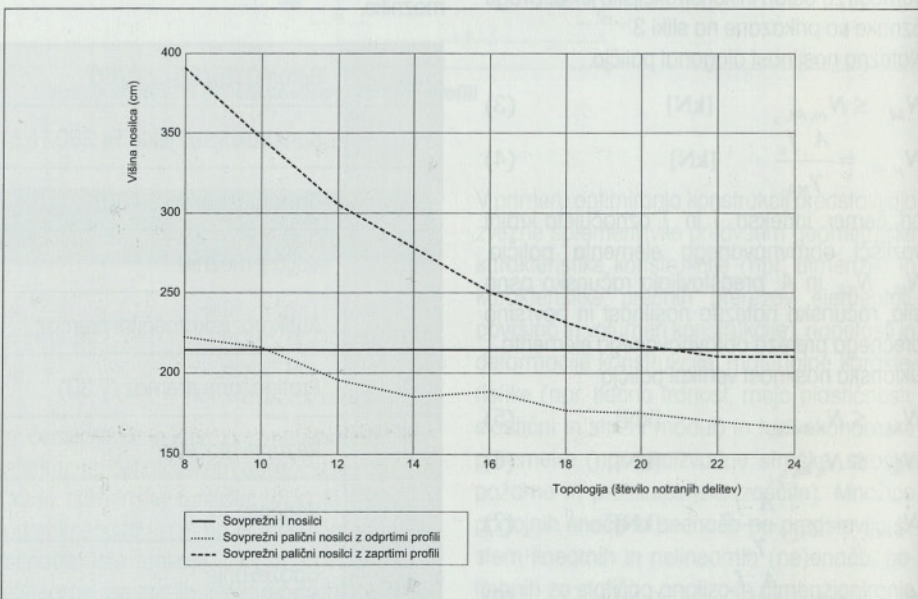
Optimiranje konstrukcij smo izvedli za vse tri predstavljene sisteme prostoležečih sovprežnih nosilcev za razpone od 10 do 40 m s korakom 5 m. Sovprežni nosilci so bili obremenjeni z lastno težo in s spremenljivo obtežbo 5 kN/m<sup>2</sup>. Lastna teža vsakega posameznega nosilca je odvisna od njegovega optimalnega prečnega prereza in je avtomatično izračunana v procesu optimiranja. Topologija sovprežnega paličnega nosilca (število notranjih delitev paličja) je bila fiksna v vsaki posamezni optimizaciji nosilca. Pri tem smo izvedli ločene optimizacije za različne razpone sovprežnih nosilcev pri definirani koristni obtežbi in za različne topologije. Med dobljenimi rešitvami smo izbrali tisto, pri kateri smo dobili najmanjše lastne izdelavne stroške konstrukcije in s tem optimalno topologijo.

Slika 4 prikazuje odvisnost optimalnih lastnih izdelavnih stroškov od topologije za sovprežni palični nosilec z zaprtimi profili in za sovprežni palični nosilec z odprtimi profili pri razponu 30 m in spremenljivi obtežbi 5 kN/m<sup>2</sup>. Vidimo, da sta v tem primeru oba sovprežna sistema dosegla minimalne izdelavne stroške pri optimalni topologiji 12 notranjih delitev.

Topologija paličja ima velik vpliv tudi na višino nosilca. Odvisnost višine optimalnega sovprežnega nosilca od števila delitev paličja pri razponu 30 m in spremenljivi obtežbi 5 kN/m<sup>2</sup> je prikazana na sliki 5. Iz analize rezultatov je razvidno, da lahko s povečanjem števila notranjih delitev paličnega nosilca bistveno zmanjšamo višino nosilca. Za obravnavani razpon in podano koristno obtežbo se izkaže, da so najugodnejši sovprežni palični nosilci z odprtimi profili. Pri topologijah z več kot 10 notranjimi delitvami je višina sovprežnega paličnega nosilca z odprtimi profili bistveno nižja od višin ostalih dveh tipov sovprežnih nosilcev.



Slika 4 • Minimalni lastni izdelavni stroški v odvisnosti od topologije

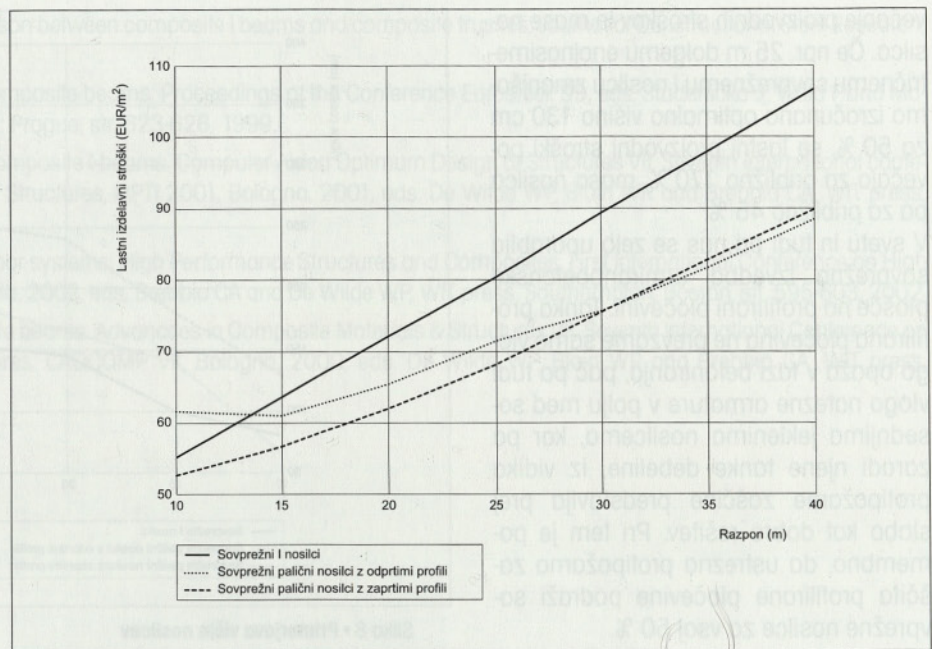


Slika 5 • Višina nosilca v odvisnosti od topologije



Iz slike 6 je razvidno, da so sovprežni palični nosilci z vidika lastnih izdelavnih stroškov primernejši od sovprežnih I nosilcev za vse obravnavane razpone pri dani spremenljivi obtežbi. Razlika v stroških narašča s povečevanjem razpona. Za razpone od 10 do 30 m so ekonomsko najugodnejši sovprežni palični nosilci z zaprtimi profili, pri obravnavanih razponih nad 30 m pa so najprimernejši sovprežni palični nosilci z odprtimi profili. Na ekonomsko razmejitev med paličnima sistemoma najbolj vplivajo materialni stroški jekla. Pri razponih od 10 do 30 m širok asortiment zaprtih profilov omogoča boljšo izkoriščenost paličja in s tem manjšo porabo jekla. Ob tem se pri dobljeni manjši medsebojni razdalji jeklenih nosilcev zmanjša tudi debelina betonske plošče. Pri teh razponih zaradi bistveno slabšega asortimenta odprtih UPE profilov le-ti niso dobro izkoriščeni, kar povečuje maso in stroške jekla. Razdalja med UPE paličji se poveča (paličje lahko nosi veliko večjo težo betona), kar pa poveča debelino betonske plošče. Šele pri razponih nad 30 m je jekleno paličje iz UPE profilov optimalno izkoriščeno, tedaj pa se izkaže nižja cena UPE profilov v primerjavi z zaprtimi profili.

Izdelavni stroški so tesno povezani z maso nosilca. Iz analize rezultatov za



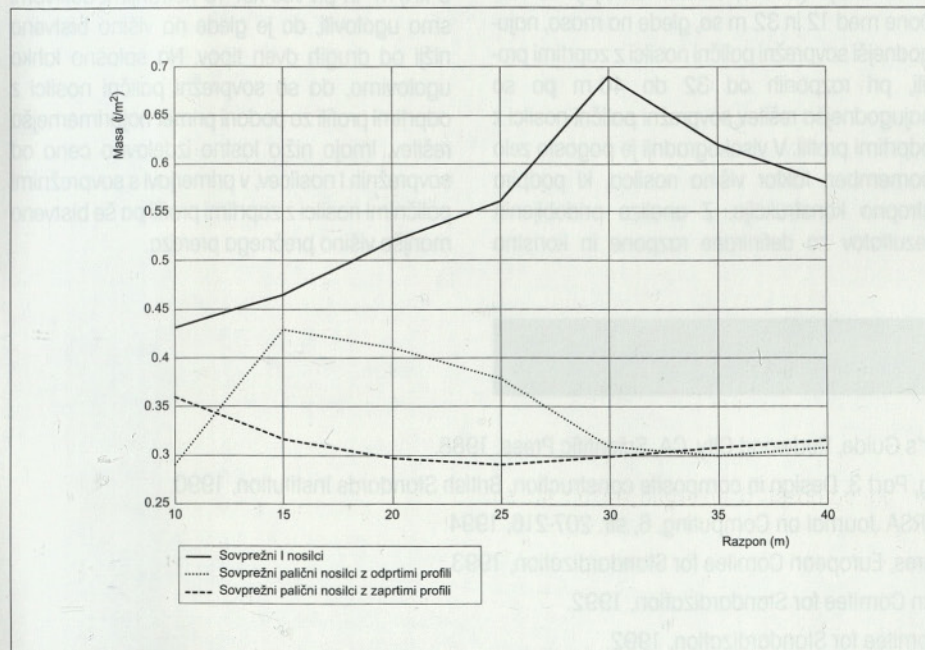
Slika 6 • Primerjava minimalnih lastnih izdelavnih stroškov

razpone med 10 in 40 m pri spremenljivi obtežbi  $5 \text{ kN/m}^2$  lahko ugotovimo, da so sovprežni I nosilci pri minimalnih lastnih izdelavnih stroških bistveno težji od sovprežnih paličnih nosilcev. Iz slike 7 je razvidno tudi, da so sovprežni palični nosilci z odprtimi profili pri minimalnih lastnih izdelavnih stroških težji od sovprežnih pa-

ličnih nosilcev z zaprtimi profili pri razponih od 12 do 32 m.

Iz slike 8 je razvidno, da imajo sovprežni palični nosilci pri minimalnih lastnih izdelavnih stroških večjo višino prečnega prereza v primerjavi s sovprežnimi I nosilci pri skoraj vseh obravnavanih razponih. Razvidno je, da so pri tem sovprežni palični nosilci z odprtimi profili ugodnejši od sovprežnih nosilcev z zaprtimi profili, ker so pri enakem razponu bistveno nižji.

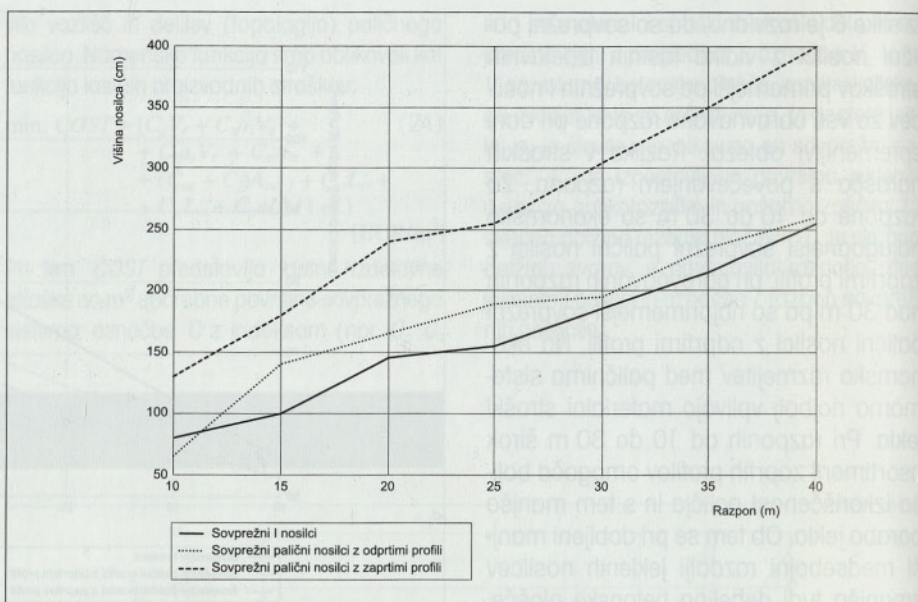
Sovprežni I nosilci, obravnavani v tej raziskavi, so sestavljeni iz varjenih dvojnosiometričnih jeklenih I prerezov predvsem zaradi stroškovne podobnosti s standardnimi vroče valjanimi I profili, ki pridejo v poštev pri manjših in srednjih razponih. Optimizacija je pokazala zelo majhno, skorajda zanemarljivo zmanjšanje optimalnih stroškov v prid enojnosimetričnih prerezov. Enojnosiometrične prereze je zato smiselno uporabiti predvsem takrat, kadar je potrebno znižati višino prečnega prereza nosilca v medetažnih konstrukcijah. Ob tem je potrebno povedati, da je bilo to optimiranje izvedeno na nivoju konstrukcijskega elementa, bistveni vplivi višine nosilca na porast stroškov pa se pokažejo šele ob optimiranju na nivoju celotnega objekta, kar pa ni predmet te raziskave. Omejevanje/znižanje višine prečnega prereza bistveno vpliva na po-



Slika 7 • Primerjava mas pri optimalni geometriji nosilcev

večanje proizvodnih stroškov in mase nosilca. Če npr. 25 m dolgemu enojnosimetričnemu sovprežnemu I nosilcu zmanjšamo izračunano optimalno višino 130 cm za 50 %, se lastni proizvodni stroški povečajo za približno 170 %, masa nosilca pa za približno 45 %.

V svetu in tudi pri nas se zelo uporablja sovprežna izvedba armiranobetonske plošče na profilirani pločevini. Tanka profilirana pločevina ne prevzame samo vlogo opaža v fazi betoniranja, pač pa tudi vlogo natezne armature v polju med sosednjima jeklenima nosilcema, kar pa zaradi njene tanke debeline, iz vidika protipožarne zaščine predstavlja prejšlo kot dobro rešitev. Pri tem je pomembno, da ustrezna protipožarna zaščita profilirane pločevine podraži sovprežne nosilce za vsaj 50 %.



Slika 8 • Primerjava višin nosilcev

## 7 • SKLEP

Namen opravljenega raziskovalnega dela je bila medsebojna primerjava in ugotovitev prednosti vsakega izmed treh različnih prostoležečih sovprežnih sistemov: sovprežnih I nosilcev, sovprežnih paličnih nosilcev z zaprtimi profili in sovprežnih paličnih nosilcev z odprtimi profili. Pri tem smo s pomočjo NLP prišli do optimalnih rešitev (minimalnih lastnih izdelavnih stroškov, geometrijskih karakteristik, materiala,) za vsak posamezni sovprežni sistem glede na ekonomsko namensko funkcijo. Primerjava rezultatov je bila izvedena za prostoležeče sovprežne nosilce z razponi med 10 in 40 m pri koristni obtežbi 5 kN/m<sup>2</sup>.

Po primerjavi pridobljenih rezultatov lahko ugotovimo, da so sovprežni palični nosilci za razpone med 10 in 40 m pri koristni obtežbi

5 kN/m<sup>2</sup> ekonomsko bolj primerna rešitev od sovprežnih I nosilcev. Izkaže se, da so za razpone nad 30 m pri obravnavani koristni obtežbi najbolj ugodni sovprežni palični nosilci z odprtimi profili. S primerjavo mas optimalnih sovprežnih nosilcev smo ugotovili, da so sovprežni I nosilci težji od sovprežnih paličnih nosilcev, kar ima lahko pomemben vpliv na ceno podporne konstrukcije (zidove, stebre, temelje). Za razpone med 12 in 32 m so, glede na maso, najugodnejši sovprežni palični nosilci z zaprtimi profili, pri razponih od 32 do 40 m pa so najugodnejša rešitev sovprežni palični nosilci z odprtimi profili. V visokogradnji je pogosto zelo pomemben faktor višina nosilca, ki podpira stropno konstrukcijo. Z analizo pridobljenih rezultatov za definirane razpone in koristno

obtežbo smo ugotovili, da so optimalni sovprežni palični nosilci višji od optimalnih sovprežnih I nosilcev, kar je slabost teh sistemov in lahko bistveno vpliva na ceno zgradbe v celoti. Iz slike 8 je razvidno, da lahko z uporabo odprtih profilov bistveno zmanjšamo višino paličnega nosilca in se tako približamo višini optimalnega sovprežnega I nosilca. Višino sovprežnega paličnega nosilca lahko bistveno zmanjšamo tudi s povečanjem števila notranjih delitev. Za sovprežni palični nosilec z odprtimi profili pri razponu 30 m, spremenljivi obtežbi 5 kN/m<sup>2</sup> in pri več kot 10 notranjimi delitvami smo ugotovili, da je glede na višino bistveno nižji od drugih dveh tipov. Na splošno lahko ugotovimo, da so sovprežni palični nosilci z odprtimi profili za podani primer najprimernejša rešitev. Imajo nižjo lastno izdelavno ceno od sovprežnih I nosilcev, v primerjavi s sovprežnimi paličnimi nosilci z zaprtimi profili pa še bistveno manjšo višino prečnega prereza.

## 8 • LITERATURA

- Brooke, A., Kendrick, D., Meeraus, A., GAMS - A User's Guide, Redwood City, CA, Scientific Press, 1988.  
 BS 5950, The Structural use of steelwork in building, Part 3: Design in composite construction, British Standards Institution, 1990.  
 Drudd, A. S., CONOPT - A Large-Scale GRG Code, ORSA Journal on Computing, 6, str. 207-216, 1994.  
 Eurocode 1: Basis of Design and actions on structures, European Committee for Standardization, 1993.  
 Eurocode 2: Design of concrete structures, European Committee for Standardization, 1992.  
 Eurocode 3: Design of steel structures, European Committee for Standardization, 1992.  
 Eurocode 4: Design of composite structures, European Committee for Standardization, 1992.



# PREDSTAVITEV REZULTATOV EVROPSKEGA PROJEKTA PRODAEC

**as. dr. Matevž Dolenc, univ. dipl. inž. grad.,**

mdolenc@ikpir.fgg.uni-lj.si

**Tomaž Pazlar, univ. dipl. inž. grad.,**

tpazlar@ikpir.fgg.uni-lj.si

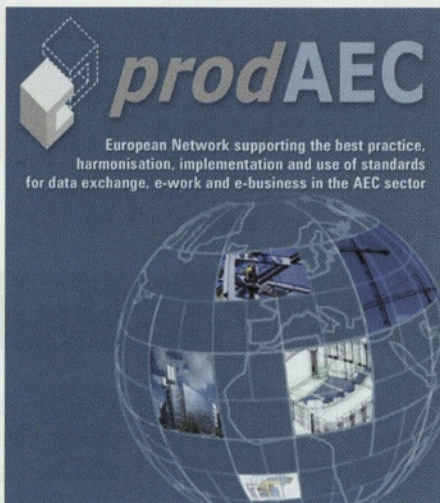
Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2,  
1000 LJUBLJANA

V Londonu je bila 5. in 6. marca 2004 v organizaciji International Alliance for Interoperability (IAI) industrijska promocija projekta prodAEC. Zastopanih je bilo preko 50 organizacij iz 13-ih držav. „Eden izmed pglavitnih ciljev projekta prodAEC je z uvajanjem in implementacijo standardov s področja informacijskih in komunikacijskih tehnologij (ICT – Information and Communication Technology) povečati konkurenčnost majhnih in srednje velikih podjetij. To bi postavilo omenjena podjetja v enakovreden položaj z velikimi,“ je na srečanju dejal vodja projekta prodAEC Manuel Martinez (AIDICO, Španija).

Osveščenost o standardih za izmenjavo informacij je med majhnimi in srednje velikimi podjetji še skromna. Ta ugotovitev temelji na rezultatih raziskave, ki je bila izpeljana v okviru dvoletnega evropskega projekta prodAEC (predstavljen v Gradbenem vestniku 8/2003) katerega cilji so promocija, razvoj in pomoč pri uvajanju standardov v področje AEC. Standardi – kjer obstojajo – se praviloma pojavljajo le na nacionalni ravni, nivo izmenjave podatkov med aplikacijami pa je še vedno skromen. Podobno velja za uporabo 3D modeliranja v praksi.

V industrijski panogi, kjer se izmenjuje velika količina podatkov, je standardizacija njihove izmenjave velikega pomena. Wolfgang Haas (Haas + Partner Engineering, Nemčija) je navedel, da se je v Nemčiji izmenjava 2D podatkov v desetih letih povečala za 100-krat. Dodatno je citiral prispevek DFX News, kjer je bila podana ocena o letni izgubi 1,8 milijard EUR zaradi neurejenega področja izmenjave podatkov.

Osveščenost in uporaba splošnih standardov ICT se razlikuje po posameznih državah. Vsekakor je nujno potrebno poskrbeti za promocijo in usklajevanje standardov v evropskem prostoru. V ta namen je bilo v okviru projekta prodAEC razvitih več orodij. Prvo izmed njih je ProMAP – spletna različica splošne



procesne matrike, s pomočjo katere uporabniki lahko ustvarijo za svoj projekt specifično matriko. „Sam proces je ravno tako pomemben kot podatki in ga nikakor se smemo zane-mariti,“ je poudaril Jeffrey Wix (Jeffrey Wix Counselling in AEC3), eden izmed ustanovnih članov projekta.

Rezultat projekta je tudi brezplačni servis spletne ankete, ki je prevedena v več jezikov. Servis je namenjen podjetjem, ki želijo primerjati stopnjo uporabe ter osveščenosti o ICT. Namen tretjega orodja, spletne AEC IT projektne baze je dolgoročno vzpostavitev pregleda nad evropskim AEC sektorjem, ki omogoča dostop do informacij o posameznih projektih, strokovnjakovih za določena področja ter drugih statističnih podatkih.

„Upamo, da bomo v treh do štirih letih postali prvi vir informacij za tiste, ki iščejo smernice pri razvoju ter uvajanju ICT v AEC sektorju,“ je zaključil Martinez. „Toda kljub uspešnemu projektu prodAEC ter uspešni predstavitvi rezultatov projekta na industrijski promociji, je potrebno še veliko dela.“

Christopher Groome, poslovni manager podjetja IAI, v okviru katerega se razvija Industry

Foundation Classes (IFC) standard, in ki je organiziralo industrijsko promocijo projekta, je postavil rezultate projekta prodAEC-a v širši okvir: „Navori usklajevanja standardov ter uvajanja ICT v podjetja bodo uspešni le v primeru, če bodo pripeljali do oprijemljivih pozitivnih ekonomskih rezultatov.“

## OPOMBI

1. Projekt prodAEC predstavlja evropsko mrežo za pospeševanje dobre prakse, harmonizacije, implementacije in uporabe standardov za izmenjavo podatkov, za e-delo in e-poslovanje v AEC sektorju. Dvoletni projekt, financiran s strani Evropske skupnosti, se bo sicer zaključil aprila 2004, vendar pa bodo razvita orodja živele še naprej. Ustanovni člani projekta so AEC, AIDICO, Antara, BIC Toscana, CSTB, H&P, Stabau, Taylor Woodrow, TU Dresden, Univerza v Lyonu, Univerza v Ljubljani, Univerza, VTT.

2. Ocena osveščenosti in uporabe ITC, omenjena v prvem odstavku, temelji na rezultatih prodAEC servisa spletne ankete.

## NADALJNJE INFORMACIJE O PROJEKTU:

- spletna stran projekta prodAEC:  
[www.prodaec.net](http://www.prodaec.net)
- Manuel Martinez, vodja projekta prodAEC,  
Tel: +34 96 131 82 78  
Fax: +34 96 131 80 33  
Mobile: +34 66 073 87 50  
Email: manuel.martinez@aidico.es
- Christopher Groome, IAI UK,  
Tel: +44 1536 526429  
Fax: +44 1536 526430  
Mobile: +44 7973 638742  
Email: chris.groome@b-r-t.co.uk
- Beryl Garcka, IAI UK,  
Tel/Fax: +44 20 8660 1631:  
Email: beryl.garcka@b-r-t.co.uk

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

SEMINAR		IZPIT		
Časovni termin		Osnovni in dopolnilni	Revidiranje	ZGO - C
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«!)

K seminarju vabimo tudi kandidate drugih inženirskih strok, ki se lahko pridružijo predavanjem iz splošnega dela programa.

**Cena** za udeležence **seminarja** po izpitnih programih 1., 2. in 3. točke znaša 102.000,00 SIT z DDV, po izpitnem programu 4. točke in za splošni del programa 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 udeleženc...). Prijavo v obliki dopisa je potrebno poslati organizatorju (ZDGITS) najkasneje 15 dni pred pričetkom določenega seminarja in zraven poslati kopijo dokazila o plačilu kotizacije.

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. 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 09.00 do 13.00 ure.

## NOVI DIPLOMANTI GRADBENIŠTVA

### UNIVERZA V LJUBLJANI, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJO

#### VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

**Bojan Žvanut**, Analiza proizvodnega obrata "GOBI" za potrebe planiranja proizvodnje, mentor doc. dr. Dušan Zupančič, somentor asist. mag. Aleksander Srdić

**Andrej Žnidaršič**, Idejna študija odvajanja in čiščenja komunalnih odpadnih voda iz Kočanske kotline s cenovno analizo, mentor doc. dr. Jože Panjan

#### UNIVERZITETNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

**Aleš Janežič**, Analiza vozlišč paličnih konstrukcij iz okroglih in kvadratnih cevi, mentor prof. dr. Darko Beg

**Matjaž Filič**, Projektiranje tankih armiranobetonskih lupin, mentor doc. dr. Boštjan Brank

**Gregor Šuligoj**, Prevod standarda prEN 1991-1-3 in možnosti elektronske objave v XML in hipertekstu, mentor prof. dr. Janez Duhovnik, somentor as. dr. Tomo Cerovšek

**Rok Pirnat**, Rekonstrukcija viadukta Peračica, mentor prof. dr. Darko Beg, somentor Gregor Gruden

#### UNIVERZITETNI ŠTUDIJ VODARSTVA IN KOMUNALNEGA INŽENIRSTVA

**Jernej Iskra**, Primerjava praks zaščite površinskih in kraških vodnih virov in obdelave surove vode v nekaterih karakterističnih državah po svetu, mentor izr. prof. dr. Boris Kompore

**Denis Kosec**, Adsorpcija pri čiščenju odpadnih voda in razlitjih nevarnih snovi v okolje, mentor doc. dr. Jože Panjan

**Robert Plestenjak**, Matematično modeliranje čistilne naprave za

odpadne vode – primer ČN Kasaze, mentor izr. prof. dr. Boris Kompore, somentorica asist. mag. Nataša Atanasova  
**Janja Ravnikar**, Odstranjevanje parazitov v kraških pitnih vodah, mentor izr. prof. dr. Boris Kompore

### UNIVERZA V MARIBORU, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO

#### VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

**Robert Deutsch**, Analiza in dimenzioniranje konstrukcijskih elementov osnovne šole, mentor pred. Milan Kuhta, somentor mag. Simon Šilih

**Peter Kolenc**, Idejni projekt dvoetažnega montažnega lesenega objekta, mentor doc. dr. Miroslav Premrov, somentor viš. pred. mag. Peter Dobrila

**Peter Rušnik**, Vrednotenje pravilnika o pripravi prostorskih sestavin dolgoročnih in srednjeročnih družbenih planov občin v digitalni obliki, mentor pred. Uroš Lobnik, somentorica Frančiška Kočar

**Bojan Vogrinec**, Hidrotehnični in cestni objekti Rimljanov, mentor pred. Milan Kuhta, somentorica Daniela Dvornik Perhavec

#### UNIVERZITETNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

**Davorin Dovečar**, Metode merjenja deformacij konstrukcijskega elementa montažne hale PAB – Stavbar, mentor doc. dr. Boštjan Kovačič, somentor doc. dr. Miroslav Premrov

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

## KOLENDAR PRIREDITEV

**5.5.2004**

**Zakonsko predpisana dokazila za dajanje proizvodov iz jekel, ki se vgrajujejo v gradbene objekte, na trg in v uporabo**

ZAG, Dimičeva 12, Ljubljana  
mirjam.leban@zag.si

**22.5. - 27.5.2004**

**World Tunnel Congress 2004**

Singapur, Singapur  
www.tucss.com/wtc2004  
http://wtc2004@tucss.com

**24.5. - 28.5.2004**

**MIPRO 2004**

Opatija, Hrvaška  
www.mipro.hr  
mipro@ri.htnet.hr

**31.5.2004**

**11. Slovenski kolokvij o betonih  
Grajenje z betoni visokih zmogljivosti**

Ljubljana, Slovenija  
www2.arnes.si/~ljirma1/

**2.6. - 4.6.2004**

**International Congress on Polymers in Concrete  
(ICPIC '04)**

Berlin, Nemčija  
www.icpic.bam.de

**9.6. - 11.6.2004**

**4. Posvetovanje slovenskih geotehnikov  
in 5. Šukljetov dan**

Rogaška Slatina, Slovenija

**14.6. - 17.6.2004**

**8th World Conference on Timber Engineering**

Lahti, Finska  
www.ril.fi/wcte2004  
kaisa.vanalainen@ril.fi

**23.6. - 25.6.2004**

**OTUA Symposium 2004: Steel Bridges Conference**

Millau, Francija  
www.otua.org/millau  
wasoodev.hoorpah@otua.ffa.fr

**24.6. - 26.6.2004**

**Bridges across the Danube- Bridges in Danube Basin**

Novi Sad, Srbija in Črna Gora

**27.6. - 30.6.2004**

**4th International Conference on Concrete Under Severe Conditions: Environment and Loading**

Seoul, Južna Koreja  
http://conlab.snu.ac.kr/consec04/

**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  
mailbox@its-uk.org.uk

**18.7. - 23.7.2004**

**Composite Construction V International Conference**

Mpumalanga, Južna Afrika  
www.engconfintl.org/4ab.html  
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  
13wcee@venuewest.com

**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  
patloots@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

**20.9. - 22.9.2004**

**6th RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes BEFIB' 2004**

Varenna - Lecco, Italija  
www.lecco.polimi.it/befib04.htm

**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 Kristijan Juteršek, ki sprejema predloge za objavo na e-naslov: [msg@izs.si](mailto:msg@izs.si)

# CMC *celje*

**CESTE MOSTOVI CELJE d.d.**  
*Družba za nizke in visoke gradnje*

## Program nizke gradnje:

- ceste
- komunalni vodi
- športno rekreacijski objekti
- zunanje ureditve

## Program mostovi, viadukti, visoke gradnje:

- mostovi
- viadukti
- objekti visokih gradenj

## Proizvodnja izdelkov in gradbenih materialov:

- asfaltne zmesi
- cementni betoni in stabilizacijske mešanice
- kamniti materiali, drobljenci, lomljenec
- polimerni modificirani bitumni
- apnenčevo mikro polnilo - apnenčeva moka
- oprema za zimsko službo
- vzdrževanje cest
- kovinski izdelki

## Storitve:

- prevozne storitve
- strojne storitve
- vzdrževanje delovnih sredstev
- laboratorijske preiskave asfaltnih zmesi, cementno betonskih mešanic in zemljin

