

# GRADBENI VESTNIK

GLASILO  
ZVEZE DRUŠTEV  
GRADBENIH  
INŽENIRJEV  
IN TEHNIKOV  
SLOVENIJE



**1 - 2**  
**1 9 9 9**

**Glavni in odgovorni urednik:**

---

Franc ČAČOVIČ

**Lektor:**

---

Alenka RAIČ – BLAŽIČ

**Tehnični urednik:**

---

Danijel TUDJINA

**Uredniški odbor:**

---

Sergej BUBNOV  
mag. Gojmir ČERNE  
prof. dr. Miha TOMAŽEVIČ  
dr. Ivan JECELJ  
Andrej KOMEL  
Stane PAVLIN  
dr. Franci STEINMAN

**Tisk:**

---

Tiskarna TONE TOMŠIČ d.d.  
v Ljubljani

Revija izdaja Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije, Ljubljana, Karlovška c. 3, telefon/faks: 061/ 221-587, ob finančni pomoči Ministrstva za znanost in tehnologijo, Gradbenega inštituta ZRMK, Zavoda za gradbeništvo Slovenije, Fakultete za gradbeništvo in geodezijo, Univerze v Ljubljani ter Fakultete za gradbeništvo, Univerze v Mariboru.

Tiska Tiskarna Tone Tomšič, d.d., Ljubljana

Količina: 1000 izv.

Letno izide 12 števil. Individualni naročniki plačajo letno naročnino v višini 2.600 SIT, študentje in upokojenci 1.300 SIT. Gospodarske organizacije in podjetja plačajo letno naročnino za 1 izvod revije 32.000 SIT. Naročnina za naročnike v tujini znaša 100 USD.

Po mnenju Ministrstva RS za kulturo je v ceno vključen prometni davek.

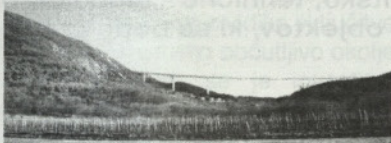
Žiro račun se nahaja pri Agenciji RS za plačilni promet, Enota Ljubljana, številka: 50101-678-47602.

## VSEBINA - CONTENTS

### Članki, študije, razprave Articles, studies, proceedings

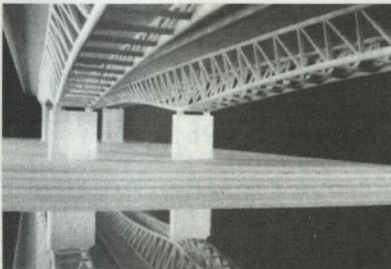
Stran 2  
M. PIPENBAHER, V. MARKELJ, J. KOŽELJ

**VIADUKT ČRNI KAL -  
PREDSTAVITEV  
PRVONAGRAJENE REŠITVE  
PP140**  
VIADUCT ČRNI KAL - PRESENTATION  
OF THE FIRST AWARDED SOLUTION  
PP140



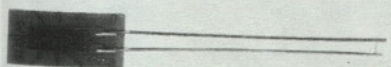
Stran 11  
Viktor MARKELJ

**NEKAJ NOVIH TRENDOV PRI  
SNOVANJU IN GRADNJI  
MOSTOV**  
SOME RECENT DEVELOPMENTS  
IN BRIDGE DESIGN AND  
CONSTRUCTION



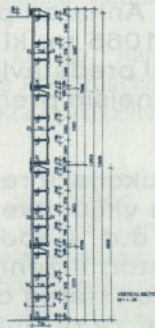
Stran 18  
A. ŠTRUKELJ, V. MARKELJ, G. LIPNIK

**MERITVE NAPENJALNE SILE  
V ZUNANJIH KABLIH  
LEŠNICA PRI ORMOŽU**  
THE MEASUREMENTS OF THE  
PRESTRESSING FORCE IN  
EXTERNAL CABLES OF  
VIADUCT LEŠNICA NEAR  
ORMOŽ



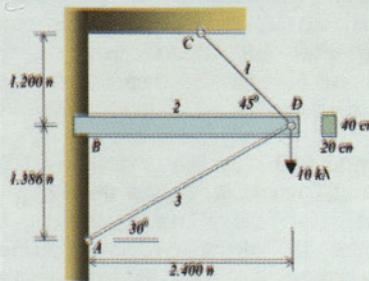
Stran 23  
Stojan KRAVANJA

**OPTIMIRANJE ZAPORNIC  
TUNNEL INTAKE  
BULKHEADS, SULTARTANGI  
HYDROELECTRIC PROJECT  
ISLANDIJA**  
STRUCTURAL OPTIMIZATION OF  
THE TUNNEL INTAKE BULKHEADS,  
SULTARTANGI HYDROELECTRIC  
PROJECT ICELAND



Stran 28  
Branko S. BEDENIK

**RAČUNALNIŠKE  
APLIKACIJE PRI ANALIZI  
KONSTRUKCIJ**  
COMPUTER APPLICATIONS IN  
STRUCTURAL ANALYSIS



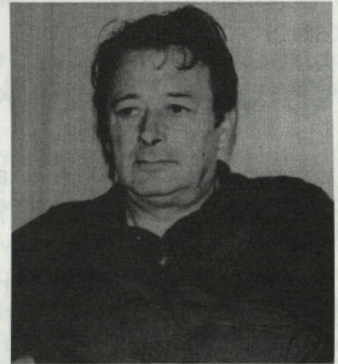
Stran 34  
V. BOSILJKOV, R. ŽARNIČ, M. PREGELJ

**VPLIV NADMERNIH ZRN IN  
RAZLIČNIH MODIFIKACIJ  
MALT NA MEHANSKE  
LASTNOSTI ZIDOVINE**  
INFLUENCE OF THE OVER-SIZED  
GRAINS AND MODIFIED MORTARS  
ON MECHANICAL PROPERTIES OF  
THE MASONRY

### IN MEMORIAM

Stran 40  
A. SLEKOVEC

**FRANC TRATNIK**  
univ. dipl. inž. gradb.



**Poročila, informacije  
Reports, Information**

Stran 42  
FGG

**IZ POROČILA O DELU FGG V  
LETU 1997**  
ORGANIZACIJA UPRAVLJANJA IN  
KADROVSKA STRUKTURA

M. PIPENBAHER, V. MARKELJ, J. KOŽELJ: Viadukt Črni kal

# VIADUKT ČRNI KAL - PREDSTAVITEV PRVONAGRAJENE REŠITVE PP140

## VIADUCT ČRNI KAL - PRESENTATION OF THE FIRST AWARDED SOLUTION PP140

UDK 624.21 : 625.745.1

Marjan PIPENBAHER, Viktor MARKELJ, Janez KOŽELJ

### POVZETEK

V okviru izvedbe avtoceste Koper - Lendava je na odseku Klanec - Ankaran predvidena izgradnja viadukta Črni kal dolžine 1065 m, ki prečka iztekajočo se Osapsko dolino

na višini od 40 do 80 m. Viadukt Črni kal predstavlja projektantsko, tehnično - tehnološko in oblikovalsko enega izmed najzahtevnejših premostitvenih objektov, ki se bodo gradili v Republiki Sloveniji.

Da bi se posodobila optimalna konstrukcijska rešitev objekta tako z vidika stabilnosti, trajnosti in ekonomičnosti kot z vidika vključitve viadukta v krajinsko občutljivo okolje kraškega roba, se je investitor DARS d.d. v sodelovanju z Ministrstvom za promet in zveze, Ministrstvom za okolje in prostor, Inženirsko zbornico Slovenije, Fakulteto za arhitekturo ter obema gradbenima fakultetama odločil, da v skladu z Zakonom o javnih naročilih razpiše državni, javni natečaj za pridobitev idejnih rešitev viadukta Črni kal.

V roku za oddajo del je prispelo 18 natečajnih rešitev, ki so jih izdelale posamezne projektantske skupine, v katerih je bil obvezno vključen arhitekt. Tolikšno število prispelih natečajnih rešitev kaže na to, da je vladalo v slovenski strokovni javnosti veliko zanimanje za sodelovanje na javnem natečaju.

### SUMMARY

Within the construction of the highway Koper - Lendava in the section Klanec - Ankaran the construction of the viaduct Črni kal is foreseen in the length of 1065 m. The

viaduct crosses the valley Osapska dolina at the height from 40 to 80 m. As for the technology and design it represents one of the most pretentious bridging structures to be built in the Republic of Slovenia.

To achieve the optimal structural solution from the standpoint of stability, durability and economy, as well as the best incorporation of the viaduct into the sensitive landscape environment of the karstic border, the Investor DARS in cooperation with the Ministry for traffic and connections, Ministry for environments, The engineering chamber of Slovenia, Faculty for architecture and both civil construction faculties made the decision, in accordance with the Law on public orders to publish the open state invitation for the conceptual solution of the viaduct Črni kal.

Within the appointed time 18 solution were received made by individual design groups, that obligatory included an architect. Such a number of solution shows that among the Slovene professional public there was a great interest for taking part in this public competition.

#### Avtorji:

Marjan PIPENBAHER, univ. dipl. inž. gradb., Inženirski biro PONTING d.o.o., Maribor  
Viktor MARKELJ univ. dipl. inž. gradb., Inženirski biro PONTING d.o.o., Maribor  
Prof. Janez KOŽELJ univ. dipl. inž. arh., Fakulteta za arhitekturo, Ljubljana

## 1.0 UVOD

V okviru izvedbe avtoceste Koper - Lendava je na odseku Klanec - Ankaran predvidena izgradnja viadukta Črni kal, dolžine 1065 m, ki prečka iztekajočo se Osapsko dolino na višini od 40 do 80 m. Viadukt Črni kal predstavlja projektantsko, tehnično - tehnološko in oblikovalsko enega izmed najzahtevnejših premostitvenih objektov, ki se bodo gradili v Republiki Sloveniji.

Da bi se pridobila optimalna konstrukcijska rešitev objekta tako z vidika stabilnosti, trajnosti in ekonomičnosti kot z vidika vključitve viadukta v krajinsko občutljivo okolje kraškega roba, se je investitor DARS d.d. v sodelovanju z Ministrstvom za promet in zveze, Ministrstvom za okolje in prostor, Inženirsko zbornico Slovenije, Fakulteto za arhitekturo ter obema slovenskima gradbenima fakultetama odločil, da v skladu z Zakonom o javnih naročilih razpiše državni, javni natečaj za pridobitev idejnih rešitev viadukta Črni kal.

V roku za oddajo del je prispelo 18 natečajnih rešitev, ki so jih izdelale posamezne projektantske skupine, v katerih je bil obvezno vključen arhitekt. Tolikšno število prispelih natečajnih rešitev kaže na to, da je vladalo v slovenski strokovni javnosti veliko zanimanje za sodelovanje na javnem natečaju.

V skladu z razpisnimi pogoji je 9 članov komisije, ki so jo sestavljali prof. dr. Miran Saje, univ. dipl. inž. gradb. (predsednik), Stane Hribar univ. dipl. inž. gradb., (podpredsednik), prof. dr. Branko Bedenik, univ. dipl. inž. gradb., prof. dr. Milenko Pržulj, univ. dipl. inž. gradb., prof. dr. Matej Fišinger, univ. dipl. inž. gradb., dr. Davorin Gazvoda, univ. dipl. ing. arh., prof. Grega Košak, univ. dipl. ing. arh., Tomaž Medvešček, univ. dipl. ing. arh. ter poročevalci prof. dr. Franci Kržič, univ. dipl. inž. gradb., Ivan Sečkar, univ. dipl. inž. gradb. in

Marko Žitnik, univ. dipl. inž. gradb., pregledali prispele natečajne rešitve in podali pisna poročila.

Ocenjevanje je potekalo na podlagi petih skupnih meril, definiranih v razpisnih pogojih, in sicer:

- upoštevanja posebnosti in izpostavljenosti lokacije
- konstruktivno - tehnoloških meril in kriterija trajnosti konstrukcije
- inventivnosti zasnove, ekonomičnosti in varnosti v fazi uporabe ter v fazi izgradnje viadukta
- eksploatacije viadukta v vseh letnih časih
- meril, ki se nanašajo na oblikovanje konstrukcijskih elementov viadukta in vključitve objekta v okolje.

Komisija za oceno natečajnih rešitev za viadukt Črni kal je v vesplošnem konsenzu konstruktorske, arhitektonske in krajinske stroke, podelila 3 nagrade ter 2 odkupa, pri čemer se je ponovno potrdilo dejstvo, ki je poznano iz snovanja velikih viaduktov in sicer:

da je konstrukcijsko inventivna, statično neoporečna ter oblikovno skladno zasnovana konstrukcija, ki pravilno upošteva morfologijo terena, najprimernejša tudi s stališča vključitve objekta v krajino in ohranjanja naravnega okolja.

## 2.0 OPIS PRVONAGRAJENE NATEČAJNE REŠITVE PP140

### O metodi konstrukcijske in oblikovne zasnove viadukta

Predlog zasnove je izhajal iz predpostavke, da pri tako zahtevni in kompleksni nalogi, kot je zasnova avtocestnega viadukta na krajinsko izpostavljenem in občutljivem območju Črnega kala, ni mogoče uveljaviti ene same načrtovalske doktrine, ki bi lahko temeljila na vnaprej postavljenem spletu vrednostnih izhodišč in izdelanih predstav za usmerjanje procesa konstrukcijskega snovanja in oblikovanja na linearen način.

### NAGRADE IN ODKUPI SO BILI TOREJ PODELJENI NASLEDNJIM NATEČAJNIM REŠITVAM:

**1. nagrada je bila podeljena rešitvi "PP140" z opusom P0548**  
avtorji: Marjan Pipenbaher, Viktor Markelj prof. Janez Kožeij in sodelavci

**znižana 2. nagrada je bila podeljena rešitvi "KAMEN"**  
avtorji: Vukašin Ačanski, Stanislav Goznik, prof. Peter Gabrijelčič, in sodelavci

**znižana 3. nagrada je bila podeljena rešitvi "1-2-1-2-1"**  
avtorji: Leon Gradnik, Saša Dalla Valle, Janez Pelhan, Aleksander Brcar, Miro Čoh

**odkup rešitvi "DMGDL"**  
avtorji: Ivan Lestan, Metod Vidmar, Aleksander Gabršček, Marko Mušič in sodelavci

**odkup rešitvi "35176"**  
avtorji: Jelenko Ačanski, Andrej Zupančič, Jurij Sadar, Boštjan Vuga, in sodelavci

M. PIPENBAHER, V. MARKELJ, J. KOŽELJ: Viadukt Črni kal

V iskanju konstrukcijske in arhitekturne zasnove je bila zato uporabljena integralna metoda celostne optimizacije, ki se v industrijsko najbolj razvitih državah (predvsem Japonska, ZDA, ZRN) uporablja pri razvoju novih izdelkov ter pri zasnovi velikih in s tem investicijsko in tehnološko zahtevnih infrastrukturnih objektov.

Po tej metodi smo sistematično razvijali variante (tudi v uporabljenih materialih) od smiselno najmanjšega do smiselno največjega razpona prekladne konstrukcije (105 - 140 - 180 m in lok z razponom 230 m) in pri tem analizirali spreminjanje odločilnosti med sklopi konstrukcijskih, tehnoloških, oblikovalskih in izvajalskih in ekonomskih meril.

Z večanjem razponov se menjajo razmerja v teži posameznih kriterijev predvsem glede na tehnološke možnosti izvedbe, s čimer se zmanjšuje stopnja oblikovne prilagodljivosti viadukta značilni zgradbi in merilu krajine. Šele s podrobno obdelano primerjalno analizo variant viadukta, ki postavljajo ločnice med menami odločilnosti posameznih vidikov, se je dalo bolj izostriti kriterije presojanja.

V tem smislu postavljene in obdelane variantne rešitve viadukta so se med seboj dejansko same ovrednotile.

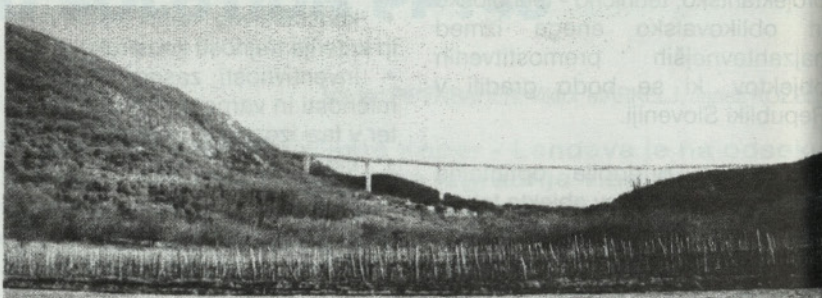
Podobno temu tudi izhodišča za oblikovanje niso bila postavljena vnaprej in izločena iz procesa vrednotenja. Tako smo se izognili problemu vzporedne obravnave oblikovnih vprašanj pri zasnovi konstrukcije viadukta, kot so usklajevanje konstrukcije z obliko ali obratno, naknadno "lepšanje" konstrukcije in še posebej preoblikovanje (overdesign), ko lahko konstrukcijsko pogojene oblike izgubijo svojo strukturno prilagojenost in postanejo dekorativne. Da je bil pristop pravilen je najlepše razvidno iz končnega poročila strokovne

komisije za ocenitev natečajnih rešitev za Viadukt Črni kal, v katerem piše:

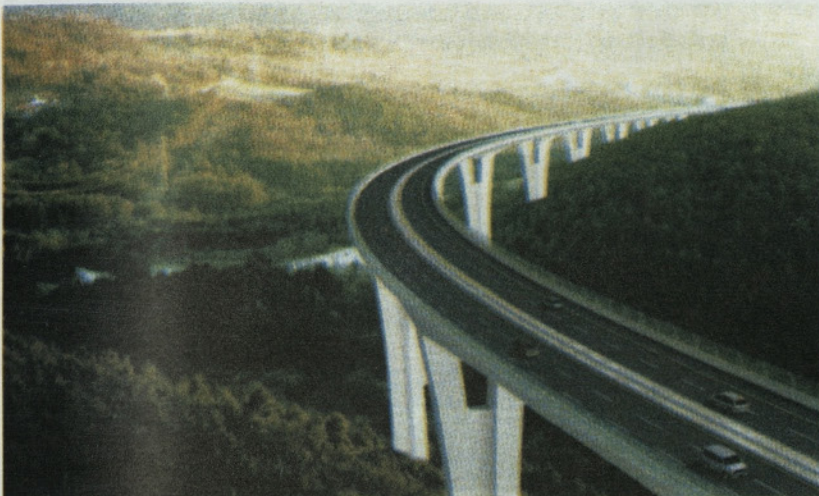
Prva nagrada je bila podeljena rešitvi PP140 z opusom P0548, ki glede na podano projektno nalogo in merila za vrednotenje, glede jasne, kompletne, visoko strokovne

in prepričljive obdelave rešitve, v primerjavi z ostalimi prispelimi natečajnimi rešitvami najustrezneje rešuje problematiko prehoda čez Osapsko dolino.

Rešitev PP140 je med natečajnimi rešitvami najbolj sprejemljiva v estetskih in konstrukcijskih para-



**Slika 1:** Študija vključitve viadukta v prostor - računalniška fotomontaža, pogled na variantne rešitve viadukta iz Osapske doline, (od zgoraj navzdol: PP140, PP105, PP180 in PL230)



**Slika 2:** Pogled na viadukt Črni kal v smeri proti Kopru - varianta PP-140 (računalniška fotomontaža)

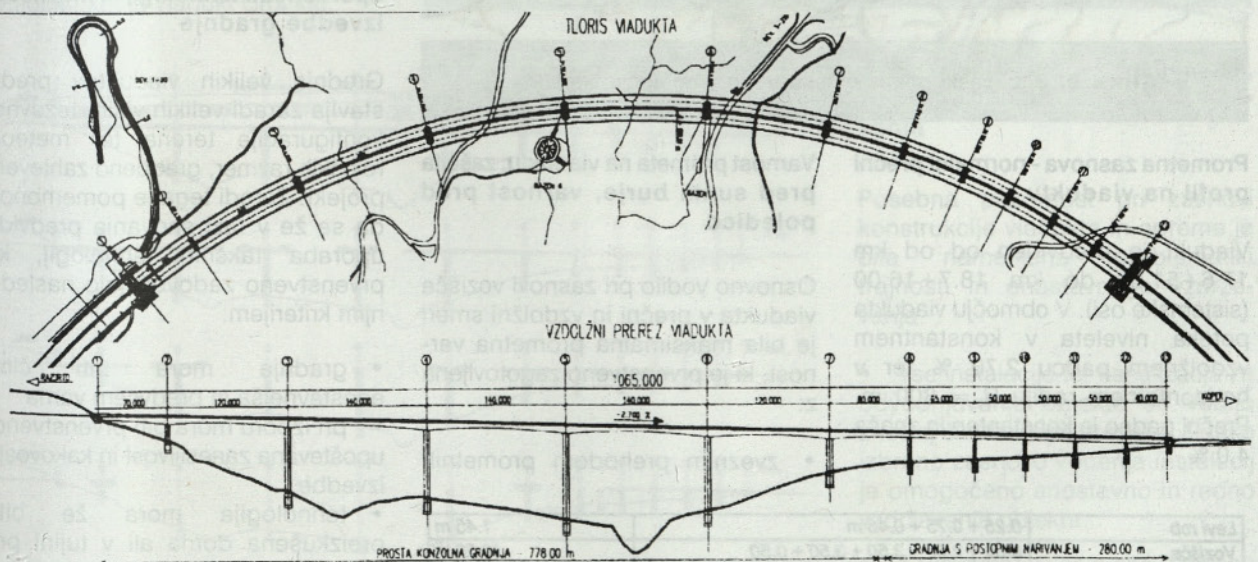
metrih. Prednost natečajne rešitve je v razmerju med razponi ter višino in številom nosilnih stebrov, ki je eno najbolj optimalnih za dano traso bodočega viadukta. Projekti opusa P0548 predstavljajo izjemno analitični in vsestransko konstruktivno - oblikovni pristop postopne optimizacije k občutljivemu problemu viaduktna premostitve in v različnosti razponov in konstrukcij primerjalno ponujajo oblikovne in cenovne alternative.

Viadukt Črni kal prečka dolino v horizontalnem radiju 800 m na višini od ca. 10 - 87 m z glavnimi razponi dolžine 140 m. S tako izbranimi razponi premostitve doline je dosežena optimalna proporcija okna v krajini, ki se približa zlatemu rezu, vertikalna komponenta viadukta pa se preusmeri v horizontalno, tako da ostane poudarjena kontinuirana horizontalna linija nadaljevanja avtoceste. Horizontalno zleknjena oblika

viadukta deluje v pokrajini enotno in umirjeno. Ustvari se vtis, kot da viadukt v obvladano počasnem ritmu zraste iz pobočja in se iztegne v pokrajino ter hitro izteče v useke.

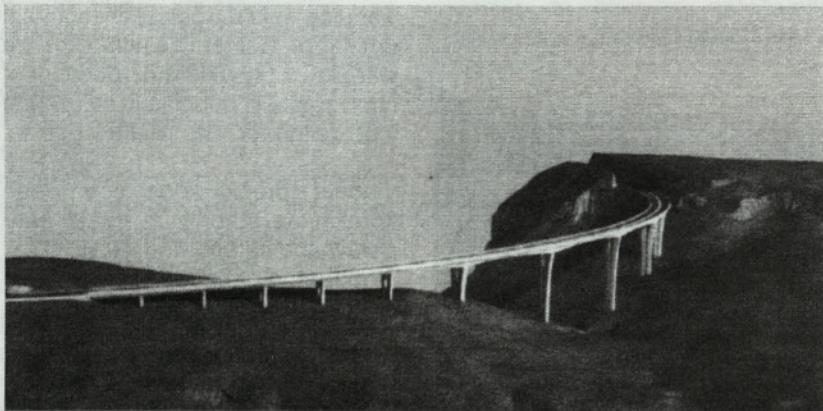
Viadukt prečka dolino v petih korakih na stebrih, ki imajo pete poravnane na približno isti višini kar še dodatno prispeva k umirjenemu prehodu. Močnejša, vutasta gredna konstrukcija zaznamuje ta. bolj zračen prehod doline, medtem ko je tanjša ravna greda umerjena s krajšimi stebri v sekvenci iztekanja viadukta. Tako se viadukt pri prehodu prek doline ujame z različnimi krajinskimi situacijami.

Večjo skladnost sicer sestavljene celote viadukta ustvarjajo mehke linije, ki se iz krivulje cestne osi izvijajo v plitve vute in nato v mehko razvejene stebre. Podobna skladnost je ustvarjena tudi v vseh oblikah prereza, ki tudi v najmanjšem elementu spremljajo spreminjanje in potek sil po prerezu. Mehka krakasta oblika stebrov torej ni plod iskanja arhitekturno - organskih oblik samih po sebi, ampak je rezultat premišljene konstruktorske optimizacije in sledenja toku sil.



**Slika 2:** Vzdolžni prerez in tloris viadukta Črni kal, varianta PP140

M. PIPENBAHER, V. MARKELJ, J. KOŽELJ: Viadukt Črni kal



**Slika 4:** Pogled na viadukt v smeri Ljubljane, 3D računalniška simulacija



**Slika 5:** Situacijski prikaz poteka trase v območju viadukta

**Prometna zasnova - normalni prečni profil na viaduktu**

Viadukt je predviden od od km 17.6+51.00 do km 18.7+16.00 (sistemske osi). V območju viadukta poteka niveleta v konstantnem vzdolžnem padcu 2.70 % ter v horizontalnem radiju  $R = 800$  m. Prečni padec je konstanten in znaša 4.0 %.

**Varnost prometa na viaduktu, zaščita pred sunki burje, varnost pred poledico**

Osnovno vodilo pri zasnovi vozišča viadukta v prečni in vzdolžni smeri je bila maksimalna prometna varnost, ki je prvenstveno zagotovljena z:

- zveznim prehodom prometnih

pasov iz trase cestnega telesa na viadukt

- vmesnim ločilnim pasom širine 3.20 m z odbojnima ograjama
- ojačano betonsko odbojno ograjo New Jersey z jekleno cevjo premera 150 mm, skupne višine 1.20 m, ki preprečuje padec vozila z objekta
- protivetrna ograja, ki je 2.60 - 3.0 m visoko nad voziščem in uspešno ščiti vozila pred sunki burje med prehodom čez objekt
- z vidika prometne varnosti na viaduktu je tudi bistveno, da je med proti-vetrno ograjo in betonsko odbojno ograjo predviden hodnik za vzdrževalce
- na konzolnem delu voziščne plošče se vgradijo tipala - avtomatski javljalci poledice, ki so povezani z vzdrževalno službo. Pred viaduktom pa se postavi elektronska tabla s prikazom temperature na vozišču, ki opozarja voznike na možnost poledice.

**Zasnova viaduka z vidika uporabnosti tehnologij in možnosti izvedbe gradnje**

Gradnja velikih viaduktov predstavlja zaradi velikih višin, težavne konfiguracije terena ter meteoroloških razmer, gradbeno zahteven projekt. Zaradi tega je pomembno, da se že v fazi snovanja predvidi uporaba takšnih tehnologij, ki prvenstveno zadovoljujejo naslednjim kriterijem:

- gradnja mora biti čim enostavnejša in predvsem varna
- pri izboru mora biti prvenstveno upoštevana zanesljivost in kakovosti izvedbe
- tehnologija mora že biti preizkušena doma ali v tujini pri gradnji velikih objektov
- tehnologija mora biti ekonomsko konkurenčna
- posegi v prostor zaradi

Levi rob	0.25 + 0.75 + 0.45 m	1.45 m
Vozišče	0.50 + 2.50 + 3.50 + 3.50 + 0.50	10.50 m
Vmesni ločilni pas	0.50 + 2.20 + 0.50	3.20 m
Vozišče	0.50 + 3.50 + 3.50 + 2.50 + 0.50	10.50 m
Desni rob	0.45 + 0.75 + 0.25 m	1.45 m
Skupna širina		27.10 m

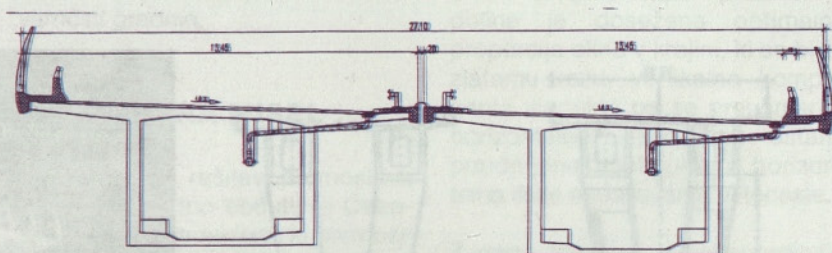




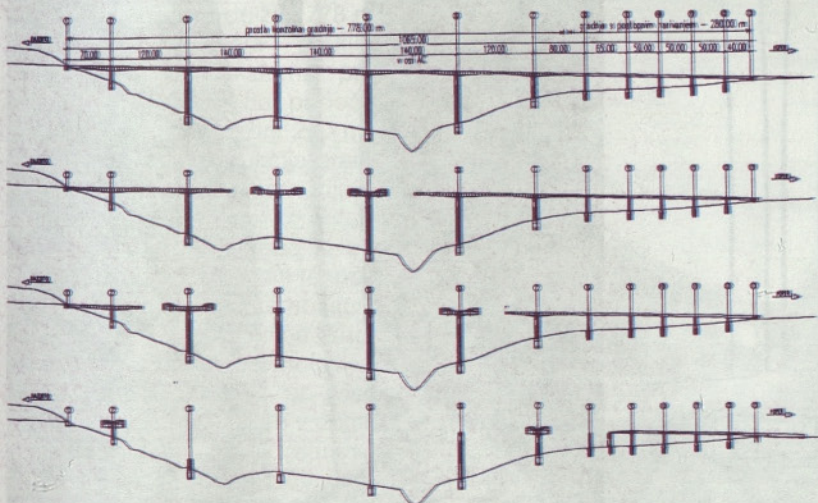
**Slika 6:** Pogled z voziškega sedeža na viaduktu, 3D simulacija)

organizacije gradbišča naj bodo čim manjši.

Tehnologija proste konzolne gradnje, gradnje s postopnim narivanjem ali navlačenjem prekladne konstrukcije izpolnjujejo navedene kriterije, tako da se da z uporabo navedenih tehnologij kakovostno, ekonomsko konkurenčno in v predvidenem pogodbenem roku zgraditi tako velik in zahteven viadukt, kot je viadukt Črni kal.



**Slika 7:** Karakteristični prečni prerez viadukta



**Slika 8:** Shematski načrt prikaza tehnologije gradnje viadukta Črni kal

### Zasnova viadukta z vidika trajnosti, stroškov in enostavnosti vzdrževanja

Posebna pozornost pri zasnovi konstrukcije viadukta in opreme je bila namenjena problematki trajnosti in enostavnega vzdrževanja.

- Vse instalacije ter kanalizacija za odvodnjavanje objekta se vodijo znotraj škatlastega preseka. S tako izbrano zasnovo vodenja instalacij je omogočeno enostavno in redno vzdrževanje objekta.
- Kakovostno zasnovana omejeno prednapeta prekladna betonska konstrukcija, ki se gradi kombinirano po sistemu proste

konzolne gradnje in s postopnim narivanjem, predstavlja optimalno tehnološko rešitev za gradnjo viadukta - tako z vidika hitrosti gradnje kot kakovosti izvedbe, saj so vse tehnologije v Sloveniji že večkrat uporabljene in preizkušene.

- Velika togost in masa prekladne konstrukcije zagotavlja minimalni dinamični vpliv prometa na konstrukcijo (vpliv vibracij je zanemarljiv).

- Kakovostna izvedba betonov, stebrov prednapete betonske prekladne konstrukcije in še posebej finalnih del (hidroizolacija, asfalt) ter detajlov opreme, zagotavlja predpisano trajnost objekta, tako da so ob rednem vzdrževanju stroški za izvedbo

manjših sanacijskih posegov minimalni.

- Za eventualno kasnejšo ojačitev betonske prekladne konstrukcije (v primeru sanacije ali potrebne razširitve objekta) se že v fazi gradnje predvidijo deviatorji, tako da je možna naknadna vgradnja kablov, ki potekajo zunaj betonskega prereza.

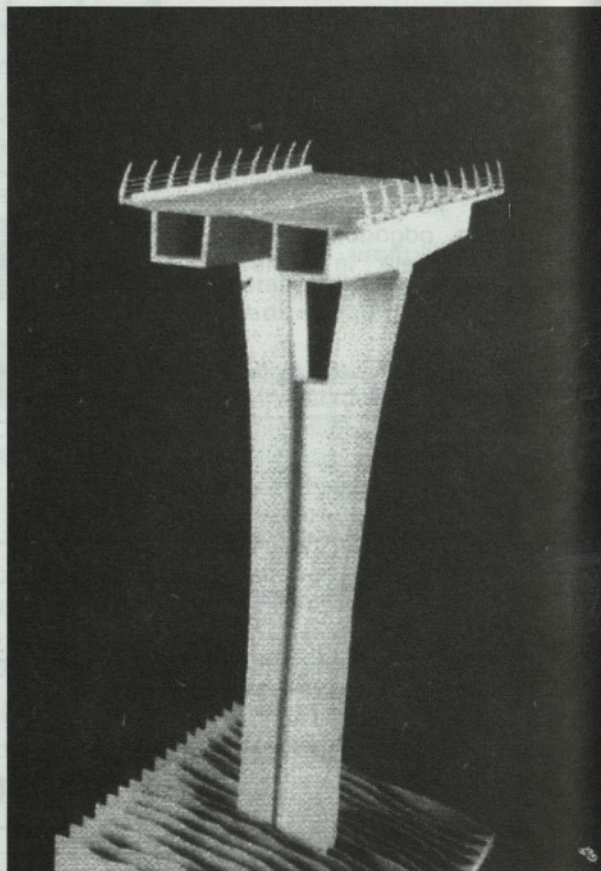
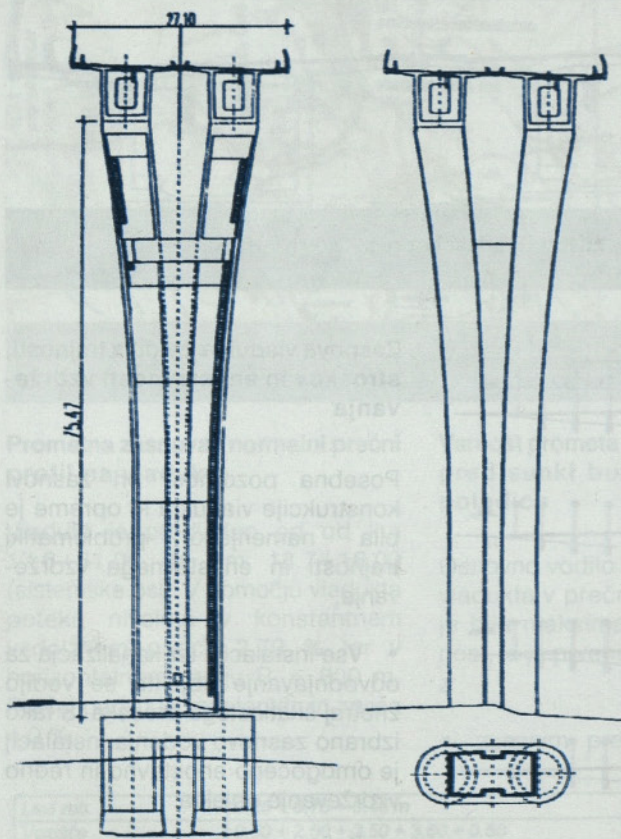
#### Konstruksijska zasnova nagrajene variante viadukta, temeljenja in tehnologija gradnje

Viadukt Črni kal je dolg 1065 m (med osmi krajnih podpor) in je zasnovan kot ena zavorna enota z razponi 70.0 + 120.0 + 140.0 + 140.0 + 140.0 + 120.0 + 80.0 +

65.0 + 3 x 50.0 + 40.0 = 1065 m ter višino stebrov od 9.0 do 87.70 m.

Viadukt sestavljata dve ločeni prekladni konstrukciji, ki potekata kontinuirano prek 12 polj in sta podprti s krakastim stebrom "Y" oblike, tako da stebri skupaj s škatlastima konstrukcijama tvorijo stabilno prostorsko okvirno konstrukcijo.

Voziščno konstrukcijo predstavljata torej 2 vzdolžno omejeno prednapeti betonski škatli širine 6.40 m in spremenljive višine od 3.50 m v polju do 7.00 m nad podporami 3,4,5 in 6. Nad podporama 2 in 7 se prekladna konstrukcija vutasto odebeli na 6.50 m. Voziščna plošča je široka 12.95 m in v prečni smeri



**Slika 9:** Načrt karakteristične vmesne podpore, fotografija makete

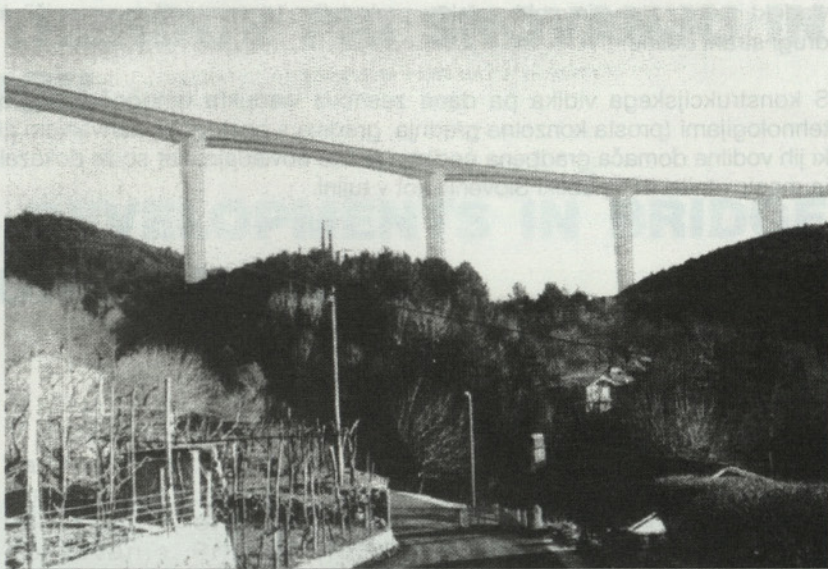
klasično armirana z jeklom za armiranje.

Spodnjo konstrukcijo predstavljata 2 krajna opornika ter 11 vmesnih podpor. Vmesne podpore 3, 4, 5, 6, 7 predstavlja masivnejši - krakasto oblikovani stebel. Škatlasti stebel ima spodaj gabaritne dimenzije 11.0 x 6.50 m in se na višini 15.0 m pod prekladno konstrukcijo razcepi v 2 kraka, ki podpirata ločeni prekladni konstrukciji. Stebri podpor 2, 8, 9, 10, 11, 12 so prav tako krakasto oblikovani, s tem da imajo stebri spodaj gabaritne dimenzije 11.0 x 3.5 m in se enako kot masivnejši stebri, 15.0 m pod prekladno konstrukcijo razcepijo v 2 kraka, ki podpirata ločeni prekladni konstrukciji.

Kraki stebrov podpor 3, 4, 5, 6, 7 so elastično vpeti v prekladno konstrukcijo, na ostalih podporah pa je prekladna konstrukcija povezana s stebri prek prečno nepomičnih, drsnih ležišč. S tako zasnovano konstrukcijo je zagotovljena vertikalna in horizontalna stabilnost viadukta tako v fazi gradnje kot v fazi uporabe. Viadukt je globoko temeljen na vodnjakih in pilotih; izjema je le krajni opornik 1, ki je plitvo temeljen v apnencu.

V območju prehoda globljega dela doline (območje v dolžini 778 m) je predvidena gradnja prekladne konstrukcije po sistemu proste konzolne gradnje, na pobočnem delu viadukta (v dolžini 280 m) pa se prekladna konstrukcija gradi po sistemu postopnega narivanja.

S kombinirano uporabo dveh, v Sloveniji že preizkušenih tehnologij za gradnjo velikih premostitvenih objektov (prosta konzolna gradnja, ki je tehnično - tehnološko in ekonomsko smiselna pri visokih stebrih in večjih razponih v območju globoke doline; gradnja z narivanjem ali navlačenjem z manjšimi razponi pri nižjih stebrih), je za dano zasnovo viadukta dosežen tehnološko - izvedbeni optimum, tako z vidika kakovosti



**Slika 10:** Pogled na viadukt iz vasi Stara Gabrovica, računalniška fotomontaža

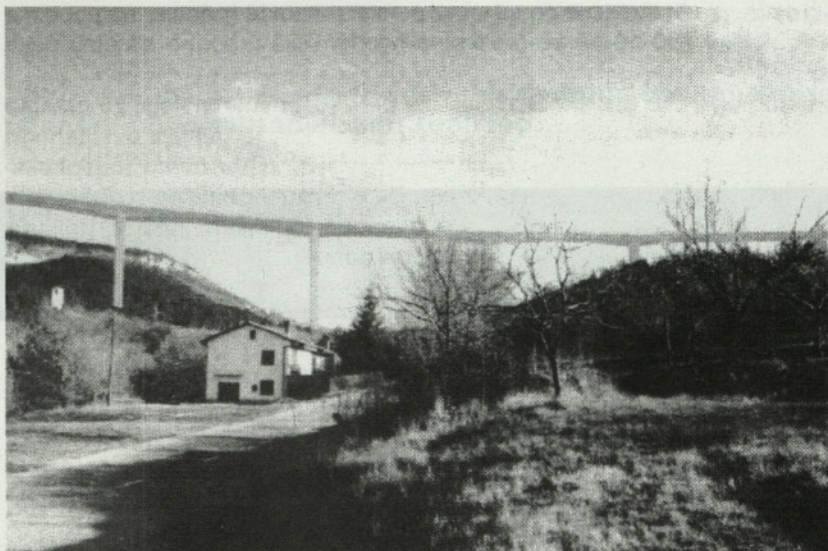
izvedbe objekta kot z vidika roka in varnosti gradnje.

### 3.0 SKLEPNA MISEL

Predstavljena rešitev premostitve krajinsko izredno občutljive Osapske doline z viaduktom, ki premosti dolino s 5 razponi dolžine do 140 m pomeni kakovostno rešitev tako s konstruktorskega kot oblikovalskega stališča.

S tako izbranimi razponi premostitve doline je dosežena optimalna proporcija okna v krajini, ki se bliža zlatemu rezu, vertikalna komponenta viadukta pa se preusmeri v horizontalno, tako da ostane poudarjena kontinuirana horizontalna linija nadaljevanja avtoceste.

Z dano zasnovo in razporeditvijo stebrov, ki oblikovno sledijo toku prenosa sil iz prekladne konstrukcije na temelje, se ustvari vtis, kot da se



**Slika 11:** Pogled na viadukt iz vasi Nova Gabrovica, računalniška fotomontaža

M. PIPENBAHER, V. MARKELJ, J. KOŽELJ: Viadukt Črni kal

viadukt izvije iz stene in mehko zlekne prek doline ter se stanjša v manjših korakih umiri, ko se dotakne pobočja na drugi strani doline.

S konstrukcijskega vidika pa dana zasnova viadukta omogoča izvedbo gradnje z že dobro preizkušenimi tehnologijami (prosta konzolna gradnja, gradnja s postopnim narivanjem ali navlačenjem prekladne konstrukcije), ki jih vodilna domača gradbena podjetja dobro obvladajo, kar so že dokazala z uspešno izgradnjo velikih viaduktov in mostov tako v Republiki Sloveniji kot v tujini.

## LITERATURA

*Natečajne rešitve za Viadukt Črni kal – šifra P0548, Inženirski biro PONTING d.o.o., april 1998*

# NEKAJ NOVIH TRENDOV PRI SNOVANJU IN GRADNJI MOSTOV

## SOME RECENT DEVELOPMENTS IN BRIDGE DESIGN AND CONSTRUCTION

UDK 624.21.012.4 : 625.745.1

Viktor MARKE LJ

### POVZETEK

V prispevku je prikazanih nekaj novosti pri konceptualni zasnovi in oblikovanju mostov in drugih premostitvenih objektov, katerih vzrok je v glavnem večja trajnost objektov, večja konkurenčnost na trgu ali posebno arhitektonsko oblikovanje. Prikazan je razvoj novih shem napenjanja v hibridnih konstrukcijah, omenjene so aplikacije zunanega napenjanja na slovenskih objektih ter nove možnosti zaščite kablov. Naštete so tudi smeri razvoja pri sovprežnih konstrukcijah.

Novosti se uporabljajo tudi v domačih zasnovah, nekaj pa je celo izvedenih.

### SUMMARY

The article presents some recent developments in the conceptual bridge design and construction of bridges, the reason of which are mainly longer durability of structures, better competitive position in the market or special architectural requirements. In the article new schemes of prestressing in hybrid structures are shown, quoted are the applications of external prestressing in Slovene structures and new possibilities of tendon protection. Some tendencies in composite structures are stated as well.

The novelties are being used in the national design, some of them have already been realized.

Avtor:

Viktor MARKE LJ univ. dipl. inž. gradb., Inženirski biro PONTING d.o.o., Maribor

### UVOD

Investicijski cikel, ki ga je pognal program izgradnje avtocest v Sloveniji, je za sabo potegnil razvoj tehnologij in novih znanj tudi na področju gradnje mostov kot dela cestnega gospodarstva. Gledano na časovno fazo lahko gospo-

darjenje s premostitvenimi objekti razdelimo na naslednje faze:

- načrtovanje (od umeščanja v prostor pa do izdelave izvedbene dokumentacije)
- izgradnja (od razpisa in oddaje del do prevzema objekta)
- uporaba (prometna funkcija z rednim vzdrževanjem in tehničnim opazovanjem)
- rehabilitacije (rekonstrukcije, sanacije, ojačitve, razširitve in podobno)
- destrukcija (ukinitve objekta ali zamenjava z novim)

## V. MARKELJ: Novi trendi pri snovanju in gradnji mostov

Vse navedene faze vplivajo ena na drugo, neposredno ali posredno. Načrtovanje in izgradnja neposredno na samo uporabo ter morebitno rehabilitacijo; uporaba in izkušnje iz sanacij objekta pa posredno na zasnovo in izgradnjo novih objektov. S samo destrukcijo premostitvenih objektov imamo v Sloveniji relativno malo izkušenj, saj se, razen nekaj nadvozov ter manjših mostov, še nismo lotili odstranitve ali nadomestitve velikih objektov. Vendar bo to področje potrebno v bodoče vedno bolj upoštevati tudi pri zasnovi novih objektov.

Poglavitni razlogi za vedno nova dognanja v mostogradnji, oziroma cilji razvoja so predvsem:

- povečana uporabnost objekta (zmanjšanje stroškov uporabe ter večja udobnost in varnost prometa)
- povečana konkurenčnost ponudbe (iz stališča ponudnika - zmanjšanje lastne cene) oziroma
- večja gospodarnost naložbe (gledano iz stališča investitorja - minimalna investicija in trajnost)
- videz objekta (estetika in skladanje z okoljem)

Ti cilji generirajo konkretne trende, ki se gibljejo v več smereh:

- Zaželeno povečana trajnost objektov in zmanjšanje stroškov uporabe poenostavlja zasnove ter zmanjšuje število kritičnih točk in detajlov, zmanjšuje se število elementov, le-ti pa postajajo bolj masivni in robustni. Posebej važni elementi (npr. kabli) se večkratno ščitijo ter izvajajo kot zamenljivi - zunanji kabli.

- Napredek tehnologije izvedbe objektov poteka v smeri zmanjševanja stroškov dela in hitrosti gradnje, tudi na račun povečane porabe materialov. Razlo-

gi so jasni, vrednost dela se je relativno precej bolj povečala kot vrednost materialov.

- Izjemen razvoj in napredek je opazen na področjih, ki posredno vplivajo na razvoj konstrukcij in gradbeništva. To sta predvsem kemijska tehnologija ter informatika: prva z izboljšanimi ali novimi materiali ter zaščitami materialov, druga pa z izjemno obdelavo vseh vrst podatkov in natančno analizo, tako v pripravi dokumentacije kakor tudi pri avtomatizaciji proizvodnje.

- Precej bolj nepredvidljiv je razvoj v oblikovanju premostitvenih objektov, posebej mestnih mostov, kjer je danes sodelovanje arhitektov ali posebnih oblikovalcev že skoraj običajna praksa. Tu so težnje v snovanju atraktivnih, novih ali nenavadnih konstrukcijskih rešitev, ki "vžgejo". Kompleksna geometrija ima pogosto lahko slabe učinke na trajnost, deviza - še ne videno v Sloveniji, lahko da dobre ali tudi slabe rezultate.

Zaradi omejenega prostora bo v tem članku prikazano samo nekaj zanimivejših novih pristopov k zasnovi premostitvenih konstrukcij, ki sem jih razdelil v tri poglavja, čeprav se v resnici med sabo prekrivajo. Ta poglavja so:

- hibridne konstrukcije z novimi shemami napenjanja
- zunanje napenjanje in zaščite kablov
- razvoj sovprežnih konstrukcij

### HIBRIDNE KONSTRUKCIJE Z NOVIMI SHEMAMI NAPENJANJA

Glede na statično zasnovo ločimo več različnih tipov konstrukcij, na primer gredne in okvirne konstrukcije, paličja, ločne in viseče konstrukcije. Za te tako imenovane osnovne konstrukcijske sisteme je nosilni sistem jasen in enostaven,

gredne konstrukcije nosijo s pomočjo upogiba, palične s tlačno in natezno osno silo, lokovi s tlakom ter viseče konstrukcije z nategom.

Če križamo ali mešamo čiste sisteme med sabo dobimo hibridne konstrukcije. Istočasno z mešanjem statičnih sistemov lahko kombiniramo tudi različne materiale. Na ta način lahko uporabimo dobre značilnosti enih in drugih, spreminjamo togosti konstrukcije ali uporabimo enostavnejšo tehnologijo gradnje.

Veliko je kombinacij, ki bi jih lahko uvrstil med mešane sisteme, vendar bi tukaj želel prikazati samo variacije v shemah prednapenjanja, imenovanih ekstrados ter intrados prestressing.

### Ekstrados prestressed bridge

Mostovi prednapeti po zgornji strani, še nimajo slovenskega imena, so pa križanec med klasičnimi grednimi prednapetimi mostovi ter obešenimi mostovi s poševnimi kabli.

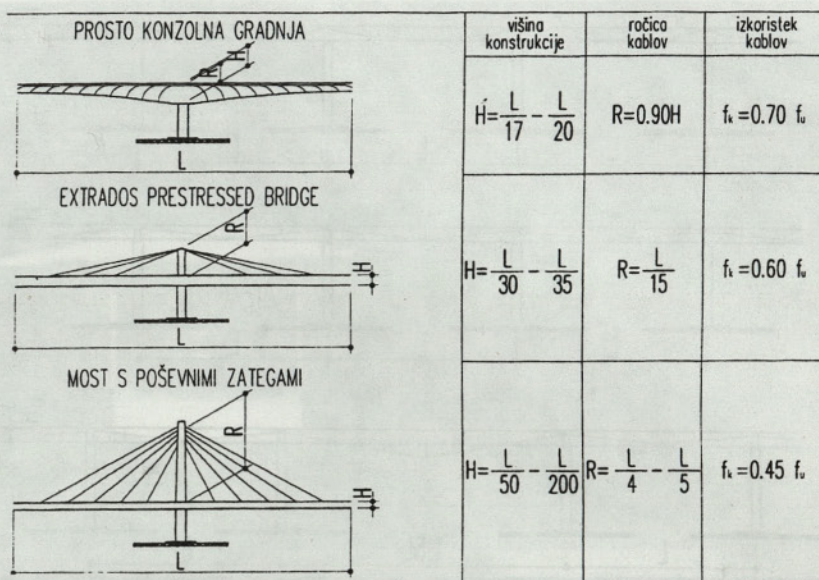
Pri klasičnih mostovih daje zadostno togost objekta greda sama, odpornost proti porušitvi pa se zagotavlja z notranjo dvojico sil med betonom in jeklom. Pri obešenem mostu je nosilnost zagotovljena s poševnimi kabli, togostna greda (stiffening girder) pa rabi kot vozišče ter zagotavlja samo uporabno togost objekta. Pri zelo dolgih objektih so vitkosti grede izjemne, geometrija in dimenzije pa so odvisne v glavnem od aerodinamične stabilnosti.

"Most, napet po ekstradosu" je ravno nekje vmes. Greda ima premajhno togost, da bi nosilnost zagotavljala sama (običajna višina konstrukcije  $H=L/30-L/40$ ), zato ji dodatno togost daje prednapetost kablov, ki pa lahko potekajo prek nizkih pilonov, oziroma deviatojev (običajno z ročico sil  $R=L/15-L/10$ ).

Eden prvih takih objektov s podobno zasnovo je bil že znani Ganterbruecke (Simplon Švica, 1980, C.Menn), ki je nekakšna izvedenka današnjih, saj ima kable oblečene z betonsko steno (cable panel stay concept). Končan oz. v fazi finalizacije pa je most Sunniberg pri Klostersu Švica (projektant prav tako Menn) z razponom 140m ter piloni visokimi 15m, ki je izveden v radiju, voziščna greda pa je v bistvu samo plošča ojačana po robovih.

### Intradados prestressed bridge

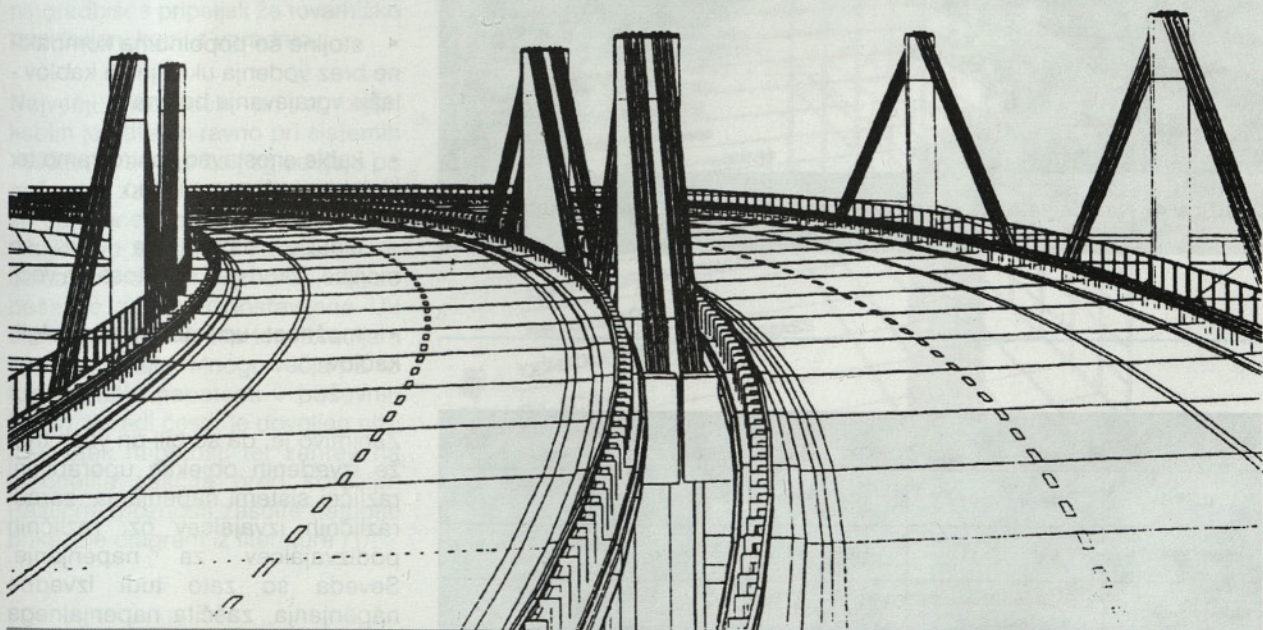
ali poslovenjeno "mostovi, napeti po spodnji strani" so nekakšno nasprotje napanjenja po zgornji strani. Izpeljemo jih lahko iz klasične prednapete grede z ukrivljenimi kontinuirnimi kable, preko vmesne faze s poligonalnimi eksternimi kable znotraj škatle, ki v končni fazi izstopijo iz škatle. Preko zunanje deviatorja, ki deluje kot distančnik, s kable vnašamo odklonsko silo, s katero lahko kontroliramo deformacije. Večino togosti takega sistema še vedno daje greda z



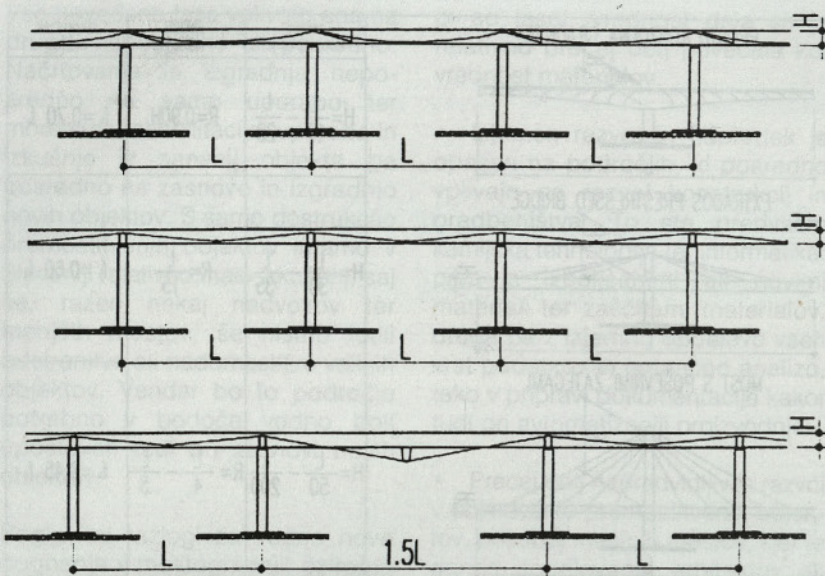
**Slika 1:** S križanjem grede in poševnih kablov dobimo "most prednapet po zgornji strani"

upogibno togostjo, del pa jo dodajo kable s svojo osno togostjo. Na tak način lahko povečamo vitkosti, ki se v običajni konstrukciji končajo pri razmerju  $L/20-L/24$  do nekje  $L/28-L/35$ , odvisno od ekscentričnosti kabla, ki jo izberemo. Napanjenje na spodnji strani ima določene

prednosti pred napanjem zgoraj, ki ne sme posegati v prometni profil na vozišču (nizki pylon je lociran ob obeh straneh ali med ločenimi prometnimi profili), saj se deviator spodaj lahko uporabi v sredini običajne škatle pod voziščem. Slabost spodnjega napanjenja pa je



**Slika 2:** Ena od študij napanjenja mosta po zgornji strani (za natečaj most čez Muro - neoddana varianta)



**Slika 3:** Razvoj od klasičnih preko eksternih kablov do napenjanja na spodnji strani



**Slika 4:** Natečajna rešitev Brod3 za most čez Muro z napenjanjem po spodnji strani

seveda poseganje v svetli profil pod konstrukcijo.

**ZUNANJE NAPENJANJE**

Zunanje napenjanje (external prestressing - zunaj betonskega prereza) ima v mostogradnji pri nas že kar nekaj aplikacij: to so viadukt Bandera, viadukt Lešnica pri Ormožu ter viadukt Ribnik pri Ajdovščini, v gradnji pa je že četrti viadukt s takim napenjanjem, ki ga lahko imenujemo kombinirani način. To pomeni za fazo narivanja klasični ravni kabli z naknadnim sovpreganjem, za fazo uporabe pa dodatni zunanji kabli zunaj betonskega prereza v notranosti škatlastega preseka grednega nosilca.

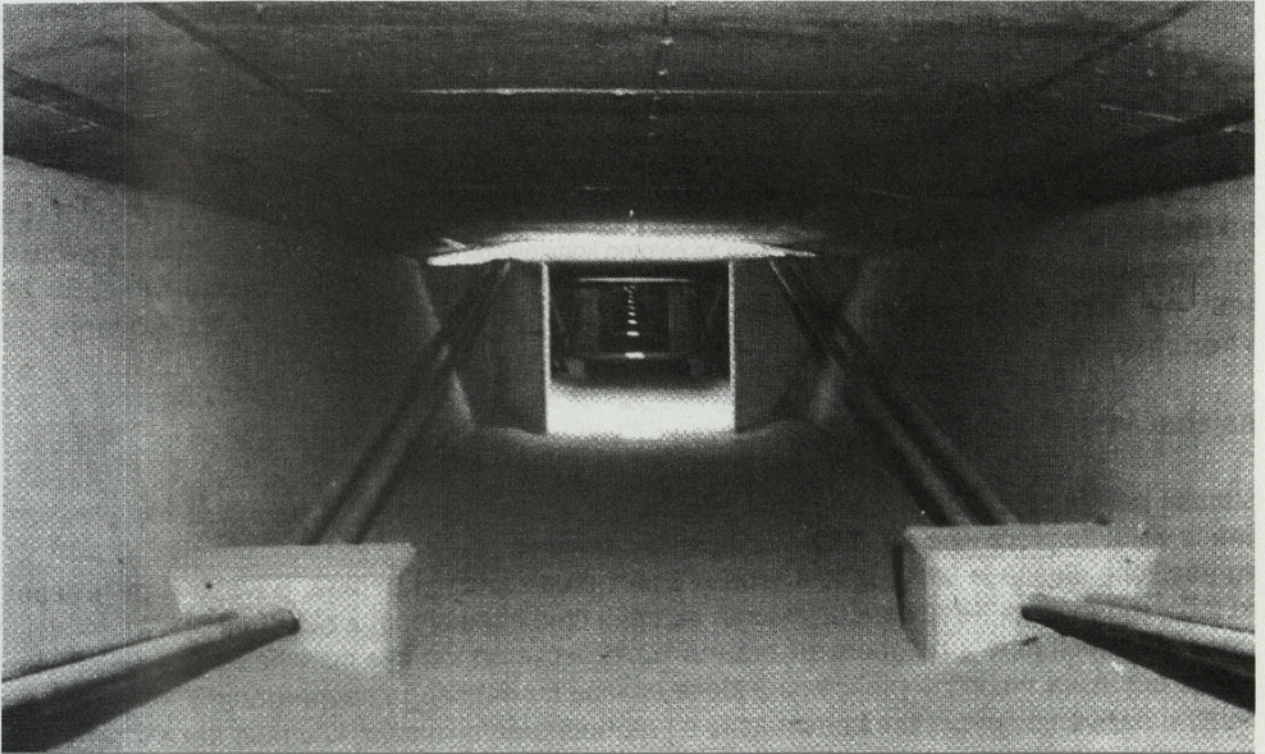
Posebej pri tehnologiji gradnje s postopnim narivanjem so prednosti takega načina napenjanja izrazite. Ker so prednosti že dokaj poznane, naj naštejemo samo najpomembnejše:

- enostavnejši opaž z možnostjo konstantnega prereza - hitrejša gradnja
- stojine so popolnoma kompaktne brez vodenja ukrivljenih kablov - lažje vgrajevanje betona
- kable enostavno kontroliramo ter jih lahko tudi zamenjamo
- izgube napenjalne sile so manjše, izkoristek napetosti pa večji
- možnost uporabe zelo dolgih kablov

Zanimivo je, da so bili pri vseh treh že izvedenih objektih uporabljeni različni sistemi napenjanja, zaradi različnih izvajalcev oz. različnih podizvajalcev za napenjanje. Seveda so zato tudi izvedbe napenjanja, zaščita napenjalnega jekla ter zamenljivost kablov različni. Ta lahko na hitro pregledamo v preglednici levo:

objekt	izvajalec / podizv. za napenjanje extr. kablov	zaščita eksternih kablov (HDPE = high density polyetilen)	direktna zamenljivost napenjalne glave
viadukt Bandera	Primorje / Gradis PH	HDPE + cementno injektiranje	ne
viadukt Lešnica	CP Celje / BBR Conex	HDPE + cementno injektiranje	da
viadukt Ribnik	Primorje / Vršpan Technik	dvojno estrud. kabli HDPE z mastmi	da

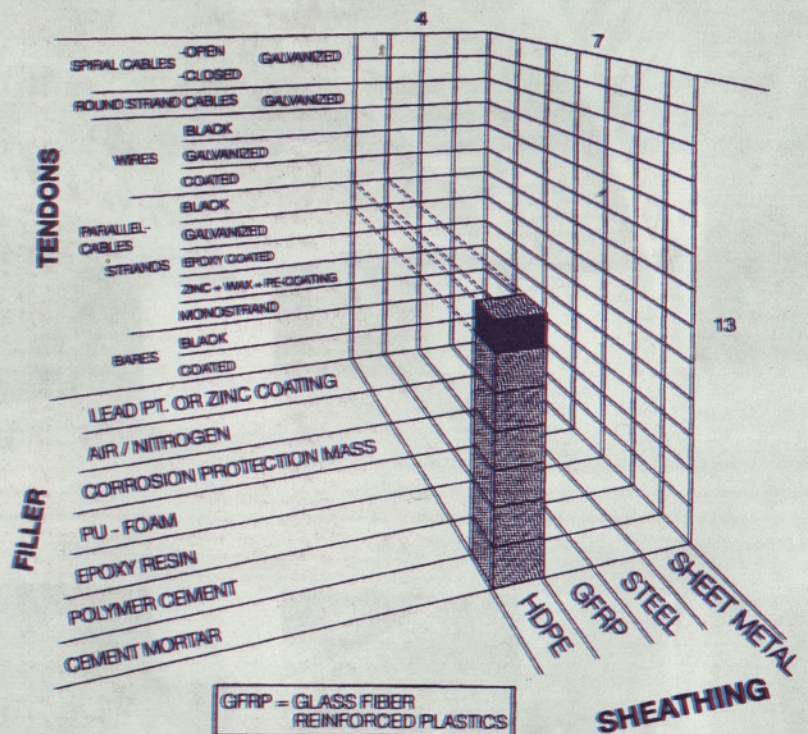




Slika 5: Eksterni kabli v viaduktu Lešnica pri Ormožu

Pri prvih dveh objektih so se zunanji kabli formirali na samem gradbišču, medtem ko so se pri tretjem objektu na gradbišče pripeljali že tovarniško pripravljene kabli z vgradnjo.

Največji napredek pri zunanjih kablilih je narejen ravno pri sistemih zaščite, ki se vse bolj zgledujejo po poševnih zategah (stay cables), ki so še precej bolj izpostavljene. Za razliko od eksternih kablov, ki so običajno v betonski gredni škatli, so poševne zatege izpostavljene UV žarkom, dežju in vetru ter vibracijam zaradi prometa. Mnogo večja pa so tudi nihanja napetosti v poševnih kablilih, zaradi česar je dovoljen nižji izkoristek napetosti ter zahtevana močnejša zaščita pred korozijo. Različne možnosti zaščite najbolje prikazuje diagram iz literature [1].



Slika 6: Možnosti zaščite kablov je veliko (13x4x7 kombinacij) - po lit. [1]

## RAZVOJ SOVPREŽNIH KONSTRUKCIJ

Tudi pri klasičnih sovprežnih konstrukcijah z jeklenimi nosilci ali jekleno škatlo ter betonsko voziščno ploščo gre razvoj v enako smer, to je v manjše število elementov kot so ojačitve in rebra ter zato uporabljena debelejša pločevina. To pomeni istočasno manjšo porabo dela ter večjo odpornost na korozijo. Posebej opazen pa je tudi vpliv arhitekture oz. oblikovanja na same nosilne konstrukcije. Nekaj najznačilnejših trendov v zadnjem času bi bilo:

- prostorska paličja sovprežena z voziščno ploščo
- stojina iz valovite pločevine ali jeklene diagonale namesto stojin
- poleg voziščne plošče je lahko

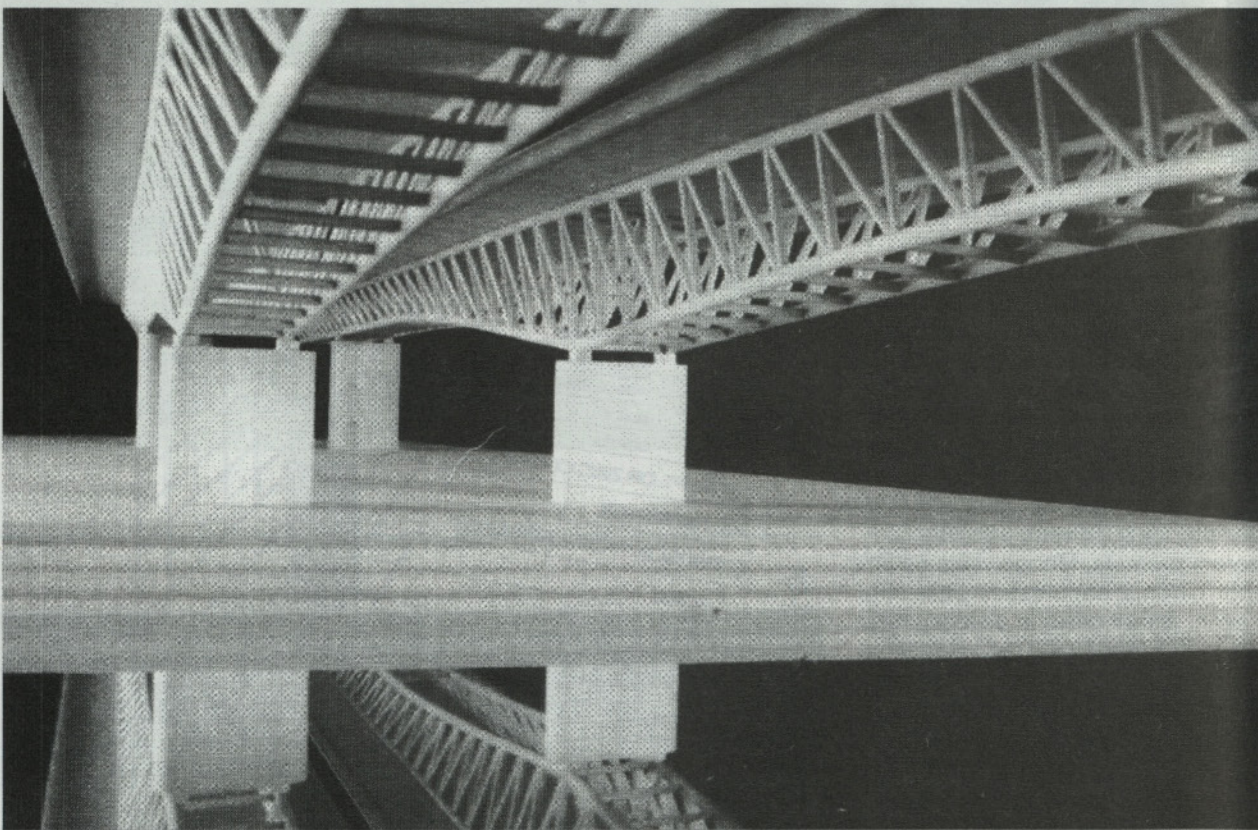
iz tudi spodnji pas iz prednapetega betona, povezava pa jeklena

- veliki ločni mostovi na Kitajskem iz jeklenih okroglih cevi napolnjenih z betonom
- jeklene cevi zapolnjene z betonom za celotno konstrukcijo od temelja do vrha na Japonskem
- narivanje betonske voziščne plošče na jeklene nosilce ter naknadno sovpreganje
- kompletno narivanje sovprežne konstrukcije s predhodno deformacijo, ki vnaša tlake v betonsko ploščo
- prednapenjanje betonske plošče ali celotne sovprežne konstrukcije
- hibridno sovpreganje (jekleni lok in betonska voziščna plošča;

betonski lok s privzeto natezno silo zgoraj s pomočjo jeklene škatle in betonske voziščne konstrukcije).

## SKLEP

Današnja tehnologija informatike s svetovnim mrežnim spletom nam omogoča tekoče spremljanje trenutnih trendov v konstruiranju ter gradnji premostitvenih objektov od katerih je le majhen delček prikazan v tem prispevku. Vsi trendi pri nas niso uporabni ali primerni, saj je potrebno upoštevati tako domače razpoložljive materiale, znanje in izkušnje projektantov, tehnološko usposobljenost izvajalcev kakor tudi lokalne klimatske in druge pogoje uporabe objektov, skupaj z vzdrževanjem. Kaže, da so za velike premostitvene objekte tudi v Sloveniji dokončno preživele montažne konstrukcije, kar je po dosedanj



**Slika 7:** Maketa natečajne rešitve Brod2 za most čez Muro

praksi sodeč verjetno dobro. Nekaj zaslug za to si lahko prisvojimo tudi pri Inženirskem biroju Ponting, kjer smo že za prvi dve izvajalski pogodbi DARSa (Viadukt Bandera - izvajalec Primorje in viadukt Goli vrh - izvajalec SCT) zasnovali masivne monolitne objekte, medtem ko so

nekateri leta kasneje še vedno projektirali montažne viadukte. Torej ostaja trend masivnih robustnih in monolitnih konstrukcij naprej.

Zelo nevarni pa so moderni trendi brez pravega razloga, samo zaradi gole "inventivnosti", želje po

ekstravagantnosti in posebnem oblikovanju. Zato mora tudi investitor mnogo vlagati v nova znanja (z lastnim izobraževanjem ali v sodelovanju z neodvisnimi konzultanti), ker le tako lahko izbere zrno med plevelom.

## LITERATURA

- [1] Jungwirth, D.: Durability of Stay Cables and Improvements, IC New Technologies in structural Engineering, FIP Lisbon 97
- [2] Reis, A.J.: Innovative Solutions for Bridges - A challenge for designers, IC New Technologies in structural Engineering, FIP Lisbon 97
- [3] Vogel T., Marti P.: Christian Menn - Bruecekbauer, Birkhauser Verlag 1997
- [4] Saje F.: Pogoji in dileme snovanja mostov, 2. slovenski kongres o cestah in prometu, zbornik referatov, Portorož 1994
- [5] Markelj V., Pipenbaher M.: Gradnja mostov v Sloveniji - pregled stanja, Gradbeni vestnik 11-12 /1996
- [6] Markelj V., Pipenbaher M., Reichenberg B.: Natečajne rešitve za most čez Muro, pod šifro Brod 1-4, Maribor 1998

# MERITVE NAPENJALNE SILE V ZUNANJIH KABLJIH VIADUKTA LEŠNICA PRI ORMOŽU

## THE MEASUREMENTS OF THE PRESTRESSING FORCE IN EXTERNAL CABLES OF VIADUCT LEŠNICA NEAR ORMOŽ

UDK 624.21.012.46 : 625.745.1

Andrej ŠTRUKELJ, Viktor MARKELJ, Gorazd LIPNIK

### POVZETEK

Viadukt Lešnica v sklopu ormoške obvoznice premošča dolino potoka Lešnica. Prekladna konstrukcija poteka kontinuirano prek desetih polj v dolžini 324 m. Poleg klasičnih centričnih kablov so bili za fazo uporabe predvideni tudi poševni kontinuirni kabli, ki potekajo zunaj betonskega prereza po celotni dolžini objekta. V času napenjanja so se izvajale meritve napenjalne sile omenjenih kablov. Meritve so bile izvedene v skladu z zahtevo projektanta, ki je zaradi izvedene dolžine in poligonalnega poteka zunanjih kablov zahteval neposredno spremljanje velikosti napenjalne sile v sredini kablov, kjer je padec sile ob obojestranskemu napenjanju največji. Rezultati so bili zadovoljivi in so pokazali, da je trenje kljub dolžini kablov v predvidenih mejah.

### SUMMARY

The Lešnica viaduct represents an essential part of Ormož bypass. It bridges the Lešnica valley as the continued structure over ten spans. Its length is 324 m. Beside the standard prestressing cables the four external continued cables have been foreseen. During the prestressing process of these cables the measurements of the prestressing force have been performed in the middle of the cable span. The obtained results have shown that the friction has not exceeded the expected limits.

#### Avtorji:

mag. Andrej Štrukelj, univ. dipl. inž. gr., Fakulteta za gradbeništvo, Maribor

Viktor MARKELJ univ. dipl. inž. gr., Inženirski biro PONTING d.o.o., Maribor

mag. Gorazd Lipnik, univ. dipl. fiz., Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Ljubljana

### 1. OPIS OBJEKTA

Objekt je zasnovan kot kontinuirana prednapeta betonska konstrukcija preko desetih polj z razponi  $28,00\text{m} + 8 \times 34,00\text{m} + 24,00\text{m} = 324,00\text{m}$ . Prekladna konstrukcija je škatlasti prerez s statično višino  $H = 2,60\text{m}$ . Stojine so poševne in tvorijo trapezno obliko prereza. Širina spodnje plošče je  $4,00\text{m}$ , širina

zgornje, voziščne plošče pa  $10,72\text{m}$ . Dolžine obojestranskih konzol znašajo  $2,31\text{m}$ . Debelina zgornje plošče je  $25 - 42\text{cm}$ , debelina konzole je  $22 - 45\text{cm}$ . Stojine so konstantne debeline  $40\text{cm}$ , spodnja plošča pa ima debelino  $25 - 45\text{cm}$ . Viadukt je v celoti zasnovan kot ena zavorna enota z dilatacijami samo na krajnih opornikih. Vzdolžne sile (zavorne in

potresne) se prenašajo prek treh stebrov v sredini zavorne enote, ki imajo na vrhu nepomična ležišča. Prečna obtežba pa se prenaša na vse podpore.

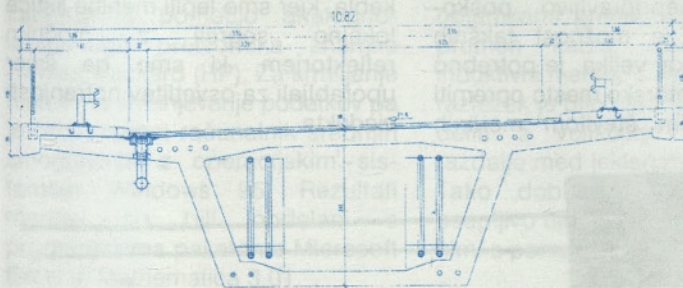
Prečni prerez stebrov ima H obliko zunanjih dimenzij  $4,00\text{m} \times 1,80\text{m}$ . Višine stebrov so od  $6\text{m}$  do  $16\text{m}$ . Na vrhu stebrov je prostor za začasna ležišča v času narivanja

konstrukcije, za končna ležišča, za dvigalke pri menjavi ležišč kakor tudi za revizijski prostor ob pregledu ležišč. Ta prostor je dostopen tudi skozi odprtino v spodnji plošči prekladne konstrukcije. Oba opornika imata škatlasto obliko z revizijskim hodnikom pod dilatacijo ter ustreznim dostopom. Stebri v dolini (3, 4, 5, 6, in 7) so temeljeni plitvo neposredno v nosilno osnovo – lapor. Pri tem imajo stebri 5, 6 in 7, ki so opremljeni s fiksnimi ležišči, temelj dimenzij 6,00m x 8,00m x 2,00m, stebra 3 in 4 pa temelj dimenzij 5,00m x 8,00m x 2,00m. Stebri 2, 8, 9 in 10 so temeljeni globoko prek pilotne blazine dimenzij 6,50m x 6,50m x 2,00m na štirih pilotih F150cm. Piloti so zaradi potrebne vertikalne nosilnosti vpeti, ca. 3 – 4d v lapor. Tudi obrežna opornika sta temeljena globoko na pilotih enakega premera. Nižji opornik 1 je podprt in stoji na treh pilotih postavljenih v eni vrsti, višji opornik 11, s katerega je potekalo narivanje prekladne konstrukcije, pa je temeljen s 4 piloti, postavljenimi v dveh vrstah (2 + 2 kom.).

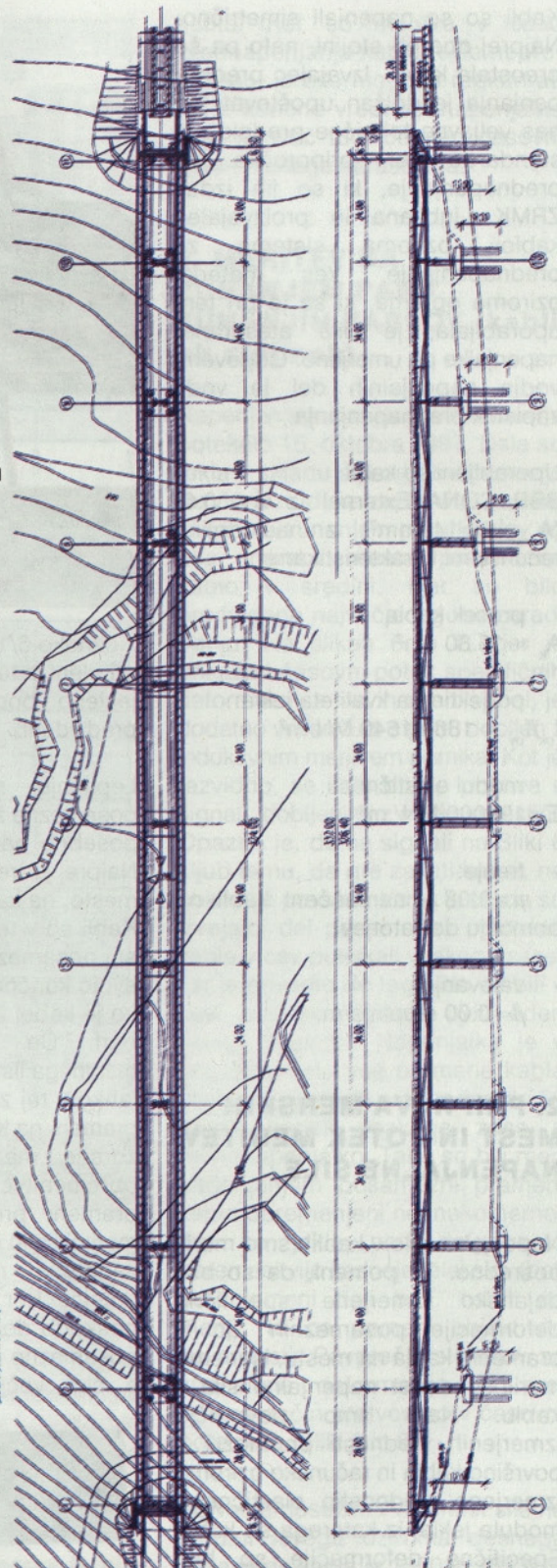
Viadukt Lešnica je izveden po tehnologiji postopnega narivanja s pomočjo jeklenega kljuna. Konstrukcija se je po fazah betonirala na delovni postaji. Vsaka faza je vključevala tudi sprotno napenjanje centričnih kablov. Za ravno centrično napenjanje so bili uporabljeni klasični kabli sistema BBR, ki so bili na vsakem delovnem stiku

podaljšani z nepomično spojko. Izvedenih je bilo 19 faz. Štirje kabli, ki potekajo poligonavno v notranjosti škatle zunaj betonskega prereza v enem kosu brez stikovanja po celi dolžini viadukta, so predvideni v fazi uporabe objekta. Napnejo se po končanem narivanju konstrukcije. Za sidranje in napenjanje so na začetku in koncu objekta uporabljene posebne glave za kabla zunaj betonskega prereza, ki omogočajo zamenjavo kablov. Napenjanje je obojestransko, pri čemer je nominalna napenjalna sila 2190 kN. Postopek napenjanja je naslednji:

- hkratno napenjanje kabla z obeh obrežnih opornikov (napenjalna sila znaša  $1.05 \times F_{nom}$ , kar je v tem primeru 2300 kN)
- popuščanje kabla pri oporniku 1 do  $0.95 \times F_{nom}$ , kar znaša 2080 kN.
- popuščanje kabla pri oporniku 11 do  $0.95 \times F_{nom}$ , kar znaša 2080 kN.



Slika 2: Karakteristični prečni prerez



Slika 1: Tloris in vzdolžni prerez viadukta

A. ŠTRUKELJ, V. MARKELJ, G. LIPNIK: Meritve napenjalne sile

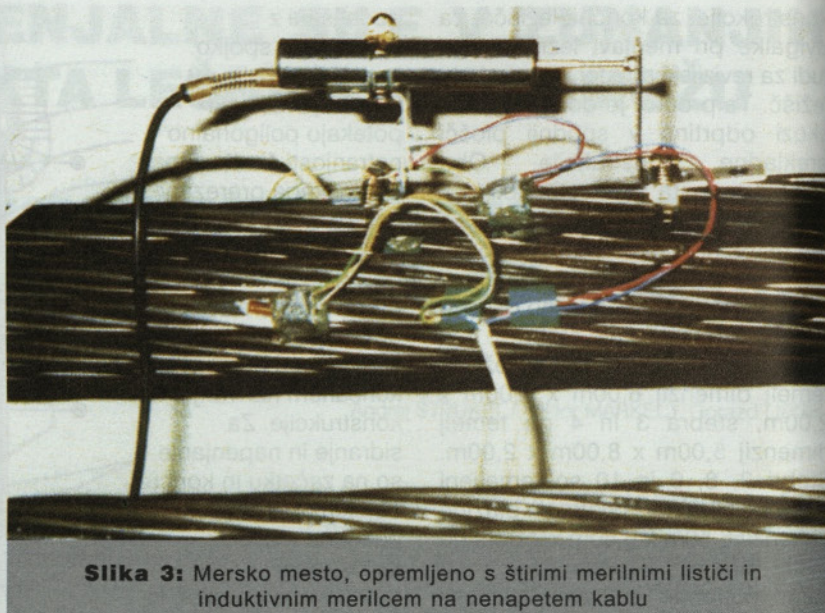
Kabli so se napenjali simetrično. Najprej oba ob stojini, nato pa še preostala kabla. Izvajalec prednapenjanja je dolžan upoštevati pri nas veljavne tehnične predpise in standarde ter priporočila za prednapenjanje, ki so jih izdali ZRMK Ljubljana in proizvajalec kablov oziroma sistema za prednapenjanje. Ves material oziroma oprema, ki se je pri tem uporabljala, je bila atestirana, napenjalke pa umerjene. Odgovorni vodja napenjalnih del je vodil zapisnik prednapenjanja.

Uporabljeni so kabli BBR CONA External iz vrvi 0.6" ( $A_{\text{pramena}} = 140 \text{ mm}^2$ ) z naslednjimi računskimi karakteristikami:

- presek kabla:  
 $A_k = 16.80 \text{ cm}^2$
- projektirana kvaliteta jekla:  
 $f_{pk}/f_{py} = 1860/1640 \text{ MN/m}^2$
- modul elastičnosti:  
 $E = 195000 \text{ MN/m}^2$
- trenje:  
 $\mu \geq 0.08$  - namaščeni kabli na območju deviatorjev
- valovanje:  
 $\beta = 0.00$  stopinje/m.

## 2. PRIPRAVA MERSKIH MEST IN POTEK MERITEV NAPENJALNE SILE

Napenjalno silo v kablh smo merili posredno. To pomeni, da so bile dejansko izmerjene specifične deformacije posameznih žic v pramenih kabla na mestu, kjer smo merili vrednost napenjalne sile v kablju. Nato smo povprečje izmerjenih vrednosti pomnožili s površino kabla in računsko oziroma izmerjeno vrednostjo elastičnega modula jekla, iz katerega so kabli. Specifične deformacije so bile izmerjene z merilnimi lističi proizvajalca Hottinger-Baldwin Mechnik (HBM). Uporabili smo lističe

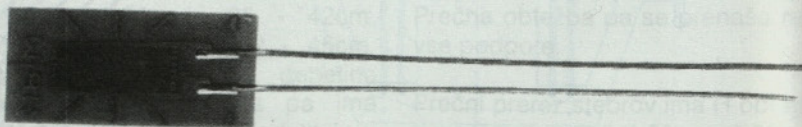


**Slika 3:** Mersko mesto, opremljeno s štirim merilnimi lističi in induktivnim merilcem na nenapetem kablju

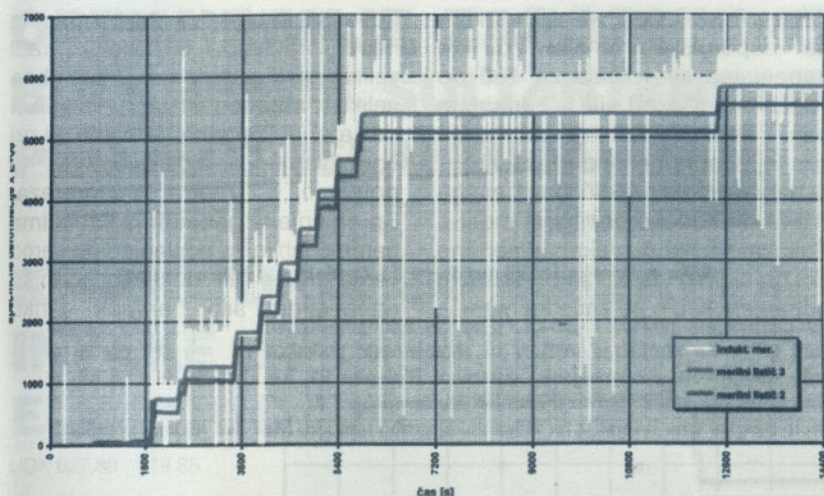
z oznako 6/120LY11, ki so posebej prirejeni in temperaturno usklajeni z jekleno podlago, za katero so predvideni.

Lepljenje merilnih lističev na posamezne žice kabla zahteva prav posebno pazljivost in natančnost. Najprej je treba zelo pazljivo izbrati mesto, na katerega nalepimo listič. Kabli so v tej fazi namreč ohlapni, saj posamezni prameni zavzamejo svojo končno pozicijo šele po tem, ko je kabel že napet s približno 50 bari. Če je mesto pritrditve merilnega lističa nepravilno izbrano, lahko v tej začetni fazi napenjanja pramen, na katerem se listič nahaja, zdrсне med ostale. Mehanske obremenitve, ki zaradi trenja med prameni pri tem nastanejo, pa merilni listič oziroma priključne žice zagotovo nepopravljivo poškodujejo. Ker je možnost takšnih poškodb dokaj velika, je potrebno posamezno mersko mesto opremiti s čim večjim številom merilnih

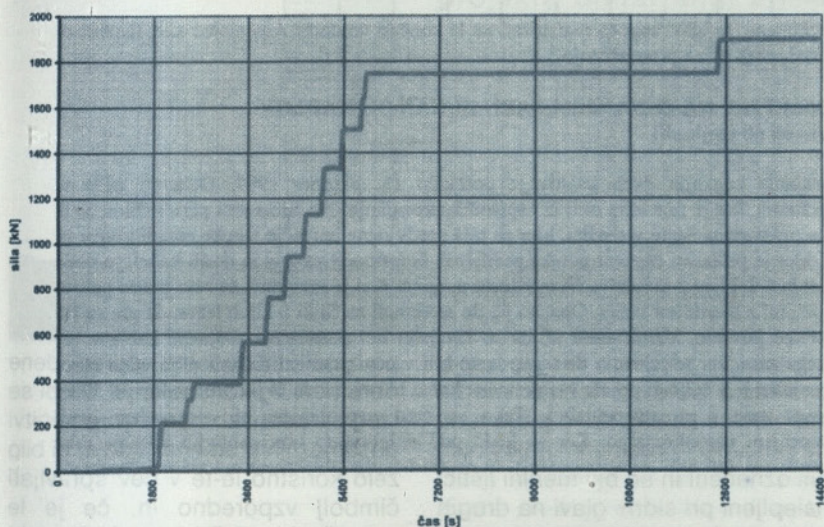
lističev (v našem primeru s štirim). Druga stvar, ki pri lepljenju merilnih lističev predstavlja veliko oviro, je mazivo, s katerim so kabli namazani, da bi se pri napenjanju zmanjšalo trenje. Da bi lepilo brezhibno prijelo, je potrebno to mazivo v bližnji okolici merskega mesta dosledno odstraniti z ustreznim topilom. Zaradi neravnosti površine (prepletene žice kabla) je to zelo zahtevno opravilo. Tako pripravljeno površino je potrebno pred lepljenjem še ustrezno obrusiti, da bi lepilo optimalno prijelo. V mesecu oktobru, ko so omenjena dela potekala, so bile temperature ozračja, s tem pa tudi podlage, na katero smo lepili merilne lističe, že dokaj nizke. To je zelo podaljšalo čas vezanja lepila. To težavo smo premagali tako, da smo območje kabla, kjer smo lepili merilne lističe lokalno segreli z močnim reflektorjem, ki smo ga sicer uporabljali za osvetlitev notranjosti viadukta.



**Slika 4:** Povečana slika merilnega lističa (dolžina mrežice je 6mm)



**Slika 5:** Specifične deformacije sredine kabla ob stojini - leva stran



**Slika 6:** Napenjalna sila v sredini kabla ob stojini - leva stran

V času meritev smo podatke zajemali s pomočjo analogno-digitalnega pretvornika znamke Hewlett Packard (HP). Za krmiljenje meritev in shranjevanje podatkov pa je rabil osebni računalnik srednjih zmogljivosti z operacijskim sistemom Windows 95. Rezultati meritev so bili obdelani s programskima paketoma Microsoft Excel in Mathematica 3.01.

Kontrolo meritev smo izvajali z na videz dokaj grobo metodo. Med dva jeklena kotnika, ki smo jih na

medsebojni razdalji natanko 10cm z objemkami pritrdili na posamezni pramen kabla, smo namestili induktivni merilec pomika. Izmerjeni raztezek je bilo nato le še potrebno deliti z velikostjo medsebojne razdalje med jeklenima kotnikoma. Tako dobljeni rezultati so se osupljivo ujemali z rezultati, dobljenimi s pomočjo merilnih lističev.

V okolici merskega mesta je bila odstranjena zaščitna cev, po kateri sicer poteka kabel, da je bil omogočen neposredni dostop do

kabla. Ker so meritve v času prednapenjanja kabla tekle neprekinjeno, je bilo mogoče registrirati ne le končno vrednost napenjalne sile, temveč tudi celoten časovni potek njenega naraščanja.

### 3. MERITEV NA ZUNANJEM PARU ZUNANJIH KABLOV (kablji ob stojinah)

Napenjanje zunanjih dveh kablov je potekalo 15. oktobra 1997. Dela so tekla v skladu s programom, kar je razvidno tudi iz zapisnika napenjanja. Na zunanjem paru kablov so bila merska mesta predvidena samo v sredini, kjer so bile predvidene največje izgube zaradi trenja. Na slikah 6 in 7, kjer je prikazan časovni potek specifičnih deformacij za levi in desni kabel, je dodatno vrisan tudi signal, dobljen z induktivnim merilcem pomika. Kot je razvidno, se zelo dobro pokriva s signali, dobljenimi z merilnimi lističi. Opazno je, da se signali na Sliki 6 kljub temu, da gre za isti kabel, ne pokrivajo povsem. Vzrok je ta, da so izvajalci del posamezne pramene kabla v cev potiskali vsakega zase, kar je privedlo do tega, da so bili v cevi prameni deloma oviti eden okrog drugega. Napenjalka je v čeljusti prijela vse pramene kabla hkrati, ne da bi jih predhodno do 50 barov napeli vsakega zase z mononapenjalko. Tako so bili med napenjanjem posamezni prameni kabla obremenjeni neenakomerno. Ker se jeklo pod dolgotrajno obremenitvijo kasneje relaksira (bolj obremenjeni deli bolj, ostali pa manj), to ne pomeni objektivne nevarnosti. Povprečje signalov za specifične deformacije na prej opisan način pretvorimo v časovni potek sile (Sliki 8 in 9).

Največja dosežena vrednost sile na sredini levega oziroma desnega zunanjšega kabla je 1890 in 1893kN, kar po predhodnem izračunu ustreza 11 do 12% trenja, kar je za to dolžino kabla zelo dober rezultat.

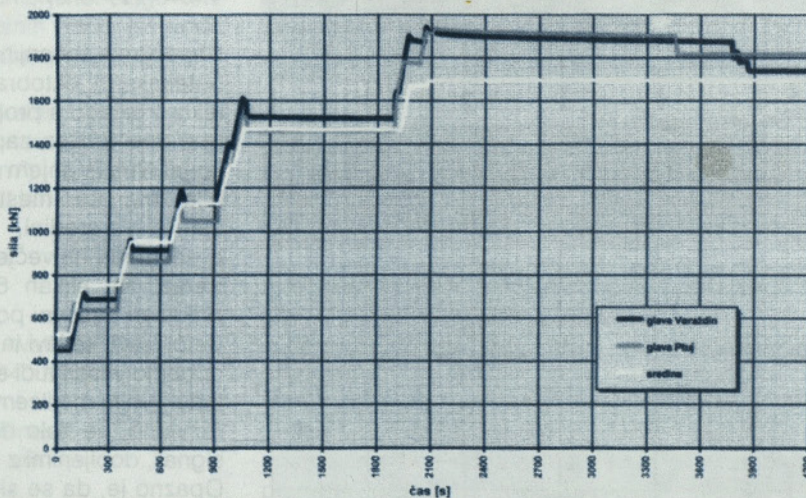
A. ŠTRUKELJ, V. MARKELJ, G. LIPNIK: Meritve napenjalne sile

#### 4. MERITEV SILE NA NOTRANJEM PARU ZUNANJIH KABLOV

Napenjanje notranjega para kablov je potekalo 20. oktobra 1997. Poleg standardnih merskih mest na sredini obeh kablov smo tokrat predvideli na vsakem kablju še dodatni merski mesti v bližini sidrskih glav. Z induktivnimi merilci tokrat nismo več

da je bila dosežena vrednost tlaka na napenjalnih enaka, pa je napenjalna sila ostala za 100 do 120 kN manjša od sile v zunanjem paru kablov. Kot je pokazala kasnejša obremenilna preizkušnja, ta napaka nima praktično nobenega vpliva na končno nosilnost mostu. Pokazalo se je še nekaj: izmerjene sile pri sidrskih glavah so pri desnem notranjem kablju na začetku manjše

odsekih kabla, ki so od mesta napenjanja najbolj oddaljeni. Zaradi velikih sil, ki nastopajo, je potrebna velika natančnost pri izdelavi deviatorjev za zunanje kable ali pri vgrajevanju cevi za kable, ki potekajo znotraj prereza. Spremenjena geometrija kabla ima namreč lahko za posledico ne samo večje trenje ali nekoliko manjšo napenjalno silo, ampak lahko



Slika 7: Napenjalne sile v notranjem paru kablov - desna stran

dodatno merili, saj so se merilni lističi pokazali za dovolj zanesljive. Merski mesti v sredini kablov sta bili opremljeni vsako s štirimi lističi. Vsako od merskih mest ob sidrskih glavah pa z dvema merskima lističema. Na levem od obeh kablov, gledano v smeri Varaždina, je takoj na začetku napenjanja prišlo do majhne neusklajenosti med obema napenjalnima stranema, kar je imelo za posledico večji izvlek kabla na varaždinski strani. Posledica tega je bila, da je del kabla, kjer sta bila merilna lističa in priključne žice potegnili v zaščitno cev ob sidrni glavi. Pri tem je prišlo do poškodb na merilnih lističih ali priključnih žicah, kar je imelo za posledico, da je bilo to mersko mesto mrtvo. Ker smo v času napenjanja specifične deformacije in silo v kablju sproti spremljali, smo ugotovili, da sila v sredini kabla ne narašča tako kot pri zunanjem paru kablov. Kljub temu,

od sil v sredini, kar je spet posledica začetne neenakomerne napetosti v kablju. Krivo pa je tudi, da posamezni prameni kablov niso bili označeni in so bili merilni lističi nalepljeni pri sidrni glavi na drugih pramenih kot v sredini.

Največja dosežena vrednost sile na sredini levega oziroma desnega notranjega kabla je 1700 in 1779 kN, kar ustreza trenju, ki je večje od 14%.

#### 5. SKLEP

Rezultati meritev so pokazali, da je pri tako dolgih kablju dobro kontrolirati napenjalno silo na kateri od vmesnih točk kabla. Pokazalo se je tudi, da s primernim mazanjem in natančno izvedbo lahko kljub izredni dolžini kabla dosežemo zadovoljivo velikost napenjalne sile tudi na

povzroči tudi dodatne nepredvidene obremenitve konstrukcije. Da bi se izognili neenakomerni obremenitvi posameznih pramenov kabla, bi bilo zelo koristno le-te v cev spravljati čim bolj vzporedno in, če je le mogoče, hkrati. Pri napenjanju pa bi bilo potrebno do prvih 50 barov posamezne pramene napeti z mononapenjalno in šele potem začeti s hkratnim napenjanjem celotnega kabla.



# OPTIMIRANJE ZAPORNIC TUNNEL INTAKE BULKHEADS, SULTARTANGI HYDROELECTRIC PROJECT ISLANDIJA

## STRUCTURAL OPTIMIZATION OF THE TUNNEL INTAKE BULKHEADS, SULTARTANGI HYDRO-ELECTRIC PROJECT ICELAND

UDK 627.88 : 519.85

Stojan KRAVANJA

### POVZETEK

V članku predstavljamo optimiranje konstrukcije jeklenih tablastih zapornic Tunnel Intake Bulkheads hidrotehničnega projekta Sultartangi v Islandiji. Optimiranje izvajamo z mešano-celoštevilskim nelinearnim programiranjem (MINLP). Z MINLP izvajamo diskretno optimiranje topologije in standardnih dimenzij sočasno z zveznim optimiranjem geometrije, teže in cene zapornic. Z opravljenim MINLP optimiranjem smo dosegli približno 30 % prihranka glede na design zapornic, dobljen na klasični način z analizo konstrukcije.

### SUMMARY

The paper presents optimization of the hydraulic steel gate structures named Tunnel Intake Bulkheads for Sultartangi Hydroelectric Project in Iceland. The optimization is performed by a Mixed-Integer Nonlinear Programming (MINLP) approach. The MINLP performs the discrete optimization of topology and standard dimensions simultaneously with the continuous optimization of the gate geometry, weight and costs. The obtained results show that the MINLP enables 30% savings of investment casts when compared to the gate design obtained by the classical method of structural analysis.

Avtor:

doc. dr. Stojan Kravanja, dipl. inž., Fakulteta za gradbeništvo, Smetanova 17, Maribor

### 1 UVOD

V hribovitem področju južne Islandije se približno 80 km od morske obale navzgor na reki Pjorsa gradi hidrotehnični objekt Sultartangi Hydroelectric Project [1]. V okviru omenjenega projekta je zgrajen 6 km dolgi protipotresni jez s prelivom in talnim iztokom. Ta jez zapira 26 km dolgo in 20 km<sup>2</sup> veliko

akumulacijsko jezero vzdolž reke Pjorsa. Iz nastalega jezera bo skozi 3.4 km dolgi vtočni tunel tekel glavni vodni tok, ki bo poganjal hidroelektrarno z dvema Franci-sovima turbinama skupne moči 123 MW. Stranski vodotok bo potekal po 7.2 km dolgem kanalu.

Vtočni tunel bo reguliran z dvema tablastima zapornicama na vtoku v

tunel, imenovanima Tunnel Intake Bulkheads. Zapornici sta štiridelni: vsaka zapornica je sestavljena iz štirih vertikalnih zaporničnih elementov. Metalna ECCE d.o.o. iz Maribora je v sklopu konzorcija Sulzer Hydro - Metalna ECCE - ESB International dobila naročila za izdelavo teh dveh zapornic skupaj z rešetkami, zapornicami na turbinskih vtokih in iztokih ter vso ostalo

## S. KRAVANJA: Optimiranje zapornic Tunnel Intake Bulkheads

potrebno opremo (dvižni mehanizmi, žerjavi, merilna oprema, itd.).

Da bi zasnovali optimalno najcenejšo možno konstrukcijo zapornic, smo izvršili optimiranje teh konstrukcij z mešano-celoštevilskim nelinearnim programiranjem (MINLP). Z MINLP smo izvedli diskretno optimiranje topologije zapornic (števila nosilcev) in standardnih dimenzij sočasno z zveznim optimiranjem geometrije, teže in cene zapornic.

Odvisno od načina poteka računske konvergence k želenemu optimumu se med MINLP optimizacijskim procesom določeni konstrukcijski elementi (nosilci, ploščinski elementi) iz konstrukcije avtomatsko računsko odvezemajo ali dodajajo in s tem tvorijo nove, različne in vedno ugodnejše konstrukcijske alternative. Ker se na ta način konstrukcija med optimiranjem spreminja, pravimo, da z MINLP izvajamo sintezo konstrukcije. Namen sinteze konstrukcije zapornic je izračunati najcenejšo konstrukcijo ob upoštevanju vseh odločilnih pogojev nosilnosti, napečnosti, stabilnosti in deformacij. Ceno konstrukcije zapornic sestavljajo materialni in delovni stroški za izdelavo.

Sintezo zapornic smo izvedli v treh fazah. V prvi fazi smo definirali mehansko superstrukturo konstrukcije zapornic, v drugi fazi smo na podlagi izgrajene MINLP modelne formulacije mehanske superstrukture izdelali optimizacijski model zapornic, v tretji fazi pa smo z ustreznim MINLP algoritmom in strategijo izvršili cenovno optimiranje.

## 2 MEHANSKA SUPERSTRUKTURA ZAPORNIC

Superstruktura konstrukcije zapornic je opisana z izborom konstrukcijskih elementov in njihovih

povezav, t.j. z množico horizontalnih in vertikalnih nosilcev ter ploščinskih elementov zajezne stene. Potrebno je tudi definirati največje in najmanjše število nosilcev in plošč. Vsaka možna kombinacija različnega števila horizontalnih in vertikalnih nosilcev daje različno konstrukcijsko oz. topološko alternativo. Najmanjša topologija je definirana z najmanjšim možnim številom nosilcev in plošč, največja topologija pa vsebuje vse definirane konstrukcijske elemente. Optimalna topologija konstrukcije z optimalnim številom konstrukcijskih elementov bo najverjetneje izračunana nekje vmes med tema dvema ekstremoma.

Kadar imamo opravka z večdelno zapornico, t.j. zapornico sestavljeno iz več posameznih zaporničnih elementov, se velikost superstrukture bistveno poveča. Optimiranje takšne superstrukture predstavlja zelo kompleksen optimizacijski problem, v katerem je definirano izredno veliko število različnih konstrukcijskih alternativ. S takšnim primerom imamo opraviti tudi pri optimiranju zapornic projekta Sultartangi, kjer so vse zapornice večdelne.

Vsaka različna konstrukcijska - topološka alternativa torej vsebuje različno število in konfiguracijo konstrukcijskih elementov in vsak element ima lahko več standardnodimenzijskih in (če to zahtevamo) tudi materialnih alternativ. Zato je znotraj definirane superstrukture poglavitni namen najti takšno možno konstrukcijo, ki bo optimalna glede na topologijo, standardne dimenzije, zvezne dimenzije in ostale projektne parametre.

Optimiranje topologije, standardnih dimenzij in ostalih parametrov izvajamo z MINLP. Topologijo in standardne dimenzije optimiramo z diskretnim optimiranjem, ostale zvezne parametre kot so zvezne dimenzije, geometrija, teža, cena in podobno pa optimiramo z zveznim optimiranjem. MINLP omogoča

sočasno izvajanje diskretnega in zveznega optimiranja, zato so topologija, standardne dimenzije in vsi definirani zvezni parametri sočasno izračunani v enovitem optimizacijskem računskem procesu.

## 3. MINLP MODELNA FORMULACIJA SUPERSTRUKTURE

MINLP modelna formulacija nam rabi kot temeljni okvir, znotraj katerega modeliramo različne superstrukture v matematično obliko, v optimizacijski model superstrukture. Za modeliranje splošne superstrukture nam zadostuje splošna MINLP modelna formulacija (MINLP-G), za modeliranje mehanske superstrukture konstrukcije, ki izkazuje določene posebnosti, pa smo morali razviti posebno MINLP modelno formulacijo mehanske superstrukture (MINLP-SMS), [2].

### 3.1 Splošna MINLP modelna formulacija, MINLP-G

Splošni nekonveksni in nelinearni diskretno/zvezni optimizacijski problem je formuliran kot MINLP problem (MINLP-G) v obliki:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & z = c^T y + f(x) \\ \text{s.t.} \quad & h(x) = 0 \\ & g(x) \leq 0 \\ & B y + C x \leq b \\ & x \in X = \{x \in \mathbb{R}^n : x^{LO} \leq x \leq x^{UP}\} \\ & y \in Y = \{0, 1\}^m \end{aligned}$$

kjer je poleg vektorja zveznih spremenljivk  $x$  definiram tudi vektor diskretnih binarnih 0-1 spremenljivk  $y$ . Poleg nelinearnega izraza  $f(x)$  je namenski funkciji dodan še linearen izraz  $c^T y$ , ki običajno predstavlja stalne stroške. Nelinearne enačbe  $h(x) = 0$  in neenačbe  $g(x) \leq 0$  kakor tudi spodnje in zgornje meje zveznih spremenljivk  $x$  predstavljajo rigorozni sistem pogojnih (ne)enačb. Dodana je tudi množica

linearnih enačb in neenačb  $By + Cx \leq d$ , ki vsebujejo tako zvezne kot diskretne spremenljivke.

### 3.2 MINLP modelna formulacija mehanske superstrukture, MINLP-SMS

Zgornjo splošno MINLP modelno formulacijo smo priredili za sintezo konstrukcij, sintezo mehanskih superstruktur (MINLP-SMS). Rezultirajočo formulacijo predstavljamo v obliki:

$$\begin{aligned} \min \quad & z = c^T y + f(x) \\ \text{s.t.} \quad & h(x) = 0 \\ & g(x) \leq 0 \\ & A(x) \leq a \\ & Ey \leq e \\ & Dy^e + R(x) \leq r \\ & Ky^e + L(d^{cn}) \leq k \\ & Py + S(d^{st}) \leq s \\ & x \in X = \{x \in \mathbb{R}^n : x^{LO} \leq x \leq x^{UP}\} \\ & y \in Y = \{0, 1\}^m \end{aligned}$$

V MINLP modelni formulaciji mehanske superstrukture so definirane zvezne spremenljivke  $x = \{d, p\}$  in diskretne spremenljivke  $y = \{y^e, y^{st}\}$ . Zvezne, spremenljivke so nadalje razdeljene za design spremenljivke  $d = \{d^{cn}, d^{st}\}$  in v izvedbene (nondesign) spremenljivke  $p$ , kjer podvektorja  $d^{cn}$  in  $d^{st}$  predstavljata zvezne in standardne dimenzije. Z zveznimi spremenljivkami opišemo dimenzije konstrukcijskih elementov, prerezne karakteristike, napetosti, lastne frekvence, težo konstrukcije, ceno idr. Podvektorja binarnih spremenljivk  $y^e$  in  $y^{st}$ , predstavljata potencialni obstoj konstrukcijskih elementov znotraj definirane superstrukture ter potencialni izbor njihovih standardno-dimenzijskih alternativ.

Ekonomski namenska funkcija vsebuje stalne stroške v linearnem členu  $c^T y$  in dimenzijsko pogojene stroške v izrazu  $f(x)$ . Nelinearne in linearne pogojne enačbe ter neenačbe  $h(x) = 0$ ,  $g(x) \leq 0$  in  $A(x) \leq a$  predstavljajo rigorozni sistem obli-

kovnih, obremenitvenih, napetostnih, deformacijskih, stabilitetnih in drugih enačb, poznanih iz analize konstrukcij. Linearne pogojne (ne)enačbe  $Ey \leq e$  opisujejo in določajo odnose med diskretnimi spremenljivkami.

Mešane linearne (ne)enačbe  $Dy^e + R(x) \leq r$  vzpostavljajo medsebojne relacije med trenutno izbranimi in obstoječimi konstrukcijskimi elementi (ustrezni  $y^e = 1$ ) in ukinjajo vse zveze med trenutno zavrnjenimi oziroma neobstoječimi elementi (odgovarjajoči  $y^e = 0$ ). Mešane linearne (ne)enačbe  $Ky^e + L(d^{cn}) \leq k$  definirajo vsakemu izbranemu konstrukcijskemu elementu zvezne design spremenljivke (dimenzije). Le-te obstajajo samo takrat, kadar pripadajoči konstrukcijski element obstaja ( $y^e = 1$ ), drugače padejo v nič. Mešane linearne (ne)enačbe  $Py + S(d^{st}) \leq s$  definirajo spremenljivke standardnih dimenzij  $d^{st}$ . Vsaka standardna dimenzija  $d^{st}$  je določena kot skalarni produkt

$$d^{st} = \sum_{i \in I} q_i y_i^{st}$$

med pripadajočim vektorjem diskretnih številskih vrednosti standardnih dimenzij  $q$  in vektorjem binarnih spremenljivk  $y^{st}$ . Samo ena (optimalna) vrednost je lahko izbrana za vsako standardno dimenzijo:

$$\sum_{i \in I} y_i^{st} = 1$$

## 4 MINLP OPTIMIRANJE ZAPORNIC TUNEL INTAKE BULKHEADS

Optimirali smo sicer vse zapornice hidrotehničnega objekta Sultartangi, vendar pa je bilo najtežavnejše oziroma najzahtevnejše optimiranje štiridelnih zapornic Tunnel Intake Bulkheads, ki bodo zapirale vtok vtočnega tunela. Omenjene zapornice so na objektu Sultartangi največje zapornice: visoke so 14 m in široke 6.65 m. Za material zapornic smo predvideli jeklo St 52-3N. Tablaste zapornice Tunnel Intake

Bulkheads so sestavljene iz štirih delov, zato je njihova superstruktura bistveno večja kot pri ostalih zapornicah istega objekta, ki so dvodelne. Spodnja dva elementa štiridelne zapornice sta ob dejstvu, da sta lahko sestavljena v dvodelno zapornico in prenešana na turbinski vtok, predvidena tudi za zapiranje le-tega. To seveda samo še dodatno zakomplicira projektiranje zapornic, predvsem zaradi različnih dveh vodnih obtežb, tesnjenja in dviznih mehanizmov. Projektni horizontalni potresni pospešek znaša 0.7g! Potresna vodna obtežba na turbinskem vtoku je približno dvakrat večja kot pri tunelskem vtoku, zato bo pri optimiranju štiridelna zapornica tunelskega vtoka računsko obremenjena z nezvezno vodno obtežbo: spodnja dva zapornična elementa obremenjuje bistveno večji vodni potresni pritisk kot zgornja dva. Odločilna obtežba za dimenzioniranje zapornic je sila hidro-statičnega pritiska 16606 kN/zapornico ter potresna sila 27243 kN/zapornico.

Zapornice se spuščajo (ali dvigajo) v mirno vodo pri izenačenem hidrostaticnem pritisku. Spuščanje / dviganje zapornic je urejeno s portalnim žerjavom. Ker je prenos spodnjih dveh elementov od tunelskega vtoka do turbinskega vtoka (in nazaj) predviden z avtožerjavom nosilnosti 200 kN, znaša ob upoštevanju teže dviznih klešč 30 kN in faktorja varnosti dvigovanja 1.4, največja možna teža posameznega elementa 11.288 kN. Omenjeno največjo možno težo posameznega zaporničnega elementa smo pri optimiranju omejili z dodatnimi pogojnimi neenačbami.

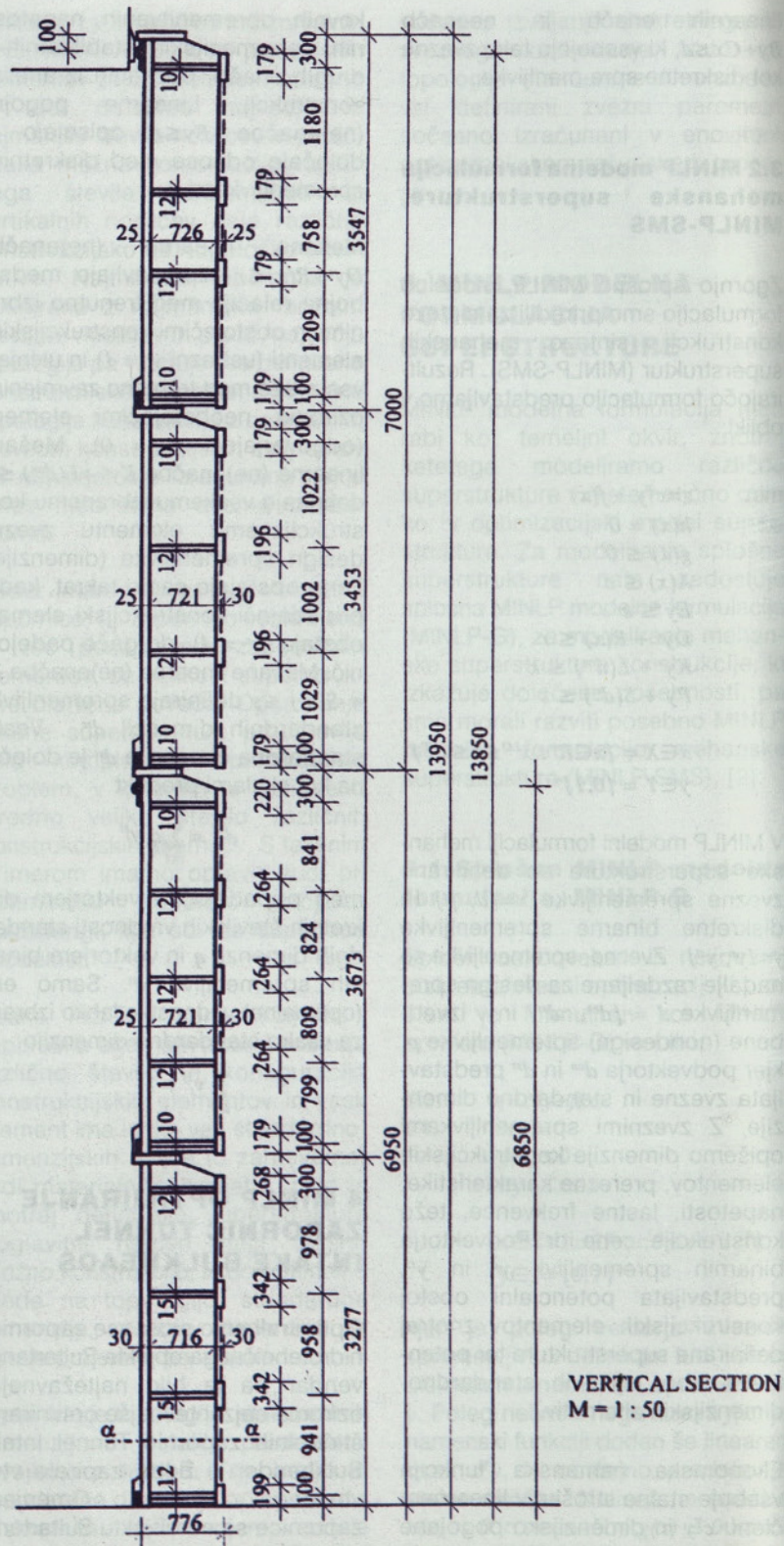
Generirali smo superstrukturo konstrukcije štiridelne tablaste zapornice, v kateri so vse možne konstrukcijske alternative podane z variranjem topologije 3 do 6 horizontalnih nosilcev za vsak glavni zapornični element in 5 do 9 vertikalnih nosilcev za celotno zapornico. Definirali smo 14 alter-

S. KRAVANJA: Optimiranje zapornic Tunnel Intake Bulkheads

nativ različnih standardnih debelin jeklenih pločevin in 2958 alternativ različnih diskretnih zaokroženih dimenzij, t.j. na 5 mm zaokroženih vrednosti zveznih dimenzij. S tem smo dobili zelo zapleten, nelinearni, diskretno/zvezni in nekonveksni optimizacijski problem s prek  $10^{15}$  različnih konstrukcijskih alternativ.

Na podlagi MINLP modelne formulacije smo izdelali MINLP optimizacijski model zapornice GATOP (GATe OPTimization), ki smo ga za ta primer posebej nadgradili s potresno obtežbo. Vodno potresno obtežbo smo definirali po Westergaardu [3]. Optimizacijski model smo zapisali z višjim algebrajskim modelskim jezikom GAMS [4]. Definirali smo ekonomsko namensko funkcijo lastnih izdelavnih stroškov, med katere smo uvrstili: materialne stroške, stroške varjenja, rezanja pločevin in antikorozijske zaščite. Namenska funkcija je podvržena sistemu oblikovnih, materialnih, napetostnih, deformacijskih in stabilitetnih pogojnih (ne)enačb, sicer poznanih iz strukturne analize. Sintezo zapornice smo izvajali v skladu z DIN 19704 [5].

Ker je optimizacijski model konstrukcije zapornice nekonveksen in nelinearen, smo za optimiranje uporabili modificirani OA/ER [6] algoritem ter povezano večfazno hierarhično MINLP strategijo [7], [8], ki smo jo nadgradili s posebno proceduro, ki avtomatsko poišče najugodnejše optimalne zaokrožitvene dimenzije, katerih vrednosti so najbližje vrednostim že dobljenih zveznih dimenzij prejšnjih MINLP iteracij. Kljub temu, da je skupno število binarnih spremenljivk celotnega problema izredno veliko oz. preveliko za normalno rešitev, smo s to proceduro bistveno zmanjšali število binarnih spremenljivk za vsako posamezno MINLP iteracijo, s čimer smo dobili dobre rezultate. Sintezo konstrukcije zapornice Tunnel Intake Bulkheads smo izvajali z lastnim MINLP računalniškim programom TOP



Slika 1: Optimalna konstrukcija zapornice Tunnel Intake Bulkheads, Sultartangi Hydroelectric Project, Islandija

(Topology Optimization Program) [9]. Program MINOS [10] smo uporabili za izračun NLP podproblemov in OSL [11] za reševanje MILP glavnih problemov.

## 5 SKLEP

Z optimiranjem smo dosegli 30 %

prihranka lastne cene konstrukcije tablastih zapornic Tunnel Intake Bulkheads glede na pogodbeno vrednost, dobljeno na osnovi klasične analize konstrukcije. Z MINLP optimiranjem smo v enovitem računskem procesu sočasno izračunali: optimalne stroške za izdelavo konstrukcije zapornic, optimalno topologijo z optimalnim številom nosilcev in

ploščinskih elementov, optimalne standardne debeline pločevin in optimalne zaokrožitve vrednosti vseh zveznih dimenzij.

Poleg cene smo bistveno zmanjšali tudi težo posameznih zapornic na 414 kN, s čimer smo zmanjšali dvizžno silo in s tem nosilnost dvizžnih mehanizmov, predvsem žerjavov.

## LITERATURA

- [1] Sultartangi Hydroelectric Project, Contract Documents SUL-30, Electromechanical Equipment, Landsvirkjun, February 1997.
- [2] Kravanja, S., Kravanja Z. and Benedik, B.S., MINLP optimization approach to the synthesis of large scale mechanical structures, Fourth International Conference OPTI 95, Computer Aided Optimum Design of Structures, 19-21 September 1995, Miami, FL, USA, Structural optimization (Computational Mechanics Publications, Edts. S. Hernandez, M. El-Sayed in C.A. Brebbia), Southampton, Boston, pp. 285-292.
- [3] Westergaard, Dynamic Water Pressure During Earthquake, From TVA Technical Report No. 13, "Kentucky Project".
- [4] Brooke, A., Kendrick, D. and Meeraus, A., GAMS – A user's guide, Scientific Press, Redwood City, CA, 1988.
- [5] DIN 19704, Stahlwasserbauten, Berechnungsgrundlagen, 1990.
- [6] Kravanja, Z. and Grossmann, I.E., New Developments and Capabilities in PROSYN - An Automated Topology and Parameter Process Synthesizer, Computers chem. Engng, 1994, 18(11/12), pp. 1097-1114.
- [7] Kravanja, S., Kravanja, Z. and Bedenik, B.S., Linked multilevel hierarchical approach to the MINLP synthesis of mechanical structures, Fifth International conference on computer aided optimum design of structures, Rome, September 8-10, Computer aided optimum design of structures (S. Hernandez, C.A. Brebbia), Computational Mechanics Publications, Southampton; Boston, 1997, pp. 203-212.
- [8] Kravanja, S. and Kravanja Z., Structural Synthesis of the Highfrequency dryer for Timber, 3<sup>rd</sup> International Conference, DMMI 97, Design to Manufacture in Modern Industry, International Conference, Portorož, Slovenia, str. 317-324, 1997.
- [9] Kravanja, S., Kravanja, Z., Benedik, B.S. and Faith, S., Simultaneous Topology and Parameter Optimization of Mechanical Structures, in Numerical Methods in Engineering '92 (ed Ch. Hirsch et al.), pp. 487-495. Proceedings of the First European Conference on Numerical Methods in Engineering, Brussels, Belgium, Elsevier, Amsterdam, 1992.
- [10] Murtagh B.A., and Saunders, M.A., MINOS User's. Guide, Technical Report SOL 83-20, System Optimization Laboratory, Department of Operations Research, Stanford University, 1985.
- [11] OSL, Optimization Subroutine Library. From IBM, Release 2.

# RAČUNALNIŠKE APLIKACIJE PRI ANALIZI KONSTRUKCIJ

## COMPUTER APPLICATIONS IN STRUCTURAL ANALYSIS

UDK 624.014 : 519.68

Branko S. BEDENIK

### POVZETEK

Prikazal sem nekaj aplikacij računanja konstrukcij iz vsakodnevne prakse s programskim paketom OCEAN, ki omogoča računanje, dimenzioniranje in optimiranje plošč, okvirov, paličij, stenastih konstrukcij, plošč na stebrih in ploskovnih konstrukcij, obremenjenih v lastni ravnini.

S prehodnim obdobjem uvajanja novih evropskih standardov za dimenzioniranje AB konstrukcij je v verziji 4.40 že vgrajeno dimenzioniranje po EUROCODE 2 v modulih MORJE (plošče) in OKVIR (ravninski okviri).

Uporaba teh standardov pri dimenzioniranju v prehodnem obdobju naj rabi za primerjavo s sedanjo prakso in za eventualno podajanje pripomb kot pomoč pri izdelavi končne verzije (SI) predpisov.

### SUMMARY

Some computer applications from everyday practice are presented using computer package OCEAN enabling analyses, dimensioning and optimisation of plates, plane frames, shear walls, plane and space trusses, thin walled structures and plates on columns.

A transient period in implementation of new European standards for concrete structures initiated an implementation of EUROCODE 2 into OCEAN, version 4.40 in modules MORJE (plate bending) and OKVIR (plane frames).

Usage of these standards in reinforcement calculations during transient period should help in evaluation of final proposal of new (SI) standards.

Avtor:

prof. dr. Branko S. Bedenik, dipl. inž. gradb., Fakulteta za gradbeništvo Maribor, Smetanova 17, 2000 Maribor

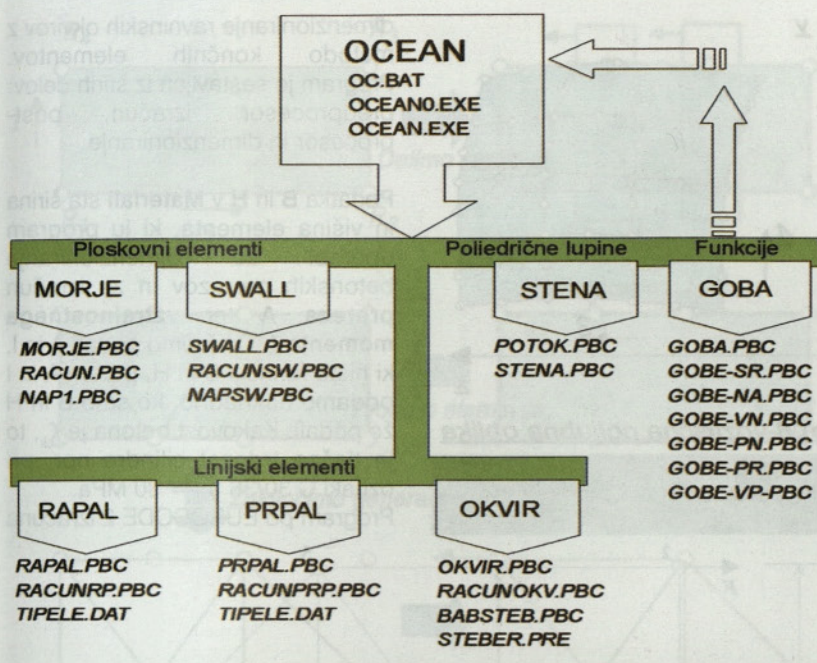
### 1 UVOD

OCEAN je interaktiven integriran paket za računanje in dimenzioniranje konstrukcij. Paket zajema analizo osnovnih vsakodnevnih tipov konstrukcij, kot

so plošče, okviri, nosilci, paličja, stenaste konstrukcije, plošče na stebrih in ploskovne konstrukcije, ki so obremenjene v lastni ravnini. OCEAN je prijazen program, saj omogoča grafičen vhod z menujskim delom na ekranu s

takojšnjo grafično interpretacijo in korekcijo vhodnih podatkov ter grafično interpretacijo izidov izračuna.

Uporabniku je metoda popolnoma transparentna, saj delo poteka



Slika 1: Struktura programa in tipi elementov

interaktivno brez eksplicitnega navajanja točk ali elementov na podlagi superelementov, ki jih delimo na manjše elemente. Povezava superelementov v konstrukcijo je poljubna, tako da lahko generiramo poljubne oblike konstrukcij.

- OCEAN je sestavljen iz naslednjih modulov, diagram poteka je prikazan na sliki 1.

- MORJE - račun in dimenzioniranje plošč (EuroCode 2)

- OKVIR - račun in dimenzioniranje ravninskih okvirjev (EuroCode 2)

- SWALL - račun strižnih sten

- RAPAL - račun in dimenzioniranje ravninskega paličja

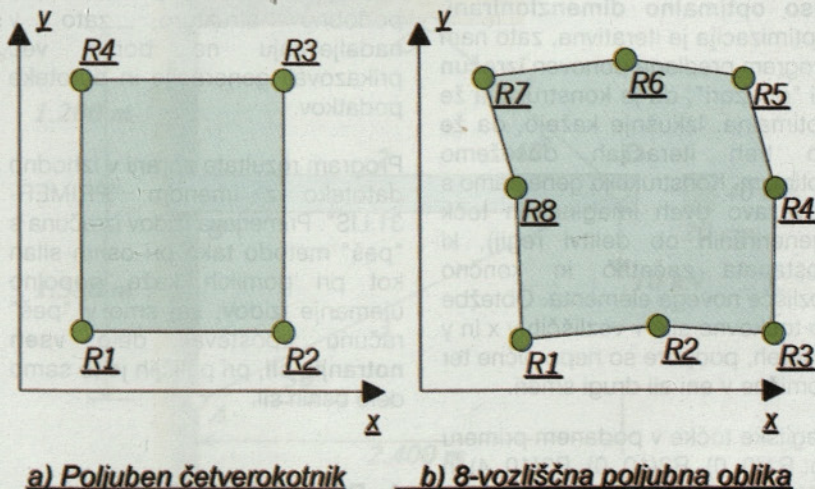
- PRPAL - račun in dimenzioniranje prostorskega paličja

- STENA - račun stenastih konstrukcij

- GOBA - račun in dimenzioniranje gobastih plošč

## 2 GENERACIJA KONSTRUKCIJE

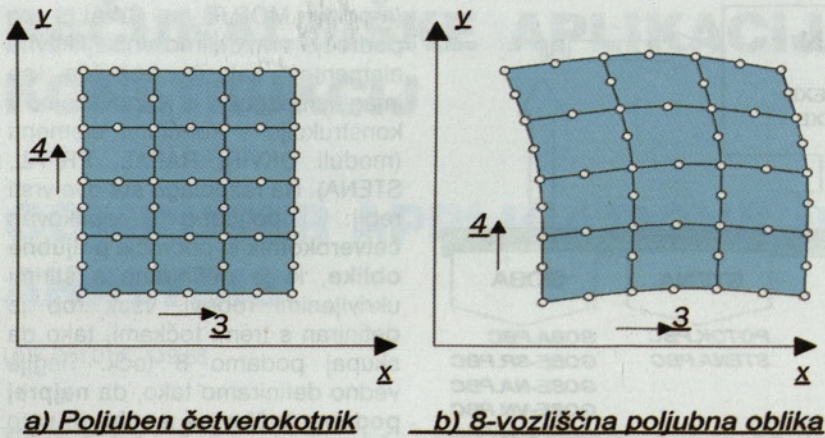
Konstrukcijo generiramo z ukazom Regije, s katerim definiramo del ali celo konstrukcijo, ki jo želimo razdeliti na končne elemente



Slika 2: Podajanje regijskih točk

(modula MORJE in SWALL) ali področje razdelimo na fiktivne elemente, katerih vozlišča so imaginarne točke, ki jih povežemo v konstrukcijo s končnimi elementi (moduli OKVIR, RAPAL, PRPAL, STENA). Na razpolago sta dve vrsti regij: poljubno oblikovan četverokotnik in področje poljubne oblike, ki je definirano s štirimi ukrivljenimi robovi, vsak rob je definiran s tremi točkami, tako da skupaj podamo 8 točk. Regije vedno definiramo tako, da najprej podamo točke na x robu in nato ostale točke podajamo protiurno. Podano regijo razdelimo v lokalni x in y smeri na zeleno število delitev, kjer delitve pri ploskovnih elementih predstavljajo elemente, pri linijskih elementih pa imaginarne točke, ki jih povežemo z elementi.

Regije lahko poljubno gradimo eno za drugo, vrstni red je nepomemben, pravitako je nepomembno izmenično mešanje 4- in 8-vozljučnih regij. Pazimo le na to, da se regije ali robovi regij med seboj ne prekrivajo in da je število elementov na skupnem robu enako. Začetna natančnost generacije ni potrebna, saj lahko z ukazi **Odstrani** in **Premakni** naknadno odstranimo elemente ali točke in premikamo točke, linije, področja ali vse.



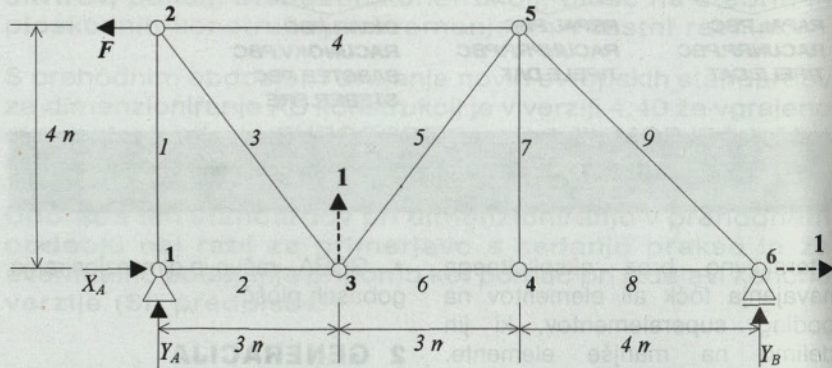
Slika 3: Elementi po delitvi

### 3 PRIMER GENERACIJE RAVNINSKEGA PALIČJA

Modul za račun ravninskih paličij se imenuje RAPAL in omogoča optimizacijo paličja z uporabo dveh algoritmov. Pri nateznih palicah kontrolira natezno napetost in izbere ustrezen prerez izmed prerezov, ki smo jih podali z ukazom materiali. Prereze tlačnih palic izbere tako, da izračuna ustrezno uklonsko nosilnost palice in jo primerja z izbranimi prerezi in nato izbere prvo višjo vrednost iz datoteke podatkov. Ob optimizaciji program v levem zgornjem okencu izpisuje elemente in pod njimi tiste elemente, ki še niso optimalno dimenzionirani. Optimizacija je iterativna, zato nam program predlaga ponoven izračun ali "opozori", da je konstrukcija že optimalna. Izkušnje kažejo, da že po treh iteracijah dosežemo optimum. Konstrukcijo generiramo s povezavo dveh imaginarnih točk (generiranih ob delitvi regij), ki postane začetno in končno vozlišče novega elementa. Obtežbe so točkovne sile v vozliščih v x in y smereh, podpore so nepomične ter pomične v eni ali drugi smeri.

Regijske točke v podanem primeru so: R1(0, 0), R2(10, 0), R3(10, 4) in R4(0, 4).

V času generiranja na "ekranu" tvori program datoteko s podatki (npr.



Slika 4: Ravninsko paličje

PRIMER31.DAT). Generacija pri drugih konstrukcijah poteka na enak način, tudi datoteka podatkov ima podobno strukturo, zato v nadaljevanju ne bomo več prikazovali generacije in datoteke podatkov.

Program rezultate shrani v izhodno datoteko z imenom "PRIMER-31.LIS". Primerjava izidov izračuna s "peš" metodo tako pri osnih silah kot pri pomikih kaže popolno ujemanje izidov, saj smo v "peš" računu upoštevali delo vseh notranjih sil, pri paličjih je to samo delo osnih sil.

### 4 RAVNINSKI OKVIR

Program OKVIR je interaktiven program za računanje in

dimenzioniranje ravninskih okvirov z metodo končnih elementov. Program je sestavljen iz štirih delov: predprocesor, izračun, postprocesor in dimenzioniranje.

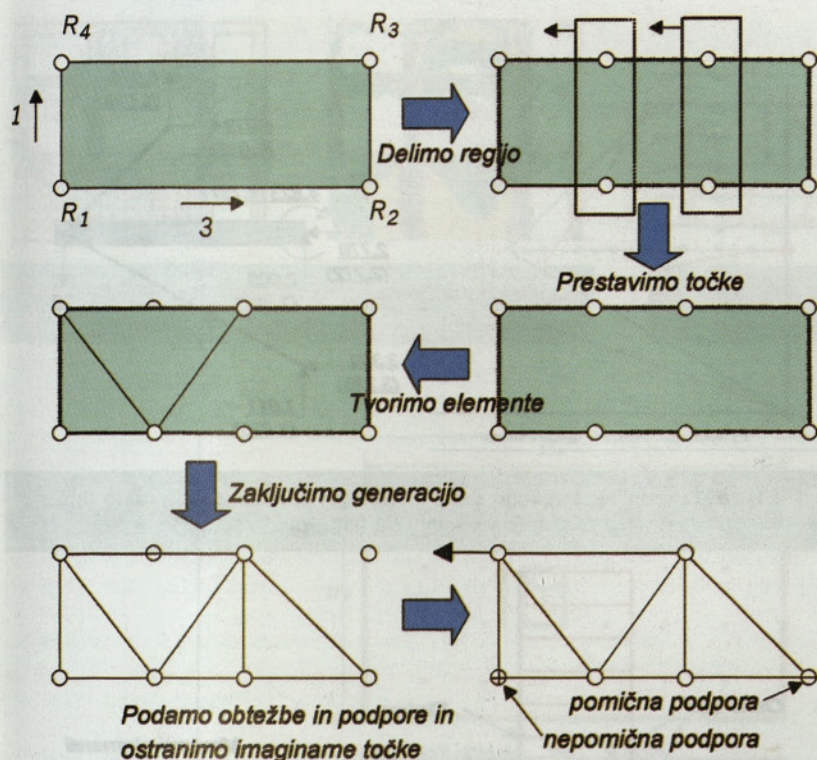
Podatka B in H v Materiali sta širina in višina elementa, ki ju program uporabi za dimenzioniranje betonskih prerezov in za izračun prereza A ter vztrajnostnega momenta I. Če želimo podati A in I, ki nista funkciji B in H, potem A in I podamo naknadno, ko smo B in H že podali. Kakovost betona je  $f_{ck}$ , to je tlačna trdnost cilindra npr. pri oznaki C 30/36  $f_{ck} = 30$  MPa. Program po EUROCODE 2 izračuna

projektno trdnost  $f_{cd}$  iz koeficienta varnosti po betonu  $\gamma_s = 1.50$ , torej je  $f_{cd} = 30/1.50 = 20$  MPa.

Po določitvi imaginarnih točk z ukazom Regije z ukazom Elementi določimo elemente. Ob izvršitvi ukaza program vpraša ali želimo delitev elementa na več podelementov. Delitev elementov uporabimo takrat, kadar želimo natančnejšo deformacijsko linijo, na splošno delitev ne izboljša natančnosti izračuna notranjih sil!

Element definiramo tako, da pokažemo začetno in končno točko elementa in kliknemo levi gumb. Členke podajamo le v vozliščih, element pa sprostimo tako, da ga najprej odstranimo in ga ponovno generiramo z več delitvami, nakar dodamo členek v željeno točko.





Slika 5: Postopek tvorjenja palične konstrukcije

Podpore so lahko različnih tipov:

• **Vpeta**

Preprečeni: pomik  $x$ , pomik  $y$  in zasak,

• **Nepomična**

Preprečena: pomik  $x$ , pomik  $y$ ,

• **Pomična X**

Preprečen: pomik  $y$ ,

• **Pomična Y**

Preprečen: pomik  $x$ ,

• **Elastično vpeta**

Preprečeni: pomik  $x$ , pomik  $y$  in zasak,

• **Elastično nepomična**

Preprečena: pomik  $x$ , pomik  $y$

V primeru, ko izberemo atribut **Elastično vpeta** ali **Elastično nepomična**, podamo še ustrezne vzmetne oz. zasučne konstante iz meniju:

• **X-vzmet** [kN/m]

• **X-vzmet** [kN/m]

• **Zasučna vzmet** [kNm/rd]

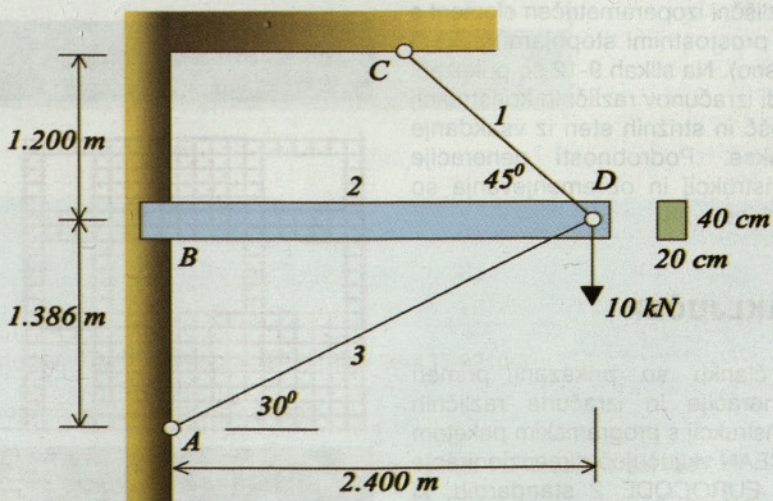
• **Enakomerna zvezna** [kN/m]

• **Trapezna** [kN/m]

• **Koncentrirane sile** [kN, kNm]

• **Temperaturna obremenitev**  $\Delta T$  [st]

• **Premik podpore** [m]



Slika 6: Mešana konstrukcija (Primer 8.4)

**Tipe obtežb** izberemo iz menuja in jih podajamo z miško na naslednje načine:

• **Enakomerno zvezno in trapezno** obtežbo podamo tako, da pokažemo levo (spodnjo) točko in nato desno (zgornjo) točko delovanja obtežbe. Pozitivna smer je navzdol za horizontalne ali poševne elemente in desno za vertikalne elemente.

• **Koncentrirane sile in Premike podpor** podamo tako, da pokažemo točko delovanja sil  $F_x$ ,  $F_y$  in  $M$ , oz. podporo, ki se premika. Pozitivne sile so z leve proti desni pri horizontalnih silah in **navzdol** pri **vertikalnih silah**.

• **Temperaturno obremenitev**  $\Delta T$  podajamo po elementih v **Področju**.

Če v bližini zelene točke na elementu ni vozlišča elementa, nas program vpraša, ali želimo **NOVO** točko. V tem primeru program tvori novo vozlišče in obstoječ element razdeli na dva elementa ter avtomatsko preštevilči vse elemente in vozlišča. Vsi podatki so hierarhični, tako da velja zadnji vnešen podatek o obtežbi na element.

**Obtežbe** izbiramo med naslednjimi možnostmi:

Konstrukcijo generiramo na običajen način in v vozlišče D vstavimo členek; podpori v točkah A in C sta nepomični, točka B je vpeta. Izidi izračuna so podani v datoteki izidov PRIMER84.LIS. Če primerjamo izide z izračuni v poglavju 8 iz [1], opazimo majhne razlike z vrednostmi, ko smo upoštevali tudi vpliv osnih in prečnih sil, kar lahko pripišemo nenatančnosti "peš" računa (Slika 7).

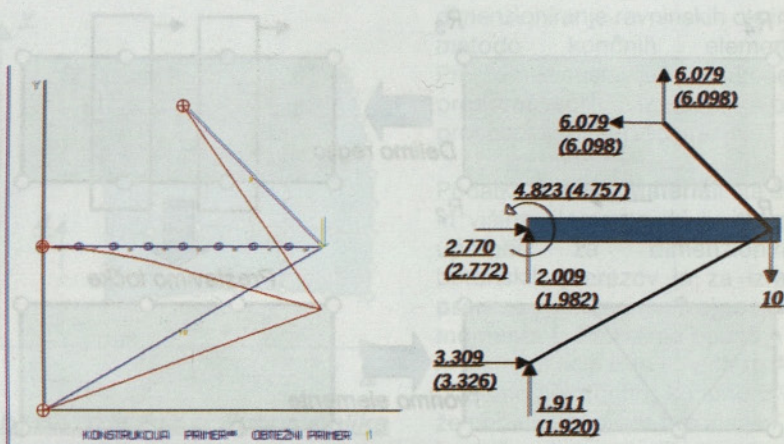
Če podpore pod stebri ne moremo nepomično temeljiti (s piloti ali na skali), potem izdelamo računalniški model elastične podpore (slika 8), pri katerem so horizontalni elementi zelo togi in zato rotirajo skupaj s stebrom, medtem ko togost vertikalnih podpornih stebričkov izračunamo iz karakteristik temeljnih tal. Lahko izberemo enake prereze A ter dolžine L in variramo modul E ali obratno.

### 5 PLOSKOVNE KONSTRUKCIJE

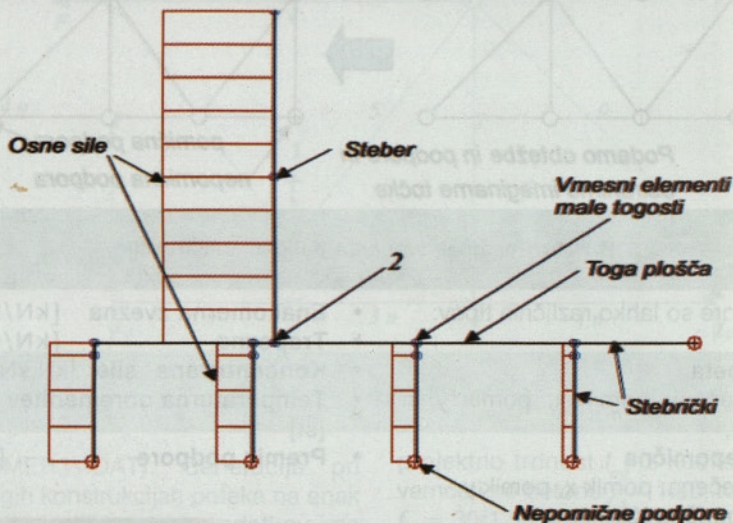
V programu za račun plošč MORJE je uporabljen 9-vozliščni izoparametričen element s 27 prostostnimi stopnjami in v programu za račun sten SWALL 8-vozliščni izoparametričen element s 16 prostostnimi stopnjami (slika 3 desno). Na slikah 9-12 so prikazani izidi izračunov različnih konstrukcij plošč in strižnih sten iz vsakdanje prakse. Podrobnosti generacije konstrukcij in obremenjevanja so podane v [4].

### ZAKLJUČEK

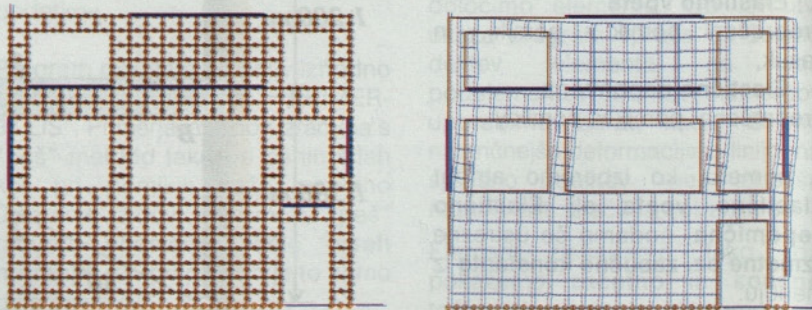
V članku so prikazani primeri generacije in izračuna različnih konstrukcij s programskim paketom OCEAN vključujoč dimenzioniranje po EUROCODE 2 standardih, ki sicer še niso v veljavi, vendar se moramo pravočasno pripraviti na njihovo obvezno uporabo in z uporabo v praksi še pravočasno



Slika 7: Izris konstrukcije s pomiki (800 x povečano) in prosto telo v ravnotežju (v oklepaju so izidi "peš" računa)

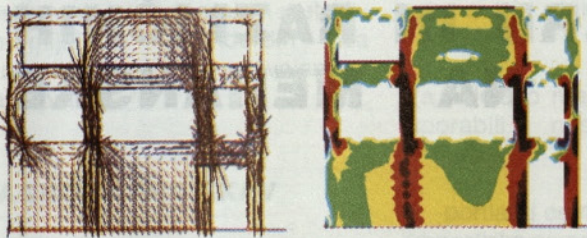


Slika 8: Simulacija elastičnega podpiranja pod stebrom

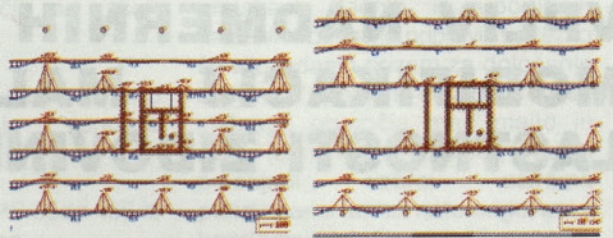


Slika 9: Betonski okvir z zidanimi polnili, desno pomiki ob potresu (SWALL)

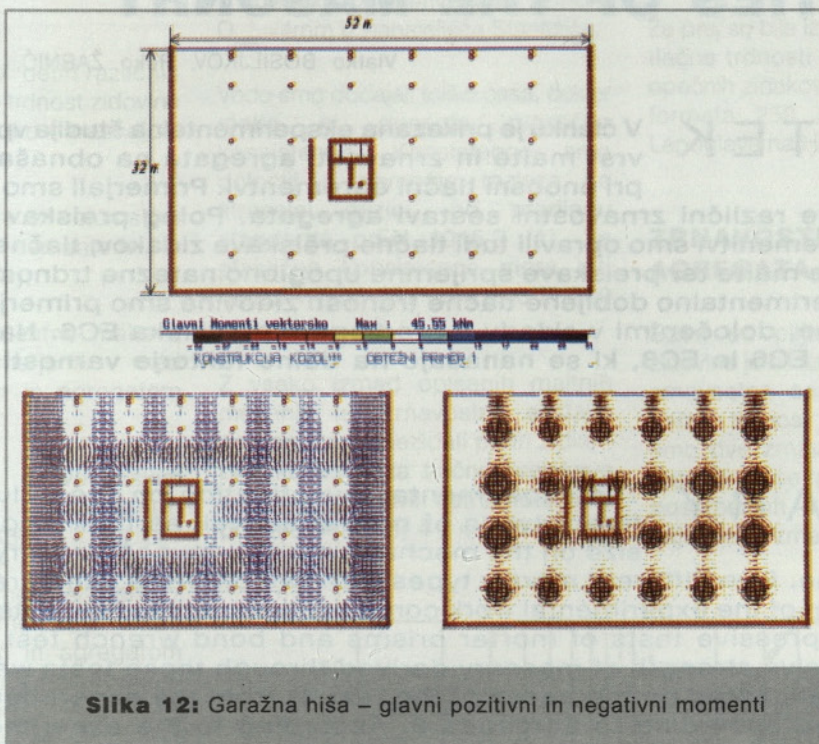
predlagati spremembe pred povzetih iz avtorjeve knjige [1], kjer dokončno veljavo. Nekaj primerov je so podane podrobnejše razlage.



**Slika 10:** Betonski okvir – glavne napetosti in napetosti  $\sigma_y$  ob potresu (SWALL)



**Slika 11:** Garažna hiša – ovojnice momentov (kNm) in armature ( $\text{cm}^2$ ) v smeri x



**Slika 12:** Garažna hiša – glavni pozitivni in negativni momenti

## LITERATURA

- [1] Branko S. Bedenik: Statika konstrukcij, UM FG, Maribor 1998, ISBN 86-435-0210-3
- [2] EUROCODE ENV 1992-1-1, European prestandard, CEN 1992
- [3] EUROCODE 2, Teil 1-1, Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken, TU Graz, Institut fuer Betonbau, Seminar, Juni 1994
- [4] Branko S. Bedenik: Programski paket OCEAN, Verzija 4.0, Maribor 1997

# VPLIV NADMERNIH ZRN IN RAZLIČNIH MODIFIKACIJ MALT NA MEHANSKE LASTNOSTI ZIDOVINE

## INFLUENCE OF THE OVER-SIZED GRAINS AND MODIFIED MORTARS ON MECHANICAL PROPERTIES OF THE MASONRY

UDK 691.53 : 620.17

Vlatko BOSILJKOV, Roko ŽARNIČ, Martin PREGELJ

**POVZETEK** V članku je prikazana eksperimentalna študija vplivov različnih vrst malte in zrnivosti agregata na obnašanje zidovine pri enoosni tlačni obremenitvi. Primerjali smo pet različnih vrst malte ter dve različni zrnivostni sestavi agregata. Poleg preiskav zidovine pri enoosni tlačni obremenitvi smo opravili tudi tlačne preiskave zidakov, tlačne in upogibno natezne preiskave malte ter preiskave sprijemne upogibno natezne trdnosti med malto in zidakom. Eksperimentalno dobljene tlačne trdnosti zidovine smo primerjali s tlačnimi trdnostmi zidovine, določenimi v skladu s predlogom pravilnika EC6. Na koncu sledi komentar določil EC6 in EC8, ki se nanašajo na delne faktorje varnosti za lastnosti materialov.

**SUMMARY** The experimental investigation on the influence of different types of mortar as well as their aggregate grain size on the mechanical behaviour of masonry under compression was done. Five different mortar types with two different sand gradation were used. The program of the experimental work contains the compressive tests of wallettes, flexural and compressive tests of mortar prisms and bond wrench test on masonry prisms. Compressive strength of masonry derived through those tests was compared with the values calculated on the bases of the results from the experiments and analytically calculated according to Eurocode 6. According to the experimental results the short comment of the partial safety factors for materials from the EC 6 and EC 8 were made as well.

### Avtorji:

asist. mag., Vlatko Bosiljkov, dipl. inž. gradb., Katedra za preizkušanje materialov in konstrukcij, FGG Ljubljana  
 prof. dr., Roko Žarnić, dipl. inž. gradb., Katedra za preizkušanje materialov in konstrukcij, FGG Ljubljana  
 Martin Pregelj - Primorje, Ajdovščina

### UVOD

Z osamosvojitvijo Slovenije je nastala potreba po urejanju tehnične regulative za področje gradbeništva. Odločitev, da se slovenski predpisi in standardi uskladijo s predpisi Evropske zveze je sprejeta zaradi potrebe po ekonomski povezanosti

in postopni integraciji Slovenije v evropski prostor in trg. Zadnja leta intenzivno pripravljamo našo zakonodajo tako, da po ustrezni pripravi in prilagoditvi prevzemamo kot lastne tiste predstandarde, ki so že sprejeti v Evropski zvezi. Med te sodijo tudi Eurocode 6 in njegovi spremljajoči standardi, ki v svojih

poglavjih obravnavajo zidane zgradbe. V okviru prizadevanj po čim hitrejšem uvajanju novih predpisov in standardov v slovensko prakso na Katedri za preskušanje materialov in konstrukcij na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani potekajo aktivnosti, katerih sestavni del je

verificiranje preskuševalnih metod v spremljajočih standardih za Eurocode 6 ter njihovo uvajanje v našo prakso.

## ZASNOVA PREISKAV

Osnovni program preiskav obsega eksperimentalno študijo vplivov različnih vrst malte na obnašanje zidovine pri enoosni tlačni obtežbi in primerjavo rezultatov z rezultati analitičnega izračuna trdnosti po Eurocode 6 (EC6).

Primerjali smo vpliv petih različnih vrst malte na tlačno trdnost zidovine pri enoosni monotono naraščajoči tlačni obremenitvi:

- cementne malte z volumskim razmerjem med cementom in agregatom 1:4 (MIX1),
- podaljšane cementne malte z volumskim razmerjem med cementom, apnom in agregatom 1:1:6 (MIX2),
- apnene malte z volumskim razmerjem med apnom in agregatom 1:3 (MIX3),
- podaljšane cementne malte z volumskim razmerjem med cementom, apnom in agregatom 1:1:6, modificirano s polipropilenski vlakni (MIX4) in
- podaljšane cementne malte z volumskim razmerjem med cementom, apnom in agregatom 1:1:6, z dodano rabitz mrežico (MIX5).

Pri pripravi omenjenih malt smo uporabili dve zrnavostni sestavi agregata:

- drobozrnati agregat,
- grobozrnati agregat.

Grobo zrnati agregat dobimo na tržišču, drobo zrnatega pa smo dobili tako, da smo grobo zrnatega presejali in izločili vsa zrna, katerih

premer je bil večji od štirih milimetrov.

Za izdelavo maltnih mešanic smo uporabili naslednje osnovne materiale:

- portland cement PC 35dz 45S iz trboveljske cementarne,
- hidratizirano apno, ki ga proizvaja Industrija gradbenega materiala iz Zagorja ob Savi,
- pesek z največjim zrnom  $D_{max}=4\text{mm}$  iz nahajališča Stanežiče.

Vodo smo dodajali toliko časa, dokler malta ni dosegla plastične konsistence. Konsistenco smo določili s pomočjo razleza na stresalni mizici, po predlogu standarda prEN 1015-3 [1]. Za plastično konsistenco mora biti razlez v intervalu med 140 in 200 mm.

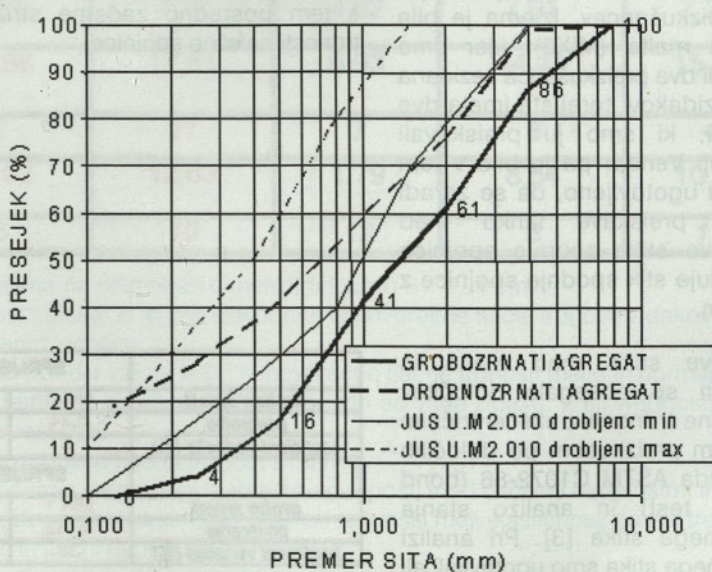
Z vsako izmed opisanih maltnih mešanic ter zrnavostno sestavo agregata smo sezidali po tri zidke - preizkušance za tlačne preiskave zidovine, pripravili ustrezno število prizmic dimenzij 4 / 4 / 16 cm, za

preiskave tlačnih in upogibnih nateznih trdnosti in pripravili ustrezno število zidanih prizem za določanje sprijemne upogibno natezne trdnosti stičnega območja med malto in zidaki (bond wrench metoda [1]). Vsi omenjeni vzorci oziroma preizkušanci so bili nato negovani v konstantnih labora-torijskih pogojih. Spremljajoče preiskave sestavnih materialov so bile opravljene istega dne kot preiskave tlačnih zidkov. Po približno 150 dneh smo začeli s preiskavami.

Že prej so bile izvedene preiskave [1] tlačne trdnosti uporabljenih polnih opečnih zidakov stan-dardnega JUS formata 250 / 120 / 65 mm iz Lepoglave na Hrvaškem.

## ZRNAVOSTNA SESTAVA AGREGATA

Eden od ciljev tlačnih preiskav zidovine je bil tudi ugotavljanje vpliva zrnavostne sestave agregata na tlačno trdnost zidovine. Primerjali smo dve zrnavostni sestavi agregata, ki sta se razlikovali v vsebnosti posameznih frakcij in v velikosti največjega zrna.



**Slika 1:** Zrnavostni sestavi uporabljenega drobozrnatega agregata in krivulje zrnavostne sestave po JUS U.M.2.010 standardih

V. Bosiljkov, R. Žamič, M. Pregelj: Vpliv nadmemnih zrn na lastnosti zidovine

Zrnavostni sestavi obeh agregatov sta prikazani na sliki 1. Pri tem je treba poudariti, da zrnavostne krivulje po EC-6 zaenkrat v spremljajočih standardih za EC 6 še niso podane.

## PREISKAVE MALT

Tlačne in upogibne preiskave malt smo opravili v skladu s prEN 1011-11 [2].

Kot je razvidno iz preglednice 1 velikih razlik v trdnosti med drobozrnato in grobozrnato malto za posamezno vrsto mešanice ni. Omembe vredna je le razlika v tlačni trdnosti za apneno malto (MIX3), ki pa je verjetno samo posledica velikega raztrosa rezultatov (veliki koeficient variacije).

## PREISKAVE STIKA MED MALTO IN ZIDAKI

Preizkušanci za določanje trdnosti stika med malto in zidaki so bile zidane prizme sezidane iz dveh zidakov. Med negovanjem smo jih obtežili še z dvema zidakoma. Za vsako vrsto malte smo pripravili po pet preizkušancev. Izjema je bila apnena malta (MIX3), kjer smo pripravili dva preizkušanca sezidana iz treh zidakov, torej sta imela dve spojnici, ki smo ju preiskovali posebej. Vendar pa je bilo v tem primeru ugotovljeno, da se zaradi načina preiskave lahko med preiskavo stika zgornje spojnice poškoduje stik spodnje spojnice z zidakom.

Preiskave stika med malto in zidakom so obsegale določitev sprijemne trdnosti z ekscentričnim nateznim preizkusom po določenih standarda ASTM C1072-86 (bond wrench test) in analizo stanja porušenega stika [3]. Pri analizi porušenega stika smo ugotavljali ali je prišlo do odpovedi stika med malto in zgornjim zidakom ali med malto in spodnjim zidakom ali celo

UPOGIBNA TRDNOST MALTE (MPa)					
<i>drobno zrnati</i>	MIX 1	MIX 2	MIX 3	MIX 4	MIX 5
povprečje	5,67	3,29	0,58	2,86	-
koeficient variacije (%)	4	7	8	5	-
TLAČNA TRDNOST MALTE (MPa)					
<i>drobno zrnati</i>	MIX 1	MIX 2	MIX 3	MIX 4	MIX 5
povprečje	24,15	12,54	2,09	11,13	-
koeficient variacije (%)	6	8	5	2	-
UPOGIBNA TRDNOST MALTE (MPa)					
<i>grobo zrnati</i>	MIX 1	MIX 2	MIX 3	MIX 4	MIX 5
povprečje	5,66	4,10	0,59	3,17	2,93
koeficient variacije (%)	5	8	8	6	7
TLAČNA TRDNOST MALTE (MPa)					
<i>grobo zrnati</i>	MIX 1	MIX 2	MIX 3	MIX 4	MIX 5
povprečje	25,88	15,22	1,29	13,67	12,19
koeficient variacije (%)	6	1	11	6	5

\* Za drobozrnato MIX 5 nismo izdelali maltnih prizmic, ker je sestava omenjene mešanice enaka kot pri MIX 2.

Preglednica 1: Tlačne in upogibne trdnosti malt

po malti. Rezultati preiskav so podani v preglednici 2.

Rezultati preiskav zelo indikativno kažejo na vpliv granulometrijske sestave na kakovost stičnega območja neglede na vrsto mešanice. Tudi koeficient variacije je v primeru grobozrnatih mešanic ustrezno večji. Tukaj je treba poudariti, da je sprijemna natezna upogibna trdnost direktni pokazatelj upogibne trdnosti zidovine paralelno z naležno spojnico. Po drugi strani pa je tudi indikativni pokazatelj kvalitete stika in s tem posredno začetne strižne trdnosti naležne spojnice.

## PREISKAVE ZIDKOV

### Dispozicija preiskave

Tlačne preiskave zidovine smo opravili v laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani. Za tlačne preiskave zidovine smo v skladu s določili standardov prEN 1052-1 in ISO 9652-4 [4] izdelali po tri preizkušance - zidke z vsako od petih vrst malte. Zidake smo pred vgradnjo navlažili, da bi dosegli čimbolj homogeno kakovost stika pri zidkih sezidanih z isto malto. Zidal je kvalificiran zidar. Preizkušanci so bili negovani v laboratorijskih pogojih vse do dneva preiskav, ko smo jih opremili z merilci deformacij in pripravili za preizkušanje. Vse preizkušance smo obremenjevali z računalniško vodenim preizkuševalnim strojem Instron kapacitete 1000 kN. Obremenitev smo nanašali z vsiljevanjem pomikov bata prek stroja s konstantno hitrostjo 0,3 mm/

SPRIJEMNA NATEZNA UPOGIBNA TRDNOST (MPa)					
<i>drobno zrnati</i>	MIX 1	MIX 2	MIX 3	MIX 4	MIX 5
povprečje	0,34	0,23	0,08	0,29	0,44
koeficient variacije (%)	6	12	21	13	14
SPRIJEMNA NATEZNA UPOGIBNA TRDNOST (MPa)					
<i>grobo zrnati</i>	MIX 1	MIX 2	MIX 3	MIX 4	MIX 5
povprečje	0,182	0,045	0,035	=	0,063
koeficient variacije (%)	35		13		33

Preglednica 2: Rezultati izračuna sprijemne natezne upogibne trdnosti stika med malto in zidaki

minuto. Odločili smo se za namestitve osmih deformetrov in treh induktivnih merilcev pomikov. Lega posameznih merilcev deformacij je prikazana na sliki (Slika2).

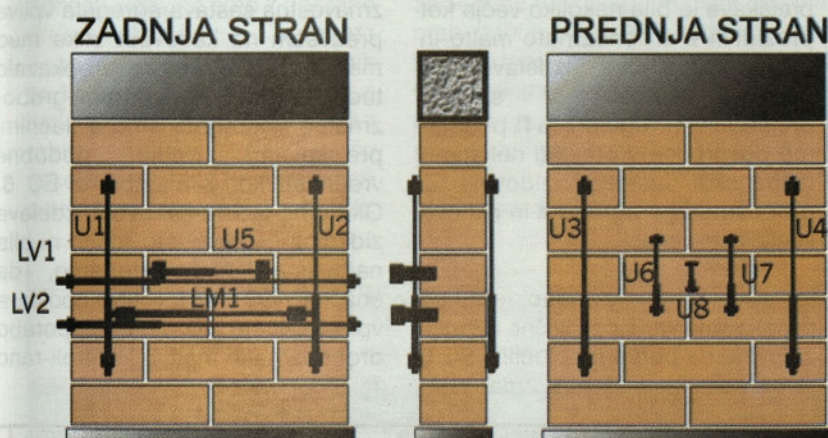
Z merilci deformacij smo spremljali globalne deformacije zidka (U1 do

U4, in LV1, LV2) in lokalne deformacije zidka in zidaka (U5 do U8) ter posledično malte. Merili smo samo deformiranje v ravnini zidka. Natančnost meritev je bila za deformetre  $1 \mu\text{m}$ , za induktivne merilce pomikov pa  $10 \mu\text{m}$ .

## Rezultati preiskav

Med seboj smo primerjali povprečno tlačno trdnost in povprečni elastični modul zidovine pri posameznih mešanicah. Poleg teh dveh lastnosti so v spodnji preglednici (Preglednica 3) podane tudi povprečne tlačne trdnosti posameznih maltnih mešanic in pa normalizirana tlačna trdnost uporabljenih zidakov, ki smo jih potrebovali za izračun tlačne trdnosti zidovine po določilih predloga pravilnika EC 6.

Na podlagi dobljenih rezultatov za posamezne maltne mešanice lahko v prvi vrsti povemo, da smo dobili izredno visoke tlačne trdnosti zidovine. Prav tako so izredno visoki elastični moduli. To je posledica optimalnih pogojev v katerih so bili zidki sezidani, negovani in preizkušani. Kvaliteta izdelave zidkov



Slika 2: Merska mesta na preiskušanču

		MIX1	MIX2	MIX3	MIX4	MIX5
$f_m$ (MPa)	povprečje	24,15	12,54	2,09	11,13	12,54
	koef. variacije %	6	8	5	2	8
$f_b$ (MPa)		17,39	17,39	17,39	17,39	17,39
$f_w$ (MPa) po EC 6		8,51	7,23	4,62	7,01	7,23
$f_w$ (MPa) preiskava	povprečje	14,98	12,51	6,93	14,44	15,21
	koef. variacije %	2	21	7	8	4
$E_{w,(30\%)}$ (GPa)	povprečje	12,62	12,53	1,79	8,54	10,31
	koef. variacije %	6	10	12	3	11

$f_{m, \max}$   
 $f_{b, \max}$

$f_{w, \max}$

$f_{w, \max}$  preiskava  
 $E_{w,(30\%)}$

je tlačna trdnost malte določena na prizmicah dimenzij približno  $8 / 4 / 4 \text{ cm}$ ,

je normalizirana tlačna trdnost zidaka, ki je bila izračunana iz povprečne tlačne trdnosti zidakov, določene s tlačnim preizkusom zidakov,

po EC 6 je izračunana tlačna trdnost zidovine [4] iz povprečne tlačne trdnosti malte in normalizirane tlačne trdnosti zidakov. Pri tem smo za faktor K, ki je odvisen od vrste zidaka, vzeli vrednost 0.60, za  $\alpha$  vrednost 0,65 in za  $\beta$  vrednost 0,25.

je pri tlačni preiskavi zidkov dobljena tlačna trdnost zidovine,

elastični modul zidovine izračunan na podlagi diagrama sovisnosti med tlačnimi napetostmi in vertikalnimi deformacijami zidovine kot sekantni modul pri računski meji elastičnosti na eni tretjini maksimalne tlačne napetosti in tlačni napetosti 0,5 MPa.

Preglednica 3: Rezultati preiskav iz drobnozrnatih malt

je bila zelo dobra. Najvišje tlačne trdnosti smo dobili pri podaljšani cementni malti z dodano rabitz mrežico (MIX5). Zelo visoke trdnosti smo dobili tudi pri cementni malti (MIX1) in podaljšani cementni malti z vlakni (MIX4). Nekoliko nižja je maksimalna tlačna trdnost pri navadni podaljšani cementni malti (MIX2). Tlačne trdnosti obeh apnenih malt so po pričakovanjih precej nižje.

Največji elastični modul smo dobili pri cementni in navadni podaljšani cementni malti. Če slednjega primerjamo z elastičnim modulom zidovine, sezidane z ostalimi dvema podaljšanimi cementnimi maltami, ugotovimo, da smo dobili pri modificiranih maltah nižji elastični modul, še posebej modificirana malta z vlakni. Pri tem moramo poudariti, da smo pri modificiranih maltah dobili podoben mehanizem porušitve, ki pa se zelo razlikuje od mehanizma porušitve pri navadni podaljšani cementni malti. Pri prvem mehanizmu ne zasledimo cepilne razpoke. Zaradi bolj podajne malte in dobre kakovosti stika so zidaki prevzeli precej večje napetosti kot pri običajni podaljšani cementni malti, kar je povzročilo močno razpokanost zidakov, malta pa je ostala skoraj nerazpokana. Opisani porušni mehanizem je bolj izrazit pri podaljšani cementni malti z mrežico. Za drug mehanizem porušitve, ki je značilen za navadno podaljšano cementno malto, pa je značilen lep razvoj vzdolžne in prečne, tako centralnih kot krajnih razpok po celotni višini preizkušanca. Razpoke potekajo kontinuirno čez zidake in maltne spojnice.

Če primerjamo razmerje med elastičnim modulom in maksimalno tlačno napetostjo za posamezne vrste malt, ugotovimo, da je pri navadni podaljšani cementni malti le-to skoraj enkrat večje kot pri z vlakni modificirani malti, nekoliko manjša pa je razlika pri z mrežico modificirani malti. Za cementno malto je omenjeno razmerje nekje vmes.

Za tlačne preiskave zidakov, sezidanih

z malto iz grobozrnatega agregata, je v splošnem značilen velik raztros rezultatov. Pri tem je potrebno povedati, da so bile te preiskave opravljene najprej in je zato potrebno upoštevati tudi vpliv začetne neenakosti izvedbe preiskav. Starost zidakov na dan preiskave je bila nekoliko večja kot pri zidkih z drobozrnato malto in kakovost njihove izdelave pa nekoliko slabša. V spodnji preglednici (Preglednica4) podajamo povprečne vrednosti nekaterih mehanskih lastnosti zidovine iz grobozrnatega agregata in njihove koeficiente variacij.

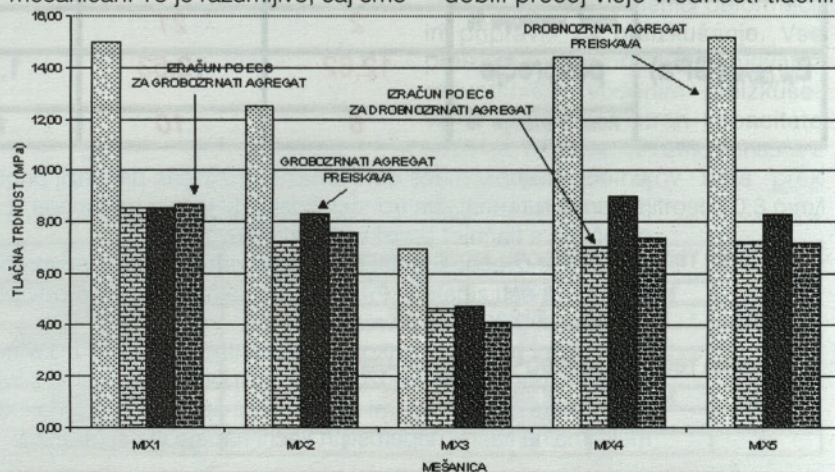
Iz slike 3 je razvidno, da so pričakovane vrednosti tlačne trdnosti zidovine na podlagi določili z EC 6 približno enake za obe zrnavnosti

uporabili v obeh primerih enake zidake, pa tudi povprečne tlačne trdnosti maltnih prizem so bile pri posameznih mešanicah precej podobne. Iz tega lahko sklepamo, da je vpliv zrnavnosti agregata na lastnosti same malte manjši kot na lastnosti zidovine. Pri slednji zrnavnostna sestava agregata vpliva predvsem na kakovost stika med malto in zidaki, kar se je pokazalo tudi v praksi. Pri uporabi grobozrnatega agregata smo s tlačnimi preiskavami dobili podobne vrednosti kot z enačbo iz EC 6. Glede na to, da kakovost izdelave zidakov z grobozrnato malto ni bila najboljša lahko sklepamo, da enačba v EC 6 zadovoljivo upošteva vpliv kvalitete zidovine. Z uporabo drobozrnatih malt in kontroli-rano

		MIX1	MIX2	MIX3	MIX4	MIX5
$f_m$ (MPa)	povprečje	25,88	15,22	1,229	13,677	12,2919
	koef. variacije %	6	1	111	66	55
$f_b$ (MPa)		17,39	17,39	17,399	17,399	17,399
$f_w$ (MPa) po EC 6		8,66	7,58	4,009	7,388	7,7818
$f_w$ (MPa) preizkava	povprečje	8,51	8,31	4,733	9,01	8,828
	koef. variacije %	24	24	144	99	111
E (GPa)	povprečje	2,54	3,20	1,004	2,959	2,277
	koef. variacije %	4	29	255	88	1616

Preglednica 4: Rezultati preiskav zidakov iz grobozrnatih malt

sestavi agregata pri vseh petih izdelavo ter nego zidakov pa smo dobili precej višje vrednosti tlačnih



Slika 3: Primerjava tlačnih trdnosti zidovine iz drobo in grobozrnatih malt, dobljenih s preiskavo in izračunanih po EC 6



trdnosti zidovine. Omenjeni eksperimentalni rezultati so dober kazalec zakaj pri računski obravnavi zidovine uporabljamo varnostne faktorje ( $\gamma_m$ ) za material in zakaj so njihove vrednosti relativno visoke. Največje povečanje tlačne trdnosti zidovine smo z uporabo drobnozrnatega agregata dosegli pri obeh modificiranih podaljšanih cementnih maltah, s tem, da je razlika pri modifikaciji z rabitz mrežico (MIX5) še nekoliko večja kot pri modifikaciji s polipropilenskimi vlakni (MIX4).

gata dobili tudi do 100% večje vrednosti, so se pri elastičnem modulu vrednosti povečale tudi do šestkrat. Največje povečanje smo dosegli pri cementni malti (MIX1). Očitno se cement boljše veže z drobnimi frakcijami agregata in s tem omogoči bolj kompaktno oziroma togo zidovino. Podobno povečanje zasledimo tudi pri podaljšani cementni malti (MIX2). Nekoliko drugačne kot pri tlačni trdnosti pa so razmere pri zidovini iz modificiranih podaljšanih cementnih malt, saj je dobljeno povečanje modula elastičnosti precej manjše kot pri navadni podaljšani cementni malti. Najmanj občutljiva na spremembo zrnastostne

faktor varnosti ne presega vrednosti dve.

Glede na to ter na podatek, da smo varnostni koeficient določili tako, da smo zanemarili druge vplivne parametre na tlačno trdnost zidovine [1], menimo, da je za Slovenijo povsem upravičena izbira delnega faktorja varnosti za lastnosti materialov predlagana v [5], ki ustreza II. kategoriji kontrole proizvodnje in C kategoriji kontrole izvedbe po EC 6.

Kar se tiče vrednosti delnih varnostnih faktorjev po EC 8, ki so zaradi značaja potresne obtežbe in filozofije preverjanja potresne odpornosti še precej nižji, menimo, da so na osnovi naših bond wrench preskusov (Preglednica 2) potrebne dodatne preiskave za njihovo verifikiranje. Namreč, faktorji varnosti po EC 6 in EC 8 niso povsem med sebojno primerljivi, saj moramo faktor varnosti po EC 8 obravnavati v kombinaciji s faktorjem duktilnosti in dušenja konstrukcije.

Pravilnik	EC 6			EC 8			
	Kategorija kontrole izvedbe			Kategorija kontrole izvedbe			
$\gamma_m$	A	B	C	A	B	C	
Kategorija kontrole proizvodnje	I	1,7	2,2	2,7	1,2	1,5	1,8
	II	2,0	2,5	3,0	1,4	1,7	2,0

**Preglednica 5:** Delni faktorji varnosti za lastnosti materialov po EC 6 in EC 8

Vrednosti delnih faktorjev varnosti se torej gibljejo med 1,47 za apneno malto (MIX3) ter 1,84 za podaljšano malto modificirano za rabitz mrežico (MIX5).

Čeprav ima zrnastostna sestava agregata velik vpliv na tlačno trdnost zidovine, je njen vpliv še mnogo večji v primeru elastičnega modula zidovine (Preglednica3 in Preglednica4). Če smo pri tlačnih trdnostih z uporabo drobnozrnatega agre-

sestave agregata je bila spet apnena malta, kjer se je vrednost povečala približno za dvakrat.

## DELNI FAKTORJI VARNOSTI MATERIALOV

Rezultati naših preiskav, ki jasno prikazujejo vpliv nadmerenih zrn v agregatu na tlačno trdnost zidovine, kažejo da v idealnih (laboratorijskih) pogojih, ko je učinek neugodnih vplivnih parametrov med izdelavo zidovine postavljen na najnižjo možno mero, delni

## ZAHVALA

Zahvaljujemo se Ministrstvu za znanost in tehnologijo Republike Slovenije, ki financira raziskovalno delo prvega avtorja, ki je mladi raziskovalec na Katedri za preskušanje materialov in konstrukcij, FGG Univerze v Ljubljani. Raziskave so tudi del nacionalnega projekta Napredno zidje št.72-7659-792-96.

## LITERATURA

- [1] BOSILJKOV, V., "Modeliranje mehanskih lastnosti zidov", Magistrska naloga, Ljubljana, oktober, 1996
- [2] BOSILJKOV, V. in Žarnić, R., "Pregled predlogov spremljajočih standardov za EC-6", 18. Zborovanje gradbenih konstruktorjev Slovenije, Bled, 1996, Zbornik del, str. 233-240.
- [3] PREGELJ, M., "Ugotavljanje mehanskih lastnosti zidovine s tlačnim preizkusom standardiziranih zidkov", Diplomaska naloga, Ljubljana, oktober, 1998
- [4] BOSILJKOV, V. in Žarnić, R., "Določanje tlačne trdnosti zidja", 17. zborovanje gradbenih konstruktorjev Slovenije, Bled, 10.-11.10.1995, Zbornik del, str. 255-262.
- [5] TOMAŽEVIČ, M., EUROCODE 6: Projektiranje zidanih konstrukcij, ENV 1996-1-1: Splošna pravila za stavbe – Pravila za armirano in nearmirano zidovje, Strokovne podlage za pripravo nacionalnega dokumenta za uporabo, Ljubljana, november, 1996

# I N M E M O R I A M

## FRANC TRATNIK

univ. dipl. ing. gradbeništva

Tiho in nenadoma je po dolgotrajni bolezni 30. julija 1998 odšel naš kolega in sošolec Franc Tratnik, univ. dipl. inž. gradbeništva, upokojeni dolgoletni direktor Stavbenika iz Kopra in naš kolega iz študijskega kroga hidrotehnikov iz leta 1952.

Rojen je bil 27. 11. 1925 v Idriji v trdni slovenski družini. V Idriji je dokončal osnovno šolo in šolanje nadaljeval v Tolminu, od koder je bil še ne 18 letni mladenič mobiliziran v italijansko vojsko.

V letu 1943 so ga na povratku domov aretirali in odpeljali v ujetništvo v Nemčijo. Iz ujetništva pa se mu je posrečilo zbežati in se pridružiti slovenski narodnoosvobodilni vojski, natančneje Gubčevi brigadi, s katero je tudi dočakal osvoboditev. Po demobilizaciji je nadaljeval šolanje najprej v Postojni, kjer je leta 1947 maturiral nato pa na Tehnični fakulteti Univerze v Ljubljani – gradbeni oddelek, tu je leta 1956 diplomiral. Že od leta 1952 je bil zaposlen pri Rižanskem vodovodu, od maja 1963 pa pri Stavbeniku v Kopru. Opravljal je več odgovornih funkcij. Od decembra 1973 je vodil podjetje kot vršilec dolžnosti, od novembra 1974 pa kot glavni direktor. Na tem mestu je ostal do junija 1985, ko se je upokojil.

Leta, ko je vodil podjetje Franc Tratnik, so bila v gradbeni operativi zelo razgibana in sorazmerno zelo težka. Gradbena operativa po celi Sloveniji se je krepila in borba za delo je bila vedno hujša. Še posebno na obalnem območju, kjer so se zaradi razmaha industrije in turizma povečale investicije v gospodarstvo, stanovanja in turistične objekte. Take razmere so narekovale gradbeni operativi Stavbenika uvajanje nove tehnologije ter zahtevnejše, hitrejše in cenejše gradbene postopke. Stanje na trgu je zahtevalo tudi širitev področja delovanja zunaj obalnega območja, pa tudi v inozemstvo. Spoprijela se je tudi z montažno in pomorsko gradnjo. Kdor je kdajkoli sodeloval pri takih delih, ve, da to zahteva celega človeka, polnega entuziazma,



# I N M E M O R I A M

organizacijskih in voditeljskih sposobnosti ter seveda dobro izvežbano in usklajeno spremljevalno ekipo. In vsemu temu je bil naš kolega Franc s svojimi sodelavci kos. Za njim so ostali objekti, ki bodo še dolgo pomenili uspešnico. Že to, da je uspešno vodil podjetje tako dolgo, dokazuje njegovo visoko strokovnost in sposobnost.

Bil je tudi velik prijatelj narave. Ljubil je planine in planinske izlete in je bil navdušen smučar. Spominjamo se, s kakšnim žarom nam je pripovedoval o preživetem smučarskem vikendu na Krvavcu in kako bo upokojski čas izkoristil za daljše bivanje na snegu. To svojo strast je prenesel tudi na svojo družino. Pred upokojitvijo sva govorila o času, ki sledi in naš kolega Franc je imel še mnogo želja in načrtov, kako jih bo uresničil, vendar mu je kruta bolezen te načrte preprečila. Ob skrbni negi požrtvovalne soproge je delno okreval in se še nekaj let aktivno udeleževal v prijateljskem krogu hidrotehnikov, vendar pa smo ga nekaj zadnjih let pogrešali.

Franca Tratnika bomo kolegi hidrotehniki ohranili v trajnem spominu kot dobrega in iskrenega prijatelja, nesebičnega sošolca in požrtvovalnega študijskega kolega.

V imenu kolegov hidrotehnikov in sošolcev

A. Slekovec.

# Iz poročila o delu FGG v letu 1997:

## ORGANIZACIJA UPRAVLJANJA IN KADROVSKA STRUKTURA

### 1. ORGANIZACIJA UPRAVLJANJA

#### 1.1 SPLOŠNO

Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (v nadaljevanju FGG) v okviru Univerze v Ljubljani opravlja izobraževalno, raziskovalno in strokovno delo na gradbeništva in geodezije. Osnovni dejavnosti sta izobraževanje in raziskovanje.

Izobraževalno in raziskovalno dejavnost v glavnem financira Republika Slovenija. Izobraževalno, raziskovalno in strokovno delo je razdeljeno na osem področij:

- geodezija,
- komunalno gospodarstvo in prostorsko planiranje,
- materiali in konstrukcije,
- operativno gradbeništvo,
- promet in prometne gradnje,
- hidrotehnika,
- gradbena informatika in osnovni predmeti,

uresničuje pa se v osemnajstih pedagoško raziskovalnih enotah (PRE).

Oddelek za gradbeništvo ima naslednje PRE:

- Katedra za splošno hidrotehniko,
- Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem,
- Inštitut za zdravstveno hidrotehniko,
- Katedra za mehaniko,
- Inštitut za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo,
- Katedra za masivne in lesene konstrukcije,
- Katedra za stavbe in konstrukcijske elemente,
- Katedra za metalne konstrukcije,
- Katedra za mehaniko tal z laboratorijem,
- Prometno-tehniški inštitut,
- Inštitut za komunalno gospodarstvo,
- Katedra za operativno gradbeništvo,
- Katedra za osnovne predmete,
- Katedra za preskušanje materialov in konstrukcij.

Oddelek za geodezijo ima naslednje PRE:

- Katedra za nižjo geodezijo,
- Katedra za matematično geodezijo in geoinformatiko,

- Katedra za fotogrametrijo, kartografijo in fotointerpretacijo in Katedra za prostorsko planiranje.

Znotraj oddelka za gradbeništvo delu je še Konstrukcijsko-prometni laboratorij.

## 1.2 DEKAN IN PRODEKANI FGG

- prof. dr. Miran Saje, dekan (do 30.9.1997)
- prof. dr. Jurij Banovec, dekan (od 1.10.1997)
- prof. dr. Bojan Majes, prodekan za študijske zadeve
- doc. dr. Anton Prosen, prodekan za raziskovalno dejavnost (do 30.9.1998)
- prof. dr. Andrej Pogačnik, prodekan za raziskovalno dejavnost (od 1.10.1997)
- doc. dr. Janez Reflak, prodekan za gospodarske zadeve
- prof. dr. Hinko Šolinc, prodekan za študentske zadeve (do 30.9.1997)
- doc. dr. Božo Koler, prodekan za študentske zadeve (od 1.10.1997)

## 1.3 SENAT FAKULTETE

Senat je najvišji strokovni organ FGG. Sestavljajo ga redni profesorji FGG, ki so v delovnem razmerju s polnim delovnim časom, in izvoljeni predstavniki tistih pedagoško-raziskovalnih enot, ki nimajo rednih profesorjev. Seje senata sklicuje in vodi dekan fakultete.

## 1.4 UPRAVNI ODBOR FAKULTETE

FGG ima upravni odbor, ki odloča o zadevah materialne narave in skrbi za nemoteno poslovanje fakultete v primeru, ko le-ta nastopa v pravnem prometu v svojem imenu in za svoj račun. V skladu s pooblastili odloča upravni odbor tudi v zadevah iz nacionalnega programa visokega šolstva. Upravni odbor vodi dekan fakultete, člani pa so prodekan za študijske zadeve v funkciji predstojnika za gradbeništvo, prodekan za raziskovalno dejavnost, prodekan za gospodarske zadeve, prodekan za študentske zadeve, predstojnik oddelka za geodezijo in tajnik FGG.

## 2. KADROVSKA STRUKTORA

### 2.1 SEZNAM ZAPOSLENIH PO PEDAGOŠKO RAZISKOVALNIH ENOTAH

#### 2.1.1 ODDELEK ZA GRADBENIŠTVO

##### 2.1.1.1 Katedra za splošno hidrotehniko (KSH)

- prof. dr. Mitja Brilly, dipl. ing. gradb., predstojnik
- doc. dr. Matjaž Mikoš, dipl. ing. gradb., namestnik predstojnika
- mag. Mario Krzyk, dipl. ing. gradb., strokovno-raziskovalni sodelavec
- Mojca Šraj, dipl. ing. gradb., strokovna sodelavka
- Gregor Petkovišek, dipl. ing. gradb., strokovno raziskovalni sodelavec (od 1.12.1997)
- Mojca Spazzapan, dipl. ing. elektr., raziskovalna sodelavka (od 1.7.1997)

**2.1.1.2 Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem (KMTek)**

prof. dr. Rudi Rajar, dipl. ing. gradb., predstojnik  
doc. dr. Franci Steinman, dipl. ing. gradb., namestnik predstojnika in predstojnik interdisciplinarnega podiplomskega študija hidrotehnike in zaščite voda (do 1.10.1997, od 1.11.1997 dalje 1/3 delovni čas)  
doc. dr. Matjaž Četina, dipl. ing. gradb., namestnik predstojnika in predstojnik interdisciplinarnega podiplomskega študija hidrotehnike in zaščite voda (od 1.10.1997)  
dr. Andrej Širca, dipl. ing. gradb., strokovni sodelavec (1/3 delovni čas)  
Primož Banovec, dipl. ing. gradb., strokovni sodelavec, mladi raziskovalec (od 15.10.1997)  
Majda Zakrajšek, dipl. ing. gradb., strokovna sodelavka  
mag. Dušan Žagar, dipl. ing. gradb., stažist raziskovalec (do 31.10.1997), visokošolski sodelavec - asistent (od 1.12.1997)

**2.1.1.3 Inštitut za zdravstveno hidrotehniko (IZH)**

prof. dr. Mitja Rismal, dipl. ing. gradb., predstojnik  
doc. dr. Jože Panjan, dipl. ing. gradb., namestnik predstojnika  
doc. dr. Boris Kompare, dipl. ing. gradb.  
Nataša Vodopivec, dipl. ing. gradb. stažistka raziskovalka  
Branka Juvan, ing. kem., laborantka

**2.1.1.4 Katedra za mehaniko (KM)**

izr. prof. dr. Stanislav Srpčič, dipl. ing. gradb., predstojnik  
prof. dr. Miran Saje, dipl. ing. gradb.  
doc. dr. Marjan Stanek, dipl. ing. gradb.  
doc. dr. Goran Turk, dipl. ing. gradb., asistent  
mag. Igor Planinc, dipl. ing. gradb., mladi raziskovalec  
Rado Flajs, dipl. ing. gradb., dipl. ing. mat., stažist asistent  
Blaž Vratanar, dipl. ing. gradb., mladi raziskovalec

**2.1.1.5 Inštitut za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo (IKPIR)**

doc. dr. Janez Reflak, dipl. ing. gradb., predstojnik  
akademik prof. dr. Peter Fajfar, dipl. ing. gradb.  
prof. dr. Frano Damjanić, dipl. ing. gradb., znanstveni svetnik  
prof. dr. Janez Duhovnik, dipl. ing. gradb.  
prof. dr. Matej Fischinger, dipl. ing. gradb.  
doc. dr. Iztok Kovačič, dipl. ing. fiz.  
dr. Tatjana Isaković, dipl. ing. gradb., raziskovalna sodelavka  
doc. dr. Žiga Turk, dipl. ing. gradb. (1/3 delovni čas)  
dr. Peter Gašperšič, dipl. ing. gradb., (1/3 delovni čas)  
dr. Dejan Žlajpah, dipl. ing. gradb. (1/3 delovni čas)  
doc. dr. Janez Lapajne, dipl. ing. fiz. (1/3 delovni čas)  
dr. Vojko Kilar, dipl. ing. gradb. (1/3 delovni čas)  
asist. mag. Vid Marolt, dipl. ing. gradb.  
Andrej Vitek, dipl. ing. mat., strokovni sodelavec za računalništvo  
Matevž Dolenc, dipl. inž. gradb., strokovni sodelavec  
mag. Blaž Dolinšek, dipl. ing. gradb., stažist raziskovalec

Dušica Drobnič, dipl. ing. gradb., stažistka raziskovalka (do 31.3.1997)  
Samo Križaj, dipl. ing. gradb., stažist raziskovalec  
Damjan Marušič, dipl. inž. arh., stažist raziskovalec  
Darja Okorn, prof. angl., poslovna sekretarka  
Alenka Bezljaj-Kreft, tehnična sodelavka  
Nataša Mayer, vodja računalniških obdelav

#### 2.1.1.6 Katedra za masivne in lesene konstrukcije (KMLK)

doc. dr. Franc Saje, dipl. ing. gradb., predstojnik  
asist. dr. Jože Lopatič, dipl. ing. gradb. namestnik predstojnika  
asist. dr. Srečko Vratuša, dipl. ing. gradb. (1/3 delovni čas)  
asist. Franci Kavčič, dipl. ing. gradb.  
mag. Drago Saje, dipl. ing. gradb., stažist raziskovalec  
Igor Valjavec, laborant

#### 2.1.1.7 Katedra za stavbe in konstrukcijske elemente (KSKE)

izr. prof. dr. Niko Seliškar, dipl. ing. arh., predstojnik  
izr. prof. dr. Aleš Krainer, dipl. ing. arh., namestnik predstojnika  
asist. dr. Živa Kristl, dipl. ing. arh.  
mag. Miha Tomšič, dipl. ing. gradb., asistent raziskovalec  
Boštjan Furlan, dipl. ing. gradb. mladi raziskovalec  
Mateja Trobec Lah, dipl. ing. gradb. mlada raziskovalka  
Rudi Perdan, laborant

#### 2.1.1.8 Katedra za metalne konstrukcije (KMK)

izr. prof. dr. Darko Beg, dipl. ing. gradb., predstojnik  
prof. dr. Jure Banovec, dipl. ing. gradb., namestnik predstojnika  
dr. Jože Korelc, dipl. ing. gradb.  
mag. Aleš Krajnc, dipl. ing. gradb., stažist raziskovalec

#### 2.1.1.9 Katedra za mehaniko tal z laboratorijem (KMTal)

prof. dr. Silvan Vidmar, dipl. ing. gradb., predstojnik (do 30.9.1997)  
izr. prof. dr. Bojan Majes, dipl. ing. gradb., predstojnik (od 1.10.1997)  
viš. pred. mag. Ana Marija Gaberc, dipl. ing. gradb., namestnica predstojnika  
(od 1.10.1997)  
asist. mag. Janko Logar, dipl. ing. gradb.  
asist. mag. dipl. ing. gradb., stažist asistent  
Mojca Bavdaž, ing. gradb., strokovna sodelavka  
Alike Kalagasidu, dipl. ing. gradb., strokovna sodelavka  
Miran Merc, laborant

#### 2.1.1.10 Prometno-tehniški inštitut (PTI)

prof. dr. Tomaž Kastelic, dipl. ing. gradb., predstojnik  
doc. dr. Alojz Juvanc, dipl. ing. gradb.  
doc. dr. Marijan Žura, dipl. ing. gradb.  
doc. dr. Niko Čertanc, dipl. ing. gradb.

doc. dr. Tomaž Maher, dipl. ing. gradb.  
asist. mag. Peter Lipar, dipl. ing. gradb.  
mag. Dušan Fajfar, dipl. ing. mat., strokovni sodelavec  
mag. Bojan Strah, dipl. ing. gradb., strokovni sodelavec  
Robert Rijavec, dipl. ing. gradb., stažist raziskovalec  
prof. dr. Bogdan Zgonc, dipl. ing. gradb. (1/3 delovni čas)  
prof. dr. Janez Žmavc, dipl. ing. gradb. (1/3 delovni čas)  
Jurij Velkavrh, sodelavec (od 1.11.1997)

#### **2.1.1.11 Inštitut za komunalno gospodarstvo (IKG)**

prof. dr. Albin Rakar, dipl. geod. kom. ing., predstojnik  
viš. pred. dr. Maruška Šubic Kovač, dipl. ing. gradb.  
Zoran Marinkovič, dipl. ing. gradb., stažist (od 1.11.1997)

#### **2.1.1.12 Katedra za operativno gradbeništvo (KOG)**

doc. dr. Dušan Zupančič, dipl. ing. gradb., predstojnik  
mag. Slobodan Bošnjak, dipl. ing. gradb., višji predavatelj  
Petra Nagode, dipl. ing. gradb., asistent  
Aleksander Srđić, dipl. ing. gradb., stažist raziskovalec

#### **2.1.1.13 Katedra za osnovne predmete (KOP)**

doc. dr. Žiga Turk, dipl. ing. gradb., predstojnik  
izr. prof. dr. Hinko Šolinc, dipl. ing. fiz.  
izr. prof. dr. Jože Peternelj, dipl. ing. fiz.  
doc. dr. Vito Lampret, prof. mat. in fiz.  
doc. dr. Aleš Založnik, dipl. ing. mat.  
asist. dr. Zvonko Jagličić, dipl. ing. fiz.  
pred. Božidar Bučar, prof. telesno kulturne stroke  
viš. pred. mag. Mitja Lakner, dipl. ing. mat.  
asist. mag. Marjeta Škapin - Rugelj, dipl. ing. mat.  
Zdene Breška, prof. fiz. in mat., strokovni sodelavec  
Marjeta Kramar, dipl. ing. mat., stažistka raziskovalka

#### **2.1.1.14 Katedra za preskušanje materialov in konstrukcij**

doc. dr. Roko Žarnić, dipl. ing. gradb., predstojnik  
asist. dr. Violeta Bokan Bosiljkov, dipl. ing. gradb., namestnica predstojnika  
asist. mag. Samo Gostič, dipl. ing. gradb., stažist raziskovalec  
asist. mag. Vlatko Bosiljkov, dipl. ing. gradb., stažist raziskovalec  
Bruno Dujič, dipl. ing. gradb., stažist asistent  
Franci Čepon, laborant

### **2.1.2 ODDELEK ZA GEODEZIJO**

#### **2.1.2.1 Katedra za geodezijo (KG)**

prof. dr. Florjan Vodopivec, dipl. ing. geod., predstojnik  
prof. dr. Dušan Kogoj, dipl. ing. geod.



doc. dr. Božo Koler, dipl. ing. geod.  
doc. dr. Aleš Breznikar, dipl. ing. geod.  
viš. pred. mag. Vesna Ježovnik, dipl. ing. geod. kom. ing.  
asist. mag. Simona Savšek-Safić, dipl. ing. geod., stažistka raziskovalka  
asist. mag. Marjan Čeh, dipl. ing. geod., stažist raziskovalec  
asist. Darko Trlep, dipl. ing. geod. ( 1/3 delovni čas)  
asist. Jakob Bitenc, dipl. ing. geod. (1/3 delovni čas)  
dr. Milivoj Vulić, dipl. ing. geod., strokovni sodelavec (od 10.3.97)  
Dušan Petrovič, dipl. ing. elektrotehnike in ing. geod., stažist raziskovalec  
Janez Goršič, ing. geod., laborant  
Milan Pajer, laborant  
Bojan Stegenšek, laborant

#### 2.1.2.2 Katedra za fotogrametrijo in kartografijo (KFK)

izr. prof. dr. Branko Rojc, mag. kartografije - predstojnik  
viš. pred. mag. Dalibor Radovan, dipl. ing. geod. (1/3 delovni čas)  
Dejan Grigillo, ing. geod., laborant

#### 2.1.2.3 Katedra za matematično geodezijo in geo-informatiko (KMGG)

doc. dr. Radoš Šumrada, dipl. ing. geod., predstojnik  
asist. dr. Miran Ferlan, dipl. ing. geod., namestnik predstojnika  
doc. dr. Bojan Stopar, dipl. ing. geod.  
višji pred. mag. Samo Drobne, dipl. ing. geod.  
asist. dr. Miran Kuhar, dipl. ing. geod.

#### 2.1.2.4 Katedra za prostorsko planiranje (KPP)

prof. dr. Andrej Pogačnik, dipl. ing. arh., predstojnik  
doc. dr. Anton Prosen, dipl. geod. kom. ing.  
asist. mag. Alma Zavodnik, dipl. ing. arh. (od 1.10.1997)  
asist. mag. Ilka Čerpes, dipl. ing. arh. (do 31.4.1997)  
stažist - asist. Mojca Foški, dipl. ing. geod. (od 15.12.1996)  
Konstanca Soss, ing. tekst. obl., laborantka

#### 2.1.3 KONSTROKCIJSKO PROMETNI LABORATORIJ

doc. dr. Roko Žarnić, dipl. ing. gradb., predstojnik  
doc. dr. Franc Saje, dipl. ing. gradb., predsednik kolegija laboratorija

#### 2.1.4 TAJNIŠTVO FAKULTETE

Nada Jamnik, dipl. pravn., tajnica fakultete  
Marija Zemljič, referentka za kadrovske zadeve  
Lidija Košak, tajnica vodstva

#### 2.1.5 KNJIŽNICA

Dragica Matajdl, dipl. pedagoginja, vodja knjižnice

Aleksander Ditrich, višji knjižničar  
Barbara Šivec, višja knjižničarka  
Jelka Rovanišek, ing. strojn.

#### 2.1.6 ŠTUDENSKI REFERAT

Frida Vlaj Kernjak, vodja študentskega referata  
Janja Ribič, referentka za študijske in študentske zadeve (odd. za gradbeništvo)  
Tanja Jesih, referentka za študijske in študentske zadeve (odd. za geodezijo)

#### 2.1.7 STROKOVNI IN TEHNIČNI SODELAVCI

Ivan Dermastja, laborant  
Romana Hudin, dipl. anglistka in nemčistka, strokovna sodelavka na konstrukcijski smeri  
Jože Jeraj, tehnični sodelavec, laborant na hidrotehnični smeri  
Jožica Škerjanc, administrativno tehnična sodelavka na hidrotehnični smeri  
Nada Zuccato, pisarniška referentka na prometni smeri  
Marija Zega Deželak, administrativno tehnična sodelavka na HS in knjižničarka

#### 2.1.8 RAČUNOVODSTVO

Jožica Trampuš, vodja računovodstva  
Rozi Hribar  
Sonja Karakaš  
Urška Dolžan  
Marjan Kuret ekonomat



**tiskarna  
tone tomšič d.d.**



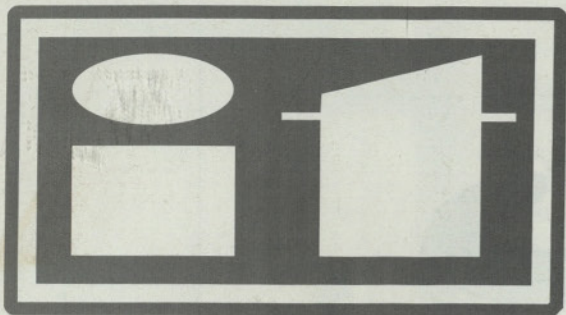
**1000 LJUBLJANA, GREGORČIČEVA 25A  
• 061/126 32 19 • FAX 061/218 646**

*Cenjeni poslovni partnerji!  
Nudimo vam kvalitetne in hitre  
usluge stavljenja, preloma,  
ofsetnega tiska, knjigotiska  
in različne vezave.*

*Obiščite nas in se prepričajte!*

*Nudimo kvalitetne izdelke po konkurenčnih  
cenah.*

*Izdelujemo vse vrste fotokopij in vezav.*



# STROKOVNI IZPITI ZA GRADBENIŠTVO IN ARHITEKTURO TER PRIPRAVLJALNI SEMINARJI ZA STROKOVNE IZPITE V LETU **1999**

Rok	Leto	A SEMINAR	B IZPIT	
			pisni	ustni
II.	1999	od 15. do 19. februar	13. februar	od 1. do 5. marec
III.	1999	od 15. do 19. marec	20. marec	od 6. do 9. april
IV.	1999	od 19. do 23. april	17. april	od 3. do 7. maj
V.	1999	od 17. do 21. maj	22. maj	od 7. do 11. junij
VI.	1999	od 20. do 24. september	16. oktober	od 2. do 5. november
VII.	1999	od 18. do 22. oktober	13. november	od 1. do 7. december
VIII.	1999	od 15. do 19. november		
IX.	1999	od 13. do 17. december		

A. **Pripravljalne seminarje** za strokovni izpit organizira Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije (ZDGITS), 1000 Ljubljana, Karlovška 3 (Telefon/fax: 061/221-587), če 1 teden pred pričetkom seminarja prispe na naslov najmanj 20 pisnih prijav. Prijava naj bo v obliki dopisa, iz katerega je razvidno: ime, priimek, zadnja strok. izobrazba, naslov udeleženca ter rok seminarja in naslov plačnika seminarja. Samoplačnik mora k prijavi priložiti kopijo dokazila o plačilu. Cena seminarja znaša 65.000,00 SIT.

B. **Strokovni izpiti** potekajo pri inženirski zbornici Slovenije (IZS), 1000 Ljubljana, Dunajska 104 (telefon: 061 168-57-16; 168-46-71. Informacije dobite po telefonu od 10.00 do 12.00 ure pri ga. Terezi Rebernik. Cena izpita znaša 70.000,00 SIT.