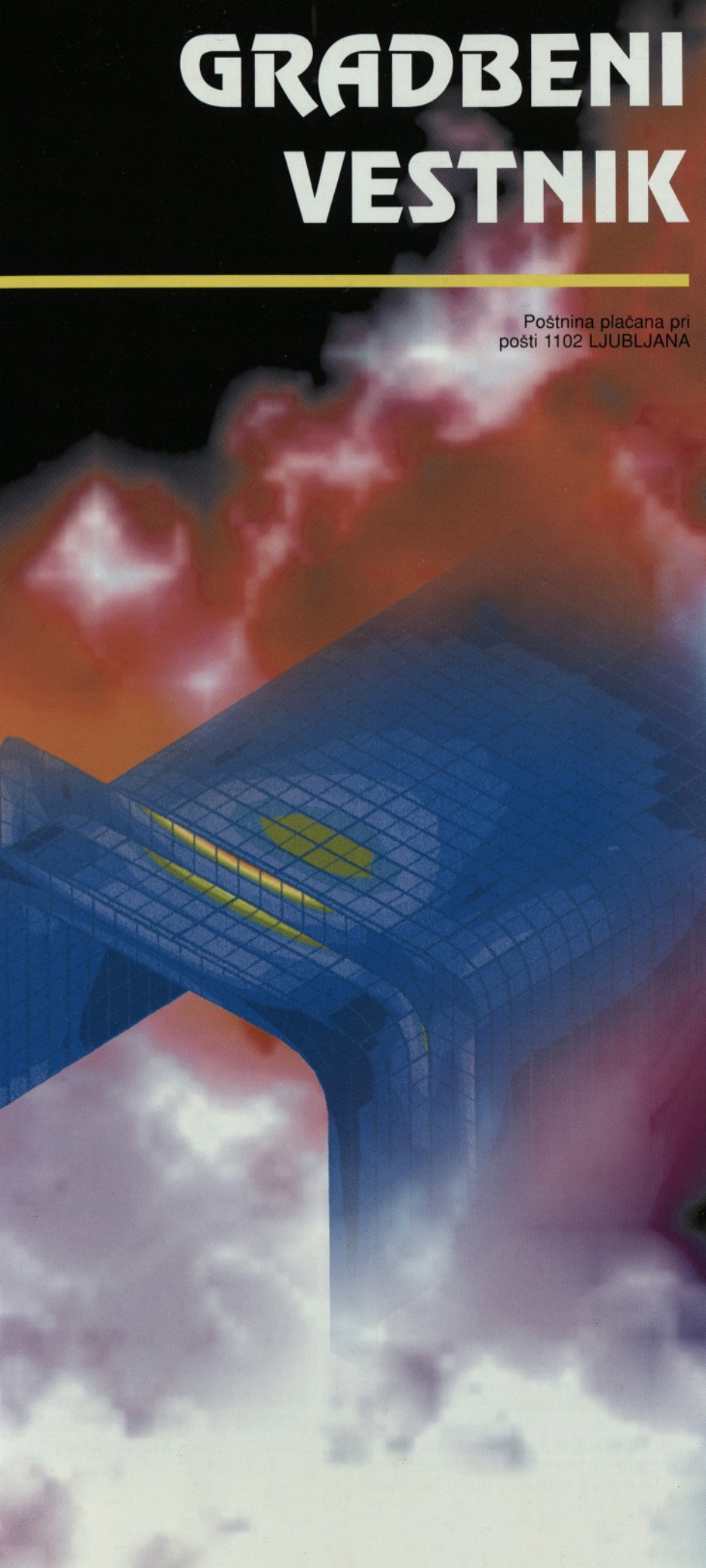


GRADBENI VESTNIK



Poština plačana pri
pošti 1102 LJUBLJANA

GLASILO
ZVEZE DRUŠTEV
GRADBENIH
INŽENIRJEV
IN TEHNIKOV
SLOVENIJE

**MAREC
2001**

**1951
2001**

Glavni in odgovorni urednik:

Prof.dr. Janez **DUHOVNIK**

Lektorica:

Alenka **RAIČ - BLAŽIČ**

Tehnični urednik:

Danijel **TUDJINA**

Uredniški odbor:

Doc.dr. Ivan **JECELJ**

Andrej **KOMEL**, u.d.i.g.

Mag. Gojmir **ČERNE**

Prof.dr. Franci **STEINMAN**

Prof.dr. Miha **TOMAŽEVIČ**

Janja **PEROVIC-MAROLT**, u.d.i.g.

Tisk:

TISKARNA LJUBLJANA d.d.

Količina: 900 Izvodov

Revijo izdaja ZVEZA DRUŠTEV GRAD-BENIH INŽENIRJEV IN TEHNIKOV SLOVENIJE, Ljubljana, Karlovska 3, telefon/faks: 01 422-46-22, ob finančni pomoči Ministrstva RS za znanost in tehnologijo, Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani ter Zavoda za gradbeništvo Slovenije.

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

Letno izide 12 števk. Letna naročnina za individualne naročnike znaša 5000 SIT; za študente in upokoјence 2000 SIT; za gospodarske naročnike (podjetja, družbe, ustanove, obrtnike) 40500 SIT za 1 izvod revije; za naročnike v tujini 100 USD. V ceni je všteti DDV.

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

Navodila avtorjem za pripravo člankov in drugih prispevkov

1. Uredništvo sprejema v objavo znanstvene in strokovne članke s področja gradbeništva in druge prispevke, pomembne in zanimive za gradbeno stroko.

2. Znanstvene in strokovne članke pred objavo pregleda najmanj en anonimen recenzent, ki ga določi glavni in odgovorni urednik.

3. Besedilo prispevkov mora biti napisano v slovenščini.

4. Besedilo mora biti izpisano z dvojnim presledkom med vrsticami.

5. Prispevki morajo imeti naslov, imena in priimke avtorjev ter besedilo prispevka.

6. Besedilo člankov mora obvezno imeti: naslov članka (velike črke); imena in priimke avtorjev; naslov POVZETEK in povzetek v slovenščini; naslov SUMMARY, naslov članka v angleščini (velike črke) in povzetek v angleščini; naslov UVOD in besedilo uvoda; naslov naslednjega poglavja (velike črke) in besedilo poglavja; naslov razdelka in besedilo razdelka (neobvezno); naslov SKLEP in besedilo sklepa; naslov ZAHVALA in besedilo zahvale (neobvezno); naslov LITERATURA in seznam literature; naslov DODATEK in besedilo dodatka (neobvezno). Če je dodatkov več, so dodatki označeni še z A, B, C, itn.

7. Poglavja in razdelki so lahko oštevilčeni.

8. Slike, preglednice in fotografije morajo biti oštevilčene in opremljene s podnapisi, ki pojasnjujejo njihovo vsebino. Slike in fotografije, ki niso v elektronski obliki, morajo biti priložene prispevku v originalu in dveh kopijah.

9. Enačbe morajo biti na desnem robu označene z zaporedno številko v okroglem oklepaju.

10. Uporabljena in citirana dela morajo biti navedena med besedilom prispevka z oznako v obliki [priimek

prvega avtorja, leto objave]. V istem letu objavljena dela istega avtorja morajo biti označena še z oznakami a, b, c, itn.

11. V poglavju LITERATURA so dela opisana z naslednjimi podatki: priimek, ime avtorja, priimki in imena drugih avtorjev, naslov dela, način objave, leto objave.

12. Način objave je opisan s podatki: knjige: založba; revije: ime revije, založba, letnik, številka, strani od do; zborniki: naziv sestanka, organizator, kraj in datum sestanka, strani od do; raziskovalna poročila: vrsta poročila, naročnik, oznaka pogodbe; za druge vrste virov: kratek opis, npr. v zasebnem pogovoru.

13. Pod črto na prvi strani, pri prispevkih, krajših od ene strani pa na koncu prispevka, morajo biti navedeni obsežnejši podatki o avtorjih: znanstveni naziv, ime in priimek, strokovni naziv, podjetje ali zavod, naslov.

14. Prispevke je treba poslati glavnemu in odgovornemu uredniku prof. dr. Janezu Duhovniku na naslov: FGG, Jamova 2, 1000 LJUBLJANA. V spremnem dopisu mora avtor članka napisati, kakšna je po njegovem mnenju vsebina članka (pretežno znanstvena, pretežno strokovna) oziroma za katero rubriko je po njegovem mnenju prispevek primeren. Prispevke je treba poslati v treh izvodih in v elektronski obliki (WORD, EXCEL, AVTODAC, DESIGNER).

Uredniški odbor

VSEBINA - CONTENTS

Članki, študije, razprave
Articles, studies, proceedings

Stran 50
Igor Kovše

RAČUNSKA OBRAVNAVA RAZPOK V JEKLENIH KONSTRUKCIJAH

NUMERICAL TREATMENT OF CRACKS IN STEEL STRUCTURES

Stran 57
Jakob Likar

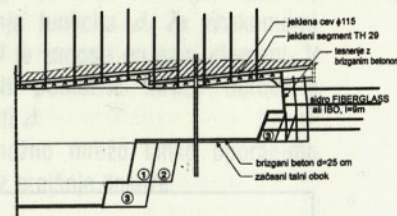
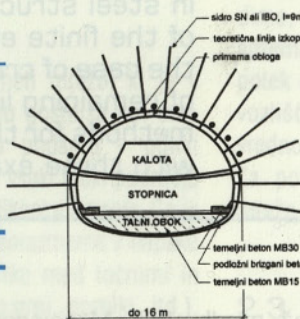
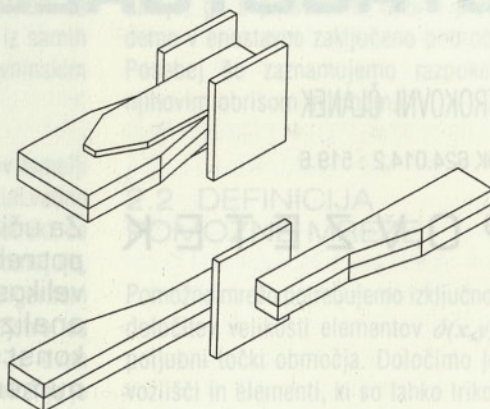
GEOTEHNIČNE IN TEHNOLOŠKE POSEBNOSTI GRADNJE PREDORA GOLOVEC

GEOTECHNICAL AND TECHNOLOGICAL SPECIFICITIES OF THE GOLOVEC TUNNEL CONSTRUCTION

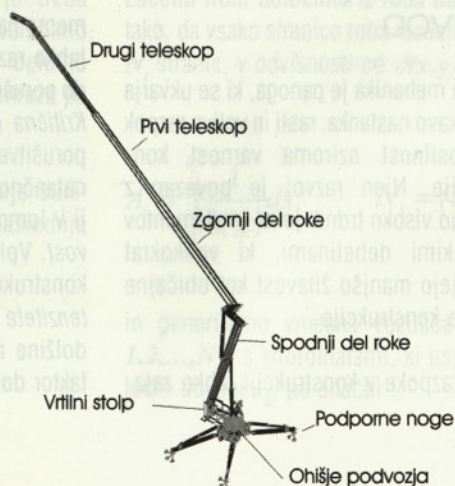
Stran 69
Anton Pristavec

KONTROLA NAPETOSTI IN STABILNOSTI KONSTRUKCIJE PREVOZNEGA DVIŽNEGA DELOVNEGA ODRA

STRESS AND STABILITY CHECK OF MOBIL LIFTING WORKING PLATFORM STRUCTURE



PREREZ IZKOPA 145m²



RAČUNSKA OBRAVNAVA RAZPOK V JEKLENIH KONSTRUKCIJAH

NUMERICAL TREATMENT OF CRACKS IN STEEL STRUCTURES

STROKOVNI ČLANEK

UDK 624.014.2 : 519.6

IGOR KOVŠE

POVZETEK

Za učinkovito analizo razpok v jeklenih konstrukcijah je nujno potrebna možnost generiranja mrež z velikim gradientom velikosti končnih elementov. To se še posebej pokaže pri analizi napredovanja razpoke in oceni življenjske dobe konstrukcije. V prispevku je predstavljena metoda za numerično računanje rasti razpoke in s tremi zgledi prikazana njena uporaba.

SUMMARY

The indispensable tool for the effective analysis of cracks in steel structures is by all means automatic generation of the finite element meshes. It is especially important in the case of crack propagation analysis and the assessment of remaining life of the structure. The paper presents the methods for the numerical calculation of crack propagation with three examples of the application.

Avtor:

Igor Kovše dr., univ. dipl. inž. gradb., IMK, Mencingerjeva 7, Ljubljana

1 UVOD

Lomna mehanika je panoga, ki se ukvarja z raziskavo nastanka, rasti in vpliva razpok na nosilnost oziroma varnost konstrukcije. Njen razvoj je povezan z uporabo visoko trdnih jekel in elementov z velikimi debelinami, ki velikokrat izkazujejo manjšo žilavost kot običajne jeklene konstrukcije.

Vpliv razpoke v konstrukciji lahko zaja-

memo na dveh stopnjah. Pri dani obtežbi lahko razpoka določene dolžine privede do porušitve te konstrukcije ali pa tudi ne. *Kritična dolžina razpoke*, ki privede do porušitve, je odvisna od materiala - bolj natančno od materialne lastnosti K_{Ic} , ki ji v lomni mehaniki rečemo *lomna žilavost*. Vpliv razpoke poljubne dolžine na konstrukcijo zajamemo s *faktorjem intenzitete napetosti* K_I , ki je odvisen od dolžine razpoke a in obtežbe P . Če ta faktor doseže vrednost K_{Ic}

$$K_I(a, P) = K_{Ic} \quad (1)$$

je konstrukcija nestabilna. Iz tega pogoja dobimo odnos med velikostjo obtežbe in dolžino razpoke.

Druga stopnja je napovedovanje rasti razpoke. Poleg velikosti kritične razpoke nas zanima tudi hitrost rasti razpoke; s tem namreč lahko določimo čas do porušitve. To zakonitost dobimo iz dinamičnega preskusa, ko vzorec z začetno

razpoko obremenjujemo s ciklično spreminjajočo se obtežbo. *Parisov zakon*, najbolj enostavna od mnogih empiričnih formul, ki opisujejo rezultate tega preskusa, se glasi

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m, \quad (2)$$

kjer je N število ciklov obežbe, ΔK pa razlika K_I pri maksimalni in minimalni obtežbi. C in m sta materialna parametra, ki ju načelno moramo določiti za konkretni material. Z integracijo enačbe (2) dobimo število ciklov N , ki je potrebno, da razpoka naraste od neke začetne dolžine do kritične dolžine. S tem lahko napovemo *življenjsko dobo* konstrukcije. Lahko tudi predpišemo, v kakšnih časovnih intervalih je potrebno konstrukcijo pregledati in ugotavljati morebitno širjenje razpok.

V prispevku najprej predstavljamo metode, ki omogočajo učinkovit izračun količine K_I (oziroma drugih ekvivalentnih količin), rast razpoke in oceno življenjske dobe, nato pa na nekaj zgledih prikažemo uporabo omenjenih metod. Postopek temelji na metodi končnih elementov (MKE).

2 ADAPTIVNA GENERACIJA MREŽE

Določevanje odvisnosti $K_I = K_I(a)$ je najbolj zamudni del postopka pri mehaniki loma. Treba je narediti vrsto izračunov z metodo končnih elementov s postopnim spreminjanjem velikosti razpoke. Znano je, da je pri vseh analizah po metodi končnih elementov največ časa potrebno ravno za generiranje geometrije in drugih vhodnih podatkov na eni strani ter za pregledovanje rezultatov na drugi strani. Težave se stopnjujejo, kadar je treba že postavljeno mrežo elementov zgostiti lokalno, še posebej, kadar je treba račun izvesti v več korakih, kjer se pri vsakem koraku geometrija spremeni. Rast razpoke je šolski primer take

komplikacije. Tukaj imamo oba problema hkrati: geometrija se pri vsakem prirastku obtežbe spremeni, mreža končnih elementov pa mora biti okoli vrha razpoke veliko gostejša kot drugod po območju. Avtomatično generiranje elementov, ki omogoča lokalno zgostitev, skupaj z avtomatičnim podaljševanjem razpoke se v takem primeru ponuja kot idealna rešitev.

V prispevku je uporabljen algoritem za generacijo neregularne mreže iz samih štirikotnikov nad poljubnim ravninskim območjem [5].

Generacija štirikotnih elementov temelji na dejstvu, da je področje v ravnini vedno mogoče pokriti izključno s štirikotniki, če ima poligon, ki to področje omejuje, sodo število stranic. Učinkovit algoritem [5] uporablja to dejstvo in pa dejstvo, da je štirikotnik možno sestaviti iz dveh trikotnikov. Osnova takega generiranja je torej generacija trikotnikov, konkretno metoda generacije s potujočim frontom [4]. Front je zaključen poligon, ki omejuje področje, ki še ni pokrito z elementi.

Običajno želimo imeti mrežo, ki je v določenem področju gostejša kot drugod. Tako zahtevo podamo v obliki funkcije $\delta(x,y)$, ki v vsaki točki področja določa zahtevano velikost elementa. Če je ta funkcija obratno sorazmerna z napako računa $e(x,y)$ (razliko med točnimi in izračunanimi napetostmi, pomiki, itd.), bo avtomatično generirana mreža s predpisano natančnostjo dosegla želeni rezultat. Za prvi izračun pa je treba funkcijo δ podati ročno. Za to uporabimo pomožno mrežo, ki prekriva celotno področje, v vozliščih pomožne mreže pa podamo vrednosti δ .

Postopek avtomatične generacije štirikotnikov lahko razdelimo na naslednje stopnje:

- definicija roba območja
- definicija pomožne mreže

- določitev začetnega fronta
- generacija štirikotnikov
- izboljšava mreže.

2.1 DEFINICIJA ROBA OBMOČJA

Rob območja označimo s zaključenim poligonom, ki vsebuje kontrolne točke in povezave med njimi. Če področje vsebuje luknje, ga s presečnimi črtami prevedemo v enostavno zaključeno področje. Posebej še zaznamujemo razpoke z njihovim obrisom in vrhom.

2.2 DEFINICIJA POMOŽNE MREŽE

Pomožno mrežo potrebujemo izključno za določitev velikosti elementov $\delta(x,y)$ v poljubni točki območja. Določimo jo z vozlišči in elementi, ki so lahko trikotni ali četverokotni. Pomožna mreža mora prekrivati celotno območje, ki ga obravnavamo, ni pa nujno, da se strogo drži roba območja. Koliko elementov naredimo, je odvisno od tega, kako se spreminja funkcija δ . Za enakomerni potek δ je zadosti en sam element. V vozliščih pomožne mreže določimo vrednosti δ .

Za pomožno mrežo lahko uporabimo mrežo iz prejšnje analize.

2.3 DOLOČITEV ZAČETNEGA FRONTA

Začetni front določimo iz roba območja tako, da vsako stranico roba razdelimo na N_i stranic, v odvisnosti od $\delta(x,y)$

$$A_i = \int_0^{l_i} \frac{1}{\delta(s)} ds, \quad N_i = (\text{int}) A_i$$

in generiramo vmesna vozlišča $k=0, 1, 2, \dots, N_{i-1}$ s koordinatami, ki ustrezajo ločni dolžini s_k , po enačbi

$$k = \frac{N_i}{A_i} \int_0^{s_i} \frac{1}{\delta(s)} ds,$$

Kadar $\delta(x,y)$ ne poteka linearno po stranici roba, je to nelinearna enačba za s_k . Zadnji segment roba razdelimo na N_i ali na N_{i+1} stranic, tako, da je skupno število stranic v frontu sodo število. Na enak način generiramo vozlišča na presečnih črtah, vendar jih ne podvajamo. Na delu roba, po katerem poteka razpoka, vozlišča podvajamo; pazimo le, da vozlišče v vrhu razpoke generiramo le enkrat. Začetni front je tako vsota vseh na novo generiranih stranic. Vse stranice začetnega fronta označimo kot aktivne.

2.4 GENERACIJA ŠTIRIKOTNIKOV

Postopek je naslednji. V frontu si izberemo aktivno stranico **AB**. Naredimo vozlišče **C**, katerega položaj določimo glede na velikosti δ_A in δ_B po metodi iz članka [4]. Če vozlišče **C** pade v bližino že obstoječega vozlišča **N**, uporabimo **N** namesto **C**. Generiramo trikotnik **ABC**. V tem trikotniku si izberemo eno od drugih dveh stranic **AC** ali **BC** (ki je aktivna) in nad njo generiramo drugi trikotnik. Iz teh dveh trikotnikov naredimo štirikotnik. Ta štirikotnik je lahko poljubne oblike, tudi konkaven. Ob generiranju vsakega trikotnika označimo stranice v frontu, ki jih ni mogoče več uporabiti, kot pasivne, na novo generirane stranice pa dodamo v front kot aktivne. Ko pri generaciji uporabljamo že obstoječa vozlišča, razpade front na več zaključenih delov - podfrontov. Postopek je končan, ko v nobenem podfrontu ni več niti ene aktivne stranice.

Pri generiranju štirikotnikov je treba paziti še na eno pomembno stvar: po zaključeni generaciji štirikotnika morajo imeti vsi podfronti sodo število aktivnih stranic (ali pa 0). Le tako je namreč možno izpeljati generacijo štirikotnikov do konca.

2.5 IZBOLJŠAVA MREŽE

Po končani generaciji moramo izboljšati mrežo, saj ta vsebuje slabo oblikovane elemente, na primer take, ki imajo en notranji kot enak ali večji od 180° . Obstaja več postopkov, ki so podrobno navedeni v [5], vendar se že z dvema korakoma da popolnoma neregularno mrežo spraviti v lepo obliko. Za ta namen najprej za vsako vozlišče določimo število **NE**, to je število elementov, ki obkrožajo to vozlišče. Nato s prvim korakom izločimo vsa notranja vozlišča (tj. vozlišča, ki niso na robu območja), za katera je **NE**=2 oziroma so obkrožena samo z dvema elementoma. Ta dva elementa združimo v enega. S tem se iznebimo konkavnih elementov.

V drugem koraku, mrežo 'zgladimo' tako, da vsako notranje vozlišče premaknemo v težišče elementov, ki ga obkrožajo. To je iterativni postopek, vendar se ponavlja že po dveh, treh korakih mreža bistveno ne spremeni več.

3 SIMULACIJA RASTI RAZPOKE

Simulacija rasti razpoke v konstrukciji je primer učinkovite uporabe avtomatičnega generiranja mreže končnih elementov.

Začetni vhodni podatek je obris območja v ravnini z določeno točko, v kateri se razpoka začne. Rast razpoke nato simuliramo z vrsto diskretnih prirastkov razpoke Δa , pri čemer uporabimo avtomatično generacijo mreže pri vsakem prirastku razpoke znova. Po vsaki generirani mreži in izračunanem primeru računamo parametre linearno elastične mehanike loma — K_p, K_{II}, J, G in smer rasti razpoke ϕ , ki nam podaja smer naslednjega prirastka razpoke. S tem postopkom dobimo odvisnost K_I od dolžine razpoke **a**:

$$K_I = K_I(a) \quad (3)$$

in podobno za $K_{II}, \dots$. Spreminjanje dolžine razpoke v času dobimo nato z integracijo Parisovega zakona (2) ob upoštevanju enačbe (3):

$$N = \int_{a_0}^a \frac{da}{C \Delta K_I^m(a)}$$

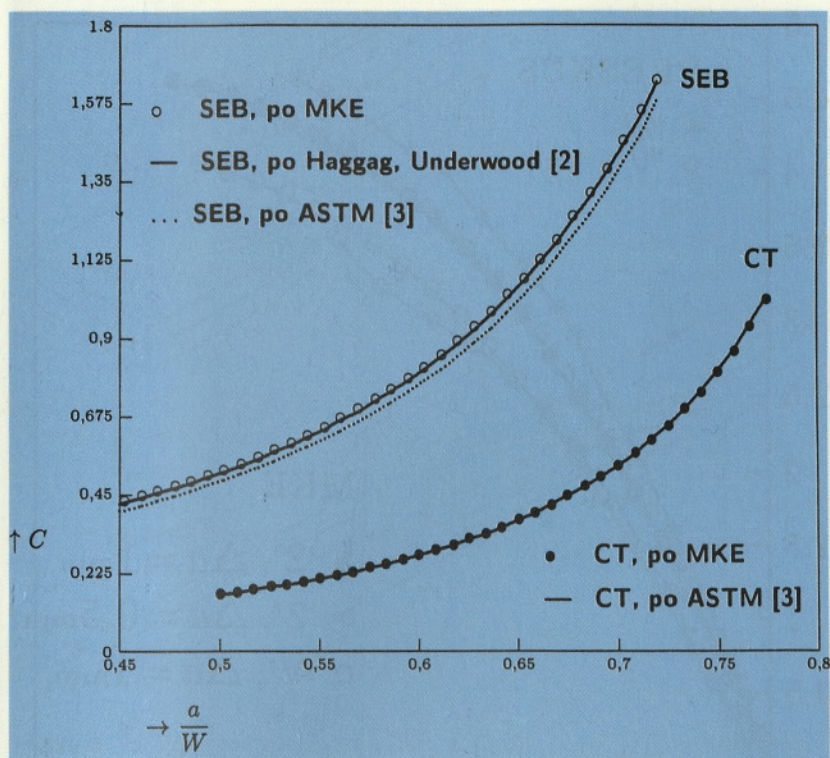
V končni fazi se postopek tako avtomatizira, da kot vhodni podatek podamo le obris območja, točko, v kateri se razpoka začne, ter materialne parametre K_{Ic} , **C** in **m**, program pa kot izhodne podatke vrne geometrijo in zgodovino razpoke **a=a(t)** od začetne do kritične velikosti in odvisnosti tipa (3).

4 PRIMERI UPORABE

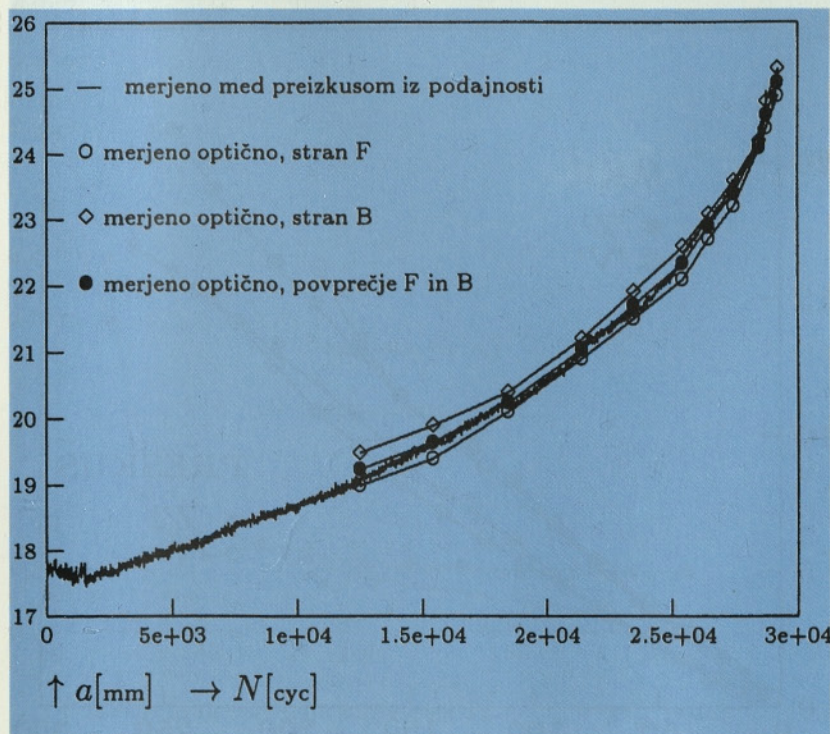
4.1 MERJENJE DOLŽINE RAZPOKE MED PRESKUSOM

Pri lomnomehanskih preskusih je potrebno meriti dolžino razpoke v preskušancu v realnem času, med potekom preskusa. Za učinkovito meritev dolžine razpoke iz podajnosti preskušanca je potrebno narediti tri korake: (a) računsko (po MKE) določiti funkcijo podajnosti **c** v odvisnosti od dolžine razpoke **a**; (b) s primernim algoritmom določiti zgornji funkciji inverzno funkcijo **a=a(c)**; (c) med preskusom meriti podajnost **c** in iz omenjene funkcije izračunati dolžino razpoke **a**.

Kot zgled smo za dva standardna lomnomehanska preskušanca, **CT** in **SEB**, določili odvisnost **c=c(a)** (slika 1) z uporabo MKE in metode simulacije rasti razpoke, omenjene v poglavju 3. Po posebnem postopku (glej [7]) smo določili inverzno funkcijo **a=a(c)** in jo uporabili za račun dolžine razpoke iz podajnosti, merjene med preskusom **CT** preskušanca, ki je bil obremenjen s ciklično obtežbo. Diagram na sliki 2 kaže zelo dobro ujemanje dolžine razpoke, izračunane iz podajnosti z optično mer-



Slika 1. Normirana podajnost C preskušancev CT in SEB v odvisnosti od dolžine razpoke. Analitično in numerično.



Slika 2. Preskušalec CT. Primerjava za dolžino razpoke, izmerjene optično, in dolžino razpoke, izračunane iz podajnosti.

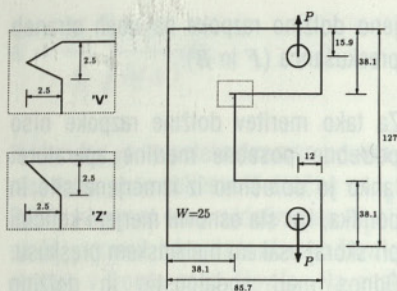
jeno dolžino razpoke na obeh straneh preskušanca (F in B).

Za tako meritev dolžine razpoke niso potrebne posebne merilne aparature: lahko jo določimo iz izmerjene sile in pomika, kar sta osnovni merjeni količini pri skoraj vsakem mehanskem preskusu. Odnos med podajnostjo in dolžino razpoke lahko po opisanem postopku določimo za preskušance s poljubno geometrijo, torej tudi za preskušance nestandardnih oblik.

4.2 RAST NESIMETRIČNE RAZPOKE

S primerjavo eksperimentalnih in numeričnih rezultatov za nestandardni preskušalec v obliki črke C smo ugotavljali zanesljivost numerične simulacije rasti nesimetrične razpoke. Uporabili smo dva vzorca, ki sta se razlikovala v obliki začetne zareze. Označili smo ju kot 'Z' in 'V' vzorec (slika 3). Obremenjevali smo s ciklično (sinusno) obtežbo s frekvenco 4Hz v 19-tih obtežnih fazah. Amplitudo sile $\Delta P = P_{max} - P_{min}$ smo počasi zmanjševali, tako da smo dobili približno konstantno hitrost razpoke. Razpoko smo merili z optičnim mikroskopom z natančnostjo 0.01mm.

Numerični račun je opravljen z MKE v približno 20 korakih s spreminjanjem dolžine razpoke. Primer smo računali elastično kot ravninsko deformacijsko stanje z materialnimi konstantami jekla $E = 2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$, $\nu = 0.3$. Zgodovino razpoke $a = a(t)$ smo določali po opisanem postopku. Pri integraciji Parisove enačbe smo uporabili parametra $C = 3.57 \times 10^{-16}$ in $m = 3.919$, ki smo ju za to jeklo določili v raziskovalni nalogi [6]. Primerjava med eksperimentom in numeričnim računom za geometrijo končne razpoke in za zgodovino dolžine razpoke je na sliki 4.



Slika 3. Geometrija preskušancev 'Z' in 'V'.

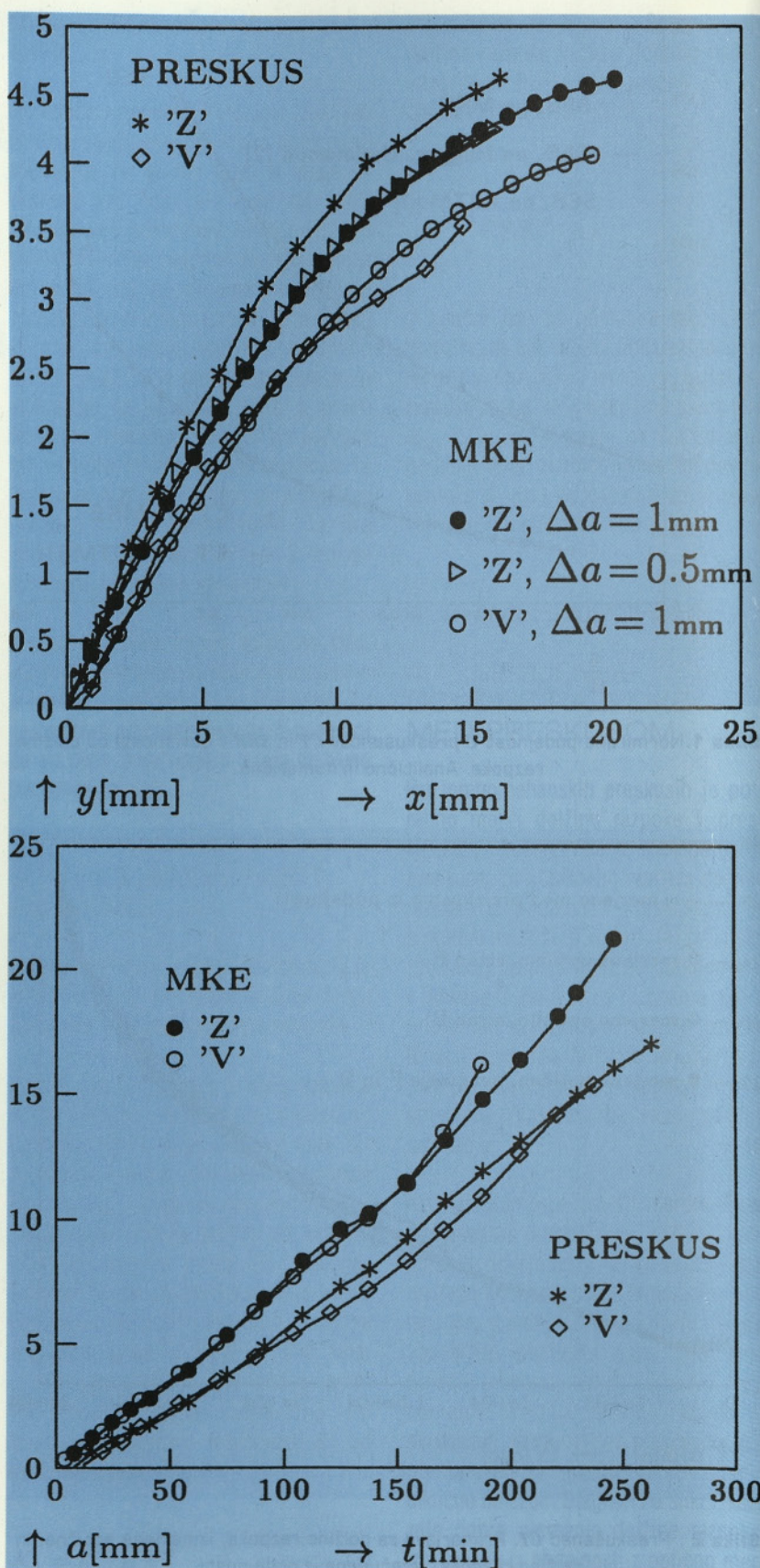
4.3 OCENA VARNOSTI DETAJLOV IZ KONST- RUKCIJE SONY CENTRA

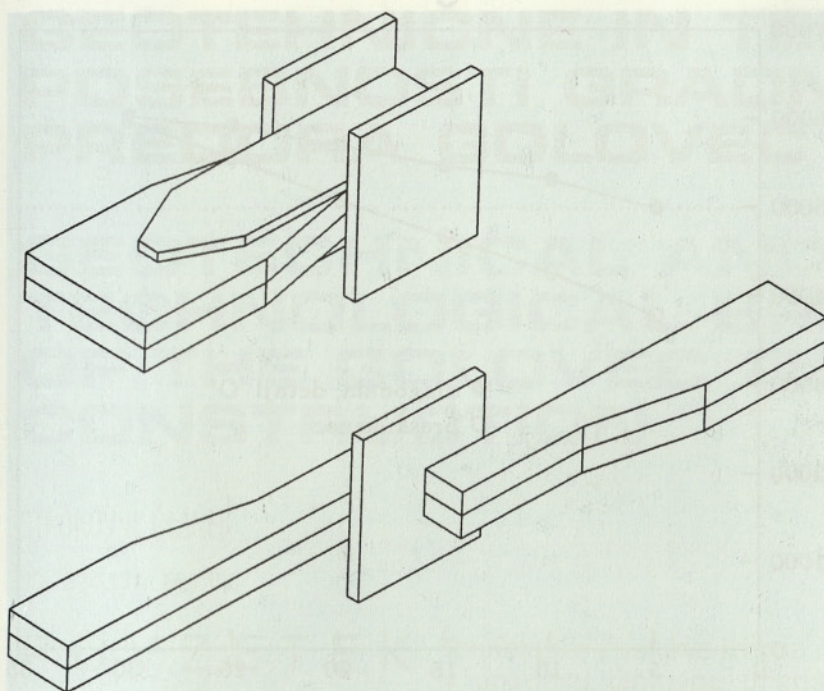
Na koncu podajamo zgled uporabe mehanike loma in v tem članku opisanih avtomatiziranih metod v primeru konkretne konstrukcije.

Konstrukcija, ki jo obravnavamo, je del drzno zastavljenega projekta Sony Centra na Potsdamer Platzu v Berlinu. Gre za masivno jekleno paličje, na katerega je obešen 7-nadstropni objekt nad kulturno zaščitenim hotelom Esplanade. Paličje je izdelano z varjenjem debelih pločevin (do $d = 100\text{mm}$) iz visoko trdnostnih jekel S 460 in S 690.

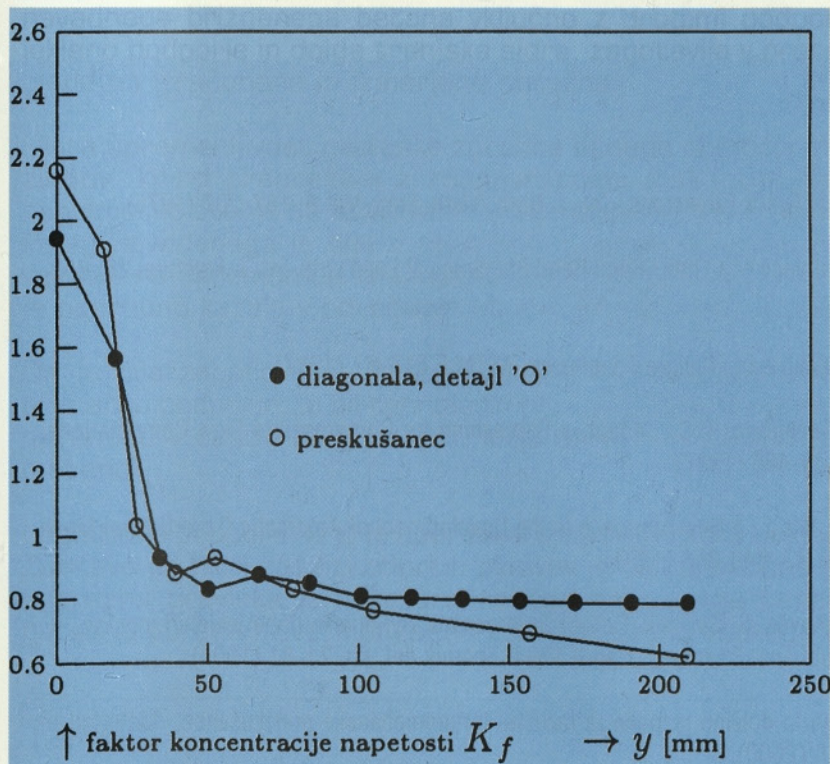
Eno od vprašanj v zvezi s to konstrukcijo je bilo tudi ali je konstrukcija varna pred krhkim lomom pri nizkih zimskih temperaturah. Področje varnosti pred krhkim lomom obravnava aneks C k evropskemu standardu ENV 1993-2, ki predpisuje najvišje dopustne debeline pločevin glede na vrsto jekla, njegovo prehodno temperaturo T_{27} , nominalno natezno napetost in temperaturo okolja. Jeklo S 690 s tem standardom sploh ni predvideno in za take primere se po standardu zahteva izrecen dokaz o varnosti pred krhkim lomom po enačbi (1), ki temelji na preskusih v povezavi z numeričnim izračunom.

Slika 4. Zgoraj: geometrija končne razpoke. Spodaj: Odvisnost dolžine razpoke od časa.





Slika 5. Paličje v konstrukciji Sony Centra. Detajl 'O' kot je dejansko izveden (zgoraj) in ekvivalentni detajl v preskušancu (spodaj).



Slika 6. Primerjava koncentracije napetosti v diagonali detajla 'O' in ustreznega detajla preskušanca.

Detajla konstrukcije, ki sta z vidika krhkega loma najbolj nevarna, sta detajl 'S', ki je priključek diagonale z zgornjim pasom in detajl 'O', ki je stik diagonale, vertikale in spodnjega pasa paličja. Ker razpoložljivi trgalski stroj (12MN) ni imel zadostne kapacitete za doseg projektnih nateznih sil, je odločeno, da se naredi preskušane druge oblike, vendar tak, da bo njegovo obnašanje čim bolj podobno obnašanju detajla v realni konstrukciji (slika 5).

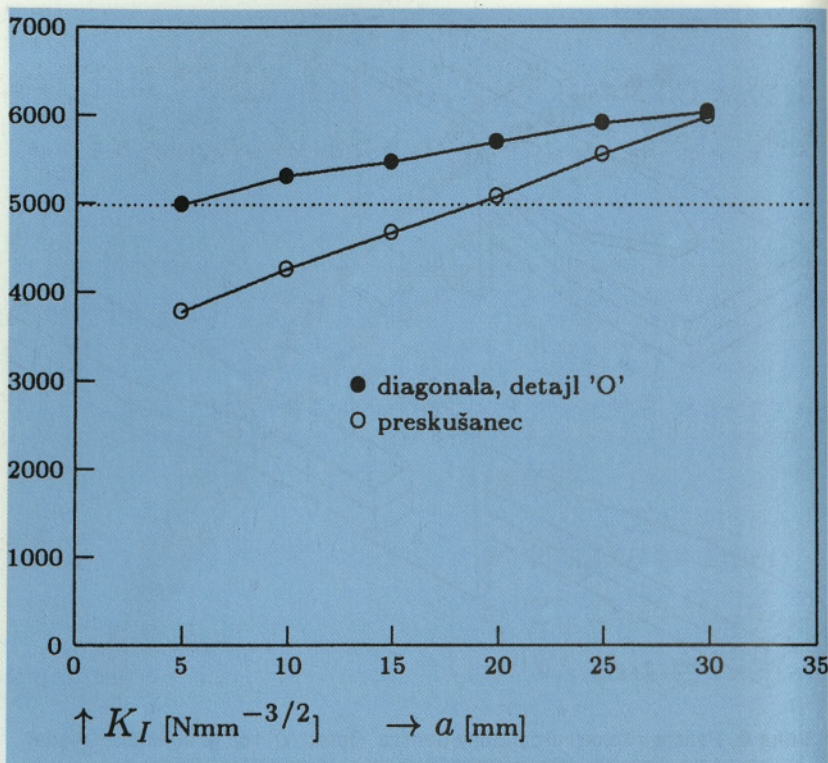
Najprej smo naredili primerjavo med koncentracijama napetosti v kritičnih točkah realnega in preskusnega modela in geometrijo preskušanca tako spremenili, da smo dobili primerljive vrednosti (slika 6). Nato smo za realni in preskusni model naredili numerično simulacijo rasti razpoke iz najbolj kritične točke. Pri tem je prišla zelo prav avtomatizirana metoda za podaljševanje razpoke.

Iz primerjave krivulj $K_f(a)$ (slika 7) za oba modela smo ugotovili, kako dolgo razpoko je treba zarezati v preskusni model, da dobimo približno enak faktor intenzitete napetosti kot pri realnem modelu. Iz slike namreč vidimo, da razpoka dolga 5 mm v realnem modelu (kar je dvakratna vrednost dolžine razpoke, ki jo lahko zaznamo z neporušnimi metodami) ustreza približno 20 mm dolgi razpoki v preskušancu. Pri preskusu se je preskušane s tako dolgo razpoko in pri projektirani obremenitvi pretrgal šele pri -70°C (z le delno krhkim prelomom).

5 SKLEP

Lahko ugotovimo, da je z avtomatičnim generiranjem mreže končnih elementov postopek določevanja faktorjev intenzitete napetosti K_f ali katerega drugega parametra, ki je odvisen od dolžine razpoke a , ter propagacije razpoke in s tem tudi ocena življenjske dobe konstrukcije, precej poenostavljen. Nadaljnja avtomatizacija postopka je možna in je v delu. Primerjava eksperimentalnih in nu-

meričnih rezultatov kaže na zadovoljivo raven ujemanja.



Slika 7. Primerjava poteka K_I (faktor intenzitete napetosti) v odvisnosti od dolžine razpoke v detajlu 'o' in ustreznem detajlu preskušanca.

LITERATURA

- [1] Hellen T.K., On the Method of Virtual Crack Extensions, Int. J. Num. Meth. Eng., Vol.9, 187-207 (1975).
- [2] Haggag F.M., Underwood H.J., Compliance of a Three-Point Bend Specimen at Load Line. Int. J. Fracture, 26, R63-R65 (1984)
- [3] Standard Test Method for J_{Ic} , A Measure of Fracture Toughness ASTM E 813-87 (1987)
- [4] Peraire J., Vahdati M., Morgan K., Zienkiewicz O.C., Adaptive Remeshing for Compressible Flow Computations, Journal of Computational Physics 72, 449-466 (1987).
- [5] Zhu J.Z., Zienkiewicz O.C., Hinton E., Wu J., A New Approach to the Development of Automatic Quadrilateral Mesh Generation, Int. J. Num. Meth. Eng., Vol.32, 849-866 (1991).
- [6] T. Velkovich, Č. Remec, M. Rodič, I. Kovše, Š. Strojnik Določanje preostale življenjske dobe jeklenih mostov, 1. Slovenski dnevi jeklenih konstrukcij, Ljubljana, 31.marec-1.april 1994, Zbornik del, str. 71-81 (1994)
- [7] Kovše I., Povezava med podajnostjo in dolžino razpoke za različne lomnomehanske preizkušance, Materiali in tehnologije, letnik 34, št. 1-2, str. 43-46 (2000).

GEOTEHNIČNE IN TEHNOLOŠKE POSEBNOSTI GRADNJE PREDORA GOLOVEC

GEOTECHNICAL AND TECHNOLOGICAL SPECIFITIES OF THE GOLOVEC TUNNEL CONSTRUCTION

STROKOVNI ČLANEK

UDK 624.131 : 624.195

JAKOB LIKAR

POVZETEK Tehnološka zasnova izkopa in vgradnja podpornih elementov v predoru Golovec predstavljata na tem strokovnem področju določeno posebnost, saj so ekstremni geotehniški pogoji gradnje narekovali uvedbo intenzivnih pomožnih podpornih elementov kakor tudi prilagoditev vseh delovnih faz relativno zapletenemu tehnološkemu postopku gradnje.

Skupna debelina primarne obloge 50 cm, ki jo sestavljajo plasti mikroarmiranega in navadnega brizganega betona vključno z drugimi podpornimi elementi, kot so ojačeno jekleno podporje in dolga trenjska sidra, zagotavlja v pretežni meri dovolj visoko nosilnost glede na izračunane in izmerjene obtežbe.

Hitra spremenljivost geološke zgradbe danega območja in anizotropna sestava hribinskih zlogov, ki so prepreženi z raznovrstnimi diskontinuitetami, ter povečano primarno napetostno stanje so zahtevali hitro prilagajanje tehnoloških faz vsakemu primeru posebej. Poleg navedenega je bila v nekaterih plasteh prisotna hribinska voda, ki je še dodatno vplivala na spremembe trdnostnih in deformabilnostnih lastnosti okoliških hribin, kar se je posredno kazalo v povečanih obremenitvah znotraj primarnega podpornega sistema.

Da je bila zagotovljena čimbolj zvezno naraščajoča anizotropna obtežba, ki deluje na primarno podporje, je bil tehnološki proces izkopa in vgradnje podpornih elementov izvajan natančno v časovnih intervalih, tako da je bilo strjevanje brizganega betona minimalno moteno.

Logistična podpora, ki jo je uporabljal izvajalec, je bila usklajena in ustrezno dimenzionirana. Zahteva po hitri zaščiti odprtih ploskev je bila praktično popolnoma izpolnjena, saj je bila ustrezna prevleka iz mikroarmiranega brizganega betona, ki relativno dobro prenaša natezne obremenitve, nanesena takoj po izkopu vsakega koraka. S takim načinom dela in

Avtor:

Doc.dr. Jakob Likar, univ.dipl.ing.rud., Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geotehnologijo in rudarstvo, Aškerčeva 12, 1000 Ljubljana

zveznim napredovanjem izkopa, ki je znašal največ okrog 3 m/dan, je bila zagotovljena varnost zaposlenih kot tudi dovolj učinkovita gradnja izjemno zahtevnega objekta.

Usklajenost delovnih faz in izvajanje tehnološkega ciklusa v predpisanem času so bili poleg ostalih elementov napredovanja bistveni pogoji, ki so bili praktično popolnoma izpolnjeni.

S U M M A R Y Technological scheme of excavation and instalment of support elements in Golovec tunnel represent in this branch certain speciality, because the extreme geotechnical conditions of construction dictated some auxiliary support elements as well as adjustment of all working phases to relatively complicated technological construction procedure.

Total thickness of primary lining in amount of 50 cm compounded of layers of regular and steel microfibre shotcrete, including other support elements, such as strengthen steel ribs and long rock bolts, mostly assure enough load capacity considering calculated and measured loads by strain gauges and hydraulic cells.

Quick changes of geological structure around the tunnel tube, anisotropic compound of rock layers with different discontinuities and increased primary stress condition demand quick adjustment of technological phases to each particular case.

Beside mentioned there is mountain water in some layers which additionally affects changes of strength and deformability characteristics of surrounding rock which indirectly shows in increased loads inside primary support system.

To assure linear anisotropic load acting on primary support, technological process of excavation and instalment of support elements are executed in time intervals and young shotcrete is minimally disturbed in hardening process.

Logistic support used by the contractor is suitable harmonised and adequate dimensioned in such case of construction. It enables quick protection of open surface with adequate steel micro fibre shotcrete layer, which stands out tensile strength relatively well. With such method of work and continuous face advancing of excavation, which should amount up to maximum of 3 m per day, the safety of employees as well as enough effective construction of extra exacting structure is assured.

Harmonisation of working phases and implementing of technological cycle in to prescribed time were together with other elements of advancing essential conditions which were practically completely fulfilled.

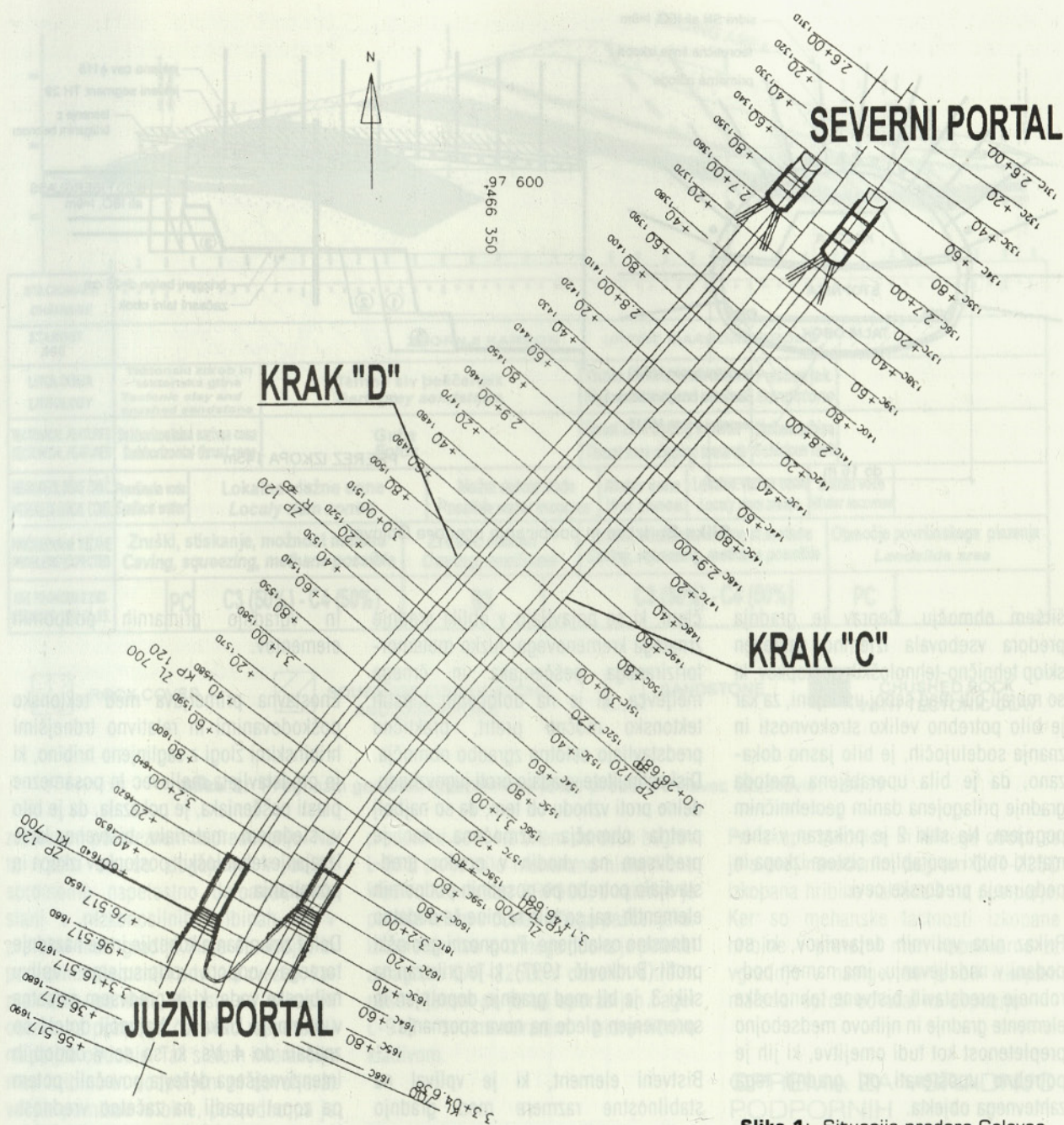
UVOD

Trasa vzhodne avtoceste, ki je del krožne povezave okrog mesta Ljubljane, se na območju razcepa Malence zarije v hrib Golovec. Na drugi, t.j. severni strani predora Golovec, je trasa speljana po bizoviški dolini vzhodno od naselja

Bizovik, in nato proti severu, kjer se spoji z avtocestnim odsekom Celje – Ljubljana. Pričakovanja, ocene in strokovne analize o naraščanju prometa v naslednjih desetletjih so jasno narekovale odločitev, da je bil predor Golovec načrtovan in zgrajen kot dvocevni tripasovni povezovalni objekt skupne dolžine 594,25 m +

562,75 m = 1157 m), kot je prikazano na sliki 1.

Povečana preseka predorskih cevi sta usklajena z zahtevami, ki se nanašajo na tripasovno potekanje cestnega prometa in predstavljata ter hkrati zahtevata v tehnično tehnološkem smislu v povezavi



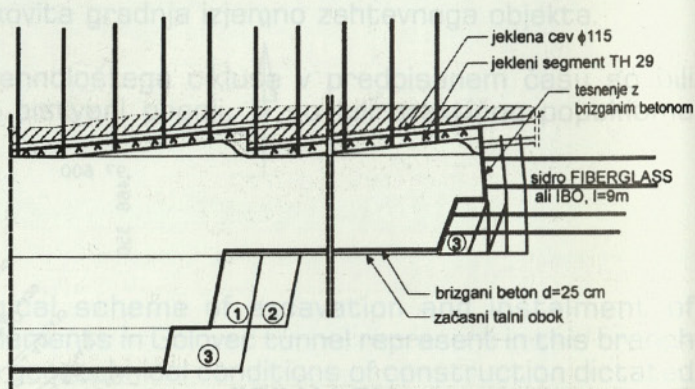
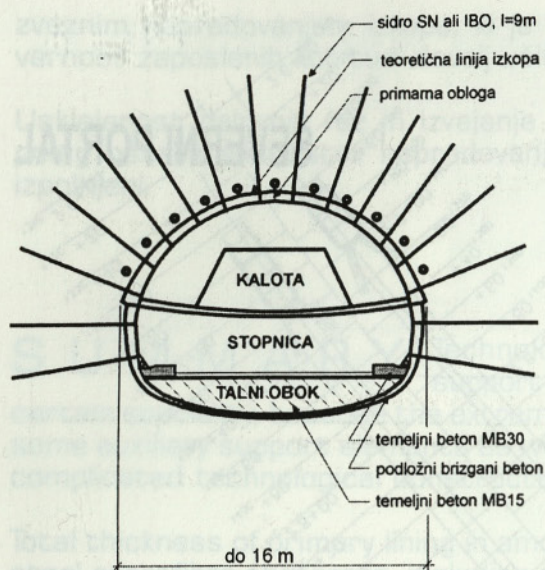
Slika 1: Situacija predora Golovec

z dejanskimi geotehničnimi pogoji gradnje posebno metodo izkopa in podpiranja. Ta je bila prilagojena specifičnim pogojem, izmed katerih je imelo bistven vpliv ekstremno visoko napetostno stanje, ki je bilo še dodatno spremenjeno po globokem plazenju južnih pobočij hriba Golovec še pred

pričetkom aktivnosti v predoru. Metoda gradnje je poleg navedenega zasnovana tudi tako, da so izpolnjene zahteve, ki se nanašajo na varno delo v predoru. Trasa, katere sestavni del sta leva in desna predorska cev (krak C in krak D), je prilagojena vsem tehniško prometnim kot tudi okoljevarstvenim zahtevam, kar

predstavlja kakovostno osnovo za dolgotrajno in uspešno uporabo objekta. To je ne nazadnje jasno vidno iz oblike portalnih konstrukcij, odvodnjevalnih posegov na širšem območju gradnje predora in umestitve objekta v naravno okolje, tako da je v čimmanjši meri moten krajinski videz in naravni tok življenja na

J. LIKAR: Geotehnične in tehnološke posebnosti gradnje predora Golovec

PREREZ IZKOPA 145m²

Slika 2: Izkop in podpiranje predora Golovec

širšem območju. Čeprav je gradnja predora vsebovala izjemno zahteven sklop tehnično-tehnoloških postopkov, ki so morali biti med seboj usklajeni, za kar je bilo potrebno veliko strokovnosti in znanja sodelujočih, je bilo jasno dokazano, da je bila uporabljena metoda gradnje prilagojena danim geotehničnim pogojem. Na sliki 2 je prikazan v shematski obliki uporabljen sistem izkopa in podpiranja predorske cevi.

Prikaz niza vplivnih dejavnikov, ki so podani v nadaljevanju, ima namen podrobneje predstaviti bistvene tehnološke elemente gradnje in njihovo medsebojno prepletenost kot tudi omejitve, ki jih je potrebno upoštevati pri gradnji tega zahtevnega objekta.

GEOLOŠKO- GEOTEHNIČNE RAZMERE OBMOČJA GOLOVEC

Geološka zgradba območja Golovec, ki je bila preverjena v času izkopa predora (krak C in krak D) se relativno dobro ujema z geološko sliko, ki je podobna tisti, ki velja za širše območje. Litološki

členi, ki se pojavljajo v obliki srednje zrnatega kremenovega, nizko metamorfiziranega peščenjaka in črnega meljevca, ki je na določenih mestih tektonsko močno pretrta, praktično predstavljajo celotno zgradbo območja. Diskontinuitete vpadajo proti jugovzhodu, delno proti vzhodu ob tem, da so najbolj pretrta območja razmočena, kar je predvsem na vseh v predoru predstavljalo potrebo po posebnih podpornih elementih, saj so bile hribine še dodatno trdnostno oslabiljene. Prognozi geološki profil (Budkovič, 1997), ki je prikazan na sliki 3, je bil med gradnjo dopolnjen in spremenjen glede na nova spoznanja.

Bistveni element, ki je vplival na stabilnostne razmere med gradnjo predora, je bil izjemno neugoden vpad plasti v južnem predelu leve predorske cevi (krak C), saj je bila intenzivnost deformacij povečana praktično povsod, kjer smo imeli opravka z navedeno plastovitostjo. Celotno južno obrobje hriba Golovec je bilo že v primarnem kot tudi v sekundarnem napetostnem stanju posledično povezano z globljimi premiki, povzročenimi z globokim plazenjem, izrazito usmerjenim proti jugu, kar je še dodatno vplivalo na način izvajanja izkopa

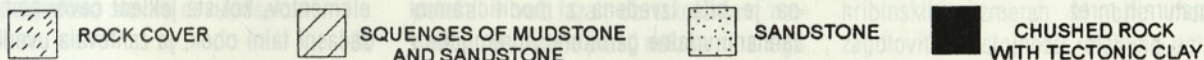
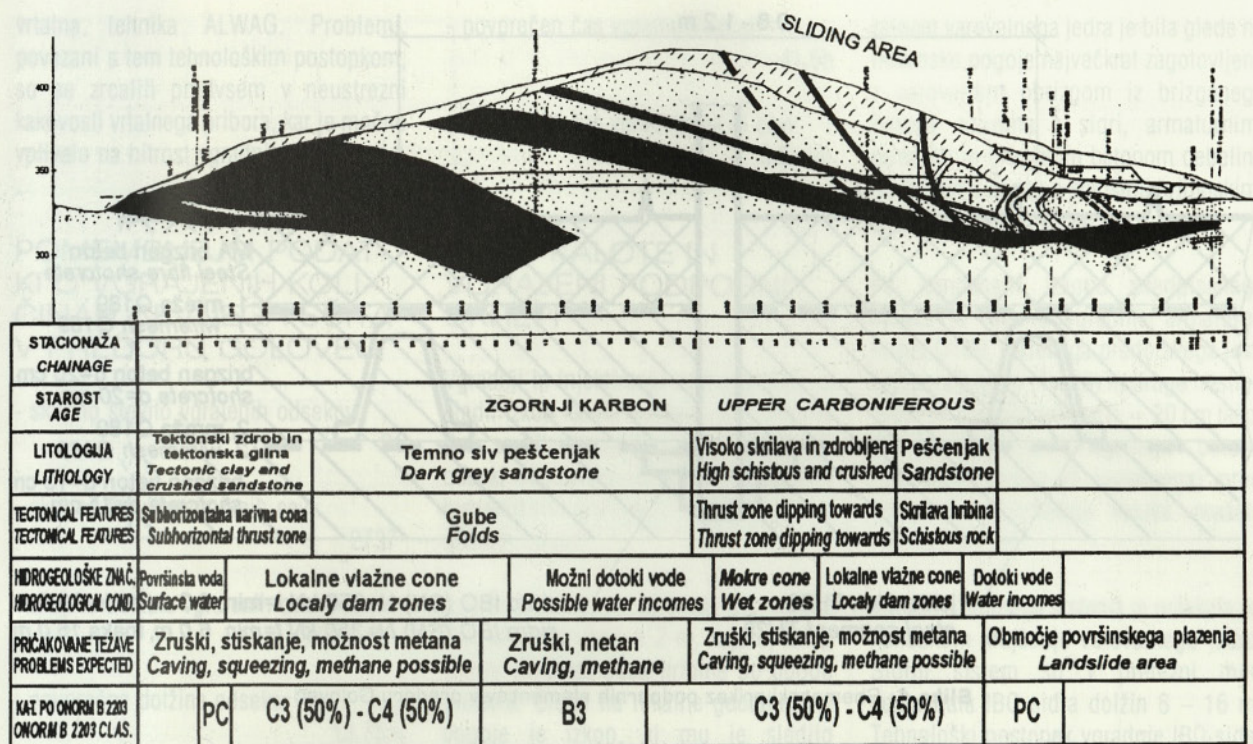
in vgradnjo primarnih podpornih elementov.

Enostavna primerjava med tektonsko poškodovanimi in relativno trdnjšimi hribinskimi zlogi z zaglinjeno hribino, ki jo predstavljata meljevec in posamezne plasti peščenjaka, je pokazala, da je bilo v slednjem materialu bistveno lažje izvajanje tehnoloških postopkov izkopa in podpiranja.

Delež zmanjšanja kohezije in ne nazadnje tornega odpora pripisujemo vplivu hribinske vode, ki je predvsem prisotna v območju kraka C. Največji dotoki so znašali do 4 l/s, ki so se v obdobjih intenzivnejšega deževja povečali, potem pa zopet upadli na začetno vrednost. Navedene razmere so zahtevale kakovostno in dotokom primerno dimenzionirano odvodnjo.

OPREMA ZA IZKOP

Geotehnični pogoji gradnje so narekovali ustrezno strojno opremo, ki je bila prilagojena tehnološkemu ciklusom v optimalnem obsegu, da je bilo zaporedje delovnih faz čim bolj usklajeno z



Slika 3: Prognozni geološko geotehnični profil predora Golovec (Budkovič, 1997)

zahtevami po zveznem napredovanju. Na ta način so se dogajanja v obliki sprememb napetostno deformacijskih stanj v nizkonosilnih hribinah, ki v pretežni meri gradijo širše območje, in podpornih elementih odvijala zvezno, kar praktično pomeni, da so se prirastki obežb na podporje časovno razporedili na daljše obdobje. Tak sistem interakcije med hribino in podporjem ni dovoljeval večjih pomikov hribine, posredno pa je omogočal vzpostavitev bolj enakomernega napetostno deformacijskega polja.

IZKOP KALOTE IN STOPNICE

Za izkop kalote sta bila uporabljena bagra (predorska izvedba) LIEBHERR-912 in L-932. Pri tem je bil bager L-932 uporabljan izključno za izkop kalote

predorske cevi, na enem od dveh bagrov L-912 pa je bilo montirano hidravlično kladivo Montabert BRP900, s katerim je potekal izkop v conah tršega peščenjaka. Izkop stopnice in talnega oboka je potekal z bagrom CAT-225D, v odsekih s tršim peščenjakom pa je bil uporabljan bager L-912 z montiranim hidravličnim kladivom.

NAKLADANJE IN TRANSPORT IZKOPANEGA MATERIALA

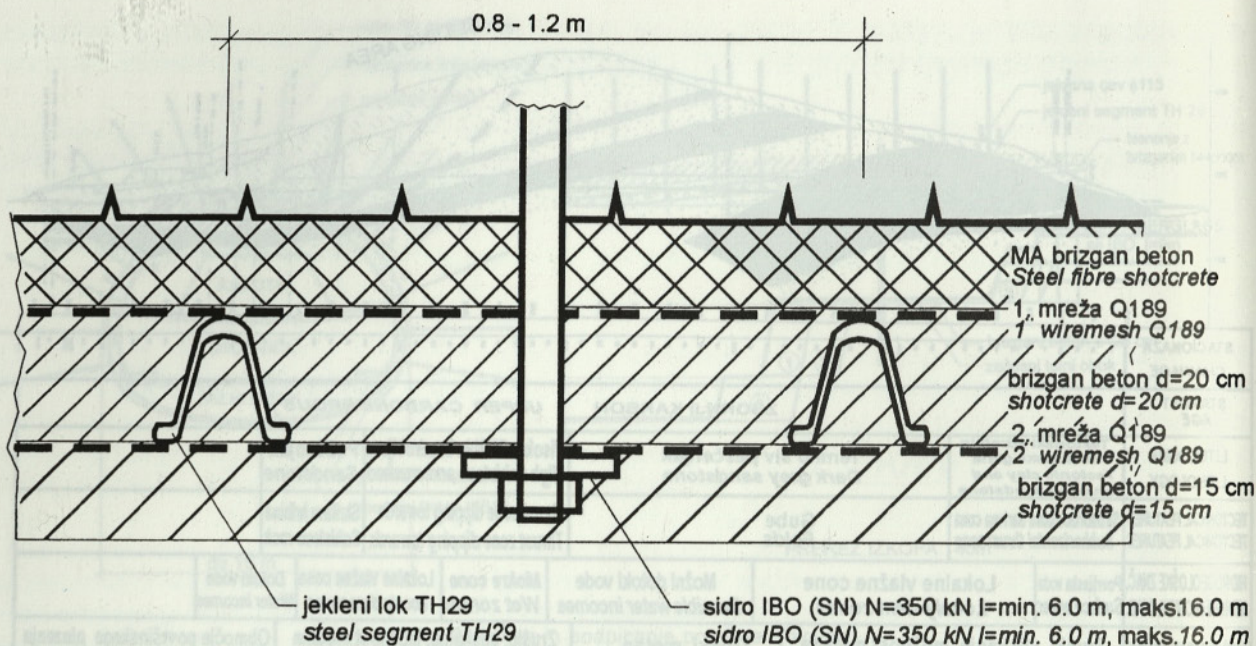
Nakladanje izkopane hribine pri izkopu kalote je potekalo z nakladalcem Caterpillar 950E. Izkopana hribina, ki se je nakladala z nakladalcem na dumperje tipa Caterpillar D25C nosilnosti 25 ton, je bila v pretežni meri odpeljana na deponijo, oddaljeno približno 2.0 km od predora.

Pri izkopu stopnice in talnega oboka se je s prej navedenim bagrom CAT-225D izkopana hribina nakladala na dumperje. Ker so mehanske lastnosti izkopane hribine v pretežni meri neprimerne za vgradnjo v nasipe, se je bil izkopani material sproti odvažal na deponijo.

OPREMA ZA VGRADNJO PODPORNH ELEMENTOV

VGRADNJA JEKLENIH PODPORNH LOKOV IN ARMATURNE MREŽE

Za vgradnjo jeklenih podpornih lokov in armaturne mreže sta bila uporabljena bagra L-932 in L-912, s katerima je potekala vgradnja oz. dviganje na tleh sestavljenih predorskih lokov na prave pozicije v profilih in nakladalec CAT 950E



Slika 4: Shematski prikaz podpornih elementov v predoru Golovec

kot dvižna platforma pri nameščanju armaturnih mrež.

VGRADNJA BRIZGANE-GA BETONA

Pri vgradnji brizganega betona je bil v predoru Golovec prvič v Sloveniji uporabljen mokri postopek brizganega betona. Za brizganje oz. nanašanje brizganega betona je bil uporabljen stroj za brizganje betona MEYCO Spraymobil z vgrajeno črpalko za beton, hidravlično lafeto za strojno nanašanje betona in procesno vodenim sistemom za kontrolo pretoka betona in doziranja pospešila za hitro vezavo betona.

VGRADNJA HRIBINSKIH SIDER IN JEKLENEGA CEVNEGA ŠČITA

Za vgradnjo hribinskih sider in jeklenih perforiranih cevi premera 115 mm cevnega ščita sta bili uporabljani vrtalni garnituri Atlas Copco BOOMER H352. Vrtalna oprema je bila sprva namenjena izključno vrtanju minskih vrtin oz. vgradnji

sidrnih sistemov. Vgradnja cevnega ščita pa je bila izvedena z modificiranimi lafetami vrtalne garniture, opremljene z novimi vrtalnimi kladivi COP 1238ME, ki je s tem dodatkom omogočila večnamensko uporabo vrtalne opreme.

Za injektiranje sider in jeklenih perforiranih cevi cevnega ščita sta bili uporabljeni injektirni črpalki MAI-400 za injektiranje sider sistema IBO oz. injektirna postaja UNIGROUT 400-12E za injektiranje cevnega ščita. Ta je omogočala hitro vgrajevanje velikih količin injektirne mase, ki je potrebna za zapolnitev jeklenih cevi praznih prostorov v okoliški hribini. Na ta način je bil utrjen svod v stropnem delu kalote in s tem dana možnost izvajanja izkopa.

OPIS TEHNOLOŠKIH FAZ GRADNJE

CEVNI ŠČIT

Izrazita nestabilnost stropa je kljub vgradnji predvidenih sulic v prvi fazi izkopa kalote zahtevala spremembo tehnologije varovanja kalote. Odločitev, ki je

narekovala uporabo dodatnih podpornih elementov, kot sta jekleni cevni ščit in začasni talni obok, je zahtevala uvedbo tehnoloških postopkov vgradnje teh sistemov v relativno pretrti hribinah. Predvsem vgradnja cevnega ščita iz jeklenih perforiranih cevi premera 115 mm, ki so bile po končani vgradnji zainjektirane, je relativno zapletena operacija, ki je zahtevala izkušnje rudarjev, ki so opravljali ta dela.

Cevni ščit je bil vedno vgrajen v zgornji del stropa kalote ob upoštevanju prekrivanja od 4 m do 6 m, kar je omogočilo varno napredovanje izkopa in vgradnjo podpornih elementov. Za ta namen je bila uporabljena vrtalna garnitura A.C. Boomer H352, pri čemer je moral izvajalec zaradi izkopa predorskih cevi z južne kot tudi severne strani za izvedbo cevnega ščita opremiti dve vrtalni garnituri. Večino vrtin za vgradnjo cevi je bilo izvedenih z vrtalno tehniko sistema BOODEX, ki je z vidika obrabe vrtalnega pribora in storilnosti relativno dobro ustrežal kriterijem pri vgradnji v mehkejših conah, medtem ko je bila v conah z menjavanjem mehkejših in trših hribin z gledišča storilnosti boljša

vrtalna tehnika ALWAG. Problemi, povezani s tem tehnološkim postopkom, so se zrcalili predvsem v neustrezni kakovosti vrtalnega pribora, kar je močno vplivalo na hitrost vgradnje.

POMEMBNEJŠI PODATKI O VGRAJENIH KOLIČINAH CEVNEGA ŠČITA V PREDORU GOLOVEC

- skupno število vgrajenih odsekov: 91
- skupno število vgrajenih cevi: 2737
- skupna dolžina vgrajenih cevi: 37660.0m
- povprečna dolžina odseka: 13.75m
- povprečno število cevi/odsek: 30
- poraba injektirne mase: 715540kg
- povprečna poraba na m cevi: 19kg

- povprečen čas vgradnje/odsek: 41.5h
- povprečen čas vgradnje na m cevi: 6.0min

IZKOP KALOTE IN VGRAJENI PODPORNİ UKREPI

Vgradnji in injektiranju cevnega ščita je sledil izkop kalote predora. Vsa izkopna dela so bila izvedena z bagerji, redkejši odseki trše hribine pa so bili izkopani s hidravličnim kladivom, nameščenim na ustrezni bager.

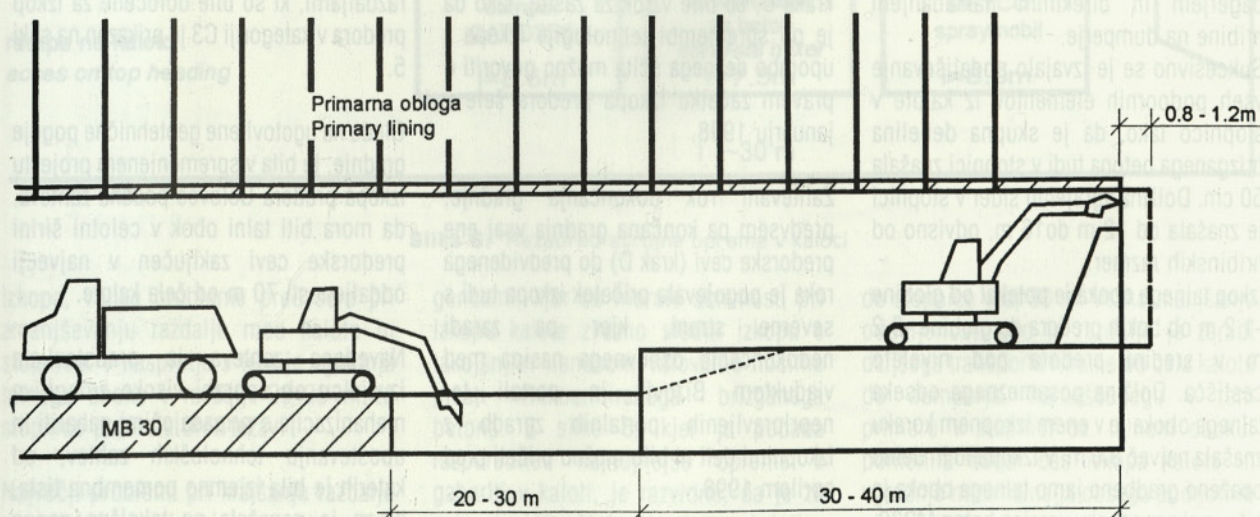
Bagerski izkop je zajemal pri koraku napredovanja 0.8 - 1.2 m, najprej izkop 2.3 m širokega pasu hribine po obodu predora. Glede na lokalne geotehnične pogoje je izkop, ki mu je sledilo nakladanje in odvoz hribine na deponijo, potekal v več fazah ob takojšnjem nanašanju varovalne plasti mikroarmiranega betona debeline 15 cm.

Čelo kalote je bilo pri izkopu oblikovano skupaj z varovalnim jedrom, katerega velikost in oblika sta bila prilagojena trenutnim hribskim razmeram. Sta-

bilnost varovalnega jedra je bila glede na hribske pogoje največkrat zagotovljena z varovalnim obrizgom iz brizganega betona oziroma s sidri, armaturnimi mrežami in brizganim betonom debeline do 20 cm v conah s slabšimi hribskimi karakteristikami.

Po končanem izkopu predpisanega koraka je sledila vgradnja armaturne mreže Q189, jeklenega predorskega loka z maso 29 kg/m (TH 29) in druge nosilne plasti brizganega betona $d = 20$ cm tako, da je debelina brizganega betona (mikroarmiranega in navadnega) pred izkopom naslednjega koraka znašala najmanj 35 cm.

Vgradnja sidrnega sistema je potekala po končanem krajšanju varovalnega jedra. Sidrni sistem so v pretežni meri sestavljala IBO sidra dolžin 6 - 16 m. Tehnološki postopek vgradnje IBO sider je bil izbran zato, ker v tako neugodnih hribskih razmerah ni bilo možno zagotoviti obstojnosti relativno dolgih sidrnih vrtin v času od zaključka vrtanja do vgradnje injektirne mase in nosilnega jeklenega sidrnega droga. Obenem je z vgradnjo sider potekala vgradnja druge plasti armaturne mreže Q189, po končanem injektiranju vgrajenih sider pa



Slika 5: Shematski prikaz delovišč pri izkopu predora Golovec

je sledila še vgradnja zadnje plasti brizganega betona $d = 15$ cm, s čimer je bila dosežena zahtevana debelina primarne obloge $d = 50$ cm.

Poleg glavnih podpornih elementov je bil glede na sproti ugotovljene hribinske razmere v veliki dolžini kalote predora vgrajen začasni talni obok, s čimer je bila dosežena sklenitev primarne obloge predora že v kaloti, kar je skupaj z vgradnjo razširjene pete kalote (»elephant foot«) preprečevalo posedanje celotne kalote. Na nekaterih odsekih je zaradi prevelikih diferenčnih posedkov stropa in bokov kalote, ki so bili posledica ekstremno visokih hribinskih obtežb na primarno podporje, prihajalo do pojavljanja vzdolžnih razpok v stropu predorskih cevi. To je zahtevalo sanacijska dela v obliki dodatnega sidranja in ponovni spojitvi obloge iz brizganega betona v nosilni obroč okrog predorske cevi.

IZKOP STOPNICE IN TALNEGA OBOKA

Izkop stopnice in talnega oboka je potekal v polovični širini predorske cevi, saj je bila druga polovica namenjena dostopu in odvozu izkopane hribine pri izkopu kalote.

Izkopna dela na stopnici so se izvajala z bagerjem in direktnim nakladanjem hribine na dumperje.

Sukcesivno se je izvajalo podaljševanje vseh podpornih elementov iz kalote v stopnico tako, da je skupna debelina brizganega betona tudi v stopnici znašala 50 cm. Dolžina vgrajenih sider v stopnici je znašala od 12 m do 16 m, odvisno od hribinskih razmer.

Izkop talnega oboka je potekal od globine -1.2 m ob bokih predora do globine -3.2 m v sredini predora pod niveleto cestišča. Dolžina posameznega odseka talnega oboka je v enem izkopnem koraku znašala največ 8.0 m. V izkopano in delno opaženo gradbeno jamo talnega oboka je bil v vsakem odseku vgrajen beton MB30. Da je bil nosilni obroč primarne obloge

predorske cevi sklenjen, je moral biti talni obok v bokih predora v celotni dolžini izdelan pod oblogo iz brizganega betona. Sklenjeni nosilni obok okrog predorske cevi ni dopuščal dodatnega posedanja, kar se je odrazilo na zelo hitrem umirjanju posedkov. Ta dogajanja so posredno vplivala na izvajanje drugih del v predoru. Doseganje deformacijskega kriterija, ki je v danem primeru znašal 8 ± 2 mm/mesec, je omogočilo vgradnjo notranje obloge predora že v časovnem presledku dveh do treh tednov za dokončanim talnim obokom.

ČASOVNI POTEK NA-PREDOVANJA

V projektu gradnje predora Golovec je bil načrtovan izkop v smeri južni portal (Malence) - severni portal (Bizovik), čemur se je prilagodil izvajalec SCT, d.d. tako, da je postavil gradbišča na južnem portalu predora. Z izkopom predorske cevi D je izvajalec pričel v sredini junija 1997, medtem ko naj bi sledil izkop cevi C v časovnem zamiku 30 - 40 dni.

Izredno zahtevna hribinska zgradba na začetku cevi kraka D, ki so jo še dodatno poslabšali globok plaz na južnem pobočju Golovca in velike težave pri prehodu iz portala v rudarski del predora kraka C, so bile vzrok za zastoj, tako da je po spremembi tehnologije izkopa z uporabo cevnege štita možno govoriti o pravem začetku izkopa predora šele v januarju 1998.

Zahtevani rok dokončanja gradnje, predvsem pa končana gradnja vsaj ene predorske cevi (krak D) do predvidenega roka je pogojevala pričetek izkopa tudi s severne strani, kjer pa zaradi nedokončanja osnovnega nasipa med viaduktom Bizovik in portali ter nepripravljenih portalnih zgradb z izkopnimi deli ni bilo možno pričeti pred aprilom 1998.

Ves čas gradnje je izvajalec SCT -

upoštevaje hribinske razmere ter velikost predorskih cevi - predvideval v kaloti izkop dveh korakov dolžine po 1.0 m na dan, čemur je z ustrezno dinamiko sledil tudi izkop stopnice in talnega oboka. Zaradi vgradnje cevnege štita, ki je vsakič pomenila trenutno prekinitev izkopnih del v kaloti, je bilo potrebno zmanjšati povprečni načrtovanimi dnevni napredek na 1.5 m za vsako delovišče, kjer je potekalo napredovanje.

Ker je kljub vgradnji cevnege štita in načrtovanih podpornih elementov še vedno na določenih odsekih prišlo do povečanih deformacij primarne obloge, so bila dela na napredovanju v teh primerih ustavljena, dokler niso bila izvedena dodatna dela na podpiranju ali sanaciji že preveč deformirane obloge predora. Zato so napredki pri gradnji tega zahtevnega objekta, ki so prikazani v preglednici 1, resničen odsev zapletenih in zahtevnih geološko geotehničnih pogojev, ki so prisotni na širšem obravnavanem območju.

OPIS ZAMIKOV TEHNOLOŠKIH FAZ GRADNJE GLEDE NA POGOJE IZVAJANJA DEL

Shematski prikaz delovišč z osnovnimi razdaljami, ki so bile določene za izkop predora v kategoriji C3 je prikazan na sliki 5.

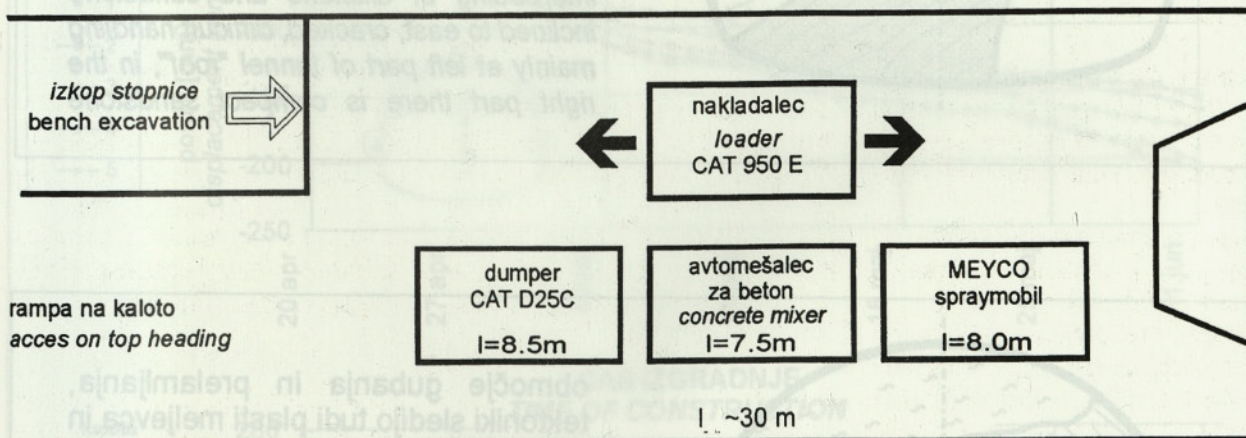
Glede na ugotovljene geotehnične pogoje gradnje, je bila v spremenjenem projektu izkopa predora Golovec podana zahteva, da mora biti talni obok v celotni širini predorske cevi zaključen v največji oddaljenosti 70 m od čela kalote.

Navedena zahteva je predstavljala izvajalcu ob uporabi visoko zmogljive mehanizacije s pripadajočimi gabariti in upoštevanju tehnoloških zahtev, od katerih je bila izjemno pomembna tista, ki se je nanašala na takojšen nanos brizganega betona, ter zahtevani dinamiki

Mesec	D-jug m	m*	D-sever m	m*	C-jug m	m*	C-sever m	m*
jan.98	0,9	1			0,5	1,2		
feb.98	1,4	1,7			0,5	1,3		
mar.98	1,1	1,7			0,7	1,2		
apr.98	1,6	1,8	0,7	0,9	0,6	1,3		
maj.98	1	1,8	0,8	1,4	0,7	1,5		
jun.98	1,2	1,7	1,2	1,5	0,2	1,1		
jul.98	1,5	1,7	1,5	1,7	0,3	1		
avg.98	1,6	1,9	1,6	1,8	0,2	1,9		
sept.98					1,2	1,6		
okt.09					1,2	1,8	1,0	1,1
nov.98					1,3	1,6	0,6	1,1
dec.98					1,3	1,7	1,2	1,5
jan.99					1,8	2,1	1,3	1,8
feb.99					1,3	1,8	0,9	1,3
mar.98					2,2	2,2	0,5	2,0

m* - predstavlja napredek v dneh, ko je bil izvajan izkop kalote

Preglednica 1: Časovni potek napredovanja izkopa predorskih cevi



Slika 6: Razpored strojne opreme v kaloti

izkopa, velike probleme predvsem pri zmanjševanju razdalje med kaloto in stopnico. V nasprotju s tem je vgradnja talnega oboka v razdalji 20-30 m za stopnico potekala brez težav.

Največji problemi pri krajšanju razdalje med kaloto in stopnico so nastopili v odsekih z nadpovprečno velikimi konver-

gencami, kjer so morale aktivnosti pri izkopu kalote zvezno slediti izkopu s takojšnjim nanosom varovalno-nosilne plasti mikoarmiranega brizganega betona. S slike 6, kjer je podana razporeditev najnujnejše opreme z gabariti v kaloti, je razvidno, da je za normalno in učinkovito delo v kaloti v času izkopa potrebna minimalna razdalja

do stopnice vsaj 30 m. Vsako manjšanje oddaljenosti pod to razdaljo je zaradi daljšega transporta hribine od čela kalote do dumperja, nameščenega v tem primeru v stopnici oz. talnem oboku, pomenila daljši čas izkopa kalote in vgradnje minimalnega obsega podpornih elementov, s tem pa tudi poslabšanje varnostnih razmer pri izkopu kalote.

REZULTATI GEOTEHNIČNE SPREMLJAVE IN MERITEV

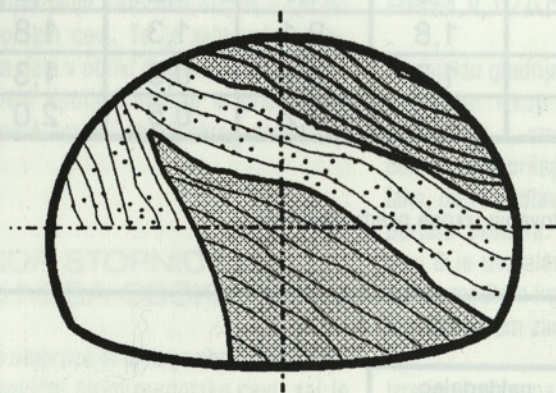
Stalna geološka spremljava izkopnih del poteka od začetka gradnje predora z namenom, da je po eni strani mogoče pripraviti prognozne geološke profile in po drugi strani analizirati neenakomerne deformacije primarne obloge predorskih cevi. Dežurni geolog je sprotne ugotovitve predstavil v obliki geoloških posnetkov, iz katerih je vidna poleg

strukture tudi inženirsko-geološka ocena določenega preseka. Na sliki 7 prikazujemo dva značilna prereza, iz katerih se vidi zapletenost in spremenljivost obravnavane geološke zgradbe.

Meritve pomikov reperov, vgrajenih v primarno oblogo, je izvajal Geograd, d.o.o., vrednotil pa ZAG – Zavod za gradbeništvo Republike Slovenije, ki je v sklopu geotehničnih opazovanj izvajal še nekatere meritve specifičnih deformacij in pomikov z ekstenzometri v okoliški hribini.

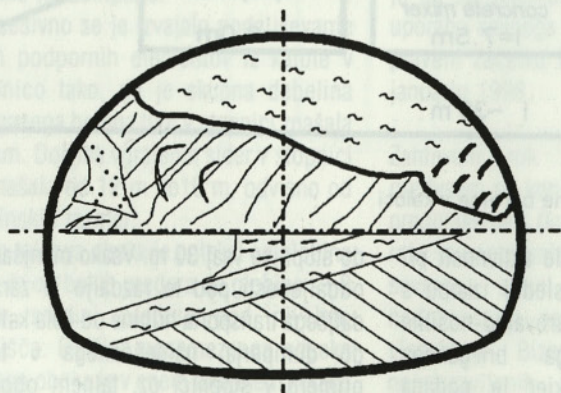
Ker je bilo še posebej izpostavljeno vprašanje vpliva izkopa kraka C na že zgrajeni krak D (vpliv leve predorske cevi na desno), je IRGO izvajal specialne meritve pomikov in specifičnih deformacij v merskem profilu na stacionaži 3.0+47 (krak D), da bi bil natančno ugotovljen omenjeni vpliv.

Splošna ocena časovnega razvoja pomikov ostenja predorskih cevi kaže na to, da je bilo prisotno pri gradnji intenzivno širjenje deformacijskih



menjavanje meljevca in peščenjaka z vpadom proti vzhodu, razpokano, težave pri obvladovanju predvsem levega dela stropa, v desnem delu kompakten peščenjak

interbedding of siltstone and sandstone inclined to east, cracked, difficult handling mainly at left part of tunnel "roof", in the right part there is compact sandstone



območje gubanja in prelamljanja, tektoniki sledijo tudi plasti meljevca in peščenjaka, ki so močno zaglinjene
generalni vpad 180/40

folding and faulting area followed by layers of siltstone and sandstone strongly filled by clay, general inclination 180/40

Slika 7: Značilna prečna geološka prereza izkopa (Beguš 1998)

procesov okrog predorskih cevi, ki se je kazalo tudi na površini na relativno širokem območju. Poleg navedenega je bilo jasno ugotovljiva spremenljivost velikosti in smeri deformacijskega polja, ki je bilo razširjeno 30 m pred izkopnim čelom in segalo nazaj tudi do oddaljenosti 50 m za izkopnim čelom. Plastično preoblikovanje karbonskih skladov, ki v pretežni meri sestavljajo širše območje okrog predora, se praktično kaže tako v širini tovrstnih vplivov kot v relativno hitrem umirjanju časovnih razvojev deformacij, ko je primarna obloga, v katero je vključen tudi talni obok, v celoti sklenjena.

Glede na rezultate triosnih strižnih preizkusov karbonskih hribin, ki jasno

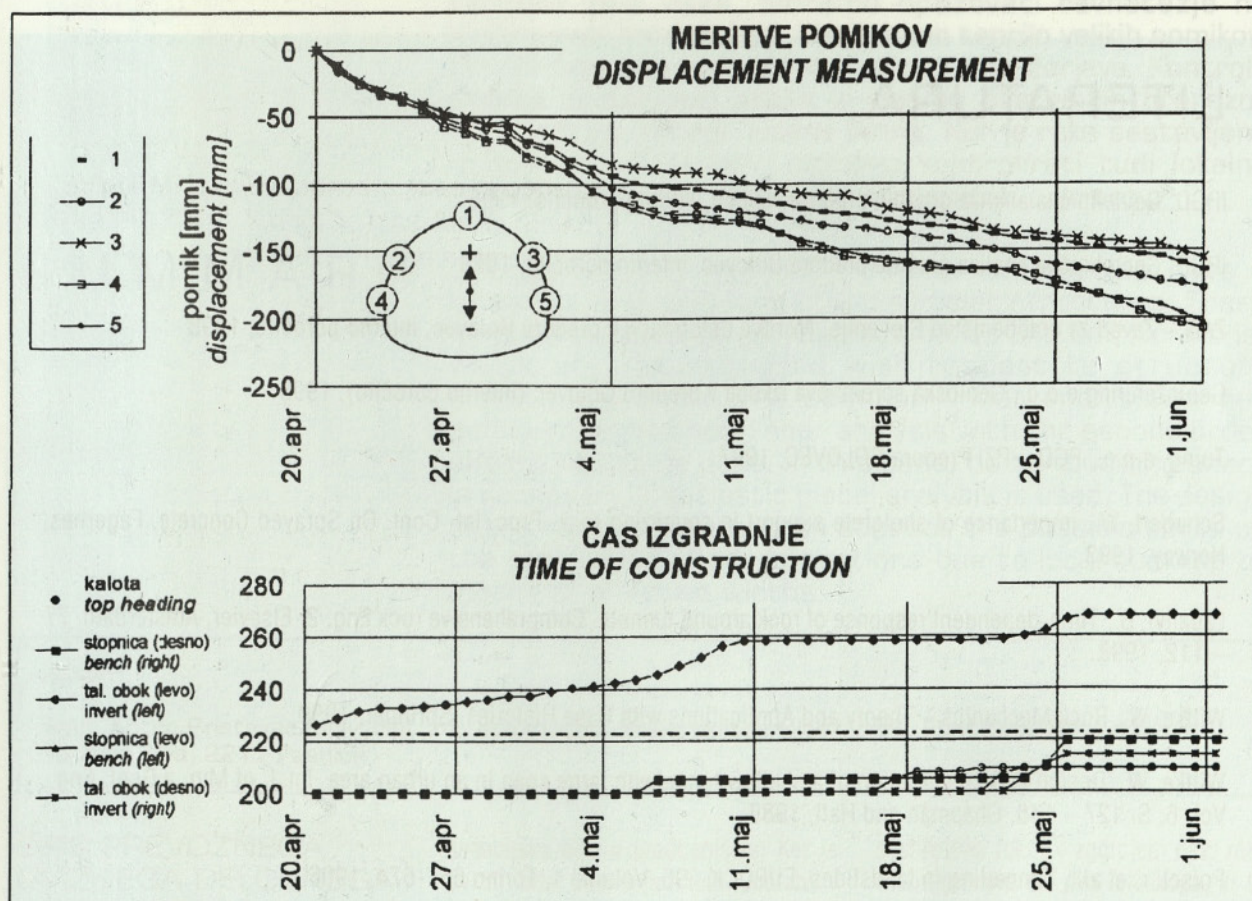
kažejo, da imamo tudi pri manjših hribinskih napetostih opraviti z izrazitim plastičnim preoblikovanjem, ni večje razlike med vrhunskimi in rezidualnimi strižnimi trdnostmi, saj se bistveno spremeni le kohezijski delež, ki pa se popolnoma ne izčrpa niti pri večjih deformacijah. Te ugotovitve kažejo izmerjene deformacije v predoru, na površini, kakor tudi analize sekundarnih napetostno deformacijskih stanj v oblogi in okoliški hribini, ki so bile izdelane z metodo končnih elementov (MKE) na IRGO.

Za boljše razumevanje navedenih ugotovitev podajamo na sliki 8 razvoj pomikov točk v primarni oblogi v odvisnosti od časa.

SKLEP

Funkcionalni in geometrijski pogoji gradnje, ki morajo biti izpolnjeni pri načrtovanju in gradnji določenega podzemnega objekta, posredno določajo obliko in ustreznost danim geotehničnim razmeram, ki so značilne za vsako območje posebej.

Ocene bistvenih geotehničnih parametrov, ki vplivajo na izbor tehnoloških postopkov izkopa in podpiranja, so v tesni povezavi z rezultati raziskav in prilagajanju karakteristik širšemu območju. Redukcije trdnostnih in deformabilnostnih parametrov so še posebej pomembne v primerih, ko so nizkonosilne hribine sestavni del širših



Slika 8: Časovni razvoj pomikov primarne obloge predorske cevi

J. LIKAR: Geotehnične in tehnološke posebnosti gradnje predora Golovec

območij, kjer poteka gradnja podzemnih prostorov z nizkim nadkritjem.

Izkop in vgradnja primarnih podpornih elementov v tripasovnem dvocevnem predoru Golovec sta pokazala, da je obvladovanje sekundarnih napetostno deformacijskih razmer, ki so prisotne v okoliški hribini in širšem območju, možno izvesti s pomočjo ojačenih podpornih elementov ob predhodni stabilizaciji stropa in čela izkopa.

Sprotna geološka in geotehnična spremljava sta omogočili ustrezno prilagajanje tehnoloških postopkov gradnje spremenljivim hribinskim pogojem. Ti se predvsem zrcalijo v anizotropnih in nizkih trdnostnih

lastnostih hribin po eni in v pogostih lokalnih anomalijah in tektonskih pojavih v mikro in makro strukturi nastopajočih karbonskih skladih po drugi strani.

Kratkoročna obstojnost in pogosta nestabilnost hribin zahtevata pri gradnji tako velikega podzemnega objekta hitro in kakovostno vgradnjo načrtovanih podpornih elementov, predvsem mikroarmiranega brizganega betona kot prvega nosilnega podpornega elementa pri napredovanju.

Deformacijske spremembe na širšem območju in ugotovljeni vplivi gradnje predorskih cevi ene na drugo so pokazali, da so bili načrtovani podporni elementi kot tudi uporabljeni tehnološki postopki

gradnje primerni glede na dane pogoje. Relativno toga primarna obloga in spremljajoči sidrni sistem kot sestavna dela primarnega podporja sta na določenih mestih, kjer je prišlo do manjših prekoračitev nosilnih sposobnosti, pokazala, da je prisotno ekstremno napetostno stanje v okoliški hribini in da vplivi gradnje segajo široko na površini nad predorom.

Dosežena hitrost gradnje v izjemno zahtevnih geotehničnih pogojih je rezultat usklajenega in ustreznega izvajanja sodobnih tehnoloških postopkov izkopa in podpiranja in ne nazadnje plod zglednega sodelovanja domačih strokovnjakov na tem področju.

LITERATURA

IRGO, Geotehnična analiza gradnje predora v Zideh, interno poročilo, 1998

IRGO, Geotehnična analiza gradnje predora Golovec, interno poročilo, 1998

ZAG – Zavod za gradbeništvo Slovenije, Meritve deformacij v predoru Golovec, interno poročilo, 1998

Geoinženiring d.o.o., Geološka spremljava izkopa v predoru Golovec (interno poročilo), 1998

Tuing, d.o.o., PGD – PZI Predora GOLOVEC, 1997

Schubert, W., Importance of shotcrete support in squeezing rock. Proc. Int. Conf. On Sprayed Concrete, Fagernes, Norway, 1993

Ladanyi, B., Time-dependent response of rock around tunnels. Comprehensive rock Eng. 2, Elsevier, Amsterdam, 77 – 112, 1993

Wittke, W., Rock Mechanics – Theory and Applications with Case Histories, Springer, 1990

Wittke, W., Design and construction of a shallow tunnel with large span in an urban area, Int.J. of Min. a Geol. Eng., Vol. 6, S. 127 – 146, Chapman and Hall, 1988

Poisel, r. et all., Tunnelling in landslides, EUROCK '96, Volume 1, Torino 667-674, 1996

Poisel, R. et all., Tunnelling in landslides, EUROCK '96, Volume 1, Torino, 689-696, 1996

KONTROLA NAPETOSTI IN STABILNOSTI KONSTRUKCIJE PREVOZNEGA DVIŽNEGA DELOVNEGA ODRA

STRESS AND STABILITY CHECK OF MOBIL LIFTING WORKING PLATFORM STRUCTURE

STROKOVNI ČLANEK

UDK 621.86 : 624

ANTON PRISTAVEC

POVZETEK

V prispevku prikazujemo dokaz nosilnosti in uporabnosti konstrukcije prevoznega dviznega žerjava. Ker je roka naprave zelo vitka, moramo opazovati ravnotežje na deformirani konstrukciji. Uporabimo teorijo velikih pomikov. Zaradi tega odpade kontrola uklona roke žerjava. Kontrolo lokalne stabilnosti stojin in pasnic škatlastih prerezov opravimo po metodi nosilne širine. Ker je roka sestavljena iz gibljivih teleskopov, moramo kontrolirati tudi lokalne pritiske na drsnih blazinicah in pasnicah prerezov.

SUMMARY

The contemporary trends in civil engineering have a tendency to create lighter and slimmer structures. These structures show larger displacements and deformations, which are not negligible with respect to structure dimensions. Here, the common linear analysis is not sufficient and a non-linear analysis with the second order effects has to be done. In this case, no bar buckling check is necessary. The elastic global analysis is used. The design of the members takes into account the possible limits on the resistance of cross-sections due to local buckling by means of effective widths.

Avtor:

mag. Anton Pristavec, univ. dipl. inž. strojništva, Štajerski tehnološki park, FEM Consulting d.o.o.
Pesnica 20a, 2211 Pesnica

OPIŠ PREVOZNEGA
DVIŽNEGA DELOVNEGA
ODRA

Z napravo opravljamo vzdrževalna in

sanacijska dela v gradbeništvu. Ker je dvizni oder namenjen tudi uporabi v zaprtih prostorih, mora biti zložljiv, okreten in imeti predpisane gabarite. Te zahteve lahko izpolnimo le z zložljivo in

sestavljeno roko. V zgornjem delu roke dviznega odra sta dva teleskopa, ki se istočasno premikata. Premikanje teleskopov dosežemo s hidravličnim cilindrom in vrvjo, ki povezuje oba teleskopa.

A. PRISTAVEC: Kontrola napetosti in stabilnosti konstrukcije prevoznega dviznega delovnega odra

Na koncu drugega teleskopa je snemljiva košara za eno osebo. Zgornji in spodnji del roke sta povezana s škarjastim mehanizmom, ki omogoča gibanje zgornjega dela roke od navpičnega do vodoravnega položaja. Roke nagibamo s hidravličnimi cilindri. Spodnja roka in hidravlični cilinder sta členkasto vpeta v vrtilni stolp. V vrtilnem stolpu je mehanizem, ki omogoča vrtenje roke okoli vertikalne osi. Vrtilni stolp in podvozje sta povezana s krogličnim aksialnim ležajem. Na podvozje so pritrjene podporne noge, ki jih nagibamo s hidravličnimi cilindri. Ker krmilimo hidravlične cilindre posamično, lahko postavimo napravo tudi na neravnem terenu.

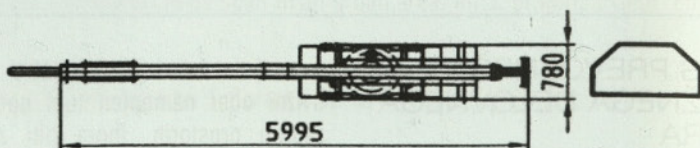
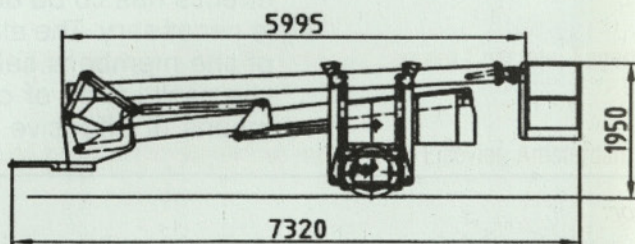
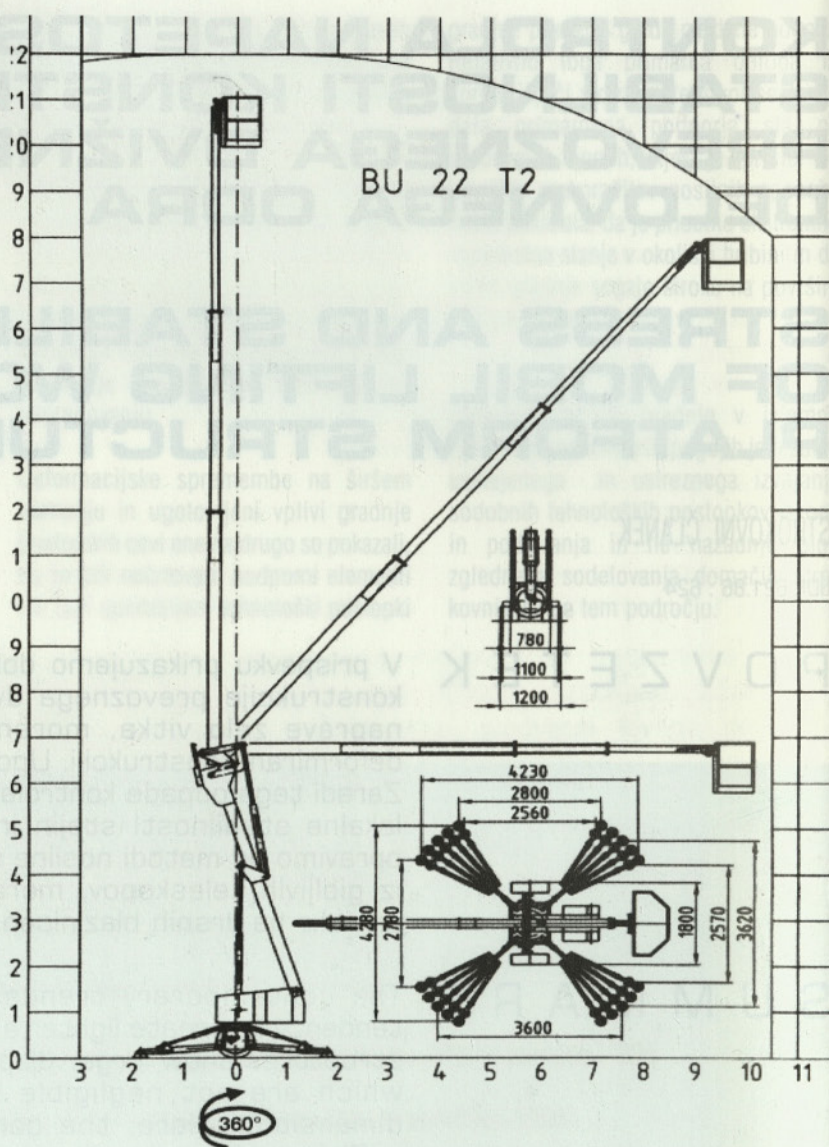
Dvižni oder prevažamo z osebnim avtomobilom srednjega razreda. Vlečno oje je zgornja roka.

Da pripeljemo dvižni oder v notranje prostore, morajo biti vrata široka 80 cm in visoka 2 m. V tem primeru uporabimo prečno podvozje, ki ga s hidravliko spustimo do vozišča. Prečno podvozje je široko 780 mm. Višina zloženega delovnega odra je 1980 mm.

Pri iztegnjeni navpični legi roke je dvižna višina približno 20 m. V vodoravnem položaju je doseg roke okoli 10 m. Ker je prečni prerez roke škatla z dimenzijami 250x180x3, je roka zelo vitka in gibka. Prerezi teleskopov so še manjši.

Proti prevrnitvi varujemo dvižni delovni oder s tipali v podložnih ploščah podpornih nog.

Prevozni dvižni delovni oder je narejen iz visokotrnostnega jekla S690Q (StE 690). Hidravlični cilindri so iz S355 (St 52). Sorniki so iz jekla za poboljšanje.



Slika 1: Karakteristični položaji prevoznega dvižnega delovnega odra. Gabaritne mere.

RAČUNSKI MODEL KONSTRUKCIJE ODRA

Prevozni dvigni delovni oder je sestavljen iz roke in podvozja.

Roka je sestavljena iz:

- spodnjega dela roke
- zgornjega dela roke
- prvega teleskopa
- drugega teleskopa in
- hidravličnih cilindrov.

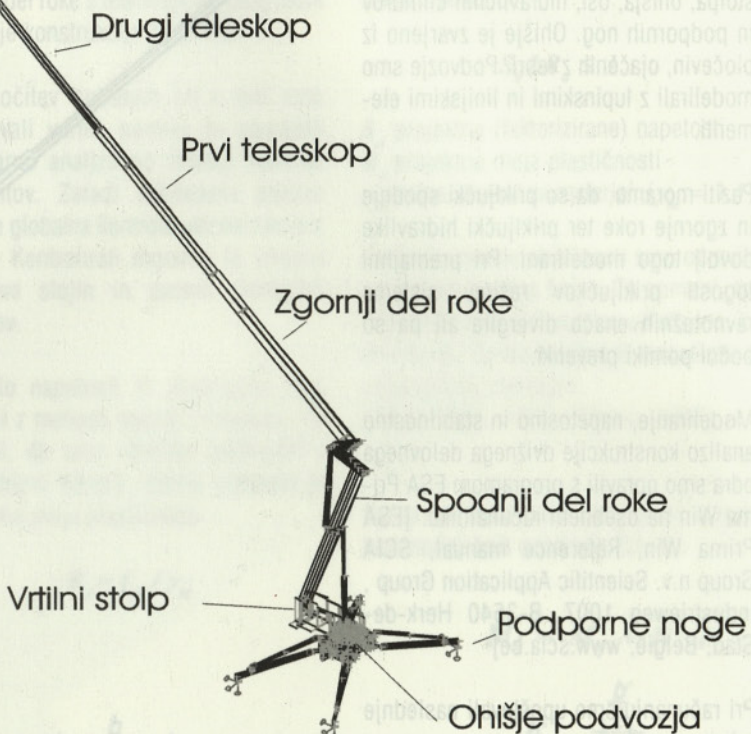
Podvozje je sestavljeno iz:

- vrtilnega stolpa
- ohišja podvozja
- podpornih nog in
- hidravličnih cilindrov.

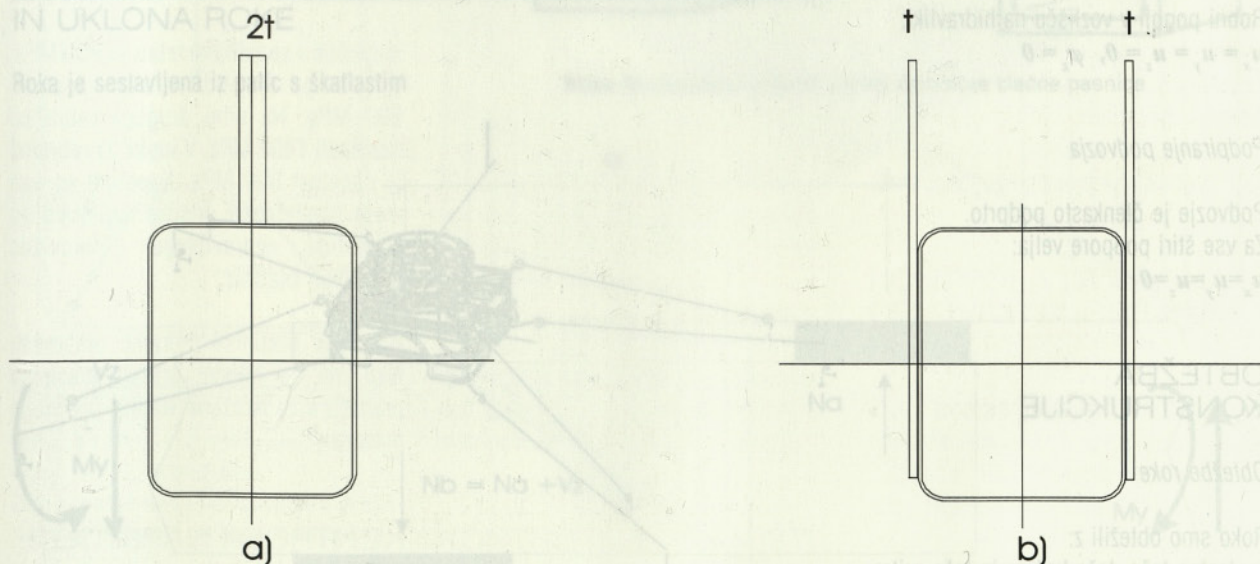
Zaradi kompleksnosti smo konstrukcijo analizirali na dveh modelih:

- na modelu roke in
- na modelu podvozja.

V prvem modelu smo modelirali roko naprave z linijskimi elementi s šestimi prostostnimi stopnjami v vozlišču. Prečni prerezi rok in teleskopov so škatlaste oblike z zaokroženimi vogali (sl. 3).



Slika 2: Združena modela roke in podvozja



Slika 3: Model gibe a) in toge b) zveze rok ter hidravlike s sornikom

Podvozje je sestavljeno iz vrtilnega stolpa, ohišja, osi, hidravličnih cilindrov in podpornih nog. Ohišje je zvarjeno iz pločevin, ojačenih z rebri. Podvozje smo modelirali z lupinskimi in linijskimi elementi.

Paziti moramo, da so priključki spodnje in zgornje roke ter priključki hidravlike dovolj togo modelirani. Pri premajhni togosti priključkov rešitev sistema ravnotežnih enačb divergira ali pa so bočni pomiki preveliki.

Modeliranje, napetostno in stabilnostno analizo konstrukcije dviznega delovnega odra smo opravili s programom ESA Prima Win na osebem računalniku. [ESA Prima Win, Reference manual, SCIA Group n.v. Scientific Application Group, Industrieweg 1007, B-3540 Herk-de-Stad, Belgije; www.scia.be]

Pri računanju smo upoštevali naslednje robne pogoje:

Podpiranje modela roke

Roka je členkasto vpeta v vrtilni stolp. Robni pogoji v vozlišču na spodnjem delu roke:

$$u_x = u_y = u_z = 0, \varphi_x = \varphi_z = 0$$

Robni pogoji v vozlišču na hidravliki:

$$u_x = u_y = u_z = 0, \varphi_z = 0$$

Podpiranje podvozja

Podvozje je členkasto podprto.

Za vse štiri podpore velja:

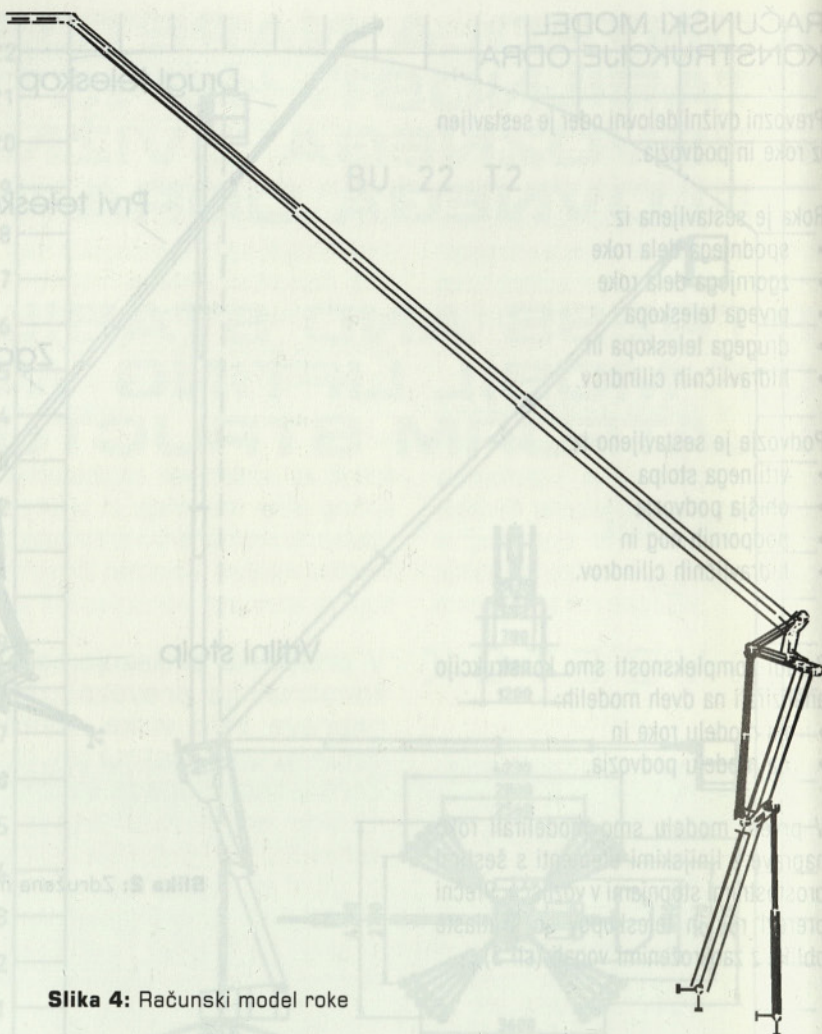
$$u_x = u_y = u_z = 0$$

OBTEŽBA KONSTRUKCIJE

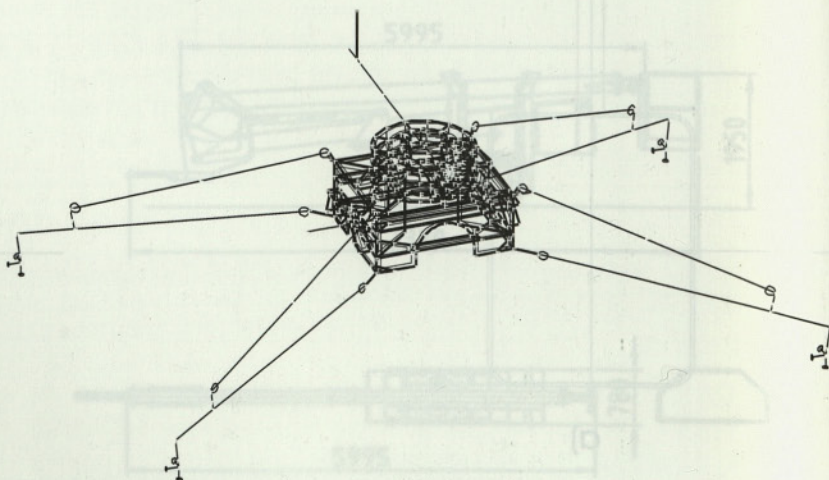
Obtežbe roke

Roko smo obtežili z:

- lastno težo, težo košare in težo pritrjenega dela košare,
- koristno obtežbo (človek in tovor),



Slika 4: Računski model roke



Slika 5: Računski model podvozja

- dinamično silo zaradi gibanja človeka v košari,
- dinamično silo zaradi vrtenja roke,
- silo zaradi netočnosti izdelave in montaže ter
- vetrom.

Obtežbe podvozja

Podvozje smo obtežili z:

- lastno težo in težo opreme (električni akumulatorji, hidravlični motorji ...),
- akcijskimi silami roke ter
- vetrom.

Podvozje smo analizirali pri dveh legah roke:

- roka je nad eno podporno nogo,
- roka je med dvema podpornima nogama.

Potrebujemo dva računska modela podvozja, ki se razlikujeta po položaju vrtilnega stolpa. V vsakem modelu smo tvorili tri obtežne kombinacije, ki so ustrezale trem položajem roke (navpično, pod kotom 50° in vodoravno).

METODE RAČUNA KONSTRUKCIJE

KONTROLA NOSILNOSTI IN UKLONA ROKE

Roka je sestavljena iz palic s škatlastim

prerezom. Ker je v iztegnjenem položaju zgornji del roke s teleskopoma dolg okoli 15 m, je konstrukcija zelo vitka.

Za določitev notranjih sil v roki smo upoštevali velike pomike in uporabili nelinearno analizo po metodi končnih elementov. Zaradi nelinearne analize odpade globalna kontrola uklona roke kot palice. Kontrolirati moramo le lokalno izbočitve stojin in pasnic škatlastih prereзов.

Kontrolo napetosti in stabilnosti smo opravili z metodo mejnih vrednosti. To pomeni, da smo obtežbe pomnožili z varnostnimi faktorji. Mejna vrednost je projektna meja plastičnosti

$$R_d = f_{yk} / \gamma_M$$

Nosilnost konstrukcijskega dela dokažemo z enačbo

$$S_d / R_d \leq 1$$

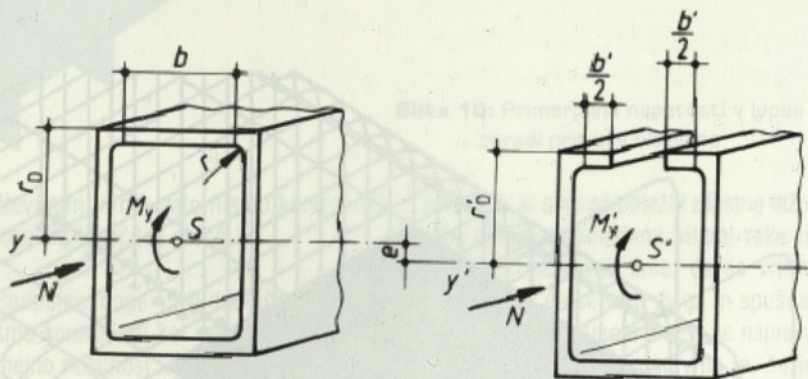
S_d projektne (faktorizirane) napetosti
 R_d projektna meja plastičnosti
 γ_M delna varnost za material ($\gamma_M = 1.1$)

Kontrolo lokalne stabilnosti smo opravili po metodi nosilne širine. To pomeni, da izključimo tisti del pasnice ali stojine, ki se izboči. Dokaz nosilnosti naredimo z oslavljenim prereзом.

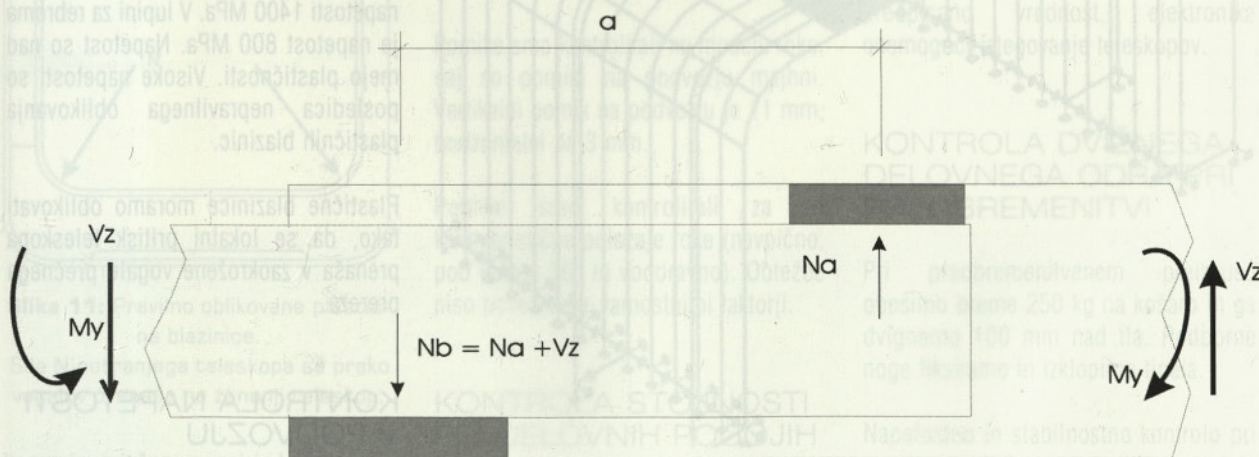
[DIN 18 800, 1990], [Thiele, 1997]

Nosilnost roke smo dokazovali v treh karakterističnih položajih (sl. 1):

$$M_y' = M_y + N \cdot e$$



Slika 6: Oslabljen prerez zaradi izbočitve tlačne pasnice



Slika 7: Obremenitev blazin

A. PRISTAVEC: Kontrola napetosti in stabilnosti konstrukcije prevoznega dviznega delovnega odra

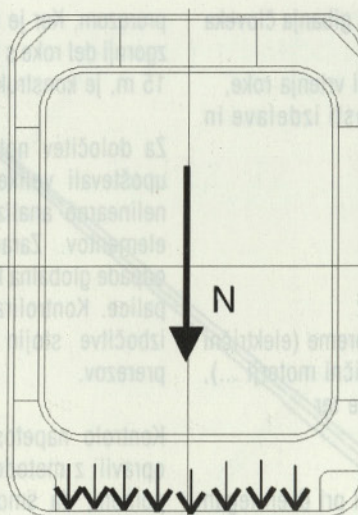
- roka je navpična in iztegnjena (doseg je 20 m)
- roka je iztegnjena pod kotom 50° , teleskopa sta popolnoma izvlečena
- roka je vodoravna (doseg je 10 m)

Pri analizi se izkaže, da je odločujoč položaj b.

Ker je konstrukcija vitka in nastanejo veliki pomiki, smo izračunali notranje sile in pomike po teoriji drugega reda. Nelinearni sistem enačb smo rešili z Newton-Raphsonovo iteracijsko metodo.

KONTROLA LOKALNIH OBREMENTEV NA SPOJU TELESKOPOV

V zgornji del roke sta vstavljena dva gibljiva teleskopa, ki lahko drsita po



Slika 8: Neprimerno oblikovane plastične blazinice.

Sila N se prenaša na zunanjo pasnico.

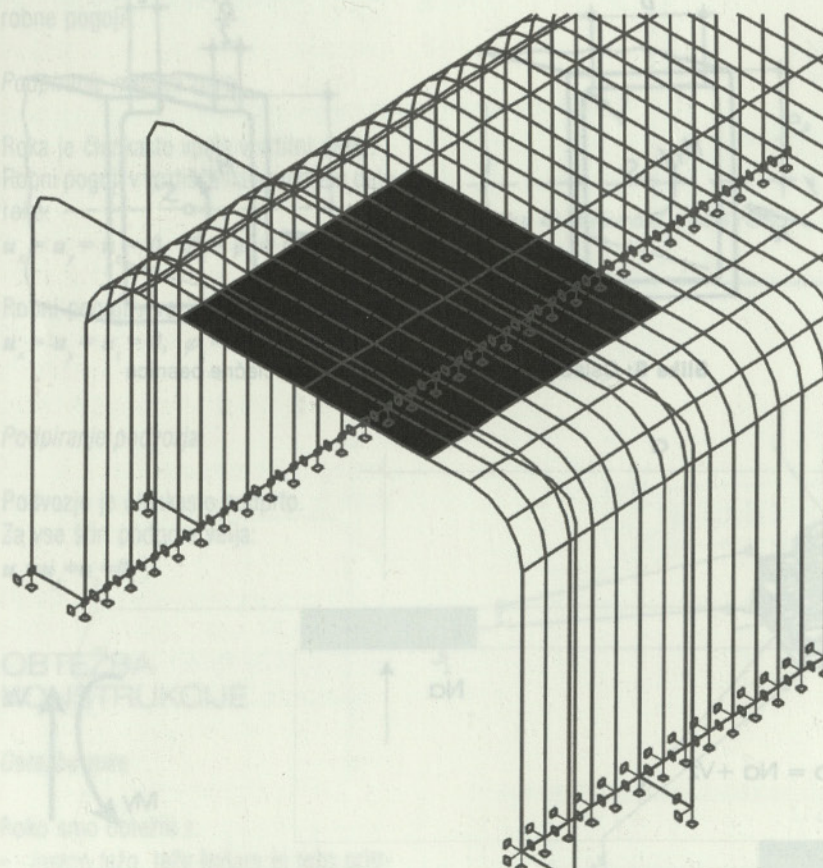
plastičnih blazinicah. Blazinice so razmaknjene tako, da lahko lovimo upogibni moment prek dvojice sil. Zunanja blazinica (ob ustju teleskopa) prestreže tudi strižno silo. Pritisk notranjega teleskopa na zunanje se prenaša prek plastičnih blazinic na pasnice škatlastih prereзов. Ker so pasnice plošče, moramo blazinice oblikovati tako, da se obremenitve prenašajo čimbolj v zaokrožene vogale škatlastega prereza. Lokalno lahko prereze ojačimo z zunanjimi obroči.

Napetosti v sprednjem rebro so 600 MPa. V lupini pri drugem rebro so napetosti 900 MPa. Na vrhu drugega rebra so napetosti 1400 MPa. V lupini za rebroma je napetost 800 MPa. Napetost so nad mejo plastičnosti. Visoke napetosti so posledica nepravilnega oblikovanja plastičnih blazinic.

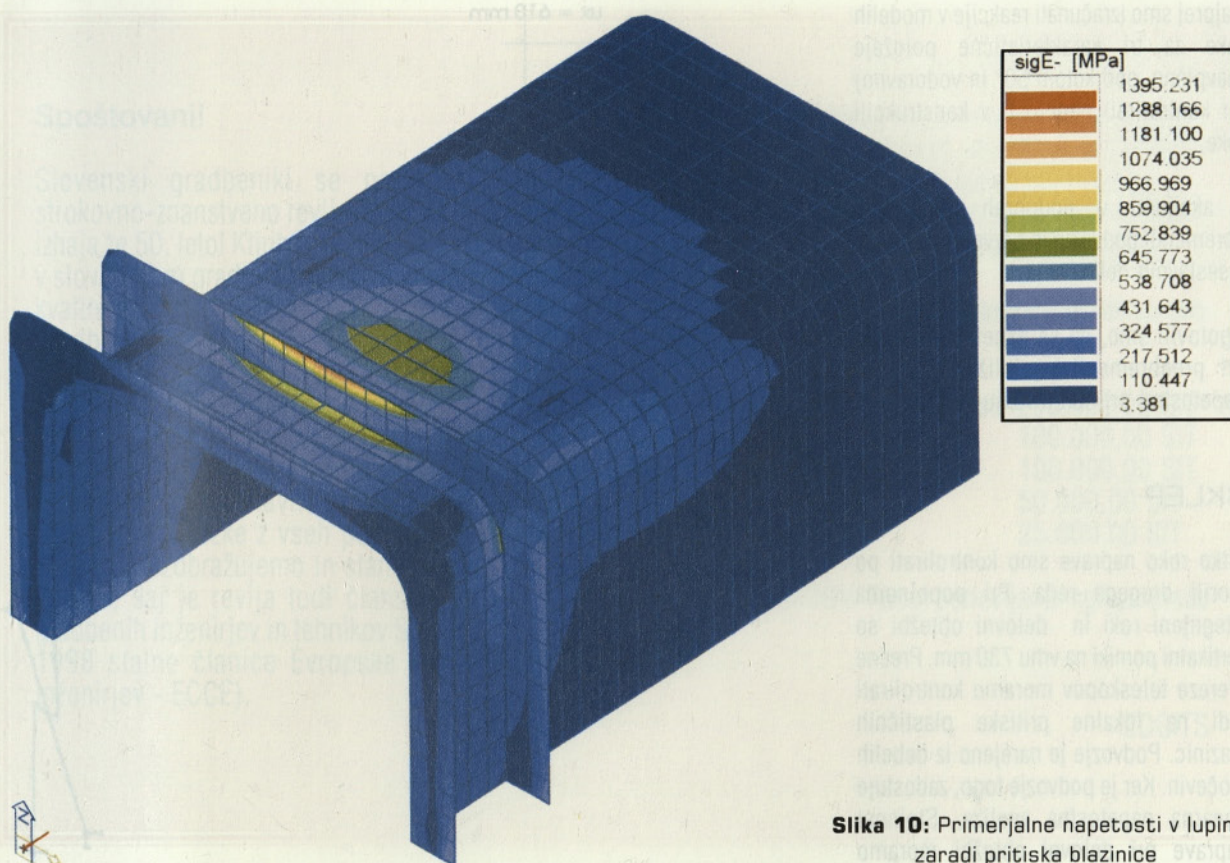
Plastične blazinice moramo oblikovati tako, da se lokalni pritisk teleskopa prenaša v zaokrožene vogale prečnega prereza.

KONTROLA NAPETOSTI V PODVOZJU

Napetosti v podvozju smo analizirali z



Slika 9: Obremenitev lupine



Slika 10: Primerjalne napetosti v lupini zaradi pritiska blazinice

številnimi rebri, zato nismo kontrolirali lokalnih izbočitev plošč.

Podporne noge in hidravlične cilindre smo kontrolirali kot palice na upogibno mejno nosilnost in uklon.

KONTROLA POMIKOV

Pomike smo kontrolirali na modelu roke, saj so pomiki na podvozju majhni. Vertikalni pomik na podvozju je 11 mm, horizontalni pa 3 mm.

Pomike smo kontrolirali za tri karakteristične položaje roke (navpično, pod kotom 50° in vodoravno). Obtežbe niso povečane z varnostnimi faktorji.

KONTROLA STOJNOSTI PRI DELOVNIH POGOJIH

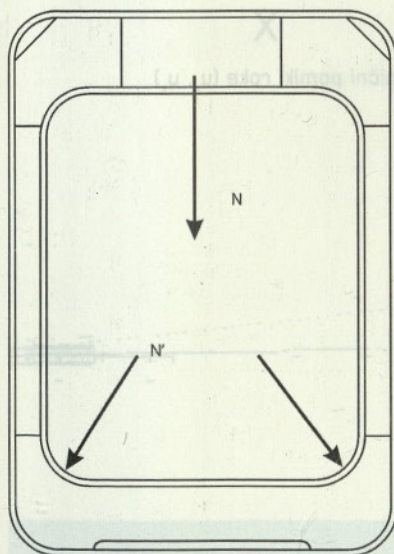
Stojnost smo kontrolirali na modelu

podvozja, ki smo ga obtežili z lastno težo, težo opreme, akcijskimi silami roke in vetrom... Upoštevali smo, da se vrtilni stolp vrti in da se roka dviga in spušča. Pri kontroli smo ugotovili, da se naprava pri delovni obtežbi ne prevrne le, če je roka navpično. Prevrnitev naprave preprečimo s tipali v podložnih ploščah. Kadar pade tlačna sila v tipalu pod predpisano vrednost, elektronika onemogoči iztegovanje teleskopov.

KONTROLA DVIŽNEGA DELOVNEGA ODRA PRI PREOBREMENITVI

Pri preobremenitvenem preizkusu obesimo breme 250 kg na košaro in ga dvignemo 100 mm nad tla. Podporne noge fiksiramo in izklopimo tipala.

Napetostno in stabilnostno kontrolo pri preobremenitvi smo opravili na modelu roke in podvozja.



Slika 11: Pravilno oblikovane plastične blazinice.

Sila N notranjega teleskopa se preko vogalov prenaša na zunanji teleskop.

linearnim izračunom, saj je konstrukcija toga. Stene podvozja so ojačene s

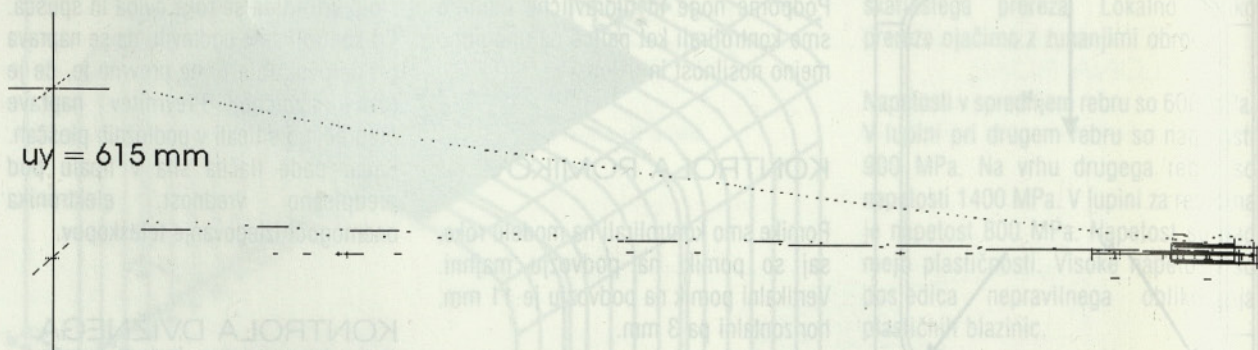
Najprej smo izračunali reakcije v modelih roke za tri karakteristične položaje (navpično, pod kotom 50° in vodoravno) ter kontrolirali napetosti v konstrukciji roke.

Z akcijami v podporah roke smo obremenili podvozje in preverili napetosti v sestavnih delih.

Ugotovili smo, da se napetostno stanje pri preobremenitvi približno ujema z napetostmi pri obratovanju naprave.

SKLEP

Vitko roko naprave smo kontrolirali po teoriji drugega reda. Pri popolnoma iztegnjeni roki in delovni obtežbi so vertikalni pomiki na vrhu 730 mm. Prečne prereze teleskopov moramo kontrolirati tudi na lokalne pritiske plastičnih blazinic. Podvozje je narejeno iz debelih pločevin. Ker je podvozje togo, zadostuje linearna napetostna analiza. Stojnost naprave pri delovni obtežbi moramo zagotoviti s tipali pritiska v podpornih nogah. Tipala preprečijo iztegovanje teleskopov, ko padejo reakcije v podporah pod predpisano vrednost.



Slika 13: Vodoravni in navpični pomiki roke (u_x , u_y)

Slika 12: Bočni pomiki roke u_y

LITERATURA

DIN 18 800, Stahlbauten, november 1990.

DIN 15 018, Krane, november 1984.

DIN 15 120, Fahrbare Hubarbeitsbühne, september 1976.

Thiele, Lohse, Stahlbau, B.G.Teubner, Stuttgart, 1997.

Spoštovani!

Slovenski gradbeniki se ponášamo s svojo strokovno-znanstveno revijo "Gradbeni vestnik", ki izhaja že 50. leto! Kljub vmesnim kriznim obdobjem v slovenskem gradbeništvi, je revija ohranila svojo kvaliteto in naročnike tudi po zaslugi sodelovanja gradbenih podjetij in posameznih strokovnih institucij, ki so omogočila izdajanje revije s svojimi vsebinskimi in reklamnimi prispevki.

"Gradbeni vestnik" je revija, s katero predstavljamo slovenski in tuji javnosti naše znanstvene in strokovne dosežke z vseh področij gradbeništva, obenem z izobražujemo in stanovsko povezujemo kolege, saj je revija tudi člansko glasilo Zveze gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije (od maja 1998 stalne članice Evropske zveze gradbenih inženirjev - ECCE).

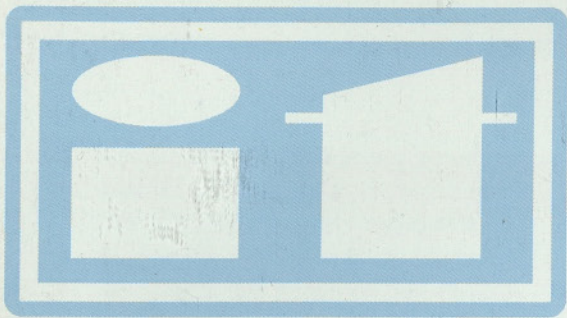
K sodelovanju vabimo vsa zainteresirana gradbena podjetja, da revijo podprejo, obogatijo in počastijo s svojimi predstavitvami in reklamnimi oglasi. Temeljna moč Vašega podjetja so strokovnjaki, njihova moč pa je znanje in dobra informacija!

Za reklamne oglase se priporočamo po naslednjem ceniku:

1/1	barvni oglas na naslovnici	200.000,00 SIT
1/1	črno - beli	100.000,00 SIT
1/2	barvni	100.000,00 SIT
1/2	črno - beli	50.000,00 SIT
1/4	črno - beli	25.000,00 SIT

V ceno je všteti DDV. Rabat ponavljanja oglasa znaša 10%.

ZDGITS



PRIPRAVLJALNI SEMINARJI TER IZPITNI ROKI ZA STROKOVNE IZPITE V GRADBENIŠTVU, ARHITEKTURI IN KRAJINSKI ARHITEKTURI V LETU 2001

MESEC	SEMINAR	IZPITI	
		GRADBENIKI	ARHITEKTI KRAJINARJI
Marec	12. - 16.	pisni: 24.3.	
April	9. - 13.	ustni: 2. - 6.4.	
Maj	14. - 18.	pisni: 26.5.	pisni: 9.5.
			ustni: 21. - 23.5.
Junij		ustni: 4. - 7.6.	
September	17. - 21.		
Oktober	8. - 12.	pisni: 27.10.	
November	12. - 16.	ustni: 5. - 8.11.	pisni: 7.11.
		pisni: 24.11.	ustni: 19. - 21.11.
December	17. - 21.	ustni: 3. - 7.12.	

A. PRIPRAVLJALNE SEMINARJE

organizira **Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije (ZDGITS)**,
Karlovška 3, 1000 Ljubljana (telefon/fax: 01 / 422-46-22), E-mail: gradb.zveza@siol.net

Seminar za GRADBENIKE poteka 5 dni (46 ur) in pripravlja kandidate za splošni in posebni del strokovnega izpita, Cena seminarja znaša 65.000,00 SIT z DDV.

Seminar za ARHITEKTE IN KRAJINSKE ARHITEKTE poteka (prve) 3 dni in jih pripravlja za splošni del strokovnega izpita. Cena seminarja je 33.000,00 SIT z DDV.

Seminar ni obvezen! Izvedba seminarja je odvisna od števila prijav (najmanj 20 kandidatov). Udeleženec prijavi k seminarju plačnik (podjetje, družba, ustanova, sam udeleženec ...). Prijavo v obliki dopisa je potrebno poslati organizatorju najkasneje 20 dni pred pričetkom določenega seminarja. Prijava mora vsebovati: priimek, ime, poklic (zadnja pridobljena izobrazba), in naslov prijavljenega kandidata ter naslov in davčno številko plačnika. Samoplačnik mora k prijavi priložiti kopijo dokazila o plačilu.

Žiro račun ZDGITS je 50101-678-47602; davčna številka 79748767.

B. STROKOVNI IZPITI

potekajo pri **Inženirski zbornici Slovenije (IZS)**, Dunajska 104, 1000 Ljubljana. Informacije je mogoče dobiti pri Ge. Terezi Rebernik od 10.00 do 12.00 ure, po telefonu 01 / 568-52-76.