

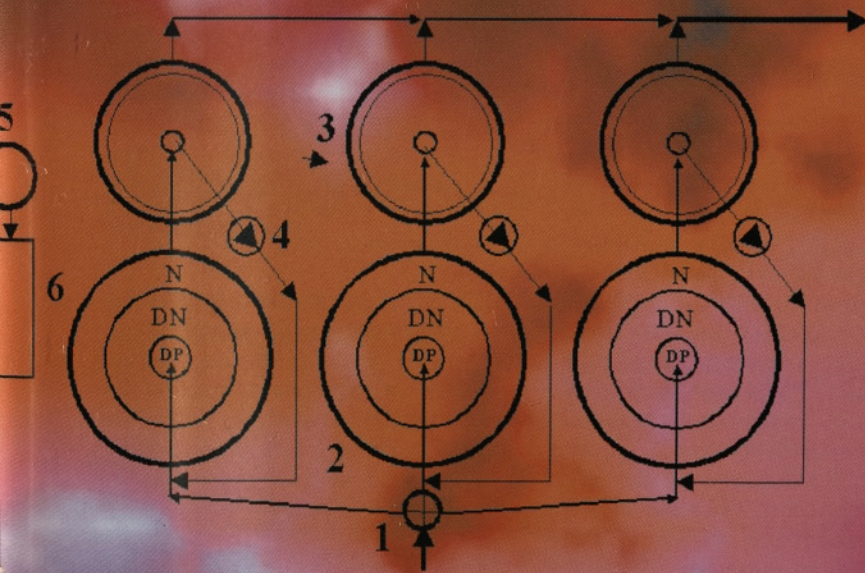
# GRADBENI VESTNIK

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

Poštnina plačana pri  
pošti 1102 LJUBLJANA

## JUNIJ 2002

VARIANTA "B"



**Glavni in odgovorni urednik:**  
Prof.dr. Janez **DUHOVNIK**

**Lektorica:**  
Alenka **RAIČ - BLAŽIČ**

**Tehnični urednik:**  
Danijel **TUDJINA**

**Uredniški odbor:**  
Mag. Gojmir **ČERNE**  
Gorazd **HUMAR**  
Doc.dr. Ivan **JECELJ**  
Andrej **KOMEL**  
Janja **PEROVIC-MAROLT**  
Marjan **PIPENBAHER**  
Mag. Črtomir **REMEC**  
Prof.dr. Franci **STEINMAN**  
Prof.dr. Miha **TOMAŽEVIČ**  
Doc.dr. Branko **ZADNIK**

**Tisk:**  
**TISKARNA LJUBLJANA d.d.**

Naklada: 2750 izvodov

Revijo izdajata ZVEZA DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV IN TEHNIKOV SLOVENIJE, Ljubljana, Karlovška 3, telefon/faks: 01 422-46-22 in MATIČNA SEKCIJA GRADBENIH INŽENIRJEV pri INŽENIRSKI ZBORNICI SLOVENIJE ob finančni pomoči Ministrstva RS za šolstvo, znanost in šport, Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani ter Zavoda za gradbeništvo Slovenije.

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

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

Letno izide 12 števil. Letna naročnina za individualne naročnike znaša 5000 SIT; za študente in upokoјence 2000 SIT; za gospodarske naročnike (podjetja, družbe, ustanove, obrtnike) 40.687,50 SIT za 1 izvod revije; za naročnike v tujini 100 USD. V ceni je vštēt DDV.

Poslovni račun se nahaja pri NLB, d.d. Ljubljana, številka:

0 2 0 1 7 - 0 0 1 5 3 9 8 9 5 5

## 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. Poglavlja in razdelki so lahko oštevilčeni.
8. Slike, preglednice in fotografije morajo biti vključene v besedilo prispevka, oštevilčene in opremljene s podnapisi, ki pojasnjujejo njihovo vsebino. Slike in fotografije, ki niso v elektronski obliki, morajo biti priložene prispevku v originalu.
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 uporabljena in citirana 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, navadni in elektronski naslov.
14. Prispevke je treba poslati glavnemu in odgovornemu uredniku prof. dr. Janezu Duhovniku na naslov: FGG, Jamova 2, 1000 LJUBLJANA oz. [janez.duhovnik@fgg.uni-lj.si](mailto:janez.duhovnik@fgg.uni-lj.si). V spremnem dopisu mora avtor članka napisati, kakšna je po njegovem mnenju vsebina članka (pretežno znanstvena, pretežno strokovna) oziroma za katero rubriko je po njegovem mnenju prispevek primeren. Prispevke je treba poslati v enem izvodu na papirju in v elektronski obliki v formatu MS WORD.

Uredniški odbor

## VSEBINA - CONTENTS

Članki, študije, razprave  
Articles, studies, proceedings

Stran 142

Peter Skuber

### NIZKOCIKLIČNO UTRUJANJE STIKOV V JEKLENIH KONSTRUKCIJAH

#### LOW CYCLE FATIGUE ASSESSMENT OF CONNECTIONS IN STEEL STRUCTURES

Stran 155

Roko Žarnić

### OSNOVNE LASTNOSTI POLIMERNIH KOMPOZITOV

#### BASIC PROPERTIES OF FIBRE REINFORCED PLASTICS

Stran 167

Mitja Rismal

### PROBLEMATIKA NAČRTOVANJA IN IZGRADNJE LJUBLJANSKE ČISTILNE NAPRAVE

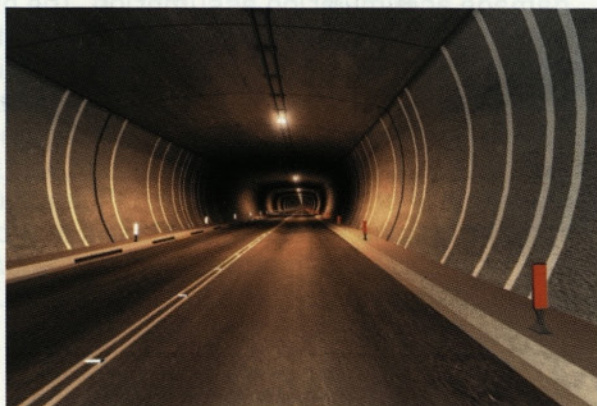
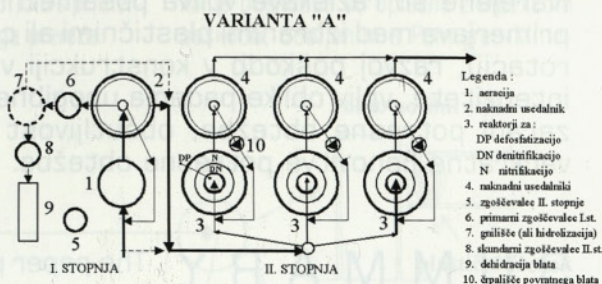
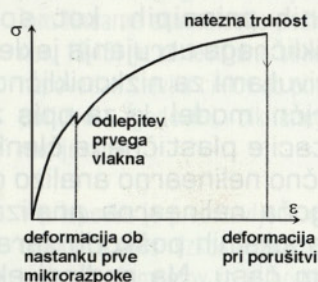
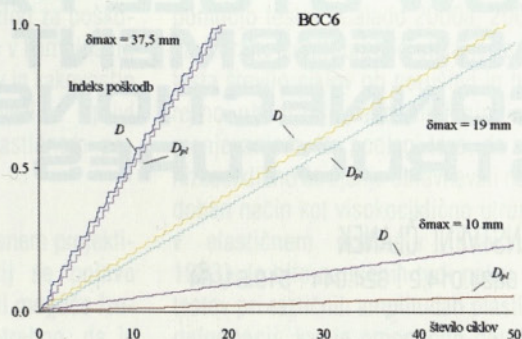
#### PROBLEMS OF DESIGN AND CONSTRUCTION OF LJUBLJANA WASTE WATER TREATMENT PLANT

Stran 174

Tomaž Novljan

### MOŽNOSTI IZBOLJŠAVE AMBIENTA ZA VEČJO VARNOST V DOLGIH CESTNIH PREDORIH

#### IMPROVEMENTS OF THE AMBIENCE FOR ACHIEVING GREATER SAFETY IN LONG ROAD TUNNELS



# NIZKOCIKLIČNO UTRUJANJE STIKOV V JEKLENIH KONSTRUKCIJAH

## LOW CYCLE FATIGUE ASSESSMENT OF CONNECTIONS IN STEEL STRUCTURES

ZNANSTVENI ČLANEK

UDK 6624.014.2 : 624.044 : 519.61/.64

PETER SKUBER

**P O V Z E T E K** V članku je predstavljen numerični model za analizo nizkocikličnega utrujanja jeklenih konstrukcij, ki temelji na podobnih principih, kot so uveljavljeni pri visokocikličnem utrujanju, kjer je opis nizkocikličnega utrujanja jeklenih elementov in stikov podan z eksperimentalno določenimi S-N krivuljami za nizkociklično utrujanje in z upoštevanjem linearne akumulacije poškodb. Numerični model, ki za opis zunanje obtežbe privzema globalni parameter rotacije stika oz. rotacije plastičnega členka v prerezu elementa, je vgrajen v računalniški program za dinamično nelinearno analizo dvodimenzionalnih konstrukcij DRAIN2DX. Z razvitim orodjem je mogoča nelinearna analiza jeklenih konstrukcij pri potresni obtežbi z upoštevanjem razvoja lokalnih poškodb zaradi nizkocikličnega utrujanja v stikih in v prerezu elementa v realnem času. Na podlagi eksperimentalnih podatkov je določena zveza med padanjem upogibne nosilnosti v odvisnosti od velikosti poškodb in od velikosti amplitud rotacij. Narejene so raziskave vpliva posameznih parametrov za opis nizkocikličnega utrujanja: primerjava med izbranimi plastičnimi ali celotnimi rotacijami (vsota elastičnih in plastičnih rotacij), razvoj poškodb v konstrukciji v odvisnosti od potresne obtežbe in od različne intenzitete, vpliv oblike padanja upogibne nosilnosti v stikih na odziv celotne konstrukcije zaradi potresne obtežbe, občutljivost izbrane S-N krivulje in razvoj poškodb zaradi večkratne ponovitve potresne obtežbe.

**S U M M A R Y** The paper presents a numerical model for a low cycle fatigue assessment of the connections in steel structures, based on the application of high cycle fatigue theory in the low cycle area. The method describes a low cycle fatigue problem with the experimentally defined fatigue curves and a linear damage accumulation assumption. The numerical model, where the strains are expressed as rotations in connections or in plastic hinges in a cross section, is built into the computer program for nonlinear dynamic analysis of planar structures DRAIN2DX. The final result is a nonlinear response of a steel structure in the earthquake conditions, taking into account the deterioration in real time. The relation between strength degradation, damage accumulation and the rotation amplitude is defined on the basis of the experimental results. The influence of the number of parameters including plastic or total rotations (the sum of elastic and plastic rotations), the type of ground motion and its intensity, the mode of the deterioration, the sensitivity of the low cycle fatigue curve, damage progress in the case of a repeated ground motions are investigated.

## 1. UVOD

Jeklene konstrukcije so izpostavljene ciklični plastifikaciji predvsem med močnejšimi potresi.

Sodobni pristop k potresnovarnemu projektiranju sloni na metodi načrtovane nosilnosti (capacity design), pri kateri v izbranih delih konstrukcije namenoma omogočimo plastificiranje prečnih prereзов in s tem disipiranje potresne energije. Na tak način močno zmanjšamo porabo materiala, vendar pa moramo v conah disipiranja energije zagotoviti zadostno duktilnost.

Duktilnost, ki je sicer zelo pomembna, je samo eden izmed parametrov nosilnosti, vezan na največje vsiljene pomike konstrukcije med potresom. Drugi prav tako pomemben parameter je vezan na ciklično obremenjevanje v plastično področje oziroma akumuliranje poškodb in zmanjševanje nosilnosti pri večanju števila ciklov. Govorimo o nizkocikličnem utrujanju, kjer lahko v odvisnosti od velikosti plastičnih deformacij do porušitve pride v nekaj sto, nekaj deset ali celo manj kot deset ciklov. Vsem dobro znan primer nizkocikličnega utrujanja je žica, ki se lahko pretrga že po nekajkratnem upogibanju, če so le upogibne deformacije dovolj velike. Pri plastični analizi okvirjev s statično obtežbo zagotavljanje ustrezne rotacijske kapacitete zadošča, pri potresni obtežbi, ki ima ciklično naravo, pa lahko oceno o tem, ali bo konstrukcija potres preživela, podamo le, če poznamo tudi odpornost proti nizkocikličnemu utrujanju. To potrjujejo izkušnje iz močnejših potresov v preteklem desetletju. Predvsem potresi v razvitih delih sveta, kjer je zgrajenih veliko število stavb z jekleno nosilno konstrukcijo (npr. Northridge, Kalifornija, 1994 in Kobe, Japonska, 1995), so povzročili veliko poškodb v momentnih stikih prečka-steber.

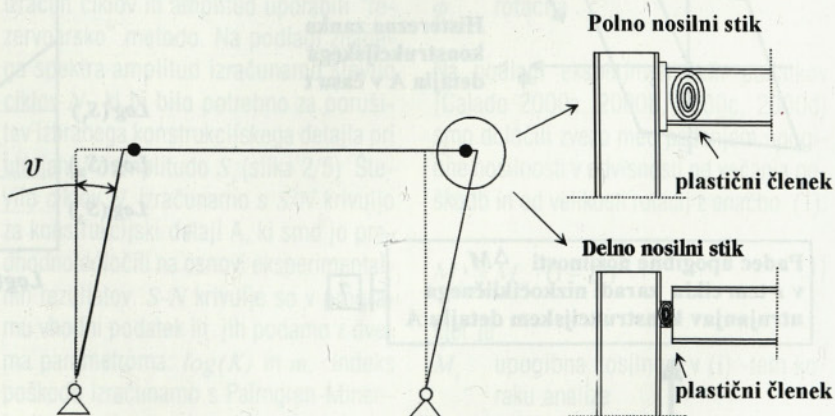
Poškodbe razen v nekaj izjemnih primerih niso bile usodne za konstrukcije, vendar pa so bili stroški saniranja poškodb zelo veliki, vseh poškodb pa verjetno sploh niso odkrili zaradi težke dostopnosti. Ob ponovitvi močnejšega potresa bi te poškodbe lahko povzročile tudi porušitev konstrukcije. Kot so pokazale številne raziskave, je glavni razlog za poškodbe nizkociklično utrujanje v kombinaciji z neustrezno zasnovo stikov in kakovostjo izvedbe zvarov ter v zvezi z vplivi utrujanja materiala v plastičnem področju.

Pri racionalnem protipotresnem projektiranju jeklenih konstrukcij se pojavu nizkocikličnega utrujanja ni mogoče izogniti, zagotoviti pa je potrebno, da je njegov vpliv čim manjši. Mesta disipiranja, običajno prečke okvirja v območju stika prečka-steber, so tako podvržena cikličnim plastičnim deformacijam in posledično nizkocikličnemu utrujanju. Pri polnonosilnih momentnih stikih, ki so močnejši od priključene prečke, plastični členek nastopi v prečki tik ob stiku, pri delnonosilnih stikih, ki so šibkejši od priključene prečke, pa v samem stiku (slika 1). V prvem primeru je duktilnost oz. rotacijsko kapaciteto potrebno zagotoviti v prečki, kar lahko storimo s primerno kompaktnostjo prečnega prereza.

V drugem primeru je potrebno rotacijsko kapaciteto zagotoviti z zadostno duktilnostjo vsaj ene od komponent stika. Običajno je to čelna pločevina v upogibu ali panel stojine stebra v strigu, nikoli pa ne vijaki v nategu.

Nizkociklično utrujanje stikov opišemo s pomočjo testov [Calado 2000a, 2000d]. Za izbrano konfiguracijo stika je rezultat testa število ciklov ob porušitvi in histerezno obnašanje med cikličnim obremenjevanjem. Na podlagi teze, da se da nizkociklično utrujanje obravnavati na podoben način kot visokociklično utrujanje v elastičnem področju [Krawinkler, 1983], je bilo narejenih tudi nekaj serij testov pri različnih amplitudah plastičnih deformacij, kar je omogočilo določitev S-N krivulj nizkocikličnega utrujanja. V povezavi s Palmgren-Minerjevim pravilom linearne akumulacije poškodb [Miner, 1945] je za testirane stike mogoče napovedati število ciklov do porušitve pri poljubni zgodovini cikličnega obremenjevanja.

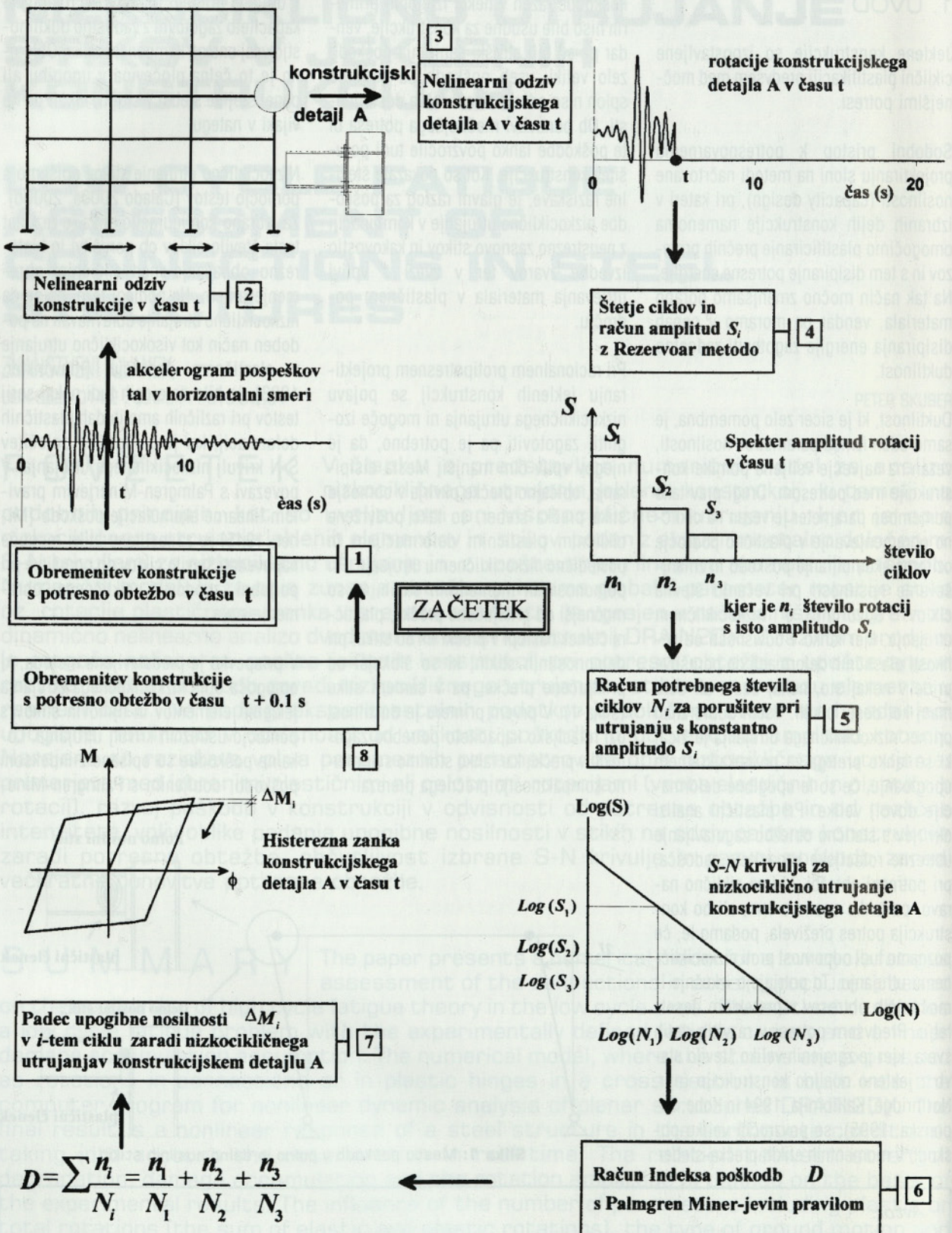
V prispevku je predstavljena metoda, ki omogoča opis nizkocikličnega utrujanja jeklenih elementov in njihovih stikov s pomočjo ustreznih krivulj utrujanja. Lokalne poškodbe so opisane z indeksom poškodb, dobljenim s Palmgren-Mine-



Slika 1: Mesto poškodb v polno in delno nosilnih stikih

Avtor:

mag. Peter Skuber, univ. dipl. inž. grad., FGG, Jamova 2, Ljubljana



Slika 2: Grafični prikaz vgradnje nizkocikličnega modela v računalniški program DRAIN2DX

rejem pravilom linearne akumulacije poškodb. Na podlagi eksperimentalnih podatkov je določena zveza med padanjem upogibne nosilnosti v odvisnosti od indeksa poškodb. Razvili smo numerični model nizkocikličnega utrujanja in ga vgradili v računalniški program za dinamično nelinearno analizo dvodimenzionalnih konstrukcij DRAIN2DX. Numerični model za opis vpliva zunanje obtežbe privzema globalno deformacijsko količino [Vayas, 1999, 2000]. Izbrali smo totalno ali plastično rotacijo v stiku ali plastičnem členku, ki jo je med testom mogoče relativno enostavno izmeriti. Z razvitim numeričnim modelom je mogoče slediti naraščanju poškodb in odzivu poškodovanih jeklenih okvirjev med samim potresom. Podan je opis poškodb in ocena preostale nosilnosti po končanem potresu. Poleg tega je možna napoved varnosti poškodovane konstrukcije v primeru popotresnih sunkov in novih potresov.

## 2. MODELIRANJE NIZKOCIKLIČNEGA UTRUJANJA

### PREDSTAVITEV ALGORITMA

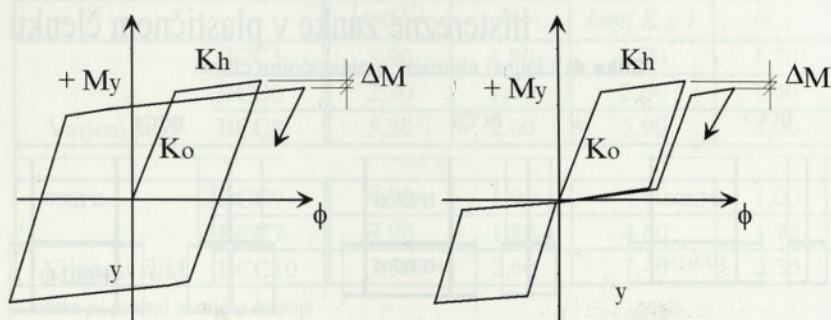
Na podlagi poznane *S-N* krivulje za določen konstrukcijski detajl in znane zgodovine obremenjevanja lahko poškodbe opišemo z indeksom poškodb, ki predstavlja linearno akumulacijo poškodb. V kodo smo dodali algoritem za račun poškodb v realnem času zaradi nizkocikličnega utrujanja na tak način, da dobimo v vsakem koraku dinamične analize odziv poškodovanega elementa in v nadaljevanju odziv celotne poškodovane konstrukcije.

Na sliki 2 je grafično predstavljen algoritem nizkocikličnega modela za stike, ki smo ga vgradili v računalniški program DRAIN2DX [Prakash, 1993]. Algoritem je narejen tako, da se odziv poškodovane konstrukcije zaradi nizkocikličnega utrujanja izračuna vsakič od začetka do

časa  $t$  s korakom 0,1 sekunde. Potresna obtežba je podana v obliki akceleroograma, ki predstavlja dinamično obtežbo s spremljivo amplitudo. V našem primeru konstrukcijo obremenimo z akceleroogramom pospeškov temeljnih tal (slika 2/1). Glavni del programa izračuna nelinearni odziv konstrukcije od začetka analize do časa  $t$  (slika 2/2). V podprogramu, kjer je določen numerični model stika, se izračuna nelinearni odziv vseh stikov v konstrukciji (slika 2/3). Tako dobimo zgodovino rotacij za konstrukcijski detajl A. Iz izračunanih rotacij stika v času  $t$  izračunamo spekter amplitud rotacij (slika 2/4).

lize izračunamo tako, da zmanjšamo začetno upogibno nosilnost po enačbi (1). Ves postopek se ponovi pri naslednjem koraku analize  $t + 0.1$  s (slika 2/8). Algoritem se konča na koncu dinamične analize ali v primeru porušitve ( $D = 1.0$ ) v najbolj poškodovanem stiku ali v prerezu elementa.

Za modeliranje nizkocikličnega utrujanja stika smo uporabili rotacijsko vzmet. Nelinearno obnašanje vzmeti je določeno s histereznimi zankami, ki so podane s histerezno ovojnico. Možni sta dve različni obliki histereznih zank (slika 3).



Slika 3: Ovojnice histereznih zank rotacijske vzmeti

V spektru so podane velikosti amplitud rotacij  $S_i$  in njihovo število  $n_i$ . Ker akceleroگرامi predstavljajo dinamično obtežbo s spremljivo amplitudo, smo za izračun ciklov in amplitud uporabili "rezervoarsko" metodo. Na podlagi znanega spektra amplitud izračunamo število ciklov  $N_p$ , ki bi bilo potrebno za porušitev izbranega konstrukcijskega detajla pri utrujanju z amplitudo  $S_i$  (slika 2/5). Število ciklov  $N_i$  izračunamo s *S-N* krivuljo za konstrukcijski detajl A, ki smo jo predhodno določili na osnovi eksperimentalnih rezultatov. *S-N* krivulje so v programu vhodni podatek in jih podamo z dvema parametroma:  $\log(K)$  in  $m$ . Indeks poškodb izračunamo s Palmgren-Minerjevim pravilom za linearno akumulacijo poškodb (slika 2/6). Na podlagi znanega indeksa poškodb izračunamo poškodbe konstrukcijskega detajla. Za opis poškodb smo izbrali padec upogibne nosilnosti  $\Delta M_i$  v histerezni zanki stika (slika 2/7). Upogibno nosilnost v  $i$ -tem koraku ana-

Kjer je

- $M_y$  moment na meji tečenja
- $K_o$  začetna togost
- $K_h$  togost v plastičnem območju
- $\phi$  rotacija

Na podlagi eksperimentalnih podatkov [Calado 2000a, 2000b, 2000c, 2000d] smo določili zvezo med padanjem upogibne nosilnosti v odvisnosti od večanja poškodb in od velikosti rotacij z enačbo (1).

$$M_i = M_o \cdot (1 - D)^{\frac{1}{n}}, \quad (1)$$

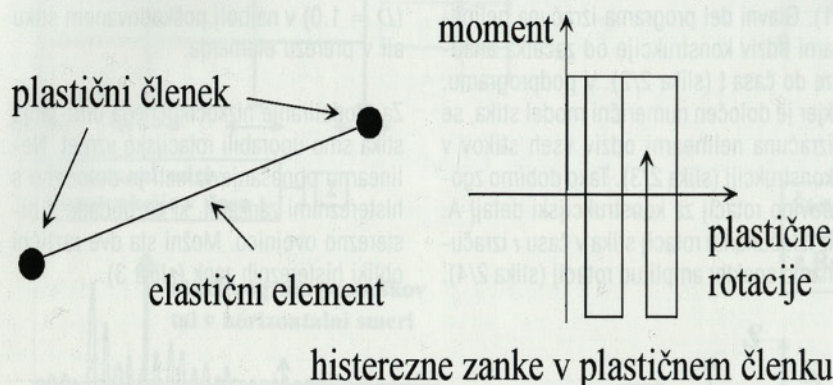
kjer je

- $M_i$  upogibna nosilnost v ( $i$ )-tem koraku analize
- $D$  indeks poškodb izračunan s Palmgren-Minerjevim pravilom (slika 2)
- $M_o$  začetna upogibna nosilnost, podana s histerezno ovojnico
- $n$  oblikovni koeficient, ki je eksperimentalno določen, odvisen od konstrukcijskega detajla in od velikosti rotacij.

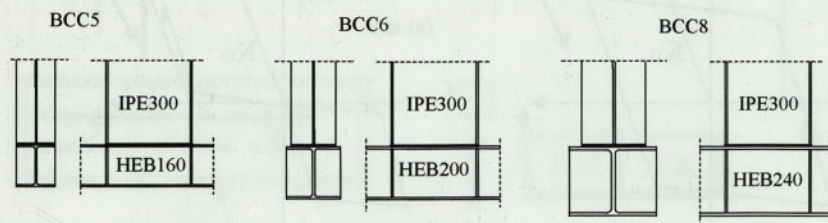
Za modeliranje nizkocikličnega utrujanja v prerezi nosilcev in stebrov smo uporabili linijski element številka 2, ki ima plastične členke na začetku in koncu elastične palice (slika 4). Algoritem za nizkociklično utrujanje prerezov smo

vgradili na enak način kot za stike (slika 3). Ker je elementa številka 2 zgrajen tako, da je odziv v plastičnih členkih določen s plastičnimi rotacijami, smo za račun nizkocikličnega utrujanja izbrali plastične amplitude rotacij. V plastičnih

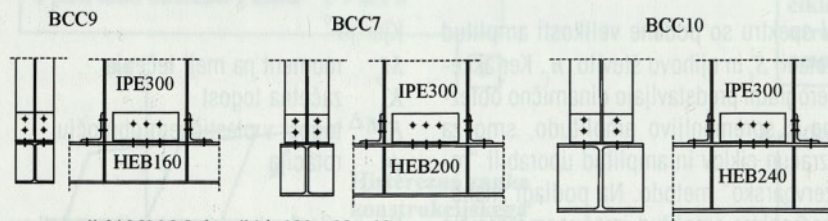
členkih linijskega elementa nismo upoštevali zveze med padanjem upogibne nosilnosti v odvisnosti od indeksa poškodbe in od velikosti rotacij.



**Slika 4:** Linijski element s plastičnimi členki

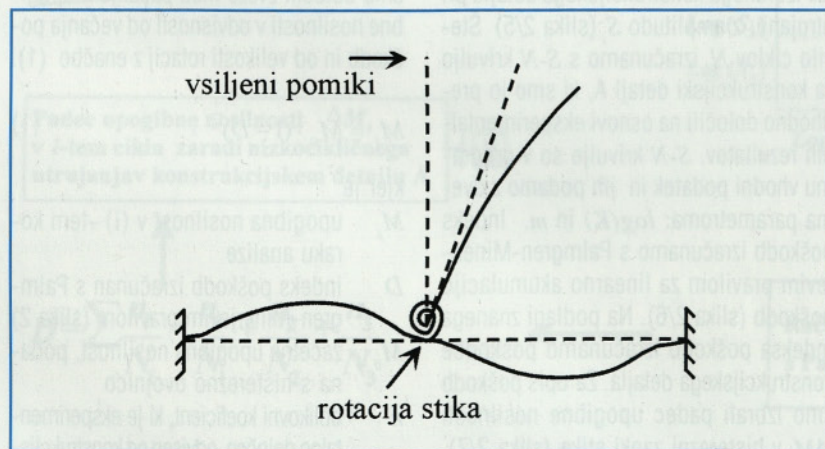


**Slika 5:** Geometrija varjenih stikov



vijaki M16 8.8, kotniki L 120 x 80 x 10

**Slika 6:** Geometrija vijačenih stikov s kotniki v pasnici in stojini



**Slika 7:** Numerični model za kalibracijo stikov

**KALIBRACIJA STIKOV. DOLOČITEV S-N KRIVULJ.**

Namen kalibracije je izračun parametrov za določitev S-N krivulje, ki je določena z nedimensionalno konstanto  $m$  in dimenzionalnim parametrom  $Log(K)$ . V logaritmski obliki jo zapišemo kot

$$Log(N) = Log(K) - m \cdot Log(S), \quad (2)$$

V zadnjem času so bile narejene obsežne eksperimentalne raziskave nizkocikličnega utrujanja stikov [Calado 2000a, 2000b, 2000c]. Za parametrično študijo smo izbrali skupino polnosilnih, togih varjenih stikov (slika 5) in skupino delno nosilnih, delno togih vijačenih stikov s kotniki v pasnici ter stojini (slika 6).

Kalibracijo smo izvedli s simulacijo eksperimenta z nadgrajenim računalniškim programom DRAIN2DX. Na podlagi poznane geometrije, momenta in rotacije na meji tečenja smo izdelali numerični model, ki smo ga obremenjevali z istimi vsiljenimi pomiki kot v eksperimentu [Calado 2000a]. V eksperimentu so bili izbrani vsiljeni pomiki s konstantno amplitudo  $\pm d_{max} = 37,5 \text{ mm}, 50 \text{ mm}$  in  $75 \text{ mm}$  in vsiljeni pomiki z naraščajočo amplitudo po priporočilu [ECCS 1986].

Vsiljeni pomiki z naraščajočo amplitudo po priporočilu ECCS so: trije cikli z amplitudo, ki povzroča rotacijo stika na meji tečenja  $d_y$ ; po trije cikli z amplitudo; ki povzroča rotacijo  $2 d_y, 4 d_y, 6 d_y, \dots$  vse do porušitve. Iz znanih vsiljenih pomikov smo najprej izračunali vsiljene rotacije (slika 7).

Iz izračunanih vsiljenih rotacij stika  $\Delta\phi$  in znanega zasuka na meji tečenja  $\phi_y$ , izračunamo po enačbi (3) normirano amplitudo rotacij ( $S$ ):



$$S = \frac{\Delta\phi}{\phi_y}, \quad (3)$$

Ker eni avtorji predlagajo za parameter ( $S$ ) plastične rotacije, drugi pa celotne rotacije, smo izračunali tudi normirano amplitudo plastičnih rotacij ( $S_{pl}$ )

$$S_{pl} = \frac{\Delta\phi_{pl}}{\phi_y}, \quad (4)$$

kjer je

$$\Delta\phi_{pl} = \Delta\phi - 2 \cdot \phi_y, \quad (5)$$

Na podlagi poznanega števila ciklov  $N$ , ki je potrebno za porušitev, in normiranih amplitud rotacij ( $S$ ) za izbrane vsiljene pomike s konstantno amplitudo ( $+\delta_{\max} = 37,5$  mm, 50 mm in 75 mm) lahko izračunamo  $S-N$  krivuljo tako, da skozi eksperimentalne rezultate narišemo premico, ki se najbolj prilega podanim točkam (slika 8).

Natančnost eksperimentalno dobljenih krivulj je odvisna predvsem od števila eksperimentalnih rezultatov, ki pa morajo pokrivati čim večjo amplitudno območje ( $S$ ).

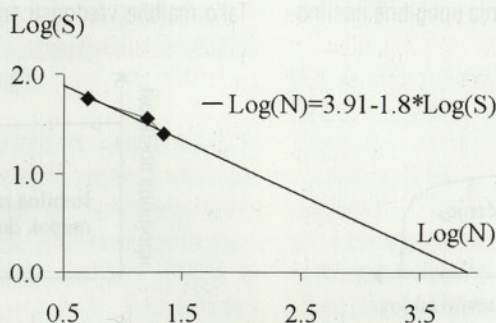
V preglednici 1 so podani izračunani parametri za določitev  $S-N$  krivulj za varjene in za vijake stike.

Kalibracijo prerezov elementa smo naredili za IPE300 nosilec [Ballio, 1995]. Za izračun parametrov  $\text{Log}(K)$  in  $m$  smo uporabili naslednjo zvezo:

$$\frac{\Delta v}{v_y} = \frac{\Delta\phi}{\phi_y}, \quad (8)$$

kjer so  $\Delta v$  vsiljeni pomiki,  $\Delta$  pomik na meji tečenja,  $\Delta\phi$  amplitude rotacij in  $\phi_y$  rotacije na meji tečenja. Iz znanih vsiljenih pomikov  $\Delta v$ , števila ciklov, potrebnih za porušitev ( $N$ ), smo podobno kot za stike izračunali iskane parametre, ki so podani v preglednici 2.

Varjeni stik BCC5



Slika 8: Eksperimentalna določitev  $S-N$  krivulj

		$\text{Log}(K)$	$m$	$\text{Log}(K_{pl})$	$m_{pl}$
Varjeni stiki	BCC5	3,90	1,80	3,70	1,70
	BCC6	2,70	1,00	2,60	1,00
	BCC8	5,20	2,60	5,90	3,00
Vijačeni stiki	BCC9	4,70	1,90	4,60	1,00
	BCC7	7,90	1,80	4,80	1,70
	BCC10	7,50	2,60	7,40	2,50

\* indeks  $pl$  pomeni plastične rotacije

Preglednica 1: Vrednosti parametrov za določitev  $S-N$  krivulje za stike

	$\text{Log}(K)$	$m$	$\text{Log}(K_{pl})$	$m_{pl}$
IPE300	3,80	2,60	2,80	1,80

\* indeks  $pl$  pomeni plastične deformacije

Preglednica 2: Vrednosti parametrov za določitev  $S-N$  krivulje za prerez elementa

#### DOLOČITEV ZVEZE MED PADANJEM UPOGIBNE NOSILNOSTI V ODVISNOSTI OD NARAVNEGA POŠKODBA IN OD VELIKOSTI ROTACIJ V STIKU

Splošno ločimo dve obliki padanja upogibne nosilnosti (slika 9), ki je prvenstveno odvisno od vrste stika in od velikosti deformacij [Krawinkler, 1983]. V primeru velikih plastičnih deformacij lahko pride do lokalnega izbočenja vseh vrst pre-

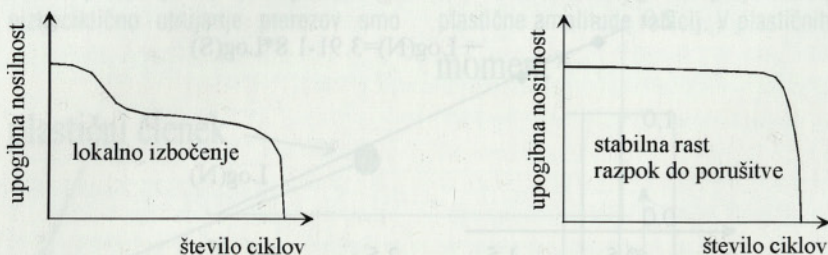
rezov, tudi kompaktnih. V tem primeru upogibna nosilnost opazno pade že po nekaj ciklih (slika 9 a). V drugem primeru padanje nosilnosti ni opazno, vse dokler ni akumulacija poškodb tako velika, da pride do velikega padca upogibne nosilnosti tik pred porušitvijo. Poškodbe se akumulirajo v osnovnem materialu ali v toplotno vplivni coni zvara. Stabilna rast razpok, kjer vse do porušitve ni večjega padanja upogibne nosilnosti, je značilna za utrujanje z manjšimi plastičnimi deformacijami (slika 9 b). Zvezo med padanjem upogibne nosilnosti v odvisnosti od poškodb zaradi nizkocikličnega

utrujanja in od velikosti rotacij v stiku smo določili na podlagi eksperimentalnih rezultatov. V našem numeričnem modelu smo obliko padanja upogibne nosilno-

sti določili z vrednostjo oblikovnega koeficienta (enačba 1).

Tako majhne vrednosti ( $n = 5, 10$ ) po-

menijo padanje upogibne nosilnosti zaradi lokalnega izbočenja, kjer upogibna nosilnost opazno pade že po nekaj ciklih, velike vrednosti ( $n = 50$ ) pa stabilno rast razpok, kjer vse do porušitve ni opaziti večjega padanja upogibne nosilnosti.



Slika 9: Oblike padanja nosilnosti zaradi nizkocikličnega utrujanja

Vijačeni stiki	$0 < \frac{\Delta\phi}{\phi_y} \leq 5$	$3 < \frac{\Delta\phi}{\phi_y} \leq 5$	$\frac{\Delta\phi}{\phi_y} > 5$
	50	10	5
Varjeni stiki	$0 < \frac{\Delta\phi}{\phi_y} \leq 20$		$\frac{\Delta\phi}{\phi_y} > 20$
	50		5

Preglednica 3: Izbrane vrednosti za oblikovni koeficient  $n$

V preglednici 3 so podane eksperimentalno izbrane vrednosti za oblikovni koeficient  $n$  v odvisnosti od vrste stikov in od velikosti normiranih amplitud rotacij.

### PRIMERJAVA EKSPERIMENTALNIH REZULTATOV Z NUMERIČNIM MODELOM

V preglednici 4 je podana primerjava za število ciklov do porušitve ( $N$ ) vijačenih in varjenih stikov. Primerjali smo eksperimentalno dobljene vrednosti [Calado, 2000b] z rezultati numeričnega modela. Izračunano število ciklov do porušitve se zelo dobro ujema z eksperimentom za vse vrste vsiljenih pomikov ( $\delta_{max}$ ), tudi za

	Število ciklov do porušitve ( $N$ )							
	$\delta_{max} = +/- 37,5 \text{ mm}$		$\delta_{max} = +/- 50,0 \text{ mm}$		$\delta_{max} = +/- 75,0 \text{ mm}$		ECCS	
	Eksper.	Numerični model	Eksper.	Numerični model	Eksper.	Numerični model	Eksper.	Numerični model
BCC9	17	16	9	9	4	3	15	17
BCC7	14	14	9	8	4	4	17	17
BCC10	18	18	9	8	3	3	15	15
BCC5	23	35	16	16	5	6	15	14
BCC6	18	20	15	14	11	8	12	13
BCC8	16	16	12	6	2	2	15	14

Preglednica 4: Primerjava rezultatov za število ciklov do porušitve ( $N$ ) stikov med eksperimentom in numeričnim modelom

vsiljene pomike s naraščajočo amplitudo po priporočilih ECCS. Na tej podlagi lahko sklepamo, da predpostavka o linearni akumulaciji poškodb, ki se uporablja za visokociklično utrujanje, velja tudi za nizkociklično območje.

### 3. IZBIRA PLASTIČNIH ALI CELOTNIH ROTACIJ ZA OPIS NIZKOCIKLIČNEGA UTRUJANJA

Da bi ugotovili ustreznost izbire plastičnih oz. celotnih rotacij, smo primerjali

število izračunanih ciklov do porušitve ( $N_{pl}$ ) za plastične rotacije oz. ( $N$ ) za celotne rotacije z eksperimentalnimi rezultati. Za ta namen smo izračunali  $S-N$  krivulje za plastične rotacije in  $S-N$  krivulje za celotne rotacije.

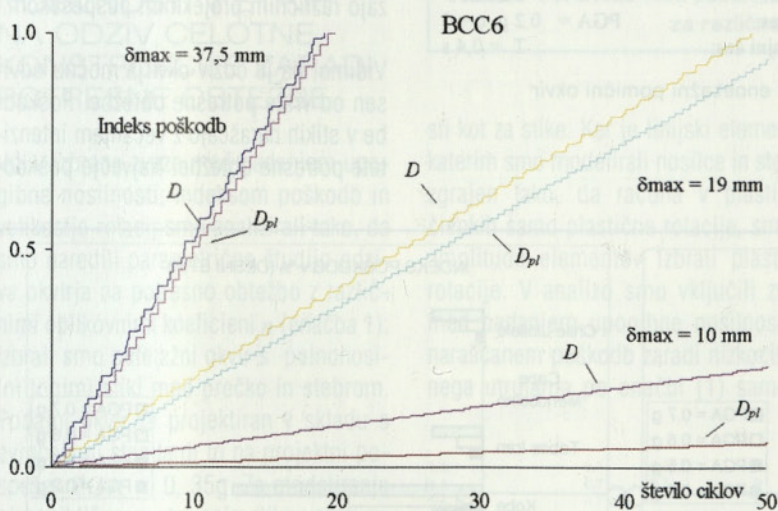
Iz rezultatov numeričnih analiz je mogoče ugotoviti, da je razlika vrednosti Indeksov poškodb odvisna od deleža plastičnih rotacij (slika 10). V primeru velikih plastičnih deformacij (vsiljeni pomiki s amplitudo  $\delta_{max} = +/- 37,5$  mm) je naraščanje indeksa poškodb  $D$  (celotne rotacije) in  $D_{pl}$  (plastične rotacije) in s tem število ciklov do porušitve približno

enako. Z manjšanjem deleža plastičnih rotacij se razlika večja (vsiljeni pomiki s amplitudo  $\delta_{max} = +/- 19$  mm in +/- 10 mm).

Na sliki 11 je prikazana primerjava naraščanja indeksov poškodb za varjene stike pri cikličnem utrujanju z naraščajočo obtežbo (vsiljeni pomiki po priporočilih ECCS). Število ciklov do porušitve je praktično enako tako v primeru plastičnih kot v primeru celotnih amplitud rotacij. Enake ugotovitve veljajo tudi za skupino obravnavanih vijačenih stikov.

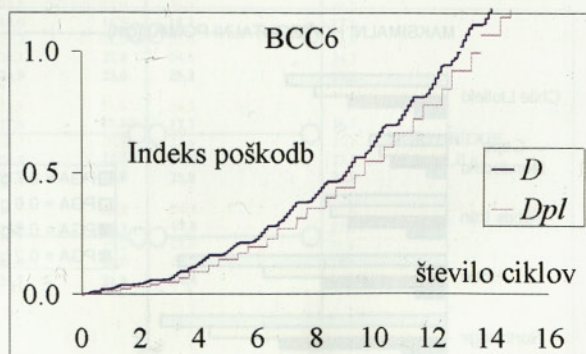
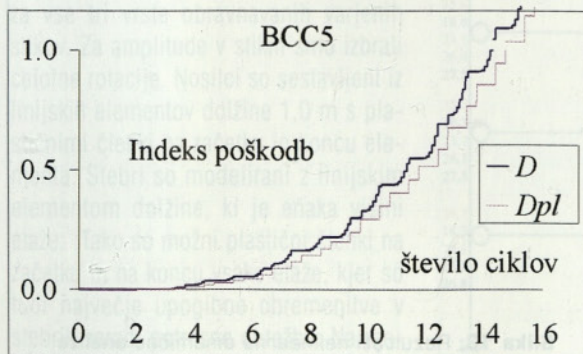
### 4. RAZVOJ POŠKODB V KONSTRUKCIJI V ODVISNOSTI OD POTRESNE OBTEŽBE IN OD RAZLIČNE INTENZITETE

Izbrali smo dva okvirja, ki se razlikujeta v izbranih stikih med nosilcem in stebrom (slika 12). V prvem okvirju smo izbrali polonosilni togi stik. Izbrali smo varjeni stik BCC8 (slika 5). Drugi okvir ima delno-nosilne in delnotoge stike. Izbrali smo vijačeni stik BCC10 (slika 6). Projektirani so v skladu z evropskim standardom za Projektiranje jeklenih konstrukcij SIST ENV 1993 in standardom za projektiranje potresno odpornih konstrukcij SIST ENV 1998. V obeh primerih je geometrija okvirja enaka, razlikuje se obtežba. Za modeliranje nizkocikličnega utrujanja smo uporabili  $S-N$  kri-



\*  $D$  indeks poškodb, izračunan z amplitudami rotacij  
 $D_{pl}$  indeks poškodb, izračunan z amplitudami plastičnih rotacij

**Slika 10:** Primerjava izračunanih Indeksov poškodb pri različnih amplitudah vsiljenih pomikov  $\delta_{max}$



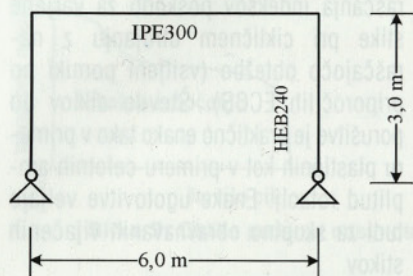
\*  $D$  indeks poškodb, izračunan z amplitudami rotacij  
 $D_{pl}$  indeks poškodb, izračunan z amplitudami plastičnih rotacij

**Slika 11:** Primerjava izračunanih Indeksov poškodb pri naraščajoči obtežbi po priporočilih ECCS

vulje za varjeni stik (BCC8) in S-N krivulje za smo vijlačni stik (BCC10). Parametri za S-N krivulje so podani v preglednici 1. Za amplitude smo izbrali celotne rotacije.

Nizkociklično utrujanje smo modelirali tudi v prerezih prečk in stebrov. Prečke in stebri so sestavljeni iz linijskih elementov dolžine 1,0 m s plastičnimi členki na

začetku in koncu elementa. Na mestih možnih plastičnih členkov v nosilcu in stebri smo izbrali S-N krivulje, ki so izračunane v preglednici 2.



Razdalja med okvirjima: 3,0 m

\* g .... pospešek prostega pada 9,81 m/s<sup>2</sup>  
q .... faktor obnašanja

Obtežba za okvir z varjenim polnonosilnim togim stikom med nosilcem in stebrom:

Lastna in stalna:	4.67 kN/m <sup>2</sup>
Koristna:	6.0 kN/m <sup>2</sup>
Sneg (s):	1.0 kN/m <sup>2</sup>
Veter:	25 m/s
Potres:	PGA = 0.2 g, q = 5
Nihajni čas:	T <sub>1</sub> = 0,6 s

Obtežba za okvir z vijlačnim delnonosilnim podajnim stikom med nosilcem in stebrom:

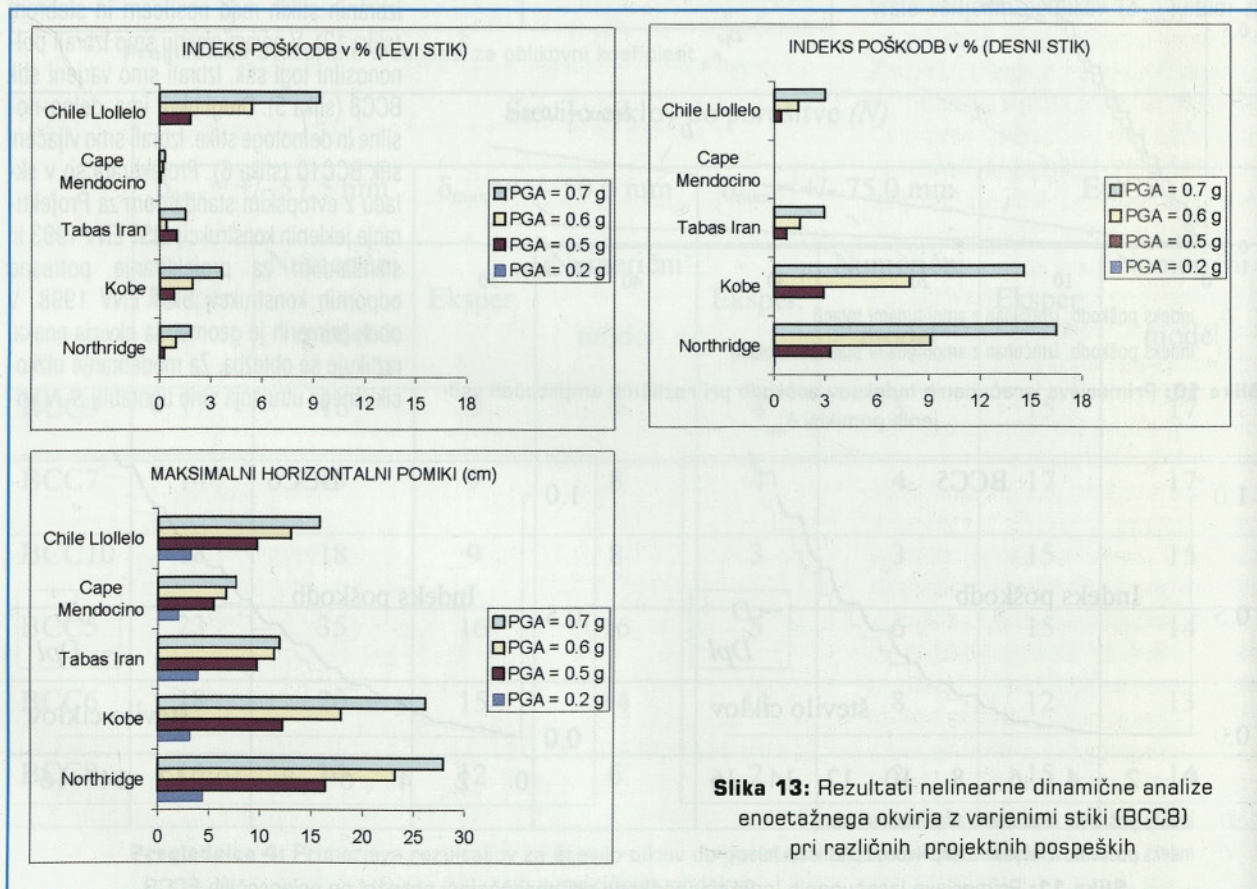
Lastna in stalna:	2.67 kN/m <sup>2</sup>
Koristna:	3.0 kN/m <sup>2</sup>
Sneg (s):	1.0 kN/m <sup>2</sup>
Veter:	25 m/s
Potres:	PGA = 0.2 g, q = 5
Nihajni čas:	T <sub>1</sub> = 0,4 s

Slika 12: Geometrija in obtežba za enoetažni pomični okvir

Ker se potresne obtežbe med seboj močno razlikujejo, smo izbrali več akceleroграмov z različnimi lastnostmi. Izbrali smo pet različnih akceleroграмov, ki se razlikujejo po magnitudi, oddaljenosti od epicentra, kakovosti tal in času trajanja.

Na sliki 13 so rezultati nelinearne dinamične analize z nadgrajenim programom DRAIN2DX za enoetažni okvir z varjenimi polnonosilnimi togimi stiki med nosilcem in stebrom. Akceleroграмi so pomnoženi z različnimi faktorji, ki ustrezajo različnim projektnim pospeškom.

Vidimo, da je odziv okvirja močno odvisen od vrste potresne obtežbe. Poškodbe v stikih naraščajo z večanjem intenzitete potresne obtežbe. Največje poškod-

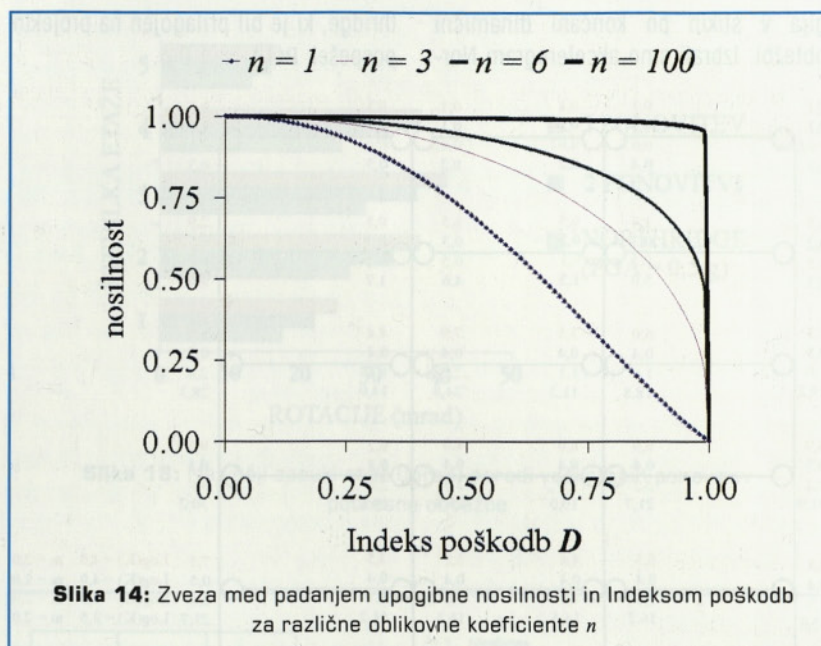


Slika 13: Rezultati nelinearne dinamične analize enoetažnega okvirja z varjenimi stiki (BCC8) pri različnih projektnih pospeških

be nastopijo v desnem stiku. Odziv okvirja na različne potresne obtežbe se kaže v velikosti poškodovanosti stikov. Izračunani indeks poškodb je največji pri obremenitvi okvirja s potresno obtežbo za Northridge za projektni pospešek  $PGA = 0.7 \text{ g}$  in znaša 16,5 %. Najmanjši je pri obremenitvi z akcelerogramom Cape Mendocino in znaša 1% pri istem projektnem pospešku. Največji horizontalni pomiki na vrhu okvirja in s tem tudi največje rotacije v stiku so pri potresni obtežbi z akcelerogramom Northridge in najmanjši za Cape Mendocino.

## 5. VPLIV OBLIKE PADANJA UPOGIBNE NOSILNOSTI V STIKIH NA ODZIV CELOTNE KONSTRUKCIJE ZARADI POTRESNE OBTEŽBE

Vpliv izbrane zveze med padanjem upogibne nosilnosti, indeksom poškodb in velikostjo rotacij smo analizirali tako, da smo naredili parametrično študijo odziva okvirja na potresno obtežbo z različnimi oblikovnimi koeficienti  $n$  (enačba 1). Izbrali smo petetažni okvir s polnosilni togimi stiki med prečko in stebrom. Podajni okvir je projektiran v skladu s evropskimi standardi in na projektni pospešek  $PGA = 0,35\text{g}$ . Za modeliranje nizkocikličnega utrujanja stikov smo izbrali predpostavljene  $S-N$  krivulje s parametrično  $\text{Log}(K) = 4$  in  $m = 2$ , ki smo jih določili na podlagi preglednice 1 kot srednja vrednost izračunanih parametrov za vse tri vrste obravnavanih varjenih stikov. Za amplitude v stikih smo izbrali celotne rotacije. Nosilci so sestavljeni iz linijskih elementov dolžine 1,0 m s plastičnimi členki na začetku in koncu elementa. Stebri so modelirani z linijskim elementom dolžine, ki je enaka višini etaže. Tako so možni plastični členki na začetku in na koncu vsake etaže, kjer so tudi največje upogibne obremenitve v stebrih zaradi potresne obtežbe. Na mestih možnih plastičnih členkov v nosilcu in stebrih smo uporabili predpostavljene  $S-N$  krivulje. Izbrali smo enake vredno-

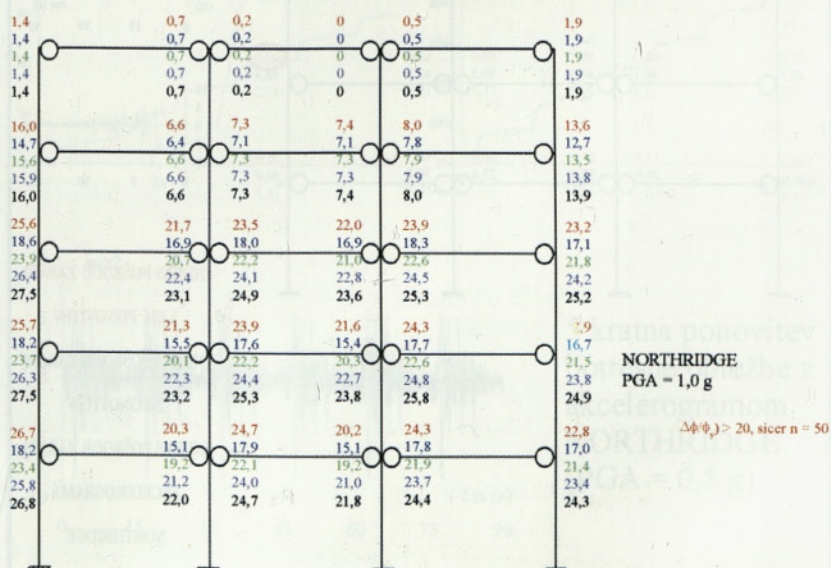


Slika 14: Zveza med padanjem upogibne nosilnosti in Indeksom poškodb za različne oblikovne koeficiente  $n$

sti kot za stike. Ker je linijski element, s katerim smo modelirali nosilce in stebre, zgrajen tako, da računa v plastičnih členkih samo plastične rotacije, smo za amplitude elementov izbrali plastične rotacije. V analizo smo vključili zvezo med padanjem upogibne nosilnosti in naraščanjem poškodb zaradi nizkocikličnega utrujanja po enačbi (1) samo za

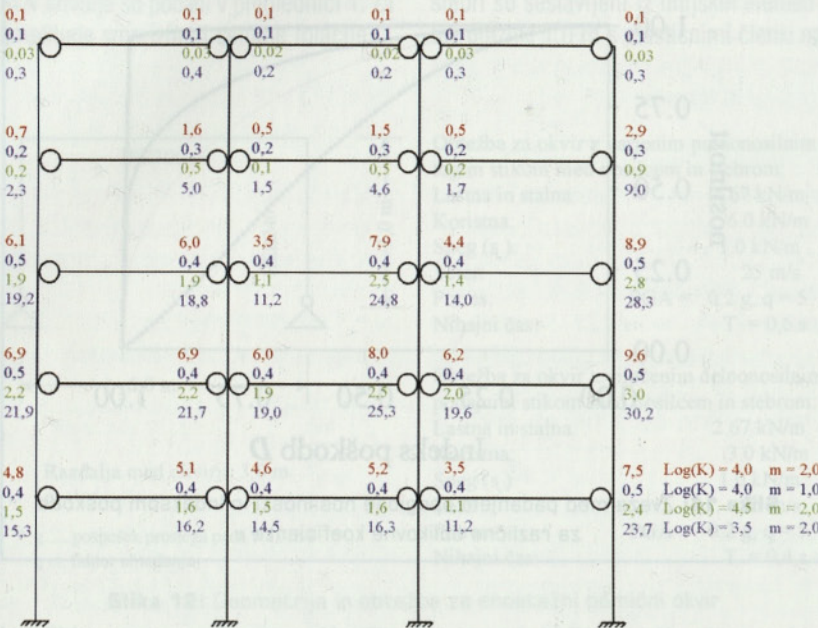
stike. V prvem primeru smo za oblikovni koeficient  $n$ , izbrali vrednosti, ki so podane v preglednici 3 za varjene stike. Nadalje smo izbrali  $n = 1, n = 3, n = 10$  in  $n = 100$  za vse velikosti rotacij (slika 14).

Rezultati so podani na sliki 15, kjer je prikazana kumulativna absorbirana ener-



Slika 15: Kumulativna absorbirana energija v stikih ( $kNm$ ) za različne zveze med indeksom poškodb in padanjem upogibne nosilnosti

gija v stikih po končani dinamični obtežbi. Izbrali smo akcelerogram Northridge, ki je bil prilagojen na projektni pospešek  $PGA = 1,0 \text{ g}$ .



Slika 16: Indeks poškodb v stikih (%) za različne vrednosti  $\log(K)$  in  $m$

Razlike v izračunani kumulativni absorbirani energiji so največje v najbolj obremenjenih stikih. Največje odstopanje je pri oblikovnem koeficientu  $n = 1$ , ki pomeni tudi največje padanje upogibne nosilnosti, medtem ko se izračunane kumulativne absorbirane energije pri ostalih oblikovnih koeficientih razlikujejo za manj kot 10 odstotkov.

Izračunani indeksi poškodb za različne oblike padanja upogibne nosilnosti so praktično enaki. Iz tega izhaja, da ima oblika padanja upogibne nosilnosti vpliv na prerazporeditev notranjih sil, medtem ko k razvoju poškodb ne prispeva bistvenega deleža.

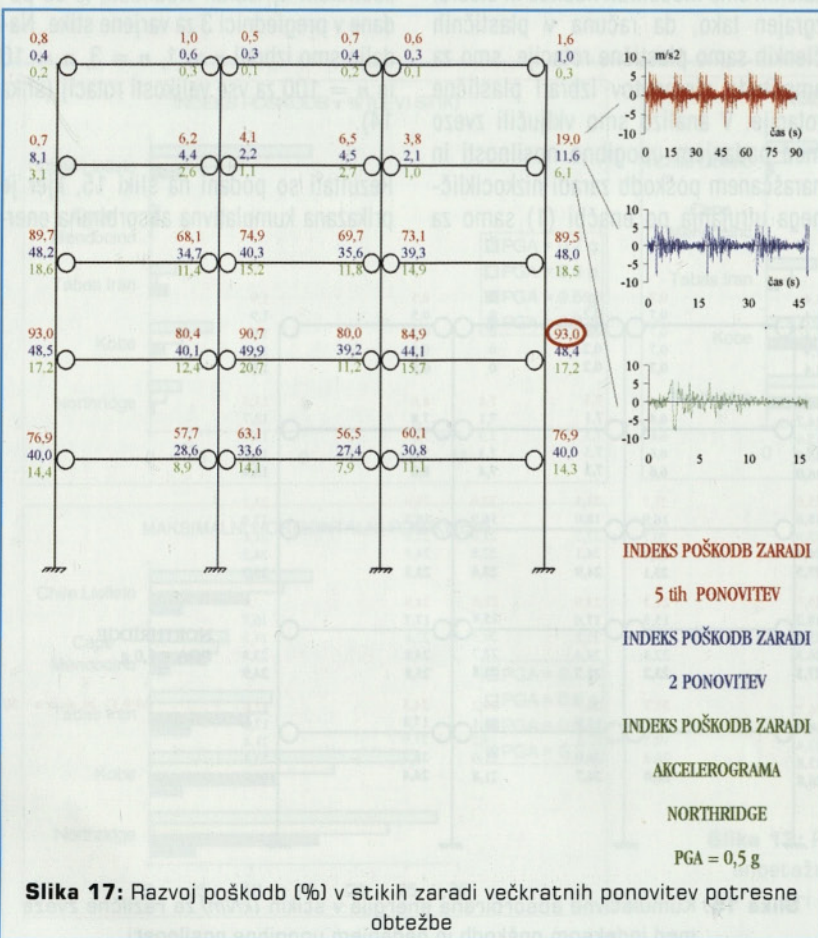
## 6. OBČUTLJIVOST PARAMETROV ZA DOLOČITEV S-N KRIVULJE

Velikost poškodb je poleg zgodovine obremenjevanja odvisna tudi od samega konstrukcijskega detajla. Da bi ocenili vpliv izbrane S-N krivulje, s katero opišemo obnašanje konstrukcijskega detajla pri nizkocikličnem utrujanju, smo naredili parametrično študijo občutljivosti izbranih parametrov, s katerimi so krivulje določene. Na sliki 16 so izračunani indeksi poškodb v stikih za različne vrednosti parametrov  $\log(K)$  in  $m$  za obremenitev z akcelerogramom Northridge, ki je prilagojen na računski projektni pospešek  $PGA = 0,35 \text{ g}$ .

Vidimo, da je velikost poškodb močno odvisna od izbranih parametrov  $\log(K)$  in  $m$  tj. od vrste stika.

## 7. AKUMULACIJA POŠKODB ZARADI VEČKRATNE PONOVITVE POTRESNE OBTEŽBE

Oceno varnosti poškodovane konstrukcije v primeru novih potresov smo naredili tako, da smo petetažni okvir obremenili z večkratno ponovitvijo z enakimi akce-



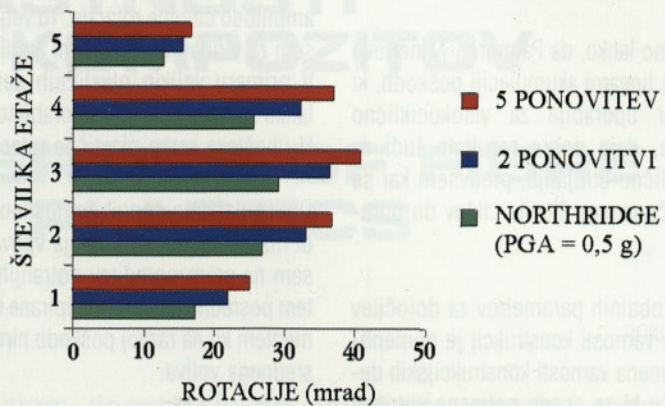
Slika 17: Razvoj poškodb (%) v stikih zaradi večkratnih ponovitev potresne obtežbe

lerogrami. Izbrali smo akcelerogram Northridge, ki smo ga prilagodili na projektni pospešek  $PGA = 0,5 g$ .

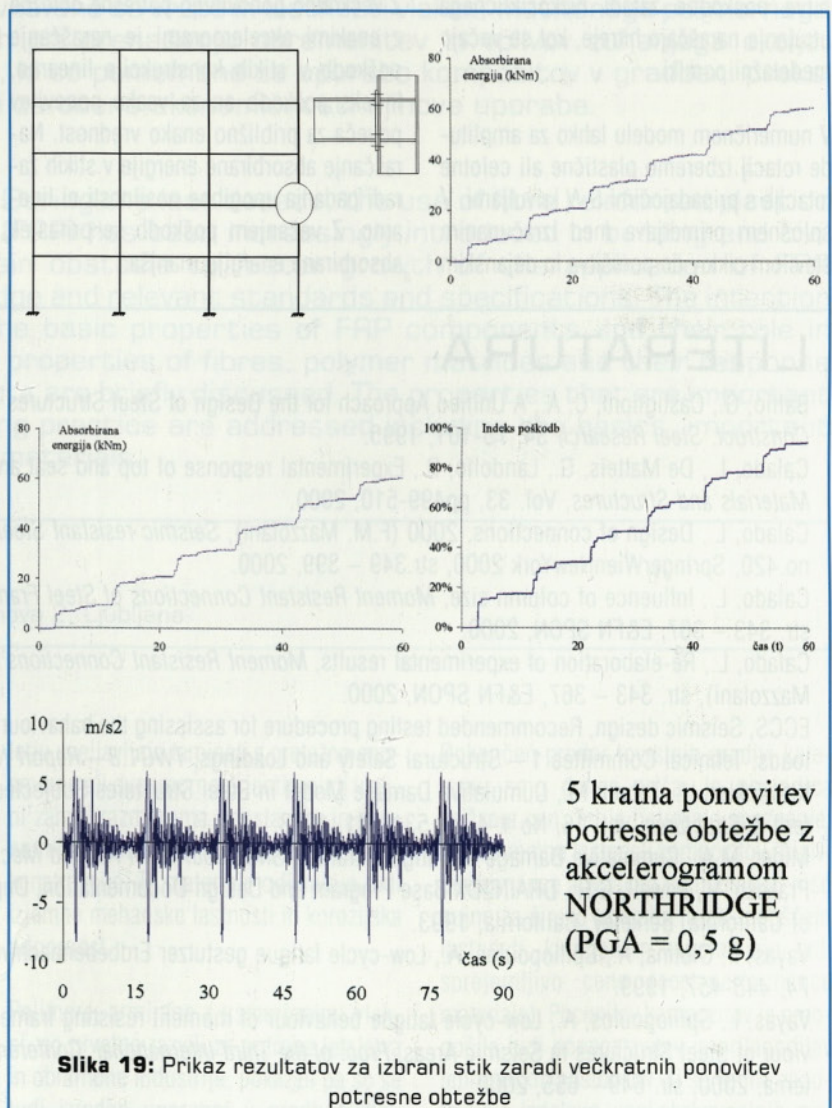
Na sliki 17 vidimo razvoj poškodb v stikih petetažnega okvirja. Podani so izračunani Indeksi poškodb (%) v stikih po končanem prvem potresu, po dveh ponovitvah in po petih ponovitvah. Najbolj poškodovani so stiki v prvih treh etažah. Vidimo, da poškodbe v stikih naraščajo linearno. Indeks poškodb se po vsaki ponovitvi poveča za približno enak delež. Po prvem potresu je indeks poškodb v najbolj obremenjenem stiku 17,2 %, po dveh ponovitvah 48,4 % in po petih ponovitvah 93 %.

Na sliki 18 vidimo največje zasuke etaž zaradi večkratnih ponovitev potresne obtežbe. Iz rezultatov je razvidno, da konstrukcija pri večkratnih ponovitvah postaja vedno bolj podajna. Največji zasuki so v tretji etaži. Po prvem potresu znašajo 30 mrad, po dveh ponovitvah 38 mrad in po petih 42 mrad.

Poleg globalnega obnašanja poškodovane konstrukcije si pogledjmo še odziv konstrukcijskega detajla. Rezultati nelinearne dinamične analize pri večkratnih ponovitvah potresne obtežbe za najbolj poškodovani stik so zbrani na sliki 19. Na diagramu moment – rotacija so prikazane histerezne zanke, s katerimi je opisano nelinearno obnašanje stika. Padanje upogibne nosilnosti zaradi razvoja poškodb je vidno šele po nekajkratnih ponovitvah potresa, ko je indeks poškodb dovolj velik. Pri večkratnih ponovitvah potresa deformacije v stiku naraščajo. Največje rotacije so 32 mrad. Na diagramu indeks poškodb – čas vidimo naraščanje poškodb. Indeks poškodb se za vsako ponovitev poveča za približno enako vrednost. Naraščanje kumulativne absorbirane energije je prikazano na diagramu absorbirana energija – čas. Vidimo, da zaradi padanja upogibne nosilnosti naraščanje energije ni linearno. Z večanjem poškodb se prirastek absorbirane energije manjša.



Slika 18: Največji zasuki etaž (mrad) zaradi večkratnih ponovitev potresne obtežbe



## 8. ZAKLJUČKI

Ugotovimo lahko, da Palmgren-Minerjevo pravilo o linearni akumulaciji poškodb, ki se sicer uporablja za visokociklično utrujanje, daje dobre rezultate tudi za nizkociklično utrujanje, predvsem kar se tiče izračunanega števila ciklov do porušitve.

Poleg globalnih parametrov za določitev potresne varnosti konstrukcij je pomembna tudi ocena varnosti konstrukcijskih detajlov. Če bi za oceno potresne varnosti okvirja izhajali samo iz največjih zasukov etaž, bi bilo lahko sklepanje o varnosti konstrukcije napačno. Iz naših analiz je razvidno, da z večanjem potresne obremenitve poškodbe zaradi nizkocikličnega utrujanja naraščajo hitreje, kot se večajo medetažni pomiki.

V numeričnem modelu lahko za amplitude rotacij izberemo plastične ali celotne rotacije s pripadajočimi S-N krivuljami. V splošnem primerjava med izračunanim številom ciklov do porušitve in dejanskim

kaže boljše ujemanje, če izberemo za amplitudo celotne rotacije. To velja predvsem za utrujanje z manjšimi amplitudami. V primeru velikih plastičnih deformacij lahko za opis poškodb uporabimo model, ki upošteva samo plastične rotacije.

Oblika padanja upogibne nosilnosti zaradi nizkocikličnega utrujanja vpliva predvsem na prerazporeditev notranjih sil in s tem posredno na delež disipirane energije, medtem ko na razvoj poškodb nima neposrednega vpliva.

Razvoj poškodb v stikih je močno odvisen od izbrane S-N krivulje, tj. od vrste konstrukcijskega detajla.

Z večkratno ponovitvijo potresne obtežbe z enakimi akcelerogrami je naraščanje poškodb v stikih konstrukcije linearno. Indeks poškodb se za vsako ponovitev poveča za približno enako vrednost. Naraščanje absorbirane energije v stikih zaradi padanja upogibne nosilnosti ni linearno. Z večanjem poškodb se prirastek absorbirane energije manjša.

Razvoj poškodb je določen s predpostavljeno linearno akumulacijo poškodb. Osnovna predpostavka je, da deformacije z isto amplitudo prispevajo enak delež k razvoju poškodb konstrukcijskega detajla. Dejansko pa to ni res. Deformacije, ki se zgodijo na začetku utrujanja, prispevajo manjši delež k razvoju poškodb kot poznejše deformacije z isto amplitudo. Z upoštevanjem nelinearne akumulacije poškodb bi bila zveza med padanjem upogibne nosilnosti in naraščanjem poškodb natančnejša od sedanje. V sedanjem modelu zaradi tega izračunani indeks poškodb ni odvisen od oblike padanja upogibne nosilnosti.

Z razvitim numeričnim modelom je kljub poenostavitvam mogoče dobro opisati nizkociklično utrujanje konstrukcijskih detajlov. Na podlagi znanih krivulj utrujanja konstrukcijskih detajlov dobimo odziv poškodovane konstrukcije v vsakem koraku analize. Po končanem potresu je možna ocena poškodb in nosilnosti konstrukcije v preostali življenjski dobi.

## LITERATURA

- Ballio, G., Castiglioni, C. A., A Unified Approach for the Design of Steel Structures under Low and/or High Cycle Fatigue, *J. Construct. Steel Research* 34, 75-101, 1995.
- Calado, L., De Matteis, G., Landolfo, R., Experimental response of top and seat angle semi-rigid steel frame connections, *Materials and Structures*, Vol. 33, pp499-510, 2000.
- Calado, L., Design of connections, 2000 (F.M. Mazzolani), *Seismic resistant Steel Structures*, CISM courses and lectures no.420, SpringerWienNewYork 2000, str.349 – 399, 2000.
- Calado, L., Influence of column size, *Moment Resistant Connections of Steel Frames in Seismic Areas*, (F.M. Mazzolani), str. 343 – 367, E&FN SPON, 2000.
- Calado, L., Re-elaboration of experimental results, *Moment Resistant Connections of Steel Frames in Seismic Areas*, (F.M. Mazzolani), str. 343 – 367, E&FN SPON, 2000.
- ECCS, Seismic design, Recommended testing procedure for assising the behaviour of structural steel elements under cyclic loads. Tehnical Committee 1 – Structural Safety and Loadings, *TWG1.3 – Report N° 45*, 1986.
- Krawinkler, H., Zohrei, M., Cumulative Damage Model in Steel Structures Subjected to Earthquake Ground Motion, *Computers & Structures*, vol. 16, No 1-4, pp 531-541, 1983.
- Miner, M.A., Cumulative Damage in Fatigue, *Trans. ASME, Journal of Applied Mechanics*, vol. 67, pp. A159-A164, 1945.
- Prakash, V., Powell, G.H., DRAIN2DX Base Program and Design Documentation, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, California, 1993.
- Vayas, I., Ciutina, A., Spiliopoulos, A., Low-cycle fatigue gestutzer Erdbebennachweis von Rahmen aus Stahl. *Bauingenieur* 74, 448-457, 1999.
- Vayas, I., Spiliopoulos, A., Low-cycle fatigue behaviour of moment resisting frames, (F.M. Mazzolani, R. Tremblay), *Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas, Proc. of the Third International Conference STESSA 2000*, Rotterdam: A. A. Baklema, 2000, str. 649 – 655, 2000.



# OSNOVNE LASTNOSTI POLIMERNIH KOMPOZITOV

## BASIC PROPERTIES OF FIBRE REINFORCED PLASTICS

STROKOVNI ČLANEK

UDK 678.7 : 624

ROKO ŽARNIČ

**P O V Z E T E K** V zadnjem desetletju se povečuje uporaba polimernih kompozitov v gradbeništvu. Ovira hitrejšemu širjenju uporabe je razmeroma slabo poznavanje lastnosti teh materialov in razmeroma slabo razvita tehnična regulativa, ki težko sledi hitremu razvoju materialov. Namen članka je predstaviti osnovne lastnosti komponent polimernih kompozitov in njihove vloge v obnašanju kompozitnega materiala. Obravnavane so vrste in lastnosti vlaken, matričnega polimernega materiala in sodelovanje obeh pri prenašanju obremenitev in vplivov zunanega okolja. Poudarjene so tiste lastnosti, ki so pomembne za uporabo kompozitov v gradbeni praksi vključno s podatki, potrebnimi za oceno ekonomičnosti njihove uporabe.

**S U M M A R Y** During the last decade, the use of fibre reinforced plastics (FRP) has been increasingly introduced in building and civil engineering practice. The main obstacle to faster growth of the application of FRP materials is the lack of knowledge and relevant standards and specifications. The intention of the paper is to present the basic properties of FRP components and their role in composite material. The main properties of fibres, polymer matrices and their response on external loadings and impacts are briefly discussed. The properties that are important for civil engineering and building practice are addressed including the basics, important for the rational use of these materials.

*Avtor:*

izr. prof. dr. Roko Žarnič, FGG, Jamova 2, Ljubljana

### UVOD

Prednost tradicionalnih gradiv, kot so les, jeklo in beton je razmeroma nizka cena surovin in znano obnašanje. Primerna so tako za novogradnje kot za popravila in utrditve obstoječih konstrukcij. Vendar pa imajo novi materiali [Lopez-Anido in Naik, 2000] svoje prednosti in ob nižanju cen in ob vse bolj množični uporabi postajajo konkurenčni. Pri utrditvah in popravilih konstrukcij se v zadnjem deset-

letju uveljavljajo laminati s pretežno enosmerno ali dvosmerno orientiranimi vlakni zaradi razmeroma enostavnih in ekonomičnih postopkov vgradnje v obstoječe konstrukcije. Te materiale odlikujejo tudi izjemne mehanske lastnosti in korozijska odpornost.

Polimere, armirane z usmerjenimi vlakni, so prvotno razvili za potrebe letalstva in obrambne industrije, pokazali pa so se tudi izredno uporabni v gradbeništvu.

Dokončen prodor tovrstnih gradiv, kateremu smo danes priča, je posledica znižanja cen. Tej je botrovalo spoznanje, da ekstremne lastnosti kompozitov (high-performance advanced composites) niso nujne za široko uporabo in da zadoščajo lastnosti, ki obenem zagotavljajo tudi sprejemljivo ceno (cost-performance materials). Pocenitev kompozitov je omogočila tudi poenostavitev in prilagoditev tehnoloških postopkov, ki še vedno zagotavljajo izdelavo visokokakovostnih ma-

## R. ŽARNIČ: Osnovne lastnosti polimernih kompozitov

terialov in izdelkov. Poleg tega se v gradbeništvu lahko uporabljajo tudi kompoziti, ki so težji od kompozitov v letalski industriji, toda še vedno izredno lahki v primerjavi s klasičnimi gradbenimi materiali. Gradbeništvu potrebuje predvsem velike količine poceni gradiv z dolgo življenjsko dobo, ki niso zahtevni glede vzdrževanja.

Kompozitni material je vsak material, ki je sestavljen iz dveh ali več komponent. Te med sabo sodelujejo tako, da so lastnosti celotnega kompozitnega materiala različne od lastnosti posamezne komponente. Kompozite sestavlja polimerna matrica in dodani material (armatura). Običajno so armaturna vlakna oblikovana na tri načine: krajša (okoli 50 mm) v vse smeri enakomerno orientirana vlakna (matta), vzdolžno orientirana medsebojno prepletana vlakna v trakovih ali šopih (rowing) in na različne načine iz rowinga pletene tkanine. Pri laminatih se lahko kombinirajo matta, ki utrjuje polimerno matrico, in armatura v obliki rowinga, v obliki tkanine ali v obeh oblikah. Armirani polimeri so po zasnovi podobni keramičnim materialom, armiranim s kovinami (armirani beton), bistveno pa se razlikujejo v količini armature. Pri armiranem betonu odstotek armiranja redko dosega 5 %, pri armiranih polimerih pa odstotek armiranja znaša od 35 % do 65 % celotnega prereza konstrukcijskega elementa. Poleg tega natezna trdnost polimerne matrice v primerjavi z njeno tlačno trdnostjo ni zanemarljiva kot pri betonu. Polimerne smole, ki se uporabljajo za kompozite, so žilave in to lastnost dajejo celotnemu kompozitu. Zvezna vlakna prispevajo k trdnosti in togosti kompozita, polimerna matrica pa zagotavlja prenos obremenitev in zaščito vlaken pred vplivi okolja in delno tudi pred mehanskimi poškodbami. Polimerni kompozit se pred zunanjimi vplivi (vlaga, plini, UV sevanje) in poškodbami ščiti s posebno polimerno plastjo (gel-coat), ki daje kompozitu tudi izgled (barva, tekstura). Ta plast je običajno debela okoli 0,5 mm in je materialno kompatibilna z matrično smolo, s katero se po nanosu tudi

kemično veže. Značilne vrste vlaken so steklena, aramidna in ogljikova ter boro-va, ki so zaradi dragocenosti in izjemnih lastnosti manj prisotna pri kompozitih za gradbeništvu. Za polimerne matrice se večinoma uporabljajo duroplasti, kot so nenasičeni poliestri, epoksidi, vinilestri in fenoli. Uporaba slednjih se zmanjšuje zaradi škodljivega vpliva na zdravje oseb v proizvodnem procesu. V zadnjih letih je izšlo razmeroma veliko učbenikov, ki obravnavajo kompozite. Mehaniko laminatov obravnava [Jones, 1999], materiale in njihovo izdelavo [Mallick, 1993], načrtovanje kompozitov [Tsai, 1992] in [Barbero, 1998]. Kljub hitremu razvoju na področju novih materialov in njihovem uspešnemu uvajanju v gradbeno prakso je njihova uporaba v Sloveniji dokaj skromna in omejena samo na določena področja popravil in utrditev konstrukcij. S tem prispevkom nameravamo gradbeno prakso nekoliko bolj seznaniti z osnovnimi lastnostmi kompozitnih materialov, primernih za gradbeništvu in spodbuditi povečanje njihove uporabe. K boljšem spoznavanju lastnosti novih materialov zelo prispevajo tudi informacije, dostopne na spletnih straneh njihovih razvijalcev, proizvajalcev in dobaviteljev [Guide to Composites, 2002].

Številčne vrednosti posameznih lastnosti materialov, ki so podane v članku, ne gre posploševati, ker veljajo izključno za določen tip materiala. Iz enakih komponent se da s spreminjanjem razmerja med matričnim materialom in armaturo ter z obdelavo obeh narediti kompozitne materiale različnih materialnih lastnosti in jih s tem prilagajati potrebam.

## ZNAČILNOSTI IN PREDNOSTI POLIMERNIH KOMPOZITOV

Armirane plastične mase omogočajo projektantom snovanje konstrukcij, ki jih odlikuje optimalno obnašanje. Zaradi visokega specifičnega modula elastičnosti in specifične trdnosti (razmerja med trd-

nostjo in gostoto) se lahko izdelajo zelo lahke, a toge in trdne konstrukcije. Zaradi načrtovanja usmeritve nosilnih vlaken v želeno smer (smer glavnih napetosti na pr.) so take konstrukcije zelo učinkovite in ekonomične. Ob ustrezni izbiri matrice in ostalih komponent je kompozitni material lahko zelo odporen proti vplivom okolja in procesom korozije. Izdelati se da tudi kompozite, katerih vrednosti koeficientov toplotnega raztezka so nizke. Taki kompoziti so primerni za izdelavo termalno stabilnih konstrukcijskih elementov. Lastnost kompozitov je tudi sposobnost dušenja dinamičnih obremenitev in odpornost proti utrujanju. Ustrezno načrtovani in izdelani kompoziti z ogljikovimi vlakni so praktično neobčutljivi za utrujanje. Te materiale odlikuje tudi visoka žilavost in s tem povezana sposobnost absorpcije velikih količin energije. Konstrukcije, ki so narejene iz kompozitov, se razmeroma enostavno vzdržujejo in tudi popravljajo - celo po nastanku lokalnih poškodb. To znižuje obratovalne stroške konstrukcije. Kompoziti se dajo razmeroma enostavno in poceni oblikovati v različne konstrukcijske elemente, celo take, ki jih ni mogoče oblikovati z nobenim drugim materialom. Deli konstrukcije se lahko povezujejo na enostaven način, majhna teža elementov pa omogoča hitro montažo na gradbišču. Serijska izdelava večjega števila predizdelanih elementov različnih oblik je razmeroma poceni.

Uvajanje kompozitov v množično uporabo v gradbeništvu še vedno zavirajo nekatere lastnosti, zaradi katerih bodo tradicionalni materiali verjetno še dolgo prevladovali. Izhodiščna cena kompozitov je razmeroma visoka zaradi višjih cen osnovnih materialov in v večini primerov tudi tehnologij proizvodnje. Te so manj prilagojene množični produkciji kot tehnologije za pridobivanje tradicionalnih gradiv. Lastnosti polimernih kompozitov še niso dovolj znane širokemu krogu projektantov in izvajalcev gradbenih del, izkušnje in znanje projektantov pa so dokaj pomanjkljive. Polimerni kompoziti sodijo v kategorijo »prihajajočih materialov«, za

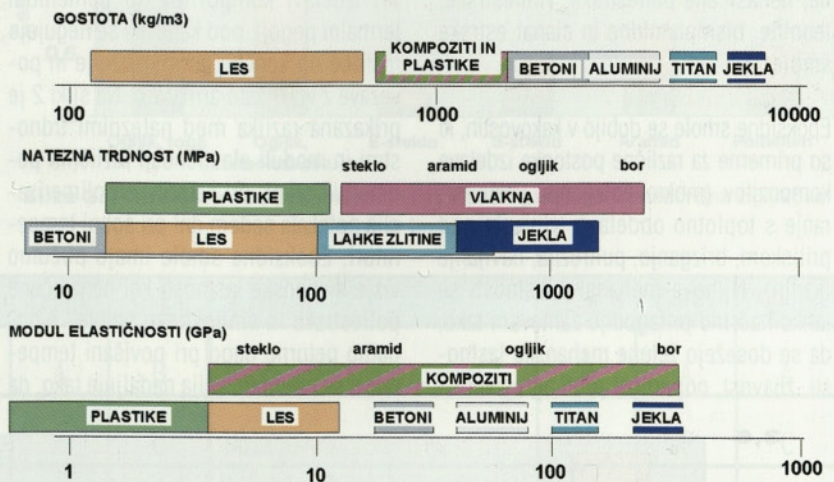
katere ni na voljo dovolj ustrezne tehnične regulative in standardov na področju gradbeništva. Ena izmed prednosti kompozitnih materialov, ki bo prišla do izraza v bodoče, se na sedanji stopnji razvoja kaže kot pomanjkljivost. Pri uporabi kompozitov bo treba povsem spremeniti pristop k snovanju in projektiranju konstrukcij. Projektanti imajo možnost projektirati skupaj tako lastnosti materiala kot samo konstrukcijo. Pri tem morajo upoštevati soodvisnost obeh možnosti in iskati optimalne konstrukcijske rešitve in maksimalne izkoristke materiala in njegovih lastnosti. Projektanti se s tem neposredno vključujejo v procese proizvodnje materiala, saj lahko naročajo materiale natančno določenih lastnosti in s tem prevzemajo tudi del odgovornosti za obnašanje materiala med celotno življenjsko dobo konstrukcije. Te možnosti postavljajo pred projektante višje zahteve, kar bo potrebno upoštevati tudi pri vzgoji in izobraževanju bodočih generacij. Znanje o materialih je pri sedanjih projektantih pogosto pomanjkljivo, tudi ko gre za tradicionalna gradiva. To zlasti velja, ko gre za njihovo trajnost in spremembe lastnosti med celotno življenjsko dobo. Problematičen je lahko vpliv lezenja polimernih smol in s tem celotnih kompozitov kakor tudi spreminjanje njihovih mehanskih lastnosti pri višanju temperature okolja. Pri kompozitih se je treba zavedati, da je njihovo obnašanje v celotnem območju uporabe večinoma linearno-elastično in da so porušitve krhke. Poleg neduktilnosti je problematična tudi njihova trajnost, če se pri izbiri materialnih komponent kompozitov ne upošteva njihova občutljivost na vplive okolja in korozijske procese.

Na sliki 1 so shematično prikazane osnovne lastnosti tradicionalnih gradiv in kompozitov, v preglednici 1 pa številčna primerjava lastnosti betona, jekla, ogljikovih vlaken in plastik armiranih z ogljikovimi vlakni. Pri slednjih so prikazane lastnosti v smeri vlaken in pravokotno na vlakna. Iz primerjave prikazanih lastnosti sledi, da je gostota kompozitov le nekoliko večja od gostote lesa, natezna trdnost ogljikovih vlaken je primerljiva z natezno trdnostjo kovin, modul elastičnosti armiranih plastik pa variira v širokem področju od primerljivosti z lesom do primerljivosti s kovinami. Podatki v preglednici 1 kažejo, da so mehanske lastnosti plastik z enosmerno orientiranimi vlakni v smeri pravokotno na potek vlaken zanemarljive v primerjavi z lastnostmi v smeri vlaken. To je posledica bistveno nižjih mehanskih lastnosti polimerne mase v primerjavi z lastnostmi armirane polimerne matrice.

## KOMPONENTE POLIMERNIH KOMPOZITOV

### POLIMERNA MATRICA

Polimerna matrica povezuje vlakna v kompozit in zagotavlja ustrezen položaj in usmeritev vlaken. Preko matrice se prenašajo obremenitve na vlakna, za kar je potrebna visoka strižna trdnost in odpornost povezave med vlakni in matrico. Trdnost in deformabilnost kompozita določa prostorninsko razmerje med matrico in vlakni (odstotek armiranja) in kakovost povezave matrice z vlakni. Matrice so iz različnih smol, izbira le-teh pa je odvisna tudi od izbire armature. Od strižne trdnosti stika matrice in vlakna so odvisne mehanske lastnosti kompozita v celoti. Zato se vlakna obdelajo z apreturo, ki se na eni strani kemično veže z materialom vlakna, na drugi strani pa z



Slika 1: Primerjava gostote, natezne trdnosti in modula elastičnosti tradicionalnih gradiv in kompozitnih materialov (prikazane so logaritemske skale)

Lastnost	Beton	Jeklo	Ogljikovo vlakno	Kompozit v smeri vlaken	Kompozit pravokotno na vlakna
Gostota (g/cm <sup>3</sup> )	1,8	7,8	1,75-1,80	1,6	1,6
Modul elastičnosti (GPa)	30	210	230	160	10
Natezna trdnost (MPa)	3,5	400	3000	1725	40
Porušni raztezek (%)	-	0,2	0,9-0,15	1,1	1,5
Poissonov količnik	0,2	0,3	0,2	0,22-0,28	0,015-0,02
Topl. prevodnost (Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	1	50	7,0-8,5	11-18	2-3

Preglednica 1: Primerjava osnovnih lastnosti tipičnega betona, jekla, ogljikovih vlaken in kompozita s 60% prostorninsko količino ogljikovih vlaken ( $V_f = 60\%$ ) v epoksidni smoli [Lopez-Anido in Naik, 2000]

matričnim materialom. Na trajnost kompozita vplivajo procesi propadanja, ki nastajajo in se razvijajo vzdolž stikov med vlakni in matrico. Od termalnih lastnosti matrice je odvisna temperaturna odpornost kompozita, saj so vlakna praviloma toplotno bolj odporna in stabilna kot matrični material. Bistveno vlogo ima lastnost amorfnega polimera, ki je znana kot "temperatura steklastega prehoda" ( $T_g$ ) in predstavlja temperaturno mejo med območji različnih mehanskih lastnosti istega polimera. Po prekoračitvi te temperature "steklasti" močno zamreženi polimer prehaja v mehkejšo stanje in dobiva lastnosti, ki so podobne lastnostim šibkeje zamreženih elastomerov. Temperatura steklastega prehoda polimerov, ki se uporabljajo za kompozite, se giblje od 150°C do 250°C (akrilne, fenolne in epoksidne smole), seže pa tudi višje (cianat estrske smole, do 350°C). Med najpogosteje uporabljanimi smolami za izdelavo matric kompozitov so epoksidne, nenasičene poliestrske, vinilestrske, fenolne, bismelamidne in cianat estrske smole.

Epoksidne smole se dobijo v kakovostih, ki so primerne za različne postopke izdelave kompozitov (mokro polaganje, vakuumiranje s toplotno obdelavo, vlivanje pod pritiskom, brizganje, pultruzija, navijanje tkanin). Njihove mehanske lastnosti se lahko načrtno prilagodijo zahtevam tako, da se dosežejo želene mehanske lastnosti, žilavost, odpornost proti agresivnosti

okolja in trajnost ob dostopni ceni, kar je zlasti pomembno pri uporabi v gradbeništvu. Z ustrezno formulacijo se lahko uporabijo tam, kjer je potrebna odpornost proti povišanim temperaturam, odpornost proti udarcem in odpornost proti vročim in vlažnim okoljem. Značilnost fenolnih smol je visoka požarna odpornost, relativno nizka cena, a bistveno slabše mehanske lastnosti v primerjavi z lastnostmi epoksidnih smol. Bismelamidne smole so razmeroma drage, vendar imajo odlične mehanske lastnosti tudi pri višjih temperaturah (okoli 250°C), dimenzijsko stabilnost in odlično kemično odpornost. Cianat estrske smole (policianati) imajo izredne tehnološke lastnosti, ki omogočajo izdelavo visoko kakovostnih kompozitov. Odlične mehanske lastnosti obdržijo tudi pri visokih temperaturah (do 350°C), a so zato dokaj drage. Postopki izdelave kompozitov so podobni kot pri epoksidnih smolah.

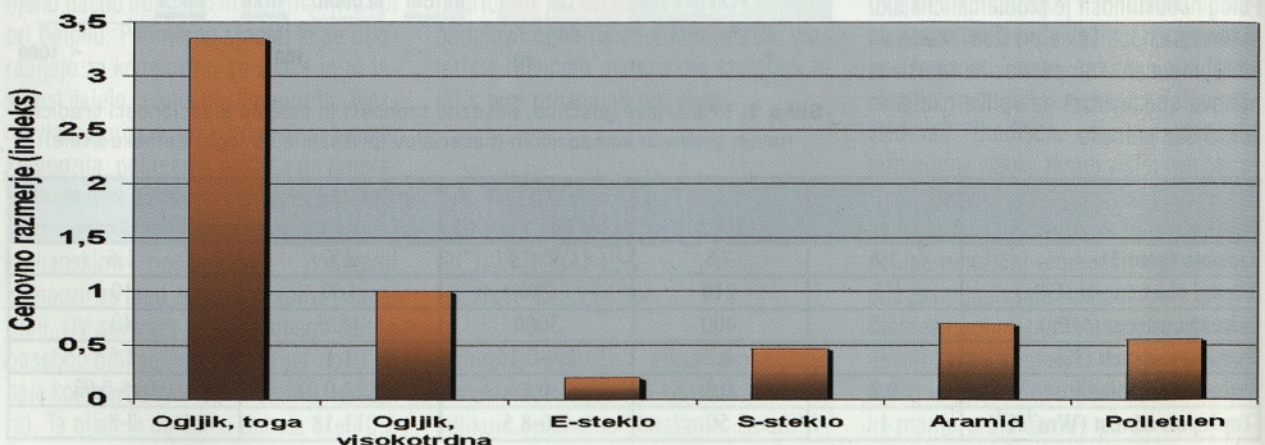
Pri izdelavi kompozitov so pomembni termalni pogoji, pod katerimi se negujejo matrice do končne polimerizacije in povezave z vlaknasto armaturo. Na sliki 2 je prikazana razlika med nateznimi trdnostmi in moduli elastičnosti različnih polimernih smol, pri katerih je polimerizacija potekala sedem dni pri sobni temperaturi. Epoksidne smole imajo občutno višje mehanske lastnosti kot nenasičene poliestrske in vinilestrske smole. Z dodatno peturno nego pri povišani temperaturi se polimerizacija nadaljuje tako, da

se mehanske lastnosti zvišajo pri vseh treh primerjanih smolah z izjemo modula elastičnosti pri epoksidni smoli. Pri tem velja omeniti tudi krčenje smol, ki pri prehodu iz tekočega in semigelskega stanja v trdno pri nenasičenih poliestrih znaša okoli 8 %, pri epoksidih pa le 2 %. Krčenje povzroča notranje napetosti v materialu, ki znižujejo trdnost kompozita. Povzroči lahko tudi tanjšanje krovnje plasti polimerne matrice nad vlaknasto armaturo, kar je težko odpraviti z naknadnimi posegi.

## ARMATURNI VLAČNA

Matrice se najpogosteje armirajo s steklenimi, aramidnimi in ogljikovimi vlakni, nekoliko manj pa še s polietilenskimi in borovimi vlakni. Matrice se armirajo z enosmerno orientiranimi zveznimi vlakni ali z dvosmerno in večsmerno prepletenimi vlakni v ravnini tako, da tvorijo na različne načine tkane tkanine.

Ogljikova vlakna proizvajajo s kontrolirano oksidacijo, karbonizacijo in grafitizacijo organskih snovi, ki so bogate z ogljikom. Najkakovostnejša vlakna se pridobivajo iz poliakrilonitrila (PAN), manj kakovostna pa tudi iz katranov in bitumnov ter iz celuloze. Z variiranjem procesa grafitacije se pridobijo vlakna visoke trdnosti (pri okoli 2600°C) ali vlakna visokega modula elastičnosti (pri okoli 2600°C). V primerjavi z ostalimi vrstami



Slika 2: Primerjava mehanskih lastnosti matričnih polimerov pri različnih pogojih nege [Guide to Composites, 2002]

vlakn imajo ogljikova vlakna visoko trdnost in srednje do izjemno visok modul elastičnosti, korozijsko odpornost, odpornost proti lezenju in utrujanju ter razmeroma nizko udarno trdnost. Uporabljajo se za izdelavo kompozitov visoke trdnosti in togosti. Ker so ogljikova vlakna in polimerna matrica kemično povezani, lahko stik prenaša izjemne obremenitve, kar dodatno prispeva k visoki trdnosti tovrstnih kompozitov.

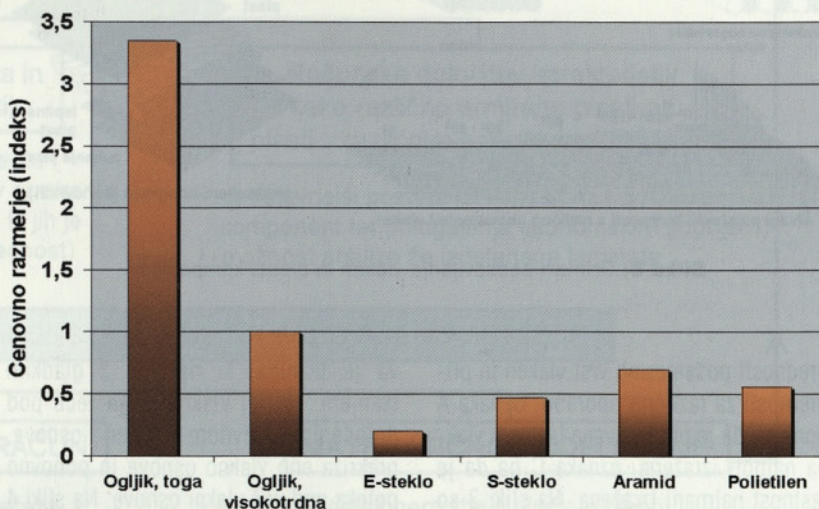
Iz taline zmesi kremenčevega peska, kalolina, apnenca in kolemanita pri 1600°C se skozi tenke šobe vlečejo in hladijo steklena vlakna. Iz različnih razmerij surovin in dodatkov se izdelujejo steklena vlakna različnih vrst. V kompozitih se najpogosteje uporabljajo vlakna iz A-stekla (alkalna), E-stekla (električna), C-stekla (kemična). A-stekla so občutljiva za alkalno korozijo, E-stekla so srednje alkalno odporna, C-stekla pa visoko alkalno odporna. Na trgu se dobijo tudi alkalno izjemno odporna steklena vlakna, ki pa so tudi dokaj draga (NEG ARG vlakna z visoko vsebnostjo  $ZrO_2$ ). Zaradi sprejemljive cene in razmeroma dobrih tehničnih lastnosti je najbolj razširjena uporaba E-stekel. Kompoziti, armirani s steklenimi vlakni, so težji in imajo manjšo trdnost in togost, a so nekajkrat cenej-

ši od kompozitov z ogljikovimi vlakni. Zaradi občutljivosti stekla za alkalno korozijo mora matrični material prenašati obremenitve in deformacije tako, da je obseg poškodb in razpok, ki bi omogočile prodor alkalij do steklenih vlakn, čim manjši. To je zlasti pomembno tam, kjer kompoziti pridejo v stik z vlažnimi betoni ali maltami.

Aramid je sintetizirani polimer, iz katerega se izdelujejo vlakna z različnimi komercialnimi imeni (Twaron®, Kevlar®). Imajo veliko specifično trdnost in odpor-

nost proti udarnim obremenitvam. Tlačna trdnost je podobna tlačni trdnosti E-steklenih vlakn. Odporna so proti toplotnim obremenitvam, propadanju zaradi kemičnih in toplotnih vplivov, manj pa odporna proti UV žarkom. Aramidna vlakna so primerna za armiranje kompozitov, ki so izpostavljeni udarni obremenitvi. Taki kompoziti so sposobni absorpcije in disipacije energije in imajo visoko obrabno odpornost.

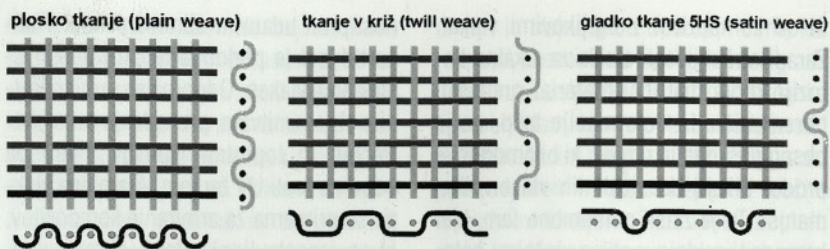
V preglednici 2 so primerjane posamezne lastnosti vlakn na način, ki pokaže



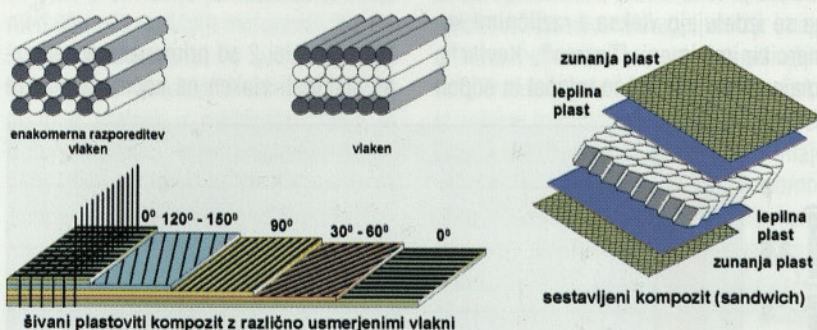
Slika 3: Primerjava cen posameznih vrst vlakn glede na visokotrдна ogljikova vlakna (indeks 1)

Lastnost	Aramid	Ogljik	Steklo	Lastnost	Aramid	Ogljik	Steklo
Visoka natezna trdnost	B	A	B	Visoka strižna trdnost v ravnini	B	A	A
Visoki natezni modul	B	A	C	Nizka gostota	A	B	C
Visoka tlačna trdnost	C	A	B	Visoka odpornost na utrujanje	B	A	C
Visoki tlačni modul	B	A	C	Visoka požarna odpornost	A	C	A
Visoka upogibna trdnost	C	A	B	Visoka toplotna izolativnost	A	C	B
Visoki upogibni modul	B	A	C	Visoka elektroizolativnost	B	C	A
Visoka udarna trdnost	A	C	B	Nizki toplotni raztezek	A	A	A
Visoka medplastna strižna trdnost	B	A	A	Nizka cena	C	C	A

Preglednica 2: Primerjava lastnosti različnih vlakn: A-najbolj izražena, C-najmanj izražena lastnost



Slika 4: Osnovni načini tkanja vlaken



Slika 5: Primeri sestavljanja vlaken in plasti kompozitov

prednosti posameznih vrst vlaken in primernosti za različno uporabo. Oznaka A pomeni, da je obravnavana lastnost vlakna najbolj izražena, oznaka C pa da je lastnost najmanj izražena. Na sliki 3 so primerjane tudi cene posameznih vlaken.

Iz vlaken tkejo tkanine, ki so močna kompozitna armatura. Različni načini tkanja dajejo tkaninam različno togost v ravnini in s tem možnost oblikovanja tudi najbolj zapletenih oblik izdelkov. Najpogosteje se uporabljajo tkanine, ki so stakne s ploskim, križnim in gladkim tkanjem. Niti, ki tečejo s koluta, tvorijo osnovo. Niti, ki jih skozi osnovo pretika čolniček, tvorijo votek. Pri ploskem tkanju se niti osnove in votka prepletajo izmenično in tako ustvarjajo tkanino, ki je zelo odporna proti deformacijam v svoji ravnini. Dobro se prilagaja ostrim spremembam oblik profilov. Križna tkanina nastane z izmeničnim pretikanjem po dveh vlaken osnove z dvema vlakni votka. Tkanina je enaka na obeh ploskvah, tako kot plosko tkana tkanina. Lažje se deformira v svoji ravnini in s tem prilagaja želeni obliki kompozitnega izdelka. Še bolj prilagodlji-

va je tkanina, ki nastane z gladkim tkanjem. Pri tej vlakno votka teče pod določenim številom vlaken osnove, prekrži eno vlakno osnove in ponovno poteka pod več vlakni osnove. Na sliki 4 so shematsko prikazana vsi trije opisani načini tkanja.

### SESTAVLJANJE KOMPONENT

Narava kompozitnih materialov je taka, da projektantu konstrukcije omogoča ne samo njihovo uporabo z upoštevanjem danih lastnosti, temveč tudi načrtovanje lastnosti kompozitov. To pomeni, da se lahko izdelata material, ki bo na različnih delih konstrukcije imel različne lastnosti izbrane tako, da prenaša pričakovane obremenitve. Pri tem se znotraj kompozita lahko uporabijo tudi različni dodani materiali kot na primer vlakna različnih vrst. Na ta način se lahko z vgradnjo cenejših vlaken v manj obremenjene dele konstrukcije doseže večja ekonomičnost konstrukcije. Dva primera različne razporeditve dveh vrst vlaken sta prikazana na sliki 5.

Kompozitni trakovi in plošče se lahko sestavljajo v večplastne laminatne strukture, ki se povežejo s šivanjem in tako nastanejo tridimenzionalno armirani polimerni materiali z izrednimi mehanskimi lastnostmi in veliko odpornostjo. Take trakove je treba apretirati po šivanju. Vsaka plast laminata je armirana z vlakni, vgrajenimi pod različnim kotom glede na vzdolžno os laminata. Iz teh kompozitov se lahko oblikujejo različni konstrukcijski elementi z lokalnimi ojačitvami in želenimi lokalnimi materialnimi lastnostmi.

Pri konstruiranju in optimizaciji izdelkov iz laminatov morata zaradi zahtevnosti tesno sodelovati tehnolog in projektant. Pogosto so potrebne tudi spremljevalne eksperimentalne preiskave materialov in njihovih sklopov ter razvoj in eksperimentalna verifikacija matematičnih modelov. Slika 6 prikazuje pristop k projektiranju, kot ga na podlagi dolgoletnih izkušenj s preiskavami in dimenzioniranjem poliestrskih laminatov predlaga Makarovič, ki je pred štirinajstimi leti s sodelavci opravil obsežne laboratorijske raziskave poliestrskih laminatov [Makarovič, 1988].

Prikazani pristop je na splošno primeren za projektiranje in optimizacijo konstrukcij iz zgrajenih kompozitov, zlasti še, ker je danes na voljo kakovostna programska oprema in visoko zmogljivi računalniki. Prednosti računsko podprtega načrtovanja so očitne.

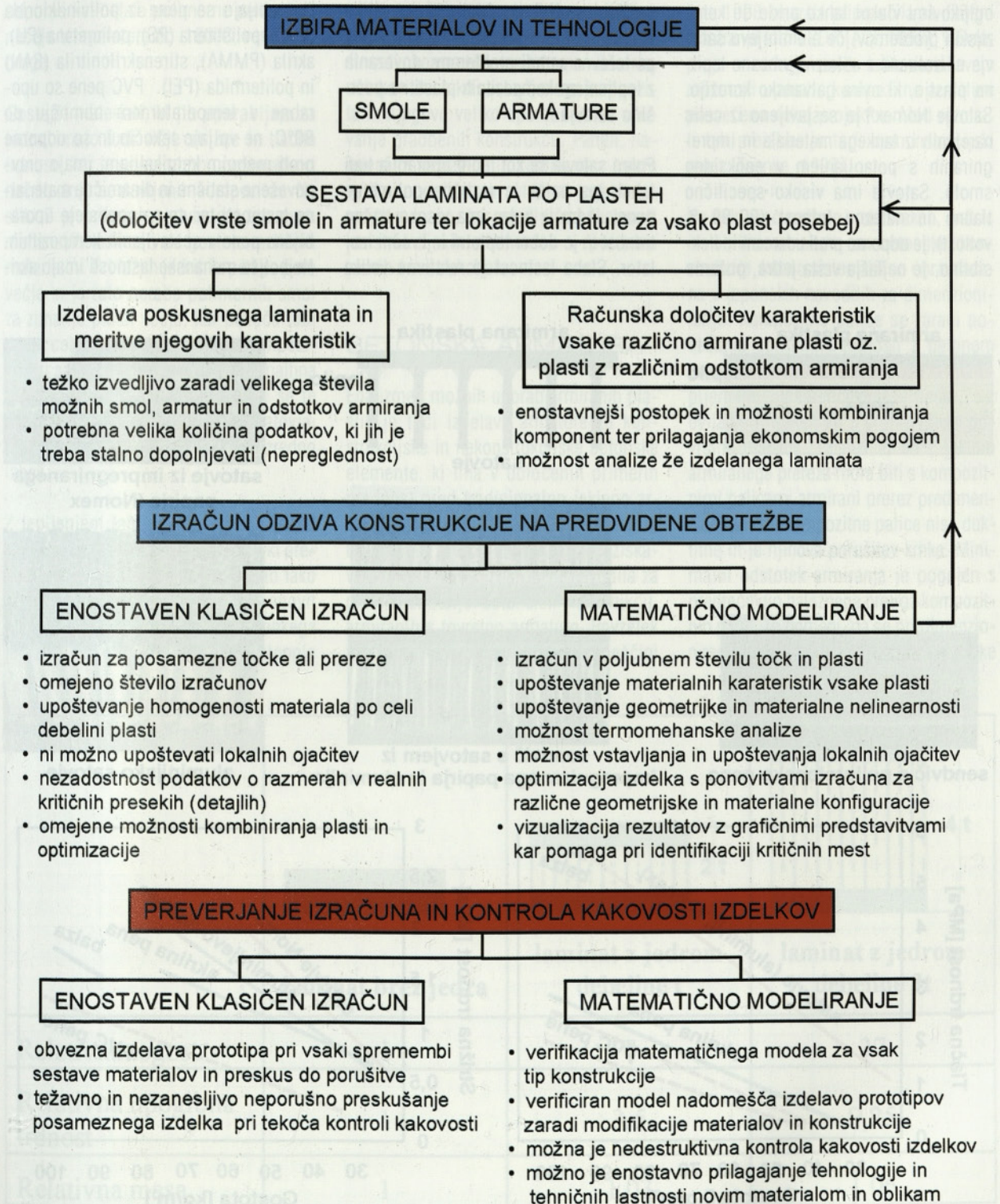
Kompozitne materiale lahko sestavljamo v različne vrste sklopov, pri katerih se lastnosti posameznih komponent optimalno izkoriščajo. Med posebej učinkovite sklope sodijo sestavljeni (sandwich) sklopi (slika 5 in preglednica 3).

Mehanske lastnosti jedra so lahko različne v odvisnosti od uporabljenih materialov, strukture in stroškov, ki si jih lahko privoščimo. Jedro v vsakem primeru bistveno zviša nosilnost sklopa in njegovo togost ob minimalnem povečanju mase. Tanki kompozitni plasti sta prilepljeni na

obe ploskvi lahkega jedra, kar ustvari podoben učinek, kot je dosežen pri profilih z nosilnimi pasnicami in vmesno

stojino, le da je jedro uklonsko bolj stabilno od tanke stojine. Pri sodobnih konstrukcijah se večinoma uporabljajo lahka

kovinska in nekovinska jedra, ki so oblikovana kot satovje. Visoka nosilnost in togost konstrukcije se doseže z alumi-



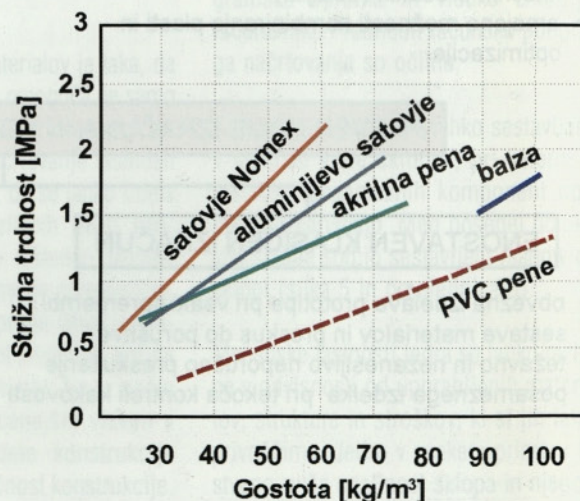
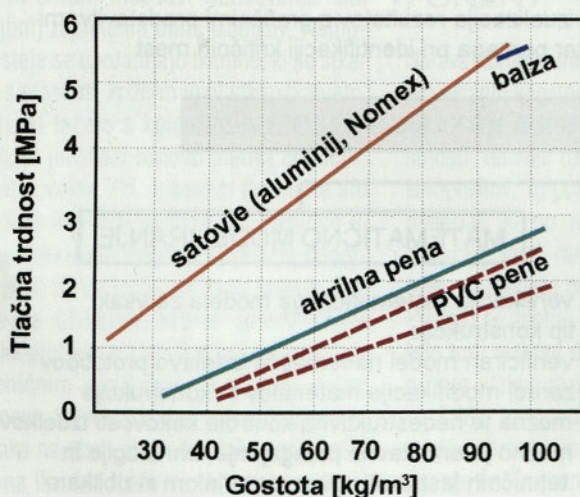
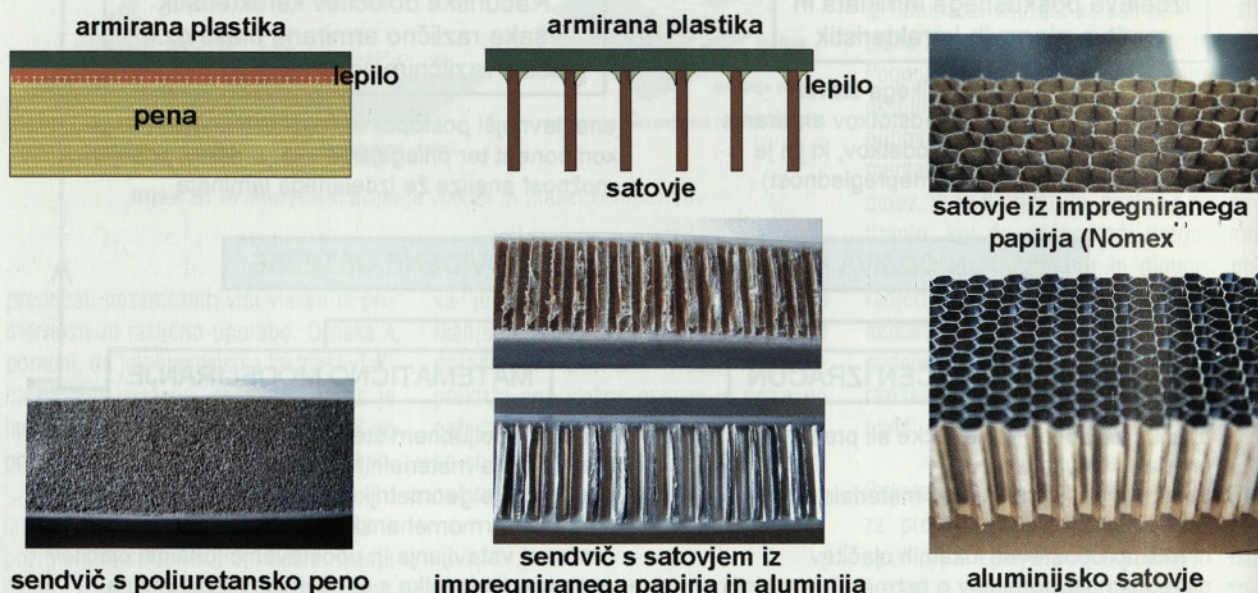
**Slika 6:** Postopki konstruiranja in optimizacije izdelkov iz laminatov (dimenzioniranje, obtežba, temperaturni pogoji, kemijska odpornost in ostale zahteve) [Makarovič, 1988]

nijevim satovjem, ki ima visoko specifično trdnost (razmerje med trdnostjo in maso) in je razmeroma poceni. Pri uporabi kompozitnih plasti armiranih z ogljikovimi vlakni lahko pride do korozijskih problemov, če aluminijevo satovje ni izolirano z ustrezno vmesno lepilno plastjo, ki ovira galvansko korozijo. Satovje Nomex® je sestavljeno iz celic narejenih iz tankega materiala in impregniranih s potapljanjem v epoksidno smolo. Satovje ima visoko specifično tlačno in natezno trdnost (90-99 % votlost), je odporno proti udarcem in fleksibilno, je najlažja vrsta jedra, požarno

odporna in dokaj draga. V glavnem se uporablja v letalski industriji, toda razvijajo se tudi druga področja uporabe. Cenejše vrste satovja so narejene iz termoplastov. Njihove lastnosti so veliko slabše, izdelava kakovostnih elementov pa težavna zaradi problemov, povezanih z lepljenjem kompozitnih plasti na površino satovja.

Poleg satovja se kot jedro uporablja tudi lahek les balza in različne polimerne pene. Jedro iz balze ima visoko tlačno trdnost in je dober toplotni in zvočni izolator. Slaba lastnost je relativno velika

gostota in poroznost, tako da je površino jedra iz balze potrebno pred polaganjem kompozitnih plasti impregnirati. Polimerne pene so veliko lažje od balze. Uporabljajo se pene iz polivinilklorida (PVC), polistirena (PS), poliuretana (PU), akrila (PMMA), stirenakrilonitrila (SAN) in politermida (PEI). PVC pene so uporabne v temperaturnem območju do 80°C, ne vpijajo tekočin in so odporne proti mnogim kemikalijam, imajo uravnotežene statične in dinamične materialne lastnosti ter so najpogosteje uporabljane pene v sestavljenih kompozitnih. Najboljše mehanske lastnosti imajo akri-



Slika 7: Primerjava tlačnih in strižnih trdnosti kompozitnih jeder v odvisnosti od njihove gostote



Ine pene, ki so odporne proti višjim temperaturam kot PVC pene, a so tudi dražje. SAN pene so podobne PVC penam, le da so bolj žilave. PEI pene so požarno bolj odporne kot ostale polimerne pene, prenesejo temperature do 180°C, vendar so drage.

Gostejši materiali, ki jih uporabljajo za jedra, imajo tudi višje strižne in tlačne trdnosti, kar je pomembno upoštevati pri načrtovanju sestavljenih kompozitov. Na sliki 7 je prikazana odvisnost teh dveh mehanskih lastnosti od gostote različnih materialov. Pri lažjih jedrih iz pen so pore večje in je zato poraba polimernih smol za zunanje plasti večja, kar poveča tudi maso celotnega sestavljenega kompozita. Pri satovjih se da doseči zelo majhna zapolnitev odprtini s smolami, če se te dobro prilepijo na tenke stene satovja. Zato je tako sestavljeni kompozit izredno lahek.

Z lepljenjem laminiranih vrhnjih plasti kompozita na jedro se doseže stik, ki prenaša strižne obremenitve in se zato tako sestavljen kompozit obnaša kot enovit material. Z variranjem debeline lahkega jedra se lahko dosežejo različne stopnje



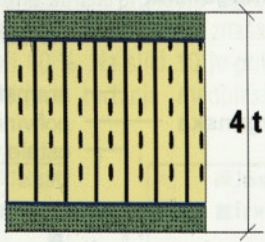
nosilnosti prereza in togosti konstrukcije. V preglednici 3 primerjamo razmerje med upogibnimi nosilnostmi in togostmi kompozitov z različno debelino jedra, ki pa imajo zaradi lahkosti jedra približno enako maso. Vpliv debeline jedra na lastnosti kompozita enostavno ilustrira učinkovitost tako sestavljenega kompozita in njegovo veliko uporabnost za snovanje gradbenih konstrukcij. Paneli, narejeni iz sestavljenih kompozitov imajo veliko upogibno in strižno togost ter majhno maso, kar so ključne lastnosti konstrukcijskih elementov v potresno varnih konstrukcijah.

### BETONSKA ARMATURA

Ena izmed možnih uporab armiranih plastik je tudi izdelava armature za konstrukcijske in nekonstrukcijske betonske elemente, ki ima v določenih primerih prednost pred tradicionalno jekleno armaturo. Na Japonskem so po štiriletnih teoretičnih in eksperimentalnih raziskavah že leta 1993 izdali prva navodila za dimenzioniranje betonskih konstrukcij, armiranih s tovrstno armaturo. Povzetek teh navodil so objavili tudi v angleščini

[Sonobe et al., 1997]. Leta 1996 so v Kanadi [CSA, 1996] izšli predpisi, ki obravnavajo uporabo kompozitne armature pri projektiranju avtocestnih mostov. Leta 1998 so izšla priporočila za dimenzioniranje tudi v ZDA [ACI, 1998]. V Evropi je v zadnjih petih letih raziskavam možnosti uporabe kompozitne armature posvečeno nekaj projektov. Med rezultati teh preiskav je tudi demonstracijski most [Taerwe, 1997].

Na sliki 8 so našteje vrste vlaken, matric in oblike armature za betonske konstrukcije, kot so sistematično obravnavane v japonskih navodilih za dimenzioniranje. Kompozitne palice se zaradi povečanja sprijemne trdnosti z betonom pogosto površinsko obdelajo z nalepljenjem kremenčevega peska, z ovijanjem vlaken ali s profiliranjem površine matrice. Za razliko od jeklenega armiranega prereza mora biti s kompozitnimi palicami armirani prerez predimenzioniran, saj kompozitne palice niso duktilne in je njihova porušitev krhka. Minimalni odstotek armiranja je pogojen s preprečitvijo nateznega pretrga kompozitnih palic. To pomeni, da se pri dimenzioniranju vedno upošteva mehanizem krhke

	 laminat brez jedra	 laminat z jedrom debeline t	 laminat z jedrom debeline 3t
Relativna togost	1	7	37
Relativna upogibna trdnost	1	3,5	9,25
Relativna masa	1	1,03	1,06

Preglednica 3: Vpliv debeline jedra na lastnosti sestavljenega kompozita

Prednosti	Pomanjkljivosti
<p>a) Specifična trdnost (10-15 višja kot pri jeklu)</p> <p>b) Korozijska odpornost</p> <p>c) Elektromagnetna nevtralnost</p> <p>d) Odpornost na utrujanje (pri ogljikovih in aramidnih vlaknih 3</p> <p>e) Nizek koeficient toplotnega raztezka</p>	<p>a) Visoka cena</p> <p>b) Nizek modul elastičnosti (aramid in steklo)</p> <p>c) Nizka porušna deformacija v primerjavi z jeklom</p> <p>d) Dolgotrajna trdnost nižja od trenutne statične</p> <p>e) Možne poškodbe zaradi UV žarčenja</p> <p>f) Vprašljiva trajnost aramida in stekla v vodi</p> <p>g) Neznana trajnost stekla v alkalnem okolju</p> <p>h) Vprašljiva odpornost na utrujanje steklenih vlaken</p>

**Preglednica 4:** Primerjava prednosti in slabosti kompozitne armature za armiranje betona

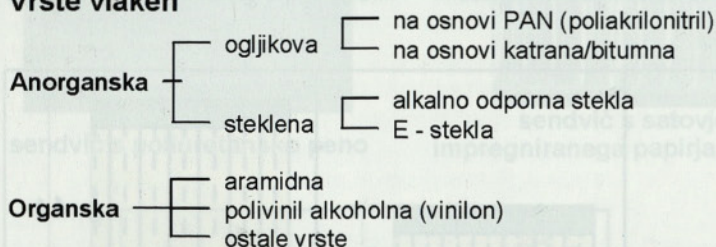
porušitve betona v tlaku bistveno pred izčrpanjem trdnosti kompozitne armature. Pri betonih, ki jih želimo armirati s polimerno kompozitno armaturo, je treba posebno pozornost posvetiti njihovi modifikaciji zaradi zagotovitve kompatibilnosti betona in armature. Modul elastičnosti betona je treba karseda približati

modulu elastičnosti kompozitne armature in zagotoviti dobro sprijemnost armature in betona. V preglednici 4 so našteje prednosti in pomanjkljivosti kompozitne armature, ki jih je treba upoštevati pred odločanjem o njihovi uporabi.

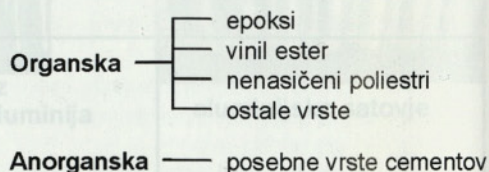
Prednosti armiranih plastik (visoka trd-

nost, razmeroma nizek modul elastičnosti v primerjavi z jeklom, elastično obnašanje) so bolj izkoriščene pri prednapenjanju ali ponapenjanju. Kabli z steklenimi, aramidnimi ali ogljikovimi vlakni imajo do 70 % prostorninskega deleža vlaken. Oblikovani so kot palice s krožnim prerezemom, ploski trakovi, kabli s 7, 19 ali 37 prameni in kot pleteni kabli. Natezne lastnosti kablov so odvisne od vrste vlaken in matrice, prostorninskega razmerja vlaken in matrice, načina izdelave, premera palic (palice večjega premera so razmeroma manj nosilne) in sistema sidranja kablov. Kabli z aramidnimi in ogljikovimi vlakni so primerni za vgradnjo v beton, za razliko od kablov s steklenimi vlakni, ki so manj odporna proti alkalni koroziji. Pri odločitvi o uporabi kablov iz armirane plastike je treba posebej preučiti probleme, ki lahko nastanejo zaradi relaksacije, lezenja, nateznega utrujanja, sprijemnosti med kompozitom in betonom, vnosom sil prednapenjanja in ostalim vplivom, ki se pri kompozitnih kablích kažejo na drug način kot pri jeklenih kablích. Zaradi nižjega modula elastičnosti kompozitnih kablov so nižje tudi

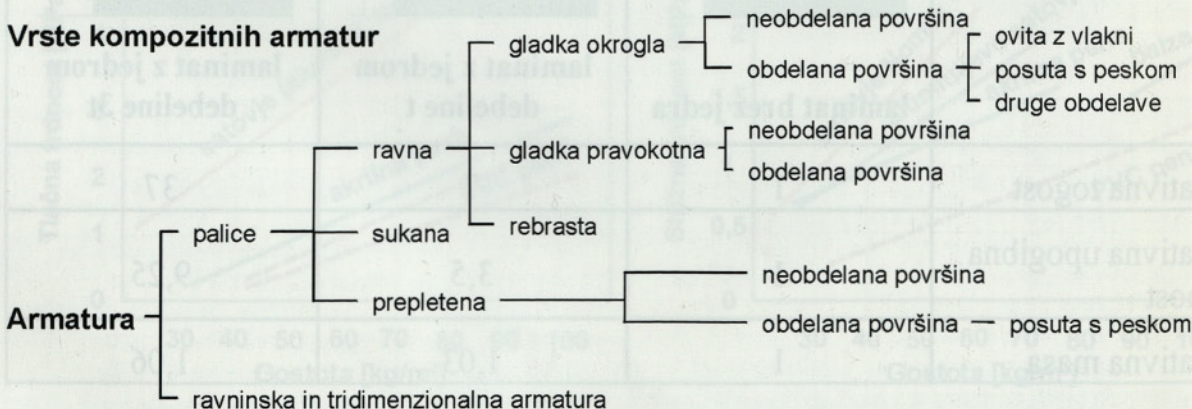
**Vrste vlaken**



**Vrste matičnih veziv**

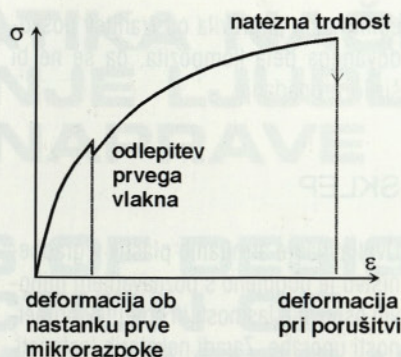


**Vrste kompozitnih armatur**



**Slika 8:** Pregled materialov in vrst kompozitnih armatur za beton [Sonobe et al., 1997]

izgube prednapetja zaradi manjšega vpliva lezenja betona, krčenja in ugrezanja sidrišč v beton. Različne vrste kompozitnih kablov različno relaksirajo. V splošnem je relaksacija kablov s steklenimi in ogljikovimi vlakni velikostnega reda relaksacije jeklenih kablov, relaksacija kablov z aramidnimi vlakni pa večja. Posebno pozornost je treba posvetiti načinom sidranja kablov, ki so praviloma tehnološko bolj zahtevni od sidranja jeklenih kablov.



**Slika 8:**  $\sigma - \epsilon$  diagram laminata z vidno mejo nastanka mikrorazpoke

se začne proces porušitve. Pri projektiranju trajnih konstrukcij iz laminatov je treba upoštevati mejo nastanka prvih mikrorazpok kot odločilno mejo, ki jo je pri projektiranju treba upoštevati kot začetek procesa zmanjševanja nosilnosti armature (Slika 9).

Deformacije, ki jih lahko doseže laminat pred pojavom prvih mikrorazpok, so odvisne od žilavosti in lepilnih lastnosti matičnega materiala. Pri krhkih smolah, kot so npr. določene kvalitete nenasičenih poliestrov, nastanejo mikrorazpoke zelo zgodaj in s tem omejujejo možnost varnega deformiranja laminata. Glede na podatke iz literature se pri nenasičenih poliestrih, armiranih s steklenimi tkaninami, mikrorazpoke pojavijo že pri deformacijah, ki so nekajkrat nižje od deformacij, doseženih pri porušitvi laminata. Epoksidne smole so bolj odporne proti nastanku in razvoju mikrorazpok kot nenasičene poliestrske smole.

Glede na to, da je trdnost laminata odvisna od pretrga vlaken v celoti, mikrorazpoke ne vplivajo takoj na nosilnost laminata. Razpokani laminat vsrka veliko več vlage kot nerazpokani. Zaradi tega se poveča njegova masa, vlaga reagira z nepolimerizirano smolo v žepkih in povzroča odlepljanje vlaken. Posledica je zmanjšanje togosti laminata in znižanje njegovih mehanskih lastnosti.

Odpornost kompozitov proti utrujanju je višja od odpornosti večine kovin. Porušitev zaradi utrujanja je odvisna od po-

stopne akumulacije malih poškodb. Zato je tudi odpornost proti utrujanju kompozitov odvisna od žilavosti matičnega materiala, njegove odpornosti proti nastanku in širjenju mikrorazpok in količine por in drugih napak v materialu, ki so nastale med njegovo izdelavo. Mehanizem porušitve zaradi utrujanja lahko nastopi zaradi pretrga posameznih vlaken znotraj matrice, odlepljanja vlaken od matrice, nastanka in širjenja razpok v matrici in medplastne strižne porušitve.

## TRAJNOST ARMIRANIH PLASTIK

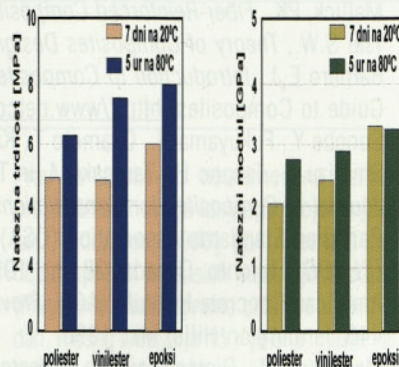
Armirane plastike so izpostavljene različnim vplivom, ki povzročajo njihovo staranje in propadanje. Korozijski procesi so manj izraziti in bolj počasni kot pri mnogih tradicionalnih materialih, a so posledica kemične zgradbe komponent in njihove odpornosti proti različnim agensom. Armirane plastike so tudi občutljive za nastanek in širjenje mikrorazpok ter utrujanje. Pri armiranih plastikah, ki so izpostavljene vlažnemu okolju ali so potopljene v vodo, sta pogost vzrok za pospešeno propadanje tudi pronicanje vode in osmoza. Procese propadanja ovirajo zaščitne plasti na zunanji površinih armiranih plastik (gel-coat) in obdelave armaturnih vlaken (apreture), vendar jih v veliko primerih na daljši rok ne morejo povsem ustaviti.

## RAZVOJ IN VPLIV MIKORAZPOK TER ODPORNOST KOMPOZITA PROTI UTRUJANJU

Razširjeno mnenje je, da je trdnost laminatov enaka njihovi porušni obremenitvi, pri kateri se zlomi matična plastika in pretrgajo vlakna. Vendar pa se že pred to obremenitvijo doseže napetostno stanje pri katerem se matična osnova začne ločevati od vlaken, ki ne potekajo povsem v smeri delujoče obremenitve. Te razpoke se postopoma širijo skozi matrico in se povezujejo v mrežo mikrorazpok. Tako

## PROPADANJE ZARADI VDORA VODE IN ZARADI OSMOZE

Pomembna lastnost sintetičnih smol je njihova odpornost proti vplivom vode, ki se posebej pokaže pri kompozitih v zelo vlažnih okoljih. Vsaka armirana plastika vpija določeno količino vode, kar povečuje njeno maso. Pomembno je, kako absorbirana voda v daljšem času vpliva na lastnosti matrice in na lastnosti stičnih površin med matrico in vlakni. Vinilestrske in nenasičene poliestrske smole so občutljive za vplive vode zaradi vodotopnosti estrov, ki tvorijo molekularno zgradbo. Zato tanki poliestrski laminati po enem letu v vodi lahko izgubijo tudi do 35 % medplastne strižne trdnosti. Pri bolj odpornih epoksidnih laminatih znaša ta izguba okoli 10 %. Na sliki 10 je prikazana primerjava znižanja medplastne



**Slika 9.** Primerjava izgube medplastne strižne trdnosti epoksidnega in poliestrskega laminata s stekleno tkanino pri pospešenem propadanju

strižne trdnosti epoksidnih in poliestrskih laminatov armiranih s stekleno tkanino pri pospešenem propadanju zaradi poto-pljenosti v vodo, segreto na 100°C.

V morskem okolju se skozi laminato giblje majhna količina vodne pare. Pri počasnem prehodu skozi polimerno okolje vodna para reagira z vodotopnimi komponentami polimera in ustvarja pore, zapolnjene s koncentrirano raztopino. V osmotskem ciklu se postopoma povečuje pretok vode skozi tako ustvarjeno polpre-pustno membrano, ki redči raztopino. Voda povečuje pritisk znotraj por do okoli 5MPa, kar povzroča poškodbe. Te so vidne na površini kompozita v obliki ujetih mehurčkov. Znotraj por se lahko nalagajo tudi nečistoče, ki so posledica slabe proizvodnje kompozita kakor tudi molekule estra, ki so se izločile iz poliestrskih ali vinilestrskih makromolekul. Ko se je proces osmotskega propadanja sprožil, je

edini način popravila odstranitev poškodovanega dela kompozita, da se ne bi širilo propadanje.

## SKLEP

Uveljavljanje armiranih plastik v gradbeništvu je pogojeno s poznavanjem njihovih osnovnih lastnosti in omejitev primerne uporabe. Zaradi nekaterih lastnosti, kot so korozijska odpornost in velika specifična trdnost, ponujajo ekonomične in trajne rešitve mnogih konstrukcijskih problemov. Posebej so primerne za popravila in utrditve obstoječih konstrukcij, izpostavljenih zahtevnim vplivom okolja ali izrednim obtežbam, kot je potres. Z razvojem standardov in specifikacij ter metod projektiranja bo uporaba armiranih plastik stalno naraščala.

Pri uporabi armiranih plastik je treba razviti

občutek za posebnosti tega materiala in le te izkoristiti kot njihovo primerjalno prednost glede na tradicionalne materiale. Uspešna in racionalna uporaba armiranih plastik je tudi pogojena z izkoriščanjem njihovih posebnih lastnosti tako, da se ne skušajo obravnavati na enak način kot kateri od bolj znanih tradicionalnih materialov. Pri tem pa se je treba zavedati omejitev, ki jih narekujejo lastnosti materialov, ki tvorijo kompozite. Najbolj osnovne omejitve izvirajo iz upoštevanja temperaturnih območij, v katerih so polimerni kompoziti uporabni. Že pri temperaturah okoli 60°C so mehanske lastnosti nekaterih kompozitov bistveno drugačne kot pri sobni temperaturi [Makarovič, 1988], še posebej pa je lahko problematična požarna odpornost kompozitnih konstrukcij. Zato je pri snovanju kompozitnih konstrukcij in utrditev klasičnih konstrukcij s kompoziti posebej treba načrtovati tudi zaščito pred segrevanjem in požarom.

## LITERATURA

- Lopez-Anido R.A. in Naik T.R., *Emerging Materials for Civil Engineering, State of the Art*, The American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, 2000.
- Jones R.M., *Mechanics of Composite Materials*, 2<sup>nd</sup> Edition, Taylor&Francis, Philadelphia, PA., 1999.
- Mallick, P.K., *Fiber-Reinforced Composites, Materials, Manufacturing and Design*, 2<sup>nd</sup> Edition, M.Dekker, New York, NY, 1994.
- Tsai S.W., *Theory of Composites Design*, 2<sup>nd</sup> Edition, Thikk Composites, Palo Alto, CA., 1992.
- Barbero E.J., *Introduction to Composite Materials Design*, Taylor&Francis, Philadelphia, 1998.
- Guide to Composites, <http://www.netcomposites.com/education.asp>, 2002.
- Sonobe Y., Fukuyama H., Okamoto T., Kani N., Kimura K., Kobayashi K., Masuda Y., Matsuzaki Y., Mochizuki S., Nagasaka T., Shimizu A., Tanano H., Tanigaki M. in Teshigawara M., Design Guidelines of FRP Reinforced Concrete Building Structures, *Journal of Composites for Constructions*, Vol. 1, No. 3, str. 90-11, 1997.
- Canadian Standards Association (CSA), *Canadian Highways Bridge Design Code, Section 16, Fiber Reinforced Structures (CHBDC)*, Toronto, Canada, 28 str., 1996.
- American Concrete Institute (ACI), *Provisional Design Recommendations for Concrete Reinforced with FRP Bars*, Committee 440, Farmington Hills, Mi., 1998.
- Makarovič M., *Dimenzioniranje poliestrskih laminatov*, Raziskovalni projekt PORS 06-1686-227-86, Poročilo ZRMK – IK-FIS, Ljubljana, 1988.
- Taerwe L., FRP Activities in Europe: Survey of Research and Applications, *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3)*, Sapporo, Japan, Vol. 1, pp. 59-74., 1997.

# PROBLEMATIKA NAČRTOVANJA IN IZGRADNJE LJUBLJANSKE ČISTILNE NAPRAVE

## PROBLEMS OF DESIGN AND CONSTRUCTION OF LJUBLJANA WASTE WATER TREATMENT PLANT

STROKOVNI ČLANEK

UDK 628.32 : 628.4 LJUBLJANA

MITJA RISMAL

**P O V Z E T E K** Prispevek obravnava tehnološko »odprto« rešitev potrjenega projekta prve etape visoko obremenjene biološke ljubljanske čistilne naprave s 70 % čiščenjem. Pred 10 leti je bila po tem načrtu zgrajena mehanska stopnja čiščenja z upravno stavbo in ostalo infrastrukturo. Prikazani sta predvideni alternativni rešitvi za dokončno izgradnjo čistilne naprave s 95 % čiščenjem. Analiza obeh rešitev kaže, da je mogoče čistilno napravo dograditi za 50 % ceneje od pogodbene cene za napravo po novem projektu.

**S U M M A R Y** The paper describes the »open« technology of officially confirmed highly loaded plant with 70% efficiency conceived as the first step of the WWTP of the city of Ljubljana. The first phase of this project (mechanical pre-treatment with complementary objects and infrastructure with about 25% of the final value of the 95% efficiency plant) had been constructed 10 years ago and has since been already in operation. The two alternative solutions to complete the WWTP for the final 95% treatment efficiency are described. Both alternatives show that the WWTP could be constructed for about 50% lower price against the contract price of the new project according to which the WWTP should be constructed.

*Avtor:*

Mitja Rismal

### 1. UVOD

Namen tega prispevka je osvetliti dosedanje projektiranje in pojasniti strokovna izhodišča na katerih je prof.dr. J. Kolar že pred letom 1990 zasnoval prvi in uradno potrjeni projekt obravnavane čistilne naprave. Približno 25 do 30 odstotkov naprave po tem projektu je zgrajenih (glavno črpališče, transformator, mehansko čiščenje – maščobnik, peskolov – ter pripadajoči

objekti: obratna stavba, laboratoriji, delavnice, skladišče, garaže, ograja, zemljišče, in ostala infrastruktura) in 10 let v pogonu.

V prispevku so navedeni tudi argumenti, zakaj prvi projekt ni kot obvezo pogojeval predčiščenje industrijskih odpadnih voda (izjema so toksične in odpadne vode z veliko količino maščob), saj v danem primeru to tehnično – ekonomsko ni bilo utemeljeno.

Prav ta strokovno neutemeljena zahteva projektantov novega idejnega projekta [Slokar, Vodopivec, 1990] po obveznem predčiščenju tudi organskih industrijskih odpadkov (Pivovarna Union, tovarna celuloze v Medvodah, mesna industrija itd.) je bila glavni »argument«, da sta mesto in JP VOKA naročila za 11,8 milijarde SIT novo, nesorazmerno drago projektno rešitev, po katerem naj bi se sedaj čistilna naprava dogradila. Izgradnja naprave pa je bila za deset let ustavljena.

## 2. KRATKA UTEMELJITEV IN OPIS PROJEKTNE ZASNOVE DR. KOLARJA

Načrtovanje takšne naprave pomeni velik investicijski napor in trajne obratovalne stroške, obenem pa pomeni naprava prvorazredni ekološki objekt, ki zahteva celostno ekološko in ekonomsko presojo možnih rešitev.

Ekonomski razlogi narekujejo načeloma etapno realizacijo ekoloških rešitev. Za ekologijo pa so pomembne »odprte« rešitve, ki v perspektivi omogočajo dograjevanje čistilnih naprav po novih zahtevah in spoznanjih.

Upoštevale ta načela so se, kolikor je bilo mogoče, upoštevale razmere, ki so odločilne za tehnološko zasnovo in ekonomičnost načrtovane naprave.

- V času načrtovanja čistilne naprave so imele industrijske odplake v odpadni vodi mesta pomemben delež, v devetdesetih letih pa je postala usoda nekaterih velikih onesnaževalcev (Tovarna celuloze v Medvodah) nego tova. Sposobnost industrije za izvedbo lastnega predčiščenja ali za alternativno sofinanciranje skupne centralne čistilne naprave je bila zato vprašljiva. Ker je industrija vezana na mestno kanalizacijo, je potrebno poudariti, da predčiščenje zniža le stroške za biokemično, ne pa tudi za hidravlično obremenitev centralne čistilne naprave.
- Objektivna negotovost o količini in onesnaženju industrijskih odplak je narekovala takšen načrt centralne čistilne naprave, ki bo zagotovil enako stopnjo čiščenja v širokem razponu biokemičnih obremenitev. Znano je, da to omogoča prva adsorpcijska stopnja biološke čistilne naprave s poživiljenim blatom. Specifičnost takšne naprave je, da očisti 70 % onesnaženja enako dobro pri enkratni kot pri

petkratni biokemični obremenitvi [Imhoff, 1999]. V danem primeru to pomeni, da bi načrtovana naprava lahko poleg komunalnih očistila tudi vse organske odplake industrije brez predčiščenja le-teh na industrijskih dvoriščih.

Uspešnost takšne naprave je bila potrjena z enoletnim preizkusom na pilotski čistilni napravi [IZH-FGG, 1989], na katero so se črpale odplake iz glavnega zbiralnika v Zalogu in dovažale odpadne vode tudi iz tedanje tovarne celuloze v Medvodah.

Zaradi opisane lastnosti prve adsorpcijske stopnje je odpadla potreba po predčiščenju organskih industrijskih odplak. Čiščenje teh, če je industrija vezana na mestno kanalizacijo, pa je tudi sicer pogosto cenejše na skupni, mestni čistilni napravi. To je pokazala tudi mednarodna ekspertiza za mariborsko čistilno napravo. Predčiščenje organsko visoko obremenjenih industrijskih odplak ima namreč lahko poleg pozitivnih (manjša poraba energije, če se za predčiščenje uporabijo anaerobni postopki - na primer UASBR) tudi negativne posledice za denitrifikacijo na centralni napravi.

- Po s pilotskim preizkusom dokazani sposobnosti prve (adsorpcijske) visoko obremenjene stopnje čistilne naprave, so bile sprejete naslednje odločitve:

1. V prvi etapi se izgradi visoko obremenjena naprava s 70% čiščenjem, brez predčiščenja organskih odplak industrije;
2. V drugi etapi 95% čiščenje z nitrifikacijo efluenta čistilne naprave;
3. v tretji etapi se dogradi denitrifikacija in defosfatizacija ter po potrebi dezinfekcija efluenta.

## 3. UTEMELJITEV PRVEGA PROJEKTA ZA IZGRADNJO NAPRAVE

S 70 % čiščenjem bi v najkrajšem

možnem času in za relativno nizko ceno pomembno izboljšali kakovost Ljubljani- ce in Save. Z izgradnjo in obratovanjem visoko obremenjene naprave pa bi pridobili tudi dobre podatke za tehnološko in ekonomsko najprimernejšo dokončno dograditev čistilne naprave.

Projekt je upošteval tudi pravilo stroke, da je potrebno dokončno obdelavo in dispozicijo blata zasnovati v povezavi s celostno rešitvijo mestnih odpadkov. Ker rešitev mestnih odpadkov še ni bila dorečena (deponiranje, kompostiranje, zažig itd.), kar tudi danes še ni, je bilo predvideno prehodno odlaganje blata (do končne rešitve mestnih odpadkov) na mestni deponiji. Če se blato pravilno vgrajuje, povečanje deponije zanj ni potrebno. V komprimiranih smeteh je v preostalih prazninah za blato dovolj prostora [Oake, 1991].

Enoletni pilotski preizkus je tudi pokazal, da je bilo mogoče dehidracijo blata rešiti s tedaj velikimi količinami filtrskega pepela iz mestne toplarne (enaka uporaba »fly ash« v ZDA). Opravljena analiza [IZH-FGG, 1990], [Oake, 1991] in strokovna literatura [Collin, 1991] pa dokazujeta, da je mogoče namesto v dragem gnilišču blato stabilizirati in pridobivati bioplin na mestni deponiji. Naprave za energetske izkoriščanje bioplina so bile na deponiji že projektirane in zgrajene. Sama količina bioplina iz blata na deponiji pa je primerljiva s proizvodnjo bioplina v gnilišču. Zato je bila gradnja gnilišča na čistilni napravi, ko tak energetske objekt na deponiji že obstoji, ekonomsko težko dokazljiva.

Deponiranje biološkega blata na deponiji tudi pospešuje metansko vrenje, s čimer se izboljšuje sicer problematična kakovost izcedne vode.

To so na kratko dejstva, po katerih je bila v prvi etapi odločena izgradnja visoko obremenjene čistilne naprave (adsorpcijske faze). Tako bi v najkrajšem možnem času in za primerno ceno odpravili nevzdržno onesnaževanje Ljubljani- ce. Za načrtovanje in dokončno izgradnjo čistilne naprave pa bi z obratovanjem prve stop-

nje pridobili najzanesljivejše podatke.

Tak pristop je potrdila tudi študija [Stanley, 1993], ki jo je MOP leta 1992 naročila pri ameriških izvedencih Stanley Consultants. Ocena načrtovane visoko obremenjene prve stopnje je bila naslednja: ... «However, until the time when full treatment can be funded, the city of Ljubljana should provide the highest level of treatment possible during the interim; i.e. the high rate biological system. From an environmental perspective this provides a significant improvement to treatment of Ljubljanas wastewater. Since only nominal removal rate expected with the high rate biological system will result in a vast improvement in surface water quality of the Ljubljanica and Sava Rivers. Therefore, a positive step towards satisfying the water quality objectives will be taken.»

Na upravičenost takšne odločitve kaže tudi razvoj čistilne tehnike v zadnjih desetih letih (hibridne tehnologije itd.) [Gamperer, 1997], [Boenke, 1999].

Namesto da bi nadaljevali z realizacijo načrtovane visoko obremenjene stopnje, je bila njena izgradnja ustavljena.

#### 4. PRIMERJAVA ALTERNATIVNIH REŠITEV ČISTILNE NAPRAVE

Po desetih letih so o odpadnih vodah iz industrije na voljo bolj zanesljivi podatki. Odpadel je tudi največji onesnaževalca tovarna celuloze v Medvodah.

Zato bomo v nadaljevanju o količini in onesnaženosti odpadne vode uporabili te bolj aktualne podatke.

	Tehnološki parametri	Oznaka	Enote	Količina
1	Sušni dotok na Č.N.	Qs	m <sup>3</sup> /d	40.000
2	Dotok v času dežja	Qd	m <sup>3</sup> /d	120.000
3	Biokemična obremenitev čn	Le	PE	360.000
4	Biokemična obremenitev čn	L	kgBPK <sub>5</sub> /d	21.600
5	Količina dušičnih spojin	Ntot	kg Ntot/d	3.960
6	Količina F	Ftot	kg Ftot/d	720
7	Netopne snovi	TS <sub>O</sub>	KgSS/d	25.920

**Preglednica 1:** Celotna količina in onesnaženost dotoka na čistilno napravo

V tem prispevku sta prikazani dve alternativni rešitvi za končno izgradnjo čistilne naprave, in sicer:

- Etapna izgradnja čistilne naprave po projektu prof.dr. J. Kolarja z visoko obremenjeno I. adsorpcijsko stopnjo.
- Etapna izgradnja čistilne naprave brez visoko obremenjene adsorpcijske stopnje.

Kot osnovo za primerjavo v tem poročilu obravnavanih variant so povzeti naslednji podatki o količini in onesnaženosti dotoka na ljubljansko čistilno napravo. (preglednica 4.1)

#### 4.1 OPIS VARIANTE A Z VISOKO OBREMENJENO ADSORPCIJSKO STOPNJO

##### 4.1.1 Kratek opis visoko obremenjene I. adsorpcijske stopnje čistilne naprave

Visoko obremenjena I. adsorpcijska stopnja (slika 1.) je bila izbrana, kot že omenjeno, ker zagotavlja 70 % učinek [Imhoff, 1999] čiščenja v širokem razponu od enkratne do petkratne obremenitve. Zato ostajajo dimenzije visoko obremenjene prve stopnje po Kolarjevem projektu tudi za nove podatke o odpadni vodi praktično nespremenjene. Za prvo etapo predstavlja adsorpcijska stopnja glede na visok učinek čiščenja najcenejšo rešitev. Brez večjih rekonstrukcij pa je mogoče učinek naprave s širokim spektrom novih

tehnologij povečati na 95 % in več.

Tehnološki parametri in dimenzije posameznih elementov naprave z vgrajenimi količinami betona so podane v preglednicah 2 in 3.

Ker je glavno črpališče z mehanskim čiščenjem že izvedeno, je bilo potrebno za čiščenje vode predvideti le aeracijski bazen (5.167m<sup>3</sup>) in naknadni usedalnik (7.778m<sup>3</sup>). Vsi parametri čistilne naprave so zaradi varnosti določeni za 60 % učinek, čeprav kažejo rezultati pilotske naprave in podatki iz literature na 70 % čiščenje.

Veliko ceno in zahteve v pogonu naprave predstavlja predvideno gnilišče (9.688m<sup>3</sup>) za anaerobno stabilizacijo blata. Zato je bila preučena možnost dehidracije svežega blata s iz toplarne in deponiranje blata na mestni deponiji odpadkov. Zmanjšano prostornino gnilišča pa je mogoče koristno uporabiti za hidrolizotakisanje – proizvedenega blata za pospeševanje denitrifikacije v naslednji stopnji čiščenja.

Kot že rečeno, so preizkusi pokazali, da je mogoče pri mehanski dehidraciji (centrifuge) blata uporabiti namesto koagulantov tedaj velike količine nadležnega filtrskega pepela iz toplarne. Skupna prostornina centrifugirane mase blata in pepela zaradi velike poroznosti pepela ni večja od prostornine samega pepela [IZH-FAGG, 1990]. Ker se je pepel odvažal na deponijo, te zaradi deponiranja blata ni bilo potrebno povečati.

Blato pospešuje metansko presnovo v deponiji in lahko skupaj z mestnimi odpadki v celoti nadomesti in preseže proizvodnjo bioplina v gnilišču. Pogoji pa je, da se pri vgradnji blato dobro premeša z mestnimi odpadki [Colin, 1991]. Pospešeno metansko vrenje izboljšuje kakovost problematičnih izcednih voda iz deponije. Naprave za črpanje bioplina in proizvodnjo električne energije na deponiji so bile načrtovane in so izgrajene.

Navedena dejstva so omogočala opusti-

	Tehnološki parametri	Oznaka	Enote	Količina
1	Sušni dotok na Č.N.	Qs	m <sup>3</sup> /d	40.000
2	Dotok v času dežja	Qd	m <sup>3</sup> /d	120.000
3	Biokemična obremenitev čn	Le	PE	360.000
4	Biokemična obremenitev čn	L	kgBPK <sub>5</sub> /d	21.600
5	Učinek čiščenja	η	%	60
6	Očiščeno onesnaženje	Δ Le	PE	216.000
7	Odtok na II. stopnjo čiščenja	Δ L	kgBPK <sub>5</sub> /d	8.640
8	Specifična obremenitev čn	Ls	kgBPK <sub>5</sub> /kgSS	1,67
9	Koncentracija biol. blata	X	kgSS/m <sup>3</sup>	2,5
10	Starost biološkega blata	Tbb	dan	0,8
11	Indeks biološkega blata	SVI	l/kgSS	70
12	Dnevna količina blata	ΔW	kgSS/d	16.147
13	Poraba kisika	OC	KgO <sub>2</sub> /d KgO <sub>2</sub> /h	10.248 427

**Preglednica 2:** Tehnološki parametri I. visoko obremenjene (adsorpcijske) stopnje

		Prostornina objekta	Premer objekta	Količina vgrajenega	
		m <sup>3</sup>	m	m <sup>3</sup>	
1	Aeracijski reaktor	Va	5.167	37,00	628
2	Usedalnik	Vu	7.778	50,50	987
3	Primarni zgoščevalc	Vzg1	1.615	20,00	97
4	Gnilišče	Vg	9.688	28,00	677
5	Sekundarni zgoščevalc	Vzg2	1.615	20,00	97
6	<b>SKUPAJ</b>		<b>25.862</b>		<b>2487</b>

**Preglednica 3:** Dimenzije visoko obremenjene I. »adsorpcijske« stopnje

tev gradnje dragega gnilišča, s čimer bi se stroški prve etape in celotne končne naprave znatno znižali.

#### 4.1.2. Kratek opis II. in III. stopnje variante A čistilne naprave s nitrifikacijo, denitrifikacijo in defosfatacijo efluenta

Prvo visoko obremenjeno »adsorpcijsko« stopnjo čiščenja je mogoče nadgraditi z nizom tehnologij. Predvidena je bila rešitev, ki prvo stopnjo brez modifikacij v celoti ohrani, druga etapa z nitrifikacijo in denitrifikacijo pa se izvede v novih reaktorjih.

To etapo je mogoče dograditi v dveh ali v eni fazi: v prvi fazi nitrifikacijo, v drugi denitrifikacijo ali oboje v eni fazi istočasno. Funkcionalna shema prve etape in izgradnje obeh stopenj druge etape je na sliki 1.

Obremenitev in tehnološki parametri II. stopnje čistilne naprave so podani v preglednici 4 in dimenzije reaktorjev s pripadajočimi količinami vgrajenega betona v preglednici 5.

Zaradi znane problematike dvostopenjskih naprav v fazi denitrifikacije je za pospešitev denitrifikacije predvidena možnost delnega obkroga odpadne vode mimo prve na drugo stopnjo in uporaba

hidroliziranega »supernatanta« (iz zmanjšane prostornine gnilišča prve stopnje) za denitrifikacijo na II. stopnji [Gampfer, 1997] (hibridna dvostopenjska naprava).

V preglednici 5 so povzeti informativni podatki za izgradnjo in obratovanje čistilne naprave po varianti A. Skupna prostornina reaktorjev znaša 76.834m<sup>3</sup> z 9.803 m<sup>3</sup> vgrajenega betona. Dnevno količino proizvedenega blata je mogoče oceniti 19.567 kgSS/d ali pri ca. 30% sušini na 65 m<sup>3</sup>/d. Potrebno moč za aeracijo pa pri vnosu 3 kgO<sub>2</sub>/kWh pa na ca. 580 kW ali 13.940 kWh/d.

#### 4.2. OPIS VARIANTE B Z DELNO AEROBNO STABILIZACIJO, NITRIFIKACIJO – DENITRIFIKACIJO IN DEFOSFATIZACIJO EFLUENTA (SLIKA2)

Funkcionalna shema te variante je na sliki 2. Ker pred desetimi leti prva visoko obremenjena stopnja s 70 % čiščenja ni bila zagrajena, je sedaj mogoče izgraditi čistilno napravo s podaljšano aeracijo oziroma z nitrifikacijo in denitrifikacijo efluenta brez prve visoko obremenjene stopnje.

V preglednicah 6 in 7 je za to varianto podana obremenitev, tehnološki parametri čiščenja in dimenzije reaktorjev in naknadnih usedalnikov, ki so kot pri prvi varianti, predvideni v statično in hidravlično ugodni krožni obliki.

Tehnično-ekonomska utemeljenost takšne tehnologije je dokazana na mnogih primerih tudi v svetu [Janssen, 1996].

V primerjavi z varianto A je skupna prostornina bazenov za ca. 30 % in poraba energije za aeracijo za ca. 80 % večja (razlika v skupni porabi energije je nekaj manjša, ker je ostala poraba energije pri prvi varianti večja).



## 5. SKLEPI

V preglednici 8. so povzeti karakteristični parametri obeh obravnavanih variant čiščenja.

Iz slike 1 je razvidno, da bi se zgrajena prva stopnja brez rekonstrukcije lahko vključila v obe v tem prispevku obravnavni rešitvi. V primeru osvojitve variante B bi bilo potrebno prvi stopnji dodati le biološki reaktor s prostornino 18.000m<sup>3</sup>.

Podrobnejša analiza investicijskih in pogonskih stroškov bi pokazala, katera od variant A ali B je v danem primeru ugodnejša.

Takšna analiza (enako kot dokazuje mariborska čistilna naprava in mednarodne izkušnje) bi tudi pokazala, da anaerobna stabilizacija blata (gnilišče) pri nizko obremenjenih čistilnih napravah z nitrifikacijo, denitrifikacijo in defosfatizacijo nima ekonomskih prednosti, povečuje pa zahtevnost obratovanja.

Enako velja za rešitev končne obdelave in dispozicije blata, ki bi morala biti obravnavana v sklopu celostne rešitve odpadkov mesta. Ker ta še ni dorečena, je za prehodno obdobje najprimernejše deponiranje dehidriranega blata na mestni deponiji. Ob pravilni vgradnji blata se prostornina deponije praktično ne poveča.

S presnovo blata so povečane količine bioplina na deponiji večje, kot bi jih pridobili na gnilišču. To je dodaten razlog, da gradnja gnilišča v energetskem pogledu ni utemeljena.

Če novi projekt, po katerem naj bi se sedaj izgradila ljubljanska čistilna naprava, presojamo v luči podatkov iz tega prispevka, je mogoče ugotoviti predvsem naslednje:

1. Podpisana pogodbeni cena za dograditev čistilne naprave za 360.000 PE znaša 11,8 milijarde SIT.

Če ocenimo, da je vrednost betonskih in zemeljskih del za izgradnjo predvi-

		Prostornina objektov	Premer objektov	Količina vgrajenega	
		m <sup>3</sup>	m	m <sup>3</sup>	
1	Skupna prostornina bioloških reaktorjev	V	22.476	3x45,00m	3.648
2	Anaerobni reaktorji za defosfatizacijo	Vp	-3333		
3	Anoksični reaktorji za denitrifikacijo	Vdn	-7.680		
4	Aerobni reaktorji za nitrifikacijo	Vn	-11.463		
5	Sekundarni usedalniki	Vu	27.780	3x49,30m	2.880
6	Sekundarni zgoščevalci blata	Vzg	716	13,51	
7	<b>SKUPAJ</b>		<b>50.972</b>		<b>6.749</b>

**Preglednica 4:** Dimenzije II. stopnje variante A, nitrifikacija - denitrifikacija - defosfatizacija

	Prostornina	beton	kisik	Blato
	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	kgOC/h	kgSS/d
I. ETAPA	25.862	2.487	461	12.393
II. ETAPA	50.972	7.316	1.281	7.163
<b>SKUPAJ</b>	<b>76.834</b>	<b>9.803</b>	<b>1.742</b>	<b>19.567</b>

**Preglednica 5:** Povzetek objektov variante A za I. in II. etapo čistilne naprave

	Tehnološki parametri	Oznaka	Enote	Količina
1	Sušni dotok na Č.N.	Qs	m <sup>3</sup> /d	40.000
2	Dotok v času dežja	Qd	m <sup>3</sup> /d	120.000
3	Biokemična obremenitev čn	Le	PE	360.000
4	Biokemična obremenitev čn	L	kgBPK <sub>5</sub> /d	21.600
5	Učinek čiščenja	η	%	95
6	Očiščeno onesnaženje	ΔLe	PE	342.000
7	Očiščeno onesnaženje	ΔL	kgBPK <sub>5</sub> /d	20.520
8	Specifična obremenitev čn	Ls	kgBPK <sub>5</sub> /kgSS	0,06
9	Koncentracija biol. blata	X	kgSS/m <sup>3</sup>	5
10	Starost biološkega blata	Tbb	dan	14,7
11	Indeks biološkega blata	SVI	l/kgSS	100
12	Dnevna količina blata	ΔW	kgSS/d	22.810
			KgO <sub>2</sub> /h	3.165
13	Poraba kisika	OC	KgO <sub>2</sub> /d	75.960

**Preglednica 6:** Obremenitev in tehnološki parametri variante B čistilne naprave z delno aerobno stabilizacijo blata

denih reaktorjev le ca. 20 % celotne cene čistilne naprave, stroški za nji-

hovo izvedbo (beton 10.995m<sup>3</sup>, zemeljska dela ca. 50.000m<sup>3</sup>) na ca. 1

			Prostornina objektov m <sup>3</sup>	Premer objektov m	Količina vgrajenega m <sup>3</sup>
1	Skupna prostornina bioloških reaktorjev	V	70.506	3x78,60m	7.548
2	Anaerobni reaktorji za defosfatizacijo	Vp	-3333		
3	Anoksični reaktorji za denitrifikacijo	Vdn	-30.675		
4	Aerobni reaktorji za nitrifikacijo	Vn	-36.498		
5	Sekundarni usedalniki	Vu	27.780	3x54,00m	3.447
6	Zgoščevalec blata	Vzg	2.281	24,10m	
7	SKUPAJ		100.567		10.995

**Preglednica 7:** Dimenzije reaktorjev variante B

milijardo, potem cena čistilne naprave ne bi smela biti večja od ca. 5 milijard SIT.

2. Realnost takšne cene ca. 5 milijard SIT dokazuje primerjava s ceno takšne čistilne naprave v Nemčiji [Wagner, 2000] in s celjsko čistilno napravo, ki je sedaj v gradnji.

Po statističnih podatkih v navedenem viru stane v Nemčiji enaka naprava (360.000 enot) 43,76 milijona EUR ali 9,86 milijarde SIT. Ker pa je po vrednosti 25 % do 30 % ljubljanska naprava že zgrajena [Abwassertech-

nik, 1978], v Nemčiji pogodbeno cena za dograditev te naprave ne bi bila večja od 7,4 milijarde SIT, kar je za 4,4 milijarde SIT manj od omenjene pogodbene cene 11,8 milijarde SIT. To pa ni vse.

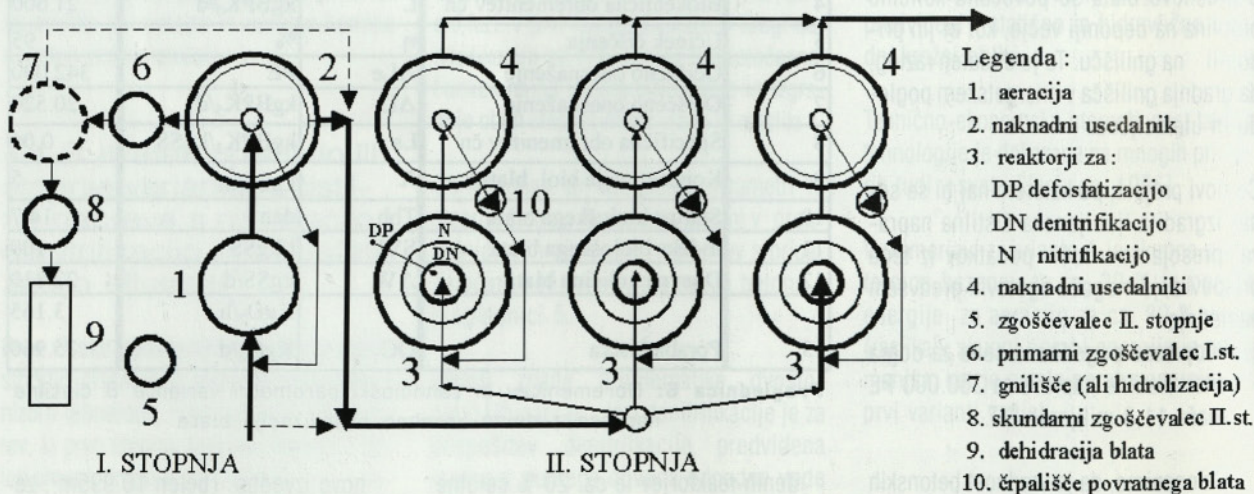
Primer celjske čistilne naprave in drugi podatki pa dokazujejo, da je ob strokovnem investitorju mogoče v Sloveniji zgraditi enako čistilno napravo mnogo ceneje kot v Nemčiji. Celjska naprava s 85.000 enotami, ki je v gradnji, stane z DDV 9,05 milijona EUR, kar je 48 % ceneje, kot bi stala po istem viru [Wagner, 2000] v Nem-

čiji (17,4 milijona EUR). Ker gre pri obeh napravah za enako kakovost čiščenja, ni razloga, da ne bi bilo mogoče tudi ljubljanske čistilne naprave dograditi za 48 % ceneje, kot bi stala v Nemčiji.

Realna cena za dograditev čistilne naprave je torej: 5,13 milijarde SIT ali za celih 6,67 milijarde SIT manj od cene v podpisani pogodbi 11,8 milijarde SIT.

3. Razlika ni samo v ceni. Po v tem prispevku opisanih in v prvem načrtu predvidenih rešitvah je mogoče čistilno napravo zgraditi na enkrat manjši površini. Dodatni nakup površin za čistilno napravo torej ne bi bil potreben.
4. Poleg nesorazmerno visoke cene je projekt neracionalen tudi v rabi prostora, saj zasede projektirana naprava več kot enkrat večje površine od v tem prispevku obravnavanih rešitev.
5. Če potrjenega in mednarodno revidiranega projekta prof.dr. Kolarja za prvo stopnjo čistilne naprave s 70 % čiščenjem pred desetimi leti ne bi zavržli, bi bila naprava že pred leti zgrajena. Ljubljana in Sava pa bi bili že več let čisti.

### VARIANTA "A"

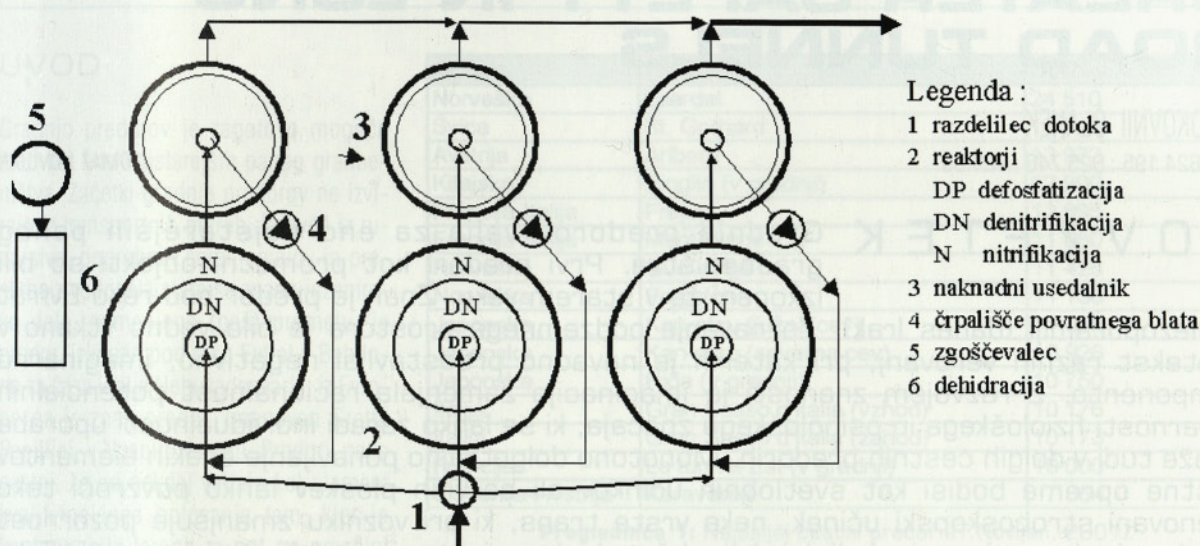


**Slika 1a:** Varianta A izvedbe čistilne naprave

	Prostornina reaktorjev	Prostornina betona m <sup>3</sup>	Poraba kisika v OC kgO <sub>2</sub> /h	Proizvodnja blato kgSS/d
VARIANTA I.	76.834	9.809	1.742	23.310
VARIANTA II.	100.567	10.995	3.165	22.810

Preglednica 8: Karakteristični parametri variante A in variante B

### VARIANTA "B"



#### Legenda :

- 1 razdelilec dotoka
- 2 reaktorji  
DP defosfatizacija  
DN denitrifikacija  
N nitrifikacija
- 3 naknadni usedalnik
- 4 črpalnice povratnega blata
- 5 zgoščevalec
- 6 dehidracija

Slika 1b: Varianta B izvedbe čistilne naprave

## LITERATURA

Abwassertechnik, Band III, stran 647-659, 1978.

Boenke, B., Vassiliki, Brautlet, P., Leistungs und Kostenvergleich fuer ein – und zweistufige Belebungsverfahren, Korespondenz Abwasser (45) Nr.9, 1999.

Colin, O.P.J., Newman, Y.J., Puolanne, Recent developments in sewage sludge processing, Commission of the European Communities, the National Board of Waters and the Environment, Helsinki, F. Elsevier Applied Science, 1991.

Gamperer, T., Sewage Treatment & Reuse, Enhanced 2-stage activated sludge, World Water, Volume 20 Issue 3, 1997.

Imhoff, Taschenbuch der Staedtentwaesserung, 29. izdaja, stran 195, slika 5,48, 1999.

IZH-FAGG, št.D-161, Poročilo o rezultatih preizkusa čiščenja odpadnih vod Ljubljane na pilotski čistilni napravi, 1989.

IZH-FAGG Poročilo o poteku raziskovalne naloge za uporabo filtrskega pepela na Č.N. Ljubljane, št.116 D/222-23, 1990.

Janssen, P.M.J., van der Roest, H.F., Eggers, E., The Carrousel and the Carrousel-2000 systems: a guarantee for total nutrient removal, European Water Pollution Control, Volume Nr.2. str. 10, 1996.

Oake, R., Sludge disposal – the options, Thames Water Utilities Limited, 1991.

Slokar, M., Vodopivec R., Idejni projekt: Primerjalna Študija čiščenja komunalnih industrijskih odpadkov mesta Ljubljane, Hidroinženiring, 1990.

Stanley Consultants, Water and Wastewater – Ljubljana, Slovenia Environmental Project, Feasibility study, Volume 8, 1993.

Wagner, W., Stellenwert der Nutzungsdauer von Abwasseranlagen unter Kostengesichtspunkten, Wasserwirtschaft Abwasser Abfall 47. Jahrgang, Nr.7., stran 1036, 2000.

# MOŽNOSTI IZBOLJŠAVE AMBIENTA ZA VEČJO VARNOST V DOLGIH CESTNIH PREDORIH

## IMPROVEMENTS OF THE AMBIENCE FOR ACHIEVING GREATER SAFETY IN LONG ROAD TUNNELS

STROKOVNI ČLANEK

UDK 624.195 : 625.746 : 725.95

TOMAŽ NOV LJAN

**P O V Z E T E K** Gradnja predorov velja za eno najstarejših panog gradbeništva. Prvi predori kot prometni objekti so bili izkopani že v starem veku. Znan je predor pod reko Evfrat v Mezopotamiji (danes Irak). Zaznavanje podzemnega prostora je bilo vedno vtakano v kontekst raznih verovanj, pri katerih je navadno predstavljal negativno, imaginarno komponento. Z razvojem znanosti je imaginacijo zamenjala racionalnost potencialnih nevarnosti fiziološkega in psihološkega značaja, ki se lahko zaradi individualnosti uporabe izraža tudi v dolgih cestnih predorih. Monotono dolgotrajno ponavljanje enakih elementov cestne opreme bodisi kot svetlobnih učinkov ali barvnih ploskev lahko povzroči tako imenovani stroboskopski učinek, neke vrste trans, ki pri vozniku zmanjšuje pozornost do dogajanja v njegovi okolici in/ali občutek dezorientacije in/ali utesnenosti. Tako psihološko stanje ima lahko v primerih, ko je potrebna hitra in racionalna reakcija na potencialno nevarno prometno situacijo izrazito negativno vlogo. Kot alternativa že izvedenim korekcijskim posegom v ambienih nekaterih evropskih cestnih predorov bo podan predlog vizualne izboljšave longitudinalno orientiranega podzemnega prostora. Z uporabo principov fraktalne geometrije bodo naravni vzorci eksteriera s pomočjo razsvetljave in/ali poslikave transformirani v abstraktne grafične zapise geometrijskih ritmov v "interieru" predora, kar naj bi udeležene v prometu zaznaval predvsem s t. i. perifernim vidom.

**S U M M A R Y** The construction of tunnels counts as one of the oldest branches of civil engineering. The first tunnels as traffic structures were excavated already in antiquity. Well-known is the tunnel under the river Euphrates in Iraq. The perception of underground space has always been entwined into a context of various beliefs, representing in it a negative, imaginary element. With the development of science, imagination is replaced by the rational understanding of potential dangers of physiological and psychological nature, which because of the individuality of users are possibly most clearly manifested in long road tunnels. Monotonous protracted repetition of the same elements of road equipment, whether as light effects or as solid colour surfaces, may cause the so-called stroboscopic effect, a state of trance, causing the driver to be less attentive to what is happening in its surroundings, as well as a feeling of disorientation and/or oppression. Such a psychological condition may play a decidedly negative role at times when a quick and rational reaction to a potentially dangerous traffic situation is required. As an

alternative to corrective interventions, already applied in the environment of some European road tunnels, this paper offers a proposal for the visual improvement of longitudinally oriented underground space, with the application of the principles of fractal geometry. These transform the natural patterns of the exterior with the help of lighting and/or painting into abstract graphic records of geometrical rhythms in the »interior« of the tunnel, which the traffic participant perceives mainly through the so-called peripheral vision.

*Avtor:*

dr. Tomaž Novljan, u.d.i.a., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, Ljubljana.

## UVOD

Gradnjo predorov je zagotovo mogoče šteti kot eno najstarejših panog gradbeništva. Začetki gradnje predorov ne izvirajo iz transportnih potreb, temveč iz rudarstva, pogrebnih ceremonialov in preskrbe z vodo. Najstarejše znano inženirsko delo, namenjeno (peš) prometu, je predor, izkopen pod reko Evfrat v Babilonu za časa kralja Nebukadnezarja; iz Evrope pa je znan predor, imenovan Grotta Posillipi, v Neaplju v Italiji. Predori, ne le cestni, že od nekdaj veljajo kot element kvalitetnejšega potovanja tam, kjer je konfiguracija terena za pot po površini prezahtevna ali kot bližnjica med dvema točkama na površini zemlje. Zato ni naključje, da je bil prvi cestni predor v Evropi zgrajen oziroma izkopen leta 1707 v Alpah, ki so predstavljale glavno oviro prometnih tokov takratne Evrope. Naslednji predor je bil izkopen šele skoraj 100 let kasneje, leta 1805 na cesti proti prelazu Simplon. Razvoju prometnega omrežja v 19. stoletju je sledila gradnja predvsem železniških, v začetku 20. stoletja pa tudi cestnih predorov.

Danes imajo cestni predori, nekateri merijo v dolžino tudi več kot 10 km, funkcijo primarne povezave glavnih prometnih vozlišč tako za osebni kot tudi za tovorni promet.

Izvedba sodobnega cestnega predora predstavlja skupek pasivnih in aktivnih ukrepov, ki naj bi pri uporabi omogočili čim boljši pretok prometa ter čim večjo varnost glede na potencialne nevarnosti. Te

Država	Predor	Dolžina v m
Norveška	Laerdal	24 510
Švica	St. Gothard	16 918
Avstrija	Arlberg	13 972
Kitajska	Pinglin (v gradnji)	12 900
Francija-Italija	Frejus	12 895
Francija-Italija	Mont-Blanc	11 660
Norveška	Gudvanga	11 428
Norveška	Folgefonn	11 130
Japonska	Kan-etsu (južna cev)	11 055
Japonska	Kan-etsu (severna cev)	10 926
Japonska	Hida (v gradnji)	10 750
Italija	Gran Sasso d'Italia (vzhod)	10 176
Italija	Gran Sasso d'Italia (zahod)	10 173
Francija	Le tunnel Est (v gradnji)	10 000
Slovenija-Avstrija	Karavanke	7 864

**Preglednica 1:** Najdaljši cestni predori [T. Novljan, 2001].

so specifične za podzemne ambiente, ki so prostorsko omejeni predvsem glede možnosti pobega v primeru požara, vdora vode, eksplozije, prometne nesreče (lahko povzroči vse naštet). Zato velja pri opremitvi predorskega prostora enaka pozornost tako prometnim oznakam na in ob cestišču kot tudi oznakam in napravam za primer nujne: alarmna stikala, telefoni, televizijske kamere, varnostne svetilke, izogibalščiča, zasilni izhodi, gasilni aparati, protipožarni sistemi.

Psihološka obremenitev uporabnikov dolgih predorov (predvsem tistih za volanom) temelji na predpostavki človekovega odnosa do podzemnih prostorov. Pojmovanje podzemlja je bilo tako pri vzhodnih kot zahodnih starih kulturah povezano z domišljijo, praznoverjem in smrtjo (starogrški Had, kjer prebivajo mrtvi, kitajski princip jin in jang, kjer ženski jin simbolizira skrivnostnost zemlje, afriški Wata, ki vlada podzemlju ipd.). Naslednji

vzrok za nelagodje v podzemnem prostoru je zaprtost in s tem pomanjkanje možnosti orientacije. Človek je v zgodovini na površju vedno znal poiskati določene naravne ali grajene točke kot konstante (nebesna telesa, morfološke dominante ipd), po katerih se je lahko zanesljivo orientiral in določil svoj položaj. Strah pred zaprtimi prostori (klavstrofobija) predstavlja za nekatere uporabnike v predoru dodatno obremenitev. Velik problem predstavlja tudi slabo prezračevanje predorske cevi, ki ima na psiho fizično stanje uporabnikov še dodaten vpliv.

## VPLIVI NA VARNOST V DOLGIH CESTNIH PREDORIH

Največjo nevarnost za uporabnike predorov, ne le cestnih, predstavlja izbruh požara in posledično nastajanje dima ter strupenih plinov. Stopnja nevarnosti je se-

T. NOVJAN: Možnosti izboljšave ambiena za večjo varnost v dolgih cestnih predorih

veda odvisna od več dejavnikov, kot npr. časa izbruha, mesta izbruha, smeri širitve zdušljivih plinov, vzroka izbruha, količina in vrsta snovi, ki gori, vzdrževanosti varnostnih naprav ipd.

- tesnoba in prevelika napetost lahko privede do pretirane in nepravilne reakcije, tudi panike v primeru izredne situacije,

- stroboskopski učinek lahko privede do neke vrste transa = nesposobnosti za pravočasno odreagirane v izredni situaciji.

Tehnične varnostne ukrepe v cestnih predorih je glede na vizualno percepcijo mogoče razdeliti na dve glavni skupini:

- preventivne, med katere sodijo: kakovost osvetlitve, različna jakost osvetlitve (na začetku oz. koncu predora, v osrednjem delu, ponoči, podnevi), kakovostna obdelava vozniških in ostalih površin, vidnost cestnoprometne in varnostne signalizacije, vidnost naprav in napeljav, ki se uporabijo v primeru nuje ipd.

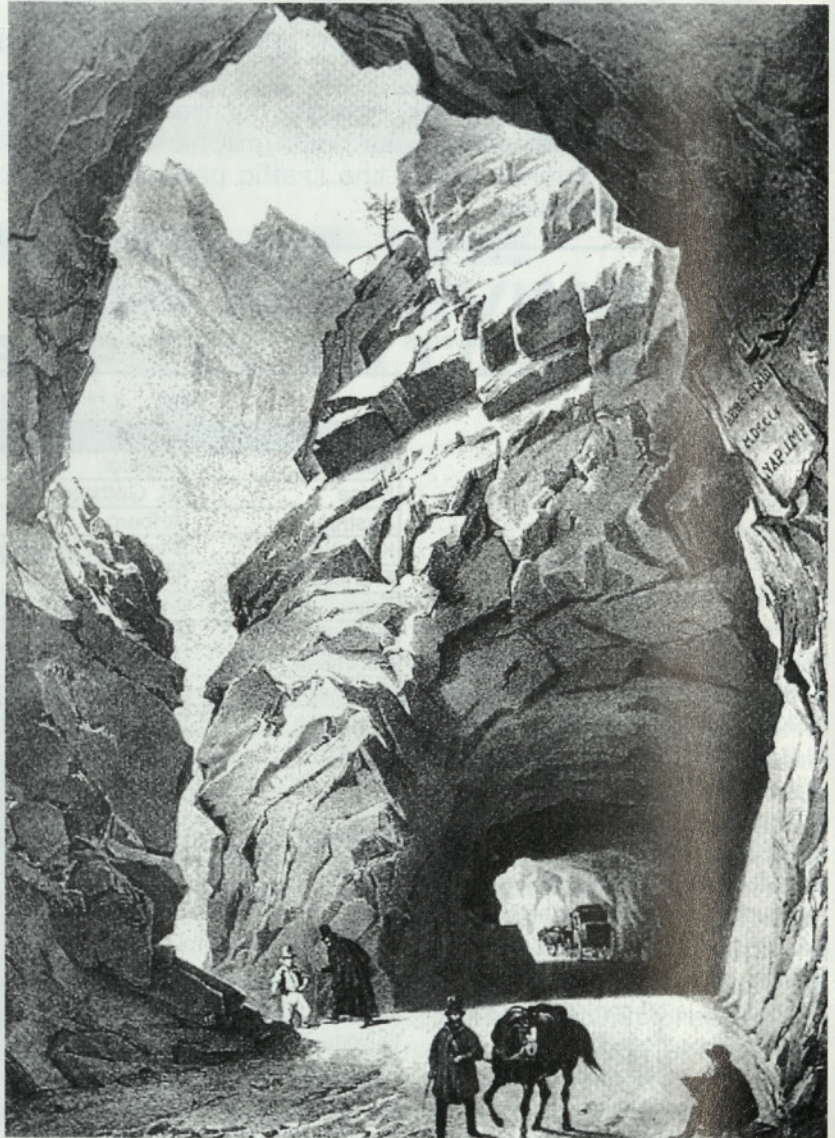
- kurativne, med katere sodijo vsi tehnični ukrepi in brezhibno delujoče naprave, napeljave in prostori, ki se v primeru nuje dejansko uporabijo.

## POIZKUSI ZA IZBOLJŠANJE AMBIENTA V PREDORU

V smislu prometnovarnostne preventive prometa v predoru je bilo v zadnjih nekaj letih (predvsem po nesreči v predoru Mt. Blanc) storjenega že marsikaj, še posebej v smislu tehničnih izboljšav. Poleg tehničnih t. i. "trdih" ukrepov pa obstaja tudi možnost uporabe t. i. "mekkih" ukrepov, ki lahko pozitivno vplivajo na podzavest uporabnikov predora med ali že pred uporabo:

- predhodne informacije o samem predoru (največja dopustna hitrost, dolžina, čas vožnje, podatki o gradnji, morebitne zanimivosti, ...)

- informacije "hic et nunc" (temperatura, vidljivost, že prevožena razdalja, preostala razdalja, ...)



**Slika 1:** Predor na cesti proti prelazu Simplon.

- interni radijski kanal s pomirjujočo glasbo in prometnimi informacijami, interni GPS, ...

- uporaba barvnih pigmentov in/ali barvne svetlobe na stenah ali stropu predora, ki artikulirajo tehnično čiste, a pogosto monotone ploskve in ritme

V državah, kjer je cestnih predorov veliko in je s tem tudi potencialna nevarnost nesreč v predoru velika, so bile napravljene študije in že izvedeni nekateri korekcijski posegi, ki naj bi interier predora napravili likovno kakovostnejši, zani-

mivejši in (s tem) tudi bolj varen. Med najbolj znanimi so francoski in norveški projekti in izvedbe. Temeljijo predvsem na uporabi dveh glavnih nosilcev ploskovne likovne govornice: barvnih pigmentov in barvnih svetlob. V nekaterih primerih je bil uporabljen tudi relief.

V predoru La Defence v Parizu je uporabljena enostavna črno-rumeno progasta poslikava pločnikov, ki se nadaljuje na obeh stenskih ploskvah. Študija vpliva progastih in podobnih vzorcev, ki je bila izdelana na University of Minnesota, ZDA, je dokazala, da vertikalno poudarjeni vzorci nudijo voz-

## T. NOV LJAN: Možnosti izboljšave ambiena za večjo varnost v dolgih cestnih predorih

Leto, dan	Ime in dolžina predora	Lokacija, država	Vozilo, kjer je požar nastal	Najverjetnejši vzrok požara
1949	Holland 2 550 m	New York ZDA	tovornjak, naložen z 11t ogjikovega disulfida	padec tovora s tovornjaka in eksplozija
1974	Mont Blanc 11 600 m	meja Francija-Italija	tovornjak	motor
1976	križišče BP-A6 430 m	Pariz Francija	tovornjak, naložen s 16t poliesterskega filma v	velika hitrost
1978	Velsen 770 m	Velsen Nizozemska	štirje tovornjaki dve osebni vozili	veržno trčenje
1979	Nihonzaka 2 045 m	Šizuoka Japonska	štirje tovornjaki dve osebni vozili	veržno trčenje
1980	Kajiwara 740 m	Japonska	tovornjak, naložen s 3600l barve	trčenje v steno predora in prevrnitev
1982	Caidecott 1 028m	Oakland ZDA	osebno vozilo, avtobus in	veržno trčenje
1983	Pecorina Galleria 662 m	Genes Savone italija	tovornjak, naložen z ribami	veržno trčenje
1986	L'Arme 1 105 m	Nica Francija	tovornjak s prikolico	zaviranje pri veliki hitrosti
1987	Gumefens 343 m	Bern Švica	tovornjak	veržno trčenje
1990	Roldal 4 656 m	Roldal Norveška	VW kombi s prikolico	
1990	Mont Blanc 11 600 m	meja Francija-Italija	tovornjak, naložen z 20t bombaža	motor
1993	Serra Ripoli 442 m	Bolonia Italija	osebni avtomobil in tovornjak, naložen s svitki	trčenje
1993	Hovden 1 290 m	Hoyanger Norveška	motorno kolo in dva osebna avtomobila	veržno trčenje
1994	Huguenot 3 914 m	Južna Afrika	avtobus s 45 potniki	okvara na električni napeljavi
1995 10. apr	Pfander 6 719 m	Avstrija	tovornjak s prikolico	trčenje
1996 18. mar	Iscia delle Femmine	Palermo Italija	tovornjak-cisterna s utekočnim plinom in	veržno trčenje
1999 24. mar	Mont Blanc 11 600 m	meja Francija-Italija	tovornjak, natovorjen z margarino in moko	puščanje nafte, motor
1999 29. maj	Tauern 6 401 m	A10 Salzburg-Spittal Avstrija	tovornjak, naložen z barvo	veržno trčenje štirih osebni avtomobilov in
2000 14. jul	Seljestad 1 272 m	E134 Drammen- Haugesund Norveška	ogjenj se je vnel na enem od osebni avtomobilov in se razširil na vozila v bližini	veržno trčenje petih osebni avtomobilov in dveh tovornjakov s prikolico
2001 28. maj	Prapontin 4 409 m	A32 Torino-Bardonecchia Italija		
2001 6. avg	Gleinalm 8 320 m	A9 Graz Avstrija	osebni avtomobil	čelno trčenje tovornjaka in osebnega avtomobila
2001 24. okt	St. Gotthard 16 918 m	A2 Švica	tovornjak	

**Preglednica 2:** Najpogostejši vzroki prometnih nesreč v predorih  
[ [http://home.no.net/lotsberg/link\\_2.html](http://home.no.net/lotsberg/link_2.html)].



**Slika 2:** Prenovljen ambient predora Mt. Blanc.

[[http://www.atmb.net/cdrom/prev\\_et\\_secu/html/detect.htm](http://www.atmb.net/cdrom/prev_et_secu/html/detect.htm)]

niku informacijo o trenutni hitrosti in ukri-  
vljenosti predora, horizontalno poudarjeni  
vzorci pa o vzdolžnem nagibu ceste. Kon-  
trastno pobarvani vertikalni pasovi na ste-  
nah so bili uporabljeni tudi kot element  
umirjanja hitrosti vozil, predvsem na uvozu  
v predorsko cev, saj se v nasprotnem pri-  
meru (velike hitrosti) tak vzorec perceptiv-  
no odraža v nelagodnem občutku mimo vo-  
zečega uporabnika. Tovrstna aplikacija je  
bila izvedena leta 1976 v predoru Saint  
Claud v bližini Pariza. Barvne ploskve so bile  
uporabljene tudi za označevanje območij  
varnostnih naprav (gasilnih aparatov, zasi-  
lnih izhodov ipd.) ter za označevanje  
prevožene in preostale dolžine predora, kot  
neke vrste občestni kamni. Poskusi dodat-  
ne izboljšave predorskega interiera so bili  
napravljene z uporabo različnih likovnih  
motivov, ki so velikokrat spominjali na  
značilnosti površja (v geomorfem, zoo-  
morfem, fitomorfem pogledu). Znan je  
francoski primer dvocevne predora Pra-  
do-Carenage pri mestu Marseilles. Motivi  
poslikave stene cevi, ki vodi proti obali, so  
"morski", v modrih in sivo belih tonih,  
medtem ko v sosednji cevi prevladujejo  
"celinski" motivi v otenkih zelene barve.

Ob gradnji 25 km dolgega cestnega pre-  
dora Laerdal na Norveškem je posebna stro-  
kovna skupina SINTEF oblikovala lestvico  
vplivov na ugodnost oziroma neugodnost  
počutja v dolgem cestnem predoru. S tem  
v zvezi je bila organizirana tudi t. i. delav-  
nica, na kateri so sodelovali poleg arhitek-  
tov tudi strokovnjaki za osvetljevanje in  
dramski svetovalci. Ugotovljeno je bilo, da  
so svetloba, velikost prostora in dobra  
prezračevanost vodilni atributi, ki sovpli-  
vajo na psiho uporabnika predora. Med sle-  
dnjimi je bila svetloba opredeljena kot  
najpomembnejša, saj je z njeno pomočjo  
mogoče doseči različne iluzionistične  
učinke - od običajne osvetlitve zasilnega  
izhoda do optične povečave notranjega  
prostora. Na 2. mes-tu je bila možnost  
orientacije v predoru, medtem ko so, po  
ugotovitvah omenjenega seminarja, likov-  
na dekoracija, estetika in prijetnost dokaj  
na dnu lestvice. Za večjo humanizacijo  
predorskega prostora so bili omenjeni  
celo hortikulturni posegi.

T. NOVLIJAN: Možnosti izboljšave ambienta za večjo varnost v dolgih cestnih predorih



**Slika 3:** Poslikava na steni predora Nogent sur Marne, Francija (foto: DDE, 1994).

Pretirana uporaba močnih barv, vzorcev, motivov in reliefov lahko privede tudi do obratnega učinka od željenega, kar pomeni, da lahko preveč odvrta pozornost udeležencev v prometu od dogajanja na cestišču. Likovne intervencije, ki se uporabljajo na slepih fasadnih stenah hiš v mestnih ambientih, bi bile v omejenem podzemnem prostoru preagresivne, upoštevati pa je treba tudi dejstva črtne in barvne perspektive, ki temeljijo na predpostavki natančno določene fiksne razdalje med opazovalcem in opazovano ploskvijo, kar zaradi specifičnosti uporabe predorskih objektov (gibanje uporabnikov in potencialnih opazovalcev) ni mogoče. Skrajni primer pri oblikovanju predorskih ambientov predstavlja uporaba velikih reklamnih panojev, ki bi bila za upravljalce predorov tržno zanimiva, vendar s stališča prometne varnosti dandanes nesprejemljiva.

Namen mehkega, "naključnega" geome-

trijskega ritma, grafično apliciranega na stenah in stropu predora, je vzbujati pozornost voznika preko t.i. perifernega vida v tolikšni meri, da kljub optičnim dražljajem z leve in desne strani še vedno lahko zbrano sledi dogajanju na cestišču.

## PERIFERNI VID

Izraz *periferni vid* označuje sposobnost zaznavanja v bližini robov vidnega polja očesa. V pretekli človeški zgodovini je bil periferni vid bistveno bolj v uporabi kot danes. Človek je bil lovec in vojak, bolje kot dandanes je znal izkoriščati svoja čutila, tudi vid. Periferni vid mu je omogočal, da je "s kotičkom oči" simultano z dogajanjem pred seboj, na katerega se je osredotočil (npr. pri lovu), spremljal tudi dogajanje levo in desno poleg sebe. Vizualna zaznava povprečnega opazovalca je danes osredotočena predvsem na



**Slika 4:** Notranjost predora Laerdal, Norveška. [<http://www.aftenposten.no/nyheter/iriks/d176880.htm>]

branje znakov, ki so frontalno pred njim. Branje tekstovnega zapisa, še bolj pa cestnoprometnih znakov ter podatkov, ki jih posredujejo različne ploskve (angl. *display*), so tipični primeri linearno usmerjenega zaznavanja.

Sposobnost perifernega zaznavanja pri povprečnem človeku še vedno obstaja, le da ni tako eksistencialno stimulirana kot je bila pri naših prednikih. Izjema so nekateri poklici, npr. pilotski, kjer je ta sposobnost še vedno obravnavana kot ena od pomembnejših. V nekaterih športih je periferna zaznava včasih še pomembnejša kot osredotočena (t. i. zan-šin pri borilnih veščinah Daljnega vzhoda). Med popularnimi načini perifernega zaznavanja je potrebno omeniti tudi branje, sicer 2D grafičnih zapisov, generiranih v stereogramski tehniki, ki opazovalcu simulirajo 3D prostor. Vsekakor je sposobnost periferne zaznave pri vožnji v cestnem prometu pomembna, saj brez pretiranega obračanja glave in oči omogoča vizualno obvladovanje prostorav zornem kotu, ki je blizu 180 stopinj. Način periferne percepcije, t. i. meditacijo med vožnjo, delo *Peace is every step* [Nhat Hanh, 1992] obravnava kot pot, po kateri nekdo potuje (vozi), ne le kot linearno nizanje dogodkov, ki je usmerjeno zgolj k enemu cilju – kraju, kamor je namenjen – temveč kot skupek mnogoterih zaznav. Te podzavestno sooblikujejo razpoloženje in vplivajo na psihološko stanje posameznega voznika in posredno tudi na varnost vseh udeležencev v prometu.

## UPORABA FRAKTALNEGA RITMA

Kot alternativo pri oblikovanju interiera predora je mogoče izrabiti grafične aplikacije geometrijsko transformiranih naravnih ritmov, izviraajočih iz različnih karakterističnih morfoloških lastnosti terena, zaznavnih s ceste, v neposredni ali posredni bližini vhoda v predor:

- ritem poudarjeno vertikalnih linij drevesnih debel

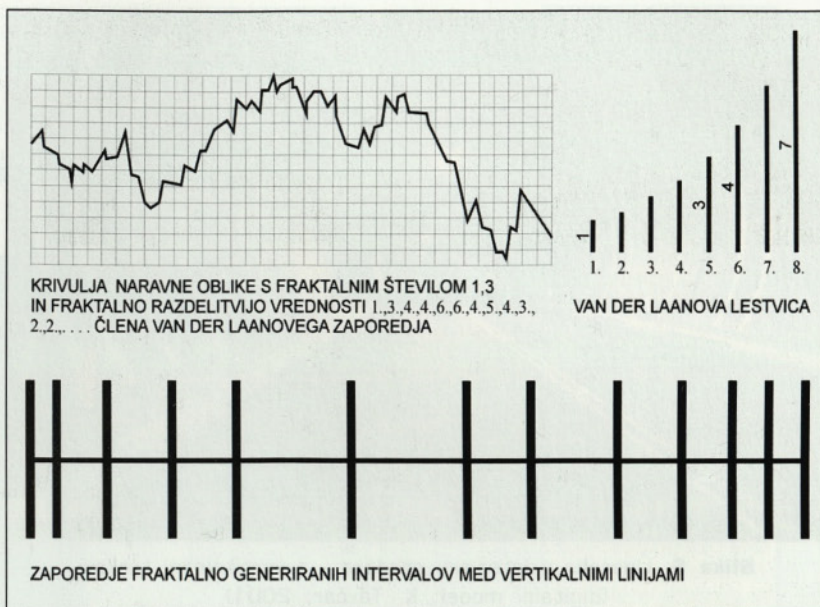


- krivulja, ki jo tvori rob drevesnih krošenj ali skalnih masivov na nebesnem ozadju
- krivulje, ki jih ustvarjajo gozdni robovi
- krivulje, ki jih ustvarjajo bregovi med vodo in kopnim.

Za izbrano izmed naštetih naravnih oblik je potrebno najprej ustvariti dvodimenzionalno projekcijo - dvodimenzionalno krivuljo, ki je lahko posneta po fotografiji ali po geodetskih koordinatah izbranega terena. To predstavlja osnovo za izračun fraktalnega števila, to je števila, katerega vrednost za krivulje znaša med 1.0 in 2.0. Fraktalno število določa stopnjo zanimivosti izbrane krivulje. Najprimernejše vrednosti so od 1.2 do 1.7. Za določitev fraktalnega števila se uporabi t. i. metoda števnih polj, ki na podlagi na izbrano krivuljo superponiranih mrež vsaj dveh velikostnih razredov beleži število polj, ki vsebujejo delček krivulje [Bovill, 1996]. Logaritmiranje razlike vrednosti ulomka med redkejšo in gostejšo mrežo rezultira v številu, ki je osnova za nadaljevanje postopka s pomočjo t. i. Van der Laanove lestvice. Ta je sestavljena iz osmih osnovnih različno velikih, med seboj komponibilnih elementov z vrednostmi: 1.0, 1.25, 1.75, 2.25, 3.0, 4.0, 5.25, 7.0 [Van der Laan, 1983]. Omenjena krivulja, ki naj ima fraktalno vrednost 1.3, je zaradi boljše grafične ponazoritve stopničasto transformirana, tako da lahko obsega v vertikalni smeri pozitivne in negativne vrednosti. Za izbrani segment v horizontalni smeri je tako mogoče določiti posamezne elemente Van der Laanove lestvice s pripadajočimi, že naštetimi absolutnimi vrednostmi. Te vrednosti je mogoče vnesti kot razdalje med poljubno izbranimi likovnimi elementi (npr. okenske odprtine na fasadi). Namen je členitev prazne ploskve ali "razbitje" monotonije ponavljajočih se enakih elementov.

## REZULTAT

V primeru modela, za katerega je služil profil karavanškega predora, sta bila izbrana



**Slika 5:** Transformacija naravne oblike v geometrijski ritem s pomočjo fraktalnega števila in Van der Laanove lestvice [T. Novljan, 2000].

dva načina aplikacije:

- aplikacija kot osvetlitev luči enake barve, vendar z elementi v različnih razmakih, kar se lahko reflektira kot direktna ali kot indirektna svetloba/senca. Razsvetljava bi bila uporabljena kot svetlobna nadgradnja obstoječi generalni osvetlitvi.

- kot likovna intervencija z uporabo neagresivnih vzorcev (vertikalnih pasov na stenah predora ali (lahko tudi izbočenih) na vozišču, ki pa ne smejo biti v navzkrižju z ostalimi prometnimi oznakami. Prednosti: enostavnost in cenenost izvedbe in vzdrževanja, vizualna privlačnost za uporabnike ne bi bila premočna, izvedba je možna pri novogradnji ali kot naknadna likovna intervencija. Predor bi imel svojo črtno kodo, ki bi v prihodnji, vedno večji tehnični perfekciji in unificiranosti lahko pomenila njegovo lokalno karakteristiko.

## PREDLOG PRAKTIČNEGA PREIZKUSA

Pred uporabo bi bilo potrebno praktični učinek teoretičnega koncepta preizkusiti s pomočjo profesionalnega simulatorja vožnje skozi predor (kot ga imajo npr. na

Norveškem). Poizkus bi temeljil na predpostavki, da se pozornost voznika za dogajanje pred vozilom v dolgem cestnem predoru:

- pri velikokratnem ponavljanju enakih elementov na enaki medsebojni razdalji zmanjša, reakcijski čas pa podaljša,
- pri ponavljanju sicer enakih elementov na različnih razdaljah pa pozornost voznika ostane.

Hkrati se pojavijo še nekateri s tem povezani problemi:

- izvedba aplikacije s svetlobo in z vertikalnimi pasovi,
- vzdrževanje ustrezne vidnosti likovnih elementov,
- oblikovanje prehodov med zunanostjo in notranostjo (svetloba/tema).

Podobno kot pri preizkusih, ki so bili izvedeni pri Transportation Research Center Inc., ZDA, bi vozniki med simulirano vožnjo skozi predor opravili različne naloge in bili izpostavljeni različnim situacijam, pri čemer bi bili izmerjeni njihovi odzivni časi [Tijerina, Parmer, Goodman, 1998].

## SKLEP

Grafične korekcije na prometnih objek-



**Slika 6:** Uporaba v interieru predora - z vertikalnimi trakovi  
(digitalni model: K. Tavčar, 2001)



**Slika 7:** Uporaba v interieru predora - z razvrstitvijo svetilk  
(digitalni model: K. Tavčar, 2001)

tih niso nobena novost. Polaganje belih pasov na vozno površino ceste, prečno na smer vožnje, je eden od načinov umirjanja hitrosti vožnje, ki je v uporabi tudi pri nas. Pasovi so izdelani bodisi v obliki dvodimenzionalnega barvnega nanosa, ki je zaznaven le vizualno, bodisi v obliki reliefnega nanosa, ki ga voznik zazna kot zvok in hkrati kot rahel udarec ali vibracijo. Omenjena načina sta namenjena zmanjševanju hitrosti vožnje in nimata neposredne zveze z obravnavanim načinom, ki ustvari fiktivni ritem vizualnih dražljajev "s strani", tj. z roba voznikovega vidnega polja. Glavni namen teh dražljajev ni zmanjševanje hitrosti v predoru, temveč podzavestna "zaposlitev" voznikovih možganov kot obramba pred negativnimi posledicami t. i. stroboskopskega učinka. Človekova podzavest vsebuje vtise naravnih oblik in ritmov, ki so se tam "nalagali" tisočletja. Nekatere oblike prepozna kot manj, druge kot bolj prijazne. V primerih oblikovanja podzemnih prostorov s posebnimi zahtevami in hkrati za množično uporabo, kar predori zagotovo so, je za vzpostavitev kakovostnejšega okolja marsikdaj potrebna le enostavna grafična korekcija. Fraktalna geometrija omogoča prav to.

## LITERATURA

- Bovill, C.: *Fractal Geometry in Architecture and Design*, Birkhäuser, Boston, 1996.
- Nhat Hanh, T.: *Peace Is Every Step*, Bantam Books, New York, 1992.
- Novljan, T.: *Fraktalno v arhitekturi – struktura, tekstura in barva* (doktorska disertacija), Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, Ljubljana, 2000.
- Perard, M.: *Interior architectural treatment of road tunnels in France*, Centre d'Etudes des Tunnels, 1998.
- Saari, K. (ur.): *The rock alternative engineering*, Finnish Tunnelling Association, Jyväskylä, 1988.
- Saitz, H.H.: *Tunnel der Welt – Welt der Tunnel*, Transpress, Berlin, 1988.
- Trstenjak, A.: *Človek in barve*, Dopisna delavska univerza Univerzum, Ljubljana, 1978.
- Van del Laan, D.H.: *Architectonic space*, E.J.Brill, Leiden, 1983.
- [http://www.atmb.net/cdrom/prev\\_et\\_secu/html/f\\_index.htm](http://www.atmb.net/cdrom/prev_et_secu/html/f_index.htm)
- <http://www.ntnu.no/gemini/1998-01E/20.html>
- [http://home.no.net/lotsberg/link\\_2.html](http://home.no.net/lotsberg/link_2.html)

1/1  
165 x 245 mm

2/3  
108 x 223 mm

1/2  
165 x 115 mm

1/4  
165 x 60 mm

1/3  
52 x 223 mm

Gradbeni vsetnik je strokovno znanstvena revija, s katero predstavljamo slovenski in tuji strokovni javnosti dosežke z vseh področij gradbeništva. Revija je tudi člansko glasilo Zveze gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije ter Matične sekcije gradbenih inženirjev pri Inženirski zbornici Slovenije.

Revija izhaja mesečno v nakladi 2750 izvodov. Med naročniki je tudi 52 naslovov iz tujine; z nekaterimi tujimi naslovi pa si revijo izmenjujemo.

Leta 2001 smo skromno obeležili 50 letnico neprekinjenega izhajanja in si želimo, da bi se slovensko gradbeništvo z revijo ponašalo tudi v prihodnosti, ko bo z širjenjem globalizacije na veliki preizkušnji naša strokovna in nacionalna zavest. Če bomo sodelovali, bomo ohranili svojo prestižno, v slovenskem jeziku pisano revijo, ki nas bo povezovala, nas izobraževala, preko katere bomo lahko komunicirali s kolegi v domovini in tujini, se spoznavali in merili med seboj v znanju.

Bodočnost Gradbenega vestnika je odvisna od nas, zato Vas vabimo k pisanju člankov, v družbo naročnikov in k prispevanju reklamnih oglasov.

Uredništvo

## NAVODILA ZA ODDAJO OGLASA

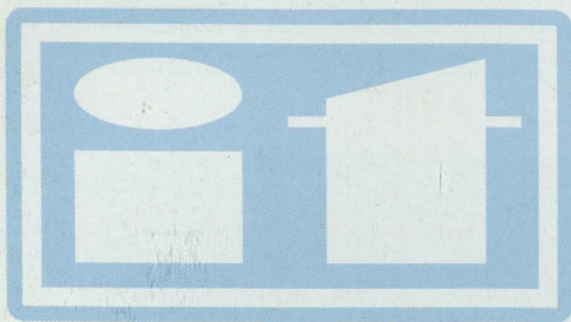
Oglas lahko oddate kot:

- rastrski format  
JPEG, TIFF, EPS
- CDR (ver 8.0 ali manj), pri čemer je potrebno vse črke spremeniti v krivulje

Vsebine je mogoče poslati z redno pošto (disketa) ali po E-pošti na naslednja naslova:  
gradb.zveza@siol.net  
jt.d.robert@siol.net

Za reklamne oglase se priporočamo po naslednjem ceniku:

Ovitek: zadnja stran 1/1 (165 x 245 mm)	200.000,00 SIT + DDV
Notranja stran 1/1 (165 x 245 mm)	150.000,00 SIT + DDV
N.S. 2/3 (108 x 233 mm)	130.000,00 SIT + DDV
N.S. 1/2 (165 x 115 mm)	100.000,00 SIT + DDV
N.S. 1/3 (52 x 233 mm)	75.000,00 SIT + DDV
N.S. 1/4 (165 x 60 mm)	40.000,00 SIT + DDV



# PRIPRAVLJALNI SEMINARJI ZA STROKOVNI IZPIT V GRADBENIŠTVU, ARHITEKTURI IN KRAJINSKI ARHITEKTURI V LETU 2002

MESEC	SEMINAR	IZPITI		
		GRADBENIKI	ARHITEKTI	KRAJINARJI
September	23.-27.			
Oktober	21.-25.	pisni: 26.10.		
November	18.-22.	ustni: 4. - 7.11.		pisni: 9.11.
		pisni: 23.11.		ustni: 18. - 21.11.
December	16.-20.	ustni: 2. - 5.12.		

## 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 90.000,00 SIT z DDV.

**Seminar za ARHITEKTE IN KRAJINSKE ARHITEKTE** poteka (prve) 3 dni in jih pripravlja za splošni del strokovnega izpita. Cena seminarja je 45.600,00 SIT z DDV.

K seminarju vabimo tudi kandidate, ki so že opravili strokovni izpit po določeni stopnji izobrazbe, pa so si pridobili višjo in morajo opravljati dopolnilni strokovni izpit. Ponujamo jim predavanje iz področja "Investicijski procesi in vodenje projektov". Cena predavanja in literature je 12.600,00 SIT z DDV.

Seminar ni obvezen! Izvedba seminarja je odvisna od števila prijav (najmanj 20 kandidatov). Udeleženca 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. Poslovni račun ZDGITS je 02017-0015398955; 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.