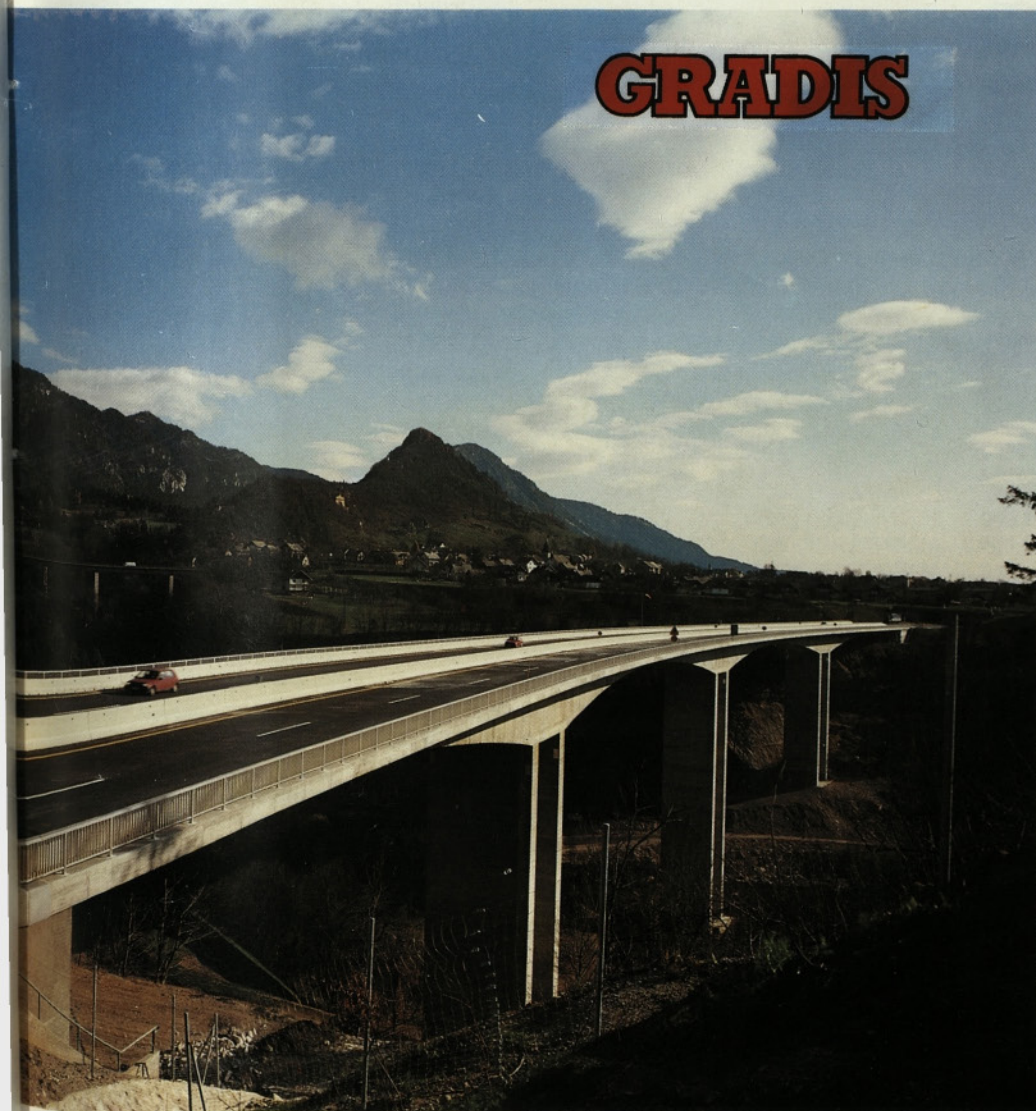


GRADBENI VESTNIK

3-4-5

1994

GRADIS



VIADUKT MOSTE NA ODSEKU AC HRUŠICA-VRBA, dograjen 1993

Glavni in odgovorni urednik:

Franc **ČAČOVIČ**

Lektor:

Alenka **RAIČ**

Tehnični urednik:

Danijel **TUDJINA**

Uredniški odbor:

Sergej **BUBNOV**, Stane **PAVLIN**,

Andrej **KOMEL**,

mag. Jože **BOŠTJANČIČ**,

mag. Ivan **JECELJ**,

prof. dr. Miran **SAJE**

Revija izdaja Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije, Ljubljana, Erjavčeva 15, telefon: 061/221-587. Žiro račun pri SDK Ljubljana 50101-678-47602. Tiska Tiskarna Tone Tomšič v Ljubljani. Letno izide 12 števil. Celoletna naročnina za člane društev znaša 1890 SIT. Za študente in upokoјence velja polovična cena. Naročnina za gospodarske naročnike znaša 21.000 SIT, za inozemske naročnike 100 US \$.

Revija izhaja ob finančni pomoči Ministrstva za znanost in tehnologijo, Zavoda za raziskavo materiala in konstrukcij Ljubljana, Fakultete za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, Univerze v Ljubljani in Tehniške fakultete, OG Gradbeništvo, Univerze v Mariboru. V naročnini je vštēt 5 % prometni davek.

GRADBENI VESTNIK

GLASILO ZVEZE DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV IN TEHNIKOV SLOVENIJE
ŠT. 3-4-5 • LETNIK 43 • 1994 • ISSN 0017-2774

VSEBINA-CONTENTS

Članki, študije, razprave Articles studies, proceedings	Matjaž Mikoš: FLUVIALNA ABRAZIJA V PRONOSNIH VODOTOKIH – I. DEL: TERENSKO RAZISKOVANJE PROCESOV IN NJIHOV MATEMATIČNI OPIS 68 FLUVIAL ABRASION IN GRAVEL-BED RIVERS – PART I: FIELD INVESTIGATION OF THE PROCESSES AND THEIR MATHEMATICAL DESCRIPTION
	Jože Panjan: OSNOVE PROCESA ZGOŠČEVANJA SUSPENDIRANIH DELCEV PRI ČIŠČE- NJU KOMUNALNIH ODPADNIH VOD 77 THE PROCESS OF THICKENING OF SUSPENDED PARTICLES IN TREATMENT OF WASTE WATER
	Bojan Grm: KONTROLA DIMA IN TOPLOTE V PRIMERU POŽARA 86 SMOKE AND HEAT CONTROL
	Gorazd Humar: LEPOTE IN SKRIVNOSTI PORUŠENEGA STAREGA MOSTU ČEZ NERETVO V MOSTARJU (1566–1993) 97
Poročila – Informacije Reports – Information	Gorazd Humar, Borut Gostič: STALIŠČA ZVEZE DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV IN TEHNIKOV DO ODPRTIH PROBLEMOV GRADITELJSTVA 104 Jaš Žnidarič, Gojmir Černe: STROKOVNI ODBOR ZA GRADITELJSTVO 105 Tone Sagadin: ZAKONODAJA, TEHNIČNA REGULATIVA IN STANDARDIZACIJA NA PODROČJU GRADBENIŠTVA 106
Poročila Fakultete za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani Proceedings of the Department of Civil Engineering University, Ljubljana	Jože Lopatič: NAPOVED ČASOVNO ODVISNEGA OBNAŠANJA VIADUKTA »REBER« 109 PREDICTION OF THE TIME DEPENDENT BEHAVIOUR OF THE REBER VIA- DUCT
Novosti – Gradbeništvo Tehniška fakulteta Univerza v Mariboru Civil Engineering News University in Maribor	Stojan Kravanja, Branko Bedenik, Zdravko Kravanja: MINLP OPTIMIRANJE MEHANSKIH STRUKTUR – II. del: MINLP OPTIMIRANJE ZAPORNICE INTAKE GATE, ASWAN 119 MINLP OPTIMIZATION OF MECHANICAL STRUCTURES PART II: MINLP OPTIMIZATION OF INTAKE GATE STRUCTURE, ASWAN
Informacije Zavoda za raziskavo materiala in konstrukcij Ljubljana Institute for testing and research in materials and structures Ljubljana	Branka Zatler-Zupančič, Ana Mladenovič: ALKALNA REAKCIJA V BETONU 125 ALKALI REACTION IN CONCRETE

FLUVIALNA ABRAZIJA V PRODNOSNIH VODOTOKIH – I. DEL: TERENSKO RAZISKOVANJE PROCESOV IN NJIHOV MATEMATIČNI OPIS

UDK 627131:556.536

MATJAŽ MIKOŠ

POVZETEK

Fluvialna abrazija, sklop mehanskih procesov drobljenja, krušenja in obrusa, ki nastopajo pri prodnem premiku v naravnih vodotokih, je sestavni del dolvodne drobnitve zrnavosti prodnatih plavin. Razumevanje in vrednotenje teh procesov je pomemben sestavni del numeričnega simuliranja premeščanja prodnatih plavin v naravnih vodotokih. Celotni proces dolvodne drobnitve se lahko relativno enostavno in zanesljivo meri v naravi. Problemi nastopijo, ko moramo pri vrednotenju pojavov fluvialne abrazije le-te ločiti od ostalih procesov dolvodne drobnitve, predvsem selektivnega premeščanja plavin. Spremljanje pojavov fluvialne abrazije je možno v naravi in v laboratoriju. V tem delu prispevka so najprej povzeta glavna spoznanja o dolvodni drobnitvi prodnatih plavin. Temu sledijo možnosti terenskega raziskovanja procesov fluvialne abrazije in njihov matematični opis. Za uporabo v praksi sta predlagana dva eksponentna modela fluvialne abrazije. Povzeti so najpomembnejši sklepi, ki veljajo za slovenske vodotoke.

FLUVIAL ABRASION IN GRAVEL-BED RIVERS – PART I: FIELD INVESTIGATION OF THE PROCESSES AND THEIR MATHEMATICAL DESCRIPTION

SUMMARY

The different mechanical impacts of running water in natural watercourses, like breakage, chipping and abrasion, together called very generally fluvial abrasion, is a part of downstream fining of gravel sediments. Understanding and evaluation of these processes are a very important part of numerical simulation of sediment transport in natural gravel-bed watercourses. Downstream fining can be relatively easily and trustfully measured in nature. The problem arises when the processes of fluvial abrasion should be separated from the other processes of downstream fining, especially from selective transport. We can observe the processes of fluvial abrasion in nature and in a laboratory. In the first part of the contribution, the today understanding of the processes of downstream fining of gravel sediments is given. Further the possibilities of field investigations on the processes of fluvial abrasion and their mathematical description are given. For practical applications two exponential models of fluvial abrasion are proposed. Most valuable conclusions concerning Slovene watercourses are given.

Avtor:

Dr. Matjaž Mikoš, dipl. inž. gradb.
Hidrotehnična smer FAGG
Univerza v Ljubljani

1. UVOD

Dolvodne spremembe oblike in zaobljenosti zrn plavin ter njene zrnavostne in petrografske sestave ali skrajšano – dolvodna drobnitev plavin je znan pojav v prodnosnih

vodotokih. Začetki inženirskega razumevanja tega pojava segajo vsaj v prejšnje stoletje, ko je Darcel leta 1857 opravil terensko raziskavo na reki Seine v Franciji [Darcel]. Tem raziskavam je sledil poskus Sternberga opisati zakonitost procesa matematično v tedanjemu času primerni obliki [Sternberg]. Po njem imenovani zakon predpisuje eksponentno zmanjšanje teže posameznega zrna plavin v odvisnosti od razdalje vzdolž vodnega toka, predpostavljajoč konstantni premosorazmerni faktor, imenovan koeficient zmanjšanja teže. Zgodnje terenske kot tudi laboratorijske raziskave fluvialne abrazije plavin so Sternbergov zakon potrdile. Tako so bili hidravlični inženirji v prvih desetletjih tega stoletja prepričani, da je fluvialna abrazija – mehanski procesi zmanjševanja velikosti zrn plavin – najpomembnejši vzrok dolvodne drobnitve plavin [Pettijohn, str. 514; Knighton 1984, str. 78; Stückerath, str. 113]. Zato je Sternbergova enačba, originalno razvita kot zakon zmanjšanja, bila na splošno sprejeta kot zakon fluvialne abrazije in namesto originalno predvidenega koeficienta zmanjšanja teže je bil vpeljan koeficient abrazije. Pri tem ponavadi pojem **fluvialne abrazije** izraža procese zmanjšanja velikosti plavin zaradi karšnihkoli vrst mehanskih procesov: drobljenja, krušenja in obrusa. Pojem **abrazija** – abrazivna obraba ali kratko obrus – pa izraža proces izgube materiala s površine zrna plavin zaradi trenjskih ali trčnih sil pri medsebojnem dotiku zrn pri prodnem premiku.

Stopnje abrazije v obširnih abrazijskih poskusih, izvedenih v krožnem žlebu [Kuenen 1955; 1956], so bile veliko manjše kot v naravi, zato ne morejo biti pripisane samo učinkom fluvialne abrazije. Tako se je poskušalo na različne načine razložiti to odstopanje in napačno sklepanje, da je Sternbergov zakon »odpovedal«. Ker so bile stopnje zmanjšanja velikosti oziroma teže plavin, merjene v laboratoriju, bistveno manjše od tistih, merjenih v naravi, so raziskovalci v glavnem poskušali to razliko pripisati drugim procesom in ne samo fluvialni abraziji. Opisani so bili drugi pomembni procesi, npr. samodrobljenje proda v času zelo redkih, a intenzivnih poplav [Bretz] in [Pittman in Overshine], preperevanje na prodiščih zaradi zmrzovanja [Krapf], spiranje in odnašanje ter hiter razpad peperelih plavin, začasno odloženih v poplavnih ravninah [Bradley], ali selektivno spiranje in premeščanje, ki povzroča dolvodno razvrščanje plavin [Plumey] ter [Bradley et al.]. Različni modeli razvrščanja plavin [Rana et al.] in [Troutman] so dali podobne eksponentne izraze zmanjšanja velikosti zrn plavin vzdolž toka, kakor so bili predvideni v primeru izključnega delovanja fluvialne abrazije. Ker se oba mehanizma dolvodne drobnitve izražata eksponentno, je bil predviden enoten eksponentni zakon zmanjšanja teže oziroma zmanjšanja velikosti zrn plavin [Church in Kellerhals]. Koeficient zmanjšanja tako predstavlja vsoto obeh delujočih faktorjev, to je fluvialne abrazije in selektivnega premeščanja, katerih relativna pomembnost se vzdolž toka spreminja. To je praktično enako rehabilitaciji Sternbergovega zakona, originalno predvidenega kot zakon dolvodne drobnitve in ne le fluvialne abrazije.

Številne terenske raziskave so pokazale omejeno uporabnost Sternbergovega zakona, ker stopnje zmanjšanja

niso bile stalne vzdolž vodotokov. Na odsekih vodotokov v povirjih voda, kjer so dotekajoče plavine ponavadi grobe in robate, so bile izmerjene visoke in spreminjajoče se stopnje zmanjšanja [Adams], veliko višje kot njihove povprečne vrednosti v spodnjem toku istega vodotoka [Mikoš 1983]. Druga nezveznost naj bi bila neposredna posledica nezveznosti v zrnivosti plavin, ugotovljena med prodonosnimi vodotoki s prevladujočim, v glavnem bimodalnim prodom, in peskonosnimi vodotoki s prevladujočim, v glavnem enomodalnim peskom [Yatsu]. Velike razlike so bile tudi ugotovljene med različnimi okolji, z največjimi stopnjami zmanjšanja na naplavnih vršajih, srednjimi stopnjami v vodotokih, in najnižjimi stopnjami v razvejenih strugah [Pettijohn str. 513]. Sternbergov zakon fluvialne abrazije naj bi celo zavrnili [Scheidegger], ker so relativne stopnje abrazije odvisne od velikosti zrn plavin [Kuenen 1956 – str. 347].

Pred kratkim so procesi fluvialne abrazije plavin ponovno zbudili pozornost. Naj si bo to zaradi prekinjajoče narave premeščanja plavin in razlike med abrazijo premikajočih se in mirujočih zrn [Stelczer] ali pa zaradi novega mehanizma abrazije – abrazije na mestu – kot posledice vibracij zrn, izpostavljenih združenemu delovanju dvižnih in vlečnih sil [Schumm in Stevens]. Ta mehanizem je bil na nek način potrjen s fenomenom oblikovanja skoraj okroglih prodnikov z obrusom prvotno robatih – oglatih skalnih okruškov v umirjevalnih bazenih pregrad [Prokopovich]. Najnovejši pristop [Parker 1991a; 1991b] upošteva teorijo saltacije zrn plavin [Wiberg in Smith], ki predvideva, da je saltacija prevladujoč način premeščanja rinjenih plavin.

Dandanes velja splošno prepričanje, da na dolvodno drobnitev plavin vplivajo naslednji procesi različne relativne pomembnosti: fluvialna abrazija, selektivno premeščanje, fizikalno in kemično preperevanje kakor tudi dotok plavin iz zaledij ter spiranje starih odkladnin zaradi bočne ali globinske rečne erozije. Glavni problem ni več »iskanje« novih vzrokov, temveč določitev relativne pomembnosti znanih vzrokov v posamični terenski situaciji. Da vprašanje ustreznega koeficienta abrazije ni le akademsko vprašanje, naj pokaže naslednja primerjava, ki ne upošteva nikakršnih učinkov selektivnega premeščanja plavin: ob predpostavljaju koeficienta abrazije $a_w = 0,05/\text{km}$ se obrusi 92 % prodnatih plavin, preden prepotujejo 50 km, ob predpostavljaju koeficienta abrazije $a_w = 0,01/\text{km}$, pa se obrusi le 40 % teh istih plavin. Koeficient abrazije je torej pomembna vhodna količina pri numeričnem simuliranju premeščanja prodnatih plavin, ki predstavlja najpomembnejšo neposredno uporabo koeficientov abrazije.

2. VZORČEVANJE PRODNATIH PLAVIN

Grobe plavine, ki jih premeščajo vodni tokovi, se na splošno v dolvodni smeri drobnijo. Njihove spremembe se lahko povzamejo kot spremembe v:

– **obliki zrn plavin** (opisovalcev njihove oblike, zaobljenosti in površinske teksture),

– **zrnavosti plavin** (njihovih statističnih parametrov – momentov: srednja vrednost, varianca, koeficient asimetrije, koeficient sploščenosti ...) in

– **petrografski sestavi plavin.**

V nadaljevanju bodo obravnavane le zrnavostne spremembe, ki so za vodarsko prakso tudi najpomembnejše. Natančnost terenske raziskave procesov fluvialne abrazije in z njo povezanih zrnavostnih sprememb je v veliki meri odvisna od poteka **vzorčevanja prodnatih plavin** v dnu vodotoka. Pomembna je izbira ustreznega mesta in načina odvzema, število in velikost vzorcev ter preračun različnih načinov ovrednotenja.

2.1. Mesto odvzema

Napake pri odvzemu in sama naravna spremenljivost sestave plavin vzdolž kratkih odsekov lahko onemogočijo določitev kakršnegakoli sistematičnega trenda v dolvodni smeri. Lokalno so plavine v dnu struge bolj grobe od povprečja, kadar sposobnost toka zaradi zoženega prečnega prereza ali naraščajočega pretoka pri konstantnem padcu dna struge naraste, in drobnejše od povprečja, ko se struga razširi in vodni tokovi razlijejo. Končno otežuje celotno sliko odnašanje plavin zaradi spodkopavanja brežin ali poglobljanja dna ter dotok svežih plavin iz stranskih pritokov [Troutman], tako da se homogenost plavin dolvodno od stranskega pritoka zmanjša [Knighton 1980]. To so glavni vzroki, zakaj je možno v nekaterih terenskih situacijah celo opazovati dolvodno naraščanje velikosti plavin [Hack] in [Brush]. Temu se je možno izogniti tako, da se analiza zrnavosti plavin opravi vzdolž odsekov, kjer prevladujejo enakomerne hidravlične lastnosti, npr. med večjimi sotočji. Raziskave selektivnega premeščanja, ki so v teku [Hunziker], kažejo, da močno zaprojevanje strug lahko spremljajo procesi selektivnega premeščanja plavin. V primeru močnih učinkov sortiranja se koeficienti zmanjšanja ne morejo ujemati s koeficienti abrazije. Potrebno je torej najti odsek vodotoka, kjer se lahko fluvialna abrazija privzame kot prevladujoč vzrok dolvodne drobnitve rinjenih plavin in ki naj bo zadostne dolžine, da se lahko zmerne stopnje abrazije merijo dovolj natančno. Pri izboru odseka je potrebno biti zelo previden, saj na pogled ravnovesni odsek vodotoka še ne zagotavlja večje relativne pomembnosti procesov fluvialne abrazije od procesov selektivnega premeščanja. Glavni razlog je dejstvo, da večje aluvialne reke predstavljajo velik zadrževalnik plavin [Jaeggi str. 51–52 in str. 70–82], katerega zanemaritev lahko vodi k precenitvi stopenj fluvialne abrazije. Obenem je numerično simuliranje premeščanja plavin pokazalo, da počasne in majhne spremembe profilov rečnega dna niso nikakršen dokaz njihove stabilnosti [Hunziker in Jaeggi]. Počasna gibanja so v naravi nekaj običajnega in pogosto nikakršen znak absolutne stabilnosti.

2.2. Način odvzema vzorca

Natančni opis načina odvzema daje literatura [Kellerhals in Bray], povzeta v [Mikoš 1989b]. Za potrebe terenske raziskave prodnatih plavin s poudarkom na študiju procesov

fluvialne abrazije, je možno odvzeti naslednje vzorce: **številčne ploskovne vzorce** \bar{q}_i^{A**} najbolj grobih zrn, različna grobe **številčne linijske vzorce** \bar{q}_i^{L**} krovnege sloja dna struge in **težnostne prostorninske vzorce** p_i^V podlage.

2.3. Število in velikost vzorcev

Lokalno spremenljivost prodnatih plavin ponavadi raziskujemo tako, da odvezamo več ustreznih velikih vzorcev plavin, ki odražajo lokalne lastnosti plavin in da ločeno analiziramo posamezne vrste kamnin [Church in Kellerhals]. Glede ustreznosti velikosti vzorcev je bilo že veliko napisanega [Kellerhals in Bray], [Anastasi] in [Gale in Hoare], tudi o lastni slovenski praksi [Mikoš 1989b].

2.4. Preračun različnih načinov ovrednotenja

Glavni namen preračunov je poenotiti rezultate različnih načinov odvzema vzorca plavin in njihovega ovrednotenja. Vsak vzorec plavin naj bi bilo mogoče ne glede na način njegovega odvzema izraziti v isti obliki. Pri tem odloča običajno najpogosteje uporabljana težnostna razporeditev zrnavosti, rezultat sejalne analize. Za preračun različnih načinov ovrednotenja vzorcev rinjenih plavin obstaja več metod, povzetih v delih [Anastasi], [Fehr] in [Kellerhals in Bray]. Prikaz uporabe tukaj predlagane Anastasijeve metode je podan tudi v [Mikoš 1988; 1989b]. V postopku preračuna po Anastasiju se najprej določi **številčna razporeditev zrnavosti** za vsak linijski \bar{q}_i^{L**} in ploskovni vzorec krovnege sloja \bar{q}_i^{A**} . Nato se uporabi model za preračun take zrnavostne razporeditve v ustrežno težnostno razporeditev, katere rezultat so tim. **preračunani prostorninski vzorci** p_i^V . **Težnostne razporeditve zrnavosti** na terenu odvzetih prostorninskih vzorcev podlage p_i^V so ponavadi določene neposredno s pomočjo sejalne analize. Temu sledi izračun odločujočih zrn vzorcev, izraženih kot aritmetično srednje zrno njihove razporeditve zrnavosti. Nato je potrebno izbrati ustrezen matematični model fluvialne abrazije in vanj vstaviti odločujoča zrna odvzetih vzorcev.

3. MATEMATIČNI OPIS FLUVIALNE ABRAZIJE

Podani so le trije modeli, ki so v prispevku neposredno omenjeni, popolnejši pregled je podan v [Mikoš 1993b].

Sternberg (1875) je bil prvi, ki je zapisal zakon fluvialne abrazije v matematični obliki:

$$dw = -a_w w ds \dots [kg] \quad (1)$$

kjer je w [kg] teža zrna plavin, ds [km] inkrement dolžine premeščanja in a_w [–/km] materialna konstanta, funkcija specifične teže in odpornosti zrna proti obrabi. Integracija enačbe (1) da:

$$w = w_0 e^{-a_w s} \dots [kg] \quad (2)$$

kjer je w_0 [kg] začetna teža zrna plavin v začetni točki $s = 0$, w [kg] teža tega zrna pri razdalji s [km] dolvodno in a_w [–/km] koeficient zmanjšanja teže.

Church in Kellerhals (1978) sta matematični izraz za dolvodno drobnitev v prodonosnih vodotokih izrazila kot spremembo teže odločujočega zrna plavin:

$$w = w_0 e^{-a_w s} \dots [\text{kg}] \quad (3)$$

Če predpostavimo, da prispevata k drobnitvi dva osnovna mehanizma: fluvialna abrazija in selektivno premeščanje, in upoštevajoč, da se vsaka od obeh komponent obnaša eksponentno, se lahko enačba (3) preoblikuje v:

$$w = w_0 e^{-(a_{w1} + a_{w2})s} \dots [\text{kg}] \quad (4)$$

kjer predstavlja a_{w1} [-/km] komponento fluvialne abrazije in a_{w2} [-/km] komponento selektivnega premeščanja. Če se v določeni študiji da prednost opisu spremembe zrnivosti plavin pred opisom zmanjšanja njihove teže, se lahko eksponentni zakon iz enačbe (4) preoblikuje v:

$$d = d_0 e^{-a_d s} \dots [\text{mm}] \quad \text{in} \quad a_d = \frac{a_w}{3} \dots [-/\text{km}] \quad (5)$$

če se lahko predpostavi, da sta oblika zrn plavin in njihova gostota stalni. Tukaj predstavlja a_d [-/km] koeficient spremembe zrnivosti.

Mikoš (1983) je opravil abrazijske poskuse v betonskem mešalcu z različnimi mešanici plavin teže prek 100 kg in nato predpostavil model fluvialne abrazije:

$$d = d_e e^{-(\kappa_0 + \kappa_1 s' - \kappa_2) s'} \dots [\text{mm}] \quad (6)$$

kjer predstavlja κ_0 [-/km] komponentno obrusa, enakovredno Sternbergovemu koeficientu, κ_1 [-/km] komponento krušenja, κ_2 [-] je indeks, kako hitro upada komponenta krušenja, d_e [mm] je velikost zrn plavin na samem začetku procesov fluvialne abrazije in d [mm] je velikost zrn plavin v oddaljenosti s' [km] od izvorov plavin. Ponavadi se procesov fluvialne abrazije ne da slediti od samega začetka, to je direktno od izvorov plavin, temveč šele v neki oddaljenosti s_0 [km], ko se velikost zrn plavin zmanjša od d_e na d_0 . Po uvedbi nove razdalje $s = s' - s_0$ v enačbo (6) se model spremeni v:

$$d(s') = d_e e^{-(\kappa_0 + \kappa_1 s' - \kappa_2)(s_0 + s')} = d_0 e^{-(\kappa_0 + \kappa_1 s' - \kappa_2)s} \dots [\text{mm}] \quad (7)$$

$$d(s) = d_0 e^{-(\kappa_0 + \kappa_1(s_0 + s) - \kappa_2)s} \dots [\text{mm}] \quad (8)$$

kar je način opisa fluvialne abrazije, kjer koeficient zmanjšanja velikosti zrn plavin upada z oddaljenostjo od povirij voda.

Gözl in Tippner (1985) sta določila koeficient abrazije kot prostorninsko oziroma masno izgubo prodnatih plavin, in sicer s pomočjo študije sprememb petrografske sestave plavin vzdolž vodotoka. Metoda tukaj ni podrobneje povzeta, za njeno uporabo glej [Gözl in Tippner] ali [Mikoš 1993b].

4. MODELI FLUVIALNE ABRAZIJE ODLOČUJOČEGA ZRNA

4.1. Enoparametrski eksponentni model fluvialne abrazije

Enostaven eksponentni model fluvialne abrazije s konstantnim koeficientom spremembe zrnivosti [Church in Kellerhals], podan v enačbah (4) in (5), nadomesti celotno zrnovostno mešanico plavin z njenim odločujočim zrnem. Ob uporabi takega modela fluvialne abrazije se kmalu postavi vprašanje, ali lahko sprememba zrnivosti mešanice plavin zaradi abrazijskih procesov, izražena s spremembo odločujočega zrna, ustrezno opiše masne izgube mešanice ali ne. Obširna teoretična analiza [Mikoš 1993a] je pokazala, da preračun koeficienta zmanjšanja teže a_w [-/km] v koeficient spremembe zrnivosti a_d [-/km] po enačbi:

$$a_w = 3 a_d \dots [-/\text{km}] \quad (9)$$

strogo gledano velja le za posamezno zrno plavin. V primeru mešanic plavin in nujne diskretizacije zrnivosti z namenom, da se določi sprememba zrnivosti, pa veljajo za različna sejalna razmerja R naslednji izrazi:

$$\text{za } R = (2)^{-1} : a'_w \approx 1.20 a_d (1 - a'_w s) \dots [-/\text{km}] \quad (9)$$

$$\text{za } R = (\sqrt[2]{2})^{-1} : a'_w \approx 1.53 a_d (1 - a'_w s) \dots [-/\text{km}] \quad (10)$$

$$\text{za } R = (\sqrt[4]{2})^{-1} : a'_w \approx 2.24 a_d (1 - a'_w s) \dots [-/\text{km}] \quad (11)$$

kjer je s [km] dolžina odseka vodotoka, na katerem je bil določen koeficient spremembe zrnivosti a_d [-/km], a'_w [-/km] pa je sedaj stopnja zmanjšanja teže zrn plavin. Terenske meritve spremembe zrnivosti rinjenih plavin je torej potrebno preračunati v dejanske masne izgube po eni od navedenih enačb.

Predlagani model je bil uporabljen v konkretni terenski situaciji. V okviru obširnejše laboratorijsko-terenske raziskave fluvialne abrazije prodnatih plavin reke Alpski Ren (Švica) je bila opravljena terenska raziskava na njegovem približno 42 km dolgem odseku. O podrobnostih te raziskave glej literaturo [Mikoš 1993a; 1993b]. Za določevanje koeficienta spremembe zrnivosti s pomočjo odločujočih srednjih zrn odvzetih terenskih vzorcev plavin je bil uporabljen enoparametrski eksponentni model s konstantnim koeficientom spremembe zrnivosti [Church in Kellerhals]:

$$d = d_0 e^{-a_d s} \dots [\text{cm}] \quad (5)$$

ob upoštevanju pravilnega preračuna koeficienta spremembe zrnivosti v stopnjo zmanjšanja teže (za uporabljeno sejalno razmerje):

$$\text{za } R = (\sqrt[2]{2})^{-1} : a'_w \approx 1.53 a_d (1 - a'_w s) \dots [-/\text{km}] \quad (10)$$

V slovenski prostor lahko prenesemo nekatere pomembne sklepe terenske raziskave, povzete v poglavju 5.

Koeficiente abrazije v enoparametrskem modelu fluvialne abrazije je možno določiti tudi z raziskavo sprememb petrografske sestave plavin vzdolž raziskovanega odseka [Gözl in Tippnerj]. Odvzeti vzorci plavin morajo biti ustrezno veliki, zato pridejo v poštev verjetno le težnostni prostorninski vzorci podlage in njihova petrografska sestava. Določitev petrografske sestave je tako zelo zamudna. Obenem lahko dolvodne spremembe petrografske sestave plavin povzroči ne le fluvialna abrazija, temveč tudi selektivno premeščanje zrn ali pa dotok plavin. Zato je tak način določanja koeficienta abrazije le pogojno uporaben v praksi.

4.2. Štiriparametrski eksponentni model fluvialne abrazije

Pomanjkljivost enoparametrskega eksponentnega modela je v njegovi slabši prilagodljivosti na pestre terenske razmere. Tako je bil na podlagi laboratorijskih raziskav [Mikoš 1993c] predložen nov model odločujočega zrna, kjer koeficient zmanjšanja teže ni več konstanten, temveč opisan z eksponentnim modelom obrabe [Mikoš 1993a; 1993b], kot je to bilo predlagano že prej [Mikoš 1983]. Od obeh eksperimentalno ugotovljenih odvisnosti linearnih stopenj obrusa, podrobneje opisanih v drugem delu tega prispevka [Mikoš 1993c], namreč odvisnosti od velikosti zrn plavin in razdalje brušenja, se v modelu lahko upošteva le zadnja. Model ima 4 parametre, ki jih je potrebno vsakokrat določiti (glej diagram 1). Njegova uporaba je primerna in enostavna [Mikoš 1993c]. Osnovo tvorijo koeficienti zmanjšanja teže a_w , podani za razne vrste kamnin v [Schoklitsch 1933, str. 352–354]. Schoklitsch je opravil abrazijske poskuse v bobnastem mlinu s samo enim preskušancem naenkrat in ugotovil velikostno neodvisnost obrabe zrn zaradi trkov. Linearna stopnja obrabe (dr/dt) [mm/km] se lahko nato določi iz eksperimentalnih rezultatov Schoklitscha [Mikoš 1993b]:

$$a_w = \frac{3}{r} \left(\frac{dr}{dt} \right) = \frac{3}{r} \kappa r^\Delta \quad \dots \text{[-/km]} \quad (16)$$

in ker za obrabo ob trku velja $\Delta = 1$, je potem konstanta κ (-/km) v izrazu za linearno stopnjo obrabe:

$$\kappa = \frac{a_w}{3} \quad \dots \text{[-/km]} \quad (17)$$

Upoštevaajoč enačbi (5) in (13) se lahko konstanta κ [-/km] neposredno uporabi kot koeficient spremembe zrnivosti a_d [-/km] in izraz za spremembo zrnivosti prodatih plavin v primeru obrabe ob trku je:

$$d = d_0 e^{-\kappa s} = d_0 e^{-a_d s} \quad \dots \text{[mm]} \quad (18)$$

Schoklitsch je podal dve različni vrednosti za vsako vrsto kamnine: za fazo krušenja (orig. scharfkantige Bruchstücke) a_{w-k} in za fazo obrusa (orig. runde Geschiebe) a_{w-0} [Schoklitsch 1933]. Razlike med obema vrednostima so bolj majhne, na splošno manjše od faktorja 2. V nasprotju z eksperimentalnimi rezultati Schoklitscha lahko pričakujemo, da so koeficienti zmanjšanja v fazi krušenja

na samem začetku abrazijskega procesa tudi do desetkrat višji od koeficientov zmanjšanja v čisti fazi obrusa. To kažejo tudi drugi eksperimentalni rezultati [Mikoš 1993a, 1993b; Kuenen 1956, sl. 14, str. 354]. Torej je zelo pomembno, da, kadar uporabljamo Schoklitscheve koeficiente, uvedemo njihovo distančno odvisnost. Način, kako to naredimo, je odvisen od tega, ali imamo dodatne eksperimentalne podatke o koeficientih abrazije ali ne (glej diagram 1).

5. SKLEPI

Za opisovanje procesov fluvialne abrazije v prodonosnih vodotokih lahko uspešno uporabljamo model fluvialne abrazije odločujočega zrna. Pri tem naj od obeh predlaganih eksponentnih modelov dobi prednost štiriparametrski model (glej diagram 1). S tem modelom lahko upoštevamo odvisnost linearne stopnje obrabe zrn plavin od razdalje premeščanja v vodnih tokovih. Če za določeno terensko študijo o fluvialni abrazijski ni na voljo lastnih eksperimentalnih podatkov o koeficientih in stopnjah zmanjšanja teže, potem se lahko v predlaganem štiriparametrskem modelu uporabi eksperimentalno delo Schoklitscha (glej diagram 1).

Če odvezamo več vzorcev rinjenih plavin, lahko s pomočjo modela fluvialne abrazije določimo tudi več koeficientov abrazije. Katere tako določene vrednosti naj se uporabljajo? V vsakem primeru se je potrebno omejiti na odsek, kjer igra fluvialna abrazija pomembno vlogo. Linijski vzorci krovnega sloja $\bar{q}_i^{L''}$ so lahko prevladujoče določeni s procesi selektivnega premeščanja (dolvodno zmanjševanje velikosti maksimalnega zrna in predvsem navpično sortiranje) in se tako ne morejo neposredno uporabiti za študijo fluvialne abrazije. Če bi bilo tako, bi bil to čisti slučaj. Linijski vzorci naj bodo najprej preračunani v prostorninske vzorce p_i^V . Pri tem je potrebno vedeti, da so preračunani prostorninski vzorci zelo občutljivi na »razumski« izbor parametrov preračuna in jih moramo zato uporabljati previdno. To je lahko vzrok, da koeficient zmanjšanja za preračunane prostorninske vzorce zelo odstopa od koeficienta, določenega za prostorninske vzorce, odvzete na terenu p_i^V . Tako se zdi, da naj se za potrebe terenskih študij o fluvialni abrazijski uporabljajo samo prostorninski vzorci podlage, ki lahko edini ustrezno odražajo petrografsko in zrnovostno pestrost plavin.

Tako lahko zaključimo, da naj bodo osnova vsake terenske raziskave fluvialne abrazije t. i. stopnje zmanjšanja teže a_w' , preračunane iz spremembe zrnivosti prostorninskih vzorcev plavin p_i^V , odvzetih na takem odseku vodotoka, kjer je selektivno premeščanje majhne intenzitete in kjer se lahko sprememba zrnivosti plavin meri s pomočjo sejalne analize. V hudournikih, ki spirajo in odnašajo sproščene zemljine, so procesi selektivnega premeščanja kljub istočasni veliki intenziteti fluvialne abrazije zelo pomembni in pogosto prevladujoči. Tako je možno terenske raziskave fluvialne abrazije, ki bi dale zanesljive podatke o dejanskih masnih izgubah plavin in spremembi njene zrnivosti, opraviti v bolj umirjenih odsekih srednjega

toka vodotokov. Ti odseki naj bi bili ob vrednostih stopenj zmanjšanja teže okoli 0,01/km vsaj nekaj 10 km dolgi, v glavnem enakomernih hidravličnih lastnosti, brez pomembnejših dotokov plavin in brez močnih vplivov poglobljanja

ali zaprojevanja. Ker je takih odsekov na slovenskih prodonosnih vodotokih bolj malo, postaja toliko bolj pomembno laboratorijsko raziskovanje procesov fluvialne abrazije, ki mu je namenjen drugi del prispevka.

Diagram 1: Model fluvialne abrazije odločujočega zrna – za prodonosne vodotoke

$$m = m_0 e^{-\alpha_w s} \quad \dots \text{ [kg]} \quad \dots (12)$$

$$d = d_0 e^{-\alpha_d s} \quad \dots \text{ [mm]} \quad \dots (13)$$

m_0 [kg] in d_0 [mm] sta masa in aritmetično srednje zrno rinjenih plavin na razdalji $s = 0$

m [kg] in d [mm] sta masa in aritmetično srednje zrno istih plavin

po premestitvi za abrazijsko razdaljo s [km]

α_w [-/km] je koeficient zmanjšanja teže

α_d [-/km] je koeficient spremembe zrnivosti

$$\alpha_w(s) = \kappa_0 + \kappa_1 (s + s_0)^{-\kappa_2} \quad \dots \text{ [-/km]} \quad \dots (14)$$

$$\alpha_d(s) = \kappa_0 + \kappa_1 (s + s_0)^{-\kappa_2} \quad \dots \text{ [-/km]} \quad \dots (15)$$

κ_0 [-/km] predstavlja komponento obrusa

κ_1 [-/km] predstavlja komponento krušenja

κ_2 [-] je indeks, kako hitro izzveni komponenta krušenja

$s + s_0$ [km] je oddaljenost od glavnih izvorov plavin

I. eksperimentalne vrednosti niso na voljo

- v delu [Schoklitsch 1933, tab.1; str.352-354] poišči ustrezno vrsto kamnine

- za fazo obrusa (orig. runde Geschiebe) podane vrednosti koeficienta zmanjšanja teže vstavi v naslednjo enačbo :

$$\alpha_{w-0} = \frac{3}{r} \left(\frac{dr}{dt} \right) = \frac{3}{r} \kappa r^\Delta \quad \dots \text{ [-/km]} \quad \dots (16)$$

- iz (16) izrazi linearno stopnjo obrabe in jo izenači s komponento obrusa :

$$\kappa_0 = \frac{\alpha_{w-0}}{3} \quad \dots \text{ [-/km]} \quad \dots (17)$$

- za komponento krušenja vzemi 5 ÷ 10-kratno vrednost komponente obrusa :

$$\kappa_1 = \frac{(5 \div 10) \alpha_{w-o}}{3} \dots [-/\text{km}] \dots (18)$$

- $\kappa_2 \approx 0.5 \div 0.7$ za hribske vodotoke ali zgornje tokove prodonosnih vodotokov
- $\kappa_2 \approx 0.7 \div 1.0$ za srednje in spodnje tokove prodonosnih vodotokov

- $s_0 \approx 1$ km za abrazijske procese, ki jih spremljamo neposredno od izvorov plavin
- s_0 [km] je srednja oddaljenost od glavnih izvorov plavin za abrazijske procese, ki jih spremljamo v neki oddaljenosti od izvorov plavin

- vstavi izbrane vrednosti v izraz za koeficient spremembe zrnivosti α_d

$$\alpha_d(s) = \kappa_0 + \kappa_1 (s + s_0)^{-\kappa_2} \dots [-/\text{km}] \dots (15)$$

kjer je s [km] razdalja vzdolž vodotoka

- vstavi vrednost koeficienta spremembe zrnivosti iz enačbe (15) v enačbo (13) in dobi spremembo srednjega zrna plavin vzdolž vodotoka :

$$d = d_0 e^{-\kappa_3 s} = d_0 e^{-\alpha_d s} \dots [\text{mm}] \dots (13)$$

II. eksperimentalne vrednosti so na voljo [Mikoš 1993c]

- κ_0 [-/km], κ_1 [-/km], κ_2 [-], s_0 [km] so eksperimentalno določeni parametri

- uporabi nelinearno regresijsko analizo izgub teže modelnih mešanic

- uporabi enačbo (14) za α_w

$$\alpha_w(s) = \kappa_0 + \kappa_1 (s + s_0)^{-\kappa_2} \dots [-/\text{km}] \dots (14)$$

LITERATURA

- Adams J.: »Wear of unsound pebbles in river headwaters«, *Science*, Vol. 203, str. 171–172, 1979.
- Anastasi G.: »Geschiebeanalysen im Felde unter Berücksichtigung von Grobkomponenten«, *Mitt. der VAW* št. 70, ETH Zürich, 1984.
- Bradley W. C.: »Effect of weathering on abrasion of granitic gravel, Colorado River (Texas)«, *Bulletin of Geological Society of America*, Vol. 81, str. 61–80, 1970.
- Bradley W. C., Fahnestock R. K. in Rowekamp, E. T.: »Coarse sediment transport by flood flows on Knik River, Alaska«, *Bulletin of Geological Society of America*, Vol. 83, str. 1261–1284, 1972.
- Bretz J. H.: »Valley deposits immediately east of the channeled scablands of Washington II«, *Journal of Geology*, Vol. 37, str. 505–541, 1929.
- Brush L. M.: »Drainage basins, channels, and flow characteristics of selected streams in central Pennsylvania«, *U.S. Geological Survey Professional Paper*, No. 282-F, str. 145–181, 1961.
- Church M., Kellerhals R.: »On the statistics of grain size variation along a gravel river«, *Canadian Journal of Earth Sciences*, Vol. 15, str. 1151–1160, 1978.
- Darcel M.: »Annales des ponts et chaussées«, 3^e série, Vol. 14, str. 108, 1857.
- Fehr R.: »Geschiebeanalysen in Gebrügsflüssen«, *Mitt. der VAW* št. 92, ETH Zürich, 1987.
- Gale S. J., Hoare P. G.: »Bulk sampling of coarse clastic sediments for particle-size analysis«, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 17, str. 729–733, 1992.
- Gözl E., Töpfer, M.: »Korngrößen, Abrieb und Erosion am Oberrhein«, *DGM*, Vol. 29, H. 4, str. 115–122, 1985.
- Hack J. T.: »Studies of longitudinal stream profiles in Virginia and Maryland«, *U.S. Geological Survey Professional Paper*, No. 294-B, str. 45–97, 1957.
- Hunziker R., Jäggi M.: »Numerische Simulation des Geschiebehaushaltes der Emme«, *Interpraevent* 1988, Graz, zvezek 3, str. 7–16, 1988.
- Hunziker R.: »Morphologisches Verhalten kiesführender Flüssen, untersucht mit Hilfe numerischer Modellierung«, *Diss. ETH Zürich*, v pripravi
- Jaeggi M.: »Sedimenthaushalt und Stabilität von Flussbauten«, *Mitt. der VAW* št. 119, ETH Zürich, 1992.
- Kellerhals R., Bray D. I.: »Sampling procedures for coarse fluvial sediment«, *Journal of the Hydraulic Division, ASCE*, Vol. 97/8, str. 1165–1180, 1971.
- Knighton A. D.: »Longitudinal changes in size and sorting of stream-bed material in four English rivers«, *Bulletin of the Geological Society of America*, Vol. 91, str. 55–62, 1980.
- Knighton A. D.: »Fluvial Forms and Processes«, Edward Arnold, London, 218 str., 1984.
- Krapf Ph.: »Die österreichisch-schweizerische Rheinregulierung zwischen der Illmündung und dem Bodensee«, *Wasserwirtschaft und Technik*, Nr. 23–27, str. 223–236, 1937.
- Kuenen Ph. H.: »Experimental abrasion of pebbles, 1. Wet sandblasting«, *Leidse geologische Mededelingen*, Vol. 20, str. 142–150, 1955.
- Kuenen Ph. H.: »Experimental abrasion of pebbles, 2. Rolling by current«, *Journal of Geology*, Vol. 64, str. 336–368, 1956.
- Mikoš M.: »Analiza zrnivosti plavin po izvornih tipih zemljin in hribin ter njihova aplikacija na odvodne struge«, *Diplomska naloga št. 102*, Hidrotehnična smer FAGG, Univerza v Ljubljani, 112 str., 1983.
- Mikoš M.: »Urejanje hribovskih vodotokov«, *Magistrska naloga št. 43*, Hidrotehnična smer FAGG, Univerza v Ljubljani, 179 str., 1983.
- Mikoš M.: »Urejanje hribovskih vodotokov«, *Acta Hydrotechnica*, letnik 7, št. 8, 73 str., 1989a.
- Mikoš M.: »Metode vrednotenja zrnivostnih združb plavin v naravnih vodotokih«, *Gradbeni vestnik*, Ljubljana, letnik 38, str. 158–165, 1989b.
- Mikoš M.: »Fluvial abrasion of gravel sediments – Field investigation of the River Alpine Rhine, experimental study in the abrasion set-up and mathematical modeling of the laboratory processes«, *Mitt. der VAW* št. 123, ETH Zürich, 322 str., 1993a.
- Mikoš M.: »Fluvialna abrazija prodatih plavin«, *Acta Hydrotechnica*, Laboratorij za mehaniko tekočin, Univerza v Ljubljani, letnik 11, št. 10, 107 str., 1993b.
- Mikoš M.: »Fluvialna abrazija v prodonosnih vodotokih, II. del: Laboratorijsko raziskovanje procesov in njihov matematični opis«, *Gradbeni vestnik*, Ljubljana, letnik 43, 1993c.
- Parker G.: »Selective sorting and abrasion of river gravel. I: Theory«, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 117/2, str. 131–149, 1991a.
- Parker G.: »Selective sorting and abrasion of river gravel. II: Application«, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 117/2, str. 150–171, 1991b.
- Pettijohn E. J.: »Sedimentary Rocks«, 3rd ed., 628 p., Harper & Row, New York, 1975.
- Pittman E. D., Ovenshine A. T.: »Pebble morphology in the Merced River (California)«, *Sedimentary Geology*, Vol. 2, str. 125–140, 1968.
- Plumey W. J.: »Black Hills terrace gravels: a study in sediment transport«, *Journal of Geology*, Vol. 56, str. 526–577, 1948.
- Prokopovich N. P.: »Rock Balls at Folsom Dam, California«, *Bulletin of the AEG*, Vol. 19/4, str. 427–432, 1982.

Rana S. A., Simons D. B. in Mahmood D.: »Analysis of sediment sorting in alluvial channels«, Journal of the Hydraulic Division, ASCE, Vol. 99/11, str. 1967–1980, 1973.

Scheiddeger A. E.: »Theoretical geomorphology«, 3rd ed., 447 p., Springer Verlag, New York, 1991.

Schoklitsch A.: »Über die Verkleinerung der Geschiebe in Flussläufen«, Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften in Wien, Math.-naturw. Klasse, Abt. IIa, Band 142, Heft 8, str. 343–366, 1933.

Schumm S. A., Stevens M. A.: »Abrasion in place: a mechanism for rounding and size reduction of coarse sediments in rivers«, Geology, str. 37–40, 1973.

Stelczer K.: »Bed-Load Transport – Theory and Practice«, Water Resources Publications, Littleton, Colorado, USA, 1981.

Sternberg H.: »Untersuchungen über Längen- und Querprofil geschiebeführender Flüsse«, Zeitschrift für Bauwesen, Vol. 25, str. 483–506, 1975.

Stückrath T.: »Der Abrieb von Quarzsand«, DGM, Vol. 33, zvezek 3/4, str. 113–120, 1989.

Troutman B. M.: »A stochastic model for particle sorting and related phenomena«, Water Resources Research, Vol. 16, str. 65–76, 1980.

Wiberg P. L., Smith J. D.: »Model for calculating bedload transport of sediment«, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 115/1, str. 101–123, 1989.

Yatsu E.: »On the longitudinal profile of the graded river«, American Geophysical Union, Transactions, Vol. 36, str. 655–663, 1955.



Specializirano podjetje za temeljenje objektov

je raziskovalno usmerjeno podjetje, ki lahko na osnovi znanja, opreme, referenc, izkušenj zaposlenih ter sodelavcev, ponudi investitorjem, načrtovalcem, projektantom in izvajalcem gradbenih objektov sledeče storitve:

- geološko-geotehnične raziskave tal in projektiranje temeljenja vseh vrst objektov
- geotehnični pregled in prevzem gradbenih jam
- kontrolne meritve nosilnosti in zveznosti pilotov
- projektantski in izvajalski nadzor
- strokovno vodenje izvajanja temeljenja
- inženiring storitve
- izdelava tenderjev za globoko temeljenje
- revizije projektov /tehnična in ekonomska upravičenost izvedbe izbrane tehnologije temeljenja/
- svetovanje pri geotehničnih raziskavah ter izvedbi temeljenja vseh vrst objektov
- razvojno raziskovalne storitve s področja geotehnike in temeljenja objektov
- uvajanje in izvajanje novih tehnologij temeljenja

Sedež podjetja: Ellerjeva 39, 61000 Ljubljana, SLOVENIJA

Telefon & Telefax: 061/1592-865

Operativna pisarna: Šmartinska 32, 61000 Ljubljana, SLOVENIJA

Telefon & Telefax: 061/320-972

OSNOVE PROCESA ZGOŠČEVANJA SUSPENDIRANIH DELCEV PRI ČIŠČENJU KOMUNALNIH ODPADNIH VOD

UDK 628.33

JOŽE PANJAN

P O V Z E T E K

Obravnavan je proces zgoščevanja gostih suspenzij v fazi »mirnega« zgoščevanja. Prikazani so trije različni modeli zgoščevanja, in sicer t. i. hidravlični, kompresijski in pretočni. Natančneje je obdelan le tisti del pretočnega dinamičnega modela spremljanja dogajanj v naknadnih usedalnikih – zgoščevanja, ki je povezan z bazenom za poživljanje (povratnim blatom) predvsem v času dežja.

Za proces zgoščevanja je bil poleg eksperimentalnih meritev in teoretičnega spremljanja procesa vpeljan tudi t. i. indeks zgostitve.

Ključne besede: Čistilna naprava, meritve, kosmi, matematični model, suspendirani delci, laserski merilnik velikosti delcev, cilindri, kosmičenje, volumenska koncentracija, gostota, poroznost, usedanje, zgoščevanje...

THE PROCESS OF THICKENING OF SUSPENDED PARTICLES IN TREATMENT OF WASTE WATER

S U M M A R Y

The process of coagulation and flocculation of dense suspensions in stagnant water sedimentation and thickening is discussed. Three mathematical model: hydraulic, thickening – compression and solid flux method are presented. Dynamic model of secondary clarifiers sedimentation and thickening, what is connected with aeration tank (return sludge) for weather flow is exactly described.

For the first time in our country, a thickening index was used along with experimental measurements and theoretical modeling of the thickening process.

Key words: Wastewater treatment plants, measurements, floc-sludge flocs, mathematical model, suspended particles, laser particle sizer, column, floc forming, volume concentration, density, porosity, sedimentation, thickening...

1. UVOD

V nalogi smo analizirali procese zgoščevanja oziroma ugotavljali sposobnost naknadnega (sekundarnega) usedanja in zgoščevanja delcev – kosmov pri dveh različnih tehnologijah čiščenja, in sicer po biološkem in kemijskem čiščenju komunalnih odpadnih vod.

Potek zgoščevanja smo opazovali pri devetih poizkusih, in sicer kot enoten proces z usedanjem in zgoščevanjem v usedalnem cilindru višine 3,64 m. Ta dva postopka sta običajno na čistilnih napravah ločena (usedalniki, zgoščevalniki). Zgoščevanje blata smo spremljali 24 ur oziroma 22 ur. Opravili smo tudi analizo kakovostnih parametrov po višinah v časovnih intervalih, istočasno pa tudi vizualno spremljali spreminjanje nivoja (volumna) suspenzije oziroma blata po biokemijski obdelavi (po kemijski obdelavi odpadne vode tega nismo mogli, ker nivo blata ni bil jasen).

Kot tehnološka parametra za spremljanje zgoščevanja se običajno uporabljata volumen blata VBp in sušina blata

Avtor:
mag. Jože Panjan, dipl. inž.
Inštitut za ekološki inženiring, Jadranska 28, 62000 Maribor,
Enota Ljubljana, Hajdrihova 28

SBp, ki sta po tehnološki plati za modeliranje s pretočnim modelom najprimernejša oziroma najenostavnejša.

Izvršene so bile tudi meritve volumske in masne koncentracije suspendiranih snovi z laserskim merilcem velikosti delcev v razponu 1,9–564 μm . Tako lahko spremljamo dogajanje v naknadnem usedalniku tudi s suspendirano surovino, kar pa tukaj ne bo obravnavano.

Pri pretočnem modelu, ko uporabimo volumen blata in sušino blata, se moramo zavedati, da volumen blata določimo po polurnem usedanju, sušino blata pa določimo po dveh urah sušenja pri 105 °C. V volumnu blata zajemamo tudi velik del t. i. proste vode, v sušini pa zajemamo tudi del raztopljenih snovi (tisti del, ki ga tehnološko nismo uspeli suspendirati), zaradi sušenja pa izgubimo vso vodo kot gradnika suspenzije oz. biološkega blata. Lasersko določena suspendirana snov pa zahteva poznavanje gostote tako kosmov blata kot same suspenzije, kar pa je težje določljivo.

2. OSNOVNE ENAČBE PROCESA ZGOŠČEVANJA

V gostih suspenzijah oziroma blatu je voda v treh oblikah:

- v nevezani obliki**, ki jo lahko izločamo s težnostnim zgoščevanjem.
- kot kapilarno vezana voda**, ki jo lahko izločamo le z odcejanjem pod pritiskom,
- kot adsorbirana voda** (molekularno vezana), ki jo lahko izločamo le z dovajanjem toplotne energije.

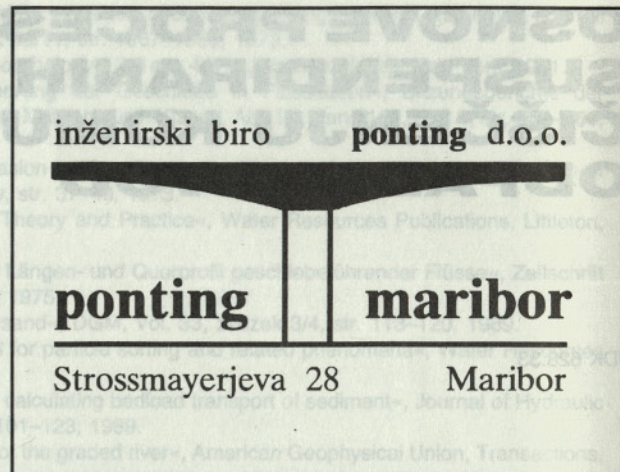
Obravnavali bomo le težnostno zgoščevanje.

Po usedanju (pa ca. 2 urah) in pri koncentracijah blata, večjih od VBp = 480 ml/l, nastane (že) zgoščevanje – pod kompresijsko točko. Zgoščevanje spremeni strukturo kosmov, nastajajo tokovni kanali, vidni s prostim očesom in nastopi sesedanje blata. Porna voda se sunkovito iztiska iz blata.

V literaturi lahko zasledimo različne pristope in reševanja procesov zgoščevanja, največkrat kar po avtorjih. V bistvu pa se lahko obravnavajo na tri načine (48), in to kot hidravlični model (spremlja se padanje – zniževanje gladine blata), zgoščevalni – kompresijski model (zgleduje se po teoriji mehanike tal oziroma zemljin in spremlja gostoto blata – zemljine) in pretočni model (spremlja se koncentracija snovi, npr. kot sušina blata in indeks blata oziroma volumen blata).

Ta model ima za praktično – aplikativno uporabo razvit t. i. model plasti, ki ga uporabljajo tudi nemški predpisi v ATV 131 (Abwasser Technische Vereinigung).

Tehnološko je najuporabnejši pretočni model, ki se je v zadnjih letih razvil v dinamični model spremljanja in reguliranja blata med bazenom za poživiljanje in naknadnim usedalnikom (povratno blato), predvsem v času dežja – padavin.



2.1. Hidravlični model

Po literaturi (2) si proces zgoščevanja opišemo s spremembo nivoja blata, kot sledi:

$$dh_z/dt = -k(h_z - h_b) \quad (2.1)$$

$$dh_z/(h_z - h_b) = -k \cdot dt$$

$$\ln/(h_z - h_b)/(h_z - h_b) = -k \cdot t \rightarrow$$

$$(h_z - h_b)/(h_0 - h_b) = \exp(-k \cdot t)$$

$$h_z = h_b + (h_0 - h_b) \cdot \exp(-k \cdot t) \quad (2.2)$$

Tu pomenijo:

- h_z – višina blata po času t (m)
- h_b – višina blata, ki limitira proti končni zgostitvi (m)
- h_0 – višina blata (suspenzije v) v času $t = 0$ (m)
- K – konstanta zgoščevanja (s^{-1})
- t – čas zgoščevanja (s^{-1})

Pri eksperimentalnem opazovanju spreminjanja nivoja blata si lahko določimo konstanto k :

$$k = \ln(h_z - h_b)/(h_0 - h_b)/t \quad (2.3)$$

Če pa poznamo konstanto zgoščevanja, si lahko določimo višino blata:

$$h_b = (h_z - h_b) \cdot \exp(-k \cdot t) / (1 - \exp(-k \cdot t)) \quad (2.4)$$

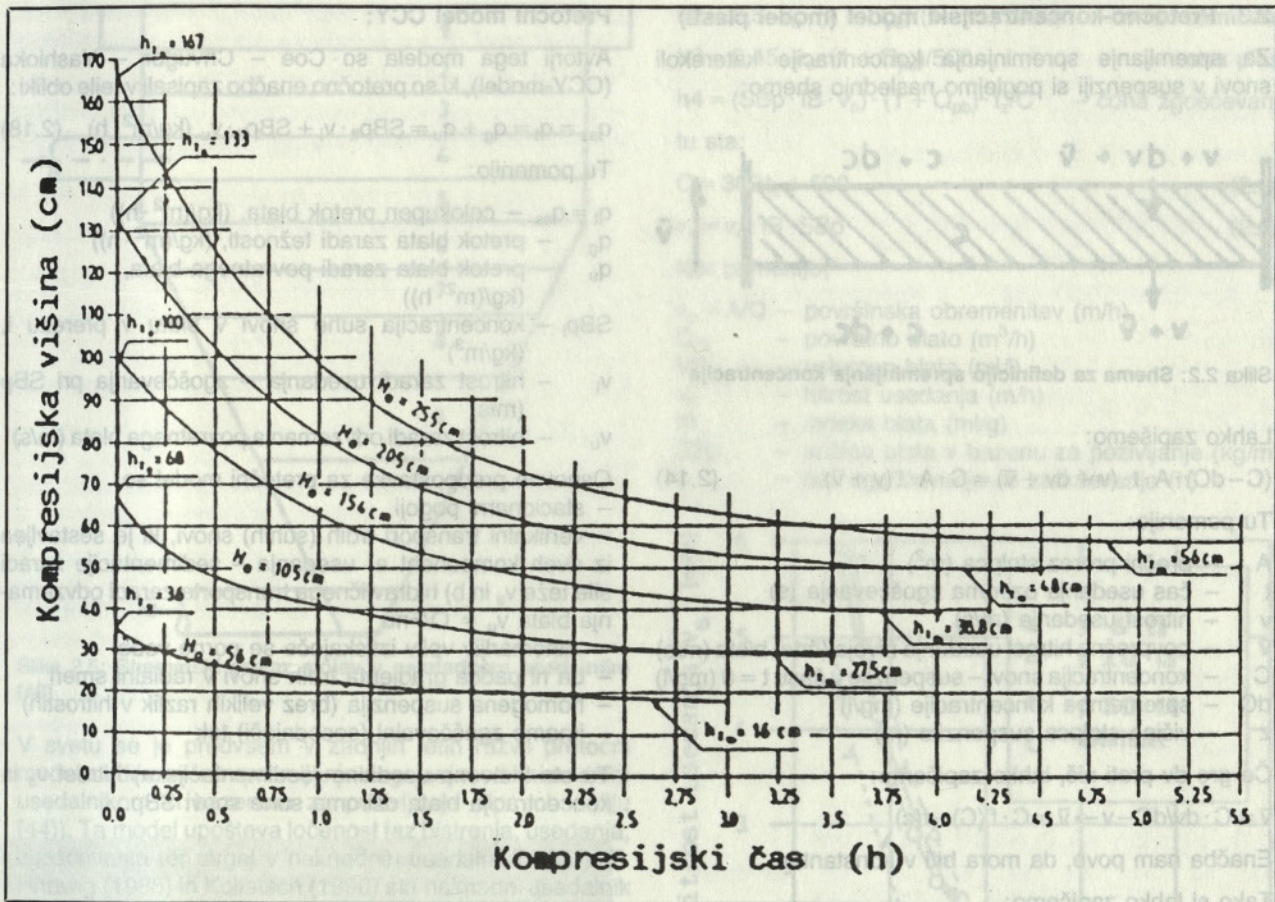
2.2. Zgoščevalni – kompresijski model:

Po literaturi (30) lahko spremljamo hitrost zgoščevanja, če poznamo gostoto suspenzije, blata in velikost kosmov – delcev oziroma poroznost snovi. Iz brezdimenzijske analize si lahko določimo funkcijsko odvisnost, ki sta jo obdelala Richardson in Zaki:

$$v_s/v_o = f(\text{Re}, d/D, \epsilon) \quad (2.5)$$

kjer pomenijo:

- v_s – hitrost usedanja suspenzije (m/s)
- v_o – hitrost usedanja po Stokesu (m/s)
- Re – Reynoldsovo število (–)
- d – premer delca (m)
- D – premer usedalnega cilindra (m)
- ϵ – poroznost suspenzije (–)



Slika 2.1: Zgoščevalna – kompresijska odvisnost od časa in višine – debeline blata (48).

Za zelo viskozno tekočino ali za delce z majhnim premerom je hitrost neodvisna od Re in je funkcija d/D , če je suspenzija enakomerna (uniformna):

$$v_s = v_o \cdot \epsilon \tag{2.6}$$

S poizkusi sta ugotovila, da je $n = 4,65 + 19,5 \cdot d/D$ oziroma ko gre $d/D \rightarrow 0$, je:

$$v_s = v_o \cdot \epsilon^{4,65} \tag{2.7}$$

Iz masne bilance sta Javaheri in Dick ugotovila, da velja naslednja zveza med poroznostjo in indeksom zgostitve – Iz in volumsko zgoščevalno odvisnostjo – kosmičnim volumnom φ_a (v literaturi AVI – Aggregate Volume Indeks):

$$v_s = v_o \cdot (1 - \varphi_a)^{4,65} \tag{2.8}$$

Pri tem je potrebno posebej določiti zveze med gostotami različnih stanj suspenzije in njihovimi volumni (to je precej zahtevno delo, saj smo pri naši raziskavi npr. merili devet parametrov in določali šest parametrov iz šestih enačb).

Indeks zgostitve je povezan s kosmičnim volumnom takole:

$$Iz = \varphi_a / \varphi_k = V_b / V_s = AVI^{-1} \tag{2.9}$$

Pri tem je $\varphi_a = V_b / V_m$, $\varphi_k = V_s / V_o$

Tu pomenijo:

- Iz – indeks zgostitve $(AVI)^{-1}$ (–)
- V_m – volumen mešanice (m^3)
- V_b – volumen blata (m^3)
- V_s – volumen sušnega dela snovi (m^3)
- φ_a – volumsko razmerje med blatom in mešanico (–)
- φ_k – volumsko razmerje med suho snovjo in V_o (–)

Po delni zgostitvi suspenzije moramo upoštevati tudi Carmen-Kozenyjevo enačbo zaradi pritiska Δp (31):

$$u = d^2 / (K \cdot \epsilon^3) / (36 \cdot \mu \cdot (1 - \epsilon)^2) \cdot \Delta p / H \tag{2.10}$$

Če to enačbo uporabimo za zgoščevanje poživljenega blata, lahko zapišemo:

$$\Delta p = (1 - \epsilon) \cdot (\rho_s - \rho_v) \cdot g \tag{2.11}$$

in

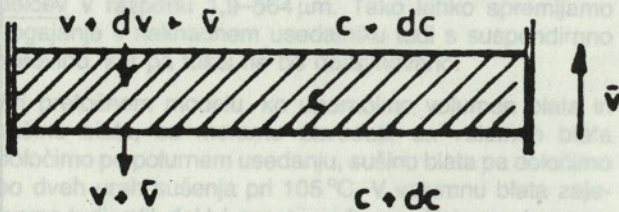
$$v = g \cdot (\rho_s - \rho_v) d^2 / (36 \cdot K \cdot \mu) \cdot \epsilon^3 \cdot (1 - \epsilon) \tag{2.12}$$

Namesto ϵ pa lahko upoštevamo tudi φ_a in φ_k ter $Iz = AVI^{-1}$:

$$\epsilon = (1 - \varphi_a) = (1 - \varphi_k \cdot Iz) \tag{2.13}$$

2.3. Pretočno-koncentracijski model (model plasti)

Za spremljanje spreminjanja koncentracije katerekoli snovi v suspenziji si pogledjmo naslednjo shemo:



Slika 2.2: Shema za definicijo spreminjanja koncentracije

Lahko zapišemo:

$$(C - dC) \cdot A \cdot t \cdot (v + dv + \bar{v}) = C \cdot A \cdot t \cdot (v + \bar{v}) \quad (2.14)$$

Tu pomenijo:

- A – prečni prerez stolpca (m^2)
- t – čas usedanja oziroma zgoščevanja (s)
- v – hitrost usedanja (m/s)
- \bar{v} – povprečna hitrost usedanja nivoja (črte) blata (m/s)
- C – koncentracija snovi – suspenzije v času $t = 0$ (mg/l)
- dC – sprememba koncentracije (mg/l)
- z – višina stolpca suspenzije (m)

Če gre dv proti nič, lahko zapišemo:

$$\bar{v} = C \cdot dv/dC - v \rightarrow \bar{v} = C \cdot f'(C) - f(C)$$

Enačba nam pove, da mora biti v konstanten.

Tako si lahko zapišemo:

$$C_0 \cdot z_0 \cdot A = C_2 \cdot t_2 \cdot A \cdot (v_2 + \bar{v}_2) \quad (2.15)$$

tu upoštevamo, da je

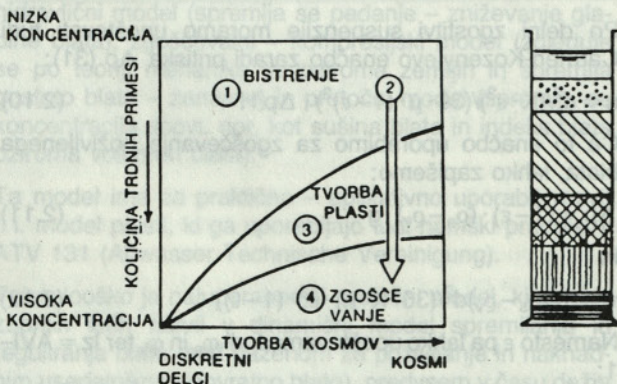
$$v_2 = z_2/t_2; \bar{v}_2 = (z_1 - z_2)/t_2$$

Tako dobimo:

$$C_2 \cdot z_2 = C_0 \cdot z_0 \quad (2.16)$$

in pretok:

$$q = z_0 \cdot A/t \quad (2.17)$$



Slika 2.3: Spreminjanje koncentracije snovi – delcev

Pretočni model CCY:

Avtorji tega modela so Coe – Chvuger – Yashioka (CCY-model), ki so pretočno enačbo zapisali v tej obliki:

$$q_{ss} = q_t = q_g + q_u = SB_{pit} \cdot v_i + SB_{pit} \cdot v_u \quad (kg/m^2 \cdot h) \quad (2.18)$$

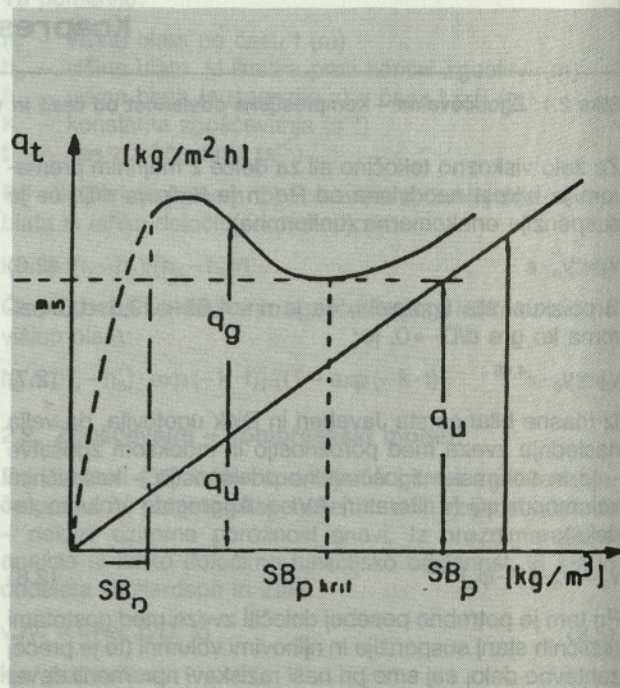
Tu pomenijo:

- $q_t = q_{ss}$ – celokupen pretok blata, ($kg/(m^2 \cdot h)$)
- q_g – pretok blata zaradi težnosti, ($kg/(m^2 \cdot h)$)
- q_u – pretok blata zaradi povratnega blata, ($kg/(m^2 \cdot h)$)
- SB_{pi} – koncentracija suhe snovi v blatu v prerezu i, (kg/m^3)
- v_i – hitrost zaradi usedanja – zgoščevanja pri SB_{pi} (m/s)
- v_u – hitrost zaradi odzemanja povratnega blata (m/s)

Osnovne predpostavke za pretočni model so:

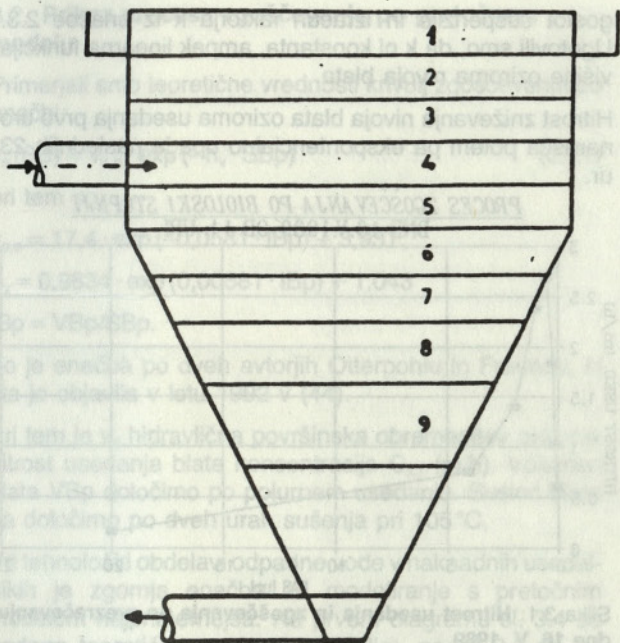
- stacionarni pogoji
- vertikalni transport trdih (suhih) snovi, ki je sestavljen iz dveh komponent a) usedanja – sedimentacije zaradi sile teže v_s in b) hidravličnega transporta zaradi odzemanja blata $v_u = Q/Fnu$
- zanemarljiv vpliv iztiskajoče se porne vode
- da ni padca gradienta trdih snovi v radialni smeri
- homogena suspenzija (brez velikih razlik v hitrostih)
- imamo zgoščevalni (sesedajoči) tok

Tu sta bistvena usadna (sedimentacijska) hitrost v_s in koncentracija blata oziroma suhe snovi SB_p .



Slika 2.4: Prikaz pretoka suhe snovi q_t , q_g in povratnega blata q_u (48)

Pri odzemanju povratnega blata nastopi (obstoji) kritična količina blata oziroma v usadnem cilindru nastopi (obstoji) t. i. kritični prerez, ko je $dq_t/dSB_p = 0$ (glej sl. 2.4).



Slika 2.5: Shematski prikaz slojev v naknadnem usedalniku (48)

V svetu se je predvsem v zadnjih letih razvil pretočni model za dinamično spremljanje dogajanj med naknadnim usedalnikom in bazenom za poživiljanje (npr. ob dežju (44)). Ta model upošteva ločenost faz bistrenja, usedanja, zgoščevanja ter strgal v naknadnih usedalnikih (NU). P. Hartwig (1988) in Kollatsch (1990) sta naknadni usedalnik razdelila na 10 celic z enakimi volumni. Pri tem je v 1. sloju čista voda (iztok), v 4. sloju dotok vode in v 10. sloju odvzem blata.

Spremembe koncentracije blata se odražajo prek bilančnih enačb pretoka blata v vsakem sloju – celci:

$$dC_{x,i} = (C_x \cdot v_s)_{i-1} + (C_x \cdot C_s)_i + q_{PB} \cdot (C_{x,i-1} - v_{x,i}) \quad (\text{kg/m}^3) \quad (2.19)$$

Tu pomenijo:

- $C_{x,i}$ – koncentracija suhe snovi v sloju i , (kg/m^3)
- $C_{x,i-1}$ – koncentracija suhe snovi v sloju $i-1$, (kg/m^3)
- $dC_{x,i}$ – sprememba koncentracije v sloju i (kg/m^3)
- $v_{s,i}$ – hitrost usedanja blata koncentracije $C_{x,i}$ (m/h)
- $v_{s,i-1}$ – hitrost usedanja blata koncentracije $C_{x,i-1}$ (m/h)
- q_{PB} – obremenitev s povratnim blatom (m/h) oziroma $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$

Ta model je bil sprejet tudi v ATV predpisih v letu 1991 v poenostavljeni obliki. Po ATV 131 je NU razdeljen na najmanj 4 sloje z enakimi volumni s tem, da je iztok oziroma čista voda v 1 sloju, odvzem povratnega blata pa v 4.

Po predpisih ATV 131 se sloji računajo oziroma določajo na naslednji način:

$$h_1 > 0,5 \text{ m} \quad \text{– cona bistrenja}$$

$$h_2 = 0,5 \cdot v_o \cdot (1 + Q_{pb}) / (1 - VB/1000) \quad \text{– cona kosmičenja}$$

$$h_3 = 0,45 \cdot v_s \cdot (1 + Q_{pb}) / 500 \quad \text{– cona plasti}$$

$$h_4 = (SBp \cdot IB \cdot v_o) \cdot (1 + Q_{pb}) \cdot t_z / C \quad \text{– cona zgoščevanja}$$

tu sta:

$$C = 300 t_z + 500 \quad (2.20)$$

$$v_s = v_o \cdot IB \cdot SBp \quad (2.21)$$

kjer pomenijo;

$v_o = A/Q$ – površinska obremenitev (m/h)

Q_{pb} – povratno blato (m^3/h)

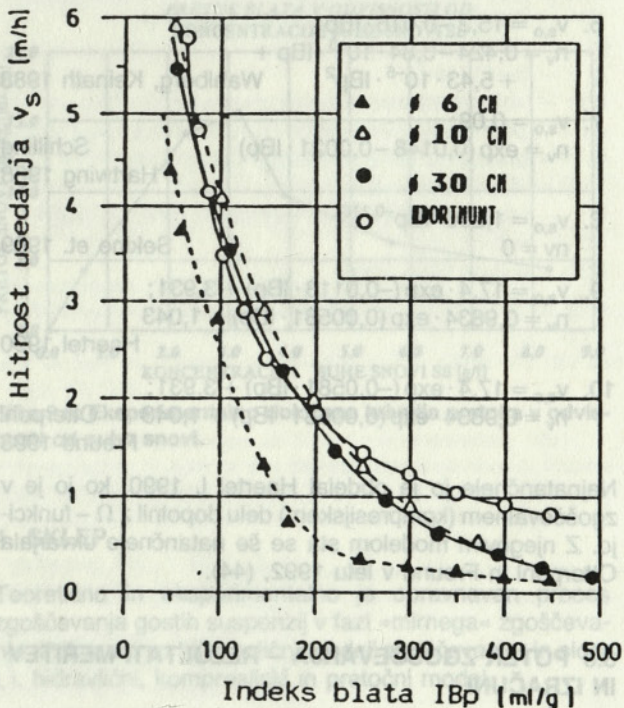
VB – volumen blata (ml/l)

v_s – hitrost usedanja (m/h)

IB – indeks blata (ml/g)

SBp – sušina blata v bazenu za poživiljanje (kg/m^3)

t_z – čas zgoščevanja ali zadrževanja (h)



Slika 2.6: Hitrost usedanja – zgoščevanja v odvisnosti od indeksa blata (43)

Schilling, Hartwig, Daigger in Roper so enačbo za dinamično spremljanje hitrosti usedanja postavili v odvisnosti od koncentracije suhe snovi in indeksa blata:

$$v_s = 7,8 \cdot \exp(-0,148 - 0,0021 IBp) \cdot C \quad (2.22)$$

Tu pomenijo:

$v_{s,i}$ – hitrost usedanja blata koncentracije $C_{x,i}$ (m/h)

C – SBp koncentracija suhe snovi (kg/m^3)

IBp – indeks blata (cm^3/g), (ml/g)

Ta enačba – model je zelo ugodna za vertikalne in radialne naknadne usedalnike, za horizontalne pa mora imeti popravke. Enačbo lahko zapišemo v naslednji obliki:

$$v_s(\text{SB}) = v_{s,0} \cdot \exp(-n_v \cdot \text{SBp}) \quad (2.23)$$

V literaturi je za enačbo 2.22 znanih ca. 10 različnih enačb, glej (47). Diagram na sliki 2.13 uporabljajo ATV predpisi (43) in (46).

Po raznih avtorjih se ta enačba glasi:

1. $v_{s,0} = 5,0;$
 $n_v = 0,2498 \cdot \exp(0,016 \cdot \text{IBp})$ Forster 1982
2. $v_{s,0} = 130 \cdot \text{IBp}^{-0,866}$
 $n_v = 0,064 + 0,61 \cdot \text{IBp}$ Koopman, Cadee 1983
3. $v_{s,0} = 7,8;$
 $n_v = 0,148 + 0,0021 \cdot \text{IBp}$ Ropper-Daigger 1985
4. $v_{s,0} = 378 \cdot \text{IBp}^{-0,866};$
 $n_v = 0$ Tsugura et. 1985
5. $v_{s,0} = 10,4 - 0,0148 \cdot \text{IBp};$
 $n_v = 0,29 \cdot \exp(0,016 \cdot \text{IBp})$ Pitman 1985
6. $v_{s,0} = 15,3 - 0,016 \cdot \text{IBp};$
 $n_v = 0,424 - 3,84 \cdot 10^{-3} \cdot \text{IBp} +$
 $+ 5,43 \cdot 10^{-5} \cdot \text{IBp}^2$ Wahlberg, Keinath 1988
7. $v_{s,0} = 0,09;$
 $n_v = \exp(0,0148 - 0,0021 \cdot \text{IBp})$ Schilling
Hartwing 1988
8. $v_{s,0} = 1,296 \cdot \text{IBp}^{-0,116};$
 $n_v = 0$ Sekine et. 1989
9. $v_{s,0} = 17,4 \cdot \exp(-0,0113 \cdot \text{IBp}) + 3,931;$
 $n_v = 0,9834 \cdot \exp(0,00581 \cdot \text{IBp}) + 1,043$ Haertel 1990
10. $v_{s,0} = 17,4 \cdot \exp(-0,0581 \cdot \text{IBp}) + 3,931;$
 $n_v = 0,9834 \cdot \exp(0,00581 \cdot \text{IBp}) + 1,043$ Otterpohl
Freund 1993

Najnatančneje jo je obdelal Haertel I. 1990, ko jo je v zgoščevalnem (kompresijskem) delu dopolnil z Ω - funkcijo. Z njegovim modelom sta se še natančneje ukvarjala Otterpohl in Freund v letu 1992, (44).

3.0 POTEK ZGOŠČEVANJA – REZULTATI MERITEV IN IZRAČUNI

3.1. Rezultati meritev

Potek usedanja in zgoščevanja smo opazovali kot enoten proces v usedalnem cilindru, čeprav sta ta dva postopka običajno na čistilnih napravah ločena (usedalniki, zgoščevalci). Usedanje v usedalnikih poteka običajno ca. 2 uri, zgoščevanje blata pa ca. 24 ur. Fizikalno sta si ta dva procesa enaka (pod vplivom sile teže se suspenzija useda), le da imamo opravka z različno gosto suspenzijo.

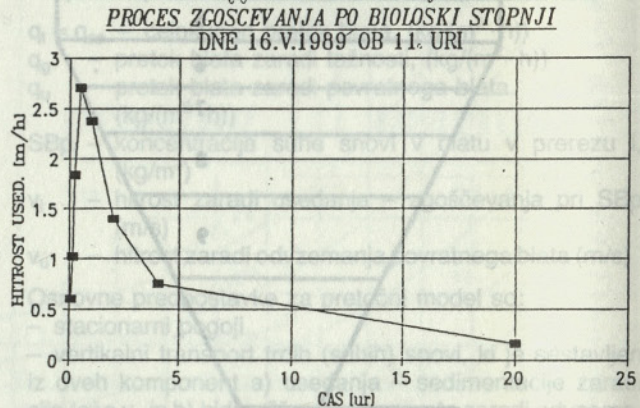
Opravili smo analizo vseh klasičnih kakovostnih parametrov in tudi z laserjem določili volumsko koncentracijo suspendiranih snovi (v odpadni vodi-tekočini).

Poleg analiz pa smo spremljali tudi spreminjanje nivoja (volumna) suspenzije oziroma blata.

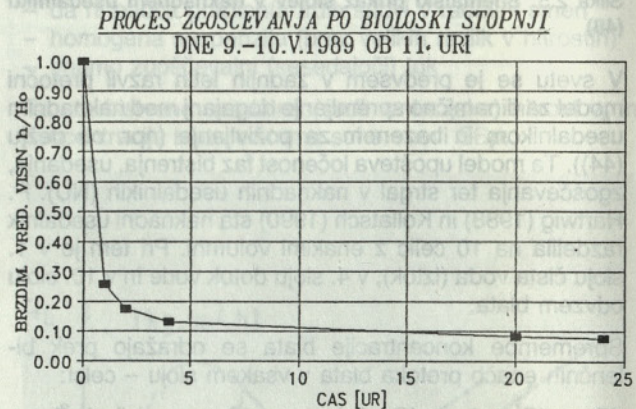
Spremljanje nivoja blata nam je omogočilo računanje

gostot suspenzije in izračun faktorja k iz enačbe 2.3. Ugotovili smo, da k ni konstanta, ampak linearna funkcija višine oziroma nivoja blata.

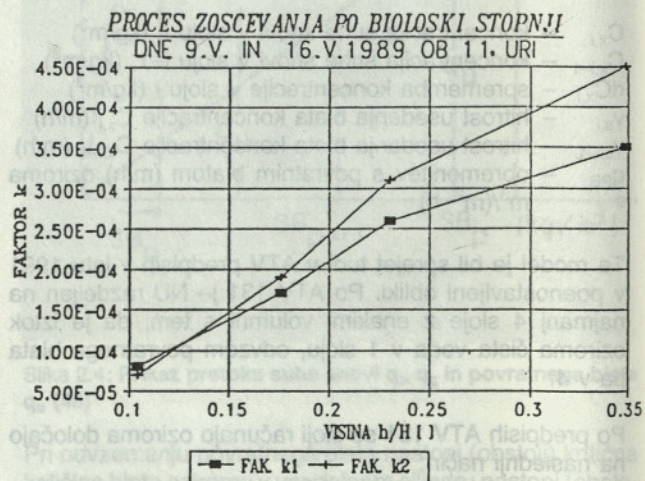
Hitrost zniževanja nivoja blata oziroma usedanja prvo uro narašča potem pa eksponentialno upada naslednjih 23 ur.



Slika 3.1: Hitrost usedanja in zgoščevanja po prezračevanju dne 16. V. 1989.



Slika 3.2: Proces usedanja in zgoščevanja po prezračevanju dne 9.-10. V. 1989 kot brezdimenzijska vrednost spreminjanja nivoja suspenzije oziroma blata.



Slika 3.3: Faktor zgoščevanja k kot funkcija nivoja blata.

3.2. Prikaz procesa zgoščevanja po pretočnem modelu

Primerjali smo teoretične vrednosti krivulj zgoščevanja po enačbi:

$$v_s(SB) = v_{s,0} \cdot \exp(-n_v \cdot SBp) \quad (2.21)$$

pri tem so:

$$v_{s,0} = 17,4 \cdot \exp(-0,0581 \cdot IBp) + 3,931;$$

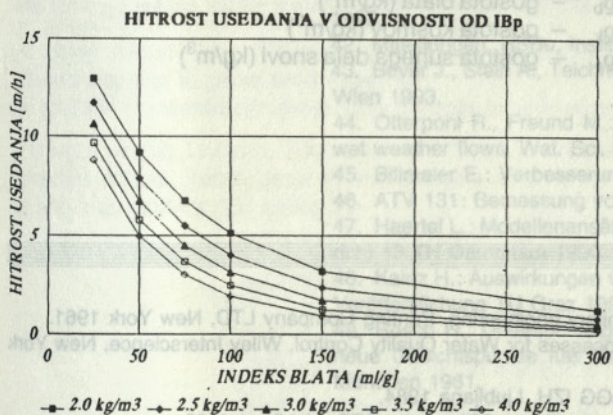
$$n_v = 0,9834 \cdot \exp(0,00581 \cdot IBp) + 1,043$$

$$IBp = VBp/SBp.$$

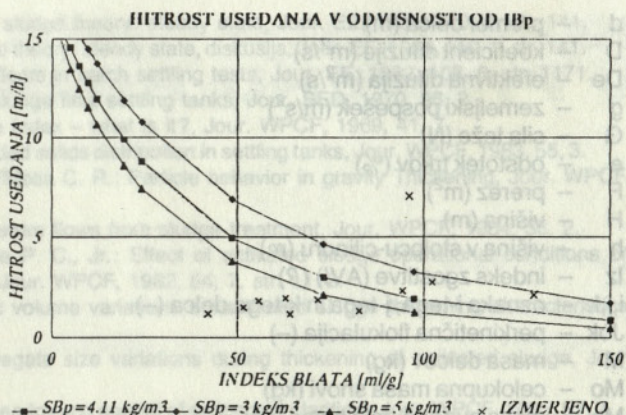
To je enačba po dveh avtorjih Otterpohlu in Freundu, ki sta jo objavila v letu 1992 v (44).

Pri tem je v_s hidravlična površinska obremenitev oziroma hitrost usedanja blata koncentracije $C_{x,i}$ (m/h). Volumen blata VBp določimo po polurnem usedanju. Sušino blata pa določimo po dveh urah sušenja pri 105°C.

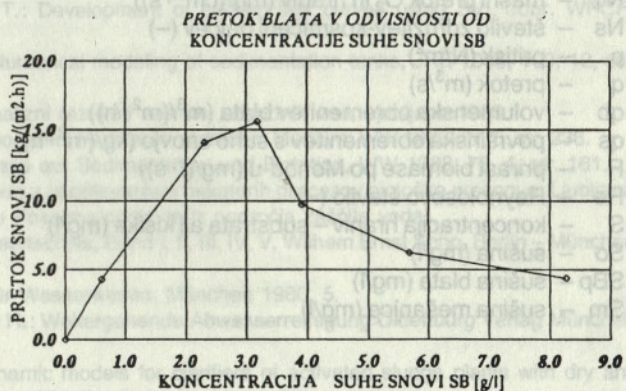
Pri tehnološki obdelavi odpadne vode v naknadnih usedalnikih je zgornja enačba za modeliranje s pretočnim modelom najprimernejša. Na prvem diagramu sl. 3.4 so podane teoretične vrednosti (krivulje), na sl. 3.5 pa so poleg dejanskih vrednosti za krivuljo vrisane tudi izmerjene vrednosti. Na diagramu 3.6 pa je prikazana izmerjena vrednost pretoka suhe snovi v cilindru na podlagi enačbe 2.21.



Slika 3.4: Hitrost usedanja v odvisnosti od indeksa blata, izračunane po enačbi dinamičnega dela modela zgoščevanja pri različnih sušinah blata.



Slika 3.5: Hitrost usedanja v odvisnosti od indeksa blata, izračunane in izmerjene vrednosti pri sušini blata 4,11 kg/m³ ter 3,0 in 5,0 kg/m³.



Slika 3.6: Eksperimentalno določena krivulja pretoka v odvisnosti od suhe snovi.

4. SKLEP

Teoretično in eksperimentalno je obravnavan proces zgoščevanja gostih suspenzij v fazi »mirnega« zgoščevanja. Prikazani so trije različni modeli zgoščevanja, in sicer t. i. hidravlični, kompresijski in pretočni model.

Natančneje je bil obdelan le tisti del dinamičnega modela spremljanja dogajanj v naknadnih usedalnikih, tj. usedanja in zgoščevanja po (44), ki je povezan z bazenom za poživiljanje (povratnim blatom). Rezultati poizkusov se dobro ujemajo s teoretičnim izračunom.

Za hitrost zniževanja nivoja blata oziroma usedanja smo ugotovili, da prvo uro narašča, potem pa eksponentialno upada naslednjih 23 ur. Za proces zgoščevanja je bil prvič pri nas uveden tudi t. i. indeks zgostitve.

Uporabljene oznake:

- Ao – površina (m²)
- C – koncentracija snovi, masa na enoto volumna, prostorninska masa (mg/l)
- Co – koncentracija v času t = 0 (mg/l)
- Css – koncentracija suspendiranih snovi (mg/l)



**ZVEZA DRUŠTEV GRADBENIH
INŽENIRJEV IN TEHNIKOV
SLOVENIJE**

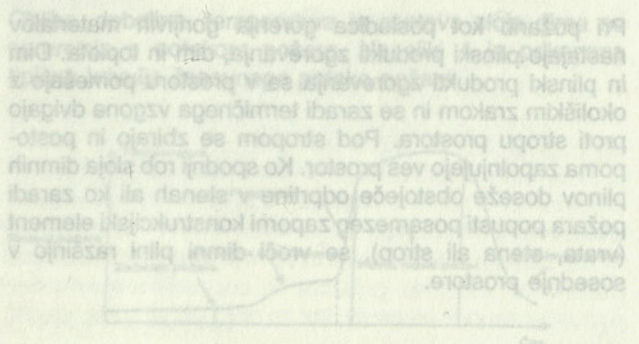
LJUBLJANA, ERJAVČEVA ULICA 15

d	– premer delca (m)	SS	– suspendirana snov (mg/l)
D	– koeficient difuzije (m^2/s)	t	– čas (s)
De	– efektivna difuzija (m^2/s)	To	– časovni interval (s)
g	– zemeljski pospešek (m/s^2)	T	– temperatura v stopinjah Kelvina (st)
G	– sila teže (N)	v	– hitrost (m/s)
e	– odstotek trkov (%)	vo	– površinska obremenitev (m/h), ($m^3/(m^2 \cdot h)$)
F	– prerez (m^2)	vs	– hitrost usedanja (m/s)
H	– višina (m)	vb	– površinska obremenitev s sušino blata (m/h)
h	– višina v stolpcu-cilindru (m)	V	– volumen (m^3)
Iz	– indeks zgostitve (AVI) (?)	Vo	– volumen suspenzije v času $t = 0$, (m^3)
i,j,k	– oznaka i-tega, j-tega in k-tega delca (–)	Vm	– volumen mešanice (m^3)
Jok	– perkinetična flokulacija (–)	Vb	– volumen blata (m^3)
M	– masa delcev (kg)	Vp	– volumen prostorninske koncentracije delcev (m^3)
Mo	– celokupna masa snovi (kg)	Vs	– volumen suhega dela snovi (m^3)
Ms	– masa suhega dela snovi (kg)	Zo	– začetna višina (m)
Mp	– masa delcev (kosmičev) (kg)	zi	– višina po času t (m)
n	– število meritev (–)	ε	– poroznost (–)
Ni	– število delcev (–)	μ	– specifična rast ()
N φ	– masni pretok O ₂ in hraniv ($mg/(cm^2 \cdot s)$)	v	– kinematična viskoznost (m^2/s)
Ns	– število združitvev-kosmičenj delcev (–)	Θ	– mešalni čas (s)
p	– pritisk (N/m^2)	φ_a	– volumsko razmerje Vb/Vo (–)
q	– pretok (m^3/s)	φ_m	– volumsko razmerje Vm/Vo (–)
qb	– volumenska obremenitev blata ($m^3/(m^2 \cdot h)$)	φ_k	– volumsko razmerje Vp/Vo (–)
qs	– površinska obremenitev s suho snovjo ($kg/(m^2 \cdot h)$)	φ_s	– volumsko razmerje Vs/Vo (–)
R	– prirast biomase po Monod-u ($mg/(l \cdot s)$)	Φ	– volumen delca (m^3)
Re	– Reynoldsovo število (–)	Q _{ss}	– gostota suspenzije (kg/m^3)
S	– koncentracija hraniv – substrata ali kisika (mg/l)	Q _m	– gostota mešanice (kg/m^3)
So	– sušina (mg/l)	Q _b	– gostota blata (kg/m^3)
SBp	– sušina blata (mg/l)	Q _k	– gostota kosmov (kg/m^3)
Sm	– sušina mešanice (mg/l)	Q _s	– gostota suhega dela snovi (kg/m^3)

LITERATURA

1. L. G. Rich: Unit operations of sanitary engineering, Printing Company LTD, New York 1961.
2. Weber J. W.: Physicochemical processes for Water Quality Control, Wiley Interscience, New York 1972.
3. J. Panjan: Magistrska naloga, FAGG IZH, Ljubljana 1984.
4. J. Kolar: Odvod odpadne vode iz naselij in zaščita voda, DZS, Ljubljana 1983.
5. M. Zlokarnik: Ähnlichkeitstheorie in der Verfahrenstechnik, Bayer 1984.
6. W. Jost: Diffusion in Solids, Liquids, Gases, Academic press inc., Publishe, New York 1952.
7. Poročilo o rezultatih preizkusa čiščenja odpadnih vod Ljubljane na pilotni čistilni napravi, nosilec nalog prof. dr. M. Rismal s sodelavci, Ljubljana, julij 1989.
8. Particle sizer reference manual, Malvern instruments, England.
9. U. Zanke: Grundlagen der Sedimentbewegung Springer-Verlag, Berlin 1982.
10. A. Trstenjak: Ekološka psihologija, ČGP Delo, Gospodarska zbornica, Ljubljana 1984.
11. Water resources and environmental engineering McGraw-Hill – Series, New York 1971.
12. A. James, An Itrouction to Water Quality Modelling, John Wiley and Sons, Chichester, New York 1984.
13. L. D. Landau, E. M. Lifschiz: Mehanika neprekidnih sredina, Gradževinska knjiga, Beograd 1965.
14. Eckenfelder W. Wesley, Jr.: Industrial water pollution control, McGraw-Hill Book Company, New York 1989.
15. Severin B. F.: Flocculant settling dynamics under constant load, Jour. EE, 1986, 112, 1.
16. Cleasby J. L.: Is velocity gradient a valid turbulent flocculation parameter?, Jour. EE, 1984, 110, 5.
17. Lo Richard T. Y.: Flocculent settling in quiescen.
18. Kim B. R.: Settling of Coal Ashes, Jour. EE, 1983, 109, 1.
19. Lawlier D. F.: Particles in thickening: Mathematical model, Jour. EE, 1983, 109, 2.
20. Schamber D. R.: Particle Concentration Predictions in Settling Basins, Jour. EE, 1983, 109, 3.

21. Mikesel D. R.: New activated sludge theory: steady state, Jour. EE, 1984, 110, 1, str. 141.
22. Dick I. R.: New activated sludge theory: steady state, diskusija, Jour. EE, 1984, 110, 1, str. 141.
23. Daxon D. C.: Compression effects in batch settling tests, Jour. EE, 1982, 108, 6, str. 1171.
24. Dick I. R.: Role of activated sludge final settling tanks, Jour. SED, 1970, 96, 2.
25. Dick I. R.: The sludge volume index – what is it?, Jour. WPCF, 1969, 41, 7.
26. Tay J. H.: Velocity and suspended solids distribution in settling tanks, Jour. WPCF, 1983, 55, 3.
27. Lawler D. F., Singer P. C., O'Melia C. R.: Particle behavior in gravity Thickening, Jour. WPCF, 1982, 54, 10.
28. Lawler D. F., Singer P. C.: Return flows from sludge treatment, Jour. WPCF, 1984, 56, 2.
29. Tuntoolavest M., Grady Leslie P. C., Jr.: Effect of activated sludge operational conditions on sludge thickening characteristics, Jour. WPCF, 1982, 54, 7, str. 1112.
30. Knocke W. R.: Effects of floc volume variations on activated sludge thickening characteristics, Jour. WPCF, 19.
31. R. Javaher, R. I., Dick: Aggregate size variations during thickening of activated sludge, Jour. WPCF, 1969, R198.
32. Keinath M. T.: Operational dynamics and control of secondary clarifiers, Jour. WPCF, 1985, 57, 7.
33. Edde H. J., Eckenfelder W. W. Jr.: Theoretical concept of gravity sludge thickening; Scaling-up laboratory units to prototype design, Jour. WPCF, 1968, 40, 8, Part 1.
34. Daigger T. G., Roper E. R., Jr.: The relationship between SVI and activated sludge settling characteristics, Jour. WPCF, 1985, 57, 8, str. 859.
35. Wahlberg J. E., Keinath M. T.: Development of settling flux curves using SVI, Jour. WPCF, 1,111,060, 12, str. 2095.
36. Imam E., McCorquale J. A.: Numerical modeling of sedimentation tanks, JHE 1983, 109, 12, str. 1740.
37. DO Vodovod-Kanalizacija: Analizni rezultati vzorcev odpadnih vod, Ljubljana 1989.
38. Toedten H.: Absetzverhalten poroeser Partikel in ruhendem Medium, WW 1987, 77, 5, str. 236.
39. J. Panjan: Analyse der Einflüsse auf Sedimentation und Flotation, WW 1988, 78, 4, str. 161.
40. Kolar J.: Čiščenje odpadne vode z upoštevanjem nekaterih procesov biološke presnove, Ljubljana 1988 (nerecenziran del publikacije Posebna poglavja iz področja zaščite voda).
41. Lehr und Handbuch der Abwassertechnik, Band I, II, III, IV, V, Wilhem Ernst Sohn, Berlin – München 1982.
42. Mitteilungen, HSBu, Institut für Wasserwesen, München 1980, 5.
43. Bever J., Stein A., Teichmann H.: Weitergehende Abwasserreinigung Oldenburg Verlag München Wien 1993.
44. Otterpohl R., Freund M.: Dynamic models for clarifiers of activated sludge plants with dry and wet weather flows, Wat. Sci. Tech, 1992, 26, 5–6.
45. Billmeier E.: Verbesserung der Feststoffretention in Nachklärbecken, AWT 1993, 2.
46. ATV 131: Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen ab 5000 Einwohnerwerten, 1991.
47. Haertel L.: Modellenansätze zur dynamischen Simulation des Belebtschlammverfahrens, Fachbericht 13 TH Darmstadt 1990.
48. Kainz H.: Auswirkungen von Stossbelastungen auf den Feststoffhaushalt einer Belebungsanlage, Veröffentlichung TU Graz 1991.
49. Resch H.: Untersuchungen an vertikal durchstörten Nachklärbecken von Belebungsanlagen – neue Gesichtspunkte fuer Bemessungen, Wassergütewirtschaft und Gesundheitsingenieurwesen, München 1981.



Slika 4: Potek temperature in faze požara v zgradbah

KONTROLA DIMA IN TOPLOTE V PRIMERU POŽARA

UDK 614.841:662.96

BOJAN GRM

POVZETEK

V članku so prikazani:

mehanizmi nastajanja dima v odvisnosti od poteka požara, modeli, s katerimi lahko opišemo nastajanje in odvod dima, mehanizmi in metode kontrole dima v objektih in osnovne lastnosti posameznih elementov sistemov za kontrolo dima v primeru požara.

SMOKE AND HEAT CONTROL

SUMMARY

The mechanisms and models for smoke development and smoke venting, mechanisms for smoke control, as well as the basic properties of individual elements of different smoke control systems are described in the article.

LITERATURA

UVOD

Pri požarih kot posledica gorenja gorljivih materialov nastajajo plinski produkti zgorevanja, dim in toplota. Dim in plinski produkti zgorevanja se v prostoru pomešajo z okoliškim zrakom in se zaradi termičnega vzgona dvigajo proti stropu prostora. Pod stropom se zbirajo in postopoma zapolnjujejo ves prostor. Ko spodnji rob sloja dimnih plinov doseže obstoječe odprtine v stenah ali ko zaradi požara popusti posamezen zaporni konstrukcijski element (vrata, stena ali strop), se vroči dimni plini razširijo v sosednje prostore.

Ti sproščeni dimni plini in toplota:

- ogrožajo življenja in zdravje ljudi;
- ogrožajo imovino v prostoru;
- predstavljajo nevarnost za razširitev požara na sosednje prostore in sosednje objekte;
- ovirajo ali onemogočajo učinkovito gašenje požara.

Naprave in sistemi za odvod dima in toplote v povezavi z ostalimi požarnovarnostnimi ukrepi v primeru požara omogočajo:

- varno evakuacijo vseh ljudi, ki so v prostoru;
- znižanje temperature v prostoru in s tem manjše poškodbe konstrukcijskih gradbenih elementov in premičnin v prostoru;
- zmanjšanje možnosti za nastanek polno razvitega požara v prostoru in za razširitev požara na sosednje prostore in objekte;
- lažje in učinkovitejše gašenje požara zaradi boljše vidljivosti, nižjih temperatur in ohranjanja nizkih koncentracij toksičnih produktov zgorevanja.

Avtor:

Bojan Grm, mag., dipl. inž., CPZT – Center za prenos znanja in tehnologij, DE Radovljica, Triglavska 38, 64240 Radovljica, SLO

1. POTEK POŽARA IN SPROŠČANJE DIMA

Pri požarih se kot rezultat gorenja gorljivih materialov:

- sprošča **toplota**;
- spreminjajo osnovne sestavine gorljivih materialov ali goriv iz originalne kemijske sestave v eno ali več drugih spojin, npr. ogljikov dioksid, ogljikov monoksid, voda in/ali druge spojine. Večina teh produktov zgorevanja je v plinskem stanju (plini, hlapi) – **plinski produkti gorenja**;
- sproščajo v ozračje zaradi nepopolnega sežiga delno zgoreli ali nezgoreli deli gorljivih materialov, v trdnem (**saje**) in/ali v tekočem stanju (**kapljice**) ter ostanek popolno zgorelih gorljivih materialov v trdnem stanju – **pepel**.

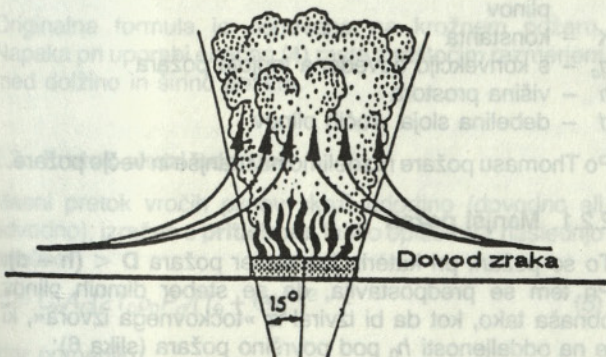
Po definiciji **dim** predstavlja zmes vročih hlapov in plinov, ki nastanejo pri sežigu skupaj z nezgorelimi razpadnimi in kondenzacijskimi produkti v trdnem in/ali tekočem stanju ter zraka, ki se primeša produktom gorenja.

Večina toplote, ki se sprosti pri požaru, ostane v masi produktov, ki nastanejo pri požaru. Zato se ta masa produktov segreva in ekspandira. Postaja lažja od okoliškega zraka in se dviga. Gibanje je turbulentno, zato poteka v dvigajočo maso dima stalen dotok velikih količin zraka iz neposredne okolice požara.

Ta dotok zraka iz okolice:

- povečuje skupno maso in volumen stebra dima;
- ohlaja steber dima. Običajno je temperatura na sredini stebra najvišja in pada proti robovom;
- znižuje koncentracijo produktov gorenja v sloju dima.

Po ugotovitvah Taylorja, Thomasa in Hinkelya je kot med mejnim robom stebra dima in okoliškega zraka ter navpično osjo požara 15° (slika 1).

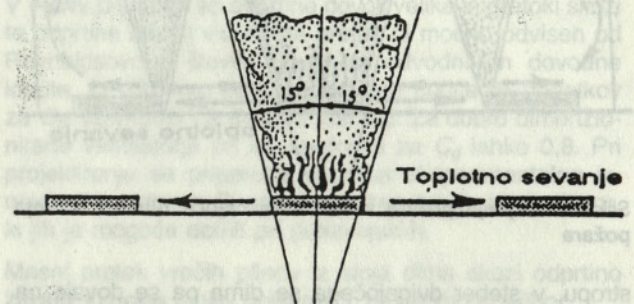


Slika 1: Dvigajoči se steber dima in dotok okoliškega zraka

Toplota se pri požaru prenaša na okolico:

1. s **prevajanjem ali kondukcijo** (zaradi temperaturnih razlik med posameznimi deli predmetov ali med predmeti, ki so v direktnem stiku);
2. s **konvekcijo** (zaradi vertikalnega gibanja segretega zraka oziroma dima);

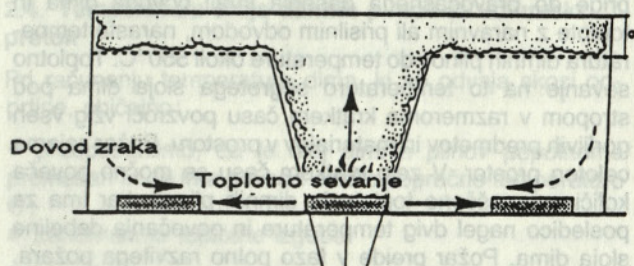
3. s **toplotnim sevanjem** (zaradi temperature segrelih teles; je funkcija temperature telesa na četrto potenco; razprostira se v vse smeri).



Slika 2: Širjenje požara s toplotnim sevanjem

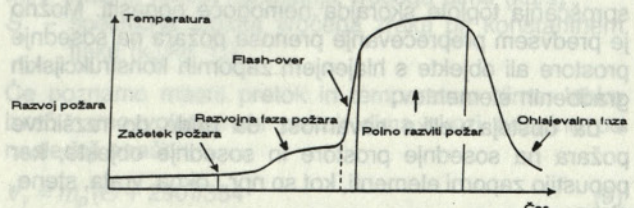
Toplotno sevanje žarišča požara je v večini primerov vzrok za segrevanje vseh gorljivih predmetov, ki so v neposredni bližini, niso pa v direktnem stiku s požarom (slika 2). Ko se gorljivi predmeti segrejejo do temperature samovžiga, se vžgejo in požar se razširi.

Dim, ki nastaja pri požaru in se zaradi vzgona dviga, se nabira pod stropom prostora in tvori sloj vročega dima (slika 3).



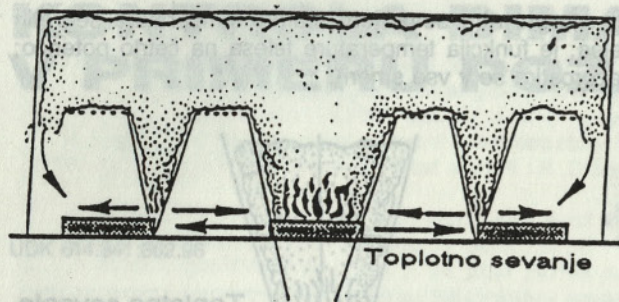
Slika 3: Nastanek sloja dima pod stropom

Oblika, debelina, temperatura in sestava sloja dima se spreminja s potekom požara. Na sliki 4 je prikazana tipična krivulja časovnega poteka požara.



Slika 4: Potek temperature in faze požara v zgradbah

V **fazi naraščajočega požara**, ki sledi fazi nastanka požara, se zaradi že navedenih vzrokov požar razširi. Nastanejo nova žarišča, ki tudi sproščajo dim in oddajajo toploto (slika 5). Dim se na žariščih požara dviga proti



Slika 5: Širjenje požara v fazi naraščajoče hitrosti razvoja požara

stropu, v stebri dvigajočega se dima pa se dovaja na začetku svež zrak, kasneje pa tudi s produkti gorenja kontaminiran zrak.

Če prostor v zgornjem delu nima vertikalnih ali horizontalnih odprtih, debelina in temperatura sloja dima naraščata. Ko se višina sloja dima spusti do višine vrat ali drugih odprtih v stenah, se dim prične širiti tudi v sosednje prostore, če zapore niso dimotesne. Zaradi dima je v tej fazi že otežkočena evakuacija v prostoru nastanka požara in v sosednjih prostorih (hodniki, stopnišča). Isto velja tudi za gašenje.

Če je v prostoru nastanka požara dovolj gorljivega materiala in zadosten dovod svežega zraka (kisik) ter če ne pride do pravočasnega gašenja in/ali odvoda dima in toplote z naravnim ali prisilnim odvodom, naraste temperatura dimnih plinov do temperature okoli 550 °C. Toplotno sevanje na to temperaturo segretega sloja dima pod stropom v razmeroma kratkem času povzroči vžig vseh gorljivih predmetov in materialov v prostoru. Požar zajame celoten prostor. V zelo kratkem času se močno poveča količina sproščene toplote in dimnih plinov, kar ima za posledico nagel dvig temperature in povečanja debeline sloja dima. Požar preide v fazo polno razvitega požara. Ta prehod se v strokovni literaturi označuje kot »flash-over«.

Za fazo polno razvitega požara je značilno:

- da je v požar zajet celoten prostor;
- da so temperature v prostoru okoli 1000 °C;
- da je požar zaradi visokih temperatur in visoke hitrosti sproščanja toplote skorajda nemogoče pogasiti. Možno je predvsem preprečevanje prenosa požara na sosednje prostore ali objekte s hlajenjem zapornih konstrukcijskih gradbenih elementov;
- da obstaja velika nevarnost, da pride do razširitve požara na sosednje prostore in sosednje objekte, ker popustijo zaporni elementi, kot so npr.: okna, vrata, stene, strop;
- da sta evakuacija in gašenje v tem prostoru nemogoča;
- da je škoda na gradbenih konstrukcijskih elementih in proizvodni opremi zelo velika.

Potek faze pojemajočega požara je odvisen predvsem od količine in vrste gorljivih materialov in od gašenja.

2. HITROST NASTAJANJA DIMA IN PRETOK SKOZI ODPRTINE TER OSTALI ZA PROJEKTIRANJE POMEMBNI PARAMETRI

2.1. Osnove

Osnovno teorijo mehanizma nastajanja in odvajanja dima v primeru požara je leta 1963 postavil Thomas s sodelavci na British Fire Research Station [3]. V kasnejših letih so teorijo in podane enačbe še dopolnili [1, 2, 4, 5, 6], tako da predstavljajo osnovo za vse računske metode in nomograme, ki so nastali za projektiranje in dimenzioniranje odvoda dima z naravnim ali prisilnim odvodom v posameznih nacionalnih predpisih in standardih. Pri posameznih računskih metodah in nomogramih so bile upoštewane različne predpostavke in poenostavitve, zato se dobljeni rezultati med seboj razlikujejo.

Za večino požarov je značilno, da je delež oziroma količina plinskih produktov gorenja, ki se sprostijo v dvigajočo maso dima, zanemarljiva v primerjavi z deležem oziroma količino zraka, ki se v ta stebel dima dovede iz okolice. Zato je količina (volumen) dima, ki se dviga nad mestom požara, se nabira pod stropom in jo je potrebno odvesti iz prostora, odvisna predvsem od velikosti oziroma intenzitete požara in manj od geometrije prostora, kot je obratno značilno za prezračevanje.

2.2. Hitrost nastajanja dima

Masni tok zraka, ki doteka v dvigajoči se »hladni« stebel plinov nad točkovnim izvorom toplote, lahko opišemo z naslednjo splošno enačbo:

$$m = Kq_c^{1/3}(h-d)^{5/3} \quad (1)$$

kjer pomenijo:

- m – masni tok zraka, ki doteka v dvigajoči se stebel plinov
- K – konstanta
- q_c – s konvekcijo odvedena toplota požara
- h – višina prostora
- d – debelina sloja vročih plinov

Po Thomasu požare razdelimo na manjše in večje požare.

2.2.1. Manjši požari

To so požari, pri katerih je premer požara $D < (h - d)$. Pri tem se predpostavlja, da se stebel dimnih plinov obnaša tako, kot da bi izviral iz »točkovnega izvora«, ki je na oddaljenosti h_0 pod površino požara (slika 6):

$$h_0 = 1,5 A_f^{1/2} \quad (2)$$

kjer pomeni A_f površino požara.

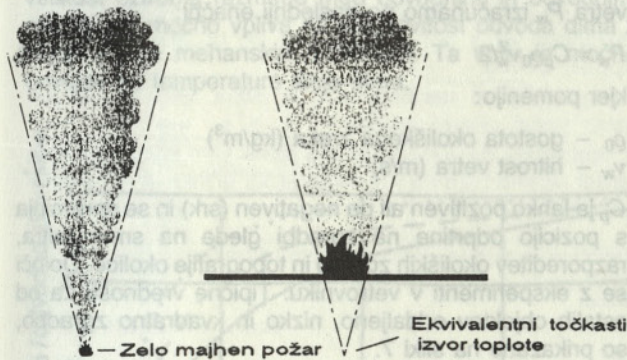
Pri majhnih požarih maso zraka, ki vstopa v požar, izračunamo z naslednjo enačbo:

$$m_p = 0,153 \rho_c q_c g / (\rho_c C_p T_0)^{1/3} (h + h_0 - d)^{5/3} \quad (3)$$

kjer pomenijo:

- m_p – masna hitrost nastajanja dima (kg/s)
- ρ_c – gostota dima nad požarom v višini stropa (m)

- C_p – specifična toplota zraka
- T_0 – temperatura okolice (K)
- d – debelina sloja vročih dimnih plinov pod stropom.



Slika 6: Manjši požari

2.2.2. Večji požari

To so požari, pri katerih je premer požara $D > (h - d)$ in ki oddajajo dovolj toplote, tako da plameni segajo v sloj dimnih plinov.

Količino zraka, ki se dovaja v požar iz okolice požara, in s tem količino dima, ki nastane pri požaru, lahko opišemo z naslednjo poenostavljeno enačbo:

$$m_p = 0,188 P (h-d)^{3/2} \quad (4)$$

kjer pomenijo:

- m_p – masna hitrost nastajanja dima (kg/s)
- P – obseg požara (m)
- $(h - d)$ – višina brezdimne cone oziroma oddaljenost od tal do spodnje meje sloja dima (m)

Originalna formula je osnovana na krožnem požaru. Napaka pri uporabi enačbe (4) raste z rastočim razmerjem med dolžino in širino požara.

2.3. Pretok skozi odprtino

Masni pretok vročih plinov skozi odprtino (dovodno ali odvodno), izražen s pritiskom, lahko opišemo z naslednjo enačbo:

$$m = C_d A_d [2 T_0 \rho_0 P_d / (T_0 + \Theta)]^{1/2} \quad (5)$$

kjer pomenijo:

- m – masni pretok skozi odprtino s pritiskom (kg/s)
- C_d – koeficient iztoka odvodne odprtine
- A_d – površina odprtine (geometrijska) (m²)
- ρ_0 – gostota okoliškega zraka (kg/m³)
- P_d – padec tlaka oziroma razlika tlakov na obeh straneh odprtine (Pa)
- Θ – razlika med temperaturo sloja vročih dimnih plinov in temperaturo okoliškega zraka (K)
- T_0 – temperatura okolice (K)

V zgornji enačbi koeficient pretoka skozi odprtino – C_d

predstavlja razmerje med aerodinamično (efektivno) – A_d in geometrijsko – A_g površino odprtine:

$$C_d = A_d / A_g \text{ ali } A_d = C_d A_g \quad (6)$$

V večini primerov so odprtine dovolj velike in pretoki skozi te odprtine dovolj visoki, da pretok ni močno odvisen od Reynoldsovega števila. Zato za odvodne in dovodne lopute, če nimamo eksperimentalno dobljenih podatkov za C_d , vzamemo za C_d vrednost 0,6. Za dobro dimenzionirane ventilatorje pa so vrednosti za C_d lahko 0,8. Pri projektiranju se priporoča uporaba eksperimentalno izmerjenih vrednosti C_d za posamezno loputo ali ventilator, ki jih je mogoče dobiti pri proizvajalcih.

Masni pretok vročih plinov iz sloja dima skozi odprtino zaradi vzgona lahko opišemo z naslednjo enačbo:

$$m_v = C_d A_g \rho_0 (2gd\Theta T_0)^{1/2} / (T_0 + \Theta) \quad (7)$$

kjer pomenijo:

- m_v – masni pretok skozi odprtino zaradi vzgona (kg/s)
- A_g – površina odprtine (geometrijska) (m²)
- d – debelina sloja vročega dima (m)

Za določeno velikost požara se predpostavlja, da je dosežena debelina sloja dima, tako da je masna hitrost nastajanja dima enaka masni hitrosti odvoda dima skozi odprtine.

2.4. Temperatura sloja dimnih plinov in volumski pretok

Pri računanju temperature dima, ki se odvaja skozi odprtine, običajno:

- predpostavimo, da je sloj dimnih plinov popolnoma premešan in da ima povsod enako poprečno temperaturo Θ ;
- zanemarimo toplotne izgube.

Tako dobimo:

$$\Theta = Q_c / m_p S \quad (8)$$

kjer pomenijo:

- Θ – razlika med srednjo temperaturo premešanega sloja dimnih plinov in temperaturo prostora (°C)
- Q_c – konvektivno oddana toplota požara (kJ/s)
- m_p – masna hitrost nastajanja vročega dima (kg/s)
- S – specifična toplota vročega zraka pri konstantnem tlaku (kJ/kg °C)

Če poznamo masni pretok in temperaturo dima, lahko izračunamo volumenski pretok dima skozi odprtino po naslednji enačbi:

$$V_v = m_p (\Theta + 290) / 354 \quad (9)$$

kjer pomenijo:

- V_v – volumenski pretok dima skozi posamezno ločeno odprtino
- m_p – masna hitrost nastajanja dima (kg/s)
- Θ – razlika med srednjo temperaturo pomešanega sloja dimnih plinov in temperaturo prostora (°C)

2.5. Maksimalne dimenzije posameznih odprtin

Za odvod dima skozi posamezno odprtino velja, da se do določenega pretoka odvaja samo dim iz sloja, ne pa tudi zrak izpod sloja dima. Kriterij za ta maksimalno možni pretok je Freudovo število, ki ne sme prekoračiti kritične vrednosti. Izračunamo jo po naslednji enačbi:

$$F_c = V_v / [(g\Theta / T_0)^{1/2} d^{5/2}] \quad (10)$$

kjer pomenijo:

F_c – Freudovo število – kritična vrednost

V_v – volumenski pretok dima skozi posamezno ločeno odprtino

d – debelina sloja dima

Θ – razlika med temperaturo sloja dima in okoliško temperaturo

T_0 – absolutna temperatura okolice (K)

Za krožne odprtine je $F_c = 1,6$. Raziskave so pokazale, da je najbolj priporočljiva vrednost F_c za odprtine na robovih 2,0, za odprtine na sredini pa 2,5.

Za vzgonski odvod dobimo ob upoštevanju enačb (7) in (10) naslednji izraz za kritično velikost odvodne odprtine:

$$(A_g)_{krit} = 0,707 F_c d^2 / C_d \quad (11)$$

$(A_g)_{krit}$ je največja možna velikost posamezne odprtine, pri kateri še ne pride do vleka tudi hladnejšega zraka. Za $F_c = 1,6$ je $(A_g)_{krit} = 1,9 d^2$, za $F_c = 2,5$ pa je $(A_g)_{krit} = 3,4 d^2$.

2.6. Pritiski, ki vplivajo na pretok skozi odprtine

Če se dim odvaja z ventilatorji, dobimo statično tlačno razliko – ΔP_{st} , ki jo potrebujemo za dimenzioniranje ventilatorja, z izračunom naslednje enačbe:

$$\Delta P_{st} = P_w + P_d - P_b \quad (12)$$

kjer pomenijo:

P_w – pričakovani zunanji tlak zaradi vpliva vetra, ki ga izračunamo z enačbo (13)

P_d – padec tlaka na dovodnih odprtinah oziroma loputih za odvod zraka, ki ga lahko dobimo z izračunom po enačbi (5)

P_b – vzgonski pritisk, ki ga izračunamo po enačbi (14)

Velja, da je vpliv vetra na pretok skozi odvodne odprtine odvisen od hitrosti vetra ter od oblike in velikosti objekta in sosednjih objektov. Ta odvisnost je izražena s koeficientom pritiska – C_p . Pričakovani zunanji tlak zaradi vpliva vetra P_w izračunamo po naslednji enačbi:

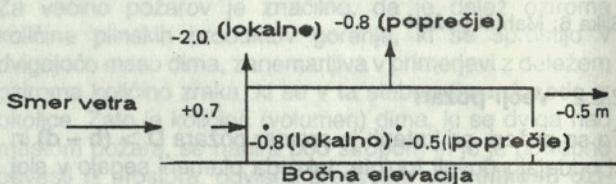
$$P_w = C_p \rho_0 v_w^2 / 2 \quad (13)$$

kjer pomenijo:

ρ_0 – gostota okoliškega zraka (kg/m^3)

v_w – hitrost vetra (m/s)

C_p je lahko pozitiven ali pa negativen (srk) in se spreminja s pozicijo odprtine na zgradbi glede na smer vetra, razporeditev okoliških zgradb in topografije okolice. Določi se z eksperimenti v vetrovniku. Tipične vrednosti za od ostalih objektov oddaljeno, nizko in kvadratno zgradbo, so prikazane na sliki 7.



Slika 7: Tipične vrednosti za koeficient pritiska C_p

Normalni zračni pritisk znaša 101300 Pa na nadmorski višini 0 m in z višino pada z okoli 12 Pa/s. Pritisk v sloju vročih plinov pod stropom pa pada z višino počasneje (slika 8). Če predpostavimo, da so pod slojem dima odprtine, prek katerih je zrak znotraj prostora povezan z zrakom zunaj prostora, potem je pritisk zraka pod slojem dima enak pritisku zunaj prostora na isti višini. V tem primeru je na višini stropa med notranjostjo in zunanostjo naslednja razlika pritiskov:

$$P_b = g \rho_0 \Theta d / (T_0 + \Theta) \quad (14)$$

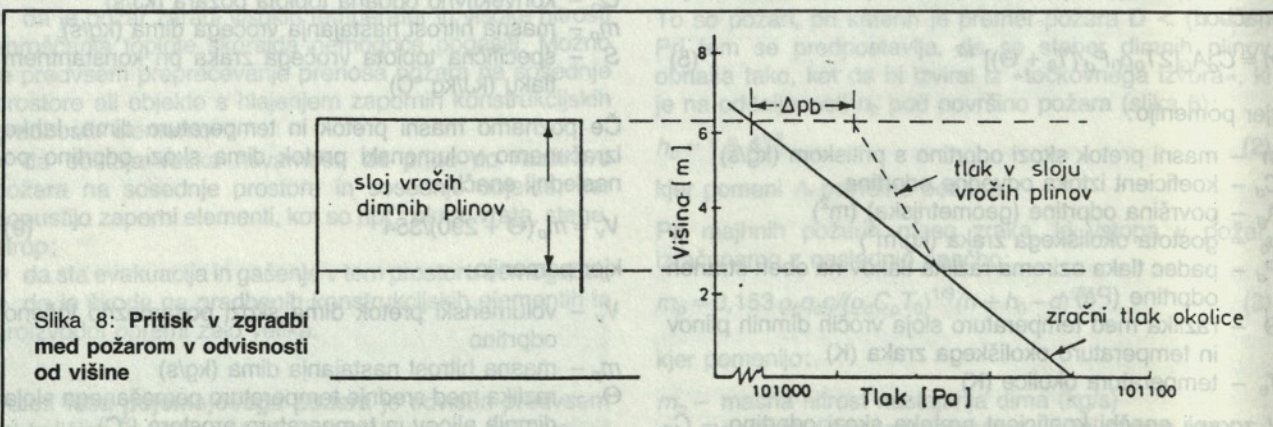
kjer pomenijo:

P_b – pritisk zaradi vzgona (Pa)

d – debelina sloja dima

Θ – razlika med temperaturo sloja dima in okoliško temperaturo ($^{\circ}\text{C}$)

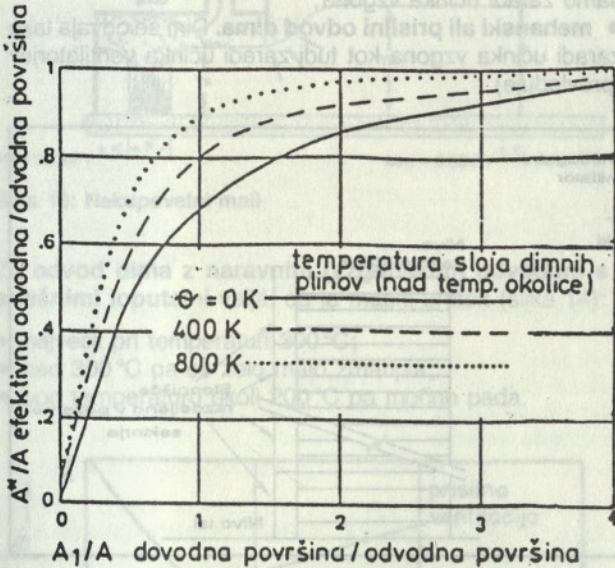
T_0 – absolutna temperatura okolice (K)



Slika 8: Pritisk v zgradbi med požarom v odvisnosti od višine

2.7. Vpliv velikosti površin odprtih za dovod zraka

Za odprtine za dovod zraka v prostor, v katerem je požar in iz katerega poteka odvod zraka velja, da njihova velikost oziroma razmerje med dovodnimi in odvodnimi odprtinami močno vpliva na učinkovitost odvoda dima z naravnimi ali mehanskim odvodom. Ta vpliv je močno odvisen od temperature sloja dima.



Slika 9: Razmerje med dovodnimi in odvodnimi površinami v odvisnosti od temperature sloja dima

Izračuni (slika 9) so pokazali, da, če hočemo zagotoviti delovanje odvoda z vsaj 90% učinkovitostjo glede na izračunano vrednost odvoda, mora biti razmerje med dovodnimi in odvodnimi odprtinami:

- 1,0 za temperature dima 800 °C nad zunanjo temperaturo;
- 2,0 za temperature dima 400 °C nad zunanjo temperaturo;
- 3,0 za temperature dima okoli zunanje temperature.

Odprtine za dovod zraka morajo biti pod slojem dima, zato jih moramo vedno namestiti v spodnjem delu prostorov.

3. NAČINI KONTROLE DIMA, KI NASTAJA PRI POŽARU

S pojmom **kontrola dima** v objektih razumemo vse načine, ki omogočajo sami ali pa v kombinaciji z drugimi preoblikovanje gibanja ali spremembo koncentracije dima, ki nastane pri požaru, s ciljem:

1. omogočiti ali olajšati **evakuacijo** ljudi iz objekta,
2. omogočiti ali olajšati **gasilec** dostop do požara ter gašenje in reševanje,
3. zmanjšati **poškodbe in škodo** na imovini.

3.1. Gradbeni požarnovarnostni ukrepi (razdelitev objekta, mehanske zapore)

Mehanske zapore, kot so npr. stene, predelne stene, stropovi, vrata, lopute in druge, ki imajo ustrezno požarno odpornost, da zdržijo učinke požara, predstavljajo učinkovito sredstvo za preprečevanje širjenja dima.

V vseh državah nacionalni **gradbeni požarnovarnostni predpisi** določajo gradbene požarnovarnostne ukrepe (pasivna požarna zaščita), ki so za posamezne skupine objektov potrebni za preprečitev širjenja požara po objektu. V teh predpisih so tudi navedene zahteve za konstrukcijo, preskušanje in izvedbo:

- požarno odpornih elementov, ki morajo poleg kriterijev požarne stabilnosti in toplotne izolativnosti izpolnjevati tudi kriterij **požarne celovitosti** (preprečen prehod plamenov in vročih plinov);
- zapornih elementov, ki so namenjeni predvsem za preprečevanje širjenja dima, npr. za **dim neprepustna vrata, za dim neprepustne lopute**.

Potrebno je omeniti, da niso vsi zaporni elementi, ki preprečujejo prehod vročega dima enako učinkoviti tudi za hladen dim; to velja predvsem za elemente, pri katerih se doseže zapiranje zaradi učinka povišanja temperature.

Trenutno še ni računske metode, ki bi omogočila izračun uhajanja dima skozi mehanske zapore. Možen je le izračun pretokov skozi odprte zaporne elemente s pomočjo enačbe (6).

3.2. Razredčitev

Ta način je uporaben za vzdrževanje sprejemljive koncentracije dima samo za prostore, v katerih ni požara, ampak pride vanje določena količina dima iz sosednjih prostorov, npr. zaradi odpiranja vrat. Učinkovito je samo, če so količine dima majhne. Redčenje poteka z obstoječim **sistemom za ogrevanje, prezračevanje in klimatizacijo** v prostoru oziroma objektu.

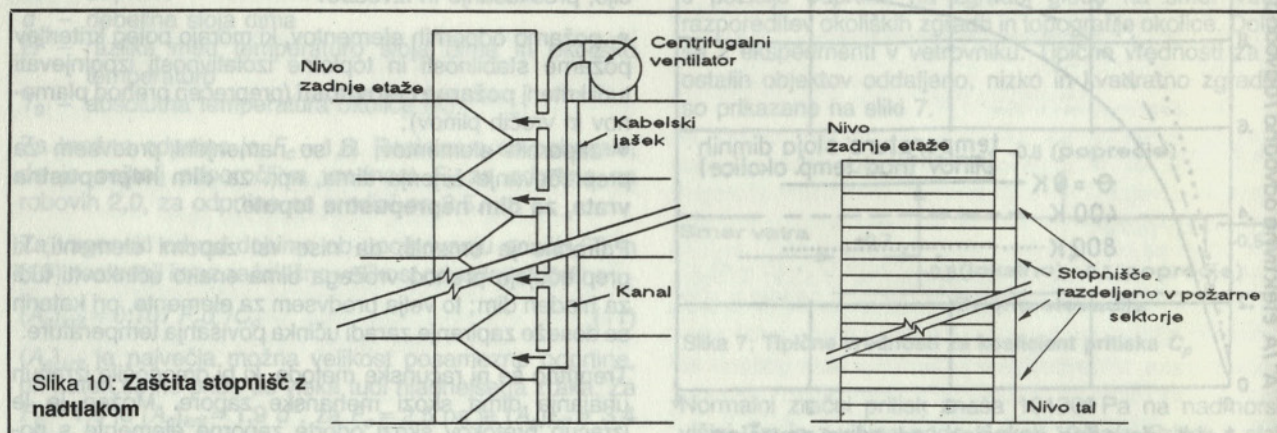
Zmotno je mišljenje, da lahko z obstoječim sistemom za ogrevanje, prezračevanje in klimatizacijo v prostoru oziroma objektu zagotavljamo učinkovito redčenje tudi v prostorih, kjer je požar, in v prostorih, ki so s tem prostorom povezani z večjimi odprtinami. Količine dima, ki nastanejo pri požaru, so v primerjavi s kapaciteto sistema za prezračevanje, ogrevanje in klimatizacijo prevelike. Poleg tega pa velja tudi, da ta sistem nima požarno odpornih ventilatorjev in dimnih loput, v večini primerov pa tudi nima požarnih loput in požarnovarno izvedenih prezračevalnih kanalov, ki bi preprečevali prenos požarov v sosednje prostore. V primeru požara mora sistem za prezračevanje, ogrevanje in klimatizacijo v teh prostorih prenehati delovati.

Uporablja pa se ta sistem lahko za odstranitev dima z metodo redčenja v vseh prostorih, potem ko je požar pogašen. Na ta način dobimo v krajšem času atmosfero, ki omogoča gibanje po prostorih.

3.3. Kontrola dima z nadtlakom

Sistemi za kontrolo dima z nadtlakom s pomočjo ventilatorjev ustvarjajo v majhnih vrzelih pri zaprtih vratih in ostalih konstrukcijskih elementih zračne tokove z visoko hitrostjo in tako preprečujejo tok dima v obratni smeri. Ta sistem zaščite se najpogosteje uporablja v povezavi z gradbenimi požarnovarnostnimi ukrepi (točka 3.1.) za zaščito stopnišč in za consko kontrolo dima, predvsem v večjih in visokih objektih, kjer se zadržuje oziroma zbira večje število ljudi.

Zaščita stopnišč z nadtlakom (slika 10) se dimenzionira



Slika 10: Zaščita stopnišč z nadtlakom

in izvede, da se zagotovi varno okolje na evakuacijski poti v primeru požara. Ta cilj mora biti izpolnjen tudi v primeru, da manjše količine dima pridejo v stopnišče, npr. ko so nekaj časa zaradi evakuacije odprta posamezna vrata v stopnišče. Pri dimenzioniranju zaščite stopnišč z nadtlakom je potrebno upoštevati naslednje tri pglavltne faktorje:

1. Neenakomerne tlačne razlike, do katerih pride po višini stopnišča.
2. Veliko nihanje tlaka zaradi zapiranja in odpiranja vrat.
3. Lokacija dovodnih odprt in ventilatorjev.

Da bi se zmanjšal vpliv odpiranja in zapiranja vrat, se pogosto uporablja »kanadski sistem«, pri katerem se ob aktiviranju sistema v primeru požara v objektu avtomatsko odprejo v prtiličju zunanja vhodna vrata.

Pri **conski kontroli dima** je objekt razdeljen v več dimnih con, ki so ločene s stenami in stropovi. Osnovni princip tega načina zaščite je, da v primeru požara v posameznem dimnem sektorju zagotovimo v sosednjih dimnih sektorjih stalen dotok zraka in stalen nadtlak, s čimer preprečujemo razširitev dima. V dimnem sektorju, kjer je prišlo do požara, pa lahko odvajamo dim ali pa tudi ne. Če ne odvajamo dima in toplote iz tega dimnega sektorja, velja, da le-ta ostane nezaščiten, zato je v tem primeru iz njega potrebno zagotoviti čim hitrejšo evakuacijo.

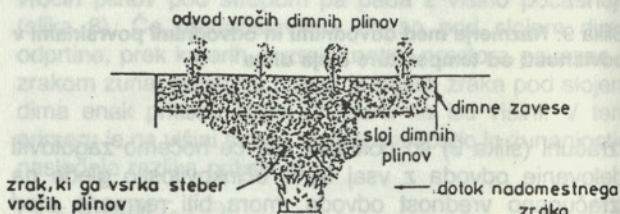
Za dimenzioniranje sistema kontrole dima z nadtlakom obstaja večje število metod, nekatere računalniške omogočajo dimenzioniranje arhitekturno zelo zahtevnih in visokih objektov.

3.4. Odvod dima skozi odprtine

Ta način kontrole dima ima najdaljšo tradicijo. Shematsko je prikazan na sliki 11.

Glede na način odvoda dima iz prostora skozi odprtine (istočasno se s tem odvaja tudi pri požaru sproščena toplota) ločimo:

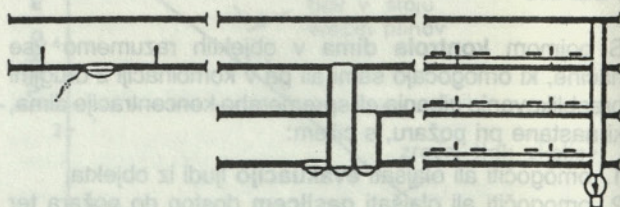
- **vzgonski ali naravni odvod dima.** Dim se odvaja samo zaradi učinka vzgona;
- **mehanski ali prisilni odvod dima.** Dim se odvaja tako zaradi učinka vzgona kot tudi zaradi učinka ventilatorjev (prevladuje).



Slika 11: Kontrola dima z odvodom dima skozi odprtine

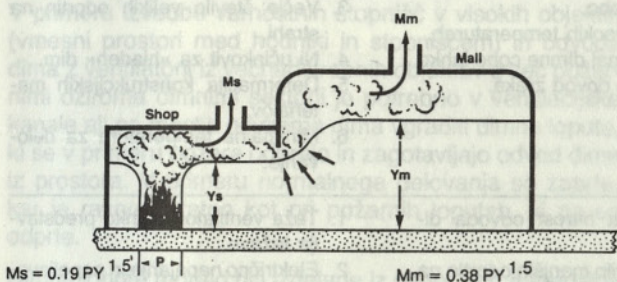
Kontrola dima s pomočjo odvoda se v povezavi z gradbenimi požarnovarnostnimi ukrepi (točka 3.1.) najpogosteje uporablja za zaščito v:

1. **industrijskih objektih** (slika 12), in sicer:
 - v enoetažnih predvsem z vzgonskim odvodom;
 - pri večetažnih pa predvsem z mehanskim odvodom;
2. **podzemnih garažnih hišah**, z mehanskim odvodom;



Slika 12: Odvod dima z uporabo strešnih loput (naravni odvod) in ventilatorjev (prisilni odvod)

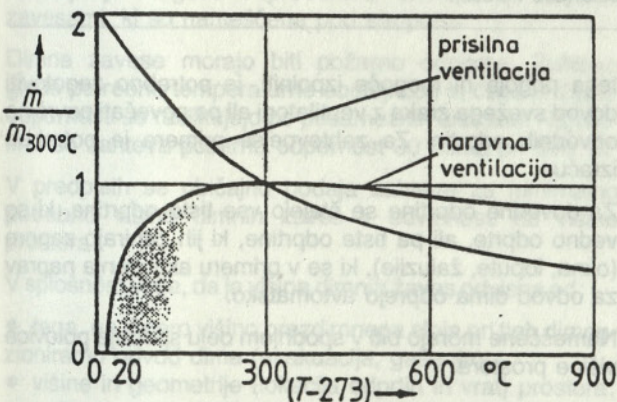
3. **atrijih** oziroma objektih z atriji (vzgonski ali mehanski odvod, odvisno od višine in geometrije atrija);
4. **nakupovalnih »mallih«**¹ (mehanski odvod ali kombinacija obeh).



Slika 13: Nakupovalni mall

Za odvod dima z naravnim (vzgonskim) odvodom s strešnimi loputami velja, da je masni pretok (slika 14):

- največji pri temperaturi 300 °C;
- nad 300 °C pa se zelo malo zmanjša;
- pod temperaturo okoli 200 °C pa močno pada.



Slika 14: Masni tok dima skozi odprtino v odvisnosti od temperature dima

To pomeni, da je odvod dima z vzgonom učinkovit predvsem za višje temperature nad 200 oziroma 300 °C. Zelo učinkovit je tudi za preprečevanje »flash-over« situacije in faze razvitega požara. Za temperature pod 200 °C in za hladen dim pa je neučinkovit.

Iz slike 14 je tudi razvidno, da je **mehanski odvod dima (z ventilatorji)** nasprotno:

- najbolj učinkovit pri sobni in nekoliko zvišani temperaturi (hladen dim);
- z rastočo temperaturo pa pada. Pri okoli 300 °C pade skoraj za polovico, od 300 do 900 °C pa še za nadaljnjo polovico.

¹ Beseda mall se v angleščini uporablja za pokrito površino ali ulico, vzdolž katere so z ene ali pa z obeh strani trgovine in je zaprta za prevoz z motornimi vozili. Prikazan je na sliki 12.

To pomeni, da je mehanski odvod dima primeren predvsem za odvod hladnejšega dima in dima s temperaturo do največ 300 °C. Če hočemo z ventilatorji zagotoviti pri višjih temperaturah enake masne pretoke kot z vzgonskim odvodom, npr. s strešnimi loputami, so za to potrebni ventilatorji zelo visokih zmogljivosti, kar pa je povezano tako z zelo povečano velikostjo in porabo energije kot tudi s precej višjo ceno ventilatorja.

V večini držav se odvod dima z ventilatorji projektira predvsem za uporabo pri nižjih temperaturah (do 300 °C) oziroma za pogoje, ko je z drugimi požarnovarnostnimi ukrepi, kot so požarno javljanje in alarmiranje ter avtomatsko gašenje preprečeno, da bi se požar razvil in razširil. Odvod dima v tem primeru zagotavlja predvsem varno evakuacijo in omogoča hitro in učinkovito posredovanje gasilcev v prostoru, kjer je prišlo do nastanka požara. V preglednici 1 so prikazane prednosti in pomanjkljivosti odvoda dima z vzgonom in ventilatorji.

4. ELEMENTI SISTEMOV ZA KONTROLO DIMA

4.1. Naprave za naravni odvod dima in toplote

Osnovni element sistema za odvod dima z vzgonom predstavljajo naprave za odvod (lopute, žaluzije ipd.), ki so lahko:

- a) strešne (horizontalna namestitev)
- b) stenske (vertikalna namestitev).

Odpiranje naprav za odvod dima z vzgonom je lahko mehansko, hidravlično ali pnevmatsko. Aktiviranje naprave v primeru požara mora biti avtomatsko in ročno. Izdelane morajo biti tako, da je zagotovljeno delovanje tudi v primeru snega.

Učinkovitost posamezne naprave je odvisna od:

- koeficienta pretoka skozi odprtino naprave (konstrukcija);
- vpliva vetra na pretok skozi napravo (konstrukcija);
- velikosti naprave in velikosti dovodnih odprtini;
- lokacije posamezne naprave in ostalih odvodnih naprav;
- časa, ki je potreben za aktiviranje in odpiranje naprave.

Običajne so naprave za odvod dima v primeru požara tako izdelane, da v normalnih pogojih omogočajo tudi prezračevanje prostora.

4.2. Proti požaru odporni ventilatorji za mehanski odvod dima in toplote

Osnovni element sistema odvoda dima z mehanskim prezračevanjem predstavljajo ventilatorji za odvod dima, ki so glede na namestitev lahko:

- a) strešni (horizontalna namestitev)
- b) radialni (vertikalna namestitev)
- c) centralni (namestitev izven prostora, potreben sistem kanalov).

Poleg tega se ventilatorji razlikujejo tudi po:

NAČIN	PREDNOSTI	POMANJKLJIVOSTI
ODVOD Z VZGONOM (STREŠNE LOPUTE)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Nizka teža (če so iz aluminija). 2. Samodejna regulacija. 3. Enostavna usposobitev za ponovno uporabo. 4. Deluje pri visokih temperaturah. 5. Odprtine zunaj dimne cone lahko zagotavljajo dovod zraka. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Velik vpliv vetra. 2. Potrebne velike površine za dovod. 3. Večje število velikih odprtin na strehi. 4. Ni učinkovit za »hladen« dim. 5. Deformacija konstrukcijskih materialov. 6. Minimalna temperatura za delovanje.
ODVOD Z VENTILATORJI	<ol style="list-style-type: none"> 1. Zagotovljena hitrost odvoda dima. 2. Manjše število manjših odprtin na strehi. 3. Učinkovit za »hladen« dim. 4. Potrebe manjše površine za dovod. 5. Lahko se uporablja tudi pri večnadstropnih objektih (vertikalni jaški). 6. Ventilatorji so lahko nameščeni zunaj cone nevarnosti. 7. Omogoča tudi normalno prezračevanje objekta (dve hitrosti). 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Teža ventilatorja lahko predstavlja težavo. 2. Električno napajanje in napeljave. 3. Usposobitev za ponovno uporabo ni vedno mogoča. 4. Visoka cena, če se dimenzionira za visoke temperature (nad 400 °C).

Preglednica 1. Prednosti in pomanjkljivosti odvoda dima z vzgonom in z ventilatorji

- kapaciteti oziroma količini odvedenega dima v m^3/h ;
- požarni odpornosti oziroma po tem, do katere temperature dima in kako dolgo lahko obratujejo in opravljajo svojo funkcijo. Imeti morajo potrdilo o preskusu v ustreznem požarnem laboratoriju. Klasifikacija in požarno testiranje požarno odpornih ventilatorjev se razlikujejo po posameznih državah (pri nas se največ uporablja nemška).

Aktiviranje naprave v primeru požara mora biti avtomatsko in ročno. Izdelani morajo biti tako, da je zagotovljeno delovanje tudi v primeru snega.

Običajno so naprave za odvod dima v primeru požara tako izdelane, da v normalnih pogojih omogočajo tudi prezračevanje prostora.

4.3. Ventilatorji za kontrolo dima z nadtlakom

Za vzdrževanje nadtlaka v posameznih prostorih se uporabljajo ventilatorji, ki ne odvajajo dimnih plinov iz prostora, ampak dovajajo svež zrak. Za te ventilatorje se ne zahteva požarna odpornost.

Aktiviranje ventilatorja v primeru požara mora biti avtomatsko in ročno. Avtomatsko aktiviranje se izvede s pomočjo sistema za javljanje požara (javljavci požara, centrala).

4.4. Odprtine za dovod zraka

Za učinkovito delovanje sistema odvoda dima je potrebno zagotoviti zadostno površino odprtih za dovod svežega zraka. Običajno se uporablja pravilo, da mora biti geometrijska površina odvodnih odprtih dvakrat večja od geometrijske površine odvodnih odprtih. V tem primeru površina dovodnih odprtih ne vpliva bistveno na odvod dima. Če

tega pogoja ni mogoče izpolniti, je potrebno zagotoviti dovod svežega zraka z ventilatorji ali pa povečati površino odvodnih odprtih. Za zahtevnejše primere je potreben izračun.

Za dovodne odprtine se štejejo vse tiste odprtine, ki so vedno odprte, ali pa tiste odprtine, ki jih zapirajo zapore (okna, lopute, žaluzije), ki se v primeru aktiviranja naprav za odvod dima odprejo avtomatsko.

Nameščene morajo biti v spodnjem delu spodnje polovice višine prostora.

4.5. Ventilatorji za dovod zraka

Če nimamo zadostne površine dovodnih odprtih, ki jih zapirajo zaporni elementi, ki se v primeru aktiviranja naprav za odvod dima avtomatsko odprejo, moramo dovajati svež zrak z ventilatorji. Za te ventilatorje ni zahtev glede požarne odpornosti. V tem primeru je potrebno v prostoru izvesti sistem kanalov z odprtinami v spodnjem delu spodnje polovice višine prostora.

4.6. Požarne lopute

V primeru odvoda dima iz večnadstropnih objektov, kjer sistem za odvod dima povezuje več požarnih sektorjev oziroma kanali za odvod dima in dovod zraka potekajo skozi več požarnih sektorjev, je potrebno za preprečevanje širjenja požara v sosednje sektorje v ventilacijske kanale za odvod dima in dovod zraka pri prehodu v sosednje požarne sektorje namestiti požarne lopute, ki imajo požarno odpornost enako kot stene.

Požarne lopute morajo biti tako izvedene, da se v primeru požara aktivirajo avtomatsko (toplotna varovalka, signal

požarnega detektorja ali signal centrale za požarno javljanje) in ročno.

4.7. Dimne lopute

V primeru izvedbe varnostnih stopnišč v visokih objektih (vmesni prostori med hodniki in stopniščem) in odvoda dima z ventilatorji iz večnadstropnih objektov z več požarnimi oziroma dimnimi sektorji je potrebno v ventilacijske kanale ali na mestih odzema dima vgraditi dimne lopute, ki se v primeru požara odprejo in zagotavljajo odvod dima iz prostora. V primeru normalnega delovanja so zaprte, kar je ravno obratno kot pri požarnih loputih, ki pa so odprte.

Dimne lopute morajo biti izdelane iz negorljivih materialov in tako izvedene, da se v primeru požara aktivirajo avtomatsko (toplotna varovalka, signal požarnega detektorja ali signal centrale za požarno javljanje) in ročno.

4.8. Dimne zaves

Da bi preprečili gibanje dima po celotnem objektu ali prostoru, je potrebno posamezne prostore razdeliti v več dimnih sektorjev. Razdelitev prostora v ločene dimne sektorje je mogoča s predelnimi stenami ali dimnimi zavesami, ki so nameščene pod stropom.

Dimne zaves morajo biti požarno odporne. Zahteve glede potrebne temperaturne obstojnosti in časa požarne odpornosti se razlikujejo po posameznih državah. Največkrat se zahteva požarna odpornost 30 minut pri 500 °C.

V predpisih se običajno podaja zahteve za minimalno potrebno višino dimnih zaves v odvisnosti od višine prostora.

V splošnem velja, da je višina dimnih zaves odvisna od:

- tega, na katero višino brezdimnega sloja pri tleh dimenzioniramo odvod dima (evakuacija, gašenje);
- višine in geometrije (lokacija odprt in vrat) prostora;
- požarnega scenarija.

4.9. Kanali za odvod dima in dovod zraka

Prezračevalni kanali za potrebe odvoda dima morajo biti iz negorljivih materialov. Izpolnjevati morajo tudi zahteve glede odpornosti proti nadtlaku oziroma podtlaku.

V primerih, ko potekajo prezračevalni kanali za odvod dima in dovod svežega zraka **skozi več požarnih sektorjev (v horizontalni in/ali vertikalni smeri)**, je potrebno prezračevalne kanale izvesti kot požarno odporne. Požarna odpornost mora biti enaka času, ki se zahteva za delovanje sistema odvoda dima ali požarni odpornosti, ki se zahteva za obodne gradbene elemente požarnih sektorjev ali objekta. Vendar ne sme biti nižja od 30 minut. S tem se preprečuje širjenje požara v sosednje požarne sektorje.

Prezračevalnih kanalov, v katerih vgrajene požarne lopute v primeru požara preprečujejo pretok dima ali zraka v sosednje požarne sektorje, ni potrebno izvesti kot požarno odporne.

4.10. Sistemi za avtomatsko aktiviranje in krmiljenje posameznih elementov in naprav za odvod dima

Za večino elementov sistema za odvod dima se zahteva avtomatsko aktiviranje v primeru požara:

- naprave za odvod dima z vzgonom (lopute, žaluzije) – odpiranje;
- zapore odprt in za dovod zraka (žaluzije, okna, vrata) – odpiranje;
- ventilatorji za odvod dima – vključitev ali preklop v višjo hitrost;
- ventilatorji za dovod zraka – vključitev ali preklop v višjo hitrost;
- požarne lopute v prezračevalnih kanalih – zapiranje;
- dimne lopute v prezračevalnih kanalih in odvodnih mestih – odpiranje.

Avtomatsko aktiviranje posamezne naprave je možno izvesti na enega od naslednjih načinov:

- s toplotno varovalko;
- na signal posameznega požarnega detektorja (dimni, toplotni, plamenski itd.);
- na signal iz centrale požarnega javljanja.

V nekaterih primerih je potrebno v primeru požara tudi izključiti prezračevanje v posameznih prostorih.

Za učinkovito delovanje sistemov kontrole dima z nadtlakom v večnadstropnih objektih in v objektih z večjim številom požarnih sektorjev se v večini primerov potreben avtomatski sistem krmiljenja, ki s pomočjo senzorjev in mikroprocesorjev usmerja delovanje posameznih naprav in podsistemov.

Kontrola dima oziroma odvod dima v večjih in zahtevnejših objektih ni možna brez električnih krmilnih naprav in električnih napeljav, ki zagotavljajo aktiviranje in regulacijo med obratovanjem posameznih naprav in podsistemov.

4.11. Zagotavljanje električne energije za aktiviranje in krmiljenje naprav in sistemov za odvod dima

Za delovanje tistih električnih komponent posameznih naprav oziroma celotnega sistema, ki morajo omogočati delovanje sistema odvoda dima v primeru požara (aktiviranje in krmiljenje), je potrebno zagotoviti:

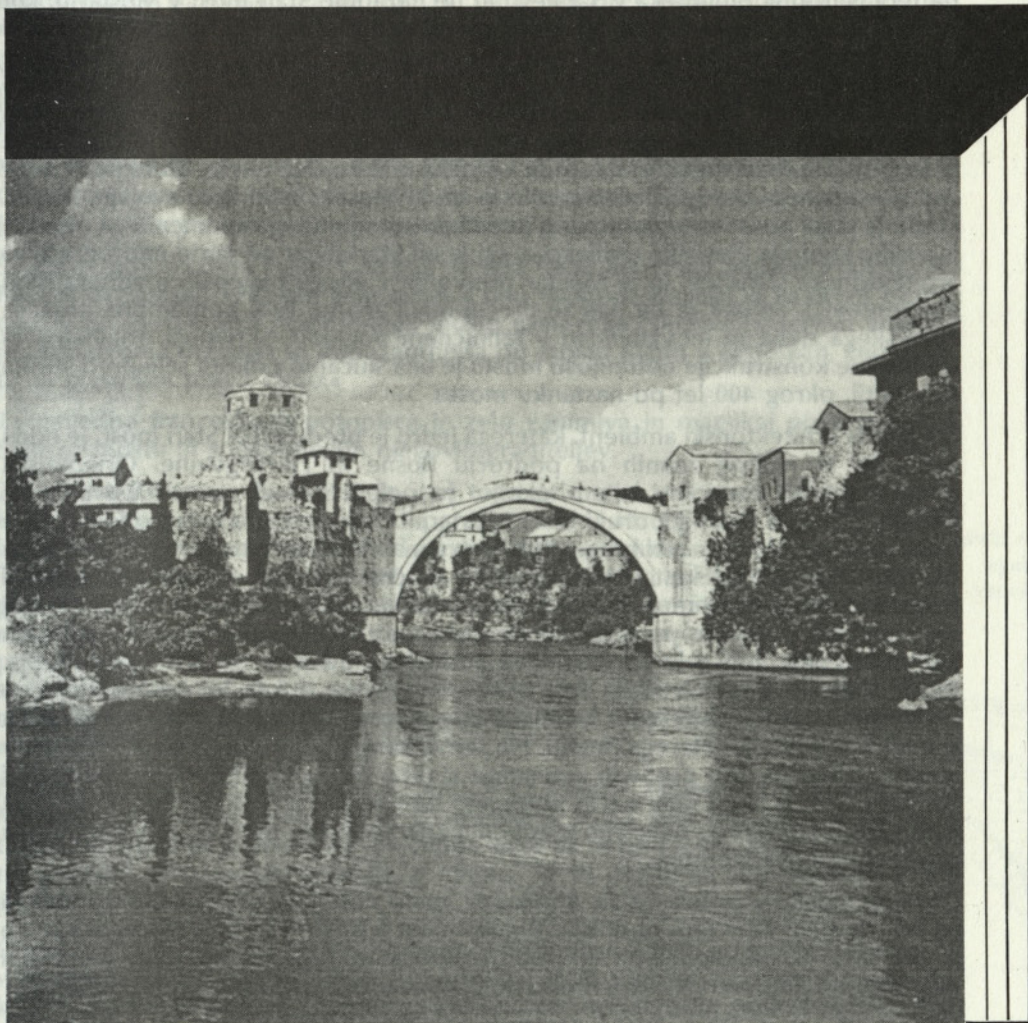
- nadomestni vir napajanja v primeru izpada javnega električnega omrežja (akumulator ali generator);
- zaščito električnih napeljav pred učinki ognja.

Zaščito električnih kablov pred učinki požara zagotovimo tako, da položimo kable v požarno odporne kinete ali jih zaščitimo s požarno odpornimi premazi ali ometi. Požarna odpornost mora biti enaka času, ki se zahteva za delovanje sistema odvoda dima ali požarni odpornosti, ki se zahteva za obodne gradbene elemente požarnih sektorjev ali objekta. Vendar ne sme biti nižja od 30 minut.

LITERATURA

1. SFPE Handbook of fire protection engineering. 1st edition, SFPE, Quincy, 1988.
2. Fire protection handbook. 17th edition; NFPA, Quincy, 1991.
3. Thomas, P. H., et al.; Investigations into the flow of hot gases in roof venting. Fire Res. Techn. Paper No. 7, HMSO, London, 1963.
4. Thomas, P. H., Hinkley, P. H.; The design of roof venting systems for single-storey buildings. Fire Res. Techn. Paper No. 10, HMSO, London, 1964.
5. Morgan, H. P.; Design principles for smoke control in buildings. Fire Surveyor, 11 (2) (1982), 22–30.
6. Morgan, H. P.; A simplified approach to smoke venting calculations. BRE informations, Paper 19/85.
7. Marchant, E. W.; The potential failings in smoke systems. Fire Prevention, 230 (1990), 24–29.
8. Morgan, H. P., Hansell, G. O.; Atrium buildings: calculation smoke flows in atria for smoke control design. Fire Safety Journal, 1 (12) (1987).
9. Marchant, E. W.; Selecting smoke control systems for buildings. Fire Prevention, 229 (1990), 26–27.
10. Marchant, E. W.; More views on selecting smoke control systems. Fire Prevention, 237 (1991), 26–29.
11. Rauch- und Wärmeabzugsanlagen. Tagungsunterlagen zu den Fachtagungen »Baulicher Brandschutz in der Praxis«, VdS, Köln 1981.
12. Brandschutz-Neuorientierung in Industriehallen, Kaufhäusern und Einkaufszentren. Sem.-Nr. 811720150, Technische Akademie Wuppertal, 1990.
13. Wild, J. A.; Fans for fire smoke venting. Woods of Colchester technical paper WTP 20/1, 1990.
14. Wild, J. A.; Smoke control by ventilation made safe. Woods of Colchester technical paper WTP 39, 1992.
15. Technical papers firme Colt Nr. 010 (1979) in 130 (1986).
16. Kühl, P.; Auf dem Weg zu einer europäischen Richtlinie für Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (RWA). Maschinenschaden 65 (1992) Heft 5, 192–195.
17. Pravilnik o tehničnih normativih za sisteme za odvod dima in toplote nastale pri požaru, Ur. list SFRJ, št. 45/83.
18. NFPA 204M; Guide for smoke and heat venting, 1985 edition.
19. Rauch- und Wärmeabzugsanlagen. Richtlinien für Planung und Einbau. VdS 2098 5/90(2).
20. DIN 18232 Teil 1; Rauch- und Wärmeabzugsanlagen. Begriffe und Anwendung (1981).
21. DIN 18232 Teil 2; Rauch- und Wärmeabzugsanlagen. Rauchabzüge. Bemessung, Anforderungen und Einbau (1989).
22. DIN 18232 Teil 3; Rauch- und Wärmeabzugsanlagen. Rauchabzüge. Prüfungen (1984).
23. DIN 18232 Teil 6; Rauch- und Wärmeabzugsanlagen. Maschinelle Abzüge (MA). Anforderungen an die Einzelbauteile und Eignungsnachweise (Entwurfsvorschlag, 1990).
24. DIN 18232 Teil X; Rauch- und Wärmeabzugsanlagen. Maschinelle Abzüge (MA). Bemessung und Einbau (Entwurfsvorschlag, 1990).

LEPOTE IN SKRIVNOSTI PORUŠENEGA STAREGA MOSTU ČEZ NERETVO V MOSTARJU (1566–1993)



UDK 624.21:725.95(09)

GORAZD HUMAR

(Mostar, 9. novembra 1993)

Videti je bilo, kot da je padel gol na nogometni tekmi. Takorekoč v neposrednem prenosu smo na televiziji videli, kako je Stari most pod streli topov padel v Neretvo. Bilo je to 9. novembra 1993 v času, ko je v Bosni in Hercegovini še vedno divjala neusmiljena vojna, ena najgrozovitejših vseh časov. Nihče je ni

Avtor:
Gorazd Humar, dipl. inž. gradb.

znal pravi čas preprečiti ali vsaj ustaviti. Njene posledice so strašne: nešteto izgubljenih človeških življenj, ogromna materialna škoda, uničeno gospodarstvo, porušena infrastruktura Bosne in Hercegovine in še bi lahko naštevali. Nepopisna in posebej težko ugotovljiva, predvsem pa nepopravljiva je škoda, ki so jo utrpeli kulturni in zgodovinski spomeniki. Težko bi našteli vse znamenite objekte, ki so bili popolnoma uničeni ali težko poškodovani, med njimi vsekakor največ džamij, pa tudi Narodna biblioteka v Sarajevu in ne nazadnje Stari most v Mostarju, kot se je imenoval lepotec, ki se je drzno dvigal nad prelepo Neretvo in povezoval njene bregove v starem zgodovinskem mestnem jedru Mostarja. Danes je zgodovinski morda kar cel Mostar, saj je bil v senci bitke za Sarajevo verjetno še bolj napaden in porušen kot Sarajevo samo, predvsem pa manj na očeh svetovne javnosti. Čeprav je znano, s katere strani so priletele topovske granate, ki so porušile Stari most, to danes ni več tako važno. Dejstvo je, da se Stari most več ne razpenja nad gladino Neretve in da je Mostar ostal brez svojega bisera, ki mu je dajal pečat in verjetno tudi ime. S porušenjem tega znamenitega objekta je veliko izgubila človeška civilizacija, saj je bil Stari most ne samo neprogresivna arhitektonska stvaritev, ki je Mostar pretvorila v enega najlepših mediteranskih ambientov(!), ampak je bil, kar je precej manj znano, tudi pomembna kreacija človeškega duha in inovativnosti v tehničnem pogledu. Skrivnost originalne in domiselne konstrukcije notranjosti mostu je bila slučajno odkrita šele pred štirimi desetletji, okrog 400 let po nastanku mostu.

Mostarski arhitektonski ambient, katerega jedro je predstavljal Stari most, je eden najlepših in najbolj znanih na področju Bosne in Hercegovine. Orientalna arhitektura, ki dominira v tem okolju, je poleg Starega mostu ustvarila še Čejvan-čehajino džamijo, drugi biser Mostarja. Celotno staro mestno jedro se je torej izoblikovalo ob obeh bregovih Neretve, na majhnem prostoru v bližini vode (Neretve), spoštujoč kult vode, ki je bil močno prisoten v turško-orientalski kulturi. Voda ni bila samo simbol življenja, bila je vsakodnevna potreba, ob njej so ponavadi potekale pomembne trgovske poti. Neretva, ki je ena najlepših jadranskih rek, ima zelo spremenljive vodostaje, odvisno od letnega obdobja. Obvladovanje naravnih sil je bila večna človekova težnja in močna želja po premostitvi korita Neretve z enim samim lokom je prav gotovo navdihovala snovalca (graditelja) Starega mostu. Ne samo, da v sredini korita Neretve na tem mestu ni bilo možno postaviti vmesnega stebra, pač pa tudi hudourniški značaj Neretve, vse to je na neki način pomenilo izziv in priložnost graditelju, da je za tiste čase postavil eno največjih gradbenih znamenitosti, most, ki je v enem loku povezal bregova Neretve.

Okolica Mostarja je bila že za Rimljanov gosto naseljena. Prvi kamniti mostovi so bili zgrajeni že v tem obdobju. Rimski most v Kosoru je bil v uporabi vse do II. svetovne vojne. Sledeč rimski poti okoli Mostarja, spoznamo, da je moral biti neki prehod prek Neretve že v rimski dobi, vendar o tem ni zanesljivih podatkov.

Najstarejši pisani dokumenti o Mostarju segajo v prvo polovico XV. stoletja, ko zasledimo tudi prve zapise o mostu na Neretvi. To je bila zasilna lesena konstrukcija, slabo izvedena, ne preveč varna in vse bolj neprimerna za naraščajoči promet, saj je Mostar postal zaradi svoje zanimive lege pomemben gospodarski, kulturni in politični center Hercegovine. Skozi Mostar so po dolini Neretve vodile tudi glavne poti k morju.

Srednjeveški mostarski most je najlepše opisal turški geograf iz 17. stoletja, Katib Čelebija (Hadži Kalfa):

»... bil je lesen, visel je na verigah in ker ni bil zadosti utrjen na stebrih, se je tako tresel, da se je preko njega prehajalo samo s smrtnim strahom.«

Ker je bila v 16. stoletju ta lesena konstrukcija povsem dotrajana, promet pa je naraščal in se je Mostar začel naglo razvijati, se je seveda pojavila potreba po novem in trdnem mostu.

Naročilo za izgradnjo novega solidnega in trajnega mostu je dal na zahtevo Mostarcev Sulejman Veličastni. Most so pričeli graditi verjetno leta 1557, dokon-

čan pa je bil leta 1566, v zadnjem letu vladanja Sulejmana Veličastnega. O mostu samem je največ napisal stari pisec Evlija Čelebija. Njegove besede so bile polne vznemirjenja in navdušenja: »Tudi ta most je zgradil Kodža Mimar Sinan, in to po Sulejmanhanovem naročilu. Videti je kot lok mavrice, ki se dviga z enega brega na drugega.« Povedal je tudi: »Naj se ve, da sem jaz, ubogi rob (služabnik) božji Evlija, do sedaj prehodil in videl šestnajst cesarstev, ali tako visokega mostu nisem nikjer videl.« Navdušilo ga je tudi to, da je bil prek mosta speljan vodovod: »Skratka, to je most, prek katerega in pod katerim teče voda.«

V resnici je bil pravi graditelj mostu Hajrudin, učenec Kodže Mimar Sinana. Le-ta je kot vrhovni graditelj pomembnih objektov v turškem cesarstvu izbral za to nalogo Hajrudina.

Most je navdušil mnoge pesnike in potopisce. Mostarski pesnik Husein efendi – Čatruja alias Husani je tako zapisal: »Po sredini mesta teče velika reka in na njej je most, ki mu po višini, kakor se od davnaj govori, ni para.«

Še pred potopiscem Evlijo Čelebijo je leta 1658 šel skozi Mostar Francoz A. Poulet in zapisal: »Pet dni smo ostali v tem mestecu (varoši), v katerem nismo opazili nič posebnega razen enega mostu prek reke Neretve, katerega gradnja je brez dvoma drznejša in impozantnejša od mostu Rialto v Benetkah, čeprav je ta na glasu kot pravo čudo.«

Ta navedba francoskega potopisca je zelo zanimiva in marsikaj pove o lepoti Starega mostu in sposobnostih njegovih graditeljev.

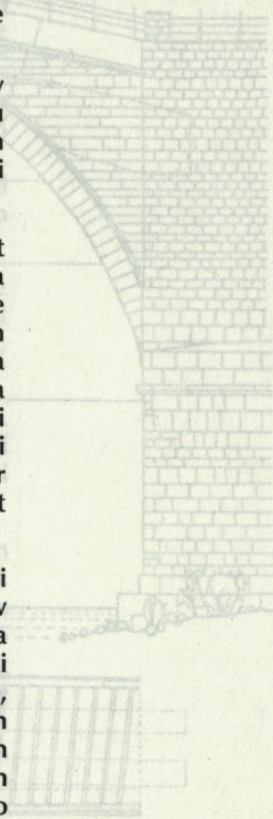
Z mostom Rialtom v Benetkah je Stari most primerjal tudi pisec Robert Michel, ki je o Mostarju izdal posebno Monografijo. V svoji študiji »Stari mostovi v Bosni in Hercegovini« je zavrnil tudi nekatere teze o nastanku mostu v rimskih časih. Tako je zapisal: »Ko bi moral izbrati najlepši most na svetu, bi verjetno izbor padel na Stari most v Mostarju. Moram reči, da name še nobeno gradbeno delo ni delovalo tako močno kot ta most.« Gradnjo je primerjal z okamenelim polmesečem oziroma orjaškim galebom, ki je okamenel v letu, v trenutku, ko se je s konicami svojih kril dotaknil skalnatih obal Neretve. Vsekakor je bil Stari most do svoje porušitve res precej manj znan kot most Rialto v Benetkah, ki je dosti bolj na očeh svetovne javnosti.

Domači pisec D. Franić pa je v začetku tega stoletja zapisal, da je Stari most v Mostarju ena največjih svetovnih znamenitosti... Ta silni lok, tako je na vrhu tanko zaobljen, da se mora človek čuditi, kako da se pod malo večjim bremenom ne prelomi. Vrh mosta končuje z lokom, ki ni podoben niti rimskemu niti gotskemu loku.

O tem, kako je bil most grajen, ni mogoče dobiti zanesljivih podatkov. Stari most v Mostarju tudi ni imel svojega Iva Andrića, ki je v knjigi Na Drini Čuprija, za katero je dobil Nobelovo nagrado za književnost, opisal način gradnje in dogodke v mestu. Ob tem je treba omeniti, da je bil most na Drini pri Višegradu zgrajen nekaj let pozneje kot Stari most (1571–1577). Osnovni problem gradnje Starega mostu je bil vsekakor postavitve ustreznega nosilnega odra za gradnjo kamnitega loka, ki pa gotovo ni smel biti temeljen v vodi, ampak na bregovih. Hudourniški značaj Neretve in hitre spremembe pretočnih količin vode so vsekakor vodili graditelje h konceptu premostitve reke v enem samem loku. To je bila sicer takrat že znana tehnična rešitev, vendar na nobenem mostu ni bila takrat uporabljena tudi držno in velikopotezno.

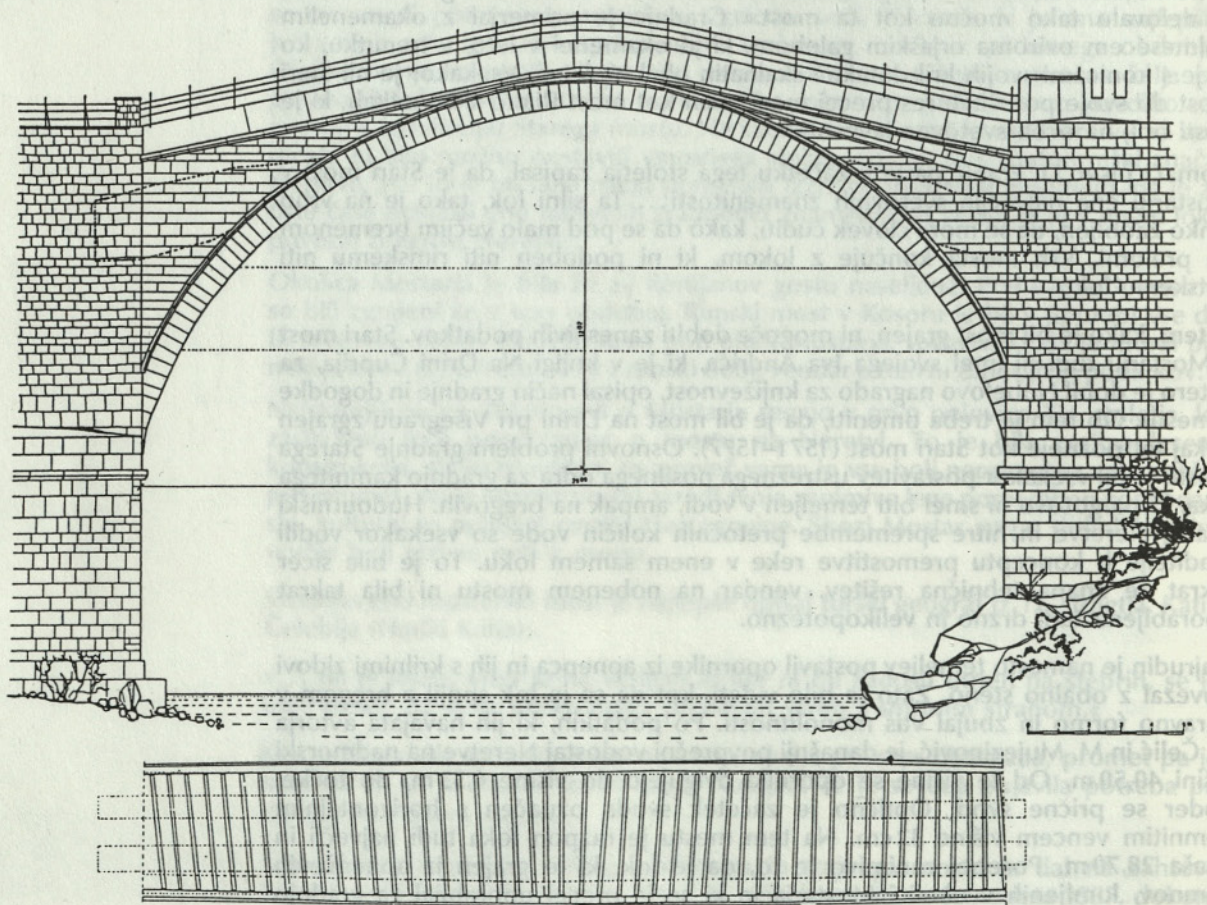
Hajrudin je namesto temeljev postavil opornike iz apnenca in jih s krilnimi zidovi povezal z obalno steno. Zato je bilo videti, kot da se je lok spojil z bregom v naravno formo in zbujal vtis monolitnosti. Po podatkih, ki jih navajata avtorja D. Čelić in M. Mujezinović, je današnji povprečni vodostaj Neretve na nadmorski višini 40,50 m. Od te višine se oporniki dvigujejo do višine 6,53 m, do točke, koder se prične svod. Optično je začetek svoda označen s horizontalnim kamnitim vencem višine 32 cm. Na tem mestu je razpon loka tudi največji in znaša 28,70 m. Posebej zanimivo je to, da je lok, ki je grajen iz apnenčevih kamnov, lomljenih v okolici Mostarja in ki se je precej uporabljal za gradnjo

Slika 1. Vzhodna fasada in lok Starega mostu s črtno linijo 2.00 označeno kaverne v mostu.



monumentalnih objektov, izredno zanimive oblike. Ta krivulja ni bila podobna tipičnim prelomljenim turškim lokom, kot jih je npr. imel most v Višegradu, niti ni bil pravilne polkrožne oblike, kot je bilo to pri Rimljanih. Njegova oblika je bila najbližje elipsi ali ovalu. Drugače povedano, pri razponu loka 28,70 m je bila njegova puščica 12,02 m (pri polkrožnem loku bi bila 14,35 m), kar je bilo za takratne razmere precej neobičajna oblika. Graditelj Hajrudin je pri teh osnovnih dimenzijah loka dosegel še nekaj. Debelina loka v sredini, kjer je bila konstrukcija najtanjša, je bila vsega 77 cm, širina pa 397 cm. Optično vitkost konstrukcije je sicer nekoliko zmanjševala kamnita ograja vzdolž mostu, vendar je kljub temu most dajal vtis izredne elegance. Res je sicer, da so bili v tistem času ponekod že izvedeni večji razponi kamnitih mostov, gotovo pa je, da niso bili tako visoki in istočasno vitki. Osebnostno menim, da je bila oblika izbrane krivulje loka kompromis graditeljevih želja po premostitvi reke v enem loku in zahteve po praktičnosti prehoda čez most. Višina loka je že sama po sebi narekovala poševni potek poti čez most (obojestranski nagib), kar sicer ni najbolj ugodno, saj je že tako bil dostop na sredino mostu kar strm. Z izbiro loka v obliki pravilne polkrožnice (Rimljani) ali šiljastega turškega loka bi bil most pri tako velikem razponu previsok in morda že neuporaben. Zato je graditelj nekoliko znižal višino loka (puščico loka), s tem je sicer ušel iz linije do takrat izvedenih lokov, in dosegel, da so bili nakloni poti čez most še znosni in premagljivi za takratna transportna sredstva, predvsem za vozove. Oblika loka in končni videz mostu s tem niso nič izgubili svoje estetske vrednosti, prej bi lahko rekli nasprotno. Skladnost poteka poševnin poti čez most in oblika loka sta bili tako mojstrsko dovršeni in dajali mostu osnovne vizualne konture in eleganco. Vsakršno odstopanje od teh oblik bi porušilo harmonično obliko konstrukcije, lahko bi bilo morda malo drzno reči, da drugačen skoraj ne bi mogel biti. Skratka, graditelj je dejansko dosegel tak optični učinek konstrukcije, da je turški (bosanski) pesnik lahko upravičeno zapel... »kot da je okamenela ptica v letu«.

Slika 2. Vzvodna fasada in tloris Starega mostu. S črtano linijo so označene kaverne v mostu.



Največja skrivnost mostu pa je bila slučajno odkrita 400 let po njegovi izgradnji. Ko je bilo potrebno po II. svetovni vojni na mostu izvesti nekaj konzervatorskih posegov in sanacij, so takratni izvajalci del v notranjosti mostu nad lokom odkrili na vsaki strani po dve kaverni oziroma votlini. To odkritje je šele pojasnilo možnost izvedbe tako elegantne in vitke konstrukcije glavnega loka. Kako je mojster Hajrudin to dosegel? Predvsem je moral narediti mostno konstrukcijo na nosilnem glavnem loku čim lažjo. To je dosegel z izgradnjo navedenih votlin in tako precej zmanjšal težo jedra mostu med čelnimi zidovi in lokom, ki se običajno izvede s polnim kamnitim nasutjem. Z vpeljavo središčnega rebra v sredini jedra nad lokom in prekritja votlin s kamnitimi ploščami je napravil tako imenovane razbremenilne odprtine, njihov razpored pa določil izredno tankočutno in prefinjeno, tako da je dosegel optimalno razporeditev teže. Pri tem je Hajrudin vpeljal celo določeno ekscentričnost votlin. Debelina čelnih zidov nad lokom je znašala okoli 80 cm.

Odkritje teh votlin je mostu povečalo zgodovinsko vrednost. Poleg enkratne zunanje oblike je postala cenjena tudi njegova konstrukcijska rešitev v statičnem pogledu. Ta »druga« vrednost mostu je bila seveda precej manj znana, vendar zasluži z vidika zgodovinskega razvoja gradnje mostov posebno pozornost in pomen.

Kompozicijsko in oblikovno pa izstopata preprostost in učinkovitost izvedbe konture mostu oziroma loka z na fasadi izbočenim reliefnim dekorativnim vencem, ki je spremljal osnovno linijo loka. Ta venec, ki je ločil svod od čelnih zidov, je bil izbočen za 15 cm od fasadne čelne stene (čelnega zidu). Venec je bil torej ločnica med skladi radialno položenih kamnov nosilnega loka in horizontalno položenimi kamni čelnega zidu.

To je bila preprosta, že preizkušena oblikovalska poteza, vendar jo je Hajrudin vpeljal učinkovito in tako dal mostu osnovne poteze, ki so še bolj poudarile eleganco nosilnega sklopa konstrukcije.

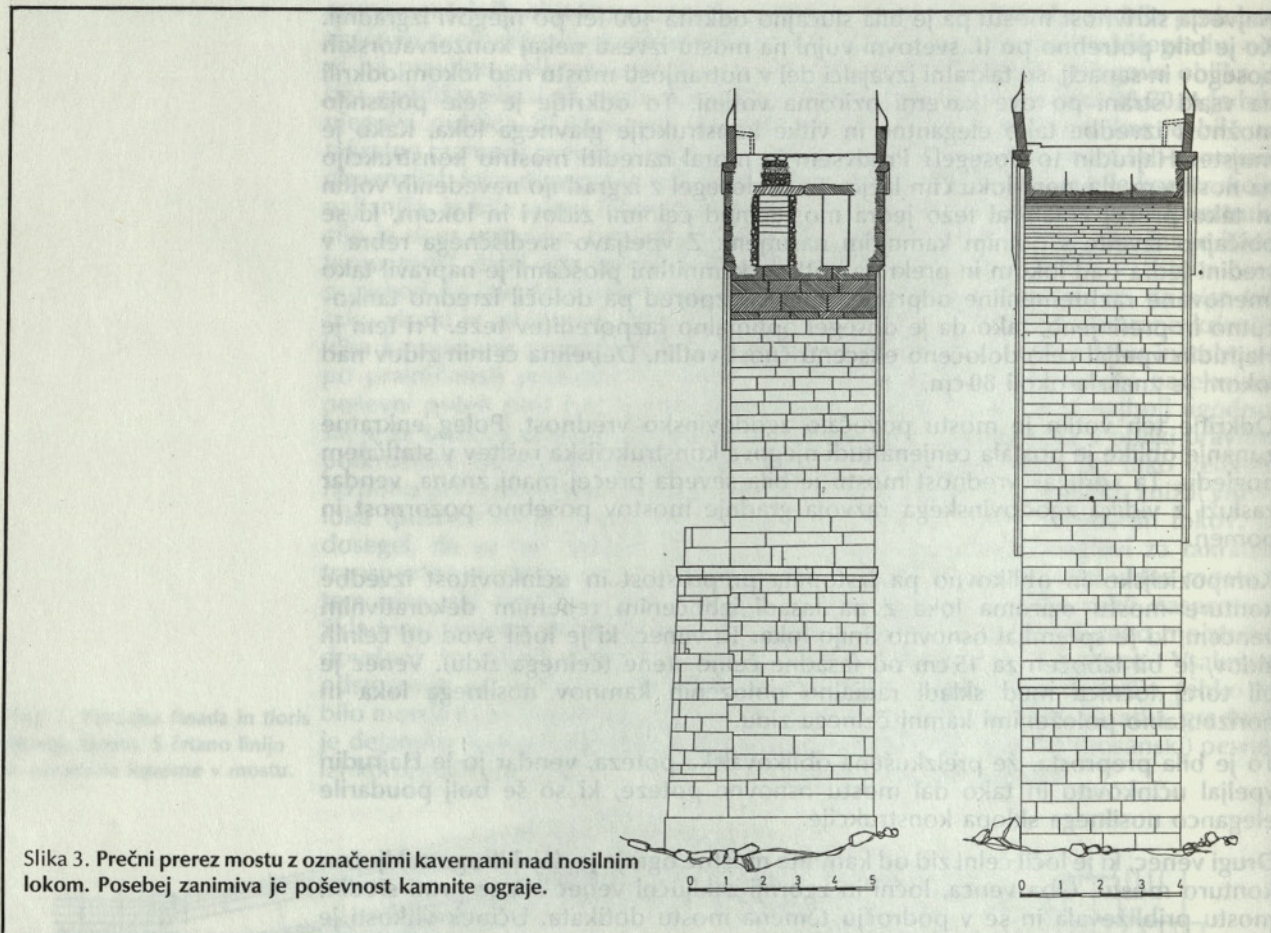
Drugi venec, ki je ločil čelni zid od kamnite mostne ograje je dajal drugo zaključno konturo mostu. Oba venca, ločni in zgornji zaključni venec sta se proti sredini mostu približevala in se v področju temena mostu dotikata. Učinek vitkosti je postal tako popoln.

Vendar je graditelj Hajrudin presenečal še naprej. Prehodna pot čez most je bila vtisnjena med kamnito ograjo (korkulak) iz masivnih plošč debeline 23–25 cm in višine 94,50 cm. Ta ograja je bila vpeta v zaključni venec v ravnini čelnih zidov, tako da je zgornji zaključni venec še vedno ostal izbočen. Najbolj zanimiv detajl pri tej ograji pa je bilo dejstvo, da je bila nekoliko poševno postavljena s tendenco širjenja od sredine mostu na obe strani mostu.

Kakšen je bil namen take postavitve ograje, lahko ugibamo. Najverjetnejša pa je trditev, da je s tako prefinjeno ekscentričnostjo ograje hotel Hajrudin vzbuditi še dodaten optični učinek povečane širine prehoda čez most. Naj omenim še, da je bila tanjša kovinska ograja dodana na kamniti del ograje mnogo kasneje.

Pohodna površina mostu je bila tlakovana s kamnitimi ploščami pravilne oblike. Med ploščami so bili na več mestih vgrajeni poševni kamniti pragovi, ki so zaradi poševnosti poti omogočali varen oprijem nog ljudi in živali. Poleg tega so ti pragovi bočno odvajali padavinske vode.

Naslednja in najbrž ne zadnja vrednota mostu je bilo enkratno arhitektonsko in naravno okolje, v katerem je bil zgrajen. Brez dvoma sta D. Čelić in M. Mujezinović pravilno ugotovila, da je bil ambinet Starega mostu »izjemen urbanistični ansambel, ki z mostom tvori aglomeracijo in kulturno-zgodovinsko vrednost, za katero je možno reči, da je največja v Bosni in Hercegovini. Poleg naravnega fenomena globokega stenastega korita z modro zeleno Neretvo, je skrivnost globokega vtisa, ki ga ta aglomeracija pušča na opazovalca v medsebojnih odnosih gradbenih mas. Začenši od malih mlinic, prek stopničastih streh hiš, pa do visokih trdnjav in samega mostu vidimo, da gre tu za aglomeracijo raznih oglatih, valjastih in paraboličnih geometrijskih teles, ki postopno naravno rastejo



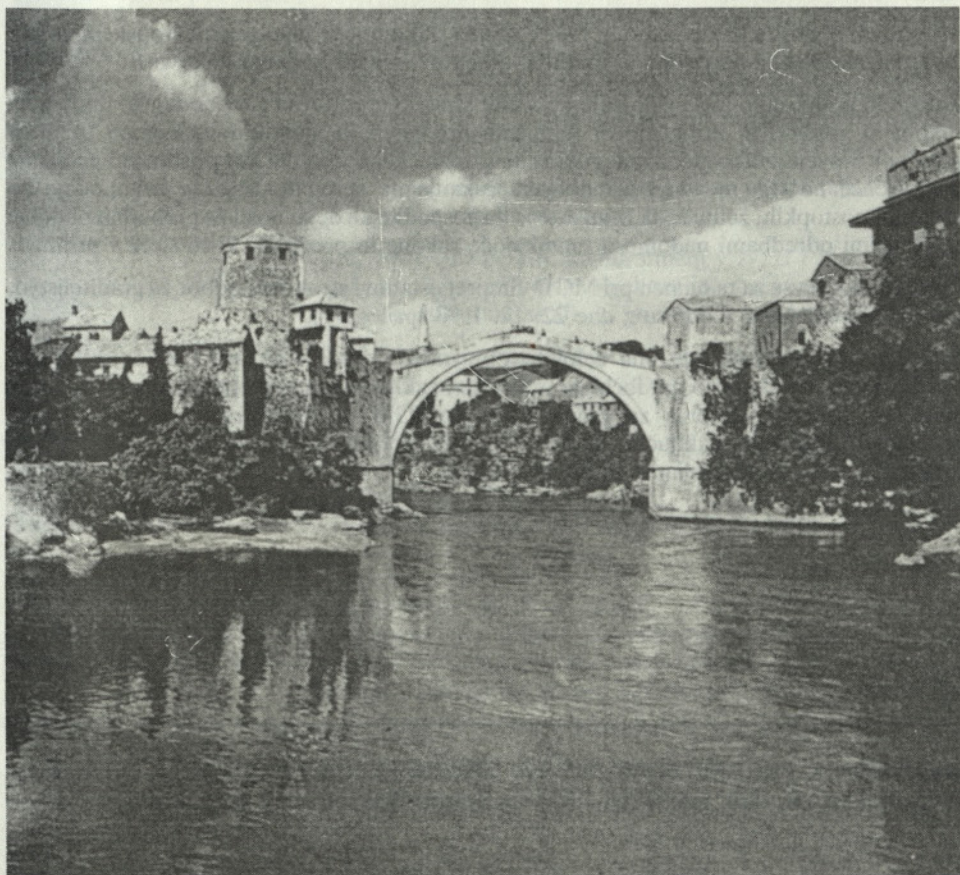
Slika 3. Prečni prerez mostu z označenimi kavernami nad nosilnim lokom. Posebej zanimiva je poševnost kamnite ograje.

s terenom, spuščajoč se mestoma naglo proti koritu. Vse je iz sivkastega apnenca, pokrito s kamnito ploščo iste barve kot zidovi, samo za nianso svetleje, ker plošče dež močnejše pere in sonce močnejše peče. Impozantni lok mosta z okoliškimi gradnjami, ki so se tako sivkasto na sivem nališpale okoli kot siga, tvori v okviru divjega pejzaža Neretve in Krasa tako harmonično celino, da ne upošteva detajlov spominja na veliko steno, na kateri so zrasli kristali. Tu je človek, v težki in mučni borbi za obstoj, umel v te kamnite gradnje vnesti samega sebe, svoj temperament, svojo vedrino »(citāt)«.

V teh zgoščenih in lepih besedah, ki odslikavajo pravo vrednost te harmonične celote, se skriva sporočilo, ki se ga oba avtorja, ko sta to pisala, še nista zavedala. Res bo v Mostarju nekoč moral nastopiti mir. Mostar brez novega Starega mostu ne bo več tisto, kar je pred usodnimi dnevi v letu 1993 bil. Res obstajajo želje, da bi v miru »Stari most« (!) ponovno zgradili. Turška vlada je pripravljena prispevati denar za obnovo. Toda Stari Mostar bo morda del tega, kar je bil, šele s popolno obnovo vse okolice mostu, na tak način, da bi gornji opis lahko veljal tudi za obnovljeni ambient. Zato je ta opis tudi obveza in poziv vsem, ki bodo hoteli obnoviti Mostar. S tem pozivom sem namenoma hotel opozoriti strokovno javnost, naj se osveščeno in zrelo loti obnove ambienta Mostarja, pa tudi drugih številnih porušenih zgodovinskih spomenikov v Bosni in Hercegovini – bodisi prek mednarodne pomoči ali drugače.

Zunanost novega mostu bo možno izvesti dokaj verno porušenemu originalu, ne verjamem pa, da bo kdo hotel verno izvesti notranjost mostu, z vsemi svojimi »skrivnostmi«. Tu obstaja nevarnost, da bo prišlo do poskusa izgradnje betonskega jedra mostu, prevlečenega z maskirnimi fasadnimi kamni. Do tega vsekakor ne bi smelo priti. V zgodovini znanih kamnitih mostov so namreč že bili taki poizkusi. Navedem naj samo primer največjega kamnitega železniškega mostu na svetu, ki je bil zgrajen leta 1906 čez reko Sočo pri Solkanu (R. Slovenija) in bil porušen med boji na soški fronti leta 1916. Čeprav oblikovno nekoliko spremenjen in večji del na novo postavljen v kamnu, ta most ni več čisto tisto, kar je bil njegov predhodnik. Zato bo pred začetkom izgradnje »novega Starega mostu« v Mostarju potrebno pošteno premisliti, kako se lotiti dela. Če prav poznam večje število strokovnjakov in ljubiteljev starih kamnitih mostov v Bosni in Hercegovini, se nam tega pravzaprav ne bi bilo treba bati. Upanje daje znana in uspešna predstavitev Arslanagičevega mostu prek Trebišnjice pri Trebinju (zgrajen v letih 1563–1575) na novo lokacijo, ker je bil na prvotni lokaciji ogrožen zaradi novega akumulacijskega jezera hidroelektrarne.

Skrajšani in s komentarjem prirejeni opis Starega mostu v Mostarju sem pripravil na osnovi knjige dveh dobrih poznavalcev številnih gradbenih spomenikov Bosne in Hercegovine, Džemala Čelića in Mehmeda Mujezinovića, ki sta najlepše mostove svoje domovine opisala v knjigi, ki je leta 1969 izšla v Sarajevu. Zato se mi zdi posebej pomembno, da je Hajrudinovo mojstrovino, tako se je imenoval graditelj Starega mostu, ponovno predstavimo javnosti in skušamo ovrednotiti njeno veličino in pomen za človeško civilizacijo. Danes je Hajrudinov most le še kup zdrobljenega kamenja v Neretvi in hkrati opomin človeštvu, da se kaj takega ne bi smelo zgoditi.



STALIŠČA ZVEZE DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV IN TEHNIKOV DO ODPRTIH PROBLEMOM GRADITELJSTVA

STALIŠČA SO BILA POSREDOVANA MINISTRSTVU ZA GOSPODARSKE DEJAVNOSTI MARCA 1994

Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije, ki v svojih področnih društvih in v specializiranih društvih združuje prek 3000 strokovnjakov s področja graditve, šteje za svojo dolžnost, da s svojim angažiranjem in predlogi soustvarja take razmere, ki bodo zagotovile pogoje za uspešno gospodarjenje in približevanje slovenskega graditeljstva evropskim kriterijem, tako glede delovne učinkovitosti kot doseganja kakovosti del.

Zaradi tega so člani predsedstva in izvršilnega odbora na več skupnih sejah izčrpno obravnavali aktualno problematiko, ki zadeva področje gradbeništva in proizvodnje gradbenega materiala ter do posameznih odprtih problemov zavzeli naslednja stališča:

– Sodimo, da je gradbeništvo in industrija gradbenega materiala pomembna gospodarska panoga, ki ne samo s svojo dejavnostjo, temveč tudi z vplivom na druga področja gospodarstva bistveno prispeva k ustvarjanju celotnega družbenega proizvoda R Slovenije. Zato mora temu primerno dobiti mesto v organizacijski shemi Ministrstva za gospodarske dejavnosti in tudi ustrezno in kompetentno kadrovsko zasedbo. Le tako bodo podani pogoji za uspešno reševanje odprtih problemov, ki bodo nakazani tudi v nadaljevanju teksta.

– Osnovni pogoj za kakovostno in tudi v tujini konkurenčno delo je po evropskem vzorcu urejena zakonodaja na področju graditve objektov in zagotavljanja kakovosti.

Zato zelo podpiramo in se vključujemo v čim hitrejšo ureditev te zakonodaje s sprejemom zakona o graditvi in pripadajočih tehničnih predpisov in standardov. Ker pa trenuten položaj v Sloveniji tako glede mnogokrat neustrezne kakovosti del kot prisotnosti nelojalne konkurence na trgu ne dopušča dolgega čakanja na sprejem ustrezne zakonodaje po utečenih postopkih, želimo, da Ministrstvo za gospodarske dejavnosti za prehodno obdobje z začasnimi odredbami nadomesti manjkajoče zakone in predpise, ki so sicer v pripravi.

Predlagamo, da se za ta namen pri MGD čimprej ustanovi strokovni odbor za graditeljstvo, kot je to predlagano v dopisu z dne 22. 12. 1993 (priloga 1).

Navedena problematika je bila celovito obravnavana tudi v okviru GZS – sekcije za gradbeništvo in industrijo gradbenega materiala, zaključke pa je ustrezno formulirala tudi Strateška panožna skupina za gradbeništvo in IGM pri Ministrstvu za gospodarske dejavnosti. Z njenimi zaključki, ki jih podajamo v prilogi (Poročilo z dne 9. 12. 1993 / Priloga 2) se v celoti strinjamo in jih podpiramo.

PREDSEDNIK PREDSEDSTVA:
Gorazd **HUMAR**, dipl. inž., l. r.

PREDSEDNIK IZVRŠNEGA ODBORA:
Borut **GOSTIČ**, dipl. inž., l. r.

STROKOVNI ODBOR ZA GRADITELJSTVO

V skladu z dogovorom na sestanku dne 21. 12. 1993, ki so mu prisostvovali tudi predstavniki Urada za standardizacijo in meroslovje, predlagamo področje dela in sestavo strokovnega odbora za graditeljstvo pri vašem ministrstvu. Naloge odbora so usklajene s pristojnostmi t. i. Stalnega odbora pri komisiji evropske skupnosti za izvajanje Smernice št. 89/106 o gradbenih proizvodih in osnutkom Zakona o graditvi (OZG).

1. Naloge strokovnega odbora za graditeljstvo

- 1.1. Priprava strategije približevanja slovenskega graditeljstva evropski ravni kakovosti,
- 1.2. Koordinacija priprave zakonov in tehničnih predpisov s področja graditeljstva, ki so v pristojnosti MGD, vključno z izdelavo potrebnih strokovnih navodil,
- 1.3. Določanje sistema potrjevanja ustreznosti za posamezne gradbene proizvode, postopke in konstrukcijske sisteme,
- 1.4. Ocenjevanje primernosti in predlog institucije, ki jo minister imenuje za potrjevanje ustreznosti (preskušanje, nadzorstvo in certificiranje) gradbenih proizvodov, postopkov in konstrukcijskih sistemov,
- 1.5. Sprejemanje strokovnih mnenj za izdajo tehničnih soglasij za gradbene proizvode in postopke v smislu osnutka (OZG),
- 1.6. Sprejemanje strokovnih mnenj v zvezi z uvozom gradbenih proizvodov,
- 1.7. Predlog gradbenih objektov in obsega zagotavljanja kakovosti pri gradnji objektov po veljavnih standardih, ki ga mora v smislu OZG predpisati minister,
- 1.8. Strokovno presojanje in svetovanje o vseh drugih zadevah s področja graditeljstva, o katerih mora odločati MGD.

Jaš ŽNIDARIČ, dipl. inž. gradb.
pom. direktorja ZRMK Ljubljana

mag. Gojmir ČERNE, dipl. inž. gradb.
v. d. direktor ZRMK Ljubljana

ZAKONODAJA, TEHNIČNA REGULATIVA IN STANDARDIZACIJA NA PODROČJU GRADBENIŠTVA

(IZVLEČEK IZ ZAPISNIKA 3. SESTANKA STRATEŠKE PANOŽNE SKUPINE ZA GRADBENIŠTVO IN IGM)

1. Osnovno izhodišče pri pripravi zakonodaje, tehnične regulative in standardizacije na področju gradbeništva je prilagajanje evropski regulativi, ki izhaja iz ustrezne Smernice Sveta Evropske skupnosti (89/106). S tem bodo podane osnove za približevanje slovenskega gradbeništva evropski ravni kakovosti.

2. Graditev objektov mora biti urejena v posebnem zakonu o graditvi objektov. Pripravljeni osnutek predstavlja primerno osnovo, zato je potrebno pospešiti aktivnosti pri pripravi zakona z ustrezno obrazložitvijo ter z njim povezanih pravilnikov.

3. V pripravo zakona v okviru MGD je potrebno poleg predstavnikov GZS-Združenja za gradbeništvo in IGM ter GZS-Združenja za inženiring in projektiranje vključiti predstavnike vseh ministrstev, katerih dejavnost je povezana z graditvijo objektov.

S tem v zvezi je potrebno v okviru Vlade uskladiti aktivnosti posameznih ministrstev pri pripravi zakonodaje na področju graditve objektov, kompleksne investicijske zakonodaje, zakonodaje na področju urejanja prostora, na področju cest in komunale, na področju stanovanj ter na področju varnosti in zaščite.

4. Pospešiti je potrebno aktivnosti pri pripravi ustreznih tehničnih predpisov in standardov. V teh okvirih so predlogi naslednji:

- Pri MGD se ustanovi strokovni odbor ali komisija za opravljanje naslednjih nalog:
- Koordinacija izdelave tehničnih predpisov, ki so v pristojnosti tega ministrstva
- Določitev gradbenih proizvodov reguliranega področja, za katere bi morale biti certificiranje s strani pooblaščenih institucij obvezno
- Strokovno presojanje zadev s področja graditeljstva, o katerih odloča resorno ministrstvo.
- MGD organizira in financira kot razvojni projekt pripravo potrebnih tehničnih predpisov in pripadajočih standardov SLS CEN. Edino takšen profesionalni pristop bo omogočil, da bodo podlage z utemeljitvami in osnutki teh dokumentov pripravljene profesionalno in v ustreznih rokih. Na podoben način bo potrebno organizirati tudi pripravo specifičnih tehničnih predpisov za področje cest in energetskih objektov.
- MGD v sodelovanju z MZT-USM naroči pripravo potrebnih tehničnih predpisov o obveznem začasnem certificiranju gradbenih proizvodov, ki jih bo določil strokovni odbor.

5. Potrebno je oblikovati sistem potrjevanja kakovosti oziroma ustreznosti, ki bo primerljiv z evropskim. V teh okvirih so predlogi naslednji:

- Na podlagi ugotovljene usposobljenosti s strani ustrezne službe USM se pooblasti ustrezna institucija za certificiranje gradbenih proizvodov po predpisih iz predhodne alinee. Imenuje naj se tudi kot pooblaščenca institucija s področja graditeljstva v RS za odnose z drugimi državami, ker je s tem pogojeno recipročno priznavanje certifikatov s tujimi partnerskimi institucijami.
- Uvede se licenciranje v svetovalnih in izvajalskih d.o.o. s področja graditeljstva za opravljanje dejavnosti, od katerih je odvisna izpolnitev zahtev po kakovosti gradbenih proizvodov in objektov.

6. Glede na obsežnost in zahtevnost nakazanih nalog predlagamo takojšnjo kadrovsko okrepitev gradbenega resorja v okviru MGD.

Pri organizaciji ministrstev bi bilo potrebno upoštevati specifičen položaj in pomen gradbeništva. V zvezi s predlogom zakona o organizaciji ministrstev so zato predlogi naslednji:

- Mesto gradbeništva in graditve objektov je v okviru MGD
- Gradbeništvo bi bilo potrebno organizirati pod vodstvom posebnega državnega sekretarja za gradbeništvo
- Potrebno bi bilo organizirati Urad za graditeljstvo.

Osnovni argumenti za navedene predloge so naslednji:

- Gradbeništvo ima velik pomen v celotni gospodarski strukturi, tako z vidika udeležbe v bruto domačem proizvodu in zaposlenosti, še posebej pa z vidika multiplikativnih učinkov na celotno gospodarstvo, saj znaša multiplikator-koeficient kompleksnih reprodukcijskih povezav gradbeništva z ostalimi dejavnostmi 2,5–3.
- Specifičen položaj gradbeništva izhaja predvsem iz dejstva, da je v gradbeništvu javni interes in s tem ingerenca države bistveno bolj izpostavljena kot v drugih dejavnostih. Pri gradbeništvu gre za regulirano področje, saj gre za proizvode, ki imajo bistven vpliv na varnost in stabilnost objektov, s tem pa tudi na varnost ljudi. V tem kontekstu ima tudi sistem zagotavljanja in potrjevanja kakovosti specifičen in poudarjen pomen.
- Za gradbeništvo je značilna specifična povezanost s številnimi področji in dejavnostmi, npr. z urejanjem prostora, s prometno, zlasti cestno in komunalno infrastrukturo, stanovanjskim gospodarstvom itd.

V zvezi z organiziranostjo gradbeništva pod vodstvom posebnega državnega sekretarja v okviru MGD je predlagan poseben razgovor predstavnikov gradbeništva z ministrom za gospodarske dejavnosti in državnim sekretarjem za industrijske projekte, na katerem bi bili podrobneje predstavljeni in argumentirani navedeni predlogi.

SZPV – SLOVENSKO ZDRUŽENJE ZA POŽARNO VARSTVO

Na ustanovnem sestanku dne 5. 10. 1993 je bilo tudi v Sloveniji ustanovljeno strokovno združenje za požarno varstvo, ki naj bi enako kot podobna združenja v tujini (NFPA, SFPE, FPA, VFDB itd.) skrbelo za strokovni napredek na vseh področjih in dejavnostih varstva pred požarom.

Na ustanovnem sestanku so bili izvoljeni člani upravnega in nadzornega organa združenja. Predsednik združenja je mag. Bojan Grm (CPZT), namestnik predsednika Milan Hajdukovič (ZRMK, Požarni laboratorij) in tajnik združenja Mateja Kalamar (ZRMK, Požarni laboratorij).

Sedež združenja je na:

ZRMK – Zavod za raziskave materialov in konstrukcij,
Požarni laboratorij
Sr. Gameljne 41
61211 Ljubljana-Šmartno

Programska izhodišča Slovenskega združenja za požarno varstvo so naslednja:

- povezovanje vseh organizacij, institucij, upravnih organov in podjetij ter posameznikov, ki delujejo na področju požarnega varstva;
- organizacija strokovnih posvetov, seminarjev in drugih oblik izobraževanja;
- izdajanje strokovne revije za področje požarne varnosti;
- zagotavljanje izvajanja razvojno-raziskovalnih projektov na področju požarnega varstva ter s tem omogočiti strokovne podlage za posamezne odločitve, hitrejši prenos novih spoznanj v prakso in uvajanje novih rešitev in izdelkov na področju varstva pred požarom;
- sodelovanje pri:
 - pripravi novih predpisov in standardov;
 - izdelavi strategije in usmeritev na področju varstva pred požarom v Sloveniji;
 - pripravi kriterijev in smernic za izvajanje sistema preskušanja in certificiranja izdelkov na področju požarnega varstva;
 - pripravi kriterijev in smernic za načrtovanje in projektiranje požarnovarstvenih ukrepov;
 - izdelavi učnih programov za vse oblike izobraževanja na področju požarnega varstva;
- dvig strokovne ravni na vseh področjih in dejavnostih varstva pred požarom;
- popularizacija požarne varnosti, tako v strokovni javnosti kot med prebivalstvom;
- sodelovanje s sorodnimi tujimi združenji s področja požarne varnosti.

Združenje je bilo med tem že registrirano pri Ministrstvu za notranje zadeve.

V okviru SZPV delujejo trenutno naslednje štiri sekcije, ki so že pričele z delom:

- sekcija za publicistično dejavnost, izobraževanje in usposabljanje
- sekcija za preskušanje in standarde
- sekcija za predpise
- sekcija za razvoj in raziskave

Delo bo pokazalo, ali je potrebno ustanoviti nove sekcije oziroma razdeliti obstoječe.

Vse, ki delate na področju požarnega varstva ali vas to področje zanima, vabimo, da se nam pridružite.

Vse **informacije** v zvezi z združenjem dobite pri ge. Mateji Kalamar, tel.: 061/59-581.



POROČILA 34

GV XXXXIII • 3-4-5

**NAPOVED ČASOVNO ODVISNEGA
OBNAŠANJA VIADUKTA »REBER«**

UDK 624.21:625.745.1

JOŽE LOPATIČ

POVZETEK

V prispevku je prikazano časovno odvisno obnašanje viadukta »REBER« na odseku dolenske avtoceste Malence–Šmarje Sap. Poleg računske nelinearne analize časovnega odziva obravnavane konstrukcije z upoštevanjem vpliva reologije in postopnosti gradnje prispevek kratko predstavlja tudi izvedbo in del rezultatov dolgotrajnih meritev odziva na objektu. Rezultate meritev, ki smo jih izvajali v času gradnje od betoniranja opazovanega polja naprej in še več mesecev po končani gradnji, primerjamo z rezultati računske analize.

PREDICTION OF THE TIME DEPENDENT BEHAVIOUR OF THE REBER VIADUCT

SUMMARY

The article presents the time dependent behaviour of the Reber viaduct on the highway section from Malence to Šmarje Sap. Beside the numerical analysis of the time response of the structure by taking into account the influence of rheology and gradual erection, the article briefly presents also the accomplishment and a part of the results of the long-term monitoring of the object response. The measurements were carried out during the process of construction and a certain time after the object has been finished. Finally, some comparisons between the computational and experimental results are given.

1. UVOD

Časovni odziv viadukta smo določili z numerično nelinearno analizo konstrukcije z upoštevanjem vplivov reolo-

gije materiala in postopnosti gradnje. Metodo analize z ustrežno programsko podporo smo v zadnjih letih razvili na Katedri za masivne in lesene konstrukcije FAGG v Ljubljani. Metoda je primerna za ravninske linijske betonske konstrukcije, ki so lahko klasično armirane ali tudi prednapete. Trenutno jo dopolnjujemo v smeri računskega upoštevanja nelinearnega lezenja betona v območju visokih napetosti.

Avtor:
mag. Jože Lopatič, dipl. inž. gradb., FAGG, Katedra za
masivne in lesene konstrukcije, Jamova 2, Ljubljana

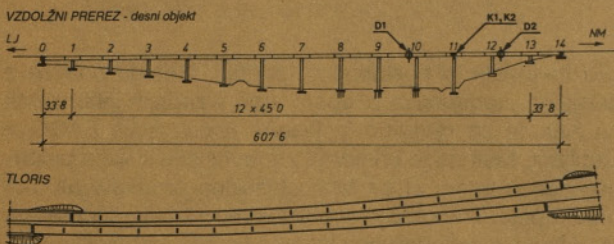
Glavni namen simulacije postopne gradnje je zajeti reološke vplive na konstrukcijo, ki nastopijo že med samo gradnjo in jih pri običajni analizi, kjer ponavadi upoštevamo kar končno obliko konstrukcije, zanemarimo. Z izrazom postopnost gradnje lahko razumemo gradnjo viadukta po taktih, prosto konzolno gradnjo mostov, gradnjo večetažnega objekta po nadstropjih ali pa tudi dograjevanje elementov konstrukcije po slojih. Upoštevanje postopnosti gradnje je pomembno, ker lahko obtežba, ki nastopi med gradnjo, doseže, mnogokrat pa celo preseže, končno obtežbo. Pri tem je potrebno upoštevati tudi drugačen statični sistem in relativno nizko starost betona.

Računske rezultate primerjamo z rezultati meritev, ki smo jih na mostu izvajali neprekinjeno od betoniranja opazovnega polja daljše časovno obdobje. Primerjava računskih in izmerjenih rezultatov lahko rabi za kontrolo primernosti in uporabnosti izdelane računске metode. Pri tem je potrebno poudariti, da je dejanski vpliv nekaterih parametrov na odziv konstrukcije računsko zelo težko ustrezno ovrednotiti. Zlasti to velja za vplive neenakomerne osičenosti konstrukcije, prevetrovanja, hidratacijske toplote in neenakomernega krčenja betona, ki jih lahko numerično le približno simuliramo.

2. TEHNIČNE ZNAČILNOSTI KONSTRUKCIJE

Viadukt Reber, ki je najdaljši in najzahtevnejši objekt na odseku Dolenjske avtoceste od Malenc do Šmarja-Sap, omogoča zunajnivojsko križanje z železniško progo Ljubljana–Novo mesto ter dvema lokalnima cestama. Glavni izvajalec del je bilo podjetje SCT iz Ljubljane.

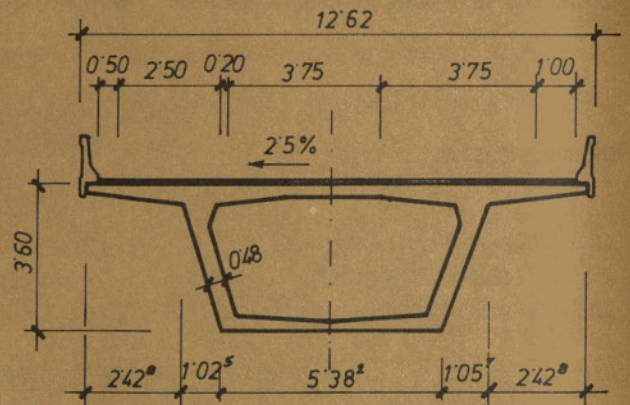
Viadukt sestavlja dva glede na smer vožnje popolnoma ločena objekta. Kot desni objekt smo poimenovali polovico viadukta, namenjeno prometu v smeri Novega mesta, levi del pa je namenjen za promet proti Ljubljani. Tlorisno potekata oba objekta v blagi krivini. Polmer levega objekta znaša 4500 m oziroma 3000 m na zadnjem odseku dolžine 40,26 m, polmer loka desnega objekta pa znaša 6000 m. Polmer vertikalne zaokrožitve trase v območju viadukta znaša 55.000 m. Desna konstrukcija je dolga 607,60 m in je podprta s trinajstimi stebri ter dvema krajnima opornikoma. Levi del viadukta ima enako število polj, dolg pa je 582,60 m. Na vsakem od objektov poteka normalen prečni profil vozišča s po dvema 3,75 m širokima voznima pasovoma ter odstavnim pasom. Širina vsakega od objektov vključno z betonsko varovalno ograjo znaša 12,62 m. Vozišče ima na območju viadukta konstantni 2,5-odstotni prečni nagib.



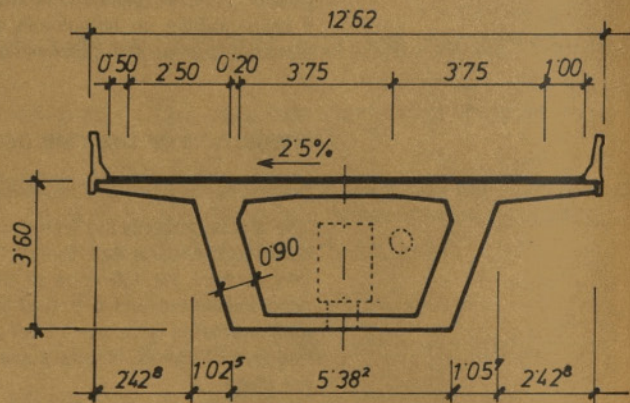
Slika 1: Vz dolžni prerez in tloris viadukta

Vsak izmed objektov je podprt s po trinajstimi vmesnimi stebri škatlastega prereza z debelino sten 35 cm in s krajnima opornikoma v obliki armiranobetonskih sten s paralelnimi krili. Objekta sta temeljena plitvo na temeljnih ploščah. Izjema so štirje vmesni stebri levega in pet vmesnih stebrov desnega viadukta, kjer je bilo potrebno izvesti globoko temeljenje. To je bilo izvedeno z Benotto piloti premera 150 cm in dolžine 6–14 m. Piloti so bili 4,5 m globoko uvrtni v nižje ležečo dolomitno podlago.

Prekladno konstrukcijo tvori neprekinjen nosilec prek štirinajstih polj, škatlastega prereza z višino 3,60 m. V območju podpor je nosilec ojačen na dolžini 9,50 m na obe strani od osi podpore.



Slika 2a: Prečni prerez nosilca v polju



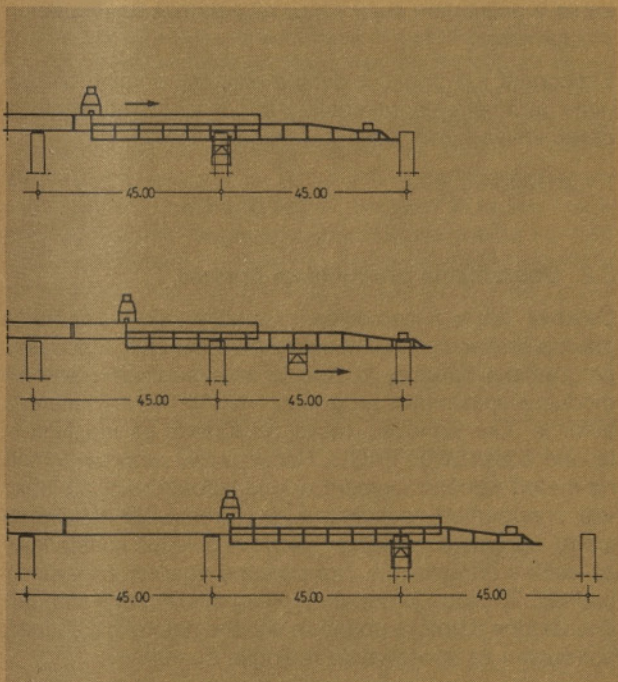
Slika 2b: Prečni prerez nosilca nad podporo

Prekladna konstrukcija vsakega ločenega objekta je zasnovana tako, da tvori eno samo zavorno enoto. Podpiranje prekladne konstrukcije je izvedeno z vzdolžno nepomičnimi ležišči na srednjih treh podporah in vzdolžno pomičnimi teflonskimi ležišči na ostalih podporah. V prečni smeri je na vsakem oporniku po par ležišč, izmed katerih je eno pomično.

Gredna konstrukcija mostu je delno prednapeta s kablji iz 42 žic $\varnothing 7$ mm ($A = 16,7 \text{ cm}^3$). V vsaki stojini mostnega

nosilca je nameščenih po osem kablov v poljih oziroma po deset kablov v območju nad podporami. Izdelava enega polja prekladne konstrukcije je potekala kot tehnološko sklenjena celota, za katero je izvajalec potreboval v normalnih razmerah 14 dni. Betoniranje mostnega nosilca je potekalo z uporabo samopremičnega opaža v celem profilu po korakih dolžine 45 m. Celotna dolžina 6000 kN težkega premičnega opaža je znašala 70 m. Iz statičnih razlogov je delovni stik oddaljen od podpore 9,5 m. Vsi premiki, kot tudi nameščanje konstrukcije premičnega opaža, so bili opravljeni s pomočjo hidravličnih dvigalk. Premik opažne konstrukcije (slika 3) v naslednje polje so predstavljali trije značilni koraki:

- a) Opažno konstrukcijo so najprej spustili za 20 cm, odprli spodnji opaž ter jo s pomočjo hidravličnih dvigalk počasi premaknili proti naslednji podpori za toliko, da je kljun dosegel podporo.
- b) Ko je prečnik kljuna sedel na podporo, so lahko demontirali par konzol za prenos obtežbe z opaža na steber in ju prestavili na naslednji steber.
- c) Opažno konstrukcijo so premaknili v dokončno lego naslednjega polja; pri tem je bilo potrebno zaradi stebra odpreti spodnji vrtljivi prečnik. Po končanem premiku je bilo potrebno zapreti dno opaža in namestiti opažno konstrukcijo v pravo lego.



Slika 3. Značilne faze pri premikanju odra

Po končani gradnji prvih 13 polj so premično opažno konstrukcijo demontirali in klasično opažili ter zabetonirali zadnje polje. Sproti ob gradnji prekladne konstrukcije so bili klasično opaženi in betonirani tudi prečniki nad vmesnimi podporami. Sledilo je še betoniranje betonske odbojne ograje, izolacijska dela ter asfaltiranje.

3. RAČUNSKA ANALIZA ODZIVA KONSTRUKCIJE

Z upoštevanjem pogojev uporabljene tehnologije gradnje in pogojev okolja konstrukcije smo s pomočjo nelinearne analize numerično simulirali časovni odziv konstrukcije. Pri tem smo reologijo betona upoštevali v skladu z modelom evropskih predpisov CEB-FIP iz leta 1990, ki lezenje betona za območje tlačnih napetosti med 0% in 40% tlačne trdnosti upošteva po linearni teoriji. V splošnem glede na raven doseženih napetosti ta teorija sicer zadošča, v času premikanja opaža pa, ko je razmeroma mlad beton najmočnejše obremenjen, bi bilo lezenje betona koristno upoštevati po nelinearni teoriji, ki jo trenutno vgrajujemo v programsko opremo. Glede na to, da visoka obremenitev konstrukcije v času premikanja opaža deluje sorazmerno kratek čas, a je glede na celotno obravnavano časovno obdobje upoštevanje lezenja betona po linearni teoriji tudi za ta primer dovolj natančno. Relaksacijo prednapete armature smo v računu upoštevali po Stüssiju.

3.1. Upoštevanji konstitutivni zakoni materialov

Časovni konstitutivni zakon betona, ki zajema vplive lezenja in krčenja betona, je v modelu predpisov CEB-FIP [8, 9] podan v obliki integralne enačbe z izrazom (1).

$$\varepsilon(t) = \sigma(t_0) \cdot J(t, t_0) + \int_{t_0}^t J(t, \tau) d\sigma(\tau) + \varepsilon_{cs}(t) \quad (1)$$

Pri tem je $\varepsilon_{cs}(t)$ deformacija krčenja betona v poljubnem času t . Ker je deformacijsko stanje prereza zaradi krčenja kot posledice sušenja betona v splošnem nehomogeno, ta vrednost karakterizira povprečno krčenje betonskega prereza. Računsko je krčenje betona odvisno od trajanja procesa (čas po končanem negovanju betona), pogojev okolice, karakteristične debeline prereza, vrste cementa in tlačne trdnosti betona. Tlačna trdnost betona sama po sebi nima direktnega vpliva na velikost krčenja, grobo pa s tem upoštevamo vpliv vodocementnega faktorja in količine cementa.

Z $J(t, t_0)$ oziroma $J(t, \tau)$ pa je označena funkcija lezenja, ki predstavlja celotno specifično deformacijo betona v poljubnem času t zaradi delovanja enotske napetosti ($\sigma = 1$) od časa t_0 oziroma τ dalje. Za obravnavane čase t , ki so manjši od časa t_0 , velja $J(t, t_0) = 0$. Sicer pa je funkcija lezenja določena s pomočjo koeficienta lezenja $\varphi(t, t_0)$, modula elastičnosti v času nastopa napetosti $E_c(t_0)$ oziroma spremembe napetosti $E_c(\tau)$ in modula elastičnosti betona pri starosti 28 dni $E_c(28)$ z izrazoma (2)

$$J(t, t_0) = \frac{1}{E_c(t_0)} + \frac{\varphi(t, t_0)}{E_c(28)} \text{ oz. } J(t, \tau) = \frac{1}{E_c(\tau)} + \frac{\varphi(t, \tau)}{E_c(28)} \quad (2)$$

Koeficient lezenja $\varphi(t, \tau)$ v enačbi (2) je normiran glede na trenutno elastično deformacijo 28 dni starega betona. Podan je kot produkt nazivnega koeficienta lezenja φ_0 , ki je odvisen od časa nastopa obremenitve τ , in funkcije β_c , ki opisuje razvoj lezenja v odvisnosti od časa trajanja obtežbe ($t - \tau$):

$$\varphi(t, \tau) = \varphi_0(\tau) \cdot \beta_c(t - \tau) \quad (3)$$

Nazivni koeficient lezenja φ_0 podaja razmerje deformacije zaradi lezenja pri neskončno dolgem delovanju obremenitve od časa τ naprej in fiktivne hipne elastične deformacije pri starosti betona 28 dni. Poleg starosti vplivajo ob obremenitvi τ na nazivni koeficient lezenja še pogoji okolja, vrsta cementa, karakteristična debelina prereza in posredno prek tlačne trdnosti tudi vodocementni faktor in količina cementa. Funkcija β_c , ki opisuje razvoj lezenja betona v odvisnosti od časa trajanja obtežbe ($t-\tau$), zajema tudi vpliv relativne vlažnosti okolice in karakteristične debeline prereza.

Če obravnavamo časovno obdobje razdelimo na končno število intervalov in privzamemo linearno spreminjanje napetosti betona znotraj posameznega časovnega intervala, lahko z numerično integracijo konstitutivni zakon betona iz integralne oblike prevedemo v algebraično obliko (4).

$$\sigma(t) = \frac{1}{A_{t,i}} \cdot \left[\varepsilon(t) - \sum_{i=0}^n B_{t,i} \cdot \sigma(t_i) - \varepsilon_{cs}(t) \right] \quad (4)$$

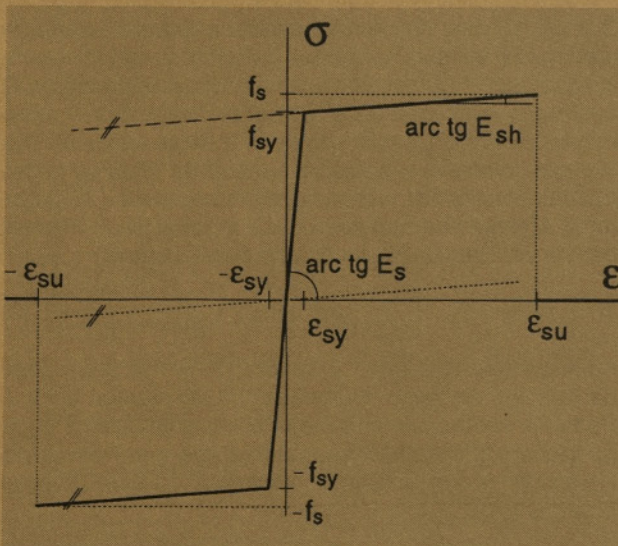
Koeficienti $A_{t,i}$ in $B_{t,i}$ so določeni s funkcijami lezenja J na naslednji način [4]:

$$A_{t,i} = \frac{1}{2} \cdot [J(t, t_n) + J(t, t)] ; B_{t,i} = \frac{1}{2} \cdot [J(t, t_{i-1}) - J(t, t_{i+1})] \quad (5)$$

Pri tem je t_i začetni čas i -tega intervala, t_n pa začetni čas zadnjega obravnavanega intervala (t_n do t).

Za mehko armaturo smo v računu upoštevali bilinearni delovni diagram z linearno utrditvijo materiala (slika 4). Pri poznani napetosti na meji elastičnosti f_{sy} , deformaciji na meji elastičnosti ε_{sy} in stopnji utrjevanja E_{sh} lahko napetost σ kot funkcijo dosežene specifične deformacije ε zapišemo z enim samim izrazom (5) za celotno definicijsko območje ($-\varepsilon_{su} \geq \varepsilon \geq \varepsilon_{su}$).

$$\sigma(\varepsilon) = \frac{f_{sy}^*}{2} \cdot \left(\left| \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{sy}} + 1 \right| - \left| \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{sy}} - 1 \right| \right) + E_{sh} \cdot \varepsilon ; f_{sy}^* = f_{sy} - E_{sh} \cdot \varepsilon_{sy}$$



Slika 4: Bilinearni delovni diagram z utrditvijo

Za prednapeto armaturo smo upoštevali nelinearni konstitutivni zakon materiala po predlogu Goldberga in Richarda (en. 6). Zaradi visoke ravni napetosti smo ta zakon dopolnili tako (en. 7), da smo zajeli tudi vpliv relaksacije materiala, ki jo povzroči deformacija v času napenjanja kablov, po Stüssiju. Ker predstavljajo pri delovnih obtežbah spremembe deformacij zaradi zunanje obremenitve relativno majhen del celotne deformacije kablov, je za te vplive zveza $\sigma-\varepsilon$ (6) v okolici napenjalne deformacije $\varepsilon(t_p)$ linearizirana.

$$\sigma^*(\varepsilon) = \frac{f_p \cdot \bar{\varepsilon}}{[1 + \bar{\varepsilon}^n]^{\frac{1}{n}}} ; \quad \bar{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{py}} ; \quad n = \frac{\log 2}{\log \frac{f_p}{f_{py}}} \quad (6)$$

$$\sigma(\varepsilon, t) = f_p \cdot \frac{\left\{ \frac{10^{-r} \cdot \bar{\varepsilon}(t_p)}{[1 + \bar{\varepsilon}(t_p)^n]^{\frac{1}{n}}} + 0.52 \right\}}{1 + 10^{-r}} + [\varepsilon(t) - \varepsilon(t_p)] \cdot \left. \frac{d\sigma^*}{d\varepsilon} \right|_{\varepsilon(t_p)} ; \quad \bar{\varepsilon}(t_p) = \frac{\varepsilon(t_p)}{\varepsilon_{py}} \quad (7)$$

Pri tem je f_p natezna trdnost jekla, f_{py} konvencionalna napetostna meja elastičnosti jekla, ε_{py} pa tej napetostni meji pripadajoča deformacija. $\varepsilon(t)$ je celotna deformacija kabla v poljubnem času $t \geq t_p$, $\varepsilon(t_p)$ pa napenjalna deformacija kabla.

Eksponent r je podan z dvema eksperimentalno določenima parametroma materiala, p in r_0 in logaritmom trajanja obremenitve kabla ($t-t_p$) na naslednji način:

$$r = p \cdot \log(t - t_p) + r_0 \quad (8)$$

3.2. Uporabljena programska oprema

Časovni odziv konstrukcije z upoštevanjem zaporedja gradnje in reologije materiala smo simulirali s pomočjo programske opreme, ki smo jo z dograditvijo posebnih modulov splošnemu programu »NONFRAN«, katerega avtor je Jure Banovec, razvili pri Katedri za masivne in lesene konstrukcije FAGG. Računalniški program temelji na metodi končnih elementov in je izdelan tako, da lahko vse spremembe na konstrukciji (spremenljiv statični sistem), spremembe pogojev okolja in obtežbe konstrukcije za celotni obravnavani čas podamo vnaprej z vhodnimi podatki. Za račun je potrebno poleg modificirane standardne vhodne datoteke podati še vhodno datoteko s podatki, potrebnimi za upoštevanje reologije materialov.

Odziv konstrukcije določamo sukcesivno po časovnih korakih. Rezultante napetosti in člene matrike tangentialnih togosti prerezov v integracijskih vozlih določamo z integracijo napetosti oziroma tangentialnega modula po prerezu. Pri tem upoštevamo Bernoullijevo hipotezo o linearnem poteku deformacij po prerezu in predhodno omenjene konstitutivne zakone materialov. Integracijo po ploskvi prečnega prereza z uporabo Greenovega integralskega izreka prevedemo na integracijo po zaključenih konturah

prereza [1, 5]. Osnovne enačbe posameznega elementa kot tudi enačbe celotne konstrukcije so zaradi upoštevanja geometrijske in materialne nelinearnosti nelinearne. Rešujemo jih iterativno s pomočjo Newton-Raphsonove metode. Uporabljamo učinkoviti končni element z oznako P_4 [6], pri katerem je ukrivljenost vzdolž referenčne osi aproksimirana s polinomom četrte stopnje. Za numerično integracijo količin vzdolž elementa je uporabljena Lobatova kvadratura formula. Nelinearne enačbe konstrukcije pri tem rešujemo iteracijsko. Minimalno število časovnih korakov določajo časovni intervali, znotraj katerih so pogoji okolja in statični sistem konstrukcije konstantni. Uporabljena računrska metoda je numerično stabilna za poljubno izbrane dolžine časovnih intervalov. Vpliv postopne gradnje na konstrukcijo upoštevamo tako, da v vsaki fazi oziroma obtežnem primeru za izhodiščno geometrijo upoštevamo deformirano geometrijo konstrukcije predhodne faze [5]. Nova faza računsko nastopi ob vsaki spremembi referenčne geometrije konstrukcije zaradi dodajanja ali dograjevanja elementov in pri vsaki takšni spremembi obtežbe, ki je ni mogoče opisati s spremembo obtežnega faktorja za spremenljivi del obtežbe.

Za upoštevanje reoloških vplivov, formiranje konstitutivnih enačb prerezov, statičnega sistema in ustreznih togostnih matrik ter enačb konstrukcije v skladu z ustreznimi fazami gradnje skrbijo ustrezni programski moduli, ki so predstavljeni v nadaljevanju.

Postopnost gradnje obravnavane konstrukcije je simulirana s pomočjo programskega modula POSTOP, ki ga aktivira osnovni program pred računom vsake faze. Namen tega je določitev novega nosilnega sistema konstrukcije, ki zajema novo število vozlišč, elementov in enačb konstrukcije, generacijo koordinat dodanih vozlišč ter račun začetnih vrednosti robnih pomikov in nedeformiranih dolžin novih elementov konstrukcije. Modul pri tem izpiše tudi podatke o referenčni geometriji konstrukcije v obravnavani fazi. V vmesnih fazah gradnje rešujemo zaradi manjšega obsega konstrukcije le del sistema enačb. Pri tem poenostavimo račun, če vozlišča in elementne oštevilčimo tako, da jih grupiramo po fazah

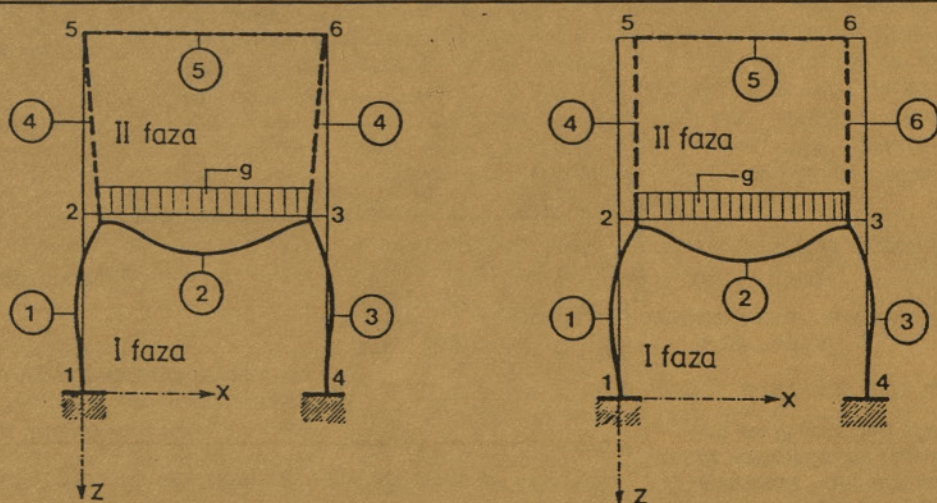
gradnje. Geometrijo in obtežbo podajamo za celotno konstrukcijo vnaprej. Koordinate vozlišč, ki nastopijo po prvi fazi, lahko podamo kot dokončne ali le kot izhodiščne vrednosti. V slednjem primeru se navežejo koordinate vozlišča na koordinate že zgrajenega sosednjega vozlišča v deformirani legi. Dokončne koordinate izračunamo v takem primeru tako, da izhodiščnim vrednostim koordinat prištejemo pomike izbranega vozlišča v smeri ustrezne koordinate osi. Razliko med obema načinoma podajanja koordinat prikazuje sliki 5. Koordinate vozlišč 5 in 6 v vrhni etaži dvoetažnega okvira so podane v primeru 5a kot dokončne, medtem ko se v primeru 5b začetni koordinati v smeri x vežeta na deformirano lego vozlišč 2 in 3.

Osnovni program NONFRAN ima standardno urejeno podajanje karakteristik prečnih prerezov, imenovanih tudi »materiali«. V razširjeni verziji je definiran tako imenovani »reološki material«, ki mu je potrebno poleg standardnih določiti še podatke o vplivnih parametrih reologije, klimatskih razmerah in postopnosti gradnje. Modul REOL računa reološke količine, potrebne za definiranje konstitutivnega zakona betona, sproti med branjem vhodnih datotek.

Za račun konstitutivnih zvez ojačenih betonskih prerezov z upoštevanjem reologije kliče program NONFRAN po potrebi vodilni podprogram modula CARB. Ta račun je potrebno izvršiti v vsaki iteraciji za vsak integracijski vozlel.

Zaradi mešanega principa je za podano osno silo in ukrivljenost sistemske osi elementa potrebno določiti elongacijo sistemske osi elementa. Pri tem si pomagamo z Newtonovo metodo reševanja nelinearnih enačb. V primeru doseženega ravnotežja izračunamo še upogibni moment prereza ter pripadajoče člene matrike tangentnih togosti prereza. Ker sodeluje pri prevzemu nateznih napestosti le nerazpokani del betonskega prereza, modul vodi tudi evidenco razpokanih con betonskega prereza, ki se dopolnjuje z vsakim računskim korakom oziroma časom.

Po uspešno zaključenem računu v posameznem časovnem koraku osnovni program s klicem podprograma RAZPOKE požene še račun širine, globine in medsebojne



Slika 5: Različna načina podajanja geometrije konstrukcije

razdalje razpok na vseh podanih mestih konstrukcije ter izpiše rezultate.

3.3. Računski model in obtežba konstrukcije

Računsko smo obdelali le desni objekt viadukta Reber, na katerem smo izvajali tudi dolgotrajne meritve. V analizi smo zajeli prekladno konstrukcijo, brez upoštevanja podajnosti podporne konstrukcije. V statičnem pogledu je prekladna konstrukcija neprekinjeni nosilec prek štirinajstih polj in je zasnovana kot ena zavorna enota.

Prekladna konstrukcija obravnavanega dela objekta je dolga 607,60 m, z razponi $33,80 + 12 \times 45,00 + 33,80$ m. Polja standardnega razpona 45 m smo modelirali s po štirimi elementi, in sicer z elementoma dolžine po 9,5 m na ojačenem območju ob podporah in z dvema srednjima elementoma šibkejšega prečnega prereza dolžine po 13,0 m. Pri krajnjih poljih dolžine 33,8 m smo uporabili po tri končne elemente dolžin 9,5 m, 10,0 m in 14,3 m. Prečni prerez betona ter razporeditev in količino mehke in prednapete armature smo podali v petih točkah oziroma integracijskih vozlih vsakega končnega elementa.

Prečni prerez betona opišemo s koordinatami točk poligona. Mehko armaturo smo zaradi poenostavitve podajali le v dveh točkah prereza, v katerih smo združili zgornjo oziroma spodnjo armaturo. Kabelska armatura je združena v dve skupini v polju oziroma tri skupine nad podporo. V posamezni skupini so združeni kabli, ki se napenjajo istočasno.

V računu smo upoštevali naslednje mehanske karakteristike materialov:

- Beton: karakteristična tlačna trdnost 50 MPa
- Mehka armatura: $f_{sy}/f_s = 400/500$ MPa, $E_s = 200$ GPa, $E_{sh} = 20$ GPa
- Kabelska armatura: $f_{py}/f_p = 1490/1657$ MPa, $E_p = 206$ GPa, $\epsilon(t_p) = 0,0049$.

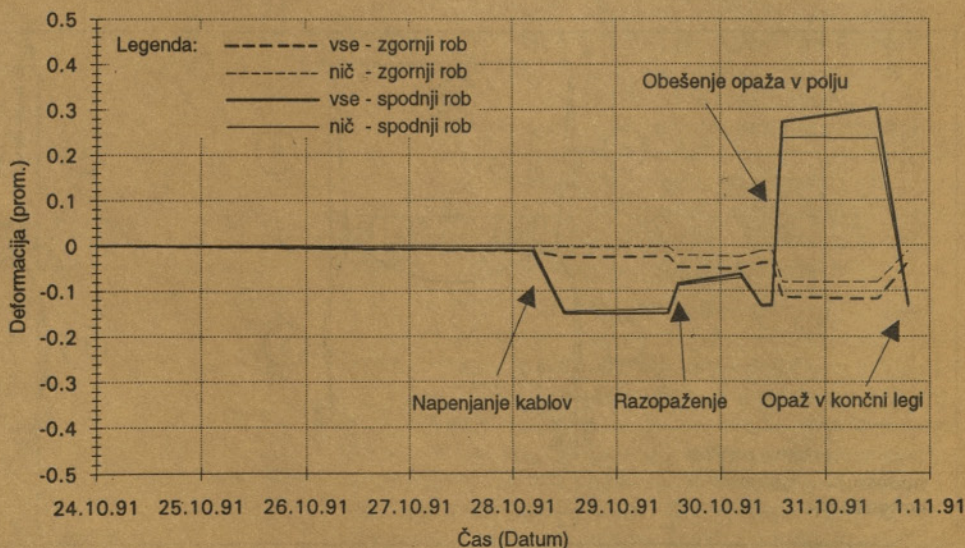
Ker je bil viadukt grajen postopno po taktih, smo to

upoštevali pri računu. V vsakem taktu smo obravnavali naslednje karakteristične čase in obtežbe: betoniranje elementov, začetek in konec napenjanja kablov, razopaženje in več faz med premikanjem opaža. Tehnologija gradnje, ki je opisana v 2. točki, je enaka pri taktih D2 do D13. Izjemi sta le prvi in zadnji takt gradnje. V prvem in zadnjem taktu (D1 in D14) smo upoštevali po pet časovnih korakov, v vmesnih taktih (D2 do D11) po sedem časovnih korakov, pri taktih D12 in D13 (območje meritev) pa po 13 časovnih korakov v petih fazah. Za pogoje okolja smo upoštevali podatke Hidrometeorološkega zavoda Slovenije in podatke, ki smo jih pridobili z lastnimi meritvami temperature in vlage zraka.

3.4. Rezultati računske analize

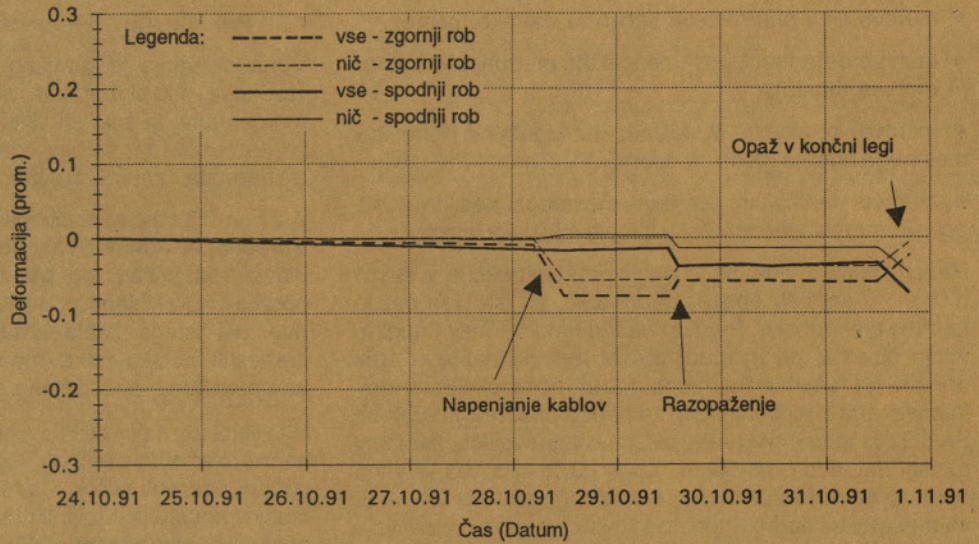
Iz obširnih rezultatov računa smo izluščili del rezultatov, ki jih lahko primerjamo z rezultati meritev. V izpisu rezultatov računa dobimo za izbrane prečne prerese konstrukcije med drugim za vsak obtežni korak tudi velikost elongacije ter ukrivljenosti vzdolžne osi v težišču prereza. Na podlagi teh podatkov lahko ob predpostavki o majhnih ukrivljenostih in linearnem poteku deformacij po prerezu določimo deformacijo na zgornjem ter spodnjem robu. Pri tem so v predstavitvi rezultatov kot negativne specifične deformacije označeni skrčki, kot pozitivne vrednosti pa raztezki.

Na sliki 6 je prikazan računski potek specifičnih deformacij na zgornjem in spodnjem robu prereza v sredini 12. polja v obdobju najbolj intenzivnih sprememb obtežbe na obravnavanem polju, to je od betoniranja dne 23. 10. 1991 do opravljenega premikanja drsnega opaža v naslednje polje dne 1. 11. 1991. Prikazani so rezultati za primer (vse), ko v računski analizi upoštevamo vse reološke vplive (relaksacijo prednapete armature, staranje, krčenje in lezenje betona) ter za primer (nič), ko ne upoštevamo nobenega reološkega vpliva. Rezultati računske analize, prikazani na sliki 6, so direktno primerljivi z rezultati meritev specifičnih deformacij v tem prerezu, ki so prikazani na sliki 9.



Slika 6: Računski potek deformacij na zgornjem in spodnjem robu prereza v sredini polja 12

Slika 7: Računski potek deformacij na zgornjem in spodnjem robu prereza nad podporo D12



Podobno je na sliki 7 prikazan računski potek specifičnih deformacij na zgornjem in spodnjem robu prereza nad podporo D12 v obdobju najbolj intenzivnih sprememb obtežbe obravnavanega polja. Zopet so prikazani rezultati za primer, ko v računski analizi upoštevamo vse reološke vplive (relaksacijo prednapete armature, staranje, krčenje in lezenje betona) in za primer, ko ne upoštevamo nobenega reološkega vpliva.

V preglednici 1 so podane računske vrednosti vertikalnega pomika (U_r) v sredini 12. polja pri posameznih karakterističnih dogodkih na objektu ob računskem upoštevanju vseh reoloških vplivov. Pri tem je kot izhodiščna upoštevana vrednost računskega pomika tik pred spuščanjem opaža, zato je direktno primerljiva z vrednostmi v preglednici 2, kjer so podani izmerjeni dejanski pomiki v sredini 12. polja.

Datum	U_r (mm)	Dogodek
29. 10. 1991	6,30	po spuščanju opaža v 12. polju
5. 11. 1991	3,90	po premiku opaža
13. 11. 1991	-1,31	po betoniranju naslednjega polja
18. 11. 1991	-3,09	po spuščanju opaža v sosednjem polju

Preglednica 1: Računski vertikalni pomiki pri upoštevanju vseh reoloških vplivov

Pri računski simulaciji obremenilnega preizkusa viadukta smo ob upoštevanju vseh reoloških vplivov izračunali vertikalni pomik 2,52 mm, v primeru računa, ko smo upoštevali le staranje materiala, pa 2,32 mm. Dejanski izmerjeni pomik med preiskavo je znašal 2,44 mm, kar se razmeroma dobro ujema z rezultati računske analize.

4. MERITVE ČASOVNEGA ODZIVA KONSTRUKCIJE

Dolgotrajna opazovanja obnašanja (monitoring) zahtevnejših gradbenih konstrukcij so v razvitem svetu že uveljavljena oblika spremljanja oziroma ugotavljanja dosežene kakovosti gradnje. V zadnjem času smo z izredno hitrim razvojem elektronike, tako na področju merilne opreme in telekomunikacij kakor tudi na področju računalništva, pridobili nove možnosti za popolnoma avtomatizirano dolgotrajno spremljanje odziva gradbenih konstrukcij v naravi [2]. Sodobna merilna oprema omogoča električno merjenje praktično vseh fizikalnih količin, ki so pomembne za presojo konstrukcij.

4.1. Obseg in izvedba meritev

Neprekinjeno opazovanje viadukta »REBER« z meritvami med gradnjo in še določen čas po dokončanju smo opravili sodelavci Katedre za masivne in lesene konstrukcije in Konstrukcijsko prometnega laboratorija Oddelka za gradbeništvo in geodezijo na FAGG v Ljubljani. Za opazovanje smo izbrali 12. fazo gradnje desnega objekta, ki obsega polje med stebri 11 in 12 ter področje podpore prek stebra 12 (slika 1). Priprave na meritve na terenu so z namestitvijo merskih senzorjev potekale hkrati s polaganjem armature opazovanega polja. Meritve so potekale neprekinjeno od dneva betoniranja izbranega polja 23. 10. 1991 do sredine leta 1992.

V okviru dolgotrajnega opazovanja viadukta Reber smo opravili naslednje meritve:

- meritve temperature in relativne vlage zraka znotraj in zunaj škatlastega nosilca (4 merska mesta),
- meritve temperature betona 1,00 cm pod zunanjo in notranjo površino škatlastega nosilca (8 merskih mest),
- meritve specifičnih deformacij betona in armature v vzdolžni in prečni smeri v polju 12 in nad podporo 12 (54 merskih mest),

- meritve sil v prednapetih kabljih (4 merska mesta),
- meritve deformacij posameznih žic prednapetih kablov (4 merska mesta),
- meritve relativnih vzdolžnih horizontalnih pomikov mostnega nosilca glede na opornik 11 (2 merski mesti) in
- meritve vertikalnih pomikov mostnega nosilca v 12. polju (6 merskih mest) v času intenzivnih del v tem polju.

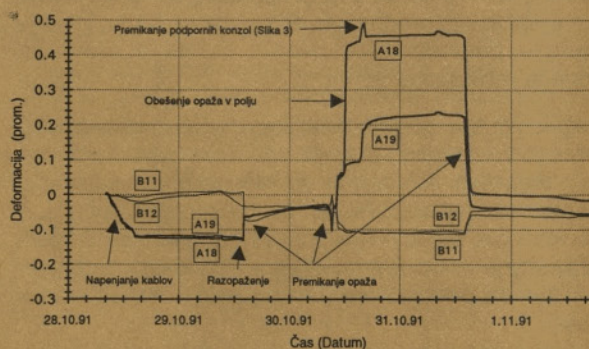
Razen meritev vertikalnih pomikov konstrukcije v šestih točkah, ki smo jih opravili geodetsko, so bile vse ostale meritve elektronske. Prvotno načrtovano daljinsko opazovanje objekta, pri katerem bi bila merilna naprava prek dodatnega računalnika, modemov in telefonskega omrežja povezana z računalnikom za nadzor meritev v prostorih FAGG, je naročnik preiskav zaradi prevelikih stroškov opustil. Meritve smo izvedli tako, da je bila vsa merilna oprema nameščena znotraj škatlastega nosilca v opazovanem polju. Jedro merilnega sistema je predstavljala 100-kanalna merilna naprava Hottinger UPH 3200 z vgrajenim vmesnikom standarda IEEE 488 za povezavo z osebnim računalnikom. Kot računalnik za procesno vodenje meritev in zajem podatkov smo uporabili kompatibilni PC 386 z dodatno kartico IEEE 488. Uporabljena programska oprema omogoča popolno kontrolo nad potekom meritev in avtomatski zajem ter hkrati grafični ali numerični prikaz podatkov. Časovni korak registriranja vrednosti smo prilagodili intenzivnosti gradbenih del in je znašal od 5 sekund do 2 ur. Ker programska oprema skrbi za sprotno zapisovanje izmerjenih vrednosti ter časa in datuma odčitka na trdi disk, so bili v primeru izpada električne energije izgubljeni le s programom predvideni odčitki v času izpada. Po ponovnem konfiguriranju sistema po izpadu se je programska oprema avtomatsko naložila in nadaljevala z meritvami. Vsi merski senzori so bili priključeni neposredno na merilno aparaturu Hottinger: za merjenje specifičnih deformacij betona, mehkega jekla in visokovrednega jekla različne vrste merilnih lističev, za pomike induktivni merilniki, za sile cilindrične celice, opremljene z merilnimi lističi, za temperaturo betona pa uporovni merilniki.

4.2. Predstavitev dela rezultatov meritev

V nadaljevanju je grafično predstavljen del izmerjenih vrednosti. Merska mesta za spremljanje deformacij in temperature, ki smo jih vključili v predstavitev rezultatov, so nameščena v sredini opazovanega 12. polja. Njihovo razporeditev znotraj prečnega prereza prikazuje slika 8.

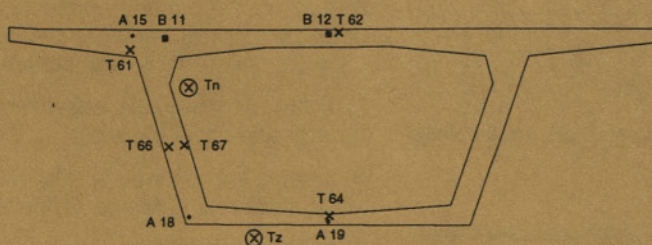
Z D1 in D2 smo označili merski celici za spremljanje sile v prednapeti armaturi na mestu sidrne oziroma napenjalne glave. Nameščeni sta bili na kablju dolžine 109,5 m, ki poteka neprekinjeno prek dveh polj objekta (slika 1). Na dve žici istega kabla smo v sredini njegove dolžine namestili merska listka (merski mesti K1 in K2 – slika 1) za spremljanje specifičnih deformacij.

Na sliki 9 je za prve štiri dni od trenutka napenjanja kablov naprej, kar je čas najbolj intenzivnih sprememb obtežbe, podan časovni potek specifičnih deformacij betona in mehke armature v vzdolžni smeri v sredini opazovanega polja. Pri najpomembnejših spremembah deformacij je nakazano, iz katerih gradbenih ukrepov te spremembe izvirajo. V času premikanja odra je namreč krajši čas obtežba že izdelane mostne konstrukcije največja izmed vseh računsko predvidenih obtežb, sprememba obremenitve konstrukcije pa najizrazitejša.



Slika 9: Vzдолžne deformacije betona in armature v prvih štirih dneh po napenjanju kablov

PREČNI PREREZ

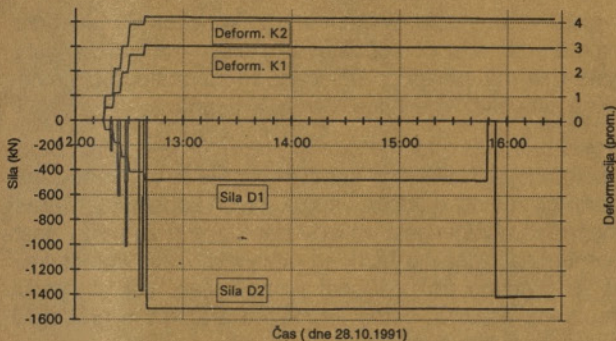


LEGENDA:

- Deformacija vzdolžne armature
- Deformacija betona v vzdolžni smeri
- × Temperatura betona
- ⊗ Temperatura zraka

Slika 8: Razporeditev merskih mest v prerezu na sredini opazovanega polja

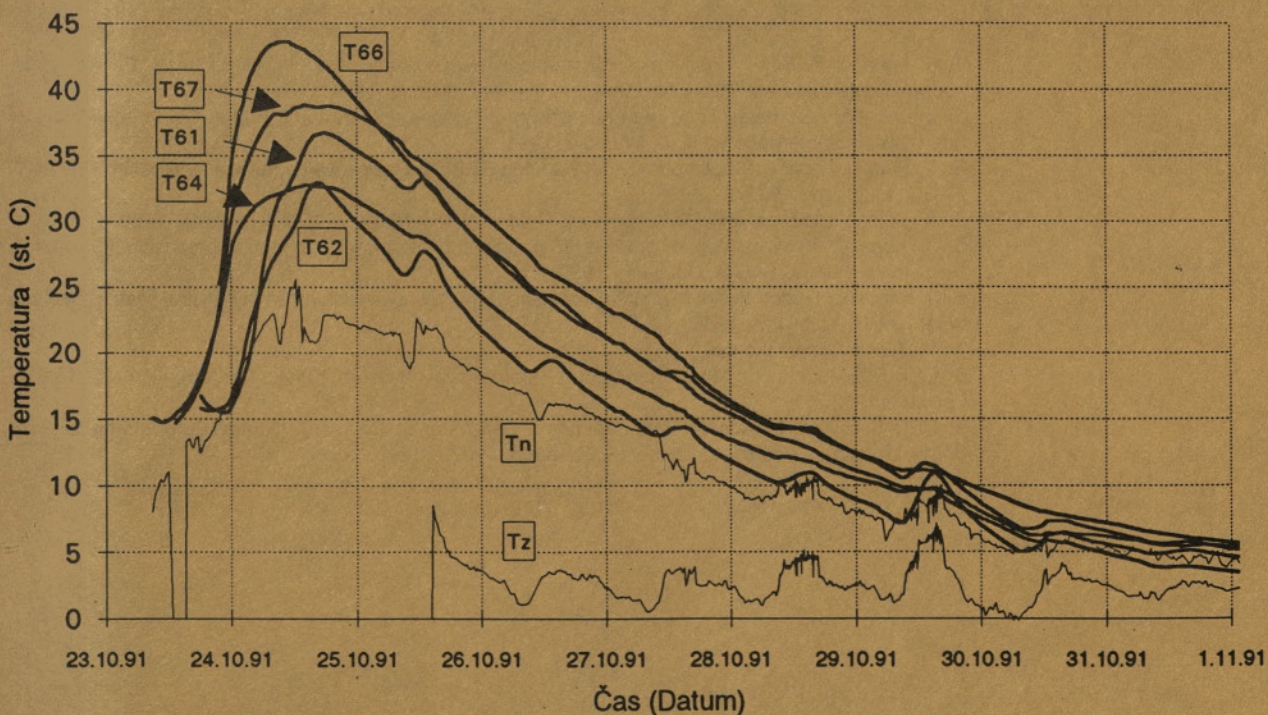
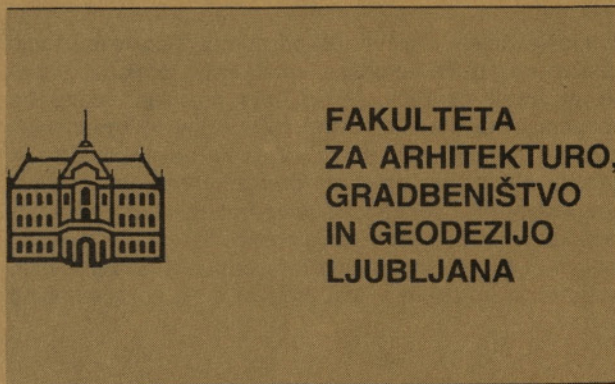
Slika 10 prikazuje za en kabel časovni potek sil v območju sidrne (mersko mesto D1) in napenjalne glave (mersko mesto D2) v času napenjanja kablov. Poleg omenjenega poteka sil je prikazan še časovni potek specifične deformacije dveh žic (merski mesti K1 in K2) opazovanega kabla. S slike lahko razberemo, da je vpliv trenja zelo velik. Med napenjanjem se na sidrno glavo (D1) na nasprotnem koncu kabla prenese nekaj nad 30% napenjalne sile. Pri naknadnem napenjanju na mestu sidrne glave (D1), ob 15⁵⁰, pa se vpliv ne prenese niti do merskih listkov na sredini kabla (K1 in K2).



Slika 10: Časovni potek izmerjenih sil in deformacij v enem kablu v času napenjanja

Slika 11 prikazuje za prvih devet dni po betoniranju časovni potek temperature betona na petih merskih mestih po sliki 6 ter temperaturo zraka v notranjosti in zunanosti prereza.

Vertikalne pomike smo merili geodetsko v šestih merskih točkah. Po dve merski mesti (levo in desno) smo opazovali v sredini 12. polja, nad stebrom D11 in stebrom D12. V preglednici 2 so podane vrednosti izmerjenih pomikov v mm v vseh šestih merskih mestih ob posameznih dogodkih na objektu. Pri tem smo kot izhodišče upoštevali vrednosti, izmerjene dne 29. 10. 1991, tik pred spuščanjem opaža v 12. polju. Kot pozitivni so označeni pomiki navzdol.



Slika 11: Izmerjene temperature betona in zraka v notranjosti ter zunanosti prereza

Preglednica 2: Izmerjene vrednosti vertikalnih pomikov

Datum	Steber D11		Sredina polja D12		Steber D12		Opombe:
	U1 (mm)	Ud (mm)	U1 (mm)	Ud (mm)	U1 (mm)	Ud (mm)	
29. 10. 1991	-1,0	-1,0	7,0	6,0	2,0	-1,0	po spuščanju opaža v polju D12
5. 11. 1991	-2,0	-1,0	4,0	5,0	4,0	3,0	po premiku opaža
13. 11. 1991	-3,0	-3,0	-1,0	-2,0	6,0	1,0	po betoniranju naslednjega polja
18. 11. 1991	-2,0	-1,0	-3,0	-4,0	7,0	4,0	po spuščanju opaža v naslednjem polju

5. SKLEP

Z upoštevanjem dejstva, da pri numeričnem simuliranju časovnega odziva betonske konstrukcije ni mogoče upoštevati vseh okoliščin, ki vplivajo na njeno dejansko obnašanje, je ujemanje med računskimi in izmerjenimi rezultati sorazmerno dobro. Vplivov neenakomernega krčenja betona po prečnem prerezu mostnega nosilca, neenakomerne osončenosti, temperaturnih deformacij betona kot posledice segrevanja nosilca zaradi hidratacijske toplote in dnevnega nihanja temperatur, interakcije med opažem in betonom v fazi strjevanja, ki so v meritvah

implicitno zajeti, pri globalni analizi konstrukcij numerično ne moremo natančno upoštevati. Poleg tega tudi dejanska kakovost materialov do določene mere odstopa od imenske kakovosti, ki je upoštevana v računu.

Prikazana računsko metoda in programska oprema omogočata dokaj realistično napovedovanje časovno odvisnih pomikov reološko občutljivih gradbenih konstrukcij. Zaradi možnosti upoštevanja vplivov postopne gradnje je zlasti primerna za analizo faznega odziva mostnih konstrukcij, ki jih gradimo po posebnih tehnologijah, kot so prosta konzolna gradnja, delno montažna gradnja in gradnja z naknadnim kontinuiranjem.

LITERATURA

1. J. Lopatič, F. Saje, Modeling of Elasto-plastic Response of Concrete Structures, Euro-C 1994, zbornik konference str. 765-774, Pineridge Press, Innsbruck 1994.
2. J. Lopatič, Automated Long-term Monitoring of Bridges, International Bridge Conference Warsaw '94, (zbornik konference v tisku), Warsaw, 1994.
3. F. Saje, J. Lopatič, Študija obnašanja viadukta REBER, Raziskovalna naloga za RUC in SGP SCT, FAGG, Ljubljana, 1993.
4. F. Saje, Viskoznost linijskih konstrukcij, Doktorska disertacija, FAGG, Ljubljana, 1990.
5. J. Lopatič, Vpliv postopne gradnje in napetostno-deformacijsko stanje betonskih konstrukcij, Magistrska naloga, FAGG, Ljubljana, 1990.
6. J. Banovec, Geometrijska in materialna nelinearnost pri ravninskih okvirnih konstrukcijah, Doktorsko delo, FAGG, Ljubljana, 1986.
7. B. Žličar, Diplomsko delo, FAGG, 1993.
8. CEB-FIP Model code 1990, Comité Euro-International du Béton, Buletin D'Information No 213/214, Lausanne 1993.
9. CEB Structural Effects of Time-dependent Behaviour of Concrete, Comité Euro-International du Béton, Buletin D' Information No. 215, Lausanne, 1993.

MINLP OPTIMIRANJE MEHANSKIH STRUKTUR

II. del: MINLP OPTIMIRANJE ZAPORNICE INTAKE GATE, ASWAN

UDK

STOJAN KRAVANJA, BRANKO BEDENIK in ZDRAVKO KRAVANJA

POVZETEK

V članku predstavljamo metodo mešano-celoštevilnega nelinearnega programiranja (MINLP), s katero uspešno rešujemo problem optimiranja in analize mehanskih struktur. Z optimizacijsko metodo MINLP izvajamo optimiranje topologije in parametrov mehanskih struktur, kjer optimalno topologijo (optimalno število konstrukcijskih elementov) in optimalne parametre (dimenzije) izračunamo sočasno v enovitem računskem procesu.

V II. delu članka predstavljamo praktični primer primerjalne analize vgrajene kotalne tablaste zapornice Intake Gate, Aswan, Egipt. S praktičnim primerom dokazujemo, da je MINLP metoda učinkovitejša od optimizacijske metode nelinearnega programiranja (NLP). Hkrati predstavljamo različne MINLP strategije, kot sta strategiji dvofaznega in enofaznega MINLP optimiranja, induktivna modelna in dekompozicijska strategija (IMD) ter strategija zaporedno povezanega teoretičnega in realnega MINLP optimiranja. Na kratko naštejemo tudi modifikacije MINLP algoritma.

MINLP OPTIMIZATION OF MECHANICAL STRUCTURES

Part II: MINLP OPTIMIZATION OF INTAKE GATE STRUCTURE, ASWAN

SUMMARY

The article describes Mixed-Integer Nonlinear Programming (MINLP) approach to solve simultaneous optimization and analysis of mechanical structures. The MINLP approach enables simultaneous topology and parameter optimization, enabling optimal topology (optimal number of structure elements) and optimal parameters (dimensions) to be simultaneously determined in a single uniform calculation process.

Avtorji:

mag. Stojan Kravanja, dipl. inž. gradb., višji raziskovalec, Tehniška fakulteta, Oddelek gradbeništvo, Smetanova 17, 62000 Maribor,

dr. Branko Bedenik, dipl. inž. gradb., izredni profesor, Tehniška fakulteta, Oddelek gradbeništvo, Smetanova 17, 62000 Maribor,

dr. Zdravko Kravanja, dipl. inž. kem. tehnolog., docent, Tehniška fakulteta, Oddelek kemijska tehnologija, Smetanova 17, 62000 Maribor.

In Part II of this series of papers the practical example of already erected roller gate Intake Gate structure, Aswan, Egypt, is presented. The example demonstrates that MINLP approach is superior in comparison to Nonlinear Programming (NLP) approach. Described are some MINLP strategies as two phased MINLP optimization, a single phase MINLP optimization, an inductive modelling and decomposition strategy (IMD) as well as the strategy of successive-linked theoretic and real MINLP optimization. Briefly are presented some modifications of MINLP algorithm.

1. UVOD

V II. delu dvodelnega članka predstavljamo praktični primer primerjalne analize že vgrajene tridelne tablaste zapornice Intake Gate, ki jo je Metalna Maribor izdelala za Aswan II, Egipt. Analizo in optimiranje strukture (konstrukcije) zapornice Intake Gate smo izvedli z optimizacijsko metodo mešano-celoštevilskega nelinearnega programiranja, MINLP. Sočasno z optimalnim rezultatom (minimalnimi stroški izdelave in transporta) smo izračunali optimalno topologijo (strukturo) zapornice Intake Gate in optimalne parametre (standardne in druge zvezne dimenzije) konstrukcijskih elementov (nosilcev, plošč).

V preteklih dveh letih smo razvili nekaj strategij MINLP optimiranja mehanskih struktur, ki smo jih prikazali in uporabili tudi pri reševanju omenjenega praktičnega primera. MINLP strategije omogočajo učinkovitejše optimiranje na dveh ravneh obsežnosti optimizacijskih problemov:

- srednje velik optimizacijski problem: definiranih okoli 100 zveznih in 20 diskretnih spremenljivk (model enodelne tablaste zapornice),
- velik optimizacijski problem: definiranih okoli 500 zveznih in 50 diskretnih spremenljivk (model večje večdelne tablaste zapornice).

Najprej smo bili sposobni reševati le srednje velike (normalne) optimizacijske inženirske probleme. S prvim MINLP optimizacijskim modelom tablaste zapornice GATOP (več o modelu GATOP glej I. del članka) smo reševali dvofazno MINLP optimiranje zapornic, kjer smo optimirali topologijo ločeno do standardnih dimenzij, glej S. Kravanja idr. [1]. Z drugim MINLP modelom GATOP smo reševali enofazno MINLP optimiranje, kjer smo izvajali optimiranje topologije in standardnih dimenzij sočasno v eni fazi, glej S. Kravanja idr. [2]. Izdelali smo tudi induktivno modelno in dekompozicijsko strategijo (IMD) za reševanje večjih homogenih (super)struktur, glej S. Kravanja idr. [3]. Z IMD strategijo smo uspeli na istem optimizacijskem primeru bistveno zmanjšati optimizacijski problem in računski čas ter izračunati isti optimalni rezultat kot pri uporabi prej omenjenih dveh strategijah.

Velik optimizacijski problem, konkretno problem večdelne zapornice, uspešno rešujemo šele zadnjih nekaj mesecev. Izkazalo se je, da prej navedene strategije pri reševanju velikih problemov ne zadoščajo, ker je število možnih variant (diskretnih odločitev), ki jih rešujemo s programom TOP, izredno velik: tudi 10^{10} ali še večje. Reševanje tako velikih MINLP optimizacijskih problemov smo izvedli z modificiranim algoritmom zunanje aproksimacije s sprostitvijo enačb (OA/ER), glej Z. Kravanja in I.E. Grossman

[4], ter z razvojem strategije zaporedno povezanega teoretičnega in realnega MINLP optimiranja.

V članku prikazujemo rezultate in primerjave rezultatov med NLP in MINLP optimizacijskima metodama, kakor tudi med različnimi MINLP strategijami.

2. ZAPORNICA INTAKE GATE, ASWAN

S praktičnim primerom primerjalne raziskave za navadno tablasto zapornico Intake Gate, glej sliko (1), ki jo je Metalna Maribor vgradila na Aswanu, Egipt, smo dokazovali uspešnost, učinkovitost in primerjavo metod matematičnega programiranja. Dobljene optimalne rezultate primerjalne analize smo primerjali s stanjem vgrajene zapornice Intake Gate, ki je bila izračunana in projektirana na klasični način, glej G. Wickert in G. Schmausser [5]. Sočasno analizo in optimiranje zapornice smo izvajali z MINLP računalniškim programskim paketom TOP in optimizacijskim modelom tablaste zapornice GATOP (več o programu TOP in modelu GATOP glej I. del članka).

Firma Metalna je izdelala osem enakih tridelnih zapornic Intake Gate iz jekla St 44-2 za osem turbinskih vtokov objekta Aswan. V preglednici (1) in (2) smo zapisali glavne tehnične podatke zapornice, v preglednici (3) pa ekonomske podatke za optimiranje.

hidrostatična obtežba	p	= 301,00 kN/m ²
svetla višina odprtine	HS	= 8,00 m
svetla širina odprtine	LS	= 7,90 m
tesnilna višina	HS	= 8,00 m
tesnilna širina	LT	= 8,00 m
osni razmak koles	LN	= 8,50 m
dopustna deformacija	d	= 1,00 cm
korozijski dodatek pločevin	Δ	= 2,00 mm

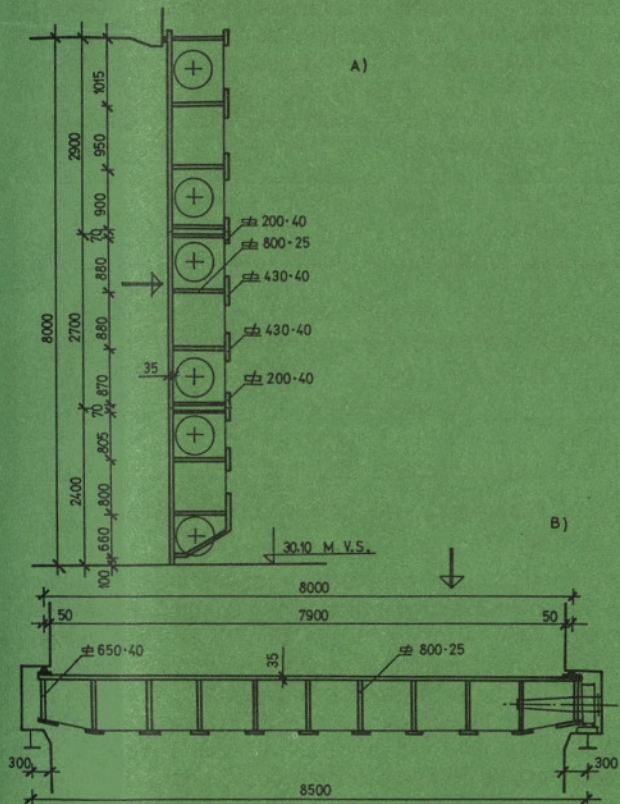
Preglednica 1. Glavni tehnični podatki zapornice

meja trdnosti materiala	σ_u	= 42,00 kN/cm ²
meja plastičnosti materiala	σ_y	= 25,00 kN/cm ²
dopustna normalna napetost	σ_{all}	= 14,70 kN/cm ²
dopustna strižna napetost	τ_{all}	= 7,80 kN/cm ²
dopustna primerjalna napetost	σ_{ref}	= 16,20 kN/cm ²

Preglednica 2. Dopustne napetosti za material St 44-2

cena materiala St 44-2	0,60 \$/kg
transportni stroški	0,35 \$/kg
stroški rezanja pločevine	1,60 \$/m ²
stroški varenja	5,00 \$/m ²
stroški antikorozijske zaščite	17,50 \$/m ²

Preglednica 3. Ekonomski podatki za optimiranje



Slika 1: Zapornica Intake Gate, Aswan, a) vertikalni prerez, b) horizontalni prerez

3. OPTIMIRANJE SREDNJEGA ELEMENTA ZAPORNICE INTAKE GATE, ASWAN – SREDNJE VELIK OPTIMIZACIJSKI PROBLEM

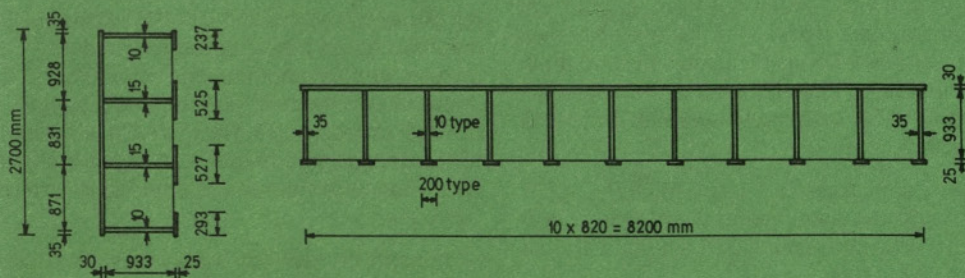
Prvotno smo računsko obvladovali samo srednje velike optimizacijske probleme, tj. probleme enodelnih tablastih zapornic. Za ta namen v tem članku predstavljamo primerjalno raziskavo SREDNJEGA ELEMENTA zapornice Intake Gate. Problem optimiranja srednjega elementa zapornice Intake Gate obravnavamo kot primer enodelne zapornice s konstantno tesnilno višino 2,7 m. V modelu GATOP smo za ta primer definirali 109 zveznih in 23 diskretnih spremenljivk.

3.1. NLP optimiranje srednjega elementa zapornice Intake Gate

Najprej smo izračunali lastne izdelavne in transportne stroške srednjega elementa v višini 24.087 USA \$. Stroške elementa smo izračunali pri držani dejanski topologiji 4–11 (4 horizontalnih – 11 vertikalnih nosilcev in pri pripadajočem številu ploščinskih elementov zajezne stene) ter pri držanih dejanskih parametrih (dimenzijah).

Nadalje smo izvršili parametrično optimiranje srednjega elementa pri držani dejanski topologiji 4–11 in pri spremenljajočih parametrih (optimirali smo dimenzije konstrukcijskih elementov: nosilcev in plošč in njihove medsebojne razdalje). Optimalni rezultat smo dosegli v znesku 18.939 USA \$, kar pomeni 21 % prihranka v primerjavi z dejansko vrednostjo konstrukcije srednjega elementa, glej sliko (2).

Gornji rezultat smo dobili po večkratni ponovitvi NLP računa za različne kombinacije stanih debelin pločevin. Ker je možnih kombinacij ogromno, smo NLP izvedli le za nekatere kombinacije. Glede na to, da nismo prepričani, da smo izbrali najugodnejšo (najoptimalnejšo) kombinacijo standardnih debelin, je zelo verjetno, da ta rezultat ne predstavlja najboljši možni lokalni optimum. Ker je optimizacijski problem konstrukcije zapornice nekonvexen, tudi ne moremo dokazati, da smo z najboljšim lokalnim optimumom dobili absolutno najboljši rezultat, tj. globalni optimum.

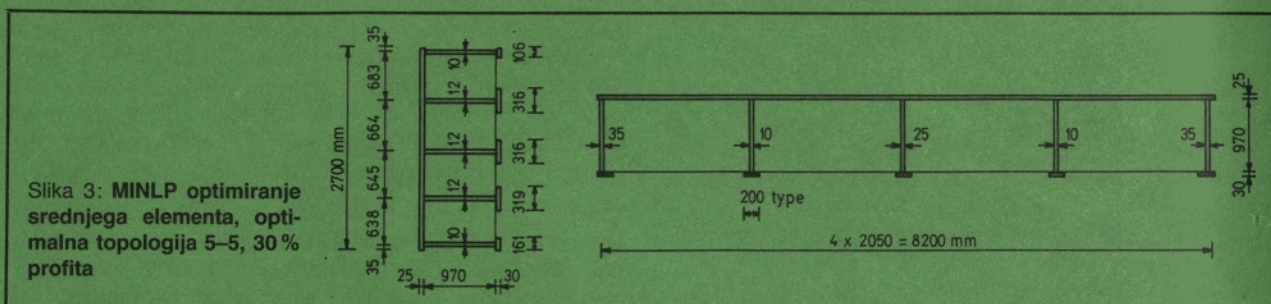


Slika 2: NLP optimiranje srednjega elementa, dejanska topologija 4–11, 21 % profita

3.2. MINLP optimiranje srednjega elementa zapornice Intake Gate

Sočasno optimiranje topologije in parametrov smo izvršili po metodi MINLP. Definirali smo takšno superstrukturo zapornice, kjer so vse možne strukture (konstrukcije) določene s katerokoli kombinacijo znotraj variranja topologij od 4 do 6 horizontalnih nosilcev in 5 do 9 vertikalnih nosilcev.

Izračunali smo optimalni rezultat 16.790 USA \$, kar predstavlja 30 % prihranka glede na dejansko lastno izdelavno ceno in transportne stroške srednjega elementa. Rezultat smo dosegli pri optimalni topologiji 5-5 (5 horizontalnih – 5 vertikalnih nosilcev). Sočasno smo izračunali tudi optimalne standardne in zvezne dimenzije konstrukcijskih elementov, glej sliko (3).



V nadaljnjem besedilu bomo prikazali tri različne MINLP strategije, ki smo jih razvili z namenom, da bi dosegli večjo računsko učinkovitost in zmanjšali računski čas optimizacijskega procesa.

3.2.1. Dvofazni MINLP postopek

S prvim MINLP modelom GATOP smo izvajali dvofazno MINLP optimiranje zapornic, kjer smo posebej izvajali teoretično in posebej realno optimiranje, glej S. Kravanja idr. [1]. S teoretičnim optimiranjem smo v prvi fazi izračunali optimalno topologijo zapornice pri zveznih parametrih. V prvi fazi smo definirali niz tistih diskretnih binarnih spremenljivk, s katerimi smo definirali topologijo zapornice. Teoretični optimum smo izračunali v višini 16.654 USA \$ pri optimalno izračunani topologiji 5-5.

Zatem smo v drugi fazi pri držani optimalni topologiji, dobljeni v prvi fazi, izračunali realni optimum, tj. optimum z optimalnimi standardnimi debelinami jeklenih pločevin in ostalimi dimenzijami. V tej drugi fazi smo v nizu binarnih spremenljivk definirali le spremenljivke za izračun standardnih dimenzij. Na ta način smo realni optimum izračunali v višini 16.790 USA \$.

Teoretični optimum smo dosegli s tremi MINLP OA/ER iteracijami, realni optimum pa z dvema dodatnima interakcijama. Za obe fazi smo potrebovali 328 sekund CPU na računalniku MicroVAX 3100.

3.2.2. Enofazni MINLP postopek

Z naslednjim MINLP modelom GATOP smo bili sposobni izvajati realno optimiranje zapornice direktno v eni sami

fazi, glej S. Kravanja idr. [2]. S tem modelom lahko optimiramo topologijo zapornice sočasno s standardnimi in drugimi zveznimi dimenzijami. Vse diskretne binarne spremenljivke smo združili in zapisali v en sam niz. Tako smo z istim nizom diskretnih spremenljivk opisali ne le potencialni obstoj konstrukcijskih elementov (topologijo), temveč tudi standardne debeline pločevin kot diskretne dimenzije konstrukcijskih elementov (diskretne parametre).

Realni optimum zapornice 16.790 USA \$ smo dosegli direktno s tremi MINLP interakcijami pri optimalni topologiji 5-5. Kljub temu, da je računalniški čas znašal 528 sekund CPU na MicroVAX 3100, smo glede na dvofazni postopek dejanski delovni čas za doseg realnega optima bistveno skrajšali (ni več vmesne inicializacije spremenljivk in ostalih podatkov).

3.2.3. Induktivna modelna in dekompozicijska strategija, IMD

Zatem smo razvili novo optimizacijsko strategijo, ki smo jo imenovali induktivno modelno in dekompozicijsko strategijo, IMD, glej S. Kravanja idr. [3]. To strategijo smo razvili na podlagi podobne modelne in dekompozicijske (M/D) strategije, ki sta jo razvila G. R. Kocis in I. E. Grossmann [6]. Osnovni namen IMD strategije je, da prvo NLP optimiranje v prvi MINLP iteraciji izvedemo le za mehansko (sub)strukturo z minimalnim možnim številom različnih konstrukcijskih elementov, in ne za superstrukturo z vsemi konstrukcijskimi elementi pri največji možni topologiji, kot je to pri dvofaznem in enofaznem MINLP postopku. Ker dobimo z linearizacijami zmanjšanega NLP problema le del linearne aproksimacije celotne superstrukture, MILP optimiranja ne moremo izvesti, vse dokler linearne aproksimacije ne dopolnimo za celotno superstrukturo. Osnovna zamisel IMD strategije je, da linearno informacijo za preostalo superstrukturo, ki v prvem NLP ni bila upoštevana, dobimo z indukcijo, tj. s prepisom informacij ustreznih podobnih obstoječih elementov iz rešitve prvega NLP. Na ta način dobi prvi MILP dobre linearizacije in informacije za celotno superstrukturo (za vse možne elemente), čeprav smo prvi NLP bistveno zmanjšali.

V mnogih primerih so linearizacije (sub)strukture z minimalno topologijo bistveno boljše kot linearizacije celotne superstrukture, tj. strukture z največjo možno topologijo. V tem primeru potrebujemo bistveno manj MINLP iteracij za doseg optimalnega rezultata. IMD strategija pa je predvsem primerna za optimiranje velikih homogenih

mehanskih superstruktur, zgrajenih iz čim večjega števila podobnih konstrukcijskih elementov. Brez IMD strategije bi bil prvi NLP izredno velik ter zato pogosto nerešljiv. V najboljšem primeru bi zahteval zelo veliko porabo računalniškega časa. Za uspešno uporabo IMD strategije smo morali primerno modificirati tako optimizacijski model GATOP kot MINLP program TOP.

V primerjalni analizi primera srednjega elementa zapornice Intake Gate smo IMD strategijo uporabili tako, da smo prvi NLP izračunali za strukturo zapornice z najmanjšo možno topologijo 4–5 (4 horizontalnih – 5 vertikalnih nosilcev). Zatem smo po izvršeni linearizaciji minimalne strukture izvršili indukcijo linearizacij za celotno superstrukturo zapornice z največjo možno topologijo 6–9 (6 horizontalnih – 9 vertikalnih nosilcev s pripadajočim številom ploščinskih elementov zajezne stene). Linearno informacijo manjkajočih konstrukcijskih elementov smo prvemu MILP posredovali z indukcijo podobnih obstoječih (v prvem NLP upoštevanih) elementov, tj. z natančno preslikavo linearizacij in vseh ostalih potrebnih informacij podobnih elementov najmanjše strukture. Tipično podobni konstrukcijski elementi konstrukcije zapornice so: spodnji horizontalni nosilec, zgornji horizontalni nosilec, notranji horizontalni nosilci, vertikalni nosilci in ploščinski elementi zajezne stene.

Z uporabo IMD strategije smo izračunali enak optimalni rezultat kot pri prej omenjenih dveh strategijah. Realni optimum 16.790 USA \$ smo dosegli pri izračunani optimalni topologiji 5–5 po opravljeni indukciji z eno samo MINLP iteracijo. Potrebovali smo samo 199 sekund CPU računalniškega časa na računalniku MicroVAX 3100.

4. OPTIMIRANJE CELOTNE TRIDELNE ZAPORNICE INTAKE GATE, ASWAN – VELIK OPTIMIZACIJSKI PROBLEM

Ugotovili smo, da je reševanje velikega optimizacijskega problema, predvsem zaradi velikega števila definiranih diskretnih spremenljivk, zelo težavno in velikokrat neizvedljivo. Problem je namreč v tem, da s povečanjem izbora diskretnih spremenljivk eksponentno povečujemo število vseh možnih variant (diskretnih odločitev), s slednjimi pa izredno povečamo računski čas za izvajanje MILP faze OA/ER algoritma. Zaradi tega strategije za reševanje srednje velikih optimizacijskih problemov več ne zadoščajo. Z dodatnimi modifikacijami OA/ER algoritma in ob razvoju ustreznih strategij smo uspešno rešili zelo velik optimizacijski problem celotne tridelne zapornice Intake Gate. V modelu GATOP smo za ta primer definirali 345 zveznih in 54 diskretnih spremenljivk (prvi realni MILP vsebuje 2083 enačb, 1842 zveznih in 54 diskretnih spremenljivk).

Kljub temu da število diskretnih odločitev omenjenega optimizacijskega primera znaša prek 10^{10} , smo z različnimi modifikacijami algoritma in predvsem z uporabo novo razvite strategije zaporedno povezanega teoretičnega in realnega MINLP optimiranja za rešitev primera Aswan potrebovali majhno število MINLP iteracij. S tem smo tudi

dokazali, da je OA/ER algoritem pri reševanju velikih optimizacijskih primerov zelo učinkovit. Bistvo omenjene strategije je v tem, da najprej izračunamo teoretični optimum (optimalno topologijo in zvezne parametre) mehanske superstrukture, zatem pa računski MINLP proces brez prekinitve nadaljujemo s vsemi nakopičenimi linearizacijami tako, da izvedemo realno optimiranje (nadaljnje optimiranje topologije, zveznih in diskretnih parametrov). S to strategijo dobimo zelo dobre rezultate, po drugi strani pa bistveno zmanjšamo število MINLP iteracij. Omenjeno strategijo smo združili z modificiranim OA/ER algoritmom, glej Z. Kravanja in I. E. Grossman [4]. Elementi te združitve so naslednji:

- ustrezen model mehanske superstrukture,
- uporaba OA/ER algoritma,
- uporaba deaktivacije linearizacij,
- uporaba povečane kazenske funkcije,
- izvedba dekompozicije namenske funkcije na linearni in nelinearni del,
- izvedba dekompozicije in deaktivacije linearizacij namenske funkcije,
- uporaba spodnje meje namenske spremenljivke (funkcije),
- uporaba heuristike za zmanjšanje števila možnih diskretnih odločitev,
- uporaba globalnega konveksnega testa in modifikacija kršenih linearizacij ter
- uporaba strategije zaporedno povezanega teoretičnega in realnega MINLP optimiranja.

Dodatno še lahko uporabimo:

- dvofazni MINLP postopek,
- enofazni MINLP postopek.

4.1. NLP optimiranje celotne tridelne zapornice Intake Gate

Dejanski lastni izdelavni in transportni stroški celotne tridelne konstrukcije zapornice Intake Gate znašajo 70.518 USA \$. Ta rezultat smo izračunali pri dejanski topologiji 4-4-4/11 (4 horizontalnih nosilcev spodnjega, srednjega in zgornjega elementa zapornice / 11 vertikalnih nosilcev skozi celotno tridelno zapornico ter pripadajočem številu ploščinskih elementov celotne tridelne zapornice) in dejanskih parametrih (dimenzijah).

Zatem smo izvršili NLP parametrično optimiranje celotne zapornice Intake Gate pri držani dejanski topologiji 4-4-4/11 in spreminjajočih se parametrih (optimirali smo dimenzije). Najugodnejši rezultat smo dosegli v višini 57.817 USA \$, kar predstavlja 18% prihranka. Enako kot pri primeru optimiranja srednjega elementa tudi tukaj velja, da smo gornji rezultat dobili po večkratnem ponavljanju NLP računa le za nekatere kombinacije standardnih debelin pločevin. Zato dobljeni rezultat ne predstavlja najboljšega lokalnega optimuma in tudi ne more biti globalni optimum, je le pomembna izboljšava dimenzij pri minimiziranju stroškov izdelave in transporta strukture zapornice.

4.2. MINLP optimiranje celotne tridelne zapornice Intake Gate

Sočasno optimiranje topologije in parametrov po metodi MINLP smo za celotno zapornico Intake Gate izvedli z definirano superstrukturo, kjer je vse možne strukture (konstrukcije) mogoče določiti s katerokoli kombinacijo znotraj variiranja topologij od 4-4-4 do 6-6-6 horizontalnih nosilcev spodnjega, srednjega in zgornjega elementa ter 5 do 9 vertikalnih nosilcev skozi celotno tridelno zapornico.

Optimalni rezultat smo izračunali v višini 49.543 USA \$, kar predstavlja 30 % prihranka. Ta rezultat smo dobili pri optimalni topologiji 4-5-5/5 (4 horizontalnih nosilcev spodnjega, 5 horizontalnih nosilcev srednjega in 5 horizontalnih nosilcev zgornjega elementa zapornice / 5 vertikalnih nosilcev skozi celotno zapornico) ter pri optimalnih standardnih in zveznih dimenzijah. Za doseg tega rezultata, realnega optimuma, smo potrebovali samo 5 MINLP OA/ER iteracij (4 teoretične in 1 realno iteracijo) pri uporabi strategije zaporedno povezanega teoretičnega in realnega MINLP optimiranja. Rezultat smo izračunali v času 261 sekund CPU na računalniku VAX 4600 (računalnik VAX 4600 je približno 10-krat hitrejši od računalnika MicroVAX 3100). Precejšnje zmanjšanje CPU časa smo dosegli tudi s primerno definirano spodnjo mejo namenske spremenljivke.

5. SKLEP

S praktičnim primerom primerjalne raziskave navadne tablaste zapornice Intake Gate, Aswan, Egipt, smo doka-

zovali učinkovitost in primerjavo metod matematičnega programiranja. Sočasno analizo in optimiranje zapornice smo izvajali z MINLP računalniškim programskim paketom TOP in optimizacijskim modelom tablaste zapornice GA-TOP.

Z uporabo optimizacijske metode nelinearnega programiranja, NLP, smo pri držani topologiji in optimiranju dimenzij konstrukcijskih elementov zapornice prihranili 20 % investicijskih sredstev. Na drugi strani pa z metodo mešano-celoštevilnega nelinearnega programiranja, MINLP, pri sočasnem optimiranju topologije, zveznih in standardnih dimenzij prihranimo okoli 30 % investicijskih sredstev. S tem smo dokazali, da je metoda MINLP učinkovitejša od optimizacijske metode NLP.

V članku smo prikazali različne strategije in opisali nekatere modifikacije algoritma zunanje aproksimacije s sprostitvijo enačb, OA/ER. Strategiji dvofaznega in enofaznega MINLP optimiranja ter IMD strategijo smo razvili in uspešno uporabili pri reševanju srednje velikih optimizacijskih problemov. Velike optimizacijske probleme pa smo uspeli rešiti z različnimi modificiranim AO/ER algoritmom ter z razvojem strategije zaporedno povezanega teoretičnega in realnega MINLP optimiranja.

Z raziskavami zadnjih treh let smo tudi dokazali, da lahko z modificiranimi algoritmi in pravilno zastavljenimi strategijami MINLP metodo uspešno uporabimo ne le v akademskih primerih (kot se to v svetu še vedno največkrat dogaja), temveč tudi pri reševanju zahtevnih praktičnih problemov. Tridelna jeklena zapornica Intake Gate na Aswanu je prva večja mehanska struktura, ki je bila optimirana z MINLP metodo.

LITERATURA

1. Kravanja, S., Z. Kravanja, B. S. Bedenik and Š. Faith, Simultaneous Topology and Parameter Optimization of Mechanical Structures, First European Conference on Numerical Methods in Engineering, Brussels, Belgium, September 1992, Numerical Methods in Engineering '92 (Elsevier, Amsterdam, 1992), str. 487-495.
2. Kravanja, S., Z. Kravanja and B. S. Bedenik, A New Approach in Structures Optimization, International conference Design to Manufacture in Modern Industry, Bled, Slovenia, 7-9 June, 1993, Proceedings, Part 2 (Department of Mechanical Engineering, Faculty of Technical Science, University of Maribor, Maribor, 1993), str. 587-593.
3. Kravanja, S., Z. Kravanja and B. S. Bedenik, MINLP Optimization of Mechanical Structures, Structural Optimization 93, The World Congress on Optimal Design of Structural Systems, Rio de Janeiro, Brazil, 2-6 August, 1993, Proceedings, Volume I (Federal University of Rio de Janeiro), str. 21-28.
4. Kravanja Z. and I. E. Grossmann, New developments and capabilities in Prosyn. An automated topology and parameter process synthesizer. Sprejeto v objavo v Computers Chem. Engng., 1994.
5. Wickert, G. und G. Schmausser, Stahlwasserbau, (Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1971).
6. Kocis, G. R. and I. E. Grossmann, A Modelling and Decomposition Strategy for the MINLP Optimization of Process Flowsheets, Computers and Chem. Eng. 13 (1989), str. 797-819.

ALKALNA REAKCIJA V BETONU

UDK 691.3:66.094.7

BRANKA ZATLER-ZUPANČIČ, ANA MLADENOVIČ

POVZETEK

Alkalna reakcija v betonu je kemična reakcija med alkalijami iz cementa in zrni reaktivnega kamenega agregata. Pri tem prihaja do tvorjenja novih proizvodov, ki imajo večjo prostornino in so hidrofilni. Proces povzroča ekspanzijo, razpokanost betona in poškodbe betona.

V sestavku so pojasnjeni mehanizmi in vzroki reakcij, metode ugotavljanja potencialno nevarnih sestavin in prisotnost teh sestavin v kamenih agregatih za beton v Sloveniji.

ALKALI REACTION IN CONCRETE

SUMMARY

Alkali reaction is a chemical reaction between alkalis in cement and reactive constituents present in the mineral aggregate. Reaction product in the form of gel increases the volume and has a hydrophilic property. The reaction causes expansion cracking of concrete and damages of concrete.

This work shows the mechanism and theory of reaction, the methods for testing the potential dangerous components and the content of these components in mineral aggregates from Slovenia.

1. UVOD

Beton je gradbeni material, ki ga danes verjetno največ uporabljamo. Njegova kakovost je pogojena s kakovostjo sestavin (agregat, cement, voda, dodatki) in postopkom izdelave ter vgradnje. Poškodbe betona, ki se občasno pojavljajo, imajo zato različne vzroke.

Danes vemo, da so nekatere poškodbe, ki so jih včasih pripisovali delovanju zmrzali, krčenju betona ali ekspanziji zaradi prostega kalcijevega oksida, posledica alkalno agregatne reakcije v betonu. To je kemična reakcija med agregatom in alkalijami, ki večinoma izhajajo iz cementa, lahko pa tudi iz raznih dodatkov betonu, iz preperelih zrn agregata, iz vode za pripravo betona ali pa pridejo vanj kasneje, ko je beton izpostavljen delovanju različnih soli.

Reakcija se javlja v dveh oblikah:

- alkalno-silikatna reakcija
- alkalno-karbonatna reakcija

Avtorici:

Mag. Branka Zatler-Zupančič, dipl. ing. kem., Ljubljana
Ana Mladenovič, dipl. ing. geol., ZRMK Ljubljana

2. ALKALNO-SILIKATNA REAKCIJA

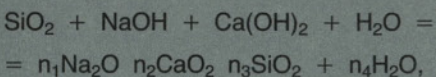
Do leta 1940 je veljalo, da so vsi kamni agregati v betonu inertni (neaktivni). Tega leta je T. E. Stanton v Kaliforniji prvi objavil opis alkalno-silikatne reakcije. Obsežna raziskovanja, ki so sledila, so pokazala, da vse silikatne sestavine agregata teoretično lahko reagirajo z alkalijami. Pri večini silikatnih sestavin so obseg in posledice reakcije zanemarljive, pri nekaterih pa je ta zelo intenzivna. Ugotovili so, da so reakcijsko sposobni minerali tisti, ki vsebujejo aktivni silicijev dioksid (SiO_2). To so predvsem:

- opal
- kalcedon
- tridimit in kristobalit
- hidrosljuda (illit)
- kislila in nevtralna vulkanska stekla
- nekateri zeoliti (heulandit).

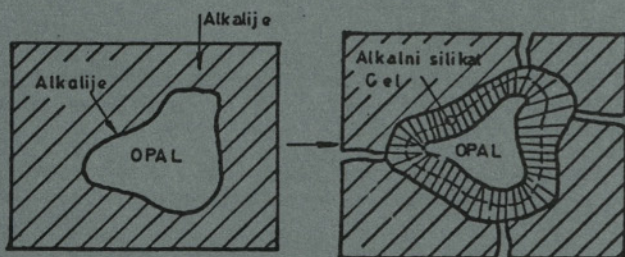
Reakcijsko sposobne so lahko tudi kamnine, ki vsebujejo naštetih aktivnih mineralov. Te so:

- roženci
- silificirane in zeolitizirane kamnine
- kisle predornine in njihovi tufi (dacit, riolit)
- metamorfozirane kamnine (filit, amfibolit, serpentinit)
- nekateri apnenci in dolomiti
- industrijski sekundarni produkti (žlindre, rudniške jalovine).

Mehanizem alkalno-silikatne reakcije je naslednji: aktivni SiO_2 reagira z alkalnimi hidroksidi po enačbi:



pri čemer nastaja alkalno-silikatni gel. Gel ima neomejeno sposobnost sprejemanja vode. Povečanje prostornine gela in s tem prostornine betona spremlja pojav notranjih pritiskov, ki vodijo do tvorbe razpok, iz katerih se izloča gel v obliki belega prahu, ki ga deževnica kasneje lahko spere (slika 1 in slika 2). Poškodbe, ki so nastale zaradi alkalno-silikatne reakcije, pospešujejo druge škodljive procese v betonu. Skozi nastale razpoke je omogočen dostop vode in reaktantov ter delovanje v notranjosti betona.



Slika 1: Tvorba gela in pojav razpok kot posledica reakcije

Poleg reaktivnega agregata na hitrost in intenziteto reakcije vplivajo tudi:

- količina alkalij v cementu
- vlaga
- temperatura
- pucolanski dodatki cementu (EF pepel, mikrosilika).

Visok delež alkalij v cementu povečuje reakcijsko sposobnost sestavin. V cementu prisotne alkalije izražamo kot



Slika 2: Pogled na beton, poškodovan zaradi alkalno-silikatne reakcije (D. W. Hobbs, Alkali-silica reaction in concrete, London 1988, str. 84)

Na_2O ekvivalent v $\%^m/m$. Trenutno prevladuje mnenje, da cementi z manj kot 0,6% alkalij ne povzročajo alkalno-silikatne aktivnosti. Vendar so nekateri raziskovalci s poskusi že dokazali, da to ni povsem točno in da so se v primeru močno reaktivnih agregatov kljub uporabi nizko-alkalnih cementov pojavile poškodbe betonov.

Vlaga je pogoj za reakcijo. Izmenično vlaženje in sušenje jo pospešuje.

Reakcija poteka v temperaturnem intervalu med 10°C in 60°C . Najmočnejša je pri 38°C .

Pucolanski dodatki cementu v splošnem reakcijo zavirajo. Če je pucolana veliko, ne nastaja nabrekli alkalno-silikatni gel, temveč nenabrekli kalcijev alkalno-silikatni gel.

2.1. Metode ugotavljanja potencialne nevarnosti alkalno-silikatne reakcije v betonu

V svetu je standardizirano več metod preizkušanja sestavin. V jugoslovanske standarde, ki jih še uporabljamo v Sloveniji, smo pred leti privzeli ameriške ASTM metode. Pravilnik o tehničnih normativih za beton in armirani beton v mejnih primerih (na osnovi mineraloške petrografske analize) zahteva preverjanje alkalno-silikatne reaktivnosti agregata.

Začetni preskus je mineraloško-petrografska analiza kamenega agregata (JUS B.B8.003 ali JUS B.B8.004). Podaja nam kvalitativno in kvantitativno zastopanost potencialno reaktivnih mineralov in kamnin. S to metodo pa ne moremo ugotoviti modifikacije SiO_2 , ki izgrajuje silikatne sestavine.

Če z mineraloško petrografsko analizo ugotovimo prisotnost reaktivnih komponent, je naslednja stopnja kemična metoda za oceno alkalne občutljivosti agregatov. Izvajamo jo po JUS B.B8.056. Merimo zmanjšanje alkalnosti raztopine natrijevega hidroksida in količino raztopljenega SiO₂. Iz diagrama, izdelanega na podlagi obeh podatkov, lahko podamo oceno o škodljivosti preizkušanih agregatov.

Če kemična metoda potrdi sum o aktivnem SiO₂, je predpisan preskus po JUS B.B8.057, ko skozi daljše časovno obdobje kontroliramo širjenje cementnih prizem. Agregat velja za sposobnega za alkalno silikatno reakcijo, če prizme po treh mesecih pokažejo ekspanzijo, večjo kot 0,05% ali večjo kot 0,10% po šestih mesecih.

2.2. Količine reaktivnih silikatnih komponent v sestavinah za betone iz Slovenije

2.2.1. AGREGATI

V Sloveniji se silikatne sestavine pojavljajo v prodih. Prod porečij Save, Soče in Savinje je pretežno karbonaten, z zelo malo silikatnih primesi. Prod Drave je mešan, silikatnih sestavin je do 60%^{m/m}. Mura ima silikaten prod. Reaktivna sestavina v vseh naših prodih je roženec, vendar njegova količina le izjemoma doseže 4%^{m/m}.

V preglednici 1 podajamo mineraloško petrografsko sestavo prodiv Save, Drave in Mure, v preglednici 2 pa delež roženca v posameznih izbranih aktivnih gramoznicah.

2.2.2. CEMENT

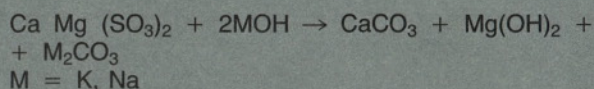
Pri nas količina alkalij v cementih s standardi za betone ni omejena, vendar kemične analize naših cementov izkazujejo razmeroma nizek delež alkalij (preglednica 3).

3. ALKALNO-KARBONATNA REAKCIJA

Prva poročila o poškodbah betonov zaradi alkalno-karbonatne reakcije segajo v leto 1957 (E. G. Swenson). Danes je mehanizem reakcije že skoraj v celoti znan.

Alkalno-karbonatna reakcija poteka v otrdelem betonu med zrni karbonatnih agregatov in alkalijami, ki večinoma izhajajo iz cementa. Posledica je nastanek novih mineralov, ekspanzija betona in pojav razpok. Posledica reakcije je zmanjšanje trdnosti betona, modula elastičnosti in drugih mehanskih lastnosti.

Reakcija poteka po enačbi:



pri tem nastaja brucit [Mg(OH)₂], ki je karakterističen za to reakcijo. Reakcija sama se imenuje dedolomitizacija in je povezana s povečanjem volumna betona.

Pri reakciji nastali alkalni karbonati lahko naprej reagirajo s Ca(OH)₂, ki je produkt hidratacije portlandskega cementa in se ponovno pretvorijo v alkalne hidrokside:

Reka	SAVA				DRAVA				MURA			
	prod		pesek		prod		pesek		prod		pesek	
Sestavine (%)	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
MAGMATSKÉ KAMNINE												
keratofir, porfir	0,0	1,0	0,0	0,4	0,0	1,3	0,0	0,4				
andezit			0,0	1,1	0,1	0,8						
SEDIMENTNE KAMNINE												
apnenec, dolomit	80,4	91,9	71,2	84,7	15,0	37,7						
peščenjak	4,8	11,4	4,1	7,9	4,1	19,9	5,5	10,7	3,5	9,7	1,4	5,3
meljevec	0,8	3,8	1,7	4,3	0,2	3,7	1,5	4,6	0,0	6,5	0,0	3,5
skrilavec	0,0	1,1	0,0	1,8								
lapor	0,0	1,5	0,4	2,2	0,0	1,7	0,4	1,0				
roženec	0,0	1,4	0,3	2,5	0,1	2,4	0,8	2,5				
konglomerat					0,0	3,4						
tuf	0,5	3,5	0,6	3,1								
METAMORFNE KAMNINE												
kvarcit	0,0	0,4	0,0	0,9	3,0	10,5	2,0	6,3	1,3	12,5	1,5	3,6
gnajs					4,9	10,3	1,3	4,4	13,7	26,6	6,6	19,7
amfibolit					1,0	6,8	0,8	3,5	0,0	2,5	0,0	2,4
filit					0,0	1,1	0,0	1,0	0,0	0,5	0,0	0,2
sljuda					0,0	2,9	0,1	1,7	0,1	2,9	0,0	1,6
sericit					0,0	0,2	0,0	0,3	0,0	0,5	0,0	0,5
MINERALI												
kremen	0,3	3,2	3,2	7,8	29,3	51,7	53,6	61,8	56,0	75,1	71,5	82,4
sljuda			0,0	0,9	0,2	0,8	0,6	4,8	0,1	0,4	0,7	3,0

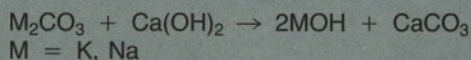
Preglednica 1: Petrografska sestava prodiv in peskov Slovenije

Preglednica 2: Delež roženca v nekaterih prodih in peskih iz Slovenije

REKA	Razdalja od izvira (km)	Delež roženca (%)															
		Velikost zrn (mm)															
		0,125/0,25		0,25/0,5		0,5/1		1/2		2/4		4/8		8/16		16/32	
Nahajališče		min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.		
SAVA																	
Hrušica	25	0	0	0	0	0	0	0,0	0,1	0,0	0,6	0,6	1,6				
Hotič	107	0,9	4,1	1,0	2,6	0,7	2,0	0,6	1,4	0,7	1,0	0,2	0,5	0,2	0,4	0,0	0,3
Drnovo	182	1,3	3,3	1,0	3,3	0,1	3,2	0,3	2,9	0,0	2,7	0,7	2,9	0,5	0,8	0	
DRAVA																	
Šentvid	215	1,3	2,4	1,3	2,0	1,1	2,5	0,4	1,7	0,4	1,3	0,0	0,5	0,0	0,9	0,0	0,6
Hoče	262	0,3	2,0	0,5	1,8	0,5	2,1	1,0	2,9	0,8	3,6	1,0	3,3	0,4	2,7	0,5	3,0
Hajdina	287	2,5	2,9	1,3	2,3	0,9	2,3	0,5	1,8	0,4	1,6	0,0	0,4	0,0	0,4	0,0	0,2
MURA																	
Babinci	220	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Preglednica 3: Delež alkalij v slovenskih cementih

Tip cementa	Delež Na ₂ O (%)		Delež K ₂ O (%)	
	min.	max.	min.	max.
PC 45 Trbovlje	0,32	0,37	0,77	0,81
PC 15z45T Trbovlje	0,34	0,38	0,82	0,85
PC 30dz45T Trbovlje	0,37	0,46	0,77	0,85
PC 15z45A Anhovo	0,26	0,30	0,86	0,97
PC 30dz45A Anhovo	0,39	0,42	0,83	0,89
SPC 45A Anhovo	0,16	0,24	0,62	0,72



Reakcija teoretično lahko teče, dokler se Ca(OH)₂ in MOH popolnoma ne pretvorita.

Od kamnin so lahko alkalno karbonatno reaktivni:

- dolomiti,
- apneni dolomiti in
- dolomitizirani apnenci.

Poleg mineraloške sestave so pogoji za reakcijo tudi:

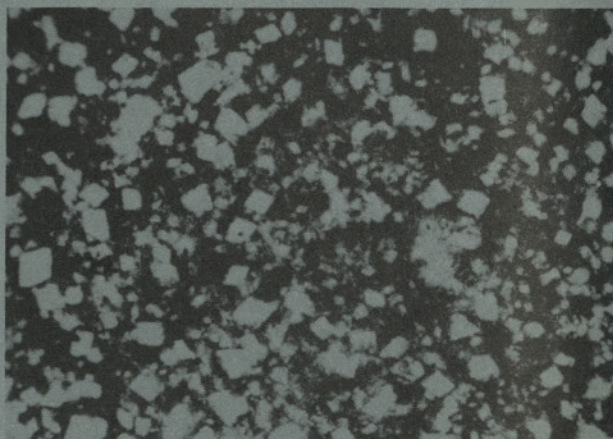
- značilna mikrostruktura,
- delež kalcita in dolomita v količinah med 40 % in 60 % in
- delež več kot 5 % mineralov glin.

Značilna mikrostruktura je tista, kjer so rombi dolomita, veliki do 25 μm, razporejeni v masi kalcitnega mikrita (slika 3). Dodatno občutljivost predstavljajo dolomitni rombi, razporejeni v gnezdih in pasovih.

Na reakcijo poleg agregata vplivajo:

- količina alkalij v cementu,
- vlaga,
- temperatura in
- velikost zrn agregata.

Delež alkalij v cementu je tisti element, ki določa stopnjo in hitrost ekspanzije v betonu. Pri uporabi potencialno reaktivnih agregatov velja priporočilo, naj alkalije (kot ekvivalent Na₂O) ne presežejo 0,6 %, nekateri raziskovalci celo menijo, da alkalij ne sme biti več kot 0,4 %.



Slika 3: Značilna mikrostruktura karbonatne kamnine, nevarne za alkalno-karbonatno reaktivnost (Gillot, Mechanism and kinetics of expansion in the alkali-carbonate reaction. Canadian Journal of Earth Sciences. Vol 4, 1964)

Vlaga je pogoj za reakcijo, saj alkalije lahko reagirajo le v vodni raztopini.

Pri višjih temperaturah je reakcija hitrejša in ekspanzija betona večja.

Ugotovili so, da je grobi agregat bolj občutljiv za alkalije kot drobni agregat.

3.1. Metode ugotavljanja potencialne nevarnosti alkalno-karbonatne reakcije v betonu

Osnova je mineraloško petrografska analiza, ki nam pokaže sestavo kamnine, količinski in strukturni odnos dolomita in apnenca ter količino glinenih primesi.

Z rentgensko difrakcijsko analizo lahko določimo razmerje CaO/MgO. Po literaturnih podatkih so potencialno nevarne kamnine, pri katerih se razmerje CaO/MgO giblje med vrednostma 3,25 in 5,24.

Rezultate mineraloško petrografske analize dopolni kemična analiza.

Če z mineraloško-petrografske in kemično analizo ugotovimo potencialno reaktivno kamnino, sledi določanje ekspanzivnosti vzorcev kamnine v raztopini natrijevega hidroksida. Pri nas standarda za ta preskus še nimamo, zato jo izvajamo po metodi ASTM C-586. Metoda je zasnovana na meritvah ekspanzije kamnine v raztopini NaOH. Meritev je dolgotrajna, traja od šest mesecev do enega leta. Kamnina velja za reaktivno, če letna ekspanzija preseže mejo 0,1%.

3.2. Deleži potencialno reaktivnih karbonatnih komponent v agregatih za betone v Sloveniji

V Sloveniji so kamnolomi tehničnega kamna za proizvodnjo kamenega agregata po sestavi skoraj izključno iz karbonatnih sestavin. ZRMK je pred leti opravil obsežno raziskavo kamnin iz številnih lokacij, s poudarkom na komponentah, potencialno nevarnih za alkalno karbonatno reakcijo. Rezultati so pokazali, da prevladujejo razmeroma čisti različki apnenca, dolomita ali dolomitne breče. Primesi apnenca v dolomitu oziroma dolomita v apnencu so izjeme, količinsko jih je malo, navadno so manjše od 10%. Glinenih primesi je manj kot 2%. Značilna nevarna mikrostruktura ni bila ugotovljena. Razmerje CaO/MgO znaša pri dolomitih od 1,89 do 3,09, pri apnencih pa nad 33.

4. ZAKLJUČEK

Ob spremljanju sestave prodnatih in drobljenih agregatov za pripravo betonov, pri čemer je mineraloško-petrografska analiza prvi preventivni korak, se nam v Sloveniji trenutno ni potrebno bati poškodb betonov zaradi alkalno-silikatne ali alkalno-karbonatne reakcije.



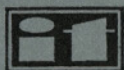
**ZAVOD ZA
RAZISKAVO
MATERIALA IN
KONSTRUKCIJ
LJUBLJANA**

Previdnost je potrebna pri morebitni uporabi neznanih agregatov, zlasti ob dejstvu, da naša gradbena podjetja gradijo tudi v tujini, kjer so kameni agregati lahko raznovrstni, včasih tudi bistveno drugačni od naših.

Opozoriti pa velja tudi na to, da so pri nas zaenkrat še popolnoma nepreučeni tako obseg kot posledice morebitnih reakcij med alkalno-cementnimi masami in različnimi zemljinami ali kamninami pri izdelavi pilotov z brizganjem cementne malte (jet grouting piloti).

LITERATURA

1. Dolar-Mantuani L., Handbook of Concrete Aggregates, Noyes Publications, New Jersey 1983.
2. Stojadinović S., O alkalno-agregatnoj reakciji u betonu, Savetovanje alkalna reaktivnost agregata u betonu, 6–61, Beograd 1984.
3. Stojadinović S., Bučar M., Alkalna reakcija dolomita kao betonskog agregata, Sarajevo 1984.
4. Zatler B., Ocepek V., Uporaba mineralnih agregatov z ozirom na namembnost in tehnološko tehnično vrednotenje za betone, malte, asfalte in tampone, ZRMK, Ljubljana, 1982.
5. Zatler B., Ocepek V., Vižintin N., Izpitivanje alkalno silikatne reaktivnosti, Savetovanje alkalna reaktivnost agregata u betonu, 61–69, Beograd 1984.
6. Zatler-Zupancič B., Mladenović A., Alkali reactive components in the sand and gravel of the river Danube and its tributaries, The 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, 1121–1128, London 1992.



ZVEZA DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV IN TEHNIKOV SLOVENIJE LJUBLJANA, ERJAVČEVA ULICA 15

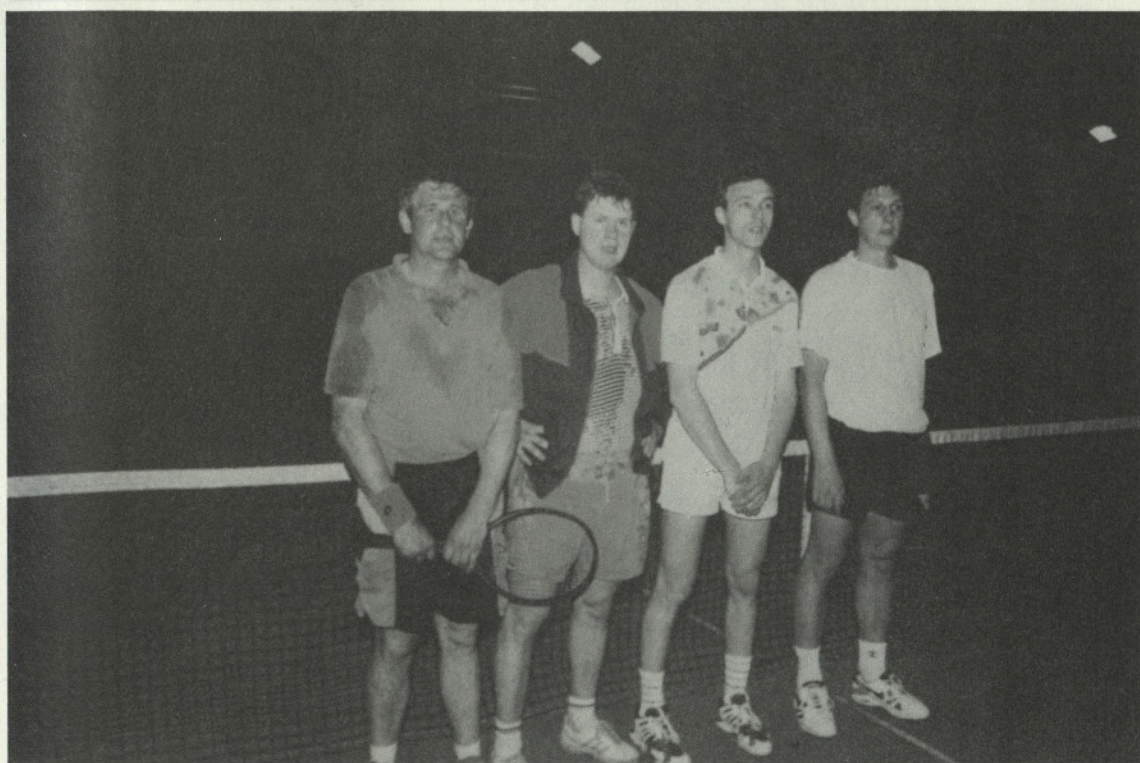
STROKOVNI IZPITI ZA GRADBENIŠTVO IN ARHITEKTURO TER PRIPRAVLJALNI SEMINARJI ZA STROKOVNE IZPITE V LETU 1994

Rok	Leto	Mesec	A. SEMINAR	B. IZPIT	
				pisni	ustni
V.	94	Maj	16.–20. maj	21. maj	6.–10. junij
VI.	94	September	19.–23. september	15. oktober	2.–4. november
VII.	94	Oktober	17.–21. oktober	19. november	4.–8. december
VIII.	94	November	21.–25. november		
IX.	94	December	12.–16. december		

A. Pripravljalni seminar organizira **ZVEZA DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV IN TEHNIKOV SLOVENIJE**, Erjavčeva 15, telefon: 061/221-587. Prijavo v obliki dopisa, skupaj z dokazilom o plačilu, pošlje plačnik stroškov seminarja. Cena seminarja v mesecih novembru in decembru 1994 znaša 350 DEM, plačljivo v SIT po srednjem tečaju Banke Slovenije na dan plačila, z doplačilom 5 % prometnega davka. Morebitna sprememba cene bo naknadno objavljena.

B. Izpit organizira **ZAVOD ZA RAZISKAVO MATERIALA IN KONSTRUKCIJ LJUBLJANA**, Dimičeva 12, Ljubljana. Informacije dobite pri inž. Grošlju prek telefona št. 061/342-671, od 10. do 12. ure.

VELENJE
1. DRŽAVNO
SLOVENIJA
5. MAJ 1994
DŽIT
TENIS

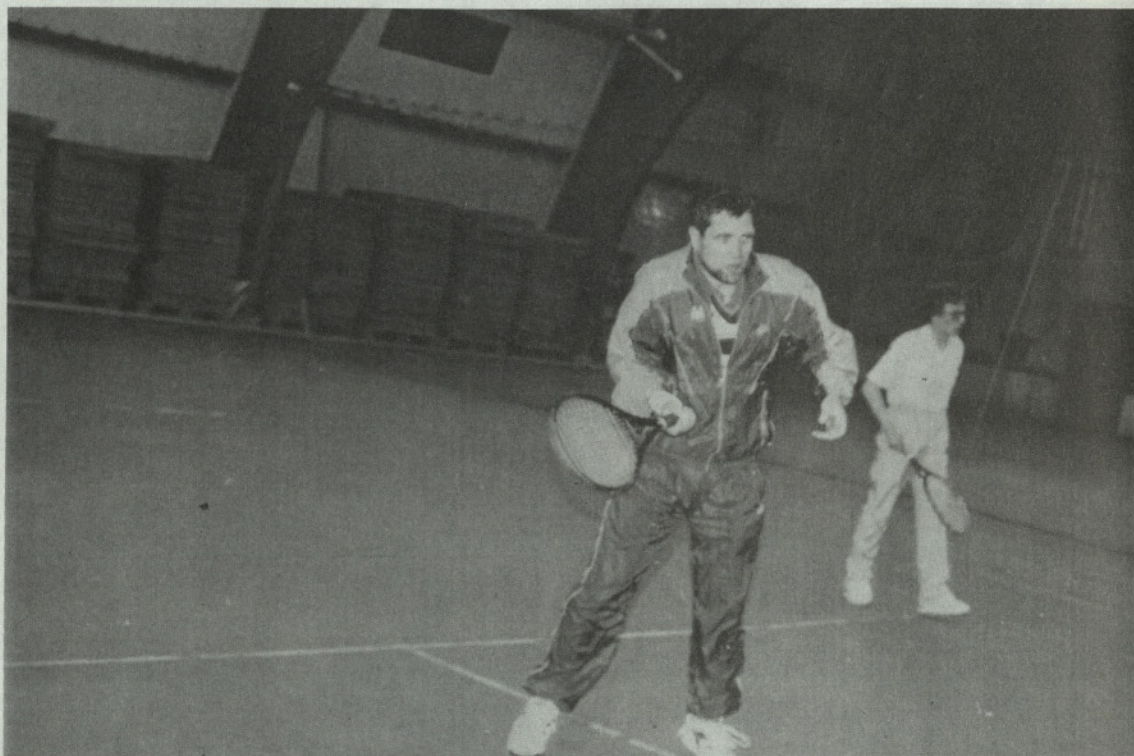


VELENJE, 5. MAJA 1994

**1. DRŽAVNO PRVENSTVO GRADBENIKOV SLOVENIJE
V TENISU - DVOJICE**

TRC Jezero - Bela dvorana

VELENJE
1.
SLOVENIJA
5. MAJ 1994
DŽIT
TENIS *cup*



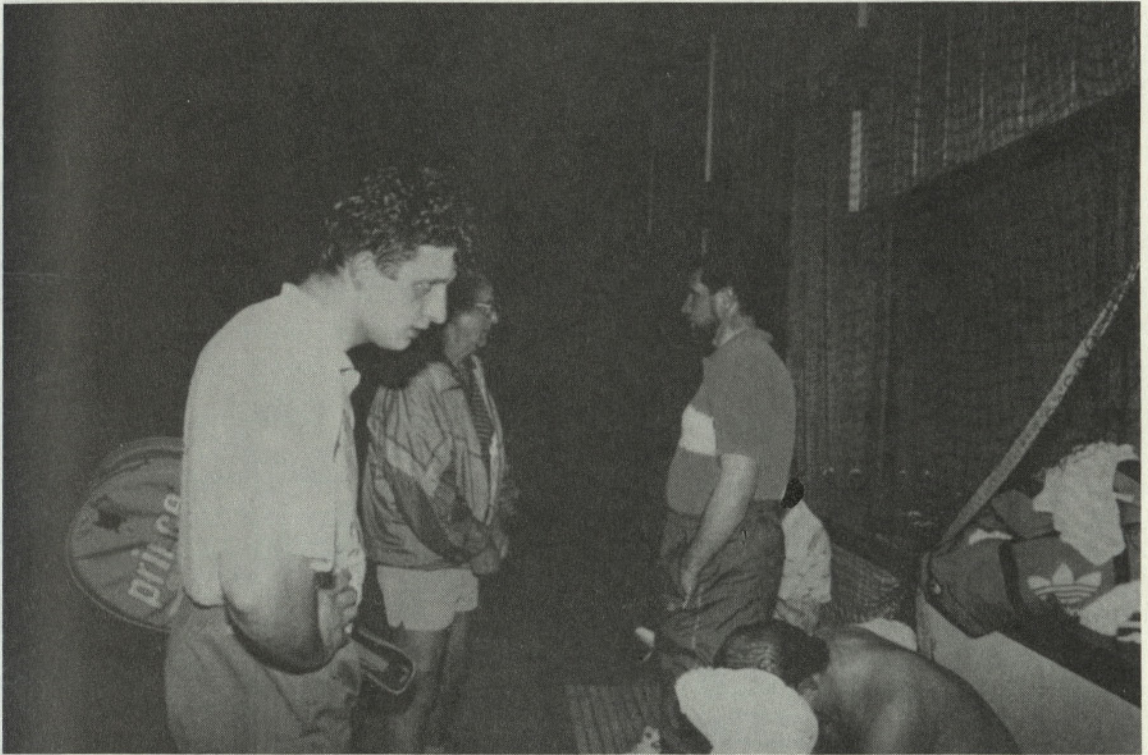
VELENJE, 5. MAJA 1994

**1. DRŽAVNO PRVENSTVO GRADBENIKOV SLOVENIJE
V TENISU - DVOJICE**

TRC Jezero - Bela dvorana

VELENJE
1.
SLOVENIJA
5. MAJ 1994

1. DRŽAVNO PRVENSTVO GRADBENIKOV SLOVENIJE V TENISU - DVOJICE

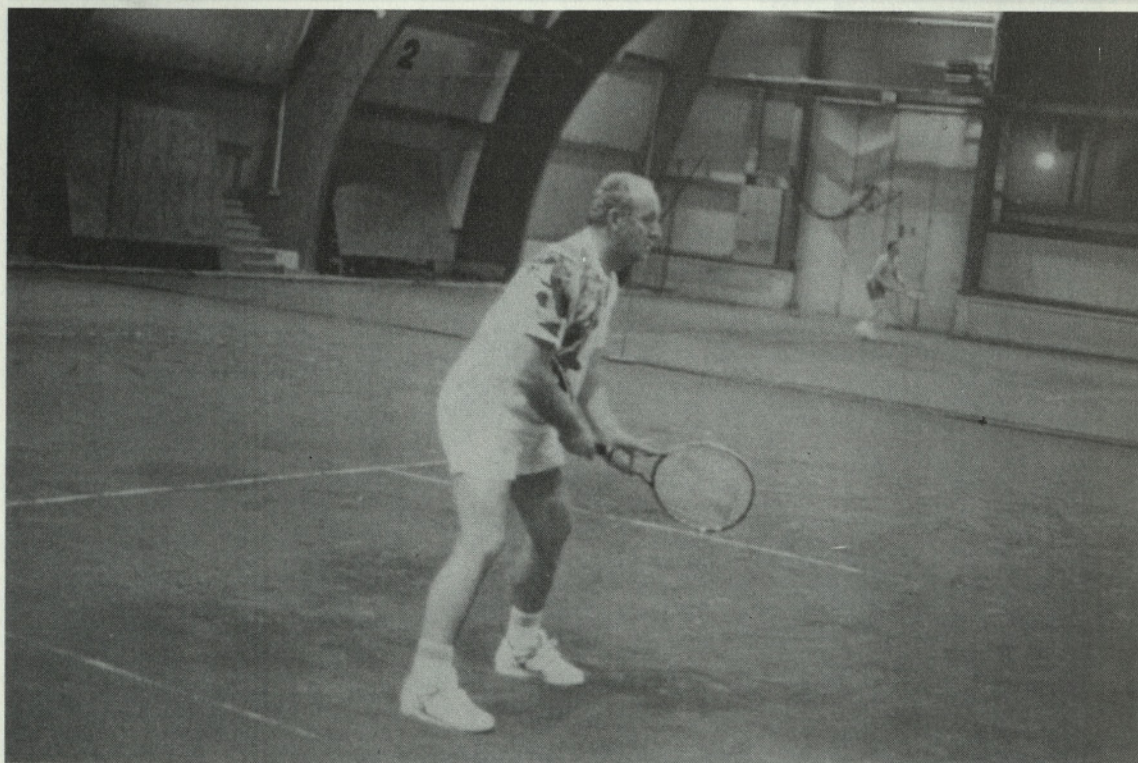


VELENJE, 5. MAJA 1994

**1. DRŽAVNO PRVENSTVO GRADBENIKOV SLOVENIJE
V TENISU - DVOJICE**

TRC Jezero - Bela dvorana

VELENJE
1.
SLOVENIJA
5. MAJ 1994
DČIT
TENIS *cup*



VELENJE, 5. MAJA 1994

**1. DRŽAVNO PRVENSTVO GRADBENIKOV SLOVENIJE
V TENISU - DVOJICE**

TRC Jezero - Bela dvorana

VELENJE
1. SLOVENIJA
5. MAJ 1994
DČIT
TENIS *cup*



VELENJE, 5. MAJA 1994

**1. DRŽAVNO PRVENSTVO GRADBENIKOV SLOVENIJE
V TENISU - DVOJICE**

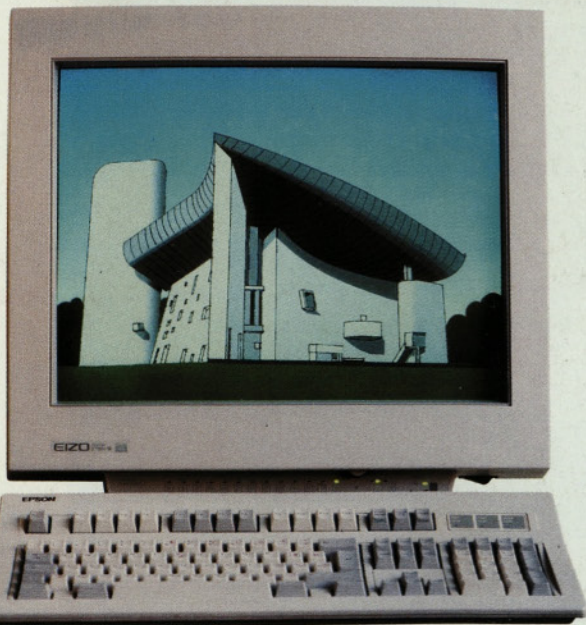
TRC Jezero - Bela dvorana



LUNA

AUTOCAD[®]

sistem, ki nikoli ne zašepa!



Poskusite si predstavljati klasično risalno desko:

- ki v vašo risbo v hipu vključi **zunanjo risbo** iz skupne knjižnice
- ki v spominu hrani nastavitve posameznih **kotiranj** in je z njimi na "ti", tako da jih lahko kliče po imenih
- ki sama **odkrije napako** pri branju datoteke risbe in jo modro preskoči
- ki na načrt **pogleda hkrati z več strani** in jih zna zapovrta še strniti v celoto
- ki kot za šalo pokuka tudi na **senčno plat** vaše risbe.

Priznajte, da si je včasih težko predstavljati!
Zato vam predstavljamo AUTOCAD!

Zunanji bloki, kotiranje s poimenovanjem nastavitvev, popravljiva baza podatkov, zaslonsko okno, senčenje prostorskih risb...

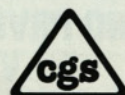
Vse podrobnosti pri pooblaščenih dealerjih:

REPRO
LJUBLJANA

Autodesk

BASIC

Tel.: 061 314 069



061 340 485

Mikrohit.

061 264 192

MRO

061 372 113