

2 2465



UDK-UDC 05:625;
YU ISSN 0017-2774

LJUBLJANA,
SEPTEMBER-
OKTOBER-
NOVEMBER 1990

LETNIK XXXIX,
STR.: 198-272

GRADBENI VESTNIK 9-10-11



S

R 2465/1990-39

624+69



924659000 9/11

COBISS

CENTRALNA TEHNIŠKA KNJIŽNICA

CENTRALNA TEHNIŠKA KNJIŽNICA



21000013641

70
LET
FAGG

ODDELEK ZA GRADBENIŠTVO



ZVEZA DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV IN TEHNIKOV SLOVENIJE
LJUBLJANA, ERJAVČEVA ULICA 15 ; TEL.: 061/221 587

**PRIPRAVLJALNI
SEMINARJI
ZA STROKOVNE
IZPITE V
GRADBENIŠTVU
ZA LETO 1990**

- 8. seminar od 19.–23. novembra 1990
- 9. seminar od 17.–21. decembra 1990

Prijavite se je treba približno en mesec pred pričetkom na naslov: **Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije, Erjavčeva 15, 61000 Ljubljana**. Prijava je v obliki dopisa, z navedbo imena, naslova in poklica kandidata, datuma udeležbe seminarja in točnega naslova plačnika stroškov za udeležbo na seminarju. Račun izstavi po ugotovljeni udeležbi organizator.



GRADBENI VESTNIK

GLASILO ZVEZE DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV IN TEHNIKOV SLOVENIJE
ŠT. 9-10-11 • LETNIK 39 • 1990 • YU ISSN 0017-2774

VSEBINA - CONTENTS

Članki, študije, razprave
Articles, studies,
proceedings

Vlasto Zemljič: ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA SKOZI 70 LET	198
Bojan Majes, Lujo Šuklje: PREGLED RAZISKAV VPLIVA LEZENJA NA KONSOLIDACIJO ZEMLJIN REVIEW OF INVESTIGATIONS CONCERNING CREEP EFFECTS ON CONSOLIDATION OF SOILS	205
Peter Fajfar, Matej Fischinger: POTRESNOVARNO PROJEKTIRANJE OBJEKTOV VISOKE GRADNJE Raziskovalno in razvojno delo v IKPIRu EARTHQUAKE RESISTANT DESIGN OF BUILDINGS Research and development in IKPIR	210
Miran Saje: PRIMERI IZ MEHANIKE KONSTRUKCIJ EXAMPLES FROM STRUCTURAL MECHANICS	216
F. B. Damjanič: METODA KONČNIH ELEMENTOV KOT SODOBNO ORODJE ZA REŠEVANJE INŽENIRSKIH NALOG USE OF FINITE ELEMENT METHOD AS A MODERN TOOL FOR ANALYSIS OF ENGINEERING PROBLEMS	219
Rudi Rajar: RAZVOJ MATEMATIČNEGA MODELIRANJA TOKOV S PROSTO GLADINO DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODELS OF FREE-SURFACE FLOW	226
Janez Duhovnik: RAČUNALNIŠKO PROJEKTIRANJE IN GRADNJA ARMIRANOBETONSKIH KONSTRUKCIJ COMPUTER AIDED DESIGN AND CONSTRUCTION OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES	231
Franc Saje, Rajko Rogač: NEKATERI PRISPEVKI KATEDRE ZA MASIVNE IN LESENE KONSTRUKCIJE K RAZVOJU STROKE SOME CONTRIBUTIONS TO THE DEVELOPMENT OF CIVIL ENGINEERING BY DIVISION OF CONCRETE AND WOODEN STRUCTURES	236
Rudi Kladnik, Aleš Krainer, Boris Orel, Marjana Šijanec-Zavrl: DINAMIČNA ANALIZA TOPLOTNEGA ODZIVA GRAJENEGA OKOLJA DYNAMIC ANALYSIS OF THERMAL RESPONSE OF BUILT ENVIRONMENT	241
Mitja Brilly: MODEL PODTALNICE LJUBLJANSKEGA POLJA GROUNDWATER MODEL OF LJUBLJANA AQUIFER	247
Albin Rakar: POMEN IN VLOGA ZEMLJIŠČA PRI PROCESU URBANIZACIJE MEANING AND ROLE OF THE BUILDING GROUNDS IN THE PROCESS OF URBANIZATION	252
Silvan Vidmar: JUBILEJ – AKADEMIK prof. dr. LUJO ŠUKLJE – osemdesetletnik	258
Darinka Battelino: 10 LET PODPORNH KONSTRUKCIJ IZ ARMIRANE ZEMLJINE V SLOVENIJI 10 YEARS EXPERIENCE IN REINFORCED EARTH WALLS IN SLOVENIA	261

Poročila, obvestila
Reports, information

Informacije Zavoda
za raziskavo materiala
in konstrukcij Ljubljana
Proceedings of the
Institute for materials and
structure research
Ljubljana

Glavni in odgovorni urednik: Franc ČAČOVIČ Lektor: Alenka RAIČ Tehnični urednik: Dane TUDJINA

Uredniški odbor: Sergej BUBNOV, Vladimir ČADEŽ, Vojteh VLODYGA, Stane PAVLIN, Gorazd HUMAR, Ivan JECELJ, Andrej KOMEL, Branka ZATLER-ZUPANČIČ, Jože ŠČAVNIČAR, dr. Miran SAJE

Revija izdaja Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije, Ljubljana, Erjavčeva 15, telefon: 221-587. Žiro račun pri SDK Ljubljana 50101-678-47602. Tiska Tiskarna Tone Tomšič v Ljubljani. Revija izhaja mesečno. Celotna naročnina, skupaj s članarino za člane društev znaša 150,00 din. Za študente in upokojenca velja polovična cena. Naročnina za gospodarske naročnike za 1. polletje 1990 znaša 1.000,00 din, za inozemske naročnike 80 US \$. Revija izhaja ob finančni pomoči RK za raziskovalno dejavnost in tehnologijo, Splošnega združenja gradbeništva in IGM Slovenije, Republiške vodne uprave, Zavoda za raziskavo materiala in konstrukcij Ljubljana in Fakultete za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo Univerze Edvarda Kardelja v Ljubljani.

ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA SKOZI 70 LET

UDK 378.662(091)(497.1)

VLASTO ZEMLJIČ

Lani decembra je Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo (FAGG) praznovala svojo sedemdesetletnico. Ob podobnem prazniku – pred desetimi leti – sem v jubilejni Zbornik 1919/1979 zapisal, da je taka starost v merilu posameznika kar lepa, v merilu neke ustanove pa še vedno predstavlja le rosno mladost. In to velja tudi za sedanje, deset let daljše obdobje.

V resnici pa je študij gradbeništva v Sloveniji le nekoliko starejši, ne samo za 70 let, kar bom poskušal na kratko tudi utemeljiti.

ČAS PRED LETOM 1919

Začetki visokošolskega študija v Ljubljani segajo daleč nazaj, v konec XVI. stoletja. Vse šolstvo, ki je presegalo osnovno šolo, so tedaj imeli v svojih rokah jezuiti, kar pomeni, da je bilo izrazito teološko usmerjeno. Dodatni sta mu bili še retorika in filozofija. Že v začetku novega, XVII. stoletja, pa se tovrstni višji študij obogati z matematiko in fiziko, ki že lahko pomenita kvaliteten premik v korist naravoslovnih ved. V Gorici se je to zgodilo že l. 1650, v Ljubljani pa sta obe vedi dobili domovinsko pravico – na iniciativo Akademije operozov – leta 1693. – Tedaj je jurist in član Akademije J. G. Dolničar (1655-1719) že zapisal misel o ustanovitvi univerze v Ljubljani. Seveda nima njegova misel še nobene neposredne zveze z gradbeništvom, tako kot je nima mnogo kasnejši podatek o reformi filozofskega študija v tedanji Avstriji (1753), kjer zasledimo navedbo, da so v Ljubljani obstajale tri stolice za obvezne predmete: matematiko, splošno in eksperimentalno fiziko ter filozofijo. Newtonovo fiziko je npr. predaval v letih 1762–63 F. K. Wulfen, nam zelo znani Gabrijel Gruber pa je l. 1768 ustanovil stolico za mehaniko in jo vodil do svojega odhoda l. 1787. Čeprav nimamo natančnejših podatkov o statusu ter organizaciji šole in njenih stolic, pa glede Gruberjeve siceršnje dejavnosti že lahko sklepamo, da se je v okviru svoje stolice že vsaj rahlo dotaknil tudi gradbene stroke. Gledano s tega stališča bi že lahko rekli, da se je morda tedaj pred dobrimi 200 leti spočel visokošolski študij gradbeništva.

Z ukinitvijo jezuitskega reda (1773) je v višjem šolstvu nastalo določeno zatišje, ki ga je prekinil prihod Francozov. Po vzorcu iz Francije so se tudi v Ilirski provinci začele ustanovljati gimnazije (nižji študij), licej s filozofsko in teološko usmeritvijo (višji študij) in centralne šole, ki že predstavljajo visoko šolo. Pravilnik o organizaciji in disciplini centralnih šol v Ljubljani (1. 8. 1810) navaja sedem študijskih smeri, med katerimi sta bili tudi inženirsko-arhitektonska (4-letni študij) in geometrska (3-letni študij). Stavbarstvo in arhitekturo je kot skupen predmet obeh strok predaval v letih 1810–12 H. Mina. Letnico 1810 torej že lahko upravičeno osvojimo kot tisto pravo, ki pove, da so se tedaj začeli v Ljubljani šolati visoko izobraženi gradbeniki. Da je tedaj že dejansko obstajala univerza v Ljubljani, ki je vključevala tudi študij gradbeništva, nas prepriča J. Polec v svoji razpravi (1929), ko pravi, da že omenjeni Pravilnik v resnici predstavlja »Statut francoske univerze v Ljubljani«. Študij gradbeništva – ne glede na poimenovanja šole ali fakultete – torej ni star le 70, ampak kar 180 let!

Z odhodom Francozov so bile njihove šole ukinjene. Vendar pa je že v l. 1848 zopet vzniklo vprašanje slovenske univerze kot splošen nacionalni problem, saj so Slovenci morali študirati v sosednjih deželah, ki so že imele svoje visoke šole. Niti šolstvo v vseh svojih oblikah, še manj pa slovenščina, v kateri naj bi pouk potekal, nista bila všeč avstroogrski monarhiji. Marčna revolucija je povzročila nov val zahtev po obnovi in povečanju ljubljanskega visokega šolstva, kar je predstavljalo del slovenskega narodnega programa v Zedinjeni Sloveniji. Značilne – in tudi danes še kako veljavne! – so besede Matije Majarja – Ziljskega, da naj vsakdo v svoji deželi doma živi, kakor mu je drago in ljubo in da naj »tudi nas puste doma po našem živeti: Slovence po slovensko«. Za

Avtor:
Vlasto Zemljič, dr., dipl. gradb. inž., redni profesor v pokoju

tedanje razmere popolnoma razumljivo je, da Slovenci s svojimi zahtevami nismo uspeli. V času taborov (1868-71) so bile slovenske zahteve po lastni univerzi obnovljene, vendar zopet neuspešne. Usojeno nam je bilo, da se šolamo še naprej na tujem, predvsem na Dunaju, v Gradcu in Pragi. Tretji val zahtev po slovenski univerzi se je pojavil l. 1898, torej v času, ko so se narodna nasprotja v Avstriji izredno zaostri. Kljub ponavljajočim se zahtevam političnih strank še v prvem desetletju tega stoletja in zaradi vse bolj labilnega notranjega stanja v monarhiji ter prve svetovne vojne smo Slovenci ostali, kar zadeva visoko šolstvo, praznih rok.

Iz vrst redkih gradbenih inženirjev, ki so se vsi morali šolati v tujini, je vredno omeniti F. Potočnika (1811–1892), ki je postal celo višji stavbni svetnik in kot eden prvih naših gradbenikov odprl l. 1888 v Ljubljani pisarno za civilno pooblaščenega inženirja. Proti koncu stoletja se je število slovenskih gradbenih inženirjev povečalo, med njimi pa so bili najbolj znani V. Polak, F. Žužek in B. Roš, medtem ko je M. Štrukelj postal celo profesor na helsinški univerzi, kjer je predaval predmete iz mostnih gradenj (diplomiral je l. 1874 na Dunaju). Študij naših gradbenikov na tujih univerzah – predvsem v Pragi – je utrdil stike še po njihovem povratku v domovino, tako da so nekateri češki kolegi prišli po svetovni vojni v Ljubljano na novo ustanovljeno univerzo (M. Kasal, A. Král).

ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA MED OBEMA VOJNAMA

Že takoj po koncu svetovne vojne, še za časa narodne vlade za Slovenijo, je bilo postavljeno nujno vprašanje ustanovitve slovenske univerze. 23. novembra 1918 je bila na pobudo M. Rostoharja ustanovljena vseučiliška komisija, ki je odslej naprej vodila vse priprave za ustanovitev univerze. V klasično – avstrijsko – sestavo univerze s štirimi fakultetami: pravno, filozofsko, medicinsko in teološko je društvo inženirjev predlagalo še tehniško fakulteto, ki naj bi bila po tedanjih pojmih kot samostojna tehniška visoka šola zunaj univerze. Deljena mnenja o tem so povzročila začetek tehniških visokošolskih tečajev (19. 5. 1919) v prostorih tedanje državne obrtne šole na Aškerčevi cesti, ki naj bi v času do ustanovitve univerze nadomestili prva dva semestra tehniškega študija s tem, da se kasneje tečajji priznajo kot redni študij (dekret deželne vlade z dne 26. 4. 1919). Začasni parlament v Beogradu je 16. julija 1919 dokončno sprejel besedilo zakona o »Univerzi kraljevstva Srbov, Hrvatov in Slovencev v Ljubljani«. Zakon je teden dni zatem (23. 7. 1919) podpisal regent Aleksander. Od petih fakultet teološke, pravne, filozofske, tehniške in medicinske so bile le prve štiri popolne, medtem ko je dobila slednja prva dva (pripravljalna) letnika. 31. 8. 1919 imenovani prvi redni profesorji (17) so se 18. septembra konstituirali kot univerzitetni svet, ki je začasno prevzel vse funkcije univerze in fakultet. S tem je prenehala delovati vseučiliška komisija. Prvo vpisovanje na vseh pet fakultet je bilo od 15.

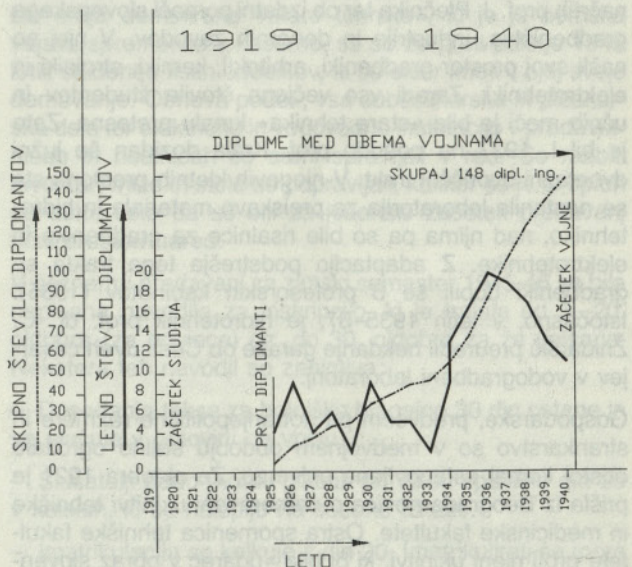
novembra do 1. decembra 1919. Takoj po končanih vpisih so na fakultetah in seveda tudi na oddelku za gradbeništvo pričeli s predavanji (z izjemo pravne fakultete, ki je začela s poukom šele 1920).

Oddelk za gradbeništvo, ki je moral šele iskati svoje učne moči – na dotedanjem visokošolskem tečaju so v glavnem predavali strokovnjaki iz prakse – je postopoma pridobival profesorje, ki so vso naslednjo dobo predstavljali jedro oddelka. Ker med Slovenci ni bilo dovolj ustrezno usposobljenih inženirjev in zaradi že omenjenih prijateljskih stikov, nastalih med študijem naših ljudi v Pragi, sta bila med novo imenovanimi profesorji dva Čeha.

Prvi je bil dr. Alojzij Král, ki je bil izvoljen za izrednega profesorja 1. 2. 1920 in ki je že od vsega začetka aktivno sodeloval pri ustanavljanju Tehniške fakultete. Ustanovil ter vodil je inštitut za tehniško mehaniko in preiskavo materiala, predaval pa je tudi teoretsko mehaniko in jeklene mostove. Pod njegovim mentorstvom so promovirali prvi doktorji tehniških znanosti na oddelku. V medvojnem obdobju je bil v treh mandatih, ki so tedaj trajali po eno leto, dekan TF, po osvoboditvi pa rektor univerze (1945–46).

Naslednji je bil prof. dr. Miroslav Kasal (1. 9. 1920), ki je vodil inštitut za gradbeno mehaniko in ojačeni beton, predaval pa je tudi lesene in masivne mostove. Bil je priznan in zelo plodovit strokovni publicist.

Tretji na GO je bil izredni profesor Alojzij Hrovat (imenovan 1. 6. 1922). Ustanovil in vodil je inštitut za ceste in železnice, poleg tega pa je predaval še predore. TF je vodil v letih 1939 do 1941, ko so ga Italijani odstavili. Po zadnji vojni je še dvakrat dekanoval na TF in kot prvi rektor vodil novoustanovljeno TVŠ (1950–52).



Jaroslav Foerster je bil imenovan za rednega profesorja 1. 6. 1922. Organiziral in vodil je inštitut za visoke stavbe, predaval pa je tudi v ta okvir spadajoči predmet industrijske zgradbe. Še preden je prišel na oddelk, je napisal

prvi dve slovenski strokovni knjigi: Ojačen beton (1921) in Nauk o trdnosti (1922). Na TF je dekanoval v dveh mandatnih obdobjih (1923/24 in 1927/28).

Na področju hidrotehnike je bil za izrednega profesorja imenovan dr. Ciril Žnidaršič (1. 7. 1925). Ustanovil in vodil je inštitut za vodne zgradbe, ki jih je tudi predaval poleg predmetov s področja hidrologije, energetske, prometne in sanitarne hidrotehnike. Organiziral in zgradil je naš prvi hidrotehnični laboratorij na Viču in s tem ustvaril temelj hidrotehniški panogi za znanstveno raziskovalno delo.

Ne bi bilo prav, če ne bi omenili tudi prvega asistenta na gradbeništvu (1923), kasnejšega profesorja Milana Fakina. Najprej je sodeloval pri cestah in železnicah, kasneje pa je honorarno predaval še opisno geometrijo. Z imenovanjem za docenta (1930) je prevzel inštitut za jeklene mostove, kjer je tudi doktoriral (1935).

Kot rečeno, so imenovani profesorji predstavljali od vsega začetka jedro moči na GO in okoli sebe vzgojili številne predavateljski naraščaj in še številnejše gradbene inženirje. V obdobju medvojnih 20 let so 7 let, torej dobro tretjino časa, uspešno vodili celotno TF, ki je štela od 4 do 8 oddelkov – različno glede na razvoj in potrebe. Vsak od profesorjev, ki na vseh oddelkih TF tedaj še niso potrebovali doktorata, ampak le strokovno reputacijo, je smel imeti – glede števila predmetov v Zavodu – še sodelavca, honorarnega predavatelja ali asistenta. Zanimanja za ta mesta pa je bilo zaradi slabih finančnih pogojev zelo malo. V svojih najboljših časih oz. neposredno pred drugo vojno je na gradbenem oddelku delovalo 10 profesorjev, honorarnih predavateljev in asistentov.

Delovne razmere so bile na vseh fakultetah zaradi prostorskih stisk zelo slabe, dokler – vsaj za tehnike – ni bila zgrajena stavba na Aškerčevi 9 (1921–22), in sicer po načrtih prof. J. Plečnika ter ob izdatni pomoči slovenskega gradbeništvu, industrije in denarnih zavodov. V njej so našli svoj prostor gradbeniki, arhitekti, kemiki, strojniki in elektrotehniki. Zaradi vse večjega števila študentov in učnih moči je bila »stara tehnika« kmalu pretesna. Zato je bil l. 1927 na pobudo prof. Krála dozidan še južni dvoetažni dvoriščni trakt. V njegovih kletnih prostorih sta se nastanila laboratorija za preiskavo materiala in hidrotehniko, nad njima pa so bile risalnice za gradbenike in elektrotehnike. Z adaptacijo podstrešja tega trakta so gradbeniki dobili še 6 profesorskih kabinetov (1935). Istočasno, v letih 1935–37, je hidrotehnik prof. dr. C. Žnidaršič preuredil nekdanje garaže ob Cesti dveh cesarjev v vodogradbeni laboratorij.

Gospodarske, predvsem pa notranjepolitične razmere in strankarstvo so v medvojnem obdobju stalno ogrožale obstoj komaj ustanovljene univerze. Že oktobra 1921 je prišla iz Beograda novica o nameravani ukinitvi tehniške in medicinske fakultete. Ostra spomenica tehniške fakultete proti njeni ukinitvi, ki bi bila »udarec v obraz slovenskemu narodu, kakor je bil nanje navajen pred osvoboditvijo«, je trenutno zavrla beograjsko namero. Leto kasneje so se grožnje zopet ponovile. To pot so bili še ostrejši protesti s strani študentov. Tudi v letu 1923 ni bilo dosti boljše, saj so s prozornimi parlamentarnimi triki hoteli

ukiniti medicinsko fakulteto. Leto 1925 je bilo zopet zelo burno, kar zadeva obstoj ljubljanske univerze. Reakcije kot: »roke proč od naše univerze« in »vsak poskus vzeti jo, bomo smatrali kot vojno napoved na življenje in smrt« so bile še kar učinkovite in so zopet – začasno – utišale beograjske grožnje – do l. 1927, ko so ob ponovni nameri o ukinitvi prevzeli iniciativo študenti in profesorji ob močni podpori slovenske javnosti na velikem protestnem zborovanju (24. 11. 1927) v unionski dvorani. Protestnim govorcem, študentoma E. Kocbeku in B. Kreftu, dekanu medicinske fakultete prof. dr. A. Šerku ter prof. dr. M. Vidmarju se je pridružil tedanji dekan tehniške fakultete prof. J. Foerster. Protesti in ostri dialogi z Beogradom so trajali do 18. 6. 1929, ko je kralj Aleksander odločil, da univerza v Ljubljani »nosi naziv Univerzitet kralja Aleksandra I«. To politično »finto« je spretno izvedel rektor prof. M. Vidmar, nakar so napadi iz Beograda bolj ali manj prenehali – čisto mirno pa le še ni bilo. Če ni šlo drugače, so se uporabljale redukcije finančnih sredstev ali pa notranje razprtije med domačimi in neslovenskimi (= srbskimi) profesorji na nekaterih fakultetah. Vmes so se seveda pojavljale slovenske medstrankarske borbe za oblast pri vodenju univerze in fakultet: »divide et impera«.

Kljub vsem burnim peripetijam v medvojnem času pa je študijski proces na fakultetah potekal dokaj redno. Na študiju gradbeništvu se je učni načrt seveda nekolikokrat menjal, pač v skladu s potrebami in razvojem tehniških znanosti. Do l. 1931 sta na gradbenem oddelku tehniške fakultete (TF) delovala dva inštituta:

– Inštitut za tehniško mehaniko s predmeti: tehniška mehanika, stavbena mehanika, statika gradbenih konstrukcij, ojačeni beton in preiskava gradiva ter

– Inštitut za gradbeno inženirstvo, industrijske zgradbe, ceste, železnice – zg. stroj, leseni in zidani mostovi, železni mostovi, vodne zgradbe, gradbeni elementi in enciklopedija inženirskih ved. Po l. 1931 sta se z diferenciacijo notranjega ustroja gradbenega oddelka (GO) oba inštituta razcepila na 6 inštitutov, ki so se v šolskem letu 1935–36 preimenovali v zavode in so jih vodili predstojniki:

– Zavod za tehnično mehaniko in preiskavo materiala (A. Král),

– Zavod za ojačeni beton in gradbeno mehaniko (M. Kasal),

– Zavod za visoke stavbe (J. Foerster),

– Zavod za ceste in železnice (A. Hrovat),

– Zavod za mostovne zgradbe (M. Kasal, kasneje M. Fakin),

– Zavod za vodne zgradbe (C. Žnidaršič, kasneje M. Goljevšček).

Ta organizacijska oblika, ki je – razen 13 osnovnih splošnih in teoretičnih predmetov – obsegala 14 strokovnih in 6 diplomskih predmetov, je trajala vse do konca druge vojne (1945). Študij je formalno trajal 8 semestrov s povprečno tedensko obremenitvijo 35 ur. Za izdelavo

diplomske naloge pa je imel študent po »absolutoriju« še dodatne 3 mesece časa. Omejitev glede trajanja študija sicer ni bilo, za prehod v 3. letnik pa je bil postavljen pogoj »prvega državnega izpita« (položeni izpiti iz prvih treh semestrov).

Študij gradbeništva je bil v letih med obema vojnama enovit in kontinuiran. Do konca I. 1940 oz. do začetka druge vojne je diplomiralo za gradbene inženirje 148 študentov. Kot prvi diplomant se je I. 1925 pojavil Josip Črnjač, kasnejši profesor na geodetskem oddelku.

ČAS OKUPACIJE (1941–1945)

S prihodom Italijanov v Ljubljano je delo na GO – kot na vseh fakultetah oz. univerzi – povsem zamrlo. 3. maja 1941 je italijanski visoki komisar ljubljanske pokrajine le dovolil, da se na fakultetah zopet prične s predavanji v polnem obsegu. Sredi novembra je italijanska policija na tehniki aretirala 29 študentov »zaradi subverzivnega gibanja«. 29. novembra je dobil rektorat univerze odlok o ustavitvi predavanj in vaj na tehniki ter odlok o odstavitvi njenega dekana, prof. A. Hrovata. Šele v februarju 1942 je visoki komisariat zopet dovolil tehnikom polaganje izpitov, vendar samo tistim, ki so se vpisali v univerzitetno fašistično organizacijo (GUF), maja pa je Grazioli zopet dovolil – na ponovno prošnjo univerze – predavanja na

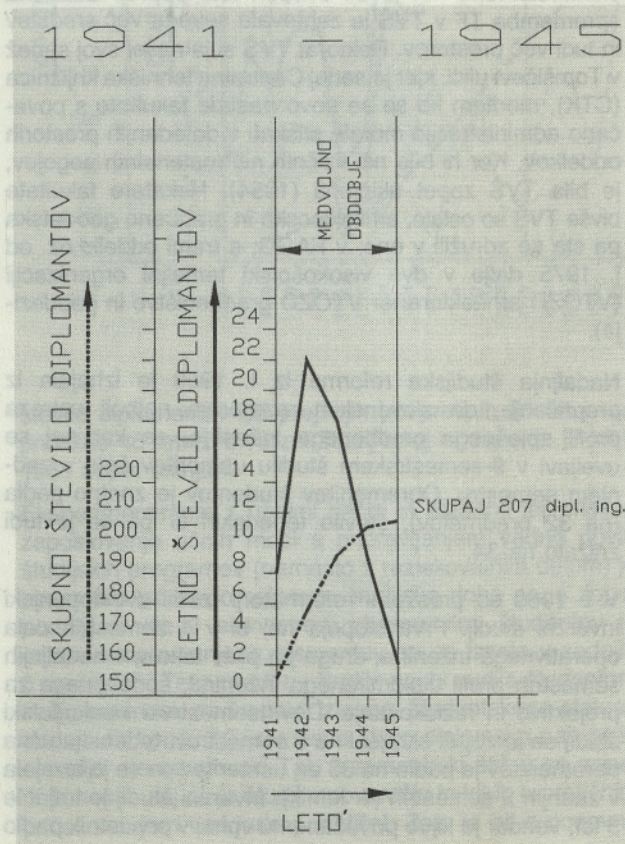
tehniko. S prihodom Nemcev v Ljubljano (1943) je začela njihova vojska zasedati univerzitetne stavbe. Zaradi tega je univerzitetni svet protestiral, protestiral pa je tudi zaradi izpadov dela študentov v univerzitetni avli, ki so »na nedostojen način napadli univerzo« in nekatere profesorje. General Rupnik je ta protest sprejel, vendar je še istega dne s posebno naredbo ustavil na univerzi vsa predavanja in vaje ter s tem zaprl univerzo vse do osvoboditve. Kljub zapiranjem fakultet in kljub prepovedim predavanj pa so študenti – v dogovoru s profesorji in celo na njihovih domovih – opravljali izpite in oddajali vaje. Na gradbenem oddelku so tudi diplomirali (59) – vsaj tisti, ki so neposredno pred vojno opravili večino svojih študijskih obveznosti. Še danes pa je v arhivu FAGG diplomatska naloga, spisana s svinčnikom (Zorka Sodnik, 1941), ker je okupator rekviriral pisalne stroje. Učni načrti se v času okupacije niso spremenili, jasno pa je, da je število vpisanih študentov v prvi letnik zelo padlo: povprečno 46, s tem da v šolskem letu 1944–45 ni bil nobeden na novo vpisan. Profesorji so v času okupacije – z izjemo tistega časa, ko so predavanja le bila dovoljena – pisali skripta, študirali in raziskovali ali pa tudi pripravljali svoje doktorske naloge (Žnideršič, 1944). Vsi pa so brez izjeme ter bolj ali manj očitno podpirali boj našega naroda proti okupatorju.

ODDELEK ZA GRADBENIŠTVO PO LETU 1945

Do kraja demolirane »stare tehnike«, ki jo je nemška vojska spremenila v kasarno, so se že proti poletju 1945 lotili študentje tistih oddelkov, ki so sicer imeli v njej svoje domovanje. Obnova podov, vsa soboslikarska in pleskarska dela ter električno in vodovodno inštalacijo v predavalnicah in risalnicah so sami spravljali v red. Še razbiti inventar, mize in stole so popravljali, kolikor se je to sploh še dalo, tako da so bili za jesenski začetek predavanj učni prostori nared.

V seznamu predavanj za zimski semester 1945–46 so bila napisana navodila za inskripcijo, ki je trajala od 5.–20. oktobra (za novince) oz. do 30. oktobra za že vpisane. Nekatera teh navodil so zanimiva:

- Dosedanja taksa za bolniško blagajno 30 din ostane in se plačuje v gotovini ob vpisu.
- Slušatelji bodo morali plačati pri vpisu vpisnino din 25 v kolekih, ki se nalepijo na osebne izkaze.
- Imatrikulacija se kolkuje z din 20. Imatrikulirati se mora novinec.
- Slušatelji-ice, ki niso novinci (novinke), bodo morali imeti nostrificirane semestre od »Komisije za priznanje semestrov in izpitov, opravljenih v času okupacije«.
- Novinci pa morajo predložiti ob vpisu nostrificirana maturitetna spričevala.



V prvi letnik se je jeseni 1945 vpisalo 108 novincev. Študij pa je tako kot pred vojno trajal 8 semestrov z enakim učnim načrtom na 6 Zavodih in enem Kabinetu (za železnice – zgornji stroj).

Naraščanje števila novovpisanih, spremembe in razširjanje programov, reorganizacije, dotok novih, mlajših učnih moči, zahteve po raziskovalnem delu in podobno, so terjale tudi več prostora. Kljub izselitvam strojnikov, kemikov in rudarjev v nove zgradbe in kljub preselitvi arhitektov na Graben (1948), je postala stara tehnika pretesna. Delovni in higienski pogoji ob sicer dotrajanem in že dolgo časa neustreznem inventarju so zahtevali nove rešitve.

Ob Hajdrihovi ulici je na pobudo prof. dr. M. Goljevščka zrasedel 1949 Vodogradbeni laboratorij (projektant prof. J. Valentinčič), v katerem sta dobila prostore s kabineti, predavalnicami in risalnicami hidrotehnični in konstrukcijski odsek.

S to pridobitvijo se potrebe gradbenega oddelka seveda niso bistveno spremenile, saj so se v izpraznjene prostore na stari tehniki vseljevali nekateri drugi, na novo ustanovljeni oddelki TF (npr. farmacevti in tekstilci). Inštitut za metalne konstrukcije (IMK) je pod vodstvom prof. dr. M. Marinčka preuredil, adaptiral in dogradil staro kegljišče v Koleziji ob Mencingerjevi ulici kot bazo za svojo raziskovalno dejavnost (1955). Vendar je bil ta že kmalu potem – enako kot Vodogradbeni laboratorij – izločen z vsem svojim inventarjem iz osnovnih sredstev TF oz. gradbenega oddelka. To so omogočala oz. zahtevala tedanja zakonska določila. Z izgubo obeh objektov, ki sta predstavljala nad 70% vseh oddelkovih prostorov, je bila gradbenemu študiju povzročena velika škoda. Z njuno izločitvijo sta bili prizadeti pedagoška in še v večji meri raziskovalna dejavnost, saj je bil IMK za šolo v celoti izgubljen, hidrotehnikom in konstruktorjem pa so praktično ostali le kabinetni prostori z dvema predavalnicama in risalnicama.

Velika volja in vztrajnost dekana FAGG (1958/59) prof. dr. B. Žnideršiča ter »ministriranje« podpisanega sta končno premaknila prostorsko vprašanje gradbenikov z mrtve točke, odobreni sta bili lokacija in gradnja fakultetnih objektov v kareju med Tržaško, Jamovo in Groharjevo uličo ter Lepim potom, kjer naj bi stali trije glavni objekti, in sicer dekanatski (z dvema velikima predavalnicama), arhitektski in gradbeno-geodetski (GG). Slednji naj bi predstavljal prvo fazo celotnega kompleksa. Da bi bila omogočena njegova gradnja, je bilo potrebno najprej poskrbeti za nadomestna stanovanja rušenih stanovanjskih barak na tem prostoru. V ta namen je bil na Mirju 5 zgrajen 12-stanovanjski objekt, v katerem so našli svoje domovanje učitelji ter asistenti gradbenega in geodetskega odseka. Tako se je l. 1962 lahko pričelo z gradnjo ob Jamovi 2. V 8-etažno poslopje s skupno 9120 m² bruto površine so se l. 1969 vselili gradbeniki ter geodeti s svojim Inštitutom za geodezijo in fotogrametrijo (IGF) in deloma tudi arhitekti (Inštitut za oblikovanje). Kljub tedanjim tendencam in gledanju na šolstvo, ki sta narekovala le šolske, ne pa tudi raziskovalno-laboratorijske prostore, si je z manjšo preadaptacijo projekta (prof. E. Ravnikar)

našel v hiši svoj prostor Laboratorij za mehaniko tal in kasneje še računalniški center.

Pogrešanje raziskovalnih prostorov je rešil prof. dr. J. Duhovnik z gradnjo laboratorijskega objekta ob glavnem posloju za potrebe konstruktorjev in prometnikov (projektant prof. dr. N. Seliškar), in sicer v l. 1984.

Zamišljena izgradnja dekanatskega in arhitektonskega objekta očitno še dolgo ne bo prišla v poštev – če sploh kdaj – saj npr. arhitekti predvidevajo reševanje svoje prostorske stiske z dograjevanjem svoje hiše na Grabnu.

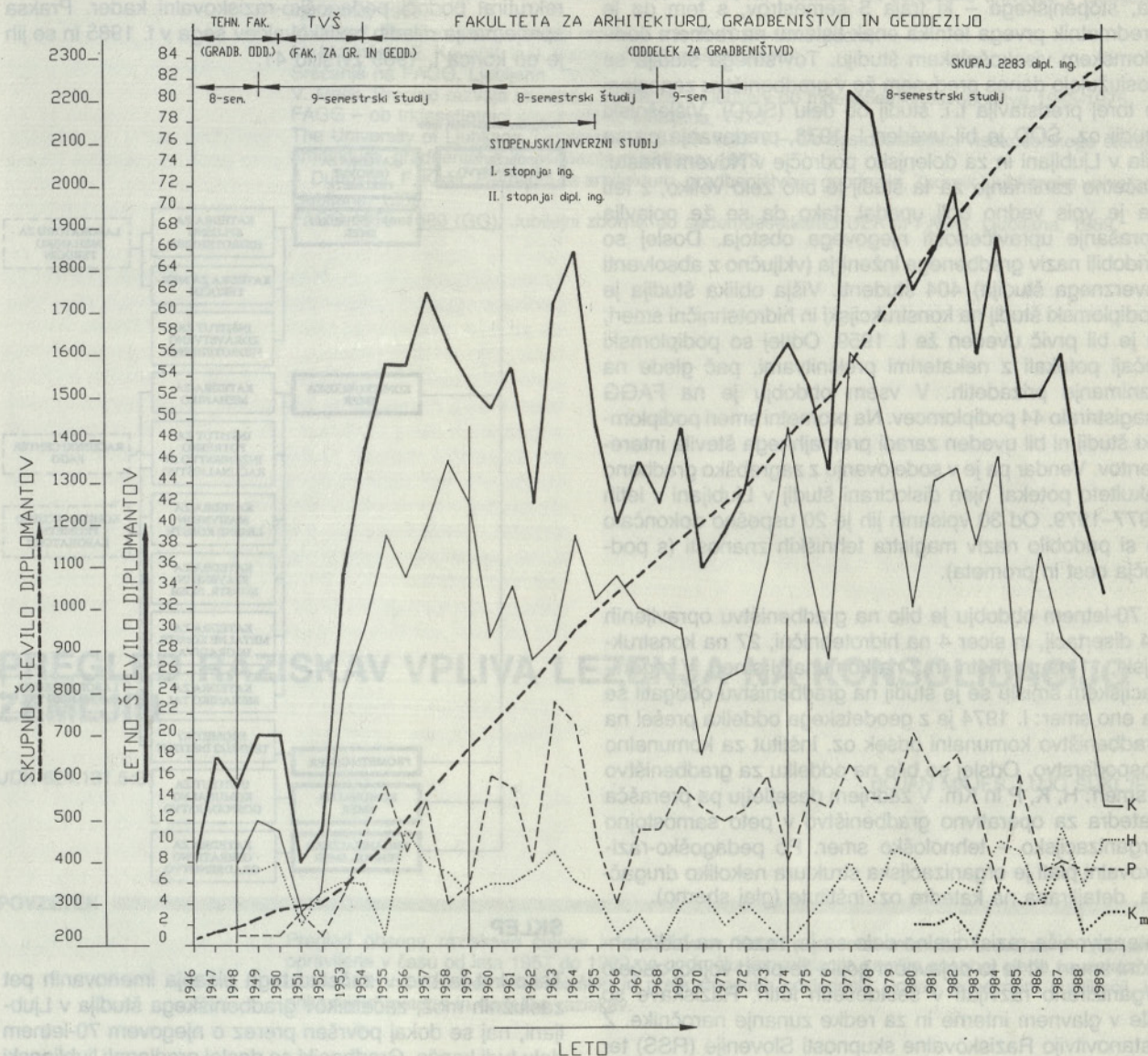
V vsem povojnem obdobju so se študijske in organizacijske reforme vrstile kot na tekočem traku. Prva taka reforma je bila izvedena l. 1949 z usmeritvijo študija v hidrotehnično (H), konstrukcijsko (K) in prometno smer (P) zaradi povečanja obsega in teže učne snovi, kar bi sicer povzročilo preveliko obremenitev študentov. Ta specializacija, ki je bila med drugim tudi odsev sovjetskega vzorca, je zahtevala podaljšanje študija na 9 semestrov, deseti pa je bil namenjen izdelavi diplomske naloge.

Število predmetov je iz predvojnih 33 znatno naraslo, in sicer: H-44, K-39 in P-48. Tedenska obremenitev študentov pa je narasla od predvojnne s 35 urami na povprečno 38 ur na vseh treh smereh. Skoraj vzporedno s to reformo se je l. 1950 spremenila tudi organizacijska oblika oddelka. Z ustanovitvijo Tehniške visoke šole (TVŠ), katere prvi rektor je bil prof. A. Hrovat, sta gradbeni in geodetski oddelek postala fakulteta (FGG), vendar z enakim študijskim režimom, kot je bil uveden leto poprej. Statusna sprememba TF v TVŠ je zahtevala seveda več sredstev in tudi več prostorov. Rektorat TVŠ si je našel svoj sedež v Tomšičevi ulici, kjer je sedaj Centralna tehniška knjižnica (CTK), medtem ko so se novo nastale fakultete s povečano administracijo morale stiskati v dotodanjih prostorih oddelkov. Ker ni bilo niti fizičnih niti materialnih pogojev, je bila TVŠ zopet ukinjena (1954). Nekatere fakultete bivše TVŠ so ostale, arhitektonska in gradbeno-geodetska pa sta se združili v eno, v FAGG, s tremi oddelki oz. od l. 1975 dalje v dve visokošolski temeljni organizaciji (VTOZD arhitektura ter VTOZD gradbeništvo in geodezija).

Nadaljnja študijska reforma iz l. 1950 je izhajala iz prepričanja, da slovenskim razmeram najbolj ustreza profil splošnega gradbenega inženirja, za kar naj se uveljavi v 9-semestrskem študiju usmeritev šele v zadnjem semestru. Obremenitev študentov je znatno padla (na 32 predmetov), število tedenskih ur pa se je tudi znižalo na 34.

V l. 1960 so prosvetni reformatorji izsilili dvostopenjski inverzni študij. Prva stopnja naj bi v 4 semestrih dala operativnega inženirja, druga pa prav tako v 4 nadaljnjih semestrih profil diplomiranega inženirja, sposobnega za projektivo in raziskovanje. Devetsemestrski visokošolski študij se je zopet skrajšal na 8 semestrov, tedenska učna obremenitev je padla na 33 ur, usmeritev pa se je izvajala v zadnjih 2 semestrih (4. letnik). Inverzni študij je trajal le 5 let, vendar je kljub povečanemu vpisu v prvi letnik padlo

1946 — 1989



število diplomantov od prejšnjih povprečnih 55 letno na približno 45 letno. Inverzni študij torej ni uspel in je bil l. 1965 zopet ukinjen.

Eksploziviranje z učnimi načrti in študenti ter prisilno zaposlovanje učnih moči s pripravljanim vedno novih študijskih programov (namesto z raziskovalnim delom) je povzročilo ponovno reformo: študijska doba se je zopet podaljšala na 9 semestrov, obremenitev študentov je ostala nespremenjena, usmeritev pa se izvaja v zadnjih 3 semestrih. Taka ureditev študija naj bi nudila študentom večjo možnost, da še pred iztekom študentskega statusa oddajo ob koncu 10. semestra svojo diplomsko nalogo in opravijo njen zagovor. Tak 9-semestrski študij se zopet ni obnesel, saj se je študij v povprečju in kljub teoretičnim pričakovanjem vendarle podaljšal. Zato je bil s ponovno

reformo l. 1971 zopet ukinjen. Uveden je bil sedanj 8-semestrski študij z rahlejšim usmerjevanjem že v 3. letniku in izrazito usmeritvijo v zadnjem, 4. letniku. Njegova značilnost je sprotni študij, po katerem je pred vpisom v višji letnik potrebno opraviti vse učne obveznosti, tj. oddati vaje in opraviti izpite iz predhodnega letnika.

Učni načrt in študijski režim se odtlej pa do danes nista bistveno spreminjala. Bili so sicer nekateri poskusi, ki pa so izhajali bolj iz notranjih potreb kot pa iz diktatov od zunaj. Karakteristika manjših korektur je sproščanje študija z izbirnimi predmeti v zadnjih dveh semestrih, s čimer je študentom dana večja možnost za izbiro tistega ožjega področja smeri, ki jih posebej zanima oz. kateremu se želijo bolj posvetiti.

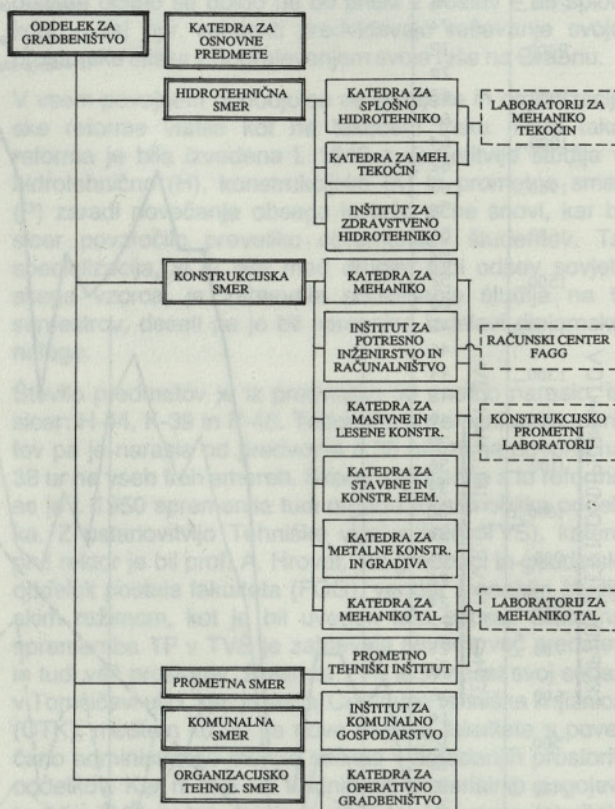
Gospodarske potrebe in v nekaterih primerih iz kakršnihkoli razlogov prekinjeni študij so izzvale uvedbo rednega višješolskega študija – za razliko od nekdanjega inverznega, stopenjskega – ki traja 5 semestrov, s tem da je predmetnik prvega letnika enak tistemu na rednem diplomskem visokošolskem študiju. Tovrstnega študija se poslužujejo danes predvsem že v gradbeništvu zaposleni in torej predstavlja t.i. študij ob delu (ŠOD). Višješolski študij oz. ŠOD je bil uveden l. 1978, predavanja pa so bila v Ljubljani in za dolensko področje v Novem mestu. Začetno zanimanje za ta študij je bilo zelo veliko, z leti pa je vpis vedno bolj upadal, tako da se že pojavlja vprašanje upravičenosti njegovega obstoja. Doslej so pridobili naziv gradbenega inženirja (vključno z absolventi inverznega študija) 404 študenti. Višja oblika študija je podiplomski študij na konstrukcijski in hidrotehnični smeri, ki je bil prvič uveden že l. 1959. Odtlej so podiplomski tečaji potekali z nekaterimi prekinitvami, pač glede na zanimanje prizadetih. V vsem obdobju je na FAGG magistriralo 44 podiplomcev. Na prometni smeri podiplomski študij ni bil uveden zaradi premajhnega števila zainteresentov. Vendar pa je v sodelovanju z zagrebško gradbeno fakulteto potekal njen dislocirani študij v Ljubljani v letih 1977–1979. Od 30 vpisanih jih je 20 uspešno dokončalo in si pridobilo naziv magistra tehniških znanosti (s področja cest in prometa).

V 70-letnem obdobju je bilo na gradbeništvu opravljenih 44 disertacij, in sicer 4 na hidrotehnični, 27 na konstrukcijski, 11 na prometni in 2 na komunalni smeri. V organizacijskem smislu se je študij na gradbeništvu obogatil še za eno smer: l. 1974 je z geodetskega oddelka prešel na gradbeništvu komunalni odsek oz. Inštitut za komunalno gospodarstvo. Odslej so bile na oddelku za gradbeništvu 4 smeri: H, K, P in Km. V zadnjem desetletju pa prerašča Katedra za operativno gradbeništvu v peto samostojno Organizacijsko – tehnološko smer. Po pedagoško-raziskovalni plati je organizacijska struktura nekoliko drugačna, detajlirana na katedre oz. inštitute (glej shemo).

Intenzivnejše raziskovalno delo se je, razen na hidrotehnični smeri, ki je to dejavnost gojila že pred vojno, začelo organizirano razvijati v šestdesetih letih. Raziskave so bile v glavnem interne in za redke zunanje naročnike. Z ustanovitvijo Raziskovalne skupnosti Slovenije (RSS) ter tedanjih Področnih in kasneje Posebnih raziskovalnih skupnosti (PORS) se je raziskovalno delo na Oddelku za gradbeništvu opravljal vse bolj sistematično. Sredstva, ki so prihajala od raziskovalnih nalog, so vse bolj pokrivala primanjkljaj s strani družbe, ki je bil z vsakim letom večji. Tako živi zadnja leta oddelk že v pretežni večini od svojega raziskovalnega in strokovnega dela. Nekatere katedre, ki predstavljajo učno bazo visokošolskega študija, so se preimenovali v inštitute, da bi mogle opravičiti in intenzivneje opravljati raziskovalno dejavnost ter pridobivati dodatna sredstva za preživetje. Tako je bil že l. 1961 ustanovljen Prometnotehniški inštitut, l. 1970 laboratorij za mehaniko tal, 1971 Računski center FAGG oz. Inštitut za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo ter končno še Konstrukcijsko-prometni laboratorij (1984).

V pomoč raziskovalnemu delu je RSS začela štipendirati mlade raziskovalce in stažiste, katerih prvenstvena naloga je opraviti podiplomski študij in iz katerih naj bi se rekrutiral bodoči pedagoško-raziskovalni kader. Praksa sprejemanja mladih raziskovalcev sega v l. 1985 in se jih je do konca l. 1989 zvrstilo 41.

Pedagoško raziskovalne enote



SKLEP

Tako kot je bilo v začetku tega pisanja imenovanih pet zaslužnih mož, začetnikov gradbeniškega študija v Ljubljani, naj se dokaj površen prerez o njegovem 70-letnem delu tudi konča. Gradbeniki so doslej predlagali ljubljanski univerzi zopet pet svojih nekdanjih profesorjev, ki so si s svojim delom prislužili častni naziv »zaslužnega profesorja«:

prof. dr. Milan Goljevšček, 1979,
 akad. prof. dr. Lujo Šuklje, 1979,
 prof. dr. Branko Žnideršič, 1981,
 prof. dr. Ervin Prelog, 1987 in
 prof. dr. Janko Bleiweis, 1989.

Verjamem in prepričan sem, da smem v njihovem imenu, ko so našemu slovenskemu gradbeništvu dali na pedagoškem, znanstvenem in organizacijskem področju nesebično vse, kar so mogli, izraziti njihovo skrito misel in željo: Naj se študij gradbeništvu še naprej razvija vsaj tako kot doslej, v korist vsem našim ljudem in še posebej v korist stroki, kateri smo se zapisali.

Seznam predavanj za zim. sem. 1945/46, Ljubljana.

R. Jenko, Štirideset let gradbenega oddelka na univerzi v Ljubljani, Gradbeniški zbornik, Ljubljana, 1959.

F. Zwitter, Višje šolstvo na Slovenskem do leta 1918, Petdeset let slovenske univerze v Ljubljani, Ljubljana, 1969.

M. Mikuž, Gradivo za zgodovino univerze v letih 1919–1945 (idem).

M. Marinček, E. Kovačič in J. Gspan, Gradbeništvo (idem).

Srečanje na FAGG, Ljubljana, 1972.

V. Melik, Pregled razvoja univerze, Univerza v Ljubljani ob tridesetletnici osvoboditve 1945-1975.

FAGG – ob tridesetletnici osvoboditve, Ljubljana, 1975.

The University of Ljubljana, Ljubljana, 1978. 1919/1979 – Ob šestdesetletnici visokošolskega študija arhitekture, gradbeništva in geodezije, Ljubljana, 1979.

J. Duhovnik, F. Košir, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, Zbornik Ljubljanske univerze, Ljubljana, 1989.

FAGG 1979–1989 (GG), Jubilejni zbornik ob sedemdesetletnici UEK in FAGG, Ljubljana, 1989.

PREGLED RAZISKAV VPLIVA LEZENJA NA KONSOLIDACIJO ZEMLJIN

UDK 624.131.5:31

BOJAN MAJES, LUJO ŠUKLJE

POVZETEK

Pregled obsega raziskave članov in sodelavcev Katedre za mehaniko tal Univerze v Ljubljani, opravljene v času od leta 1957 do 1990 na področju konsolidacije zemljin posebej glede na viskozne lastnosti in na nelinearnost reoloških in prepustnostnih sovisnosti. Dodan je seznam publikacij, ki prikazujejo metode in dosežke raziskav.

REVIEW OF INVESTIGATIONS CONCERNING CREEP EFFECTS ON CONSOLIDATION OF SOILS

SUMMARY

This review concerns the investigations of members and cooperators of the Chair of Soil Mechanics at the Civil Engineering Department of the University in Ljubljana, elaborated in the field of the consolidation of soils with special regard to viscous properties and to the non-linearity of rheological and permeability relationships. A list of publications is added presenting the methods and achievements of investigations.

Avtorja:

Bojan Majes, dr., dipl. gradb. inž., višji predavatelj
Lujko Šuklje, dr., dipl. gradb. inž., zaslužni profesor, redni član SAZU

Povečanju obtežbe se zemljine ne odzovejo hipno. Prehod v novo deformacijsko stanje zavlačujeta hidravlični upor izcejanju porne vode in zraka ter strukturni upor zemljinkega ogrodja. Potek konsolidacije, to je razvoj novega deformacijskega stanja, lahko z računom napo-

vemo tako, da rešujemo difuzijsko enačbo ob upoštevanju ravnovesnih enačb in reoloških sovisnosti zemljin, ki izražajo razmerja med napetostmi, deformacijami in njihovimi hitrostmi.

Že leta 1957 je Šuklje predlagal, da se ta razmerja pri linearno deformacijskih problemih izražajo po podatkih edometrijskih preiskav z družino izotah, to je sovisnic med efektivnimi normalnimi napetostmi (σ') in koeficienti por (e), ustrežajočih izbranim hitrostim (\dot{e}):

$$e = e(\sigma', \dot{e}) = [e(\sigma')]_{\dot{e} = \text{const.}} \quad (1)$$

Pokazal je pot, kako lahko z uporabo izotah za homogen sloj poljubne debeline (h) ob privzetkih, da je obtežba površja (q) brezkraino široka in enakomerna, da je koeficient prepustnosti (k) konstanten, da je zemljina zasičena in da so izohrone parabolične, izvedemo po iterativnem polgrafičnem, polanalitičnem postopku konsolidacijsko črto $e = e(t)$ in njej ustrezne izohrone $u = [u(z)]_{t = \text{const.}}$

Analogen postopek je bil uporabljen tudi za nepopolno zasičene zemljine (Šuklje, 1964 oz. 1966) s tem, da sta bila poleg difuzijske enačbe in družine izotah upoštevana še Boyle-Mariottov zakon o stanju plina in Henryjev zakon o topljivosti zraka v vodi.

Leta 1968 (Šuklje in Kogovšek) je bil grafično-analitični postopek prikrojen za numerično analizo konsolidacije v pogojih linearnih deformacijskih stanj in bodisi aksialne ali radialne ali kombinirane filtracije. Za rešitev difuzijske enačbe:

$$\frac{\delta e}{\delta t} = \frac{(1+e)}{\gamma_w} \left\{ k_r(e) \left[\frac{\delta^2 u}{\delta r^2} + \frac{1}{r} \frac{\delta u}{\delta r} \right] + k_z(e) \frac{\delta^2 u}{\delta z^2} \right\} \quad (2)$$

je bila uporabljena diferenčna metoda. Aplikacija postopka na homogen sloj enakomerne debeline (h), obremenjen z brezkraino široko obtežbo (q), popolno ali nepopolno zasičen, dreniran proti zgornji in/ali spodnji horizontalni mejni ravnini ali (in) radialno proti vertikalni valjasti drenaži (Šuklje, 1969; Šuklje in Simončič, 1972; Šuklje in Kozak, 1972 in 1974) je privedla do naslednjih splošnih sklepov (glej Šuklje, 1979):

(a) Pri isti vrednosti količnika t/h^2 (t je čas po začetku obremenitve, h je debelina sloja), je razmerje ($\Delta u/\Delta \sigma$) med največjim presežnim pornim tlakom Δu in porastom totalnega tlaka $\Delta \sigma$ tem manjše, čim tanjši je sloj in čim manjša je stopnja zasičenosti – pri enaki poroznosti e_a in enaki obremenitveni stopnji q ter ob pogoju, da je čas t_p obremenjevanja sorazmeren h^2 .

(b) Pri nepopolni zasičenosti naraščajo presežni porni tlaki prek časa t_p konca obremenjevanja; zaostanek maksimalnih pornih tlakov je tem daljši, čim manjša je stopnja zasičenosti. Pri polni zasičenosti zaostanka ni.

(c) Pri enaki debelini sloja in pri enaki stopnji zasičenosti je razmerje $\Delta u/\Delta \sigma$ presežnega pornega tlaka Δu proti

porastu $\Delta \sigma$ totalnega tlaka tem manjše, čim manjši je porast $\Delta \sigma$.

(č) Pri enakem obremenitvenem intervalu $\Delta \sigma = \Delta q$ in enakem končnem totalnem tlaku težijo konsolidacijske črte $e = e(t)$ k istim asimptotskim črtam sekundarne konsolidacije ne glede na to, kakšen je začetni koeficient por e_a in kolikšna je stopnja zasičenosti.

(d) Čim manjši je – pri istem efektivnem tlaku σ' – količnik por e (to je, čim večja je začetna gostota zemljine zaradi učinka predhodne sekundarne konsolidacije), tem manjši so – pri enakem obtežnem koraku $\Delta \sigma$ – presežni porni tlaki in tem počasnejša je konsolidacija.

Leta 1975 (Šuklje in Majes) so raziskave prešle na področje ravninsko deformacijskih problemov z omejitvijo, da so bila najprej brez upoštevanja konsolidacije analizirana polja totalnih napetosti in deformacij v temeljnih tleh v nedreniranih in dreniranih pogojih (z metodo končnih elementov), potem pa je bila glede na tak razvoj totalnih napetostnih stanj analizirana faza primarne konsolidacije po diferenčni metodi (Šuklje in Kovačič, 1978; Šuklje, 1978). Pri teh raziskavah so bile uporabljene reološke sovisnosti, določene s triosnimi preizkusi na valjastih vzorcih. Izražene so bile s sovisnicami med oktaedriskimi vrednostmi deformacij in napetosti ter časom v obliki:

$$\varepsilon^o = \varepsilon_0^o + \beta_0 \ln(t^*/t_0) \quad (3)$$

$$\gamma^o = \gamma_0^o + \beta_\gamma \ln(t^*/t_0), \quad (4)$$

kasneje (Šuklje, 1978) pa v splošnejši obliki:

$$\varepsilon^o = \varepsilon_0^o + \varepsilon_K [1 - (t^*/t_0)^m] \quad (5)$$

$$\gamma^o = \gamma_0^o + \gamma_K [1 - (t^*/t_0)^n]. \quad (6)$$

Deformacijski parametri, ki nastopajo v enačbah (3) do (6), so vsi funkcije napetostnega stanja, izraženega z oktaedriskima vrednostima efektivnih napetosti:

$$\sigma^o = 1/3 (\sigma_1' + 2\sigma_3') \quad (7)$$

$$\tau^o = \sqrt{2}/3 (\sigma_1' - \sigma_3'). \quad (8)$$

Z reološkimi sovisnostmi (5) in (6) je bila leta 1982 (Saje, Kovačič in Šuklje) razvita hkratna rešitev difuzijske in ravnovesnih enačb za nelinearna viskozna tla. Za numerično reševanje ravninskih deformacijskih problemov je bila uporabljena metoda končnih elementov ter izdelan računalniški program VISOIL (Kovačič in Saje, 1982). V tej rešitvi so bili reološki odnosi tolmačeni po modelu zaporedne povezave nelinearne Hookove vzmeti in nelinearnega Kelvinovega telesa. Tako niso mogli biti zajeti vplivi predhodne sekundarne konsolidacije na dispacijo presežnih pornih tlakov. Rešitev difuzijske in ravnovesnih enačb je morala biti omejena na primere, ko je začetni strukturni viskozni odpor ničen ali zanemarljivo majhen

(Saje in Šuklje, 1984; Saje in Majes, 1984; Kovačič in Majes, 1985).

Alternativna rešitev difuzijske in ravnovesnih enačb za nelinearne viskozne zemljine (Šuklje, Majes in Kovačič, 1985; Majes, 1985; Majes, Kovačič in Šuklje, 1986), v kateri so bile reološke sovisnosti po sistemu deformacijskih izotah tolmačene po nelinearnem Kelvinovem modelu, je omogočila napoved deformacij in presežnih pornih tlakov tudi v primerih, ko je začetni strukturni viskozni odpor pomemben.

Diferencialne ravnovesne in difuzijske enačbe so bile prirojene metodi končnih elementov ob upoštevanju načela efektivnih napetosti, Darcyjevega zakona in reoloških sovisnosti, izraženih z družinami deformacijskih izotah. Uporabljamo jih v naslednji matrični obliki:

$$\begin{bmatrix} [K]_i & - [L]_i^T \\ - [L]_i & - \Delta t_i / 2 [M]_i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\Delta U\}_i \\ \{\Delta \Pi\}_i \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{\Delta P\}_i \\ \Delta t_i [M]_i \{\Pi\}_{i-1} \end{Bmatrix} \quad (9)$$

Za nelinearne reološke sovisnosti zemljin, podane z družinama deformacijskih izotah, moramo sistem enačb (9) v vsakem časovnem koraku Δt_i , v katerem odnose med napetostmi in deformacijami lineariziramo, rešiti iterativno. Matrike $[K]$, $[L]$ in $[M]$ so simetrične matrike, odvisne od geometrije polja končnih elementov. Matrika $[K]$ je odvisna tudi od konstitucijske matrike, matrika $[M]$ pa od matrike koeficientov prepustnosti. Vektor $\{\Delta P\}$ je odvisen od prirastkov volumenskih in površinskih obtežb, $\{\Delta U\}$ in $\{\Delta \Pi\}$ pa sta vektorja neznanih prirastkov vzdolžnih vrednosti premikov in upadkov presežnih pornih tlakov v ogliščih končnih elementov.

Za hkratno rešitev difuzijske in ravnovesnih enačb po metodi končnih elementov je bil pripravljen računalniški program MASUKO (Kovačič in Majes, 1984). V pozni fazi primarne konsolidacije, ko se presežni porni tlaki približajo nični vrednosti, in v sekundarni fazi konsolidacije s programom MASUKO ne moremo izračunati nadaljnjega časovnega razvoja deformacij v temeljnih tleh. Ob privzetku, da se napetostna stanja v tleh med sekundarno fazo konsolidacije s časom ne spreminjajo, deformacije pa so odvisne od sprememb deformacijskih hitrosti, lahko v sekundarni fazi konsolidacije prirastke deformacij zaradi lezenja izračunamo po enačbi:

$$\Delta \epsilon_{ij} = \{ \dot{\gamma}^o / (2\tau^o) \} \sigma_{ij}^d + \dot{\epsilon}^o \delta_{ij} \Delta t. \quad (10)$$

V enačbi (10) pomenijo: σ_{ij}^d deviator napetosti, σ^o in τ^o oktaedrske napetosti v posameznih točkah mreže končnih elementov ob koncu primarne faze konsolidacije. Proces konsolidacije je končan, ko se deformacijske hitrosti približajo nični vrednosti. Aproximativno lahko izračunamo prirastke premikov v sekundarni fazi konsolidacije iz prirastkov specifičnih deformacij po enačbah:

$$u_x = u_{x_0} + \sum_{x_0}^x (\Delta \epsilon_{xx} \Delta x) \quad (11)$$

$$u_y = u_{y_0} + \sum_{y_0}^y (\Delta \epsilon_{yy} \Delta y). \quad (12)$$

V ravninsko deformacijskih pogojih so bili s programom MASUKO raziskani vplivi posameznih viskoznoznostnih parametrov na časovni razvoj deformacij in presežnih pornih tlakov (Majes, Kovačič in Šuklje, 1986; Šuklje in Majes, 1989), vpliv diskontinuitet ob kontaktih zemljin z zelo različnimi lastnostmi (Majes, Kovačič in Šuklje, 1985), vpliv armiranja površja temeljnih tal pod cestnimi nasipi (Majes in Battelino, 1985; Majes, Logar in Battelino, 1989) in vpliv premikov togega zidu na aktivne ali pasivne pritiske viskozni malo prepustni zemljin (Majes in Šuklje, 1989).

V disertaciji Majesa (1990) je prikazana analogna hkratna rešitev difuzijske enačbe in ravnovesnih enačb tudi v osnosimetričnih pogojih. Za numerično analizo po metodi končnih elementov je bil pripravljen računalniški program OSA (Logar in Majes, 1989).

Navedene aplikacije programov VISOIL, MASUKO in OSA omogočajo naslednje sklepe:

(e) S hkratno rešitvijo difuzijske in ravnovesnih enačb za nelinearne viskozne zasičene zemljine smo uspeli pripraviti postopek, ki omogoča usklajeno istočasno napoved deformacij in varnosti temeljnih tal, obremenjenih z nasipi, omogoča pa tudi študijo prenosa obtežbe preko vertikalno obremenjenih kolov v boljša tla.

(f) V primerih, ko je deformabilnost stikajočih se medijev različne velikostne stopnje, je vstavitve umišljenega (v določenih primerih stvarnega) kontaktnega pasu tankoslojnih elementov priporočljiva, pogosto tudi nujna. Na ta način dobimo verjetnejšo sliko o spremembah v temeljnih tleh pod naraščajočo obtežbo in zanesljivejšo osnovo za določitev mejne in dopustne obtežbe.

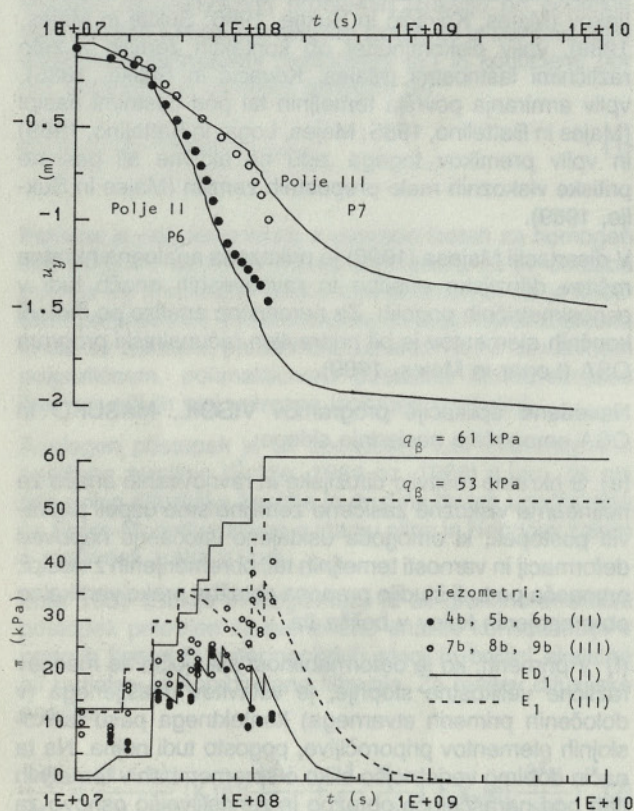
(g) Pri gradnji nasipov na zelo deformabilnih tleh je armiranje površja temeljnih tal priporočljivo. Koristnost se kaže v večji varnosti proti porušitvi temeljnih tal, v zmanjšanju bočnih deformacij, v delnem zmanjšanju končnih posedkov temeljnih tal, pa tudi v hitrejši gradnji nasipov.

(h) Velikost in razporeditev zemeljskih pritiskov na toge podporne (aktivni zemeljski pritiski) ali razporne konstrukcije (pasivni zemeljski pritiski) je zelo odvisna od načina in velikosti možnega odmika ali primika toge konstrukcije. Pomemben vpliv na razvoj zemeljskih pritiskov imajo poleg trdnostnih parametrov tudi deformacijski, viskozni in prepustnostni parametri zemljine.

(i) Študije vpliva predhodne sekundarne konsolidacije na razvoj presežnih pornih tlakov in posedkov v ravninsko deformacijskih pogojih so pokazale podobne rezultate in sklepe, kot so jih pokazale raziskave v linearno deformacijskih pogojih, popisane pod točkami (b), (č) in (d).

Leta 1989 (Šuklje in Majes) in 1990 (Majes) je bil izvrednoten časovni potek posedkov in presežnih pornih tlakov pod poizkusnim nasipom, ki je bil zgrajen v trasi južne ljubljanske obvoznice v obdobju 1982–85. Rezultati računskih analiz so bili primerjani s terenskimi meritvami

presežnih pornih tlakov in posedkov nasipa. Kljub nepopolnosti razpoložljivih eksperimentalnih podatkov in kljub veliki deformabilnosti barjanskih tal, ko postaja upravičeno uporabe teorije majhnih deformacij dvomljiva, je skladnost med računskimi rezultati in izmerki dobra (slika 1).



Izvedene računske analize so pokazale, da bi bilo potrebno v nadaljnjih raziskavah konsolidacije nelinearnih, zelo deformabilnih viskoznih zasičenih zemljin večjo pozornost posvetiti eksperimentalnemu terenskemu in laboratorijskemu delu. Reološke sovisnosti takšnih zemljin bi bilo potrebno določevati za osnosimetrične probleme v triosnih aparatih na valjastih vzorcih, za ravninske in prostorske probleme pa v biaksialnih oziroma v pravih triosnih aparatih na prizmatičnih vzorcih. Raziskati bi bilo potrebno tudi vpliv napetostnih poti (naraščanje in upadanje) na deformacijske in viskozne parametre zemljin kakor tudi različnost koeficientov prepustnosti v vertikalni in vodoravni smeri. Na teoretičnem področju bo treba pripraviti računalniški program, ki bi v hkratni analizi difuzijske in ravnovesnih enačb upošteval tudi velike deformacije. Teoretične osnove za to so podane (Majes, 1990).

Slika 1. Poizkusni nasip na barjanskih tleh: drenirano polje II in nedrenirano polje III; primerjava rezultatov računskih analiz (črte) z izmerki (krožci).

1.a) (zgoraj): Posedki točk P6 in P7 v osi na dnu nasipa

1.b) (spodaj): Presežni porni tlaki v globini 7,5 m

LITERATURA

1. I. Kovačič, M. Saje, VISOIL – program za računanje ravninske konsolidacije viskoznih zemljin, *interno poročilo Katedre za mehaniko*, FAGG, 1982.
2. I. Kovačič, B. Majes, Consolidation of non-homogeneous non-viscous soils at arbitrary plane-strain loading and boundary conditions, *Acta Geotechnica*, Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani, No. 90, str. 1–29, 1985.
3. B. Majes, D. Battelino, Effect of surface reinforcing of soft soils, *Proc. XIth Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, San Francisco, 1985, Vol. 3, str. 1729–1734, 1985.
4. B. Majes, Hkratna analiza deformacij in stabilnosti tal v ravninsko deformacijskih pogojih, *magistrska naloga*, Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani, FAGG, Ljubljana, 1985.
5. B. Majes, I. Kovačič, L. Šuklje, Consideration of displacements along contacts of different media, *Acta Geotechnica*, Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani, No. 91, str. 1–21, 1985.
6. B. Majes, I. Kovačič, L. Šuklje, Numerical analysis of plane-strain consolidation accorded with strain isotaches, *Acta Geotechnica*, Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani, No. 94, str. 1–43, 1986.
7. B. Majes, L. Šuklje, Ravninska konsolidacija plastovitih zasičenih viskoznih tal, *Kuhljevi dnevi '87*, Preddvor 1987, Slovensko društvo za mehaniko, Zbornik del, str. 53–60, 1987.
8. B. Majes, L. Šuklje, Consolidation and creep effects on earth pressures, *Acta Geotechnica*, Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani, No. 99, str. 1–33, 1989.
9. B. Majes, J. Logar, D. Battelino, Reinforcement of soft soils under road structures, *Acta Geotechnica*, Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani, No. 100, str. 1–17, 1989.
10. B. Majes, Dvodimenzionalna konsolidacija nelinearnih viskoznih zasičenih zemljin, *doktorska disertacija*, Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani, FAGG, Ljubljana, 1990.
11. M. Saje, I. Kovačič, L. Šuklje, Joint solution of diffusion and equilibrium equations for non-linear viscous soils, *Spominski zbornik Antona Kuhlja*, SAZU, str. 339–348, 1982.
12. M. Saje, Consolidation of non-linear viscous soils: Numerical aspects, *Acta Geotechnica*, Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani, No. 82, str. 1–25, 1982.

13. M. Saje, B. Majes, Consolidation of a layer of non-linear viscous soils, *Acta Geotechnica*, Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani, No. 87, str. 1–43, 1984.
14. M. Saje, L. Šuklje, Consolidation effect on bearing capacity of non-linear viscous soils, *Acta Geotechnica*, Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani, No. 86, str. 1–13, 1984.
15. L. Šuklje, The analysis of the consolidations process by the isotache method, *Proc. 4th ICSMFE*, Vol. 1, str. 200–206, Vol. 3, str. 116–119, London, 1957.
16. L. Šuklje, B. Kogovšek, Isochrones of a uniformly loaded layer of viscous soils, *III. Sesja Naukova Wydziału Budownictwa Ladovego Politechniki Wroclawskiej*, Referaty I, str. 369–380, 1968.
17. L. Šuklje, Rheological aspects of soil mechanics, *Wiley-Interscience*, 571 strani, London, 1969.
18. L. Šuklje, M. Simončič, The use of isotaches in the numerical analysis of radial consolidation, *Acta Geotechnica*, Univerza v Ljubljani, No. 41, str. 1–57, 1972.
19. L. Šuklje, J. Kozak, Consolidation of partly saturated viscous soils, *Acta Geotechnica*, Univerza v Ljubljani, No. 54, str. 1–20, 1974.
20. L. Šuklje, I. Kovačič, The role of the effective stress speed in the consolidation analysis, *Proc. 8th Danube European Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, Bled, 1974, Vol. 1, str. 223–240, 1974.
21. L. Šuklje, B. Majes, Development of displacements in a non-linear viscous plane-strain space, *Acta Geotechnica*, Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani, No. 58, str. 1–13, 1975.
22. L. Šuklje, Non-linear viscous soil behaviour, Limit analysis and rheological approach in soil mechanics, *CISM Courses and lectures*, No. 217, Springer Verlag, Wien – New York, str. 167–292, 1978.
23. L. Šuklje, Stresses and strains in non-linear viscous soils, *Int. J. Num. Anal. Methods in Geomechanics*, Vol. 2, str. 129–158, 1978.
24. L. Šuklje, Zemljina kot nelinearno Kelvinovo telo, *Saopćenja XIV. savjetovanja Jugoslovenskog društva za mehaniku tla i fundiranje*, Sarajevo, 1978, str. 359–382, 1978.
25. L. Šuklje, I. Kovačič, Consolidation of drained multilayer viscous soils, *Evaluation and prediction of subsidence* (International conference, Pensacola Beach, 1978), American Society of Civil Engineers, str. 373–383, New York, 1979.
26. L. Šuklje, *Mehanika tal*, Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani, 360 str., Ljubljana, 1984.
27. L. Šuklje, B. Majes, I. Kovačič, Previous secondary consolidation in a soil model, Report of ISSMFE Subcommittee on constitutive laws of soils and proceedings of discussion session 1.A, *IX. ICSMFE*, San Francisco, str. 168–171, 1985.
28. L. Šuklje, B. Majes, Consolidation and creep of soils in plane-strain conditions, *Géotechnique*, Vol. 39, No. 2, str. 231–250, 1989.
29. L. Šuklje, B. Majes, Discussion on Consolidation and creep of soils in plane-strain conditions, *Acta Geotechnica*, Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani, No. 98-b, str. 1–6, 1989.
30. L. Šuklje, Consolidation of viscous soils subjected to continuously increasing uniform load, Ponatisnjeno iz New advances in soil mechanics, Československá vedeckotechnická společnost stavební, Praha 1969, I: 199–235, *Acta Geotechnica*, Univerza v Ljubljani, No. 34, 1971.
31. L. Šuklje, J. Kozak, Radially symmetric space consolidation of saturated viscous soils, *Acta Geotechnica*, Univerza v Ljubljani, No. 42, 1972.
32. L. Šuklje, On some controversial effects of the viscous structural resistance of soils, English version of the paper »O nekim spornim efektima viskoznostrukturnog otpora tla«, *Savetovanje »Specialna poglavlja iz mehanike tla i fundiranja«*, Savez gradj. inž. i tehn. SR Srbije, Cavtat, 1979, str. 1–24, *Acta Geotechnica*, Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani, No. 84, 1982.
33. L. Šuklje, S. Srpčić, Incremental matrix form of an elastic viscoplastic model for soils, *Reologia gruntów i skal* (Prace Naukowe Instytutu Geotechniki Politechniki Wroclawskiej 32, Seria: Konferencije 13), Wroclaw, 1980.

POTRESNOVARNO PROJEKTIRANJE OBJEKTOV VISOKE GRADNJE

Raziskovalno in razvojno delo v IKPIRu

UDK 624.9:699.841

PETER FAJFAR, MATEJ FISCHINGER

POVZETEK

V članku je podan pregled dela raziskovalne skupine, ki se v **IKPIR FAGG** zadnjih dvajset let ukvarja z raziskovalnim, razvojnim in strokovnim delom na področju potresnovarnega projektiranja stavb. Raziskave so se nanašale predvsem na probleme linearne in nelinearne analize stavb ter na probleme v zvezi s predpisi. Priložen je spisek izbranih objavljenih del v domači in tuji strokovni literaturi.

EARTHQUAKE RESISTANT DESIGN OF BUILDINGS
Research and development in IKPIR

SUMMARY

An overview of the work of the research team in **IKPIR**, which has been for the last twenty years involved in research, development and consulting work in the field of earthquake resistant design of buildings, is given in the paper. Research has been mainly concentrated on linear and nonlinear analyses as well as on problems connected with aseismic codes. A list of selected references in national and international professional literature is presented.

UVOD

Na področju Jugoslavije v štiridesetih in petdesetih letih tega stoletja ni bilo večjih potresov, zato ni čudno, da večina odgovornih strokovnjakov v tem obdobju ni posvečala ustrezne pozornosti potresni varnosti gradbenih objektov. Začasni tehnični predpisi (**PTP**), ki so izšli leta 1948, so za projektiranje masivnih konstrukcij v območjih, kjer so se v zgodovini zgodili potresi s katastrofalnimi posledicami, predvidevali minimalno horizontalno obtežbo v velikosti 2 % teže objekta. V Sloveniji so bili na srečo posamezni strokovnjaki, ki so spremljali dogajanje v svetu in ki so se zavedali, da tako nizka horizontalna obtežba ne more omogočiti zadostne potresne odpornosti. Januarja 1962, približno v istem času, kot je prišlo do prvega večjega povojnega potresa v Jugoslaviji v okolici Makarske, se je pričela v Sloveniji organizirana akcija, ki je privedla do izdaje prvih sodobnih predpisov za gradnjo na potresnih območjih. Ti predpisi so bili najprej objavljeni v publikaciji [1] skupaj z obrazložitvijo in navodili za račun, nato pa tudi kot odredba v Uradnem listu [2]. Za račun

potresne obremenitve je bila po teh predpisih uvedena tako imenovana modalna analiza, ki temelji na dinamiki konstrukcij. Samo dober mesec dni po izidu novih slovenskih predpisov je julija 1963 prišlo do katastrofalnega potresa v Skopju, ki je nazorno demonstriral neustreznost jugoslovanskih predpisov. Po tem potresu so bili slovenski predpisi z manjšimi korekturami sprejeti kot jugoslovanski predpisi za gradnjo na potresnih območjih.

TedANJI predpisi so v precejšnji meri odražali spoznanja, dostopna v tistem času. V skoraj treh desetletjih, ki so sledila, se je naše vedenje o potresnovarni gradnji na podlagi izkušenj, pridobljenih v številnih potresih, in na podlagi rezultatov teoretičnih in eksperimentalnih raziskav seveda bistveno izpopolnilo. Pomembno vlogo pri tem so odigrali računalniki, saj so omogočili numerične simulacije obnašanja konstrukcij med potresi s pomočjo dinamičnih analiz, ki so bile prej mogoče le v omejenem obsegu za najenostavnejše konstrukcije. Nastanek Računskega centra **FAGG**, ki je pozneje prerasel v Inštitut za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo (**IKPIR**) v okviru gradbenega oddelka **FAGG**, se ujema s pričetkom intenzivne uporabe računalnikov pri nas. Sodelavci **IKPIR**-a so se od vsega začetka ukvarjali z raziskovalnim, razvojnim in strokovnim delom na področju potresnovarnega projektiranja stavb, pri čemer so razvijali in uvajali moderne metode računa z računalniki. Danes deluje v sklopu **IKPIR**-a raziskovalna skupina, ki je z rezultati svojih

Avtorja:
Peter Fajfar, dr., dipl. gradb. inž., redni profesor, dopisni član SAZU
Matej Fischinger, dr., dipl. gradb. inž., docent

raziskav na tem področju dosegla mednarodni ugled. V tem članku, ki je napisan za posebno številko Gradbenega vestnika ob 70-letnici **FAGG**, so na kratko opisani najvažnejši rezultati raziskovalne skupine.

LINEARNA ANALIZA

Objekti visokogradnje imajo običajno precej zahtevne konstrukcijske sisteme. Za njihovo analizo je potrebno izbrati računske modele, ki so sposobni zajeti najpomembnejše značilnosti obnašanja konstrukcij, obenem pa omogočajo čim bolj enostaven in pregleden račun. Pri horizontalni obtežbi je za večji del konstrukcij stavb najbolj primeren tako imenovan psevdo-tridimenzionalni model, kjer so upoštevane naslednje predpostavke, značilne za objekte visokogradnje:

- Konstrukcija je sestavljena iz posameznih makroelementov (podkonstrukcij), ki so med seboj povezani z medetažnimi (stropnimi) ploščami.
- Stropne plošče so neskončno toge v svoji (horizontalni) ravnini in nimajo togosti pravokotno na to ravnino.
- Mase in horizontalna obtežba so koncentrirani v višini stropnih plošč.
- Bistvene prostostne stopnje so horizontalni pomiki in torzijski zasuki v višini stropnih plošč.

Navedene predpostavke vodijo do razmeroma enostavnega in učinkovitega modela, ki se je v zadnjih dvajsetih letih uveljavil po vsem svetu. Pri tem je praviloma uporabljena dodatna predpostavka

- velja materialna in geometrijska linearnost, ki bo kritično ocenjena na koncu tega poglavja.

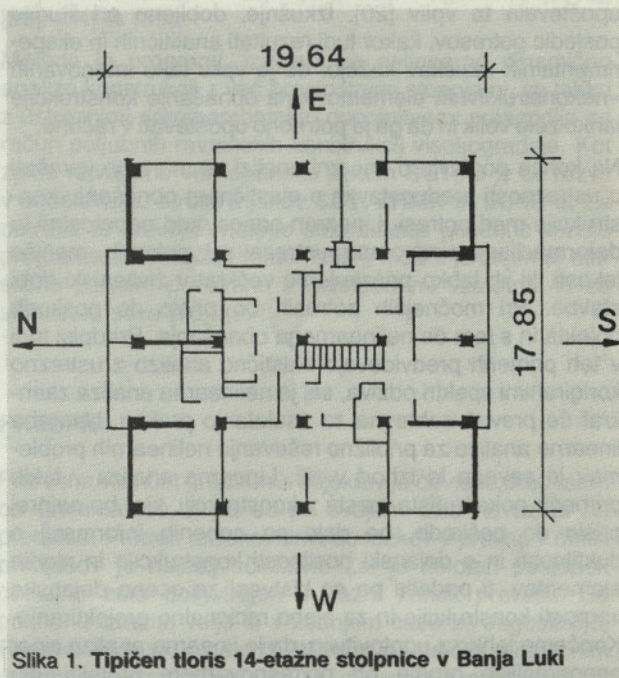
Kljub sorazmerni enostavnosti modela je za njegovo analizo, razen v najenostavnejših primerih, potreben računalnik. Računski model in ustrezni računalniški programi so se pri nas razvijali vzporedno z razvojem v svetu. Prva objava sodelavcev **IKPIR-a** s tega področja se je pojavila leta 1969 [3]. Leta 1971 sta bila izdelana metoda računa in program [4], ki sta bila omejena na ravninske konstrukcije. V letu 1972 je bil dokončan program **DAVEK** [5] (Dinamična analiza večetažnih konstrukcij), ki je omogočil analizo ravninskih in prostorskih večetažnih konstrukcij ob uporabi psevdo-tridimenzionalnega modela. Rezultati dela so bili na kratko povzeti v članku, ki je bil objavljen v nemški reviji *Die Bautechnik* [6].

Rezultat nadaljnjih raziskav je bila razširitev metode na račun časovnega odziva in elastične stabilnosti. Uvedena je bila tudi možnost upoštevanja teorije 2. reda [7], [8]. Na podlagi tako dopoljenih teoretičnih osnov je bil izdelan program **EAVEK**, [9] (Elastična analiza večetažnih konstrukcij), ki se je uveljavil predvsem v Sloveniji, deloma pa tudi zunaj nje, kot eden najbolj uspešnih programov za račun konstrukcij. Uporabljen je bil za seizmične analize številnih objektov visokogradnje. Njegova uporabnost se je še posebno razširila s pojavom osebnih računalnikov, ki so omogočili, da so projektanti dobili program na svoje delovno mesto.

Stanje v svetu in pri nas kaže, da je metoda računa,

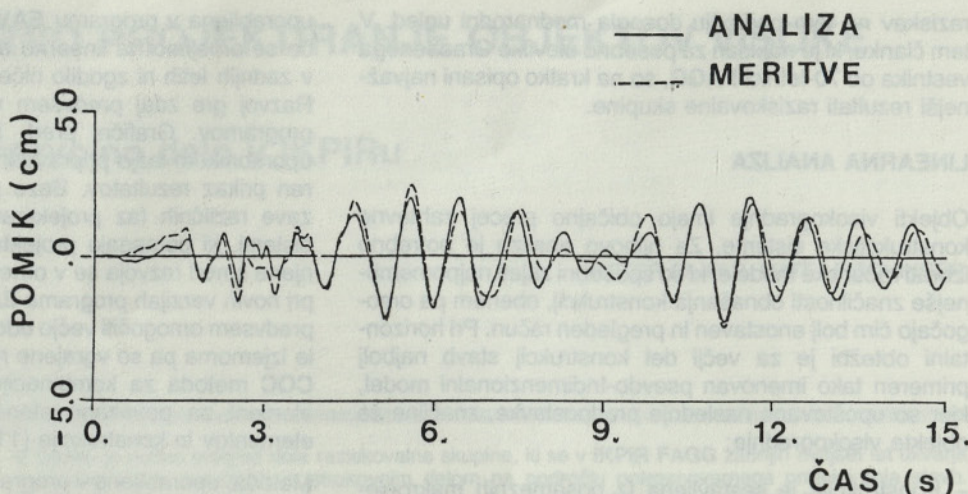
uporabljena v programu **EAVEK** blizu optimalne rešitve, če se omejimo na linearno analizo. Na tem področju se v zadnjih letih ni zgodilo ničesar posebno pomembnega. Razvoj gre zdaj predvsem v smeri večje »prijaznosti« programov. Grafični pred- in poprocesorji omogočajo uporabnikom lažjo pripravo in kontrolo podatkov in nazoren prikaz rezultatov. Baze podatkov omogočajo povezave različnih faz projektiranja. Razvijajo se ekspertni sistemi, ki pomagajo projektantom pri odločitvah. Omejenе smeri razvoja se v omejenem obsegu odražajo tudi pri novih verzijah programa **EAVEK**. Uporabnikom želimo predvsem omogočiti večjo udobnost pri uporabi programa, le izjemoma pa so vgrajene nove teoretične osnove, npr. **CQC** metoda za kombinacijo vpliva nihajnih oblik, nov element za povezane stene [10] in elastična vpetost elementov in konstrukcije [11].

Metoda, uporabljena v programu **EAVEK**, in sam program sta bila verificirana s primerjavo rezultatov analize in meritev na dejanskih objektih. O tem smo poročali v številnih člankih, npr. [12], [13], [14]. Kot primer dobre korelacije prikazujemo časovni potek pomika na vrhu 14-etažne armiranobetonske stolpnice (slika 1), ki je bila zgrajena v Banja Luki po sistemu **IMS**, med potresom v Banja Luki leta 1981 (slika 2). Instrumenti so na stolpnici registrirali časovni potek pospeškov. Konstrukcija se je med potresom obnašala praktično elastično.



Slika 1. Tipičen tloris 14-etažne stolpnice v Banja Luki

Vzporedno z razvojem in verifikacijo programa **EAVEK** se je odvijala v **IKPIR-u** še vrsta raziskav na področju linearne analize objektov visokogradnje. Študirani so bili primeri, ko ena od osnovnih predpostavk metode (neskončna togost stropnih plošč v njihovi ravnini) ni izpolnjena in razvite so bile metode za upoštevanje podajnosti plošč



Slika 2. Časovni potek pomika v E – W smeri na vrhu stolpnice

[15], [16]. Na podlagi kombinirane analitične in eksperimentalne študije je bila predlagana enačba za sodelujočo širino sten T in I preseka [17]. Razvita je bila enostavna metoda za analizo pravih ravninskih konstrukcij v visokogradnji [18]. Sistematično so bile ocenjene razlike med rezultati, ki jih dajeta modalna analiza in račun z ekvivalentno statično obtežbo [19]. V zadnjem času je posebna pozornost posvečena študiju vpliva polnil na armiranobetonske okvire in razvoju praktične metode računa, ki bo upoštevala ta vpliv [20]. Izkušnje, dobljene pri študiju posledic potresov, kakor tudi rezultati analitičnih in eksperimentalnih raziskav kažejo, da je vpliv tako imenovanih »nekonstruktivnih elementov« na obnašanje konstrukcije lahko zelo velik in da ga je potrebno upoštevati v računu.

Na koncu poglavja o linearni analizi se moramo vprašati o ustreznosti predpostavke o elastičnem obnašanju konstrukcije med potresi. Linearen odnos med napetostmi in deformacijami nedvomno ustreza pri potresih manjše jakosti, ki jih lahko pričakujemo večkrat v življenjski dobi stavbe. Pri močnejših potresih bo prišlo do poškodb objekta in s tem do nelinearnega obnašanja. Predpisi tudi v teh primerih predvidevajo elastično analizo z ustreznimi korigiranimi spektri odziva, saj je nelinearna analiza zaenkrat še preveč zahtevna za vsakdanjo prakso. Uporaba linearne analize za približno reševanje nelinearnih problemov je seveda le izhod v sili. Linearna analiza v takih primerih pokaže tista mesta v konstrukciji, kjer bo najprej prišlo do poškodb, ne daje pa nobenih informacij o duktilnosti in o dejanski nosilnosti konstrukcije in njenih elementov, ti podatki pa so bistveni za oceno dejanske varnosti konstrukcije in za njeno racionalno projektiranje. Končamo lahko z ugotovitvijo, da je linearna analiza sicer nepogrešljivo orodje pri potresnovarnem projektiranju stavb, da pa so njene zmogljivosti omejene in da bi bilo za racionalno projektiranje potrebno njene rezultate dopolniti z rezultati nelinearne analize.

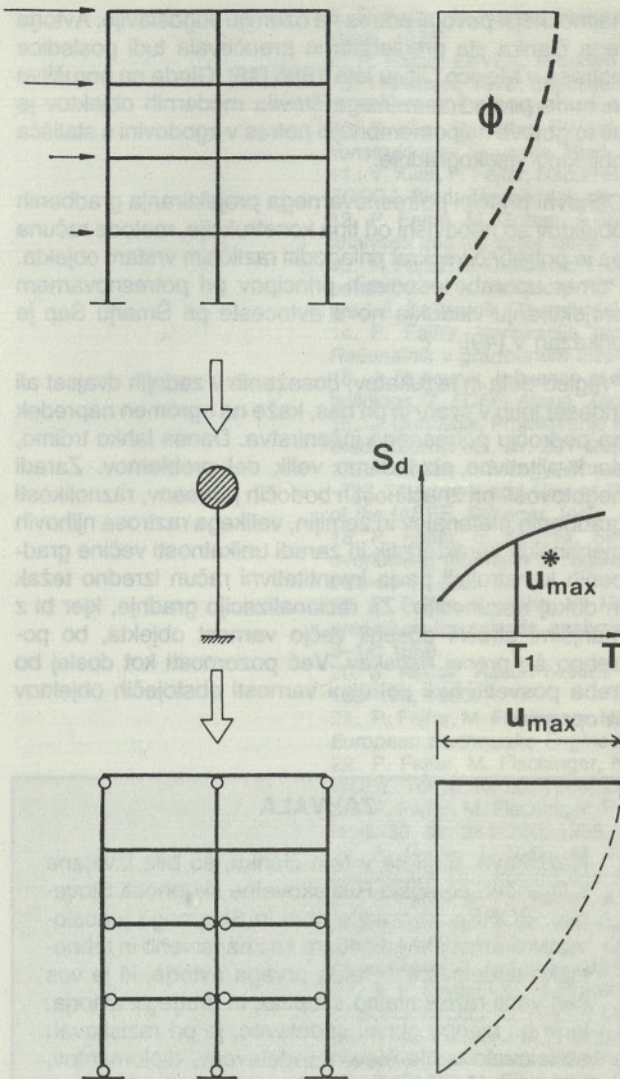
NELINEARNA ANALIZA

Težišče raziskovalnega dela na področju potresnega inženirstva je v IKPIR-u v zadnjih letih usmerjeno v

nelinearno analizo, s katero je mogoče dokaj zanesljivo simulirati dejansko obnašanje konstrukcij med močnimi potresi. Glavni cilj raziskav je razvoj poenostavljene metode računa, ki bo primerna za vsakdanjo prakso. Osnovne ideje metode, ki smo jo imenovali N2 metoda (Nelinearna metoda z dvema računskima modeloma) [21], [22], [23], so v najbolj poenostavljeni obliki, ki jo je mogoče uporabiti za manj toge stavbe, prikazane na sliki 3.

Najprej je treba določiti osnovni nihajni čas konstrukcije T_1 in potek pomikov po višini konstrukcije Φ (npr. statična deformacijska linija zaradi horizontalne obtežbe ali osnovna nihajna oblika). Nato je iz spektra pomikov S_d mogoče dobiti maksimalni pomik ekvivalentne konstrukcije z eno prostostno stopnjo u_{\max}^* . Enostavne empirične enačbe za splošno veljavne spektre so bile dobljene na podlagi obsežnih statističnih študij [24]. Ob upoštevanju predpostavljene oblike pomikov Φ lahko izračunamo maksimalni pomik na vrhu dejanske konstrukcije u_{\max} . Sledi nelinearna statična analiza modela z več prostostnimi stopnjami, pri čemer monotono povečujemo horizontalno obtežbo, dokler ni na vrhu dosežen pomik u_{\max} . Pri regularnih konstrukcijah, ki nihajo pretežno v osnovni nihajni obliki, stanje konstrukcije pri tem pomiku približno ustreza stanju konstrukcije po pričakovanem potresu. Na podlagi primerjave deformacij, do katerih bo prišlo med predvidenim potresom, in maksimalnih deformacij, ki so jih posamezni elementi in celotna konstrukcija sposobni prenesti, je mogoče oceniti varnost konstrukcije in velikostni red poškodb.

Poškodbe, ki se pojavijo pri cikličnem obremenjevanju v neelastičnem področju, so večje od poškodb zaradi monotone obremenitve z isto amplitudo. Vpliv cikličnih deformacij lahko v računu približno zajamemo tako, da pri obremenitvah poleg maksimalnih pomikov upoštevamo tudi energijo, ki med potresom pride v konstrukcijo [21], pri kapaciteti konstrukcije pa zmanjšamo velikost maksimalnih deformacij, ki jih je konstrukcija sposobna prenesti. To je mogoče narediti s tako imenovano ciklično (reducirano) duktilnostjo [25], [26].



Slika 3. Shematičen prikaz N2 metode

N2 metoda omogoča uporabo spektrov odziva v nelinearnem področju. Na ta način je račun omejen na nelinearno statično analizo, izognemo pa se zamudni in zahtevni nelinearni dinamični analizi, pri kateri so rezultati bistveno odvisni od izbranega časovnega poteka pospeškov tal.

Za uspešno izvajanje raziskav pri razvoju poenostavljene N2 metode je potrebno opraviti celo vrsto vzporednih raziskav. Za primerjalne analize je treba imeti na razpolago primerna orodja za nelinearno dinamično analizo konstrukcij. V IKPIR-u smo se odločili, da bomo uporabljali program **DRAIN-2D** [27], razvit na Univerzi v Berkeleyu, pred kratkim pa smo pričeli uporabljati tudi program **IDARC** [28], izdelan na Univerzi v Buffalu. Oba programa, ki sta omejena na konstrukcije v ravnini, je bilo za naše potrebe potrebno predelati in dopolniti. Z našo verzijo programa **DRAIN-2D** smo izvršili številne analize večetažnih armiranobetonskih konstrukcij. Posebej smo se ukvar-

jali s sedemetažno armiranobetonsko stenasto-skeletno stavbo, ki je bila testirana v merilu 1:1 v Tsukubi na Japonskem. Obsežni in kakovostni eksperimentalni rezultati nelinearnega obnašanja te stavbe kakor tudi rezultati spremljajočih testov predstavljajo dragocen material za primerjalne analize. Rezultati naših analiz, ki so pokazali dobro ujemanje globalnega obnašanja in slabše ujemanje nekaterih detajlov odziva, so bili objavljeni med drugim v [21] in [29]. Slabšo korelacijo detajlov je povzročil neustrezen model stene, ki je bila simulirana z nadomestnim linijskim elementom.

Ker v svetu še ne obstaja splošno priznan element za nelinearno analizo sten, smo posebno študijo posvetili temu problemu. Pregledali smo obstoječe modele in kot najbolj primerne izbrali model, sestavljen iz dveh togih prečk zgoraj in spodaj, povezanih z več vertikalnimi vzmetmi in s horizontalno vzmetjo [30], [31]. Ko smo ta element vgradili v program **DRAIN-2D** in ga uporabili za analizo že omenjene stavbe iz Tsukube, smo dosegli dobro korelacijo, ne samo pri globalnem odzivu, pač pa tudi pri vseh detajlih.

Pomemben del raziskav je bil namenjen iskanju splošnoveljavnih neelastičnih spektrov odziva. Pri tem smo izvajali parametrične študije, pri katerih smo spreminjali gibanje tal ter najpomembnejše parametre konstrukcije, ki je bila modelirana kot sistem z eno prostostno stopnjo. Rezultati raziskav so bili sproti objavljeni, med drugim v [24], [32], [33], [34] in [35].

Metode in programi, izdelani za nelinearno dinamično analizo konstrukcij z več prostostnimi stopnjami, se lahko z ustreznimi spremembami in dopolnitvami prilagodijo za račun poljubnih ravninskih konstrukcij visokogradnje. Kot zgled navajamo velikopanelni sistem **SCT**, ki je bil razvit v sodelovanju strokovnjakov **SCT**, **ZRMK** in **IKPIR-a**. Za potrebe te razvojne naloge smo izdelali posebno verzijo programa **DRAIN-2D**. Matematični model je zajemal elastične panele, povezane z nelinearnimi vzmetmi, ki so simulirale stike [36], [37].

PREDPISI

Potresna varnost gradbenih objektov je odvisna predvsem od projektantov, ti pa so pri svojem delu navezani na predpise. Prenos raziskovalnih dosežkov v prakso v obliki predpisov je najbolj učinkovit. Žal je celoten postopek običajno zelo dolgotrajen in fazni zamik prevelik. Še posebno izrazito velja to v zadnjem času za Jugoslavijo. Raziskovalna skupina v **IKPIR-u** si je ves čas z različnim uspehom prizadevala, da bi s svojimi raziskovalnimi rezultati vplivala na izboljšanje predpisov. Največja akcija je bila sprožena ob izdaji jugoslovanskih predpisov o gradnji na potresnih območjih leta 1981. Ob tej priložnosti je bila izdelana kritična analiza predpisov [38] s predlogi za spremembe. Na podlagi te študije so bila leta 1982 spremenjena najspornejša določila predpisov. Publikacija obenem rabi številnim projektantom kot komentar še vedno veljavnih predpisov.

Raziskave v zvezi z našimi in tujimi predpisi potekajo praktično ves čas vzporedno z ostalimi raziskavami. O tem smo občasno poročali v strokovni literaturi, npr. [19], [39], [40]. V zadnjem času smo se posebej posvetili odnosu med obremenitvami in kapaciteto konstrukcij. Ta odnos, pri katerem igrata glavno vlogo duktilnost in dejanska nosilnost konstrukcije, predstavlja osnovo za metodo v predpisih, kjer so nelinearni efekti približno zajeti z redukcijo potresnih sil s pomočjo tako imenovanih redukcijskih faktorjev. Pri tem se je šele v zadnjem času povsem jasno pokazalo, da ima na velikost redukcije sil bistven vpliv dodatna nosilnost konstrukcije, to je razlika med dejansko in računsko nosilnostjo. Samo z upoštevanjem te dodatne nosilnosti je mogoče razložiti dobro obnašanje nekaterih objektov med močnimi potresi in zavreti tendence po zviševanju potresnih sil, ki se pojavljajo pri pripravi nekaterih novih predpisov, predvsem v Evropi (npr. **EUROCODE 8**). Omenjeni problemi so obravnavani v številnih novejših člankih, npr. [42], [43], [44], [45].

SKLEP

V članku je podan zelo kratek pregled skoraj dvajsetletnega dela raziskovalne skupine, ki se v **IKPIR-u** ukvarja s problemi potresnovarne gradnje objektov visokogradnje. Pregled je dopolnjen z izbranimi referencami (navedena je približno tretjina vseh objav). Glavne rezultate raziskav (razen najnovejših) je mogoče najti tudi v knjigi [46], ki kot prva publikacija v jugoslovanskem prostoru kompleksno obravnava obnašanje objektov visokogradnje pri potresni obtežbi.

V tem članku je dan največji poudarek analizi konstrukcij. Pri tem se je treba zavedati, da je korektna analiza potreben, ne pa tudi zadosten pogoj za dobro obnašanje objektov med potresi. Pomemben vpliv imajo tudi zasnova konstrukcije ter dimenzioniranje in konstruiranje. Del naših raziskav je posvečen tudi tem problemom (npr. [38]). Največ izkušenj in novih spoznanj je mogoče dobiti s preučevanjem posledic močnih potresov. Raziskovalci **IKPIR-a** so detajlno študirali obnašanje nekaterih objektov med potresom v Črni gori leta 1979 [47], ki je bil

najmočnejši povojni potres na ozemlju Jugoslavije. Avtorja tega članka sta pregledala in preučevala tudi posledice potresa v Mexico Cityju leta 1985 [48]. Glede na porušitve in hude posledice velikega števila modernih objektov je bil to gotovo najpomembnejši potres v zgodovini s stališča objektov visokogradnje.

Osnovni principi potresnovarnega projektiranja gradbenih objektov so neodvisni od tipa konstrukcije, metode računa pa je potrebno večkrat prilagoditi različnim vrstam objekta. Primer uporabe osnovnih principov pri potresnovarnem projektiranju viadukta nove avtoceste pri Šmarju Sap je prikazan v [49].

Pregled dela in rezultatov, doseženih v zadnjih dvajset ali trideset letih v svetu in pri nas, kaže na ogromen napredek na področju potresnega inženirstva. Danes lahko trdimo, da kvalitativno obvladamo velik del problemov. Zaradi negotovosti pri značilnostih bodočih potresov, raznolikosti gradbenih materialov in zemljin, velikega raztrosa njihovih mehanskih karakteristik in zaradi unikatnosti večine gradbenih konstrukcij pa je kvantitativni račun izredno težak in dokaj nezanesljiv. Za racionalizacijo gradnje, kjer bi z manjšimi stroški dosegli večjo varnost objekta, bo potrebno še precej raziskav. Več pozornosti kot doslej bo treba posvetiti tudi potresni varnosti obstoječih objektov in opreme.

ZAHVALA

Raziskave, našete v tem članku, so bile izvajane s finančno pomočjo Raziskovalne skupnosti Slovenije, PORSa za graditeljstvo in Skupnega jugoslovansko-ameriškega odbora za znanstveno in tehnološko sodelovanje. Poleg prvega avtorja, ki je ves čas vodil raziskovalno skupino, in drugega avtorja, ki je bil njegov glavni sodelavec, je pri raziskavah sodelovalo večje število sodelavcev, diplomantov, magistrandov in doktorandov. Nekateri od njih so navedeni kot avtorji ali soavtorji v spisku literature. Podiplomski študenti so bili v zadnjem času financirani v okviru akcije 2000 mladih raziskovalcev.

LITERATURA

1. Dimenzioniranje gradbenih objektov v potresnih območjih, Zveza gradbenih inženirjev in tehnikov za Slovenijo, Ljubljana, 1962.
2. Odredba o dimenzioniranju in izvedbi gradbenih objektov v potresnih območjih, *Uradni list SRS*, št. 18-147/63, 13. junij 1963.
3. J. Duhovnik, P. Fajfar, Račun konstrukcij z elektronskimi računalniki, *Gradbeni vestnik*, letnik 18, str. 233-236 in 252-260, 1969.
4. E. Prelog, F. Cvetaš. P. Fajfar, Reševanje linijskih konstrukcij z uporabo računalnikov, Univerza v Ljubljani, 1971.
5. P. Fajfar, Analiza horizontalno obteženih nesimetričnih večnadstropnih konstrukcij, *publikacija RC FAGG št. 1*, 103 strani, 1972.
6. P. Fajfar, Beitrag zur dynamischen Berechnung von Hochhäusern, *Die Bautechnik*, Berlin, Vol. 5, str. 175-177, 1973.
7. P. Fajfar, Statika, dinamika in stabilnost večetažnih objektov, *publikacija RC FAGG št. 3*, 96 strani, 1974.

8. P. Fajfar, Numerical analysis of multistory structures, 5. ECEE, Istanbul, Zbornik del, referat 79, 6 strani, 1975.
9. P. Fajfar, EAVEK, Program za elastično analizo večetažnih konstrukcij, publikacija RC FAGG št. 13, 173 strani, 1976; dopolnjena 2. izdaja, 1981; 3. izdaja, 1987; angleška verzija: publikacija IKPIR št. 13A, 1987; Dopolnila in spremembe za verzijo 2.0, publikacija IKPIR št. 31, 1989 (soavtor V. Kilar)
10. V. Kilar, P. Fajfar, EWALL – nov makroelement v programu EAVEK, 11. zborovanje gradbenih konstruktorjev Slovenije, Bled, Zbornik del, str. 216–223, 1989.
11. V. Kilar, P. Fajfar, Račun elastično vpetih objektov visokogradnje s programom EAVEK, 5. kongres ZDSGJ, Bled, Zbornik del, str. 274–279, 1990.
12. P. Fajfar, M. Godec, A comparison of dynamic properties of buildings obtained from numerical analyses and full-scale tests, 7. ECEE, Atene, Zbornik del, Vol. 3, str. 145–154, 1982.
13. P. Fajfar, M. Čaušević, Y. Jiang, Comparison of analytically and experimentally determined dynamic behaviour of a multistory RC building, EUROBUILD 87, Mednarodna konferenca o potresnovarni gradnji, Dubrovnik, Zbornik del, str. 134–139, 1987.
14. P. Fajfar, Verifikacija programa EAVEK s pomočjo primerjave z eksperimenti, 4. seminar Računalnik v gradbenem inženirstvu, Ljubljana, Zbornik del, str. 74–83, 1988.
15. J. Duhovnik, Influence of flexibility of floor slabs on the loading of vertical elements of high-rise buildings, 7. ECEE, Atene, Zbornik del, Vol. 3, 463–470, 1982.
16. J. Duhovnik, Projektiranje togih stropov konstrukcij stavb pri vodoravni obtežbi, 5. kongres ZDSGJ, Bled, Zbornik del, str. 201–206, 1990.
17. P. Fajfar, J. Szilagyi, The effective width of wall elements in buildings, Proceedings of the seminar »Tall Structures and Use of Prestressed Concrete in Hydraulic Structures«, Indian National Group of the IABSE, Srinagar, India, str. 1214–1230, 1984.
18. P. Fajfar, Š. Strojnik, Simplified method for computation of earthquake induced shears and overturning moments in regular multistorey structures, 7. WCEE, Istanbul, Zbornik del, knjiga 5, str. 561–564, 1980.
19. P. Fajfar, Y. Jiang, M. Fischinger, Comparison of modal analysis and equivalent lateral force procedure for seismic analysis of buildings, European Earthquake Engineering, Vol. 2, No. 2, str. 3–14, 1988.
20. J. Reflak, Račun okvirov s polnili v linearnem območju, 5. kongres ZDSGJ, Zbornik del, str. 189–194, 1990.
21. P. Fajfar, M. Fischinger, Non-linear seismic analysis of RC buildings: Implications of a case study, European Earthquake Engineering, Vol. 1, str. 31–43, 1987.
22. P. Fajfar, M. Fischinger, N2 – A method for non-linear seismic analysis of regular buildings, 9. WCEE, Tokyo, Kyoto, 1988, Zbornik del, Vol. V, str. 111–116, Maruzen, Tokyo, 1989.
23. P. Fajfar, M. Fischinger, Prispevek k seizmični analizi armiranobetonskih stavb, Gradbeni vestnik, letnik 36, str. 254–260, 1988.
24. P. Fajfar, T. Vidic, M. Fischinger, Seismic demand in medium- and long-period structures, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 18, No. 8, str. 1133–1144, 1989.
25. P. Fajfar, M. Fischinger, A seismic design procedure including energy concept, 9. ECEE, Moskva, Zbornik del, vol. 2, str. 312–321, 1990.
26. P. Fajfar, M. Fischinger, Odnosi med obremenitvami in kapaciteto konstrukcij pri potresnovarnem projektiranju, 5. kongres ZDSGJ, Bled, Zbornik del, str. 105–111, 1990.
27. A. E. Kanaan, G. H. Powell, DRAIN-2D, A general purpose computer program for dynamic analysis of planar structures, Report UC/IEERC-73/6, University of California, Berkeley, 1973.
28. Y. J. Park, A. M. Reinhorn, S. K. Kunnath, IDARC: Inelastic damage analysis of reinforced concrete frame-shear-wall structures, Report NCEER-87-0008, NCEER, Buffalo, New York, 1987.
29. P. Fajfar, M. Fischinger, Č. Remec, Nonlinear dynamic analysis of a RC building, subjected to earthquake loading, 3rd International Conference on Numerical Methods for Nonlinear Problems, Dubrovnik, objavljeno v Numerical Methods for Non-linear problems, C. Taylor in drugi (uredniki), Pineridge Press, Swansea, U. K., str. 377–389, 1986.
30. M. Fischinger, T. Vidic, J. Šelih, P. Fajfar, H. Y. Zhang, F. Damjanić, Validation of a macroscopic model for cyclic response prediction of R. C. walls, Computer Aided Analysis and Design of Concrete Structures, Vol. 2, str. 1131–1142, Pineridge Press, Swansea, 1990.
31. P. Fajfar, M. Fischinger, Mathematical modeling of reinforced concrete structural walls for nonlinear seismic analysis, Preprints, European Conference on Structural Dynamics, Vol. 2, str. 143–150, Bochum, 1990.
32. M. Fischinger, P. Fajfar, Inelastic spectra of some earthquakes recorded in Yugoslavia, 7. ECEE, Atene, Zbornik del, Vol. 3, str. 53–60, 1982.
33. P. Fajfar, M. Fischinger, Parametric study of inelastic response to some earthquakes recorded in Southern Europe, 8. WCEE, San Francisco, Zbornik del, Vol. 4, str. 57–82, Prentice-Hall, 1984.
34. T. Vidic, P. Fajfar, M. Fischinger, Neelastični spektri za projektiranje konstrukcij, 5. kongres ZDSGJ, Bled, Zbornik del, str. 59–64, 1990.
35. P. Fajfar, T. Vidic, M. Fischinger, A measure of earthquake motion capacity to damage medium-period structures, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, v tisku, 1990.
36. M. Fischinger, P. Fajfar, F. Capuder, Earthquake resistance of the »SCT« large panel building system, Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, Vol. 20, str. 281–289, 1987.
37. M. Fischinger, M. Tomažević, F. Capuder, P. Fajfar, M. Lutman, J. Szilagyi, Študija potresne varnosti velikopanelnega sistema SCT, Gradbeni vestnik, letnik 36, str. 241–248, 1988.
38. S. Bubnov, P. Fajfar, M. Fischinger, V. Ribarič, M. Tomažević, Graditve objektov visokogradnje na seizmičnih območjih. Ocena pravilnika, publikacija IKPIR št. 25, 250 strani, 1982.
39. P. Fajfar, M. Fischinger, Č. Remec, Evaluation of aseismic provisions in the U.S.A. and Yugoslavia, publikacija IKPIR št. 28 A, 217 strani, 1985.

40. M. Fischinger, P. Fajfar, Č. Remec, Influence of the seismic code requirements on the safety and cost of a RC building, 8. ECEE, Lizbona, Zbornik del, Vol. 5, str. 12/17–12/24, 1986.
41. M. Fischinger, P. Fajfar, Ocena aseizmičnog projektovanja AB zgrada prema novim propisima, Jugoslavensko savetovanje BAB 87, Dubrovnik, 1988, Zbornik del, knjiga 3, referat P22, str. 139–142, 1988.
42. M. Fischinger, P. Fajfar, O potresnih silah v predpisih, *Gradbeni vestnik*, letnik 38, št. 11–12, str. 334–338, 1989.
43. M. Fischinger, P. Fajfar, On the response modification factors for reinforced concrete buildings, 4th U. S. National Conference on Earthquake Engineering, Palm Springs, Zbornik del, Vol. 2, str. 249–258, EERI, California, 1990.
44. P. Fajfar, M. Fischinger, Odnosi med obremenitvami in kapaciteto konstrukcij pri potresnovarnem projektiranju, 5. kongres ZDSGJ, Bled, Zbornik del, str. 105–111, 1990.
45. P. Fajfar, M. Fischinger, Relation between structural capacity and demand in earthquake resistant design, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, poslano v objavo.
46. D. Aničić, P. Fajfar, B. Petrović, A. Szavits-Nossan, M. Tomažević, Zemljotresno inženjerstvo – Visokogradnja, *Građevinska knjiga*, Beograd, 632 strani, 1990.
47. P. Fajfar, J. Duhovnik, J. Reflak, M. Fischinger, Z. Breška, Obnašanje gradbenih objektov med potresi v Črni gori 1979, publikacija IKPIR št. 19, 149 strani, 1981.
48. P. Fajfar, M. Fischinger, Potres v Mehiki – karakteristike, posledice in nauki, 8. zborovanje gradbenih konstruktorjev Slovenije, Bled, Zbornik del, str. 43–51, 1986.
49. M. Fischinger, P. Fajfar, L. Bevc, Potresnovarno projektiranje viadukta Reber, 12. zborovanje gradbenih konstruktorjev Slovenije, Bled, Zbornik del, str. 51–58, 1990.

Kratice pomenijo:

ECEE – Evropska konferenca o potresnem inženirstvu

WCEE – Svetovna konferenca o potresnem inženirstvu

ZDSGJ – Zveza društev za seizmično gradbeništvo Jugoslavije

PRIMERI IZ MEHANIKE KONSTRUKCIJ

UDK: 624:531

MIRAN SAJE

POVZETEK

Mehanika ima pri raziskovalnem delu v gradbeništvu zelo pomembno vlogo. O tem se lahko prepričamo ob branju člankov v pričujočem Gradbenem vestniku. Ključnega pomena pa je njena vloga pri analizi konstrukcij. Tu igra vlogo orodja ali pa je predmet raziskovanja pri večini raziskav na konstrukcijski smeri FAGG, še posebej pa pri magistrskih in doktorskih delih. Pri tem aktivno sodeluje vrsta pedagogov. V pričujočem članku se pisec omejuje le na kratek opis nekaterih, iz mehanskega stališča zanimivejših del s področja plastičnosti, mehanike loma, teorije elastičnosti, teorije konstrukcij in prenosa toplote, ki jih je v zadnjih 15 letih pripravil sam ali s sodelavci.

EXAMPLES FROM STRUCTURAL MECHANICS

SUMMARY

Mechanics as a scientific discipline is an important basis of civil engineering. This is even more true for the structural engineering. It is only natural then that it is involved in most of the research projects at the Division of Structural Engineering at FAGG Ljubljana. This article presents some of the projects worked on by the author and his co-workers since 1975 and which are interesting from the mechanical point of view.

Avtor:

Miran Saje, dr., dipl. gradb. inž., redni profesor

UVOD

Mehanika ima pri raziskovalnem delu v gradbeništvu zelo pomembno vlogo. O tem se lahko prepičamo ob branju člankov L. Šukljeta in B. Majesa, P. Fajfarja in M. Fischingerja, F. Damjanića, F. Sajeta in R. Rogača ter R. Rajarja v pričujočem Gradbenem vestniku. Ključnega pomena pa je njena vloga pri analizi konstrukcij. Tu igra vlogo orodja ali pa je predmet raziskovanja pri večini raziskav na konstrukcijski smeri FAGG, še posebej pa pri magistrskih in doktorskih delih. Pri tem – poleg že omenjenih – aktivno sodelujejo predvsem pedagogi J. Banovec, D. Battelino, D. Beg, J. Duhovnik, D. Jurišič, P. Lončar, M. Pregl, M. Saje, S. Srpčič, M. Stanek, S. Vidmar ter M. Bratović, M. Čepin in B. Dobovišek iz oddelka za arhitekturo. V pričujočem članku se pisec omejuje le na kratek opis nekaterih, iz mehanskega stališča zanimivejših del, ki jih je v zadnjih 15 letih pripravil sam ali v sodelovanju s svojima kolegoma S. Srpčičem in G. Turkom.

PLASTIČNOST IN MEHANIKA LOMA

S teorijo plastičnosti in mehaniko loma se je kot eden prvih v Sloveniji pa tudi v svetu že kmalu po 2. svetovni vojni zelo uspešno ukvarjal profesor M. Marinček. V 60. letih je odlična dela mednarodne vrednosti o plastičnosti prispeval D. Jurišič. S svojo strokovnostjo in navdušenostjo je prepričal pisca tega članka, da se usmeri v študij tega zanimivega in hitro razvijajočega se področja. Rezultati tega študija so bili objavljeni v referatu [1] in prinašajo več novosti. Obravnava je nadalje pokazala, da pri takšnih nalogah ne bi smeli zanemariti vplivov velikih deformacij. Rezultat intenzivnega študija v tej smeri so dela [2–6]. Najpomembnejše od teh del je [4]. V njem je numerično obravnavana lokalna zožitev palice okroglega prereza v nategu, kar je ena najtežjih nalog mehanike trdnega telesa. Poznavanje napetostnih in deformacijskih razmer v lokalno zoženi palici pred porušitvijo je bistveno za razumevanje nastanka duktilnega loma v palici. Objava tega dela je avtorju omogočila, da se je kot gostujoči profesor vključil v delo raziskovalne skupine na Brownovi univerzi v Providence-u v ZDA. Tukaj smo skupaj z J. Panom in A. Needlemanom obravnavali vpliv poroznosti kovine na sprožitve lokalizacij deformacij – strižnih ploskev in s tem na začetek duktilnega loma. Rezultati so bili objavljeni v [7, 8], delno pa tudi v [9]. Lokalizacijo deformacij v trdnih telesih je v tem času raziskovalo le nekaj skupin na najuglednejših teoretično usmerjenih univerzah (na primer Harvard, Oxford, Brown); danes je drugače, glej na primer zbornik del 2. mednarodne konference o računalniško podprtem konstruiranju betonskih konstrukcij v Zell am Seeju v Avstriji (1990). Deli [7, 8] sta pogosto citirani v svetovni literaturi.

Mehaniko loma delimo na nelinearno mehaniko loma, ki obravnava duktilni lom, in na linearno mehaniko loma, s katero opišemo krhki lom. Teorija nelinearne mehanike še ni dokončna. Nasprotno pa bi lahko trdili za linearno teorijo loma. Glavnino raziskovalnega dela v linearni mehaniki loma zato predstavlja izdelava analitičnih, nume-

ričnih in preizkuševalnih orodij za oceno lomne varnosti. Naše prispevke v tej smeri opisujemo v [10–13].

KOMPATIBILITETNI POGOJI

Če mehansko nalogo rešujemo z metodo napetosti, moramo poleg treh ravnotežnih pogojev za določitev šestih deformacij uporabiti še tri izmed šestih kompatibilitetnih pogojev. Toda katere tri? Odgovor na to vprašanje, in sicer za primer neomejeno velikih deformacij, je podan v [14, 15]. Razprava o tem je bila prikazana na kongresu GAMM leta 1985; vzbudila je dokajšnje zanimanje in pisec tega članka in S. Srpčič sva bila povabljeni na specializirano konferenco Euromech na Poljskem, ki pa se je zaradi pomanjkanja finančnih sredstev nisva udeležila. Spoznanja, pridobljena ob raziskovanju kompatibilitetnih pogojev, je bilo mogoče koristno uporabiti pri preučevanju znane Bernoullijeve hipoteze o ravninskih prerezih ravnega ali krožnega grednega nosilca v primeru neomejeno velikih deformacij. Izkazalo se je, da je Bernoullijeva hipoteza dober približek tudi v primeru velikih deformacij. Na teh osnovah je bilo analiziranih nekaj poučnih primerov [16–22], pridobljene izkušnje pa so omogočile razvoj novega končnega elementa za ravninske gredne nosilce pri neomejenih deformacijah.

KONČNI ELEMENT RAVNINSKEGA GREDNEGA NOSILCA

Leta 1981 je J. Banovec izpeljal sijajen končni element ravninskega grednega nosilca, ki temelji na poenostavljenih kinematičnih enačbah in uporablja tako imenovani »mešani« variacijski princip [23, 24]. Pripadajoči računalniški program NONFRAN je danes standardno orodje za projektiranje in raziskavo konstrukcij [25]. Pisec pričujočega članka je uspel v okviru priprav na predavanja iz predmeta Osnove nelinearne mehanike na podiplomskem študiju konstrukcijske smeri FAGG izpeljati še splošnejši in še bolj učinkovit končni element, ki izhaja iz točnih kinematičnih enačb in temelji na izreku o stacionarni vrednosti posplošene potencialne energije. Po bogatih diskusijah s kolegoma J. Banovcem in S. Srpčičem so sledile objave [26–28]. V [29] je bila nato teorija razširjena še na dinamično obremenjene hiperelastične nosilce.

POŽAR IN DRUGI TEMPERATURNI PROBLEMI

Konstrukcije so med požari izjemno močno obremenjene, trdnost vgrajenih materialov pa se občutno zmanjša. Zato se konstrukcija obnaša izrazito nelinearno. Pri izdelavi računskega modela ne smemo zanemariti vplivov velikih deformacij, plastifikacije, drobljenja materiala, tečenje in časovno spreminjanje temperature po prerezi konstrukcije. Obravnava požarno obremenjenih konstrukcij je torej izredno zahtevna naloga nelinearne mehanike. Rezultate naših prvih korakov opisujemo v [30–35].

S kolegom G. Turkom sva obravnavala porazdelitev temperature v strjujočih se betonskih konstrukcijah zaradi

vpliva hidratacijske toplote in okolja konstrukcije [36–38]. Pripadajoče napetostno in deformacijsko stanje v mladem, strjujočem se betonu je obravnaval G. Turk v okviru svoje magistrske naloge. Računalniški programi, izdelani za namene teh študij, so bili nato prirejani še za temperaturno

in napetostno časovno analizo prečnih prerezov mostnih konstrukcij [39, 40]. Pri tem so poleg podatkov o temperaturi in hitrosti okoliškega zraka upoštevani tudi vplivi osonečenja in sence. V pripravi je programski sistem za celovito temperaturno in napetostno analizo mostov.

LITERATURA

1. M. Saje, Odredjivanje napona i deformacija u elastično plastičnom području po metodi konačnih elemenata, *Simpozij o uporabi metode končnih elementov v tehniki*, Vrnjačka Banja, Zbornik del, str. 175–189, 1975.
2. M. Saje, O referenčnem opisu, 14. kongres jug. društva za uporabno in racionalno mehaniko, Portorož, Zbornik del, A2-14, str. 229–235, 1978.
3. M. Saje, Konstitutivne jednačine za velike deformacije u elastično-plastičnom području, 14. kongres jug. društva za uporabno in racionalno mehaniko, Portorož, Zbornik del, A2-13, str. 221–228, 1978.
4. M. Saje, Necking of a cylindrical bar in tension, *Int. J. Solids Structures*, vol. 15, str. 731–742, 1979.
5. M. Saje, Analiza predpostavke o konstantni vzdolžni deformaciji v Bridgmanovih formulah za napetosti v lokalno zoženi natezni palici, 6. kongres jug. društva gradbenih konstruktorjev, Bled, Zbornik del, T28, str. 287–296, 1978.
6. M. Saje, Residual stresses in a necked cylindrical bar, *Mechanics: Research Communications*, vol. 6, No. 5, str. 263–268, 1979.
7. M. Saje, J. Pan, A. Needleman, Void nucleation effects on shear localization in porous plastic solids, *Int. J. Fracture*, vol. 19, str. 163–182, 1982.
8. J. Pan, M. Saje, A. Needleman, Localization of deformation in rate sensitive porous plastic solids, *Int. J. Fracture*, vol. 21, str. 261–278, 1983.
9. M. Saje, Localizations in tension test of porous plastic materials, *Spominski zbornik Antona Kuhlja*, SAZU, Ljubljana, str. 121–135, 1982.
10. M. Saje, M. Oštir, Končni elementi v mehaniki loma, Teorijska in programska oprema, *Raziskovalna skupnost Slovenije*, pogodba C2-0138/792-81, 257 strani, 1981.
11. M. Saje, R. Ferjančič, M. Oštir, M. Stepančič, Končni elementi v mehaniki loma. Teorijska in programska oprema, 2. del, *Raziskovalna skupnost Slovenije*, pogodba C2-0138/792-82, 166 strani, 1982.
12. M. Saje, I. Planinc, Končni elementi v mehaniki loma, Teorijska in programska oprema, 3. del, *Raziskovalna skupnost Slovenije*, pogodba C2-0138/792-83, 100 strani, 1983.
13. M. Saje, Oblikovanje mreže končnih elementov okrog vrha ostre razpoke, 17. jug. kongres teoretične in uporabne mehanike, Zadar, Zbornik del, C2-25, str. 155–160, 1986.
14. S. Srpčič, M. Saje, Eligible triples of compatibility equations in stress method, *kongres GAMM*, Dubrovnik, knjiga izvlečkov, sekcija 2, str. 23, 1985.
15. S. Srpčič, M. Saje, Izbira kompatibilitetnih pogojev pri metodi napetosti, *Kuhljevi dnevi '87*, zborovanje Slovenskega društva za mehaniko, Preddvor, Zbornik del, str. 97–103, 1987.
16. M. Saje, S. Srpčič, Upogib ravnega grednega nosilca z neomejenimi deformacijami, 16. kongres jug. društva za teoretično in uporabno mehaniko, Bečići, Zbornik del, C1–23, str. 169–176, 1984.
17. S. Srpčič, M. Saje, Numerical solution of large deformation bending of plane elastic slender beam, *kongres GAMM*, Dubrovnik, knjiga izvlečkov, sekcija 2, str. 23, 1985.
18. M. Saje, S. Srpčič, Large deformations of in-plane beam, *Int. J. Solids Structures*, vol. 21, No. 12, str. 1181–1195, 1985.
19. S. Srpčič, M. Saje, Large deformations of thin curved plane beam of constant initial curvature, *Int. J. Mechanical Sciences*, vol. 28, No. 5, str. 275–287, 1986.
20. M. Saje, S. Srpčič, Stabilnost C-vzmeti, *Simpozij '85: Savremeni problemi nelinearne mehanike kontinuuma*, Društvo za mehaniko Srbije, Vrnjačka Banja, Zbornik del, str. 323–330, 1985.
21. M. Saje, S. Srpčič, Stability of C-shaped spring, *J. Engineering Mechanics*, ASCE, vol. 113, No. 6, str. 943–946, 1987.
22. M. Saje, G. Turk, Nelinearni upogib gibkega elastičnega nosilca skozi predpisane gladke ravninske podpore, 17. jug. kongres teoretične in uporabne mehanike, Zadar, Zbornik del, C1-54, str. 335–340, 1986.
23. J. Banovec, An efficient finite element method for elastoplastic analysis of plane frames, *Nonlinear Analysis in Structural Mechanics* (ur. W. Wunderlich, E. Stein in K.-J. Bathe), Springer, New York, str. 385–402, 1981.
24. J. Banovec, Geometrijska in materialna nelinearnost pri ravninskih okvirnih konstrukcijah, *doktorsko delo*, FAGG, Ljubljana, 1986.
25. J. Banovec, R. Perdan, Program za nelinearno analizo ravninskih linijskih konstrukcij. Navodila za uporabo, FAGG, Ljubljana, 1987.
26. M. Saje, S. Srpčič, A variational principle for large displacements of a straight slender in-plane elastic beam, *21st Midwestern Mechanics Conference*, Houghton, ZDA, Zbornik del (ur. J. B. Ligon, H. W. Lord, M. Vable, V. W. Snyder, G. Trevino), str. 223–224, 1989.
27. M. Saje, Mešan variacijski princip za neomejeno velike deformacije ravninskih nosilcev in uporaba v metodi končnih elementov, *Kuhljevi dnevi '89*, Slovensko društvo za mehaniko, Rogla, Zbornik del, strani 91–100, 1989.
28. M. Saje, A variational principle for finite planar deformation of straight slender elastic beams, *Int. J. Solids Structures*, vol. 26, No. 8, str. 887–900, 1990.
29. M. Saje, G. Jelenič, Mešan variacijski princip za neomejeno velike deformacije ravninskih hiperelastičnih nosilcev in uporaba v metodi končnih elementov, *Kuhljevi dnevi '89*, Slovensko društvo za mehaniko, Rogla, Zbornik del, str. 101–110, 1989.

30. S. Srpčič, M. Saje, Račun vpliva visokih temperatur na jeklene konstrukcije, 8. kongres Zveze društev gradbenih konstruktorjev Jugoslavije, Cavtat, Zbornik del, knjiga K2, K-79, str. 183–188, 1987.
31. S. Srpčič, M. Saje, Analitične metode v požarnem inženirstvu, 9. zborovanje gradbenih konstruktorjev Slovenije, Bled, Zbornik del, str. 276–283, 1987.
32. S. Srpčič, M. Saje, Račun vpliva požara na jeklene konstrukcije, *Gradbeni vestnik*, vol. 36, št. 5-6, str. 121–126, 1987.
33. M. Saje, S. Srpčič, Računske metode v požarnem inženirstvu, 4. seminar Računalnik v gradbenem inženirstvu, Ljubljana, Zbornik del, str. 174–179, 1988.
34. S. Srpčič, M. Saje, Vpliv visokih temperatur na jeklene konstrukcije, *Kuhljevi dnevi '89*, Slovensko društvo za mehaniko, Rogla, Zbornik del, str. 125–134, 1989.
35. S. Srpčič, M. Saje, Računska analiza obnašanja jeklenih konstrukcij v požaru, Simpozijum '89: *Gradevinske konstrukcije i požar*, Društvo gradbenih konstruktorjev Srbije, Arandelovac, Zbornik del, str. 187–202, 1989.
36. M. Saje, G. Turk, Računalniški program za račun prenosa toplote v trdnih telesih, 4. seminar Računalnik v gradbenem inženirstvu, Ljubljana, Zbornik del, str. 234–239, 1988.
37. M. Saje, G. Turk, Račun temperatur v strjujočem se betonu, *Gradbeni vestnik*, vol. 36, št. 7-8, str. 177–182, 1987.
38. M. Saje, G. Turk, Študij vplivov na porazdelitev temperature v strjujočem se betonu, 9. zborovanje gradbenih konstruktorjev Slovenije, Bled, Zbornik del, str. 144–151, 1987.
39. M. Saje, G. Turk, Račun temperatur v prerezih betonskih in jeklenih mostov, referat in poster, 10. zborovanje gradbenih konstruktorjev Slovenije, Bled, 1988.
40. M. Saje, G. Turk, Račun temperaturnega razporeda in temperaturnih napetosti v prerezu, *Simpozijum '89*, Zveza društev gradbenih konstruktorjev Jugoslavije, Dubrovnik, Zbornik del, D-97, str. 169–165, 1989.

METODA KONČNIH ELEMENTOV KOT SODOBNO ORODJE ZA REŠEVANJE INŽENIRSKIH NALOG

UDK 624:519.61/64

F. B. DAMJANIĆ

POVZETEK

Članek predstavlja kratek pregled avtorjevih raziskav na področju metode končnih elementov s poudarkom na nelinearni mehaniki. Predstavljeni numerični modeli so namenjeni reševanju različnih praktičnih problemov. Na kratko so opisani modeli za armirani beton, lupine, dinamično interakcijo konstrukcije in tekočine, toplotno in toplotnomehansko analizo, za simulacijo preoblikovalnih procesov ter uvedba neskončnih elementov v nekatere od naštetih modelov.

USE OF FINITE ELEMENT METHOD AS A MODERN TOOL FOR ANALYSIS OF ENGINEERING PROBLEMS

SUMMARY

This paper presents a brief review of our research results in the area of Finite Element Methods with the particular emphasis on the nonlinear engineering mechanics. Numerical models developed for the solution of various practical problems are here summarized. The structural reinforced concrete and shell analysis, the dynamic fluid-structure interaction, the thermal and thermomechanical analysis, infinite elements and industrial forming processes are briefly outlined and a list of related references is presented.

UVOD

Z intenzivnim razvojem moderne tehnologije in vedno večjo kompleksnostjo problemov v zadnjih letih so se

pojave potrebe po zanesljivih in natančnih postopkih za analizo inženirskih problemov. Matematične enačbe, ki formulirajo določen problem, so analitično rešljive le v enostavnih primerih, kar je ustvarjalo v preteklosti prepad med teorijo in prakso. Z razvojem računalnikov in njihovo uporabo v vsakdanji inženirski praksi so postale numerične metode izjemno zanimive, saj lahko z njimi rešujemo kompleksne probleme, katerih rešitve prej niso obstajale.

Avtor:
F. B. Damjanić, dr., dipl. gradb. inž., redni profesor,
zunanji profesor Istituto di Scienza e Tecnica delle Costruzioni,
Università di Padova

Ena od numeričnih tehnik, ki se dandanes mnogo uporablja, je metoda končnih elementov (**MKE**). V začetku se je metoda uporabljala le za konstruktivne probleme, danes pa je sprejeta kot učinkovito orodje za računalniško reševanje raznovrstnih problemov, ki se pojavljajo v inženirski praksi. Njeno uporabo srečamo v napetostni analizi, problemih prenosa toplote in mase, v analizi elektromagnetnih polj, dinamiki tekočin, analizi akustičnih in biomehanskih problemov itd. Linearna analiza z **MKE** je danes povsem uveljavljena kot orodje pri načrtovanju na mnogih področjih. Nelinearna **MKE** pa je še vedno predmet intenzivnega razvoja. Nelinearnosti, ki se pojavljajo, lahko definiramo kot materialne in geometrijske nelinearnosti ali pa kot nelinearne časovno odvisne fenomene. Razvoj modeliranja nelinearnih problemov, bolj učinkoviti postopki reševanja ter izkušnje, pridobljene z uporabo teh postopkov, zagotavljajo zadostno zanesljivost nelinearne **MKE**. V zadnjem času je bilo razvitih precejšnje število zelo izpopolnjenih modelov. Žal pa se pogosto dogaja, da nimamo na razpolago eksperimentalnih podatkov in rezultatov z dovolj veliko natančnostjo, s katerimi bi lahko preverili natančnost numeričnega modela.

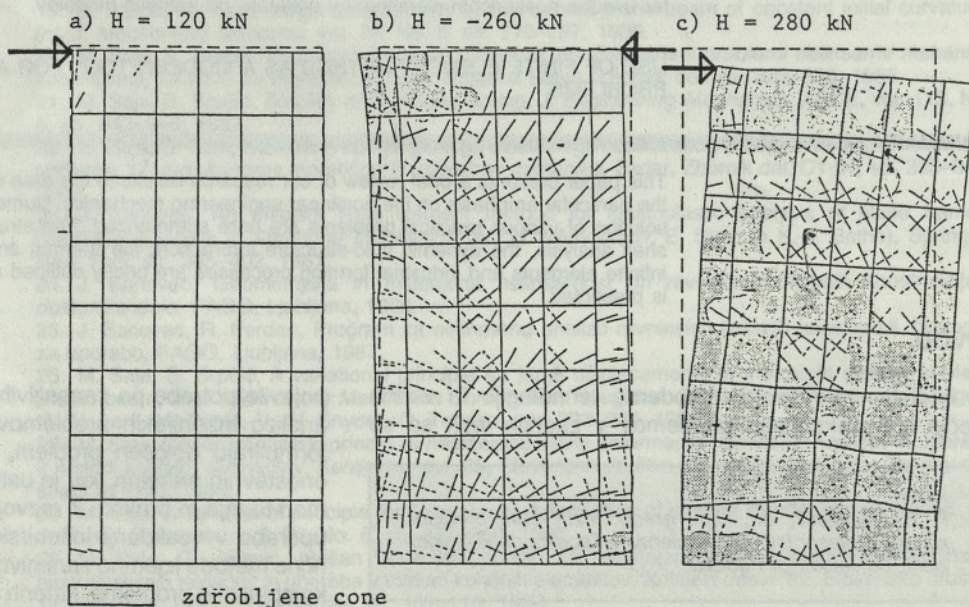
Avtor članka se zadnjih deset let intenzivno ukvarja z razvojem **MKE** na področju nelinearne mehanike, sprva med doktorskim študijem pod mentorstvom profesorja **D. R. J. Owena** (na oddelku, ki ga je vodil eden od utemeljiteljev metode končnih elementov prof. **O. C. Zienkiewicz**) na University College of Swansea (V. Britanija), nato kot raziskovalec na tej univerzi in sodelavec firme Rockfield Software ter končno s sodelavci na **FAGG-IKPIR** v Ljubljani in **ISTC** v Padovi. V teh raziskavah smo posebno pozornost posvečali možnostim uporabe **MKE** pri reševanju različnih inženirskih problemov. Tako so bili na primer razviti različni nelinearni numerični modeli ter pripadajoči računalniški programi za analizo armiranobetonskih konstrukcij, obremenjenih s statičnimi, dinamičnimi in termalnimi obremenitvami (za masivne konstrukcije, pa tudi za

tanke lupinaste konstrukcije), za analizo dinamične interakcije tekočina-konstrukcija ter za nelinearno nestacionarno analizo prehoda toplote in termomehanskih problemov. Kot posebno področje raziskav smo obravnavali preslikane neskončne elemente, ki so posebno uporabni v toplotni analizi in napetostni analizi zemljin. Poleg različnih nelinearnih modelov za mehansko obnašanje materialov (kot so elastoplastični oz. elastoviskoplastični) smo razvili za analizo gumenih materialov model, ki temelji na Mooney-Rivlinovem konstitutivnem zakonu. Na podlagi modela za gibanje viskozne tekočine je bil razvit model za opis gibanja plazov. Na podlagi osnovnega modela za nelinearno toplotno mehansko analizo je bil izpeljan poseben model za simulacijo obdelovalnega procesa za plastiko in steklo.

Čeprav so navedeni problemi na videz popolnoma različni, se moramo zavedati, da vsi temeljijo na istih zakonitostih mehanike, zato lahko pri različnih problemih uporabljamo velik del istih splošnih numeričnih postopkov, ki pa jih moramo prilagoditi specifičnim zahtevam, kot so na primer lastnosti materiala in mejni pogoji.

ARMIRANOBETONSKE KONSTRUKCIJE

V zadnjih dveh desetletjih je bilo razvitih veliko število različnih numeričnih modelov za opis mehanskega obnašanja betona pri različnih obtežnih pogojih (statična, dinamična, kratkotrajna in dolgotrajna obtežba) (glej npr. [1, 2]). V naših začetnih raziskavah je bil zasnovan model [3–8], ki je numerično relativno enostaven, saj zajema le prevladujoče nelinearne mehanske karakteristike betona in armature, pri tem pa je dovolj natančen in zanesljiv tako pri statični kakor tudi pri dinamični analizi. Z modelom lahko zajamemo tudi možnost nestacionarne toplotne obremenitve. Pripadajoči računalniški program **BET50** je preverjen s številnimi eksperimentalnimi testi in z analizami praktičnih in inženirskih konstrukcij [9–11].



Sl.1. Razpoke in deformacije stene pri značilnih nivojih obtežbe: a) prvi pojav razpok, b) začetek tečenja armature, c) porušitev

Uporabljeni konstitutivni model obsega večosno obnašanje betona v tlaku, pri čemer upošteva elastoplastično oziroma elastoviskoplastično formulacijo ter mejo drobljenja. Nekatere probleme v zvezi z numerično stabilnostjo in Mohr-Coulombovim kriterijem smo obravnavali v [12–14]. V nategu opisujemo obnašanje betona z modelom za odpiranje, širjenje in eventualno zapiranje razpok. Obnašanje armature opišemo z enoosnim elastoplastičnim modelom. Pri tem podajamo lego in površino armature (ali kablov za prednapetje) s posebnimi linijskimi elementi, ki potekajo znotraj končnih elementov, ki opisujejo betonsko konstrukcijo. Upošteveno lahko tudi geometrijsko nelinearnost. Rezultati programa **BET50** so pomiki vozlišč, napetosti v betonu in armaturi ter položaj in smeri razpok. Praktičen pregled možnosti uporabe programa najdemo v [15], v [16–22] pa je podan niz primerov dinamične in seizmične analize nosilnih armiranobetonskih konstrukcij. Za ilustracijo modela prikazujemo na sl. 1 tipične rezultate dinamične analize armiranobetonske stene [22].

LUPINASTE KONSTRUKCIJE

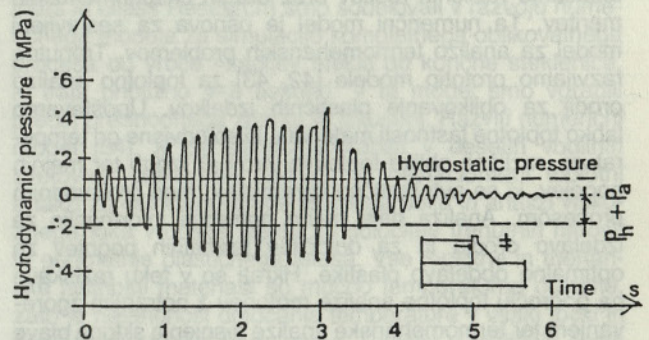
V navedenih raziskavah predstavlja posebno področje numerično modeliranje lupinastih konstrukcij predvsem zaradi posebnosti uporabljenega 3D lupinastega končnega elementa [23]. Takšen element omogoča analizo plošč in lupin različnih debelin: od zelo tankih s prevladujočim membranskim obnašanjem do debelih z izrazitim upogibnim in strižnim vplivom. Razviti model omogoča tudi račun večslojnih lupin z izotropnimi ali anizotropnimi mehanskimi lastnostmi v posameznem sloju (npr. armirani beton, laminirani kompoziti). Iz osnovnega modela smo razvili niz specializiranih programov za analizo lupinastih konstrukcij.

SHELIN [24] je program za analizo lupinastih konstrukcij poljubnih geometrijskih oblik, ki so lahko ojačene z rebri ali nosilci ter sestavljenih konstrukcij ali nagubanih lupin, ki se stikujejo med seboj pod različnimi nakloni. Uporablja se lahko za analizo konstrukcij iz armiranega betona (pri tem se armatura opisuje s posebnimi sloji) [25–27], iz plastičnih laminiranih kompozitov [28], steklobetona [29] itd. Program **CONSHELL** se uporablja za nelinearno dinamično in statično analizo z enakim mehanskim modelom za beton, kot je bil opisan v prejšnjem razdelku, ter totalno Lagrangevo formulacijo za velike pomike in rotacije. Program **RUBSHELL** [23, 30] je bil razvit v okviru raziskovalne naloge z Dunlopom za analizo lupinastih konstrukcij ali elementov elastomernih konstrukcij z ali brez vlaknastih ojačitev. Zaradi hiperelastičnega obnašanja tega materiala uporabljamo Mooney-Rivlinov konstitutivni zakon, nestisljivost pa upošteevamo z metodo Lagrangevih množiteljev. S programom lahko analiziramo različne napihnjene konstrukcije, kot so npr. avtomobilske gume, ladje, strehe [31] ipd.

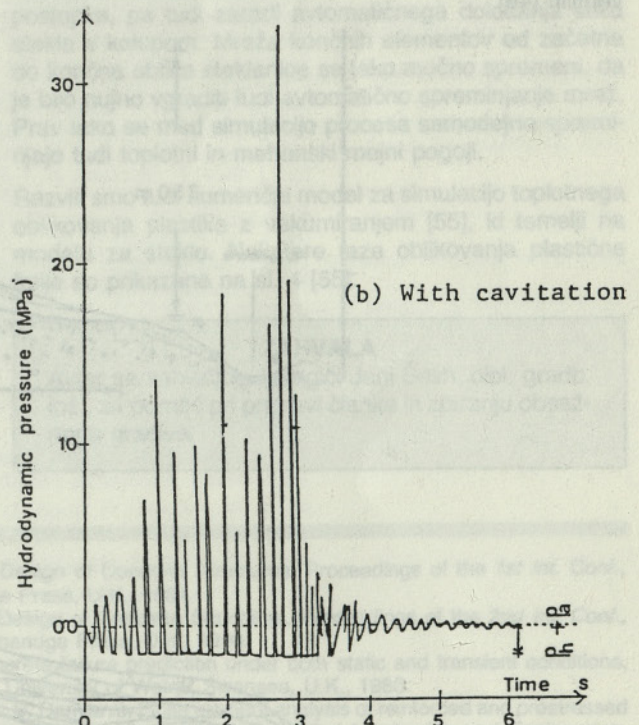
DINAMIČNA ANALIZA INTERAKCIJE TEKOČINA-KONSTRUKCIJA

Numerični model za interakcijo tekočina-konstrukcija smo razvili za dinamično analizo konstrukcij, ki so v stiku s

tekočino, kot so jezovi in rezervoarji, uporabljal pa bi se lahko tudi za analizo ladij ali konstrukcij na odprtem morju. Obnašanje konstrukcije in okolišne tekočine je pri dinamični obremenitvi medsebojno odvisno, zato lahko dobimo natančen dinamičen odziv konstrukcije le z analizo, ki upošteva interakcijo. Numerični model je zasnovan na ideji, da se gibanje konstrukcije opisuje v Lagrangevem sistemu, gibanje tekočine pa v Eulerjevem. Ta dva sistema sta medsebojno povezana z interakcijskimi pogoji na stiku konstrukcija-tekočina. V model sta vključeni materialna in geometrijska nelinearnost ter simulacija kavitacije v tekočini. Podroben opis formulacije in tehnike reševanja lahko najdemo v [32–35]. Na sl. 2 je prikazana razlika v rezultatih, če je kavitacija upoštevana ali ne [34]. Nekateri rezultati raziskav hidrodinamičnih pritiskov na »nedeformabilne« stene rezervoarja so podani v [36, 37].



(a) Without cavitation



(b) With cavitation

Sl. 2. Diagram hidrostatičnega pritiska na betonsko pregrado 1,0 m pod gladino vode (Obtežba: hor. in vert. harmonično vzbujanje v trajanju 3,0 s): (a) brez kavitacije in (b) s kavitacijo

NESTACIONARNA NELINEARNA TOPLOTNA IN TERMOMEHANSKA ANALIZA

Potreba po računu prehoda toplote se pojavlja na raznih področjih, kot so strojništvo, metalurgija, arhitektura, gradbeništvo, elektrika, energetika, geotermika itd. Osnovni numerični model za toplotno analizo smo razvili že prej. Rešitve nekaterih problemov numerične stabilnosti in natančnosti so podane v [38–40]. Kasneje smo razvijali model dalje ter ga prilagajali specifičnim zahtevam, ki so nujne za praktično uporabo [41]. Model omogoča račun temperature v vsakem trenutku in točki telesa, ki ga analiziramo. Zato predstavlja veliko pomoč pri optimiziranju novih rešitev ali analizi obstoječih. S simuliranjem toplotnih tokov, določanjem kritičnih temperatur, termošokov, izgub energije itd. je omogočeno ekonomično in hitro določanje različnih rešitev brez dragih eksperimentalnih meritev. Ta numerični model je osnova za sestavljeni model za analizo termomehanskih problemov. Trenutno razvijamo prototip modela [42, 43] za toplotno analizo orodij za oblikovanje plastičnih izdelkov. Upoštevamo lahko toplotne lastnosti materiala, ki so odvisne od temperature, različne oblike toplotnih virov ali izgub ter mejnih pogojev, ki se avtomatično spreminjajo med proizvodnim procesom. Analiza daje nujno potrebne informacije za izdelavo orodja in za določitev termalnih pogojev za optimalno obdelavo plastike. Hkrati so v teku raziskave na področju toplotne analize motorjev z notranjim zgorevanjem ter termomehanske analize tesnjenja sklopa glave motorjev [44, 45]. Zanimive rezultate smo dobili tudi na področju analize temperaturnega polja v polprevodniških ventilih [46].

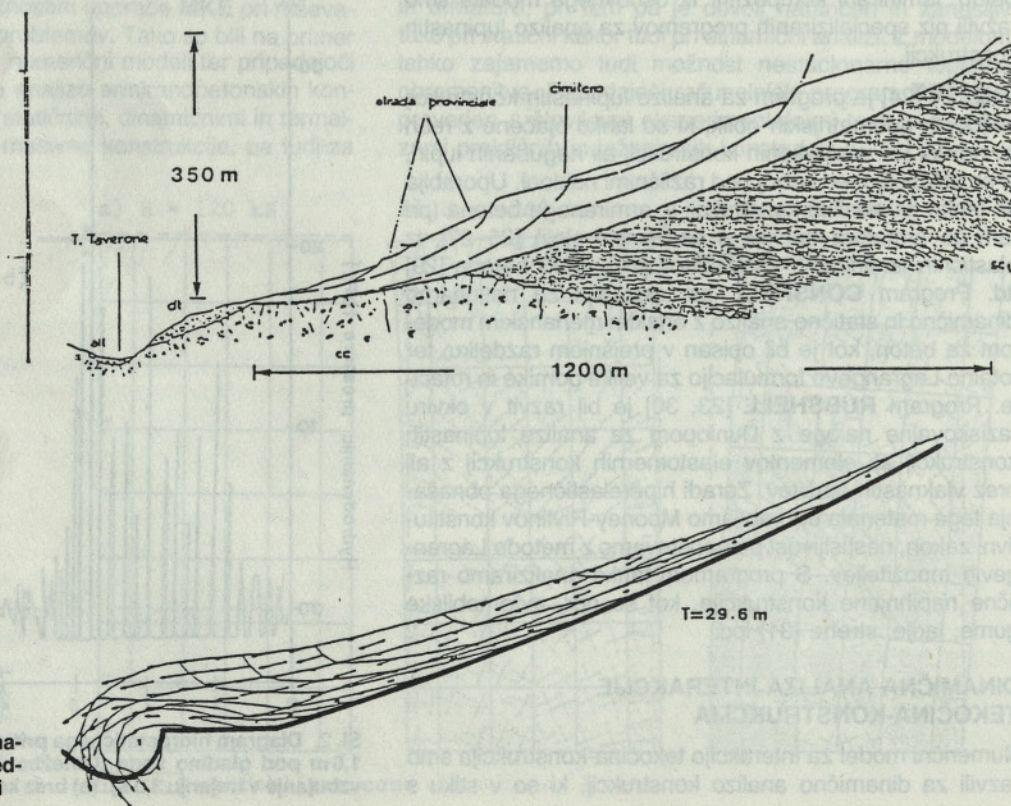
NESKONČNI ELEMENTI

Reševanje različnih praktičnih inženirskih problemov iz prevajanja energije (še posebej pri geotermalnih in elektromagnetnih problemih) ter iz linearne in nelinearne analize napetosti in deformacij (posebej pri geomehanskih problemih) pogosto zahteva analizo v neskončnem prostoru. V teh primerih je uporaba neskončnih elementov na robu interesnega področja, opisanega s končnimi elementi, zelo praktična. Kot prvi smo uporabili preslikane brezkončne elemente v nestacionarni nelinearni toplotni analizi [3, 47]. Ta model je bil prvič uporabljen 1981. leta pri določanju toplotne disipacije predora pod La Manchom.

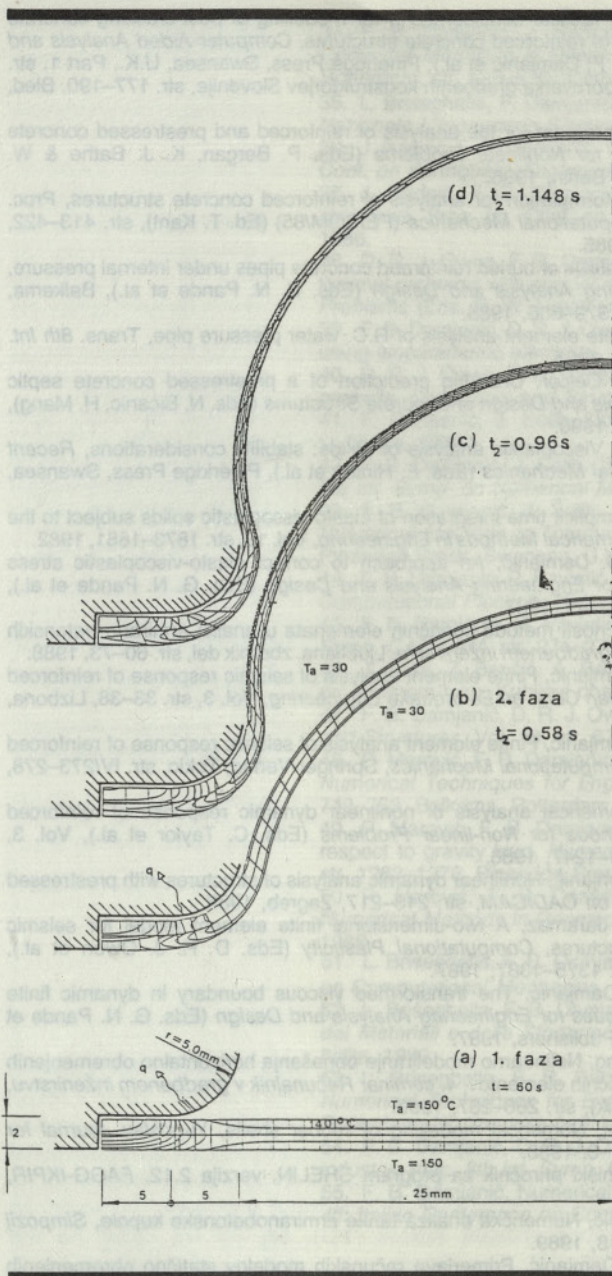
Neskončne elemente smo vključili tudi v numerični model za analizo napetosti in deformacij v zemljini. Model se je izkazal kot odlično orodje za študij napetostno-deformacijskih razmer okrog predorov ali drugih odprtín v zemljini [48–50].

GIBANJE PLAZOV

V analizi gibanja zemeljskih plazov smo postavili nov alternativni pristop, ki opušča standardno formulacijo, po kateri se zemljina obnaša kot trdna snov. Namesto nje predpostavljamo, da se zemljina obnaša kot nestisljiva viskozna tekočina. Ob poznavanju lastnosti zemljine in mejnih pogojev lahko na ta način določimo gibanje zemljine zaradi težnosti in seizmičnega vzbujanja ter njeno končno lego. Model je še v razvoju, začetni rezultati [51–53] pa obetajo novo učinkovito orodje za analizo gibanja zemeljskih plazov. Primer simulacije gibanja plazu je prikazan na sl. 3 [53].



Sl. 3. Gibanje plazu v značilnih časih; puščice predstavljajo vektorje hitrosti



Sl. 4. Oblikovanje segrete plastične folije z vakumiranjem; deformirane oblike z izotermami za nekatere časovne korake

PREOBLIKOVALNI INDUSTRIJSKI PROCESI

Prave možnosti nelinearne numerične analize z **MKE** se pokažejo zlasti pri simulaciji industrijskih procesov. Preoblikovalni industrijski procesi potekajo danes na popolnoma avtomatiziranih strojih. Načrtovanje teh strojev ter njihovo računalniško krmiljenje pa v glavnem še vedno temelji na akumuliranih izkušnjah in dragih eksperimentih, saj so procesi prekompleksni za analitično reševanje. Numerične metode, še zlasti **MKE**, pa nudijo veliko fleksibilnost pri modeliranju materialov, geometrijskih oblik in mejnih pogojev ter s tem omogočajo poznavanje parametrov procesa v vsakem trenutku. Uporaba numeričnih metod zmanjša stroške, saj je numerična simulacija mnogo cenejša od eksperimentov.

V okviru raziskovalnega projekta **IPGR-a** (Industrial Partners in Glass Research) smo sodelovali v razvoju numeričnega modela za simulacijo kompletnega oblikovalnega procesa od vroče »kaplje« stekla do končne steklenice, ki traja približno 4–8 sekund. V ta model smo vgradili precej predhodnega znanja in izkušenj. Razviti numerični model [54], ki se danes uporablja v desetih vodilnih svetovnih steklarnah, temelji na nestacionarni toplotni analizi za določitev temperaturnega polja in analizi viskoznega toka vročega stekla za določitev trenutnih hitrosti in geometrije plastičnega telesa. Vse toplotne in mehanske lastnosti materiala so močno temperaturno odvisne, zato je natančnost določanja temperature v vsaki točki in času procesa zelo pomembna. Rešitev v različnih časih dobimo z uvedbo časovnih korakov, ki so avtomatično kontrolirani zaradi stabilnosti in natančnosti numeričnega postopka, pa tudi zaradi avtomatičnega določanja stika stekla s kalupom. Mreža končnih elementov od začetne do končne oblike steklenice se tako močno spremeni, da je bilo nujno vgraditi tudi avtomatično spreminjanje mrež. Prav tako se med simulacijo procesa samodejno spreminjajo tudi toplotni in mehanski mejni pogoji.

Razvili smo tudi numerični model za simulacijo toplotnega oblikovanja plastike z vakumiranjem [55], ki temelji na modelu za steklo. Nekatere faze oblikovanja plastične folije so prikazane na sl. 4 [55].

ZAHVALA

Avtor se zahvaljuje kolegici Jani Šelih, dipl. gradb. inž., za pomoč pri pripravi članka in zbiranju obsežnega gradiva.

LITERATURA

1. Computer Aided Analysis and Design of Concrete Structures, Proceedings of the 1st Int. Conf., Split (F. Damjanić et al.), Pineridge Press, U.K., 1984.
2. Computer Aided Analysis and Design of Concrete Structures, Proceedings of the 2nd Int. Conf., Zell am See (N. Bičanić et al.), Pineridge Press, U.K., 1990.
3. F. B. Damjanić, Reinforced concrete failure prediction under both static and transient conditions, doktorska disertacija, C/Ph/71/83, University of Wales, Swansea, U.K., 1983.
4. D. R. J. Owen, J. A. Figueiras, F. B. Damjanić, Finite element analysis of reinforced and prestressed concrete structures including thermal loading, *Comp. Meths. Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 41, str. 323–366, 1983.
5. D. R. J. Owen, F. B. Damjanić, A finite element formulation for transient thermal analysis of nonlinear material problems, *Trans. 7th Int. Conf. SMIRT, Chicago, USA*, Vol. H, str. 169–176, 1983.

6. F. B. Damjanić, D. R. J. Owen, Practical considerations for modelling of post-cracking concrete behaviour for finite element analysis of reinforced concrete structures, *Computer-Aided Analysis and Design of Concrete Structures* (Eds. F. Damjanić et al.), Pineridge Press, Swansea, U.K., Part 1, str. 693–706, 1984. (Tudi v zborniku 6. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije, str. 177–190, Bled, 1984).
7. F. B. Damjanić, A finite element program for the analysis of reinforced and prestressed concrete structures, *Finite Element Methods for Nonlinear Problems* (Eds. P. Bergan, K. J. Bathe & W. Wunderlich), str. 623–637, Springer, Berlin, 1986.
8. F. B. Damjanić, A finite element formulation for analysis of reinforced concrete structures, *Proc. Int. Conf. on Finite Elements in Computational Mechanics (FEICOM/85)* (Ed. T. Kant), str. 413–422, Bombay, Indija, Pergamon Press, 1985.
9. F. B. Damjanić, Finite element analysis of buried reinforced concrete pipes under internal pressure, *Numerical Techniques for Engineering Analysis and Design* (Eds. G. N. Pande et al.), Balkema, Rotterdam, Netherlands, Part 2, str. 679–686, 1985.
10. F. B. Damjanić, J. Radnić, A Finite element analysis of R.C. water pressure pipe, *Trans. 8th Int. Conf. SMIRT*, Bruselj, Paper H 7/10, 1985.
11. M. Stanek, F. B. Damjanić, V. Celcer, Cracking prediction of a prestressed concrete septic containment, *Computer Aided Analysis and Design of Concrete Structures* (Eds. N. Bicanic, H. Mang), Pineridge Press, U.K., str. 623–631, 1990.
12. D. R. J. Owen, F. B. Damjanić, Viscoplastic analysis of solids: stability considerations, *Recent Advances in Non-linear Computational Mechanics* (Eds. E. Hinton et al.), Pineridge Press, Swansea, U.K., Ch. 8, str. 225–253, 1982.
13. F. B. Damjanić, D. R. J. Owen, Implicit time integration of elasto-viscoplastic solids subject to the Mohr-Coulomb yield criterion, *Int. J. Numerical Methods in Engineering*, Vol. 18, str. 1873–1881, 1982.
14. T. Rodič, D. R. J. Owen, F. B. Damjanić, An approach to correct elasto-viscoplastic stress predictions, *Numerical Techniques for Engineering Analysis and Design* (Eds. G. N. Pande et al.), Paper D55/1–9, Vol. 1, Nijhoff Publishers, 1987.
15. F. B. Damjanić, Osvrt na mogućnosti metode konačnih elemenata u analizi armirano betonskih konstrukcija, *4. seminar Računalnik v gradbenem inženirstvu*, Ljubljana, zbornik del, str. 60–73, 1988.
16. A. Mihanović, B. Jaramaz, F. Damjanić, Finite element analysis of seismic response of reinforced concrete structures, *Proc. 8th European Conf. on Earthquake Engineering*, Vol. 3, str. 33–38, Lizbona, 1986.
17. A. Mihanović, B. Jaramaz, F. Damjanić, Finite element analysis of seismic response of reinforced concrete walls, *Proc. Int. Conf. on Computational Mechanics*, Springer-Verlag, Tokio, str. IV/273–278, 1986.
18. A. Mihanović, F. Damjanić, Numerical analysis of nonlinear dynamic response of reinforced concrete structures, *Numerical Methods for Non-linear Problems* (Eds. C. Taylor et al.), Vol. 3, Pineridge Press, Swansea, str. 1238–1247, 1986.
19. A. Mihanović, B. Jaramaz, F. Damjanić, Nonlinear dynamic analysis of structures with prestressed concrete walls, *Proc. 8th Int. Symp. on CAD/CAM*, str. 213–217, Zagreb, 1986.
20. F. Damjanić, A. Mihanović, B. Jaramaz, A two-dimensional finite element model for seismic analysis of reinforced concrete structures, *Computational Plasticity* (Eds. D. R. J. Owen et al.), Pineridge Press, Swansea, U.K., str. 1375–1387, 1987.
21. B. Jaramaz, A. Mihanović, F. Damjanić, The transformed viscous boundary in dynamic finite element analysis, *Numerical Techniques for Engineering Analysis and Design* (Eds. G. N. Pande et al.), Paper T44/1-10, Vol. 2, Nijhoff Publishers, 1987.
22. J. Šelih, F. Damjanić, H. Y. Zhang, Nelinearno modeliranje obnašanja horizontalno obremenjenih armiranobetonskih sten z metodo končnih elementov, *4. seminar Računalnik v gradbenem inženirstvu*, Ljubljana, zbornik del (ur. J. Duhovnik), str. 280–287, 1990.
23. F. B. Damjanić, D. R. J. Owen, Numerical modelling of rubber shells, *Yugoslav Journal for Engineering Modelling*, Vol. 1, pp. 1–8, 1988.
24. F. Damjanić, B. Brank, Uporabniški priročnik za program SHELIN, verzija 2.12, *FAGG-IKPIR*, Ljubljana, 1990.
25. B. Brank, J. Šelih, F. B. Damjanić, Numerička analiza tanke armiranobetonske kupole, *Simpozij SDGKJ*, Dubrovnik, Vol. R, str. 13–18, 1989.
26. B. Brank, B. Dobovišek, F. B. Damjanić, Primerjava računskih modelov statično obremenjenih lupinastih konstrukcij, *11. zborovanje gradbenih konstruktorjev Slovenije*, Bled, zbornik del, str. 231–238, 1989.
27. B. Brank, F. B. Damjanić, Analiza nagubanih in ojačanih lupin s programom SHELIN, *5. seminar Računalnik v gradbenem inženirstvu*, Ljubljana, zbornik del (ur. J. Duhovnik), str. 216–221, 1990.
28. F. B. Damjanić, B. Brank, D. Nazor, Numerical analysis of a shaped plastic plate, *Proc. 10th Int. Symp. CAD/CAM*, str. 73–80, Zagreb, 1989.
29. B. Brank, F. B. Damjanić, Numerična analiza lupinaste konstrukcije iz steklobetona (v pripravi).
30. F. B. Damjanić, D. R. J. Owen, Numerical modelling in rubber technology, *Proc. 9th Int. Symp. CAD/CAM*, str. 107–112, Zagreb, 1987.
31. F. B. Damjanić, Numerični model za analizu napuhanih struktura, *Gradjevinar*, Vol. 40., No. 5, str. 211–213, 1988.
32. J. Radnić, F. B. Damjanić, D. K. Paul, Nonlinear dynamic analysis of concrete gravity dams including hydrodynamic interaction, *Numerical Methods for Non-Linear Problems*, Vol. 3 (Eds. C. Taylor et al.), Pineridge Press, Swansea, str. 1247–1255, 1986.
33. J. Radnić, F. B. Damjanić, Fluid-structure interaction, *Proc. 8th Int. Symp. CAD/CAM*, str. 225–230, Zagreb, 1986.

34. F. B. Damjanić, J. Radnić, Seismic analysis of fluid-structure interaction including cavitation, *Computer Modelling in Ocean Engineering* (Eds. B. A. Schrefler and O. C. Zienkiewicz), Balkema, Rotterdam, str. 523–530, 1988.
35. L. Briseghella, F. Damjanić, L'Interazione fluido struttura in presenza di cavitazione, 4. *Convegno Nazionale L'Ingegneria Sismica in Italia*, Milano, Italija, zbornik del, članek 39, 1989.
36. J. Radnić, F. B. Damjanić, V. Jović, Hydrodynamic pressure on rigid structures, *Proc. 8th European Conf. on Earthquake Engineering*, Vol. 3, str. 65–72, Lizbona, 1986.
37. J. Radnić, F. B. Damjanić, A finite element analysis of hydrodynamic pressure on reservoir structures, *Proc. Int. Conf. on Computational Mechanics*, Springer Verlag, Tokio, str. VII/175–180, 1986.
38. D. R. J. Owen, F. B. Damjanić, The stability of numerical time integration technique for transient thermal problems with special reference to reduced integration effects, *Numerical Methods in Thermal Problems* (Eds. R. W. Lewis et al.), Vol. 2, str. 487–505, Pineridge Press, Swansea, U.K., 1981.
39. F. B. Damjanić, D. R. J. Owen, Practical considerations for thermal transient finite element analysis using isoparametric elements, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 69, str. 109–126, 1982.
40. D. R. J. Owen, F. B. Damjanić, Reduced numerical integration in thermal transient finite element analysis, *Computers and Structures*, Vol. 17, str. 261–276, 1983.
41. F. Damjanić, J. Šelih, Uporabniški priročnik za program THELIN, verzija 2.10, FAGG-IKPIR, Ljubljana, 1990.
42. F. B. Damjanić, J. Šelih, Thermal finite element analysis of moulds for plastic forming processes, *5th Int. Symp. on Numerical Methods in Engineering*, članek 9.1.1., Lausanne, Švica, 1989.
43. F. B. Damjanić, J. Šelih, Thermal analysis of an injection mould for plastic forming process, *Numerical Methods in Thermal Problems* (Eds. R. W. Lewis and K. Morgan), Vol. 6, str. 151–159, Pineridge Press, Swansea, U.K., 1989.
44. F. B. Damjanić, R. Pavletič, R. Marinčič, Thermo-mechanical analysis of a combustion seal system, *Computational Plasticity* (Eds. D. R. J. Owen et al.), str. 543–554, Pineridge Press, U.K., 1989.
45. F. B. Damjanić, R. Pavletič, R. Marinčič, Numerical analysis of combustion seals, *Proc. 10th Int. Symp. CAD/CAM*, str. 271–278, Zagreb, 1989.
46. J. Šelih, Z. Benčič, A. Bešič, F. Damjanić, Študij temperaturnega polja v energetskem tiristorju pri udarnem toku, Kuhljevi dnevi 90, Zbornik del, str. 65–72, Rogla, 1990.
47. F. B. Damjanić, D. R. J. Owen, Mapped infinite elements in transient thermal analysis, *Computers and Structures*, Vol. 19, str. 673–687, 1984.
48. P. Marović, F. B. Damjanić, Mapped infinite elements in the analysis of geomechanical problems, *Numerical Techniques for Engineering Analysis and Design* (Eds. G. N. Pande et al.), 2. del, str. 749–753, Balkema, Rotterdam, Nizozemska, 1985.
49. P. Marović, F. B. Damjanić, Mapped infinite elements in nonlinear stress analysis with special respect to gravity load, *Numerical Methods for Non-Linear Problems* (Eds. C. Taylor et al.), Vol. 3, str. 1263–1276, Pineridge Press, Swansea, U.K., 1986.
50. P. Marović, F. B. Damjanić, Underground stress analysis using mapped infinite elements, *Numerical Methods in Geomechanics* (Eds. G. Swoboda), Vol. 2, str. 959–968, Balkema, Rotterdam, 1988.
51. L. Briseghella, F. B. Damjanić, Comportamento evolutivo delle frane, *Proc. 4th Italian Conference on Computational Mechanics*, AIMETA, čl. 16, Padova, Italija, 1989.
52. L. Briseghella, F. B. Damjanić, Numerical analysis of landslide motion, *Convegno di Meccanica dei Materiali e delle Strutture* (In ricordo di R. Baldaci e M. Capurso), zbornik del, članek 26, Rim, Italija, 1989.
53. L. Briseghella, F. B. Damjanić, A numerical approach for the landslide evolution prediction, *Numerical Techniques for Engineering Analysis and Design* (Eds. G. N. Pande et al.), Balkema, Rotterdam, Nizozemska (v tisku).
54. F. B. Damjanić, D. R. J. Owen, J. M. A. Cesar de Sa, V. Jović, Numerical modelling in the glass industry, *Proc. 8th Int. Symp. CAD/CAM*, str. 365–370, Zagreb, 1986.
55. F. B. Damjanić, Numerical model for the thermo-forming process of plastics by vacuuming, *Proc. 4th Italian Conference on Computational Mechanics*, AIMETA, čl. 36, Padova, Italija, 1989.

RAZVOJ MATEMATIČNEGA MODELIRANJA TOKOV S PROSTO GLADINO

UDK: 627.15:531.68

RUDI RAJAR

POVZETEK

Prikazan je razvoj matematičnih modelov tokov s prosto gladino pri nas in področja uporabe. Enodimenzijske modele smo uporabljali za račun potovanja visokovodnih valov na rekah, račun obratovalnih valov v kanalih HE, račun gibanja snežnih plazov in račun toka krvi v ožilju. Dvodimenzijske modele uporabljamo za račun gladin ob objektih (npr. pri regulaciji Save v Tacnu, pri projektiranju kajakaškega tekmovalnega kanala), račun toka po porušitvi nasipov itd. Tridimenzijski modeli so namenjeni predvsem za izračun tokov v rekah, jezerih ali morju v zvezi z nadaljnjimi izračuni kakovosti voda. Uporabljali smo jih že za račun tokov v Blejskem in Bohinjskem jezeru ter v Tržaškem, Koprskem in Piranskem zalivu.

DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODELS OF FREE-SURFACE FLOW

SUMMARY

The development of mathematical models for the simulation of free-surface flow and their application is presented.

One-dimensional models are used for the simulation of the propagation of flood waves in rivers, the simulation of waves in the derivation channels of HEPP, and for the simulation of snow avalanche dynamics and of the blood flow in vessels.

Two-dimensional models are used to simulate details of free surface flow near objects (e. g. on the Sava river in Tacen, flow in a kayak racing channel), for the simulation of dam-break flow etc. Three-dimensional models are used mainly to compute velocity fields in rivers, lakes or in the sea in connection with the water-quality modelling.

They were used for the simulation of the circulation in the lakes Bled and Bohinj, in the gulf of Trieste, and in the Koper and Piran Bays.

UVOD

Razvoj matematičnega modeliranja tokov s prosto gladino je šel na Katedri za splošno hidrotehniko FAGG skladno z razvojem v svetu, istočasno pa tudi v skladu s potrebami gospodarstva. Pri tem so tekle temeljne raziskave in tudi aplikativne, katerih rezultati so se uporabljali neposredno v praksi.

V povojnem obdobju, tja do leta 1970, delno še do leta 1975, je bil na tem področju v hidrotehniko poudarek na izkoriščanju hidroenergije ter zavarovanju pred poplavi. Pri tem so množično gradili fizične modele zapornic, prelivov, podslapij, dovodnih in odvodnih kanalov in tudi dolin pod pregradami v zvezi z določanjem hidravličnih posledic možnih porušitev. Tipično za celotno povojno obdobje je, da povsod v svetu skušajo fizične modele, kjer je le mogoče, nadomestiti z mnogo bolj ekonomičnimi matematičnimi modeli. Za simuliranje tokov prek zapornic, posebno pa še v podslapjih, še danes to v glavnem ni

mogoče, medtem ko je potek valov v dovodnih in odvodnih kanalih hidroelektrarn kot tudi visokovodnih valov v rekah in celo poplav ob eventualni porušitvi nasipov navadno možno simulirati z matematičnimi modeli do zadovoljive natančnosti. Zato smo razvili in uporabljali matematične modele (dalje MM) za omenjene probleme. To so bili še enodimenzijski modeli (1D), saj po eni strani na teh področjih ti navadno zadostujejo, po drugi strani pa so bili v tistem času tudi v svetu 2D in 3D modeli še v fazi temeljnih raziskav.

V obdobju 1975 do 1980 so se začela pri nas odpirati nova področja dveh vrst. Prva vrsta so dvodimenzijski tokovi ob objektih, npr. ob jezovih, na rekah ali kanalih in visokovodni ali porušitveni valovi v dveh dimenzijah, kjer je bilo že mogoče za nekatere primere fizične modele nadomestiti z matematičnimi. Drugo področje, ki je najprej v svetu, nato pa tudi pri nas povzročilo pravo eksplozijo raziskav, pa so ekološki problemi, povezani s kakovostjo vode v rekah, jezerih ali morju. Značilno za te probleme je, da jih večinoma ni mogoče uspešno simulirati na fizičnih modelih, da pa so se pokazale lepe možnosti matematičnega modeliranja. To so večinoma 2D in 3D modeli turbulentnih tokov, ki so se v svetu zelo intenzivno

Avtor:
Rudi Rajar, dr., dipl. gradb. inž., redni profesor

razvijali. Na naši katedri smo sledili razvoju, v zadnjem času pa tudi uspeli ujeti korak s svetom.

ENODIMENZIJSKI TOKOVI

To modeliranje je bilo predvsem v zvezi z naslednjimi področji:

- (a) račun visokovodnih valov na rekah,
- (b) račun obratovalnih valov v rekah ali kanalih hidroelektrarn,
- (c) račun toka po eventualni poružitvi nasipov ali pregrad.

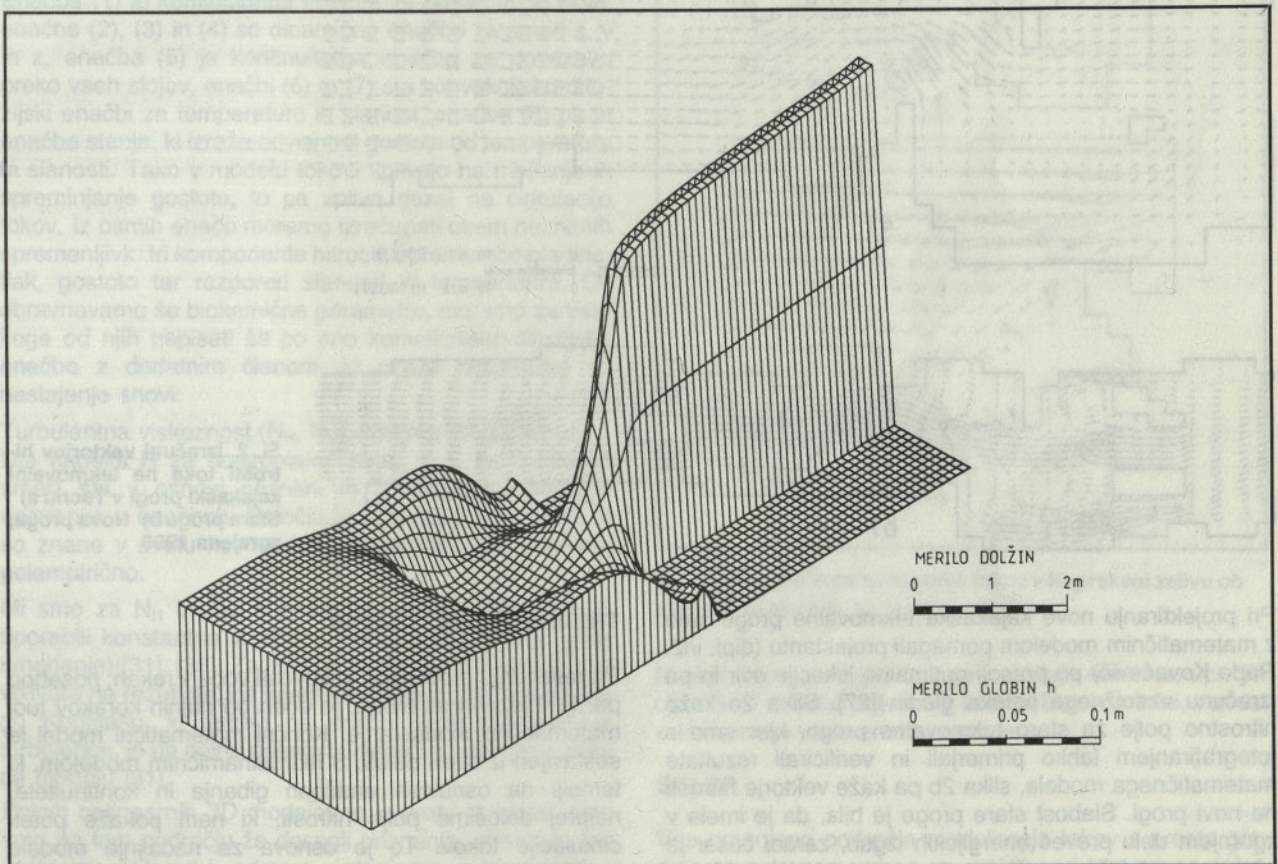
Za vse te vrste toka je značilno, da so v večini primerov usmerjeni vzdolž struge, tako da jih je mogoče opisati z enodimenzijsko dinamično in kontinuitetno enačbo. Za reševanje uporabljamo numerične metode končnih razlik. Topografija doline je podana s prečnimi profili na medsebojni razdalji 50 do 500 metrov (odvisno od velikosti reke in od zahtevane točnosti). Pri vseh treh vrstah problemov veljajo iste enačbe, različni pa so začetni in mejni pogoji.

Izdelali smo MM, s katerim smo preračunali potek visokovodnih valov na reki Dravi, Savi in Muri [1], [2]. Tu gre predvsem za vodnogospodarsko presojo zaščite pred poplavami, optimalno izkoriščanje hidrocentral, delno tudi za zaščito podtalnice in kakovosti voda. Veliko je bilo izračunov valov, ki nastanejo zaradi obratovanja HE, in sicer za dimenzioniranje nasipov v dovodnem kanalu HE

Srednja Drava I [3] in za kanale HE Ohau A v Novi Zelandiji [4]. Naš matematični model pa so (z dopolnitvami) dalje uporabljali v Vodnogospodarskem inštitutu za izračun valov v kanalu HE Srednja Drava 2.

V področju izračuna hidravličnih posledic poružitve nasipov ali pregrad smo za verifikacijo MM lahko zelo dobro izkoristili nekatere meritve na fizičnih modelih v sklopu temeljnih raziskav [5]–[15]. Pri tem smo predlagali nekatere originalne dopolnitve metod, kot npr. uvedbo lokalnih izgub zaradi razširitev ali krivin. Te izgube temeljijo na dejanskem fizikalnem dogajanju, istočasno pa tudi sploh omogočajo izračune v zelo neprizmatičnih kanalih, kjer sicer pride do numerične nestabilnosti.

Detajlna študija osnovnih enačb in mejnih pogojev je pokazala tudi možnost uporabe matematičnega modela (z določenimi spremembami) za račun na videz popolnoma različnih pojavov. Nekaj let smo delali na raziskavi Dinamika snežnih plazov [9], [16] in na študiji Dinamika krvnega ožilja [17]. Pri zadnji gre za hidrodinamično obravnavo toka krvi v ožilju oziroma za povezavo med tlaki, pretoki in upori pri pulzirajočem učinku srca (ki deluje kot črpalka). Pojav je do neke mere analogen vodnemu udaru v cevovodih. Ker je sistem enačb za vse omenjene probleme istega (hiperboličnega) tipa, smo lahko uporabili isto numerično metodo reševanja (Lax-Wendroff). Velike razlike pa so v začetnih in mejnih pogojih.



Sl. 1. Dvodimenzijski izračun vala po poružitvi pregrade, ko je prešel razširitev

Isti modificirani model smo uporabili tudi za izračun valov, ki nastanejo zaradi obrežnih odlomov v akumulaciji Mavčiče [18], saj gre tudi tu za enake osnovne enačbe in posebne mejne pogoje.

DVDIMENZIJSKI TOKOVI

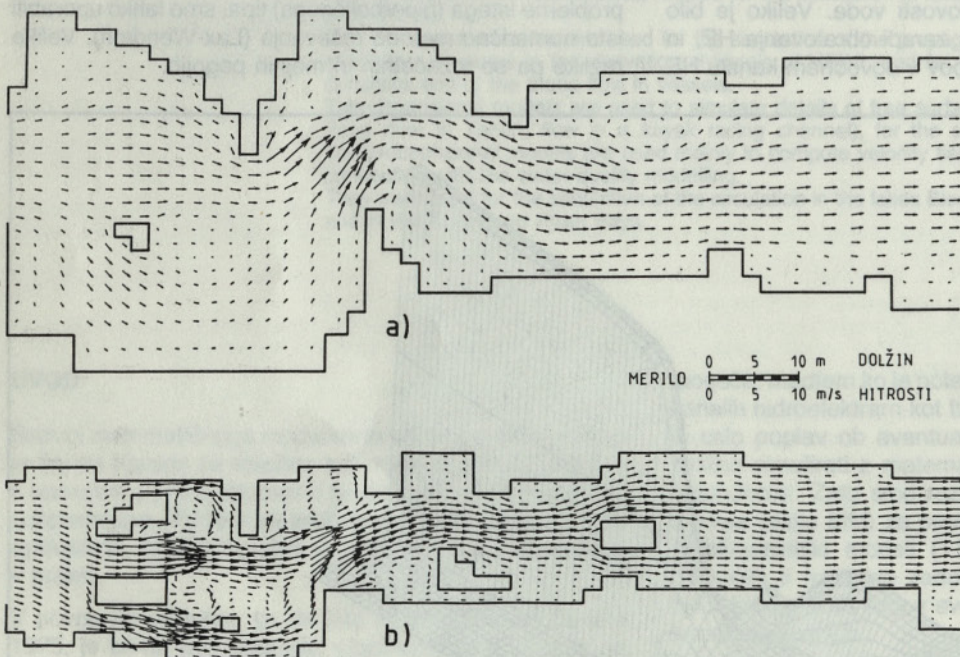
Potreba po dvodimenzijskih modelih se je najprej pojavila pri problemih porušitvenih valov, kjer se voda razliva v dveh dimenzijah. V okviru osnovnih raziskav smo izdelali program [19], [20], [21], ki smo ga verificirali s primerjavo z rezultati meritev Cvetanke Popovske [22] na fizičnem modelu shematiziranega korita z lokalno naglo razširitvijo, ki je bil zgrajen na gradbeni fakulteti v Skopju.

Drugo vrsto modela smo razvili za izračun kvazi-stacionarnega toka v zelo strmih dolinah s krivinami, kjer je vpliv centrifugalnih pospeškov bistven. Ta model je predstavljal nov prispevek tudi v mednarodnem merilu [23].

Isti model, s spremenjenimi mejnimi pogoji, smo uporabili tudi pri reševanju drugih primerov, npr. pri izračunu toka v hidravlični stopnji [24] ali za izračun poteka gladin na Savi nad in pod jezom pri Tacnu [26].

Pomoč matematičnega modela je bila v tem, da je dal projektantu že za prvo predlagano varianto lokacije ovir indikacijo o poteku tokov, vrtnecv in vodnih skokov, tako da je lahko izbral določene spremembe, da bi proga čimbolj ustrezala tekmovalnim pogojem. Končne detajle, ki jih pa matematični model ni mogel pokazati, je projektant oblikoval še po opazovanju na samem kanalu. Matematični model je prispeval toliko, da ni bilo treba graditi fizičnega modela, za katerega je primanjkovalo tako časa kot sredstev.

Delno smo dvodimenzijski model uporabljali tudi že pri reševanju problemov kakovosti voda. Simulirali smo tokove v Blejskem jezeru pri dotoku Radovne in iztoku preko natege [28], [29]. Bistvo raziskave je v tem, da se ugotovi, kako učinkoviti so ukrepi za zdravljenje jezera – kakšno cirkulacijo v jezeru povzroči umetni dovod in odvod. Ker so bile izvedene tudi meritve na samem jezeru (švicarska ekipa z Univerze v Bernu), je bila možna dobra verifikacija modela. Tu smo uporabljali v svetu že poznani in v splošnem zelo uspešni t. i. $k-\epsilon$ model turbulence. Rezultati izračunov se dobro ujemajo z rezultati meritev.



Sl. 2. Izračuni vektorjev hitrosti toka na tekmovalni kajakaški progi v Tacnu a) Stara proga b) Nova proga, zgrajena 1990

Pri projektiranju nove kajakaške tekmovalne proge smo z matematičnim modelom pomagali projektantu (dipl. inž. Rade Kovačević) pri presoji optimalne lokacije ovir in pri izračunu vzdolžnega poteka gladin [27]. Slika 2a kaže hitrostno polje za staro tekmovalno progo, kjer smo s fotografiranjem lahko primerjali in verificirali rezultate matematičnega modela, slika 2b pa kaže vektorje hitrosti na novi progi. Slabost stare proge je bila, da je imela v zgornjem delu preveč energijskih izgub, zaradi česar je bila v prvem delu pretežka, v drugem pa prelahka. Nova proga je popolnoma predelana. Bistveno je ožja in težka

TRIDIMENZIJSKI TOKOVI

Pri reševanju problemov kakovosti vode v rekah, posebno pa še v jezerih ali morju, je eden od nujnih korakov tudi matematično modeliranje. Končni matematični model je sestavljen iz dveh delov. S hidrodinamičnim modelom, ki temelji na osnovnih enačbah gibanja in kontinuitete, najprej določimo polje hitrosti, ki nam pokaže potek cirkulacije tokov. To je osnova za nadaljnje modele kakovosti, kjer na osnovi konvekcijsko-difuzijske enačbe za razne biokemične parametre ali polutante določamo

transport in disperzijo le-teh po recipientu. S posebnim členom v enačbah se zajame tudi razgradnja ali produkcija snovi, možno je upoštevati tudi samočistilno sposobnost.

Kombinacija obeh modelov predstavlja zelo koristno orodje, ki ga je možno uporabljati za presojo ekonomsko in ekološko optimalnih rešitev, saj s takim modelom (ko je tudi ustrezno verificiran) lahko simuliramo dogajanje ob raznih sedanjih ali načrtovanih situacijah. Med drugim je možno določiti npr. optimalno lokacijo podmorskih izpuštov, koncentracijo polutantov na raznih lokacijah (npr. kopaljških, lukah itd.) ob različnih predvidenih rešitvah ali pa tudi stanje ob eventualnih ekoloških katastrofah (razlitje nafte).

V nekaterih primerih je možno uspešno uporabiti 2D model (če je hitrost po globini približno konstantna), večinoma pa je nujen 3D model, kjer se hitrost z globino spreminja.

Uporabljamo t. i. metodo končnih volumnov, ki spada med metode končnih razlik. Definijsko področje se razdeli v vertikalni smeri na sloje, v horizontalni pa na mrežo celic.

V metodi končnih volumnov se giblje (»dih«) z gladino samo površinski sloj, vsi ostali pa so fiksirani v prostoru in času.

Uporabljamo 8 enačb, ki jih tu ne prikazujemo (glej npr. [31], [32]).

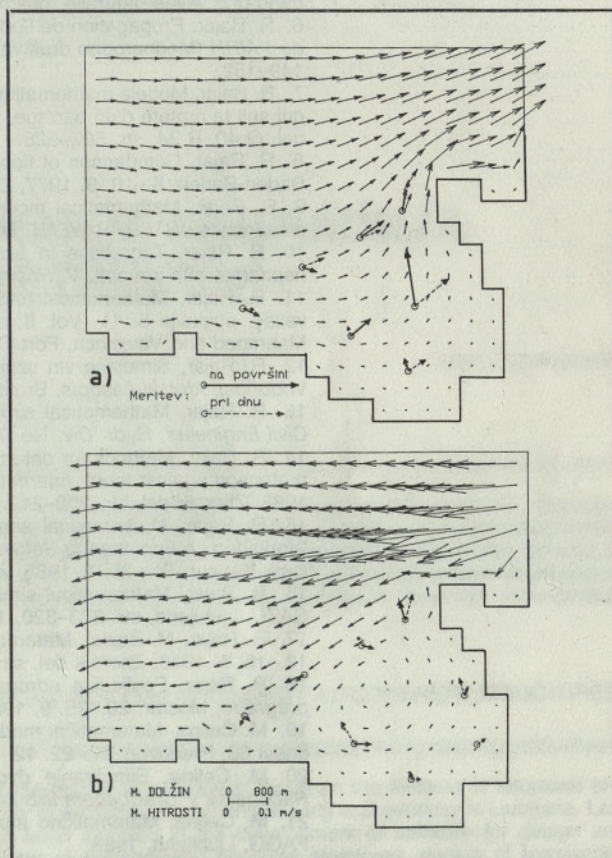
Enačba (1) je kontinuitetna enačba za posamezne sloje, enačbe (2), (3) in (4) so dinamične enačbe za smeri x , y in z , enačba (5) je kontinuitetna enačba za povezavo preko vseh slojev, enačbi (6) in (7) sta konvekcijsko-difuzijski enačbi za temperaturo in slanost, enačba (8) pa je enačba stanja, ki izraža odvisnost gostote od temperature in slanosti. Tako v modelu tokovi vplivajo na mešanje in spreminjanje gostote, to pa vpliva nazaj na cirkulacijo tokov. Iz osmih enačb moramo izračunati osem neznanih spremenljivk: tri komponente hitrosti, spremembo gladine, tlak, gostoto ter razpored slanosti in temperature. Če obravnavamo še biokemične parametre, moramo za vsakega od njih napisati še po eno konvekcijsko-difuzijsko enačbo z dodatnim členom, ki izraža razgradnjo ali nastajanje snovi.

Turbulentna viskoznost (N_H , N_V) oziroma difuzivnost (D_H , D_V) (indeks H za horizontalno smer in V za vertikalno smer) sta v osnovi neznani in predstavljata dodatne neznanke v enačbah. Določiti ju je treba z enačbami, ki so znane v svetu kot modeli turbulence in so dobljene polempirično.

Mi smo za N_H in D_H , ki manj vplivajo na potek tokov, uporabili konstantne vrednosti (njihova vrednost je stvar umerjanja) [31], [36]. Za izračun N_V in D_V , ki bistveno bolj vplivata na rezultate, pa imamo vgrajen model turbulence po Koutitasu, ki temelji na enačbi kinetične energije turbulence, je pa delno poenostavljena na podlagi meritev na modelu [31].

Polnih nelinearnih 3D modelov je v svetu le nekaj, zato smo na tem področju že dosegli priznanja, posebno, ker večinoma računske primere potrjujemo z meritvami v naravi.

S tem modelom smo že uspešno računali tokove v Bohinjskem jezeru [32], [33], v Blejskem jezeru ter v Tržaškem, Koprskem in Piranskem zalivu [34] – [39]. Sl. 3 kaže cirkulacijo tokov v Koprskem zalivu ob plimi (a) in ob oseki (b) ter brez vetra. Situacija je pomembna za presojo odnašanja odplak in za določanje optimalne lokacije podmorskih izpuštov. Vidi se, da ob plimi tok odnaša odplake ob vzhodni obali proti severu in ven iz zaliva, medtem ko nastane ob oseki v zalivu ciklonalni (protiurni) vrtilinec, kar je neugodno, saj ni izmenjave vode, ki kroži po zalivu in tudi hitrosti toka so zelo majhne. Meritve, ki so prikazane na sliki 3, so izvedli člani Vodnogospodarskega inštituta skupaj s člani poljske akademije znanosti. V bodočih raziskavah bomo simulirali še vplive najpogostejših vetrov (maestral, burja, jugo) na cirkulacijo vode.



Sl. 3. Računani in merjeni potek tokov v Koprskem zalivu ob plimi a) in ob oseki b) ter brez vetra

Model smo uporabljali tudi že za druge namene, npr. pri določanju cirkulacije tokov v bodoči Izolski marini, v zvezi s kakovostjo vode znotraj marine.

SKLEP

Vsa omenjena področja modeliranja tokov s prosto gladino so zelo pomembna za prakso, pri tem pa so nujne tudi temeljne raziskave, saj določena vprašanja, posebno

v zvezi s turbulenco, tudi v mednarodnem merilu še danes niso zadovoljivo rešena. Nekateri matematični modeli lahko nadomestijo mnogo dražje fizične modele, posebno obsežne raziskave pa potekajo na področju zaščite voda, saj tu zaradi različnih problemov (zelo obsežna področja, težavno simuliranje turbulence in stratifikacije itd.) večkrat fizično modeliranje sploh ni možno.

Raziskave nadaljujemo v smeri izpopolnjevanja modela; predvsem iščemo boljše metode za zmanjšanje numerične difuzije, ki včasih lahko popači prave rezultate, skušamo pa tudi vgraditi popolnejše modele turbulence za natančnejši izračun turbulentne viskoznosti in difuzivnosti.

LITERATURA

1. R. Rajar, Metode proračuna propagacije poplavnih valova u otvorenim tokovima, uvodni referat, zbornik *IX. posvetovanja Jug. društva za hidravlične raziskave* (JDHI), Split, 6.–10. 10. 1986, str. 12–39.
2. R. Rajar, Matematični model mejne in notranje Mure, Referat, *Goljevščkovi dnevi*, 1984.
3. R. Rajar, O. Colarič, P. Deržek, Rezultati računov in poskusov na distorziranem in nedistorziranem modelu ter meritev v naravi za nestalni tok s prosto gladino v dovodnem kanalu HE SD1, Zbornik *V. posvetovanja JDHI*, Ohrid, 26.–29. 4. 1970, str. 155–161.
4. R. Rajar, V. Verbovšek, Uporaba razbremenilnika tipa »Zlatoličje« pri HE Ohau (Nova Zelandija), *Gradbeni vestnik*, št. 2, str. 50–53, 1973.
5. R. Rajar, Recherche theorique et experimentale sur la propagation des ondes de rupture de barrage dans une vallee naturelle, *doktorska disertacija*, Univerza Paul Sabatier, Toulouse, Francija, 1972.
6. R. Rajar, Propagation de l'onde de rupture d'un barraga dans une vallee naturelle, *XIV. Congress de l'AIHR* (Mednarodno društvo za hidravlične raziskave), Paris, 6.–10. 6. 1971, Vol. 5, sem. 3, str. 149–152.
7. R. Rajar, Modele mathematique et abaqes sans dimensions pour la determination de l'ecoulement qui suit la rupture d'un barrage, *XI. Congress des Grands Barrages*, Madrid, 9.–12. 6. 1973, Zbornik del, Q 40, R 34, str. 507–525.
8. R. Rajar, Comparison of floods due to total, partial and gradual damcollapse, *18. kongres IAHR*, Baden-Baden, 8.–10. 9. 1977, Zbornik del, Vol. 4, C. 69, str. 553–558.
9. R. Rajar, Mathematical models for simulation of flood waves of dam-break waves and of snow avalanches, *INTERPRAVENT*, Bad Ischl, Avstrija, 6.–9. 9. 1980, Zbornik del, str. 111–119.
10. R. Rajar, Teoretične in eksperimentalne raziskave valov, ki nastajajo pri porušitvi pregrad v neprizmatičnih strugah, *V. Posvetovanje JDHI*, Ohrid, 26.–29. 4. 1970, Zbornik del, str. 145–153.
11. R. Rajar, Mathematical and physical model for the dam-break wave propagation in a natural valley, poglavje 5. 11 (Vol. II, str. 662–665) v knjigi *Unsteady Flow in Open Channels*, Edited by Mahmood and Vevjevich, Fort Collins, USA, 1975.
12. R. Rajar, Simulace vln vznikajicich pri uplnem, častečnem nebo postupnem protženi prehrad, *Vodohospodarski časopis*, Bratislava, št. 1, str. 43–63, 1977.
13. R. Rajar, Mathematical simulation of dam-break flow, *Proceeding of the American Society of Civil Engineers, Hydr. Div. No. 7*, str. 1011–1026, 1978.
14. R. Rajar, Methods for determination of floods due to collapse of dams and economic aspects of protection against them, *International Commission on Irrigation and Drainage*, Dubrovnik, 26.–29. 9. 1988, Zbornik del, str. 202–212.
15. R. Rajar, Mathematical simulation of dam-break flow and related unsteady flow phenomena, Workshop on *Engineering Software-Application and Research (ENG SAR)*, Indian Institute of Technology, Kanpur, 21.–25. 1. 1985, Zbornik del, str. 25, 1985.
16. R. Rajar, Mathematical simulation of snow avalanche dynamics, *Spominski zbornik A. Kuhlja, SAZU*, Ljubljana, str. 303–320, 1982.
17. R. Rajar, M. Bezljaj, Matematični model arterijskega sistema, *VII. posvetovanja JDHI*, Novi Sad, 12.–15. 9. 1978, Zbornik del, str. 51–72.
18. R. Rajar, Posljedice odrona obale u akumulacije, *XIII. kongres Jugoslov. društva za visoke pregrade*, Mostar, 20.–25. 9. 1986, Zbornik del, str. 245–250.
19. M. Četina, Matematični model turbulentnega toka zraka okrog dvodimenzionalnih teles, *Kuhljevi dnevi 88*, Preddvor, 21.–22. 12. 1988, Zbornik del, str. 164–173.
20. M. Četina, Simuliranje dvodimenzionalnega nestalnega toka s prosto gladino, *4. seminar Računalnik v gradbenem inženirstvu*, Ljubljana, 5.–6. 4. 1988, Zbornik del, str. 295–301.
21. M. Četina, Matematično modeliranje dvodimenzionalnih turbulentnih tokov, *magistrska naloga*, FAGG, Ljubljana, 1988.
22. C. Popovska, Numeričko i eksperimentalno istraživanje na dvodimenzionalno tečenje vo otvoreni tokovi, *disertacija*, Gradj. fak. Skopje, 1988.
23. R. Rajar, M. Četina, Two-dimensional dam-break flow in steep curved channels, *XX. Congress IARH*, Moskva, 5.–9. 9. 1983, Zbornik del II, str. 571–579.
24. M. Četina, S. Juvan, Račun toka v stopnji s pomočjo računalniškega programa TEACH, *5. seminar Računalnik v gradbenem inženirstvu*, Ljubljana, 5.–6. 4. 1990, Zbornik del, str. 113–118.
25. M. Četina, Uporaba $K - \epsilon$ modela turbulence pri računu toka vode s prosto gladino, *Kuhljevi dnevi 89*, Rogla, 19.–20. 10. 1989, Zbornik del, str. 253–262.
26. M. Četina, R. Rajar, M. Marinček, Dvodimenzijski račun gladin na Savi pri Tacnu, *8. Goljevščkovi spominski dan*, Ljubljana, 8. 3. 1989, *Acta Hydrotechnica*, 4. izredna št., letnik 7, str. 6.1.–6.13, 1989.
27. M. Četina, Nekateri primeri dvodimenzionalnih izračunov turbulentnega toka s prosto gladino, *10. posvetovanje JDHI*, Sarajevo, 9.–13. 10. 1990.
28. R. Rajar, M. Četina, Numerical and experimental simulation of twodimensional turbulent flow, *HYDROSOFT*, Portorož, 10.–14. 9. 1984, Zbornik del, str. 2.29–2.39.
29. R. Rajar, M. Četina, Mathematical simulation of 2-dim. lake circulation, *HYDROSOFT*, Southampton, 9.–12. 9. 1986, Zbornik del, str. 125–133.

30. R. Rajar, Program za simuliranje dvo- in trodimenzionalnih turbulentnih tokov v vodotokih, 4. seminar *Računalnik v gradbenem inženirstvu*, Ljubljana, 5.–6. 4. 1988, Zbornik del, str. 287–194.
31. R. Rajar, Three dimensional modelling of currents in the Northern Adriatic Sea, *XXIII. kongres IAHR (International Association for Hydraulic Research)*, Ottawa, Kanada, 21.–25. 8. 1989, Zbornik del, str. C35–C42.
32. R. Rajar, Trodimenzionalno modeliranje tokov v jezerih in morju, 10. posvetovanje *JDHI*, Sarajevo, 9.–13. 10. 1990.
33. R. Rajar, Matematično modeliranje disperzije v recipientu, *Zaštita voda*, Bar, 23.–25. 5. 1990.
34. R. Rajar, M. Četina, V. Tonin, Matematično modeliranje tokov v Piranskem zalivu – prvi rezultati, *Kuhljevi dnevi 88*, Preddvor, 21.–22. 12. 1988, Zbornik del, str. 174–182.
35. R. Rajar, V. Tonin, Measurements and numerical simulation of currents in Koper Bay and Piran Bay (Northern Adriatic), *XXXI. kongres ICSEM – International Commission for the Scientific Exploration of the Mediterranean Sea*, Atene, 17.–22. 10. 1988, poster.
36. R. Rajar, M. Četina, V. Tonin, Influence of linearisation and of vertical distribution of turbulent viscosity coefficient on 3 Dim. simulation of currents, *Hydrocomp*, Dubrovnik, 13.–16. 6. 1989, Zbornik del, str. 193–202.
37. R. Rajar, Three-dimensional mathematical model of currents and of transport of pollutants in the Adriatic, *VIII. Computational Methods in Water Resources*, Venezia, 11.–15. 6. 1990, Zbornik del, str. 57–62.
38. R. Rajar, Hydrodynamic models as basis for water quality modeling, *1st Intern. Symposium Ecological Problems in the Adriatic Sea*, Split, 7.–9. 11. 1990.

RAČUNALNIŠKO PROJEKTIRANJE IN GRADNJA ARMIRANOBETONSKIH KONSTRUKCIJ

UDK 624.012.45:519.68

JANEZ DUHOVNIK

POVZETEK

Članek opisuje delo in rezultate skupine raziskovalcev na Inštitutu za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo na FAGG v Ljubljani, ki se je v preteklih desetih letih ukvarjala z razvojem programske opreme za projektiranje in gradnjo armiranobetonskih konstrukcij. Opisana je programska oprema za projektiranje in izdelavo armature, projektiranje montažnih betonskih konstrukcij, projektiranje opažnih konstrukcij in geometrijsko modeliranje stavb. Prikazana je uporabnost sodobnih računalniških tehnologij na tem področju.

COMPUTER AIDED DESIGN AND CONSTRUCTION OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

SUMMARY

The paper describes the work and the results of a research group on the Institute of structural and earthquake engineering at the Faculty of architecture, civil engineering and geodesy in Ljubljana. Last ten years, the research group has been involved in the development of software for design and manufacture of reinforcement, design of prefabricated concrete structures, design of formworks, geometrical modelling of buildings as well as in the research of the applicability of modern computer technologies in these fields.

UVOD

Računalniki postajajo čedalje pomembnejše orodje gradbenih konstruktorjev. Na eni strani omogočajo vedno bolj natančne analize novih in zapletenih konstrukcij, na drugi pa lahko z njimi močno avtomatiziramo projektiranje

običajnih konstrukcij, s katerimi se gradbeni konstruktorji srečujemo vsak dan.

Gradbeni konstruktorji so bili tudi pri nas med prvimi uporabniki računalnikov. Ti so jim najprej pomagali pri dolgočasnih in zamudnih računih pri reševanju sistemov enačb, na začetku sedemdesetih let pa smo že uporabljali program **STRESS**, ki je na podlagi osnovnih podatkov o konstrukciji in obtežbi zmožni samostojno izračunati pre-mike, notranje in podpore sile pri linijskih konstrukcijah.

Avtor:
Janez Duhovnik, dr., dipl. gradb. inž., izr. profesor

Vzporedno z uvajanjem drugih, tujih splošnih programov za račun linijskih, ploskovnih in prostorskih konstrukcij je bilo pri nas razvitih tudi več originalnih programov, ki so pomembno pospešili uvajanje računalnikov v delo konstrukterjev. Njihova uporaba pa je bila omejena samo na računanje konstrukcij.

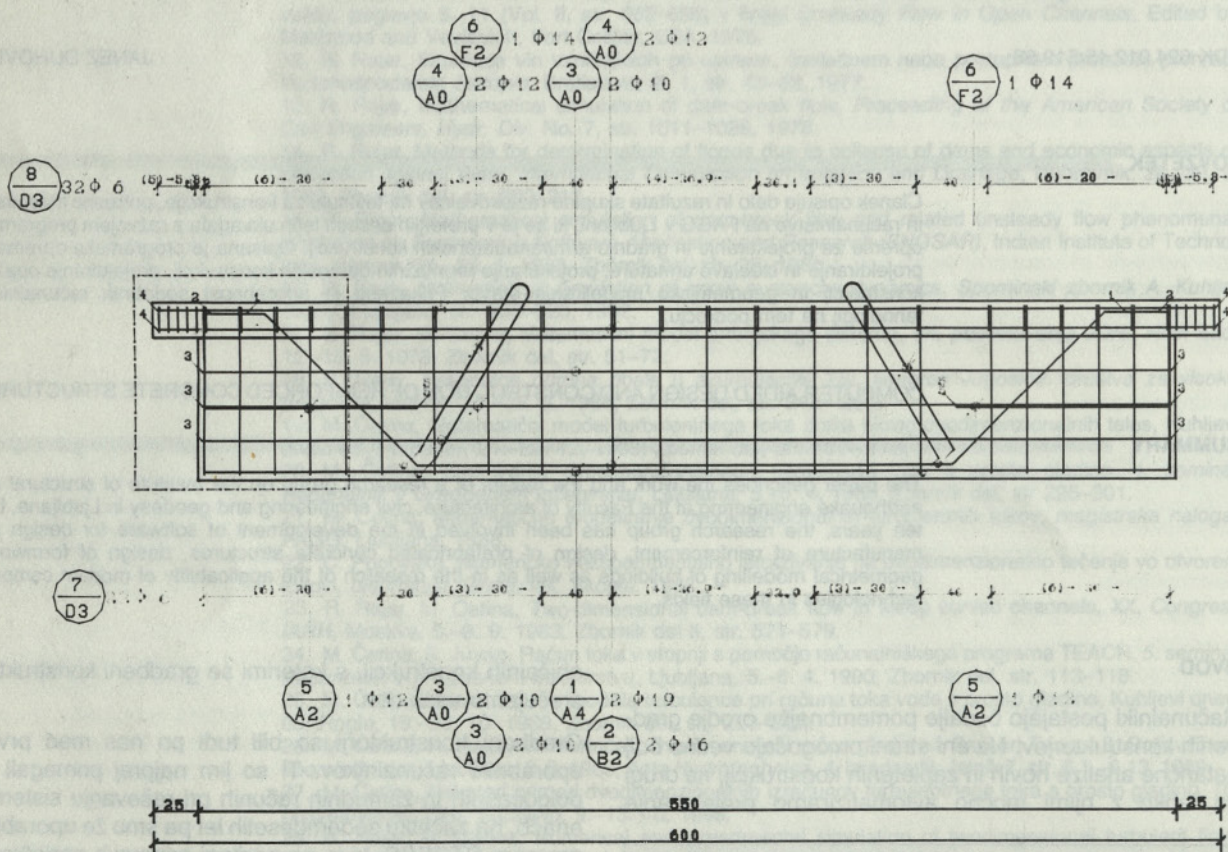
Močna spodbuda za uporabo računalnika pri ostalih fazah projektiranja je bil razvoj računalniške grafike. Nakup grafičnih terminalov in risalnikov na Inštitutu za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo (IKPIR) na FAGG leta 1979, ki ga je omogočila Raziskovalna skupnost Slovenije (RSS), pa je bil neposreden povod za začetek dela na tem področju pri nas.

Raziskovalno in razvojno delo je potekalo znotraj dveh raziskovalnih projektov (RP), v letih 1980–1985 v RP Računalniško projektiranje in izdelava armature (RP PIA), v letih 1986–1990 pa v RP Računalnik v gradbenem inženirstvu (RP RGI) [1]. Oba RP sta obsegala temeljne, uporabne in razvojne raziskave.

RAČUNALNIŠKO PROJEKTIRANJE IN IZDELAVA ARMATURE

Konstruiranje armature, risanje armaturnih načrtov, izdelava in montaža armature so med časovno najboljšejnimi fazami pri projektiranju in gradnji armiranobetonskih konstrukcij. To je bil najpomembnejši razlog za nastanek predloga za RP PIA, ki ga je konec leta 1979 IKPIR v sodelovanju z GIP Gradis predložil RSS. Ob dodatni denarni podpori večine najpomembnejših slovenskih gradbenih in projektantskih podjetij je bilo v letih 1980–85 izvedenih več raziskovalnih nalog. Na IKPIR, ki je prevzel raziskave v zvezi s projektiranjem armature, smo se ukvarjali s splošnimi osnovami računalniškega projektiranja armature (1980) in z računalniškim konstruiranjem in risanjem armaturnih načrtov za elemente montažnih konstrukcij (1981), ravninskih okvirnih konstrukcij (1982), plošč (1983), sten (1984) in splošnih konstrukcij (1985). Uporaben rezultat raziskovalnega in razvojnega dela so bili računalniški programi za konstruiranje armature in

T nosilec M 1:25
 MB 40 RA 400/500-1 GA 240/360



Slika 1. Armaturni načrt, izdelan s programskim sistemom AR-CAD

risanje armaturnih načrtov za različne vrste konstrukcij [2] ter usposobljeni kadri za razvojno delo na tem področju.

Programi smo razvijali na velikih računalnikih **CYBER** in **DEC**, pri čemer smo uporabljali doma razvita orodja [3, 4]. Praktična uporaba programov je bila mogoča le z našim neposrednim sodelovanjem pri projektiranju konstrukcij, ker je bila draga grafična oprema za projektivne biroje takrat nedosegljiva. Na ta način smo sodelovali pri nekaj projektih, po katerih so se konstrukcije tudi zgradile.

S pojavom mikroročunalnikov in drugih sorazmerno cenejših grafičnih naprav pa so se razmere bistveno spremenile. Ta oprema je danes dostopna tudi našim projektivnim podjetjem. Zato smo vso programsko opremo za projektiranje armature prenesli na mikroročunalnike in jo tam razvijali naprej. Rezultat tega dela je programski sistem **AR-CAD**. Ta omogoča avtomatično in interaktivno konstruiranje armature različnih vrst konstrukcij, risanje armaturnih načrtov in avtomatično sestavljanje seznamov armature [5]. Interaktivni del programa **AR-CAD** je izdelan v okolju programa **AUTOCAD**. Sistem je delno ali v celoti instaliran v več projektivnih podjetjih. Trenutno ga uporabljamo še v treh projektivnih birojih. Podatki o armaturi se lahko neposredno uporabijo v programih za vodenje proizvodnje v železokrivnici, ki so bili izdelani v **GIP Vegrad**.

Ob razvoju programske opreme je nastal tudi predlog standarda [6], ki bistveno poenostavlja risanje armaturnih načrtov in oblikovanje armature. Predlog standarda formalno še vedno ni sprejet, uporabljajo pa ga vsi, ki konstruirajo armaturo z računalniki.

RAČUNALNIŠKO PROJEKTIRANJE MONTAŽNIH BETONSKIH KONSTRUKCIJ

Montažne betonske konstrukcije še danes zavzemajo pomemben delež gradbene proizvodnje, čeprav je obseg naročil na tem področju zaradi zmanjšanja investicijske dejavnosti sorazmerno najbolj padel. Zaradi hitre gradnje takih konstrukcij je smotno čas za njihovo projektiranje

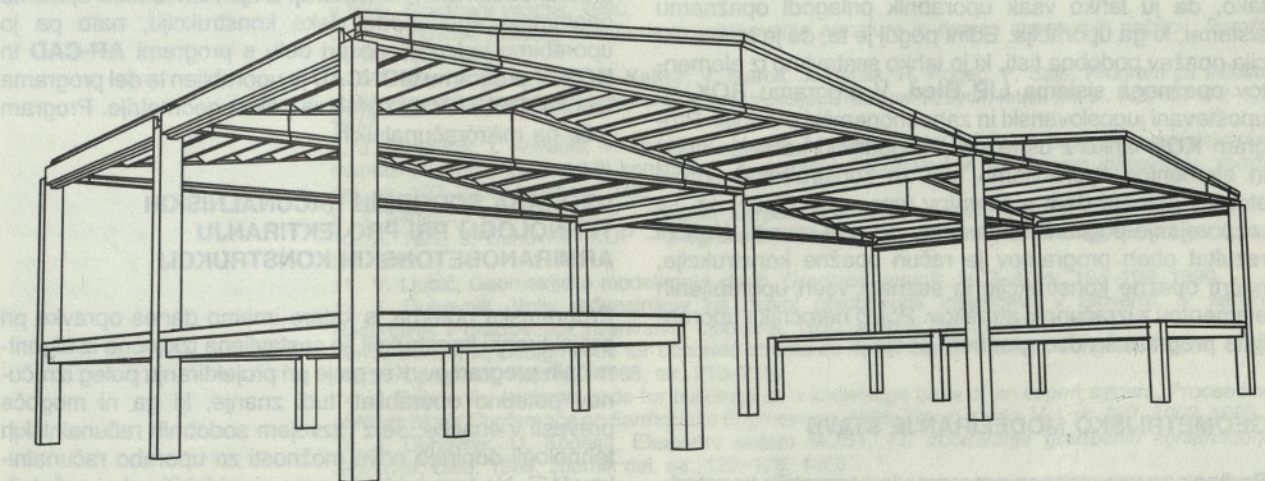
čimbolj skrajšati. Na **IKPIR** smo začeli razvijati programsko opremo za projektiranje montažnih konstrukcij že v sedemdesetih letih [7]. Poleg programa za račun montažnih konstrukcij Gorica smo v naslednjih letih razvili podobne programe še za montažne sisteme Grosuplje, Ingrad in Vemont.

Leta 1986 pa smo se skupaj z vsemi pomembnejšimi proizvajalci montažnih konstrukcij dogovorili, da razvijemo en sam programski sistem, ki bo namenjen projektiranju obstoječih in na novo se pojavljajočih montažnih konstrukcij. Tudi tu smo se odločili, da bomo sistem razvijali na mikroročunalnikih. Tako je nastal programski sistem **MONCAD** [8]. **MONCAD** je namenjen projektiranju montažnih konstrukcij, sestavljenih iz krovnih elementov, nosilcev, stebrov in čašastih temeljev. Program je sestavljen iz delov, ki omogočajo: sestavljanje kataloga tipov in elementov poljubnega montažnega sistema, račun notranjih sil in dimenzioniranje vseh elementov konstrukcije, račun pomikov konstrukcije, račun razpok in povesov nosilcev in krovnih elementov, risanje geometrije konstrukcije, risanje armaturnih načrtov elementov in avtomatično sestavljanje seznama vseh uporabljenih elementov. Program je povezan s sistemom **AR-CAD** in programom **AUTOCAD**.

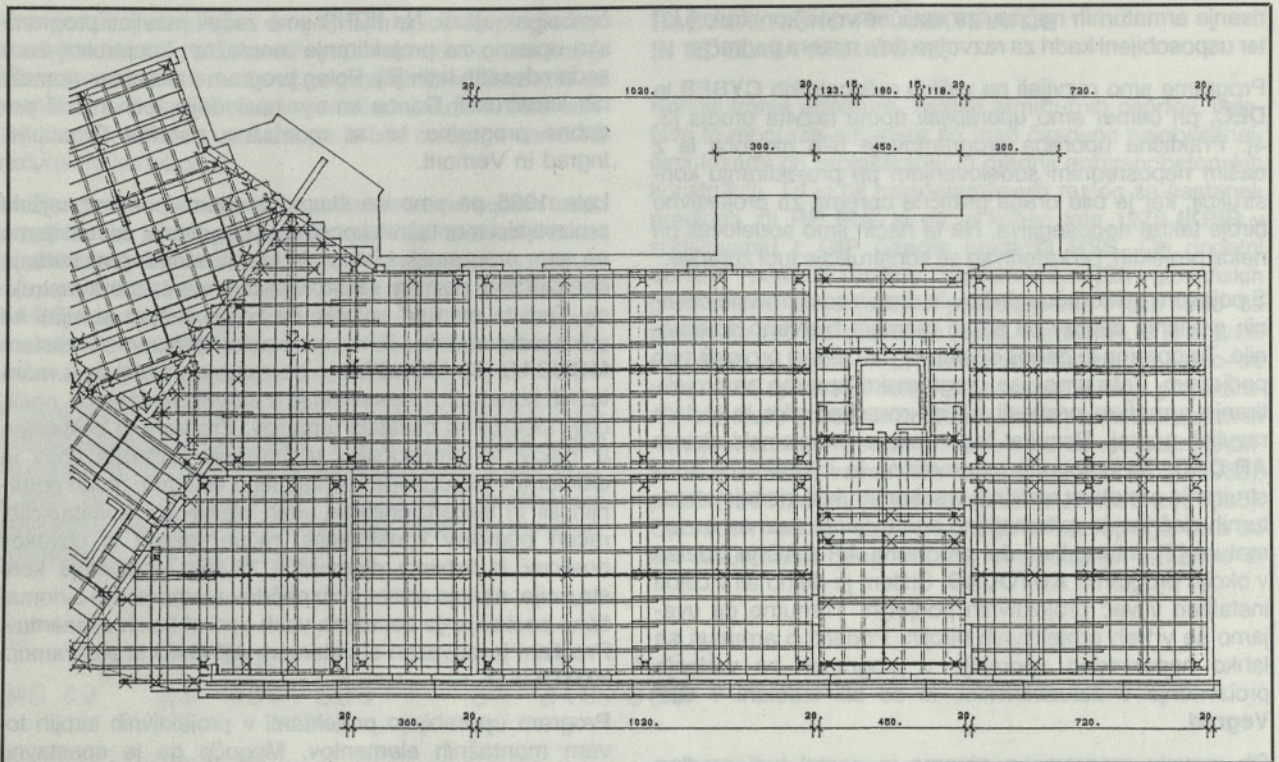
Program uporabljajo projektanti v projektivnih birojih tovarn montažnih elementov. Mogoče ga je enostavno prilagajati posebnim zahtevam posameznih proizvajalcev montažnih elementov.

RAČUNALNIŠKO PROJEKTIRANJE OPAŽNIH KONSTRUKCIJ

Naraščajoča zahtevnost sodobnih betonskih konstrukcij vpliva tudi na postopke pri gradnji teh konstrukcij. Kdor želi biti konkurenčen, se mora vseh opravil lotevati načrtno, pri izvajanju pa mora biti mogoča stalna kontrola. Zato so tudi za izdelavo opažnih konstrukcij potrebni načrti, podlaga za njihovo izdelavo pa morajo biti ustrezni izračuni.



Slika 2. Tipična montažna konstrukcija, ki jo je mogoče računati s programom **MONCAD**



Slika 3. Načrt opaža plošče, izdelan s programom KOP

ni. Šele na podlagi te dokumentacije je mogoče izdelati zadovoljive popise del, ki vsebujejo osnovne podatke, potrebne za nadzor nad stroški in vodenje proizvodnje.

Na pobudo in ob denarni podpori proizvajalca elementov opažnih konstrukcij **LIP Bled** smo zato začeli z razvojem programske opreme za račun in konstruiranje opažnih konstrukcij [9, 10]. Glede na proizvodni program naročnika je bilo določeno, da naj programska oprema omogoča projektiranje opažnih konstrukcij za plošče in stene (stebre) na mikroročunalnikih. Programa **ROK** za računanje opažnih konstrukcij in **KOP** za konstruiranje sta izdelana tako, da ju lahko vsak uporabnik prilagodi opažnemu sistemu, ki ga uporablja. Edini pogoj je ta, da je konstrukcija opažev podobna tisti, ki jo lahko sestavimo iz elementov opažnega sistema **LIP Bled**. V programu **ROK** so upoštevani jugoslovanski in zahodnonemški predpisi. Program **KOP** lahko z ustrežno prilagoditvijo kataloga tipov in elementov uporabljamo tudi za konstruiranje odrov, stropov iz montažnih elementov (npr. votlih plošč) oz. za razporejanje poljubnih elementov po neki ravnini. Končni rezultat obeh programov je račun opažne konstrukcije, načrti opažne konstrukcije in seznam vseh uporabljenih elementov z izračunom stroškov. Poleg naročnika uporabljata program še dve gradbeni podjetji.

GEOMETRIJSKO MODELIRANJE STAVB

Podlaga za vse opisane programe je geometrija konstrukcije, ki je pri običajnem projektiranju razvidna iz načrtov.

Pri računalniškem projektiranju pa je treba zgraditi geometrijski model konstrukcije v spominu računalnika. Delu v zvezi s tem pravimo geometrijsko modeliranje. Pri tem delu nam pomagajo posebni programi, ki jim pravimo geometrijski modelirniki. Ti so lahko dvo ali trodimenzionalni. Danes jih je na trgu zelo veliko, v času, ko pa smo se pri nas začeli ukvarjati z računalniškim projektiranjem armiranobetonskih konstrukcij, so obstajali le zelo dragi in zaprti paketi na velikih računalnikih. Zato smo se odločili za razvoj svojega programa **GeoMODEL** [11], ki tudi sedaj rabi kot koristno orodje za opis geometrije armiranobetonskih konstrukcij. Z njim lahko hitro opišemo geometrijo armiranobetonske konstrukcije, nato pa jo uporabimo kot podlogo pri delu s programi **AR-CAD** in **KOP**. V programu **MONCAD** je uporabljen le del programa **GeoMODEL**, ki rabi samo za prikaz geometrije. Program teče na mikroročunalnikih.

UPORABA SODOBNIH RAČUNALNIŠKIH TEHNOLOGIJ PRI PROJEKTIRANJU ARMIRANOBETONSKIH KONSTRUKCIJ

Programska oprema, s katero imamo danes opravka pri projektiranju konstrukcij, je sestavljena izključno iz algoritmčnih programov. Ker pa je pri projektiranju poleg izračunov posebno uporabljati tudi znanje, ki ga ni mogoče prevesti v enačbe, se z razvojem sodobnih računalniških tehnologij odpirajo nove možnosti za uporabo računalnikov [12]. Na tem področju smo si pridobili nekaj začetnih izkušenj in znanja [13–15], ki nam sedaj omogočajo, da

se lotimo nalog, katerih rezultati bodo uporabni tudi pri praktičnem delu konstruktorjev. Možnosti vidimo predvsem v razvoju ekspertnih sistemov, ki bodo povezovali obstoječo programsko opremo in usmerjali konstruktorja pri njegovem delu [16]. Pri tem nameravamo uporabljati vsa razpoložljiva orodja za razvoj programske opreme, ki jih ponuja svetovni trg.

SKLEP

Smotrnost raziskovalnega in razvojnega dela na področju računalniškega projektiranja armiranobetonskih konstrukcij lahko najbolje ocenijo neposredni uporabniki opisane programske opreme. Njihove praktične izkušnje nam kažejo, da razvita programska oprema že omogoča učinkovitejše projektiranje in gradnjo armiranobetonskih konstrukcij, možne pa so tudi številne izboljšave, za katere so predlogi nastali prav pri praktični uporabi. Velik izziv za nadaljnji razvoj na tem področju so sodobne računalniške tehnologije in orodja za razvoj programske opreme, ki obetajo hitrejše in učinkovitejše prilagajanje bodočim potrebam. Poseben poudarek pri nadaljnjem razvoju pa bo potrebno posvetiti integraciji posameznih delov programske opreme, kar bo njeno učinkovitost bistveno povečalo, zlasti pa vplivalo na racionalizacijo graditve objektov v celoti.

ZAHVALA

Za raziskovalno in razvojno delo v zvezi z opisano programsko opremo so prispevala denar gradbena in projektivna podjetja ter drugi bodoči uporabniki (GIP Beton-Zasavje, GIP Gradis, GIP Ingrad, GIP Pionir, GIP Vegrad, GP Gorica, GP Grosuplje, GP Stavbar, IB Elektroprojekt, PB Velenje, RC Celje, IB Ljubljana, IB Koper, LIP Bled, SGP Gradbinec, SGP Konstruktor, SGP Primorje, SGP Stavbenik, SCT, Slovenija projekt, vsi kupci programske opreme IKPIR), Raziskovalna skupnost Slovenije, Posebna raziskovalna skupnost za graditeljstvo in Mestna raziskovalna skupnost Ljubljana). Vsem, zlasti pa tistim, ki so nas ves čas podpirali, ki so začeli rezultate našega dela tudi uporabljati in ki so nam nato posredovali svoje praktične izkušnje, se za sodelovanje zahvaljujem skupaj s svojimi sodelavci. V preteklih desetih letih so to bili: prof. dr. Peter Fajfar, višja predavateljca Iztok Kovačič in mag. Janez Reflak; asistenti Vladislav Ljubič, Vid Marolt, mag. Duška Tomšič in Andrej Vitek; novi raziskovalci Anton Knific, mag. Igor Potočan, mag. Vanja Samec, asistent mag. Žiga Turk, mag. Marko Verčnik in asistent mag. Dejan Žlajpah; Milan Videmšek in Jure Rihar, ki sta bila več mesecev na podiplomskem strokovnem izpopolnjevanju na IKPIR in številni diplomanti na konstrukcijski smeri gradbenega oddelka.

LITERATURA

1. J. Duhovnik (urednik), raziskovalni projekt Računalnik v gradbenem inženirstvu, FAGG, VTOZD GG, IKPIR, 13 strani, 1987.
2. J. Duhovnik, V. Ljubič, D. Žlajpah, RAPAR – Program system for the design of reinforced concrete structures, *Int. Conf. on Computer-Aided Analysis and Design of Concrete Structures*, Split 1984, Proceedings, str. 923–936, Pineridge Press, Swansea, U.K., 1984.
3. A. Vitek, I. Kovačič, Grafični paket P, Uporabniški priročnik, *publikacija IKPIR št. 29*, 1987.
4. I. Kovačič, Menu input generating system for the FORTRAN programs, *Engineering Software III*, London, 1983, Proceedings, str. 3–12, 1983.
5. J. Duhovnik, V. Ljubič, A. Knific, D. Žlajpah, AR-CAD, programski sistem za projektiranje armature, v tisku, *Gradbeni vestnik*, 1990.
6. J. Duhovnik, Predlog standarda za oblikovanje armature in risanje armaturnih načrtov, *Poročilo IKPIR 7/90*, 1990.
7. J. Duhovnik, B. Jelinčič, B. Kajfež, V. Marolt, J. Reflak, R. Rogáč, F. Saje, Program za izdelavo statičnega računa montažne dvoranske konstrukcije, *Gradbeni vestnik*, letnik 26, št. 7–8, str. 172–179, 1977.
8. J. Duhovnik, I. Kovačič, V. Ljubič, V. Marolt, M. Verčnik, MONCAD – program za projektiranje montažnih armiranobetonskih konstrukcij, 4. seminar *Računalnik v gradbenem inženirstvu*, zbornik del, str. 197–203, Ljubljana, 1988.
9. V. Samec, J. Duhovnik, ROK – program za račun opažnih konstrukcij, vir kot pri 8., str. 335–340.
10. Ž. Turk, J. Duhovnik, KOP – program za konstruiranje opažnih konstrukcij, vir kot pri 8., str. 341–346.
11. V. Ljubič, Geometrijsko modeliranje stavb, *Gradbeni vestnik*, št. 7–8, str. 184–190, 1990.
12. J. Duhovnik, Vpliv računalnikov na razvoj gradbenega inženirstva v Sloveniji, 5. seminar *Računalnik v gradbenem inženirstvu*, Ljubljana, 1990, zbornik del, str. 8–14, 1990.
13. J. Duhovnik, Design code for concrete structures as an expert system, Congress Report of 13th IABSE Congress, Helsinki, 1988, str. 213–219.
14. J. Duhovnik, Aseismic code for buildings as a knowledge base of an expert system, Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, 1988, Tokyo-Kyoto, Vol. str. 997–1002, 1989.
15. J. Duhovnik, U. Kodolja, Ekspertni sistem MOST, 11. zborovanje gradbenih konstruktorjev Slovenije, Bled, 1989, zbornik del, str. 122–128, 1989.
16. J. Duhovnik, Računalniško integrirano projektiranje gradbenih konstrukcij, 12. zborovanje gradbenih konstruktorjev Slovenije, Bled, 1990, zbornik del, str. 218–225, 1990.

NEKATERI PRISPEVKI KATEDRE ZA MASIVNE IN LESENE KONSTRUKCIJE K RAZVOJU STROKE

UDK 624.011.1+624.012.4]04

FRANC SAJE, RAJKO ROGAČ

POVZETEK

V članku so prikazani novejši prispevki katedre za masivne in lesene konstrukcije k razvoju stroke. V informativni obliki je predstavljena tako dejavnost katedre s področja teoretičnih in eksperimentalnih temeljnih raziskav kakor tudi njeno prizadevanje v zvezi z uvajanjem novih metod računske analize betonskih konstrukcij v prakso.

SOME CONTRIBUTIONS TO THE DEVELOPMENT OF CIVIL ENGINEERING BY DIVISION OF CONCRETE AND WOODEN STRUCTURES

SUMMARY

The paper deals with the newer contributions to the development of civil engineering by Division of concrete and wooden structures. The activity of the Division regarding theoretic and experimental basic researches as well as its endeavours in introducing new methods of concrete structural analysis into the practice are presented in an information-like shape.

UVOD

Člani katedre za masivne in lesene konstrukcije (KMLK) smo v minulem obdobju delali tako na področju temeljnih teoretičnih in eksperimentalnih raziskav kakor tudi na področju razvijanja novih računskih metod analize in dokazovanja varnosti betonskih in lesenih konstrukcij. Tvrno sodelovanje pri snovanju tehnične regulative predstavlja pomemben del dejavnosti katedre. Priprava strokovne literature in izdelava pripomočkov za praktično računanje konstrukcij pa pomeni bistveni sestavni del prizadevanj za širjenje novih teoretičnih, eksperimentalnih in izkustvenih spoznanj stroke. V tem poročilu so omenjeni samo nekateri raziskovalno-razvojni dosežki v zadnjem obdobju. Izbrani so iz različnih delovnih področij, kar naj bi prispevalo k popolnejši sliki dejavnosti KMLK. Posamezni prispevki so predstavljeni le v opisno informativni obliki, brez enačb in računskih primerov. Popolnejšo informacijo o opravljenih raziskavah pa lahko bralec dobi v referencah, ki so sproti navedene v besedilu.

Skrb za nabavo nujne laboratorijske raziskovalne opreme za področje konstrukcij je v minulih letih tako od posameznih sodelavcev kakor tudi od katedre v celoti zahtevala mnogo truda, časa in žrtev.

Avtorja:

Franc Saje, mag., dipl. gradb. inž., viš. predavatelj
Rajko Rogač, dr., dipl. gradb. inž., redni profesor

TEMELJNE LABORATORIJSKE RAZISKAVE

Eksperimentalne raziskave krčenja in tečenja betona, ki smo jih v letih 1971 in 1973 opravili v sodelovanju z Zavodom za raziskavo materiala in konstrukcij v Ljubljani, sodijo med prve tovrstne raziskave pri nas [1] [2]. Na podlagi poznejših eksperimentov na kockah je bila razvita relativno zanesljiva računsko metoda prognoziranja 28-dnevne trdnosti oziroma marke betona iz znane recepture sveže mešanice [3]. V sodelovanju z gradbenim podjetjem Tehnika so bile opravljene posebne eksperimentalne raziskave v zvezi z vgradljivostjo transportiranega betona. Na podlagi analize eksperimentalnih rezultatov so bila izdelana praktična navodila o trajanju in razdalji transportiranja betona, ki so glede vgradljivosti betona še sprejemljiva.

Da bi razvili računsko metodo analize, s katero bi lahko dovolj natančno zasledovali napetostno-deformacijsko stanje ojačenih betonskih konstrukcij vse do porušitve, smo leta 1977 pričeli intenzivno proučevati osnovne mehanske lastnosti ter konstitucijske zakone betona in armature. V okviru študija znanih matematičnih simulacij delovnih diagramov smo v laboratoriju Stare tehnike na Aškerčevi ulici napravili tudi nekaj lastnih eksperimentov, s katerimi smo ugotavljali delovne diagrame betona v območju tlakov. Ugotavljanje padajoče veje delovnega diagrama betona z močno zastarelim strojem, ki prek hidravličnega bata omogoča le ročni nanos sile, seveda ni bilo mogoče. Prve rezultate omenjenih raziskav impli-

citno vsebujejo tudi poročila, ki so bila objavljena na 6. evropskem kongresu iz potresnega inženirstva leta 1978 v Cavtatu [4] [30].

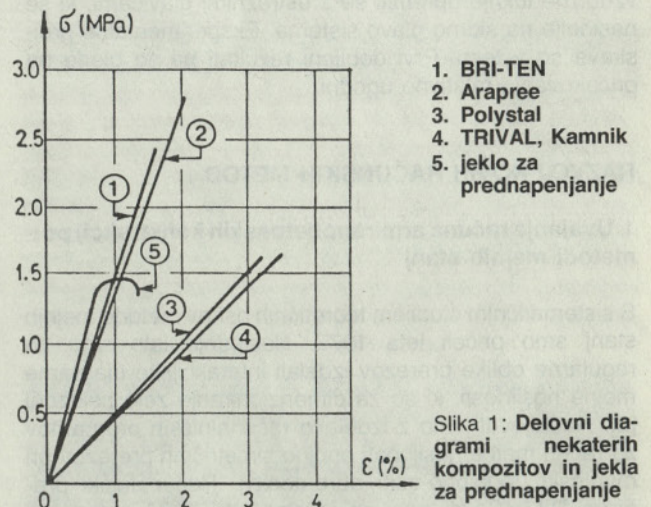
Rezultati preiskav krčenja in tečenja betona, ki smo jih leta 1988 in 1989 opravili v sodelovanju s podjetjem Gradis v novem laboratoriju FAGG, kažejo določena permanentna odstopanja od ustreznih vrednosti reoloških količin, ki so podane v Pravilniku za beton in armirani beton iz leta 1987 oziroma modelu mednarodnih predpisov CEB-FIP, vendar ne v tolikšni meri, kot zatrjujejo nekateri. Izmerjeno krčenje običajnega betona pri uporabi slovenskih cementov brez dodatkov je v povprečju nekoliko večje od vrednosti krčenja po pravilniku za beton in armirani beton oziroma predpisih CEB-FIP, izmerjeno tečenje betona pa v povprečju nekoliko manjše. Vpliv vrste agregata enake granulometrične sestave iz različnih nahajališč na reološke lastnosti betona je relativno majhen. Različni dodatki betonu, odvisno od vrste in količine, lahko v začetni fazi povzročijo tudi do 100%-tno povečanje krčenja in tečenja betona glede na krčenje in tečenje enakega betona brez dodatkov. V poznejšem obdobju se relativne razlike krčenja in tečenja manjšajo, tako da po šestih mesecih znašajo le še 10 do 20 %.

S pomočjo preizkuševalnega stroja INSTRON smo lahko zanesljivo določili dejanske delovne diagrame betona, ki smo jih potrebovali za računsko nelinearno analizo konstrukcij. Pri časovno programiranem nanosu deformacij preizkušanca nam je v področju tlačnih napetosti redno uspelo določiti tudi padajočo vejo delovnega diagrama betona. V področju nateznih napetosti, pri čemer smo ugotavljali le delovni diagram betona pri centričnem nategu, smo vedno uspeli določiti le rastočo vejo delovnega diagrama, pri nekaterih preizkušancih pa še del padajoče veje. Ugotavljanje delovnega diagrama betona pri centričnem nategu je zaradi zelo majhnih porušnih deformacij ($\epsilon_{ctu} = 0.0001$) in relativno krhkega materiala mogoče le na zelo togih preizkuševalnih strojih z izjemno natančno regulacijo in občutljivim krmilnim mehanizmom. Preizkuševalni stroj INSTRON tem zahtevam sicer v celoti zadošča, težave pa smo imeli s centriranjem vzorcev, ki smo ga zagotavljali fizično prek zglobov, kar pa za preiskave takšne vrste ni dovolj natančno. Enakomerne deformacije po prečnem prerezu vzorca lahko zagotovimo le z ustreznim nagibanjem vpenjalne glave.

Obsežne poškodbe prednapetih betonskih konstrukcij zaradi korozije armature, ki so v drugi polovici osemdesetih let z vso ostrino prišle na dan (v Berlinu se je zaradi korozije kablov porušila svetovno znana kongresna dvorana), so v gradbeništvu spodbudile iskanje alternativnih materialov, ki bi vsaj v najbolj agresivnih okoljih nadomestili korozijsko občutljivo jekleno armaturo. Možnosti uporabe kompozitnih palic oziroma pramen iz steklenih oziroma karbonskih vlaken in naravnih ali umetnih smol za prednapenjanje betonskih konstrukcij v svetu šele preizkušajo. V Zvezni republiki Nemčiji imajo s takšnimi kompozitnimi palicami prednapete že prve tri poizkusne objekte.

Študija kompozitnih materialov in njihove uporabe za prednapenjanje konstrukcij smo se v letu 1988 lotili tudi

pri nas [6]. Skupaj z razvojnim oddelkom tovarne Trival iz Kamnika, ki edina v Jugoslaviji za potrebe radiografije in vojske že proizvaja takšne kompozitne palice oziroma pramena, smo se najprej lotili določanja mehanskih lastnosti palic. Z laboratorijskimi preiskavami natezne trdnosti kompozita smo ugotovili, da so njegove mehanske lastnosti zelo podobne lastnostim nemškega polystala (slika 1), s katerim so prednapeti vsi trije poizkusni objekti [7].



Iz diagrama na sliki 1 je razvidno, da je natezna trdnost Trivalovega kompozita nekoliko večja od trdnosti visokovrednega jekla. Kompozit se vse do porušitve obnaša kot linearno elastičen material, s trikrat manjšim elastičnim modulom, kot ga ima visokovredno jeklo. Trdnost in elastični modul kompozitov s karbonskimi vlakni, ki se pri nas ne proizvajajo, pa sta še znatno večji.

Prve meritve lezenja in staranja materiala, ki smo jih opravili v manjšem obsegu, so pokazale, da znaša padec natezne trdnosti kompozita pri trajni obtežbi približno 40 odstotkov, kar je za 1/4 več kot pri polystalu, lezenje kompozita pa je zelo majhno in znaša le 2,5%, kar se ujema z lezenjem polystala.

Vpliva zvišane temperature na trdnost kompozita še nismo raziskovali. Meritve, ki so jih na sorodnem polystalu opravili v Zvezni republiki Nemčiji, pa kažejo, da pri povišani temperaturi natezna trdnost kompozita pade približno v enakem razmerju kot pri jeklu.

Zaradi preprečitve kemične reakcije med alkalnim betonom in silikatnimi vlakni kremenčevega stekla, do katere pride v primeru stika obeh materialov, morajo biti na površini kompozita vsa steklena vlakna prekrita z epoksidno smolo. Da bi stik med betonom in steklenimi vlakni zanesljivo preprečili, kompozitne palice še dodatno oplaščijo. Zaradi relativno majhne trdnosti kompozita v bočni smeri predstavlja sidranje takšnih palic kompozita poseben tehnični problem, ki ga trenutno rešujemo. Ker nobeden izmed klasičnih načinov sidranja s pomočjo trenja pri zaklinjanju oziroma lepljenja pri kompozitnih palicah ne

daje optimalnih rešitev, smo se odločili za kombinacijo obeh. Sidranje kompozitnih pramen izvedemo s pomočjo kovinskih palic, v katere po celi dolžini izvrtamo rahlo koničaste luknje, vanje vstavimo kompozitne palice in zalijemo s posebnim lepilom. Na ta način je kompozitna palica priključena na kovinsko, ki jo lahko sidramo po ustaljenih sistemih, od katerih je švicarski sistem BBRV še posebno prikladen. V tem primeru moramo kovinske sidrne palice oziroma tulce na koncu z večjim premerom vzdolžne luknje opremiti še z ustreznimi glavicami, ki se naslonijo na sidrno glavo sistema. Eksperimentalne preiskave so v teku. Prvi dobljeni rezultati pa so glede na pričakovanja relativno ugodni.

RAZVOJ NOVIH RAČUNSKIH METOD

1. Uvajanje računa armiranobetonskih konstrukcij po metodi mejnih stanj

S sistematičnim študijem teoretičnih osnov metode mejnih stanj smo pričeli leta 1977. Naslednje leto smo za regularne oblike prereзов izdelali interakcijske diagrame mejne nosilnosti, ki so za dimenzioniranje zelo prikladni [8]. Nadaljevali smo z izdelavo računalniških programov za račun mejne nosilnosti enojno simetričnih prereзов pri ravninski upogibno-osni obremenitvi. Računalniški program DIMMS, ki smo ga izdelali leta 1982, omogoča račun mejne nosilnosti oziroma dimenzioniranje armiranobetonskih prereзов poljubne oblike na poljubno upogibno-osno obremenitev (M_y , M_z , N_c) [9]. Pri tem lahko upoštevamo določila jugoslovanskega pravilnika za beton PBAB iz leta 1971, ameriške predpise ACI in model predpisov CEB-FIP iz leta 1978. Tako zastavljen program nam je zelo olajšal pripravo strokovnih analiz in primerjav, ki smo jih za tvorbo sodelovanje pri novelaciji oziroma izdelavi novega pravilnika zelo potrebovali.

Leta 1983 smo pričeli s študijem mehanizmov in pripravljanjem teoretičnih osnov za račun mejne nosilnosti armiranobetonskih elementov pri strižni obremenitvi s prečno silo in torzijo. Pri tem smo preučevali tudi vplive simultane delovanja strižne in upogibno-osne obremenitve elementov armiranobetonskih konstrukcij [10]. Za račun mejne nosilnosti oziroma dimenzioniranje strižno obremenjenih konstrukcij smo prav tako izdelali računalniški program (PREARM) [11].

Pri računu betonskih konstrukcij po metodi mejnih stanj moramo računati tudi širino razpok [12] [13], pri določitvi pomikov pa moramo upoštevati reologijo materiala in zmanjšati togost konstrukcije zaradi razpok [13]. V okviru raziskovalnega programa v letu 1984 smo podali poenostavljene računske metode, ki so primerne za prakso [14]. Za enostavno kontrolo širine upogibnih razpok pa smo izdelali tudi pomožne diagrame.

Pri dimenzioniranju poljubnih betonskih prereзов z uporabo programa DIMMS ostane v začetku podano razmerje prereзов armature v posameznih točkah prereza ves čas računa konstantno [9]. Pri enostavni obliki prereza in manjšem številu obtežnih primerov lahko izkušen uporab-

nik dobro presodi, v katerih točkah je učinkovitost armature največja, in na teh mestih poda največje relativne prereze. Pri zelo razgibanih prerezech neregularnih oblik in pri večjem številu obtežnih primerov, ki imajo poleg tega tudi različna razmerja posameznih komponent vektorja obremenitve prereza $\{S_i\} = [N_{xi}, M_{yi}, N_{zi}]$ pa uporabnik programa ne more vnaprej predvideti niti približno optimalnega razmerja prereзов armature v posameznih točkah.

Po dolgih in napornih diskusijah, v katerih smo sodelavci naše katedre tvorno sodelovali, je bil leta 1985 osnutek novega pravilnika za beton že precej usklajen z modelom predpisov CEB-FIP. Osnovni parametri računa mejne nosilnosti prereza so bili glede na pravilnik iz leta 1971 bistveno spremenjeni. V povsem nanovo zasnovanem računalniškem programu za dimenzioniranje poljubno oblikovanih armiranobetonskih prereзов na poljubno upogibno-osno obremenitev ODIM smo upoštevali vsa nova izhodišča računa mejne nosilnosti prereзов vključno s parcialnimi faktorji varnosti [16].

Dimenzioniranje prereзов smo obogatili še z optimizacijo vzdolžne armature glede na hkratno upoštevanje vseh podanih obremenitev. Pri tem moramo doseči, da bodo pri izpolnjenih ravnotežnih enačbah deformacije po celem prerezu znotraj predpisanih mej, skupen prerez vzdolžne armature pa minimalen.

Tako zastavljen problem je nelinearen in ga rešujemo iterativno z metodo linearizacije. V vsakem koraku določimo za vsak obtežni primer lego deformacijske ravnine, ki zagotavlja ravnotežje sil prereza. Potrebno povečanje prereza armature v posameznih točkah nato izračunamo kot rešitev linearnega programa, v katerem nastopajo – v primeru prekoračitve mejnih vrednosti – omejitve deformacij na najbolj izpostavljenih mestih, dodatni pogoj pa je minimum celotnega prirastka armature v prerezu. Postopek ponavljamo, dokler ne dosežemo želene natančnosti. Računske primerjave so pokazale, da lahko z vgrajeno optimizacijo v primerjavi z običajnim dimenzioniranjem prereзов, pri katerem relativno razporeditev armature po prerezu vnaprej predpišemo, še zlasti pri prerezu razgibane geometrije in večjem številu obremenitev, prihranimo znaten delež vzdolžne armature. Pozneje smo v program vgradili še možnost upoštevanja slojevitosti prereza [17].

2. Nelinearna analiza betonskih konstrukcij

Pri računski analizi časovnega spreminjanja napetostno-deformacijskega stanja ojačenih betonskih konstrukcij smo se omejili na ravninske gredne sisteme. Splošni metodi nelinearne analize ravninskih okvirov in ustrezno modificirani programski opremi NONFRAN, ki ju je razvil Jure Banovec [18], smo dodali nove module za račun konstitutivnih zvez ojačenih betonskih prereзов, s katerimi smo zajeli tudi viskoznost materiala in razpokanost konstrukcije [19]. V okviru viskoznosti materiala smo upoštevali časovno naraščanje trdnosti, krčenje in lezenje betona ter relaksacijo prednapete armature. Zaradi upoštevanja nelinearne teorije lezenja betona dobimo z uporabo izdelane računske metode zanesljive rezultate pri nivojih napetosti, ki so nižji od 40 do 50 % njegove tlačne trdnosti. Ta pogoj

je v primeru uporabne obtežbe in obtežbe v fazi gradnje praktično vedno izpolnjen. Pri višjem nivoju tlačnih nape-tosti betona postane ustreznost linearne teorije lezenja betona vprašljiva, s tem pa tudi rezultati analize [20] [21].

Pri računu časovnega odziva konstrukcije lahko upošte-vamo poljuben časovni nanos obtežbe in prednapetja, vključno s faznim prednapenjanjem konstrukcije, ki je lahko tudi sovprežna ter poljubno časovno spreminjanje klimatskih razmer. Dejanska obremenitev in pomiki betonske konstrukcije so zaradi postopka nanašanja obtežbe na različne statične sisteme po fazah gradnje drugačni od obremenitve in pomikov, ki jih enaka obtežba povzroči na celotni konstrukciji.

Računska metoda in programska oprema, ki smo jo razvili za analizo vplivov postopne gradnje, se tudi navezuje na program NONFRAN. Modificirani verziji osnovnega pro-grama smo dodali posebne module za račun konstitutivnih zvez ojačenih betonskih prerezov z upoštevanjem razpok in elasto-plastičnega obnašanja materiala pri razbremenitvi ter poseben podprogram, ki simulira postopno nanaša-nje obtežbe in ustrezno spreminjanje statičnega sistema konstrukcije po fazah gradnje [22].

UVAJANJE NOVIH ZNANJ V PRAKSO

1. Sodelovanje pri snovanju tehničnih predpisov

Aktivno sodelovanje pri snovanju predpisov je za uvajanje novih znanj v tehnično prakso zelo pomembno. Tehnični predpisi so po svoji naravi v primerjavi z najnovejšimi dognanji stroke povsod do določene mere konservativni. Predpisi iz varnostnih razlogov namreč lahko vsebujejo le povsem preverjene rešitve. Poleg tega morajo biti prirejeni povprečni usposobljenosti kadrov. Preveliko tehnično zaostajanje regulative za teoretičnimi in izkustvenimi spoznanji stroke pa, posebno še v primeru, če je le-ta bolj toga, lahko predstavlja škodljivo coklo razvoja.

Sodelavci KMLK smo intenzivneje sodelovali pri oblikova-nju novih standardov za lesene konstrukcije, ki veljajo od leta 1983 in pri snovanju novega Pravilnika za beton in armirani beton (PBAB) iz leta 1987. Poglobljen teoretični študij metode mejnih stanj, s katerim smo pričeli že leta 1977, izdelana programska oprema in opravljene primer-jalne analize so nam omogočile tvorno sodelovanje pri pripravi PBAB. Pri tem smo bili s svojimi predlogi v zvezi z definiranjem osnovnih parametrov mejne nosilnosti prereza, kot so delovni diagram betona in konvencionalne mejne deformacije prereza, kakor tudi s predlogom korek-cije računa tlačnih elementov, uspešni. Za doseg tega cilja smo poleg dokumentiranih argumentov potrebovali tudi določeno mero odločnosti. Naša prizadevanja za poenostavitev pretirano razvejanih parcialnih faktorjev varnosti, uporabo metode mejnih stanj tudi pri nearmiranih konstrukcijah in razširitev pravilnika na področje predna-petih konstrukcij, pa niso bila uspešna.

V okviru aplikativnega raziskovalnega programa smo študirali tudi mejno stanje upogibne in strižne nosilnosti

ter mejna stanja uporabnosti naknadno in adhezijsko prednapetih konstrukcij. Poleg računa časovne prerazpo-reditve napetosti prereza [29] smo obdelali tudi račun razpok delno prednapetih konstrukcij [12] in račun reoloških vplivov [15]. Posebno pozornost smo namenili računu statično nedoločenih linijskih prednapetih konstrukcij, prednapetih sten, križem prednapetih plošč in lupin [31].

2. Izdelava pripomočkov za praktični račun

Z novim PBAB je bilo od leta 1971 mogoče varnost armiranobetonskih konstrukcij glede na upogibno-osno obremenitev alternativno dokazovati tudi po metodi mejnih stanj. Za dokazovanje varnosti glede na strižno obreme-nitev konstrukcij pa je bila uporaba metode dovoljenih napetosti še naprej obvezna. Zaradi drugačnih tehničnih zahtev je bilo celo za dimenzioniranje konstrukcij po metodi dovoljenih napetosti čutili veliko pomanjkanje prak-tičnih pripomočkov v obliki tabel in diagramov. Za račun konstrukcij po metodi mejnih stanj pa takšnih pripomočkov sploh ni bilo. Na ta način je imela možnost uporabe metode mejnih stanj le teoretični pomen.

Na željo strokovnjakov iz operative sva avtorja sklenila pripraviti Priročnik za dimenzioniranje betonskih konstrukcij v treh delih. V prvem delu sva po metodi dovoljenih napetosti nameravala obdelati dimenzioniranje armirano-betonskih prerezov na upogibno in osno obremenitev, v drugem pa še dimenzioniranje strižno obremenjenih ele-mentov in račun prednapetih konstrukcij, prav tako po metodi dovoljenih napetosti. Za tretji del sva načrtovala račun ojačenih betonskih konstrukcij po metodi mejnih stanj. Prvi del priročnika, ki je izšel leta 1972, bil hitro razprodan in ponatisnjen, sva pripravila v zelo kratkem času [23]. Misel na pripravo predvidene vsebine drugega dela pa sva glede na smer razvoja stroke v svetu, kjer se je uporaba metode dopustnih napetosti polagoma opuščala, kmalu zavrgla. Ker so bila v PBAB iz leta 1971 izhodišča za račun konstrukcij po metodi mejnih stanj definirana slabo in nepopolno, sva ugotovila, da bo mogoče in smiselno priročnik za račun betonskih konstrukcij po metodi mejnih stanj pripraviti šele po ustrezni spremembi oziroma dopolnitvi pravilnika. Vzporedno s poglobljenim študijem metode mejnih stanj pa smo kljub temu postopno pripravljali tudi osnove za izdelavo pomož-nih diagramov in tabel, ki so potrebne za račun armirano-betonskih konstrukcij po metodi mejnih stanj.

V okviru aktivnega sodelovanja pri oblikovanju novega pravilnika za beton smo osnove za račun pomožnih tabel in diagramov s programsko opremo vred sproti prilagajali že dogovorjenim spremembam pravilnika. Na ta način smo ustreznost sprememb pravilnika najlaže sproti pre-verjali in predlagali potrebne popravke. Istočasno pa smo imeli ob izidu novega PBAB leta 1987 pripravljene že vse računalniške programe za izdelavo pomožnih tabel in diagramov, ki jih potrebujemo pri računu betonskih konstrukcij po metodi mejnih stanj. Z novim pravilnikom so bile dane tudi vse druge okvirne osnove za izdelavo Priročnika za dimenzioniranje armiranobetonskih konstrukcij po me-todi mejnih stanj, ki je v založbi ljubljanske univerze izšel

aprila 1989 [24]. Prvotnima avtorjema se je pridružil še mlajši sodelavec katedre Miran Lozej.

SKLEP

Prikaz dejavnosti KMLK v zadnjem času zajema le del njenih prizadevanj za razvoj stroke pri nas. Doseženi rezultati na področju eksperimentalnega dela tvorijo šele prve začetke, ki nam lahko omogočajo načrtovanje obsežnejših eksperimentalnih raziskav betonskih konstrukcij. Rezultati, ki smo jih dosegli na področju nelinearne analize konstrukcij, pa spadajo med dosežke, ki tudi s stališča razvoja stroke v svetu niso zanemarljivi.

ZAHVALA

Prikazani dosežki KMLK so plod večletnega raziskovalnega dela, ki so ga finančno omogočili Raziskovalna skupnost Slovenije, Posebna raziskovalna skupnost za graditeljstvo in gradbena ter industrijska podjetja. Pri opravljenih raziskavah so poleg avtorjev sodelovali tudi drugi člani KMLK. Financerjem in sodelavcem se za sodelovanje tudi na tem mestu lepo zahvaljujemo.

LITERATURA

1. S. Turk, Deformability of composite timber beams, Final Report, 11. Congress IABSE, zbornik del, str. 247–250, Dunaj, 1980.
2. S. Turk, Simplified calculations of concrete – creep problems, IABSE – Colloquium Advanced Mechanics of Reinforced Concrete, Final report, Session 2, str. 492–493, Delft, 1981.
3. S. Turk, Prognoziranje marke in konsistence betona na osnovu ustanovljanja sastava betonske mešavine na gradilištu, simpozij saveza jugoslovenskih laboratorija za ispitivanje i istraživanje materiala i konstrukcija, knjiga I, referat I-23, Vrnjačka Banja, 1978.
4. P. Fajfar, J. Banovec, F. Saje, Behavior of a prefabricated industrial building in Breginj during the Friuli earthquake, 6. evropski kongres potresnega inženirstva, knjiga 2, str. 493–500, Cavtat, 1978.
5. V. Bokan, F. Saje, Vpliv kemičnih dodatkov na krčenje betona, 11. zborovanje gradbenih konstruktorjev Slovenije, zbornik del, str. 186–192, Bled, 1989.
6. S. Turk, R. Rogač, F. Saje, Plastene mase – stekloplastiki – sodobni materiali, 11. zborovanje gradbenih konstruktorjev Slovenije, zbornik del, str. 57–62, Bled, 1989.
7. F. Saje, Kompozitna pramena za prednapenjanje betonskih konstrukcij, Gradbeni vestnik, št. 1-2, str. 41–48, Ljubljana, 1990.
8. R. Rogač, F. Saje, Interakcijski diagrami mejne nosilnosti prereza, VII. kongres Zveze društev gradbenih konstruktorjev Jugoslavije, knjiga TE 3, str. 39–56, Cavtat, 1983.
9. F. Saje, R. Rogač, M. Stanek, Mejna nosilnost ojačanih betonskih prerezov pri upogibu z osno silo, VII. kongres Zveze društev gradbenih konstruktorjev Jugoslavije, knjiga TE 3, str. 57–64, Cavtat, 1983.
10. R. Rogač, F. Saje, Strižna nosilnost betonskih elementov, 6. zborovanje gradbenih konstruktorjev Slovenije, zbornik del, str. 143–160, Bled, 1984.
11. R. Rogač, S. Vratuša, M. Lozej, Račun prečne armature betonskih elementov po metodi mejnih stanj z uporabo računalnika, Gradbeni vestnik, št. 9–10, str. 213–218, Ljubljana, 1987.
12. R. Rogač, Razpoke kot kriterij za trajnost in varnost konstrukcij, 9. zborovanje gradbenih konstruktorjev Slovenije, zbornik del, str. 36–44, Bled, 1987.
13. F. Saje, Vpliv razpok na časovni potek obnašanja konstrukcij, 10. zborovanje gradbenih konstruktorjev Slovenije, zbornik del, str. 50–57, Bled, 1988.
14. R. Rogač, Račun pomikov armiranobetonskih in prednapetih linijskih elementov, 10. zborovanje gradbenih konstruktorjev Slovenije, zbornik del, str. 58–67, Bled, 1988.
15. F. Saje, Vpliv reologije in razpok na napetosti in pomike prednapetih konstrukcij, Jugoslovensko društvo za prednaprezanje, V. savjetovanje, Prednaprezanje 90, Zbornik del, str. 31–38, Beograd, 1990.
16. F. Saje, J. Lopatič, Osno-upogibna nosilnost prerezov po novem pravilniku za beton in armirani beton, VIII. kongres Zveze društev gradbenih konstruktorjev Jugoslavije, zbornik del, str. 125–130, Cavtat, 1987.
17. J. Lopatič, Vpliv slojevitosti prerezov na nosilnost ojačanih betonskih konstrukcij, Simpozij 89, Zveza društev gradbenih konstruktorjev Jugoslavije, knjiga T, str. 183–188, Dubrovnik, 1989.
18. J. Banovec, Geometrijska in materialna nelinearnost pri ravninskih okvirnih konstrukcijah, doktorska disertacija, FAGG, Ljubljana, 1986.
19. F. Saje, Nelinearnost betonskih konstrukcij, magistrsko delo, FAGG, Ljubljana, 1986.
20. F. Saje, Nelinearna analiza ojačanih betonskih konstrukcij, VIII. kongres Zveze društev gradbenih konstruktorjev Jugoslavije, knjiga T2, str. 119–124, Cavtat, 1987.
21. F. Saje, The effects of rheology and cracks on the load-deformation time relationship of plane frames, Computer Aided Analysis and Design of Concrete Structures, 2nd International Conference, Proceedings, Vol. 2, str. 727–738, Zell am See, 1990.
22. J. Lopatič, Vpliv postopne gradnje na napetostno – deformacijsko stanje betonskih konstrukcij, magistrsko delo, FAGG, 1990.
23. R. Rogač, F. Saje, Priročnik za dimenzioniranje betonskih konstrukcij I. del, 231 strani, Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije, Ljubljana, 1972.
24. R. Rogač, F. Saje, M. Lozej, Priročnik za dimenzioniranje armiranobetonskih konstrukcij po metodi mejnih stanj, 361 strani, FAGG Univerze v Ljubljani, 1989.
25. F. Saje, A. Marinko, Der Bau des Karavankentunels, Arbeitstagung Brücken und Ingenieurbau, referat 2.13, 7 strani, Schleswig, 1989.

26. M. Lozej, R. Rogač, S. Vratuša, Teoretične osnove in računalniški program za račun prečne armature, VIII. kongres Zveze društev gradbenih konstruktorjev Jugoslavije, knjiga T1, str. 263-268, Cavtat, 1987.
27. F. Saje, Osnove nelinearnosti betonskih konstrukcij, 147 strani, FAGG Univerze v Ljubljani, Ljubljana, 1987.
28. M. Lozej, S. Vratuša, Optimalno dimenzioniranje prednapetih betonskih elementov, 10. zborovanje gradbenih konstruktorjev Slovenije, zbornik del, str. 68-76, Bled, 1987.
29. M. Lozej, Časovna razporeditev napetosti in deformacij po prečnem prerezu, 9. zborovanje gradbenih konstruktorjev Slovenije, zbornik del, str. 45-51, Bled, 1987.
30. P. Fajfar, M. Fischinger, R. Rogač, The additional cost of earthquake resistant shear wall structures, 6. evropski kongres potresnega inženirstva, knjiga 2, str. 235-242, Cavtat, 1978.
31. R. Rogač, Statično nedoločene prednapete betonske konstrukcije, 11. zborovanje gradbenih konstruktorjev Slovenije, zbornik del, str. 50-56, Bled, 1989.

DINAMIČNA ANALIZA TOPLOTNEGA ODZIVA GRAJENEGA OKOLJA

UDK 699.86:519.68

RUDI KLADNIK, ALEŠ KRAINER, BORIS OREL, MARJANA ŠIJANEC-ZAVRL

POVZETEK

Prispevek predstavlja usmeritev razvojne in raziskovalne dejavnosti katedre za stavbe in konstrukcijske elemente na področju toplotnega odziva grajenega okolja. Opisana je programska oprema za analizo posameznih problemskih območij, kot so ovoj zgradbe oz. konstrukcijski sklop, toplotno delovanje zgradbe kot celote, geometrijska analiza sence ter eksperimentalno in teoretično delo na področju spektralno selektivnih površin za radiacijsko hlajenje zgradbe. Posamezna problemska področja povezujemo v projektu pametne hiše, ki z vključevanjem mejnih in novih tehnologij nakazuje bioklimatsko zgradbo 21. stoletja, zasnovano na principu »3E«: ekologija-energija-ekonomija.

DYNAMIC ANALYSIS OF THERMAL RESPONSE OF BUILT ENVIRONMENT

SUMMARY

In the article the orientation of research and development work of the Chair for buildings and structural elements in the field of thermal response of the built environment is represented. The computer software for the analysis of particular problem areas like the building envelope and the structural complex respectively, thermal performance of a building as a whole, geometric analysis of the shadow, and experiments and theoretical work in the field of spectrally selective surfaces for radiative cooling of the building is described. The bioclimatic building of the 21st century is indicated, including boundary and new technologies based on the principle of "3E": ecology-energy-economy.

RAZVOJ

Razvojna in raziskovalna dejavnost katedre za stavbe in konstrukcijske elemente (v nadaljevanju KSKE) je usmerjena v področje načrtovanja in analize elementov in

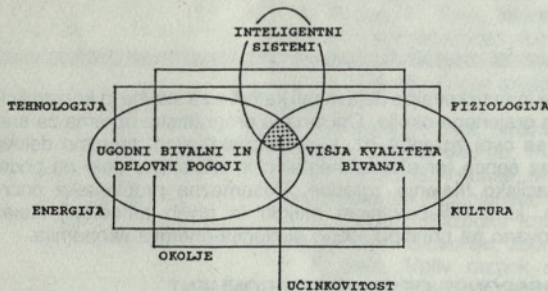
sistemov, ki oblikujejo bioklimatske zgradbe predvsem s stališča dinamičnega toplotnega in svetlobnega odziva. Leta 1980 nam je bilo prvič omogočeno sodelovati v programih Raziskovalne skupnosti Slovenije, in sicer v okviru URP Gradbeni materiali in URP Nekonvencionalni viri energije, od 1986 URP Nove tehnologije za rabo in pretvorbo energije ter industrijska energetika. Že v samem začetku je bilo delo zasnovano multidisciplinarno. Sodelavci s področja arhitekture, fizike in gradbeništva so omogočili razvoj zasnovanega projekta, ki se je razvijal v dveh smereh: v smeri študija dinamičnega toplotnega

Avtorji:

Rudi Kladnik, dr., dipl. inž. fiz., redni profesor
Aleš Krainer, dipl. inž. arh., višji predavatelj
Boris Orel, dr., dipl. inž. fiz., izredni profesor, KIBK
Marjana Šijanec-Zavrl, mag., dipl. inž. gradb., asistentka

odziva konstrukcijskih sklopov in v smeri študija možnosti naravnega izkoriščanja sončne energije, pasivnega ogrevanja in ohlajevanja zgradb. Razvoj modelov oblikovanja, lastne računalniške programske opreme z ustrežno teorijo in eksperimentalno delo so glavne smeri delovanja, ki so omogočile tudi uvedbo podiplomskega študija s področja toplotnega odziva zgradb na konstrukcijski smeri FAGG. Geslo »3E«, ekologija-energija-ekonomija, opredeljuje dosedanje delovanje in bodočo usmeritev skupine.

Pri oblikovanju bivalnega in delovnega okolja se bo potrebno v bližnji prihodnosti poleg raziskav in razvoja novih materialov in elementov ter metod za predvidevanje delovanja sistemov vedno bolj usmerjati na uporabo inteligentnih sistemov v zgradbah in informacijskih tehnologij. Energetske tokove v zgradbi je treba preusmerjati, zadrževati ali povečati, tako da se doseže kar največja učinkovitost. Cilj je izboljšana kakovost življenja, varovanje okolja in racionalno ravnanje z viri in energijo. Čeprav imamo pri pametni hiši opravka z mejnimi in novimi tehnologijami, ki napovedujejo radikalne spremembe že do konca leta 2000, se zasnova zgradb zaradi tega ne bo dramatično spremenila. Glavni problem bodo sestavni elementi in komunikacije, kjer bo treba osvojiti enokabelsko tehnologijo v sistemu zaprte zanke. Avtomatizacija stanovanja je povezana s kompatibilnostjo proizvodov, učinkovito vodeno delovanje je neposredno povezano s standardizacijo (slika 1).



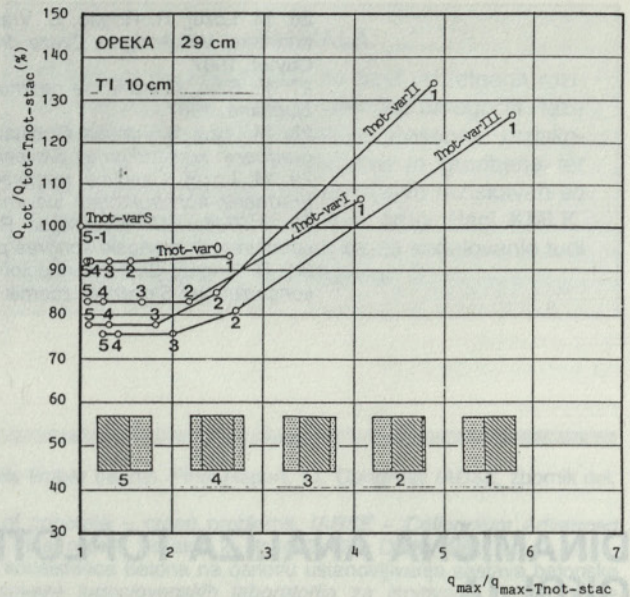
Slika 1. Usmerjenost parametrov sistema v učinkovitost

Kreativnim oblikovalcem grajenega okolja moramo pri skrbeti metode in orodja, ki bodo omogočili dosego teh ciljev. Pogoj je celostni pristop, kjer obravnavamo področje od sestave konstrukcijskih sklopov, prek zasnove zgradbe, do razporeditve le-teh v prostoru, v odvisnosti od raznih vplivov zunanjega in notranjega okolja.

KONSTRUKCIJSKI SKLOP

Program TEMPOL je orodje za analizo dinamičnega toplotnega odziva večplastnih konstrukcijskih sklopov, ki so izpostavljeni dvema poljubnim temperaturnima režimoma, na zunanji in na notranji strani istočasno. Namenjen je raziskavi in razvoju novih sistemov ovoja zgradbe (sliki 2 in 3).

Temperaturne zahteve uporabnikov bivalnega in delovnega okolja so bolj ali manj časovno pogojene. Za določene prostore obstajajo značilni vzorci uporabe. Da-



Slika 2. Potek temperature ($T(^{\circ}\text{C})-d(\text{m})$) v opečni steni s toplotno izolacijo na zunanji in notranji strani za posamezno uro iz analizirane 24-urne periode

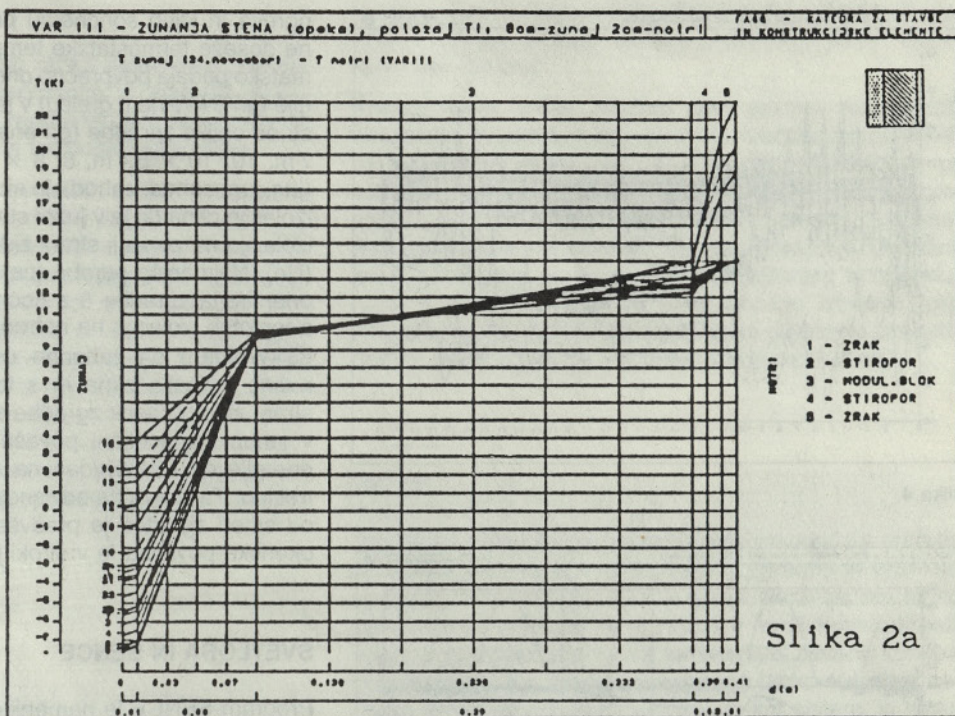
nes je neprekinjen 24-urni vzorec uporabe omejen le na določene posebne prostore. V času, ko so prostori v uporabi, je potrebno vzdrževati določene temperaturne nivoje, ki so funkcija toplotnega ugodja in udobja. V času, ko prostori niso v uporabi, se lahko ti temperaturni nivoji spremenijo. Vzdrževanje konstantnih temperaturnih nivojev v prostorih ni smiselno.

Spreminjanje zasnove in razporeditve plasti sklopa lahko tudi pri enaki toplotni prehodnosti vodi do spreminjanja potrebne energije za ogrevanje sklopa (slika 3). Dinamika ogrevanja sklopa in potrebna moč ogrevalne naprave se močno razlikujeta za različne zasnove KS. Izbrani vzorec nihanja notranje temperature in ustrezno zasnovani KS omogočata zmanjšanje porabe energije za ogrevanje, po drugi strani lahko neugodna zasnova sklopa poveča porabo energije. Program TEMPOL je orodje za določanje energetske najbolj učinkovitega sklopa izmed predlaganih možnosti.

ZGRADBA

Kakšne temperature se razvijajo v notranosti zgradbe v vročih, sončnih dnevih ter kako hitro in kako močno se zgradba ohladi v hladnih nočeh in kakšno gretje je potrebno, da se v zgradbi zagotovi željen temperaturni režim, je odvisno od velikosti in orientacije zgradbe, od debeline zidov in sestave zidov, od velikosti in lege toplotne zaščite, od velikosti okenskih odprtih in vrste uporabljenih šip in predvsem od spremenljive temperature zunanjega zraka ter od spremenljive jakosti sončnega sevanja. Da lahko te pojave simuliramo in že vnaprej predvidimo, kateri materiali in kakšne konstrukcijske zasnove so za zgradbo v danih klimatskih pogojih primerni, smo razvili program KAMRA.

Slika 3. Poraba energije za ogrevanje KS v odvisnosti od največjega potrebnega toplotnega toka na notranji strani sklopa, analizirani so štiri nestacionarni temperaturni režimi v bivalnem prostoru (stopnjuje se nihanje notranje temperature in znižuje povprečna notranja temperatura, var0, varI, varII, varIII), osnova za normiranje je vzdrževanje stalne največje temperature notri (varS)



Slika 2a

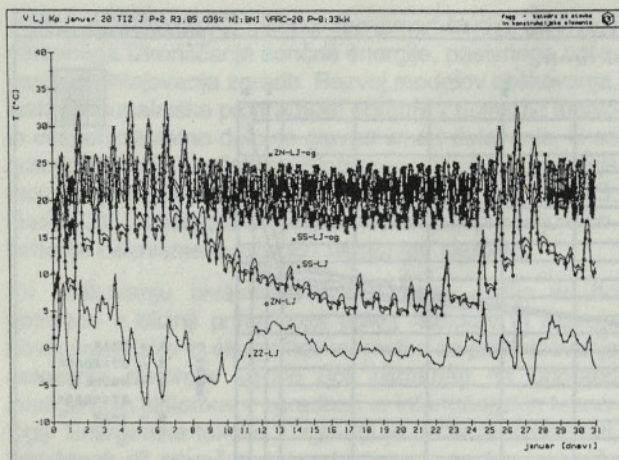
Program KAMRA temelji na modelu termičnih kapacitivno-uporovnih mrež za pravokotno zgradbo z ravno streho. Pomembni vhodni parametri so: širina, globina in višina zgradbe, orientacija zgradbe glede na smer sever-jug, urne vrednosti temperature zunanjega zraka (ZZ), temperatura zemljine pod zgradbo (ZE), urne vrednosti energijskega toka sončnega globalnega sevanja na m² vodoravne ploskve, toplotni upor in toplotna kapaciteta na m² vsakega zidu, stropa in tal posebej, upor toplotne zaščite in njena lega na zunanji (TIZ) ali notranji (TIN) strani zidu za vsak zid posebej, velikost in lega oken, vrsta zunanje ter notranje šipe, absorptivnost (barva) za sončno sevanje notranjih sten, tal in stropa, režim gretja (prekinjeno ali neprekinjeno), vrsta gretja (zračno, talno), imenska moč grelca in njegov relaksacijski čas, temperatura termostata, pri kateri se grelec vklaplja oz. izklaplja, datum dneva in število dni simulacije, geografska širina kraja, čistost ozračja in stopnja oblačnosti za vsako uro posebej.

Upoštevamo toplotne energijske tokove, ki iz zemljine in iz zunanjega zraka difundirajo v zgradbo ali v obratno smer, ter sončno sevanje, ki skozi okna (upoštevajoč refleksijo in absorpcijo v šipah) prodre v notranjost zgradbe in se absorbira v stenah zidov in tal ter se od njih difuzno razpršuje. Računamo časovno spremenljive temperature za vsako uro in dan v letu. Pomembni izhodni parametri so: temperatura notranjega zraka (ZN) za vsako uro in dan simulacije, temperatura notranjih sten, sredine in zunanjih sten za vsak zid, strop in tla posebej, temperatura notranje in zunanje šipe za vsako okno posebej, dnevni odtok sončne energije v zgradbo, dnevna poraba ogrevalne energije za dani režim gretja, za vsak dan posebej.

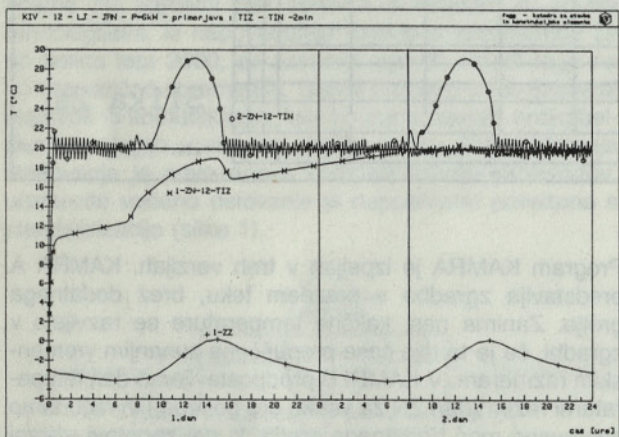
Program KAMRA je izpeljan v treh verzijah. KAMRA A predstavlja zgradbo v praznem teku, brez dodatnega gretja. Zanima nas, kakšne temperature se razvijejo v zgradbi, če je ta dlje časa prepuščena zunanjim vremenskim razmeram. V KAMRI B predpostavljamo dan temperaturni režim (dan ZN za vsako uro posebej) in računamo zahtevano moč dodatnega gretja, ki naj zagotovi izbrani temperaturni režim. Najpomembnejša je KAMRA C, v kateri podamo temperaturo TT, pri kateri se grelec vklaplja ali izklaplja, če temperatura notranjega zraka pade pod ali zraste nad njo. Tudi s tem programom računamo dnevno porabo ogrevalne energije, dodan pa je še dejanski časovni potek temperatur, kakršen se izpostavi pri izbranem temperaturnem režimu v danem tipu zgradbe.

Naslednje slike ilustrirajo nekaj tipičnih rezultatov, ki jih lahko dobimo s KAMRO A ali C. Na sliki 4 je podan časovni potek temperatur v zgradbi 20 m × 7,8 m × 8 m (masivni zidovi s TIZ) za mesec januar v Ljubljani. Zgradba je usmerjena na jug in ima 39 % okenskih odprtin v vseh zidovih. Spodnja krivulja podaja spreminjanje temperature zunanjega zraka (ZZ), srednji krivulji pa temperaturo notranjega zraka (ZN) in severne stene (SS) za zgradbo v praznem teku (KAMRA A), zgornji krivulji (gost črn pas) pa za zgradbo z dodatnim ogrevanjem (moč grelca 33 kW) pri termostatski temperaturi 20 °C (KAMRA C).

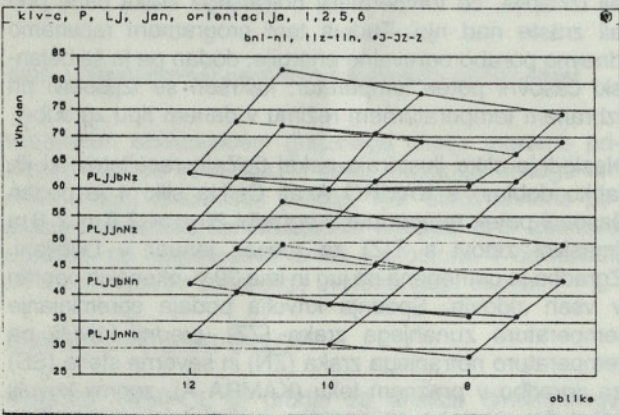
Vpliv lege toplotne izolacije na zunanji in notranji strani zidov (TIZ ali TIN) na časovni potek temperature notranjega zraka po vklopu grelca (nominalna moč 6 kW, relaksacijski čas 0,5 h) v zgradbi 12 m × 7 m × 2,5 m (z oknom le v južni, široki steni) za povprečen januarski dan



Slika 4.



Slika 5.



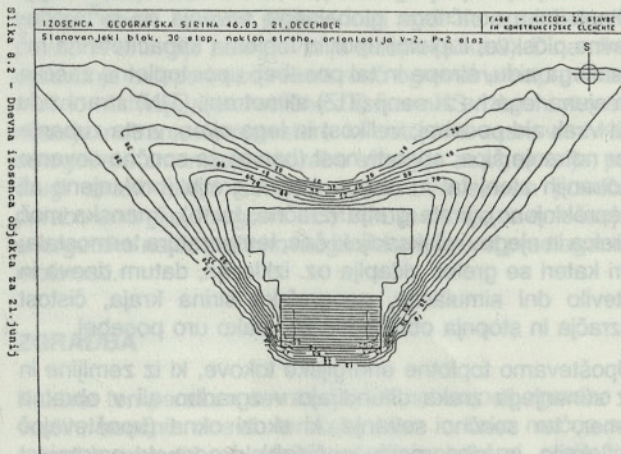
Slika 6.

v Ljubljani je podan na sliki 5. Pri TIN se temperatura zraka takoj po vklopu grelca dvigne na termostatsko temperaturo 20°C in nato variira okrog nje. Sončno sevanje skozi južno okno dvigne temperaturo notranjega zraka na največ 29°C . Pri TIZ pa se notranji zrak le počasi

ogreva in kljub sončnemu prispevku v prvem dnevu še ne doseže termostatske temperature 20°C . Slika 6 shematsko podaja povprečno dnevno porabo ogrevalne energije (pri 6 kW-nem grelcu) v januarju v Ljubljani v odvisnosti od oblike zgradbe (pri enaki tlorisni površini, $12: 12 \times 7\text{ m}$, $10: 10 \times 8,4\text{ m}$, $8: 8 \times 10,5\text{ m}$) in njene orientacije (jug, jugozahod, zahod), in sicer z uporabo nočne toplotne izolacije okna (ki je v južni steni) ali brez nje ter s toplotno izolacijo na zunanji strani zidov (Nz) ali na notranji strani (Nn). Najmanjšo porabo (ca. 28 kWh/dan) zahteva južno orientirana zgradba 8 z nočno toplotno izolacijo okna in s toplotno izolacijo na notranji strani zidov. Največjo (ca. 83 kWh/dan) pa zahodno usmerjena zgradba 12 brez nočne izolacije okna in s toplotno izolacijo na zunanji strani zidov. Zasuk zgradbe 12 od južne smeri na zahod v januarski Ljubljani poveča dnevno porabo ogrevalne energije od 63 kWh/dan na 83 kWh/dan , to je za slabo tretjino. Tako močna odvisnost porabe ogrevalne energije od smeri zgradbe je predvsem posledica dejstva, da je okenska površina le v široki južni steni.

SVETLOBA IN SENCE

Program SENCE je namenjen geometrijski analizi sence posameznega objekta ali cele skupine objektov. Omogoča izris sence objekta za izbrano uro in dan v letu, dnevne in letne izosence objektov (glede na čas zasenčenja terena), aksonometrične projekcije iz smeri sonca, cilindrične kotne projekcije osonečenosti točke in projekcije »ribje oko«. Določimo lahko tudi celodnevno pozicijo sonca na nebu (azimut in dvižni kot sonca).



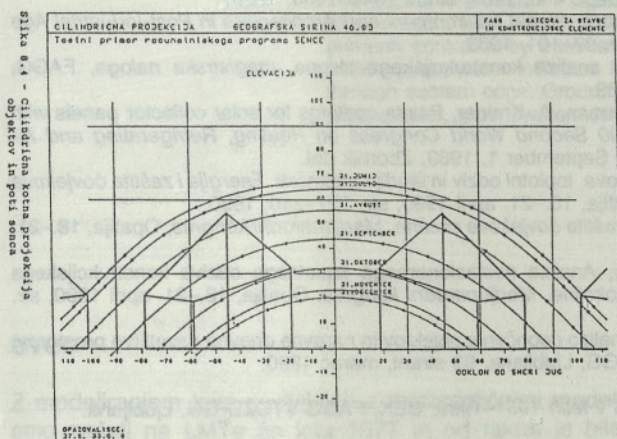
Slika 7. Dnevna izosenca stanovanjskega bloka P + 2

Program SENCE je namenjen analizi položaja posameznih objektov in njihovi razporeditvi v skupinah, za preverjanje svetlobnega vpliva oblike in velikosti zgradbe na okolico in sosednje objekte in za študij medsebojnih svetlobnih vplivov zgradb pri urbanističnem načrtovanju. Določamo lahko osvetljenost delovne površine na poljubnem mestu v prostoru.

SELEKTIVNE POVRŠINE

Za celovit popis toplotnih izgub zaradi radiacijskega hlajenja je potrebno kombinirati eksperiment in računske pristope, ki temeljijo na različnih modelnih atmosferah ali na dejansko merjenih spektralnih lastnostih atmosfere.

Ker podatki o transmisijskih lastnostih atmosfere za naše območje niso na voljo, smo uporabili spektralne lastnosti, znane iz drugih lokacij. Modelni računi, ki smo jih opravili, so kvalitativni in veljajo za izbrani standard z emitivnostjo 0,98. Eksperimentalno smo preverjali vrsto novih selektivnih površin za sončne zbiralnike in ugotovili povezavo med selektivnostjo in njihovim ohlajevanjem zaradi radiacijskega hlajenja. Dosežene temperaturne razlike glede na temperaturo atmosfere dosegajo 18 K. Običajna ohlajitev ni večja od 6–8 K. Primerjava med eksperimentalnimi rezultati in modelnim računom je sicer kvalitativna, vendar omogoča klasifikacijo površin glede na njihovo spektralno selektivnost.



Slika 8. Cilindrična kotna projekcija objektov in poti sonca za značilne dneve v letu

Merili smo tudi stagnacijske temperature selektivnih površin. Rezultati so nam rabili za kvalitativno oceno dosežene selektivnosti.

Konceptualno sveže meritve smo opravili na vzorcih spektralno selektivnih folij, ki imajo različno prepustnost za sončno in infrardeče sevanje ter reflektivnost za termično sevanje. Za ta namen smo merilne celice opremili s črnimi spektralno selektivnimi površinami (Solariselect), ki so imele vlogo temperaturnega senzorja. Ugotovili smo, da obstaja povezava med doseženimi temperaturami v merilnih celicah in prepustnostjo izbranih folij. Pokazalo se je, da so spektroskopsko določene prepustnosti v istem razmerju kot izmerjene temperature.

SKLEP

Filozofija in tehnologija pametne hiše omogočata reševanje konfliktnih situacij med okoljem, zgradbo in vzorcem uporabe. S stališča pretoka energije skozi sistem lahko ugotovimo, da je danes zgradba v svoji konstrukcijski zasnovi stacionarna in v svoji funkcionalni zasnovi konservativna. Zgradba, grajeno okolje, se lahko vključi v naravno okolje, ki deluje dinamično, le kot sistem, ki lahko sledi cikličnim spremembam v okolju in vedno večjim socialnim premikom, ki se dogajajo tako na nivoju življenjskega vzorca posameznika in družine kot tudi na nivoju globalnih socialnih vzorcev.

Zgradba, ki jo danes gradimo za jutri, mora biti konstrukcijsko in tehnološko pripravljena na te spremembe, ki se pričakujejo v 10–15 letih. Ključni za doseg tega cilja so v oblikovanju take strukture zgradbe, ki bo z uporabo komunikacijskih in informacijskih sistemov, s čim manjšo uporabo virov in energije v celotni življenjski dobi zagotavljala kakovostne bivalne in delovne pogoje.

LITERATURA

- A. Krainer, R. Kladnik, B. Orel, The influence of colours on thermal response of a building, *International Symposium on Applications of Solar and Renewable Energy*, Cairo, Mar. 23-26, 1986, Zbornik del, 8 strani, 1988.
- A. Krainer, Equality in variety: A review of bioclimatic growth of buildings on Yugoslav territory, *Passive and Low Energy Architecture*, Pecs, september 1–5, 1986, Zbornik del, 50 strani, 1986.
- M. Šijanec, A. Krainer, R. Perdan, Programska oprema za analizo toplotnega odziva zgradbe, *Arhitektura in energija*, Bled, 14. 9.–15. 9. 1986, Zbornik del, str. 123–130, 1986.
- A. Krainer, Računarsko-programska oprema za analizo toplinskega refleksa zgrade, *Čovjek i prostor*, št. 7-8, 2 strani, 1987.
- A. Krainer, R. Kladnik, B. Orel, M. Klanjšek Gunde, Thermal performance of a building with radiative cooling roof, *European Conference on Architecture, 1987*, Proceedings of an International Conference, W. Paiz, Commission of the European Communities, Munich, F. R. Germany, 6th–10th April, 1987, B14, str. 69–74, 1987.
- M. Klanjšek Gunde, B. Orel, A. Krainer, N. Bukovec, Vpliv optičnih lastnosti stekel na večplastno zasteklitev oken, *Mednarodno svetovanje Korištenje sončeve energije u priobalnom području*, Split, 29.–30. oktober 1987, 10 strani, 1987.
- R. Kunič, Računalniški program SENCE, *Mednarodno svetovanje Korištenje sončeve energije u priobalnom području*, Split, 29.–30. oktober 1987, 10 strani, 1987.
- R. Kladnik, A. Krainer, Direct gain and greenhouse thermal response analysis on three locations in Slovenija, *ISES Solar World Congress 1987*, Hamburg, 13.–18. september 1987, 1 stran, 1987.
- A. Krainer, Autochthonous bioclimatic buildings in Yugoslavia & Slovenija, *International conference*

- Passive Solar Architecture 1988*, Bled, mar. 21–25, 1988, Conference proceedings, str. 70–77 + poster, 1988.
- A. Krainer, R. Kladnik, J. Banovec, R. Perdan, M. Šijanec, Design tools for dynamic thermal analysis, *International conference Passive Solar Architecture 1988*, Bled, mar. 21–25, 1988, Conference proceedings, str. 291–294 + poster, 1988.
- A. Krainer, Thermal design and computer, *International Conference Passive Solar Architecture 1988*, Bled, mar. 21–25, 1988, Conference proceedings, str. 406–412, 1988.
- A. Krainer, J. Banovec, M. Šijanec, TEMPOL – Program for analysis of nonstationary response of constructional complexes, *USER 1, A Working Conference for Users of Simulation Hardware, Software and Intellware*, Ostend, Belgium, September 6–8, 1988, Proceedings of USER 1, str. 95–100, 1988.
- A. Krainer, M. Klanjšek Gunde, Z. Crnjak Orel, B. Orel, Radiacijsko hlajenje spektralno selektivnih površin za sončne zbiralnike, *Medunarodni simpozij Alternativni izvori energije danas i za 21. stoljeće*, Brioni, 5.–8. oktober 1988, Zbornik radova, str. 149–159 + poster, 1988.
- R. Kladnik, A. Krainer, M. Klanjšek Gunde, B. Orel, Vpliv radiacijskega hlajenja strehe na toplotni odziv zgradbe, *Gradbeni vestnik 1-2-3*, Ljubljana, Letnik XXXVII, str. 45–51, 1988.
- Z. Crnjak Orel, B. Orel, I. Radoczy, A. Krainer, M. Bosanac, M. Mišič Stella, Spektralno selektivne obojene površine: Priprava i karakterizacija. *Primjena nauka št. 16*, Beograd, str. 42–46, 1989.
- A. Krainer, J. Banovec, M. Šijanec, Analysis of dynamic thermal response of constructional complexes, *Heat and Mass Transfer in Building Material and Structure*, Dubrovnik, 4.–8. september, 1989, Zbornik del, 10 strani, 1989.
- A. Krainer, B. Orel, I. Radoczy, Z. Crnjak Orel, Application for paint coating for radiatively cooled roofs, *ASRE '89*, Cairo, Egypt, Mar. 19–21, 1989, 10 strani, 1989.
- B. Orel, Z. Crnjak Orel, A. Krainer, M. Bosanac, A new paint for coil-coated solar collector panels, *Sun at Work in Europe*, European Solar Energy Journal, No. 7, str. 2–5, April 1989.
- A. Krainer, Slovene karst house and settlements, *Clean and Safe Energy Forever, ISES Solar World Congress*, Pergamon Press, Kobe, Sept. 4–8, 1989, strani 1049–1053, 1990.
- A. Krainer, Environment and hedonism?, *Global Environment and Architecture in Post-Industrial Age PLEA '89*, Nara, Sept. 4–8, 1989, str. 97–101, 1989.
- M. Šijanec, Nestacionarna toplotna analiza konstrukcijskega sklopa, *magistrska naloga*, FAGG, VTOZD GG, Ljubljana, strani 96, 1989.
- B. Orel, I. Radoczy, Z. Crnjak, R. Jerman, A. Krainer, Paints coatings for solar collector panels with high spectral selectivity, *CLIMA 2000 Second World Congress on Heating, Refrigerating and Air Conditioning*, Sarajevo, August 27 – September 1, 1989, Zbornik del.
- S. Kovič, M. Šijanec, A. Krainer, Prenova, toplotni odziv in študija možnosti, *Energija i zaštita čovjekove okoline, Medunarodni kongres*, Opatija, 18.–21. april 1990, str. 227–240, 1990.
- A. Krainer, Pametna hiša, *Energija i zaštita čovjekove okoline, Medunarodni kongres*, Opatija, 18.–21. april 1990, str. 345–352, 1990.
- M. Šijanec, J. Banovec, A. Krainer, Analiza nestacionarnega toplotnega odziva konstrukcijskega sklopa, *Energija i zaštita čovjekove okoline, Medunarodni kongres*, Opatija, 18.–21. april 1990, str. 353–360, 1990.
- R. Kunič, Računalniški program za analizo osonečenja objektov in naravne dnevne osvetlitve prostorov, *magistrska naloga*, FAGG, VTOZD GG, Ljubljana, 93 strani, marec 1990.
- Ostala literatura je navedena v:
- M. Saje, *Poročila o delu VTOZD GG v letih 1981–1989*, UEK, FAGG VTOZD GG, Ljubljana.

MODEL PODTALNICE LJUBLJANSKEGA POLJA

UDK 627.12+628.1.033

MITJA BRILLY

POVZETEK

Za analizo in prognozo bodočega režima podtalnice Ljubljanskega polja je izdelan model za obdobje osmih let od 1. 1. 1978 do 31. 12. 1985 in štiri variante izračuna. (Varianta brez poglobljanja struge reke Save in tri variante povečanega črpanja podtalnice za potrebe Ljubljanskega vodovoda). Umerjanje modela omogoča uspešno simulacijo in prognozo režima podtalnice Ljubljanskega polja. Z nadaljevanjem meritev infiltracije ter gladin podtalnice bo mogoče v bodoče model razvijati za potrebe planiranja in prognozo posegov za povečanje zmogljivosti in zaščito podtalnice.

GROUNDWATER MODEL OF LJUBLJANA AQUIFER

SUMMARY

The aquifer is a basin 77 square kilometers in area and more than 100 meter deep. It has been filled to its present level with gravel sediments from the river Sava. Groundwater levels in the aquifer are primarily controlled by water levels in the river Sava. In the western and central parts of the Ljubljansko polje aquifer, water infiltrates from the river bad to the aquifer, flows through and drains to the river through eastern edge. Groundwater modeling studies were performed to investigate the protection of groundwater, groundwater recharge and hydro-power development.

UVOD

Z modeliranjem toka podtalnice z matematičnimi modeli smo začeli na LMTe že leta 1977 in od takrat je bila obdelana vodna bilanca vseh večjih vodonosnikov v Sloveniji: Ljubljansko polje, Ljubljansko barje, Dravsko polje, Krško-Brežiško polje, Sorško polje in Mursko polje. Najobsežnejše raziskave so bile opravljene za potrebe Ljubljanskega vodovoda na Ljubljanskem polju. Izdelan je model, ki omogoča natančno simulacijo nestalnega režima podzemnih voda Ljubljanskega polja (10 cm odstopanja pri prognozi gladin podtalnice).

Kot rezultat računa modela dobimo podatke o gladinah vode in vodni bilanci posameznih polj, na katera je analizirano področje podzemne akumulacije razdeljeno. Z nadaljnjo obdelavo in analizo podatkov smo izdelali program, ki na osnovi matrike gladin in lastnosti vodonosnika določa gradiente podtalnice, Darcyjeve hitrosti, dejanske hitrosti in pretoke ter omogoča njihovo grafično prikazovanje. Z omenjenimi modeli so bili uspešno analizirani vplivi povečanega črpanja podtalnice, izgradnje hidroenergetskih objektov, onesnaženja itd. [1] [4]–[11] [13].

REGIONALNI MODELI GIBANJA PODTALNICE

Matematični modeli toka podtalnice so sestavljeni iz sistema diferencialnih enačb, zasnovanih na Darcyjevem zakonu in kontinuitetni enačbi. Rešitve enačb za določene začetne in mejne pogoje so možne z različnimi analognimi modeli ali računalniškimi programi [2].

Model podtalnice vsebuje vrsto hidrodinamičnih parametrov, ki jih z meritvami in opazovanji lahko določimo samo v posameznih točkah: koeficient filtracije in efektivna poroznost ter kote za vodo neprepustne podlage vodonosnika. Meje vodonosnih plasti tudi niso natančno določene. Posameznih členov vodne bilance (podzemni dotok in odtok, infiltracija vode iz rečne struge) ne moremo meriti direktno, lahko jih le grobo ocenimo. Zato je najzahtevnejša faza modeliranja umerjanje modela.

Umerjanje modela je usklajevanje ocene vrednosti posameznih parametrov, dokler odstopanja med izračunom in meritvami ne dosežejo dovolj majhnih vrednosti. Pri modelih podtalnice se usklajujejo predvsem podatki o merjenih in izračunanih gladinah vode. Praktično rešujemo n enačb za n^* m neznanih vrednosti. Posamezne parametre spreminjamo na podlagi ocen, izkušenj in analiz razpoložljivih podatkov. Umerjanje je nedokončan postopek. Vsaka dodatna informacija o vodonosniku, nadaljnje raziskave in opazovanja omogočajo boljše usklajevanje parametrov modela.

Avtor:
Mitja Brilly, dr., dipl. gradb. inž., redni profesor

Vzrok za odstopanja med izračunom in meritvami v naravi so tudi napake:

- zaradi sheme modela (uvajanje napačnih hipotez),
- zaradi razdelitve poroznega prostora (manjše število delov se bolj grobo prilagaja naravi, večje število pa komplicira izračun),
- zaradi prostorsko in časovno neenakomerno razporejenih vhodnih spremenljivk (padavine oziroma infiltracija),
- zaradi natančnosti računskih operacij v samem računalniku ipd.

Dobro umerjen model, usklajen z naravo, nam omogoča:

- določanje členov vodne bilance, ki jih ne moremo merit in jih lahko le grobo ocenimo (podzemni odtok in dotok) [1] [5],
- analizo vpliva posameznih dejavnikov na režim podzemnih voda (regulacije vodotokov, melioracije in drugi že zgrajeni objekti ipd.) [4],
- prognozo vpliva povečanega črpanja podtalnice, izgradnje hidroenergetskih objektov, urbanizacije in drugih posegov na režim podzemnih voda [6]–[8] [10].

Kot rezultat izračuna na modelu dobimo podatke o gladinah vode in vodni bilanci posameznih polj, na katera je analizirano področje razdeljeno. Na podlagi matrice gladin in lastnosti vodonosnika lahko izračunamo gradiente podtalnice, Darcyjeve hitrosti, dejanske hitrosti in pretoke. Omenjene rezultate dobimo lahko za vsak posamezni časovni korak. Rezultat izračuna je množica podatkov, ki je brez dodatne obdelave nepregledna. Zato smo za nadaljnjo obdelavo in analizo podatkov pripravili več programov oziroma podprogramov, ki omogočajo izdelavo diagramov z grafičnim programom AutoCAD.

Za grafično podporo pri modeliranju smo uporabili program AutoCAD [12] [14]. Za vnašanje podatkov o črpanju vode in drugih vhodnih elementih smo izdelali program z makro AutoCAD ukazi. Delo pričnemo z AutoCAD sliko

področja vodonosnika, v katero vnašamo položaj vodnjakov in pridružene attribute (količino črpanja). Po končanem izračunu se rezultati (hidroizohipse itd.) grafično prikažejo na karti na zaslonu. Sliko dokončno obdelamo in opremimo z besedilom ter jo nato lahko zrišemo v poljubnem merilu.

Za pripravo podatkov meritev, analizo njihove natančnosti in izločanje napak smo uporabili programski paket LOTUS 123. Pri tem smo izdelali programirane tabele, opremljene z ustreznimi MAKRO ukazi.

MODEL PODTALNICE LJUBLJANSKEGA POLJA

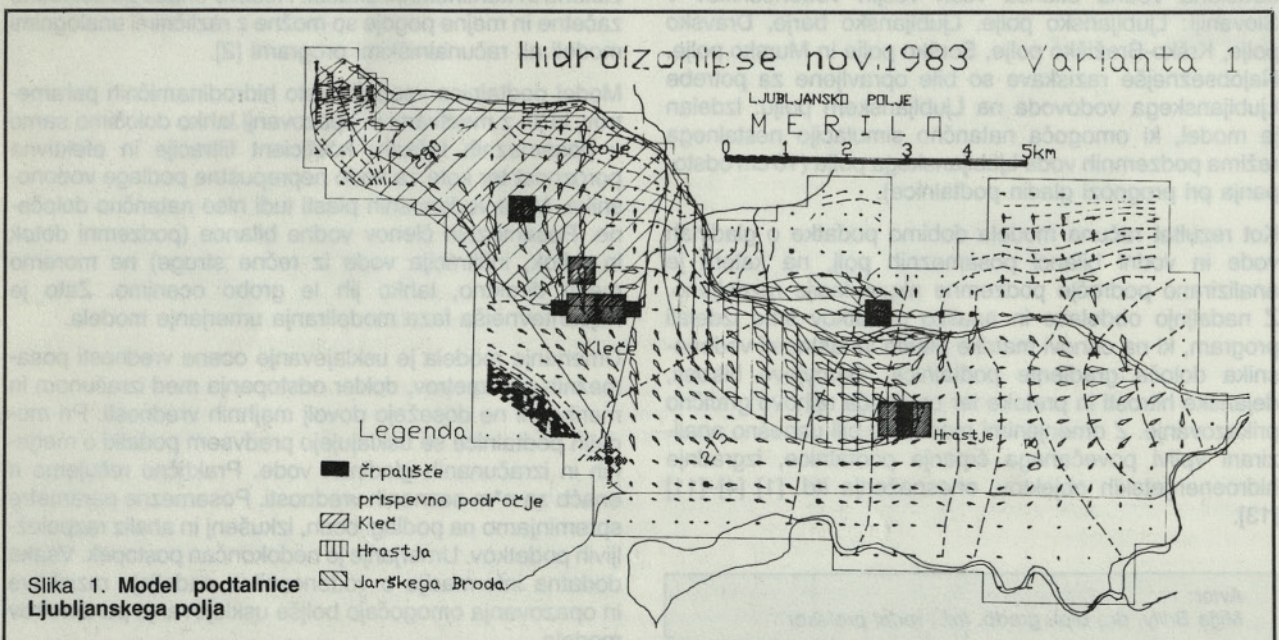
Leta 1980 je bila končana večletna naloga [1]. Kot rezultat naloge je bil izdelan model podtalnice in mreža piezometrov za opazovanje nihanja gladin podtalnice, opremljena z limnigrafi. Po končani nalogi se je opazovanje na piezometrih nadaljevalo, prav tako tudi opazovanje infiltracije padavin na lizimetrih pri vodarni Kleče.

V preteklem obdobju je bil model večkrat uporabljen pri analizi dinamike podtalnice:

- analiza ukrepov pri izredno nizkih gladinah podtalnice leta 1983,
- onesnaženje s kromom leta 1986 in
- analiza vpliva izgradnje pragov pri Rojah 1983.

Omenjene analize in podatki meritev so pokazali večje razlike med izračunom in meritvami kot pa pri umerjanju modela v obdobju 1977–1980. Izračuni so kazali nekoliko višje vrednosti gladin kot pa meritve.

Razvoj ljubljanskega vodovoda je v zadnjih letih poleg odpiranja novih vodarn zunaj področja Ljubljanskega polja (Brest in Skaručna) narekoval povečano izkoriščanje osnovnega vira – podtalnice Ljubljanskega polja. Poleg razširitve obstoječih vodarn je bila odprta nova vodarna



Slika 1. Model podtalnice Ljubljanskega polja

Jarški Brod. Tudi v naslednjih letih bo razvoj vodovoda sponel na povečanem črpanju podtalnice. Zato je bila v letih 1986–87 izdelana valorizacija matematičnega modela (slika 1).

1. Priprava hidroloških in geoloških podatkov za umerjanje modela

V prvi fazi so bile izdelane geofizikalne raziskave, ki so zajele področje med vodarnami Jarški Brod in Hrastje ter ob Savi med Gameljnam in Dolskim [17] [18]. Opazna je večja razgibanost podlage na področjih, kjer so bile opravljene geofizikalne raziskave. Raziskave so tudi potrdile obstoj praga med Črnučami in Gradom, kar je bilo na podlagi raziskav 1980. leta tudi pričakovati. Ugotovljen je tudi pojav globljega rova v podlagi pri Rojah.

Za potrebe valorizacije modela je bila izdelana analiza hidroloških meritev, ki jih Ljubljanski vodovod opravlja od 1979. leta dalje (gladine podtalnice, padavin in infiltracija padavin). V okviru same naloge so bile opravljene tudi meritve pretokov Save v več profilih, ki jih je izvedel Hidrometeorološki zavod.

Infiltracija padavin se meri pri vodarni v Klečah kontinuirano od 1979. leta na dveh lizimetrih – posodah premera 1,4 m, vkopanih 2 m v zemljo. Meritve potekajo vsak dan sočasno z meritvami padavin, na ombrometru in ombrografu v neposredni bližini lizimetra. Razlike v meritvah infiltracije v posodah ter meritvah padavin na padavnomerskih postajah Kleče in Bežigrad so bile statistično obdelane [9].

V sklopu raziskovalne naloge [1] [15] je bilo izdelanih sedem črpalnih piezometrov, in postavljenih deset limnigrafov za opazovanje nihanja gladin podtalnice. Podatki dnevni vrednosti gladin sedemletnih opazovanj (1978–

1984) so bili posneti z limnigrfskih trakov in vneseni v računalnik ter analizirani tako, da so izločene grobe napake, do katerih je prišlo pri digitalizaciji in vnašanju podatkov v računalnik. Formirana je računalniška baza podatkov dnevni opazovanj.

Na sliki 2 so prikazane karakteristične oscilacije gladine podtalnice na posameznih piezometrih (Kleče, Hrastje in Roje) in nihanje gladine vode v reki Savi. Podatki kažejo na izredno nihanje gladin Save pri vodomerni postaji Šentjakob in na prisotno izredno poglobljanje struge (1,5 m od 1978. do 1985. leta). Zaradi zožene struge reke v profilu vodomera je nihanje gladin pri visokovodnem valu tudi pet metrov v enem dnevu. Sicer pa je nihanje gladin v mejah do dva metra. Do prekinitve opazovanj je prišlo leta 1981 (oktober-december) zaradi del na rekonstrukciji Šentjakobskega mostu v neposredni bližini vodomera.

Zaradi poglobljanja struge, ki je bila predmet posebne študije [4], je bilo na Savi zgrajenih šest pragov. Za potrebe hidroenergetske izrabe Save je bilo 1987. leta ponovno izmerjenih več profilov na odseku Save od sotočja z Ljubljano in Medvodami [16]. Da bi lahko modelirali vpliv poglobljanja struge, smo podatke o poglobljanju dna interpolirali za posamezna leta, tako da se je izračun za posamezna leta začel z novimi kotami dna.

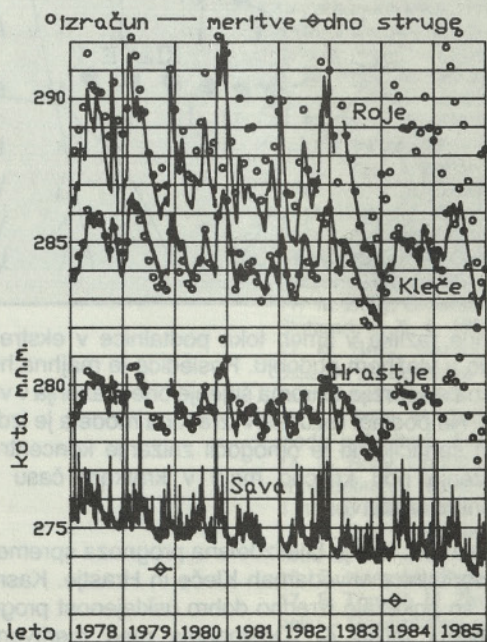
Za potrebe naloge je HMZ opravil dve seriji meritev pretokov Save v petih profilih. Pri analizi podatkov moramo opozoriti, da znaša natančnost meritev $\pm 5\%$ in da je med meritvami, ki so trajale cel dan, prihajalo do sprememb pretokov zaradi obratovanja HE Medvode. Vsekakor je opazno značilno zmanjšanje pretokov med profili Medno in ustje Gameljščice ter Črnuče – Šentjakob. Med profili Šentjakob in ustje Kamniške Bistrice se kljub temu, da ni površinskega dotoka, pretok izdatno poveča (od 1,3 do 2 m³/s).

Podtalnice Ljubljanskega polja ne izkorišča samo Ljubljanski vodovod, temveč tudi industrijska črpališča. Podatki o omenjenih črpaljščih so bili zbrani 1979. leta za potrebe študije [1], in sicer na podlagi prijave za plačilo vodnega prispevka pri ZVSS. Analiza je pokazala, da se je iz ekonomskih vzrokov natančnost prijavljenih zneskov izredno zmanjšala. Zato smo v nadaljnjem delu za omenjena črpaljšča zadržali vrednosti, podane v elaboratu [1].

Omenjena opazovanja in meritve so bila osnova za umerjanje modela podtalnice Ljubljanskega polja.

2. Rezultati umerjanja modela

Model smo umerjali v obdobju osmih let od 1. 1. 1978 do 31. 12. 1985. Za omenjeno obdobje smo imeli na voljo podatke opazovanj na dvanajstih piezometrih. V tem obdobju ni bilo registriranih izredno vlažnih let. Padavine so bile z izjemo v letih 1980 in 1985 v dolgoletnem povprečju ali pod njim. Značilno je sušno leto 1983, ko so bile padavine le za 20 % pod povprečjem, a je bilo izredno dolgo sušno poletno-jesensko obdobje. Za obdobje po letu 1985 ni bilo na razpolago podatkov o gladinah podtalnice, prišlo pa je tudi do večjih posegov



Slika 2. Nivogrami reke Save in podtalnice

na Savi, o katerih še ni bilo na razpolago zadovoljivih podatkov. Rezultati izračuna in meritev so podani na sliki 2.

Kot rezultat umerjanja modela smo dobili podatke o efektivni poroznosti na področju Ljubljanskega polja. Vrednosti efektivne poroznosti, ugotovljene pri umerjanju 1980. leta, so znašale 0,06, kar je glede na sestavo poroznega prostora izredno nizka vrednost. Ponovno umerjanje je podalo vrednost 0,1, kar je glede na gramozno sestavo materiala še vedno sorazmerno nizka vrednost.

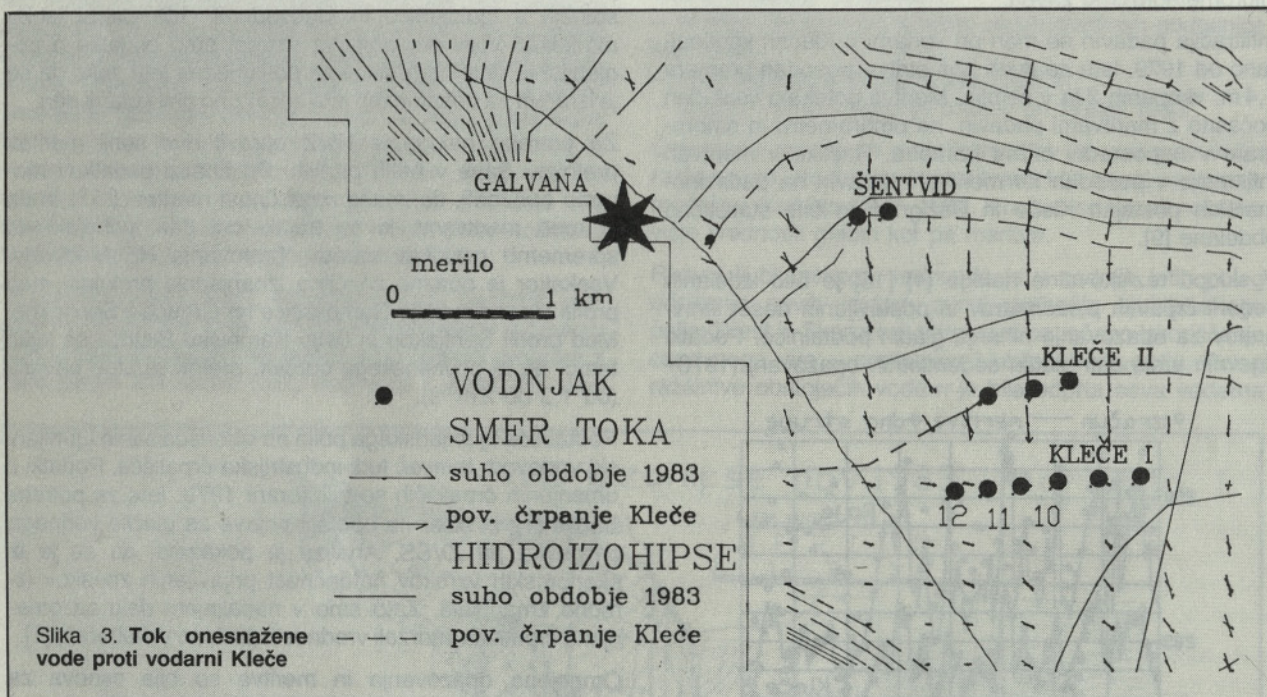
Rezultati izračuna kažejo, da je poglaviti vir podtalnice reka Sava (povprečno $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$), ki pa še več vode drenira ($3,26 \text{ m}^3/\text{s}$). Enako pomemben vir je tudi infiltracija padavin ($2,1 \text{ m}^3/\text{s}$), dotoki podtalnice na robu področja pa znašajo $0,43 \text{ m}^3/\text{s}$. V povprečju infiltracija padavin še presega črpanje in v najbolj sušnih obdobjih se $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$ podtalnice drenira v Savo.

S pomočjo vektorja pretoka so določene prispevne površine posameznih vodarn v ekstremnih primerih, slika 1.

Primerjava gladin podtalnice, izračunanih pri varianti brez poglobljanja struge reke Save, z rezultati umerjanja modela kaže za več kot meter višje gladine podtalnice, kar le potrjuje izreden vpliv reke Save na gladino podtalnice Ljubljanskega polja. Vpliv na vodno bilanco (pretoke podtalnice) je bil pri tem minimalen.

Pri variantah povečanega črpanja so bile predvidene količine črpanja vode za potrebe vodovoda 1930, 2185 in 2365 lit/s. Povečano črpanje se direktno čuti v vodni bilanci Save, kjer se je dreniranje v povprečju zmanjšalo za višino povečanega črpanja. Pri tretji varianti črpanja infiltracija Save v povprečju presega dreniranje podtalnice v Savo. Prispevno področje vodarn se izdatno poveča, tako da sta v sušnem obdobju prispevni področji Kleč in Hrastja med seboj povezani in ves čas leta tvorita enotno prispevno področje obeh vodarn.

Ekstremni režimi podtalnice v okolici vodarne Kleče z lokacijo galvane, ki je povzročila onesnaženje s šestvalentnim kromom leta 1986, so podani na sliki 3. Slika kaže



Slika 3. Tok onesnažene vode proti vodarni Kleče

V sušnem obdobju so področja nekoliko širša in bližje reki Savi. V vlažnem obdobju se pretoki povečajo, prispevna področja zožijo in pomaknejo od Save. Deloma se tudi pokrijejo, tako da del podtalnice, ki teče skozi vodarno Kleče, teče proti Hrastju.

3. Rezultati izračuna posameznih variant

Za analizo in prognozo bodočega režima podtalnice smo naredili štiri variante izračuna. Varianti brez poglobljanja struge reke Save in tri variante povečanega črpanja podtalnice za potrebe Ljubljanskega vodovoda.

na majhne razlike v smeri toka podtalnice v ekstremno suhem in v vlažnem obdobju. Posledica je majhna hidrodinamična disperzija oziroma širjenje onesnaženja v vodonosniku. Na podlagi rezultatov izračuna modela je izdelan program sanacije, ki je omogočil znižanje koncentracije onesnaženja pod kritično mejo v kratkem času in z minimalnimi sredstvi.

Januarja 1989. leta je bila izdelana prognoza spremembe gladin podtalnice v vodarnah Kleče in Hrastje. Kasnejše meritve so pokazale izredno dobro usklajenost prognoze z meritvami (slika 4). Odstopanja med meritvami in prognozo so bila pod deset centimetrov.

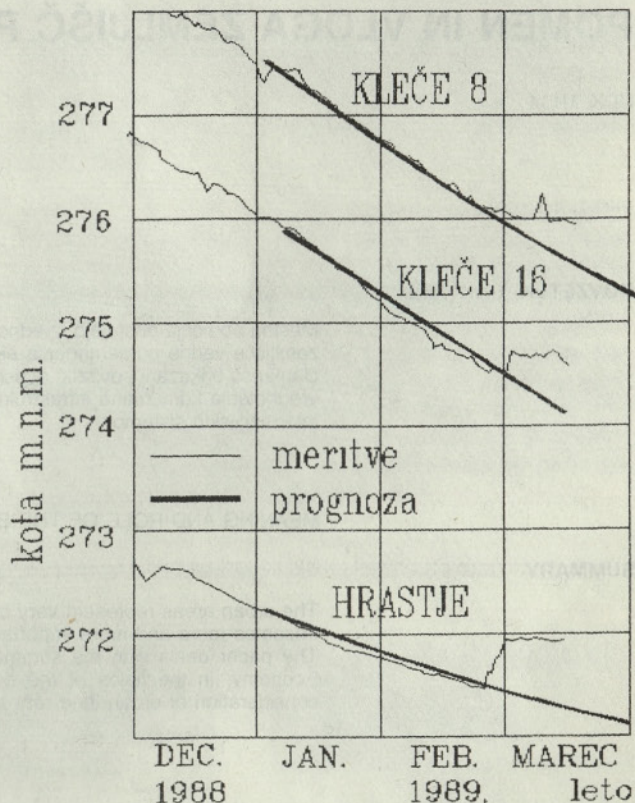
SKLEPI

1. Umerjanje modela omogoča uspešno simulacijo in prognozo režima podtalnice Ljubljanskega polja. Z nadaljevanjem meritev infiltracije ter gladin podtalnice bo mogoče v bodoče planirati različne posege za povečanje zmogljivosti in zaščito podtalnice.

2. Analize kažejo na izreden vpliv Save, predvsem na gladino podtalnice in v manjši meri tudi na vodno bilanco. Za uspešno modeliranje podtalnice bo v bodoče potrebno redno spremljati spremembe struge reke Save.

3. Planirano povečano črpanje podtalnice Ljubljanskega polja je možno ob povečani skrbi za zaščito podtalnice. Prispevne površine posameznih vodarn bodo zajele v večji meri strnjeno naseljene površine.

4. Podtalnica je na področju Kleč in Hrastja s predvidenimi povečanimi črpanja skoraj v celoti zajeta. Vsako nadaljnje povečanje črpanja na omenjenih vodarnah bo širilo prispevna področja proti naseljenim površinam mesta. Dodatne možnosti za povečano črpanje, brez večjih posledic, ima še vodarna Jarški Brod.



Slika 4. Prognoza gladin podtalnice v vodarnah

LITERATURA

1. M. Breznik, M. Brilly, Podtalnica Ljubljanskega polja – povečanje zmogljivosti in gospodarjenje, raziskovalna naloga, *IPK-TOZD Mestni vodovod*, Ljubljana, 1981.
2. M. Brilly, Sodobne metode za modeliranje podtalnice, *III. posvetovanje hidrotehnikov*, Zbornik del, str. 161–180, Ljubljana, 1977.
3. M. Brilly, M. Gorišek, Matematični model simulacije toka podtalnice Ptuiskega polja, raziskovalna naloga, *FAGG – Laboratorij za mehaniko tekočin*, Ljubljana, 1984.
4. M. Brilly, Vpliv poglobljanja struge reke Save na podtalnico Ljubljanskega polja, *FAGG – Laboratorij za mehaniko tekočin*, Ljubljana, 1985.
5. M. Brilly, M. Gorišek, Matematični model vodonosnika Ljubljanskega barja III. faza, raziskovalna naloga, *FAGG – Laboratorij za mehaniko tekočin*, Ljubljana, 1985.
6. M. Brilly, M. Gorišek, Vpliv HE Hrastje na podtalnico Mursko-Ljutomerskega polja, raziskovalna naloga, *FAGG – Laboratorij za mehaniko tekočin*, Ljubljana, 1985.
7. M. Brilly, M. Gorišek, Vpliv načrtovanih HE na podtalnico Krško-Brežiškega polja, *FAGG – Laboratorij za mehaniko tekočin*, Ljubljana, 1986.
8. M. Brilly, Irrigation and drainage requirements and design of hydroelectric power plants on the Mura river, *ICID*, Dubrovnik, 25. 9.–2. 10. 1988, Zbornik del, str. 74–81, 1988.
9. M. Brilly, M. Gorišek, Valorizacija modela podtalnice Ljubljanskega polja, raziskovalna naloga, *FAGG – Laboratorij za mehaniko tekočin*, Ljubljana, 1988.
10. M. Brilly, M. Gorišek, Končno poročilo I. faze projekta Sava–Ljubljana – Vodnogospodarska problematika, *FAGG – Laboratorij za mehaniko tekočin*, Ljubljana, 1988.
11. M. Brilly, Groundwater pollution by chromium, *Symposium Contaminant transport in groundwater*, Stuttgart, 4.–6. 4. 1989, Zbornik del, str. 465–366, 1989.
12. M. Brilly, Razvoj programov za simulacijo toka podtalnice in možnosti uporabe programskih paketov za obdelavo tabel in grafično obdelavo podatkov, raziskovalna naloga, *FAGG – Laboratorij za mehaniko tekočin*, Ljubljana, 1989.
13. M. Brilly, M. Gorišek, Sanacija onesnaženja podtalnice Dravskega polja, I. faza – Matematični model podtalnice, *FAGG – Laboratorij za mehaniko tekočin*, Ljubljana, 1990.
14. M. Brilly, Uporaba AutoCAD programskega paketa za grafično podporo informacijskim sistemom in modeliranju hidroloških pojavov, *Seminar – Računalnik v gradbenem inženirstvu*, Ljubljana, 4.–6. 4. 1990, Zbornik del, strani 105–112, Ljubljana, 1990.
15. N. Del Fabro, Interna dokumentacija Ljubljanskega vodovoda, *Ljubljanski vodovod*, Ljubljana, 1980–87.
16. D. Kosmač, Sava – Ljubljana, *Vodnogospodarski inštitut*, Ljubljana, 1987.
17. B. Tomšič, M. Živanovič, D. Ravnik, Hidrogeološke raziskave za preskrbo z vodo na Ljubljanskem polju – Geofizikalne raziskave na Ljubljanskem polju 1986, *GZL Ljubljana*, 1987.
18. B. Uran, M. Živanovič, Geofizikalne raziskave ob Savi med Gameljnami in Dolskim, *GZL Ljubljana*, 1987.

POMEN IN VLOGA ZEMLJIŠČ PRI PROCESU URBANIZACIJE

UDK 711.14

ALBIN RAKAR

POVZETEK

Mestna območja postajajo izredno zapletena in kompleksna stvarnost, ob tem pa postaja tudi mestno zemljišče vedno pomembnejša ekonomska dobrina, s katero je treba kar najskrbneje gospodariti. V članku so prikazani povzetki raziskav, ki jih je opravil Inštitut za komunalno gospodarstvo na področjih vrednotenja komunalne infrastrukture in stavbnih zemljišč, preučevanja mestne rente ter oblikovanja informacijskih sistemov.

MEANING AND ROLE OF THE BUILDING GROUNDS IN THE PROCESS OF URBANIZATION

SUMMARY

The urban areas represent very complicated and rather complex reality and thus the urban use land becomes more and more important economic goods which should be managed as well as possible. The paper deals with the summaries of the research works, developed by Institute of Communal Economy, in the fields of the evaluation of communal infrastructure and urban use land, of the consideration of urban land rent and in building information systems.

UVOD

Proces urbanizacije ima med drugim za posledico tudi nastajanje, rast in razvoj mest in večjih urbanih aglomeracij. Osnovno gibalno rasti in razvoja današnjih mest so določene aglomeracijske in produkcijske prednosti, ki jih mesta nudijo in zaradi katerih so tudi privlačna za investicijska vlaganja v proizvodne in neproizvodne fonde. Tako cenimo, da je kar 60 % do 80 % vseh investicijskih vlaganj usmerjenih na mestna območja. Logična posledica take prostorske razporeditve investicijskih vlaganj je, da se pretežni del gospodarskih aktivnosti države odvija na relativno majhnem območju mest in naselij mestnega značaja.

Intenzivnost vlaganj v mestna območja povzročajo, da postajajo ta območja izredno zapletena in kompleksna stvarnost in da postaja mestno zemljišče vedno pomembnejša ekonomska dobrina, s katero je treba kar najskrbneje gospodariti.

Vse doslej povedano velja tudi za republiko Slovenijo. Hiter proces deagrarizacije je povzročil med drugim pritisk

prebivalstva na večja mesta, ki so se v prostorskem in populacijskem smislu izredno naglo razvila, na žalost ekstenzivno in neracionalno. Širjenje mest smo v prostorskem smislu do neke mere še usmerjali in obvladovali, ob tem pa nam nikakor ni uspelo oblikovati ustreznega instrumentarija, s katerim bi razvoj regulirali tudi v ekonomskem smislu. Eden temeljnih razlogov za odsotnost regulacijskih mehanizmov ekonomskega značaja je gotovo v dejstvu, da zemljišča v vsej povojni zgodovini nismo šteli za pomemben ekonomski tvorec. Tako so kmetijska in stavbna zemljišča po vojni izgubila svojo prvotno ekonomsko funkcijo in so postala zgolj pospeševalna elementa procesa industrializacije, kmetijska zemljišča na račun prelivanja akumulacije, stavbna pa na račun cenenih lokacij. Opisane razmere so bile zadosten razlog, da smo pričeli na Inštitutu za komunalno gospodarstvo sistematično proučevati pomen stavbnih in mestnih zemljišč.

Pri tem so nas zanimali predvsem odgovori na tale temeljna vprašanja: koliko kapitala je vložnega v mestna zemljišča, da mesto kot sistem lahko opravlja svoje proizvodne in neproizvodne funkcije?, kdo uživa koristi od tega kapitala in kakšne so te koristi?, na kakšen način je možno regulirati prostorski razvoj (tudi v ekonomskem smislu) in kakšen informacijski sistem potrebujemo za kompleksno upravljanje tega področja?, in končno, kako ublažiti nasprotje med izgradnjo naselij in varstvom kmetijskih zemljišč? V zvezi z iskanjem odgovorov na zastavljena vprašanja je nastal razmeroma obsežen raziskovalni opus, katerega rezultate povzemamo po naslednjih tematskih področjih:

Članek je povzetek dela raziskovalne skupine Inštituta za komunalno gospodarstvo na področju gospodarjenja s stavbnimi zemljišči in urbane ekonomike v obdobju 1972–1990. Prispevek posameznega avtorja je razviden iz literature.

Avtor:

Albin Rakar, dr., dipl. geod. kom. inž., izredni profesor

VREDNOTENJE KOMUNALNE INFRASTRUKTURE IN STAVBNIH ZEMLJIŠČ

Z razvojem urbanizacije in s prostorskim širjenjem mest se večja obseg komunalne infrastrukture ter njena vrednost. Tako predstavljajo komunalni fiksni fondovi vse pomembnejši del narodnega bogastva.

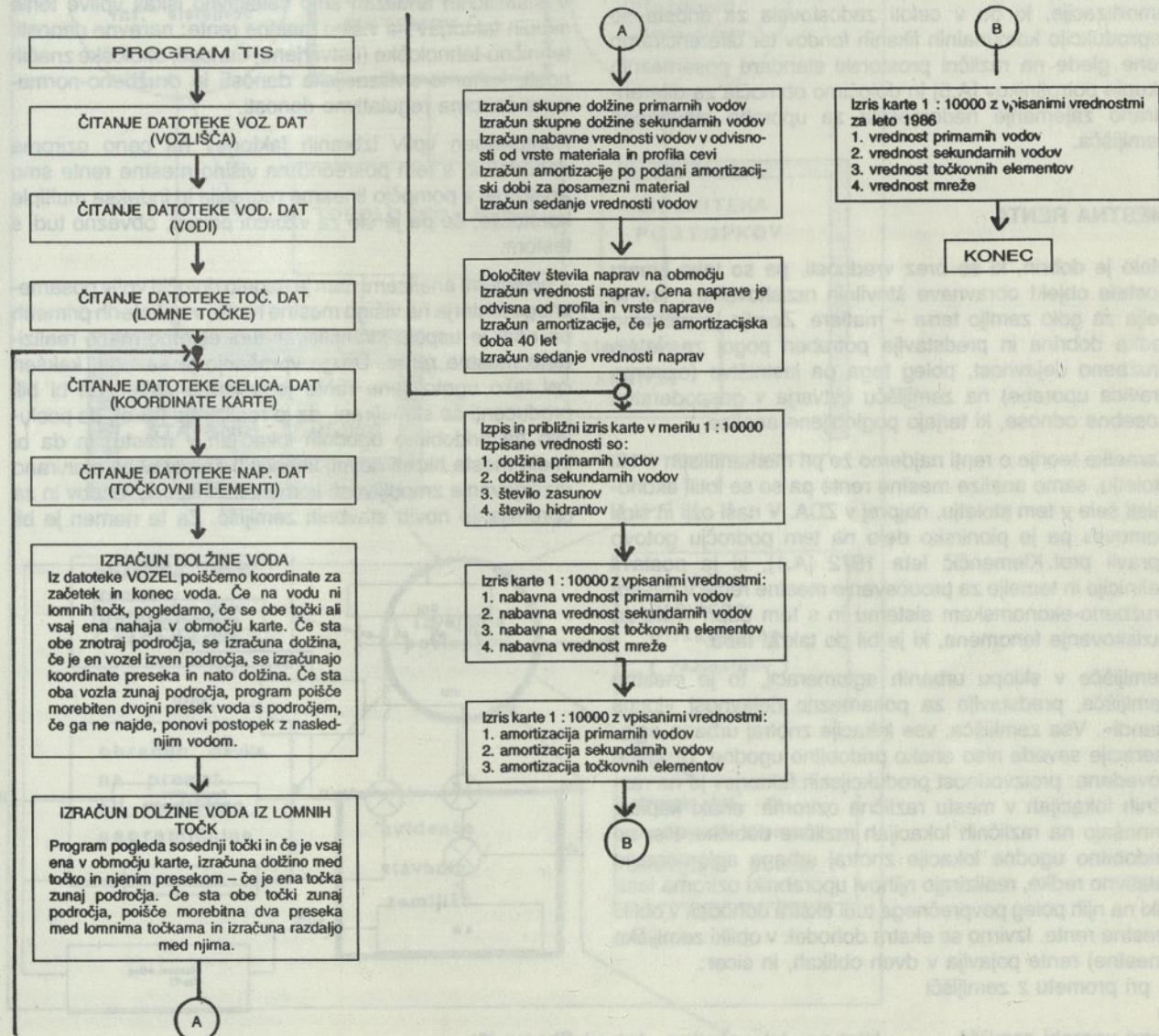
Za vrednotenje komunalne infrastrukture obstajata dve temeljni metodi, ki jih lahko po potrebi razširimo in dopolnimo, in sicer:

- 1) metoda kumuliranja investicij na neko začetno inventurno stanje in
- 2) metoda valorizacije na osnovi inventarizacije fiksnih fondov, ki jo lahko opravimo: z direktno oceno na osnovi popolnega popisa ali pa z vzorčenjem.

Za samo ovrednotenje komunalne infrastrukture je bolj primerna druga metoda. Za uporabo metode kumuliranja

investicij na neko začetno stanje nam na področju komunalnega gospodarstva manjkajo kvalitetni knjigovodski podatki, z uporabo druge metode pa dobimo poleg podatkov o celokupni vrednosti komunalne infrastrukture tudi podatke o gostoti te vrednosti ter o njeni prostorski razporeditvi.

Metodo valorizacije na podlagi inventarizacije komunalnih fiksnih fondov smo prvič razvili in testirali na primeru mesta Celje leta 1981 [A.3], kasneje pa z določenimi spremembami uporabili tudi pri vrednotenju komunalne infrastrukture v Mariboru [B.3]. Uporabili smo podatke grafičnega prikaza komunalnih naprav ter z njihovo pomočjo določili najprej gostote vodov, nato pa še gostoto vrednosti in njeno prostorsko razporeditev. Pri določanju prostorske razporeditve vrednosti komunalne infrastrukture smo enkrat izhajali iz geometričnih (Celje) in drugič iz upravnih (Maribor) prostorskih enot.



Prej opisani metodi nista predvidevali računalniške obdelave, zato pa sta dajali dokaj hitre in zanesljive rezultate. Njihova osnovna slabost pa je nedvomno v tem, da ne upoštevata v zadostni meri tudi rabljenosti naprav. Pri računalniško podprtem informacijskem sistemu komunalnega gospodarstva (ISKG) in še predvsem pri avtomatiziranem katastru komunalnih naprav pa lahko s poljubno natančnostjo izvedemo tako vrednotenje komunalne infrastrukture kot tudi vrednotenje zemljišča po posameznih geometričnih oziroma teritorialnih enotah ali zaprtih sistemih, če imamo digitalizirane meje teritorialnih enot oziroma oskrbovanih področij. Postopek vrednotenja je prikazan v priloženi shemi [A.7].

Podatki o vrednosti komunalne infrastrukture imajo zelo velik in večstranski pomen za alokacijo dejavnosti in za učinkovito gospodarjenje s stavbnimi zemljišči. Na podlagi teh podatkov namreč lahko določimo t.i. povečano vrednost zaradi minulih družbenih vlaganj, ki je sestavni del cene za oddano stavbno zemljišče, določimo višino amortizacije, ki bo v celoti zadostovala za enostavno reprodukcijo komunalnih fiksnih fondov ter diferenciramo ceno glede na različni prostorski standard posameznih skupin potrošnikov [A.5] in določimo območja za diferencirano zajemanje nadomestila za uporabo stavbnega zemljišča.

MESTNA RENTA

Malo je dobrin, ki so brez vrednosti, pa so tako kmalu postale objekt obravnave številnih raziskovalcev, kot to velja za golo zemljo terre – matiere. Zemlja je relativno redka dobrina in predstavlja potreben pogoj za vsako družbeno dejavnost, poleg tega pa lastništvo (oziroma pravica uporabe) na zemljišču ustvarja v gospodarstvu posebne odnose, ki terjajo poglobljene analize.

Zametke teorije o renti najdemo že pri merkantilistih v 16. stoletju, same analize mestne rente pa so se lotili ekonomisti šele v tem stoletju, najprej v ZDA. V naši ožji in širši domovini pa je pionirsko delo na tem področju gotovo opravil prof. Klemenčič leta 1972 [A.1], ki je postavil definicijo in temelje za proučevanje mestne rente v našem družbeno-ekonomskem sistemu in s tem odprl vrata za raziskovanje fenomena, ki je bil do takrat tabu.

Zemljišče v sklopu urbanih aglomeracij, to je mestno zemljišče, predstavlja za posamezno dejavnost »locus standi«. Vsa zemljišča, vse lokacije znotraj urbane aglomeracije seveda niso enako pridobitno ugodne. Drugače povedano: proizvodnost produkcijskih faktorjev je na različnih lokacijah v mestu različna oziroma: enaki kapitali prinašajo na različnih lokacijah različne dobičke. Ker so pridobitno ugodne lokacije znotraj urbane aglomeracije relativno redke, realizirajo njihovi uporabniki oziroma lastniki na njih poleg povprečnega tudi ekstra dohodek v obliki mestne rente. Izvirno se ekstra dohodek v obliki zemljiške (mestne) rente pojavlja v dveh oblikah, in sicer:

- pri prometu z zemljišči
- in
- pri uporabi zemljišč.

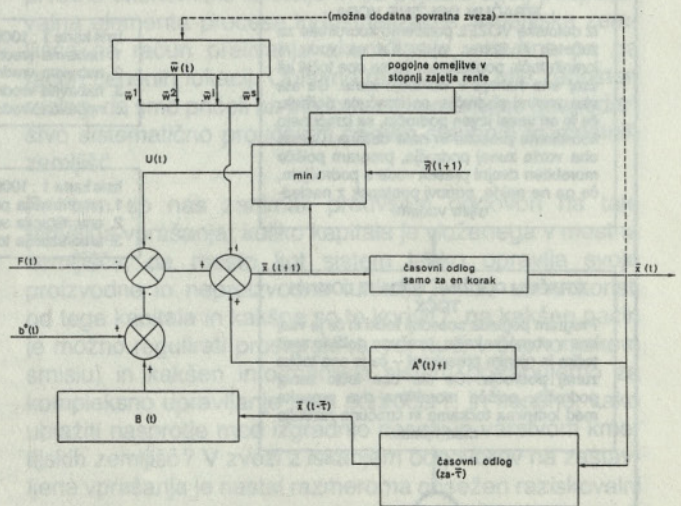
V prvem primeru se realizira mestna renta enkratno prek cene, ki je v bistvu kapitalizacija zemljiške rente, v drugem pa tekoče, v dejavnosti [A.2].

Obe pojavi obliki mestne rente smo skušali na Inštitutu za komunalno gospodarstvo kvantificirati s pomočjo statističnih analiz, pri čemer so raziskave potekale v dveh smereh. Pri kvantifikaciji mestne rente, ki se realizira pri prometu z zemljišči, smo izhajali iz kupoprodajnih pogodb in pogodb o pridobitvi pravice uporabe na mestnem zemljišču. V tem primeru smo ugotovili višino rente posredno prek cene zemljišča, ki je po definiciji kapitalizacija rente [A.2], [A.6]. Za kvantifikacijo mestne rente, ki se tekoče realizira v dejavnosti, pa smo analizirali proizvodno in tržno uspešnost v industriji in v terciarnih dejavnostih. Tu smo ugotavljali zgolj razlike v ekstra dohodkih po posameznih dejavnostih, na različnih lokacijah z različno komunalno opremljenostjo, torej rentne diferenciale [A.4], [A.6].

V statističnih analizah smo selektivno iskali vplive tehle skupin faktorjev na višino mestne rente: naravne danosti, tehnično-tehnološke (ustvarjene) danosti, ekološke značilnosti, kulturno-civilizacijske danosti in družbeno-normativne oziroma regulativne danosti.

Kompleksen vpliv izbranih faktorjev na ceno oziroma dohodek in s tem posredno na višino mestne rente smo analizirali s pomočjo linearne regresije in indeksa multiple korelacije, če pa je šlo za vzorčni primer, obvezno tudi s testom.

Z opisanimi analizami nam je uspelo določiti vpliv posameznega faktorja na višino mestne rente, v nekaterih primerih pa nam je uspelo kvantificirati tudi celotno maso realizirane mestne rente. Drugo vprašanje je seveda, kakšen del tako ugotovljene rente je smotrno zajeti, da bi bili producenti še stimulirani, da jo realizirajo (torej, da poslujejo na pridobitno ugodnih lokacijah v mestu) in da bi imela mesta hkrati dovolj finančnih sredstev za planirano razširjevanje zmogljivosti komunalnih fiksnih fondov in za opremljanje novih stavbnih zemljišč. Za ta namen je bil

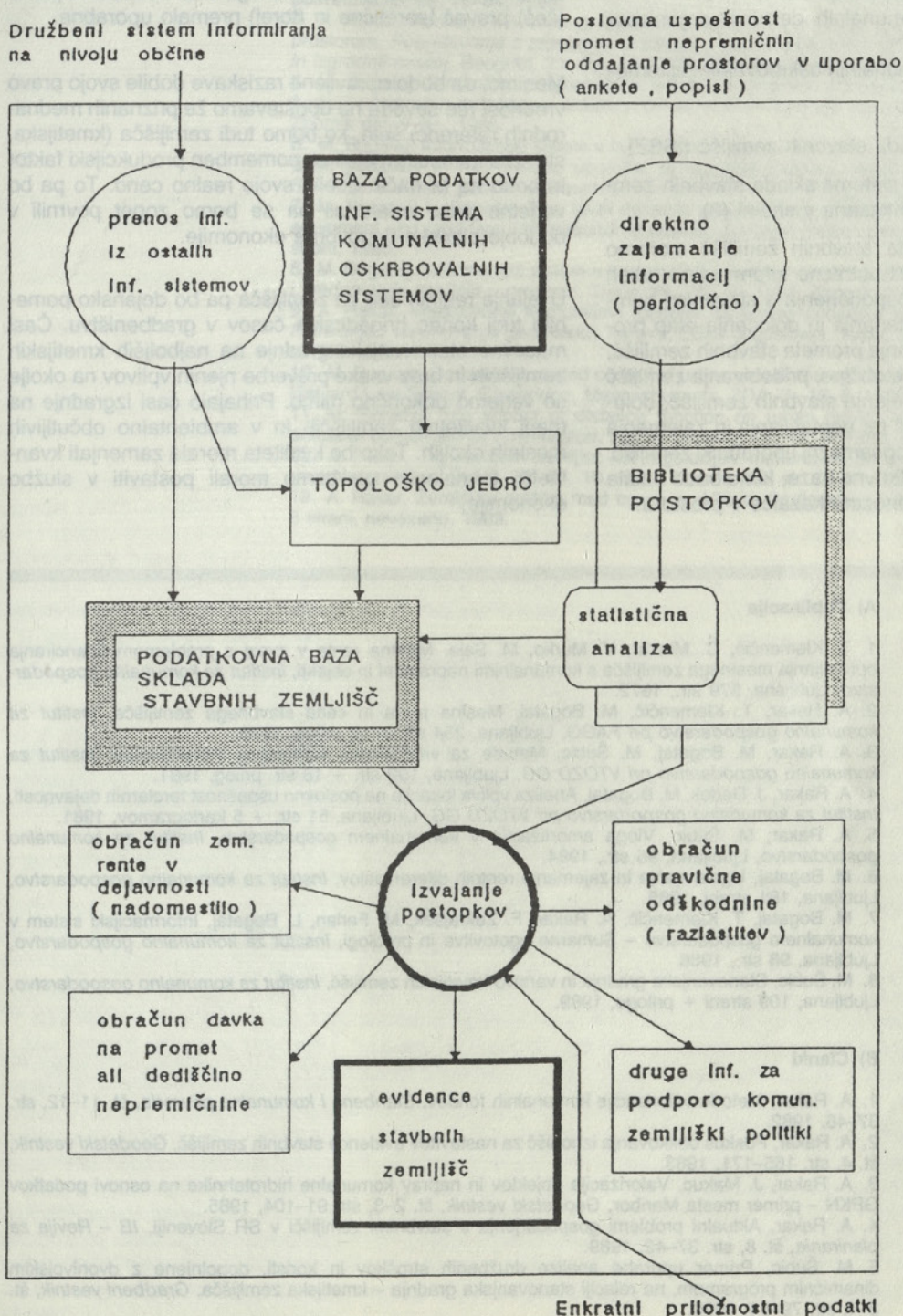


Schema (2)

razvit model zajemanja rentnih diferencialov kot regulator razvoja naselij [A.6], ki je bil kasneje razširjen in dopoljen z dinamičnim modelom določanja poselitve. Z dinamičnim modelom določanja poselitve opredeljujemo dolgoročno

alokacijo dejavnosti v prostoru na makro in mikro nivoju s ciljem doseči maksimalne skupne družbene koristi, ki jih zemljišča dolgoročno nudijo posameznim dejavnostim [C.7], [C.10], [C.11], [A.8], [B.5].

Shema povezave Informacijskega sistema sklada stavbnih zemljišč z drugimi Informacijskimi sistemi na nivoju občine



Shema (3)

INFORMACIJSKI SISTEMI

Prvi pogoj za odločanje v skladu z ekonomskimi principi, je informiranost. Ta ugotovitev je splošna in velja tudi za področje gospodarjenja s stavbnimi in mestnimi zemljišči. Informacijski sistem za potrebe gospodarjenja s stavbnimi zemljišči smo zasnovali kot del informacijskega sistema na področju komunalnega gospodarstva, ki je sestavljen iz tehle delov (podsystemov) [A.7]:

- informacijski sistem komunalnih delovnih organizacij (ISKDO),
- informacijski sistem komunalnih oskrbovalnih sistemov (ISKOS),
- in
- informacijski sistem sklada stavbnih zemljišč (ISSZ).

Povezava informacijskega sistema sklada stavbnih zemljišč z drugimi sistemi je prikazana v shemi (3).

Informacijski sistem sklada stavbnih zemljišč moramo zasnovati tako, da bo nudil ustrezne informacije v vseh akcijah posameznih faz gospodarjenja s stavbnimi zemljišči, od racionalnega usmerjanja in določanja etap prostorskega razvoja, spremljanja prometa stavbnih zemljišč, izvajanja predkupne pravice občine, pridobivanja zemljišč v družbeno lastnino, do urejanja stavbnih zemljišč, določanja cen stavbnih zemljišč ter ugotavljanja in zajemanja razlik v koristih, ki jih imajo posamezni uporabniki zemljišč. Za to pa so potrebne podatkovne baze, ki ne bodo nudile le fizičnih, ampak tudi vrednostne kazalce v prostoru.

SKLEP

Predstavljeni raziskovalni opus je nastajal v času in družbenih razmerah, ki mu niso bile najbolj naklonjene. Pojmi kot so trg, podjetništvo, profit in ekstraprofit v tistih časih še niso imeli domovinske pravice. Dnevna politika pa je glede tega področja zgolj stalno opozarjala, da ji primanjkujejo komunalno opremljena zemljišča in da nima za ta namen stalnega systemskega vira. Raziskave pa so (češ) preveč teoretične in (torej) premalo uporabne.

Menimo, da bodo opravljene raziskave dobile svojo pravo vrednost (če seveda ne upoštevamo že priznanih mednarodnih referenc) šele, ko bomo tudi zemljišča (kmetijska, stavbna in mestna) šteli za pomemben produkcijski faktor in bodo na ta način dobila svojo realno ceno. To pa bo verjetno prav kmalu ali pa se bomo zopet povrnili v obdobje plansko-dogovorne ekonomije.

Uvajanje realnih cen za zemljišča pa bo dejansko pomenilo tudi konec brigadirskih časov v gradbeništvu. Časi masovne stanovanjske gradnje na najboljših kmetijskih zemljiščih in brez vsake preverbe njenih vplivov na okolje so verjetno dokončno mimo. Prihajajo časi izgradnje na manj kvalitetnih zemljiščih in v ambientalno občutljivih mestnih okoljih. Tako bo kvaliteta morala zamenjati kvantiteto, tehnologijo pa bomo morali postaviti v službo ekonomije.

LITERATURA

A) Publikacije

1. T. Klemenčič, C. Mlakar, V. Murko, M. Saje, Mestna renta v zvezi s problemom financiranja opremljanja mestnega zemljišča s komunalnimi napravami in objekti, *Institut za komunalno gospodarstvo*, Ljubljana, 379 str., 1972.
2. A. Rakar, T. Klemenčič, M. Bogataj, Mestna renta in cena stavbnega zemljišča, *Institut za komunalno gospodarstvo pri FAGG*, Ljubljana, 254 str. in 22 prilog, 1979.
3. A. Rakar, M. Bogataj, M. Šubic, Metode za vrednotenje komunalne infrastrukture, *Institut za komunalno gospodarstvo pri VTOZD GG*, Ljubljana, 102 str. + 18 str. prilog, 1981.
4. A. Rakar, J. Dedek, M. Bogataj, Analiza vpliva lokacije na poslovno uspešnost terciarnih dejavnosti, *Institut za komunalno gospodarstvo pri VTOZD GG*, Ljubljana, 51 str. + 5 kartogramov, 1981.
5. A. Rakar, M. Šubic, Vloga amortizacije v komunalnem gospodarstvu, *Institut za komunalno gospodarstvo*, Ljubljana, 95 str., 1984.
6. M. Bogataj, Ugotavljanje in zajemanje rentnih diferencialov, *Institut za komunalno gospodarstvo*, Ljubljana, 181 strani, 1985.
7. M. Bogataj, T. Klemenčič, A. Rakar, F. Zakrajšek, M. Ferlan, L. Bogataj, Informacijski sistem v komunalnem gospodarstvu – Sumarne ugotovitve in predlogi, *Institut za komunalno gospodarstvo*, Ljubljana, 98 str., 1986.
8. M. Šubic, Stanovanjska gradnja in varstvo kmetijskih zemljišč, *Institut za komunalno gospodarstvo*, Ljubljana, 109 strani + priloge, 1989.

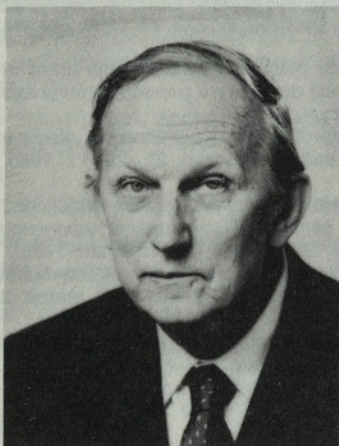
B) Članki

1. A. Rakar, Metode valorizacije komunalnih fondov, *Stanbena i komunalna privreda*, št. 11–12, str. 37–46, 1982.
2. A. Rakar, Poskus oblikovanja izhodišč za nastavitev evidence stavbnih zemljišč, *Geodetski vestnik*, št. 4, str. 165–171, 1983.
3. A. Rakar, J. Makuc, Valorizacija objektov in naprav komunalne hidrotehnike na osnovi podatkov GPKN – primer mesta Maribor, *Geodetski vestnik*, št. 2–3, str. 91–104, 1985.
4. A. Rakar, Aktualni problemi gospodarjenja s stavbnimi zemljišči v SR Sloveniji, *IB – Revija za planiranje*, št. 8, str. 37–42, 1989.
5. M. Šubic, Primer uporabe analize družbenih stroškov in koristi, dopolnjene z dvonivojskim dinamičnim programom, na relaciji stanovanjska gradnja – kmetijska zemljišča, *Gradbeni vestnik*, št. 3–4, str. 79–84, 1990.

C) Referati v kongresnih zbornikih

1. A. Rakar, Elastičnost troškova komunalnog opremanja s obzirom na gustinu naseljenosti, Znanstveno strokovno posvetovanje *Stanovanje – sinteza individualnog i kolektivnog*, Beograd, 1981, Zbornik, 18 str., nevezano, 1981.
2. A. Rakar, M. Bogataj, J. Dedek, Analiza vpliva lokacije na poslovno uspešnost terciarnih dejavnosti, Simpozij *Zemljište i zemljišna politika u planiranju prostora*, Beograd, 1981, Zbornik del, 11 str. + 2 diagrama + 2 kartograma, 1981.
3. A. Rakar, Funkcija amortizacije u procesu planiranja i korišćenja komunalnih fondova, *Planiranje i građenje naselja u uslovima usporenije stope ekonomskog rasta*, Beograd, 22.–23. 11. 1984, Zbornik posvetovanja, str. 75–84, 1984.
4. A. Rakar, Funkcija evidence građevinskih zemljišta u procesu planiranja i gazdovanja urbanim prostorom, *Posvetovanje o planiranju in planih v funkciji učinkovitih odločitev v prostorskem razvoju in izgradnji naselij*, Beograd, 21.–22. 11. 1985, Zbornik del, 9 strani, 1985.
5. M. Bogataj, Dinamično programiranje korišćenja prostora, *Posvetovanje o planiranju in planih v funkciji učinkovitih odločitev v prostorskem razvoju in izgradnji naselij*, Beograd, 21.–22. 11. 1985, Zbornik del, 9 str., 1985.
6. M. Bogataj, Informacijski sistem v komunalnem gospodarstvu kot podpora prostorskim evidencam. Baze podatkov in njih metode uporabe za urejanje prostora, *seminar Zveze društev urbanistov Slovenije in Zveze geodetov Slovenije*, Maribor, 17.–19. 4. 1986, Zbornik del, C3, 17 strani, 1986.
7. M. Bogataj, L. Bogataj, Two level dynamic programming of the spatial distribution of communal equipment and land use, *International workshop: Location theory*, Dubrovnik, 8. 10. 1986, referat, 8 strani, 1986.
8. M. Bogataj, Informacioni sistem u komunalnoj privredi i vrednovanje kapitala u prostoru, *Planiranje i vrednovanje kapitala u prostoru*, Tuzla, 28.–30. 10. 1987, Zbornik del, str. 107–119, 1987.
9. A. Rakar, Vrednovanje komunalnih fondova na osnovi podataka katastra komunalnih uređenja, *Planiranje i vrednovanje geodetskih radova*, ZGIG Jugoslavije, Tuzla, 28.–30. 10. 1987, Zbornik del, str. 97–106, 1987.
10. M. Bogataj, Computer assisted control of urban growth through the land use value, *Lecture notes*, Harvard Law School, Cambridge, Massachusetts, ZDA, 7.–12. 8. 1988, 36 strani, 1988.
11. M. Bogataj, The impact of distance function on urban growth control, *Euroalio-workshop on practical combinatorial optimisation*, Rio de Janeiro, 14.–18. 8. 1989, Zbornik, str. 11–12, 1989.
12. A. Rakar, Trg stavbnih zemljišč kot regulacijski mehanizem pri urejanju prostora, *Geodezija in urejanje prostora*, Čatež, 20.–21. 10. 1989, Zbornik del, str. 56–61, 1989.
13. A. Rakar, Zemljiška politika med trgov in državo, *Sedlarjevo srečanje*, Bled, 14.–15. 12. 1989, 8 strani, nevezano, 1989.

JUBILEJ



Akademik

prof. dr. LUJO ŠUKLJE – osemdesetletnik

Profesor Lujo Šuklje je eden najuglednejših jugoslovanskih znanstvenikov in pedagogov na področju mehanike tal in temeljenja. Z vztrajnim in požrtvovalnim delom, s kritičnim presojanjem in z iskanjem novih raziskovalnih poti si je pridobil velik ugled ne samo v naši državi, ampak tudi izven naših meja. Bil je pobudnik za ustanovitev Jugoslovanskega društva za mehaniko tal in temeljenje; zlasti v prvih letih njegovega razvoja je s svojim organizacijskim in strokovnim delom mnogo pripomogel k današnji mednarodni veljavi društva.

*Ob znanstveno raziskovalni in strokovni dejavnosti je pomembno tudi pedagoško delo profesorja Šukljeta. Svoje bogato znanje je znal posredovati študentom, sodelavcem in strokovnjakom v operativi. V Sloveniji so izšli malone vsi aktivni geomehaniki iz njegove šole, pa tudi v drugih jugoslovanskih republikah je mnogo prispeval k vzgoji strokovnjakov za področje mehanike tal. Iz teh vrst je izšlo več magistrin in doktorjev znanosti. Poskrbel je tudi za vzgojo pedagoškega kadra in je za pedagoški poklic usposobil dovolj habilitiranih učiteljev in asistentov za nadaljevanje pouka predmetov s področja geotehnike ob njegovi upokojitvi. Njegov učbenik *Mehanika tal* pa ni le pripomoček študentom, ampak nudi tudi dragoceno pomoč inženirjem iz prakse.*

Rodil se je 21. 9. 1910 v Jelsi na Hvaru. Po maturi na klasični gimnaziji je študiral gradbeništvo na Univerzi v Ljubljani, kjer je diplomiral 1935. leta. Po diplomi in vojaškem roku je najprej dve leti projektiral in gradil vodovode, potem pa je vse do leta 1946 poučeval kot suplent in kot profesor na Tehniški srednji šoli v Ljubljani. Leta 1946 je postal po zagovoru disertacije »Dršenje temeljnih tal pod učinkom brezkrajnega bremenskega pasu« doktor tehniških ved Univerze v Ljubljani in je bil imenovan za docenta Tehniške fakultete te univerze. Leta 1951 je postal izredni, leta 1957 pa redni profesor in sicer za predmeta mehanika tal in osnove tehnične mehanike. Kot redni profesor Fakultete za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo je stopil leta 1975 v pokoj. Leta 1979 mu je bil podeljen naslov zaslužni profesor za njegovo bogato in obsežno delo.

V svoji specialni stroki – mehaniki tal – je poglobljal znanje v Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics v Parizu z dvakratnim polletnim študijem v letih 1937 in 1952. Na pobudo prof. A. Kràla je v okviru Instituta za tehnično mehaniko univerze v Ljubljani v letih 1938 do 1940 pripravil aparature in ostvaril pogoje za ustanovitev laboratorija za mehaniko tal v tem institutu jeseni 1940. Laboratoriju je bil predstojnik od 1946. do 1963. leta in od 1966. do 1970. leta. V letih 1970 do 1975 je bil predstojnik katedre za geotehniko in njej priključenega laboratorija za mehaniko tal Fakultete za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo. Kot predstojnik je vodil raziskovalne in strokovne študije laboratorija.

Raziskovalno je profesor Šuklje delal posebno na področju dopustne obtežbe tal, računanja napetosti in deformacij v tleh, analize konsolidacije s posebnim ozirom na nelinearnost reoloških sovisnosti in na viskozne lastnosti zemljin ter na področju stabilnosti pobočij in ukopov s posebnim ozirom na heterogenost zemljin, lezenje in progresivni lom. K razvoju mehanike tal je (deloma s sodelavci) prispeval zlasti:

z razširitvijo elastoplastične analize kritične obtežbe glede na začetne učinkovite napetosti in z opredelitvijo pojma »plastičnih področij« (1948);

z raziskavo začetne nosilnosti koherentnih slojev omejene debeline glede na profil bremenskega pasu (1954); z ugotovitvijo, da se lahko v trmih razpokanih ali grudastih glinah zaradi progresivnosti loma trdnost reducira na sam torni upor neprekonsolidirane zemljine (1953);

da je lahko v tektonsko poškodovanih hribinah z glinastimi sestavinami stabilnost pobočja odvisna od najmanj odporne sestavine, čeprav ta volumensko ne prevladuje, in odpor hribine reduciran na samo trenje v tej sestavini (1954);

s predlogom za prikazovanje reoloških lastnosti zemljin v linearnih deformacijskih pogojih z družino izotah izpremembe količnika por v odvisnosti od učinkovitih osnih napetosti ter z uporabo izotah za analizo enosmerne konsolidacije viskoznih zemljin (1957, 1964);

z raziskavo učinkov zadrževanja lezenja zemljin (1961);

s presojo kritičnosti pobočja glede na značaj, razsežnost, trajanje in pospeške lezenja ter glede na pogostnost in trajanje preobremenilnih učinkov (1961, 1964);

z raziskavo pogojev za prodor arteške vode zaradi nastanka nateznih razpok (1961);

z izdelavo metode tridimenzionalne analize stabilnosti temeljev ločnih pregrad oslonjenih na slojevita in razpokana skalna tla (1967);

z definicijo pojma učinkovitih napetosti za viskozne zemljine in s prikazom reoloških sovisnosti za rotacijsko simetrična napetostna stanja (1967 do 1978);

z numerično analizo vplivov stopnje predhodne sekundarne konsolidacije, stopnje zasičenosti, hitrosti oziroma velikosti dodatne obtežbe in dolžine filtracijske poti na konsolidacijo nelinearno deformabilnih zemljin z viskoznimi lastnostmi in sicer v pogojih enosmerne ali dvosmerne filtracije (1968 do 1978);

z numerično analizo napetosti in deformacij v polravnini, ki jo sestavlja več plasti nelinearno deformabilnih, viskoznih zemljin (1975 do 1978);

z numerično analizo konsolidacije takšne polravnine, če izrazimo reološke lastnosti zemljin po modelu nelinearnega Kelvinovega telesa (1977 do 1978);

s hkratno rešitvijo difuzijske in ravnovesnih enačb za nelinearna viskozna tla, ki omogoča usklajeno istočasno napoved deformacij in varnosti temeljnih tal, obremenjenih z nasipi (1982 do 1989).

O teh in drugih rezultatih svojega in svojih sodelavcev raziskovalnega dela je profesor Šuklje poročal na vrsti strokovnih sestankov. Aktivno se je udeležil 16 posvetovanj Jugoslovanskega in dveh posvetovanj Srbskega društva za mehaniko tal in temeljenje; šestih kongresov mednarodnega društva: v Rotterdamu (1948), v Zürichu (1953), v Londonu (1957), v Parizu (1961) in v Moskvi (1973), referat pa je poslal tudi kongresu v San Franciscu (1985); štirih evropskih konferenc: v Stockholmu (1954), v Bruxellesu (1958), v Wiesbadenu (1963) in v Oslu (1967); treh regionalnih konferenc: za plazove v Kievu (1964), 4. podonavske na Bledu (1974) in 1. baltiške v Gdansku (1975); šestih specialnih konferenc oziroma simpozijev: v Grenoblu (1964), v Wrocławu (1968), v Pragi (1969), v Sarajevu (1969), v Pensacola Beachu, Florida (1978) in v Samarkandu (1982); dalje dveh posvetovanj Jugoslovanskega komiteja za dolinske pregrade: v Jablanici (1952) in na Bledu (1954) ter mednarodnega kongresa za dolinske pregrade v Parizu (1955).

Referata je poslal tudi mednarodnemu kongresu za dolinske pregrade v Istanbulu (1967) in skupščini mednarodnega društva za hidravlične raziskave v Dubrovniku (1961). Na evropski konferenci v Bruxellesu je bil glavni referent dveh sekcij, na evropski konferenci v Oslu član panela, na evropski konferenci v Wiesbadenu in na 1. baltiški konferenci v Gdansku podpredsednik sekcije, na 4. podonavskem posvetovanju na Bledu predsednik organizacijskega odbora, na mednarodnem kongresu v Moskvi pa predsednik prve glavne sekcije in častni gost organizacijskega komiteja.

Na povabilo ustanov ali v okviru meddržavnega znanstvenega sodelovanja ali ob priliki študijskih potovanj je o svojem in svojih sodelavcev raziskovalnem delu predaval pri akademiji znanosti in na univerzi v Budimpešti (1963, 1966), v hidrotehničnem inštitutu akademije znanosti v Gdansku (1966), na Imperial Collegeu v Londonu (1968), na univerzah v Palermu, Neaplju in Rimu (1970), na Purdue University, University of Colorado, Duke University, Waterways Experiment Station (Vicksburg) v ZDA (1974), na univerzi v Grenoblu, v Laboratoire Central des Ponts et Chaussées in pri francoskem komiteju za mehaniko tal in temeljenje v Parizu (1975), na tehniški visoki šoli v Delftu in pri nizozemskem društvu za mehaniko tal in temeljenje v Haagu (1976) ter na univerzah v Karlsruhe, Göteborg in Trondheim, v Norveškem geotehničnem inštitutu v Oslu, v Švedskem geotehničnem inštitutu v Linköpingu (1977), na univerzi v Wrocławu (1980), na univerzi v Kuvaitu (1981), na akademskih inštitutih v Pekingu in Wuhanu (1981) in na univerzah v ZDA (1989); na kongresu Jugoslovanskega društva za mehaniko v Zadru je imel uvodno predavanje (1986).

V Centre International des Sciences Mécaniques (CISM) v Vidmu je imel leta 1974 deset predavanj o nelinearnem viskozem ponašanju zemljin. V okviru CISM-a je v letih 1974 in 1975 vodil tritedeński seminar iz mehanike tal UNESCOa. Leta 1978 je uredil tudi zbornik teh predavanj. V okviru podiplomskega študija je imel predavanja iz mehanike tal na univerzah v Zagrebu (1972, 1974, 1976, 1978), v Beogradu (1972, 1974, 1976) in v Ljubljani (1975).

V okviru Laboratorija za mehaniko tal FAGG Univerze v Ljubljani je izdelal številne geotehnične študije strokovnih problemov, ekspertize in recenzije projektov na področju temeljenja, gradnje nasipov, stabilnosti naravnih pobočij, izkopov in dolinskih pregrad in sicer tako v Sloveniji kot v drugih Jugoslovanskih republikah. Bil je član mnogih strokovnih svetov in komisij.

Sodeloval je pri pripravi jugoslovanskih predpisov za temeljenje in leta 1979 izdal pojasnila k predpisom, do leta 1975 pa je bil sodrudenik Applied Mechanics Reviews.

V letih 1961 do 1964 je bil član sveta za šolstvo SRS, od leta 1963 do leta 1971 pa član upravnega odbora Sklada Borisa Kidriča. V letih 1960 do 1965 je predsedoval komisiji Univerze v Ljubljani za raziskovalno delo, od leta 1967 do leta 1969 pa je bil član komisije skupščine SRS za proučitev visokega šolstva. Od leta 1967 do leta 1972 je bil predsednik skupščine Izobraževalne skupnosti SRS.

Leta 1969 je bil izvoljen za dopisnega člana Slovenske akademije znanosti in umetnosti, leta 1979 pa za rednega člana. Kot član akademije je bil sourednik Spominskega zbornika Antona Kuhlja.

Leta 1964 je prejel nagrado Sklada Borisa Kidriča. Za delo v NOV je bil leta 1964 odlikovan z medaljo zasluge za narod, leta 1965 pa za znanstveno, prosvetno in vzgojno delo z redom republike s srebrnim vencem in leta 1980 z redom dela z rdečo zastavo. Leta 1972 je prejel Kidričevo nagrado za dognanja na področju mehanike tal, ki so strnjena v njegovi knjigi »Rheological Aspects of Soil Mechanics«; knjiga, ki je izšla pri založbi Wiley-Interscience, je prevedena tudi v ruščino.

Zveza gradbenih inženirjev in tehnikov Jugoslavije in Jugoslovansko društvo za mehaniko skale in podzemna dela sta prof. Šukljeta leta 1965 oziroma 1977 imenovali za svojega častnega člana.

Vsi, ki sprejemamo njegovo znanje, njegovo pomoč in nasvete in ki smo imeli priliko z njim sodelovati, se ob tej priložnosti prof. Šukljetu iskreno zahvaljujemo in mu želimo še mnogo uspešnih in zdravih let.

Silvan Vidmar.

10 LET PODPORNIH KONSTRUKCIJ IZ ARMIRANE ZEMLJINE V SLOVENIJI

UDK 624.131.53(497.12)

DARINKA BATTELINO

POVZETEK

Armirano zemljino smo doslej v Sloveniji uspešno uporabili pri graditvi več podpornih konstrukcij za cestne nasipe, večinoma iz nekoherentnih zemljin. V članku je prikazana uporaba armirane zemljine tudi za koherentne zemljine; opisana je 3,5 m visoka podporna konstrukcija iz armirane zemljine, narejena iz gline in meljastega peska ter podana primerjava vrednosti izmerjenih na terenu in dobljenih računsko.

Pri vseh narejenih konstrukcijah so bili uporabljeni samo domači materiali: obložne plošče iz armiranega betona, sidrane v nasipe z armirnimi trakovi iz poliestrskega laminata.

V članku so prikazani uporabljeni postopki za dimenzioniranje konstrukcij in konstrukcijski elementi z določljivo mehanskih lastnosti. Podani so: kratek opis štirih narejenih podpornih konstrukcij, način preizkušnje njihove stabilnosti in smernice nadaljnjega razvoja izvedbe ter uporabe.

10 YEARS EXPERIENCE IN REINFORCED EARTH WALLS IN SLOVENIA

SUMMARY

In Slovenia the reinforced earth has been successfully applied for a few retaining walls protecting road embankments. The fill is mainly a gravel or sand. In order to contribute to the experience concerning the applicability of the reinforced cohesive earth, measurements and tests made during and after construction of a reinforced embankment of 3,50 height have been analysed and are presented.

Only home made materials have been used: mainly covering plates of reinforced concrete anchored by reinforcing strips of polyester laminate.

The paper presents the applied design procedures, structural elements with the determination of their mechanical properties, short description of four retaining walls and the possibilities of theoretical and application development.

1. UVOD

Konstrukcijsko načelo armiranja zemljin je podobno kot za armiranje betona: osnovni material, ki ima zadostno odpornost na tlačne in strižne napetosti, vendar majhno oziroma nično natezno trdnost, kombiniramo z armaturnim materialom, ki ima zadostno odpornost na nateg in je na

površini dovolj raskav, da se napetosti iz osnovnega materiala s trenjem in adhezijo lahko prenesejo na armaturo – armirne palice ali trakove iz kovin, lesa ali sintetičnih snovi.

V preprostih oblikah so armiranje zemljin z lesenimi palicami ali vejevjem poznali že v starih časih. Armirano zemljino je v sodobno gradbeništvo uvedel francoski arhitekt Henry Vidal (1966) pa je tudi definiral konstrukcijska načela in podal osnovo za dimenzioniranje konstrukcij iz armirane zemljine. Po številnih laboratorijskih, terenskih in modelnih preiskavah so leta 1968 naredili šest podpornih konstrukcij iz armirane zemljine na cesti Menton-Nica

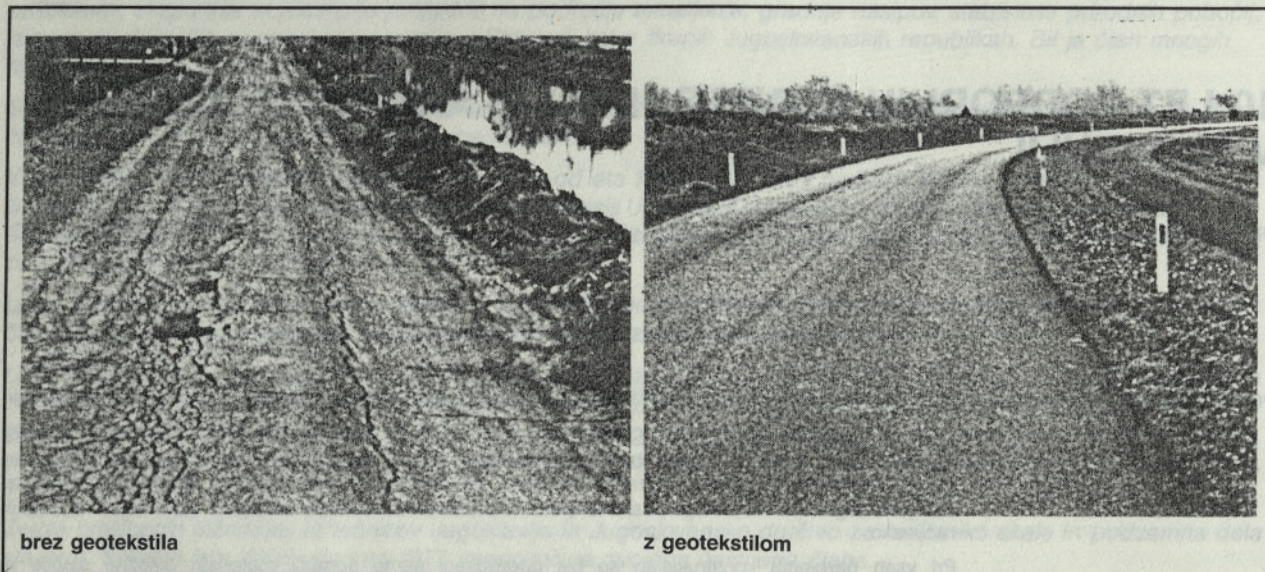
Avtor:
prof. dr. Darinka Battelino, dipl. inž. gradb., FAGG, ZRMK
Ljubljana

na Azurni obali. Maksimalna višina teh podpornih konstrukcij je bila 22 m. Ta drzna in lepa konstrukcija je dokazala zanesljivost in vse prednosti uporabe armirane zemljine za izvedbo podpornih konstrukcij. Njena uporaba se je iz Francije razširila po vsem svetu.

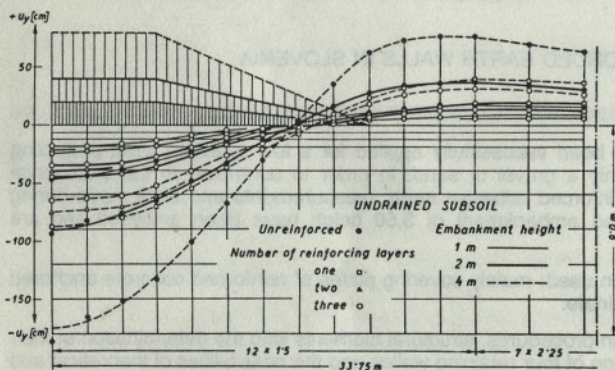
Uporaba se je vzporedno razvijala v štirih glavnih smereh:
 – gradnja cest: armatura – preproga iz geotekstila oziroma geomreže predstavlja ločilni sloj med koherentnimi temeljnimi tlemi in cestnim nasipom, izboljša razporeditev napetosti zaradi prometne obtežbe, zmanjša deformabilnost in poveča obstojnost ceste (sl. 1);

– gradnja nasipov na slabo nosilnih tleh: poveča se dopustna obremenitev, zmanjšajo se začetne distorzijske deformacije in poveča se lokalna stabilnost. Na sliki 2 so podani rezultati analize gradnje nasipa na nearmiranih in različno armiranih slabo nosilnih temeljnih tleh;

– gradnja podpornih konstrukcij: možna je gradnja visokih podpornih konstrukcij tudi na slabo nosilnih temeljnih tleh, temelj ni potreben, velika stabilnost pri statični, dinamični in potresni obremenitvi, možnost spreminjanja oblike in barve čelne strani omogoča izredno lepo prilagajanje okolju, gradnja je hitra in poceni.



Sl. 1. Asfaltna cesta na barjanskih tleh tri leta po graditvi

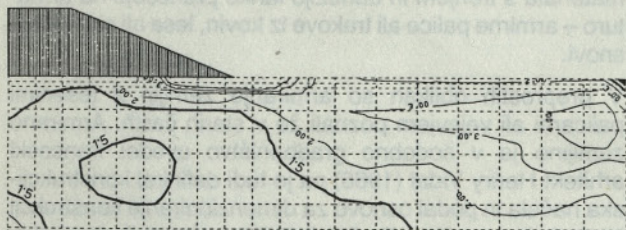


Sl. 2a. Cestni nasip: nedrenirani pogoji. Primerjava posevkov za tri različne višine nasipa (1, 2 in 4 m) in za štiri različna armiranja: nearmirana zemljina, enojna, dvojna in trojna plast geomreže

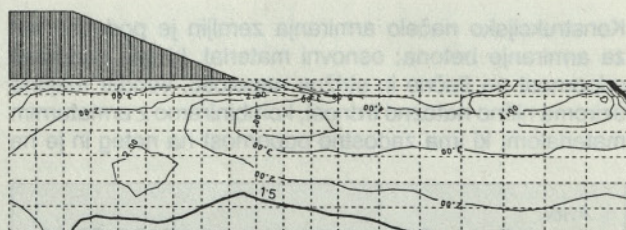
– Posebne gradnje: konstrukcije, pri katerih so združeni elementi zadnjih dveh vrst konstrukcij so zemeljske pregrade, valobrani in zaščita rečnih ter morskih brežin pod vodno gladino. Pri tem načinu je možno izjemno zmanjšanje prereza konstrukcije.

V Sloveniji smo uporabili armirano zemljino pri gradnji cest in podpornih konstrukcijah za cestne nasipe. Narejena je bila ena podorna konstrukcija z geotekstilom in nekaj nižjih podpornih konstrukcij z geomrežami. Pri gradnji gorskih cest. Pri podpornih konstrukcijah nasipov za pomembnejše ceste pa smo uporabili podporne konstrukcije, narejene z armiranobetonskimi obložnimi ploščami in zemljino armirali s poliestrskimi trakovi.

Pri uvajanju prvih konstrukcij iz armirane zemljine smo se oprli na tuje izkušnje, hkrati pa začeli opravljati laboratorijske in terenske meritve. Tako imamo danes na voljo precejšnje število pomembnih podatkov za gradnjo podpornih konstrukcij iz armirane zemljine. Razvoj laboratorijskih meritev je v zadnjem času usmerjen na vpliv dina-



Sl. 2b. Cestni nasip: izolinijske varnostnih količnikov za nearmirano zemljino pri nasipu visokem 4 m ($F = \tau_0/\tau^0$)



Sl. 2c. Cestni nasip: nedrenirani pogoji, izolinijske varnostnih količnikov pri enojni armaturi in nasipu visokem 4 m

mične obremenitve na te vrste podpornih konstrukcij, kar je posebej pomembno za uporabo armirane zemljine pri zaščiti nasipov za železnice.

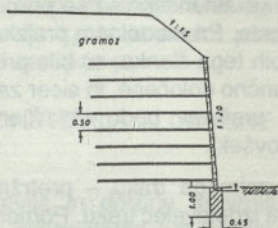
Vpliv potresne obremenitve se za zdaj upošteva samo pri računu aktivnega zemeljskega pritiska. V načrtu pa so modelne laboratorijske preiskave na potresni mizi, kjer se bo, s simuliranjem najpogostejših potresov v Sloveniji, določal vpliv takšne obremenitve na armirne trakove oziroma armirne plasti.

2. MATERIALI IN IZVEDBA

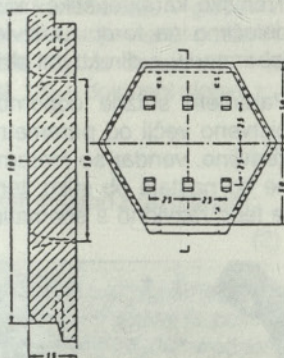
Ker so bile v Sloveniji podporne konstrukcije v glavnem iz armirane zemljine, narejene z obložnimi ploščami in armirnimi trakovi ter nekoherentno zasipno zemljino (sl. 3), je v članku podrobneje opisan samo ta tip konstrukcije.

2.1. OBLOŽNE PLOŠČE

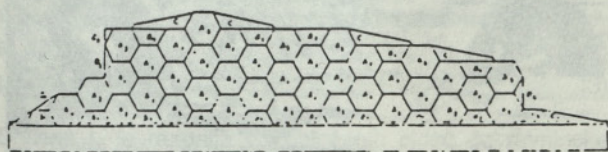
Obložne plošče so iz armiranega betona MB 30 in so izdelane v dvanajstih različicah. Osnovna plošča (A1) je šesterkotnik višine 1 m, debeline 15 cm z vdelenimi šestimi odprtinami za armirne trakove (sl. 4). Kakor je razvidno s slike 5, lahko z modificiranimi ploščami sledimo vsaki obliki nasipa. Možno je tudi oblikovanje armiranega nasipa, ki se lomi pravokotno. Vertikalna povezava med ploščami je zagotovljena s stikom na pero in uter ter jeklenimi zatiči. Pri eni modifikaciji plošče je v njenem spodnjem delu 10 cm okrogla odprtina za iztok vode iz zaledja.



Sl. 3. Karakteristični prerez obl. plošče – armir. trakovi



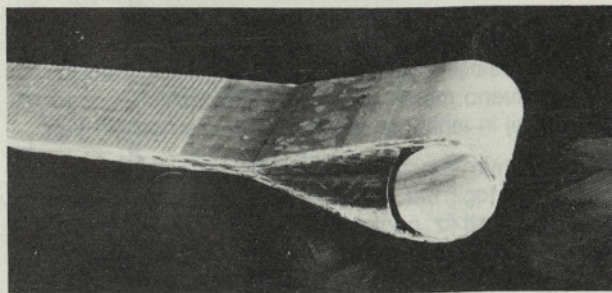
Sl. 4. Pogled in prerez plošče A1 (arm. v prerezu ni vrisana)



Sl. 5. Vrste obložnih plošč

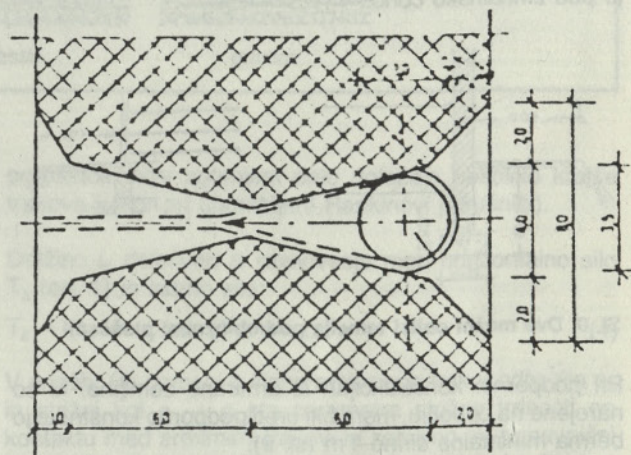
2.2. ARMIRNI TRAK

Armirni trakovi, ki jih uporabljamo sedaj so izdelani iz poliestrskega laminata širine 6 cm in debeline 0,2 do 0,3 mm (sl. 6).

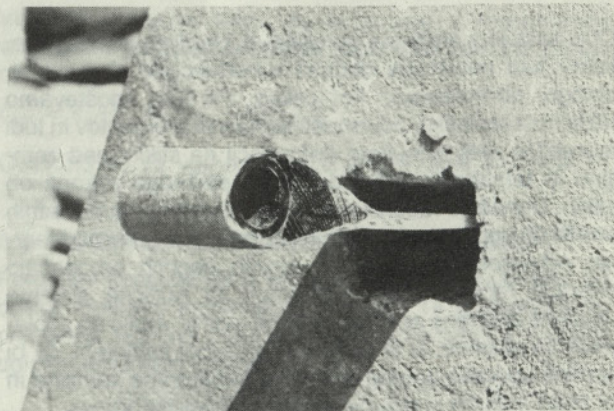


Sl. 6. Armirni trak

V obložni plošči je dvojna konusna odprtina (sl. 7), tako da trak, ki ima na pritrilnem koncu izdelano odebeljeno glavo v obliki solze (sl. 6), lepo naleže v odprtino.



Sl. 7. Odprtina za trak



Sl. 8. Vgrajevanje armirnega traku

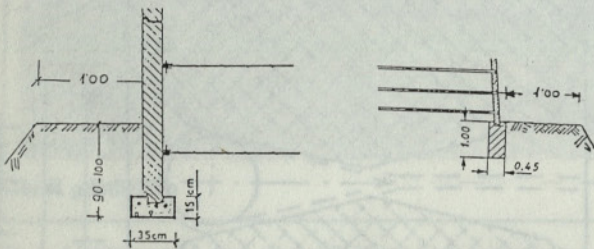
Pomanjkljivost teh trakov je omejena dolžina – ki je zaradi načina izdelave možna samo do 5 m – kar dovoljuje gradnjo konstrukcij iz armirane zemljine do maksimalne višine 5 m oziroma je potrebna kombinacija z vmesnimi plastmi geomrež. Druga pomanjkljivost trakov pa je tudi kemična sestava. Sedaj uporabljeni material je razmera »krhek« in že pri manjših deformacijah se pojavijo

lasne razpoke kar omogoči dostop vode do vlaken iz steklene volne, vgrajenih v trak zaradi povečanja njegove pretržne odpornosti. Zato bo treba, kakor je podano v poglavju 5, razviti novo vrsto trakov.

2.3. TEMELJ

Ena izmed osnovnih prednosti podpornih konstrukcij iz armirane zemljine je, da ni potreben temelj, zato je tudi izkop bistveno manjši kot pri gradnji klasičnih podpornih konstrukcij in lahko se gradijo na slabše nosilnih tleh.

Pri podpornih konstrukcijah iz armirane zemljine, ki so izvedene iz togih obložnih plošč in armiranih trakov oziroma armiranih plasti iz geotekstila ali geomrež, je treba t. i. narediti konstrukcijski temelj pod obložnimi ploščami. Ta konstrukcijski temelj mora prevzeti težo obložnih plošč, da se le-te ne obesijo na armirne trakove, hkrati pa rabi za lažje in lepše vgrajevanje obložnih plošč. Temelj mora biti majhnih dimenzij, zato da je njegova teža čim manjša. Na sliki 9 sta prikazani dve obliki temelja pod obložnimi ploščami. Globina temelja v naših krajih mora biti, tako kot za vsa temeljenja – minimalno od 90 do 100 cm, da je pod zmrzlinško cono.



Sl. 9. Dve možni obliki temelja pod obložnimi ploščami

Pri podpornih konstrukcijah iz armirane zemljine, ki so narejene na pobočju, mora biti pred podporno konstrukcijo berma minimalne širine 1 m (sl. 9).

3. RAČUNSKE OSNOVE ZA DIMENZIONIRANJE PODPORNE KONSTRUKCIJE

Obe sestavini armirane zemljine, tj. zemljino in armaturo, kakor tudi nebitveni dodatni konstrukcijski element, tj. oblogo, obravnavamo kot celoto. Pri tem upoštevamo različnost reoloških odvisnosti sestavnih elementov in tudi morebitno diskontinuiteto deformacij na stikih med zemljino in armaturo, zaradi delovanja strižnega zakona ob stikih. Današnje računske metode reševanja ravnovesnih enačb ob upoštevanju takšnih različnih, navadno nelinearnih odvisnosti in pri danih mejnih pogojih omogočajo pripravo računalniških programov za različne sisteme uporabe armirane zemljine. Stroge rešitve vodijo do zapletenih programov, ki bi postali še posebej zapleteni, če bi razširili uporabo armiranja tudi na koherentne zemljine in bi želeli vključiti v račune še konsolidacijski proces.

V praksi si prizadevamo za poenostavitve računov, tako da eliminiramo faktorje, ki v določenih primerih niso pomembni; ti so: diskontinuirnost pomikov na stikih med zemljino in armaturo, viskozne lastnosti zemljine, hidravlični filtracijski upor ter nelinearnost in anizotropnost odvisnosti med deformacijami in napetostmi.

Za podporne konstrukcije iz armirane nekoherentne zemljine lahko uporabimo preprosto analizo po modelu klasič-

nih sidranih konstrukcij. Ker meritve deformacij in napetosti na že narejenih konstrukcijah potrjujejo uspešnost in zadovoljivost takšnih analiz, se bomo omejili samo na prikaz teh računov.

Pri dimenzioniranju podporne konstrukcije iz armirane zemljine z obložnimi ploščami in sidrni trakovi moramo:

- določiti mehanske karakteristike temeljnih tal, zasipne zemljine, armiranih trakov in stika armirni trakovi – zasipa zemljina pri statični in dinamični obremenitvi;
- določiti horizontalne komponente napetosti, ki delujejo na podporno konstrukcijo zaradi aktivnega zemeljskega pritiska, obremenitve površja, potresne obremenitve in zaledne vode ter upoštevati naklon zaledja;
- določiti na podlagi rezultatov analiz prvih dveh točk potrebno število in dolžino armiranih trakov;
- preizkusiti notranjo stabilnost konstrukcije;
- preizkusiti armirani del zemljine, enako kot težnostni podporni zid, na prevrnitev in horizontalni zdrs ter posedek konstrukcije;
- analizirati stabilnost celotne konstrukcije.

3.1. MEHANSKE KARAKTERISTIKE TEMELJNIH TAL, ZASIPNE ZEMLJINE IN KONTAKTA ARMIRNI TRAK – ZASIPNA ZEMLJINA

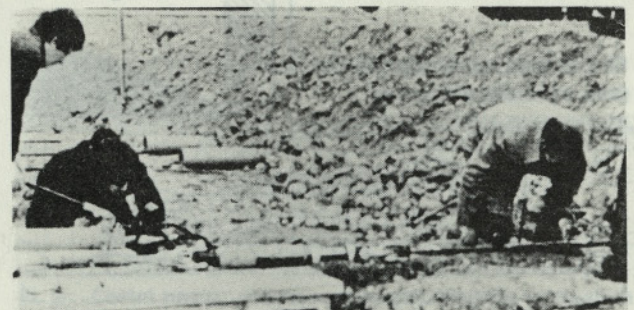
Za varno dimenzioniranje podporne konstrukcije je treba poznati slojevitost temeljnih tal, nagnjenost slojev, parametre strižne odpornosti zemljine v posameznem sloju, deformacijske module, koeficiente prepustnosti, prostorske teže in nivo ter režim podtalnice.

Pri zasipni zemljini moramo določiti optimalno gostoto oziroma vlago za vgrajevanje ter parametre strižne odpornosti in deformacijski modul pri dinamični in statični obremenitvi. Te karakteristike so se pri nas do sedaj bolj ali manj privzemale. Pri modelnem preizkusu, ki je kratko omenjen v sklepih tega članka, so bile pri nas te karakteristike prvič natančno določene, in sicer za savski peščen prod. Rezultati preiskav bodo objavljeni v posebnem članku (A. Petkovšek).

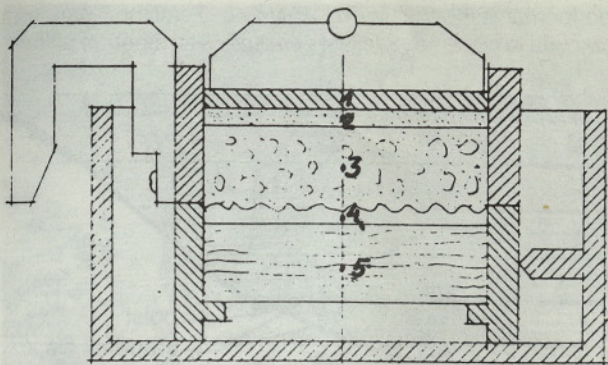
Karakteristika armirnega traku – pretržna sila traku je podatek, ki ga dá izdelovalec traku. Pomembno je upoštevati pravilno vrednost varnostnega količnika, ker s tem upoštevamo tudi lastnost staranja plastičnih mas.

Trenjske karakteristike med zemljino in armirnimi trakovi določimo na terenu z izvlečnimi preizkusi (sl. 10) ter v laboratoriju z direktnimi strižnimi preiskavami (sl. 11).

Parametri strižne odpornosti na kontaktu so običajno bistveno večji od parametrov strižne odpornosti zasipne zemljine, vendar se moramo zavedati, da porušitev za to ne bo nastala ob stiku, temveč v zasipni zemljini, kakor je lepo razvidno s shematičnega prikaza na sl. 12.

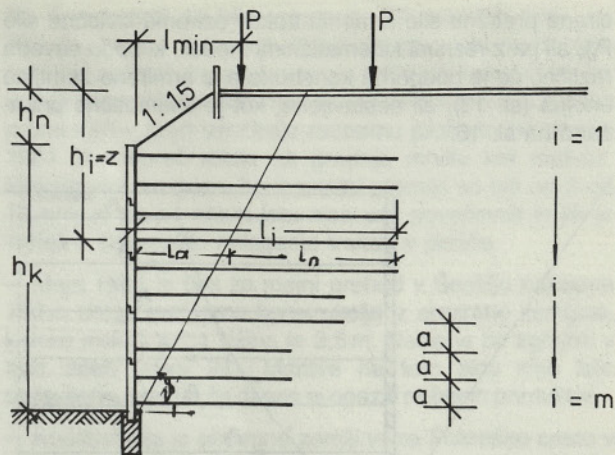


Sl. 10. Izvlečni preizkus

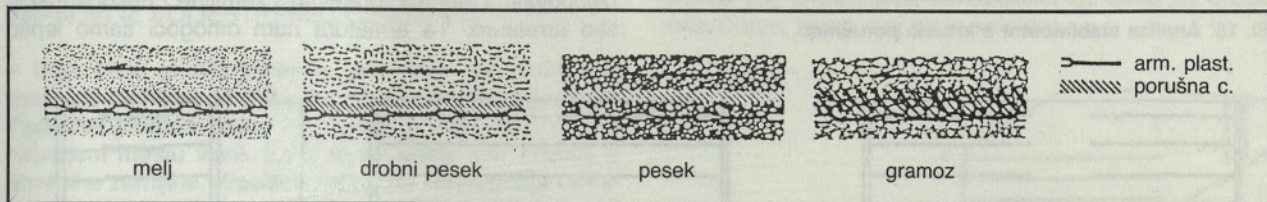


1. kovinska plošča, 2. filtrni kamen, 3. zasipna zemljina, 4. armirni trak, 5. podložna plošča

Sl. 11. Direktni strižni preizkus



Sl. 13 Shema preseza



Sl. 12. Porušna cona pri izvleku traku

Rezultati številnih izvlečnih preizkusov, opravljenih pri nas in v tujini, so pokazali, da je pri nekovinskih armirnih trakovih in nekoherentni zasipni zemljini kritična pretržna odpornost traku in ne izvlečna sila. Pri izračunu trenjske oziroma sidrne sile za posamezni trak se priporoča, da se privzame v račun vrednost strižnega kota zasipne zemljine in adhezije c_a , ki je enaka polovični vrednosti kohezije zasipne zemljine c .

3.2. DOLOČITEV ŠTEVILA IN DOLŽINE ARMIRNIH TRAKOV

Ta določitev števila in dolžine armirnih trakov (širino armirnega traku privzamemo kot znano vrednost, ki jo določi izvajalec – š) na določeni višini podporne konstrukcije, določimo rezultanto vseh horizontalnih napetosti v tej višini. Če je tlak za 1 m širine konstrukcije v globini z enak e_z , trakovi pa so po višini konstrukcije v enakomernih razdaljah a , je horizontalna sila E_z , ki deluje na 1 m obloženih plošč v pasu višine a (sl. 13), v določeni globini z :

$$E_z = e_z a \quad (1)$$

Potrebno število trakov n v eni vrsti dobimo z razmerjem:

$$n = E_z / F P \quad (2)$$

kjer je F varnostni količnik in P pretržna sila posameznega traku. Pretržna sila je za 6 cm široke trakove iz poliestrskega laminata, ki so sedaj v uporabi 20 kN, vrednost varnostnega količnika pa je 4.

Potrebna dolžina armirnega traku (horizontalno zaledje, sl. 13) je:

$$l_i = l_a + l_n \quad (3)$$

Dolžina l_a je razdalja od obloženih plošč do ravninske potencialne porušnice za homogeno, neobremenjeno zaledje (v tuji literaturi so privzete razne oblike te potencialne

porušnice, ki v zgornjem delu določajo nekoliko krajše trakove kakor pri uporabljeni Rankinovi porušnici).

Dolžino l_n določimo iz ravnovesja med horizontalno silo T_z (en. 1) in sidrno silo:

$$T_z = (c_a + \sigma_z \tan \varrho) 2 b n l_n \quad (4)$$

V enačbi (4) pomeni b širino armirnega traku, adhezija c_a in strižni kot $\varrho \rightarrow \phi$ sta parametra strižne trdnosti na kontaktu med armirnimi trakovi in zemljino, σ_z je navpični zemeljski tlak v globini z . Iz enačbe (4) torej izhajajo, da je:

$$l_n = E_z / (c_a + \sigma_z \tan \varrho) 2 b n \quad (5)$$

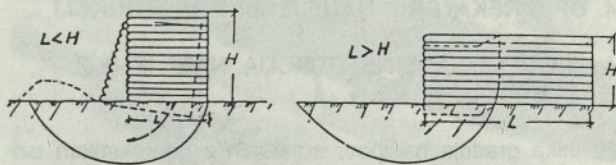
Varnost uvedemo tako, da računamo z reduciranimi vrednostmi parametrov strižne odpornosti zaledne zemljine:

$$c_{am} = c_a / F^* \quad \text{in} \quad \phi_m = \tan \phi / F^* \quad (6)$$

Običajno se za varnostni količnik privzame vrednost $F^* = 1,3$.

3.3. NOTRANJA STABILNOST KONSTRUKCIJE

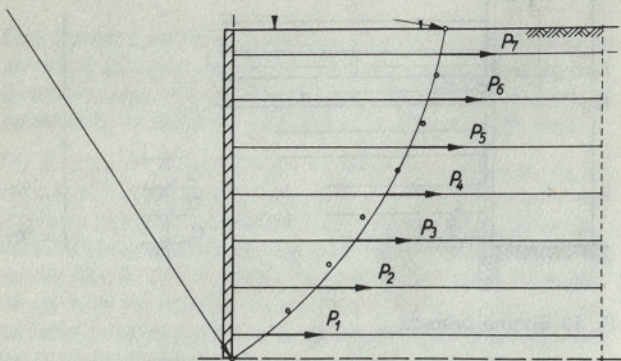
Porušitev konstrukcije iz armirane zemljine je odvisna od oblike armirane konstrukcije. Na sliki 14 je shematično prikazana različna porušitev dveh konstrukcij z različno dolgimi armirnimi trakovi.



Sl. 14. Shema porušitve

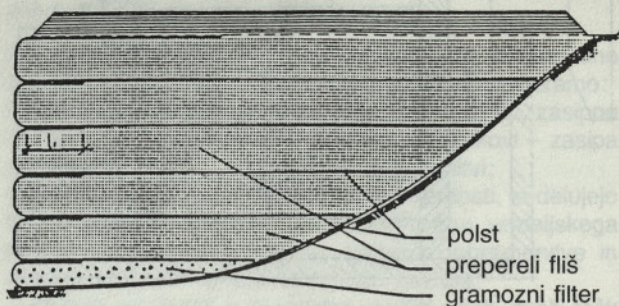
Notranjo stabilnost konstrukcije, kjer je $L > H$, lahko analiziramo s krožnimi potencialnimi porušnicami, kakor je prikazano na sliki 15 (kot zunanje sile upoštevamo redu-

cirane pretržne sile armirnih trakov oziroma izvlečne sile P_1), ali pa z različni kinematičnimi modeli, ki bodo seveda različni, če je podporna konstrukcija iz armirane zemljine enojna (sl. 13), ali sestavljena, kot je shematično prikazano na sl. 16.



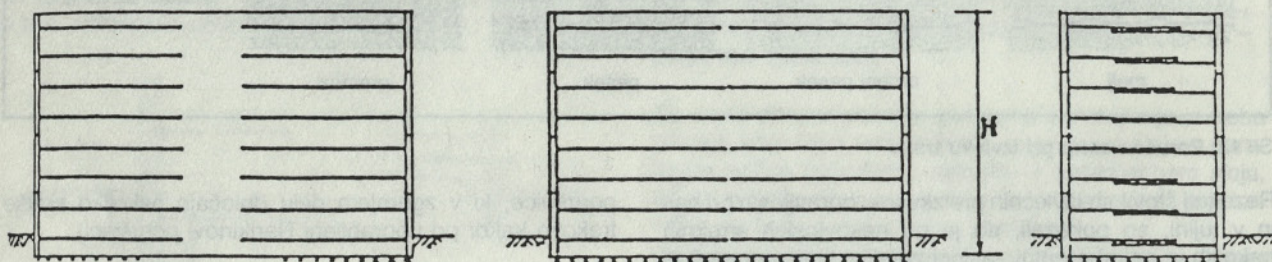
Sl. 15. Analiza stabilnosti s krožno porušnico

podporna konstrukcija iz armirane zemljine, narejena tako, da je posamezna plast zemljine ovita z geotekstilom.



Sl. 18. Shema armiranja z geotekstilom

Za višje podporne konstrukcije se v svetu uporablja izpopolnjena tehnika vgrajevanja zemljine z nekonstrukcijsko armaturo. Ta armatura nam omogoči samo lepšo

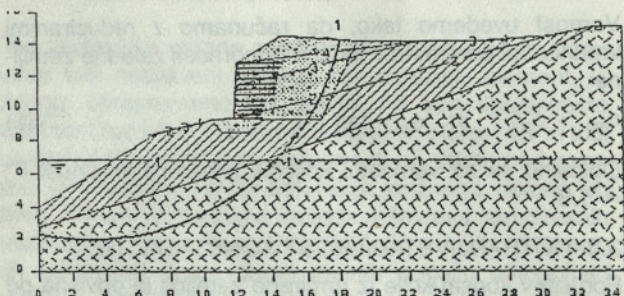


Sl. 16. Shematični prikazu raznih vrst dvojnih podp. konst. iz arm. zemljine

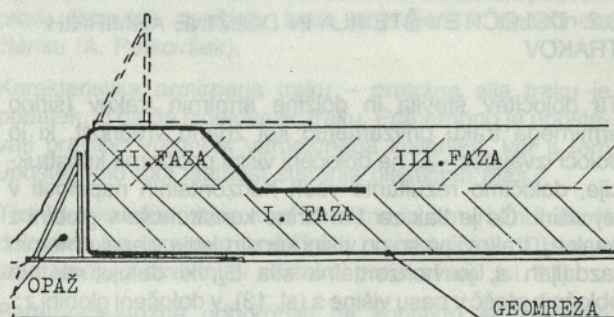
izvedbo zunanje brežine. Vgrajevanje je razdeljeno v tri faze, ki so shematično prikazane na sl. 19.

3.4. ANALIZA STABILNOSTI

Ko so opravljene vse analize stabilnosti podporne konstrukcije iz armirane zemljine, je treba preizkusiti stabilnost brežine z novo konstrukcijo, npr. s programom BISHOP (B. Majes). Primer takšne analize je podan na sliki 17.



Sl. 17. Celotna analiza stabilnosti



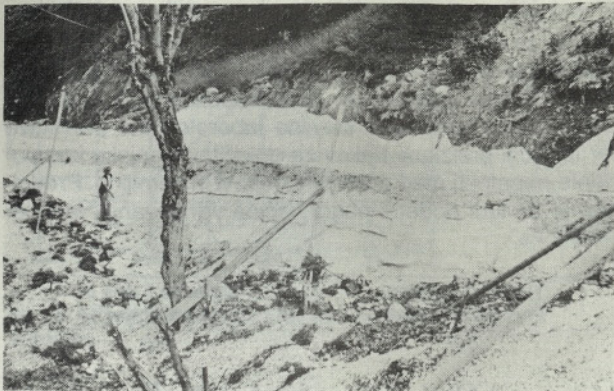
Sl. 19. Shematični prikaz posameznih faz vgrajevanja

4. OPIS NEKATERIH NAREJENIH KONSTRUKCIJ

4.1. PODPORNNA KONSTRUKCIJA, NAREJENA Z GEOTEKSTILOM

Tehnika gradnje nasipov, armiranih z geotekstilom oziroma geomrežami, je danes v svetu zelo izpopolnjena in zaradi dobrih trdnostnih karakteristik geotekstila se gradijo armirani nasipi do višine 20 m z vertikalno čelno ploskvijo. Za nasipni material se lahko uporabljata nekoherentna in koherentna zemljina. Na sliki 18 je shematsko prikazana

Na sliki 20 je prikazan na nasip, utrjen z geotekstilom. Nasip višine 3 m ter dolžine 30 m je narejen na gozdni poti k vstopnemu jašku za Karavanški predor (1979). Zasipni material je flišna preperina, katere parametra strižne odpornosti sta: $\phi = 18^\circ$ in kohezija $c = 45 \text{ kPa}$. Nagib zunanje brežine nasipa je 80° . Armirani nasip je zgrajen na 4 m debeli plasti flišne preperine, ki je bila za gradnjo klasičnega podpornega zidu neprimerna. Nasip je bil zgrajen v 6 urah. Zunanja plast brežine je zaščitena pred ultravijoličnimi žarki s plastično folijo ter humusnim zasutjem, v katerega je zasajeno grmičevje. Meritve na dokončanem nasipu niso bile opravljene, vendar vidnejših defrmacij ni opaziti.

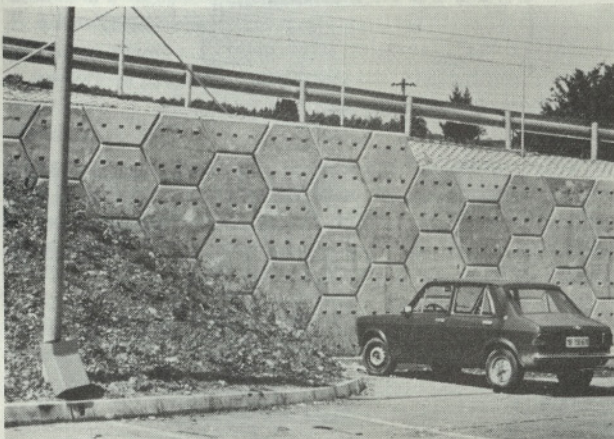


Sl. 20. Gradnja nasipa z 0,5 m debelo plastjo zgornjega ustroja

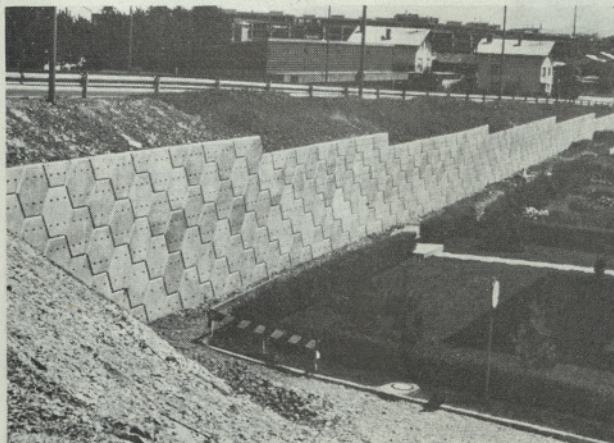
4.2. PODPORNNA KONSTRUKCIJA, Z OBLOŽNIMI ARMIRANOBETONSKIMI PLOŠČAMI TER ARMIRNIMI TRAKOVI IZ POLIESTRSKEGA LAMINATA

– Leta 1980 je bila zgrajena podporna konstrukcija iz armirane zemljine za priključni nasip zahodne obvoznice Podutik–Ljubljana (slika 21). Nasip je dolg 30 m ter na najvišjem mestu visok 5,5 m in do višine 4 m izdelan iz armirane zemljine. Klasična podporna konstrukcija (armiranobetonski podporni zid) bi morala biti natem mestu temeljena na približno 15 m globokih pilotih zaradi plasti barjanskih tal. Podporna konstrukcija iz armirane zemljine je narejena neposredno na površini terena.

Shematični prerez konstrukcije je podan na sliki 3.



Sl. 21. Priključni nasip – Podutik

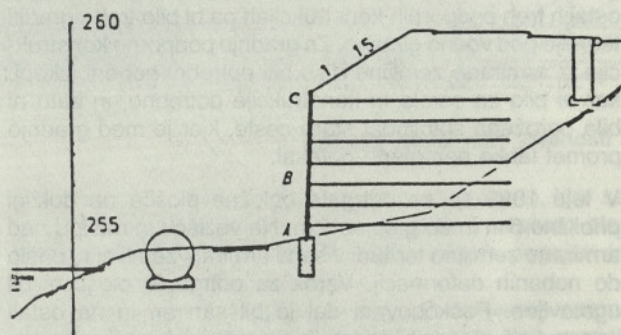


Sl. 22. Priključni nasip – Šentilj

Na konstrukciji je bilo vgrajenih 52 merskih točk, na katerih so se v določenih časovnih intervalih merili horizontalni premiki, in to od oktobra 1980 do junija 1981, ko je bila konstrukcija obremenjena z zelo težkim in gostim prometom – pred izročitvijo rednemu prometu novembra 1981 je namreč rabila za gradnjo mostu kot nadvoz. Maksimalni izmerjeni horizontalni premiki so bili od 3 do 12 mm, ki se po enem letu niso več povečevali in jih je verjetno povzročilo naleganje trakov v plošče.

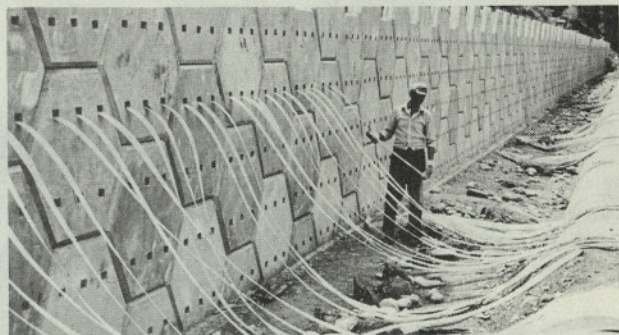
– Maja 1981 je bila za mejni prehod v Šentilju narejena 120 m dolga podporna konstrukcija iz armirane zemljine, katere maksimalna višina je 3,5 m. Nasip je bil zgrajen v treh dneh (slika 22). Meritve na tem zidu niso bile opravljene, vendar še danes ni opaziti nobenih premikov.

– Konstrukcija iz armirane zemljine za Pobreško cesto v Mariboru je bila izbrana kot najcenejša ter najugodnejša različica. Kakor je razvidno iz karakterističnega prereza, s slike 23, je podporna konstrukcija zgrajena na bregu reke Drave, tik ob njej pa je kolektor.

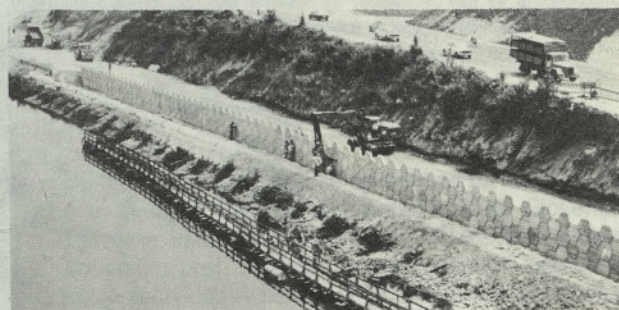


Sl. 23. Karakteristični prerez

Dolžina celotne konstrukcije je približno 180 m, največja višina nasipa 6 m, ki je do višine 4 m grajena iz armirane zemljine. Na slikah 24 in 25 je prikazana konstrukcija med gradnjo, ki je bila končana septembra leta 1981.



Sl. 24. Vlaganje armirnih trakov



Sl. 25. Gradbišče Pobreške ceste

Vgrajenih je bilo 42 merskih točk, horizontalni premiki po enem letu so bili med -15 in $+19$ mm v nivoju A, med -6 in $+8$ mm v nivoju B, med -19 in $+25$ mm v nivoju C (slika 23). Kasneje se pomiki niso več večali. Tudi ti premiki so nastali zaradi naleganja plošč oziroma trakov. Za karakteristični profil, prikazan na sliki 23, je bila izdelana tudi ekonomska primerjava za štiri različne podporne konstrukcije. Rezultati so podani v preglednici 1.

je prikazan v tretjem poglavju, ne zadostuje. Za 3,5 m visoko in 186 m dolgo podporno konstrukcijo cestnega nasipa za servisno cesto ob avtocesti Koper-Izola (sl. 26), ki je bila zgrajena iz glinasto-peščenega melja (sl. 28), so bile opravljene številne laboratorijske preiskave ter izvlečni preizkusi trakov za določitev trenjske komponente napetosti med armirnimi trakovi in zemljino. Predpisan je bil tudi dodatni pogoj načina vgrajevanja, in sicer

Preglednica 1:

Podporna konstrukcija	Potrebna višina konstrukcije (m)	Cena za 1 dol. m konstrukcije (%)
Armiranobetonski podporni zid	4,8	100
Armiranobetonska plošča z vmesnimi sidranimi piloti	4,0	72
Dvojne kašte	6,2	88
Armirana zemljina	3,5	54

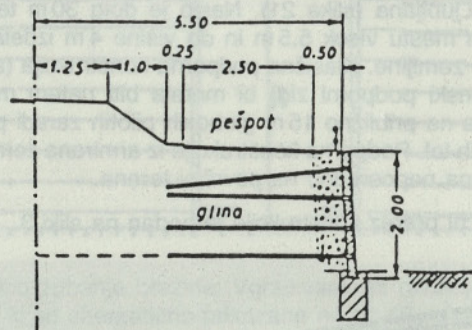
Pri ekonomskem prikazu niso upoštevane izvedbene prednosti armirane zemljine, to je mnogo krajši čas gradnje; vse delo je potekalo nad nivojem reke Drave, pri ostalih treh podpornih konstrukcijah pa bi bilo treba graditi temelje pod vodno gladino. Za gradnjo podporne konstrukcije iz armirane zemljine niso bili potrebni nobeni izkopi, kar bi bilo za ostale tri konstrukcije potrebno, in zato ni bila ogrožena stabilnost stare ceste, kjer je med gradnjo promet lahko nemoteno potekal.

V letu 1989 so se odtrgale obložne plošče na dolžini približno 5 m in do globine 2 m. Na vozišču in nasipu nad armirano zemljino ter tudi v sami armirani zemljini ni prišlo do nobenih deformacij. Vzrok za odtrganje plošč ni bil ugotovljen. Poškodovani del je bil saniran in na ostali konstrukciji ni vidnih dodatnih premikov ali poškodb.

Prikazane so le tri od vseh doslej narejenih podpornih konstrukcij (Šmartinska cesta I. 1981, Brdo I. 1984, obvoznica Maribor I. 1988/89, gozdne ceste na Gorenjskem I. 1986 in druge), ker so vse ostale izdelane iz enakih konstrukcijskih elementov in dimenzionirane na enak način, kakor je podano v poglavju 3.

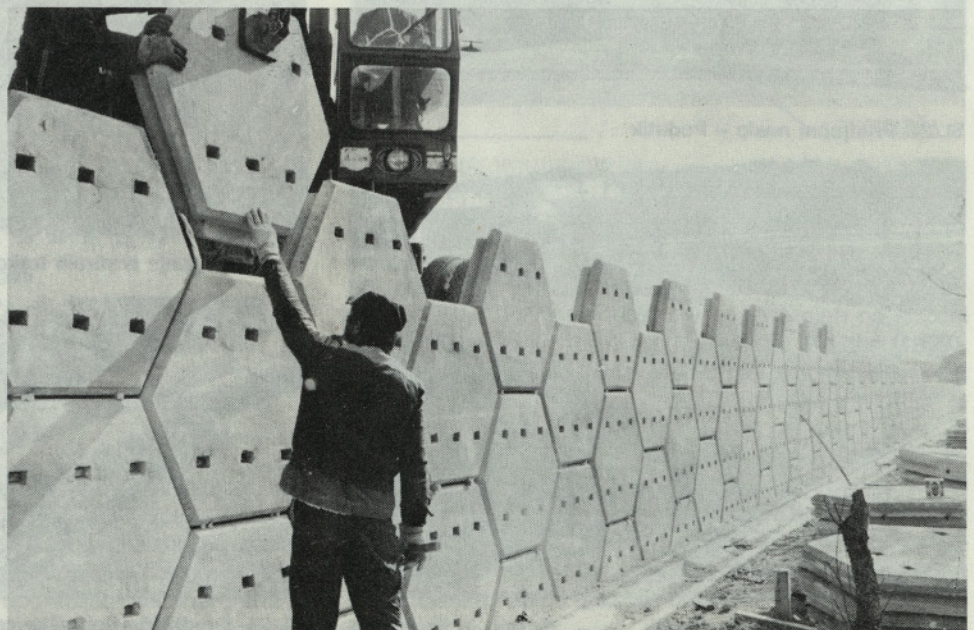
– Pri koherentni zasipni zemljini računski model za dimenzioniranje podporne konstrukcije iz armirane zemljine, kot

vlažnost zasipne koherentne zemljine se ne sme povečati. Za doseganje tega pogoja je bil izdelan vertikalni in horizontalni drenažni tampon ter zelo skrbno izdelana asfaltna površina vozišča (sl. 27).

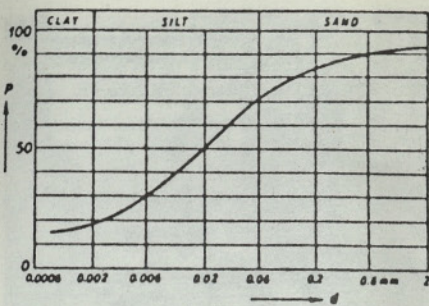


Sl. 27. Karakteristični prerez

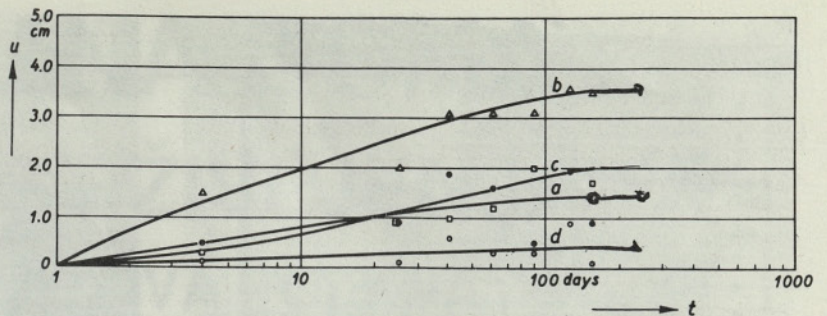
V šestih vertikalnih prerezih so bila postavljena merska mesta; horizontalni pomiki obložnih plošč so se merili med gradnjo in leto dni po njej. Na sl. 29 je prikazan časovni potek horizontalnih pomikov za en prerez v točkah po višini 1 m, 2 m, 3 m in 3,5 m.



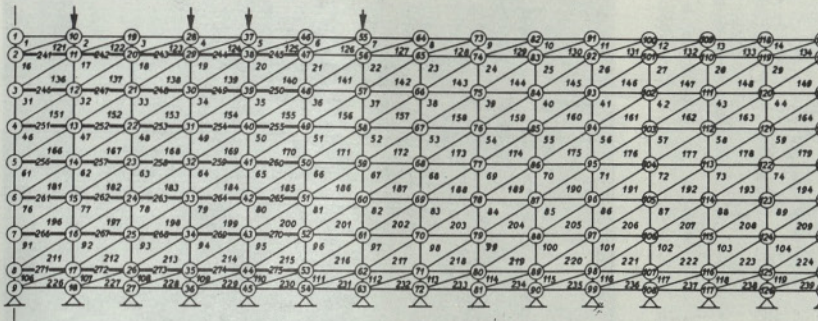
Sl. 26. Pogled na nasip



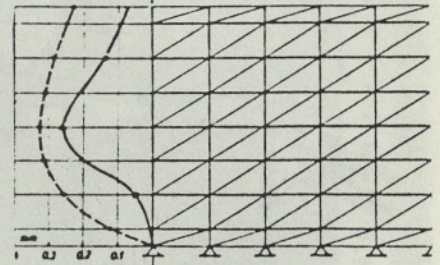
Sl. 28. Granulometrijska krivulja zasipne zemljine



Sl. 29. Časovni razvoj horizontalnih pomikov obložnih plošč



Sl. 30. Mreža končnih elementov



Sl. 31. Primerjava rač. in mer. vrednosti

Merjene vrednosti napetosti in pomikov so bile primerjane z računskimi, pri katerih je bila armirana zemljina upoštevana kot sestavljeno hipoelastično telo s Coulomb-Mohrovo porušitveno ovojnico. Numerična analiza je bila izdelana z uporabo metode končnih elementov (program B. Majes). Armiran nasip (ravninsko deformacijsko stanje) je bil razdeljen v kompatibilno mrežo trikotnih elementov s šestimi prostorskimi stopnjami za zemljino in v linijske elemente s štirimi prostorskimi stopnjami za armirne trakove (sl. 30).

Na sl. 31 je prikazana primerjava izračunanih horizontalnih pomikov ter izmerjenih končnih pomikov obložnih plošč.

Iz primerjave rezultatov, s sl. 31, primerjave ostalih merjenih vrednosti napetosti na trakovih ter izračunanih vrednosti, vidimo, da se z opisano metodo lahko ustrezno določi obnašanje armirane zemljine tudi pri koherentni zemljini, vendar pa so potrebne dobre predhodne laboratorijske preiskave zemljine, zemljine in armirnih trakov, potrebni pa so tudi posebni pogoji vgrajevanja.

5. SKLEPI

Izkušnje v zvezi s konstrukcijami iz armirane zemljine po svetu in pri nas v Sloveniji, pridobljene s poizkusi v laboratoriju, meritvami in opazovanji na narejenih konstrukcijah ter na modelnih preiskavah, nam kažejo:

- uporaba podpornih konstrukcij iz armirane zemljine, armirani nasipi oziroma armirana zemljina, je v gradnji cest uspešna in ekonomska;

- za računsko analizo armiranja nekoherentne zemljine zadoščajo postopki, prikazani v tretjem poglavju, ki se nanašajo na napetostna stanja v zemljini, dobljena po metodi mejnega ravnovesja z uporabo potencialnih porušnic;

- pri analizi armiranja koherentne zemljine je treba opraviti laboratorijske preiskave zasipne zemljine, sodelovanje armirnega materiala in zemljine ter izdelati računsko analizo z uporabo metode končnih elementov (važen je

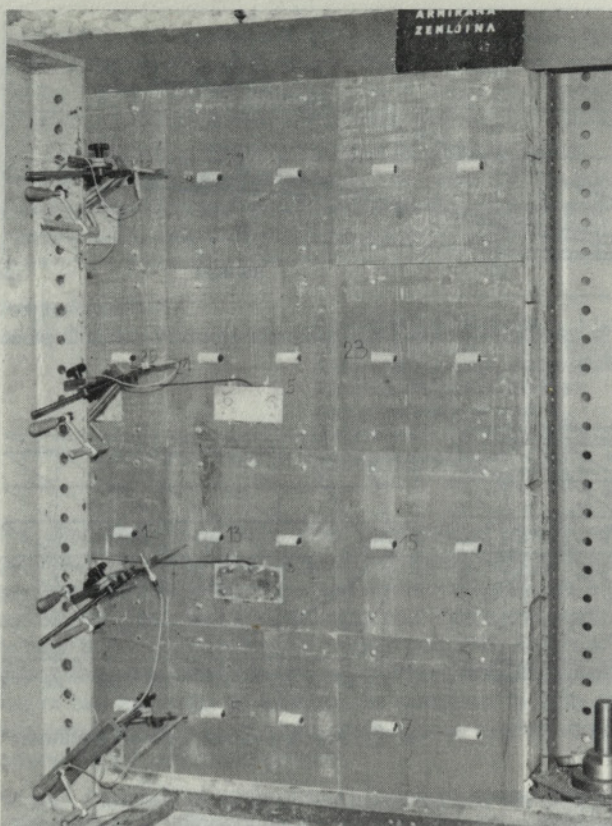
vpliv privzete vrednosti Poissonovega količnika ν), kjer se upošteva izpolnitev ravnovesnih pogojev v vsakem elementu konstrukcije ob upoštevanju mejnih pogojev in reoloških odvisnosti materialov;

- nadaljnji razvoj armirane zemljine je usmerjen v uporabo podpornih konstrukcij iz te zemljine pri gradnji železnic, zato je treba določiti vpliv dinamične obremenitve na celotno konstrukcijo ter na armirne elemente. Prva preiskava iz serije modelnih laboratorijskih preiskav, ki se izvajajo v okviru magistrske naloge (B. Prokop) ter raziskovalne naloge ZRMK in ŽGS, je že opravljena in rezultati te preiskave so izredno spodbudni. Na sliki 32 je prikazan model za meritve napetosti in deformacij v armirani zemljini pri dinamični obrnenitvi (merilo modela 1:1). Na sliki 33 so odstranjene obložne plošče, tako da so vidni armirni trakovi. Obremenjevanje s statično in z dinamično obtežbo se je nadaljevalo in kljub velikim dodatnim obremenitvam ni prišlo do porušitve. Med obremenjevanjem so se merile napetosti v armirnih trakovih. Na podlagi teh rezultatov, ki so sicer maloštevilni, so pa v skladu z tujimi izkušnjami, se bodo lahko določili parametri fizikalne odpornosti armirane zemljine ter pripravljen predlog projekta podpornih konstrukcij iz armirane zemljine za drugi tir železniške proge proti Jesenicam.

- druga smer razvoja armirane zemljine je poleg izboljšanja kakovosti armiranih trakov tudi uporaba geotekstila oziroma geomrež za armiranje nasipov, kar bi omogočilo, da bi se težke armiranobetonske obložne plošče nadomestile z lahkimi in oblikovno primernejšimi oblogami.

6. ZAHVALA

Vse študije in raziskave so bile opravljene na FAGG–Univerza v Ljubljani ob finančni pomoči RSC Slovenije, Raziskovalne Skupnosti Slovenije in ZRMK. Zahvaljujem se akademiku prof. Šukljetu za neprecenljivo pomoč in napotke v vseh letih raziskav ter Dr. Majesu za dolgoletno sodelovanje.



Sl. 32. Laboratorijski model armirane zemljine

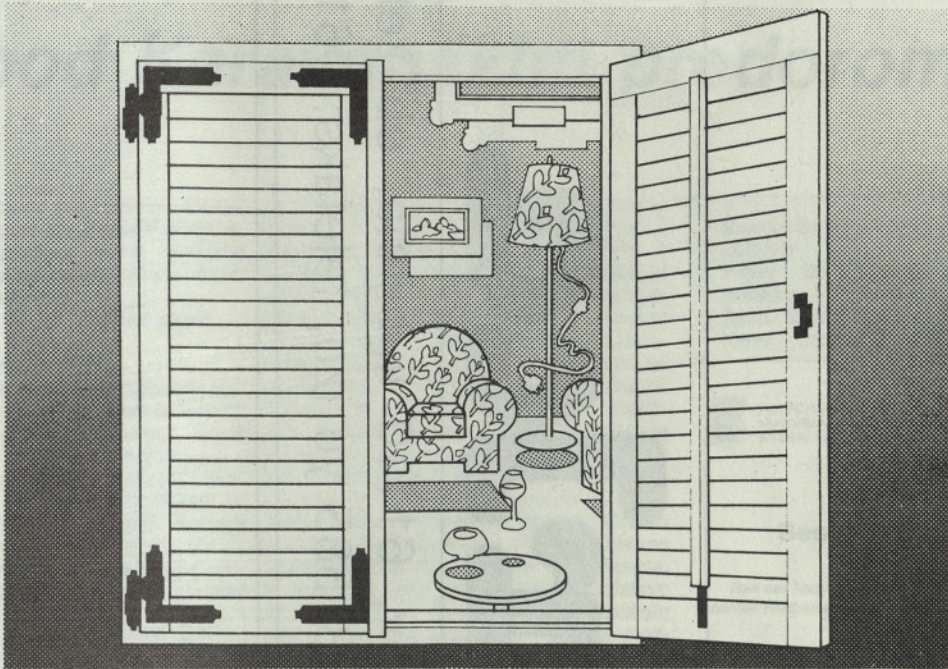


Sl. 33. Model z odstranimi obloznimi ploščami

LITERATURA

1. Amar et all. (1979). Le opere in terra armata, raccomandazioni e norme. LPCP, 1-245, Paris.
2. Barksdale, R., Robnett, Q., Lai, J. and Zeevart Wolff, Al (1982). Experimental and theoretical behavior of geotextile reinforced aggregate soil systems. Second international Conference on Geotextiles, 375-380, Las Vegas.
3. Battelino, D. Poročila o raziskovalnih nalogah FAGG - 1979, 1980, 1981, 1982, 1983, 1984, 1985, Ljubljana.
4. Battelino, D. (1981), Prve izkušnje z armirano zemljino v Sloveniji. XV. Savetovanje JDMF, 209-220, Ohrid.
5. Battelino, D., Vilhar, M., Žmavc, J. (1981). Armiranje zemljin, 1-31, Ljubljana.
6. Battelino, D. (1982), Armirana zemljina pri gradnji cest. Strokovno posvetovanje, 33-62, Ljubljana.
7. Battelino, D. (1983). Some experience in reinforced cohesive earth. VIII. European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Helsinki, Vol. 2, 463-468.
8. Battelino, D. (1983). Dimensioning methods for soil reinforcement. VIII. European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Helsinki, Vol. 3, 1190-1191.
9. Battelino, D. (1984). Armirana zemljina. Raziskovalna naloga, 1-26, Ljubljana.
10. Battelino, D. (1986), Vpliv armiranja na nosilnost stabilnostnih temeljnih tal, XVI. Savetovanje JDMF, Arandelovac, 171-180.
11. Boutrup, E., and Holtz, R. D. (1983), Analysis of embankments on soft ground reinforced with geotextiles. Proc. 8th Eur. Conf. Soil Mech. Found. Engg, (2), 469-472, Helsinki.
12. Brown, B. S., and Poulos, H. G. (1981), Analysis of foundations on reinforced soil. Proc. 10th ICSMFE, (3), 595-598, Stockholm.
13. Eggstad, A. (1983). Improvement of cohesive soils. State-of-the-art report. Proc. 8th Eur. Conf. Soil Mech. Found. Engg, (3), 991-1007, Helsinki.
14. General Reports, State-of-the-art Reports, Lectures, X. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering; Stockholm.
15. Ingold, T. S. (1982). Reinforced Earth, FAGG London.
16. Majes, B. (1982). Analiza konstrukcij iz armirane zemljine po metodi končnih elementov, FAGG Ljubljana, 40 str.
17. Majes, B., Battelino, D. (1985), Effect of Surface reinforcing of soft soils. Proc. of the Eleventh International Conference on soil mechanics and foundation engineering, 1729-1734, San Francisco.
18. Miguel, A. Rodriguez-Miranda, Jose M. Villaroel. (1984), Fondazioni di una struttura su terreni coesivi teneri eseguite con la tecnica della terra armata, Le Strade, LXXXVI.
19. Mitchell, J. K., and Katti, R. K. (1981). Soil improvement - General report (preliminary) 10th ICSMFE, General Reports, State-of-the-art Reports, Lectures, 163-171, Stockholm.
20. Schlosser, F., Jacobsen, H. M., Juran, I. (1983). Soil reinforcement. General report. Proc. 8th Eur. Conf. Soil Mech. Found. Engg, (3), 1159-1180, Helsinki.
21. Šuklje, L. (1980). Rheological relationships for soils. Research report, FAGG Ljubljana.
22. Tchong, Y. (1957). Fondations superficielles en milieu stratifie. Proc 4th ICSMFE, (1), 4490452, London.
23. Vidal, H. (1972). Reinforced Earth. Annales de l'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics, Paris.

TOPLINA DOMA RADOST ŽIVLJENJA GN GIBLJIVA POLKNA



NOVA, SODOBNA REŠITEV KOTNIH VEZI, KI JE V SKLADU Z ZAHODNO EVROPSKIMI STANDARDI, ŠČITI POLKNA PRED SONCEM IN DEŽJEM.

V naši bogati izbiri izdelkov stavbnega pohištva boste našli še:

- termoizolacijska okna, izolacijske omarice z roletno, komarnike
- sobna, vhodna in garažna vrata, okvirje za nadsvetlobo in stransko svetlobo.

OBIŠČITE NAS IN SE PREPRIČAJTE

Industrija stavbnega pohištva
61310 Ribnica, Partizanska 3

telefon: (061) 861-411
telegram: inles - Ribnica
telex: 31-262 inles Yu
telefax: (061) 861-603



NAŠA PRODAJNA SKLADIŠČA
61310 Ribnica; Kolodvorska 22, tel. (061) 861-212
51213 Jurdani - Opatija, tel. (051) 741-330

in v vseh trgovinah z gradbenim materialom
Slovenijales in v vseh večjih trgovinah z gradbenim
materialom po vsej Jugoslaviji

izolirka

industrija izolacijskih materialov, 61110 ljubljana, ob železnici 18
telefon: 061/443-096, teleks: 31585 yu izo, telefaks: 061/445-182

Mejno kontrolni plato Hrušica pod Karavanškim predorom

Mejni plato Hrušica po svoji funkciji zahteva velike pokrite in dobro prežračene površine, na katerih se opravljajo mejno kontrolne dejavnosti. Po funkciji ločimo tri samostojne nadstreške, ki prekrivajo

– jugoslovansko mejno kontrolni objekt

– avstrijski

– objekt cestninske postaje

Zaradi potrebe po velikih funkcionalnih razponih so nadstreški projektirani iz lesenih lepljenih konstrukcijskih elementov. Vzrok za izbiro lesa kot osnovnega materiala je v njegovi majhni lastni teži, ki omogoča premostitev velikih razponov in racionalno izrabo materiala. Zelo pomemben element pri izbiri lesa za konstrukcijo nadstreška pa je tudi izredni estetski izgled lesenih lepljenih elementov, ki dajejo objektom v celoti reprezentančni videz. Les je tudi zelo primeren zaradi lokacije, saj plato leži na enem izmed lepših predelov Slovenije, kjer je les osnovni naravni material in se v to okolje najbolje vklaplja.

pa 9 m. Danes je to največji sklop objektov prekritih z leseno lepljeno konstrukcijo v Jugoslaviji. Lepljene lesene elemente, v katerih je vgrajeno preko 2000 m² lesa, je izdelala Hoja iz Ljubljane. Znanje, organizacija in kvalitetno izdelani projekti so omogočili hitro pripravo, izdelavo in montažo konstrukcij. Kvalitetno lepljene konstrukcije so potrdili tudi na ZRMK, kjer so s poskusi dokazali, da je dosežen po predpisih zahtevani varnostni faktor. Hoja izdeluje lesene lepljene konstrukcije že 20 let. Svojo kvaliteto dokazujemo s preiskavami v lastnem laboratoriju, preizkusi vzorcev na TDC Zagreb in rezultati poskusnih obremenitev do porušitve ZRMK Ljubljana. Prav tako imamo licenco B Otto Graf inštituta iz Stuttgarta, ki dokazuje našo sposobnost za izdelavo lesenih lepljenih konstrukcij v evropskem merilu. Priznana kvaliteta in najširša možnost uporabe teh konstrukcij narekuje čedalje večjo proizvodnjo teh izdelkov tako za domače tržišče kot tudi za izvoz, ki se v zadnjih letih čedalje bolj povečuje. Prednosti, zaradi katerih se investitorji odločajo za naše izdelke, so pred ostalimi konstrukcijami naslednje:

– estetska prednost lesa je naraven material in zaradi tega vizualno človeku najpri-
vlačnejši;

– ognjeodpornost je zaradi masivnih presekov dokazana na mnogih inštitutih. Majhna toplotna prevodnost in nastanek zogle-
nele plasti na površini lesa preprečuje do-
stop kisiku, ki je pogoj za proces gorenja. Enakovredni leseni preseki so zato bolj
ognjeodporni kot AB ali jekleni;

– majhna specifična teža omogoča grad-
njo na slabo nosilnih tleh, podporne kon-
strukcije pa so lahko manjših presekov
(temelji, stebri);

– k ne potrebujejo vzdrževanja in so zato
cenejše v eksploataciji;

– odpornost pri uporabi v agrarnih klimah
je zelo dobrodošla, predvsem pri hlevih in
termalnih bazenih.

Zaradi priznane kvalitete naših izdelkov, velike možnosti arhitektonskega oblikovanja in navedenih uporabnih prednosti zgradimo vsako leto veliko objektov – športne dvorane, bazene, hleve, šole, salone, restavracije, razne industrijske objekte... Naši strokovnjaki z dolgoletnimi izkušnjami so vam na razpolago pri oblikovanju objektov, izdelavi statičnega računa, izvedbi in montaži. Pokličite nas.

Izvajalec lesne lepljene konstrukcije – Hoja
Ljubljana
Projekt – Slovenijaprojekt Ljubljana
arhitektura – Bizjak Drago, dipl. ing. arh.
Tarbuh Branko, dipl. arch. teh.
statika – Omahen Feliks, dipl. ing. gr.



FORSCHUNGS- UND
MATERIALPRÜFUNGSANSTALT
BADEN-WÜRTTEMBERG - OTTO-GRAF-INSTITUT -

Bescheinigung B

über den Nachweis der Eignung zum Leimen von
tragenden Holzbauteilen gemäß DIN 1052, Abschnitt 11. 5. 1.

Der Firma HOJA, Fedelava lesa
Langusova 8
YU - 61000 Ljubljana

wird für Ihren Betrieb in Ljubljana
nach Überprüfung des Fachpersonals und der Werkseinrichtung die Eignung bescheinigt

zum Leimen von einfachen tragenden Holzbauteilen nach
DIN 1052 (z. B. Balken und Träger mit Stützweiten bis
12 m, Dreigelenkbinder bis 15 m Spannweite, einhöftige
Binder mit einer Abwicklungslänge bis 12 m)

Diese Bescheinigung gilt unter den umeitig genannten Bedingungen bis zum

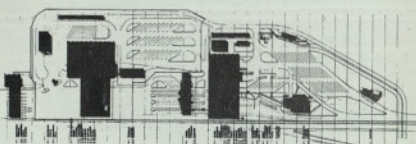
31. März 1994

Stuttgart, den 31.03.1989

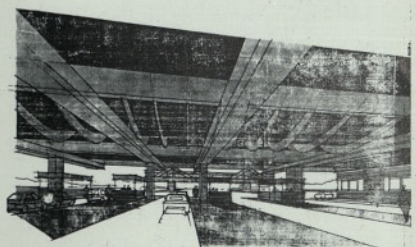


Der Direktor
I. A.

Manns
Prof. Dr. Ing. Manns



MEJNO KONTROLNI PLATO
HRSUŠICA
1 : 500



MEJNO KONTROLNI OBJEKT JUGOSLAVIJA S NADSTREŠKOM
PERSPEKTIVA

Skupna površina vseh nadstreškov na mejnem platuju Hrušica znaša 16.000 m². Največji razpon nosilcev je 22 m, največji previs

hoja
predelava lesa
ljubljana
langusova 8

Ljubljana, Langusova 8 Tel. 262-671 Telex
31-150 Telefax 061 262-882



Mejni plato karavanškega predora Hrušica



Gimnastična dvorana Šiška