

Štete na sustavima opločenja armiranobetonskih elemenata

Vesna Lacković, Mira Matošević, Ivan Turčić

Ključne riječi

armiranobetonski element, kameno opločenje, mramorna ploča, ispitivanja "in situ", laboratorijska ispitivanja, proračun

Key words

reinforced-concrete element, stone paving, marble slab, in situ testing, laboratory testing, analysis

Mots clés

élément en béton armé, carrelage en pierre, carreau de marbre, essais in situ, essais en laboratoire, calcul

Ключевые слова

железобетонный элемент, каменная облицовка, мраморная плита, полевые испытания, лабораторные испытания, расчёт

Schlüsselworte:

Stahlbetonbauteil, Steinverkleidung, Marmortafel, Untersuchungen "in situ", Laboruntersuchungen, Berechnung

V. Lacković, M. Matošević, I. Turčić

Stručni rad

Štete na sustavima opločenja armiranobetonskih elemenata

Opisani su uzroci oštećenja koja nastaju na kamenom opločenju unutarnjih površina armiranobetonskih elemenata građevina. Analizirana su kamena opločenja mramornim pločicama iz nalazišta Carrara. Prikazana su ispitivanja "in situ" i laboratorijska ispitivanja. Provedene su i proračunske analize oštećenja. U zaključku se upozorava na utjecaje o kojima treba voditi računa pri projektiranju i izvedbi vanjskih i unutarnjih kamenih oblaganja ploha armiranobetonskih nosivih elemenata.

V. Lacković, M. Matošević, I. Turčić

Professional paper

Damage to paving systems for reinforced-concrete elements

Causes of damage to stone facing of the interior surfaces of reinforced-concrete elements of buildings are described. Stone facing consisting of marble slabs from the Carrara deposit is described. Relevant in situ and laboratory tests are presented. Damage analyses are described. In conclusion, authors define influences that must be taken into account during the design and realization of exterior and interior stone facing systems that are used for cladding reinforced concrete load bearing elements.

V. Lacković, M. Matošević, I. Turčić

Ouvrage professionnel

Dégradation des systèmes de carrelage des éléments en béton armé

L'article décrit les dégradations des carrelages en pierre des surfaces intérieures des éléments en béton armé des bâtiments. Les carreaux de marbre de Carrare ont été analysés. Les essais in situ et en laboratoires sont présentés. On a effectué également les analyses de calcul des endommagements. En conclusion, on souligne les impacts dont il faudrait tenir compte lors de l'établissement de l'étude et de l'exécution des revêtements en pierre extérieurs et intérieurs des éléments porteurs en béton armé.

Лацкович, Матошевич, И. Турчич

Отраслевая работа

Ущербы на системах плиточной облицовки железобетонных элементов

В работе описаны причины повреждений, возникающих на каменной облицовке внутренних поверхностей железобетонных элементов зданий. Анализированы каменные облицовки мраморными плитками из месторождения карьера. Каррара. Показаны полевые испытания ("in situ") и лабораторные испытания. Проведены и расчётные анализы повреждений. В заключении предупреждается о влияниях, которые необходимо учитывать при проектировании и возведении наружных и внутренних облицовок поверхностей железобетонных несущих элементов.

V. Lacković, M. Matošević, I. Turčić

Fachbericht

Schäden an Verkleidungssystemen für Stahlbetonbauteile

Beschrieben sind die Ursachen der Beschädigungen die an der Steinverkleidung innerer Oberflächen von Stahlbetonbauteilen entstehen. Analysiert sind Steinverkleidungen mit Marmortafeln aus dem Steinbruch Carrara. Dargestellt sind Untersuchungen "in situ" und Laboruntersuchungen. Es wurden auch rechnerische Analysen der Beschädigungen durchgeführt. Im Schluss wird auf die Einflüsse hingewiesen die man bei Entwurf und Ausführung äusserer und innerer Steinverkleidungen der Flächen von Tragelementen aus Stahlbeton beachten soll.

Autori: **Vesna Lacković**, dipl. ing. fiz.; **Mira Matošević**, dipl. ing. građ., Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb; **Ivan Turčić**, dipl. ing. građ., Ministarstvo prostornog uređenja i zaštite okoliša RH, Zagreb

1 Uvod

Oštećenja na kamenim oblogama armiranobetonskih konstruktivnih elemenata izražena su na pročeljima građevina, osobito u krajevima s vrućim ljetima i ostrim zimama. Navedena oštećenja (otpadanje i lokalno drobljenje kamenih ploča) su detaljno i u više navrata opisivana u stručnoj literaturi i relativno su poznata.

Međutim, praksa je pokazala da se oštećenja mogu pojaviti i na unutrašnjim armirano betonskim zidovima i stropovima s kamenim opločenjem. Budući da se problem unutrašnjeg opločenja najčešće zanemaruje i prepušta izvođaču radova (kamenopolagaču), da sam riješi problem izvedbe opločenja, nije čudno da utjecaji kao što su dodatna naprezanja od puzanja podloge, (armiranobetonskih elemenata) i utjecaji temperaturnih deformacija rezultiraju spomenutim oštećenjima.



Slika 1. Karakteristična oštećenja kamenog opločenja

Analiza oštećenja odnosi se na primjer elemenata unutrašnjeg opločenja zidova i stropova građevine *Croatialinea* u Rijeci, gdje se vizualnim pregledom utvrdilo mjestimično "šuštanje" ili otpadanje većih dijelova kamenih pločica. Opločenje je bilo izvedeno od pločica rezanih od bijeloga mramora iz nalazišta *Carrara*, debljine 8 mm. Reške između pločica nisu bile izvedene. Kamene pločice na vertikalne zidove i stropove bile su lijepljene ljepilom za keramičke pločice. Na mjestima gdje su kamene pločice otpale, vidjelo se da je ljepilo nanoseno nazubljenom lopaticom (tehnologijom nanošenja keramičkih pločica), te da je prionljivost ljepila veća na podlozi nego na pločicama.

Iz razloga što boljeg uvida u konstruktivni sustav građevine i vremenskog tijeka pojedinih radova pregledana je

projektna i izvedbena dokumentacija. Pregledom dokumentacije ustanovljeno je da je građevina skeletna armiranobetonska konstrukcija s krutim armiranobetonskim stubišnim jezgrama. Opisana oštećenja odnose se na dio konstrukcije – armiranobetonske zidove, debljine 20 cm opločene lijepljenim kamenim pločicama, koji se nalaze u stubištima i pretprostorima dizala. Također je utvrđeno da je starost betona na zidu u podrumskoj etaži, u fazi izvedbe kamenog opločenja iznosila 98 dana. Podatak se može primijeniti i za ostale katove pa se temeljem toga može zaključiti da je izvedba kamenog opločenja započela nakon 90-100 dana starosti armirano betonskih elemenata.

Karakteristična oštećenja prikazana su na slici 1.

2 Ispitivanja *in situ*

Jedino moguće provedivo ispitivanje *in situ*, za utvrđivanje uzroka štete na unutrašnjem opločenju armirano betonskih zidova i stropova predmetne građevine, bilo je ispitivanje prionljivosti na vlak sustava kamenog opločenja, pomoću *pull-off* testa (tablica 1.).

Tablica 1. Rezultati ispitivanja čvrstoće prionljivosti metodom *pull-off*

Broj mjernog mjesta	Pozicija mjernog mjesta	Sila čupanja [kN]	Čvrstoća prionljivosti [N/mm ²]
1.	stropno opločenje ispred strojarnice 7. kat	1,35	0,135
2.	opločenje zida kod strojarnice, istok	0,00	0,000
3.	pregradna stijena od siporexa 6. kat	6,00	0,600
4.	stubište prema atriju između 3. i 4. kata	0,00	0,000
5.	opločenje zida na koti 0,0 predprostor dizala	1,60	0,160
6.	opločenje zida kod dizala razina	0,00	0,000

Pull-off test proveden je prema EN 1015-12:2000, pomoću testera "PROCEQ SA-Dyna Z 15" No. 1366, Switzerland. Izabrana mjesta su bila ona na kojima kameno opločenje nije pokazivalo znakove vrlo niske prionljivosti, tzv. "šuštanja". Vidljivo je iz tablice da je na tako odabranim mjernim mjestima većina rezultata ispitivanja bila izvan mjernog područja aparata. To su bila sva mjerna mjesta na kojima je čvrstoća prionljivosti bila jednaka 0,00.

3 Ispitivanja u laboratoriju

S obzirom na to da je na građevini nađeno mnogo otpalih kamenih pločica, one su iskorištene za provedbu ispitivanja u laboratoriju.

3.1 Ispitivanje vodoupojnosti kamenih pločica s građevine

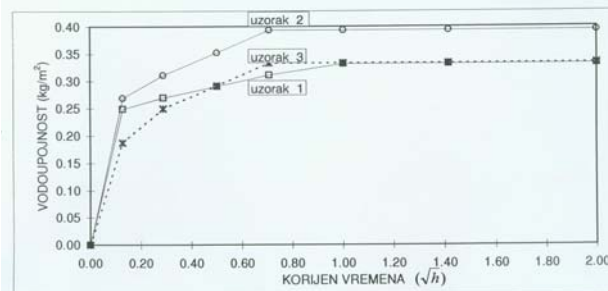
Kapilarna vodoupojnost ispitana je na uzorcima uzetim na građevini, prema normi HRN U.M8.300.:1985., a rezultati ispitivanja nalaze na slici 2.

Na slici 2. u tablici su dani pojedinačni rezultati ispitivanja na tri uzorka u intervalima do 4 sata, a linearna regresija prikazana je na grafikonu.

Kapilarna vodoupojnost pločica ispitana je zbog utjecaja vodoupojnosti pločice na prionljivost pločice u opisanom sustavu (manja vodoupojnost rezultira slabijom penetracijom ljepila u pločicu, odnosno lošijom prionljivošću pločica za podlogu).

UZORAK 1				UZORAK 2				UZORAK 3			
a (cm)	6.95			6.95			6.92				
b (cm)	6.94			6.95			6.95				
P (cm ²)	48.233			48.303			48.094				
vrijeme	m	mv	A	m	mv	A	m	mv	A		
h	(\sqrt{h})	(g)	(kg/m^2)	($\text{kg}/\text{m}^2\sqrt{h}$)	(g)	(kg/m^2)	($\text{kg}/\text{m}^2\sqrt{h}$)	(g)	(kg/m^2)	($\text{kg}/\text{m}^2\sqrt{h}$)	
0.00	0.00	108.80	0.00	108.07	0.00	107.41	0.00	107.57	0.00	107.57	
0.02	0.13	108.92	0.25	1.93	108.20	0.27	2.08	107.50	0.19	1.45	
0.08	0.29	108.93	0.27	0.93	108.22	0.31	1.08	107.53	0.25	0.86	
0.25	0.50	108.94	0.29	0.58	108.24	0.35	0.70	107.55	0.29	0.58	
0.50	0.71	108.95	0.31	0.44	108.26	0.39	0.56	107.57	0.33	0.47	
1.00	1.00	108.96	0.33	0.33	108.26	0.39	0.39	107.57	0.33	0.33	
2.00	1.41	108.96	0.33	0.23	108.26	0.39	0.28	107.57	0.33	0.24	
4.00	2.00	108.96	0.33	0.17	108.26	0.39	0.20	107.57	0.33	0.17	

Srednja vrijednost koeficijenta kapilarnog upijanja vode: A(15 min) = $(0.62 \pm 0.07) \text{ kg}/\text{m}^2\sqrt{h}$
 Srednja vrijednost koeficijenta kapilarnog upijanja vode: A (4 sata) = $(0.18 \pm 0.02) \text{ kg}/\text{m}^2\sqrt{h}$
 Koef. kapil. upijanja vode dobiven regresijom za sva 3 uzorka: A = $(0.12 \pm 0.01) \text{ kg}/\text{m}^2\sqrt{h}$



Slika 2. Rezultati ispitivanja kapilarne vodoupojnosti

3.2 Ispitivanje modula elastičnosti kamenih pločica s građevine

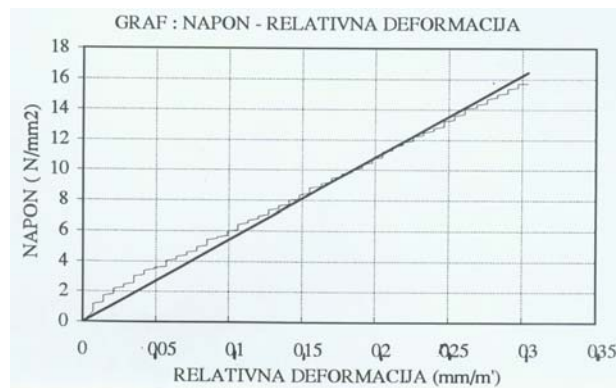
Za potrebe provedbe analize nastalih oštećenja u sustavu kamenog opločenja, odnosno utvrđivanja kompatibilnosti pojedinih materijala, u odnosu na njihova svojstva elastičnosti izmjeren je u laboratoriju modul elastičnosti ugrađenog kamena.

Modul elastičnosti na tlak ispitivan je na modificiranim uzorcima načinjenim iz kamenih pločica s građevine, a metoda ispitivanja je bila prema normi HRN U.M1.025.

Sila i deformacija mjerene su elektronički, a dobiveni podaci su obrađeni na računalu.

Vrijednost modula elastičnosti ispitanog uzorka je $E_k = 5400 \text{ kN}/\text{cm}^2$.

Grafikon napon – relativna deformacija sa pravcem regresije za linearno područje prikazan je na slici 3.



Slika 3. Odnos napona i deformacije

3.3 Ispitivanje koeficijenta toplinske dilatacije ugrađenih kamenih pločica

S obzirom da se radilo o unutrašnjem opločenju, pretpostavljeni temperaturni interval u zatvorenom prostoru mediteranskog područja uoči i nakon sezone grijanja je $12-20^\circ \text{C}$. Ovaj podatak je bio važan za analizu oštećenja i izračun dodatnih napreznja pomoću Dischingero-ve jednadžbe.

Ispitivanje koeficijenta toplinske dilatacije provodilo se prema modificiranoj metodi HRN B.D8.052, a rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 3.

Tablica 3. Rezultati ispitivanja koeficijenta toplinske dilatacije

Oznaka metode	Izmjerena vrijednost koeficijenta toplinske dilatacije α_t [$\text{mm}/^\circ\text{C}$]
A	$(5,08 \pm 1,23) 10^{-6}$
B	$(6,19 \pm 0,59) 10^{-6}$
Srednja vrijednost	$(5,64 \pm 0,91) 10^{-6}$

Ispitivanje je provedeno na tri različita uzorka (različita struktura kamena u pojedinoj pločici), te pomoću dvije modificirane metode mjerenja označene simbolom A i B. Uzorci su bili kondicionirani u klima komori "HERAEUS 4033".

Mjerenje pod oznakom A provodilo se na štapovima izmjera $200 \times 40 \times 8 \text{ mm}$ pomoću komparatora "FORM-TEST" sa mjernom bazom od 200 mm .

Mjerenje pod oznakom B provodilo se na uzorcima izmjera $200 \times 200 \times 8 \text{ mm}$ pomoću mjernog uređaja za keramičke pločice "IMS" sa mjernom bazom 200 mm .

Za izračun posmičnog napona od utjecaja promjene temperature koristila se srednja vrijednost koeficijenta α_t od dvije modificirane metode mjerenja.

4 Računska analiza uzroka nastalog oštećenja

Na osnovi dosadašnjih podataka i spoznaja, provedena je približna računaska analiza utjecaja vremenskih deformacija armiranobetonskih zidova i stropova na nastala oštećenja kamenog opločenja

Vremenske deformacije, nastale zbog puzanja i skupljanja betona procjenjuju se na temelju Dischingerove diferencijalne jednadžbe, uz pretpostavljene koeficijente puzanja i skupljanja prema Pravilniku za beton i armirani beton.

$$\frac{d\varepsilon}{d\varphi} = \frac{1}{E} \left(\frac{d\sigma}{d\varphi} + \sigma \right) + \frac{\varepsilon_{s_\infty}}{\varphi_\infty}$$

Za centrično opterećene elemente

$$\sigma_b = E_b [-n\mu \cdot \varepsilon_b + (1 + n\mu) \cdot \varepsilon_0]$$

gdje je :

$\varepsilon = \varepsilon_b$ - deformacija betona u vremenu t

$\sigma = \sigma_b$ - tlačno naprezanje u betonu u vremenu t

E_b - modul elastičnosti betona

E_a - modul elastičnosti građ. čelika

$$n = \frac{E_a}{E_b}, \quad \eta = \frac{A_a}{A_b}$$

$\varphi = \varphi(t)$ - koeficijent puzanja u vremenu t

$\varphi; \varepsilon_{s_\infty}$ - konačne vrijednosti koeficijenata puzanja i skupljanja

Rješenjem diferencijalne jednadžbe dobijemo odnos deformacije betona u vremenu t prema početnoj deformaciji ε_0 :

$$\frac{\varepsilon(t)}{\varepsilon_0} = \frac{1}{\alpha} \left\{ 1 - (1 - \alpha) \cdot e^{-\alpha\varphi} \right\} + \frac{\varepsilon_{s_\infty}}{\varphi_\infty \cdot \varepsilon_0} \cdot (1 - \alpha) (1 - \alpha^{-\alpha\varphi})$$

$$\alpha = \frac{n \cdot \eta}{1 + n \cdot \eta}$$

Za opisani slučaj i za zid debljine 20 cm, postojeće opterećenje te kvalitetu ugrađenog materijala, možemo izračunati dodatno posmično naprezanje na kontaktu između pločica i zida (u ljepilu):

$N = 250$ kN/m

Beton MB 30

Čelik

$\mu = 0,6\%$

$A_b = 2000$ cm²

$A_a = 12,0$ cm²

$E_b = 3150$ kN/cm²

$E_a = 21000$ kN/cm²

$E_k = 5400$ kN/cm²

Prema PBAB-u $\varphi_\infty = 2,1$; $\varepsilon_\infty = 0,34$

$\alpha = 0,0385$

$$\sigma_0 = \frac{N}{A_b(1 + n \cdot \mu)} = 0,12 \text{ kN/cm}^2$$

$\varepsilon_0 = 0,038$ †₁₀₀

Uvrštavanjem u jednadžbu dobijemo

$$\frac{\varepsilon_\infty}{\varepsilon_0} = 11,204; \quad \varepsilon_t = 0,426$$
 †₁₀₀

Kako je izvedba opločenja započeta nakon približno 100 dana, a zid je imao cca 50% pretpostavljenog opterećenja, možemo usvojiti da je

$$\frac{\varepsilon_{100}}{\varepsilon_\infty} = 30\%; \quad \varepsilon_{100} = 0,128$$
 †₁₀₀

$$\Delta\varepsilon_b = 0,426 - 0,128 = 0,298 \approx 0,30$$
 †₁₀₀

Za visinu etaže od $l = 3$ m i razdoblje od $t = 100$ dana do promatranog vremena

$$\Delta l = 3,0 \cdot 0,3 = 0,90 \text{ mm}$$

Zid je opločen kamenim pločicama debljine $d_k = 8$ mm bez horizontalnih i vertikalnih reški. Uvažavajući Hookeov eksperimentalni zakon i činjenicu da se proračunava sustav dva različita materijala (betonski zid i kameno opločenje), skraćenje betonskog zida debljine $d_z = 20$ cm i širine $\check{s} = 100$ cm, za $\Delta l = 0,9$ mm izazvat će na kontaktu sa kamenim opločenjem silu:

$$T_S = \frac{\Delta l}{l} \cdot \frac{d_z \cdot \check{s} \cdot E_b}{1 + d_z \cdot \check{s} \cdot E_b} \cdot d_k \cdot \check{s} \cdot E_k,$$

uvrštavanjem zadanih veličina dobijemo:

$$T_S = 121 \text{ kN}$$

Pad temperature od 20°C na 12°C ($\Delta t = 8^\circ\text{C}$, $\alpha_{tb} = 11 \times 10^{-6}/1^\circ\text{C}$; $\alpha_{tk} = 5,64 \times 10^{-6}/1^\circ\text{C}$) izazvat će dodatnu silu:

$$T_t = \frac{(\alpha_{tb} - \alpha_{tk}) \cdot \Delta t \cdot d_z \cdot \check{s} \cdot E_b}{1 + d_z \cdot \check{s} \cdot E_b} \cdot d_k \cdot \check{s} \cdot E_k.$$

Uvrštavanjem zadanih veličina dobijemo:

$$T_t \approx 18 \text{ kN}$$

$$T = T_s + T_t = 139 \text{ kN}$$

Ova sila izazvati će na kontaktu (u ljepilu) naprezanje:

$$\tau = \frac{139 \cdot 2}{300 \cdot 100} = 0,0093 \text{ kN/cm}^2 = 0,093 \text{ N/mm}^2$$

Ako pretpostavimo da posmično naprezanje približno odgovara vlačnom naprezanju lako se može zaključiti da je kod armiranobetonskih zidova deformacija izazvana skupljanjem i puzanjem betona najviše doprinijela nastalom oštećenju. Pridodajmo ovoj činjenici utjecaj skupljanja u poprečnom smjeru, nejednoliku temperaturu, vlagu i neujednačenu tehnologiju izvedbe kamenog opločenja, ova će konstatacija imati još veću utemeljenost.

Osim toga, važno je naglasiti da su ispitivanja vlačne prionljivosti kamene obloge za podlogu (armiranobetonske zidove) dala izrazito neujednačene rezultate, što upućuje na činjenicu da su kvaliteta ugrađenih materijala i tehnologija izvedbe bile neujednačene, što je dovelo do pojave lokalnog prekoračenja granične čvrstoće prionljivosti, a time do odvajanja kamenog opločenja od podloge–ljepila.

5 Zaključak

Na temelju provedenih ispitivanja *in situ*, u laboratoriju i analize uzroka nastalog oštećenja, dolazi se do zaključka da pri izvedbi opločenja (kamenim pločama malih

dimenzija ili keramičkim pločicama) armiranobetonskih elemenata od “mladog betona” (beton na kojemu se još nije očitovao utjecaj dugotrajnih deformacija), treba uzeti u obzir više utjecaja kao što su: starost i krutost podloge, svojstva ljepila za polaganje obloge, vodoupojnost obloge i podloge, tehnologija polaganja pločica (točkasto ili kontinuirano) s određivanjem širine reške te utjecaj promjene temperature, koji je najviše izražen kod oblaganja pročelja građevina, kada temperaturni interval može poprimiti do deset puta veću vrijednost od razmatrane.

Ove spoznaje treba primijeniti pri izradi projekta opločenja armiranobetonskih elemenata, bez obzira radi li se o unutrašnjem ili o vanjskom opločenju.

Posebnu pažnju potrebno je posvetiti interakciji armiranobetonske podloge na opločenje i opločenja na podlogu. Uvažavanje prethodnih spoznaja rezultirat će pravilnim odabirom materijala za izvedbu opločenja (ljepila i obložnog materijala), pravilnim određivanjem dimenzija obložnih ploča i širine reški kao i redosljeda i načina izvedbe.

Opisana oštećenja daleko su manja na zidovima od zidarskih elemenata (opeka, siporex, i sl.), jer ovi materijali nisu značajnije podložni utjecaju dugotrajnih deformacija i temperaturnih promjena. To je vidljivo iz primjera prikazanog u tablici br.1, na mjernom mjestu br. 3., na zidovima od siporexa. Ta se činjenica može objasniti time što je kod zidova od zidarskih elemenata utjecaj dugotrajnih deformacija u podlozi i deformacija nastalih zbog promjene temperature zanemariv.

LITERATURA

- [1] Stanuga, G.: *Fasade*, Građevinski institut, Zagreb, 1984.
- [2] Šimić, V.: *Otpornost materijala 1.*, Školska knjiga, Zagreb, 1992.
- [3] Ukrainczyk, V.: *Beton: struktura, svojstva i tehnologija*, ALCOR, Zagreb, 1994.
- [4] Beslač, J.: *Beton visoke kakvoće*, Građevni godišnjak, Hrvatsko društvo građevinskih inženjera, 260.-263, Zagreb, 1996.
- [5] M^c Donald, W. H.: *Thin facades*, Dimensional Stone, 37-40, Indiana, USA, 2/1990.
- [6] Bernie Erlin: *Stone World*, 86.-90., Oradell, USA, 2/1989.
- [7] Crnković, B.; Rokić, Lj.: *Toplinska postojanost prirodnog kamena*, Građevinar 33 (1981) 6, 525.-528., Zagreb
- [8] Winkler, E. M.: *Stone*, Springer Verlag, Wien-New York, 1975.
- [9] Stojiljković, I.; Gencel, D.: *Greške pri oblaganju fasada tankim kamenim pločama i keramičkim pločicama*, Jugoslovensko društvo građevinskih konstruktera, Z 16-1-Z 16-14, Cavtat, 11/1976.