

## UTJECAJ STRUKTURNO-PETROGRAFSKIH, HIDRODINAMIČKIH I OSTALIH ČIMBENIKA NA TROŠENJE STIJENA U TEMELJU DUBROVAČKIH ZIDINA

Ivan TOMAŠIĆ<sup>1</sup> i Vladimir ANDROČEĆ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, YU-41000 Zagreb

<sup>2</sup> Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, YU-41000 Zagreb

**Ključne riječi:** Strukturni sklop, Petrografska svojstva, Hidrodinamičko opterećenje, Valovi, Valni tlakovi, Otpornost, Stabilnost i Postojanost stijena

Otpornost, stabilnost i postojanost stijenske mase u temelju dubrovačkih zidina izučavana je u uvjetima djelovanja različitih čimbenika, a posebno pod utjecajem abrazije, erozije i korozije morske vode. Pojedinačno obrađeni i utvrđeni različiti čimbenici prikazani su prema intenzitetu djelovanja. Posebno se može istaknuti snažno djelovanje morskih valova (compression shock), pritiska kristalizacijskih soli (NaCl), stezanje i rastezanje kalcita, parni pritisci u pornom prostoru i kemo-korozivni utjecaj morske vode. Složeno i cikličko ponavljanje ovih procesa zbiva se u višestruko tektoniziranim i kataklaziranim dolomitima koje karakterizira specifičan strukturno-petrografski sklop. Diferencijalni i progresivni učinak pojedinih procesa samo je dio složenih uvjeta u kojima se spomenute stijene oslabljuju, troše i raspadaju.

**Key-words:** Structural fabric, Petrographic properties, Hydrodynamic loads, Waves, Wave pressures, Resistivity, Stability and Durability.

Resistivity, stability and durability of the rock mass in the foundation of the Dubrovnik ramparts have been studied in the conditions effected by different factors, especially by abrasion, erosion and corrosion of sea water. Individually treated and established different factors are presented according to the intensity of their action. Intensive action of sea waves (compression shock), the pressure of crystalization salts (NaCl), contraction and extension of calcite, vapour pressures in the pore space and chemo-corrosive influence of sea water need to be particularly discussed. Complex and cyclic repetition of these processes occurs in multiple tectonized and cataclysed structural-petrographic fabric. Differential and progressive effect of individual processes is only a part of complex conditions under which the mentioned rocks become weak, weathered and desintegrated.

### Uvod

Temeljne stijene jugozapadnog dijela dubrovačkih zidina izložene su dugotrajnoj abraziji, eroziji i koroziji uslijed djelovanja morske vode, kišnice i sunca. Fizičko-kemijska i mehanička destrukcija morske vode i valova prijete zidinama izgrađenim od klesanog kamena, a koje se po svom sastavu pretežno sastoje od dolomita i dijelom od vapnenca.

Opazanja i istraživanja temeljnih stijena obavljena su u zoni tvrdave Bokar i dijelom istočno. Istraživanje je imalo za cilj definiranje uzroka i stanja raspadanja, oštećenja i stabilnosti temeljnih stijena, zatim definiranje postojećeg stanja u pogledu geološke građe, strukturnog sklopa i petrografskih karakteristika stijenske mase, te određivanje najkritičnijih dijelova, na kojima je, već u ovom času, neophodna sanacija.

Podlokavanje i obrušavanje stijenske mase na pojedinim mjestima toliko je uznapredovalo, da bi daljnje odgađanje sanacije, injektiranjem, sidrenjem, izgradnjom potpora od betona ili eventualnim zasipavanjem prirodnim kamenom po principu izgradnje lukobrana, moglo ozbiljno ugroziti stabilnost postojećih zidina.

Istraživanjem obuhvaćen dio temeljnih stijena podijeljen je na pet zasebnih blokova (sl. 1). Dostupni uzorkovanju i detaljnom pregledu strukturnog sklopa bili su blokovi 4 i 5. Blokovi 1, 2 i 3 obrađeni su sa zidina ili s blokova 4 i 5.

### Geološka građa temeljnih stijena

Prema Markoviću (1966) stijenska masa na kojoj su temeljene zidine i grad Dubrovnik, sastoji se od karbonatnih naslaga mastrihtskog potkata. Ove naslage pripadaju para-autohtonu gornje krede predstavljenom paketom vapnenaca i dolomita, s četiri litostratigrafska člana: dolomit, dolomit i vapnenac, vapnenac te vapnenac i dolomit. Ove naslage izgrađuju strme dijelove jadranske obale (klifove) područja Dubrovnika. Grad Dubrovnik leži na njihovom najstarijem dijelu, dolomitima koji pripadaju donjem mastrihtu ( $\frac{1}{4}K_2^3$ ). Debljina ovih dolomita procjenjuje se na oko 250 m.

U tektonskom pogledu ove naslage su u istraživanom dijelu šireg područja temeljnih stijena kule Bokar, te istočno i zapadno (Lovrijenac), bile izložene intenzivnom reversnom rasjedanju i boranju. Na širem području dominiraju rasjedi pružanja SI–JZ. Pružanje reversnih rasjeda i čela navlake jest ZSZ–III. Čelo navlake nalazi se (prema Markoviću, 1966) približno 200 do 300 m JJ od dubrovačkih zidina.

### Glavni čimbenici oštećenja stijena u temelju

Detaljnim opažanjem stijena u temelju zidina utvrđeno je da su uzroci oštećenja brojni, različitog intenziteta djelovanja i posljedica.

Utvrđeno je da je stijenska masa izgrađena od



dolomita, da je potpuno prožeta diskontinuitetima s kalcitnom ispunom, te da je u potpunosti izdobljena (kataklazirana) te ponovno cementirana. Kalcit kao ispuna diskontinuiteta prožima stijensku masu od milimetarskih, centimetarskih pa do metarskih razmaka. Debljine kalcitne ispune su mikrometerske pa sve do mjestimice dva, tri ili više centimetara.

Jedan od čimbenika jest nejednolika korozija,

odnosno sporije otapanje dolomita u odnosu na kalcitnu ispunu i kalcitni cement kojim je povezana kataklazirana stijenska masa. Diferencijalnom korozijom površina dolomita postala je grubo hrapava. Iz osnovne mase strše 2 do 3 mm krupnija zrna dolomita.

Čitava stijenska masa ispresijecana je diskontinuitetima od kojih su mnogi zjapeći. Diskontinuiteti su

različitog nagiba i orijentacije i dijelom mjestimice ispunjeni crvenkastosmedim kalcitom.

Oštećenjima pogoduje nastanak otvorenih i zjapelih diskontinuiteta duž kalcitne ispune, a koji omeđuju blokove različite veličine, zbog čega su predisponirani obrušavanju u more. Do obrušavanja blokova svih mogućih dimenzija dolazi razornim djelovanjem valova, odnosno komprimiranjem zraka i morske vode u otvorene pukotine obalnih stijena.

Posebno se može istaknuti destruktivno, kemijsko i mehaničko djelovanje iskristaliziranih soli iz mora u pornom prostoru stijenske mase, ponajviše natrijevog klorida. Ne treba zanemariti niti parne udare u pornom prostoru stijene za sunčanih i vrlo toplih dana, kada je stijena zasićena vlagom. Razaranju doprinosi i termičko širenje odnosno stezanje stijene i minerala u njoj, posebice kalcita. Svim ovim procesima progresivno pogoduju intenzivno raspucane tektonske zone utvrđene između blokova 1 i 2 zatim 3 i 4, te na djelovima blokova 3, 4 i 5 (sl. 1). Obrušavanju stijenske mase pogoduju i povoljni uvjeti međusobnog prostornog položaja: i gustoća diskontinuiteta kao na primjer u blokovima 1, 2 i 3 (nagib prema moru).

Predhodno spomenuti procesi znatno su oslabili fizičko-mehanička svojstva stijenske mase. Izvršena su ispitivanja tlačne čvrstoće na uzorcima (5×5×5 cm) iz bušotina izbušenih do dubine od 2 m u zoni strukturnog bloka 4. Dobivene su vrijednosti od 23,2; 34,0; 49,2 i 8,7 MN/m<sup>2</sup> (Čorko i dr., 1989). Ovaj posljednji rezultat odnosi se na uzorak koji se mogao mrviti u ruci, zbog toga što je bio jako raspucan i prošaran mrežom diskontinuiteta s kalcitom ispunom i vezivom. Dobivene vrijednosti niže su najmanje 3 do 15 puta od standardnih uzoraka dolomita koji nisu bili izloženi predhodno opisanim procesima. Može se sa sigurnošću pretpostaviti da u ovoj stijenskoj masi postoje dijelovi u kojima je tlačna čvrstoća znatno manja od 8,7 MN/m<sup>2</sup>.

### Strukturni sklop temeljnih stijena

Opažanja i mjerenja diskontinuiteta i svih oslabljenih mjesta u stijenskoj masi obavljena su na blokovima 1, 2, 3, 4 i 5, prikazanim na sl. 1, te dijelom na slikama 2, 3 i 4.

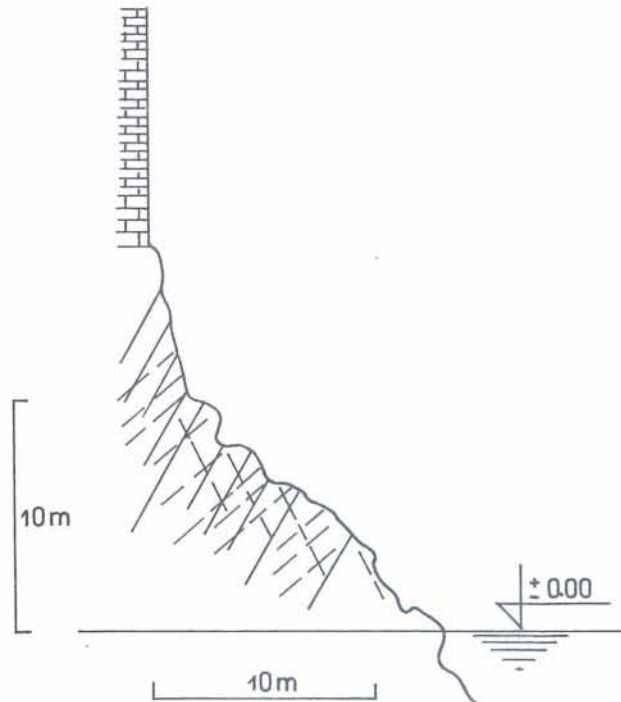
U bloku 1 izmjerene su pukotine: 65/60 (×17) a koje iz bl. 1 ulaze u bl. 2, zatim 135/60 (×20) i 237/60 (×12). Ova tri sustava pukotina formiraju blokove pogodne za obrušavanje u more.

U bloku 2 izmjerene su pukotine: 50/73 (×10) i 60/77 (velika od vrha do mora), te 237/60 (×9).

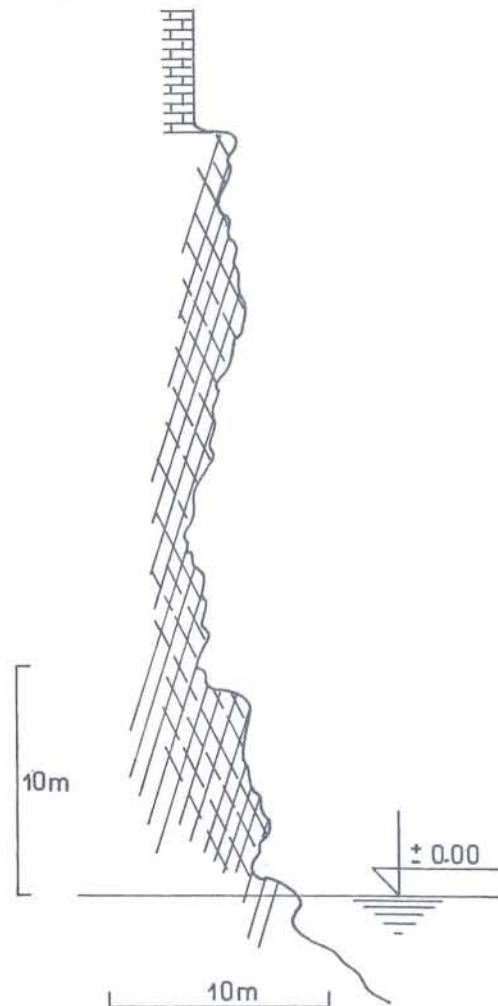
U zoni bloka 3 izmjerene su pukotine 210/80 (×4), 210/84 (×6), 94/52 (×7), 268/60 (×2), 220/78 (×7) (formirale su blok koji se obrušio u more), 120/85 (×5), 353/76 (×7) i 43/67 (×4).

U bloku 4 izmjerene su pukotine 102/80 (×5), 350/55 (×4) a koje se skoro podudaraju sa slojevitosti, zatim 110/82 (×8), 110/82 (×4), 25/60 (×2), 21/64 (×5), te položaji slojeva 350/40, 355/43 i tektonskih zona 210/85, 206/86 i 30/27.

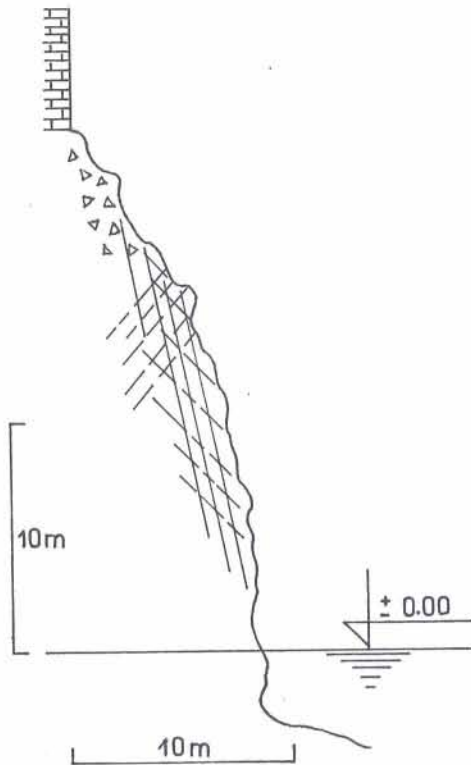
U bloku 5 izmjereni su slojevi 356/45 i pukotine: 306/72 (×2), 190/45 (×5), 25/72 (×5), 85/87 (×1), 195/80 (×10) i 170/72 (×1).



Sl. 2 Shematski prikaz diskontinuiteta (profil A-A, blok 4)  
Fig. 2 Schematic display of discontinuities (cross-section A-A, block 4)



Sl. 3 Shematski prikaz diskontinuiteta (profil B-B, blok 3)  
Fig. 3 Schematic display of discontinuities (cross-section B-B, block 3)



Sl. 4 Shematski prikaz diskontinuiteta (profil C-C, blok 2)  
Fig. 4 Schematic display of discontinuities (cross-section C-C, block 2)

S obzirom na položaj diskontinuiteta u stijenskoj masi, odmah se, s obzirom na stabilnost, kao najnepovoljniji mogu izdvojiti blokovi 1 i 2 jer sadrže pukotine s nagibom prema moru, zatim blok 3 s obzirom na široku tektonsku zonu koja kao kapa leži u gornjem dijelu, te položaje pukotina s upadom prema moru. Blok 4 sadrži tektonske zone sa zdrobljenim dolomitom prošaranim diskontinuitetima ispunjenim kalcitom.

Blokovi 4 i 5 intenzivno su ispresijecani diskontinuitetima, a sastoje se od izrazito korodirane i kataklazirane, mikrobrečaste dolomitne stijenske mase. Između bloka 3 i 4, te blokova 4 i 5 more je već doprlo do zidina upravo tamo gdje je sučeljavanje raznih diskontinuiteta i tektonskih zona bilo najintenzivnije.

Na istraživanje i izmjerene diskontinuitete ne može se primijeniti grafička analiza stabilnosti za čvrste stijene (Hoek i Bray, 1974), jer ovdje ne vrijedi mogućnost upotrebe kuta unutrašnjeg trenja iz razloga što morski valovi jačinom snage udara (posebice komprimiranjem zraka i vode u šuplje prostore diskontinuiteta) kidaju pojedine blokove, koji bi u nekim drugim uvjetima, npr. kod površinskih kopova i litica s obzirom na svoju geometriju bili potpuno stabilni.

#### Petrografske karakteristike stijenske mase

Dio stijenske mase obuhvaćen istraživanjem uzorkovan je te analiziran makroskopski, mikroskopski i rendgenski. Utvrđeni su slojevi svijetlo i tamnije sivih dolomita koji su u izmjeni (blok 4). Dva sloja tamnosivog dolomita, prvi debljine 0,8 m i drugi

1,3 m nalaze se unutar svijetlosivih dolomita u prvih 8 m površ mora. Analizirano je pet uzoraka. Iz bloka 4 uzeti su uzorci 2, 3, 5 i 7 na udaljenosti 4 do 10 m od mora. Uzorak 10 uzet je iz bloka 5 na udaljenosti 4 m od mora.

Makroskopski uzorci su sivobijele boje (uz. 2, uz. 5 i uz. 10) s intenzivnim diferencijalnim trošenjem, koje je nešto slabije izraženo na uzorcima tamnije-sivog dolomita (uz. 3 i uz. 7). Zrna dolomita strše iz osnovne mase gustog spleta kalcitnih žilica debljine od 0,1 do 5 mm, a na razmacima od 0,5 do 4 mm. Površine su grubo hrapave. Stijena se pod udarcima lomi nepravilno, jače duž kalcitne ispune u diskontinuitetima.

Mikroskopski izbrusci pokazuju da se stijena sastoji od fragmenata kasnodijagenetskog dolomita koji je bio kataklaziran, pa čak i izdrobljen do praha. Ovi fragmenti sastoje se od mikro- i makrokristalastog dolomita promjera kristala od 0,8 do 0,2 mm. Kristali su dijelom bistri a dijelom zamućeni fino dispergiranom organskom supstancijom. Uglavnom su alotriomorfni a samo sporadično hipidiomorfni. Osnovna milonitizirana masa fino izdrobljenog kriptokristalastog dolomita (presjeka kristalica ispod 0,01 mm prošarana je naknadno duž prslina kalcitom ispunom debljine 0,2 do 4 mm (uz. 5). U toj masi leže fragmenti mikro- i makrokristalastog dolomita. Pojedini prekrizacijom novo nastali kristali dolomita veličine su i do 0,4 mm u presjeku. Ova porozna masa ispunjena je i prožeta organskom supstancijom. U uzorku 3 duž prslina uočen je jaki porozitet nastao uslijed otapanja kalcita. Prvobitno nastali mehanički diskontinuiteti zacijeljeni su kalcitom te je između njih nastala čvršća veza. Ovaj je proces vjerojatno bio višekratan. Veza novonastalog kalcita u diskontinuitetima s prvobitnom stijenom vrlo je slaba jer su granice odnosno kontaktne površine ravne.

Analizirani uzorci određeni su kao kasnodijagenetski, kataklazirani i milonitizirani krypto-mikro- do makrokristalasti dolomit, odnosno dolomitna mikrobreča nastala višekratnom tektonizacijom i rekristalizacijom dolomita.

Mineralni sastav određen je još rendgenskom difrakcijskom analizom uzorka s površine »kore« stijene, unutrašnjosti stijene i crvenkastog materijala koji predstavlja ispunu većih pukotina. Prema dobitnim rezultatima (Čorko i dr., 1989) stijena se sastoji pretežno od dolomita i vrlo malih količina kalcita (2 do 3%). Uzorak unutrašnjosti stijene pokazao je isti mineralni sastav, tj. dolomit i 2 do 3% kalcita. Crvenkasti materijal iz većih pukotina predstavlja kalcit s tragovima aragonita. Crvenkasta boja posljedica je limonitnih nečistoća kojih ima u tragovima.

#### Hidrodinamičko opterećenje prirodne približno vertikalne stijene morskim valom

Vjetreni morski valovi definirani su visinom H, periodom T i duljinom L. Dolaskom na plitko dno odnosno vertikalnu stijenu deformiraju se u pogledu visine i duljine te reflektiraju. Prilikom refleksije predaju određenu energiju koja u neporemećenom valu iznosi:

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2 L$$

(gdje su:  $\rho$  – gustoća mora,  $g$  – gravitacija,  $H$  – visina vala i  $L$  – dužina vala) a sastoji se od potencijalne i kinetičke energije. Ova predaja može biti kroz potencijalnu energiju očitovana u tlačnom opterećenju stojnog vala koje iznosi otprilike na razini mora  $p = \rho g H$  ili pak kroz udarno opterećenje ako postoje uvjeti za lom vala na prepri ili u njenoj blizini. Ovo udarno opterećenje može bitno varirati ovisno o geometriji vala i prepreke.

Da bi odredili veličinu spomenutih tlačnih opterećenja izrađena je i prikazana prognoza valova na mjestu utvrde Bokar te su poznatim metodama izračunati maksimalni tlakovi koji su relevantni za opterećenje stijene.

S obzirom na smjer valova promatrano područje oko tvrđave Bokar izloženo je otvorenom moru u sektoru od SE do W. Dvadesetogodišnja statistika mjerenja vjetra na otočiću Sv. Andrija pokraj Dubrovnika (Hrabak-Tumpa i dr., 1987) pokazuje slijedeću vremensku učestalost pojedinih vjetrova u % određene jačine kako je to prikazano u tablici 1.

Tablica 1. Jačina u Bf i učestalost vjetrova u % (najviše po sezoni)

Vjetar %	SE	S	SW	W	Ukupno
(Bf, ms <sup>-1</sup> )	(proljeće)	(jesen)	(jesen)	(proljeće)	
1-3 Bf 4-5 Bf	201,8	38,2 46,5	23,3 24,8	6,0 35,5	2,6 308,6
(0,3-5,4) (5,5-10,7)					70,1
6-7 Bf 8 Bf	5,3	1,3 7,2	2,4 1,8	0,3 0,2	14,5
(10,8-17,1) (17,2- )					4

Ostali dostupni podaci pokazuju sličnu statističku raspodjelu. Radovi Kleščenkova (1970) na temelju dvadesetogodišnjeg mjerenja vjetrova na Sredozemlju pokazuju da na južnom Jadranu vjetrovi juga mogu doseći brzine i do 30 m/s.

Iz podataka o vjetrovima može se doći do odgovarajućih valova. Srednja vrijednost visine značajnih valova  $H_{1/3}$ , dakle prosjek trećine najviših valova koji su i energetski najznačajniji, prognostičkom metodom Groen-Dorrensteina (1975), (iz Andročec, 1986), iznosi za srednju vrijednost brzine vjetra u navedenim klasama, za privjetrište od cca 200 km, a koje odgovara za sve smjerove izloženosti, kako je prikazano u tablici 2.

Tablica 2. Brzina vjetra i visine valova (Groen-Dorrenstein, 1975)

Vjetar	Značajna visina valova $H_{1/3}$ (m)
1-3 Bf (0,3-5,4 m/s)	0,4
4-5 Bf (5,5-10,7 m/s)	1,4
6-7 Bf (10,8-17,2 m/s)	3,8
8 Bf (22 m/s)	6,5
maks. 30 m/s	9,0

Na temelju dugogodišnjih statistika vjetrova, uzimajući u obzir njegovu dugoročnu razdiobu, može se doći do visine valova za određeni povratni period

vremena. Takve prognoze su izradili Tabain (1977) za otvoreno more Jadrana i Andročec (1986) za pojedina privjetrišta na Jadranu. Iz ovih prognoza dobivaju se rezultati kako je to prikazano u tablici 3.

Tablica 3. Statistički prikaz visina valova u povratnom periodu

Povratni period (godina)	Visina valova $H_{1/3}$ (m)	
	Tabain	Andročec (privjetrište 200 km)
1	5,8	5,0
10	7,8	6,8
20	8,4	7,5
50	9,3	8,2
100	9,8	8,7

Prikazani podaci ukazuju da se sve tri navedene prognoze u statističkom smislu podudaraju te je za očekivati da se u periodu od 100 godina bar jednom pojave oluje sa značajnijim valovima visine do 9,0 m, što znači da je moguć i maksimalni val otprilike 13,0 m. Naravno da će se takav val zbog batimetrije znatno prije deformirati i slomiti. Međutim valovi do 9 m mogu se slomiti na samoj strukturi obalne stijene ili je doseći bez loma.

Iz mogućeg hidrodinamičkog opterećenja stijene, akceptirajući spomenute visine valova na području obalnih stijena tvrđave Bokar u Dubrovniku, izračunato je tlačno opterećenje na stijenu.

Nelomljeni val na stijeni ima teoretski maksimalni doseg od jedne visine vala od svoje srednjice, zbog čega je njegovo tlačno opterećenje najveće na samoj srednjici (dakle nešto iznad razine mora) i iznosi  $p = \rho g H$ . Ukoliko se val deformira i lomi na stijeni ili ispred same stijene tada se za normalni lom može upotrijebiti jednadžba Hiroi-a (1967), (iz Horikawa, 1878),  $p = 1,5 \rho g H$ .

Međutim zbog nepravilne geometrije obalne stijene i dna moguće su i druge vrste loma, zbog čega val koji se lomi može na stijeni uzrokovati trenutačni udarni tlak kratkog trajanja (cca 0,1 sec) koji je značajno veći od onog kod reflektiranog vala  $p = \rho g H$ . Međutim s obzirom da je taj udarni tlak veoma varijabilan njegovo je određivanje još uvijek vezano empiričkim relacijama ili direktnim mjerenjima. Teoretski gornja vrijednost jednaka je onoj od efekta potpunog vodnog udara (*fluid compression wave*). Ovaj efekt se praktički može potpuno pojaviti u stvarnom valu zbog prisustva zračnog jastuka ispod konkave vrha lomljenog vala. Već je Bagnold (1939) utvrdio da je prisustvo zarobljenog zraka kod loma vala u obliku prebacivanja (*plunging*), a koje se javlja kod relativno strmog nagiba dna prije obale, uzrok visokim tlačnim udarima. Za iste uvjete Denny (1951) pokazao je pomoću pokusa da je najčešći maksimum trenutačnog tlaka:

$$P_{\max} \doteq 28 \rho g H,$$

dok je kao najveću pojedinačnu vrijednost dobio:

$$P_{\max} \doteq 100 \rho g H.$$

Za vrlo jednostavnu geometriju vertikalnog zida i poznatu fiziku loma vala na plitkom dnu blagog

nagiba danas se najčešće upotrebljava izraz za maksimalni tlak sa zarobljenim zrakom  $a$  koji je razvio Minikin (1936) na temelju mjerenja na raznim lokacijama obala u Europi:

$$P_{\max} = 101 \text{ g H} \frac{H_b}{L_{d_1}} \frac{d_s}{d_1} (d_s + d_1)$$

gdje su  $H_b$  visina lomljenog vala,  $L_{d_1}$  njegova duljina na dubini  $d_1$ ,  $d_1$  je dubina mora jednu valnu duljinu od zida, a  $d_s$  je dubina kod samog zida. Eksperimenti pokazuju (Horikawa, 1978) da je najčešća vrijednost maksimalnog tlaka po ovom izrazu  $P_{\max} = 10 \text{ g H}$ .

Očigledno je da su svi navedeni izrazi poluempirijski a ovise o lokalnoj geometriji. Za složenu geometriju dna i obalnih stijena za različite napadne kuteve valova kod tvrdave Bokar točne vrijednosti bi se mogle dobiti samo istraživanjem na hidrauličkom modelu ili mjerenjem u naravi. Stoga su ovdje izračunate vrijednosti po raznim metodama samo kvalitativne i pokazuju red veličina mogućeg maksimalnog trenutnog tlaka na stijenu za razne visine valova (tablica 4).

Tablica 4. Maksimalni tlakovi za razne visine valova i vrste loma  $p$  (MN/m<sup>2</sup>)

Visina vala H (m)	Nelomljeni val	Lomljeni val (Hiroi)	Lomljeni val (Minikin)	Lomljeni val (Denny) srednji maksimum	Lomljeni val (Denny) najveći mogući
3	0,0294	0,0441	0,294	0,823	2,94
5	0,0491	0,0736	0,491	1,375	4,91
7	0,0687	0,1030	0,687	1,924	6,87
9	0,0883	0,1324	0,883	2,472	8,83

Posebno ovdje treba ukazati na utjecaj umora materijala, odnosno u ovom slučaju stijene, jer poznato je da periodsko ponavljanje znatno manjih opterećenja od onih kod kojih se stijena lomi u laboratoriju, može također prouzročiti lom.

Iz prethodno prikazanih statističkih podataka proizlazi da npr. valove od 3 m može prouzročiti vjetar od 6 do 7 Bf kojeg po statistici ima iz otvorenih smjerova 14,5% odnosno 5 dana ili 120 sati godišnje. Jednostavnom analizom može se vidjeti da je to zapravo najmanje 20000 valova spomenute visine godišnje, ili  $2 \times 10^6$  u stoljeću a kod te vrijednosti i čvrsti materijali postaju dinamički kruti što može biti uzrok loma cjelovitih dijelova stijene odnosno makroabrazija. Dakako da je površinski sloj kamena zbog ostalih procesa znatno oslabljen, zbog čega napadna sila vala lakše lomi i otkida sitne čestice, te tako nastaje mikroabrazija koja kontinuirano i u duljem vremenskom periodu postaje uzrokom postepenog nestajanja dijelova stijene.

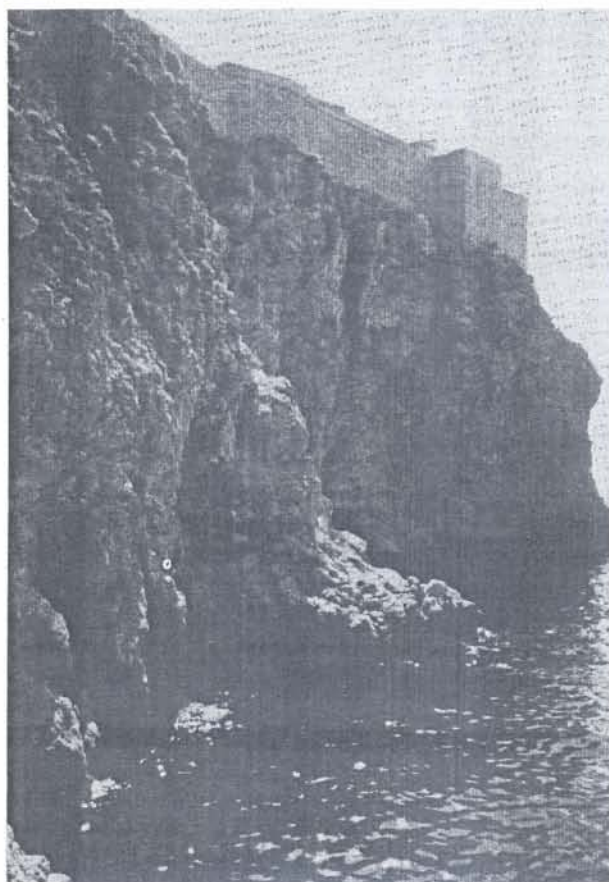
### Diskusija i zaključak

Stijene u temelju dubrovačkih zidina u predjelu kule Bokar i istočno izgrađene su od kasnodijagenetskog, kataklaziranog i milonitiziranog, dijelom pre-kristaliziranog kriptomikro do makrokristalastog dolomita intenzivno ispresijecanog diskontinuitetima

s kalcitnom ispunom. Kalcitna ispunna diskontinuiteta nastalih najmlađom tektonskom aktivnošću jedan je od osnovnih uzroka brze destrukcije stijena. Zbog mnogo bržeg otapanja i raspadanja kalcitne ispune nastaju pogodni uvjeti, pogodovani i geometrijom strukturnog sklopa tj. nagibom pukotina i položajem tektonskih zona (Sl. 1, 2, 3 i 4), za odvaljivanje blokova stijenske mase u more, prvenstveno djelovanjem snage valova i kompresije zraka duž šupljina diskontinuiteta.

Otpornost, stabilnost i postojanost stijenske mase u temelju dubrovačkih zidina izučavana je u uvjetima utjecaja abrazije, erozije i korozije morske vode. Cjelokupna spoznaja o učinku pojedinih čimbenika dobivena je pretežno na temelju laboratorijskih i terenskih istraživanja obalnih stijena u okružju kule Bokar.

Diferencijalni i progresivni učinak pojedinih procesa u prikazanim i opisanim uvjetima u ovom radu upućuje na specifičnu strukturno-petrografsku građu, hidrodinamički i fizičko kemo-korozivni utjecaj morske vode (Sl. 5).



Sl. 5 Obalne stijene u temelju dubrovačkih zidina

Fig. 5 Coastal rocks in foundation of Dubrovnik fortification stone walls

Svi navedeni procesi odvijaju se u složenoj sredini, u ovom slučaju u obalnim stijenama izloženim utjecaju morske vode, valova, sunca, kiše, a vjerojatno rijede i mraza. Kemo-korozivno i fizičko djelovanje morske vode na stijene sličnog sastava, izučavano je do sada često u laboratorijskim uvjetima. Rezultati takvih istraživanja korisni su za objašnjenje karak-

tera i intenziteta sličnih, pa čak i istih takvih procesa u prirodnim uvjetima destrukcije.

Djelovanjem otopinama natrijevog klorida, natrijevog bromida, magnezijevog klorida, magnezijevog sulfata, ali i smjese spomenutih soli, u koncentracijama u kojima su te soli zastupljene u morskoj vodi, na vapnence i dolomite, ispitivao je Crnković (1972). Tom prilikom utvrđena su najveća oštećenja uzoraka tretiranih otopinom natrijevog klorida, posebice na vapnencima vezano uz kalcitni matriks i kalcitnu ispunu u diskontinuitetima. Uzorak dolomita pretrpio je vrlo male promjene i to samo duž kalcitom ispunjenih tankih diskontinuiteta.

Svaka klimatska promjena, odnosno, vlaženje i sušenje kalcitnim žilicama ispresijecanog dolomita sa sadržajem agresivnih komponenti u pornom prostoru, u ovom slučaju natrijevog klorida, reaktivira te komponente, njihovu disocijaciju i kemo-korozivno djelovanje na dolomit, što pospješuje razaranje kamena. Smanjenjem čvrstoće i povećanjem poroziteta pojačava se sposobnost ponovne apsorpcije štetnih agenasa.

Prema Crnkoviću i Rokiću (1981) naizmjeničnim zagrijavanjem i sušenjem vodozasicećenog kamena slabi intergranularna veza i nastaju fizičke promjene u pornom prostoru kamena. Ove se promjene tumače stezanjem i rastezanjem kalcita pri zagrijavanju.

Djelovanje i intenzitet stezanja i rastezanja kalcita duž osi »C« odnosno okomito na nju prikazao je Winkler (1973). Tom prilikom utvrđeno je prema njemu da kod temperature od 50 do 60°C u kalcitu nastaju pritisci u iznosu od 300 do 400 bara (30 do 40 MN/m<sup>2</sup>).

Prema Winkler-u (1973) naizmjeničnim vlaženjem i sušenjem kamena a pri povećanim temperaturama, utvrđeno je da se širi voda koja ispunjava zatvoreni porni prostor, uz povećanje pritiska. Kod toga može nastati naprezanje od 300 do 400 bara (30 do 40 MN/m<sup>2</sup>) kod temperature od 50 do 60°C. Istovremeno dolazi i do ekspanzije kalcita u iznosu od cca 0,15 %. Ovi procesi također vode slabljenju veza između pojedinih kristala dolomita i kalcita, povećanju intergranularnog poroziteta a s time i slabljenju čvrstoće kamena.

Ovako veliki pritisci mogući su vjerojatno samo u površinskom dijelu kamena a koji je intenzivnije izložen toplotnom zagrijavanju. Tvorba zatvorenog pornog prostora moguća je uslijed kristalizacije soli također u površinskom dijelu. Ukoliko su pore dobro povezane s površinom kamena ova su naprezanja znatno manja.

Stoga zatvaranje i otvaranje pornog prostora bitno utječe na »disanje« stijene čime se pospješuje kemo-korozivno djelovanje, te utjecaj na intenzitet parnog tlaka u porama koji može imati snažno destruktivno djelovanje u razaranju obalnih stijena.

Jedan od jakih čimbenika u razaranju stijena jest nastanak pritisaka uslijed kristalizacije soli u kameanu. Ovi se pritisci (Winkler, 1973) znatno povećavaju ako soli kristaliziraju iz jako koncentriranih i saturiranih otopina. Tako je na primjer utvrđeno da kod različitih nivoa supersaturacije NaCl i temperature od 0° do 50°C mogu postepeno uzrokovati

deformacije minerala i stijena, utjecati na intergranularni porozitet i kemo-korozivno djelovanje morske vode.

Pojačanu koroziju obale u intertidal zoni (između najniže razine plime i najviše razine oseke) ističe u svojim istraživanjima morfogeneze strmih obala Benac (1979). To je upravo zona u kojoj se utjecaj svih spomenutih čimbenika posebno reflektira na tvorbu morfoloških karakteristika strmih obala odnosno klifova.

Obalne stijene u intertidal zoni izložene su snažnom i brzom djelovanju različitih organizama. Smatra se da je njihovo djelovanje prvenstveno biokemijske i mehaničke prirode. Kemijskim sekretom i mehaničkom aktivnošću veći broj različitih organizama buši i razara stijene. Napredovanje pojedinih organizama prema Ansell-u (1969), Warme-u (1969) i Cobb-u (1969), (iz Winkler, 1973) iznosi godišnje 10 do 15 mm. Ovi podaci odnose se na karbonatne stijene, prije svega vapnence. Pretpostavlja se da se svi ovi procesi u dolomitima odvijaju sa znatno manjim intenzitetom, zbog veće gustoće kristalne rešetke minerala dolomita, a vjerovatno i prisustva magnezija koji kao element u većim količinama ne odgovara nekim organizmima.

Potrebno je posebno istaknuti destruktivno djelovanje vjetrovih valova kao periodske pojave u obliku hidrodinamičkog opterećenja prirodne vertikalne stijene. Ovo opterećenje ovisi o vrsti i brzini vjetra, visini i jačini valova, ali i o vrsti i morfologiji stijene.

Maksimalni tlakovi za različite visine i vrste loma, a ovisno o stijeni, prikazane u tablici 4, ukazuju na znatne razlike u opterećenju. Kao što je već spomenuto strukturno petrografski sklop opisane stijene karakteriziraju šupljine koje mjestimice duboko zadiru u masiv stvarajući uvjete za »compression shock«, odnosno u povratu vala stvaraju podtlak tj. efekt »implozije« koji je deset do dvadeset puta snažniji od djelovanja »hammer shock-a«.

Ovdje posebno treba istaknuti vrijednosti tlaka dobivene prema Denny-u (1951) koji u takvim uvjetima za valove 3, 5, 7 i 9 m za lomljeni val (srednji maksimum) iznose 0,823; 1,375; 1,924 i 2,472 MN/m<sup>2</sup>, odnosno u još jače izraženijim uvjetima za lomljeni val (najveći mogući) iznose 2,94; 4,91; 6,87 i 8,83 MN/m<sup>2</sup>.

Dobivene vrijednosti tlaka približavaju se čvrstoćama oslabljenih dijelova stijenske mase u temelju dubrovačkih zidina. Na osnovi terenskih opažanja procijenjeno je da u ukupnoj stijenskoj masi obuhvaćenoj istraživanjem postoji do 5% oslabljenih dijelova s čvrstoćom ispod 10 MN/m<sup>2</sup>.

Između mnogih navedenih čimbenika od utjecaja na obalne stijene potrebno je istaknuti važnost istraživanja značajki strukturnog sklopa. Na površinskim kopovima, a tako i na obalnim stijenama, postoje strukturni sklopovi koji znatno utječu na morfološke značajke. Dakle, neke uzroke u postojanju strmih obala treba tražiti u položaju strukturnog sklopa za koji je značajan specifičan položaj diskontinuiteta (nagib i pružanje), na način, kako se objašnjava pojava strmih otkopnih fronti kod površinskih kopova ali i kod svih drugih otvorenih profila u čvrstim stijenskim masivima.

Neka korisna iskustva, u tom pogledu, a koja bi se kod obalnih stijena mogla primijeniti, stečena su u istraživanjima stabilnosti kosina čvrstih stijenskih masiva na površinskim kopovima s obzirom na orijentaciju strukturnog sklopa u odnosu na smjer eksploatacije (Tomašić, 1989). Ta istraživanja ukazuju da su prirodno najstabilniji stijenski masivi odrezani približno okomito na pružanje karbonatnih naslaga. Stoga, neke uzroke u postojanosti strmih kamenitih obala, između ostalog, treba tražiti u povoljnosti položaja strukturnog sklopa u odnosu na napadnu silu valova.

Analiziran i istraživani primjer strukturno-petrografskog sklopa stijenske mase ukazuje na nemogućnost primjene analize stabilnosti prema metodi Hoek-a i Bray-a (1974) iz razloga što valovi kidaju pojedine blokove koji bi u nekim drugim uvjetima bili stabilni s obzirom na svoju geometriju i kut unutrašnjeg trenja.

Može se na kraju zaključiti da je uzrok oslabljenja i destrukcije istraživanih obalnih stijena složeno i cikličko djelovanje niza spomenutih čimbenika različitog intenziteta. Primjeri otrgnutih i obrušenih dijelova stijenske mase, a u obliku manjih ili većih blokova, mogu se, mjestimice na istraživanim mjestima, uočiti u udubljenjima omeđenim diskontinuitetima s nagibom prema moru ali i prema stijeni.

Primljeno: 4. IV. 1991.

Prihvaćeno: 25. VI. 1991.

#### LITERATURA:

Objavljeno

Andročec V. (1986): Dinamika Jadranskog mora kao element projektiranja fiksnih pomorskih objekata. Disertacija, Sveučilište u Zagrebu, 142 str., Zagreb.

Bagnold R. A. (1939): Interim Report on Wave Pressure Research, *Journal of the Institute of Civil Eng'rs*, Vol. 12., p. 201–226, London.

Benac Č. (1989): Morfogenezna vrlo strmih i okomitih obala na području Kvarnera. *Pomorski zbornik*, knjiga 27, 485–495, Rijeka.

Crnković B. (1972): Utjecaj nekih komponenata morske vode na karbonatne stijene. *Gradevinar* br. 7, 289–298, Zagreb.

Crnković B. i Rokić Lj. (1981): Toplinska postojanost prirodnog kamena. *Gradevinar* br. 12, 525–528, Zagreb.

Denny D. F. (1951): Further Experiments on Wave Pressures, *Journal of the Institute of Civil Eng'rs*, Vol. 35., London.

Hoek E. and Bray J. (1974): Rock Slope Engineering. The Institution of Mining and Metallurgy, p. 402, London.

Horikawa K. (1978): Coastal Engineering, University of Tokyo Press, p. 99–100, Tokyo.

Hrabak T. G. i dr. (1978): Režim vjetra na području Jadranskog mora. RHMZ – Centar za meteorološka istraživanja, Vol. 1. str. 63, Zagreb.

Kleščenko L. K. (1970): Nekotorye karakteristiki štorova Sredozemnog morja i aerosinoptičeskie uslovia ih voznikovenija, *Trudi GU GMS*, Vyp. 68, Moskva.

Marković B. (1966): Tumač i osnovna geološka karta SFRJ, list Dubrovnik (1:100000), 43 str., Beograd.

Minkin R. R. (1963): Winds, Waves and Maritime Structures, Charles Griffin & Co., Ltd., London.

Tabain T. (1977): »Privremeni standard ratne mornarice za stanje vremena na Jadranu« BI, Izv. br. 2697 – A., Zagreb.

Tomašić I. (1989): Grafička metoda analize najpovoljnijeg položaja otkopne fronte u odnosu na tektonski sklop i stabilnost stijenske mase. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, Vol. 1, str. 77–87, Zagreb.

Winkler E. M. (1973): Stone: Properties, Durability in Man's Environment. Springer – Verlag, 230 p., Wien – New York.

Neobjavljeno

Čorko D. i dr. (1989): Temeljna stijena gradskih zidina između tvrđave Bokar i predjela na Andriji – Dubrovnik, Izvještaj o provedenim istražnim radovima i prijedlog sanacije, Arhiva Geoexperta, 65 str., Zagreb.

## The Impact of Structural-petrographic, Hydrodynamic and Other Factors on Rock Weathering in the Foundation of the Dubrovnik Ramparts

J. Tomašić and V. Andročec

Resistivity, stability and durability of rock mass in the foundation of the ramparts enclosing Dubrovnik have been studied in the conditions of abrasion, erosion and corrosion by sea water.

Rocks in the foundation of the Dubrovnik ramparts in the Bokar tower and easterly, are late-diagenetic, cataclysed and milonitized, partly recrystallized crypto-micro to macrocrystalline dolomite, intensively intersected by the discontinuities with calcite filling. The calcite filling of discontinuities generated by the youngest tectonic action is one of the basic causes of the fast rock destruction. Much faster solution and desintegration of the calcite filling result in appropriate conditions favoured also by the geometry of structural fabric, i.e. by the incline of cracks and the position of tectonic zones (figs. 1, 2, 3 and 4), and therewith favourable for separating the blocks of rock mass into the sea, primarily by the action of wave power and air compression along the cavities and discontinuities.

Differential and progressive effect of particular processes in the presented conditions in this work refers to a specific structural-petrographic composition, hydrodynamic and physical chemo-corrosive influence of sea water (fig. 5).

The whole knowledge about the effect of particular factors was acquired predominantly on the basis of laboratorial and field explorations of the coastal rocks in the surroundings of the Bokar Tower.

All the mentioned processes occur in a complex environment, in this case in the coastal rocks exposed to the action of sea water, waves, sun, rain and probably very rarely of frost, too.

Among many of the mentioned factors influencing coastal rocks, the investigation of structural fabric features is especially important. On the surface excavations, as well as on the coastal rocks there are structural fabrics considerably influencing the morphological characteristics. Consequently, some causes of steep banks' existence have to be looked for in the position of structural fabric characterized by a specific discontinuity position (slope and strike), in a way as the occurrence of steep excavation fronts are explained, but also at all others open profiles in hard rock massives.

In that regard, some useful experiences which would be applied on coastal rocks have been acquired in the investigations of slope stability by hard rock massives on open excavations, considering the orientation of structural fabric in relation to the exploitation direction (Tomašić, 1989.) These investigation indicate, that naturally most stable rock massives are cut approximately vertically to the strike of carbonate sediments.

Therefore, some causes of the durability of steep stone banks have to be searched for, among other things in the convenient position of structural fabric in relation to the aggressive force of waves.



The analyzed and investigated case of structural-petrographic fabric of the rock mass implies, that the application of the stability analysis according to the method by Hoek and Bray (1974) is impossible, because the vaves break particular blocks which would be stable in some other conditions regarding their geometry and the angle of friction.

It is necessary to emphasize particularly the destructive action of wind waves as periodical occurrence in the form of hydro-dynamic load of the naturally vertical rock. This load depends on the kind and speed of wind, height and power of waves, but also on the kind and morphology of the rock.

Maximal pressures for different heights and kinds of fractures depending on the rock, illustrated in Table 4, refer to considerable differences in load. As already mentioned, structural-petrographic fabric of the described rock is characterized by cavities which here and there cut into the massive, creating the conditions for the »compression shock«, i.e. in the wave recurrence creating the subpressure that is the »implosion« effect being ten to twenty times stronger than the »hammer shock« action.

Especially important are therefore the pressure values obtained according to Denny (1951), which in such conditions amount 0,823; 1,375; 1,924 and 2,472 MN/m<sup>2</sup> for the waves of 3, 5, 7 and 9 m for a broken wave (mean maximum) – in other words, in still more expressive conditions for a broken wave (possibly the biggest one), they amount 2,94; 4,91; 6,87 and 8,83 MN/m<sup>2</sup>.

The obtained pressure values are approaching the strengths of the weakened parts of the rock mass in the foundation of the Dubrovnik ramparts. On the basis of field observations it was estimated, that in the total rock mass investigated, there are to 5% weakened parts with the strength under 10 MN/m<sup>2</sup>.

Chemo-corrosive and physical action of sea water on the rocks of similar composition have been often studied in laboratorial conditions up to now. The results of such investigations are useful for the explanation of character and intensity of similar and even the same processes in natural conditions of destruction.

The influence of the sea-water salt on limestones and dolomites was investigated by Crnković (1972). On this occasion the biggest damages of samples treated by the solution of natrium chloride were found, particularly on limestones in connection with calcite matrix and calcite filling in discontinuities. The dolomite sample has undergone very small changes only along thin discontinuities filled with calcite.

Each climate change, i.e. moistening and drying with calcite veinlets of intersected dolomite with the content of aggressive components in the pore space, in this case it is natrium chloride, reactivates these components, their dissociation and the chemo-corrosive action on dolomite, which intensifies the stone destruction. By hardness decrease and porosity increase the reabsorption ability of damaging agents is intensified.

According to Crnković and Rokić (1981), the intergranular connection is getting weaker by alternating warming up and drying of water-saturated stone, and physical changes occur in the pore space of stone. These changes are explained by contraction and extension of calcite by warming up.

The action of intensity of contraction and extension of calcite along the axis »C« i.e. vertically to it was discussed by Winkler (1973). According to him, at temperature from 50°C to 60°C the pressures in calcite from 300 to 400 bars (30 to 40 MN/m<sup>2</sup>) were established.

According to Winkler (1973) it was proved, that by the alternating moistening and drying of stone at increased temperatures, water spreads filling the closed pore space with pressure increase. The strain from 300 to 400 bars (30 to 40 MN/m<sup>2</sup>) can develop by this occurrence at the temperature from 50°C to 60°C.

At the same time it also comes to calcite expansion of cca 0,15%. These processes also lead to less intensive connection between individual crystals of dolomite and calcite, to the increase of intergranular porosity and there with to stone hardness weakening.

Such big pressures are probably possible only in the surface part of stone which is more intensively exposed to thermal warming up. Creation of a closed pore space is possible due to salt crystallization in the surface part, too. If the pores are well connected with the stone surface, these strains are considerably smaller.

This closing and opening of the pore space essentially influence »breathing« of a rock, whereby the chemo-corrosive action is rushed as well as the influence on the intensity of pore pressure, which can strongly act the destruction of coastal rocks.

One of significant factors in stone destruction is generation of pressures due to the salt crystallization in stone. These pressures (Winkler, 1973) considerably increase, if salts crystallize from very concentrated and saturated solutions. It has been found, for example, that at different levels of NaCl supersaturation and temperature from 0° to 50°C the pressures can be created from 554 to 3737 atmospheres (55 to 373 MN/m<sup>2</sup>). In nature, only pressures in the field of lower limit can occur, which happens in the conditions of capilar porosity close to the stone surface. These pressures are sufficient to cause gradually the deformations of minerals and rocks, and to influence the intergranular porosity and chemo-corrosive action of sea water.

The intensified coast corrosion in the intertidal zone (between the lowest and the highest tide level) was discussed by Benac (1979) in his investigations of morphogenesis of steep banks. This exactly is the zone where the influence of all the mentioned factors is especially reflected on the creation of morphological characteristics of steep banks, i.e. cleaves.

Coastal rocks in the intertidal zone are exposed to a strong and fast action of different organisms. Their action is supposed to be primarily of biochemical and mechanical nature. A large number of different organisms perforate and destruct the rocks by chemical secretion and mechanical activity. According to Ansell (1969), Warm (1969) and Cobb (1969), (from Winkler, 1973) the development of individual organisms amount yearly 10 to 15 mm. These data refer to carbonate rocks, first of all limestones. All these processes in dolomites are supposed to occur with considerably less intensity due to a more dense crystal lattice of dolomite minerals and probably to the presence of magnesium which, being an element in larger quantities, is not favourable for some organisms.

The conclusion can be finally made, that the cause of weakening and destruction of the explored coastal rocks is the complex and cyclic action of a number of the mentioned factors with different intensity. The cases of broken and crashed down parts of the rock mass, in the form of smaller or bigger blocks, can be noticed at some places on exploration locations, in recesses confined by discontinuities with the slope toward sea, but also toward the rock.