

# Metodologija ocjene stanja kamene zaštite lukobrana

Marko Pršić, Eva Ocvirk, Duška Kunštek

## Ključne riječi

lukobran Kaše, luka Dubrovnik, kamena zaštita (školjera), ispitivanje, valna klima

## Key words

Kaše, port of Dubrovnik, stone (riprap) protection, testing, wave climate

## Mots clés

Kaše, port de Dubrovnik, protection par enrochement, essais, climat des vagues

## Ключевые слова

волнорез Каше, порт г. Дубровника, каменная защита, испытание, волновой климат

## Schlüsselworte

Hafendamm Kaše, Hafen Dubrovnik, Steinschutz ("školjera"), Untersuchung, Welleklima

M. Pršić, E. Ocvirk, D. Kunštek

Prethodno priopćenje

## Metodologija ocjene stanja kamene zaštite lukobrana

Opisuje se ispitivanje provedeno u svrhu određivanja stanja kamene zaštite (školjere) lukobrana Kaše koji je kroz povijest štiti od morskih valova luku Dubrovnik. Lukobran je oštećen i treba ga sanirati. Osim određivanja stanja školjere ispitivanje je provedeno i radi utvrđivanja valne klime ispred lukobrana. Na temelju dugoročne valne klime definirano je stanje lukobrana u odnosu na projektno. Zaključeno je da školjeru treba zamijeniti ili dodati krupniju na cijelom pokosu.

M. Pršić, E. Ocvirk, D. Kunštek

Preliminary note

## Methodology for assessing breakwater riprap condition

The testing conducted to determine condition of riprap at Kaše breakwater, which has been protecting Dubrovnik port against wave action through many centuries, is described. The breakwater is damaged and has to be remedied. In addition to inspection of riprap condition, the wave climate in front of the breakwater was also analyzed. The breakwater condition as related to design state was defined based on the long-term wave climate information. It was concluded that riprap must either be replaced or strengthened by adding bigger stone blocks along the entire slope.

M. Pršić, E. Ocvirk, D. Kunštek

Note préliminaire

## Méthodologie pour estimer la condition d'enrochement devant le brise-lames

Les essais conduits afin de déterminer la condition d'enrochement devant le brise-lames de Kaše, qui a protégé le port de Dubrovnik contre l'action des vagues pendant un grand nombre de siècles, sont décrits. Le brise-lames est endommagé et doit être réparé. En plus de l'analyse de la condition d'enrochement, l'analyse a également porté sur le climat des vagues devant le brise-lames. L'état du brise-lames est comparé avec la condition projetée sur la base des informations à long terme sur le climat des vagues. Il a été conclu que l'enrochement doit être remplacé ou renforcé en ajoutant les blocs de pierre plus grands tout au long du talus.

М. Пршич, Е. Оцвирк, Д. Кунштек

Предварительное сообщение

## Методология оценки состояния каменной защиты волнореза

Описывается испытание, проведенное с целью определения состояния каменной защиты волнореза Каше, в течение длительного времени защищавшего от морских волн порт г. Дубровника. Волнорез имеет повреждения и требует санации. Помимо установления состояния каменной защиты испытание проводилось и с целью определения волнового климата перед волнорезом. На основании долгосрочного волнового климата дефинировано состояние волнореза по отношению к проектному. Сделано заключение, что необходимо либо произвести замену каменной защиты, либо добавить более крупную на всем склоне.

M. Pršić, E. Ocvirk, D. Kunštek

Vorherige Mitteilung

## Methodologie der Zustandsbewertung des Steinschutzes von Hafendämmen

Man beschreibt eine Untersuchung des Hafendamms ("školjera") Kaše der durch die Geschichte den Hafen Dubrovnik vor Seewellen schützte, mit dem Ziel den Zustand des Steinschutzes festzustellen. Der Hafendamm ist beschädigt und muss saniert werden. Ausser der Festlegung des Zustands des Damms wurde die Untersuchung auch im Ziel der Festlegung des Wellenklimas vor dem Damm ausgeführt. Auf Grund der langjährigen Wellenklima definierte man den Zustand des Damms im Verhältnis zum Entwurf. Man schliesst dass der Steinschutz ausgewechselt werden sollte oder dass man an der ganzen Böschung einen groberen Steinschutz hinzufügen muss.

Autori: Prof. dr. sc. **Marko Pršić**, dipl. ing. građ.; dr. sc. **Eva Ocvirk**, dipl. ing. građ. i dipl. ing. mat.; dr. sc. **Duška Kunštek**, dipl. ing. građ., Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb

## 1 Uvod

Lukobran Kaše smješten je u akvatoriju gradske luke Dubrovnik između lukobrana Porporele i Lazareta. Izgradio ga je gradski inženjer Paskoje Miličević kao vertikalni zidovi su od klesanih kamenih blokova, a ispunsko zide od lomljenog kamena vezanog povijesnim vezivom od gline i vapna. Smjer pružanja mu je gotovo sjever – jug (slika 1.). Duljina lukobrana Kaše iznosi oko 79,3 m, a širina varira od 7,5 m do 10,9 m. U poprečnom smislu sastoji se od povijesnoga vertikalnog lukobrana temeljnog na morskom dnu od marinskog sedimenta dubine – 7 m (i manje) na koji je s morske (istočne) strane naknadno prislonjen kameni nasip s primarnom kamenom oblogom (školjerom) od relativno malih kamenih blokova veoma blagog nagiba pokosa prema moru od 1:2,4.



Slika 1.a Makrolokacija i mikrolokacija lukobrana Kaše



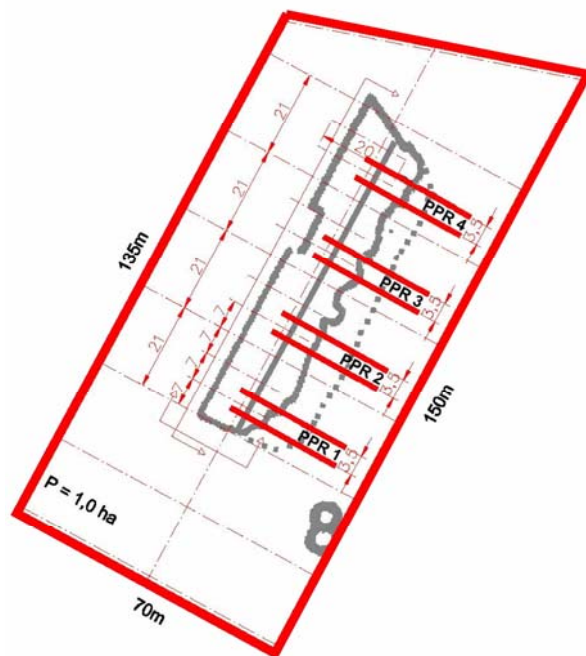
Slika 1.b Pogled na lukobran Kaše

## 2 Stanje školjere

Opisat će se ispitivanje provedeno u svrhu definiranja stanja školjere koja je ugrađivana kroz povijest s južne (morske) strane lukobrana Kaše.

### 2.1 Lokacija i opseg terenskog ispitivanja

Terenska su ispitivanja provedena na četiri kontrolna profila školjere naznačena na priloženoj situaciji (slika 2.). Između tih profila ispitivanje nije provedeno pod pretpostavkom da su uvjeti između profila slični onima unutar profila. Svaki profil čini trak širine 3,5 m od krune do nožice pokosa, a svaki se profil još dijeli i posebno evidentira na dvije sekcije, i to: pokos nad morem i pokos pod morem. Za svaku se sekciju zasebno tablično i grafički prikazuju sve granulometrijske značajke.



Slika 2. Položaj profila PPR1 do PPR4 na lukobranu Kaše

### 2.2 Konstrukcija granulometrijske krivulje

Opažanja o školjeri bilježila su se u za to određene formule preko promjera kamenog bloka,  $D$ , koji su ovisno o rasponu svrstavani u razrede kojima je izrazom

$$W = \rho_{kam} \cdot D^3 \cdot \frac{\pi}{6} = 0,524 \cdot \rho_{kam} \cdot D^3 \quad (1)$$

pridružena srednja masa, uz srednju gustoću kamenog bloka  $\rho_{kam} = 2,6 \text{ t/m}^3$ .

Na temelju opažanja definirani su grafovi granulometrijskih krivulja po sekcijama profila prikazani na slikama 3. i 4., uz označene standardne granice širokograduirane granulometrijske krivulje primarnog sloja školjere [2].

Prema pravilima za kakvoću granulometrijske krivulje školjere može se načiniti kontrola kvalitete postojeće školjere. Najprije je potrebno odrediti je li postojeća školjera usko, široko ili vrlo široko građuirana. Za sve presjeke po sekcijama definirana je gornja i donja granica za široko građuiranu školjeru na osnovi očitanih vrijednosti  $W_{50\%}$  iz granulometrijskih krivulja. Osim toga, za svaku su granulometrijsku krivulju očitane mase blokova  $W_{85\%}$ ,  $W_{50\%}$ ,  $W_{15\%}$  te su proračunani nominalni promjeri blokova  $D_{85\%}$ ,  $D_{50\%}$ ,  $D_{15\%}$  prema izrazu:

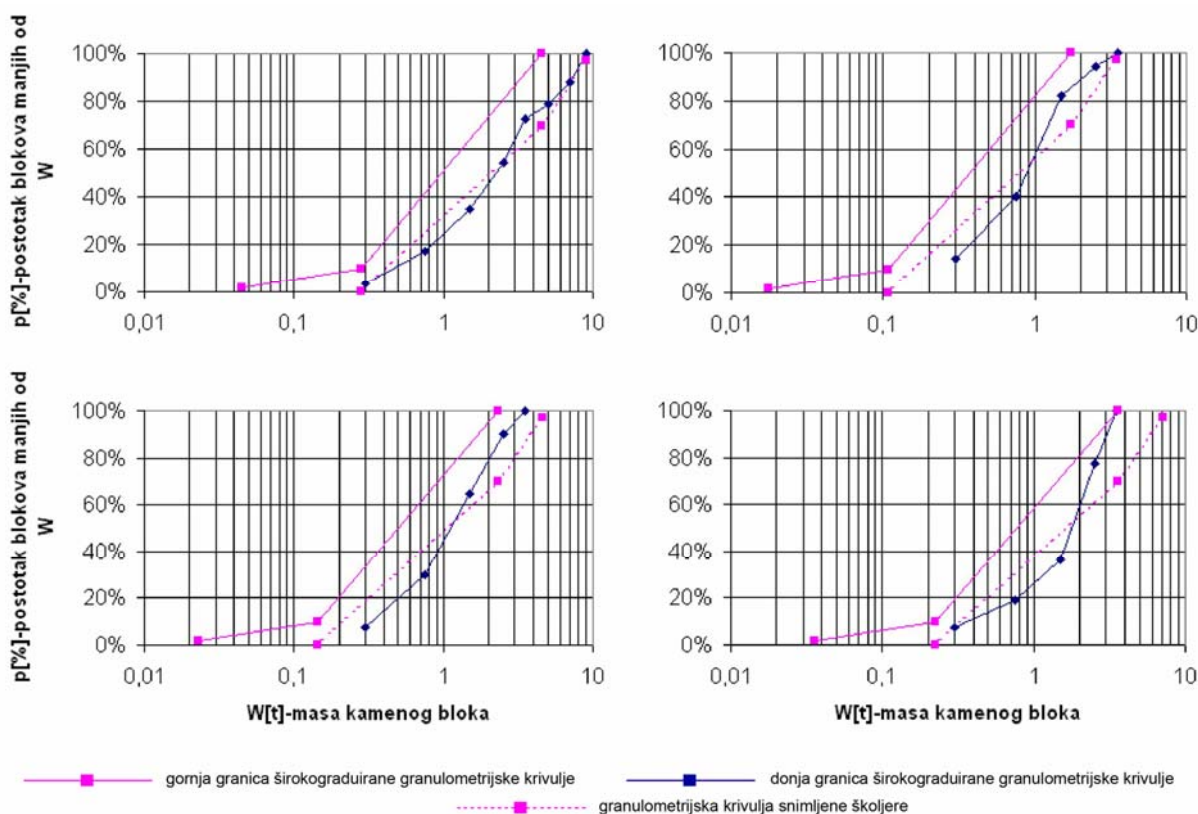
$$D_{x\%} = \left[ \frac{6}{\pi} \cdot \left( \frac{W_x}{\rho_{kam}} \right) \right]^{1/3} = 1,24 \cdot \left( \frac{W_x}{\rho_{kam}} \right)^{1/3}. \quad (2)$$

U nastavku se za svaku granulometrijsku krivulju očita parametar granulometrijske širine:

$$pgš = \frac{D_{85\%}}{D_{15\%}}. \quad (3)$$

Rezultati analize širine granulometrijske krivulje prikazani su u tablici 1.

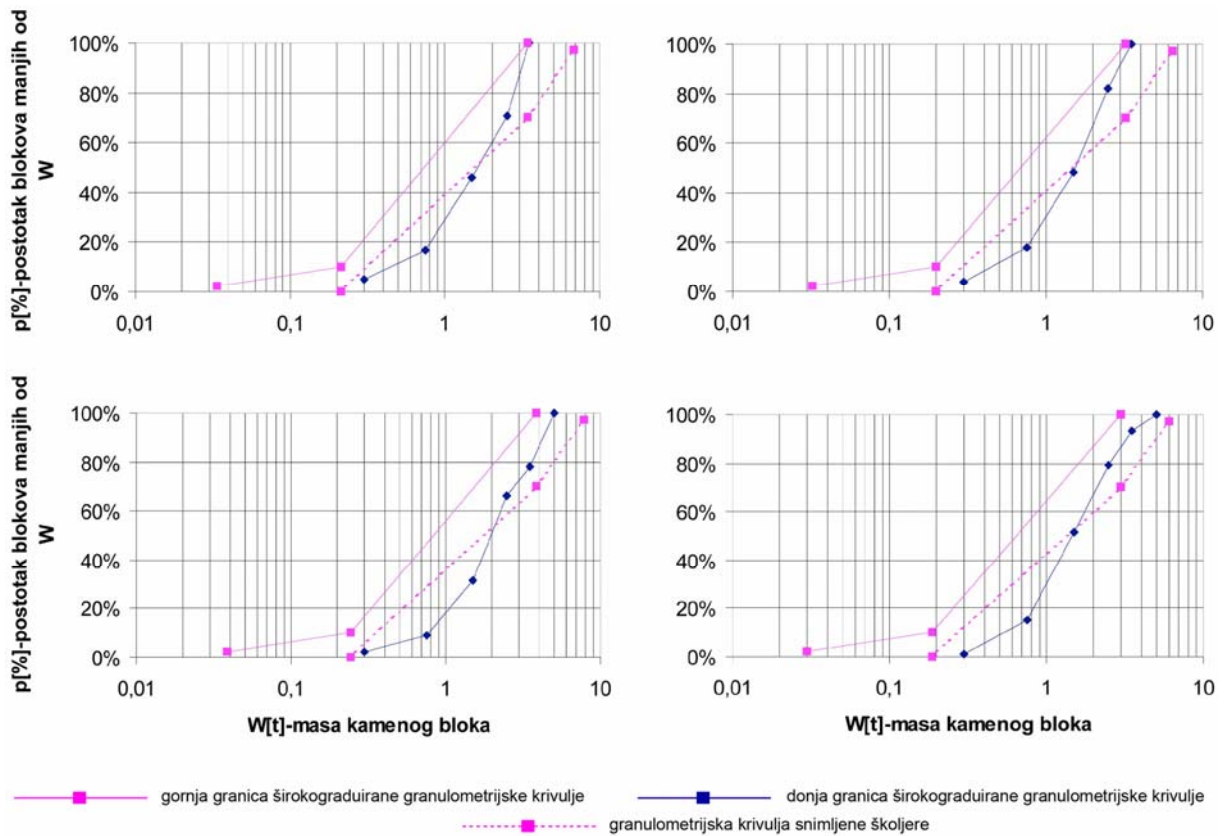
Prema suvremenom pravilu struke ugrađena školjera je troškovno optimalna ako je usko građuirana. Iz razloga što je školjera u Kašama rađena u prošlosti i višekratno "zanatski" popunjavana ispitivanje je pokazalo da je ona široko građuirana.



Slika 3. Granulometrijska krivulja školjere nad morem po profilima (gornji red PPR1 i PPR2, donji red PPR3 i PPR4)

Tablica 1. Određivanje širine granulometrijske krivulje

| Lokacija |           | $W_{85\%}$ | $W_{50\%}$ | $W_{15\%}$ | $D_{85\%}$ | $D_{50\%}$ | $D_{15\%}$ | $pgš=D_{85\%}/D_{15\%}$ | $pgš<1,35$ | $1,35<pgš<2$ | $pgš>2$   |
|----------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------------------|------------|--------------|-----------|
|          |           | [t]        | [t]        | [t]        | [m]        | [m]        | [m]        | ugrađeno                | usko       | široko       | vrlo šir. |
| PPR 1    | nad morem | 6,1        | 2,25       | 0,63       | 1,65       | 1,18       | 0,77       | 2,13                    |            |              | x         |
|          | pod morem | 2,95       | 1,7        | 0,66       | 1,29       | 1,08       | 0,79       | 1,65                    |            | x            |           |
| PPR 2    | nad morem | 1,7        | 0,87       | 0,31       | 1,08       | 0,86       | 0,61       | 1,76                    |            | x            |           |
|          | pod morem | 2,65       | 1,6        | 0,61       | 1,25       | 1,06       | 0,77       | 1,63                    |            | x            |           |
| PPR 3    | nad morem | 2,3        | 1,15       | 0,41       | 1,19       | 0,95       | 0,67       | 1,78                    |            | x            |           |
|          | pod morem | 3,9        | 1,95       | 0,89       | 1,42       | 1,13       | 0,87       | 1,64                    |            | x            |           |
| PPR 4    | nad morem | 2,8        | 1,8        | 0,54       | 1,27       | 1,10       | 0,73       | 1,73                    |            | x            |           |
|          | pod morem | 2,8        | 1,5        | 0,74       | 1,27       | 1,03       | 0,82       | 1,56                    |            | x            |           |



Slika 4. Granulometrijska krivulja školjere pod morem po profilima (gornji red PPR1 i PPR2, donji red PPR3 i PPR4)

### 2.3 Procjena poroznost i obujamske mase

Poroznost školjere određuje se izrazom :

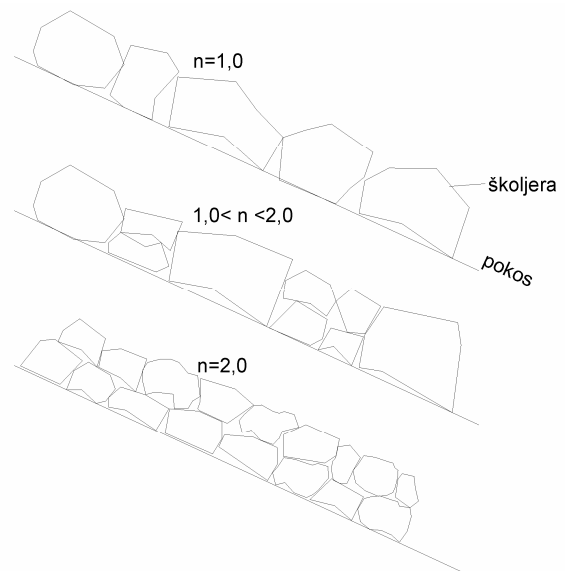
$$p[\%] = 1 - \frac{N_r}{A \cdot n \cdot k_{\Delta}} \left( \frac{\rho_{kam}}{W_{50\%}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (4)$$

gdje je  $p$  [%] poroznost školjere,  $A$  [m<sup>2</sup>] ploština pokosa sekcije,  $n$  broj blokova u ispitanom sloju školjere. Budući da se vidi i da se može prebrojiti samo površinski sloj ugrađene školjere, provodi se redukcija ukupno prebrojenog broja blokova na broj blokova u jednom sloju školjere. U slučaju lukobrana Kaše zbog široke je granulacije školjere izgled presjeka poput onog na slici 5. (sredina) te se uzima kompromisna vrijednost  $n = 1,5$ . Nadalje,  $k_D = 1,1$  je koeficijent sloja,  $\rho_{kam} = 2,6$  [t/m<sup>3</sup>] gustoća mase kamena,  $W_{50\%}$  [t] masa 50 %-tnog bloka iz granulometrijske krivulje i  $N_r$  broj kamenih blokova izbrojen na površini temeljen na blokovima promjera >0,4 m.

Prosječna obujamska masa školjere, prema pravilu struke, treba biti  $g_{kam}^{zapr} = 1,6 \pm 0,1$  [t/m<sup>3</sup>], a određuje se prema izrazu:

$$\gamma_{kam}^{zapr} = \left( 1 - \frac{p}{100} \right) \cdot \rho_{kam} \quad (5)$$

gdje je  $g_{kam}^{zapr}$  [t/m<sup>3</sup>] obujamska masa školjere i  $\rho_{kam}$  [t/m<sup>3</sup>] gustoća mase kamena školjere.



Slika 5. Definićijska skica koeficijenta broja blokova u ispitanom sloju školjere "n"

Na osnovi podataka iz formulara opažanja veličine kamenih blokova, podataka iz granulometrijskih krivulja te procjene tlocrtne ploštine pojedinih profila po secki-

Tablica 2. Tablica proračuna poroznosti  $p$  [%] i objamske mase  $g_{kam}^{zapr}$  školjere

| LOKACIJA |           | Propisano |                               | Masa 50% bloka iz granul. krivulje | Broj kamenih blokova izbrojen na površini $\geq 0,4m$ | Ploština traka (sekcije) | Izmjereno |                               |
|----------|-----------|-----------|-------------------------------|------------------------------------|---|--------------------------|-----------|-------------------------------|
|          |           | $p$       | $Y_{kam}^{zapr}$ (bez uzgona) | $W_{50\%}$                         | $N_r$   | $A$                      | $p$       | $Y_{kam}^{zapr}$ (bez uzgona) |
|          |           | [%]       | [t/m <sup>3</sup> ]           | [t]                                | [kom]   | [m <sup>2</sup> ]        | [%]       | [t/m <sup>3</sup> ]           |
| PPR 1    | nad morem | 35-42     | 1,5-1,7                       | 2,25                               | 45  | 31,50                    | 21%       | 2,0                           |
|          | pod morem | 35-42     | 1,5-1,7                       | 1,7                                | 50  | 39,90                    | 43%       | 1,5                           |
| PPR 2    | nad morem | 35-42     | 1,5-1,7                       | 0,87                               | 71  | 39,55                    | 48%       | 1,4                           |
|          | pod morem | 35-42     | 1,5-1,7                       | 1,6                                | 42  | 39,20                    | 53%       | 1,2                           |
| PPR 3    | nad morem | 35-42     | 1,5-1,7                       | 1,15                               | 63  | 37,45                    | 41%       | 1,5                           |
|          | pod morem | 35-42     | 1,5-1,7                       | 1,95                               | 61  | 41,65                    | 27%       | 1,6                           |
| PPR 4    | nad morem | 35-42     | 1,5-1,7                       | 1,8                                | 59  | 38,15                    | 27%       | 1,7                           |
|          | pod morem | 35-42     | 1,5-1,7                       | 1,5                                | 47  | 33,95                    | 42%       | 1,5                           |

jama definirana je tablica poroznosti  $p$  [%] i objamske mase  $g_{kam}^{zapr}$  [t/m<sup>3</sup>] školjere (tablica 2.). Kako se mase kamenih blokova procjenjuju, i ne zna se ništa o potpovršinskom sloju školjere, ovi parametri nisu precizno određeni.

#### 2.4 Procjena kakvoće upetosti (stabilnosti) površinskog sloja školjere

Za široko graduiranu školjeru lukobrana Kaše u nastavku je provedeno sljedeće ispitivanje. Ispitano je smanjenje koeficijenta stabilnosti postojeće školjere  $K_D$  u odnosu na preporučeni koeficijent [2] i to na temelju procjene kakvoće upetosti. Propisani koeficijent stabilnosti standardno uklještena stabilne širokograduirane školjere  $K_{D=0}$  definiran je tablicom 3. i ne odnosi se na specijalno kvalitetan način postave nego na standardan "kamenomet".

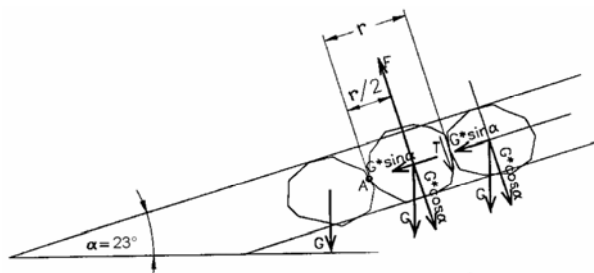
Tablica 3. Orijentacijske vrijednosti koeficijenta stabilnosti  $K_D$  širokograduirane školjere za konstantnu valnu visinu, za različite upetosti [2]

| Kamena širokograduirana školjera                                      | Trup lukobrana nagib pokosa 1:1,5 nelomljeni valovi |
|---|---|
| $K_{D=0}$ "propisani" za potpuno uklještenu širokograduiranu školjeru | 2,5   |
| $K_{D>0}$ za u potpunosti neuklještenu širokograduiranu školjeru      | 1,65  |
| $K_{D>>0}$ kod sloma lukobrana (vidi se filter na pokosu)             | 0   |

To znači slučajno slaganje pojedinačnih kamenih blokova dizalicom na pokos nagiba 1:1,5 ili blaži, od nožice prema kruni, bez njihova posebnog namještanja i dirigiranja ronioaca. Položeni se blokovi na prethodno postavljene moraju oslanjati na najmanje 3 točke. Ugrađeni

blokovi ne smiju titrati pod valnim opterećenjem, ne smiju se držati samo trenjem, tj. moraju biti upeti i moraju formirati zaštitni sloj iznad ostalih slojeva lukobrana u vidu dva bloka po debljini. Kod takve školjere  $K_D$  daje najpovoljniju veličinu kamenih blokova uz oštećenje od 0 do 5 % kod projektnog 100-godišnjeg žestokog stanja mora, pa se takav koeficijent stabilnosti širokograduirane školjere označava sa  $K_{D=0}$ , tj. "bez oštećenja". Oštećenje školjere definira se postotkom ispalih blokova s pokosa koji se otkotrljaju niz pokos do dna mora.

Analiza ovisnosti koeficijenta stabilnosti  $K_D$  neke ugrađene širokograduirane školjere počinje od pretpostavke da primarni (površinski) sloj na pokosu lukobrana ima 2 reda blokova i da se na pokosu ne vidi sitniji filter materijal ili sasvim sitna jezgra. Tada koeficijent  $K_D$  može biti smanjen samo zbog slabe upetosti. Da bi se mogla procijeniti stabilnost školjere hidrodinamički opterećene valovima, potrebno je procijeniti uklještenost pojedinog bloka školjere, odnosno njezina površinskog sloja. Ovdje se upetost procjenjuje na definiranim profilima (slika 2.) procjenom broja kontakata bloka školjere sa susjednim blokovima istoga sloja (površinska ploha pokosa). Za svaki blok unutar ispitnog polja širine 3,5 m procjenjuje se s koliko je susjednih blokova u kontaktu.



Slika 6. Skica sila na bloku dobro upete obloge

Ne broje se kontakti bloka promjera manjeg od 0,4 m. Kontaktom se ne smatra dodir s blokovima donjeg sloja. [3]

Potom je prikazana teorijska osnova određivanja koeficijenta  $K_D$  na osnovi procijenjenog broja kontakata.

Na slici 6. prikazan je raspored sila koje djeluju na stabilnost bloka školjere. Nagib pokosa je jednak srednjem nagibu školjere lukobrana Kaše ( $\alpha = 23^\circ$ ). Sila F je komponenta hidrodinamičke sile vala koja djeluje na čupanje bloka obloge i ugrožava mu stabilnost. Njoj se suprotstavljaju vlastita težina G i trenje sa susjednim blokom T. Konzervativno, za slučaj uklještenog bloka, u proračun se uzima doprinos stabilnosti samo gornjega susjednog bloka. Za slučaj neupetosti taj se doprinos ne uzima i hidrodinamičkoj sili suprotstavljat će se samo vlastita težina bloka.

Analizom stabilnosti za kritičan slučaj kada hidrodinamičko opterećenje djeluje okomito na pokos i kada je moguće prevrtanje bloka oko točke A, za slučaj upetosti slijedi:

$$F_{D=0} = \frac{\rho g H_{proj}^3}{k_{D=0} \left( \frac{\rho^{kam}}{\rho^{mora}} - 1 \right)^3 \cdot ctg \alpha} (\cos \alpha + 2 f_t \sin \alpha), \quad (6)$$

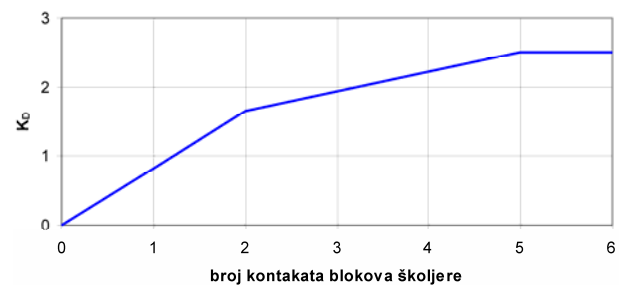
a za slučaj upetog bloka analiza stabilnosti daje izraz

$$F_{D>0} = \frac{\rho g H_{proj}^3}{k_{D>0} \left( \frac{\rho^{kam}}{\rho^{mora}} - 1 \right)^3 \cdot ctg \alpha} \cos \alpha. \quad (7)$$

Sile  $F_{D=0}$  i  $F_{D>0}$  su hidrodinamičke sile na blok obloge na pokosu nagiba 1:2,4 za slučaj upetog i neupetog stabilnog bloka, a  $f_t$  koeficijent trenja kamena o kamen ( $f_t = 0,6$ ). U gornjem izrazu uobičajeno je za projektnu valnu visinu koristiti se desetinskom valnom visinom povratnog razdoblja 100 godina,  $H_{proj} = H_{1/10}^{100god}$ . Ako na upeti i neupeti istovrsni blok školjere djeluju valovi iste visine  $H_{proj}$ , oni izazivaju iste hidrodinamičke sile:  $F_{D=0} = F_{D>0}$ .

Odatle slijedi da je za istu veličinu kamenog bloka vrijednost koeficijenta  $K_{D=0}$  za uklještenu školjeru nagiba 1:2,4 za 1,51 puta veći nego li  $K_{D>0}$  za neupetu školjeru, odnosno da bi neuključeni blok morao biti oko 51 % teži od upetog da dostigne istu stabilnost kao upeti blok. Prema tablici 3. slijedi da je  $K_{D>0}$  za širokograduiranu neupetu školjeru na tijelu lukobrana kod nelomljenih valova:  $K_{D>0} = 2,5/1,51 = 1,65$ . Neupeti stabilni blok javlja se kod najmanje 2 kontakata razmatranog bloka na donjoj strani pokosa. Pretpostavlja se da je potpuna upepost postignuta kad neki blok ima 5 i više kontakata s okolnim blokovima i tada je postignut  $K_{D=0}$  koji odgo-

vara potpuno stabilnom bloku bez oštećenja. Prema tablici 3. slijedi da je  $K_{D=0}$  za širokograduiranu uklještenu školjeru na tijelu lukobrana kod nelomljenih valova:  $K_{D=0} = 2,5$ . Blok na pokosu bez ijednog kontakta, a iste veličine kao i upeti blok na tom pokosu, bit će nestabilan. Takav blok morao bi biti beskonačno teži od upetog da dostigne istu stabilnost, a njegov  $K_D$  morao bi težiti nuli, tj.  $K_{D>0} \rightarrow 0$ . Na temelju ovako definiranih relacija između koeficijenta stabilnosti  $K_D$  i broja kontakata sa susjednim blokovima linearnom interpolacijom načinjen je dijagram odnosa " $K_D$  - broj kontakata", prikazan na slici 7.



Slika 7. Ovisnost koeficijenta stabilnosti  $K_D$  za širokograduiranu uklještenu školjeru na tijelu lukobrana kod nelomljenih valova o broju kontakata sa susjednim blokovima [3]

Na osnovi terenski ustanovljenih podataka o 2, 3, 4, 5 i više brojeva kontakata proračuna se prosječan broj kontakata za svaki profil i pojedinu sekciju (u prosjek se ne uzimaju 0 i 1 kontakt jer se smatra da nisu stabilni na pokosu i ne pridonose bitno stabilnosti cjeline pokosa). Sa tako određenim brojem kontakata s pomoću grafa na slici 7. odredi se vrijednost koeficijenta  $K_D$ , za svaki pojedini profil (tablica 4.).

Tablica 4. Očitane vrijednosti koeficijenta  $K_D$  na osnovi procijenjenih prosječnih brojeva kontakata  $N$  i pripadne 50%-tne težine  $W_{50\%}$  blokova školjere

| Lokacija | Prosječan broj kontakata $N$ | $K_D$ | $W_{50\%}$ [t] |
|----------|------------------------------|-------|----------------|
| PPR 1    | nad morem                    | 2,68  | 1,8            |
|          | pod morem                    | 2,46  | 1,7            |
| PPR 2    | nad morem                    | 2,71  | 1,9            |
|          | pod morem                    | 2,53  | 1,6            |
| PPR 3    | nad morem                    | 2,98  | 1,9            |
|          | pod morem                    | 2,63  | 2,0            |
| PPR 4    | nad morem                    | 2,96  | 1,8            |
|          | pod morem                    | 2,89  | 1,5            |
| PROSJEK  | 2,73                         | 1,9   | 1,6            |

### 2.5 Stanje školjere

Konačan prikaz granulometrijskih značajki školjere lukobrana Kaše, koje su definirane u ovom radu, dan je u tablici 5.

Za kontrolu stanja školjere proračunani  $K_D$ , uz projektno stogodišnje žestoko stanje mora ( $H_{proj} = H_{1/10}^{100god}$ ), uvrsti se u Hudsonovu formulu (8) i proračuna se potrebna masa pojedinačnog kamenog bloka površinske školjere, a rezultati su prikazani u tablici 7.

Tablica 5. Prikaz granulometrijskih značajki školjere lukobrana Kaše

| Lokacija |           | IZMJERENO |            |                                   |                     |       |
|----------|-----------|-----------|------------|-----------------------------------|---------------------|-------|
|          |           | $K_D$     | $W_{50\%}$ | parametar granulometrijske širine | $\rho_{kam}^{zapr}$ | $P$   |
|          |           | [-]       | [t]        |                                   | [t/m <sup>3</sup> ] | [%]   |
| PPR 1    | nad morem | 1,8       | 2,25       | vrlo široko                       | 2,0                 | 21,4% |
|          | pod morem | 1,8       | 1,70       | široko                            | 1,5                 | 42,8% |
| PPR 2    | nad morem | 1,9       | 0,87       | široko                            | 1,4                 | 47,6% |
|          | pod morem | 1,8       | 1,60       | široko                            | 1,2                 | 53,0% |
| PPR 3    | nad morem | 1,9       | 1,15       | široko                            | 1,5                 | 40,8% |
|          | pod morem | 1,8       | 1,95       | široko                            | 1,6                 | 26,7% |
| PPR 4    | nad morem | 1,9       | 1,80       | široko                            | 1,7                 | 26,6% |
|          | pod morem | 1,9       | 1,50       | široko                            | 1,5                 | 41,9% |

Hudsonova formula oblika je

$$W = \frac{\rho^{kam} g H_{proj}^3}{K_D \left( \frac{\rho^{kam}}{\rho^{mora}} - 1 \right)^3 ctg \alpha} \quad (8)$$

gdje je  $W$  težina pojedinačnog elementa školjere,  $H_{proj}$  projektna valna visina,  $\gamma_r$  jedinična težina elementa obloge,  $K_D$  koeficijent stabilnosti obloge "bez oštećenja", a  $\alpha$  kut nagiba pokosa izloženog moru mjeren od horizontale.

Ako je ta masa veća od mase 50 %-tnog postojećeg bloka ( $W_{50\%}$ ) to znači da postojeća školjera nije stabilna za projektno stogodišnje žestoko stanje mora. Ako je ista situacija za sve ispitane profile, potrebno je sanirati lukobran dodavanjem novog sloja školjere veće krupnoće na pokosu. Pritom bi dodavanje novog sloja školjere na cijelom pokosu od dna do krune nešto izmijenilo izgled Kaša, pa bi bilo bolje dio postojeće školjere u gornjem dijelu pokosa (npr. od krune do kote -4 [m n.m.]) presložiti na dublji dio pokosa, a na mjestu oduzete školjere u gornjem dijelu pokosa dodati krupnije blokove školjere stabilne kod stogodišnjega žestokog stanja mora. Isto tako moguće je uvrštavanjem procijenjene težine odrediti povratni period valne visine koju bi školjera u postojećem stanju mogla podnijeti.

### 3 Prognoza dugoročne značajne valne visine u dubokom moru

Kut izloženosti akvatorija luke Dubrovnik valovima proteže se od smjerova ESE do WSW, a za potrebe analize podijeljen je na dva sektora: *Sektor I*: ESE-SE i *Sektor II*: SSW-WSW. Između *Sektora I* i *II* je otok Lokrum koji djelomično štiti dubrovačku luku od S valova.

U tablici 1. prikazane su usvojene prognozirane dugoročne značajne valne visine u dubokom moru (na mjestu točke P1 (slika 10.) u poglavlju 4 definiranih profila) ispred luke Dubrovnik.

### 4 Numerički model valnih deformacija

Budući da se lukobran nalazi u području plitkovodne valne klime, a podacima o valovima raspolaže se u području dubokovodne valne klime (tablica 6.) u nastavku je provedena analiza deformacija pućinskih valova povratnih razdoblja 5 do 100 godina iz smjera SE (uključuje i valove smjerova

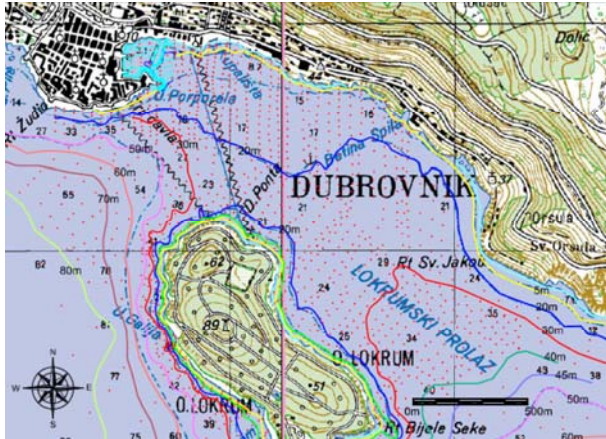
ESE i SE) i iz smjera SW (uključuje i valove smjerova SSW i WSW) do plitkog mora gdje se nalazi lukobran Kaše, uz pomoć matematičkog modela valovanja MIKE 21/BW. Ovim numeričkim modelom obuhvaćene su sve kombinacije relevantnih utjecaja na deformacije valova: utjecaj plićine ("shoaling efekt"), refrakcija, difrakcija, parcijalna refleksija, frekvencijska disperzija i prostorna disperzija

Tablica 6. Usvojene prognozirane dugoročne značajne valne visine u dubokom moru ispred luke Dubrovnik na mjestu točke P1 (slika 10.) [4]

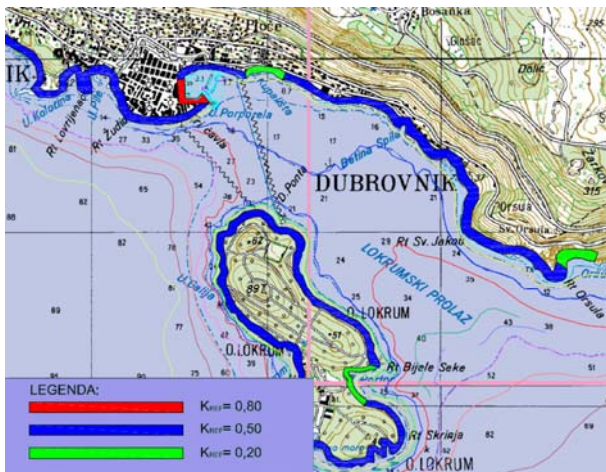
| povratno razdoblje PR[god] | $H_s^{PR}$ [m]<br>Sektor I - SE | $H_s^{PR}$ [m]<br>Sektor II - SW |
|----------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| 100                        | 5,3                             | 4,9                              |
| 50                         | 4,3                             | 4,4                              |
| 40                         | 4,0                             | 4,3                              |
| 30                         | 3,6                             | 4,1                              |
| 20                         | 3,1                             | 3,8                              |
| 10                         | 2,3                             | 3,4                              |

Na slici 8. prikazana je batimetrija promatranog područja. Karakteristikama obale na promatranom području pridruženi su odgovarajući koeficijenti refleksije prikazani na slici 9. Koeficijenti refleksije procijenjeni su tako da je na obali u obliku vertikalnog zida odabran  $k_r = 0,8$ , na području prirodne kamene obloge  $k_r = 0,5$  i na području plaže blagoga nagiba  $k_r = 0,2$ .

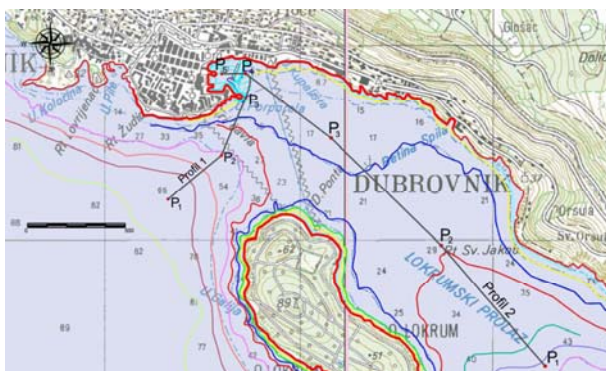
Deformacije valova analizirane su po smjerovima grafički i numerički preko zamišljenih profila (Profila 1 i Profila 2, slika 10.) na čijem je početku kontrolna točka u dubokom P<sub>1</sub>, a na kraju je kontrolna točka P<sub>5</sub>, u plitkom u gradskoj luci. Za definiranje dubokovodne valne plime mjerodavna je kontrolna točka P<sub>4</sub> neposredno ispred lukobrana.



Slika 8. Batimetrija Lokrumskog prolaza i gradske luke Dubrovnik

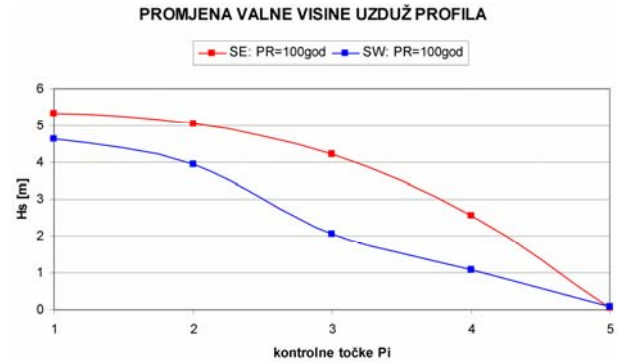


Slika 9. Vrijednosti koeficijenta refleksije za pojedine djelove obale



Slika 10. Prikaz profila i točaka očitavanja vrijednosti deformirane valne visine iz matematičkog modela za promatrane smjerove

Rezultati valnih deformacija od dubokog (točke P<sub>1</sub> sa slike 10.) do plitkog ispred Kaša (točka P<sub>4</sub> sa slike 10.) dobivene numeričkim modelom za različite smjerove prikazani su na slici 11. gdje je radi preglednosti prikazana samo deformacija vala značajne valne visine povratnog razdoblja 100 godina.



Slika 11. Profili značajnih valnih visina u kontrolnim točkama za smjer valova iz smjera ESE-SE

### 5 Zaključak: valna klima preživljavanja lukobrana u postojećem stanju

Analize deformacije valova lebičade-garbinade, tj. za smjer SW pokazale su da su u tim situacijama valne visine na samom lukobranu bitno manje nego kod situacija juga, pa je za masu školjere mjerodavan smjer juga. U tablici 7. prikazani su rezultati analize otpornosti školjere na realnu valnu klimu provedene na temelju istraživanja prikazanih u poglavljima 2., 3. i 4. za relevantni smjer SE, tj. za valove juga.

Tablica 7. Prikaz izmjerene mase školjere lukobrana Kaše, potrebne težine u slučaju projektne valne visine 100-godišnjega povratnog razdoblja i povratna razdoblja po Hudsonovoj formuli definirana kao ekvivalentna izmjerenoj masi

| Lokacija | W <sub>50%</sub> [t] |   | PR projektnog vala koji može podneti izmjerena školjera [god] |    |
|----------|----------------------|---|---|----|
|          | izmjereno            | potrebno za $H_{proj} = H_{1/10} / 100_{god}$ |   |    |
| PPR 1    | nad morem            | 2,25  | 6,9   | 40 |
|          | pod morem            | 1,70  | 6,9   | 30 |
| PPR 2    | nad morem            | 0,87  | 6,6   | 15 |
|          | pod morem            | 1,60  | 6,9   | 30 |
| PPR 3    | nad morem            | 1,15  | 6,6   | 25 |
|          | pod morem            | 1,95  | 6,9   | 35 |
| PPR 4    | nad morem            | 1,80  | 6,6   | 35 |
|          | pod morem            | 1,50  | 6,6   | 30 |



Iz provedenih analiza proizlazi da bi postojeću školjeru lukobrana Kaše trebalo zamijeniti ili, što je jeftinije, dodati krupniju školjeru na cijelom pokosu ako se pretpostavlja rješenje bez godišnjeg održavanja. Naime rješenje bez godišnjeg održavanja traži krupnoću školjere određenu projektnom valnom visinom definiranom prema izrazu  $H_{proj} = H_{1/10}^{100god}$ . Uz pretpostavku budućega

godišnjeg održavanja, tj. krupnoću školjere određenu projektnom valnom visinom definiranom prema izrazu  $H_{proj} = H_{1/10}^{30god}$ , konstrukciju bi se moglo popravljati mjestimično tamo gdje je školjera manje gustoće i gdje je školjera građirana vrlo široko. No budući da je lukobran veoma malen ovo posljednje nije racionalno.

## LITERATURA

- [1] Stručni elaborat: *Procjena stanja primarne obloge lukobrana „Kaše“*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu za Montmontažu-Hidroinženjering, 2004.
- [2] *Shore protection manual*, Vol. II, Coastal Engineering Research Center, 1984.
- [3] Pršić, M.; Kuspilić, N.; Kunštek, D.: *Armour stability of constructed rubble breakwaters*, *Proceedings of the 7th International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering*/ Gdansk, Poland, 2001. 269-276
- [4] Ocvirk, E.: *Optimizacija nasipnih zaštitnih građevina u uvjetima ekstremne jadranske valne klime*, doktorska disertacija (2010.)