

Prof. dr. sc. Marko Pršić, dipl. ing. građ.

PLOVNI PUTEVI I LUKE

Dio 6.8 LUKOBRANI

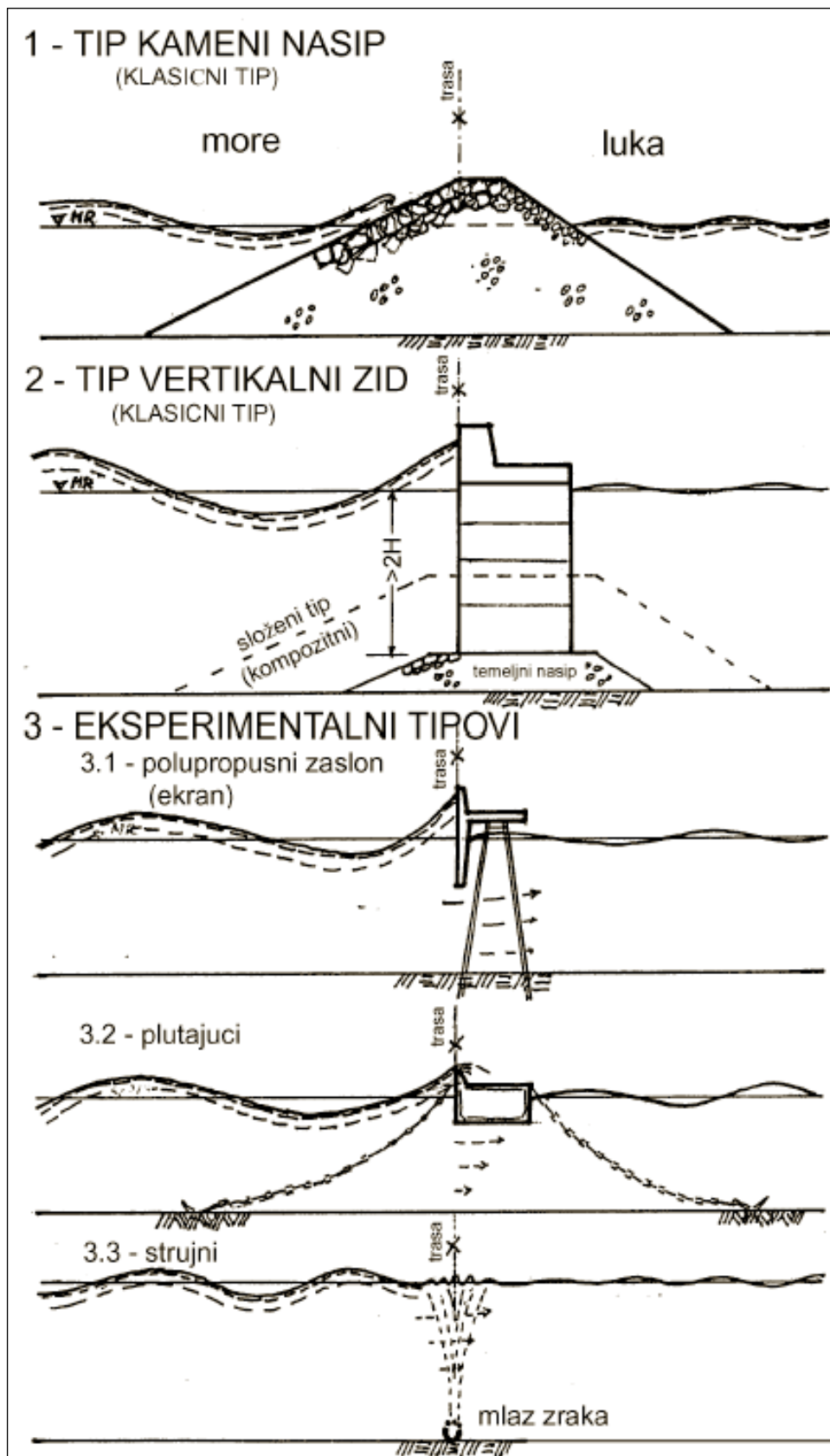
23.05.2010.

Sadržaj

6.8	Lukobrani	3
6.8.1	TIPOVI LukobranA.....	4
6.8.2	TRASIRANJE LukobranA	4
6.8.3	Lukobran tipa nasip.....	6
6.8.3.1	Profil nasipnog lukobrana	6
6.8.3.2	Presjek lukobrana (konstrukcija).....	11
6.8.3.3	Proračuni konstrukcije nasipnog lukobrana.....	14
6.8.3.4	Tehnologija gradnje nasipnog lukobrana	19
6.8.4	Lukobran tipa zid (vertikalni lukobran)	22
6.8.4.1	Profil lukobrana tipa zid.....	23
6.8.4.2	Presjek lukobrana tipa zid	24
6.8.4.3	Proračun konstrukcije lukobrana tipa zid	25

6.8 LUKOBRANI

Najčešća smetnja radu u lukama je djelovanje valova na ljuljanje brodova u luci. Zato se lučki akvatorij zaštićuje *lukobranom* (Sl. 6.8.1::1). Po tlocrtu može biti jednostrani i dvostrani. Tlocrtni dijelovi jednostranog (i svake strane dvostranog) lukobrana su: korijen



(spoj s kopnom na obalnoj crti), trup i konačno glava kao ojačani morski završetak konstrukcije. Neki put lukobran nije spojen s kopnom, pa onda nema korijen nego se sastoji od trupa i dvije glave. Oni osim zaštite od valova služi i protiv ostalih štetnih djelovanja na pr.: struja i nanosa. Proširenu funkciju ima uporabni (operativni) lukobran. Sastoji se od obrambene krune na morskoj strani, a sa lučke strane je izgrađen kej tako da se mogu formirati brodski vezovi i eventualno postaviti mehani-zacija za prekrcaj brodova. Ukoliko je širina keja mala za obavljanje prekrcaja, takav lukobran služi samo za vezivanje brodova (čekanje, oprema,

Sl. 6.8.1::1 Tipovi lukobrana

Ako građevina kao lukobran služi protiv djelovanja valova na druge pomorske građevine (obalni ispust iz HE, usis rashladne morske vode...) nazva se *valobranom*. Konstrukcija lukobrana i valobrana je identična, a funkcija im je različita.

Valolomi su podmorski ili (niski) nadmorski objekti koji djelomično štite od valova. Takav objekt je podignut na morskom dnu, a doseže do izvjesne dubine ispod površine mora ili samo malo iznad mora, kako bi se veći valovi na njemu lomili i tako gubili dio energije. Samo manji valovi nesmetano prelaze preko te prepreke. Koriste za zaštitu plaža.

6.8.1 TIPOVI LUKOBRANA

U pogledu presjeka konstrukcije razlikuju se 3 osnovna tipa lukobrana (Sl. 6.8.1::1):

- 1 tip nasip (tal. molo), jezgra izrađena od miješanog sitnijeg kamenitog materijala s oblogom (školjeraom) od krupnih kamenih ili betonskih blokova;
- 2 tip zid (tal. diga) od gravitacijskog (betonskog) zida koji leži na tanjem kamenom temeljnom nasipu. Dubina (D) zida je veća od dubine loma vala ($D \geq 2 H_{proj}$);
- 3 tzv. eksperimentalni tipovi koji se rjetko primjenjuju; t.j. samo na poluzaštićenim lokacijama. Između mnogo najpoznatiji su: polupropusni, plutajući i strujni.

Prva dva tipa se zajednički nazivaju klasični. Primjenjuju se u najvećem broju slučajeva.

6.8.2 TRASIRANJE LUKOBRANA

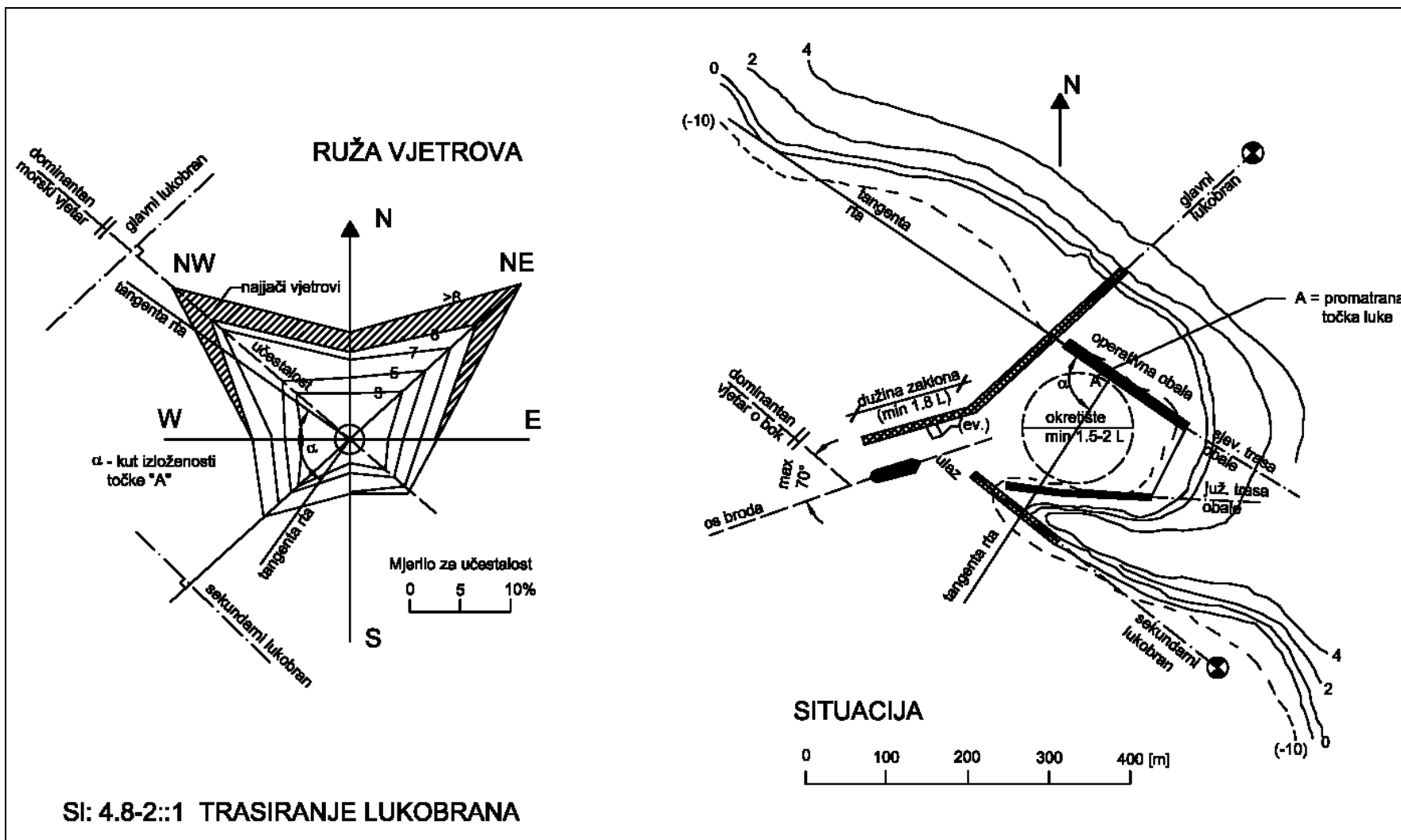
Trasa lukobrana je osnovna tlocrtna crta pružanja lukobrana. Predstavlja neki istaknuti rub poprečnog presjeka s morske strane. Trasiranje lukobrana obavlja se na pomorskoj karti na koju je ubačena ruža vjetrova kao na slijedećem primjeru:

PR 17: TRASIRANJE LUKOBRANA

Postupak trasiranja je slijedeći:

- a) Prvo treba odrediti broj i veličinu vezova prema prometu i veličini brodova.
- b) Izvršiti trasiranje vezova na snimljenoj batimetriji a ispred njih staviti okretnište i ostale manevarske dijelove akvatorija koji lukobran treba štiti.
- c) Izabere se najizloženiji vez tj. najizloženija točka "A" luke tj. lučkog akvatorija.
- d) Iz točke "A" tangiraju se rtovi akvatorija i tako odredi kut izloženosti " α ".
- e) " α " (kut izloženosti) prenesemo na ružu vjetrova. Vidi se da će dominantni valovi biti iz "NW" smjera a sekundarni iz "SW" smjera.
- f) Trasa glavnog lukobrana treba biti okomita na dominantan smjer a sekundarni lukobran na sekundarni smjer valova. To se ucrtava na ruži vjetrova i paralelno (vodeći računa o ekonomici – dužina lukobrana i dubina mora trase) prenesemo na situaciju.

Pri tome treba ostaviti ulaz širine 70-120 [m] uz poštovanje principa trasiranja ulaza tj. da ruta uplovljavanja bude pod kutem $\leq 70^\circ$ na dominantan vjetar.

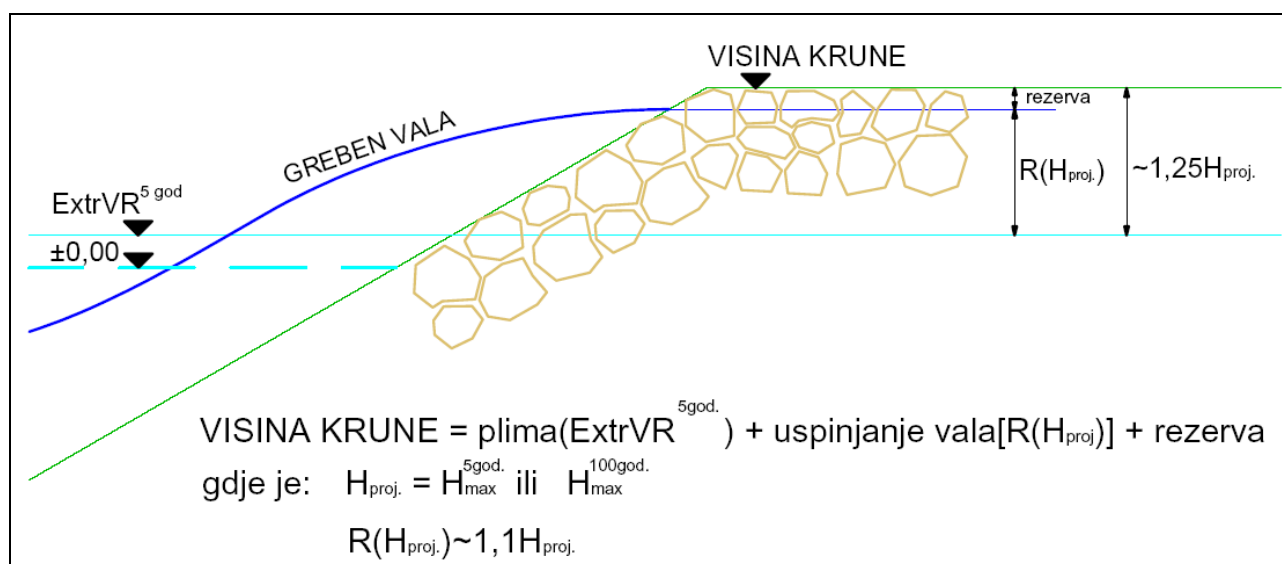


SI: 4.8-2::1 TRASIRANJE LUKOBRANA

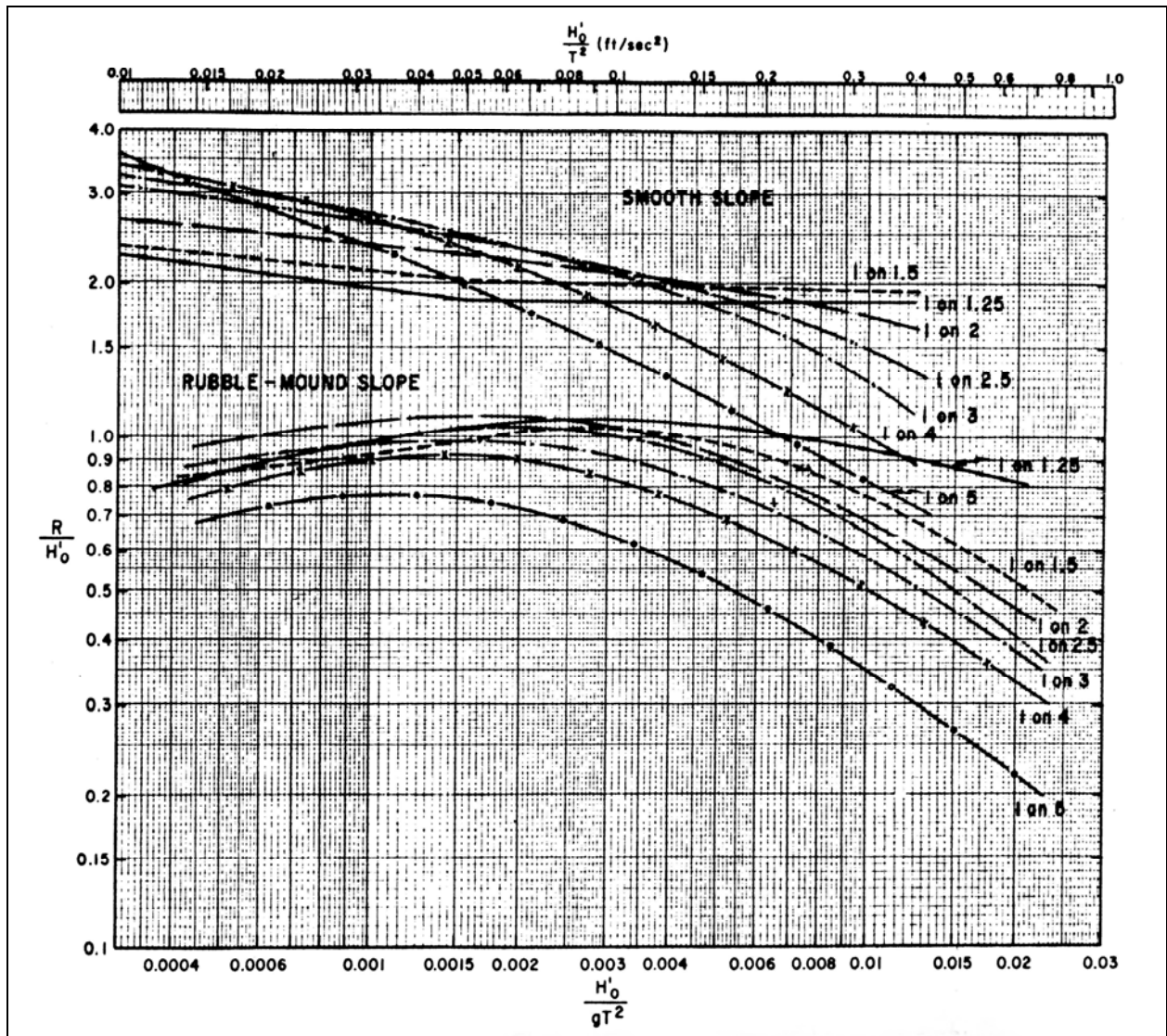
SI. 6.8.2::1 Trasiranje lukobrana

S druge strane širina i visina krune posredno ovise o tehnologiji građenja. Naime kruna jezgre mora biti iznad vode i teba biti toliko široka da u fazi građenje s krune omogući rad i smještaj građevinske mehanizacije (mimoilaženje kipera s nasipnim materijalom, rad stroja za razastiranje, rad stroja za uređenje pokosa, te postavu tračnica dizalice za polaganje blokova obloga). Kod malih lukobrana koji se grade bez dizalice na tračnicama širina krune jezgre iznosi minimalnih 7[m], a kod velikih 10-12[m]. Ta radna ploha od 7 ili 12[m] treba biti na visinskoj koti nešto iznad SVVŽR (na Jadranu cca 0,6 – 0,8[m n.m.]).

Visina krune: Za uporabnu krunu treba predvidjeti malu vjerojatnost prelijevanja dok kod zaštitne krune ta vjerojatnost može biti veća. Učestalost i količina dopuštenog prelijevanja ovisi o funkcijama upotrebne krune, no i o sigurnosti obloge kod prelijevanja. Visina krune lukobrana, po kriteriju prelijevanja, izračunava se zbrajanjem dosega projektnog vala ($H_{proj} = H_{max}^{5god}$) na vanjskom pokosu i ekstremno visokog morskog raza 5-godišnjeg povratnog razdoblja. To u grubom iznosi 1,25 H_{proj} iznad 5-godišnjeg visikog morskog raza (Sl. 6.8.3.1::2). Visina uspinjanja vala na pokosu $R(H_{proj})$ dana je za glatke i hrapave pokose na eksperimentalnom dijagramu sa Sl. 6.8.3.1::3. Po tehnološkom kriteriju neki puta će visina krune biti viša od onog što se izračuna po kriteriju prelijevanja. Naime kruna jezgre mora biti iznad mora a na njenu visinu dodaju se još filteri i obloga, pa se visina krune lukobrana dobije zbrajanjem visine jezgre i debljina filtera i obloge. To može biti više od visine krune po kriteriju prelijevanja.



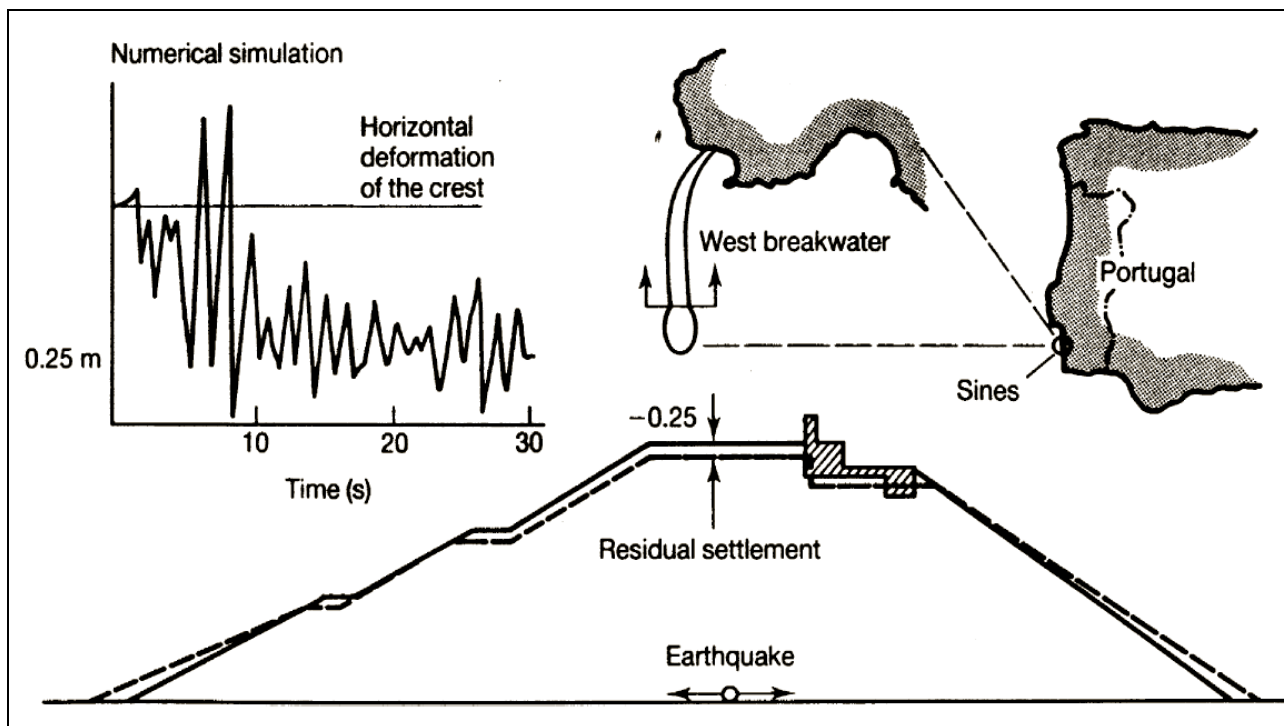
Sl. 6.8.3.1::2 Određivanje visine krune nasipnog lukobrana



Sl. 6.8.3.1::3 Uspinjanje vala na glatkom i hrapavom pokosu CERC II, fig 7-20, 1977

Visina krune ovisi i o slijegavanju lukobrana. Slijeganje dna pod lukobranom može iznositi i po nekoliko metara, a tome se dodaje slijeganje od prirodne konsolidacije kamenog nasipa trupa uzrokovano gravitacijom, vibracijama od valova i potresima Sl. 6.8.3.1::4. Veličina slijegavanja nasutog trupa lukobrana uslijed potresa procjenjuje se usporedbom zbijanja rahlog šljunka i kamenog nasipa na suhom. Šljunak se može zbiti mehanizacijom 10 do 15%, a kameni nasip veličine 10/60kg do 15%. Ako se uzme da su ubrzanja mehanizacije 5× veća ud ubrzanja potresa (10g : 2g) onda se može očekivati zbijanje nasipnog lukobrana uslijed potresa od 2 do 4%. Podmorski nasip može se, ako treba, umjetno zbijati laganim miniranjem u bušotinama izvedenim u nasipu. Valno zbijanje može biti reda veličine 1%. Dakle prosječno prirodno zbijanje je oko 3% volumena što daje cca 4%-tno smanjenje visine. Problem se anulira nadvišenjem u fazi gradnje. Za usporedbu kod kamenih brana zbog prirodnog slijegavanja nasipa se obično dodaje nadvišenje cca 0,2% do 0,5%. CIRIA338

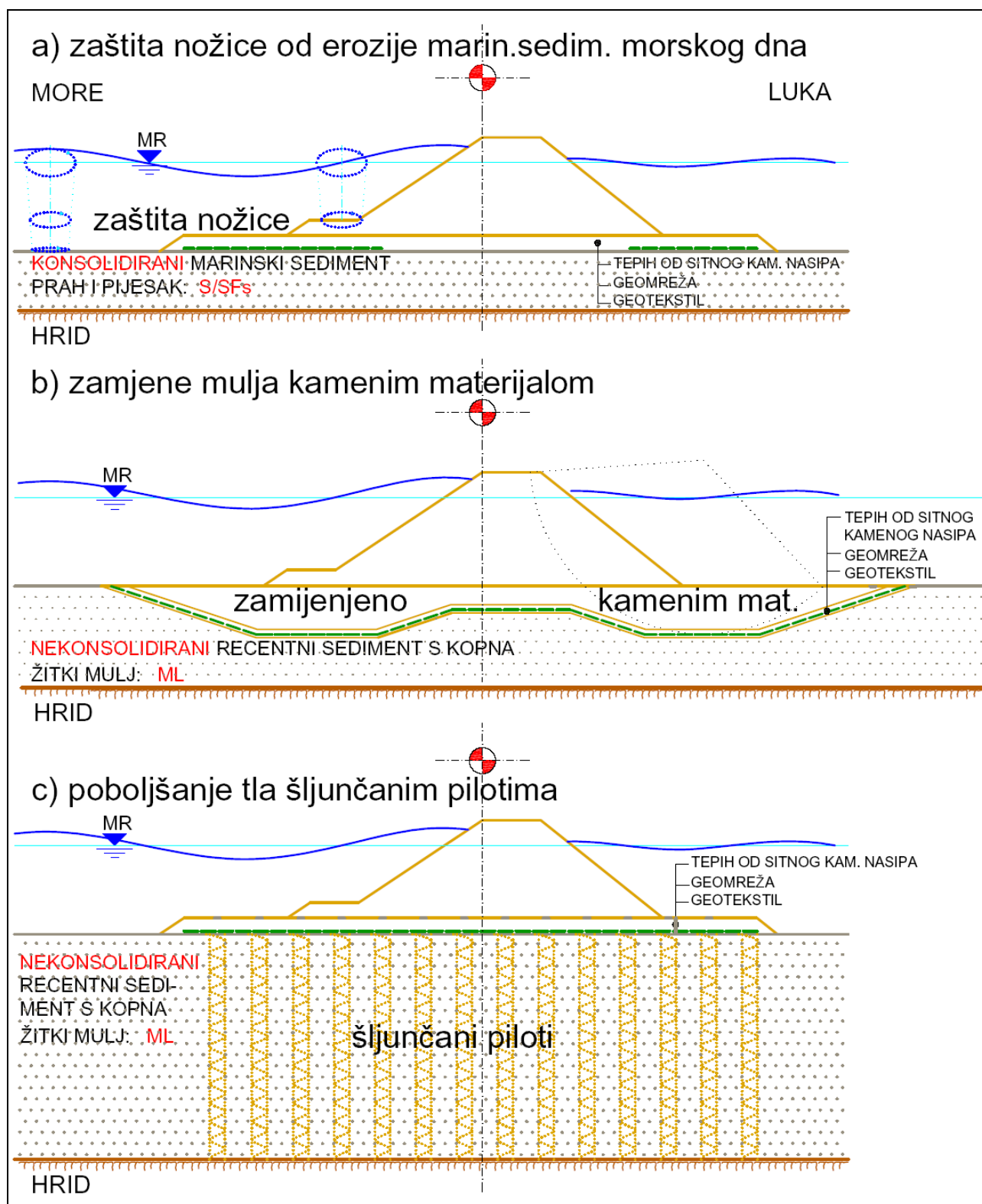
Nagib pokosa ovisi o valnoj klimi, vrsti obloge i temeljnom tlu. Vanjski pokos koji je izložen olujama ima redovito blaži nagib od unutarnjeg okrenutog prema luci. Vanjski nagibi u normalnim uvjetima kreću se od 1:1,5 do 1:3, najviše do 1:5 (kod specijalnih pješćanih obaloutvrda s asfaltnom oblogom). Standardni nagibi lukobrana s oblogom od kamenih blokova su: 1:1,5 vanjski i 1:1,25 unutarnji.



Sl. 6.8.3.1::4 Simulacija slijeganja lukobrana uslijed potresa matematičkim modelom GIRIA338

Osim zahtjeva za vlastitom stabilnošću nasute kamene mase lukobrana profil mu ovisi i o kvalitetu dna na kojem leži masa nasipnog lukobrana. Strmi nagib pokosa stvara veća naprezanja na morsko dno. Ako je ono od slabog materijala potrebno je naprezanja smanjiti. To se postiže ublažavanjem nagiba pokosa, čime se proširi baza lukobrana i smanji tlak na dno, a što daje veću sigurnost od sloma temeljnog tla i pokosa nasipa. Prilikom nasipanja (krupnijeg) kamenja na vrlo mekano dno, npr. na mulj, kamenje prodire duboko u dubinu pa je to "izgubljeni" materijal. Ako sloj mulja nije debeo u takvom slučaju potrebno je prvo postaviti geotekstil i geomrežu, te nasuti posteljicu od sitnijeg materijala da se stvori tepih koji nosi trup (Sl. 6.8.3.1::5a). Ako je dno i u većoj dubini vrlo slabo nosivo, onda se mora pristupiti klasičnoj metodi zamjene temeljnog tla sa boljim materijalom, ili nekoj od metoda poboljšanja tla (šljunčani piloti, ubrzanje konsolidacije vertikalnim drenovima, mlaznim pilotima - jet grouting, dubinskom miješanjem tla i cementne paste - deep mixing i sl.). Ako je na dnu mora tipičan zbijeni (konsolidirani) marinski sediment: prah i pijesak (S ili SM) nataložen na hridi, onda na profilu lukobrana treba s morske strane predvidjeti zaštitu nožice protiv erozije pjeskovitog materijala morskog dna (Sl. 6.8.3.1::5a). Tada se neće dešavati erozija nožice uslijed valova i morske struje, niti će se javiti bitno slijeganje nasipnog lukobrana. Druga je stvar s tlom manje čvrstoće (na pr. MH/CL) kad strmi nagib pokosa stvara veća naprezanja na morsko dno. Naprezanja je moguće smanjiti ublažavanjem nagiba pokosa. Time se proširi baza lukobrana i smanji tlak na dno što daje veću sigurnost od sloma temeljnog tla i pokosa nasipa. Ako je iznad osnovne hridi morskog dna naplavljen s kopna tanji sloj (oko 3-

5m) žitkog mulja ML (nekonsolidiranog recentnog sedimenta) onda nasipanje treba početi s krupnim kamenom koje prodire duboko u mulj i dostiže donju osnovnu hrid morskog dna.



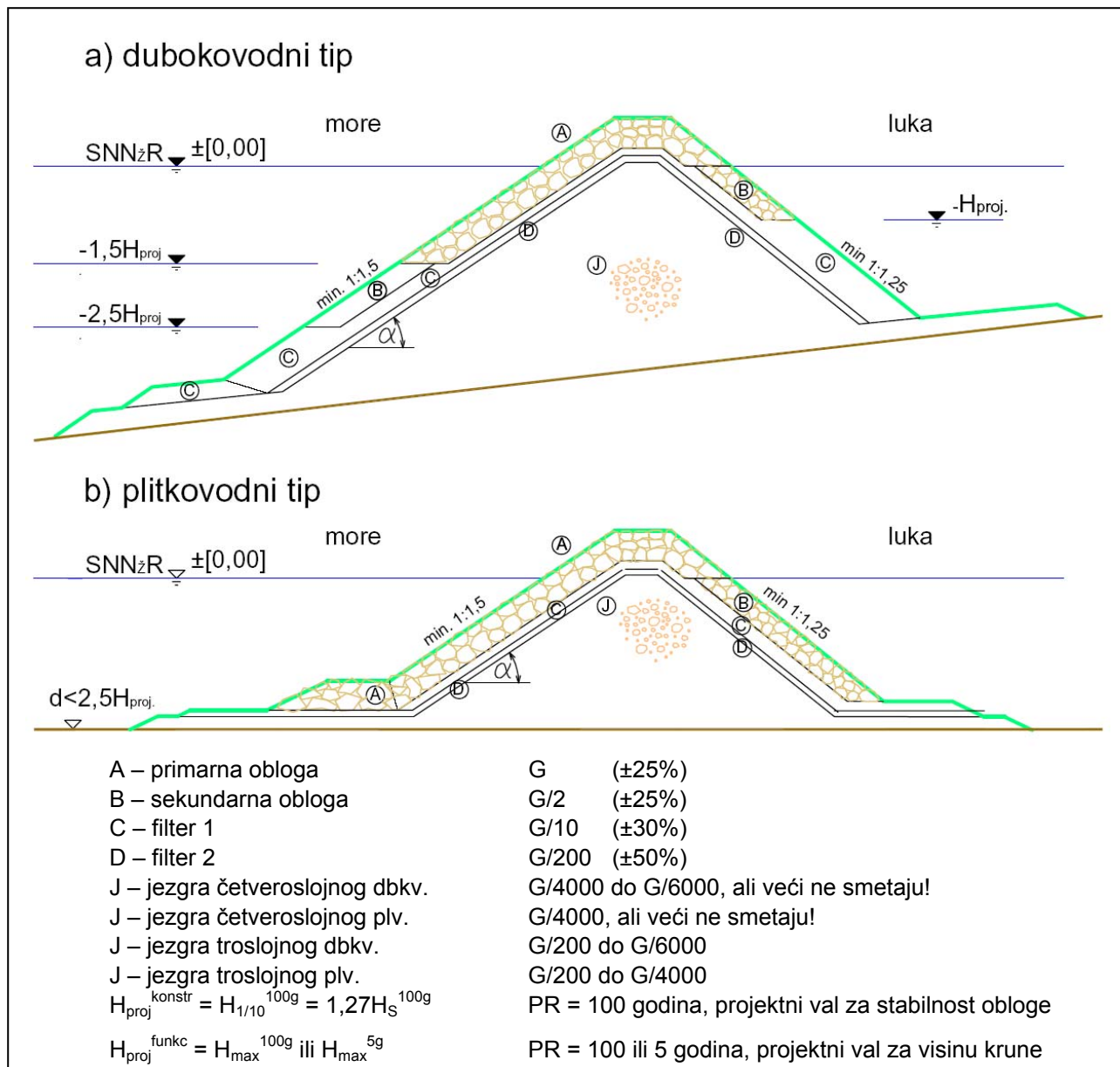
Sl. 6.8.3.1.:5 Zaštita nožice i poboljšanja lošeg temeljnog tla kod gradnje nas. lukobrana

S morske strane u principu ne treba predvidjeti zaštitu nožice, ali zbog imperfekcija u ovoj tehnologiji treba ju predvidjeti. Ni tada se neće dešavati erozija nožice, niti će se javiti bitno slijeganje nasipnog lukobrana. Ako je žitki mulj srednje debljine (oko 5-10m) u takvom slučaju potrebno je pristupiti klasičnoj metodi zamjene mulja boljim materijalom (Sl. 6.8.3.1::5b). Na površinu izvršenog iskopa mulja prvo se mora postaviti geotekstil i geomrežu, te nasuti posteljicu od sitnijeg kamenog materijala da se stvori tepih koji nosi trup. Potom se nasipa masa zamjenskog materijala i trupa lukobrana koji su od kamenog materijala. S morske strane treba predvidjeti zaštitnu nožicu u vidu upornog praga od kamenih blokova. Ni tada se neće dešavati erozija nožice, ali će se javiti značajno slijeganje nasipnog lukobrana (i metarske veličine) koje će se realizirati kroz dugo razdoblje konsolidacije mulja. Problem se anulira nadvišenjem lukobrana u fazi gradnje. Osim toga ne treba graditi krutu betonsku krunu sve dok se slijeganje uglavnom ne završi. Ako je žitki mulj veće debljine (otprilike >10m) potrebno je pristupiti nekoj od metoda poboljšanja tla: šljunčani piloti (Sl. 6.8.3.1::5c), ubrzanje konsolidacije vertikalnim drenovima i sl.

6.8.3.2 Presjek lukobrana (konstrukcija)

Današnji presjeci nasutih lukobrana izgrađuju se krajnje ekonomično. Glavnina je presjeka (jezgra) od sitnijeg materijala, a samo obloga pokosa i krune od krupnih blokova. Čak se i pojedini dijelovi obloge razno dimenzioniraju prema jačini djelovanja valova. Podjela materijala u presjeku je najekonomičnija onda ako je u skladu sa izdašnosti (po frakcijama) kamenoloma koji je na raspoloženju. Izdašnost kamenoloma značajno diktira sastav presjeka. Ovakvi ekonomični presjeci sa sitnijim kamenim materijalom u jezgri stvaraju i ozbiljne izvedbene probleme. Kod jakih mora moraju se radovi tako etapirati da pojedine faze gradnje – a gradi se kroz više zimskih perioda – mogu izdržati nalete valova (obloge odmah slijede gradnju jezgre i filtera, filteri moraju izdržati barem 5 godišnje valove i sl.).

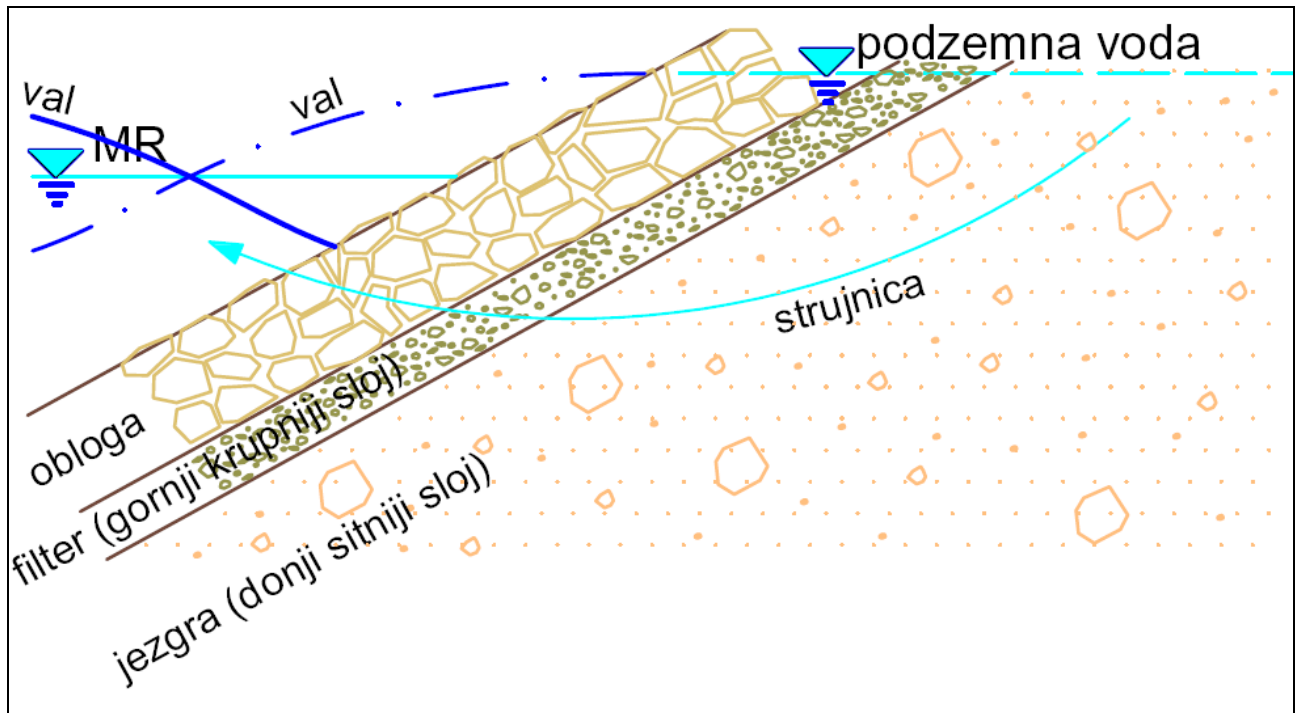
Tipičan *četveroslojni presjek* se sastoji od najkrupnije primarne obloge "A" na kruni i vanjskom pokosu ispod koje je u većoj dubini nešto manja sekundarna obloga "B". Između jezgre i obloga su filterski slojevi "c" i "D" (Sl. 6.8.3.2::1). Danas prevladavaju troslojni lukobrani sastavljeni iz primarne obloge, filtera i jezgre (Sl. 6.8.3.2::1). Slojevi nasipnog lukobrana složeni su po „filterskom pravilu“.



Sl. 6.8.3.2.:1 Četveroslojni nasipni lukobran s usko graduiranom oblogom

Filtersko pravilo

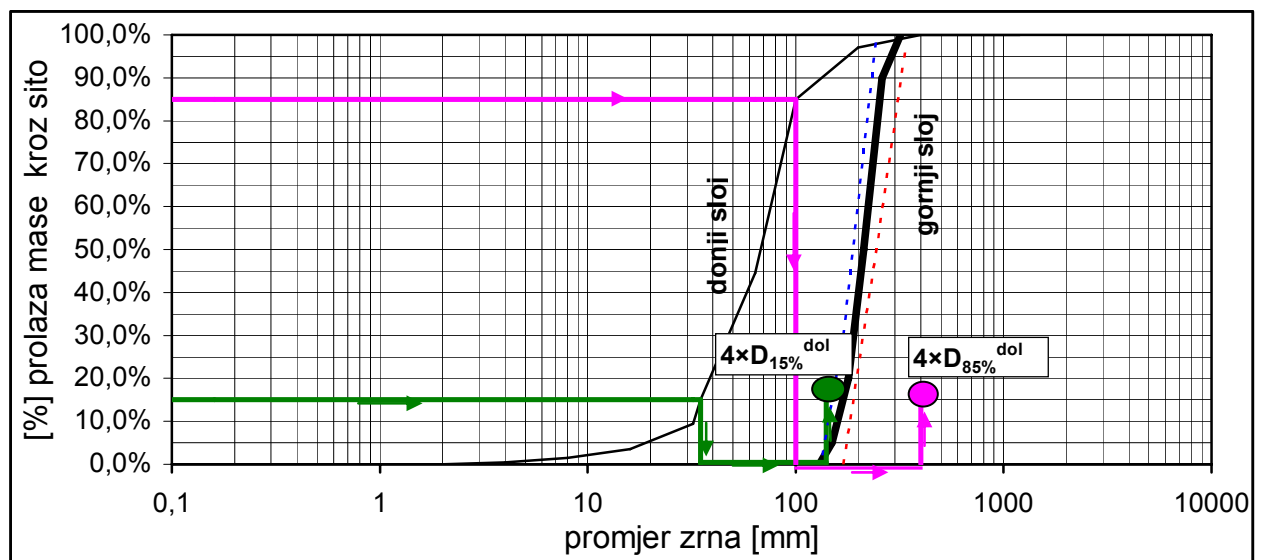
Filtersko pravilo definira princip da sitna zrna materijala ispod filtera (donji sloj) ne mogu biti strujanjem vode izvučena kroz šupljine filtera (gornji sloj), Sl. 6.8.3.2.:2.



Sl. 6.8.3.2::3 Principijelni prikaz strujanja mora unutar nasipnog lukobrana čija se intencija ispiranja sitnih čestica jezgre sprečava filterom na površini pokosa

Granulometrijska krivulja usko graduiranih filtera lukobrana (gornji sloj) prema Terzagiju (Sl. 6.8.3.2::3) mora se nalaziti u slijedećem granulometrijskom području:

$$4 \times D_{85\%}^{\text{donje}} \geq D_{15\%}^{\text{gornje}} \geq 4 \times D_{15\%}^{\text{donje}}$$



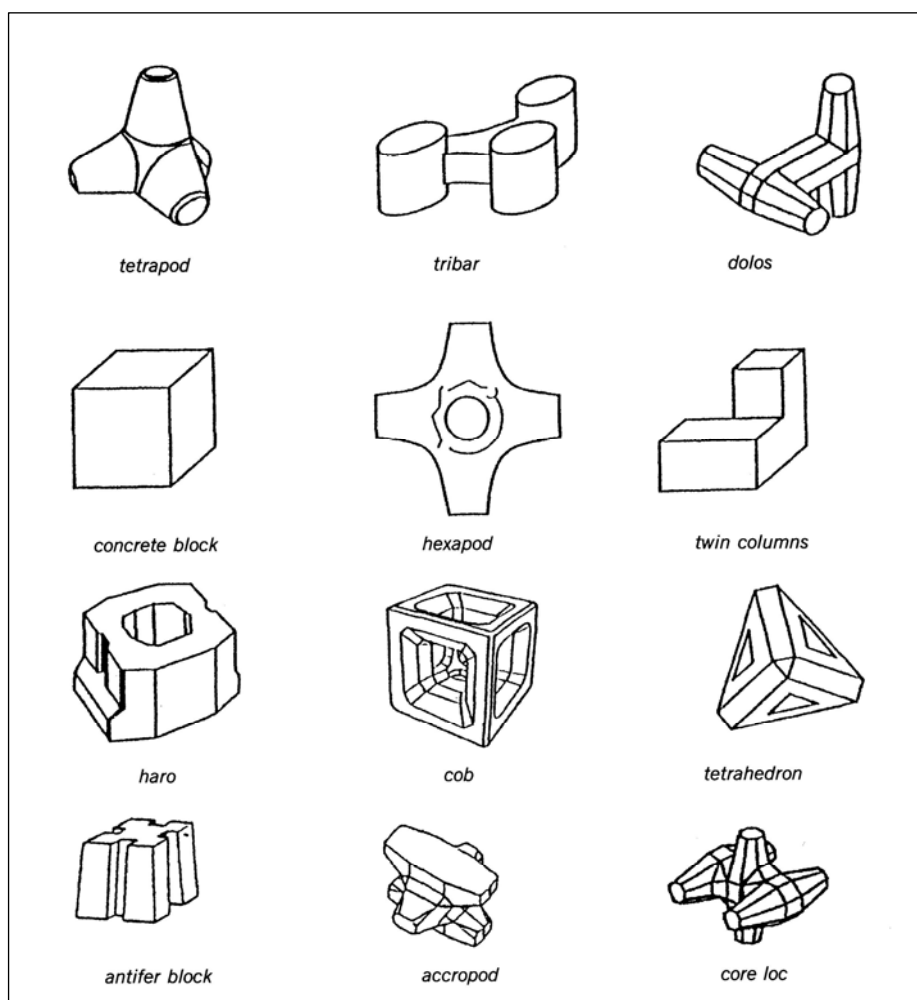
Sl. 6.8.3.2::3 Određivanje granulometrijske krivulje filtera prema Terzagiju

6.8.3.3 Proračuni konstrukcije nasipnog lukobrana

Od proračuna konstrukcije potrebno je provesti sljedeće:

- proračun stabilnosti elemenata obloge pri djelovanju valova / hidraulička stabilnost Hudson,
- proračun stabilneta pokosa nasipa / geotehnička stabilnost,
- proračun sloma tla ispod nasipa lukobrana / geotehnička stabilnost,
- proračun slijeganja tla i nasipa.

Ovdje će se dati samo proračun stabilnosti elemenata obloga.



Sl. 6.8.3.3::1 Tipovi umjetnih blokova "A" primarne obloge za lukobrane tipa nasip. Oblici su patentirani i korištenje patenta je na komercijalnoj osnovi.

Primarna obloga „A“ ima funkciju zaštite sitnijih unutarnjih slojeva lukobrana od hidrodinamičkog djelovanja valova. U pravilu je grubo hrapava jer se izvodi od velikih kamenih ili umjetnih (betonskih) elemenata (Sl. 6.8.3.3::1), promjera većeg od metara, postavljenih na pokos bez velikog slaganja (engl: pel-mal ili rip-rap). Na taj način se dobije izgled jednoličnog pokosa od nepravilno složenih blokova, metarske hrapavosti i velike

šupljikavosti. Ako su blokovi od prirodnog kamena, primarna obloga se naziva školjera. Vrste umjetnih blokova od betona dane su u svim priručnicima. Obzirom na djelovanje valova, od elemenata primarne obloge (školjere) se traži:

- Da im težina bude u skladu s veličinom valova prema Hudsonovoj formuli kako bi ostali stabilni na pokosu tj. onemogućili oštećenje lukobrana.
- Da budu međusobno biti dobro ukliješteni, jer se tako težina pojedinog bloka povećava tlakom okolnih blokova. Iz tog razloga ugradnja teče po horizontalnim slojevima.
- Da budu čvrsti. Naime školjera je konstrukcija od točkasto oslonjenih elemenata, pa bi lom na točkama oslonca olabavio konstrukciju i doveo do oštećenja cijelog lukobrana uslijed erozije obloge.
- Da budu kompaktni; t.j. da budu teški uz to da položeni u školjeru imaju napadne plohe izložene valovima što manje.
- Da imaju veliku šupljikavost između elemenata, jedan od osnovnih zahtjeva kako bi što više vode kod valnog djelovanja moglo ući u šupljine i tamo izgubiti valnu energiju uslijed disipacije. Disipacija smanjuje uspinjanje vala na pokosu i omogućava nižu krunu. Time se školjera bitno razlikuje od obloge u, mirnijim riječnim nasipima.

Raspored slojeva, pa tako i školjere, po dubini i širini presjeka dan je na slici 6.8.3.2::1. Polaganje blokova školjere vrši se prema unaprijed utvrđenom projektu organizacije na osnovu tipa blokova odnosno elemenata i raspoloživim sredstvima (plovnim dizalicama, plovnim i kopnenim dizalicama, iznimno samo kopnenim dizalicama).

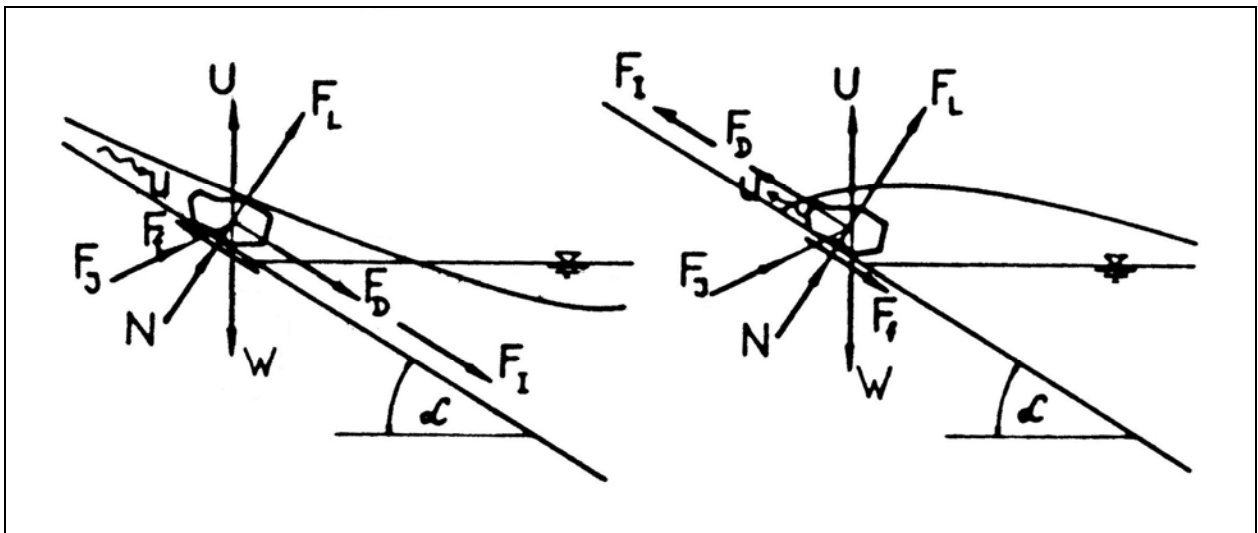
Tipovi umjetnih betonskih blokova "A" dvoslojne primarne obloge dani su na Sl. 6.8.3.3::1. Najčešći tipovi blokova dvoslojne primarne obloge su kameni blokovi i tetrapodi. Tu pripada i nešto moderniji "Antifer" blok. U novu generaciju umjetnih betonskih blokova jednoslojne primarne obloge pripadaju ACCROPODE (Francuski laboratorij Sogreah), CORE-LOC (US Arm. Corps of Engineers, Coastal Hidraulics Laboratory) i tribar.

Težina stabilnih blokova primarne obloge "A" proračunava se prema donjoj Hudsonovoj formuli. Izvedena je temeljem ravnoteže obložnog bloka na pokosu izloženog statičkim i dinamičkim silama: vl. težina, uzgon, hidrodinamički uzgon, sila otpora bloka u struji silaznog vala, inert. sila, sila trenja na pokosu, reakcija podloge i sila od strujanja mora u jezgri lukobrana (Sl. Sl. 6.8.3.3::2). Težina blokova "A" označava se kod uniformne obloge od umjetnih betonskih blokova s G_A . Kod kamene (kamenometne, jer se kamen ne nabacuje nego se "meće" s pažnjom) obloge koja ne može biti uniformna; t.j. može varirati u težini $\pm 25\%$, izračunava se težina 50%-tnog bloka $G^{50\%}_A$. To predstavlja težinu bloka 50%-tne zastupljenosti na granulometrijskoj krivulji ugrađenih blokova. Raspon mase

ugrađenih kamenih blokova u odnosu na proračunatu veličinu $G_A^{50\%}$ je: $G_{A,\min} = 0,75 G_A^{50\%}$ i $G_{A,\max} = 1,25 G_A^{50\%}$. CERC7-205, CIRIA97,98 Taj raspon gradacije vrijedi kako za trup, tako i za glavu lukobrana. Hudsonova formula za stabilnost obloge u valnoj klimi reprezentiranoj projektnom valnom visinom H_{proj} glasi:

$$G_A = G_A^{50\%} = \frac{\rho_{\text{obl}} \cdot g \cdot H_{\text{proj}}^3}{K_D \left(\frac{\rho_{\text{obl}}}{\rho_m} - 1 \right) \cdot \text{ctg } \alpha} \quad [\text{N}]$$

- G_A [N] težina bloka primarne obloge
- $\rho_m = 1026$ [kg/m³] gustoća mase mora
- ρ_{obl} [kg/m³] gustoća mase materijala obloge: kamen vapn. 2600 [kg/m³], beton 2400 [kg/m³]
- $K_D \equiv K_{D=0}$ eksperimentalni koeficijent obloge za 0 do 5%-tno oštećenje ovisan o tipu obložnih blokova (Tab. 6.8.3.3.:I)
- H_{proj} [m] = $H_{1/10}^{100g} = 1,27 H_S^{100g}$
- α [°] kut nagiba morskog pokosa prema horizontali. Ovisi o raspoloživoj veličini blokova za oblogu. Općenito ne ide se ispod 33,7°, tg 33,7° = 0,667 = 1:1,5.



Sl. Sl. 6.8.3.3.:2 Sile na usamljeni blok obloge pokosa pri spužtanju (mjerodavno za stabilnost) i uspinjanju vala: W – težina bloka, U – hidrostatički uzgon, F_L – sila hidrodinamičkog uzgona, N – sila reakcije podloge, F_D – sila otpora, F_I – sila inercije, F_J – hidrodinamička sila od strujanja vode u jezgri

Eksperimentalni koeficijenti obloge $K_D \equiv K_{D=0}$, iz gornje Hudsonove formule za proračun težine bloka G_A stabilne uniformne ili uskograduirane kamenometne primarne obloge na vanjskom pokosu nasipnog nepreljevnog lukobrana, uz 0 do 5%-tno oštećenje dani su u Tab. 6.8.3.3.:I za blokove kamenomete obloge i za neke tipove umjetnih betonskih blokova.

Type of outer covering elements	Number of layers	Type of placing	Breakwater side $K_D^{1)}$		Breakwater end K_D		
			Breaking waves ³⁾	Non-breaking waves ⁵⁾	Breaking waves	Non-breaking waves	Slope
Smooth, rounded racks	2	random	1.2	2.4	1.1	1.9	1 : 1.5 bis 1 : 3
	3	random	1.6	3.2	1.4	2.3	1 : 1.5 bis 1 : 3
Angular rubble	2	random	2.0	4.0	1.9	3.2	1 : 1.5
	3	random	2.2	4.5	1.6	2.8	1 : 2
	2	carefully placed ²⁾	5.8	7.0	1.3	2.3	1 : 3
					2.1	4.2	1 : 1.5 bis 1 : 3
Tetrapode	2	random	7.0	8.0	5.3	6.4	1 : 1.5 bis 1 : 3
					5.0	6.0	1 : 1.5
					4.5	5.5	1 : 2
					3.5	4.0	1 : 3
Antifer Block	2	random	8.0	–	–	–	1 : 2
Accropode	1		12.0	15.0	9.5	11.5	bis 1 : 1.33
Coreloc	1		16.0	16.0	13.0	13.0	bis 1 : 1.33
Tribar	2	random	9.0	10.0	8.3	9.0	1 : 1.5
					7.8	8.5	1 : 2
					6.0	6.5	1 : 3
					7.5	9.5	1 : 1.5 bis 1 : 3
Tribar	1	uniformly placed	12.0	15.0	7.5	9.5	1 : 1.5 bis 1 : 3
Dolos	2	random	15.8 ³⁾	31.8 ³⁾	8.0	16.0	1 : 2 ⁴⁾
					7.0	14.0	1 : 3

¹⁾ For slope of 1 : 1.5 to 1 : 5.
²⁾ Longitudinal axis of rocks perpendicular to the surface.
³⁾ K_D values confirmed experimentally only for slope 1 : 2.
 If requirements are higher (destruction < 2%), the K_D values must be halved.
⁴⁾ Slopes steeper than 1 : 2 are not recommended.
⁵⁾ Breaking waves occur more often when still water depth in front of the breakwater decreases the wave height.

Tab. 6.8.3.3.:I Eksperimentalni koeficijent obloge $K_D \equiv K_{D=0}$ za proračun težine bloka G_A stabilne uniformne ili uskograduirane primarne obloge prema Hudsonovoj formuli nepreljevanih nasipnih lukobrana po kriteriju da nema oštećenja. To praktično znači da 0-5% blokova kod projektnog stanja mora moći pasti s pokosa (CERC II 7-206)

Za proračun težine blokova primarne širokograduirane kamene obloge (primjenjuje se na branama akumulacijskih jezera) prema Hudsonovoj formuli umjesto koeficijenta K_D koristi se eksperimentalni koeficijent K_{RR} (Tab. 6.8.3.3.:II). Pomoću K_{RR} izračunava se $G_A^{50\%}$, a gradacija je od $0,125 G_A^{50\%}$ do $4 G_A^{50\%}$.

TIP OBLOGE	SLAGANJE	K_{RR} ZATRUP	
		lomljeni valovi	nelomljeni valovi
kamenometna, širokograduirana, uglata	slučajno	2,2	2,5

Tab. 6.8.3.3.:II Eksperimentalni koeficijent obloge K_{RR} za Hudsonovu formulu proračuna težine bloka $G_A^{50\%}$ stabilne širokograduirane kamenometne primarne obloge po kriteriju da nema oštećenja (upotrebljava se umjesto K_D)

Debljina sloja primarne obloge ne može biti manja od 2 elementa u sloju, a izračunava se kao:

$$t = n \cdot k_{\Delta} \sqrt[3]{\frac{G_A}{\rho_{obl} \cdot g}} = n \cdot k_{\Delta} \sqrt[3]{\frac{G_A}{\gamma_{obl}}} \quad ()$$

gdje je: t [m] debljina sloja primarne obloge
 n broj blokova u sloju primarne obloge (uglavnom $n=2$)
 k_{Δ} koeficijent sloja prema Tab. 6.8.3.3.:III
 G_A [N] težina bloka primarne obloge
 ρ_{obl} [kg/m³] gustoća mase materijala obloge:
 kamen vapnenec 2600 [kg/m³], beton 2400 [kg/m³]
 γ_{obl} [N/m³] zapreminska težina materijala obloge:
 kamen vapnenec 26.000 [N/m³], beton 24.000 [N/m³]

Armor Unit	n	Placement	Layer Coefficient k_{Δ}	Porosity (P) %
Quarrystone (smooth) ¹	2	Random	1.02	38
Quarrystone (rough) ²	2	Random	1.00	37
Quarrystone (rough) ²	>3	Random	1.00	40
Quarrystone (parallepiped) ⁶	2	Special	--	27
Cube (modified) ¹	2	Random	1.10	47
Tetrapod ¹	2	Random	1.04	50
Quadripod ¹	2	Random	0.95	49
Hexipod ¹	2	Random	1.15	47
Tribar ¹	2	Random	1.02	54
Dolos ⁴	2	Random	0.94	56
Toskane ⁵	2	Random	1.03	52
Tribar ¹	1	Uniform	1.13	47
Quarrystone ⁷	Graded	Random	--	37

¹ Hudson (1974).
² Carver (1983).
³ Hudson, (1961a).
⁴ Carver and Davidson (1977).
⁵ Carver (1978).
⁶ Layer thickness is twice the average long dimension of the parallelepiped stones. Porosity is estimated from tests on one layer of uniformly placed modified cubes (Hudson, 1974).
⁷ The minimum layer thickness should be twice the cubic dimension of the W_{50} riprap. Check to determine that the graded layer thickness is ≥ 1.25 the cubic dimension of the W_{max} riprap (see eqs. 7-123 and 7-124 below).

Tab. 6.8.3.3.:III Koeficijenti sloja k_{Δ} i poroziteti p [%] raznih primarnih obloga CERC II, 7-234

Kad je jednom pozna težina bloka stabilne primarne obloge G_A onda se sekundarna obloga B, filteri C i D te jezgra J određuju u odnosu na težinu G_A .

Sekundarna obloga B se javlja kod dubokovodnih lukobrana na površini pokosa, ali u većim dubinama ($D \pm 1,5 H_{proj}$). Javlja se i na podmorskoj površini unutrašnjeg pokosa lukobrana. Postavlja se na isti način kao i primarna obloga. Težina bloka sekundarne obloge je:

$$G_B = 0,5 \cdot G_A$$

Ako su blokovi od kamena, težina im može varirati $\pm 25\%$. Debljina sekundarnog sloja također ne može biti manja od 2 elementa u sloju.

Filtarski slojevi C i D nalaze se između obloge i jezgre. Složeni su po filterskom pravilu. Funkcija im je da spriječe ispiranje sitnih frakcija jezgre kroz velike šupljine u primarnoj oblozi. Za filter se upotrebljava kameni materijal. Kod manjih lukobrana postavlja se grtalicom, a kod većih čeličnim koševima obješenim na užeta dizalice. Težina prosječnog zrna filtera je:

$$G_C = G_A/10 \text{ i}$$

$$G_D = G_A/200.$$

Varijacija kamenog granulata za G_C i G_D je $\pm 30\%$ i $\pm 50\%$. Debljina filtera je minimum 2 zrna, ali debljina sloja ne treba biti manja od 0,7 m!

Jezgra čini najveći dio presjeka, ali zato najjeftiniji jer je od neselektiranog kamenog materijala iz kamenoloma. Nije otporna na djelovanje valova i stoga se oblaže. Paralelno s izgradnjom jezgre mora teći i oblaganje, kako veći valovi ne bi oštetili već završeni dio jezgre. Jezgra se ugrađuje nasipavanjem s plovila ili kopnenom mehanizacijom kod napredovanja s čela. Težinski raspon zrna jezgre, ako dolazi ispod filtera C, je: $G_A/200 - G_A/6000$, a ispod filtera D $G_A/4000 - G_A/6000$. Veća zrna pa čak i blokovi u jezgri, ne smetaju! U materijalu jezgre jedino ne smije biti zemlje ($\leq 3\%$) niti materijala sitnijeg od 1 kg više od 15%.

6.8.3.4 Tehnologija gradnje nasipnog lukobrana

U principu postoje 2 načina gradnje nasipnih lukobrana:

- s mora pretežno plovnom mehanizacijom i
- s krune pretežno kopnenom mehanizacijom.

U obadva slučaja gradnja počinje u kamenolomu. Nakon miniranja jedne sekcije obavlja se selekcija A, B, C i D nepravilnih krupnih blokova, a ostatak izminirane kamene mase je za jezgru (mješovite granulacije raspona otprilike 0,1 do 500 kg).

Ako se predviđa gradnja s mora (Sl. 6.8.3.4::1), kameni materijali se kopnenim transportnim sredstvima transportiraju do obale gdje se na gradilišnom pristanu utovaruju na transportna plovila (maone, platforme, prevrtaljke ili klapete), koje tegljači otegle na mjesto ugradnje. Ugradnja jezgre obavlja se sipanjem s plovila tako da se naspe more od dna do kote cca -2,5 m koliko je ograničenje gazom plovila. Smjer nasipavanja je od korijena lukobrana prema glavi. Ostali podmorski dio i nadmorski dio jezgre ugrađuje se kopnenom mehanizacijom (damperima) s krune jezgre sipanjem s čela. Obloge se na mjesto ugradnje transportiraju isto kao jezgra, a ugrađuju plovnom dizalicom, tako da se prati ugradnja jezgre na 30 do 50 m zaostatka. Jezgra bez obloge ne može dugo stajati

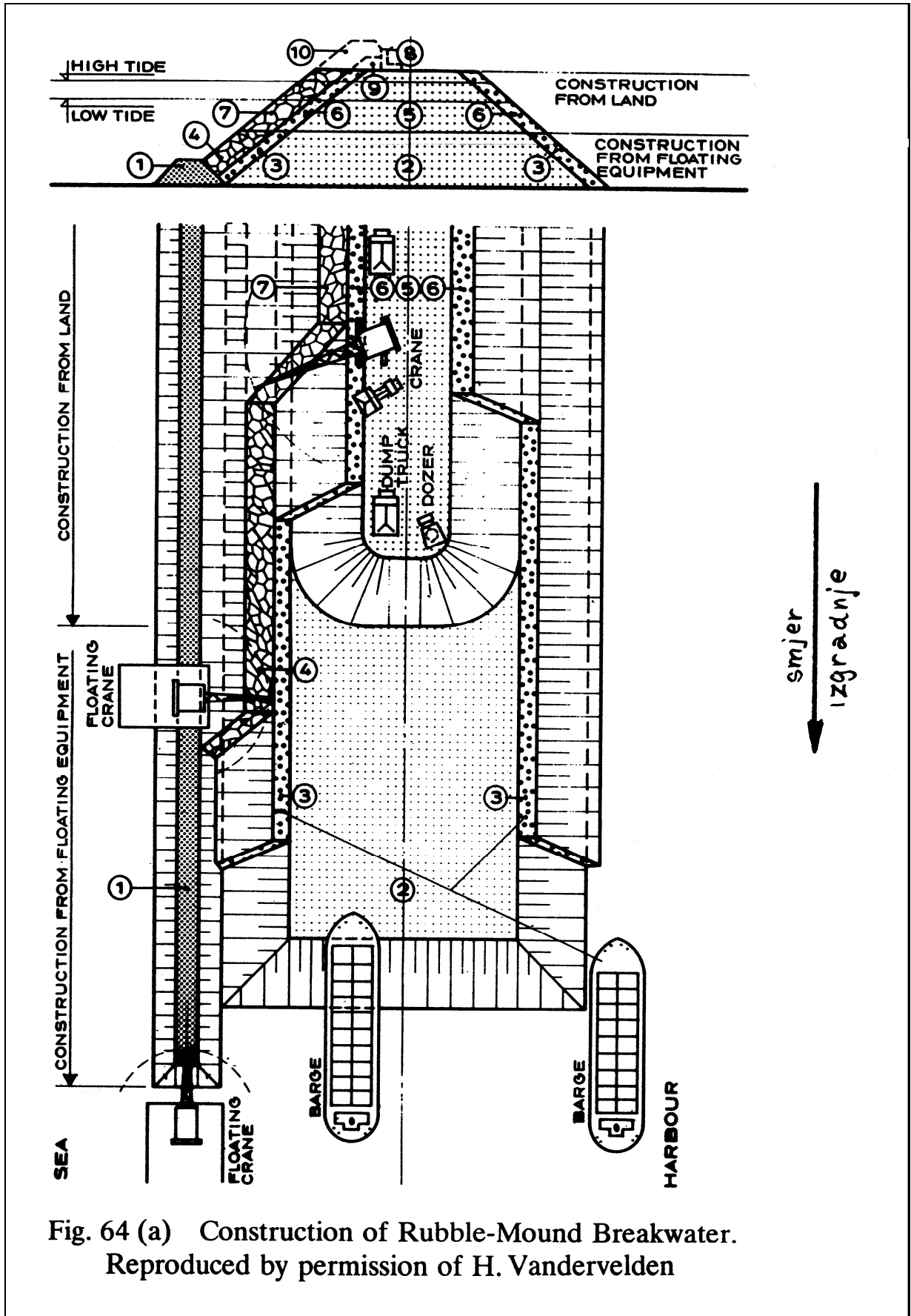
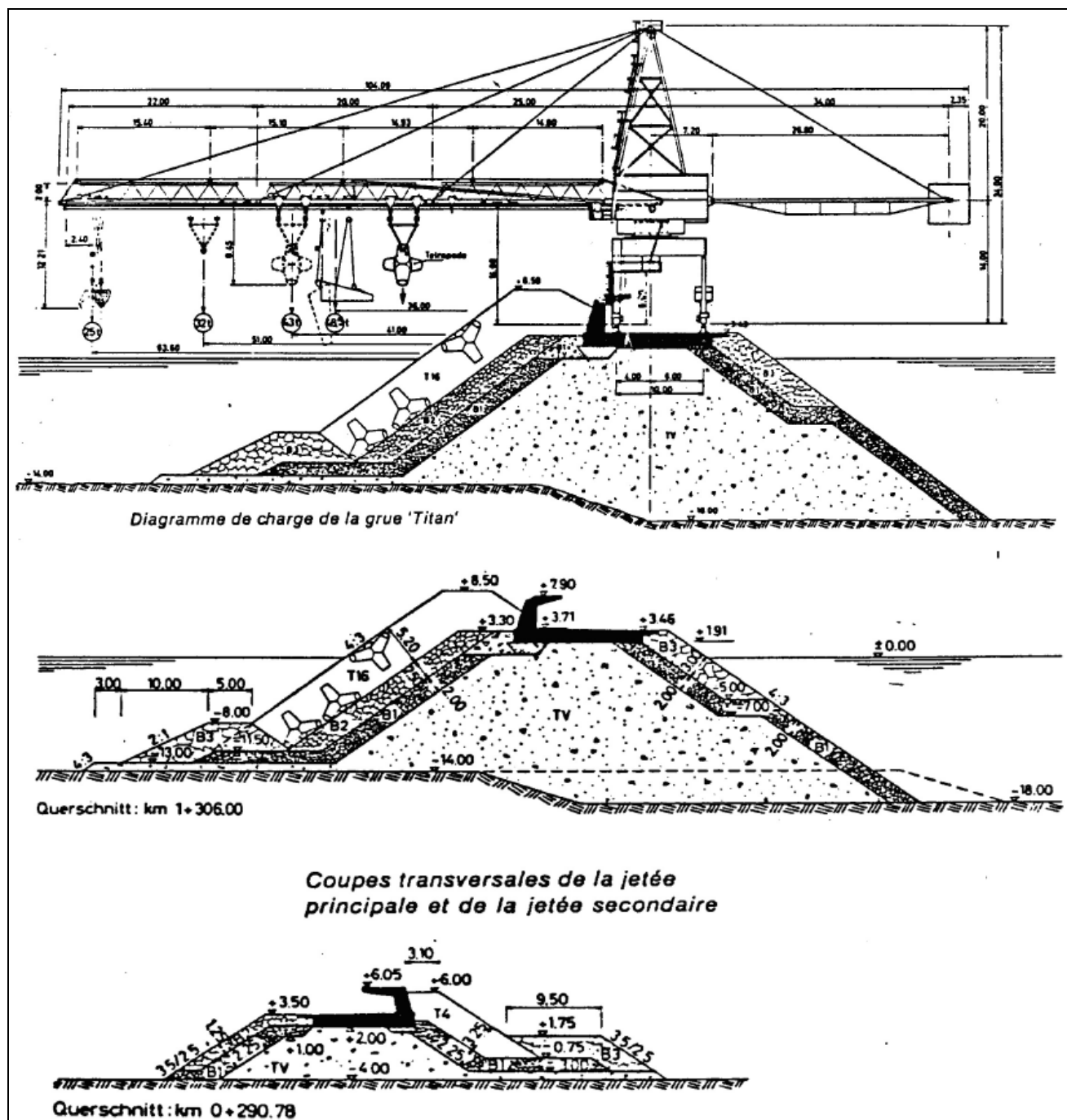


Fig. 64 (a) Construction of Rubble-Mound Breakwater.
 Reproduced by permission of H. Vandervelden

Sl. 6.8.3.4::1 Tehnologija gradnje nasipnog lukobrana s mora s pretežno plovnom mehanizacijom

zbog mogućnosti oštećenja od valova. Krana obloge (iznad kote cca +1 do +1,5 m) se se ugrađuje zadnja, od glave prema korijenu lukobrana, radi omogućavanja prolaza kopnene mehanizacije po krani.



Sl. 6.8.3.4.:2 Postava tetrapodske i kamenometnih obloga dizalicom s krune lukobrana

Ako se predviđa gradnja s krune (Sl. 9.3.:2) kameni materijali se kopnenim transportnim sredstvima transportiraju do mjesta ugradnje vožnjom po krani jezgre koja stoga mora biti nad morem. Ugradnja jezgre obavlja se sipanjem sa čela, a smjer nasipavanja je od

korijena lukobrana prema glavi. Obloge se na mjesto ugradnje transportiraju damperima, isto kao jezgra, a ugrađuju dizalicom smještenom na kruni, tako da se prati ugradnja jezgre na 30 do 50 m zaostatka. Duboke obloge za koje dizalica na kruni nema dohvata ugrađuju se plovnom dizalicom. Kruna obloge se ugrađuje zadnja, od glave prema korijenu lukobrana.

6.8.4 LUKOBRAN TIPA ZID (VERTIKALNI LUKOBRAN)

Osnovna konstrukcija se sastoji od velikih prefabriciranih betonskih elemenata slaganih jedan na drugi, ili rjeđe jedan pored drugog u pravilnom poretku, na tanki podmorski kameni nasip čime se formira masivni vertikalni zid (Sl. 6.8.4.1::1). Dubina zida (D) je veća od dubine loma vala ($D \geq 2 H_{\text{proj}}^{\text{konstr.}}$), pa je podvrgnut samo reflektiranim valovima (manji hidrodinamički tlakovi od valova). Prednosti su mu:

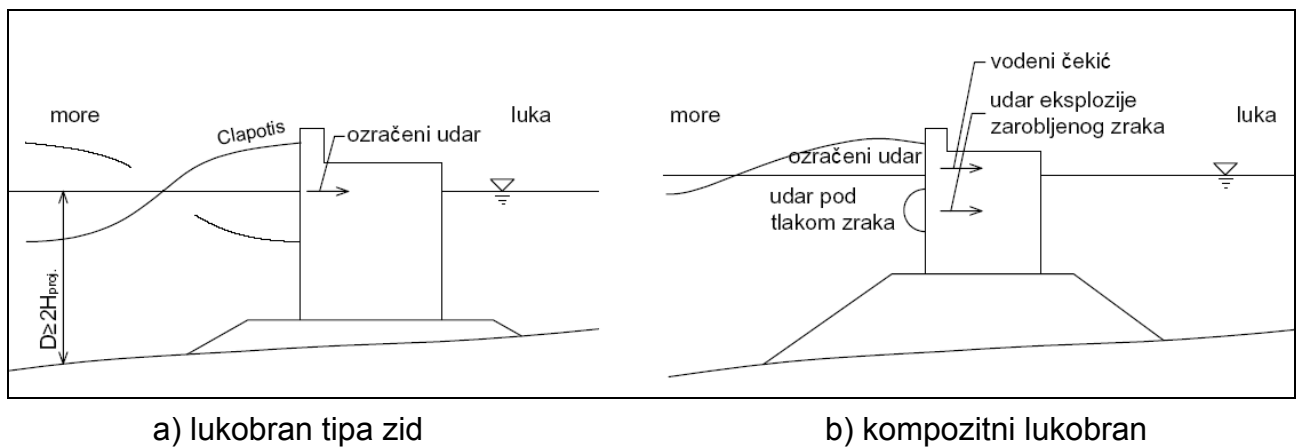
- ekonomičan je s materijalom,
- prilično brzo se gradi,
- zauzima malo prostora,
- s lučke strane se formira kejs,
- ako je slabo temeljno tlo može se čak temeljiti na pilotima,
- po kruni mu se u fazi građenja može kretati građevinska, a u fazi eksploatacije prekrcajna mehanizacija,
- dokazan je u primjeni.

Mane su mu:

- da reflektira valove tako da brodovi uz njega otežano plove i ulaze u luku,
- udarne sile od valova mogu lokalno biti žestoke,
- uz dno je moguća erozija temeljnog nasipa,
- nije fleksibilan za slučaj slijeganja,
- treba tešku i skupu građevinsku mehanizaciju,
- na finom pijesku javljaju se problemi u vezi temeljenja (erozija nožice, potresna likvefakcija)
- i što je najvažnije žestoko se oštećuju ako projektni uvjeti budu premašeni uz istovremeni gubitak zaštitne funkcije.

Sličan je ovom tipu lukobrana tzv. "kompozitni lukobran" (Sl. 6.8.4::1) koji se sastoji od visokog podmorskog nasipa na čijem je vrhu neki zid (Sl. 6.8.4::1). Dubina zida (D) je manja od dubine loma vala ($D < 2 H_{\text{proj}}^{\text{konstr.}}$), pa je podvrgnut reflektiranim i lomljenim valovima (veći hidrodinamički tlakovi od valova). Za razliku od toga lukobran tipa zid je

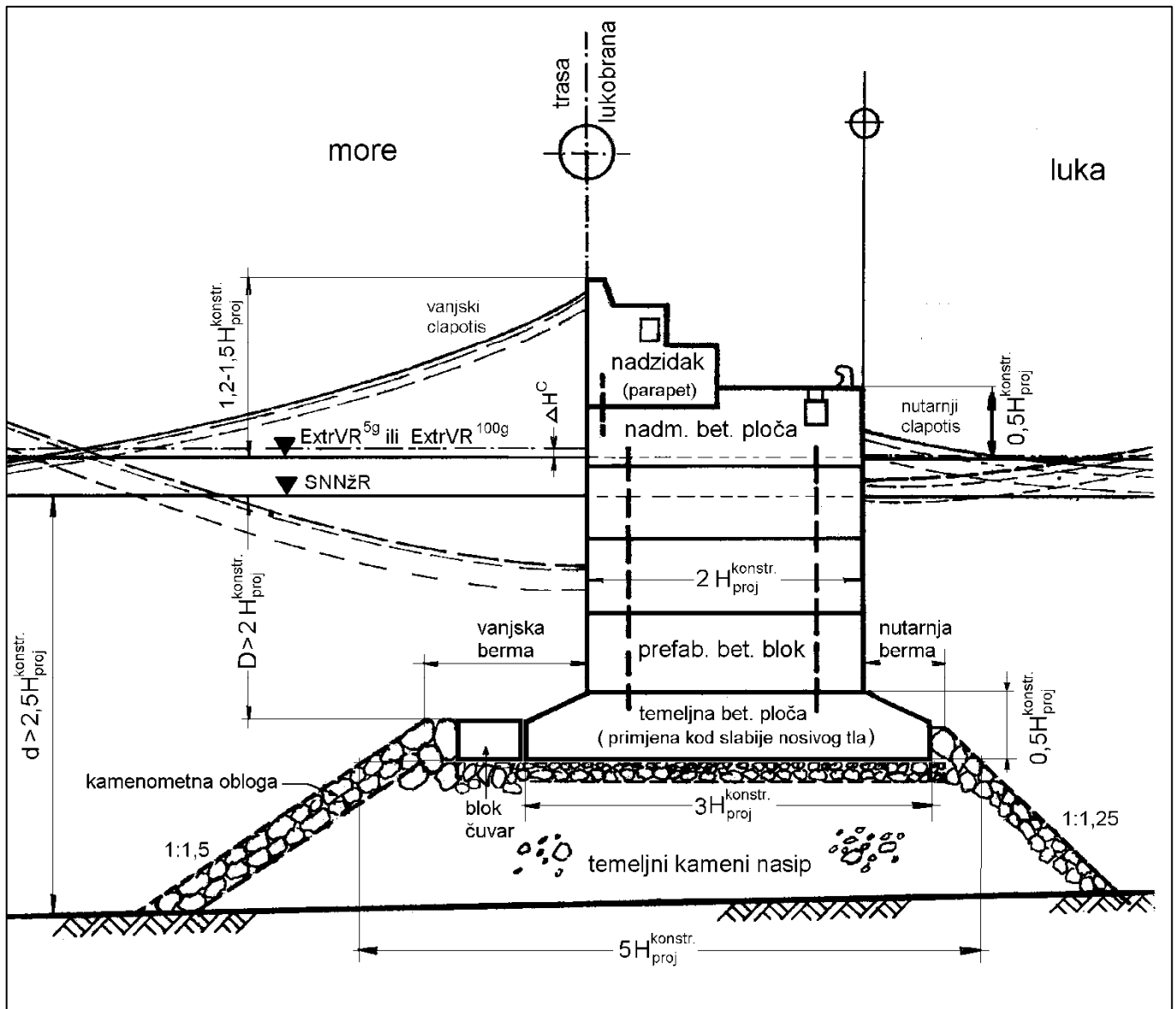
obično podvrgnut samo reflektiranim valovima tj. morsko dno i kruna temeljnog nasipa obično su tako duboko da ne mogu inicirati lom.



Sl. 6.8.4.:1 Različiti slučajevi opterećenja od valova na lukobranu tipa zid (manje sile od clapotisa), i na kompozitnom lukobranu (veće sile od lomljenog vala)

6.8.4.1 Profil lukobrana tipa zid

Lukobran tipa zid (za nelomljene valove) treba biti trasiran na dubini morskog dna većoj od 2,5 visine projektnog vala ($d \geq 2,5 H_{proj.}^{konstr.} = 2,5 H_{max}^{100\text{ god}}$), kako sigurno ne bi došlo do loma valova ispred konstrukcije i velikih udarnih opterećenja od lomljenih valova. Nožica zida oslonjena je na krunu temeljnog nasipa koji ne smije biti plići od 2 visine projektnog vala ($D \geq 2 H_{proj.}^{konstr.} = 2 H_{max}^{100\text{ god}}$) iz istih razloga. Lučko i morsko lice lukobrana su vertikalni. S morske strane je zid viši radi sprečavanja preljeva valova, a s lučke niži radi pristajanja brodova. Visina parapeta s morske strane određuje se kao suma visokog raza (na pr. Extr. VR^{5g}), jedne projektne valne visine za funkcionalnost - prelijevanje ($H_{proj.}^{funkc.} = H_{max}^{100g}$ što je u ovom slučaju $= H_{proj.}^{konstr.}$) i izdizanja srednice vala $\Delta H_{proj.}^{funkc.C}$, kako to pokazuje slika za slučaj reflektiranog vala (clapotisa). Ostale orijentacijske dimenzije profila lukobrana prema Laras-u dane su na Sl. 6.8.4.1.:1. Ovaj orijentacijski profil služi kao polazni za proračune stabilnosti.



Masa prefabriciranog betonskog bloka

M do cca 300[t]

$$H_{proj}^{konstr} = H_{max}^{100g} \approx 2H_S^{100g}$$

PR = 100 godina, projektni val za stabilnost

$$H_{proj}^{funkc} = H_{max}^{100g} \text{ ili } H_{max}^{5g}$$

PR = 100 ili 5 godina, projektni val za visinu krune

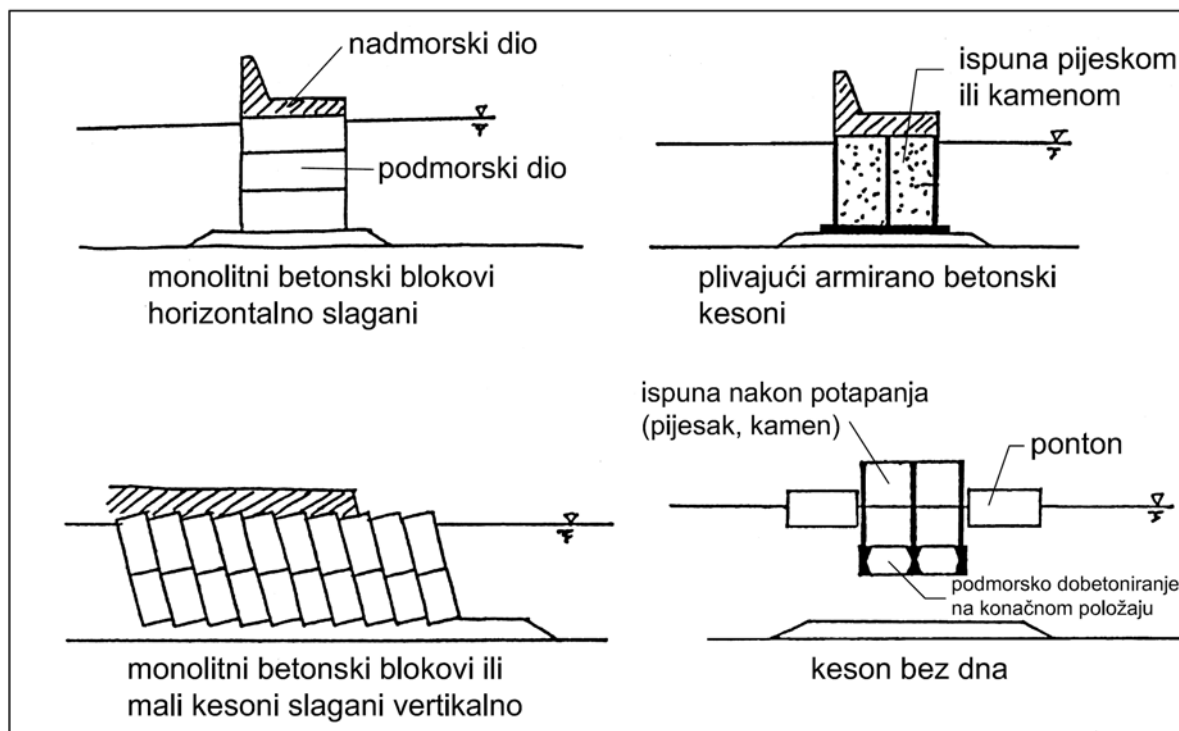
Sl. 6.8.4.1::1 Približne dimenzije vertikalnog lukobrana prema Laras-u

6.8.4.2 Presjek lukobrana tipa zid

Lukobran tipa zid se izrađuje u raznim varijacijama presjeka kao na pr.: slagani monolitni betonski blokovi (Sl. 6.8.4.2::1 i 2), manji i veći armiranobetonski kesoni, plivajući armiranobetonski kesoni koji se potapaju na mjesto ugradnje i sl. (Sl. 4.8.1.2.2::1).

Monolitni betonski blokovi se slažu jedan na drugi bez preklopa, pa zid djeluje kao niz priljubljenih stupova. Na taj način se omogućava realizacija diferencijalnih slijeganja uzduž

trase. Po završetku slijegavanja dobetonira se nadmorski dio koji poravna i poveže različito slegnute dijelove montažnog zida. Na isti taj način formira se nadmorska ploča s parapetom kod svih varijanti lukobrana tipa zid.



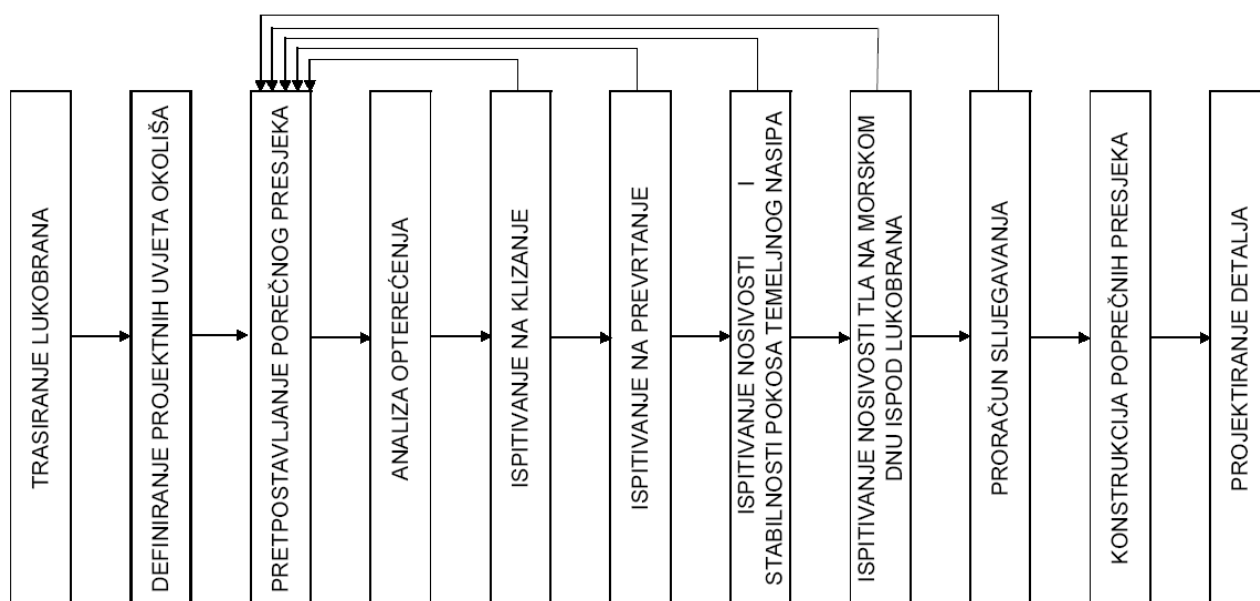
Sl. 6.8.4.2::1 Razne varijante konstrukcije lukobrana tipa zid

6.8.4.3 Proračun konstrukcije lukobrana tipa zid

Svi od tipova moraju biti vrlo pažljivo dimenzionirani, jer propusti dovode do teških oštećenja i gubitka funkcije. U tom cilju potrebno im je ispitati stabilnost i čvrstoću. U pogledu stabilnosti potrebno je ispitati slijedeće:

- klizanje na temeljnoj fugi i među blokovima,
- prevrtanje oko rubne točke na temeljnoj fugi,
- proračun čvrstoće betona (ekscentricitet: rezultanta u jezgri)
- nosivost temeljnog nasipa ispod temeljne fuge (slom nasipa ispod temeljne fuge)
- stabilnost pokosa temeljnog nasipa
- nosivost tla na morskom dnu ispod temeljnog nasipa (slom tla)
- slijegavanje temeljnog tla i temeljnog nasipa,
- stabilitet plutanja i tegljenja za plivajuće kesone.

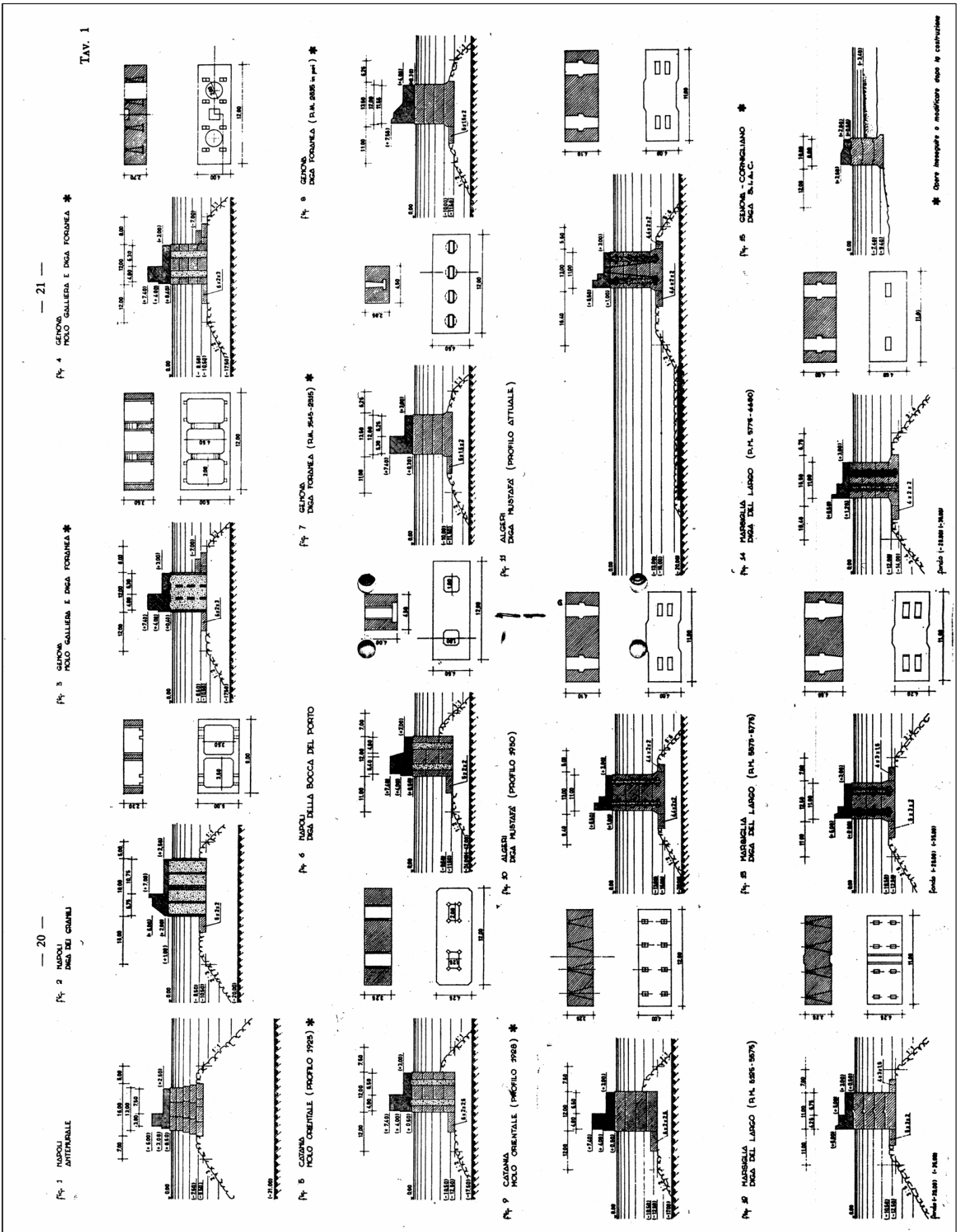
U pogledu čvrstoće, monolitni (nearmirani) betonski blokovi ne smiju dobiti vlačna naprezanja za redovna (stalna i promjenjiva) opterećenja, što se dokazuje položajem rezultante koja tada mora biti u jezgri presjeka. Za izvanredna opterećenja rezultanta u maloj mjeri može izaći iz jezgre. Kod armiranobetonskih kesona svaka stijenka mora biti dovoljno armirana i otporna na pukotine u svim fazama izgradnje i eksploatacije (prenošenje dizalicom, porinuće u more, plutanje, tegljenje, potapanje, razni modusi eksploatacije). Pri tome treba računati sa svim uobičajenim redovnim (kojao uključuju i opterećenja od djelovanja mora i broda) i izvanrednim (prvenstveno potresom) opterećenjima u građevinarstvu. Djelovanja more su hidrostatski tlakovi za razne morske razove u kombinaciji s hidrodinamičkim tlakovima od valova. Djelovanja broda su vlak na poler, ili alternativno tlak na fendere (oboje od vjetra i valova), te udar broda na fendere kod pristajanja. Od svih djelujućih sila načini se znatan broj šema redovnih i izvanrednih opterećenja za koje se izvrše proračuni stabilnosti i čvrstoće i nađu najnepovoljnija stanja za pojedine dijelove ili za cijelu konstrukciju.



Slika 6.8.4.3::1 Dijagram toka projektiranja lukobrana

Projektna valna visina za proračun konstrukcije je maksimalna valna visina povratnog razdoblja 100 godina:

$$H_{\text{proj}}^{\text{konstr.}} = H_{\text{max}}^{100 \text{ g}} .$$



Slika 6.8.4.2::2

Primjeri izgrađenih lukobrana tipa zid