

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

HIDROTEHNIČKE GRAĐEVINE

Dio 4 GRAĐEVINE VODNOG PROMETA

09.05.2010.

Predmet: HIDROTEHNIČKE GRAĐEVINE

Studij: Preddiplomski

Smjer: Opći

Semestar: VI.

Fond sati: 45+0

Predavači: prof. Boris Beraković (1. i 3. dio), prof. Neven Kuspilić (1. i 2. dio) i
prof. Marko Pršić (1. i 4. dio)

Poglavlja ovog separata

- 4.1 GIBANJA MORA
- 4.2 MORSKI VALOVI
- 4.3 IDEALNI VALOVI
- 4.4 REALNI VALOVI
- 4.5 PROGNOZE VALOVA
- 4.6 PROJEKTNI VALOVI
- 4.7 MORSKE RAZINE
- 4.8 LUČKE GRAĐEVINE
- 4.9 UREĐAJI ZA SVLADAVANJE VISINSKIH PREPREKA NA PLOVNIM
PUTEVIMA

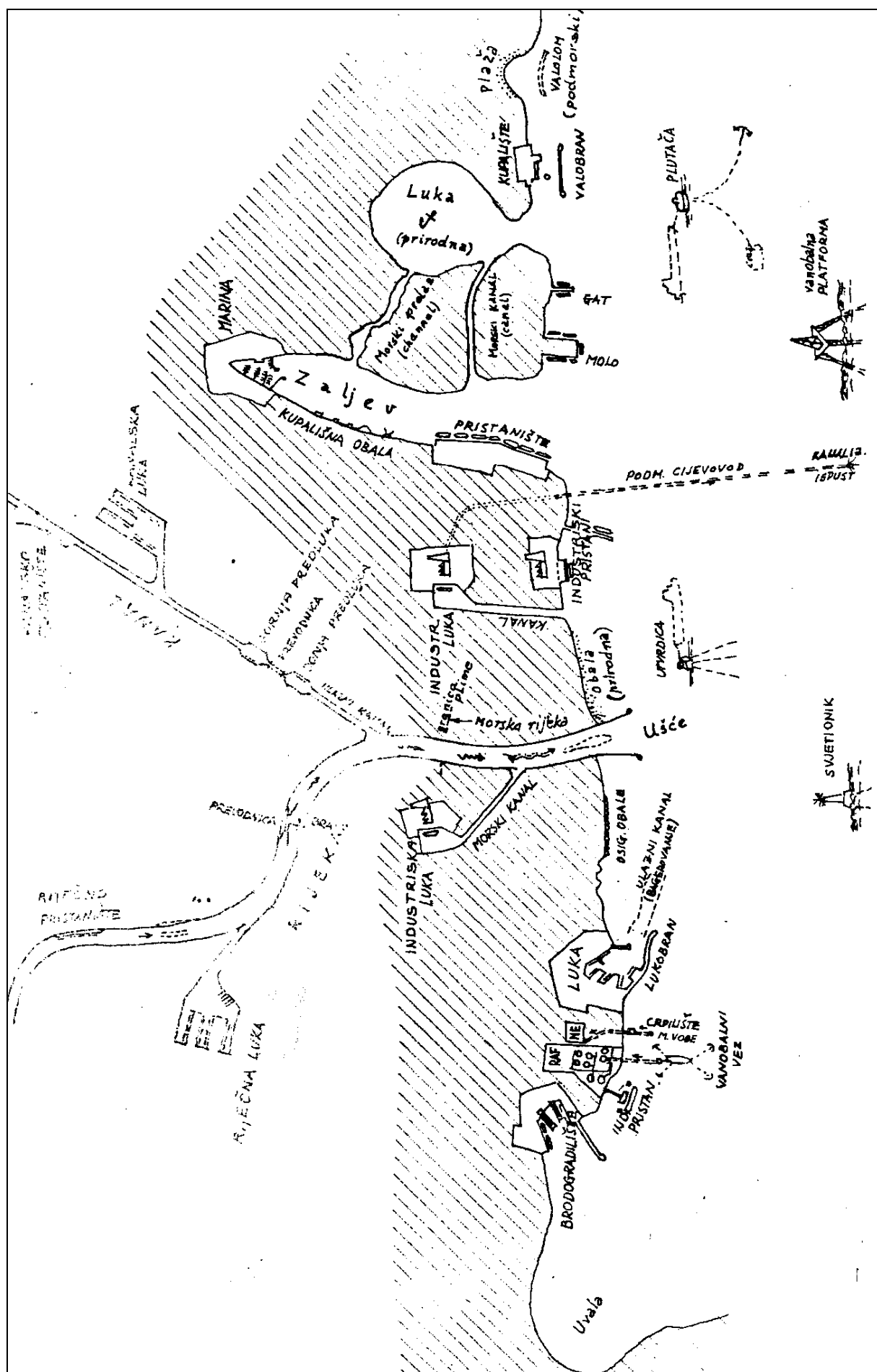
Napisao: prof. Marko Pršić

Na uređenju sudjelovali demonstratori: Josip Medvedec, Davorin Piha, Miroslav Ivić, Marko Rebić, Danijel Dujmović, Tomislav Kržak, Kristina Novak, Ivan Halkijević, Tomislav Šalamun, Damir Mujkanović i Jelena Dasović

Sadržaj

4.1	GIBANJA MORA	6
4.2	MORSKI VALOVI	6
4.2.1	Definicija morskih valova.....	6
4.2.2	Valovi u moru	7
4.2.3	Vrste površinskih morskih valova	7
4.2.4	Opis površinskih morskih valova.....	9
4.2.5	Prognoza površinskih morskih valova.....	10
4.3	IDEALNI VALOVI	11
4.3.1	Definicija idealnog vala	11
4.3.2	Vrste idealnih valova	11
4.3.3	Deterministički opis valova i valna osnova	14
4.3.4	Teorija valova malih amplituda.....	17
4.3.5	Deformacije valova kratkih perioda	20
4.4	REALNI VALOVI	37
4.4.1	Statistički opis realnih vjetrovnih valova	37
4.4.2	Spektralni opis realnih vjetrovnih valova	40
4.5	PROGNOZE VALOVA	42
4.5.1	PROGNOZE VJETROVNIH VALOVA	43
4.5.1.1	Podaci potrebni za prognoze vjetrovnih valova.....	44
4.5.1.1.1	Podaci o vjetru	44
4.5.1.1.2	Podaci o valovima	55
4.5.1.2	Lokalne kratkoročne prognoze vjetrovnih valova	55
4.5.1.2.1	Lokalne kratkoročne prognoze reprezentativnih parametara valnog profila iz podataka o vjetru	56
4.5.1.2.2	Lokalne kratkoročne prognoze reprezentativnih parametara valnog profila iz podataka o valovima; t.j. obrada vizualnog opažanja ili valnog zapisa	60
4.5.1.2.2.1	Lokalne kratkoročne prognoze reprezentativnih parametara valnog profila iz vizualnog opažanja valova	60
4.5.1.2.2.2	Lokalne kratkoročne prognoze reprezentativnih parametara valnog profila iz instrumentalnih registracija valova	60
4.5.1.2.3	Lokalne kratkoročne prognoze valnih spektara iz podataka o valovima ili vjetru.....	61
4.5.1.2.3.1	Određivanje empirijskog spektra iz valnog zapisa	61
4.5.1.2.3.2	Prognoziranje spektra iz podataka o vjetru ili valovima	61
4.5.1.3	Regionalne kratkoročne prognoze vjetrovnih valova.....	64
4.5.1.4	Lokalne Dugoročne prognoze vjetrovnih valova	64

4.6	PROJEKTNİ VALOVI	78
4.7	MORSKE RAZINE.....	84
4.8	LUČKE GRAĐEVINE	87
4.8.1	Lukobrani	91
4.8.1.1	Lukobran tipa nasip.....	92
4.8.1.1.1	Profil nasipnog lukobrana	92
4.8.1.1.2	Presjek lukobrana (konstrukcija).....	94
4.8.1.2	Lukobran tipa zid (vertikalni lukobran)	98
4.8.1.2.1	Profil lukobrana tipa zid.....	99
4.8.1.2.2	Presjek lukobrana tipa zid.....	100
4.8.1.2.3	PRORAČUN KONSTRUKCIJE lukobrana tipa zid.....	101
4.9	UREĐAJI ZA SVLADAVANJE VISINSKIH PREPREKA NA PLOVNIM PUTEVIMA.....	104



Sl. 4.0::1 Objekti pomorskih građevina i unutarnjih plovnih puteva (Tadejević)

4.1 GIBANJA MORA

Razlikuju se dvije vrste gibanja mora:

- pokreti cijele morske mase – morske struje i
- pokreti dijelova morske mase – morski valovi.

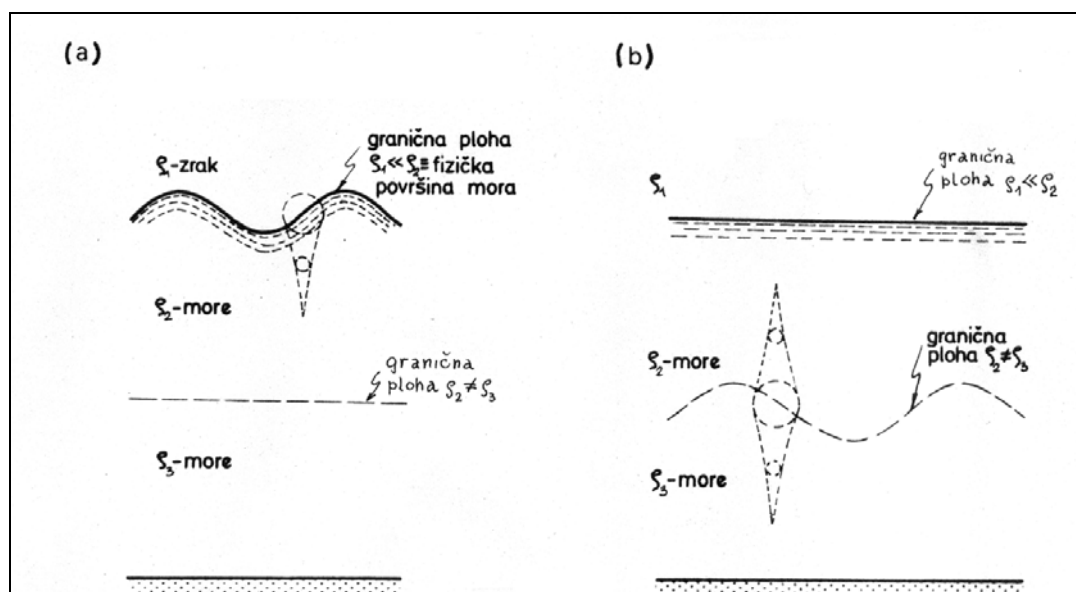
Prvi imaju male brzine, ali prenose velike mase morske vode i interesantni su prvenstveno za ekološke probleme i probleme morskog nanosa. Ne čine velike sile na građevine, pa se uzimaju u obzir samo kod vrlo vitkih konstrukcija. *Drugi* zahvaćaju samo dijelove morske mase i ne uzrokuju značajan transport mase. No imaju značajne brzine i uzrokuju značajne sile na sve građevine u moru. Dalje će se razmatrati samo morski valovi.

4.2 MORSKI VALOVI

4.2.1 DEFINICIJA MORSKIH VALOVA

Morski valovi su proces periodičkog kolebanja neke granične plohe u moru udružen s osciliranjem vodnih čestica pod djelovanjem pobuđujućih i umirujućih sila. Pobuđujuće sile dolaze od zvijezda, gibanja meteoroloških sustava, seizmičkih i tektonskih poremećaja, vjetera i brodova. Umirujuće sile su površinska napetost, gravitacija i Coriolisova sila. U prirodi nikada pojedine pobuđujuće i umirujuće sile ne djeluju separatno nego kompleksno s različitim intenzitetom. Osim toga pobuđujuće sile su pulsirajuće i često slučajne prirode što sve skupa realne valove čini nepravilnim po frekvenciji, smjeru i amplitudi.

Prema stratifikaciji u moru (Sl. 4.2.1::1) razlikuju se *površinski* i *unutarašnji morski* valovi.



Sl. 4.2.1::1 Morski valovi: (a) površinski, (b) unutrašnji (dubinski); $\rho_1 = \rho_z$ - gustoća zraka, ρ_2 i ρ_3 gustoće dva različita sloja mora.

Kod površinskih morskih valova pomiče se fizička površina mora kao granica dvaju medija (vode i zraka) bitno različite gustoće. Pomaci vodnih čestica (i drugi parametri gibanja vodnih čestica) opadaju s dubinom po eksponencijalnom zakonu. Kod unutrašnjih morskih valova pomiče se neka granična ploha u tekućini koja se formira kao granica različitih gustoća unutar vodne mase. Pomaci vodnih čestica tada opadaju i prema dnu i prema površini od granične plohe.

U pogledu duljine valova kod površinskih gravitacijskih morskih valova kratki valovi su oni čija valna duljina je mnogo manja od dubine mora (period do cca 5 min), a dugi valovi su oni čija je duljina mnogo veća od dubine mora (period preko cca 5 min). Kod planetarnih valova duljine valova se sistematiziraju u ovisnosti o smjeru valne duljine i duljine bazena pa ako je taj smjer mali radi se o kratkim valovima, a ako je velik, radi se o dugim valovima.

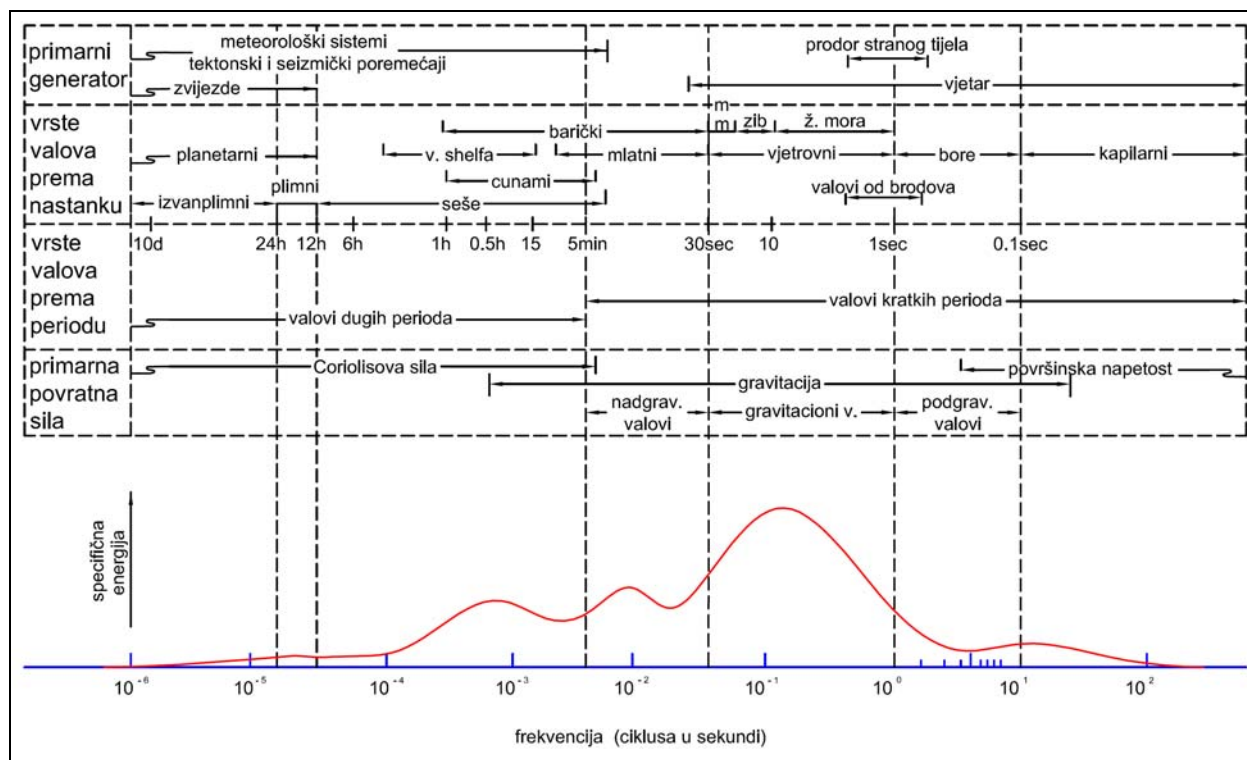
4.2.2 VALOVI U MORU

Su, osim morskih valova, još i elektromagnetski, svjetlosni i zvučni valovi kao dio valova u tekućinama, a ovi su opet samo dio valova u tekućinama i čvrstim tijelima. U valnoj mehanici tekućina i krutih tijela vrši se sistematizacija po: - uvjetima okolilša na adijabatske i izotermičke, po lokalizaciji na površinske i unutrašnje, po orijentaciji ravnine osciliranja u odnosu na smjer rasprostiranja na uzdužno poprečne, translatorne i stojne, po dužini perioda na kratke i duge, a s obzirom na karakter pobude na pravilne i nepravilne tj. slučajne.

Uzdužni valovi se mogu probuditi na površini i u unutrašnjosti krutih tijela i tekućina. Poprečni valovi su također mogući na površini i u unutrašnjosti krutih tijela, ali samo na površini tekućina ili na nekoj graničnoj plohi različitih gustoća u vodenoj masi. U masi vode jednake gustoće ne mogu se pobuditi, bez obzira na veliku pokretljivost vodnih čestica, jer u njoj ne postoje tangencijalna naprezanja. Poprečne oscilacije u čvrstim tijelima nastaju pod djelovanjem sila inercije i tangencijalnih naprezanja pomicanjem atoma oko ravnotežnog položaja u kristalnoj rešetki. Kako u tekućinama nema tih sila za pobudu poprečnih oscilacija potrebne su vanjske sile (površinska napetost, gravitacija, Coriolisova sila) i magnetske sile za elektrovodljive tekućine. U ovom kolegiju dalje će se razmatrati samo površinski morski valovi!

4.2.3 VRSTE POVRŠINSKIH MORSKIH VALOVA

Osim što su sistematizirani prema općim karakteristikama, koje vrijede za sve vrste valova u tekućinama i krutim tijelima, morski valovi se sistematiziraju: - prema primarnom generatoru i - prema primarnoj umirujućoj sili (Sl. 4.2.3::1).

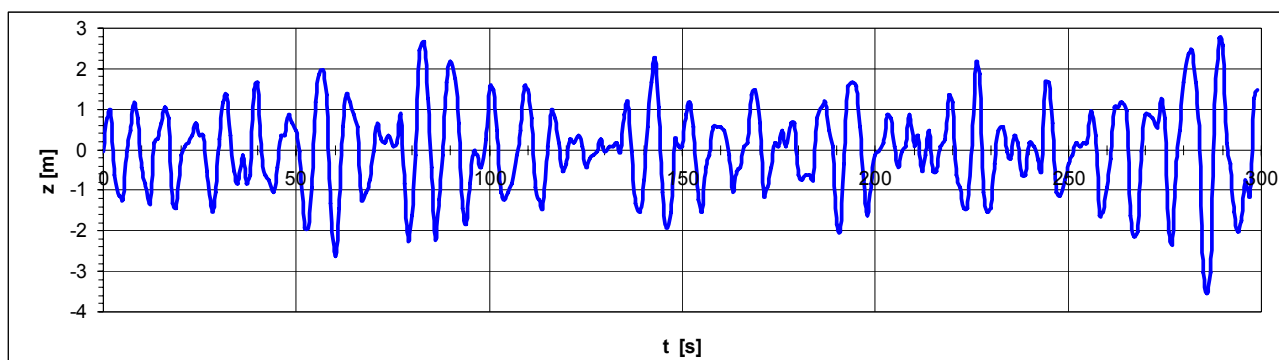


Sl. 4.2.3::1 Klasifikacija površinskih morskih valova prema primarnom generatoru i primarnoj umirujućoj (povratnoj) sili

Primarne umirujuće sile površinskih morskih valova su površinska napetost, teža (gravitacija) i Coriolisova sila. Sistematizacija im je bazirana na omjeru valnog perioda T i perioda inercijalnih oscilacija $T_i = T/\omega \sin \varphi$ gdje je ω kutna brzina rotacije Zemlje, a φ geografska širina. Prema umirujućoj sili se razlikuju: **kapilarni valovi** u čijem umirenju prevladavaju kapilarne sile, **gravitacijski** u čijem umirenju prevladavaju sile gravitacije ($T \ll T_i$), **inercijalno-gravitacijski** u čijem umirenju učestvuju teža i Coriolisova sila ($T < T_i$), **inercijalni** (giroskopski) u čijem umirenju prevladava Coriolisova sila ($T = T_i$) i **planetarni** (Rossby-evi) pod utjecajem vrtnje i sferičnosti Zemlje ($T \gg T_i$).

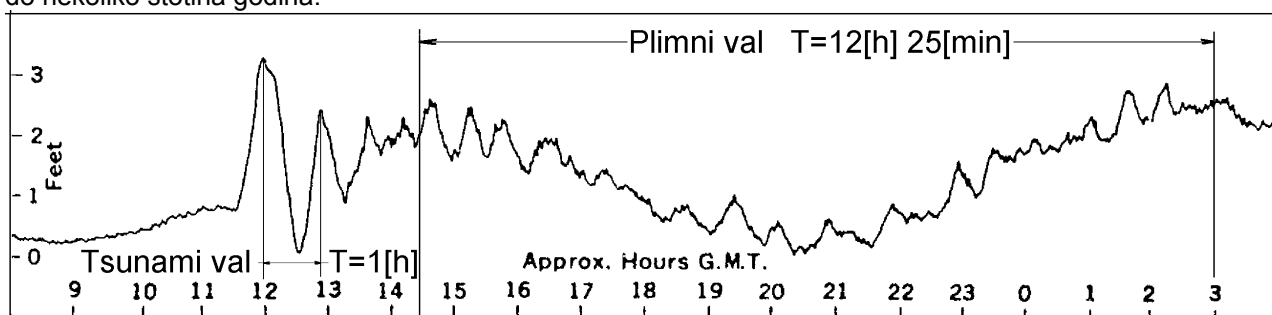
Prema primarnom generatoru (Sl. 4.2.3::1) mnogo je vrsta morskih valova. Od vjetra nastaju **kapilarni valovi** (engl. capillary waves) $T \approx 0,01 - 0,1$ [s], **bore** (engl. ripple) $T \approx 0,1 - 1$ [s] **valovi živog mora** (Sl. 4.2.3::2)

(engl. seas,) $T \approx 1 - 10$ [s], **zibine** (mixed waves), $T \approx 10-20$ [s], **valovi mrtvog mora** – bibavica (engl. swell) $T \approx 20-30$ [s], **mlatni** (engl. surf) $T \approx 30$ [s] – 5 [min], **divovski** (engl. freak, mammoth waves). Od brodova nastaju **brodski valovi** $T \approx 0,8 - 2$ [s]. Uslijed promjena tlaka zraka iznad morske površine izazvanih pomacima olujnih sistema ili djelovanjem vjetra javljaju se **barički valovi ili olujna mijena** (engl. surge, storm tide) $T \approx 0,5-60$ [min]. Uslijed potresa i tektonskih poremećaja u moru nastaju **cunami** (jap. Tsunami) (Sl. 4.2.3::3) valovi $T = 5$ [min] do 1[h].



Sl. 4.2.3::2: Valni zapis vjetrovnih valova živog mora s valografske postaje Panon 22.12.1979. od 01⁰⁰ do 01⁰⁵, period digitalizacije 1[s], reprezentativni valni parametri: $\bar{H}=2,56[\text{m}]$, $H_s=3,98[\text{m}]$, $H_{1/10}=5,07[\text{m}]$, $H_{\max}=6[\text{m}]$, $\bar{T}_0=3,79[\text{s}]$, $T_s=4,22[\text{s}]$, $T_{1/10}=4,16[\text{s}]$, $T_{\max}=4,6[\text{s}]$

Šćige ili seše (engl. seiche) su stojni valovi u zatvorenim ili poluzatvorenim bazenima uzrokovani vjetrom, promjenom pritiska, seizmičkim ili dugim valovima s mora. **Valovi šelfa** (engl. shelf waves) $T \approx 15$ [min] – nekoliko sati nastaju zbog djelovanja nagle promjene dubine na pučinske valove. **Plimni valovi** (engl. tidal wave) proizlaze izgravitacionog djelovanja Mjeseca i Sunca (Sl. 4.2.3::3), kao i ostalih zvijezda te rotacije Zemlje $T = 12$ [h] 25 [min] ili 24 [h] 56 [min]. **Izvanplimni valovi** (engl. transtidal waves) su proizvedeni pomacima olujnih sistema zvijezda i Zemljine kore; $T =$ nekoliko dana do nekoliko stotina godina.



(from Symons and Zelter, 1960)

Sl. 4.2.3::3 Mareogram dugih plimnih valova s registriranim dugim cunami (potresnim) valovima max. visine 3,3[ft]=1[m]. Mareografski zapis na otoku Johnston, Havaji 24. i 25.05.1960.

4.2.4 OPIS POVRŠINSKIH MORSKIH VALOVA

Svaki opis morskih valova sadrži dvije stvari: *opis valnog profila i opis gibanja vodnih čestica*. Povijesno gledano, a i po složenosti razvijena su tri načina opisa morskih valova deterministički, statistički i spektralni. *Deterministički opis* valova se primjenjuje za idealizirane pravilne dvodimenzionalne valove s konstantnim parametrima valnog profila (valna visina, tj. valna duljina L , valni period T i valna brzina c ; odnosno pokretnim valnim profilom $\eta = f(x, t)$

koji sadrži sve prednje parametre i parametrima gibanja vodnih čestica (putanja $x(t)$, $z(t)$, brzina v_x , v_z , ubrzanje a_x , a_z). Zbog svoje pravilnosti takovi valovi se nazivaju i idealni valovi. U prirodi su izuzetno rijetki i donekle im se približavaju valovi mrtvog mora. **Statistički opis** prikazuje realne nepravilne trodimenzionalne valove, na jednoj geografskoj točki za neko stacionarno stanje mora (10 min do nekoliko sati), reprezentativnim parametrima valnog profila koji su za to stanje konstantni. Valni profil i ostali parametri gibanja vodnih čestica dobiju se uvrštavanjem reprezentativnih valnih parametara u izraze za idealne valove. Reprezentativne valne visine su: $H_s \equiv H_{1/3}$ – značajna valna visina, $H_{1/10}$ – desetinska valna visina, $H_{1/100}$, $H_{1/1000}$, H_N^{mod} – maksimalna valna visina među N valova, H_{rms} – korijen sredine kvadrata valnih visina (energetski ekvivalent nekog nepravilnog valovlja) i H_v – vizualno opažana valna visina ($H_v \sim H_s$). Reprezentativni valni periodi su: $\bar{T}_0$ prosječni period presijecanja mirnog raza mora, T_s značajni valni period, $T_{1/10}$, $T_{1/100}$, T_N^{mod} i T_v – vizualno opažan valni period ($T_v \sim T_s$). Varijacije valnih perioda su mnogo manje nego li kod valnih visina, a jedne i druge se ravnaaju prema Raglighovom zakonu vjerojatnosti (kod perioda njihovi kvadrati). Za statistički opis je potreban valni zapis ili vizualno opažanje. **Spektralni opis** kao i statistički služi za prikaz kratkoročnog stacionarnog stanja realnih valova. No sredstvo spektralnog opisa je matematičko: funkcija spektralne gustoće koja se često skraćeno naziva valni spektar. Osnovna je ideja spektra da se, postupkom tzv. spektralne ili Fourierove analize, nađe rezultanta sume pravilnih (idealnih) valova koja je jednaka razmatranom realnom valovanju pa se pojedini parametri tako definiranih pravilnih valova poredaju po njihovim frekvencijama (ω) i valnim brojevima (k). Rezultat su jednodimenzionalni spektri u frekventnoj domeni i u domeni valnog broja. Češće se koriste frekventni spektri. Tako su u upotrebi energetski spektar, spektar pomaka valnog profila, amplitudni spektar, spektar valnih visina, spektar brzina vodnih čestica, spektar ubrzanja vodnih čestica Za opis varijabiliteta valnih parametara po morskom prostoru služe dvodimenzionalni ili usmjereni spektri. Jednodimenzionalni frekventni spektar za neko konkretno stanje mora se može dobiti iz valnog zapisa, a dvodimenzionalni spektar valnog broja se dobije iz stereografskog snimka valovite morske površine. Ostali se izvode iz ova dva.

4.2.5 PROGNOZA POVRŠINSKIH MORSKIH VALOVA

Prognoza površinskih morskih valova je postupak određivanja reprezentativnih ili vjerojatnih parametara valnog profila, ili valnog spektra, realnih valova u prošlosti, sadašnjosti ili budućnosti. Prognoze su razvijene prema primarnom valnom generatoru, a svaka od njih ima kratkoročnu (za 10-minutno do nekoliko satno stacionarno stanje mora) i dugoročnu varijantu (za rijetke pojave, tj. za stanje mora koje se pojavljuje u nekom duljem nizu godina). Po lokaciji prognoze mogu biti globalne (na pr. valna prognoza WMO za vjetrovne valove svjetskog mora ili globalni model rasprostiranja plimnih valova), regionalne (na pr. valna prognoza WMO za Mediteran, valna prognoza ALADIN za Jadran ili model rasprostiranja plimnih valova na Jadranu) i lokalne koje se odnose na jednu geografsku točku. Po nastupu mogu biti vjerojatnosne i vremenske. Prve definiraju vjerojatnost nastupa neke valne veličine, a druge i vrijeme njenog nastupa.

4.3 IDEALNI VALOVI

4.3.1 DEFINICIJA IDEALNOG VALA

Idealni val je veoma restriktivan fizikalni ili matematski model realnog vala. Fizikalni model lje u odnosu na realni val restriktivan u toliko što je:

- dvodimenzionalan,
- monokromatski,
- jednostavan (opisan jednom ili više cikl. funkc.),
- konstantne visine.

Mogu opstati samo u laboratoriju. Realni morski valovi nemaju niti jednu od karakteristika idealnih valova, a samo iznimno im se u tom pogledu približuju (na pr. dugi valovi mrtvog mora).

Matematički model lje još restriktivniji od fizikalnog jer sadrži još i sljedeće restrikcije u odnosu na realni val:

- fluid je homogen i nestišljiv, gustoća je konstantna;
- površinska napetost se može zanemariti;
- Coriolis-ov efekt se može zanemariti;
- tlak na fiz. pov. mora je jednoličan i konstantan;
- fluid je idealan ili neviskozan;
- pojedini val je promatran bez interakcije s ostalim gibanjima vode;
- dno je horizontalno, čvrsto nepomičnog ruba što uključuje da čestice na dnu imaju vertikalnu brzinu nula;
- amplituda vala je mala, a forma vala je nepromjenljiva u prostoru i vremenu;
- valovi su male strmine.

4.3.2 VRSTE IDEALNIH VALOVA

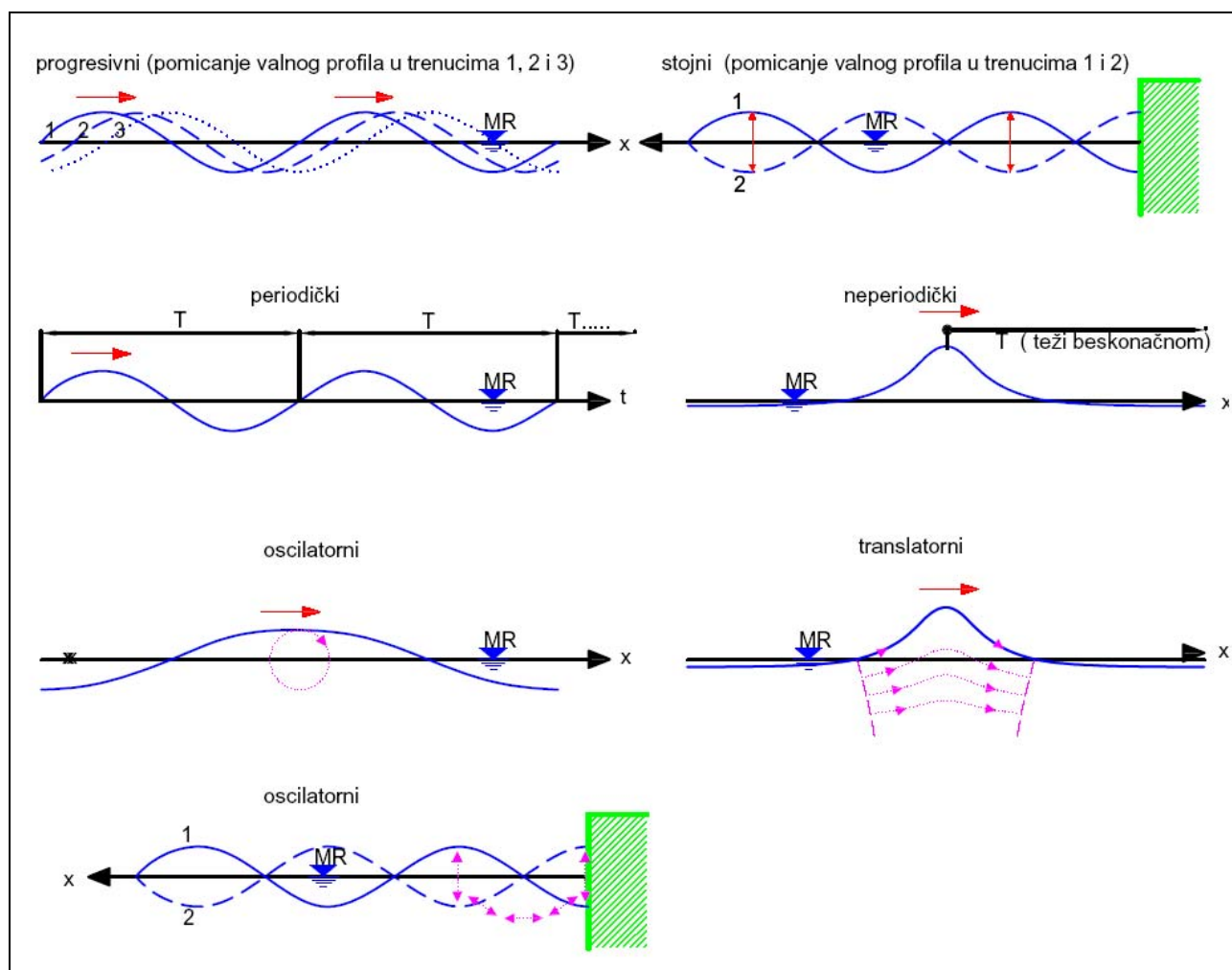
Osnovna je podjela idealnih površinskih valova prema veličini njihovog perioda pa se mogu imenovati:

- valovi kratkih perioda (period manji od cca 30 sek)
- valovi dugih perioda (period veći od cca 5 min.).

Prvi imaju karakteristiku da je u pokretu pretežno površinski sloj mora dok se dubinski slojevi znatno manje ili ništa ne pokreću. Elementarne čestice se kreću u kružnim ili eliptičnim putanjama. Drugi imaju karakteristiku da pokreti zahvaćaju čitavu morsku masu. Pri tome su putanje karikirano izdužene elipse tako da se uočavaju samo horizontalni

pokreti tamo-amu. Promjena gibanja čestica po dubini je mala u odnosu na promjenu kod kratkih valova.

Za daljnja uvodna tumačenja interesantne su podjele po načinu gibanja. *Gibanja valnog profila* mogu se klasificirati po 2 kriterija. 1: ako se promatra gibanje po prostoru mogu se razlikovati progresivni i stojni valovi (Sl. 4.3.2::1). 2: ako se gibanje valnog profila promatra po vremenu mogu se razlikovati periodički i neperiodički valovi (Sl. 4.3.2::1). *Gibanje vodnih čestica* je različito od gibanja valnog profila, a može biti oscilatorno i translatorno (Sl. 4.3.2::1).

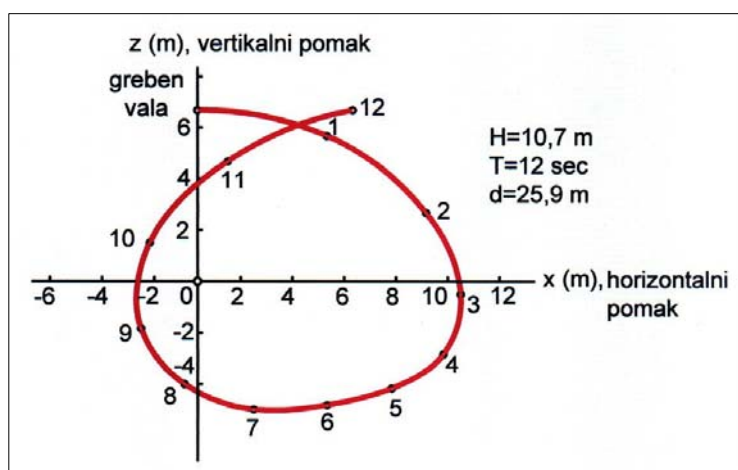


Sl. 4.3.2::1 Modusi gibanja valnog profila i vodnih čestica idealnih valova

Progresivni val je onaj kome se valni profil; t.j valni greben kao najuočljiviji, horizontalno giba u odnosu na fiksnu točku. Smjer u kome se greben giba je smjer rasprostiranja vala. *Stojni val* je onaj kome se valni profil; t.j valni greben kao najuočljiviji, pomiče samo gore-dolje na fiksnoj poziciji. Karakteriziran je trbusima i čvorovima. Prvi uvijek imaju maksimalne amplitude, a drugi uvijek miruju.

Periodički val je onaj kome se valni profil: t.j. kolebanje fizičke površine mora ponavljati u jednakim vremenskim intervalima. *Neperiodički val* je onaj kome se valni profil: t.j. valni greben pojavi usamljeno, ili se ponavlja u vrlo dugim vremenskim intervalima tako da val izgleda usamljen (naziva se i soliterni val).

Oscilatorni val je onaj kome se gibanje čestica odvija po kružnim ili eliptičnim putanjama (trajektorijama) koje su manje-više na istom mjestu. Vodna čestica pređe cijelu putanju za jedan valni period i to se na istom mjestu stalno ponavlja s tim istim periodom. Ako su trajektorije zatvorene takvo gibanje vodnih čestica se naziva rotaciono (Sl. 4.3.2::1), a ako su približno zatvorene naziva se irotaciono (Sl. 4.3.2::2). To kod rotacionog gibanja ne daje nikakvo napredovanje vodnih čestica u smjeru rasprostiranja vala, a kod irotacionog gibanja daje veoma malo napredovanje vodnih čestica u smjeru rasprostiranja vala (t.z.v. drift struju). S druge strane pokreti susjednih vodnih čestica su jednake periodičnosti (frekvencije), ali su međusobno pomaknuti u fazi. Neke čestice su na vrhovima svojih orbita, neke malo niže tako da se može formirati valovita fizička površina mora; t.j. valni profil.



Slika 4.3.2::2 Irotaciono gibanje vodnih čestica, Skjelbreia 1959.

Oscilatorni pomaci čestice vode mogu se odvijati tamo-amo, oko početnog mjesta, i po pravčastim trajektorijama različite orijentacije u prostoru (Sl. 4.3.2::1). U tom slučaju nikad nema napredovanja

vodnih čestica u odnosu na početni položaj. *Translatorni val* je onaj kome vodene čestice permanentno, u znatnom iznosu, napreduju s valnim grebenom i ne vraćaju se na svoje početno (originalno) mjesto.

Primjeri za valna gibanja su: *Vjetrovni val* koji pojavom izgleda kao niz grebena i dolova koji se vidno gibaju morskom površinom i u manje-više pravilnim periodima slijede jedan za drugim. Vodne čestice gibaju mu se u orbitalnim putanjama i opetovano se vraćaju otprilike na svoje originalno mjesto. Prema tome on je progresivan, periodički i oscilatoran val. *Reflektirani val* nastaje kao superpozicija kod refleksije progresivnog vala kad on udari u vertikalni zid. Valni mu se profil ne giba nego koleba gore-dolje. Karakteriziran je trbusima i čvorovima koji su uvijek na istom mjestu. Na mjestu trbuha naizmjenično se, u manje-više pravilnim periodima, pojavljuju dol i brijeg. Čvorovi uvijek miruju. Čestice vode gibaju mu se oscilatorno tamo-amo, oko originalnog mjesta, a po pravcima različite orijentacije. Prema tome on je stojni, periodički i

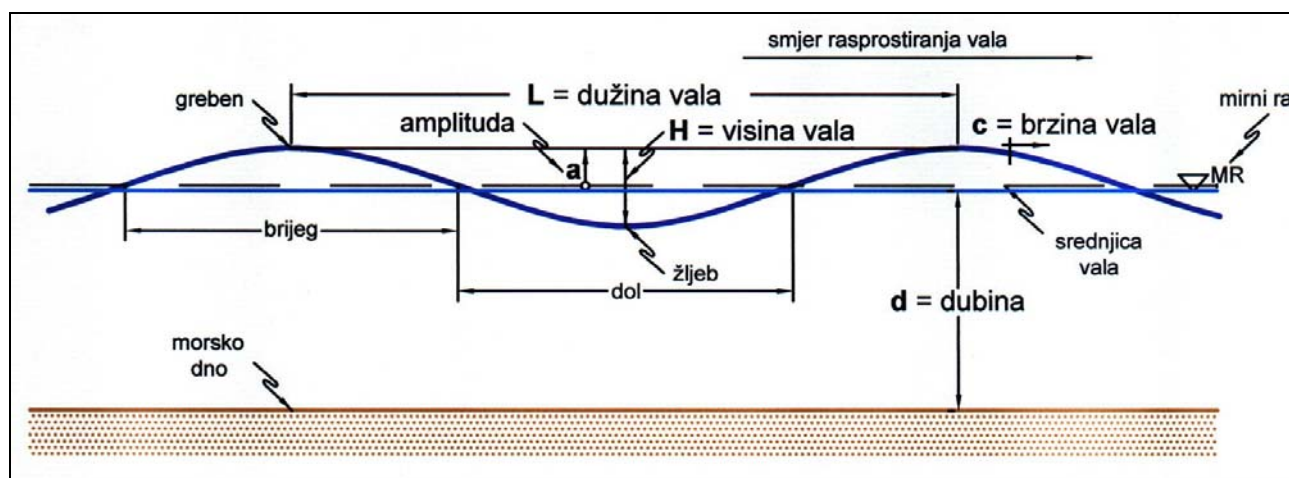
osvilatoran val. Realni pandan potpunom (totalnom) stojnom valu naziva se clapotis (franc.). *Lomljeni val* nastaje u plićaku od vjetrovnog vala. Na mjestu loma vala formira se jedan greben koji usamljeno putuje prema obalnoj crti sve dok se sasvim ne slomi i nestane u povratnoj struji mora. Vodne čestice napreduju u smjeru gibanja valnog grebena i ne vraćaju se na svoje originalno mjesto (vrate se kasnije u povratnoj struji). Prema tome on je progresivan, neperiodički i translatoran val. Taj karakter ima i potresni (tsunami, jap.) val.

U prirodi najčešći su valovi koji su progresivni, periodički, i oscilatorni, pa će se u nastavku najprije definirati baš takvi valovi. Vidno im se rasprostire valni profil (forma vala), a vodne čestice osciliraju manje više na istom mjestu.

4.3.3 DETERMINISTIČKI OPIS VALOVA I VALNA OSNOVA

Determinističkim načinom dadu se u potpunosti opisati samo idealni valovi preko zakona valne mehanike. Datira s početka razvoja pomorske hidraulike, 19. st. Realni valovi ne mogu se na taj način zadovoljavajuće opisati radi slučajne varijacije njegovih parametara.

Deterministički opis sadrži 2 grupe parametara: za *valni profil* i za *gibanje vodnih čestica*. Glavni dijelovi valnog profila (Sl. 4.3.3.:1) progresivnog, periodičkog, oscilatornog vala su brijeg i dol, s njihovim istaknutim točkama: grebenom i žljebom.



Sl. 4.3.3.:1 Opis valnog profila idealnog progresivnog, periodičkog, oscilatornog vala

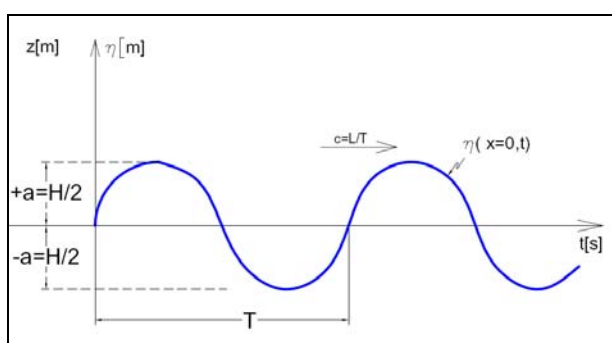
Najosnovniji parametri za opis valnog profila su *visina* $H[m]$, *dužina* $L[m]$ i *period* $T[s]$. *Amplituda* $a[m]=H/2$ je maksimalni pomak fizičke površine mora od srednjice vala (Sl. 4.3.3.:1).

Strmost vala $H/L[1^\circ]$ je odnos visine i dužine vala, kreće se od $1/7$ do $1/200$ kod valova živog mora najčešće od $1/10 - 1/25$!

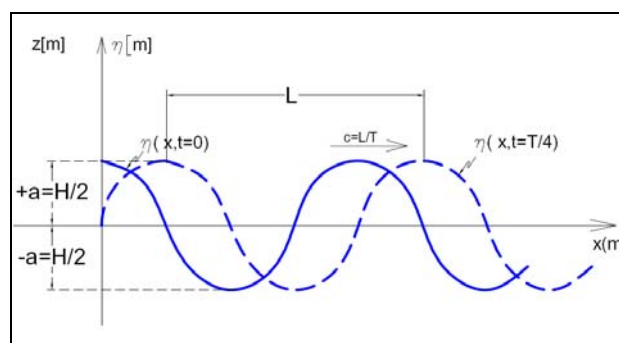
Period vala $T[s]$ je vremenski period između dva uzastopna prolaza grebena kroz istu točku (Sl. 4.3.3::2). Visina H i dužina L su parametri vala koji se mijenjaju s dubinom. Period T se ne mijenja s dubinom!

Valni profil $\eta(x,t)[m] \equiv z(x,t)[m]$ predstavlja vertikalno kolebanje fizičke površine mora po prostoru i vremenu u vidu neke cikličke funkcije (Sl. 4.3.3::2 i 4.3.3::3).

Brzina rasprostiranja vala, ili samo brzina vala, $c[m/s]$ je brzina pojedinačnog brijega ili dola vala kojom se on rasprostire morskom površinom u odnosu na fiksnu točku (Sl. 4.3.3::3). Kod oscilatornog vala daje se izraziti kao $c = L/T$, dok se brzina translatornog vala ne da izraziti na taj način jer $T \rightarrow \infty$.



Sl. 4.3.3::2 Lokalni valni profil na nekoj fiksnoj geografskoj točki



Sl. 4.3.3::3 Trenutni valni profil u fiksnom trenutku $t=0[s]$ i nekom drugom fiks. trenutku $t=T/4[s]$

Brzina vodne čestice $v[m/s]$ je brzina kojom ona prolazi svoju putanju ($v = H\pi/T$ kod irotacijskog gibanja vodne čestice). Ima horizontalnu komponentu " $u[m/s] \equiv v_x$ " i vertikalnu " $w[m/s] \equiv v_z$ ". Kod progresivnog oscilatornog vala to je brzina rotacije po orbitalnoj putanji (Sl. 4.3.2::1). Vodne čestice translatornog vala gibaju se po zakrivljenoj crti ((Sl. 4.3.2::1) i također imaju obadvije komponente brzine.³

Slijede osnovni parametri opisa gibanja vodnih čestica:

Putanja (trajektorija) vodne čestice može biti zatvorena kružna ili eliptična (rotacijska), spiralna kružna ili eliptična (irotacijska), pravčasta ili zakrivljena crta. Prve tri se odnose na oscilatorne valove, a četvrta na translatorne.

Ubrzanje vodne čestice $a[m/s^2]$ je derivacija brzine po vremenu. Komponente su a_x i a_z .

Horizontalna brzina transporta vodne mase uslijed valova (brzina drifta) $U[m/s]$ je horizontalna brzina kojom se kod irotacijskog gibanja vodnih čestica pomiče morska masa.

Val koji se približava obali je u interakciji s dnom. Obzirom na to kako dubina vode $d[m]$ utječe na parametre vala može se more podijeliti u tri zone: duboka voda, prijelazno područje dubina, plitka voda (Tab. 4.3.3::I). Za neki val je *voda duboka* ako dno ne utječe na njegove parametre ("ne osjeća dno"). Takvi dubokovodni valovi se indeksiraju s "o" kao na pr. H_o i L_o . Dubokovodno područje se ostvaruje za $d \geq L_o/2$. U tom slučaju npr. brzina vala ne ovisi o dubini mora $c_o = f(T)$. Neki se val rasprostire u *prijelaznom području dubina* ako je $L_o/2 > d \geq L/25$. U tom slučaju dubina utječe na promjenu parametara. Brzina vala je funkcija perioda i dubine: $c = f(T, d)$. *Plitko područje* je definirano dubinom $d < L/25$, a brzina vala je funkcija samo dubine: $c = f(d)$.

	d/L	$2 \pi d/L$	$\tanh(2 \pi d/L)$
duboka voda	$> 1/2$	$> \pi$	~ 1
prijelazno područje	$1/2$ do $1/25$	π do $1/4$	$\tanh(2 \pi d/L)$
plitka voda	$< 1/25$	$< 1/4$	$\sim 2 \pi d/L$

Tab. 4.3.3::I Klasifikacija dubina mora obzirom na valove

Nakon što je izvedena prva valna teorija (Trohoidalna, Gerstner 1802.) pokazalo se da ona ne može dobro opisati valni profil i sva valna gibanja u svim područjima dubina mora, pa su razvijene brojne teorije koje bolje opisuju val u određenom području dubina (Tab. 4.3.3::II).

Veličina amplitude	Red teorije	Naziv i autor teorije
1 Valovi malih amplituda $H/L < 1/150$; $L > 150 H$	Prvog reda ili linearna	Airy (1845)
2 Valovi konačnih amplituda	Prvog reda ili linearna i višeg reda ili nelinearna	Trohoidalna, Gerstner (1802.), Stokes 2. reda (1880.), Stokes 3. reda Stokes 4. reda Stokes 5. reda Konoidalna 1. reda, Korteweg i De Vries (1895.), Konoidalna 2. reda, Hiperbolična (1968.) Iwagaki, Soliterna (1872.) Businessque, Teorija strujne funkcije (1973.) Dean

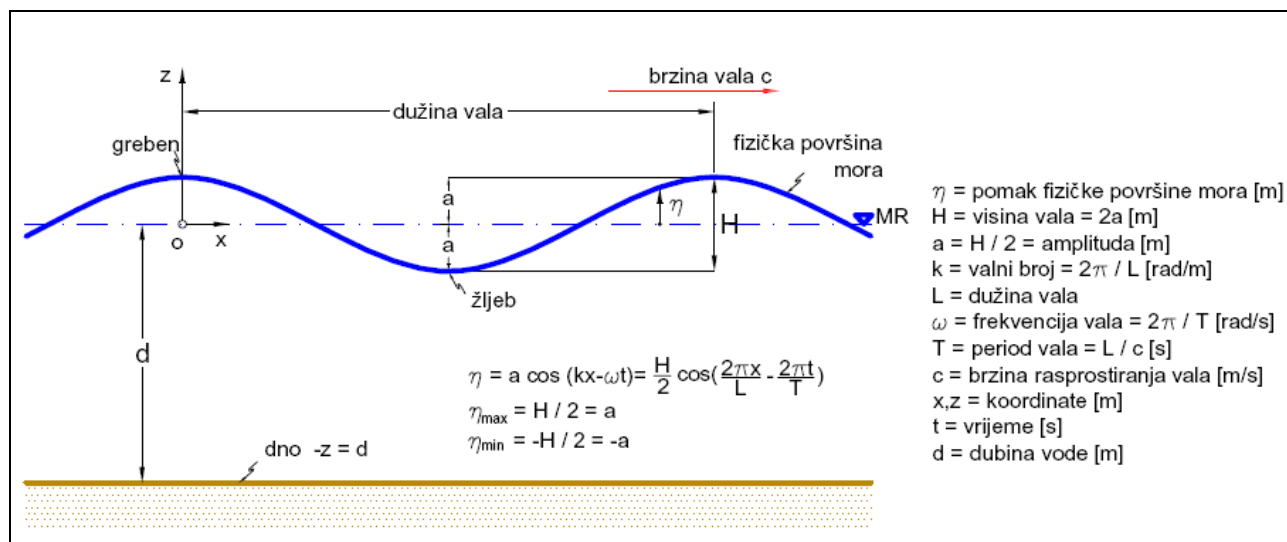
Tab. 4.3.3.:II Determinističke teorije idealnih morskih valova kratkih perioda

Zbog toga pojedina teorija, odgovarajuća određenom valnom profilu, gibanju vodnih čestica i području dubine mora, ima najmanje pogreške za upravo tekav val, a za drukčiji val i dubinu mora više griješi. Najčešće se koristi linearna teorija koja za najčešće inženjerske probleme prihvatljivo opisuje progresivnan, periodički, oscilatorni val u svim područjima dubina mora.

4.3.4 TEORIJA VALOVA MALIH AMPLITUDA

Najelementarnija od svih teorija (Tab. 4.3.3.:II) je teorija valova malih amplituda ili još nazvana linearna teorija, odnosno prema autoru Airy-jeva teorija (1845). Matematički Airyjeva teorija može se označiti kao prva aproksimacija nelinearnog opisa oscilatornih valova. Ta teorija daje uvid u sva periodička valna ponašanja i opis valnog profila u svim područjima dubina mora.

U, općenito nelinearnom, matematičkom modelu idealnog valovlja rubni uvjeti na fizičkoj površini mora nisu linearni. U koliko je valna amplituda veoma mala u odnosu na dužinu vala ($H/L \leq 1/150$) rubni uvjeti na površini se mogu linearizirati bez velike pogreške na izvedene formule i matematički model postaje linearan. Tada se opis valova prikazuje jednostavnim jednadžbama za pojedine valne parametre kako slijedi:



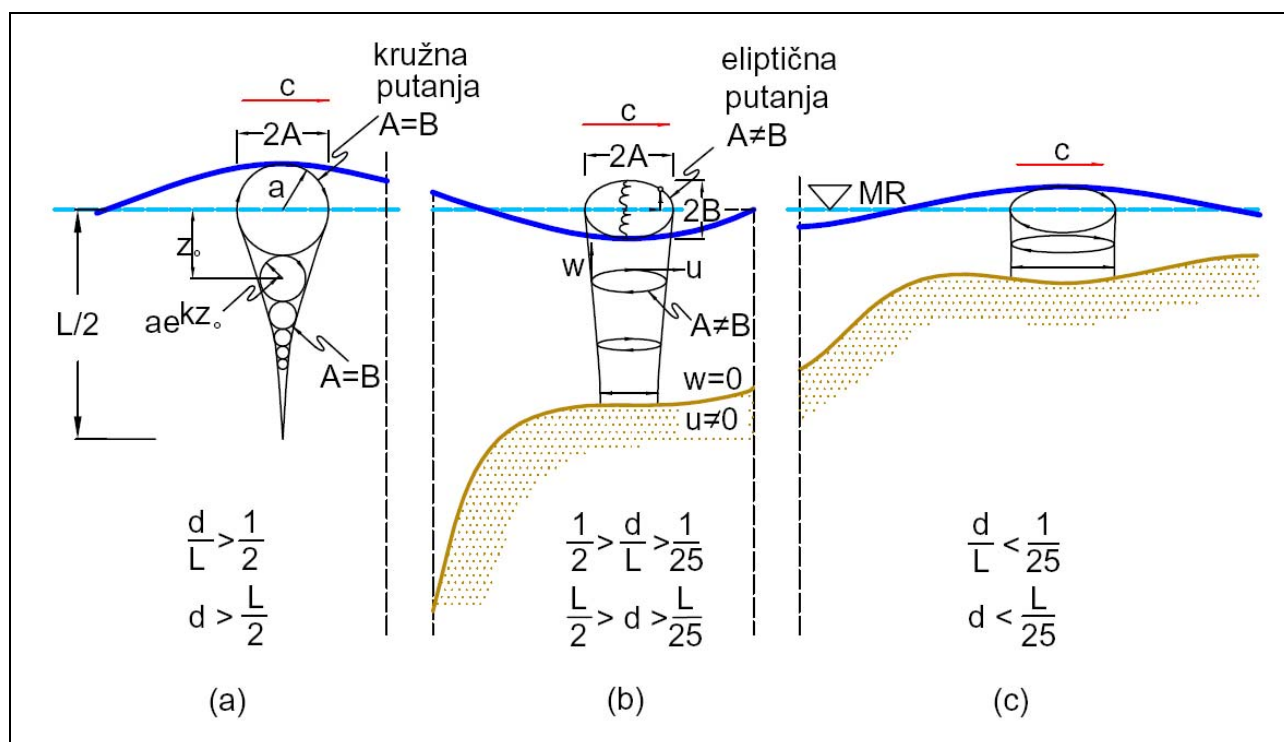
Sl. 4.3.4.:1 Prikaz oznaka i naziva valnog profila kod linearne valne teorije

Sinusoidalni profil pokretnog vala: je jednadžba koja opisuje izdizanje fizičke površine mora (Sl. 4.3.4.:1) kao funkciju horizontalne udaljenosti (x) i vremena (t) u vidu sinusnog vala.

$$\eta = a \cdot \cos(kx - \omega \cdot t), \quad a \text{ uz } k = \frac{2\pi}{L}, \quad \omega = \frac{2\pi}{T}, \quad a = \frac{H}{2}$$

$$\eta = \frac{H}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{L}x - \frac{2\pi}{T}t\right).$$

Pomaci vodnih čestica vala (u linearnoj valnoj teoriji) općenito se odvijaju u eliptičnim putanjama u plitkoj i prelaznoj zoni mora, a u kružnim putanjama u dubokom moru (Sl. 4.3.4::2).



Sl. 4.3.4::2 Utjecaj dubine na putanje čestica vala u (a) dubokoj vodi, (h) prelaznom području i (c) u plitkoj vodi

Horizontalna i vertikalna brzina vodnih čestica:

$$u = \frac{agk}{\omega} \left[\frac{\text{ch}[k \cdot (z + d)]}{\text{ch}(kd)} \right] \cos(kx - \omega t)$$

$$w = \frac{agk}{\omega} \left[\frac{\text{sh}[k \cdot (z + d)]}{\text{ch}(kd)} \right] \sin(kx - \omega t).$$

Ubrzanja vodenih čestica proizlaze daljijim diferenciranjem brzina po vremenu:

Brzina rasprostiranja vala dana je s:

$$c^2 = \frac{g}{k} \text{th}(kd) \text{ što u razvijenom obliku glasi: } c = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \text{th} \frac{2\pi d}{L}}$$

a supstitucijom $c = L/T$ i preuređenjem dobije se:

$$c = \frac{g}{\omega} \operatorname{th}(kd) \text{ što u razvijenom obliku glasi: } c = \frac{gT}{2\pi} \operatorname{th} \frac{2\pi d}{L}.$$

Valna dužina je s periodom vezana zakonom

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \operatorname{th} \frac{2\pi d}{L} = L_0 \cdot \operatorname{th} \frac{2\pi d}{L} = \frac{gT}{\omega} \cdot \operatorname{th}(kd). \text{ Jedn. je implicitna, rješava se iteracijom!}$$

$$T = \sqrt{\frac{2\pi L}{g} \operatorname{cth} \frac{2\pi d}{L}}$$

Valna visina nije nikakvim zakonom vezana za L i T !

Valna energija na jedinicu morske površine (specifična valna energija):

$$\bar{E} = \frac{\rho \cdot g \cdot H^2}{8} \left[\frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{m}^2} \equiv \frac{\text{J}}{\text{m}^2} \right]$$

Primjer 4.3.4.:1

Valni profil

Zadano: Valni profil definiran je valnom dužinom $L = 100 \text{ m}$ i valnom visinom $H = 3 \text{ m}$. Dubina dna je 50 m .

Traži se: Izračunaj: valnu amplitudu $a[\text{m}]$, valni broj $k[\text{rad/m}]$, valni period $T[\text{s}]$, valnu kutnu frekvenciju $\omega[\text{rad/s}]$ i brzinu rasprostiranja vala $c[\text{m/s}]$. Napiši izraz i nacrtaj valni profil $\eta=f(x)$ u trenutcima $t_1 = 0$, $t_2 = T/4$ i $t_3 = T/2$!

Rješenje:

$$a = H/2 = 3/2 = 1,5[\text{m}]$$

valna amplituda

$$k = 2\pi/L = 2\pi/100 = 0,0628[\text{rad/m}]$$

valni broj,

$$T = \sqrt{\frac{2\pi L}{g} \operatorname{th} \left(\frac{2\pi d}{L} \right)} = 8[\text{s}]$$

valni period

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 0,785[\text{rad/s}]$$

valna kutna frekvencija

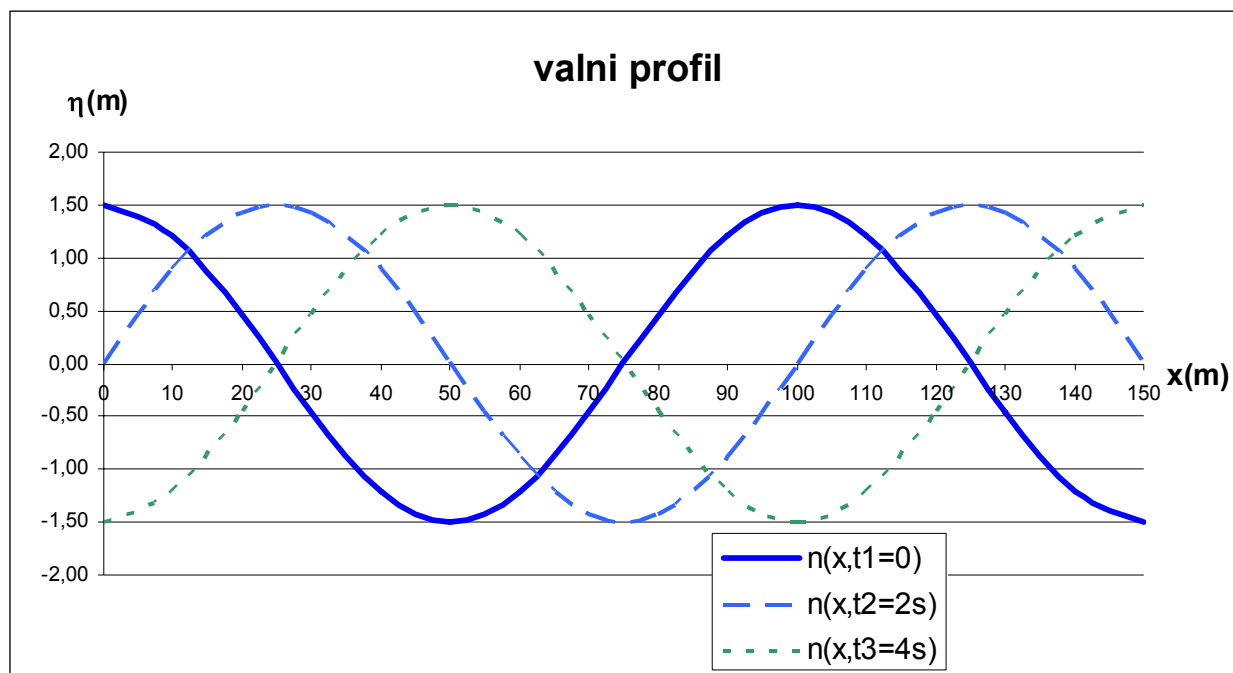
$$c = L/T = 100 / 8 = 12,5[\text{m/s}]$$

brzina rasprostiranja vala

$$\eta = a \cdot \cos(kx - \omega t) = 1,5 \cos(0,0628x - 0,785t) [\text{m}] \quad \text{valni profil}$$

Graf valnog profila u trenucima $t_1 = 0$, $t_2 = T/4 = 2,0$ i $t_3 = T/2 = 4,0$ [s]:

x [m]	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
$\eta(x, t_1=0)$ [m]	1,50	1,21	0,46	-0,46	-1,21	-1,50	-1,21	-0,46	0,46	1,21	1,50	1,21	0,46	-0,46	-1,21	-1,50
$\eta(x, t_2=2\text{s})$ [m]	0,00	0,88	1,43	1,43	0,88	0,00	-0,88	-1,43	-1,43	-0,88	0,00	0,88	1,43	1,43	0,88	0,00
$\eta(x, t_3=4\text{s})$ [m]	-1,50	-1,21	-0,46	0,46	1,21	1,50	1,21	0,46	-0,46	-1,21	-1,50	-1,21	-0,46	0,46	1,21	1,50



4.3.5 DEFORMACIJE VALOVA KRATKIH PERIODA

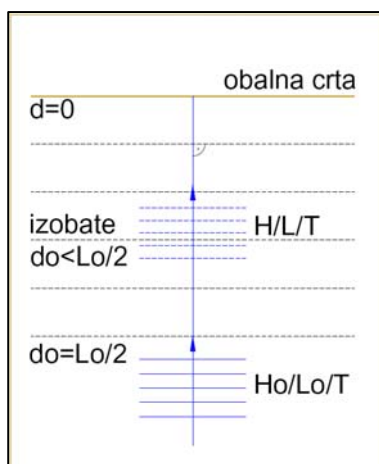
Dvije su osnovne vrste valnih deformacija: a) na nagnutom dnu i b) na preprekama koje se izdižu s morskog dna prema površini ili obrnuto. U nastavku će se deformacije definirati preko linearne teorije, ali mogu se definirati i nešto preciznije; preko teorija višeg reda.

a) Deformacije na nagnutom dnu

Uz postupene promjene profila i gibanja vodnih čestica val se iz dubokog (s pučine) približava obali no da li će se slomiti prije nje, na njoj, prijeći ju ili se reflektirati, ovisi o nagibu dna, strmini vala na tom mjestu, hrapavosti i propusnosti dna.

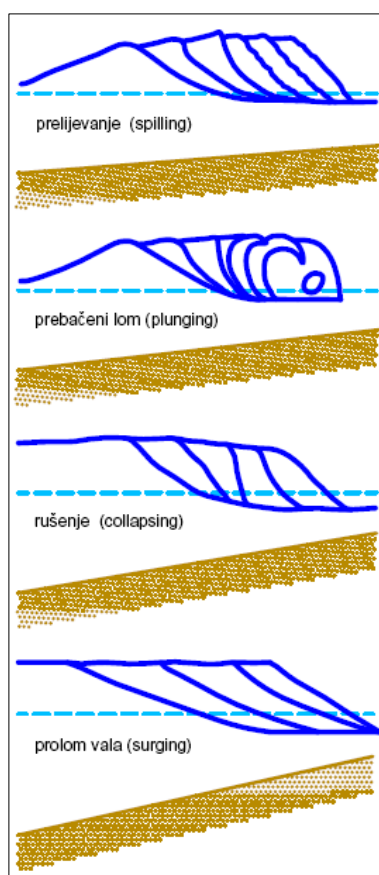
Valni period je jedini valni parametar koji se ne deformira! Reakcija vala s dnem praktično počinje kada dubina dna iznosi $d < L_0 / 2$.

Promatrajući rasprostiranje vala s pučine prema obali, okomito na konturu dna i obalnu crtu (Sl. 4.3.5::1), prostorni i vremenski slijed deformacija bit će:

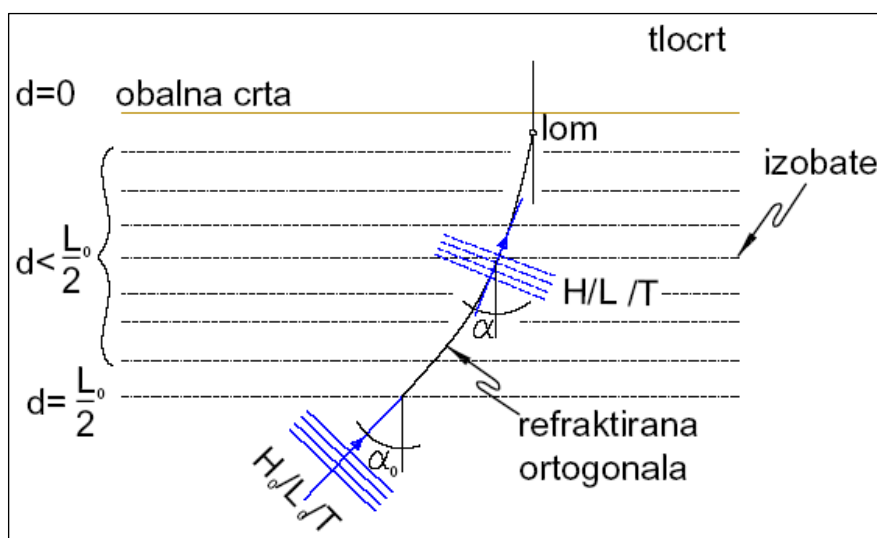


- *deformacija valova na nagnutom dnu* uslijed smanjenja dubine (tzv. učinak plićine ili "Shoaling efekt"), Sl. 4.3.5::2.
- *deformacija valova uslijed trenja s dnom* (zanemaruje se kao mala),
- *odbijanje ili refleksija valova na nagnutom dnu* (zanemaruje se kod strmih valova i blago nagnutog dna, što je najčešći slučaj) i
- *lom valova*, Sl. 4.3.5::3.

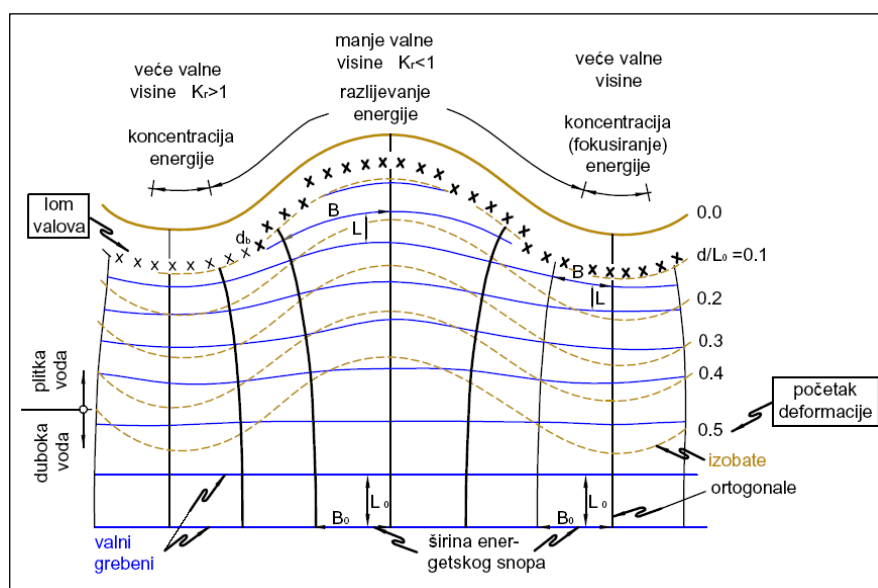
Sl. 4.3.5::1 Rasprostiranje vala normalno na konturu dna i obalnu crtu



Sl. 4.3.5::3 Tipovi loma vala



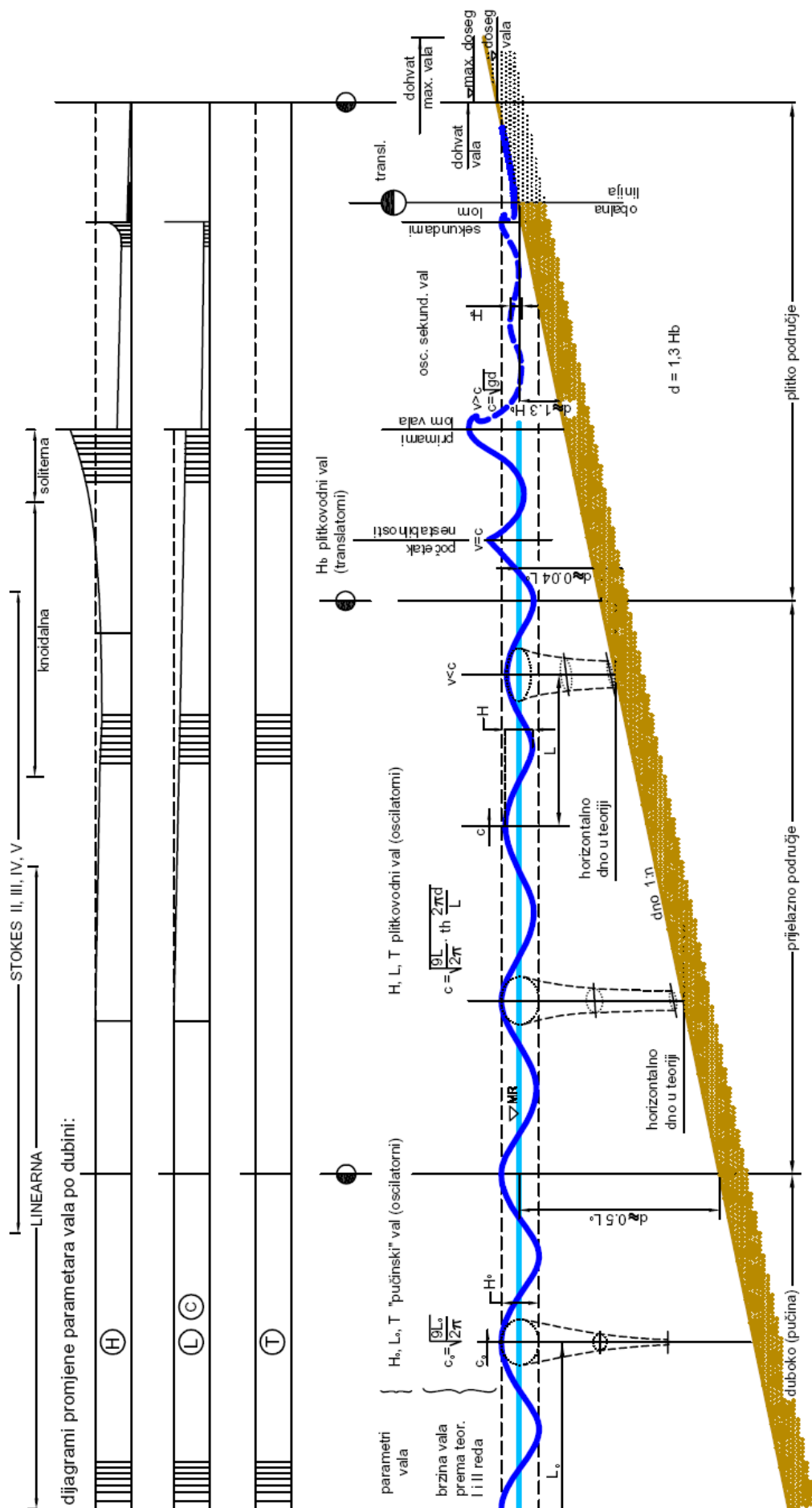
Sl. 4.3.5::4 Rasprostiranje vala koso na konturu dna i obal. crtu



Sl. 4.3.5::5 Refrakcija vala i njeni učinci na uvalu i rtove

Orientacijski izbor meritorne valne teorije u slučaju konačnih valova:

dijagrami promjene parametara vala po dubini:

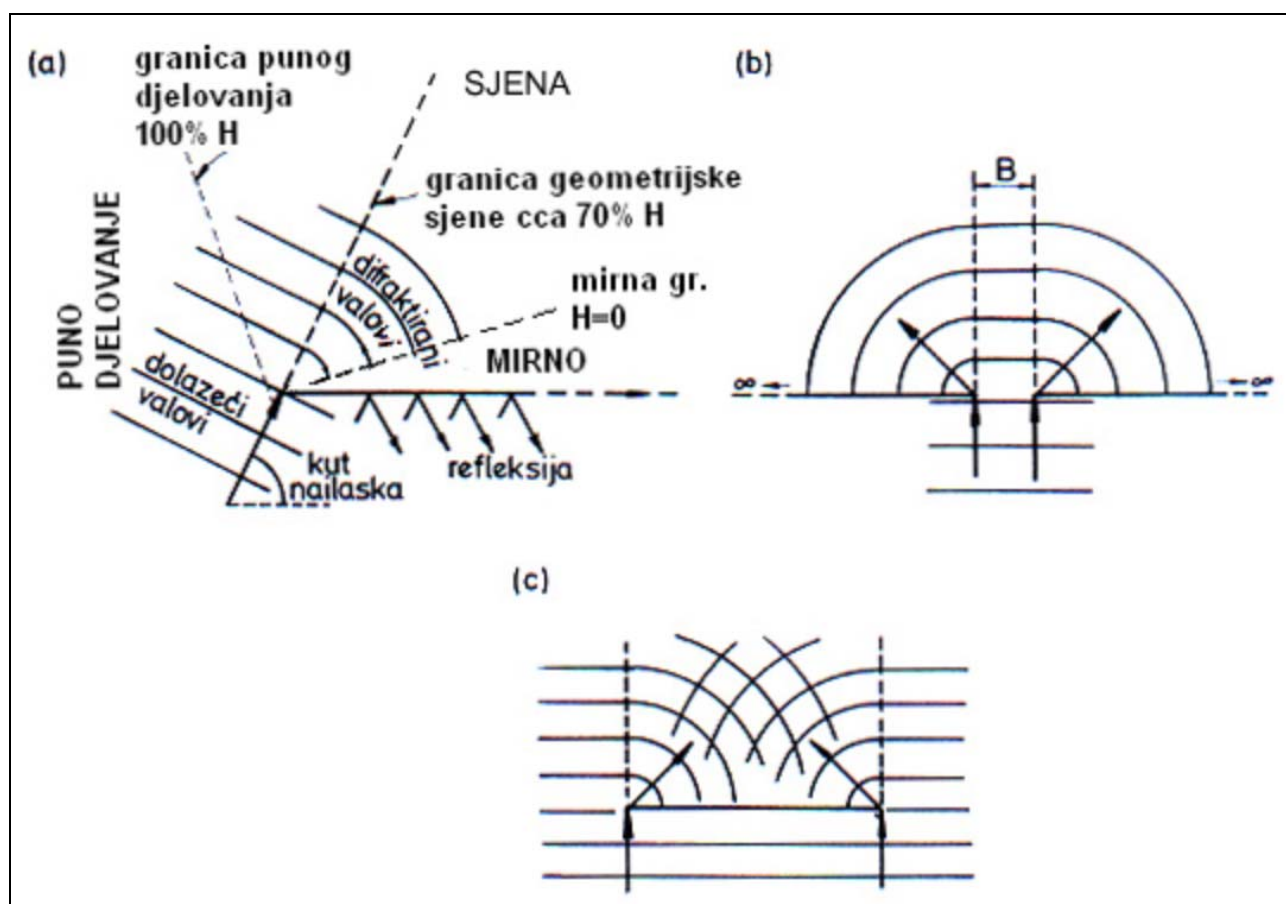


Sl. 4.3.5.:2 Deformacija vala na nagnutom dnu kad se val širi normalno na konturu obale bez efekta refrakcije i trenja (Tadejević)

Ako se valovi rasprostiru koso na konturu dna i obale i obalnu crtu (Sl. 4.3.5::4) javlja se deformacija zvana *zalomljavanje ili refrakcija* (Sl. 4.3.5::5). U procesu refrakcije odvijaju se i četiri prethodno spomenute deformacije!. Manifestira se promjenom smjera rasprostiranja valova s tendencijom da bude okomita na izobate (Sl. 4.3.5::5), smanjivanjem valnih dužina, i promjenom valnih visina koje se u uvali smanjuju, a na rtovima povećavaju.

b) Deformacije na preprekama

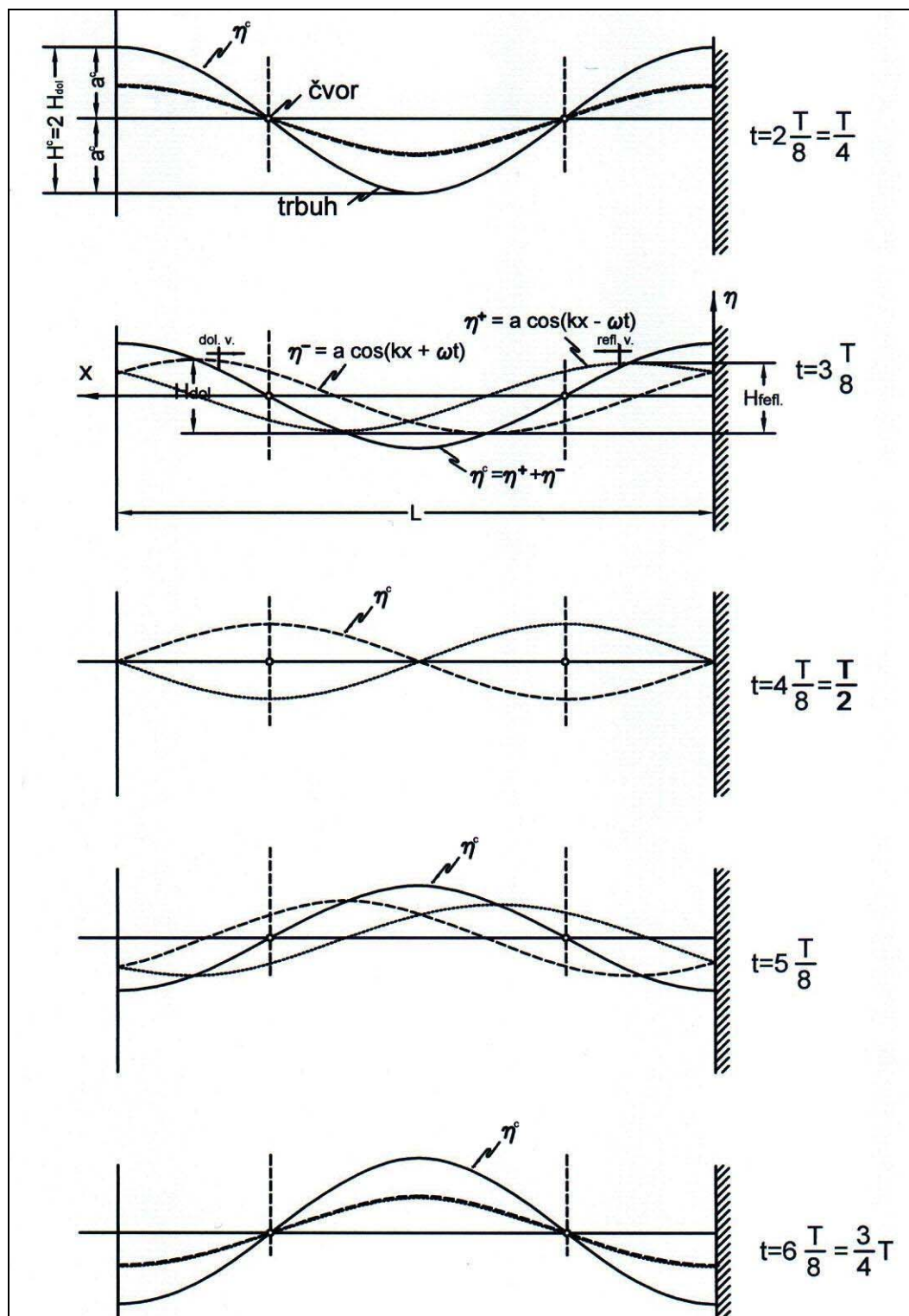
Ogib ili difrakcija valova je deformacija valova na ravnom dnu koja nastaje u slučaju kada se ispred dijela valnog polja prepreči vertikalna prepreka na pr. lukobran (Sl. 4.3.5::6). Rezultat je bočnog rasprostiranja energije (uzduž grebena vala) koja se time javlja i iza prepreke. Očituje se širenjem i zaokretanjem valova u područje geometrijske sjene iza prepreke i smanjenjem valne visine u geometrijskoj sjeni i nešto prije nje.



Sl. 4.3.5::6 Ogib (difrakcija) vala: (a) jednostrana, (b) dvostrana, (c) iza ograničene prepreke

Odbijanje ili refleksija je deformacija vala koji u svom rasprostiranju nailazi na vertikalnu ili nagnutu prepreku beskonačne dužine uslijed čega dolazi do totalnog ili parcijalnog

reflektiranja tog vala u suprotnom smjeru. *Potpuna (totalna) refleksija* nastaje na vertikalnoj nepropusnoj i krutoj prepreci (gravitacijski kej, gravitacijski vertikalni lukobran), a djelomična (*parcijalna*) na nagnutoj prepreci (plaža, obala, nasuta obaloutvrda, nasipni lukobran) ili propusnoj vertikalnoj prepreci (perforirani AB vertikalni lukobran).



Sl. 4.3.5::7 Refleksija vala na krutom, nepropusnom, glatkom, vertikalnom zidu (film stojnog vala $\eta_{sup} \equiv \eta^c$ u trajanju od $\frac{1}{2}$ valnog perida prikazan pomoću superpozicije dvaju jednakih valova η^+ i η^- koji se rasprostiru u suprotnim smjerovima)

Refleksija na krutom, nepropusnom, glatkom, vertikalnom zidu zidu prema izloženom znači totalnu refleksiju energije dolazećeg vala. Tada se energija reflektiranog vala superponira s dolazećom energijom slijedećeg vala, pa morska površina (Sl. 4.3.5::7) ima profil potpunog stojnog vala (clapotis.franc.), $\eta^{\text{sup}} \equiv \eta^{\text{c}}$ koji je periodičan po prostoru i vremenu i ima maksimalnu valnu visinu $2H_{\text{dol}}$:

$$\eta_{\text{sup}} \equiv \eta^{\text{c}} = \eta^+ + \eta^- \quad \text{gdje je } \eta^+ \text{ dolazeći val, a } \eta^- \text{ reflektirani val (suprotnog smjera rasprostiranja)}$$

gdje je:

$$H_{\text{sup}} = H_{\text{dol}} + H_{\text{refl}}^{\text{tot}} \quad \text{visina superponiranog vala (vrijedi za bilo koji trenutak totalne refleksije)}$$

$$H_{\text{refl}}^{\text{tot}} = H_{\text{dol}} \quad \text{visina totalno reflektiranog vala (vrijedi za trnutke: } t = T/4, 3T/4 \dots)$$

$$H_{\text{sup}}^{\text{tot}} \equiv H^{\text{c}} = H_{\text{dol}} + H_{\text{refl}}^{\text{tot}} = 2H_{\text{dol}} \quad \text{visina superponiranog kod totalne refleksije vala (vrijedi za trnutke: } t = T/4, 3T/4 \dots)$$

Za usporedbu, valna visina superponiranog vala kod parcijalne refleksije u bilo kojem trenutku iznosi:

$$H_{\text{sup}} = H_{\text{dol}} + H_{\text{refl}}^{\text{parc}} \quad \text{visina superponiranog vala (vrijedi za bilo koji trenutak, bilo totalne bilo parcijalne refleksije)}$$

$$H_{\text{refl}}^{\text{parc}} < H_{\text{dol}} \quad \text{visina parcijalno reflektiranog vala (vrijedi za trnutke: } t \neq T/4, 3T/4 \dots)$$

$$H_{\text{sup}}^{\text{parc}} = H_{\text{dol}} + H_{\text{refl}}^{\text{parc}} < 2H_{\text{dol}} \quad \text{visina superponiranog kod parcijalne refleksije vala (vrijedi za trnutke: } t = T/4, 3T/4 \dots)$$

Maksimalan tlak vala na vertikalni zid desit će se u trenutku totalne refleksije kada je na licu zida greben superponiranog stojnog vala; tj. kada je visina "clapotisa" $H^{\text{c}} = 2 H_{\text{dol}}$. Ukupan tlak na vertikalni zid sastoji se od hidrostatičkog i hidrodinamičkog. Veličina hidrodinamičkog tlaka na nekoj dubini D proračunava se prema Sainflou (Sl. 4.3.5::8) i iznosi:

$$p_{\text{dyn}} = \frac{\rho g a_{\text{sup}}}{ch \frac{2\pi D}{L}} = \frac{\rho g H_{\text{dol}}}{ch \frac{2\pi D}{L}} \left[\frac{N}{m^2} = Pa \right] \quad \text{dinamički tlak nelomljenog vala prema Sainflou}$$

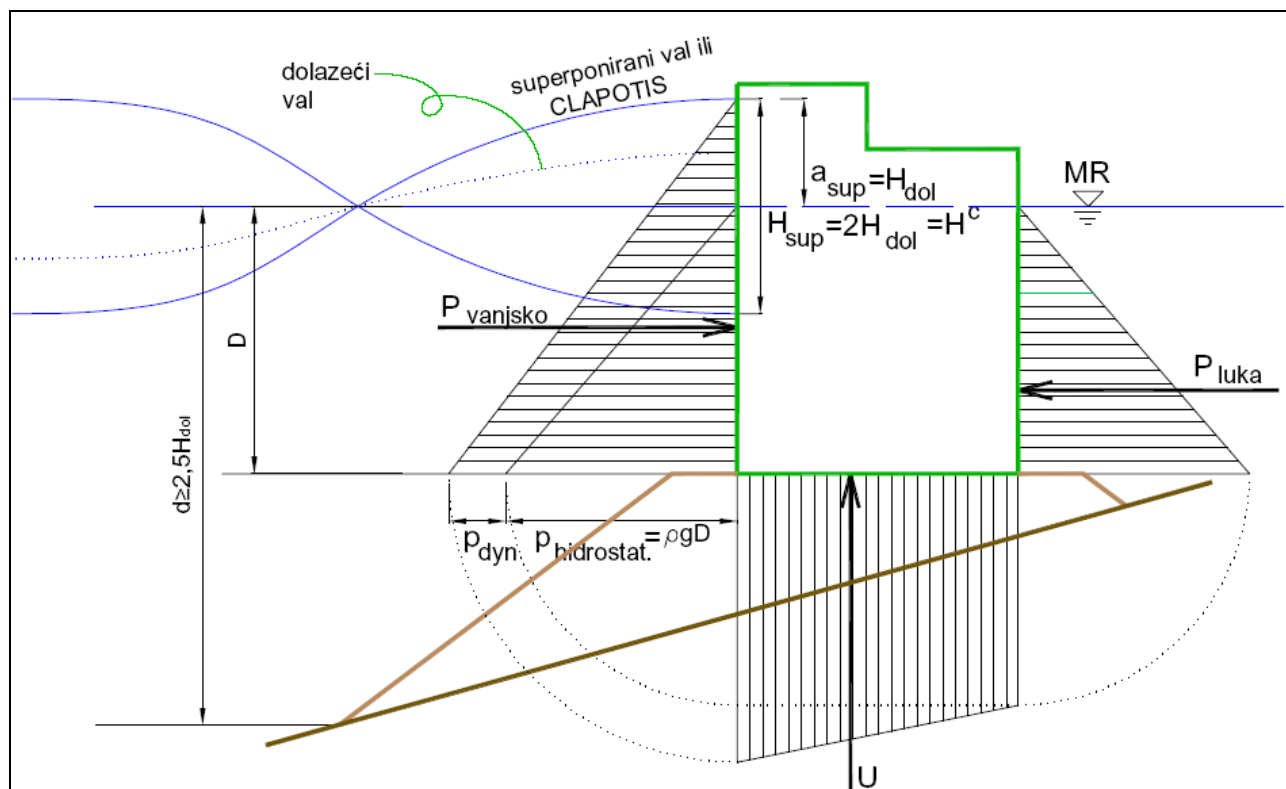
$$\rho = 1025 [\text{kg/m}^3] \quad \text{gustoća mase morske vode}$$

$$H_{\text{dol}} [\text{m}] \quad \text{visina dolazećeg vala}$$

$$L [\text{m}] \quad \text{dužina dolazećeg vala}$$

$$D [\text{m}] \quad \text{dubina mora na kojoj se traži dinamički tlak}$$

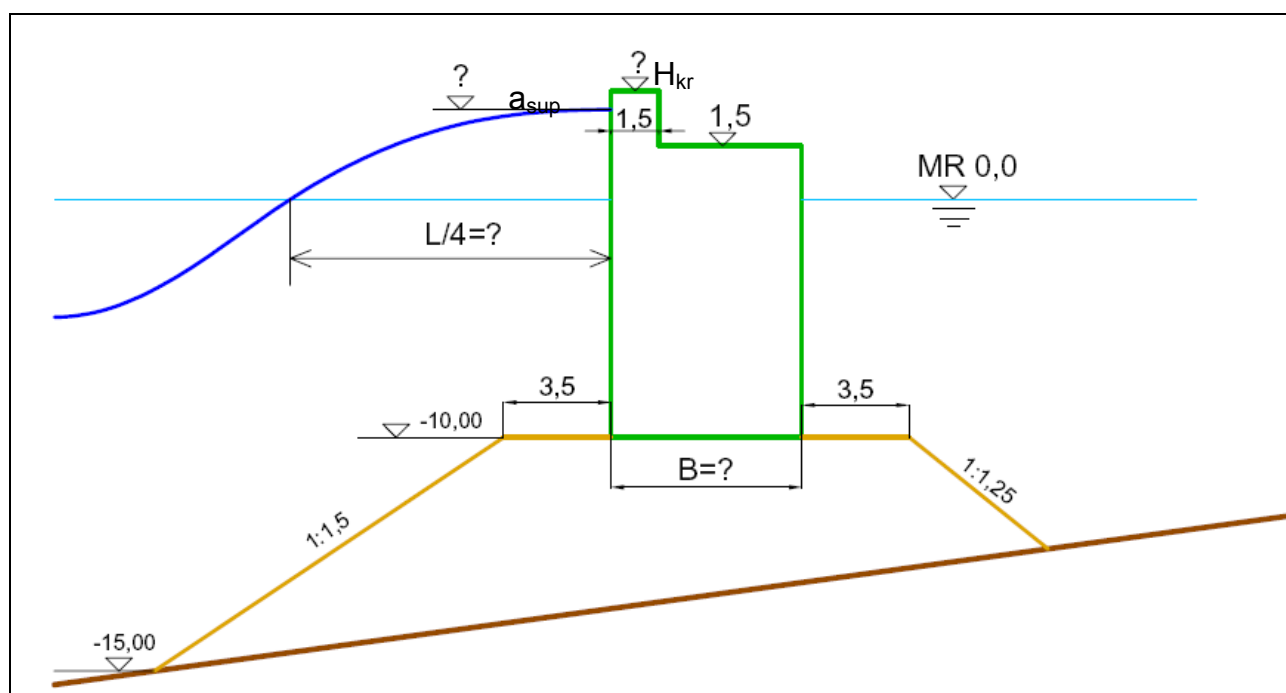
Proračun vrijedi samo za nelomljene valove ispred vertikalnog zida. Uvjet za nelomljene valove (vrlo siguran-inženjerski) je da dubina dna pred zidom bude: $d \geq 2,5 H_{\text{dol}}$. U slučaju loma vala pred zidom tlak je mnogo puta veći i određuje se po drugim metodama.



Sl. 4.3.5::8 Tlak nelomljenog vala na vertikalni zid

Primjer 4.3.4::2 Tlak vala i stabilnost vertikalnog lukobrana

Zadatak: Treba oblikovati i dimenzionirati prema EC vertikalni lukobran sa skice. Zadan je dolazeći val $H_{dol}=2,5$ m, $L_{dol}=50$ m, dubina mora ispred lukobrana $d=15$ m i dubina temeljnog nasipa ispod vertikalnog zida $D=10$ m. U ovom primjeru uzeti će se u proračun stalna djelovanja i promjenjivo hidrodinamičko djelovanje valova.



Traži se:

- Provjeriti lom vala ispred lukobrana.
- Odrediti i nacrtati valni profil ispred lukobrana
- Nacrtati dijagrame hidrodinamičkog i hidrostatskih tlakova.
- Odrediti visinu krune lukobrana H_{kr}
- Odrediti širinu vertikalnog lukobrana B prema kriteriju da nema prevrtanja i klizanja, te da su naponi na temeljnoj fugi tlačni.

Rješenje:**a) Provjera loma vala ispred lukobrana**

Praktičan uvjet da pred zidom ne bude loma vala glasi:

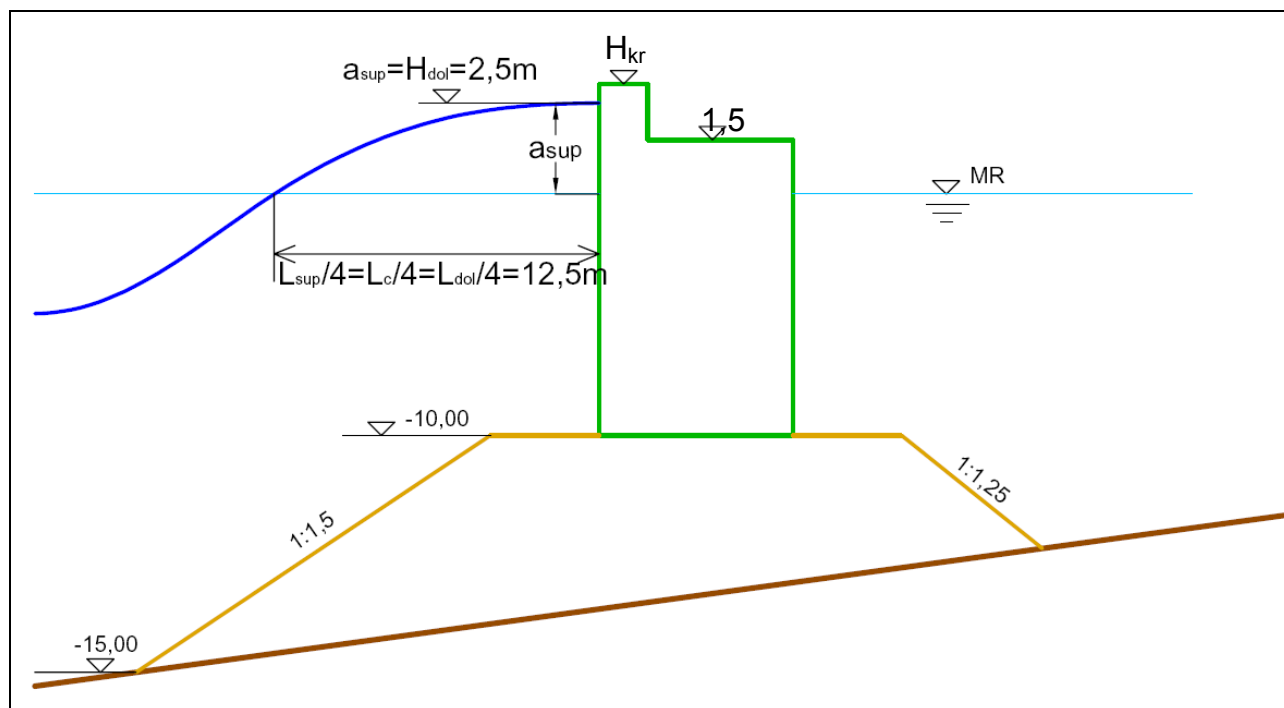
$d \geq 2,5H_{dol} \rightarrow 15,0 \geq 2,5 \times H_{dol} \rightarrow 15,0 \geq 6,25$ m. Uvjet zadovoljen. Proračun tlaka vala po Sainflou.

b) Valni profil ispred lukobrana:

visina stojnog (reflektiranog) vala, ili clapotis-a: $H_{sup} \equiv H_c = 2 \times H_{dol} = 2 \times 2,5 = 5$ m,

amplituda stojnog (reflekt.) vala, ili clapotis-a: $a_{sup} \equiv a_c = H_{dol} = 2,5$ m,

dužina stojnog (reflekt.) vala, ili clapotis-a: $L_{sup} \equiv a_c = L_{dol} = 50$ m.

**c) Dijagrami hidrodinamičkog (od vala) i hidrostatskih tlakova**

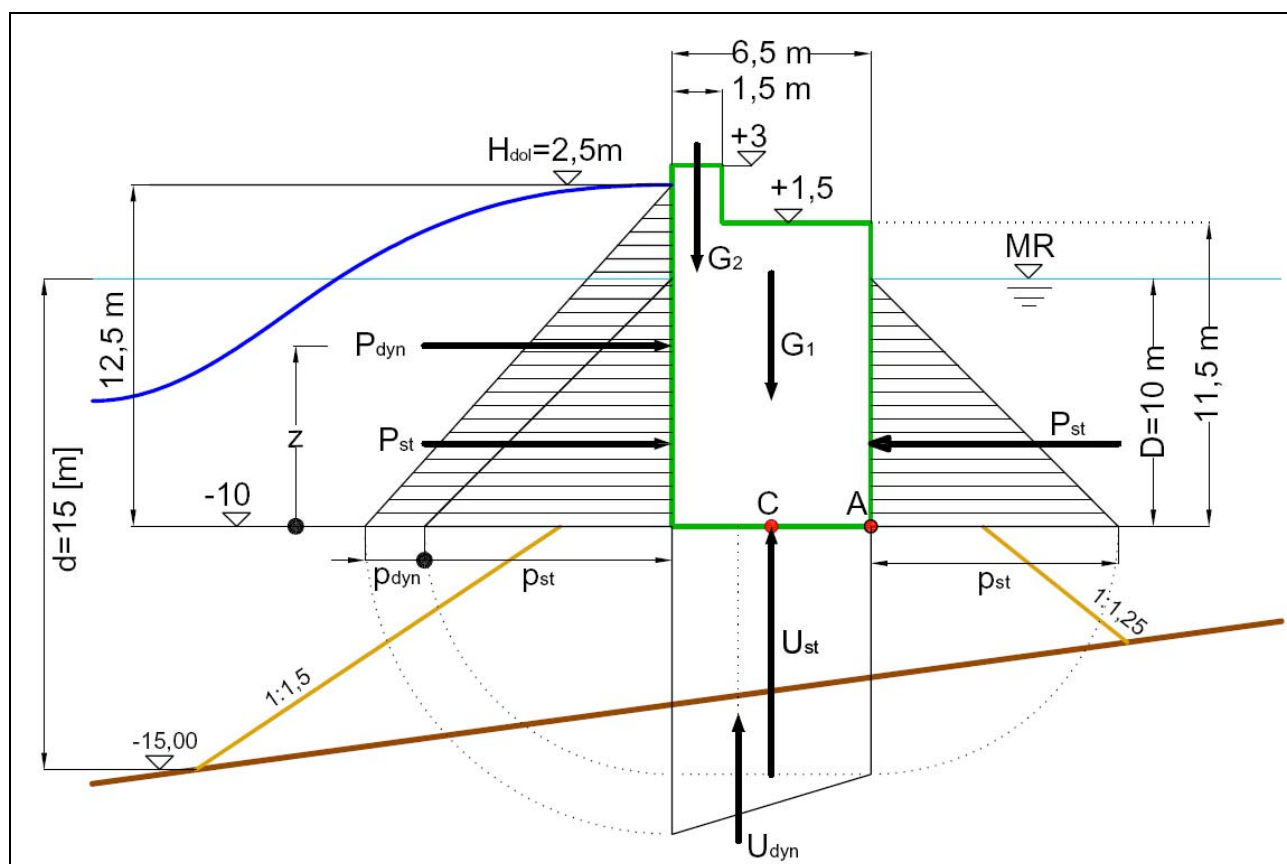
Tlakovi na dubini $D=10$ m:

hidrostatski

$$p_{st} = \rho \cdot g \cdot D = 1025 \cdot 9,81 \cdot 10 = 100.550 \text{ N/m}^2 = 100,55 \text{ kN/m}^2$$

hidrodinamički

$$p_{\text{dyn}} = \frac{\rho \cdot g \cdot \eta}{ch \frac{2\pi \cdot D}{L}} = \frac{\rho \cdot g \cdot H_{\text{dol}}}{ch \frac{2\pi \cdot D}{L}} = \frac{1025 \cdot 9,81 \cdot 2,5}{ch \frac{2\pi \cdot 10}{50}} = 13.230 \text{ N/m}^2 = 13,23 \text{ kN/m}^2$$



d) Visina krune vertikalnog lukobrana H_{kr} (zanemarena plima i izdizanje srednjce vala)

$$H_{kr} = H_{\text{dol}} + \text{rezerva} = 2,5 + 0,5 = +3,0 \text{ m n.m.}$$

e) Širina vertikalnog lukobrana B (proračun po EC; t.j. poHRN ENV 1997)

Konstrukcije se po EC proračunavaju na: nosivost i uporabljivost i uz određivanje trajnosti. Ovdje će se ispitati samo nosivost, prema graničnom stanju nosivosti (EC oznaka LS1*), jer ostala dva problema kod masivnih konstrukcija nisu dominantna. Granično stanje nosivosti uključuje 2 granična stanja: a) granično stanje stabilnosti betonskog zida (EC oznaka LS1 A*) i b) granično stanje sloma ili pretjeranih deformacija temeljnog tla (čvrstoće, EC oznaka LS1 C*).

GRANIČNA STANJA NOSIVOSTI – LS1		
GRUPA PRORAČUNA	NAZIV	OZNAKA
a) stabilnost	gubitak stabilnosti ili pomak konstrukcije razmatrane kao kruto tijelo (EQU) HRN ENV 1991 1:1994,14,22 EN1990:2000,28,43	LS1 A
b) čvrstoća	slom ili pretjerane deformacije konstrukcije (STR) HRN ENV 1991- 1:1994,14,23 EN1990:2000,28,43	LS1 B

	slom ili pretjerane deformacije temeljnog tla (GEO) HRN ENV 1991-1:1994,14,17,22	LS1 C
	slom uslijed zamora (FAT) HRN ENV 1991-1:1994,15 EN1990:2000,28	LS1 D

*Tab. Nazivi graničnih stanja nosivosti za proračun konstrukcija prema HRN ENV 1991 ~~EN1990:2000,28, 43~~
~~HRN ENV 1991-1:1994,25~~

Granično stanje nosivosti (EC oznaka LS1 A*) ispituje se u pravilu za 3 kombinacije opterećenja (LC1, LC2 i LC3). Ovdje će se načiniti samo za LC1** koja uključuje stalna (vlastita težina G i sila hidrostatički uzgon U_{st}) i promjenljiva (sila hidrodinamičkog uzgona U_{dyn} i silu dinamičkog tlaka vala) opterećenja, a za vježbu studenti mogu dovršiti LC2 i LC3. Ovdje će se načiniti samo za LC1** koja uključuje stalna (vlastita težina G i sila hidrostatički uzgon U_{st}) i promjenljiva (sila hidrodinamičkog uzgona U_{dyn} i silu dinamičkog tlaka vala) opterećenja, a za vježbu studenti mogu dovršiti LC2 i LC3.

GRANIČNO STANJE NOSIVOSTI (LS1)		
situacija djelovanja 1 (LC1) Stalna ili promjenljiva proračunska situacija	situacija djelovanja 2 (LC2) Izvanredna proračunska situacija	situacija djelovanja 3 (LC3) Potresna proračunska situacija

**Tab. Načelne kombinacije djelovanja za granična stanja nosivosti (LS1)

e₁) Postupak započinje pretpostavljanjem širine: na primjer B=6,5m.

e₂) Provjera sigurnosti za stabilnost (granično stanje LS1 A*), a za trajnu ili prolaznu proračunsku situaciju (LC1) kombinacije djelovanja

Provjere se vrše upotrebom parcijalnih faktora sigurnosti za djelovanja i materijala (osobina tla) iz tablice.

Table 2.1 — Partial factors — ultimate limit states in persistent and transient situations

Case	Actions			Ground Properties			
	Permanent		Variable	$\tan \phi$	c'	c_u	q_u^a
	Unfavourable	Favourable	Unfavourable				
Case A	[1.00]	[0.95]	[1.50]	[1.1]	[1.3]	[1.2]	[1.2]
Case B	[1.35]	[1.00]	[1.50]	[1.0]	[1.0]	[1.0]	[1.0]
Case C	[1.00]	[1.00]	[1.30]	[1.25]	[1.6]	[1.4]	[1.4]

^a Compressive strength of soil or rock.

Slučaj A: stabilnost, Slučaj B: konstruktivni elementi bez geotehničkog djelovanja, Slučaj C: slom tla, Porijeklo: ENV 1997-1:1994, str 15

Ovo granično stanje uključuje:

- Provjeru sigurnosti na klizanje
- Provjeru sigurnosti na prevrtanje,

a provjere se vrši po kriteriju:

$$E_{d,destab} \leq E_{s,stab}$$

Prvi korak je odedivanje stalnih djelovanja:

Vlastita težina lukobrana:

$$G_1 = 6,5 \times 11,5 \times 24,0 = 1794 \text{ kN}$$

$$G_2 = 1,5 \times 1,5 \times 24,0 = 54 \text{ kN}$$

$$G = G_1 + G_2 = 1794 + 54 = 1848 \text{ kN}$$

Hvatišta sila G_1 i G_2 u odnosu na točku „A“

$$x_{G1} = \frac{6,5}{2} = 3,25 [\text{m}]$$

$$x_{G2} = 6,5 - \frac{1,5}{2} = 5,75 [\text{m}]$$

Sila hidrostatskog uzgona:

$$U_{st} = 100,55 \cdot 6,5 = 653,58 [\text{kN}]$$

Hvatište sile hidrostatskog uzgona u odnosu na točku „A“

$$x_s = \frac{6,5}{2} = 3,25 [\text{m}]$$

Odedivanje promjenjivih djelovanja:

Sila hidrodinamičkog uzgona:

$$U_{dyn} = \frac{13,23 \cdot 6,5}{2} = 43 [\text{kN}]$$

Hvatište sile hidrodinamičkog uzgona u odnosu na točku „A“

$$x_{dyn} = \frac{2}{3} \cdot 6,5 = 4,33 [\text{m}]$$

Sila dinamičkog tlaka vala:

$$P_{dyn} = \frac{(100,55 + 13,23) \cdot 12,5}{2} - \frac{100,55 \cdot 10}{2} = 711,125 - 502,75 = 208,38 [\text{kN}]$$

Hvatište dinamičke sile tlaka vala u odnosu na točku „A“

$$z_{dyn} = \frac{711,125 \cdot \frac{1}{3} \cdot 12,5 - 502,75 \cdot \frac{1}{3} \cdot 10}{711,125 - 502,75} = 6,18 [\text{m}]$$

Provjera stabilnost na prevrtanje betonskog zida oko točke „A“

Kriterij provjere sigurnosti na prevrtanje betonskog zida je:

$$E_{d,destab} \leq E_{s,stab}$$

$$E_{d,stab} = \gamma_{G,pov} \cdot G_1 \cdot x_{G1} + \gamma_{G,pov} \cdot G_2 \cdot x_{G2} = 0,95 \cdot 1794 \cdot 3,25 + 0,95 \cdot 54 \cdot 5,75 = 5834 [\text{kNm}]$$

$$\begin{aligned} E_{d,destab} &= (\gamma_{G,nepov} \cdot U_{st} \cdot x_s) + (\gamma_{Q,1} \cdot P_{dyn}) \cdot z_{dyn} + (\gamma_{Q,1} \cdot U_{dyn}) \cdot x_{dyn} \\ &= 1,0 \cdot 653,58 \cdot 3,25 + 1,5 \cdot 208,38 \cdot 6,18 + 1,5 \cdot 43 \cdot 4,33 = 4335,1 [\text{kNm}] \end{aligned}$$

$$E_{d,destab} \leq E_{s,stab} \rightarrow 4335,1 [\text{kNm}] < 5834 [\text{kNm}] \quad \text{Zadovoljava na prevrtanje!}$$

Provjera stabilnost na klizanje betonskog zida na temeljnoj fugi:

Kriterij provjere sigurnosti na klizanje je:

$$E_{d,destab} \leq E_{s,stab}$$

Proračunska vrijednost stabilizacijskog djelovanja $E_{d,stab}$ kod proračuna graničnog stanja klizanja je proračunska vrijednost trenja T_d . Kod izračuna trenja T_d potrebna je sila koja je normalna na betonskog zida za vrijeme klizanja (u ovom slučaju ta je sila vertikalna). Normalna sila je ΣV_d koja se dobije tako da povoljna stalna djelovanja (što je u ovom slučaju vlastita težina) imaju parcijalni koeficijent djelovanja 0,95 a nepovoljna stalna i nepovoljna promijenjiva djelovanja (što je u ovom slučaju statička i dinamička komponenta uzgona) imaju vrijednost 1,0. Sila trenja se određuje preko koeficijenta trenja f_d . Proračunska vrijednost koeficijenta trenja glatkog predfabriciranog betonskog zida i temeljnog tla (u ovom slučaju kamene posteljice temeljne fuge) je: $f_d = \tan(\delta_d)$. Pritom je proračunska vrijednost kuta tenja između betona i temeljnog tla $\delta_d = 2/3 \varphi'_d$. Proračunska vrijednost kuta unutarnjeg trenja temeljnog tla je $\varphi'_d = \arccos[(\tan \varphi'_k) / \gamma_m]$, gdje je φ'_k karakteristična vrijednost osobine temeljnog tla (kamene posteljice); t.j. kuta unutarnjeg trenja dobivena od odovlaštenog laboratorija, a $\gamma_m = 1,1$ je parcijalni faktor sigurnosti za materijal (temeljno tlo: t.j. kamenu posteljicu). Uz karakterističnu vrijednost kuta unutarnjeg trenja kamene posteljice

$$\varphi'_k = 40^\circ \rightarrow f_d = \tan \delta_d = \tan \left(\frac{2}{3} \varphi'_d \right) = \tan \left[\frac{2}{3} \left(\arccos \frac{\tan \varphi'_k}{\gamma_m} \right) \right] = \tan \left[\frac{2}{3} \left(\arccos \frac{\tan 40}{1,1} \right) \right] = 0,46 \cdot \text{ENV 1997-1:1994, s 40, 16.}$$

$E_{d,stab} = T_d = \text{prorač. vrij. vertikalnog optereč.} \times \text{prorač. vrij. koeficijenta trenja}$

$$= (\gamma_{G,pov} \cdot G - \gamma_{G,nepov} \cdot U_{st} - \gamma_{G,nepov} \cdot U_{dyn}) \cdot f_d = (0,95 \cdot 1848 - 1 \cdot 653,58 - 1 \cdot 43) \cdot 0,46 = 1059,02 \cdot 0,46 = 487,14 [\text{kN}]$$

Proračunska destabilizirajuća horizontalna sila $E_{d,destab}$ je sila proračunski hidrodinamički tlaka vala.

$$E_{d,destab} = \gamma_{Q,1} \cdot P_{dyn} = 1,5 \cdot 208,38 = 312,57 [\text{kN}]$$

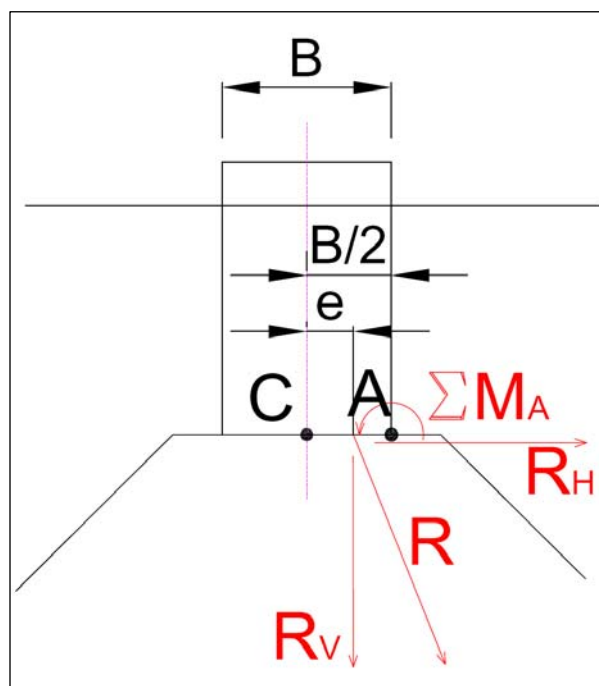
Kad se sve uvrsti u kriterij graničnog stanja klizanja:

$$E_{d,destab} \leq E_{s,stab}$$

dobije se: $312,57 [\text{kN}] < 487,14 [\text{kN}]$ Zadovoljava na klizanje!

e₃) Ekscentricitet

Veličina ekscentricitete dobije se iz jednakosti momenata oko točke "A":



$$\Sigma M_A = [(B/2) - e] \times R_V$$

(ΣM_A^{OTP} ukupni moment oko točke A od stabilizirajućih sila (bez parc. koef. djelovanja)

ΣM_A^{AKT} ukupni moment oko točke A od destabilizirajućih sila (bez parc. koef. djelovanja)).

Ukoliko ekscentricitet rezultante sila na temeljnoj fugi betonskog presjeka ne zadovoljava $e \leq \frac{B}{6}$ (ne prolazi kroz jezgru presjeka) potrebno je analizi posvetiti dodatnu pažnju.

$$e = \frac{B}{2} - \frac{\Sigma M_A}{R_V} = \frac{B}{2} - \frac{\Sigma M_A^{OTP} - \Sigma M_A^{AKT}}{\Sigma V} = \frac{6,5}{2} - \frac{6141 - 3598,2}{1151,425} = 3,25 - \frac{2542,8}{1151,425} = 1,04 \text{ [m]}$$

$$\frac{B}{6} = \frac{6,5}{6} = 1,08 \text{ m} \quad 1,04 < 1,08$$

Rezultanta sila na temeljnoj fugi prolazi kroz jezgru betonskog presjeka što znači da su naponi na temeljnoj fugi tlačni.

e₄) Provjera sigurnosti za čvrstoću tla na temeljnoj fugi (granično stanje GEO LS1 C), a za trajnu ili prolaznu proračunsku situaciju (LC1) kombinacije djelovanja

Ovo granično stanje uključuje:

granično stanje sloma ili pretjerane deformacije temeljnog tla

Kriterij provjere sigurnosti na slom ili pretjerane deformacije temeljnog tla je:

$$E_d \leq R_d$$

Proračunska vrijednost otpornosti tla R_d ; t.j. proračunska vrijednost nosivosti temeljnog tla $R_d \equiv \sigma_d$ (dopušteno naprezanje tla) ovisi o karakterističnim vrijednostima svojstva materijala; t.j. tla, dobivenim na temelju laboratorijskih ispitivanja (karakteristična vrijednost kuta unutarnjeg trenja φ_k i karakteristična vrijednost kohezije tla c_k) podijeljenim s odgovarajućim parcijalnim koeficijentima materijala; t.j. tla, $\gamma_m \geq 1$ čime se dobiju proračunske vrijednosti svojstva materijala; t.j. tla (proračunska vrijednost kuta unutarnjeg trenja $\varphi_d = \arctan(\tan \varphi_k / \gamma_m)$ i proračunska vrijednosti kohezije tla $c_d = c_k / \gamma_m$). Pritom su $\gamma_{m,\varphi} = 1,25$ i $\gamma_{m,c} = 1,3$ Tada se može pisati $\sigma_d = f(\varphi_k, c_k, \gamma_m) = f(\varphi_d, c_d)$. U ovom primjeru pretpostavlja se da je vrijednost $R_d \equiv \sigma_d = 450 \text{ kN/m}^2$.

Proračunska vrijednost učinka djelovanja E_d ; t.j. naponi reduciranu temeljnu površinu $E_d \equiv \sigma_{centr}$ (slika) računaju se kao:

$$E_d \equiv \sigma_{centr} = \frac{R_{V,d}}{A_{reduc}} = \frac{R_{V,d}}{B_{reduc} \cdot 1} = \frac{\Sigma V_d}{B_{reduc} \cdot 1}$$

$$E_d \equiv \sigma_{\text{centr}} = \frac{1,35 \cdot 1848 - 1 \cdot 653,58 - 1 \cdot 43}{2 \cdot \left(\frac{B}{2} - e\right) \cdot 1} = \frac{1798,22}{2 \cdot (3,25 - 1,04) \cdot 1} = \frac{1798,22}{4,42} = 406,84 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

(Stvarna vrijednost učinka djelovanja $\sigma_{1/2}$ izračuna se kao $\sigma_{1/2} = \frac{R_V}{A} \pm \frac{M_C}{W} = \frac{R_V}{B \cdot 1} \pm \frac{M_C}{(B^2 \cdot 1)/6}$, uz djelovanja bez parcijalnih koeficijenata. Pritom vrijedi odnos M_A i M_C : $M_C = R_V \left(\frac{B}{2} - \frac{M_A}{R_V} \right)$)

Pri tome su parcijalni koeficijent djelovanja za slučaj sloma u tlu za stalna nepovoljna djelovanja je 1,35, a za povoljna djelovanja (stalna i promijenjiva) što je u ovom slučaju statička i dinamička komponenta uzgona, imaju vrijednost 1,0. Tablica 9.2 ENV 1991-1:1994.

Provjera sigurnosti za slom tla ispod temeljne fuge po kriteriju:

$$E_d \leq R_d \quad \text{odnosno} \quad \sigma_{\text{centr}} \leq \sigma_d$$

pokazuje da je uvjet zadovoljen, jer $406,84 < 450 \text{ [kN/m}^2\text{]}$

EKSCENTRICITET I NAPREZANJA NA TEMELJNOJ FUGI

① REZULTANTA U JEZGRI BET.

PRESJEKA ($e \leq B/6$)

Provjera sigurnosti za čvrstoću tla na temeljnoj fugi uz uvjet:

$$E_d \leq R_d$$

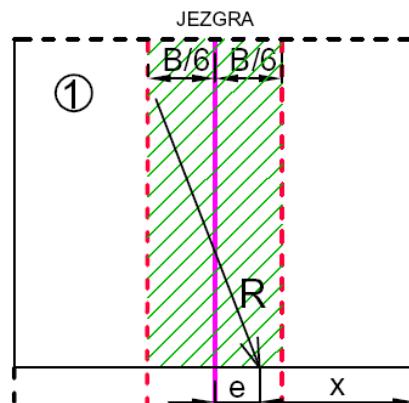
$$E_d \equiv \sigma_{\text{centr}}$$

$$R_d \equiv \sigma_d$$

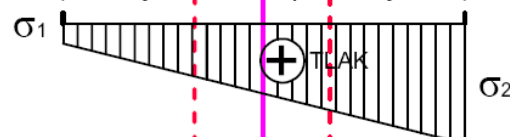
$$\sigma_{\text{centr}} \leq \sigma_d$$

$$\sigma_{\text{cent}} = \frac{R_v}{B_{\text{reduc.}}^* \times 1} \leq \sigma_d$$

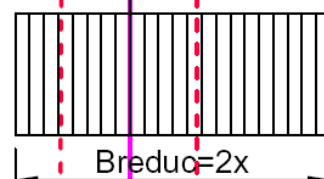
širina zida B



Stvarna vrijednost učinka djelovanja; t. j. stvarna vrijednost naprezanja



Proračunska vrijednost učinka djelovanja; t. j. proračunska vrijednost naprezanja



$$E_d \equiv \sigma_{\text{centr}}$$

② REZULTANTA VAN JEZGRE BET.

PRESJEKA ($e > B/6$),

Provjera sigurnosti za čvrstoću tla na temeljnoj fugi uz uvjet:

$$\sigma_{\text{centr}} \leq \sigma_d$$

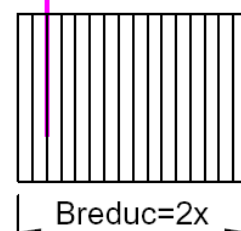
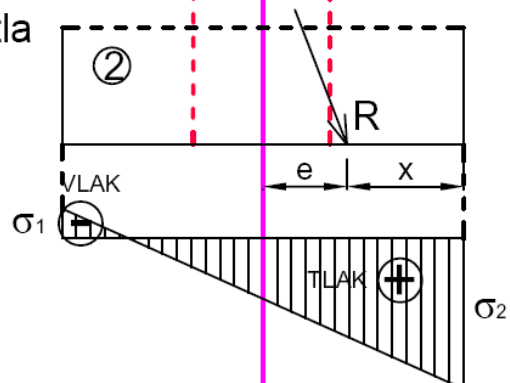
$$\sigma_{\text{cent}} = \frac{R_v}{B_{\text{reduc.}}^* \times 1} \leq \sigma_d$$

$$*B_{\text{reduc.}} = 2x$$

$$x = \frac{\sum M_A}{\sum V}$$

$$e = \frac{B}{2} - x,$$

$$e = \frac{(V_{\text{otp}} - V_{\text{akt}}) \frac{B}{2} - (M_{\text{otp}}^A - M_{\text{akt}}^A)}{V_{\text{otp}} - V_{\text{akt}}}$$



$$E_d \equiv \sigma_{\text{centr}}$$

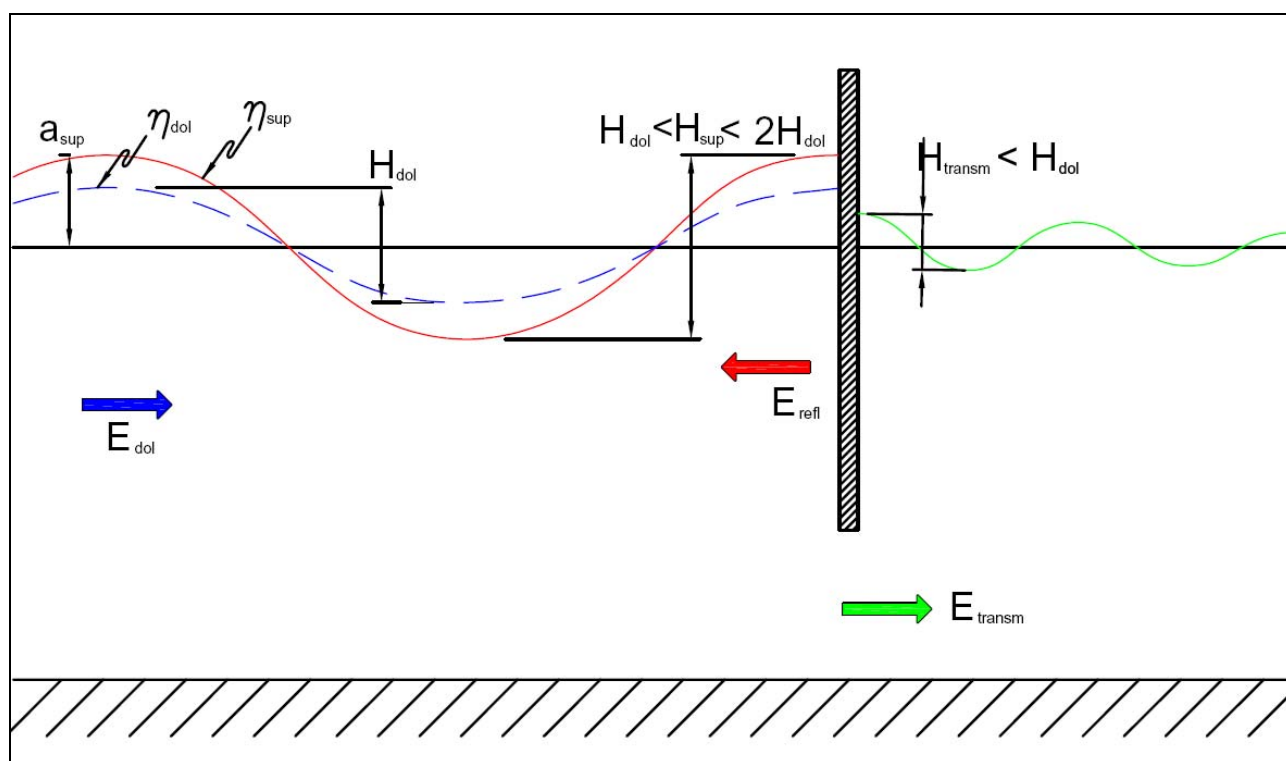
Kraj primjera!

Propuštanje ili transmisija je valna deformacija koja nastaje kod propuštanja valne energije ispod prepreke djelomično izdignute izna dna (Sl. 4.3.5::9), ili kroz prepreku koja je u nekom postotku izbušena otvorima. U procesu transmisije javlja se i parcijalna refleksija tako da je ispred prepreke parcijalno superponirani val (visine $H_{dol} < H_{sup} < 2H_{dol}$), a iza prepreke transmitirani val (visine $H_{transm} < H_{dol}$). Odnos 3 spomenute valne visine povezan je jednadžbom kontinuiteta valne energije:

$$E_{dol} = E_{refl} + E_{transm}$$

Ako je na pr. visina parcijalno reflektiranog vala $H_{refl} = K_{refl} H_{dol} = 0,71 H_{dol}$ onda je visina parcijalno superponiranog vala

$$H_{sup} = H_{dol} + H_{refl} = 1,71 H_{dol}, \quad a_{sup} = 0,85 H_{dol}$$



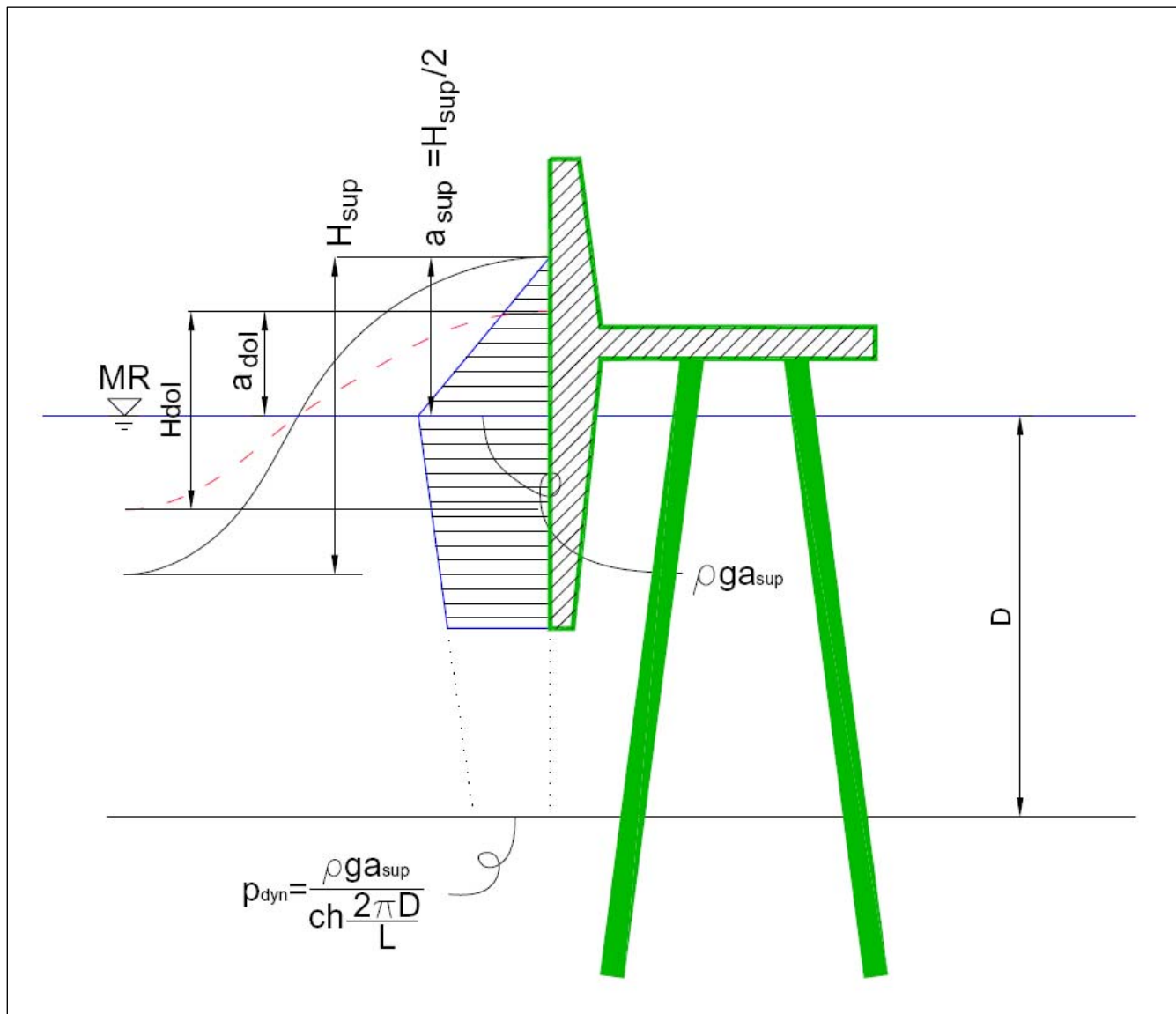
Sl. 4.3.5::9 Propuštanje ili transmisija valova

Tada iz jednadžbe kontinuiteta valne energije proizlazi deformirana valna visina uslijed transmisije kao:

$$H_{transm} = \sqrt{(H_{dol}^2 - H_{refl}^2)} = 0,71 H_{dol}, \rightarrow H_{transm} = K_{transm} H_{dol} = 0,71 H_{dol} \rightarrow K_{transm} = 0,71$$

Primjer 4.3.4::2: Tlak parcijalno reflektiranog vala

Zadatak: Odredi visinu parcijalno reflektiranog vala i njegov dinamički tlak na vertikalni poluuronjeni AB ekran temeljen na AB pilotima!



Sl. 4.3.5::10 Graf. dinamičkog tlaka vala za parcijalno reflektirani val

Rješenje:

a) Visina parcijalno reflektiranog vala

Za slučaj polupropusnog lukobrana i parcijalne refleksije s $K_{refl} = 0,7$ (na pr.) dobije se $H_{sup} = H_c = (0,7+1)H_{dol}$. Tada je $a_{sup} = H_{sup}/2 = H_c/2 = 1,7/2 H_{dol} = 0,85H_{dol}$.

b) Graf. dinamičkog tlaka vala izgleda kao na Sl. 4.3.5::10.

4.4 REALNI VALOVI

Realni valovi su oni koji se javljaju u prirodi. Ovdje će se izučavati samo vjetrovni valovi zbog svoje čestine i najveće specifične energije. Pripadaju u površinske morske valove kratkih perioda. Potpuno se razlikuju od idealnih valova po fizičkom izgledu, a samo u rijetkim situacijama se približavaju izgledu idealnih valova. Općeniti izgled realnih morskih valova od vjetra karakterizira nepravilno prostorno nabrana površina mora čija se konfiguracija slučajno mijenja s vremenom. Spomenuta konfiguracija nema pravilnosti niti po smjeru niti po vremenu, ali se ipak uočava osnovna usmjerenost valnog polja u smjeru vjetra. Presjek takvog valnog polja s jednom vertikalnom ravninom daje pokretne valove u vidu promjenljive valovite morske površine. Ovakva slika realnih valova "živog mora" (Sl. 4.2.3::2) je najčešća, a nalazi se u području puhanja vjetra iznad morske površine. Kad vjetar prestane nakon nekog vremena valno polje postaje prilično pravilno. Uočavaju se gotovo paralelni valni grebenovi određenog smjera napredovanja i pravilne frekvencije. To su valovi "mrtvog mora" i oni su u nekoliko slični idealnim valovima.

4.4.1 STATISTIČKI OPIS REALNIH VJETROVNIH VALOVA

Ovaj opis ne daje kompletnu sliku valovanja jer se odnosi samo na profil vala, a ne na gibanje vodnih čestica. Ideja je da se statističkom obradom svih pojedinačnih valova tokom nekog kratkoročnog stacionarnog stanja mora trajanja 5-15 minuta; tj. obradom pripadnog valnog zapisa dobiju reprezentativni parametri valnog profila koji se dalje uvrste u izraze za deterministički opis valova i s takvim reprezentativnim pravilnim valovima se tretiraju građevinske konstrukcije.

Reprezentativni parametri valnog profila za kratkoročno stacionarno stanja mora trajanja 5-15 minuta su:

$H_{\max}$ [m] maksimalna valna visina koju dosegne neki val u jednom valnom zapisu

$H_{1/1000} = \frac{1}{N_0 / 1000} \sum_{i=1}^{N_0 / 1000} H_i^{\text{opad.niza}}$ tisućinska valna visina [m]; prosjek od 1/1000 najviših valnih visina u jednom valnom zapisu opsega N_0 valova

$H_{1/100} = \frac{1}{N_0 / 100} \sum_{i=1}^{N_0 / 100} H_i^{\text{opad.niza}}$ stotinska valna visina [m]; prosjek od 1/100 najviših valnih visina u jednom valnom zapisu opsega N_0 valova

$H_{1/10} = \frac{1}{N_0/10} \sum_{i=1}^{N_0/10} H_i^{\text{opad.niza}}$ desetinska valna visina [m]; prosjek od 1/10 najviših valnih visina u jednom valnom zapisu opsega N_0 valova

$H_{1/3} \equiv H_S = \frac{1}{N_0/3} \sum_{i=1}^{N_0/3} H_i^{\text{opad.niza}}$ značajna valna visina [m]; prosjek od 1/3 najviših valnih visina u jednom valnom zapisu opsega N_0 valova

$H_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} H_i^2}$ korijen sredine kvadrata svih valnih visina u jednom valnom zapisu opsega N_0 valova; energetski reprezentant realnog (nepravilnog) valnog polja

$\bar{H} = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} H_i$ [m] prosječna valna visina; prosjek od svih valnih visina u jednom valnom zapisu opsega N_0 valova

T_{max} [s] maksimalni valni period koji ima neki val u jednom valnom zapisu

$T_{1/10} = \frac{1}{N_0/10} \sum_{i=1}^{N_0/10} T_0(H_i^{\text{opad.niza}})$ desetinski valni period [s]; prosjek od 1/10 valnih perioda koji pripadaju 1/10 najviših valova, u jednom valnom zapisu opsega N_0 valova

$T_S \equiv T_{1/3} = \frac{1}{N_0/3} \sum_{i=1}^{N_0/3} T_0(H_i^{\text{opad.niza}})$ značajni valni period [s]; prosjek od 1/3 valnih perioda, koji pripadaju 1/3 najviših valova, u jednom valnom zapisu opsega N_0 valova

$\bar{T} \equiv \bar{T}_0 = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} T_{0i} = \frac{T_R}{N_0}$ [s] prosječni valni period presijecanja nule; prosjek od svih valnih perioda, u jednom valnom zapisu opsega N_0 valova,

gdje je:

N_0 broj uzlaznih ili silaznih presjecanja nule u jednom valnom zapisu t.j. broj valova

$H_i^{\text{opad.niza}}$ [m] i-ta valna visina iz niza valnih visina pojedinačnih valova u jednom valnom zapisu složenom po opadanju

H_i [m] i-ta valna visina iz sukcesivnog niza valnih visina pojedinačnih valova u jednom valnom zapisu

$T_{0,i}$ [s] i-ti valni period presijecanja nule iz sukcesivnog niza perioda presijecanja nule pojedinačnih valova u jednom valnom zapisu

$T_0(H_i^{\text{opad.niza}})$ [s] period presijecanja nule koji pripada valnoj visini $H_i^{\text{opad.niza}}$

T_R [s] dužina jednog valnog zapisau kojem ima N_o valova ili vrijeme registracije valova

Svim parametrima obično se pridružuje smjer dolaska valova.

Obzirom na to da Rayleigh-ova distribucija vjerojatnosti pojedinačnih valnih visina vrijedi za svako kratkoročno stacionarno stanje mora, mogu se općenito definirati odnosi reprezentativnih valnih visina:

$$H_{\max} \approx H_{1/1000} \approx 2H_S = 2,82 H_{\text{rms}} = 3,25 \bar{H} \quad T_{\max} \approx T_S \approx 1,1 \bar{T}_o$$

$$H_{1/100} = 1,67 H_S = 2,36 H_{\text{rms}} = 2,73 \bar{H}$$

$$H_{1/10} = 1,27 H_S = 1,8 H_{\text{rms}} = 2,17 \bar{H} \quad T_S \approx T_{1/3} \approx 1,1 \bar{T}_o$$

$$H_{1/3} = H_S = \sqrt{2} H_{\text{rms}} = 1,63 \bar{H}$$

$$H_{\text{rms}} = \frac{\sqrt{2}}{2} H_S = 1,15 \bar{H}$$

$$\bar{H} = 0,61 H_S$$

$$\bar{T}_o = 0,9 T_S$$

Za valne periode vezane uz reprezentativne valne visine vrijede gornji empirijski odnosi: Distribucija vjerojatnosti kvadrata valnih perioda pojedinačnih valova je također Rayleigh-ova.

Reprezentativni valni parametri za dugoročno vremensko razdoblje su:

H_S^{PR} [m] značajna valna visina povratnog razdoblja od PR=1,5,10,20,50,100 godina; tj. značajna valna visina koja u PR godina može biti 1x dostignuta ili premašena

T_S^{PR} značajni valni period povratnog razdoblja od PR=1,5,10,20,50,100... godina,

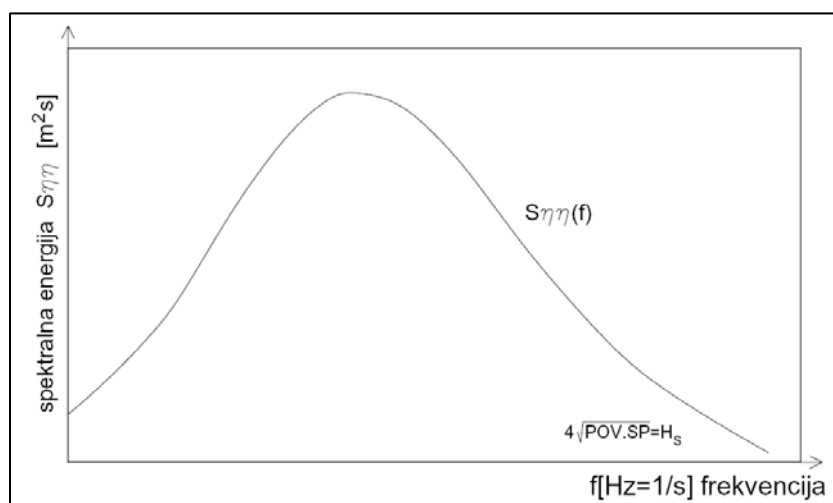
i ostali analogni valni parametri iz kratkoročnog stanja mora s pridruženim povratnim periodima. Na pr. $H_{\max}^{100g}$, $H_{1/10}^{5g}$, $\bar{T}_o^{25}$ Značajna valna visina H_S^{PR} povratnog razdoblja od PR = 10, 20, 50, 100 godina se izračuna iz višegodišnjeg niza ekstrema značajnih valnih visina (na pr. po jedan ekstrem godišnje) kao ona valna visina koja u povratnom razdoblju od PR godina može biti 1 puta dostignuta ili premašena. Iz nje se, prema gornjim odnosima reprezentativnih valnih visina, izvode $H_{\max}^{\text{PR}}$, $H_{1/10}^{\text{PR}}$ i $\bar{H}^{\text{PR}}$. Isto vrijedi i za valne periode. Značajni valni period T_S^{PR} povratnog razdoblja od PR = 1, 10, 20, 50, 100 godina se dobije iz višegodišnjeg niza značajnih valnih perioda kao onaj valni period koji u povratnom razdoblju od PR godina može biti 1 puta dostignut ili premašen. Iz njega se izvodi $T_{\max}^{\text{PR}}$ i $\bar{T}_o^{\text{PR}}$.

4.4.2 SPEKTRALNI OPIS REALNIH VJETROVNIH VALOVA

Kao što su kod statističkog opisa nekog kratkoročnog stacionarnog stanja mora unutar 5 do 15 minuta osnovni pokazatelji H_s i $\bar{T}_0$, tako je kod spektralnog opisa osnovni pokazatelj spektar. Spektri sadrže kompletan varijabilitet tretiranih valnih parametara (E , η , a^2 , H , v , a) a matematički se opisuju u vidu funkcije spektralne gustoće po prostoru i vremenu; odnosno u domeni valnog broja (k) i frekventnoj domeni ($f=2\pi\cdot\omega$) kao na pr.: $S_{\eta\eta}(k,f)$. Ako se valovlje promatra u jednom trenutku onda je spektar funkcija samo od prostora; t.j. od valnog broja i naziva se trenutni spektar kao na pr.: $S_{\eta\eta}(k)$. Ako se valovlje promatra na jednoj točki onda je spektar samo funkcija od vremena; t.j. od frekvencije i naziva se lokalni spektar kao na pr.: $S_{\eta\eta}(f)$. Takvi će se spektri razmatrati u nastavku. Za opis fizičke površine mora postoji nekoliko alternativnih spektara : valni energetski spektar $E(f)$, spektar pomaka $S_{\eta\eta}(f)$ (Sl. 4.4.2::1), amplitudalni spektar $a^2(f)$ i spektar valnih visnina $H(f)$, a za opis gibanja valnih čestica kod valova: spektar brzina $S_{vv}(f)$ i spektar ubrzanja vodnih čestica $S_{aa}(f)$. Pojedine vrste spektra se mogu transformirati u druge. Spektar pomaka $S_{\eta\eta}(f)$ često se naziva energetskim spektrom jer je proporcionalan specifičnoj energiji nepravilnog valnog polja:

$$\bar{E} = \rho g \int_0^{\infty} S_{\eta\eta}(f) df \left[\frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{m}^2} \right]$$

Sl. 4.4.2::1 Lokalni spektar pomaka fizičke površine mora



Postoje i relacije između statističkih valnih parametara i spektara. Na pr. u dubokoj vodi:

$$H_s = 4(m_0)^{1/2}$$

$$H_{rms} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot (m_0)^{1/2}$$

$$\bar{T} = 2\pi(m_0/m_2)^{1/2}$$

$$\bar{L} = \frac{2\pi}{g}(m_0/m_4)^{1/2},$$

gdja je m_i i-ti spektralni moment:

$$m_i = \int_0^{\infty} f^i S_{\eta\eta}(f) df,$$

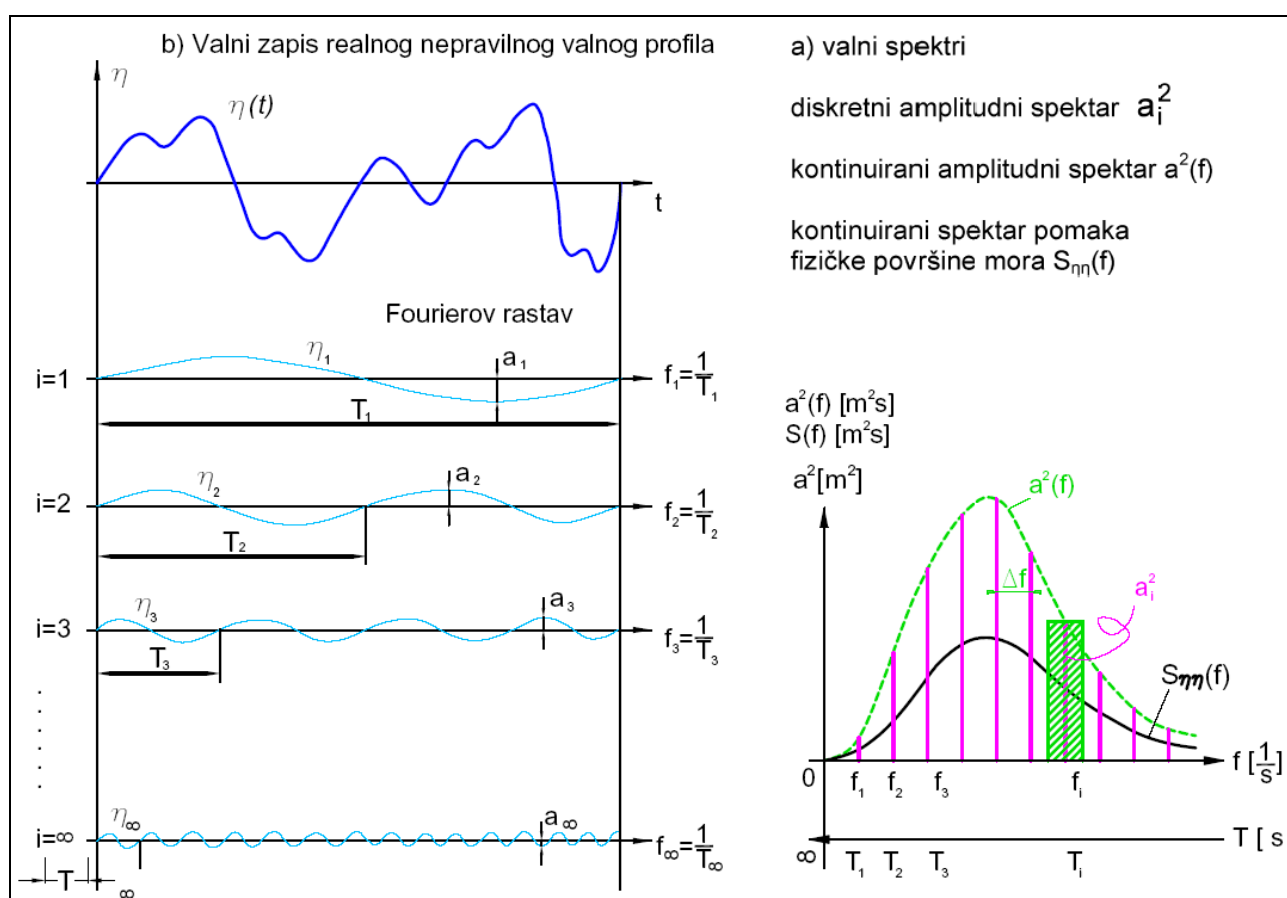
a m_0 nulti spektralni moment, ili površina spektra:

$$m_0 = \int_0^{\infty} S_{\eta\eta}(f) df = \langle \eta^2(t) \rangle = \sigma_{\eta}^2 \quad \text{za } \bar{\eta} = 0.$$

Preko valnog spektra lako se daje pokazati da je H_{rms} ; t.j. korijen sredine kvadrata valnih visina energetski reprezentant nepravilnog valnog polja:

$$\bar{E} = \rho g \int_0^{\infty} S_{\eta\eta}(f) df = \rho g m_0 = \rho g \frac{H_S}{16} = \rho g \frac{H_{rms}}{8} \left[\frac{N \cdot m}{m^2} \right]$$

Naime, lijeva strana pokazuje specifičnu energiju nepravilnog valnog polja, a desna energiju pravilnog linearnog vala između kojih je znak jednakosti.



Sl. 4.4.2.2 Diskretni amplitudni spektar a_i^2 , amplitudni spektar $a^2(f)$ i valni spektar $S(f)$ slučajnog valnog zapisa $\eta(t)$ čiji Fourierov rastav predstavljaju spektralne komponente $\eta_1, \eta_2, \eta_3 \dots \eta_{\infty}$.

Osnovna ideja valnog spektra proizlazi iz izjednačenja specifične valne energije nepravilnog valnog polja i sume specifičnih valnih energija spektralnih komponenti (pravilnih linearnih; t.j. sinusnih valova) na koje se nepravilni valni zapis daje Fourier-ovom analizom rastaviti (Sl. 4.4.2.2).

4.5 PROGNOZE VALOVA

Valna prognoza se ovdje definira kao postupak određivanja statistički reprezentativnih ili vjerojatnih parametara valnog profila realnih valova (visine i perioda), ili određivanja valnog spektra pomaka fizičke površine mora. Prognoziranim veličinama pridružuje se smjer rasprostiranja. Temelj za to su izmjerena stanja mora, ili podaci potrebni za definiranje valnog generativnog procesa koji opet mogu biti izmjereni (vjetar) ili, prognozirani (potres) ili teorijski izvedeni (gravitacijsko i Coriolisovo ubrzanje). Parametre gibanja vodnih čestica kod realnih valova nije moguće prognozirati. Oni se određuju temeljem zavisnosti gibanja vodnih čestica i prognoziranih parametara valnog profila primjenom primjerene teorije idealnog vala, ili adekvatnih zavisnosti valnog spektra pomaka i spektara gibanja vodnih čestica.

Metode prognoza površinskih morskih valova mogu se logično specificirati **prema valnim generatorima** na:

- prognoze vjetrovnih valova,
- prognoze valova od uragana,
- prognoze plimnih valova,
- prognoze baričkih valova (storm surge),
- prognoze valova kontinentalnog shelfa (setup),
- prognoze seša,
- prognoze valova od potresa (cunami)
- prognoze brodskih valova...

Prema točnosti sve valne prognoze mogu se podijeliti na **kvalitativne i kvantitativne**. *Kvalitativne* određuju stanje mora stupnjevima koji su opisni. Opis uključuje dosta širok raspon nekog valnog parametra koji je moguć kod tog stanja mora. Služe za navigaciju. *Kvantitativne* prognoze određuju stanje mora brojčanom vrijednošću nekog, ili više valnih parametara.

Sve vrste realnih valova mogu imati **vjerojatnosne i vremenske valne prognoze**. Pri tome se *vjerojatnosnim prognozama* utvrđuju vjerojatnosti dostizanja ili premašenja nekog valnog parametra, ili se njima utvrđuju statistički reprezentativni valni parametri odnosno valni spektri. Primjenjuju se u graditeljstvu, naročito za vjetrovne valove. *Vremenskim prognozama* se utvrđuju veličina i vrijeme nastupa mekog valnog parametra. Njihova točnost otprilike odgovara točnosti klimatskih prognoza. Velika je kod prognoza plimnih i cunami valova. Njima se bavi geofizika. Malo se koriste u graditeljstvu.

Valne prognoze prema geografskoj pripadnosti su **globalne, regionalne i lokalne**. *Prve dvije* su do sada bile manje-više kvalitativne i služile za navigaciju. Uglavnom pripadaju u vremenske valne prognoze. U novije vrijeme razvijene su i kvantitativne regionalne vremenske prognoze valova. Ovdje je interesantno napomenuti da su danas razvijene kvantitativne regionalne vremenske prognoze vjetrovnih valova na pr. WAM model (**Wawe Model ili Wawe Analysis Model**). *Lokalne* su isključivo kvantitativne. Načinjene su za neku geografsku točku, ili uže područje, a služe u inženjerske svrhe.

Za svaku vrstu valova može se načiniti **kratkoročna i dugoročna prognoza**. *Kratkoročna* se odnosi na neko stacionarno stanje mora trajanja *10-tak minuta* do jednog dana, a dugoročna na rijetke pojave; tj na stanje mora koje se javlja tek u dužem nizu godina.

Dugoročna se bazira na rezultatima velikog broja kratkoročnih prognoza, a praktično se radi za razdoblja 1 godine do stoljeća.

U nastavku će se izučavati samo valne prognoze vjetrovnih valova zbog najvećeg djelovanja na pomorske građevine.

4.5.1 PROGNOZE VJETROVNIH VALOVA

Za potrebe pomorskog graditeljstva najinteresantnije su prognoze vjetrovnih valova, jer su to valovi najveće energije i stoga imaju najveća djelovanja na građevine. Rezultat prognoze su reprezentativni parametri valnog profila, ili valni spektar, realnih valova. Inženjerski se najčešće koriste prognoze vjetrovnih valova koje su: a) istovremeno kvantitativne, vjerojatnosne, lokalne i kratkoročne ili b) istovremeno kvantitativne, vjerojatnosne, lokalne i dugoročne. Ove pod a) će se u nastavku nazivati: kratkoročne prognoze vjetrovnih valova, a one pod b) dugoročne prognoze vjetrovnih valova.

		TEMELJEM PODATAKA O VALOVIMA		TEMELJEM PODATAKA O VJETRU	
KRATKOROČNE PROGNOZE	potrebni podaci	vizualno osmatranje pojedinačnog stanja mora	instrumentalni valni zapis pojedinačnog stanja mora	vizualno osmatranje pojedinačnog stanja vjetra	instrumenalni anemografski zapis pojedinačnog stanja vjetra
	prognozirane veličine	kratkoročni reprezentativni valni parametri ili teorijski valni spektar za pojedinačno stanje mora	kratkoročni reprezentativni valni parametri ili empirijski valni spektar za pojedinačno stanje mora	kratkoročni reprezentativni valni parametri ili teorijski valni spektar za pojedinačno stanje mora	kratkoročni reprezentativni valni parametri ili teorijski valni spektar za pojedinačno stanje mora
DUGOROČNE PROGNOZE	potrebni podaci	reprezentativni valni parametri temeljem mnogo valnih situacija iz višegodišnjeg vizualnog ili instrumentalnog opažanja	dugoročni reprezentativni valni parametri za stanja mora koja se rijetko javljaju; t.j. koja se javljaju u dugim povratnim razdobljima	reprezentativni valni parametri temeljem mnogo situacija vjetra iz višegodišnjeg vizualnog ili instrumentalnog opažanja	dugoročni reprezentativni valni parametri za stanja mora koja se rijetko javljaju; t.j. koja se javljaju u dugim povratnim razdobljima
	prognozirane veličine	dugoročni reprezentativni valni parametri za stanja mora koja se rijetko javljaju; t.j. koja se javljaju u dugim povratnim razdobljima	dugoročni teorijski spektri za stanja mora koja se rijetko javljaju; t.j. koja se javljaju u dugim povratnim razdobljima	dugoročni reprezentativni valni parametri za stanja mora koja se rijetko javljaju; t.j. koja se javljaju u dugim povratnim razdobljima	dugoročni teorijski spektri za stanja mora koja se rijetko javljaju; t.j. koja se javljaju u dugim povratnim razdobljima

Tab. 4.5.1::l Pregled prognoziranih veličina kod kratkoročnih i dugoročnih prognoza vjetrovnih valova u funkciji ulaznih podataka

Prognoze vjetrovnih valova mogu se vršiti na temelju podataka o vjetru ili podataka o valovima. Jasno je da su kvalitetnije prognoze na temelju podataka o valovima, pa se zato prognoze temeljem vjetra rabe kad

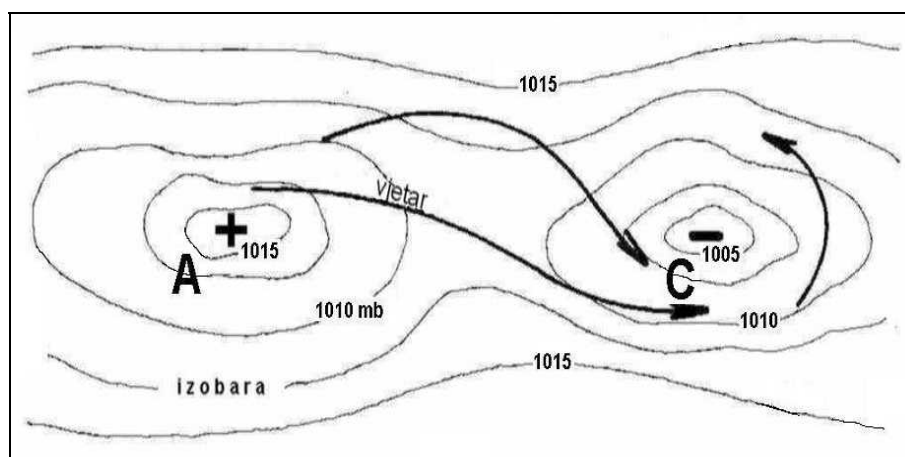
nema podataka o valovima (što je nažalost gotovo pravilo). Isto tako opažanja vjetra i valova mogu se obavljati vizualno i instrumentalno. Jasno je da su kvalitetnije prognoze na temelju instrumentalnih opažanja. Za kratkoročnu prognozu potrebni su podaci samo od jednog stanja valova ili vjetra, a za dugoročnu višegodišnji niz valnih situacija ili situacija vjetra. Izlazni podaci kratkoročnih i dugoročnih prognoza vjetrovnih valova u funkciji raspoloživih podataka dani su u Tablici 4.5.1::I.

4.5.1.1 PODACI POTREBNI ZA PROGNOZE VJETROVNIH VALOVA

Ovakve prognoze mogu se raditi na temelju podataka o vjetru ili podataka o valovima. Za kratkoročne prognoze potrebni su podaci od jednog ili nekoliko pojedinačnih stanja mora unutar jedne valne ili vjetrovne situacije, a za dugoročnu podaci od velikog broja situacija vjetra ili valova iz 30-godišnjeg, ili barem 10-godišnjeg, razdoblja opažanja.

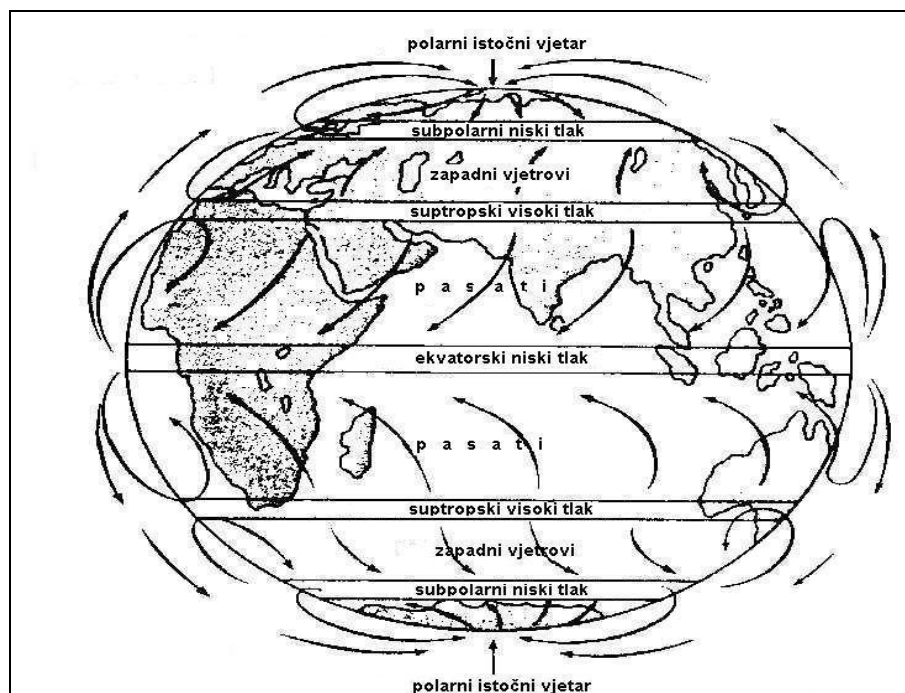
4.5.1.1.1 PODACI O VJETRU

Vjetar je gibanje zraka uzrokovano razlikom tlaka na različitim mjestima tj. između anticiklone (A-polje povišenog tlaka) i ciklone (C-polje sniženog tlaka) Sl. 4.5.1.1.1::1. Vjetar u početku puše od anticiklone prema cikloni u smjeru maksimalnog gradijenta tlaka (okomito na izobare). Kako mu se povećava brzina raste i Coriolisova sila koja djeluje okomito na smjer strujanja i otklanja pravac vjetra u desno na sjevernoj polukugli. Postepenim povećanjem brzine jača Coriolisova sila, a time jača i otklanjanje smjera strujanja u odnosu na spojnicu A-C, odnosno: smjer strujanja teži smjeru izobara. Na koncu se formira kružno strujanje zraka oko centara ciklone i anticiklone velikih razmjera.



Sl. 4.5.1.1.1::1 Kretanje vjetra na sjevernoj polukugli od područja visokog tlaka (A) ka području niskog tlaka (C)

Vjetar se generira pod utjecajem pobuđujućih i umirujućih sila. Najznačajniji utjecaj na brzinu vjetra imaju trestričke sile koje su slučajne prirode (klimatske i turbulentne), a nešto manji astralne (centrifugalno ubrzanje ovisno o zemljopisnoj širini, coriolisova sila, ...) koje su više determinističke. Sve to realnom vjetru daje karakter slučajnog procesa. Brzina realnog vjetra, kao najinteresantniji graditeljsko-inženjerski parametar, stoga se opisuje statistički i spektralno.

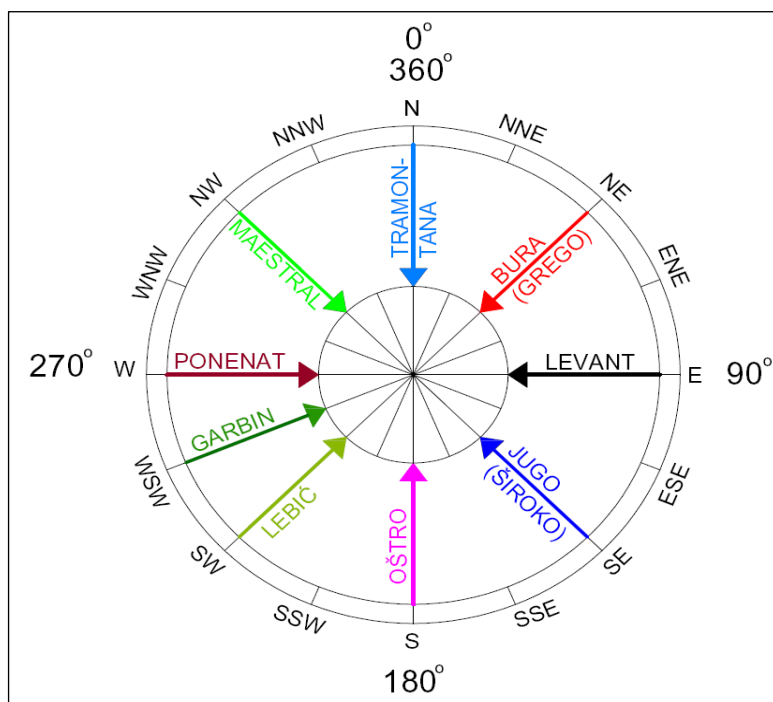


Sl. 4.5.1.1.1::2 Prikaz opće cirkulacije zraka na Zemlji

Drugi uzrok stalnih strujanja zraka je raspodjela toplih ekvatorskih i hladnih polarnih zračnih masa koje uvjetuju tzv. opću cirkulaciju zraka, a sastoji se od:

- pasata u ekvatorijalnom pojasu
- zapadnih vjetrova u umjerenom pojasu

polarnih vjetrova kao što se vidi na Sl. 4.5.1.1.1::2.



Vjetrovi na Jadranu i njihovi smjerovi puhanja imaju tradicionalne nazive koji su prikazani na vjetrulji (Sl. 4.5.1.1.1::3).

Sl. 4.5.1.1.1::3

Vjetrulja za
Jadran

Standardna brzina vjetra $\overline{U(z_m)} \equiv \overline{U_{600s}(z_m)}$ [m/s] prema WMO (World Meteorologic Organisation) konvenciji izražava se kao 10-minutni prosjek od sekundnih brzina

izmjerenih anemometrom na visini $z_m=10[m]$ iznad podloge; t.j. iznad što ravnijeg terena bez okolnih prepreka, ili iznad morske površine. kad se koristi za proračune tlakova ili sila na građevine prema EC ova brzina se naziva i "referentna ili karakteristična brzina vjetra".

Umjesto brzine vjetra $\overline{U(z_m)}$ [m/s] ranije se koristila "jačina" vjetra podijeljena Beaufort-ovom skalom na 12 stupnjeva. U njoj "stupanj jačine ili Beaufort-ov stupanj" opisuje 10-minutno stanje vjetra pomoću ponašanja prirodne okoline. Više se ne koristi, ali za starije vjetrovne datoteke u Boforima korisno je imati odnos za pretvaranje stupnjeva Bf u brzinu vjetra izraženu u [m/s].

Beaufort (Bf)	Naziv vjetra	Opis vjetrovne situacije		Klasa brzine [m/s]
0	TIŠINA	Dim se diže uspravno.	More kao ogledalo. $H_s=0$ m, $T_s=0$ s, $L_{sr}=0$ m	0.0-0.2
1	LAGAN POVJETARAC	Dim se povija. Smjer vjetra određuje se po dimu, vjetrokazi se ne okreću.	Formirani su nabori u vidu ribljih ljuski, ali bez pjene na grebenima. $H_s=5$ cm, $T_s=1,5$ s, $L_{sr}=2$ m	0.3-1.5
2	POVJETARAC	Vjetar se osjeća na licu, šušti lišće a vjetrokaz se pokreće.	Sitni valovi, još kratki, ali bolje izraženi. Grebeni im imaju staklast izgled, ali se još ne lome niti pjene. $H_s=20$ cm, $T_s=2,7$ s, $L_{sr}=5$ m	1.6-3.3
3	SLAB VJETAR	Gibaju se grančice, lišće jače šušti. Lagane zastave se počinju razvijati.	Vrlo mali valovi, grebeni im se počinju lomiti, pjena na grebenima staklastog izgleda povremeno bijela (razbacani bijeli mačići). $H_s=0,5$ m, $T_s=3,7$ s, $L_{sr}=9,5$ m	3.4-5.4
4	UMJEREN VJETAR	Diže se prašina i komadići papira s tla. Njišu se grančice.	Mali valovi koji postaju duži, česta pojava bijele pjene na grebenima (česti bijeli mačići). $H_s=0,8$ m, $T_s=4,6$ s, $L_{sr}=14$ m	5.5-7.9
5	UMJERENO JAK VJETAR	Njišu se tanja stabalca, na lokvama se stvaraju valići.	Umjereni valovi s bolje izraženom valnom dužinom, mnogo valova na grebenu ima bijelu pjenu (bijele mačice). Može se pojaviti morski dim. $H_s=1,3$ m, $T_s=5,4$ s, $L_{sr}=20$ m	8.0-10.7
6	JAK VJETAR	Njišu se velike grane, zuje telefonske žice, kišobrani jedva upotrebljivi.	Počinju se javljati veliki valovi, na svim se grebenima javlja bijela pjena. Može se pojaviti morski dim. $H_s=1,9$ m, $T_s=6,2$ s, $L_{sr}=25$ m	10.8-13.8
7	VRLO JAK VJETAR	Njišu se deblja stabla, otežano hodanje protiv vjetra.	Valovi se sve više gomilaju, a bijelu pjenu koja nastaje lomljenjem valova vjetar raznosi u vidu dugačkih pruga u smjeru vjetra. $H_s=2,6$ m, $T_s=6,9$ s, $L_{sr}=32$ m	13.9-17.1
8	OLUJAN VJETAR	Otkidaju se grančice sa stabala, hodanje vrlo teško.	Umjereno visoki valovi veće dužine, rubovi grebenova počinju se lomiti i pretvarati u morski dim, pjena se izdužuje u jasne pruge niz vjetar. $H_s=3,5$ m, $T_s=7,6$ s, $L_{sr}=40$ m	17.2-20.7
9	OLUJA	Nastaju lakša oštećenja na zgradama, vjetar ruši dimnjake i crepove.	Visoki valovi s debelim prugama pjene niz vjetar, valni grebeni se prolamaju, kortljaju i prebacuju, morski dim može smanjiti vidljivost. $H_s=4,6$ m, $T_s=8,3$ s, $L_{sr}=50$ m	20.8-24.4
10	JAKA OLUJA	Rijedak vjetar na kopnu. Čupa stabla iz zemlje i uzrokuje znatne	Vrlo visoki valovi s dugim grebenima pretrpanim pjenom. Pjena se u velikim krpama izdužuje u vidu debele bijele	24.5-28.4

		štete na zgradama.	pruge u smjeru vjetra. Morska površina u cjelini ima bijeli izgled. Prebacivanje valova postaje postaje snažno i udarno. Vidljivost smanjena. $H_s=5,9$ m, $T_s=9$ s, $L_{sr}=55$ m	
11	ORKANSKI VJETAR	Vrlo rijedak vjetar na kopnu. Stvara velike štete.	Izuzetno visoki valovi (mali i srednji brodovi povremeno se gube iz vida), more je potpuno prekriveno dugim krpama bijele pjene koje su izdužene uzduž smjera vjetra, rubovi grebenova se svuda raspršuju u pjenu, vidljivost smanjena. $H_s=7,3$ m, $T_s=9,7$ s, $L_{sr}=65$ m	28.5-32.6
12	ORKAN	Vrlo rijedak vjetar na kopnu. Stvara katastrofalne štete.	Zrak je pun pjene i magle od morskog dima, more je potpuno bijelo. Vidljivost jako smanjena. $H_s=8,8$ m, $T_s=10,4$ s, $L_{sr}=80$ m	32.7-36.9

Tab. 4.5.1.1.1::I Beaufort-ova skala jačina vjetra za 10-minutno stanje (nije u međunarodnom sustavu mjera SI)

Reprezentativne brzine vjetra: Kako je već rečeno vjetar je pojava slučajne prirode, a shodno tome i brzina mu slučajno varira. Stoga se brzina vjetra, za neko kratkoročno stacionarno stanje vjetra trajanja 10 minuta, mora prikazivati pomoću većeg broja statistički reprezentativnih brzina koje uključuju njen varijabilitet. U inženjerskoj primjeni se za kratkoročna stanja vjetra koriste srednje brzine vjetra i udari vjetra. Određuju se iz anemometarskog zapisa brzine vjetra. Shodno tipu instrumenta u nekoliko se razlikuju i definicije reprezentativnih brzina vjetra.

a *Srednje brzine vjetra za kratkoročno stacionarno stanje vjetra*

Stariji tipovi anemografa davali su u zapisu kumulativni pređeni put (odnosno broj okretaja) po vremenu, pa se iz tog omjera određivala brzina vjetra. Razlučivost podataka bila je reda veličine 3-5 sekundi. Tada je računat

- 1 satni srednjak $\overline{U_{3600s}(z_m)}$ [m/s] kao prosjek sekundnih brzina iz satnog anemografskog zapisa na standardnoj visini $z_m=10$ [m]. Napušten.

Danas kada postoje digitalni anemometri mjerenja su sekundne razlučivosti. Iz tih mjerenja mogu se izračunati srednjaci kako slijedi:

- 2 desetminutni srednjak $\overline{U(z_m)} \equiv \overline{U_{600s}(z_m)}$ [m/s] je standardna ili karakteristična brzina vjetra t.j. prosjek sekundnih brzina iz 10-minutnog anemografskog zapisa na standardnoj visini $z_m=10$ [m].

Iz takvih 10-minutnih srednjih brzina vjetra može se izračunati:

- 3 dnevni desetminutni srednjak je dnevni prosjek od 10-minutnih srednjaka

- 4 mjesečni desetminutni srednjak je mjesečni prosjek od 10-minutnih srednjaka
- 5 godišnji desetminutni srednjak je godišnji prosjek od 10-minutnih srednjaka

Iz 10-minutnih srednjih brzina vjetra mogu se izračunati i slijedeće maksimalne brzine vjetra:

- 6 dnevna maksimalna 10-minutna brzina vjetra je najveći 10 minutni srednjak u nekom danu
- 7 mjesečna maksimalna 10-minutna brzina vjetra je najveći 10 minutni srednjak u nekom mjesecu
- 8 godišnja maksimalna 10-minutna brzina vjetra je najveći 10 minutni srednjak u nekoj godini

Sve gornje vrijedi i za satne srednjake brzine vjetra.

b Udari vjetra za kratkoročno stacionarno stanje vjetra

Iz sekundnih podataka vjetra određuje se brzina udara vjetra:

- 9 10-minutni maksimalni udar vjetra $U_{600s}^{max}(z_m) \equiv U_{1s}(z_m)$ je najveća sekundna brzina u zabilježena 10- minutnom anemonetarskom zapisu
- 10 satni maksimalni udar vjetra $U_{3600s}^{max}(z_m) \equiv U_{1[s]}(z_m)$ je najveća sekundna brzina zabilježena u satnom anemografskom zapisu
- 11 mjesečni maksimalni udar vjetra je najveća sekundna brzina u nekom mjesecu
- 12 godišnji maksimalni udar vjetra je najveća sekundna brzina u nekoj godini.
- 13 udar vjetra t-sekundnog trajanja $U_{t[s]}$ je najveća trenutna brzina t-sekundnog intervala u anemonetarskom zapisu

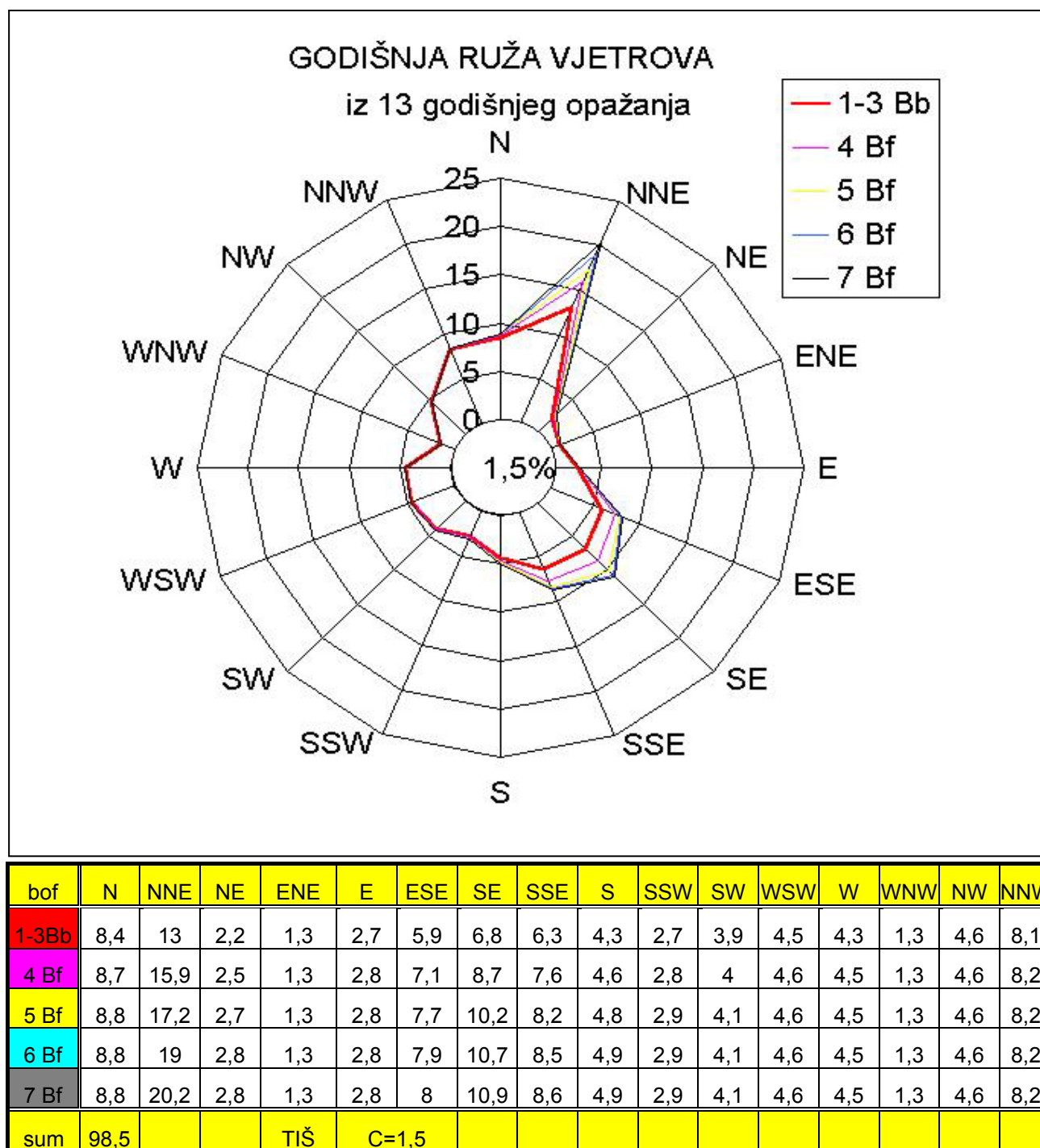
c Srednje brzine i udari vjetra za dugoročna stanja vjetra

Ipak najčešća je inženjerska primjena brzine za dugoročna stanja vjetra. Koriste se srednje brzine i udari vjetra koji se proračunavaju iz velikog broja reprezentativnih brzina vjetra za kratkoročna stanja računom vjerojatnosti. Dakle dugoročna reprezentativna brzina vjetra je bilo koja kratkoročna reprezentativna brzina vjetra kojoj je pridružena neka mala vjerojatnost nastupa, ili dugo povratno razdoblje PR[god]. Na pr:

- 14 50-godišnji 10-minutni srednjak $\overline{U^{50g}(z_m)} \equiv \overline{U_{600s}^{50g}(z_m)}$ [m/s] na standardnoj visini $z_m=10[m]$.
Kod proračuna građevina prema EC naziva se i "referentna ili karakteristična brzina vjetra".
- 15 50-godišnji udar vjetra 1-sekundnog trajanja $U_{1[s]}^{50g}$

Spektar brzine vjetra: Vjetar je pojava slučajne prirode. Brzina mu slučajno varira i daje se opisati spektrom brzina.

Ako se **vjetar promatra na jednoj geografskoj točki**, generalnu kvantitativnu sliku vjetra u prosječnoj godini (ili nekom drugom razdoblju) kao što su smjerovi, brzine [m/s] te učestalosti pojave vjetra [%] prikazuje ruža vjetrova (Sl. 4.5.1.1.1::4).



Sl. 4.5.1.1.1::4 Prosječna godišnja ruža vjetrova iz 13-godišnjeg opažanja u Dubrovniku i tablica kontigencije vjetra (učestalost [%] parova smjer/jačina) iz koje je nacrtana ruža vjetrova

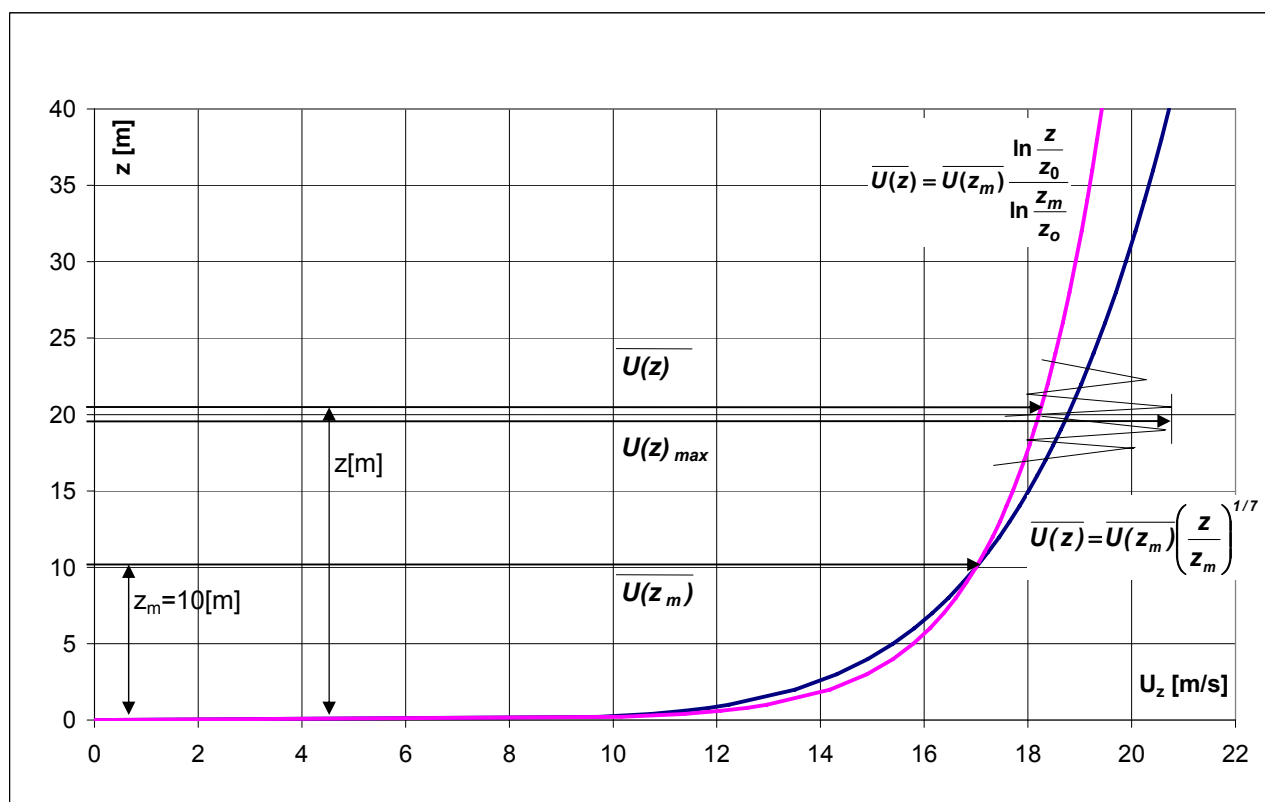
Vertikalni profil brzine vjetra: U koliko se traži srednja 10-minutnoj brzini vjetra $\overline{U(z)}$ na nekoj visini $z[m]$ (iznad tla ili mora) a raspolaže se brzinom $\overline{U(z_m)} = \overline{U_{600}(z_m)}$ na bilo kojoj visini z_m ona se može izračunati prema približnom vertikalnom eksponencijalnom profilu srednje brzine vjetra [30].

$$\overline{U(z)} = \overline{U(z_m)} \left(\frac{z}{z_m} \right)^\alpha$$

gdje je:

z [m]	visina iznad tla na kojoj se traži brzina vjetra
z_m [m]	visina iznad tla za koju postoji izmjerena brzina vjetra; standardno $z_m=10$ [m]
$\overline{U(z)}$ [m/s]	10-minutna srednja brzina vjetra na visini "z" iznad površine mora ili tla
$\overline{U(z_m)}$ [m/s]	10-minutna srednja brzina vjetra na visini " z_m " iznad površine mora ili tla (standardno $z_m=10$ [m]).
α	eksponent: definiran je prema hrapavosti pa za standardan otvoreni teren $z_0=0,05$ [m] (neobrađeno polje) sim 43 [30] iznosi $\alpha=1/7$.

$$\overline{U(z)} = \overline{U(z_m)} \left(\frac{z}{z_m} \right)^{1/7}$$



Sl. 4.5.1.1.1::5 Vertikalni profil srednje brzine vjetra

Opće prihvaćen je i detaljniji logaritamski profil u kojem se uzima u obzir i hrapavost površine ~~sim 39~~ [30]:

$$\overline{U(z)} = \overline{U(z_m)} \cdot \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_m}{z_0}\right)},$$

gdje je:

z_0 [m] dužina hrapavosti hrapavosti;

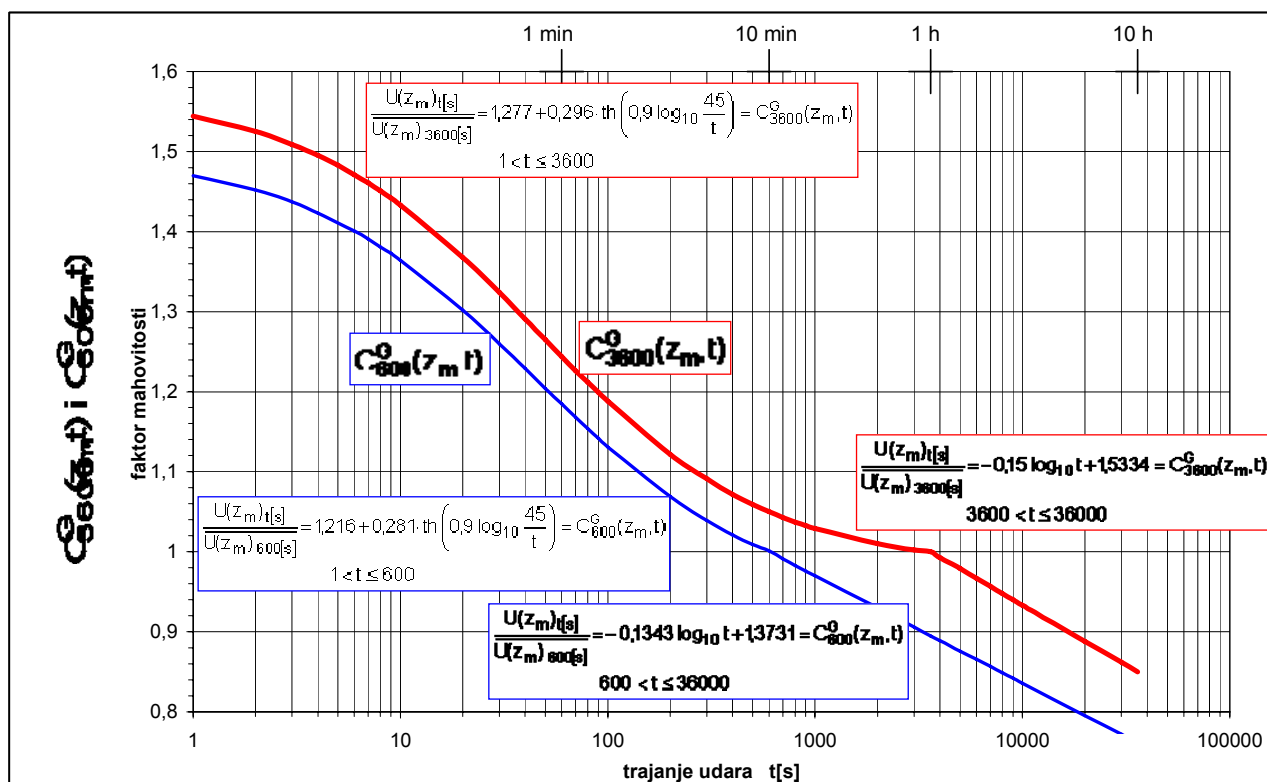
za valovitu morsku površinu kod brzine vjetra 14m/s $z_o = 0,0006$ m; Sim42

za kopno $z_o = 1/10$ srednje hrapavosti terena, raslinja i građevina (Tab1400); na pr. za

standardni otvoreni teren (neobrađeno polje) $z_o = 0,05$ m. Sim42

Komparacija eksponencijalno i logaritamskog profila dana je na Sl. 4.5.1.1.1::5 ([28,29] CEM - Coastal Engineering Manual: U.S Army Corps of Engineers"; Index; Part II: Coastal Hydrodynamics)

Nema veze s valnom prognozom, ali zbog primjere kod opterećenja vjetrom, definirati će se i brzine udara (mahovitost, refuli). Udar je najvjerojatniji maksimum od sekundnih brzina vjetra koje se mogu desiti, ili izmjeriti, u nekom intervalu trajanja vjetra $t[s]$. Udar se iz srednje 10-minutne brzine vjetra daje izračunati preko faktora mahovitosti kao:



Sl. 4.5.1.1.1::6 Faktor mahovitosti vjetra $C_{3600}^G(z_m, t)$ za t -sekundni udar na visini $z_m[m]=10[m]$ kad je poznata srednja satna brzina vjetra $\overline{U_{3600[s]}(z_m)}$ na visini z_m ([28] CEM Coastal Engineering Manual Index, Part II: Coastal Hydrodynamics, U.S Army Corps of Engineers, i faktor mahovitosti vjetra $C_{600}^G(z_m, t)$ za t -sekundni udar na visini $z_m[m]=10[m]$ kad je poznata 10-minutna srednja brzina vjetra $\overline{U_{600[s]}(z_m)}$ na visini z_m (izveo autor); sve za standardni teren na kopnu $z_o=0,05[m]$

$$U_{t[s]}(z_m) = C_{600}^G(z_m, t) \cdot \overline{U_{600s}(z_m)} \quad \text{ili konkretno} \quad U(z_m)_{1[s]} = C_{600}^G(z_m, t = 1[s]) \cdot \overline{U_{600s}(z_m)}$$

gdje je:

$U_{t[s]}(z_m)$ [m/s] t -sekundni udar vjetra na visini $z_m[m]$

$z_m[m]=10[m]$ standardna visina iznad tla ili mora

$\overline{U_{600s}(z_m)} = \overline{U(z_m)}$ [m/s] 10-minutna srednja brzina vjetra na visini z_m .

Prema EC naziva se karakteristična brzina vjetra.

$C_{600}^G(z_m, t)$ faktor mahovitosti za t-sekundni udar na visini z_m kad je poznata 10-minutna srednja brzina vjetra na visini z_m

Izraz vrijedi i za bilo koju visinu $z \neq 10[m]$ no za to treba izračunati $\overline{U(z)}$ i poznavati faktor mahovitosti na visini $z \neq 10[m]$. Faktor mahovitosti $C_{600}^G(z_m, t)$ za srednju 10-minutnu brzinu i $C_{3600}^G(z_m, t)$ za srednju satnu brzinu, na visini $z_m[m]=10[m]$, dan je na Sl. 4.5.1.1.1::6. Neke analize bure na Jadranu pokazale su da je faktor mahovitosti bure veći od ovoga na slici.

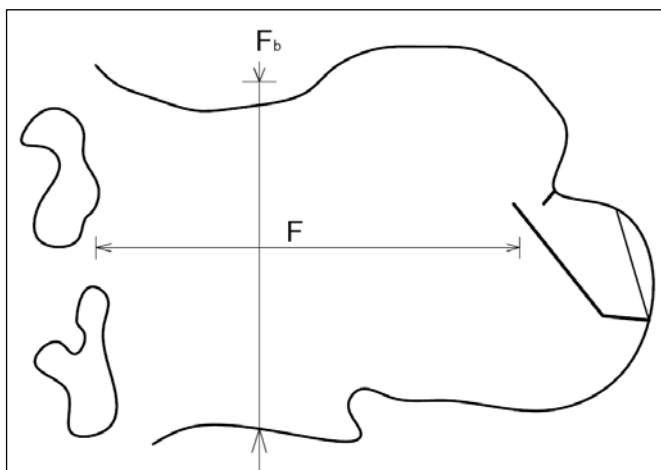
Projektna brzina vjetra za valne prognoze je srednja satna brzina vjetra $\overline{U_{3600}(z_m)}$ [m/s] na $z_m=10[m]$ iznad mora što je logično jer je standardni 10-minutni srednjak prekratak: t.j. karakteristična brzina vjetra $\overline{U(z_m)} \equiv \overline{U_{600}(z_m)}$ prekratka za valni generativni proces koji se razvija satima. Ako je poznata karakteristična brzina vjetra $\overline{U(z_m)}$ [m/s] (10-minutni srednjak na $z_m=10[m]$ iznad mora) onda se satni srednjak prema Sl. 4.5.1.1.1::6 izračuna kao $\overline{U_{3600s}(z_m)} = C_{600}^G(z_m, 3600[s]) \cdot \overline{U_{600s}(z_m)}$, ili konkretno otprilike $\overline{U_{3600[s]}(z_m)} = 0,95 \cdot \overline{U_{600[s]}(z_m)}$.

Projektna brzina vjetra za opterećenja građevina prema EC-u je 50-godišnji 1-sekundni udar na visini $z_m=10[m]$ t.j. $U_{1[s]}^{50g}(z_m)$ [m/s], pa ako je poznata 50-godišnja karakteristična brzina vjetra $\overline{U^{50g}(z_m)} \equiv \overline{U_{600s}^{50g}(z_m)}$ [m/s] onda se 50-godišnji sekundni udar izračuna pomoću Sl. 4.5.1.1.1::6 kao: $U_{1[s]}^{50g}(z_m) = C_{600}^G(z_m, 1[s]) \cdot \overline{U_{600[s]}^{50g}(z_m)}$, ili konkretno otprilike $U_{1[s]}^{50g}(z_m) = 1,47 \cdot \overline{U_{600[s]}^{50g}(z_m)}$.

Osnovni podaci za prognoziranje valova iz podataka o vjetru su smjer, srednja satna brzina $\overline{U_{3600[s]}(z_m)}$ [m/s] i trajanje vjetra $t[h]$, te privjetrište $F[km]$ i dubina mora $d[m]$. Informacije o interesantnim smjerovima, brzini i njihovoj učestalosti vjetra daje ruža vjetrova (Sl. 4.5.1.1.1::4); tj. iz nje se uočava generalna slika vjetrovne klime, što je u grubo i slika valne klime. No ruža, osim smjerova i redovnih brzina, ne sadrži ostale potrebne podatke o vjetru za kvantitativnu valnu prognozu kao što su brzine i njihova pripadna trajanje tokom cijele situacije vjetra unutar nekoliko sati do nekoliko dana. Maksimalne brzine dešavaju se vrlo rijetko, pa im učestalost iznosi djeliće postotka i stoga se na ruži, ili uprosječnoj tablici kontigencije, ne vide. Zbog toga, za valnu prognozu, treba kod meteorološkog zavoda naručiti detaljnije podatke o situacijama vjetra (t.j brzine i pripadna trajanja vjetra) kroz 10-30 godišnje razdoblje što ne daje ruža vjetrova; . Za kratkoročnu prognozu treba naručiti konkretnu situaciju vjetra od interesa (od početka puhanja do smirenja). Takva se prognoza rijetko radi; na pr. kod havaruje neke postojeće pomorske građevine od konkretne oluje. Za dogoročnu prognozu, koja se radi kod svakog projekta nove pomorske građevine, treba iz prethodnog 30-godišnjeg ili barem 10-godišnjeg razdoblja opažanja naručiti: a) tablicu kontigencije s apsolutnim

učestalostima i b) sve situacije vjetra (od početka puhanja do smirenja) jačine iznad 3-4Bf unutar kuta izloženosti valovima razmatrane lokacije za pomorsku građevinu.

Za kratkoročnu prognozu uzimaju se podaci o **satnim brzinama** $\overline{U_{3600[s]}(z_m)} [m/s]$ i pripadajućim **trajanjima** $t[h]$ vjetra za cijelu meteorološku situaciju od interesa ako se nastoji prognozirati stanje mora u bilo kojem trenutku te situacije. Pri tome treba imati na umu da svaka situacija vjetra ima faze porasta, vrhunca i opadanja brzine vjetra s vremenom. Za prognoze ekstremnog stanja mora u razmatranoj situaciji vjetra interesantne su faze porasta, vrhunca i opadanja. Ako se umjesto kontinuirane zvonolike funkcije promjene brzine vjetra s vremenom zamisli diskretna stepenasta funkcija onda svaka stepenica predstavlja jedno stanje vjetra koje se sastoji od para: brzina i pripadajuće trajanja vjetra. Takvih stepenica je velik broj, a time nastaje i velik broj parova: brzina i trajanja vjetra. Kako se prognoza može vršiti samo za jedan par podataka o vjetru (brzina i trajanje) to je, za onaj trenutak kada se želi doznati stanje mora; t.j. izvršiti valna prognoza, potrebno uzeti brzinu vjetra u tom trenutku iz podataka mjerenja, i njoj pridružiti ekvivalentno trajanje vjetra. Izračunavanje ekvivalentnog trajanja vjetra vrši se sumiranjem ekvivalentnih trajanja za pojedine parove (brzina i trajanje), kod brzina vjetra prije one u trenutku prognožiranja, po principu da se za svaki takav par podataka nađe ekvivalentno (kraće) trajanje koje s brzinom u trenutku prognožiranja daje istu valnu visinu kao i dotični par podataka. Taj proračun se može provesti na bilo kojem poluempirijskom prognostičkom dijagramu.

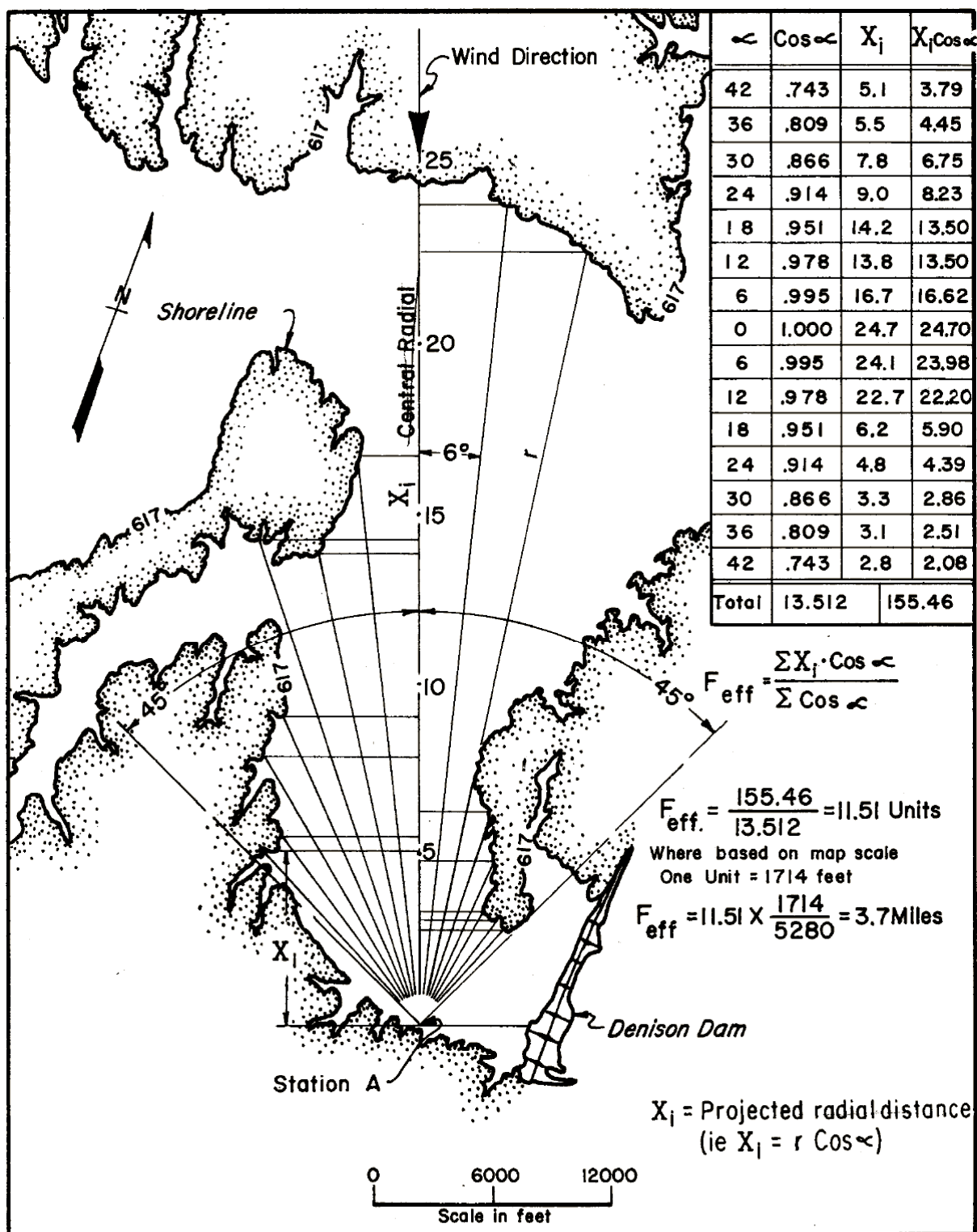


Privjetrište $F[km]$ (engl. Fetch) je morska površina iznad koje puše vjetar generirajući valove (Sl. 4.5.1.1.1::7). Za priobalne lokacije i zaljeve privjetrište se proteže preko cijelog akvatorija, jer se smatra da polje vjetra uvijek pokriva cijeli akvatorij.

Sl. 4.5.1.1.1::7 Definijska skica za dimenzije privjetrišta

Kod približno pravokutnih akvatorija, prema Sl. 4.5.1.1.1::7 dimenzije privjetrišta su: duljina privjetrišta $F[km]$ i širina privjetrišta $F_b[km]$. U slučaju širokih privjetrišta: $F_b \geq (1/2)F$ mjerodavna je samo duljina privjetrišta. Za uska privjetrišta: $F_b < (1/2)F$ mjerodavne su duljina i širina iz kojih se izračunava samo jedan podatak t.zv. "efektivno privjetrište". Ono se određuje preko teoretski izvedenih dijagrama, a kod nepravilnih pomoću geometrijske konstrukcije (Sl. 4.5.1.1.1::8) prema priručniku [1] (CERC I, Shore Protection Manual, Coastal Engineering Research Center, 1984).

U koliko vjetar puše nad oceanom čija je površina veća od područja zahvaćenog vjetrom privjetrište se određuje specijalnom metodom prema priručniku World Meteorological Organization WMO [2]. Isto se može naći i u priručniku [1] CERC.



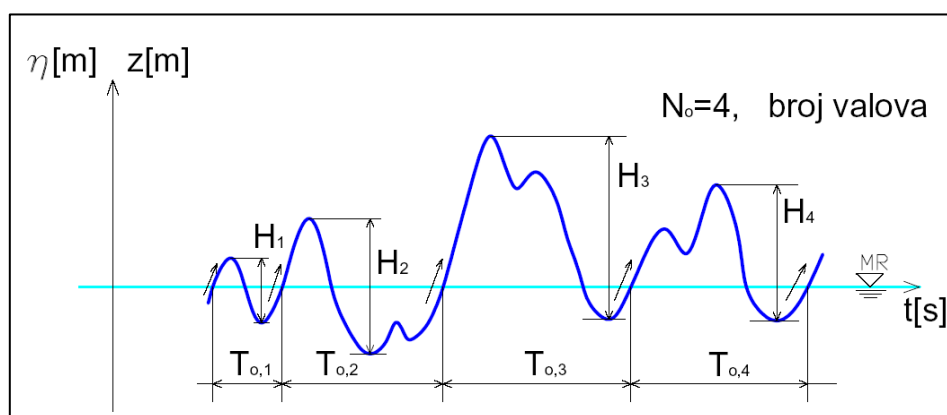
(U.S. Army, B.E.B. Tech. Memo No. 132, 1962)

Sl. 4.5.1.1.1::8 Definijska skica za proračun efektivnog privjetrišta, [1] CERC 1984.

Dubina mora ne ulazi u proceduru prognoze, kao ulazni podatak, ako je more "duboko" za prognozirane valove; inače ulazi. Kako se to ne može znati unaprijed prognoza se provodi u vidu iteracije.

4.5.1.1.2 PODACI O VALOVIMA

Valovi se mogu opažati vizualno ili instrumentalno - valografom. **Vizualno** se procjenjuju valna visina H_v i valni period T_v , te smjer rasprostiranja valova. **Instrumentalno** se valovi mjere na pojedinačnim geografskim točkama valografom koji ne može mjeriti smjer valova. Radi toga mu je obično pridružen anemograf. Valograf daje valni zapis pomaka fizičke površine mora u funkciji vremena. Iz njega se, metodom uzlaznog ili silaznog presijecanja nule, određuje broj valova, visine H_i i valni periodi $T_i \equiv T_{oi}$ individualnih valova (Sl. 4.5.1.1.2::1) koji se kasnije statistički obrađuju u svrhu kratkoročnog ili dugoročnog prognoziranja. Instrument standardno daje 8 valnih zapisa dužine 5-15 minuta dnevno što znači da se uključuje svakih 3 sata.



Sl. 4.5.1.1.2::1 Određivanje valnih parametara pojedinačnih (individualnih) valova iz valnog zapisa metodom uzlaznog presijecanja nule

4.5.1.2 LOKALNE KRATKOROČNE PROGNOZE VJETROVNIH VALOVA

Odnose se na pojedinačne valne situacije koje mogu trajati nekoliko sati do nekoliko dana. Rezultat prognoze je prikaz valovlja u bilo kojem "trenutku" razmatrane situacije od njenog početka, pa do kraja. Taj "trenutak" je u stvari vremenski interval u kojem se valni proces može smatrati stacionaran, i on je standardiziran na cca 10-minuta. Dakle ovim prognozama utvrđuju se statistički reprezentativni valni parametri ili valni spektar na jednoj geografskoj točki za neko *kratkoročno stacionarno stanje mora trajanja 10-tak minuta* i to u statističkoj formi preko reprezentativnih parametara valnog profila:

- značajne valne visine $H_s \equiv H_{1/3}$ i
- značajnog valnog perioda $T_s \equiv T_{1/3}$ (ili $\bar{T}_0$),

ili u spektralnoj formi u vidu

- valnog spektra izdizanja (pomaka) fizičke površine mora $S_{\eta\eta}(f)$.

4.5.1.2.1 LOKALNE KRATKOROČNE PROGNOZE REPREZENTATIVNIH PARAMETARA VALNOG PROFILA IZ PODATAKA O VJETRU

Rezultat ovakve prognoze su reprezentativni valni parametara: najčešće značajna valna visina H_s i značajni valni period T_s za *kratkoročno stacionarno stanje mora trajanja 10-tak minuta*. Ovakove prognoze se provode kad nema podataka o valovima. Mogu se raditi za prošlost, sadašnjost, i budućnost ako su poznati podaci o vjetru iz prošlosti iz sadašnjosti odnosno ako su prognozirani za budućnost. Postoji dvije generacije metoda: empirijske i poluempirijske. Obadvije grupe za provedbu valne prognoze trebaju neke podatke ili sve podatke o vjetru definirane u poglavlju 4.5.1.1.1. **Empirijske formule** su razvijane između sredine XIX. i sredine XX. stoljeća, no nakon II svjetskog rata su prevaziđene poluempirijskim (poluteorijskim) metodama. Kod **poluempirijskih metoda** su zakonitosti generativnog procesa izvedene teorijskim analizama (dimenzionalnim, statističkim, spektralnim...), a veličine njihovih parametara su dobivene iz mnogih opažanja stanja mora i relevantnih meteoroloških značajki okoliša. Najprije su (nakon prvih radova Munka i Svedrupa 1944.) razvijene poluempirijske "metode značajnih valnih parametara" na temelju mjerenih valova od kojih su najpoznatije:

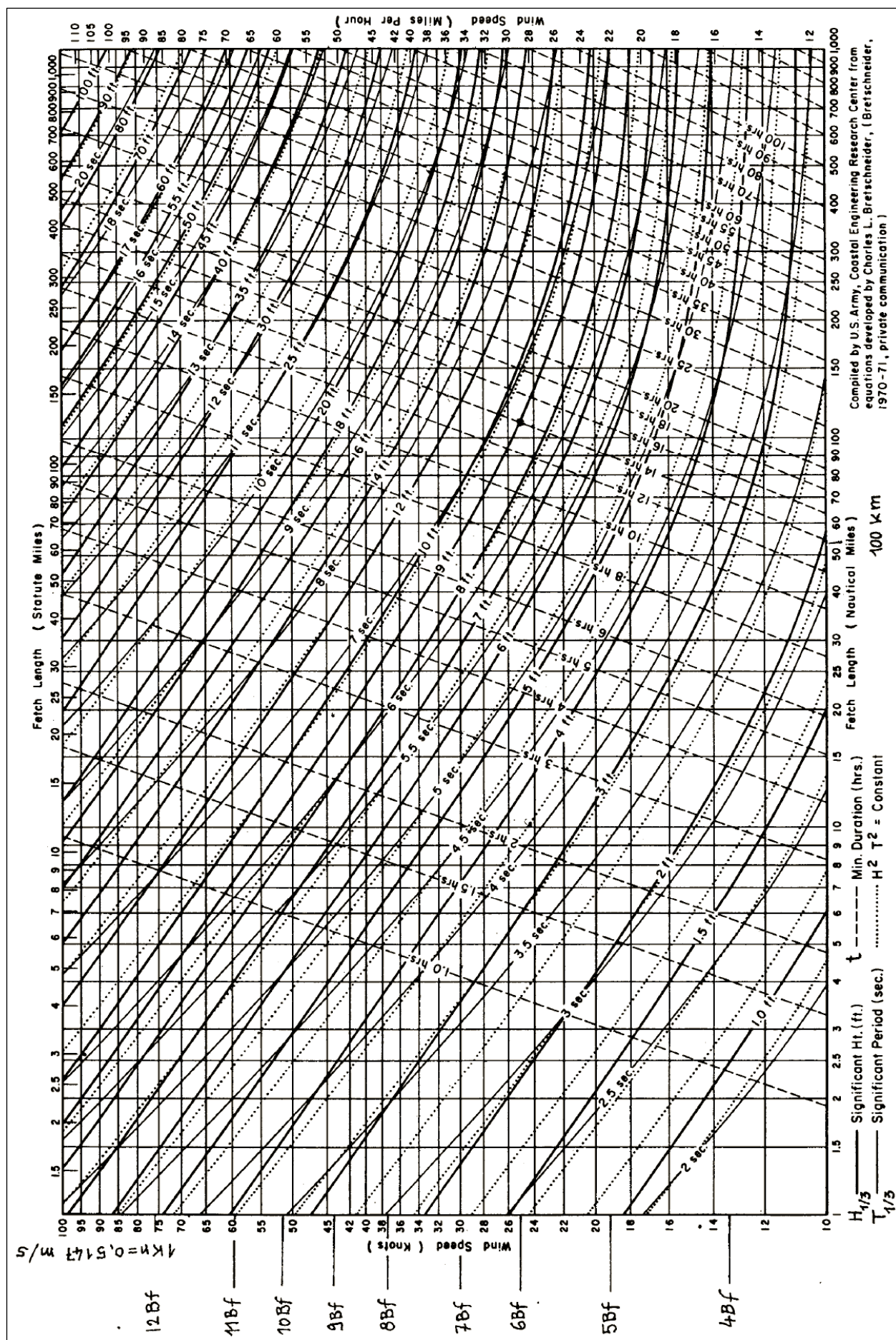
- SMB metoda (Svedrup, Munk, Bretschneider) Sl. 4.5.1.2.1::1 [3],
- Groen - Dorrenstein metoda Sl. 4.5.1.2.1::2 [5] i druge kao [4] i [6]

a kasnije (nakon prvih radova Bretschneidera i Piersona 1955.) i "spektralne metode" na bazi mjerenih spektara:

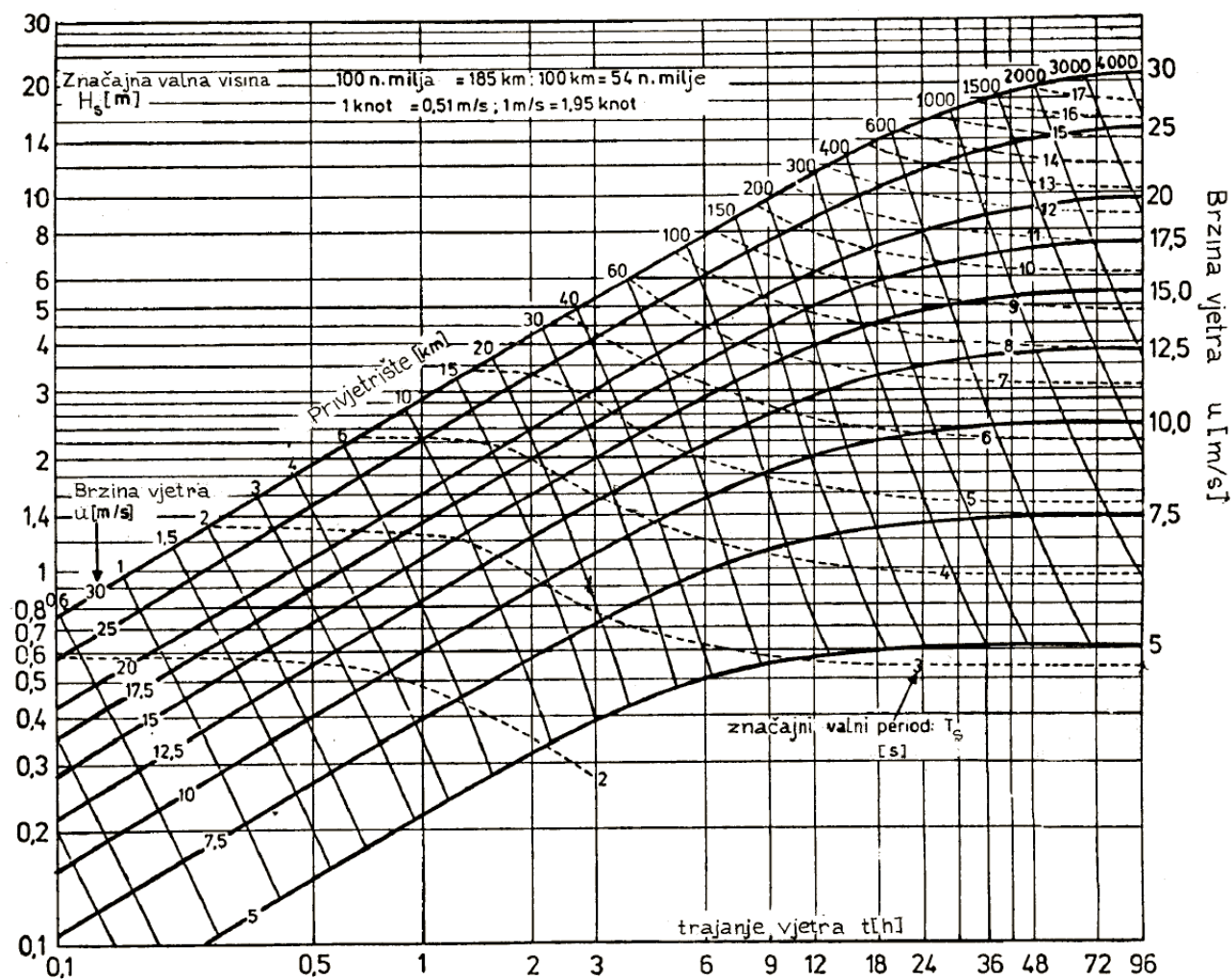
- PNJ metoda (Pierson, Neuman, James) [7] Sl. 4.5.1.2.1::1 i
- JONSWAP metoda (Joint North Sea Wave Project) [8].

Sve navedene (i mnogobrojne druge) metode izvedene su u vidu matematičkih izraza, ali su za praktične svrhe dane na dijagramima. Prikazati će se SMB metoda (Sl. 4.5.1.2.1::1) kao najpoznatija i Groen-Dorrenstein (Sl. 4.5.1.2.1::2) preporučena od WMO [2]. Sve one se u pravilu koriste tako da se s lijeva na desno prati konstantna brzina vjetra u i zatim traži njeno presjecište s privjetrištem F ili trajanjem vjetra t koje već prvo dođe. Na mjestu tog prvog presjecišta očitaju se prognozirana značajna valna visina H_s i značajni valni period T_s . Presjecište brzine vjetra s privjetrištem ili trajanjem pokazuje koji od ta dva uticajna faktora je ograničavajući za generiranje vjetrovnih valova.

Sasvim desno na dijagramima se uočava da prognozirane veličine H_s (ili H_{max}) i T_s postaju neovisne od privjetrišta i trajanja vjetra, a ovise samo od brzine vjetra u . Takovo stanje valnog generativnog procesa naziva se potpuno razvijeno more (engl.: Fully Arisen Sea-FAS). Privjetrište i trajanje vjetra tada nisu ograničavajući faktori, i na valove se prenosi najveća moguća energija vjetra.



Sl. 4.5.1.2.1::1 SMB dijagram za prognozu dubokovodnog značajnog vala u funkciji brzine, trajanja vjeta i privjetrišta:
 $1[Nm]=1853[m]$, $1[čvor]=1[Nm/h]=0.5147[m/s]$ 11 CERC



Sl. 4.5.1.2.1::2 Groen - Dorrenstein dijagram za prognozu dubokovodnog značajnog vala u funkciji brzine i trajanja vjeta, te privjetrišta [2]

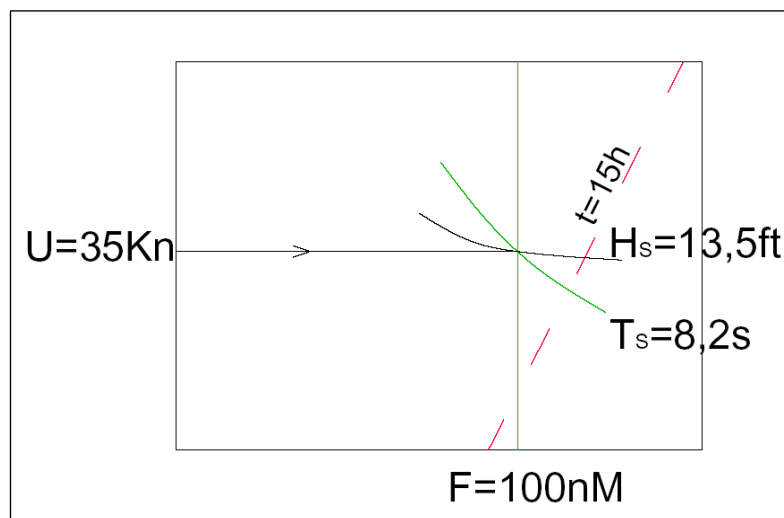
Unutar privjetrišta može, u vrijeme generiranja valova od vjeta, biti pridošlih **valova mrtvog mora** proizvedenih nekom ranijom udaljenom olujom. Sumarna valna visina od vjetrovnih valova i valova mrtvog mora je dana jednadžbom izvedenom iz sume valnih energija:

$$\bar{E} = \bar{E}_{\text{mrtvog mora}} + \bar{E}_{\text{od vjeta}} \Rightarrow H_{\text{rms}} = \sqrt{(H_{\text{rms}}^{\text{mrtvog mora}})^2 + (H_{\text{rms}}^{\text{od vjeta}})^2}$$

Visina valova mrtvog mora ovisi o duljini puta zamiranja koji su prošli od svog izvora do točke od interesa, a proračun njihove atenuacije dan je u priručniku CERC [1].

Za plitko more i jezera postoje posebni SMB dijagrami [1], a i mnoge druge metode.

Primjer 4.5.1.2.1::1 Prognoza vala SMB metodom za slučaj kada je mjerodavno privjetrište



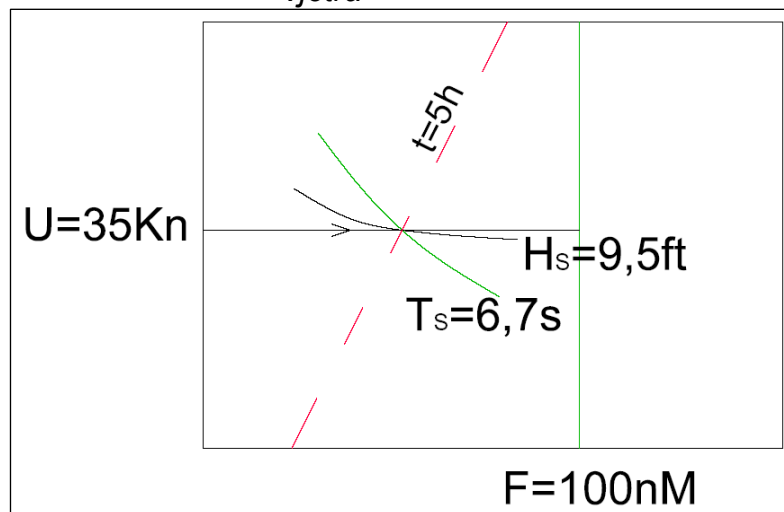
Zadano: $U=35[\text{čv}\equiv\text{Kn}]=18[\text{m/s}]$
srednja satna brzina
vjetra
 $t = 15 [\text{h}]$
trajanje vjetra
 $F=100[\text{nM}]=185,3\text{km}$
dužina orivjetrišta

Rezultat:
Na mjestu presjecišta U i F očita se:

$$H_{1/3} = 13,5[\text{ft}] = 13,5 \times 0,305 \approx 4 [\text{m}]$$

$$T_{1/3} = 8,2 [\text{s}]$$

Primjer 4.5.1.2.1::2 Prognoza vala SMB metodom za slučaj kada je mjerodavno trajanje vjetra



Zadano: $U=35[\text{čv}\equiv\text{Kn}]=18[\text{m/s}]$
srednja satna brzina
vjetra
 $t = 5 [\text{h}]$
trajanje vjetra
 $F=100[\text{nM}]=185,3\text{km}$
dužina orivjetrišta

Rezultat:
Na mjestu presjecišta U i t očita se:

$$H_{1/3} = 9,5 [\text{ft}] = 2,9 \times 0,305 \approx 2,9 [\text{m}]$$

$$T_{1/3} = 6,7 [\text{s}]$$

4.5.1.2.2 LOKALNE KRATKOROČNE PROGNOZE REPREZENTATIVNIH PARAMETARA VALNOG PROFILA IZ PODATAKA O VALOVIMA; T.J. OBRADA VIZUALNOG OPAŽANJA ILI VALNOG ZAPISA

Ovdje se radi o obradi opažanja valova iz dva različita izvora podataka: iz vizualno opažanih valova i iz instrumentalno mjerenih valova (valnih zapisa). Obrade se mogu raditi za sadašnjost ili unazad. U obadva slučaja prvo se mora obaviti opažanje valva. Rezultat obrade su reprezentativni valni parametara: (najčešće) značajna valna visina H_s i značajni valni period T_s za *kratkoročno stacionarno stanje mora od 10-tak minuta*.

4.5.1.2.2.1 Lokalne kratkoročne prognoze reprezentativnih parametara valnog profila iz vizualnog opažanja valova

Rezultat obrade su značajna valna visina H_s i značajni valni period T_s . Do njih se dođe posredstvom vizualno procjene srednje valne visine H_v i srednjeg valnog perioda T_v , te smjera dolaska valova što registrira opažač za neki dan i sat. Prema gruboj orijentaciji ono što iskusan opažač procijeni kao prosječnu valnu visinu od 15 do 20 dobro formiranih većih valova u nizu H_v [12] odgovara značajnoj valnoj visini H_s WMO [2]. Zbog toga je H_s i usvojen kao najreprezentativniji valni parametar realnih valva. Vizualno osmotreni prosječni valni period od 15- 20 dobro formiranih uzastopnih većih valova - T_v WMO [12] grubo odgovara značajnom valnom periodu T_s CERC [1]. Na temelju komparacije vizualnih opažanja i objektivnih mjerenja Nordenström [9] je za Sjeverno more, a Cartwright [13] za oceane ustanovio neke relacije:

$$H_s = 1,68H_v^{0,75}$$

$$\bar{T}_o = 0,74T_v \quad \text{ili} \quad \bar{T}_o = 2,83T_v^{0,44}$$

$$H_s = 1,11H_v$$

$$\bar{T}_o = 0,374T_v + 5,19$$

Izrazi za visine se prilično slažu za valove do 7 m, a za periode su općenito vrlo različiti. To znači da su gornje relacije za valne periode prilično neodređene.

4.5.1.2.2.2 Lokalne kratkoročne prognoze reprezentativnih parametara valnog profila iz instrumentalnih registracija valova

Podaci za definiranje parametara valnog profila dobiju se iz analognog (kod starijih valografa) ili digitalnog (kod novijeg tipa valografa) valnog zapisa (Sl. 4.2.2::2), a smjer valova se procjenjuje iz pridruženog anemografa. Rezultat obrade jednog valnog zapisa su reprezentativni valni parametri: (najčešće) značajna valna visina H_s i značajni valni period T_s . Oni se dobiju izračunom, iz parametara valnog profila pojedinačnih valova u jednom valnom zapisu, prema statističkim definicijama. Obrada parametara valnog profila pojedinačnih valova iz analognog valnog zapisa (metodom uzlaznog, ili silaznog presijecanja nule) i izračun reprezentativnih valnih parametara prema statističkim definicijama u početku se radila mukotrpno "ručno". Potom je uvedena kratka i teitijski utemeljena metoda za ručnu obradu valnih zapisa razvijena od Tuckera 1963. [10] prezentirana u [11] gdje se nalazi i praktični

tuckerov duijagram. Vidi detaljno u Pršić [29]. Danas se obrada analognog valnog zapisa vrši digitalnim analizatorom (digitajzerom) s papirnate valografske trake čime se napravi digitalni zapis, koji se kao i kod digitalnog valografa, obradi računalom prema statističkim definicijama.

4.5.1.2.3 LOKALNE KRATKOROČNE PROGNOZE VALNIH SPEKTARA IZ PODATAKA O VALOVIMA ILI VJETRU

Mogu se vršiti unazad ili za sadašnjost ako postoje registracije valova ili vjetra na nekoj točki, odnosno za budućnost ako se takovi podaci predvide. Rezultat prognoze je valni spektar. Termin valni spektar je u praksi sinonim za *lokalni neusmjereni (jednodimenzionalni) jednostrani frekventni spektar pomaka (izdizanja) fizičke površine mora*. Dade se matematički prezentirati istoimenom funkcijom autospektralne gustoće u tabelarnom, grafičkom ili analitičkom vidu.

Ako se raspolaže valnim zapisom može se spektralnom analizom izračunati konkretan *empirijski spektar* (Sl. 4.5.1.2.3.1::1), a ako se raspolaže reprezentativnim valnim parametrima ili podacima o vjetru tada se stanje mora može približno predstaviti *teorijskim spektrom* u općenitoj matematičkoj formi.

4.5.1.2.3.1 Određivanje empirijskog spektra iz valnog zapisa

Ako se na nekoj točki načini 10 minutni valni zapis, bez obzira na smjer širenja, može se spektralnom analizom dobiti valni spektar. Za to su, povijesno gledano, razvijene tri matematičke tehnike:

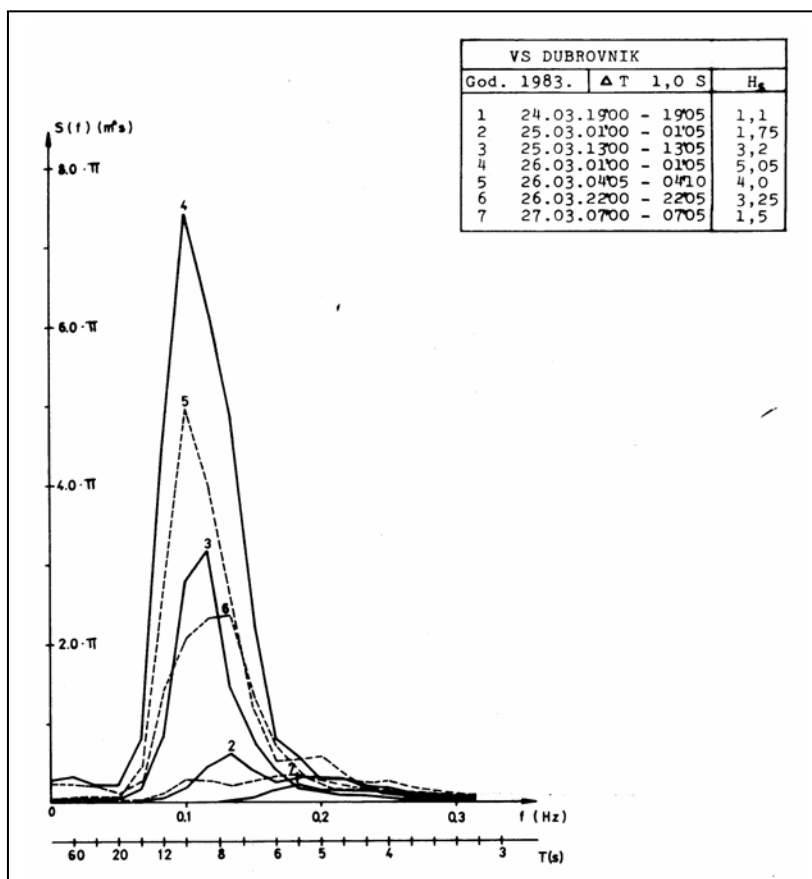
- direktna fourierova transformacija,
- indirektna metoda preko autokorelacijske funkcije i
- brza fourierova transformacija (FFT).

Sve tri su numeričke metode, a rezultat imje graf empirijskog valnog spektra kao na Sl. 4.5.1.2.3.1::1. Kao što se vidi iz slike cijela meteorološka situacija se može pratiti nizom valnih zapisa i njihovom transformacijom u empirijske spektre.

4.5.1.2.3.2 Prognoziranje spektra iz podataka o vjetru ili valovima

Često puta se ne raspolaže valnim zapisima iz kojih se mogu izvesti realni spektri, te ih je potrebno prognozirati iz podataka o vjetru i valovima. S druge strane u proračunima konstrukcija pogodno je, umjesto empirijskih spektara u vidu grafa,

Sl. 4.5.1.2.3.1::1 Empirijski valni spektri ispred Dubrovnika za situaciju 24. do 27.03. 1983.



raspolagati analitičkim izrazom za funkciju spektralne gustoće. Obavljajući ove potrebe zadovoljavaju teorijski spektri. Njihovi analitički izrazi su poluempirijskog karaktera. Osnovna forma im je dobivena teorijskim putem, a numeričke koeficijente određivali su razni autori prilagodbom osnovnog zakona na veliki broj empirijskih podataka. Vrijede samo za dubokovodno more. Ozirom na to koju fazu u razvitku valova prikazuju, spektri se mogu podijeliti na dvije grupe: spektre potpuno razvijenog mora i spektre nepotpuno razvijenog mora. Prvu grupu karakterizira Pierson-Moskowitzov spektar [14], a drugu JONSWAP spektar [16]. **Spektar potpuno razvijenog mora** reprezentira takovo stanje mora kod kojega su privjetrište i trajanje vjetera dovoljno dugi da se ostvari najveći mogući transfer energije vjetera u valove; t.j. takav spektar ovise samo o brzini vjetera. Njemu su pridruženi najveći mogući valovi za neku brzinu vjetera. Opća matematička forma za taj tip spektra je dana jednadžbom:

$$S_{\eta\eta}(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^m} e^{-\beta \left(\frac{\omega_p}{\omega} \right)^n}$$

gdje je:

$S_{\eta\eta}(\omega)$ [m ² s/rad]	funkcija spektralne gustoće
ω [rad/s]	kutna frekvencija
ω_p [rad/s]	kutna frekvencija vrha spektra
$\alpha = 8,1 \cdot 10^{-3}$	Philipsova konstanta (parametar spektra)
$\beta = 5/4$	parametar spektra
$m = 5$	
$n = 4$	
$g = 9,81$ [m/s ²]	gravitacijska konstanta

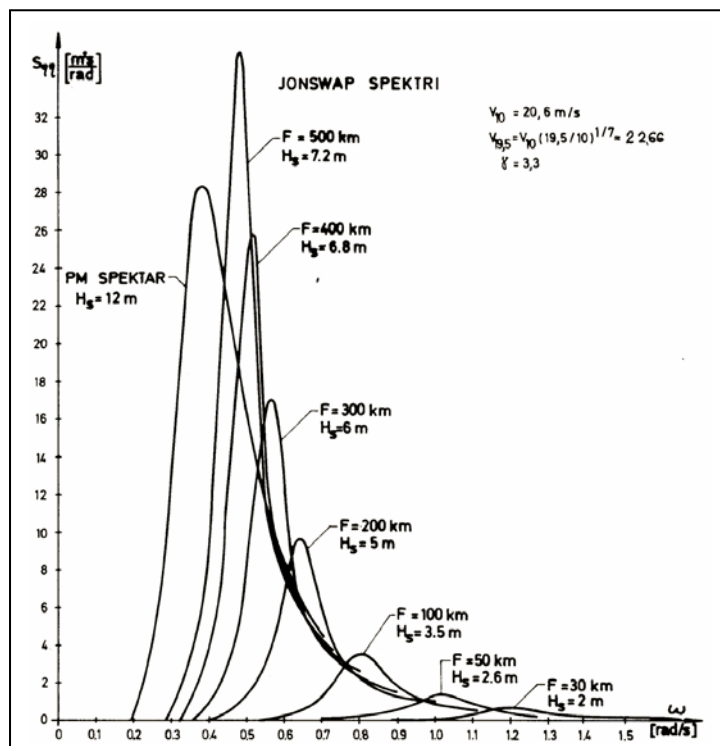
a konačan oblik *Pierson – Moskowitz-ovom* jednadžbom iz 1964 [14]:

$$S_{\eta\eta}(\omega) = \frac{8,1 \cdot 10^{-3} g^2}{\omega^5} e^{-\frac{5}{4} \left(\frac{0,8772 g/U}{\omega} \right)^4}$$

$\omega_p = 0,8772 g/U$ [rad/s] kutna frekvencija vrha spektra
 U [m/s] brzina vjetera 19,5 [m] iznad mirne razine mora

Sl. 4.5.1.2.3.2.:1 Komparacija PM valnog spektra od vjetera brzine 20,6 m/s s JONSWAP spektrom od vjetera iste brzine, ali ograničenog privjetrišta 30,50,100, 200, 300, 400 i 500 km

Spektre potpuno razvijenog mora razvijali su i drugi autori ili institucije kao na pr.: Darbyshire 1952., British Towing Tank Panel, Neuman 1953. i t.d. Drugi su autori, kao na pr.: Bretschneider 1953., International Ship Structure Conference 1964., International Towing Tank Conference -ITTC 1970. [15] i t.d., izveli spektre potpuno razvijenog mora u funkciji reprezentativnih valnih parametara za takovo stanje mora. Donja jednadžba je primjer takovog ITTC [15] spektra:



$$S_{\eta\eta}(\omega) = \frac{8,1 \cdot 10^{-3} g^2}{\omega^5} e^{-\frac{5}{4} \left(\frac{1,256 / \sqrt{H_s}}{\omega} \right)^4}$$

$\omega_p = 1,256 / \sqrt{H_s}$ [rad/s] kutna frekvencija
 H_s [m] značajna valna

vrha spektra
 visina

Spektar nepotpuno razvijenog mora opisuje takovo stanje mora kod kojega još nije ostvaren maksimalni mogući transfer energije s vjetra na valove uslijed ograničavajućeg djelovanja privjetrišta ili trajanja vjetra na valni generativni proces. Najpoznatiji je JONSWAP spektar [16], a u tu grupu pripadaju ITTC spektar za nepotpuno razvijeno more iz 1984. [21], Mitsiyasu spektar i Ochi-Hubble spektar s dva vrha za kombinaciju živog i mrtvog mora. Na Jadranu su takav spektar razvili Tabain [18] i Smirčić – Gačić [19], a autor ovog teksta posebno za jake bure, te posebno za jaka juga [20]. *JONSWAP spektar* [16] Sl. 4.5.1.2.3.2.:1 se izračunava iz podataka o vjetru, a ima općenitu formu:

$$S_{\eta\eta}(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} e^{-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega_p}{\omega} \right)^4} \cdot \gamma e^{-\left[\frac{(\omega - \omega_p)^2}{2\sigma^2 \omega_p^2} \right]}$$

gdje je:

$$\alpha = 0,076 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{-0,22} \quad \text{parametar spektra}$$

$$\beta = 5/4 \quad \text{parametar spektra}$$

$$\omega_p = 2 \cdot \pi \cdot 3,5 \frac{g}{U} \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{-0,33} \quad [\text{rad/s}] \quad \text{kutna frekvencija vrha spektra}$$

$$\gamma = 1 \text{ do } 7 \quad \text{mjera povišenja vrha spektra: } \gamma=1 \text{ za PM spektar, } \gamma=3,3 \text{ srednja JONSWAP vrijednost, } \gamma=7 \text{ za vrlo šiljate spektre}$$

$$\sigma \begin{cases} \sigma_a = 0,07 \text{ za } \omega \leq \omega_p \\ \sigma_b = 0,09 \text{ za } \omega > \omega_p \end{cases} \quad \text{mjera širine spektra lijevo i desno od vrha}$$

F [m]

privjetrište

U [m/s]

brzina vjetra 10[m] iznad mirne razine mora

Prema JONSWAP istraživanju duljina privjetrišta F je ograničavajući faktor koji ne dopušta razvirak vjetrovnih valova do potpuno razvijenog mora u slučaju ako je $F[\text{m}] \leq 2,32 \cdot 10^4 (U^2/g)$; t.j. stanje mora je definirano brzinom vjetra i duljinom privjetrišta, i može se opisati JONSWAP spektrom prema gornjoj jednadžbi. Trajanje vjetra t je ograničavajući faktor u slučaju ako je $t[\text{s}] \leq 63,8 \leq (g/U) \cdot (gF/U^2)^{0,7}$; t.j. stanje mora je u funkciji brzine i trajanja vjetra, i može se opisati JONSWAP spektrom prema gornjoj jednadžbi s time da su njeni promjenljivi parametar α i frekvencija vrha spektra ω_p definirani preko brzine i trajanja vjetra:

$$\alpha = 0,183 \left(\frac{gt}{U} \right)^{-0,286} \quad \text{parametar spektra}$$

$$\omega_p = 2 \cdot \pi \cdot 16,8 \frac{g}{U} \left(\frac{gt}{U} \right)^{-\frac{3}{7}} \quad [\text{rad/s}] \quad \text{kutna frekvencija vrha spektra}$$

Moguće je prognozirati valni spektar nepotpuno razvijenog mora i nabazi podataka o valovima H_s i $\bar{T}_0$. Takav je ITTC spektar iz 1984 [21]. No ako se promatraju samo viša stanja mora, kod kojih je disperzija valnih perioda nešto manja nego kod niskih, moguće je dosta dobro definirati spektar samo s jednim podatkom t.j. sa značajnom valnom visinom H_s . Tako se na primjer valni spektri bure i juga za valove reprezentirane značajnom valnom visinom $H_s \leq 2,5\text{m}$ dadu opisati gore navedenim općim JONSWAP izrazom. Vrijednosti konstanti i promjenjivih parametara tog izraza su prema [20] dani u Tab. 4.5.1.2.3.2.:l.

OZNAKA	BURA	JUGO	UVJET PRIMJENE
β	5/4	5/4	
γ	2,2	1,7	
σ_a	0,08	0,08	$\forall \omega < \omega_p$
σ_b	0,1	0,1	$\forall \omega \geq \omega_p$
α	$0,0026 H_s^2 \omega_p^4$	$0,00275 H_s^2 \omega_p^4$	$\forall \omega_p < 1,1 \text{ rad/s}$
ω_p	$\frac{2\pi}{6,4 (\ln H_s)^{0,55}}$	$\frac{2\pi}{7,4 (\ln H_s)^{0,5}}$	$\forall H_s > 2,5 \text{ m}$

Tab. 4.5.1.2.3.2.:l Konstante i promjenljivi parametri jadranskog spektra visokih stanja mora bure i juga prema [20] (oznake kao kod općeg JONSWAP izraza)

4.5.1.3 REGIONALNE KRATKOROČNE PROGNOZE VJETROVNIH VALOVA

Pripadaju u treću generaciju valnih prognoza koje su se počele razvijati nakon pojave prvog takozvanog WAM modela 1988. prezentiranog u članku [22] i kasnijim člancima [23, 24, 25, 26 27]. Ovaj tip prognoze predstavlja vezu prognostičkih modela za valove i atmosferskih modela, a daje kvantitativne rezultate. Razvijen je od t. zv. Wava Modelling Group-e europskih valnih modelara sredinom '80-tih, a potpuno operativan postao je 1992. Model iz sinoptičke vremenske situacije na nekom rasteru geografskih točaka (na pr. 50×50 km za Mediteran) izračunava stanje mora (reprezentativne valne parametre). No WAM se isto može načiniti i za prognostičku sinoptičku vremensku situaciju (za 1 do n dana). Tako izračunata stanja mora potvrđena su satelitskim snimkama. Danas je u upotrebi 4. generacijam WAM modela. WAM model pripada u vremenske valne prognoze.

4.5.1.4 LOKALNE DUGOROČNE PROGNOZE VJETROVNIH VALOVA

Takove prognoze rade se za razdoblja od 1 godine do 1 stoljeća, i to tako da se veličinama reprezentativnih valnih parametara pridruži vjerojatnost, ili povratno razdoblje u godinama. Za to je potrebno optimalno 30 godina opažanja, a minimalno 10 godina (za nuždu 5 godina). Pouzdana dugoročna prognoza je za povratno razdoble 3×dulje od razdoblja opažanja [EAU2004,128]. Obzirom na tako duga razdoblja logično je da valovlje kroz to vrijeme nije stacionaran proces. No u koliko se razdoblje razdjeli u niz dovoljno kratkih odsječaka valni proces će biti skup stacionarnih stanja mora. Tada će reprezentativni parametri za opis valovlja, na pr. H_s i T_s iz velikog broja kratkoročnih stacionarnih stanja mora, određeni kratkoročnim prognozama iz

mjerenja valova ili vjetra, formirati nizove statistički nezavisnih valnih podataka. Takvi nizovi su u stvari uzorci odgovarajućih slučajnih varijabli - značajne valne visine $\hat{H}_s$ i - značajnog valnog perioda $\hat{T}_s$ koje imaju svoje raspodjele vjerojatnosti. Općenito postoje dva matematička načina prikazivanja raspodjele reprezentativnih valnih parametara za duga razdoblja:

- *jednodimenzionalnom* raspodjelom za jednu slučajnu varijablu, najčešće $\hat{H}_s$, ali ponekad i $\hat{T}_s$ i
- *dvodimenzionalnom* raspodjelom za istovremenu pojavu slučajnih varijabli $\hat{H}_s$ i $\hat{T}_s$

Kod istovremenog promatranja značajne valne visine i značajnog valnog perioda; t.j. slučajnog vektora $(\hat{H}_s, \hat{T}_s)$ iskustvom u inženjerskoj praksi, došlo se do zaključka da se takva raspodjela može dobro predstaviti dvodimenzionalnom Log-normalnom, ili Weibullovom funkcijom raspodjele vjerojatnosti. Ako se promatra po jedna slučajna varijabla, značajna valna visina $\hat{H}_s$ se daje opisati Log-normalnom, Gumbelovom, Frechetovom ili Weibullovom funkcijom raspodjele vjerojatnosti, dok se valni period daje opisati Log-normalnom funkcijom raspodjele. U nastavku će se prikazati samo jednodimenzionalne raspodjele za značajne valne visine!

Ako se raspolaze uzorkom iz dugog niza godina, neke od rečenih slučajnih varijabli $\hat{H}_s$ i $\hat{T}_s$, tada se može odrediti “*dugoročna jednodimenzionalna raspodjela vjerojatnosti*”. Tako se na primjer iz cjelokupnog uzorka s razdobljem opažanja dužine 10 godina, po kriteriju prekoračenja nekog visokog praga, formira uzorak smanjenog opsega i temeljem njega određuje empirijska a potom i teorijska dugoročna raspodjela vjerojatnosti bilo slučajne varijable $\hat{H}_s$ bilo $\hat{T}_s$. Uzorak formiran po kriteriju prekoračenja praga naziva se i “*niz prekoračenja*” kao u Primjeru 4.5.1.4.:1. Ako se raspolaze uzorkom iz 30-godišnjeg opažanja neke od rečenih slučajnih varijabli $\hat{H}_s$ i $\hat{T}_s$, tada se može odrediti “*jednodimenzionalna raspodjela vjerojatnosti ekstrema*”. Tako se na primjer iz cjelokupnog uzorka s razdobljem opažanja dužine 30 godina izdvoje godišnji ekstremi i formira uzorak manjeg opsega. Temeljem njega određuje se empirijska, a potom i teorijska raspodjela vjerojatnosti ekstrema. Uzorak formiran po kriteriju godišnjih ekstrema se naziva i “*niz maksimuma*”. No, kod ovakve datoteke može se formirati i niz prekoračenja. Svaki od ta dva tipa uzorka s pripadajućom jednodimenzionalnom raspodjelom vjerojatnosti omogućava proračun reprezentativnih valnih parametara (na pr. H_s^{PR} ili T_s^{PR}) male vjerojatnosti (vrlo rijetkog pojavljivanja), odnosno dugog povratnog razdoblja $PR=1.....100$ godina. Ipak najčešće se prognoziraju ekstremne značajne valne visine, a kvalitetnija je prognoza temeljem raspodjele vjerojatnosti ekstrema iz 30-godišnjeg opažanja. Postupak proračuna je istovjetan i za dugoročnu raspodjelu (Long-Term Distribution, opažanje 10god.) i za raspodjelu ekstrema (Extrema Value Distribution, opažanje 30god.). Najprije se iz uzorka ustanovi *empirijska raspodjela vjerojatnosti*. Za to je potrebno uzorak poredati po opadanju i proračunati vjerojatnosti premašenja po jednoj od kompromisnih formula, na pr. po Hazenovoj: $P(H_{s,i}) = P(\hat{H}_s \geq H_{s,i}) = \frac{2 \cdot F_i - 1}{2 \cdot n}$. Pri tome je:

$\hat{H}_s$	slučajna varijabla značajne valne visine
$H_{s,i} [m]$	i-ta vrijednost slučajne varijable značajne valne visine $\hat{H}_s$ u uzorku složenom po opadanju
n	opseg uzorka; tj. broj podataka (vrijednosti $H_{s,i}$ u uzorku slučajne varijable značajne valne visine $\hat{H}_s$ za proračun raspodjele
$i=1.....n$	redni broj razmatrane vrijednosti $H_{s,i}$ slučajne varijable značajne valne visine u uzorku slučajne varijable značajne valne visine $\hat{H}_s$ složenom po opadanju
f_i	apsolutna učestalost i-te vrijednosti slučajne varijable značajne valne visine $\hat{H}_s$; tj. broj ponavljanja značajnih valnih visina $H_{s,i}$ u uzorku opsega n
$F_i = \sum_{j=1}^i f_j$	zbirna apsolutna učestalost i-te vrijednosti slučajne varijable značajne valne visine $\hat{H}_s$; tj. broj značajnih valnih visina $H_{s,i}$ iz uzorka slučajne varijable značajne valne visine $\hat{H}_s$ koje dostižu ili premašuju vrijednost $H_{s,i}$
$P(\hat{H}_s \geq H_{s,i}) \equiv P(H_{s,i})$	vjerojatnost premašenja i-te vrijednosti $H_{s,i}$ slučajne varijable značajne valne visine $\hat{H}_s$
$P(\hat{H}_s \geq H_s) \equiv P(H_s)$	teorijska funkcija raspodjele vjerojatnosti slučajne varijable značajne valne visine $\hat{H}_s$

Potom se parovi $[H_{s,i}; P(\hat{H}_s \geq H_{s,i})]$ stavljaju se u koordinatni sustav $H_s; P(\hat{H}_s \geq H_s)$ što predstavlja empirijsku raspodjelu vjerojatnosti slučajne varijable značajne valne visine $\hat{H}_s$ u vidu "oblaka" točaka (Sl. 4.5.1.4::1). Na abscisi su vrijednosti značajne valne visine H_s , a na ordinati vjerojatnosti premašenja $P(\hat{H}_s \geq H_{s,i})$. Ako se na skup parova $[H_{s,i}; P(\hat{H}_s \geq H_{s,i})]$ prikazan točkama u koordinatnom sustavu; t.j. na empirijsku raspodjelu prilagodi krivulja dobije se teorijska funkcija raspodjele vjerojatnosti $P(\hat{H}_s \geq H_s) \equiv P(H_s)$ slučajne varijable značajne valne visine $\hat{H}_s$ (Sl. 4.5.1.4::1a). Vjerojatnost dostizanja ili premašenja bilo koje vrijednosti $H_{s,i}$ slučajne varijable značajne valne visine $\hat{H}_s$, pa i one

veoma velike i rijetke koja nikad nije izmjerena, može se odrediti grafičkim ili numeričkim putem produljenjem teorijske funkcije raspodjele vjerojatnosti u područje izvan izmjerenih vrijednosti. Dok je to određivanje prilično pouzdano u području raspoloživih podataka (točaka empirijske raspodjele) dotle je nepouzdan u području produljenja krivulje izvan područja podataka. To stoga jer prilagodba krivulje na skup točaka nije jednoznačna. Naime, na jedan skup točaka može se dobro prilagoditi više tipova krivulja čija se njihova produljenja (ekstrapolacije) izvan područja raspoloživih podataka neće poklapati. Problem se rješava transformacijom skale osi apscisa s H_s na $\ln H_s$ tako da se funkcija raspodjele vjerojatnosti poravna na pravac. Tada će se empirijska funkcija raspodjele vjerojatnosti; tj. skup parova $[H_{s,i}; P(\hat{H}_s \geq H_{s,i})]$ prikazan "oblakom" točaka u koordinatnom sustavu, prilagoditi pravac i teorijska funkcija raspodjele vjerojatnosti slučajne varijable značajne valne visine $\hat{H}_s$ bit će jednoznačno određena (Sl. 4.5.1.4::1b). Način određivanja teorijske funkcije raspodjele prikazat će se u Primjeru 4.5.1.4 Dugoročna prognoza.

Kad je jednom poznata teorijska funkcija raspodjele vjerojatnosti $P(\hat{H}_s \geq H_s) \equiv P(H_s)$ (pravac) povratno razdoblje bilo koje vrijednosti slučajne varijable značajne valne visine $H_{s,i}$, pa i one veoma velike i rijetke koja nikad nije izmjerena, može se odrediti prema izrazu

$$PR[\text{god}] = \frac{T_{\text{REG}}}{n} \cdot \frac{1}{P(\hat{H}_s \geq H_{s,i})},$$

jer je na raspolaganju teorijska funkcija raspodjele vjerojatnosti $P(\hat{H}_s \geq H_s)$ slučajne varijable značajne valne visine $\hat{H}_s$ preko koje se vrijednosti $H_{s,i}$ dade pridružiti vjerojatnost njenog dostizanja ili premašenja $P(\hat{H}_s \geq H_{s,i}) \equiv P(H_{s,i})$.

Pritom je:

T_{REG} [god] razdoblje besprekidnog opažanja (ili mjerenja) vrijednosti značajne valne visine iz kojeg je dobiven uzorak,

PR [god] povratno razdoblje; tj broj godina u kome razmatrana vrijednost značajne valne visine $H_{s,i}$ može biti 1 puta dostignuta ili premašena.

Češća je zadaća odrediti značajnu valnu visinu H_s^{PR} nekog povratnog razdoblja od PR godina. Određuje se tako da se izračuna vjerojatnost koja je pridružena toj valnoj visini

$$P(\hat{H}_s \geq H_s^{\text{PR}}) = \frac{T_{\text{REG}}}{n} \cdot \frac{1}{PR}$$

H_s^{PR} [m] značajna valna visina povratnog razdoblja od PR godina

i potom se na grafu teorijske funkcije raspodjele vjerojatnosti $P(\hat{H}_s \geq H_s)$ za vjerojatnost

$P(\hat{H}_s \geq H_s^{\text{PR}})$ preslikavanjem odredi značajna valna visina H_s^{PR} (Sl. 4.5.1.4::1b).

Primjer 4.5.1.4.:1 Dugoročna prognoza značajnih valnih visina **OBAVEZNO ZA ISPIT****Zadatak:**

Iz trogodišnjih podataka o značajnim valnim visinama, na bazi mjerenja valografom, formiran je uzorak s pragom na 1,8 m (Tablica 4.5.1.4.:1). Treba načiniti dugoročnu "L-N" raspodjelu vjerojatnosti značajnih valnih visina i izračunati značajne valne visine 100, 50, 20 i 10-godišnjeg povratnog razdoblja.

Rješenje:*a) Uređivanje uzorka i empirijska raspodjela vjerojatnosti*

Ukupan broj podataka kroz vrijeme opažanja $T_{REG}=3$ [god] iznosi $n'=3 \times 365 \times 8=8760$. Uzorak je formiran od onih značajnih valnih visina koje prelaze prag od $H_s^{prag} \geq 1,8$ [m], a takvih je $n=3108$. Njihovim uređenjem kao u Tablici 4.5.1.4.:1 dobije se empirijska raspodjela vjerojatnosti značajne valne visine.

Razred i	Razred valnih visina $_{gor}H_S - _{donje}H_S$ [m]	Srednja valna visina H_{Si} [m]	Apsolutna učestalost f_i	Zbirna apsolutna učestalost $F_i = \sum_{j=1}^i f_j$	Vjerojatnost premašenja $P(\hat{H}_S \geq H_{Si}) = (2F_i - 1)/2n$
1	9,60-9,01	9,3	6	6	0,00177
2	9,00-8,41	8,7	12	18	0,00563
3	8,40-7,81	8,1	6	24	0,00756
4	7,80-7,21	7,5	24	48	0,01528
5	7,20-6,61	6,9	36	84	0,02687
6	6,60-6,01	6,3	30	114	0,03652
7	6,00-5,41	5,7	72	186	0,05968
8	5,40-4,81	5,1	138	324	0,10409
9	4,80-4,21	4,5	210	534	0,17165
10	4,20-3,61	3,9	396	930	0,29907
11	3,60-3,01	3,3	480	1410	0,45351
12	3,00-2,41	2,7	738	2148	0,69096
13	2,40-1,80	2,1	960	3108	0,99984
$n =$			3108		

Tablica 4.5.1.4.:1 Uređeni uzorak značajnih valnih visina iz trogodišnjeg opažanja koji prelaze prag od 1,8 m s empirijskom raspodjelom vjerojatnosti

Vjerojatnost dostizanja ili premašenja neke valne visine računata je pritom u tablici 4.5.1.4.:1 kao *Hazen-ova kompromisna vjerojatnost*:

$$P(\hat{H}_S \geq H_{S,i}) = \frac{2F_i - 1}{2n} ;$$

gdje je :

$\hat{H}_S$ - slučajna varijabla značajne valne visine

$H_{S,i}$ - i-ta vrijednost slučajne varijable [m]

$F_i = \sum_{j=1}^i f_j$ - zbirna apsolutna učestalost i-te vrijednosti slučajne varijable $\hat{H}_S$

f_i - apsolutna učestalost i-te vrijednosti slučajne varijable $\hat{H}_S$

Za prvi i drugi razred Tablice 4.5.1.4.:I kompromisne vjerojatnosti su :

$$P(\hat{H}_S \geq 9,3) = \frac{2 \cdot 6 - 1}{2 \cdot 3108} = 0,00177$$

$$P(\hat{H}_S \geq 8,7) = \frac{2 \cdot 18 - 1}{2 \cdot 3108} = 0,00563$$

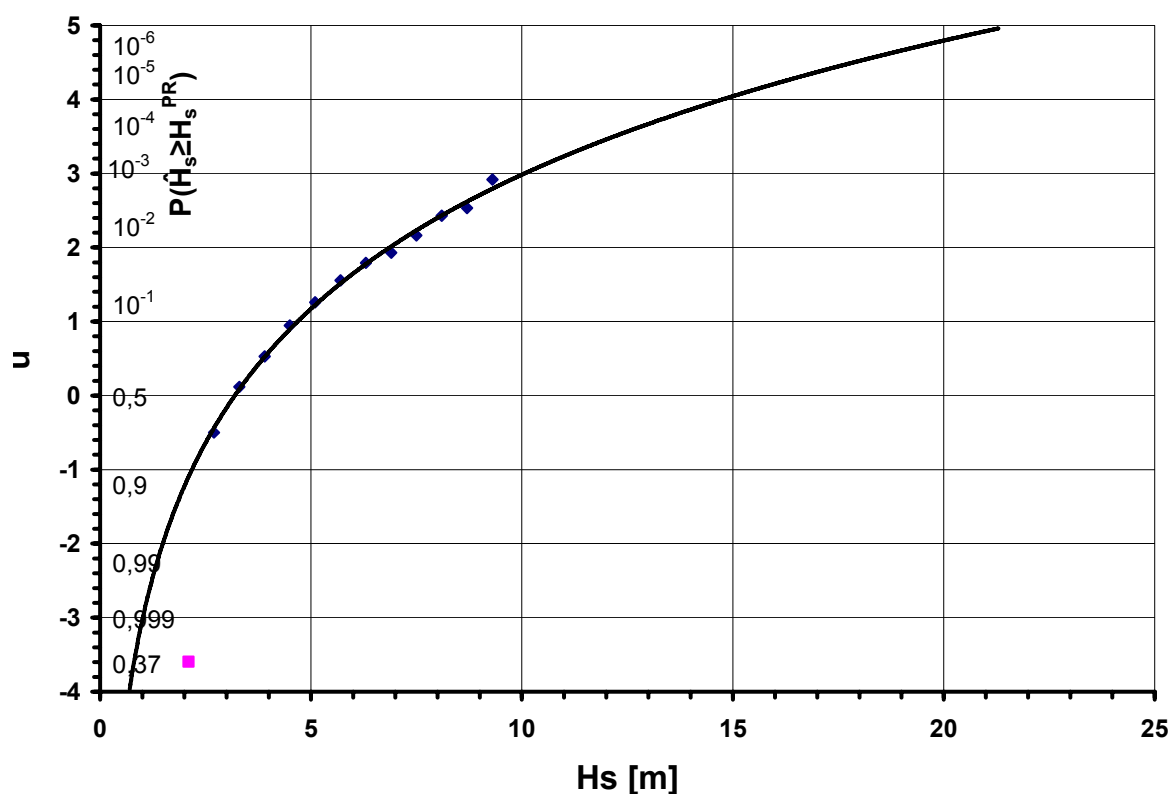
b) *Prilagodba teorijske aspodjele vjerojatnosti na empirijsku pravcem pomoću metode najmanjih kvadrata*

Polazi se od iskustvene činjenice da se raspodjela vjerojatnosti slučajne varijable $\hat{H}_S$ ravna prema Normalnom ili Gaussovom zakonu raspodjele vjerojatnosti. Na temelju proračunatih vjerojatnosti iz Tablice 4.5.1.4.:I na Sl. 4.5.1.4.:1a prikazani su parovi $[H_{S,i}; P(\hat{H}_S \geq H_{S,i})]$ u vidu "oblaka" točaka i prilagodbe tih točaka krivuljom u koordinatnom sustavu $H_{S,i}; P(\hat{H}_S \geq H_{S,i})$. Parovi $[H_{S,i}; P(\hat{H}_S \geq H_{S,i})]$ predstavljaju empirijsku raspodjelu vjerojatnosti slučajne varijable značajne valne visine $\hat{H}_S$.

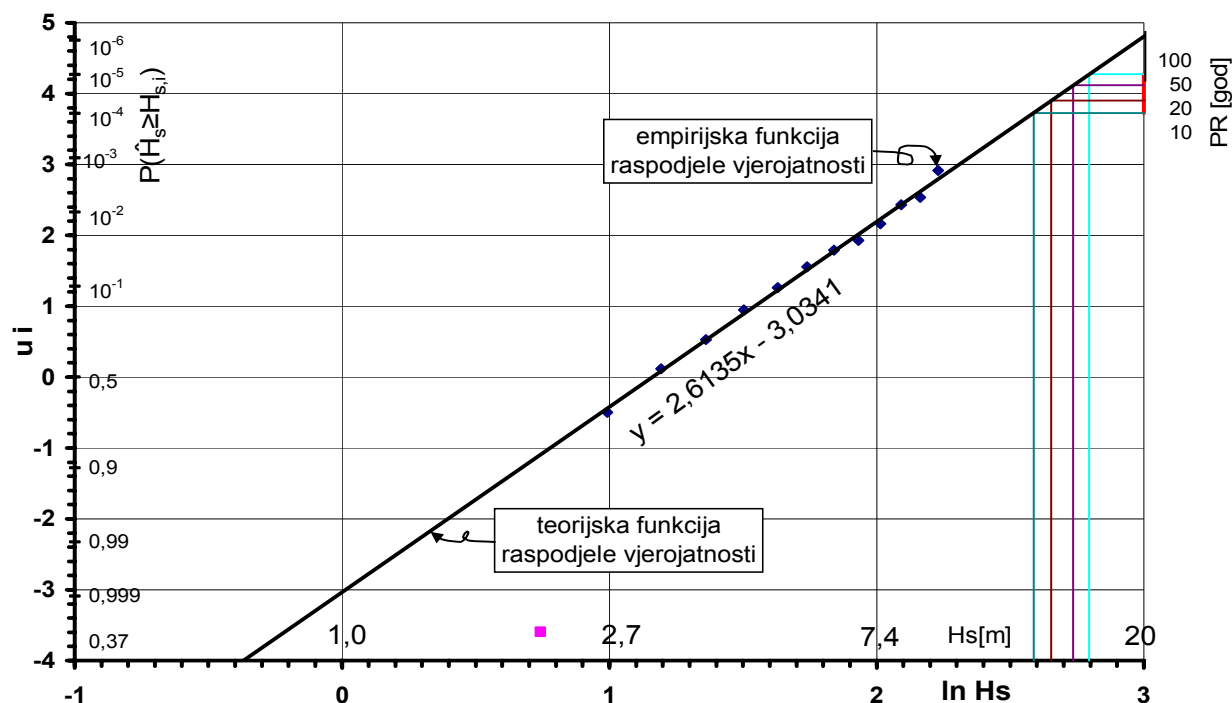
Prilagodba dugoročne raspodjele vjerovatnosti krivuljom u praksi nije prihvatljiva pošto nije moguće jednoznačno ekstrapolirati krivulju izvan područja podataka ("oblaka točaka"). Problem se rješava korištenjem Log-Normalnog (L-N) zakona raspodjele u kojem se raspodjela vjerojatnosti slučajne varijable značajne valne visine $\hat{H}_S$ ravna po pravcu (Sl. 4.5.1.4.:1b). Kod L-N raspodjele, umjesto s prirodnim vrijednostima $H_{S,i}$ slučajne varijable $\hat{H}_S$ barata se logaritmima vrijednosti $\ln H_{S,i}$. Za ovakav grafički prikaz zakona raspodjele promatrane slučajne varijable $\hat{H}_S$ pravcem, koriste se gotovi Log-Normalni papiri vjerojatnosti kao na Sl. 4.5.1.4.:1b s kalibriranim koordinatnim osima $\ln H_{S,i}$ i $P(\hat{H}_S \geq H_{S,i})$. U takvom koordinatnom sustavu prvo se nacrtava empirijska raspodjela vjerojatnosti iz Tablice 4.5.1.4.:I; t.j. "oblak točaka".

Potom se na empirijsku raspodjelu vjerojatnosti (pomoću jedne od četiri poznate metode prilagodbe: najmanjih kvadrata, najveće vjerodostojnosti, metoda momenata ili od oka) prilagodi pravac regresije koji predstavlja L-N zakon raspodjele vjerojatnosti promatrane slučajne varijable $\hat{H}_S$.

a) Normalna (Gaussova)



b) Log-normalna (Galtonova)



Slika 4.5.1.4::1

Dugoročna raspodjela značajnih valnih visina. Najdonja točka empirijske raspodjele $\blacksquare(2,1 ; 0,99984)$ ispuštena je kod prilagodbe pravca na "oblak točaka", jer ne doprinosi definiranju pravca u području ekstremnih vrijednosti

Taj se pravac može jednoznačno ekstrapolirati izvan područja podataka ("oblaka točaka"), pa i u područje malih vjerojatnosti; odnosno velikih valnih visina koje u raspoloživom uzorku vrijednost slučajne varijable - H_{si} nisu niti registrirane. Na slici Sl. 4.5.1.4::1b pravac je prilagođen metodom najmanjih kvadrata.

c) *Proračun značajne valne visine nekog povratnog razdoblja $\equiv$ dugoročna prognoza značajne valne visine*

Kod određivanja valne visine 100, 50, 20, 10-godišnjeg povratnog razdoblja PR [god.] prvo treba izračunati vjerojatnosti koje pripadaju tim povratnim razdobljima uz pomoć izraza:

$$P(\hat{H}_S \geq H_S^{PR}) = \frac{T_{REG}[\text{god}]}{n} \cdot \frac{1}{PR[\text{god}]} \quad \text{gdje je:}$$

H_S^{PR} [m] značajna valna visina povratnog razdoblja od PR godina.

Tada vrijede slijedeće relacije:

za $PR=100$ [god]	$P(\hat{H}_S \geq H_S^{100g}) = \frac{3}{3108} \cdot \frac{1}{100} = 9,65 \cdot 10^{-6} \sim 1 \cdot 10^{-5}$
za $PR=50$ [god]	$P(\hat{H}_S \geq H_S^{50g}) = \frac{3}{3108} \cdot \frac{1}{50} = 1,93 \cdot 10^{-5} \sim 2 \cdot 10^{-5}$
za $PR=20$ [god]	$P(\hat{H}_S \geq H_S^{20g}) = \frac{3}{3108} \cdot \frac{1}{20} = 4,83 \cdot 10^{-5} \sim 5 \cdot 10^{-5}$
za $PR=10$ [god]	$P(\hat{H}_S \geq H_S^{10g}) = \frac{3}{3108} \cdot \frac{1}{10} = 9,65 \cdot 10^{-5} \sim 1 \cdot 10^{-4}$

pomoću kojih se na Sl. 4.5.1.4::1 b može nacrtati pomoćna ordinatna skala povratnih razdoblja PR [god]. Nakon toga jednostavnim preslikavanjem preko pravca na Sl. 4.5.1.4::1b (zakona raspodjele vjerojatnosti $\hat{H}_S$) dobiju se:

za $PR=100$ [god].....	$H_S^{100g} = 16,3$ [m]
za $PR=50$ [god].....	$H_S^{50g} = 15,3$ [m]
za $PR=20$ [god].....	$H_S^{20g} = 14,2$ [m]
za $PR=10$ [god].....	$H_S^{10g} = 13,8$ [m]

d) *Konstrukcija Log-normalnog zakona raspodjele vjerojatnosti značajne valne visine $\hat{H}_S$ metodom momenata*

Log-Normalni zakon dugoročne raspodjele vjerojatnosti značajne valne visine $\hat{H}_S$ može se u linearnoj formi, osim metodom najmanjih kvadrata, konstruirati i metodom momenata. Polazi se od izraza za funkciju gustoće vjerojatnosti slučajne varijable $\ln \hat{H}_S$ koji glasi:

$$p(\ln H_S) = \frac{1}{\sigma_{\ln H_S} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln H_S - \overline{\ln H_S}}{\sigma_{\ln H_S}} \right)^2}$$

Funkcija raspodjele vjerojatnosti tada je:

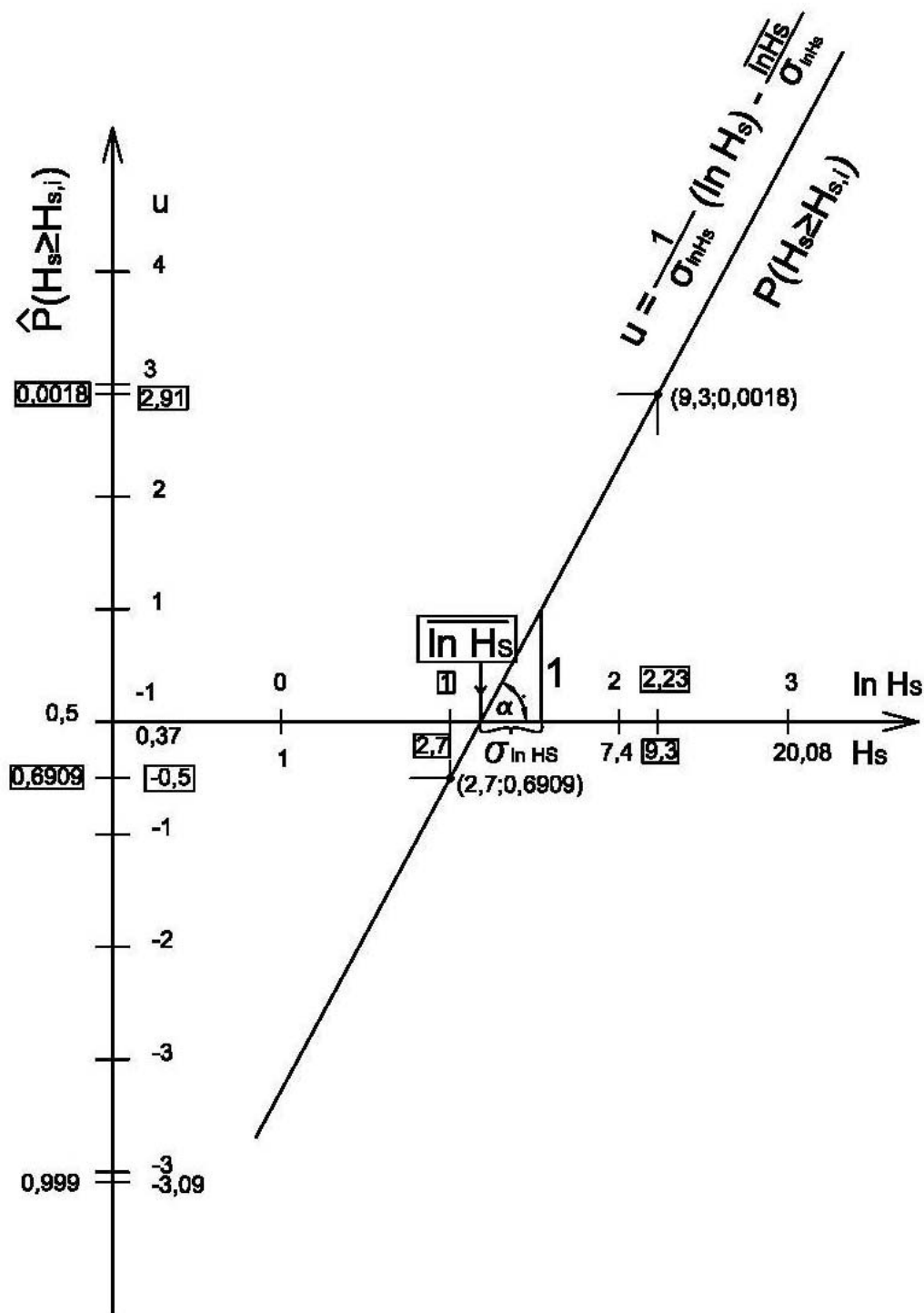
$$P(\ln \hat{H}_S \geq \ln H_S) = \int_{\ln H_S}^{+\infty} \frac{1}{\sigma_{\ln H_S} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln H_S - \overline{\ln H_S}}{\sigma_{\ln H_S}} \right)^2} d(\ln H_S) = \int_{\ln H_S}^{+\infty} \frac{1}{H_S \sigma_{\ln H_S} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln H_S - \overline{\ln H_S}}{\sigma_{\ln H_S}} \right)^2} dH_S =$$

$$= 0,5 - \int_0^{\ln H_S} \frac{1}{\sigma_{\ln H_S} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln H_S - \overline{\ln H_S}}{\sigma_{\ln H_S}} \right)^2} dH_S = P(\hat{H}_S \geq H_S) = P(H_S)$$

Ako se u zadnji izraz uvede supstitucija $u = \frac{\ln H_S - \overline{\ln H_S}}{\sigma_{\ln H_S}} = \frac{1}{\sigma_{\ln H_S}} (\ln H_S) - \frac{\overline{\ln H_S}}{\sigma_{\ln H_S}} = u(\ln H_S)$ dobije se normirana

Gaussova funkciju raspodjele vjerojatnosti $N[0,1]$ slučajne varijable " $\hat{H}_S$ ":

$$P(H_S) = P(\hat{H}_S \geq H_S) = 0,5 - \int_0^{\ln H_S} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} u^2} du$$



Sl. 4.5.1.4.:2 Konstrukcija log-normalnog zakona vjerojatnosti u linearnoj formi metodom momenata

Izraz $u(\ln H_S)$ je u stvari jednadžba pravca u koordinatnom sustavu " $\ln H_S; u$ ". Sjecište pravca s osi $\ln H_S$ dobije se za $u=0$ što daje: $\ln H_S = \overline{\ln H_S}$. Nagib tog pravca je $\tan \alpha = 1/\sigma_{\ln H_S}$ (Sl. 4.5.1.4.:2). Pravac predstavlja vezu logaritamske skale " $\ln H_S$ " i linearne skale " u ". No ako se za vrijednosti " u " pomoću gornjeg izraza izračunaju vjerojatnosti $P(H_S)$ i pridruže vrijednostima " u " na ordinatnoj skali (Sl. 4.5.1.4.:2) dobije se veza između logaritamske skale " $\ln H_S$ " i nelinearne skale " $P(H_S)$ "; t.j. Log-Normalni zakon distribucije značajne valne visine " $\hat{H}_S$ " u formi pravca.

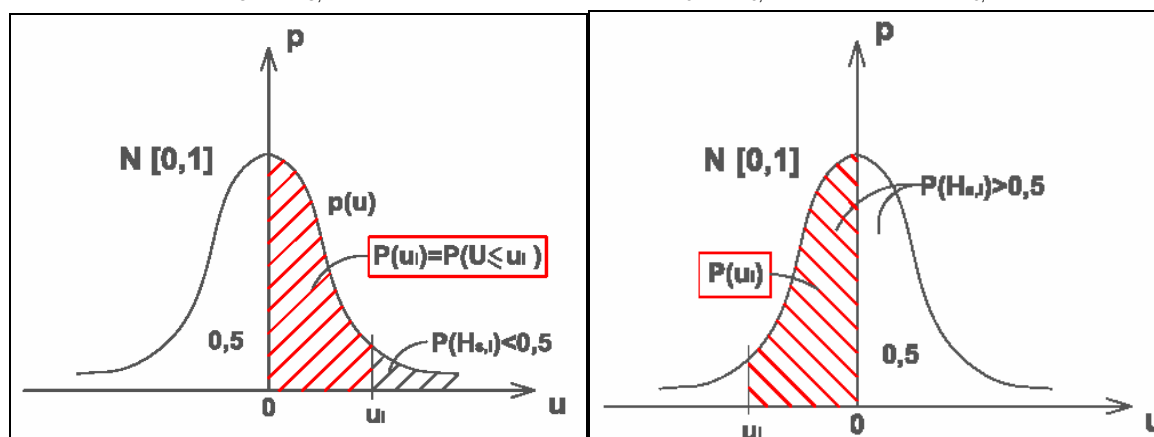
e) *Crtanje Log-Normalne empirijske raspodjele vjerojatnosti*

Empirijsku Log-Normalnu raspodjelu vjerojatnosti predstavlja već spomenut "oblak točaka" t.j. parova $[\ln H_{S,i}; P(\hat{H}_S \geq H_{S,i})]$. Prikazat će se na primjeru crtanja para (točke) $[H_{S,1}; P(\hat{H}_S \geq H_{S,1})] = [9,3; 0,00177]$. Problem je pri tom da ordinatna skala $P(\hat{H}_S \geq H_S)$ nije linearna nego se kalibrira integriranjem Gauss-ove funkcije gustoće vjerojatnosti. Rješenje je problema uvođenje transformirane slučajne varijable " U " s njezinim vrijednostima " u ". Ta slučajna varijabla ima, kao i slučajna varijabla $\hat{H}_S$, normalnu raspodjelu vjerojatnosti, ali normiranog oblika $N[0,1]$ koja je tabulirana u Gaussovima tablicama (Tablica 4.5.1.4.:III). Ako se linearne vrijednosti " u_i " nacrtaju na linearnoj ordinatnoj skali njima se mogu pridružiti nelinearne vrijednosti $P(H_{S,i}) = P(\hat{H}_S \geq H_{S,i})$ prema relacijama:

$$P(\hat{H}_S \geq H_{S,i}) = 0,5 - P(u_i) \rightarrow P(u_i) = 0,5 - P(\hat{H}_S \geq H_{S,i}); \quad \forall \quad P(H_{S,i}) < 0,5$$

$$P(u_i) = 0 \quad \forall \quad P(H_{S,i}) = 0,5$$

$$P(\hat{H}_S \geq H_{S,i}) = 0,5 + P(u_i) \rightarrow P(u_i) = P(\hat{H}_S \geq H_{S,i}) - 0,5; \quad \forall \quad P(H_{S,i}) > 0,5$$



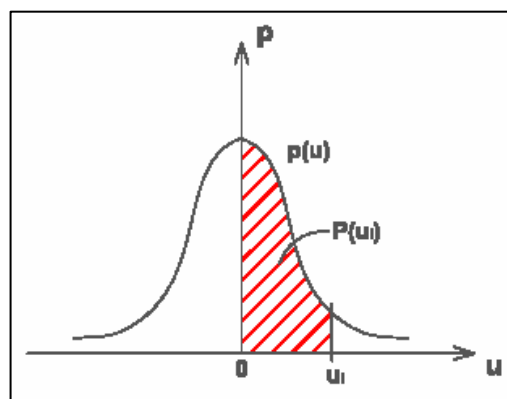
Sl. 4.5.1.4.:3 Definijske skica za gornje relacije

To se praktično provodi tako da se za željene vjerojatnosti premašenja $P(H_{S,i}) = P(\hat{H}_S \geq H_{S,i})$ prema gornjim izrazima izračunaju površine ispod Gaussove f.g.v. t.j. Gaussov integral $P(u_i)$. Kako je $P(H_{S,i})$ poznato iz empirijske raspodjele uzoraka razmatrane slučajne varijable $\hat{H}_S$ (Tablica: 4.5.1.4.:I), to je poznato i $P(u_i)$ iz gornjih formula. Sada se nađu tabulirane vrijednosti " u_i " u tablici Tab. 4.5.1.4.:III koje pripadaju tom gaussovom integralu

$$P(u_i) = \int_0^{u_i} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}u^2} du = \int_0^{u_i} p(u) du$$

kako je naznačeno na Sl. 4.5.1.4.:4.

Sl. 4.5.1.4.:4 Površina ispod Gaussovog integrala $P(u_i)$



Za konkretan slučaj $P(\hat{H}_S \geq H_{S,1}) = P(\hat{H}_S \geq 9,3) = 0,00177$ pa vrijedi :

$$P(u_1) = 0,5 - P(\hat{H}_S \geq H_{S,1}) = 0,5 - P(\hat{H}_S \geq 9,3) = 0,5 - 0,00177 = 0,49823 \text{ i}$$

$$\ln 9,3 = 2,23.$$

Dalje tražimo vrijednost argumenta "u₁" kojemu pripada integral preko ½ Gaussove funkcije gustoće vjerojatnosti veličine 0,49823. Nju očitamo iz tablice Gaussovog integrala (Tablica 4.5.1.4::III):

$$u_1 = 2,915.$$

Vrijednost u₁ može se odrediti i pomoću EXCELL funkcije $\text{NORMSINV}[P(\hat{H}_S \geq H_{S,1})] = -\text{NORMSINV}(0,00177) = 2,9165$. Također se može obrnuto za u₁=2,9165 dobiti $P(\hat{H}_S \geq H_{S,i}) = \text{NORMSDIST}(-u_1) = \text{NORMSDIST}(-2,9165) = 0,00177$. Dalje se par $\ln H_{S,1} = \ln 9,3 = 2,23$ i u₁=2,91 nacrtaju na linearnim skalama "ln H_S" i "u", te im se pridruže vrijednosti H_{S,1}=9,3 i $P(\hat{H}_S \geq 9,3) = 0,00177$ (Sl. 4.5.1.4::2). Za par H_{S,12}=2,7 [m] i $P(\hat{H}_S \geq H_{S,12}) = P(\hat{H}_S \geq 2,7) = 0,6909$; $P(u_{12}) = 0,6909 - 0,5 = 0,1909$, a iz Gaussove tablice u₁₂=-0,5. $\ln H_{S,12} = \ln 2,7 = 1$.

f) *Kalibriranje pomoćne ordinate "PR[god]"*

Kalibracija na Sl. 4.5.1.4::1b izvedena je pomoću tablice 4.5.1.4::II, a ona se kreira kako slijedi. Na pr.:

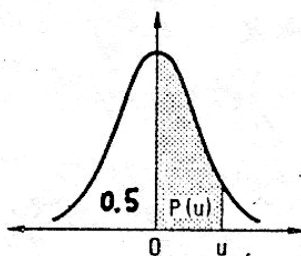
$$\text{Za } PR = 100g \rightarrow P(\hat{H}_S \geq H_S^{100g}) = \frac{T_{\text{reg}}}{n} \cdot \frac{1}{PR} = \frac{3}{3108} \cdot \frac{1}{100} = 9,65 \cdot 10^{-6}.$$

$$\text{Za } P(u) = \int_0^{u_1} p(u) du = 0,5 - 9,65 \cdot 10^{-6} = 0,49999035 \rightarrow u^{100g} = 4,27.$$

PR [god]	$P(H_S) = P(\hat{H}_S \geq H_{S,i})$	$P(u) = 0,5 - P(\hat{H}_S \geq H_S^{PP})$	u^{PR}
100	$9,65 \cdot 10^{-6}$	0,49999035	4,27
50	$1,93 \cdot 10^{-5}$	0,499981	4,12
20	$4,83 \cdot 10^{-5}$	0,499952	3,90
10	$9,65 \cdot 10^{-5}$	0,499904	3,73

Tablica 4.5.1.4::II Tablica za kalibriranje pomoćne ordinate povratnih razdoblja "PR[god]"

Površine ispod normalne krivulje



$$P(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^u e^{-\frac{1}{2}x^2} dx = \int_0^u p(u) du$$

TABLICA V

u	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0.00000	00399	00798	01197	01595	01994	02392	02790	03188	03586
0,1	03983	04380	04776	05172	05567	05962	06356	06749	07142	07535
0,2	07926	08317	08706	09095	09483	09871	10257	10642	11026	11409
0,3	11791	12172	12552	12930	13307	13683	14058	14431	14803	15173
0,4	15542	15910	16276	16640	17003	17364	17724	18082	18439	18793
0,5	19146	19497	19847	20194	20540	20884	21226	21566	21904	22240
0,6	22575	22907	23237	23565	23891	24215	24537	24857	25175	25490
0,7	25804	26115	26424	26730	27035	27337	27637	27935	28230	28524
0,8	28814	29103	29389	29673	29955	30234	30511	30785	31057	31327
0,9	31594	31859	32121	32381	32639	32894	33147	33398	33646	33891
1,0	34134	34375	34614	34850	35083	35314	35543	35769	35993	36214
1,1	36433	36650	36864	37076	37286	37493	37698	37900	38100	38298
1,2	38493	38686	38877	39065	39251	39435	39617	39796	39973	40147
1,3	40320	40490	40658	40824	40988	41149	41309	41466	41621	41774
1,4	41924	42073	42220	42364	42507	42647	42786	42922	43056	43189
1,5	43319	43448	43574	43699	43822	43943	44062	44179	44295	44408
1,6	44520	44630	44738	44845	44950	45053	45154	45254	45352	45449
1,7	45543	45637	45728	45818	45907	45994	46080	46164	46246	46327
1,8	46407	46485	46562	46638	46712	46784	46856	46926	46995	47062
1,9	47128	47193	47257	47320	47381	47441	47500	47558	47615	47670
2,0	47725	47778	47831	47882	47932	47982	48030	48077	48124	48169
2,1	48214	48257	48300	48341	48382	48422	48461	48500	48537	48574
2,2	48610	48645	48679	48713	48745	48778	48809	48840	48870	48899
2,3	48928	48956	48983	49010	49036	49061	49086	49111	49134	49158
2,4	49180	49202	49224	49245	49266	49286	49305	49324	49343	49361
2,5	49379	49396	49413	49430	49446	49461	49477	49492	49506	49520
2,6	49534	49547	49560	49573	49585	49598	49609	49621	49632	49643
2,7	49653	49664	49674	49683	49693	49702	49711	49720	49728	49736
2,8	49744	49752	49760	49767	49774	49781	49788	49795	49801	49807
2,9	49813	49819	49825	49831	49836	49841	49846	49851	49856	49861
3,0	49865	49869	49874	49878	49882	49886	49889	49893	49897	49900
3,1	49903	49906	49910	49913	49916	49918	49921	49924	49926	49929
3,2	49931	49934	49936	49938	49940	49942	49944	49946	49948	49950
3,3	49952	49953	49955	49957	49958	49960	49961	49962	49964	49965
3,4	49966	49968	49969	49970	49971	49972	49973	49974	49975	49976
3,5	4997674									
4,0	4999683									
4,5	4999966									
5,0	0.49999713									

Svakoj vrijednosti u ovoj tablici prethodi decimalni zarez; tako je npr.: $P(1,71) = 0,45637$

Tablica 4.5.1.4.: III Gaussov integral za normiranu normalnu raspodjelu $N[0,1]$

Literatura uz poglavlje 4.5

- [1] CERC: Shore protection Manual. Vol I 2. ed. Washington D. C.: US Army Corps of Engineers - Coastal Engineering Research Center, 1984.
- [2] WMO: Handbook on Wave Analysis and Forecasting. WMO-No.446. Geneva: World Meteorological Organization, 1976. Str. 70
- [3] Bretschneider, C. L.: Revisions in Wave Forecasting. - Deep and Shallow Water. In: Proceedings of the Sixth Conference on Coastal Engineering - Council on Wave Research, New York: ASCE, 1959.
- [4] Darbyshire, M.; Draper, L.: Forecasting Wind-Generated Sea Waves. In.: Engineering (London) Nr.195 (April 1963): 482 - 484
- [5] Groen, P.; Dorrenstein, R.; Zeegolven. In.: Koninklijk Neederlands Meteorologisch Institut, Opstellen op Oceanographisch en Maritiem Meteorologisch Gebied no.11 1958
- [6] Donelan, M.A.: Similarity Theory Applied to the Forecasting of Wave Heights, Periods and Directions. In.: Proceedings of the Canadian Coastal Conference, 1980: National Research Council Canada, 1980. p. 47-61
- [7] Pierson, W.J.jr.; Neumann, g.; James, R.W.: Practical Methods for Observing and Forecasting Ocean Waves by Means of Wave Spectra and Statistics. In.: Publication No 603. .Washington D.C.: US Navy Hydrographic Office, 1955
- [8] Hasselaann, K.; Ross, D.B. Müller, P.; Sell, W.: A Parametric Wave Prediction Model. In.: Journal of Physical Oceanography, Vol. 6 (1976.): 200-228
- [9] Nordenström, N.: A Method to Predict Long Term Distributions of Waves and Wave-Induced Motions and Loads on Ships and Other Floating Structures. In.: Publication No. 81. Oslo: Det Norske Veritas. April 1973.
- [10] Tucker, J.: Analysis of Record of Sea Waves. In.: Proceedings of the Institution of Civil Engineers Vol. 26 (1963.) paper No. 6691: 305-316
- [11] Silvester, R.: Coastal Engineering, 1. Amsterdam: Elsevir Scientific Publication Comp. 1974. -p. 256-269
- [12] WMO: Guide to Meteorological Instruments and Observing Practices. WMO Publications No. 8 TP.3.: World Meteorological Organization
- [13] Cartwright, D.C.: A Comparison of Instrumental and Visually Estimated Wave Heights and Periods Recorded on Ocean Weather Ships. In.: The presentation of wave data from voluntary observing ships, Hogben, N.; Lamb, F.E. (GB): National Physical Laboratory, SHIP REF. 49 (1964)
- [14] Pierson, W.J.; Moskowitz, L.: A Proposed Spectral Form for Fully Developed Wind Seas Based on the Similarity Theory of S.A. Kitaigoriskij. In.: Journal of the Geophysical Research (USA) Vol 69 (1964) No. 24: 5181-5190
- [15] ITTC: Technical Decizioni and Recommendations Of the Seakeeping Comitee. In.: Proceedings 12. i 13. ITTC, 1969. Rim i 1972. Berlin
- [16] Hasselmann, K.; i drugi: Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay During the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). In.: Deutsche hydrographische Zeitschrift, reihe A(8°) (1973.) No.12
- [17] Chakrabarti, K.S.: Hydrodynamics of Offshore Structures. Southampton: Computational Mechanics Publications, 1987. -Str. 102-125
- [18] Tabain, T.: Predskazivanje valjanja malih brodova pri istovremenom djelovanju nepravilnih valova i vjetra. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje. Doktorska disertacija obranjena 1985.
- [19] Smirčić, A.; Gačić, M.: Parametarska aproksimacija spektra površinskih valova srednjeg Jadrana . U.: Alpex-rezultati, simpozij Dinamika vjetra i strujanja u sjevernom Jadranu, Split, Juni 1983. Split: Savezni HMZ Beograd i Institut za oceanografiju i ribarstvo Split, 1983.
- [20] Pršić, M.: Optimalizacija konstrukcije lukobrana u uvjetima jadranskog valnog spektra, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet građevinskih znanosti. Doktorska disertacija obranjena 1987. -Str. 189
- [21] ITTC: Proceedings of the 17th International Towing Tank Conference, Leningrad, September 1984.: ITTC, 1984
- [22] Hasselman, S.; i drugi: The WAM model - a Third Generation Ocean Wave Prediction Model. In.: Journal of Physical Oceanography, Vol 18(1988.): Str. 1775-1810
- [23] an Mörkerken, R.A.; Komen, G.J.; Janssen, P.A.E.m. In: Operational WAMS statistics over the period December 1986 - March 1987. In.: KNMI Tech. Rept. TR-114, 1989.

- [24] Zambresky, L.: A verification study of the global WAM mode, I December 1987 - November 1988. In.: ECMWF Tech. Rept. 63 (may 1989)
- [25] Riepma, H.W.; Bouws, E.: Preliminary results of the NEDWAM model. In.: Preprints of Second International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Vancouver B.C., april 1989. Downsview: Published by Environment Canada AES, 4905 Dufferin St. Downsview, Ontario, Canada
- [26] Tolman, H.L.: The numerical WAVEWATCH: A third generation model for hindcasting of wind waves on tides in shelf seas. In.: Rept No. 89-2. Delft: Dept. of Civil Eng., Delft University of Technology, 1989.
- [27] Kuspilić, N.: Prognoze vjetrovnih valova na području sjevernog Jadrana. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet građevinskih znanosti. Magistarski rad obranjen aprila 1988.
- [28] CEM - Coastal Engineering Manual: U.S Army Corps of Engineers"; Index; Part II: Coastal Hydrodynamics
- [29] Pršić, M.: Prognoze vjetrovnih valova, Vodoprivreda, Beograd, 1991.
- [30] Simiu, E.; Scanlan, R. H.: Wind Effects on Structures – An Introduction to Wind Engineering, Second edition, John Wiley / Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, 1986.

4.6 PROJEKTI VALOVI

Osim poznatih kopnenih djelovanja na pomorske građevine javljaju se specijalni utjecaji koji proizlaze iz morskog okoliša, a to su morski valovi i morske razine. Kod nekih pomorskih građevina, ili njihovih konstrukcija, djelovanja morskog okoliša su čak dominantna. Stoga se pomorske građevine moraju na njih proračunati kako slijedi:

Proračuni pomorskih građevina mogu se provoditi s:

- projektnim valovima ili s
- projektnim spektrom. Ovdje će se dati samo projektni valovi.

Projektni valovi razlikuju se za slijedeće dvije su vrste proračuna pomorskih građevina:

- proračuni funkcionalnosti i
- proračuni konstrukcije.

Djelovanje morskog okoliša na pomorske građevine podrazumijeva ekstremna djelovanja, koja se definiraju projektnim povratnim razdobljem $PR=5, 50, 100$ ili više [god]. Valno djelovanje uobičajeno se definira *projektnom valnom visinom* (H_{proj}), koja je ovisna o vrsti proračuna i o tipu konstrukcije (Tab. 4.6::I). *Projektni valni period* (T_{proj}) nije propisan nego se određuje tako da se ispita djelovanje prikladnog raspona valnih perioda, a usvaja se onaj koji za razmatrani proračun daje najnepovoljnije efekte. Pri tome gruba je orijentacija da se funkcionalni proračuni provode za povratna razdoblja $PR \geq 5$ godina [2,3,5,15], a proračuni konstrukcije za povratna razdoblja $PR=50$ (EC) do 100 (BS) godina [1,2,3,4] (Tab. 4.6::I).

PROJEKTI VAL				
prognostirani (ili u rijetkim slučajevima izmjerni)				
FUNKCIONALNOST GRAĐEVINE			PRORAČUN KONSTRUKCIJE	
1. AGITACIJA BAZENA (PREKRCAJNI DANI)	$H_{1/3}^{5\text{god}}$	VAL 5- GODIŠNJEG POVRATNOG RAZDOBLJA	1. NASIPNE GRAĐEVINE (fleksibilne konstrukcije)	$H_{1/10}^{100\text{god}}$
2. PRELJEVANJE ¹⁾	$H_{\max}^{5\text{god}}$		2. VERTIKALNE STIJENE (krute konstrukcije)	$H_{\max}^{100\text{god}}$
	$H_{\max}^{100\text{god}}$	VAL 100- GODIŠNJEG POV. RAZD.	3. GRAĐEVINE NA PILOTIMA (krute konstrukcije)	

Tab. 4.6::I Izbor projektne valne visine H_{proj} u ovisnosti o vrsti proračuna i tipu građevine [2,3,13,14]. 1) Projektna valna visina za prelijevanje ovdje se preporuča s $H_{proj}=H_{\max}^{5\text{god}}$ što principijelno vrijedi za kej; t.j. visinu teritorija u luci i visinu krune lukobrana teretnih luka kod kojih se, u slučaju većih valova, može kontrolirati i zabraniti prolaz ljudi kako nebi stradali [6]. Kod javnih luka gdje se promet pješaka ne može kontrolirati [6] projektna valna visina za prelijevanje je $H_{proj}=H_{\max}^{100\text{god}}$. Ova projektna valna visina vrijedi i za prelijevanje nasipnog lukobrana, jer se stabilnost obloge pokosa na lučkoj strani lukobrana u principu računa pod pretpostavkom nepreljevanja. Tablica je autorska interpretacija literature.

Proračuni funkcionalnosti - agitacija lučkog bazena i prekrcajni dani - pomorskih građevina provode se u principu za niže vrijednosti djelovanja morskog okoliša ($PR \geq 5$ [god]) nego li proračuni konstrukcija ($PR=50$ do 100 [god]), jer se u proračunskom radnom vijeku građevine može dopustiti da ona nekoliko puta ne funkcionira. Naime tada će se desiti prihvatljiva i popravljiva šteta, neće biti ljudskih žrtava a s druge strane

početna investicija će biti manja. Ni o tu ima razlika: standardni proračun funkcionalnosti – prelijevanje - provodi se za PR=5 do 100 [god], a za specijalne građevine i do 10.000[god] sukladno Tab. 4.6::II

SVRHA GRAĐEVINE I VRSTA OPASNOSTI	PRORAČUNSKI RADNI VIJEK GRAĐEVINE	RAZINA ZAŠTITE
	LT[god]	PR[god]
Privremena ili kratkotrajna mjera	1 - 20	5 – 50
Većina obrambenih građevina i obaloutvrda	30 - 70	50 – 100
Protupoplavne građevine koje štite velike rizične prostore	50 - 100	100 – 10.000
Specijalne građevine, visoki troškovi gradnje	200	do 10.000
Nuklearne elektrane i sl.	-	10.000

Tab. 4.6::II Primjeri preporučenih razina zaštite od prelijevanja valovima u funkciji povratnih razdoblja, [15] *Eurotop*, 30

Za usporedbi u UK obrana od preplavlivanja morem građevina velikog rizika određuje se za PR=1.000[god], a srednjeg rizika PR=200 do 1.000[god]. No mnoge postojeće građevine ne nude zaštitu u skladu s tim aktualnim propisima. Poznati primjer za zaštitu od ekstremnih plima su polderi u Nizozemskoj čijih je 2/3 površine ispod takvih plima. Kod toga gusto naseljene seoske površine imaju zaštitu za PR=10.000[god], manje guste za PR=4.000[god]. Zaštita od riječnih poplava (bez uzimanja u obzir ekstremne plime) je za PR=1.250[god]. Proračunski radni vijek nasipa za obranu od poplava koji se lako daju nadvisiti je u Nizozemskoj LT=50[god]. U urbanim područjima gdje je nasipe teže nadvisiti LT=100[god]. To može biti i više za vrlo skupe specijalne građevine kao što su plimna pregrada na istočnoj Šeldi Temzi ili Maeslandtkerring na ulazu u Rotterdam kada je LT=200[god]. [15] *Eurotop*, 30. Nije vezano za more i valove, ali je slična filozofija primijenjena za savski nasip u Zagrebu koji je dimenzioniran za protok PR=1.000[god].

Kriteriji za količinu (protok) prelijevanja dani su u Tab. 4.6::III, a neki kriteriji agitacije lukčkog bazena, vezani za probleme koji stvaraju valovi kod prekrcaja tereta i manevara broda u luci, dani su okvirno u Tab. 4.6::IV i precizno u Tab. 4.6::V.

Proračuni konstrukcije pomorskih građevina provode se za više vrijednosti djelovanja morskog okoliša (za PR=50-100[god]), jer se u proračunskom radnom vijeku građevine ne može dopustiti da ona ima veliku vjerojatnost loma ili velikog oštećenja. Tada bi bile moguće ljudske žrtve, a sigurno će se desiti velika financijska šteta. No za građevine čije bi nefunkcioniranje ili lom ugrozili široku društvenu zajednicu projektno povratno razdoblje je veće od 100 godina. U svakom slučaju projektno povratno razdoblje za proračun konstrukcije jednako je ili veće od proračunskog radnog vijeka građevine: $PR[god] \geq LT[god]$, [2, 1996].

Kriteriji za proračune konstrukcije definirani su EUROCODE-om kao princip da proračunski učinci djelovanja moraju biti $\leq$ proračunskih učinaka stabilizacijskih djelovanja, od proračunske otpornosti konstrukcije projektne vrijednosti uporabnog ograničenja konstrukcije.

m ³ /s/m'	PROMETNA SIGURNOST		SIGURNOST KONSTRUKCIJE			l/s/m'
2,E-01	nesigurno kod svih brzina	vrlo opasno	konstruktivna oštećenja	oštećenja čak iako je potpuno obložen	oštećenja čak iako je hodnik popločen	200
5,E-02					oštećenja ako hodnik nije popločen	50
2,E-02				oštećenje kod neobloženog nutarnjeg pokosa	bez oštećenja	20
1,E-02						10
2,E-03				oštećenje kod neobložene krune		2
1,E-03						1
5,E-04				opasno: travnati nasip i kompoz. vert. kej		0,5
4,E-04						0,4
1,E-04	nesigurno na vertikalnom lukobranu	0,1				
3,E-05		nesigurno parkiranje na vertikalnom lukobranu	0,03			
2,E-05	0,02					
1,E-06	nesigurna vožnja kod visokih brzina	nekonforno, ali bezopasno	malena oštećenja opreme	0,001		
4,E-05				0,04		
1,E-06	vlažno, ali gotovo konforno	bez oštećenja		0,001		
1,E-07				sigurna vožnja kod svih brzina	0,0001	
	VOZILA	PJEŠACI	KUĆE	NASIPNI LUKOBRAN	NASIPNE OBALOUTVRDE	

Tab. 4.6::III Kriteriji za prelijevanje [6,12]

POSTUPCI	BRODOVI [dwt]	ZNAČAJNA VALNA VISINA [m]	PROSJEČNA GODIŠNJA UČESTALOST [dana/god]
Prilaz ulazu u luku [11]	Svi	3.0	19
Manevriranje unutar luke [11]	Svi	1.5	8
Pristajanje [11]	do 60 000	0.8	24
	od 60 000 do 125 000	1.0	14
	od 125 000 do 250 000	1.5	8
Ukrcaj rasutog tereta [11]	do 60 000	1.5	8
	od 60 000 do 125 000	2.0	4
Iskrcaj rasutog tereta [11]	do 60 000	0.8	24
	od 60 000 do 125 000	1.0	14
	od 125 000 do 250 000	1.5	8
Prekrcaj generalnog tereta [11]	do 20 000	0.5	30
Marine [7,14]	Svi	0.15	5
Dopuštena stanja valovlja unutar akvatorija marine s plutajućim gatovima [5]	Svi	0.3	1dan/5 god
	Svi	0.5	1dan/50 god

Tab. 4.6::IV Granične valne visine usvojene za razne operacije kod uplovljavanja i prekrcaja brodova u luci i marini [5,7,11,14]

Djelovanje morskog okoliša na pomorske građevine izraženo preko projektnog PR[god] u odnosu na proračunski radni vijek građevine LT[god] definira rizikom R[%] gubitka funkcije, oštećenja ili sloma građevine.

Ship Type	Cargo Handling Equipment	Surge (m)	Sway (m)	Heave (m)	Yaw (°)	Pitch (°)	Roll (°)
Fishing vessels	Elevator crane	0.15	0.15				
	Lift-on-lift-off	1.0	1.0	0.4	3	3	3
	suction pump	2.0	1.0				
Freighters, coasters	Ship's gear	1.0	1.2	0.6	1	1	2
	Quarry cranes	1.0	1.2	0.8	2	1	3
Ferries, Ro-Ro	Side ramp ²	0.6	0.6	0.6	1	1	2
	Dew/storm ramp	0.8	0.6	0.8	1	1	4
	linkspan	0.4	0.6	0.8	3	2	4
	Rail ramp	0.1	0.1	0.4	-	1	1
General cargo	-	2.0	1.5	1.0	3	2	5
Container vessels	100% efficiency	1.0	0.6	0.8	1	1	3
	50% efficiency	2.0	1.2	1.2	1.5	2	6
Bulk carriers	Cranes	2.0	1.0	1.0	2	2	6
	Elevator/ bucket-wheel	1.0	0.5	1.0	2	2	2
	Conveyor belt	5.0	2.5		3		
Oil tankers	Loading arms	3.0 ³	3.0				
Gas tankers	Loading arms	2.0	2.0		2	2	2

Remarks: 1) Motions refer to peak-peak values (except for sway: zero-peak).
 2) Ramps equipped with rollers.
 3) For exposed locations 5.0 m (regular loading arms allow large movements)

Tab. 4.6::V PIANC preporuka kriterija gibanja broda za sigurno obavljanje prekrcaja [7,14]

Rizik gubitka funkcije, oštećenja ili sloma građevine definira se kao vjerojatnost izlaganja konstrukcije projektnom djelovanju (na pr. valnoj visini $H \geq H^{proj}$) definiranog povratnog razdoblja PR[god], ili težem od njega, u proračunskom radnom vijeku konstrukcije LT[god]. Kako je prikazano u [10] izvodi se iz vjerojatnosti premašenja slučajne varijable ekstrema valnih parametara kao:

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{PR}\right)^{LT} \quad \forall \quad LT > 1$$

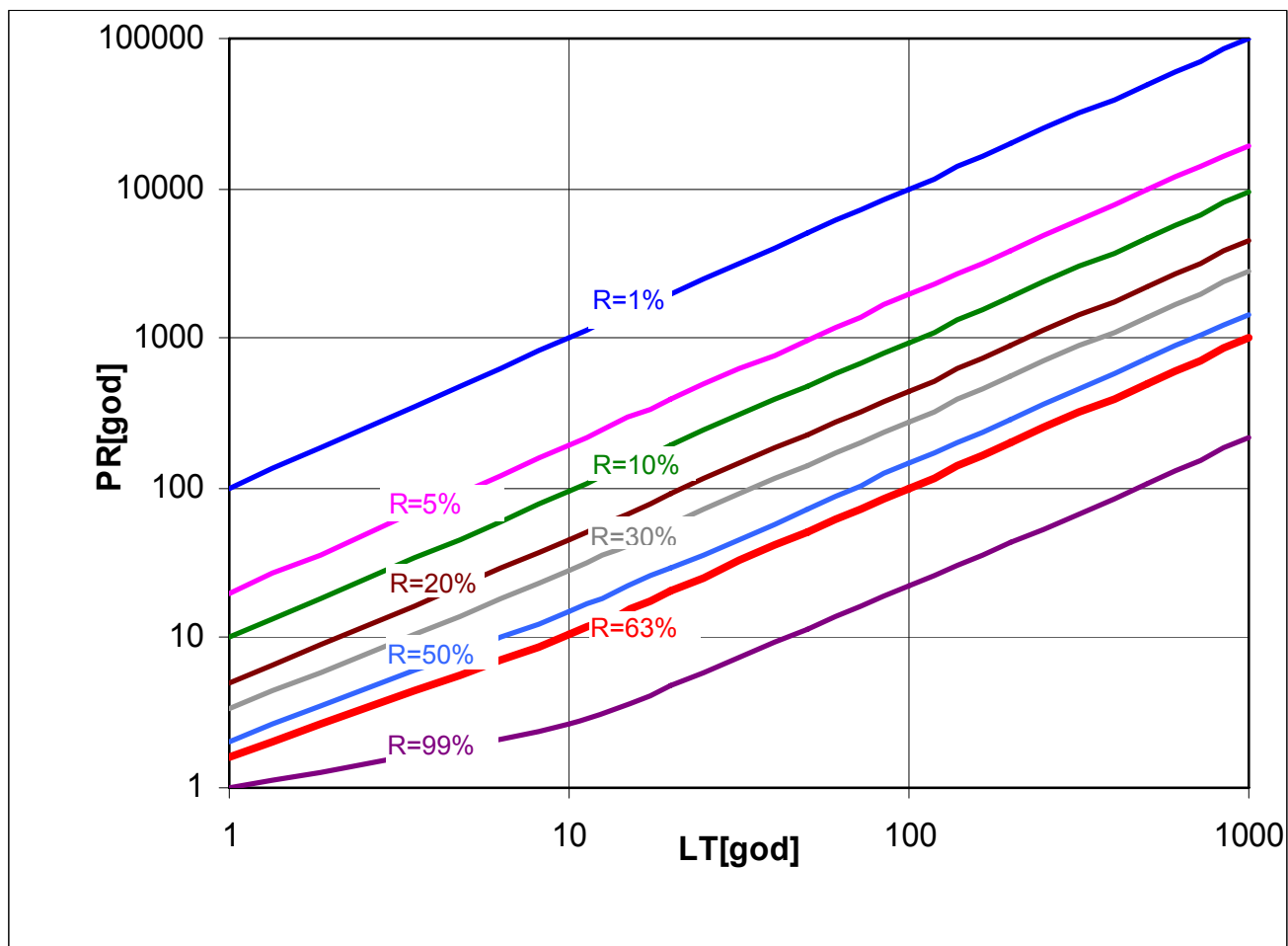
gdje je:

R[1°] rizik izlaganja građevine projektnim uvjetima i težim od njih
 PR[god] povratno razdoblje razmatranog djelovanja na građevinu
 LT[god] živorni vijek građevine,

ili obratno:

$$PR = \frac{1}{1 - e^{-\frac{LT}{R}}}$$

Obje veličine se, prema Borgmanu [10], mogu izvesti na dva načina: preko analize slučajne varijable godišnjih ekstrema (vidi gore) i preko statističkog modeliranja ekstrema razmatranog fizikalnog procesa uz Poissonovu distribuciju.



Sl. 4.6::1 Odnos rizika s povratnim periodom i proračunskim radnim vijekom konstrukcije

Prema drugom principu rizik se izvodi, uz pomoć Poissonove distribucije, iz vjerojatnosti da se neki događaj male vjerojatnosti u okviru više mogućnosti pojavi 1 puta :

$$R = 1 - e^{-\frac{LT}{PR}} \quad \forall \quad LT \gg 1$$

$$PR = -\frac{LT}{\ln(1-R)}$$

privremene građevine	1-5
instalacije	15-25
fiksne pomorske građevine	50-100

Tab. 4.6::VI Preporučeni proračunski radni vijek građevina [2,8,14]

Odnos rizika s povratnim periodom i proračunskim radnim vijekom konstrukcije je dan na Sl. 4.6::1. Pritom je preporučeni proračunski radni vijek dan u Tab. 4.6::II i VI. Na Sl. 4.6::1 se vidi da je rizik oštećenja ili sloma građevine u slučaju da su proračunski radni vijek i povratno razdoblje projektnog djelovanja jednaki $LT=PR$ vrlo velik i iznosi 63%!

Prihvatljivi rizik definira se preko zakonski propisanog povratnog razdoblja $PR[god]$, ili težeeg od njega, u zakonski propisanom proračunskom radnom vijeku konstrukcije $LT[god]$. Tako najčešći prihvatljivi rizik za $PR=100[god]$ i $LT=50[god]$ iznosi $R=39,3[\%]$, a za specijalne objekte s $PR=10.00[god]$ i $LT=200[god]$ iznosi $R=2[\%]$.

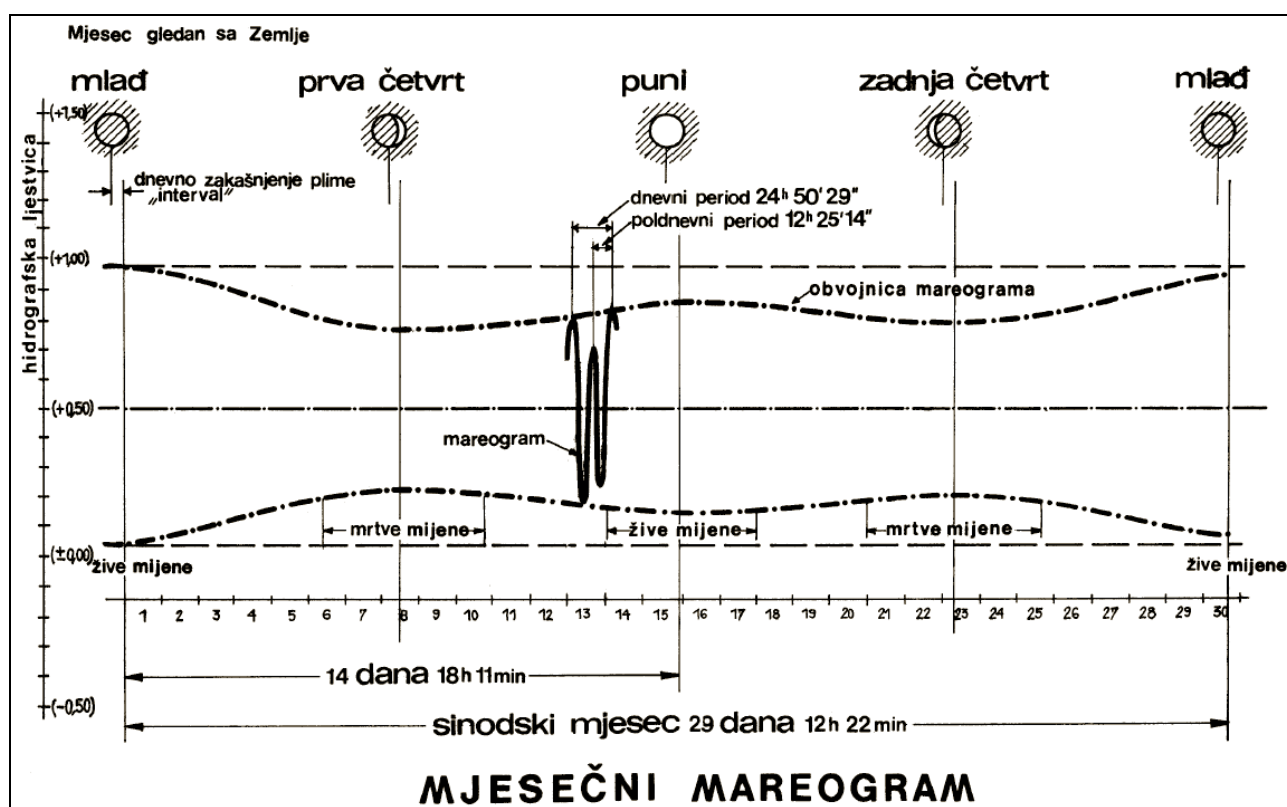
LITERATURA UZ POGLAVLJE 6

- [1] EC1 Eurocode 1 – Osnove projektiranja i djelovanja na konstrukcije – Dio 2-4 Djelovanje na konstrukcije – Opterećenje vjetrom, CEN Europski komitet za norme, Brussels, xxxx god
- [2] EAU Empfehlungen des Arbeitsausschusses Ufereinfassungen Häfen und Wasserstraßen: Arbeitsausschuß" Ufereinfassungen2 der Hafenbautehnischhen Gesellschaft e. V. und der Deutschen Gesellschaft für Geotechnick e. V., Ernst und Sohn, Berlin 2004
- [3] BS 6349 – 7: 1991, British Standard, Maritime Structures – Part 7: Guide to the design and construction of breakwaters
- [4] CEM Coastal Engineering Manual: (proj valovi) U.S Army Corps of Engineers"; Index; Part II: Coastal Hydrodynamics naći točniji citat
- [5] HRB Hrvatski registar brodova: Tehnički uvjeti i svjedodžba o sigurnosti plutajućeg objekta za pontonske za gatove u marinama QC-T- 191, Split 2003.
- [6] Wave Overtopping of Seawalls, Design and Assessment Manual, R/D Technical Report W178, HR Wallingford Ltd, Wallingford UK, 1999.
- [7] PIANC, Criteria for Movements of Moored Ships in Harbours, A Practical Guide, Report of Working Group 24 of the Permanent Technical Committee II, Supp. to Bulletin N°88, str. 6, Brussels, 1995.
- [8] St. Denis,M.: Determination of Extreme Waves: Topics in Ocean Engineering Vol.1, Bretschneider, C.L., editor. Texas. Gulf Publishing Co., 1969. -p. 37-41
- [10] Borgman,L.E.: Risk Criteria: Journal of the Waterways, Harbours and Coastal Engineering Division, A.S.C.E. Proceedings Vol.89 (1963.) No. WW3: -p. 1-35
- [11] The Dock&Harbour Authority,str. 199, London, Oct. 1979.
- [12] PIANC, Breakwaters with vertical and inclined concrete walls, Report of Working Group 28 of the Maritime Navigation Comission, str. 9, Brussels, 2003.
- [13] PIANC, *****, Report of Working Group N°13 of the Permanent Technical Comittee II, Supplement to Bulletin N°85, Brussels, 1994
- [14] BS 6349 – 1: 2000, British Standard, Maritime Structures – Part 1: Code of practice for general criteria
- [15] EurOtop, Wave Overtopping of Sea Defences anr Related Structures Assesment Manual, EA Environment Agency, UK; ENW Expertise Network Waterkeren, NL; KFKI Kuratorium für Forschung im Kvsteningenieurwesen, D: August 2007-10-08

4.7 MORSKE RAZINE

Ekstremne morske razine su, uz valove, osnovna podloga za sve vrste inženjerskih zahvata u moru.

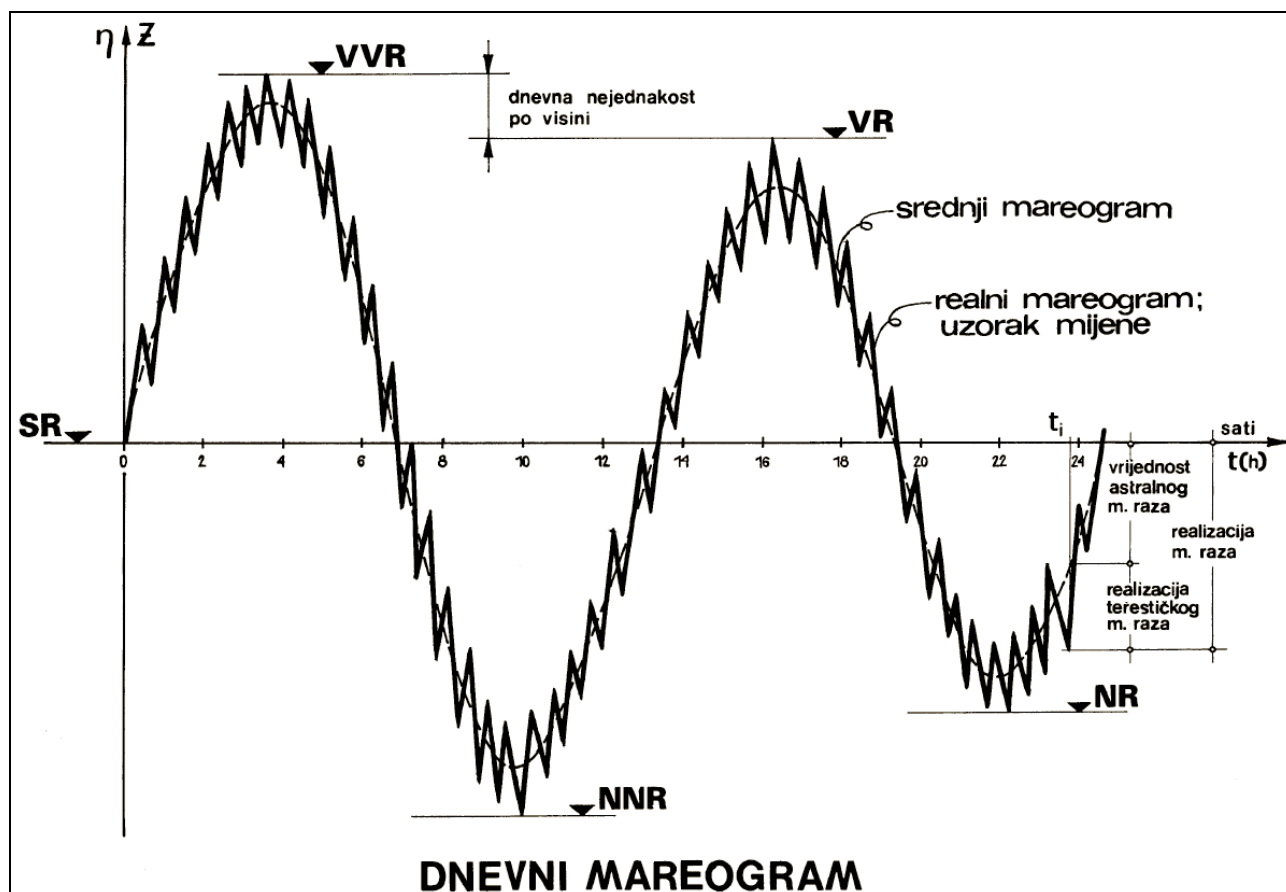
Pojam morske razine odnosi se na nivo fizičke površine mora koji je u relaciji s nekom referentnom ravninom. Morska razina se javlja u jednom trajnom dugovalnom procesu nazvanom morska mijena. Dvije su glavne grupe valnih komponenti koje formiraju duge valove morske mijene: 1) astralna, koja se naziva morsko doba (generirana gibanjem nebeskih tijela – pretežno Mjeseca i Sunca - s periodom od oko $\frac{1}{2}$ ili oko 1 dan) i 2) terestička (generirana zemaljskim utjecajima s periodom od 10-tak minuta do nekoliko sati). Astralna komponenta morske mijene se može okarakterizirati kao deterministička, a terestička kao slučajan proces, što cijeloj morskoj mijeni daje karakter slučajnog procesa.



Sl. 4.7::1 Mjesečni mareogram

Amplituda mijene varira u tokom jednog mjeseca. Period mjesečne varijacije morske mijene je pola sinodskog mjeseca ($0,5 \times 29,5$ dana) Sl. 4.7::1. No varira i tokom dana. Na slici 4.7::2 prikazana je dnevna varijacija morske mijene, koja se može javiti s jednim ili

dva perioda. Jednodnevna mijena ima period 24 sata i 50 minuta, a poludnevna 12 sati i 25 minuta. Mijene na Jadranu su poludnevnog tipa u vrijeme sizigija (mlađ i pun mjesec), a jednodnevnog tipa u vrijeme kvadrature (prva i zadnja četvrt). U tablici 4.7::I dana je nomenklatura morskih razina s oznakama i definicijama karakterističnih morskih razina.



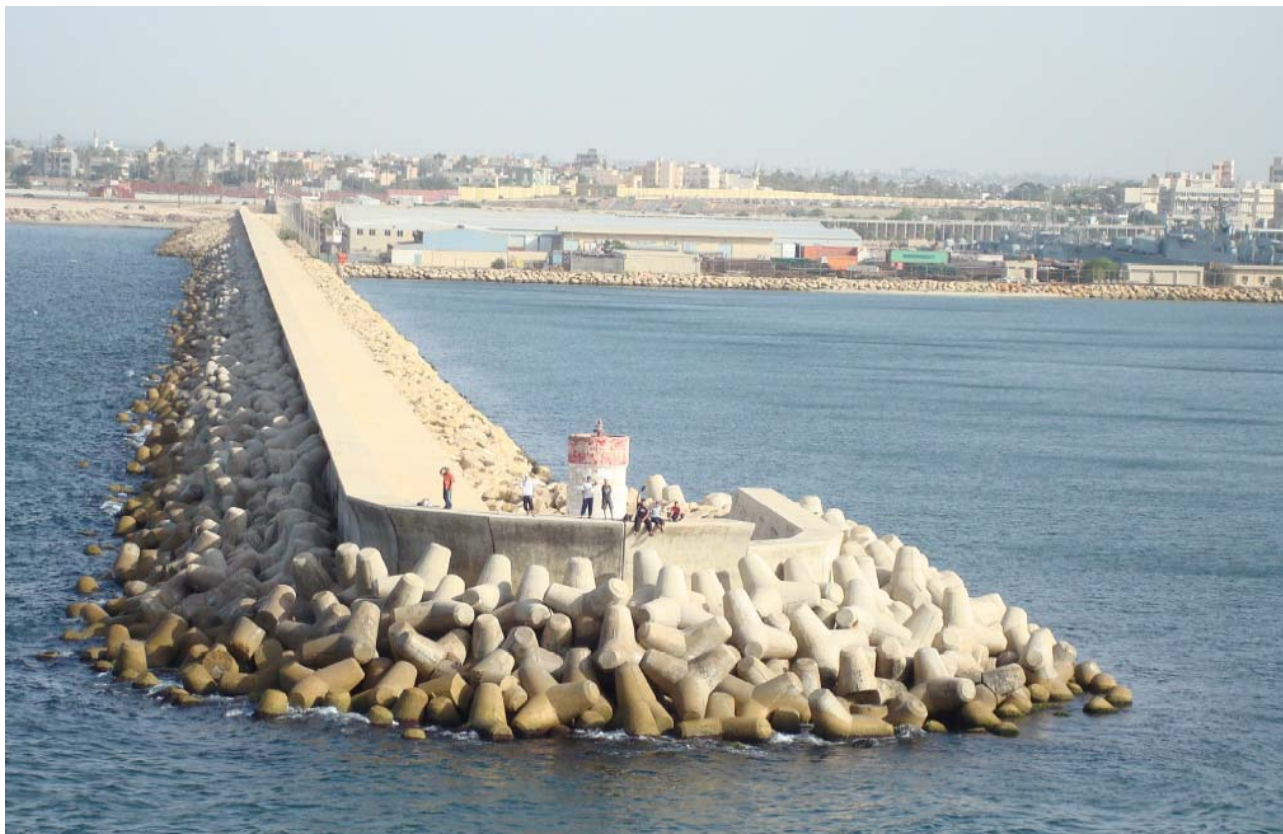
Sl. 4.7::2 Dnevni mareogram

NOMENKLATURA MORSKIH RAZINA

ExtrVR ^{100g}	Ekstremno Visoka Razina 100 g povratnog razdoblja, odnosno maksimalna razina koja 1 puta u 100 godina može biti dostignuta ili premašena
ExtrVR ^{50g}	Ekstremno Visoka Razina 50 g povratnog razdoblja, odnosno maksimalna razina koja 1 puta u 50 godina može biti dostignuta ili premašena
ExtrVR ^{10g}	Ekstremno Visoka Razina 10 g povratnog razdoblja, odnosno maksimalna razina koja 1 puta u 10 godina može biti dostignuta ili premašena
SVVŽR	Srednja Viša Visoka živa Razina – 20-godišnji prosjek od po jedne maksimalne registrirane više visoke razine u vrijeme žive mijene s izgladenog moreograma
SVVR	Srednja Viša Visoka Razina – prosjek od svih registriranih viših visokih razina u nekom periodu s izgladenog moreograma
SVR	Srednja Visoka Razina – prosjek od svih registriranih visokih razina nekog razdoblja s izgladenog moreograma
SR $\pm 0,0$	Srednja Razina $\equiv$ geodetska nula $\pm 0,0$ [m n.m.], ili nula generalnog nivelmana države – prosjek registriranih satnih razina s izgladenog moreograma ili integralni prosjek; ako se radi o barem 20-godišnjem prosjeku može poslužiti za nulu generalnog nivelmana države: $\pm 0,0$ [m n.m.]. Za to se odabere jedna mareografska stanica na državnoj obali. Za Hrvatsku je geodetska nula $\pm 0,0$ [m n.m.] definirana 1875. iz jednogodišnjeg opažanja u Trstu. Za usporedbu 20-godišnjia SR u Bakru je cca $+0,1$ [m] niža .
SNR	Srednja Niska Razina – prosjek od svih registriranih niskih razina nekog perioda s izgladenog moreograma
SNNR	Srednja Niža Niska Razina – prosjek od svih registriranih nižih niskih razina u nekom periodu s izgladenog moreograma
SNNŽR [$\pm 0,0$]	Srednja Niža Niska živa Razina $\equiv$ hidrografska nula $\equiv$ nula pomorskih karata ili – 20-godišnji prosjek od po jedne minimalne registrirane niže niske razine u vrijeme žive mijene. Hidrografska nula se mijenja uzduž obale, pa stoga nije istovjetna za sve pomorske karte
ExtrNR ^{10g}	Ekstremno Niska Razina 10 g povratnog razdoblja, odnosno minimalna razina koja 1 puta u 10 godina može biti dostignuta ili podbačena
ExtrNR ^{50g}	Ekstremno Niska Razina 50 g povratnog razdoblja, odnosno minimalna razina koja 1 puta u 50 godina može biti dostignuta ili podbačena
ExtrNR ^{100g}	Ekstremno Niska Razina 100 g povratnog razdoblja, odnosno minimalna razina koja 1 puta u 100 godina može biti dostignuta ili podbačena

Tab. 4.7::I Nomenklatura morskih razina

4.8 LUČKE GRAĐEVINE



Sl. 4.8::1 Nasipni lukobran s oblogom od AB elemenata - tetrapoda

U lukama se pojavljuje mnoštvo tipičnih kopnenih građevina i instalacija, ali i neke specijalne pomorske građevine koje nemaju kopneni pandan. To su u prvom redu: lukobran (Sl. 4.8::1) i kej (Sl. 4.8::2), a zatim njihovi derivati.



Sl. 4.8::2 Vertikalni kej

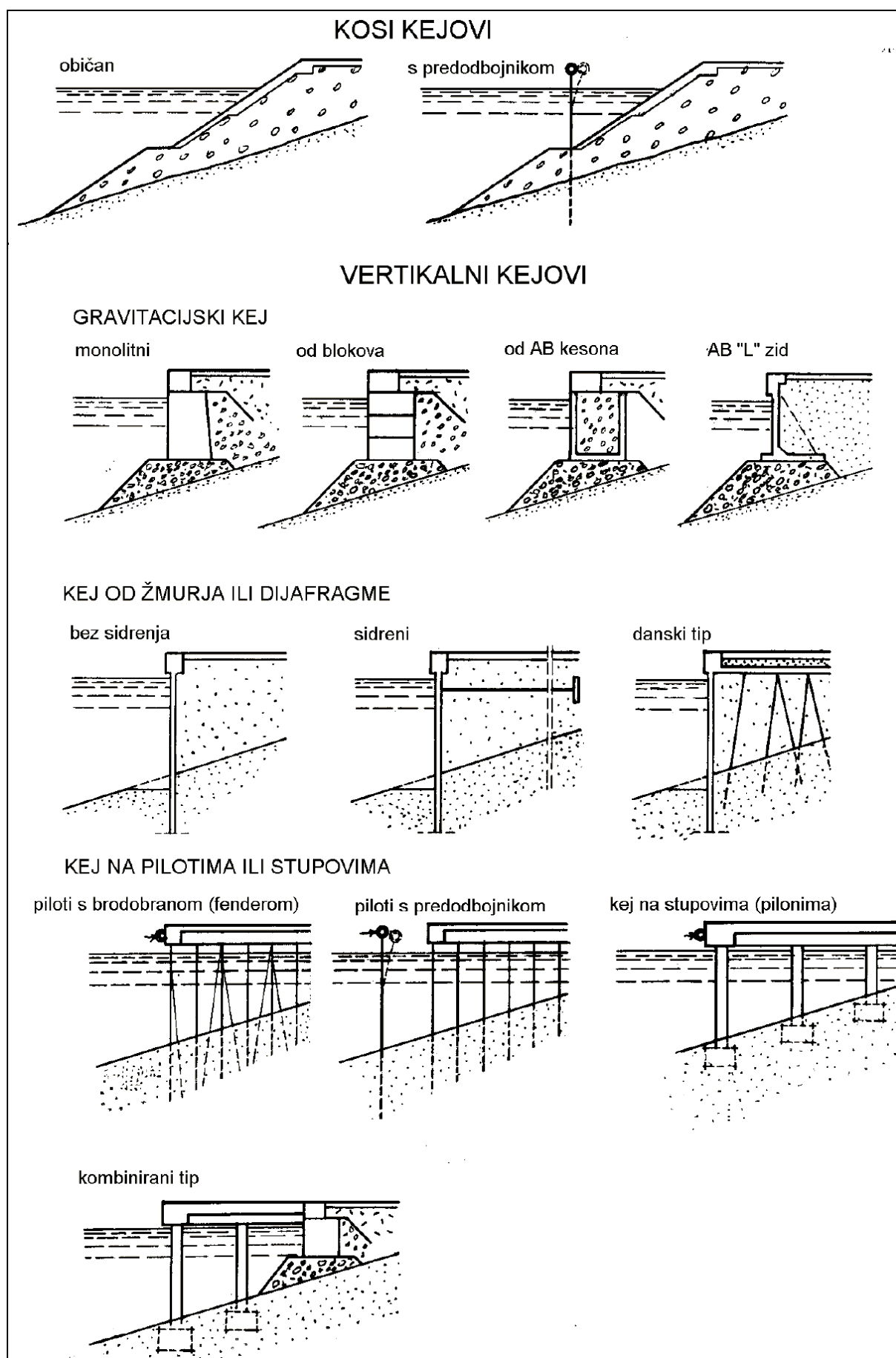
Ove građevine su raspoređene u zaštićenom lučkom akvatoriju ili vani pa mogu biti

vanjske:

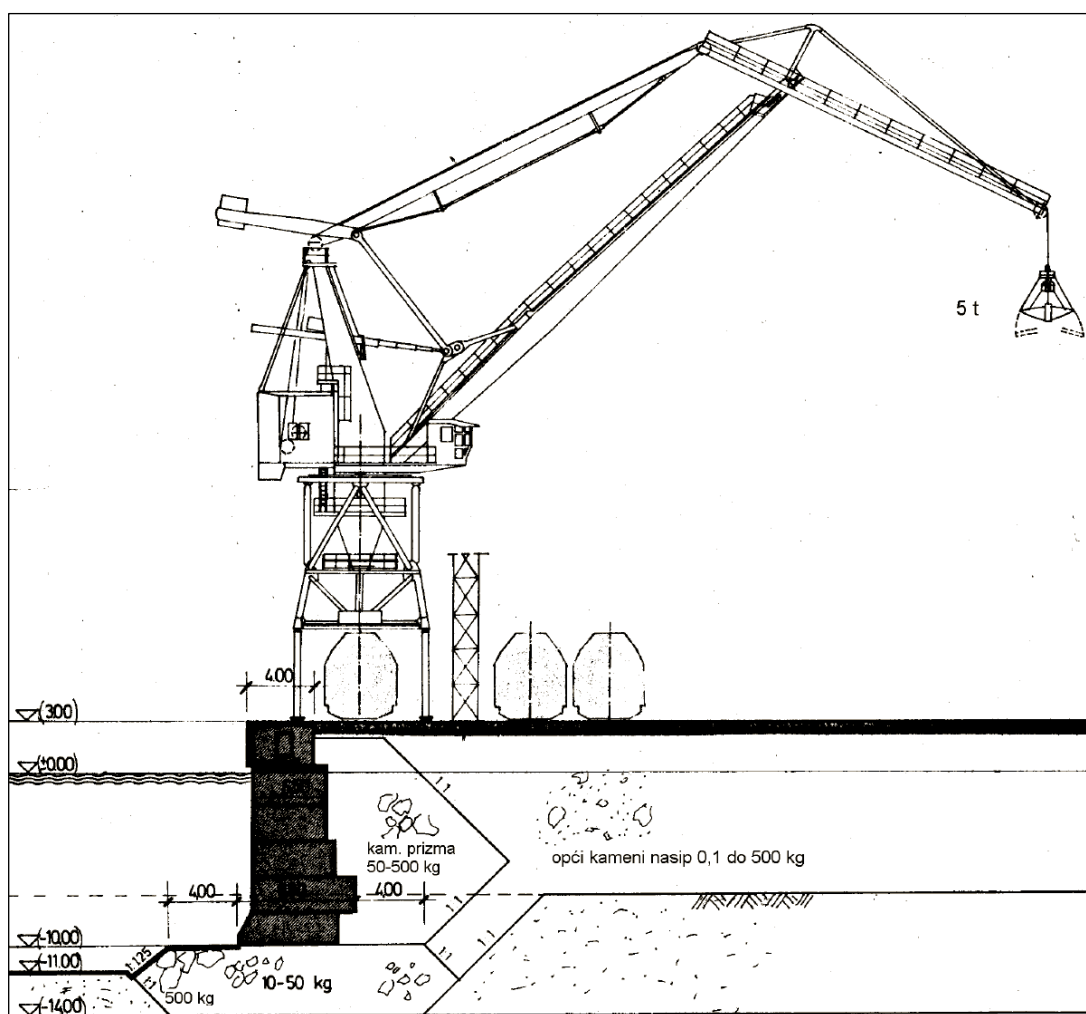
- lukobran (Sl. 4.8::1),
- valobran,
- valolom,
- obaloutvrda, i

unutarnje:

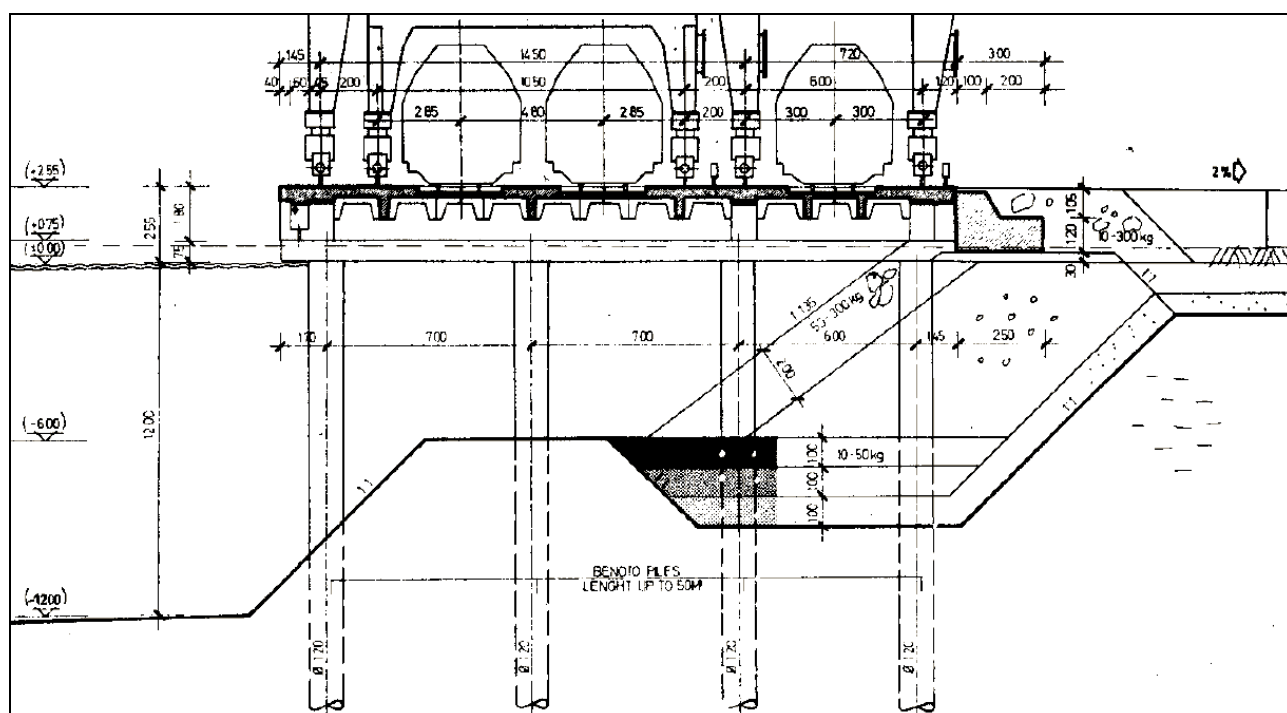
- kej, Sl. 4.8::2, 3, 4 i 5
- molo,
- gat,
- utvrdica, dalba, plutača i
- uređena obala.



Sl. 4.8.:3 Tipovi keja



Sl. 4.8::4 Gravitacijski kej

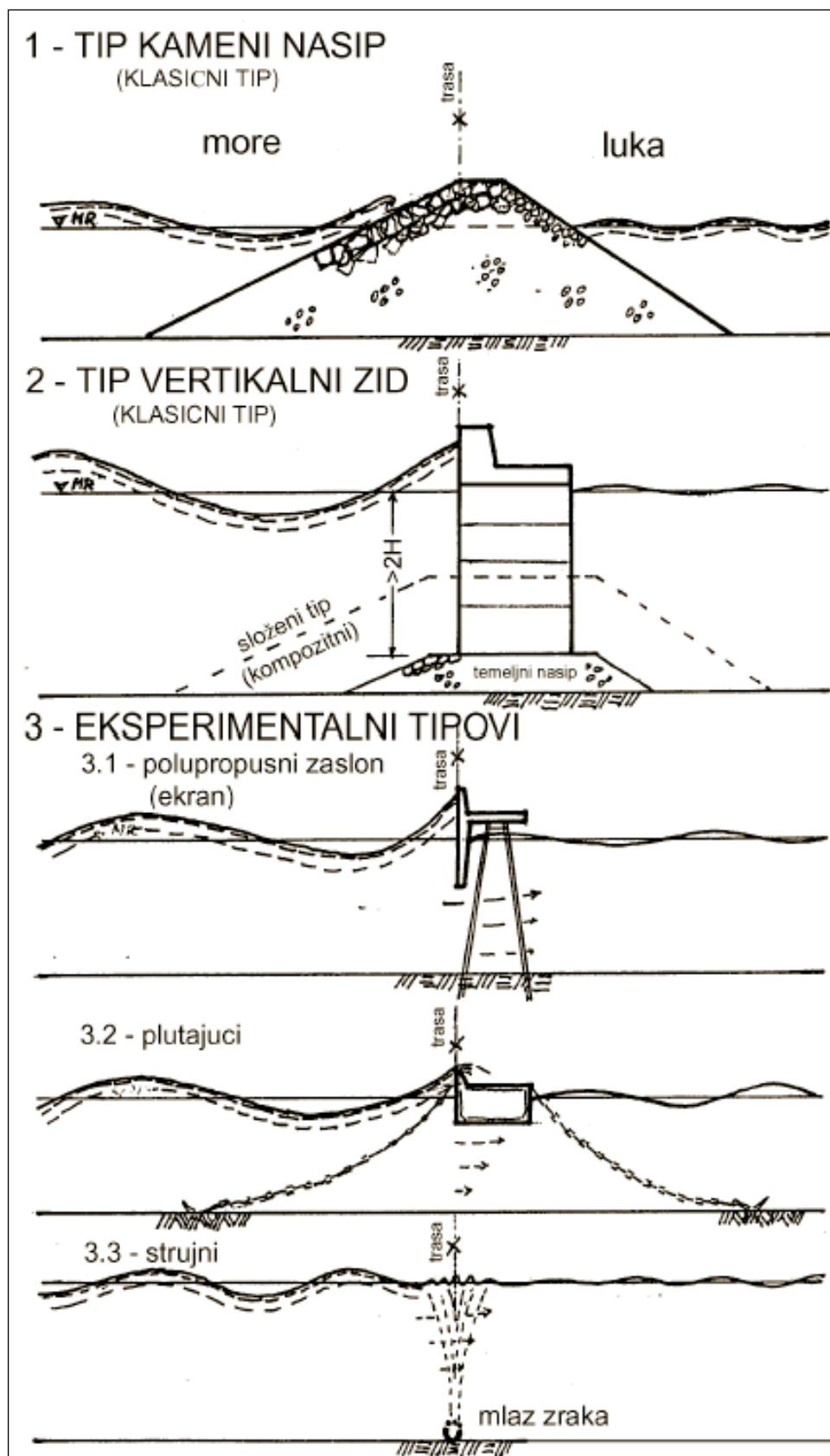


Sl. 4.8::5 Kej na pilotima

4.8.1 LUKOBRANI

Najčešća smetnja radu u lukama je djelovanje valova na ljuljanje brodova u luci. Zato se lučki akvatorij zaštićuje *lukobranom* (Sl. 4.8.: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. 4.8.1.:1 Tipovi lukobrana

Ako građevina kao lukobran služi protiv djelovanja valova na druge pomorske građevine (obalni ispust iz HE, usis rashladne morske vode...) naziva 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.

U pogledu presjeka konstrukcije razlikuju se 3 osnovna tipa lukobrana (Sl. 4.8.1::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.

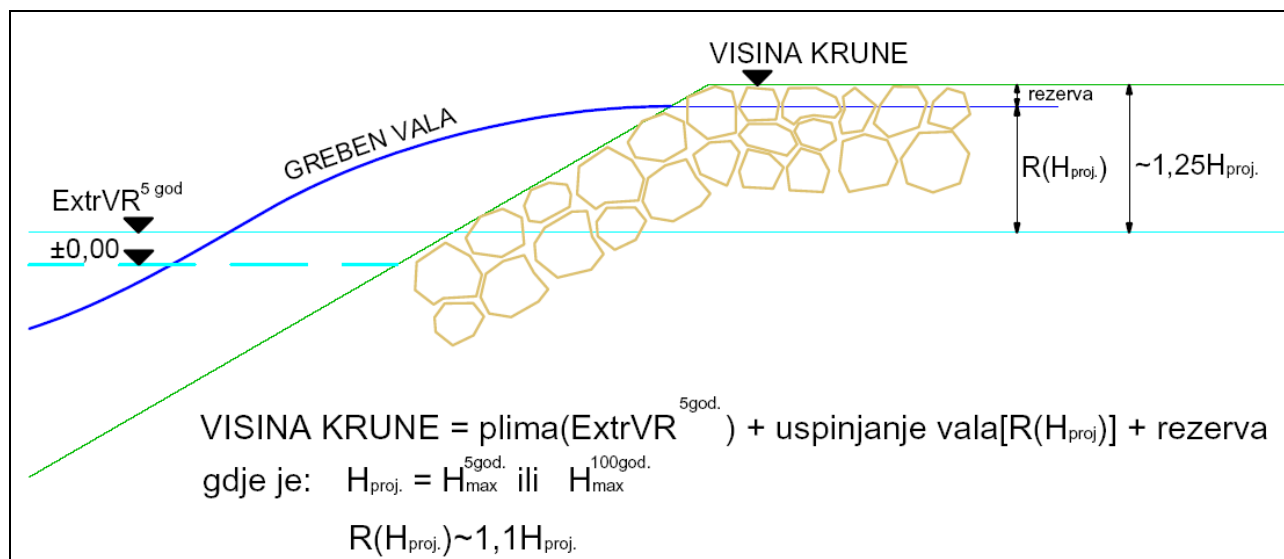
4.8.1.1 LUKOBRAN TIP NASIP

Lukobran tipa nasip se primjenjuje za sve vrste tla na dnu, pa čak i za mulj. Traži dosta održavanja, ali je vrlo otporan na djelovanje valova. Nevrijeme ga može oštetiti, ali ne i potpuno srušiti tako da nikada ne gubi zaštitnu funkciju. S velikim dubinama postaje skup jer mu cijena raste gotovo kao kvadrat visine. Vrlo je otporan na ratna razaranja. Sastoji se od središnje jezgre (sitniji kameni nasip) i obloga (postavljeni krupni kameni ili umjetni betonski blokovi)

4.8.1.1.1 PROFIL NASIPNOG LUKOBRANA

Nasipni lukobran ima trapezni profil. Širina krune je mala ako je samo zaštitna, ili velika ako je uporabna; t.j. ako se na njoj obavlja promet vozila i prekrcaj.

Minimalna širina zaštitne krune, po kriteriju stabilnosti, odgovara širini 3-4 elementa primarne obloge. Po kriteriju nepreljevanja veća širina se može primijeniti radi smanjenja visine kad to estetika zahtijeva, a što se precizno utvrđuje proračunima i modelskim ispitivanjem. Širina uporabne krune zavisi o namjeni i prema tome mora omogućiti smještaj prekrcajne mehanizacije, prometnica pa čak neki puta i skladišta. S druge strane širina i visina krune posredno ovise o tehnologiji građenja. Naime kruna jezgre mora biti iznad iznad vode i teba biti toliko široka da u fazi građenje s krune omogući rad i smještaj građevinske mehanizacije (mimoilaženje kiperu 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.]).



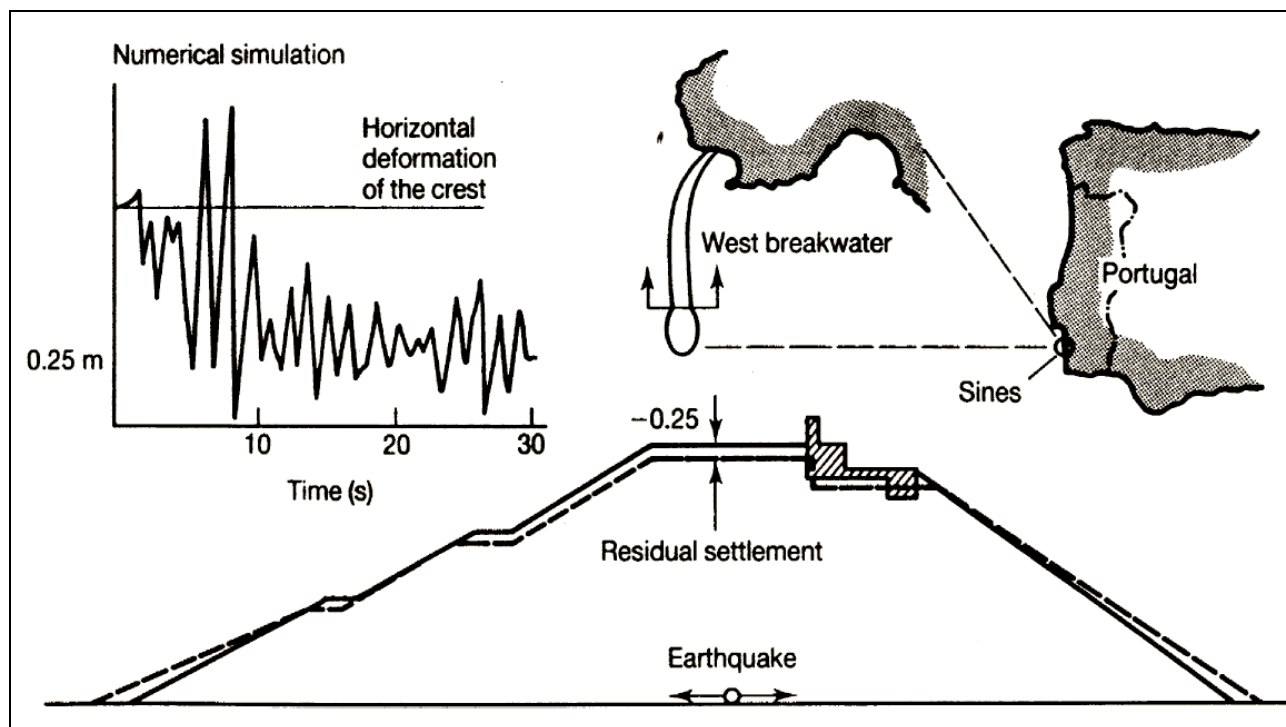
Sl. 4.8.1.1.1::1 Određivanje visine krune nasipnog lukobrana

I u pogledu *visine krune* ima razlika. 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. 4.8.1.1.1::1). 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 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.

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. 4.8.1.1.1::2. 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 $5 \times$ veća od 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

pješčanih obaloutvrda s asfaltnom oblogom). Standardni nagibi lukobrana s oblogom od kamenih blokova su: 1:1,5 vanjski i 1:1,25 unutarnji.



Sl. 4.8.1.1.1::2 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. 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.

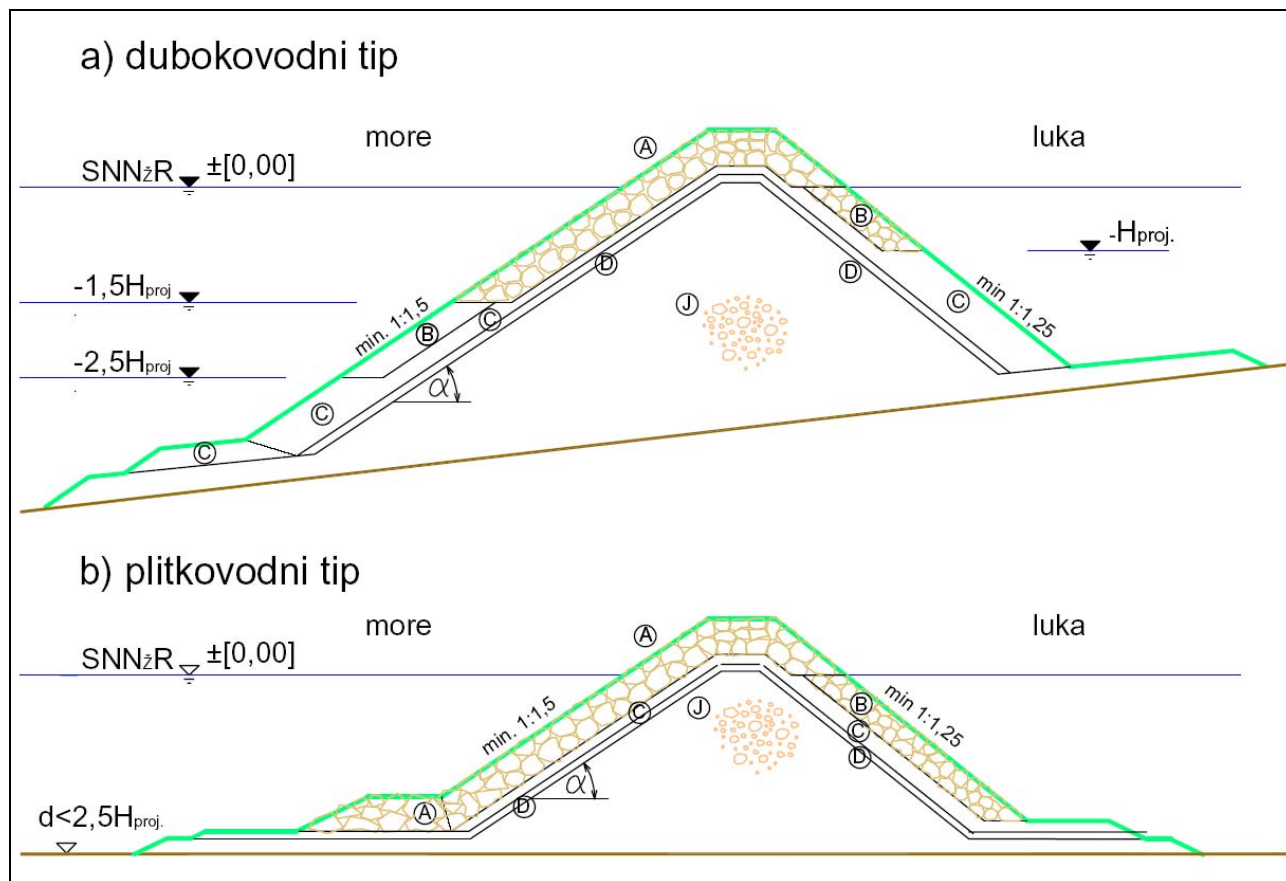
Prilikom nasipanja (krupnijeg) kamenja na vrlo mekano dno, npr. na mulj, kamenje prodire duboko u dubinu pa je to "izgubljeni" materijal. Ako sloj mulja nije debeo u takvom slučaju potrebno je prvo postaviti geotekstil i geomrežu, te nasuti posteljicu od sitnijeg materijala da se stvori tepih koji nosi trup. 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.).

4.8.1.1.2 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.).



A – primarna obloga

B – sekundarna obloga

C – filter 1

D – filter 2

J – jezgra četveroslojnog dbkv.

J – jezgra četveroslojnog plv.

J – jezgra troslojnog dbkv.

J – jezgra troslojnog plv.

$$H_{proj}^{konstr} = H_{1/10}^{100g} = 1,27 H_S^{100g}$$

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

G (±25%)

G/2 (±25%)

G/10 (±30%)

G/200 (±50%)

G/4000 do G/6000, ali veći ne smetaju!

G/4000, ali veći ne smetaju!

G/200 do G/6000

G/200 do G/4000

PR = 100 godina, projektni val za stabilnost obloge

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

Sl. 4.8.1.1.2::1 Četveroslojni nasipni lukobran s usko graduiranom oblogom

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. 4.8.1.1.2::1). Kod manjih lukobrana česti su i troslojni lukobrani sastavljeni iz primarne obloge, filtera i jezgre.

Primarna obloga "A" u pravilu je grubo hrapava jer se izvodi od velikih elemenata, 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 4.8.1.1.2::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).

Hudsonova formula za stabilnost obloge u valnoj klimi reprezentiranoj projektnom valnom visinom H_{proj} :

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

$$\rho_m = 1026 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$\rho_{obl} = 2650 \text{ [kg/m}^3\text{]} \text{ za kamen}$$

$$\text{ i } 2400 \text{ [kg/m}^3\text{]} \text{ za beton}$$

$$K_D = 2,5 \text{ (kamen)}$$

$$K_D = 8 \text{ (tetrapodi)}$$

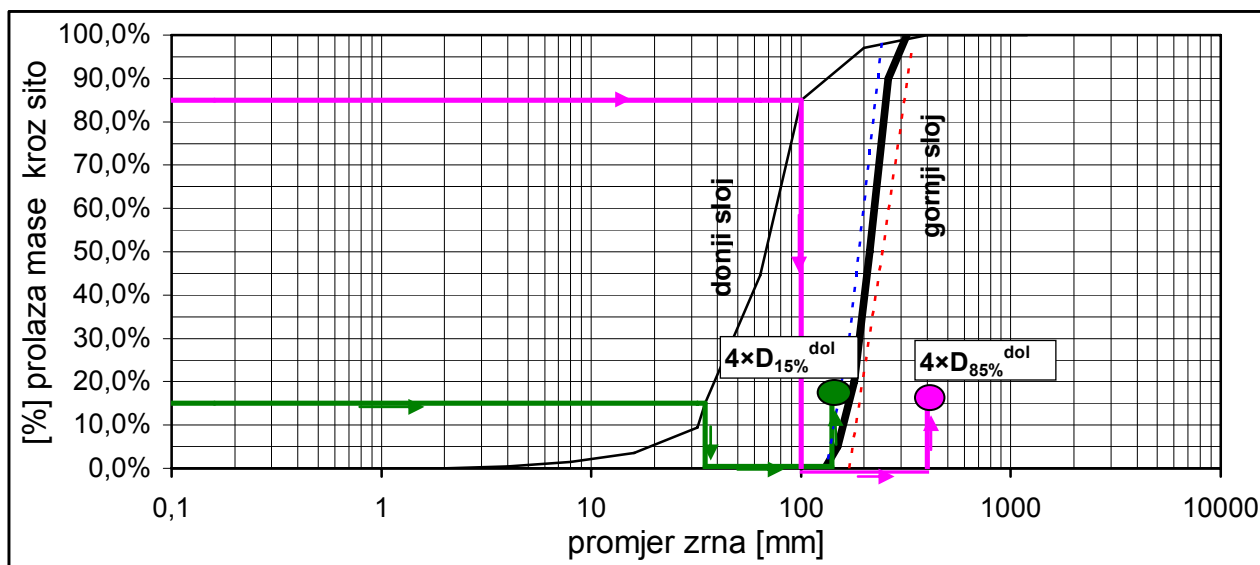
$$H_{proj} = H_{1/10}^{100g} = 1,27 H_S^{100g}$$

Filtersko pravilo

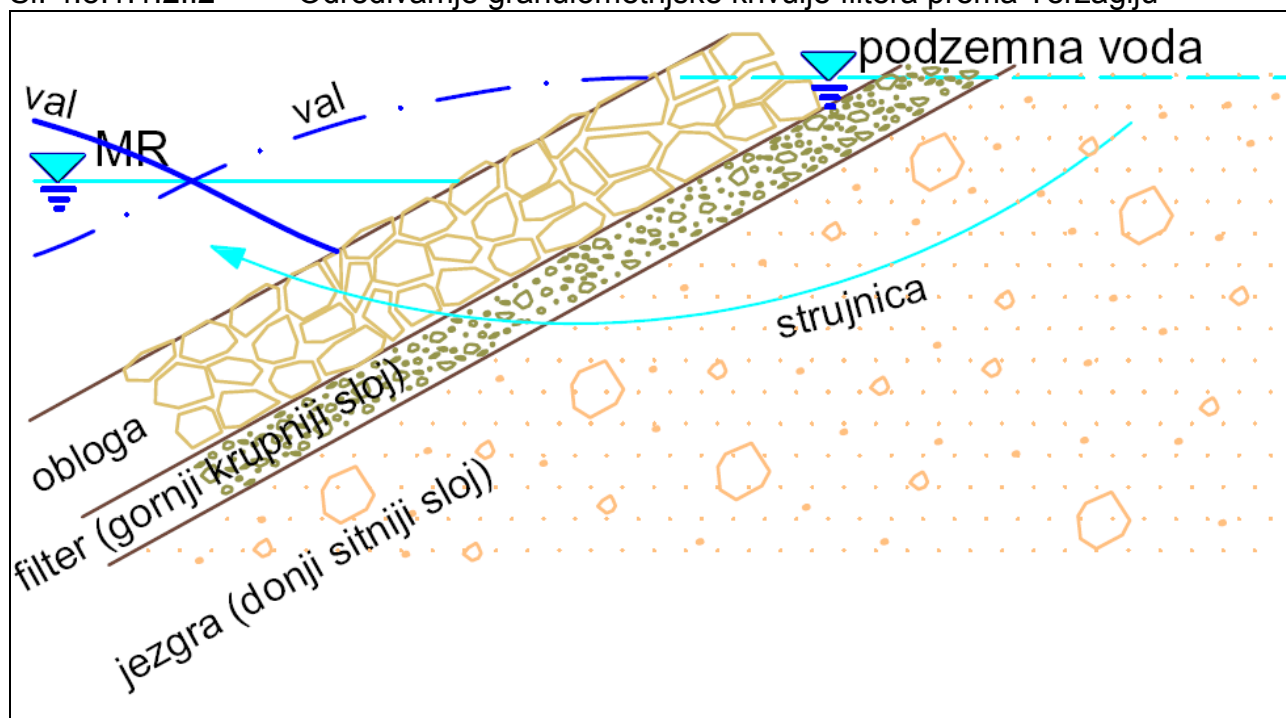
Filtersko pravilo definira princip da sitna zrna materijala ispod filtera (donji sloj) ne mogu biti strujanjem vode izvučena kroz šupljine filtera (gornji sloj), Sl. 4.8.1.1.2::3.

Granulometrijska krivulja usko građuiranih filtera lukobrana (gornji sloj) prema Terzagiju (Sl. 4.8.1.1.2::2) mora se nalaziti u slijedećem granulometrijskom području:

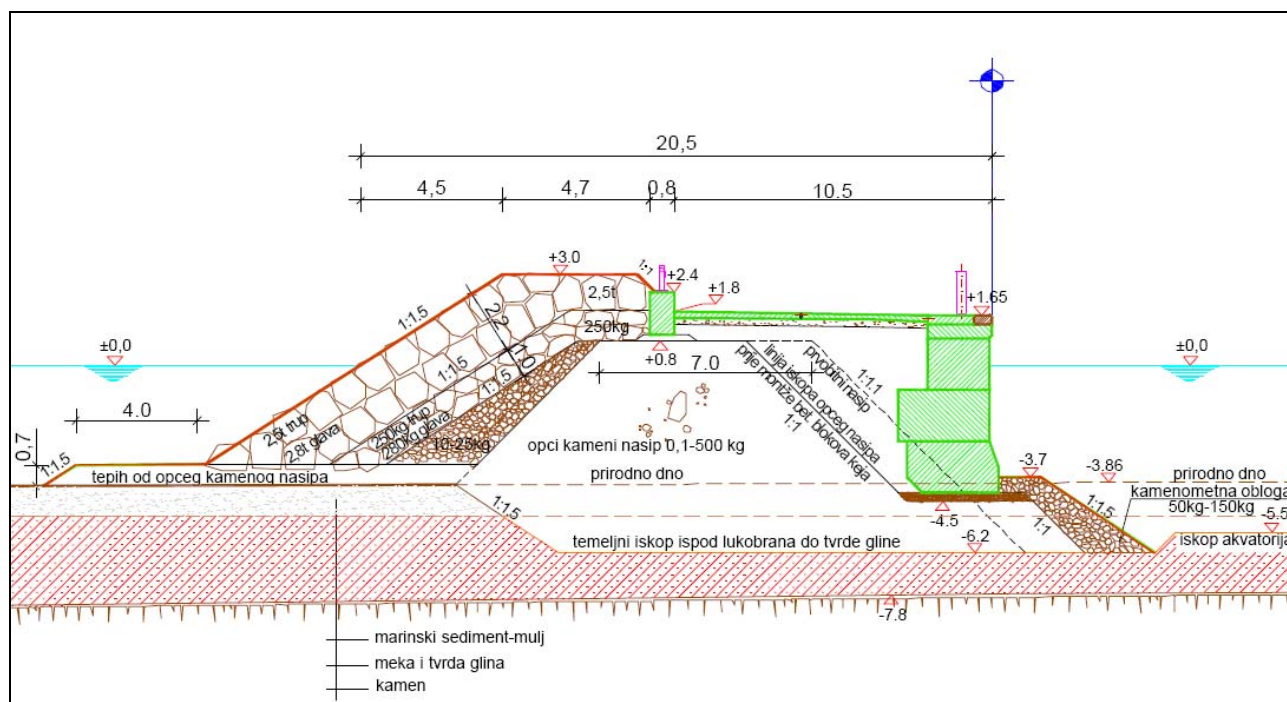
$$4 \times D_{85\%}^{\text{donje}} \geq D_{15\%}^{\text{gornje}} \geq 4 \times D_{15\%}^{\text{donje}}$$



Sl. 4.8.1.1.2::2 Određivanje granulometrijske krivulje filtera prema Terzagiju



Sl. 4.8.1.1.2::3 Principijelni prikaz strujanja mora unutar nasipnog lukobrana čija se intencija ispiranja sitnih čestica jezgre sprečava filterom na površini pokosa



Sl. 4.8.1.1.2::3 Nasipni lukobran s upotrebom krunom i gravitacijskim kejom u marini NOVIGRAD

4.8.1.2 LUKOBRAN TIP 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. 4.8.1.2.1::1). Dubina zida (D) je veća od dubine loma vala ($D \geq 2 H_{proj}^{konstr.}$), pa je podvrgnut samo reflektiranim valovima (manji hidrodinamički tlakovi od valova). Prednosti su mu:

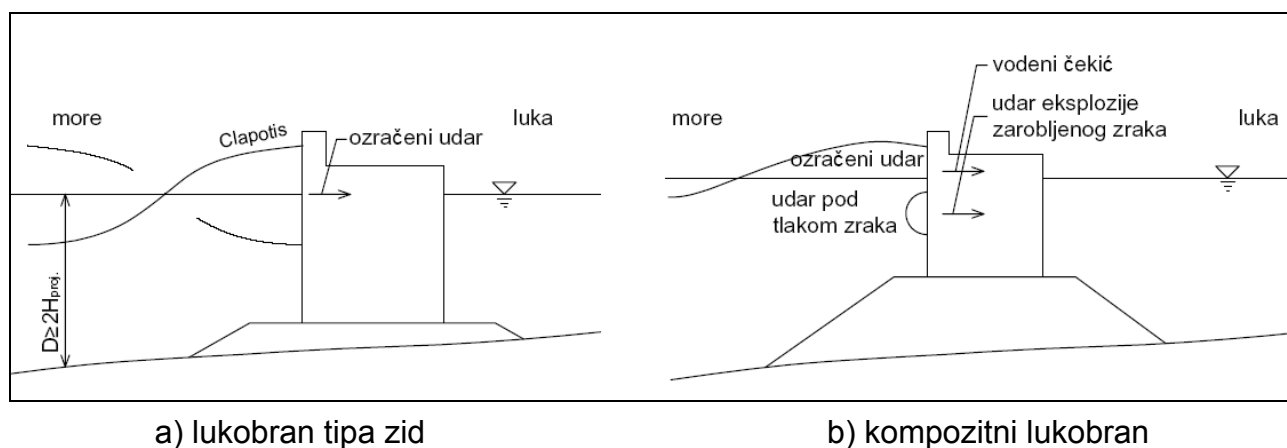
- ekonomičan je s materijalom,
- prilično brzo se gradi,
- zauzima malo prostora,
- s lučke strane se formira kej,
- ako je slabo temeljno tlo može se čak temeljiti na pilotima,
- po kruni mu se u fazi građenja može kretati građevinska, a u fazi eksploatacije prekrcajna mehanizacija,
- dokazan je u primjeni.

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. 4.8.1.2::1) koji se sastoji od visokog podmorskog nasipa na čijem je vrhu neki zid (Sl. 4.8.1.2::1). Dubina zida (D) je manja od dubine loma vala ($D < 2 H_{proj}^{konstr.}$), 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.

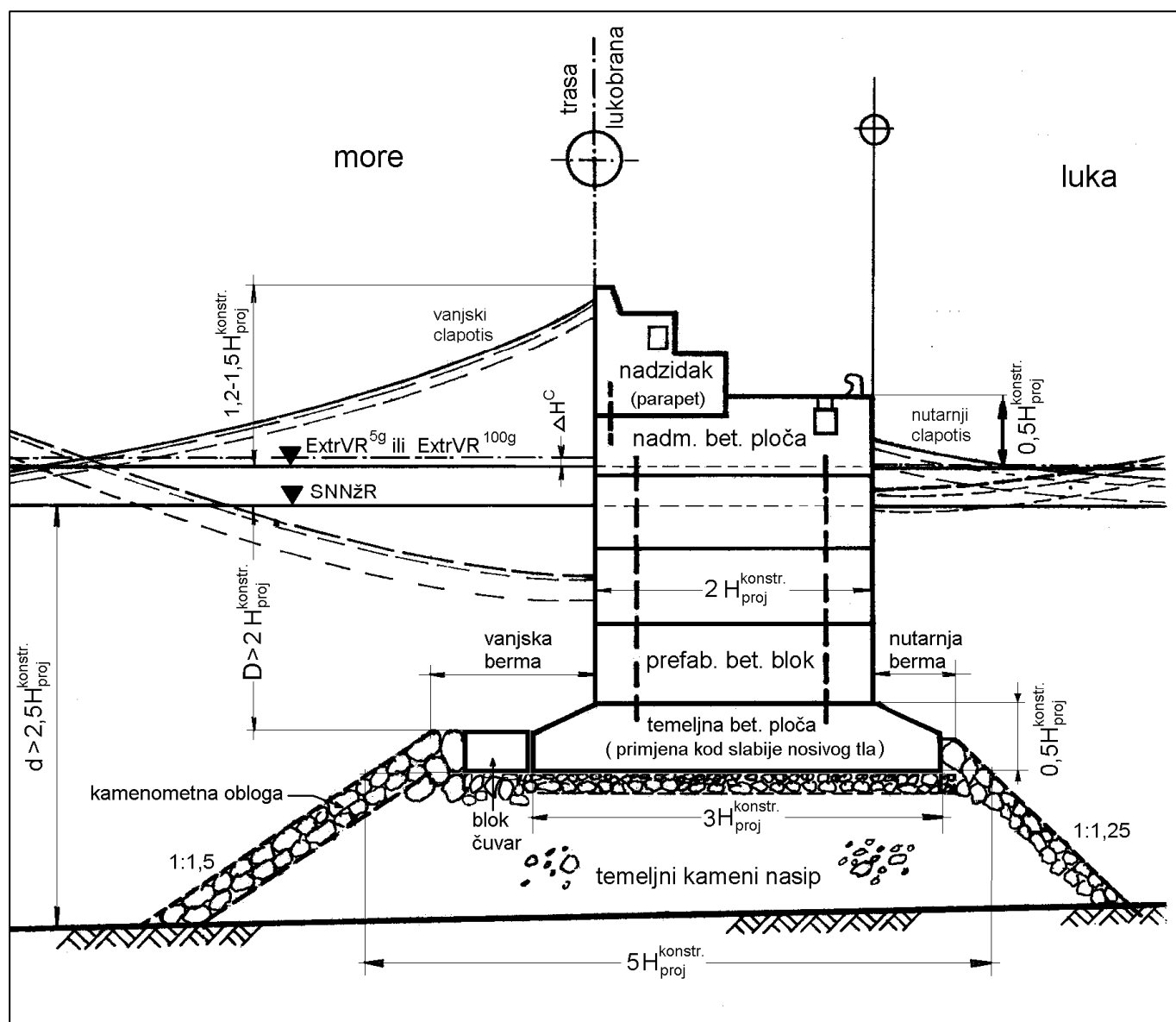


Sl. 4.8.1.2::1 Različiti slučajevi opterećenja od valova na lukobranu tipa zid (manje sile od clapotisa), i na kompozitnom lukobranu (veće sile od lomljenog vala)

4.8.1.2.1 PROFIL LUKOBRANA TIPRA ZID

Lukobran tipa zid (za nelomljene valove) treba biti trasiran na dubiniorskog dna većoj od 2,5 visine projektnog vala ($d \geq 2,5 H_{proj}^{konstr.} = 2,5 H_{max}^{100 god}$), 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 pliđi od 2 visine projektnog vala ($D \geq 2 H_{proj}^{konstr.} = 2 H_{max}^{100 god}$) 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. VR⁵⁹), 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. 4.8.1.2.1::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

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

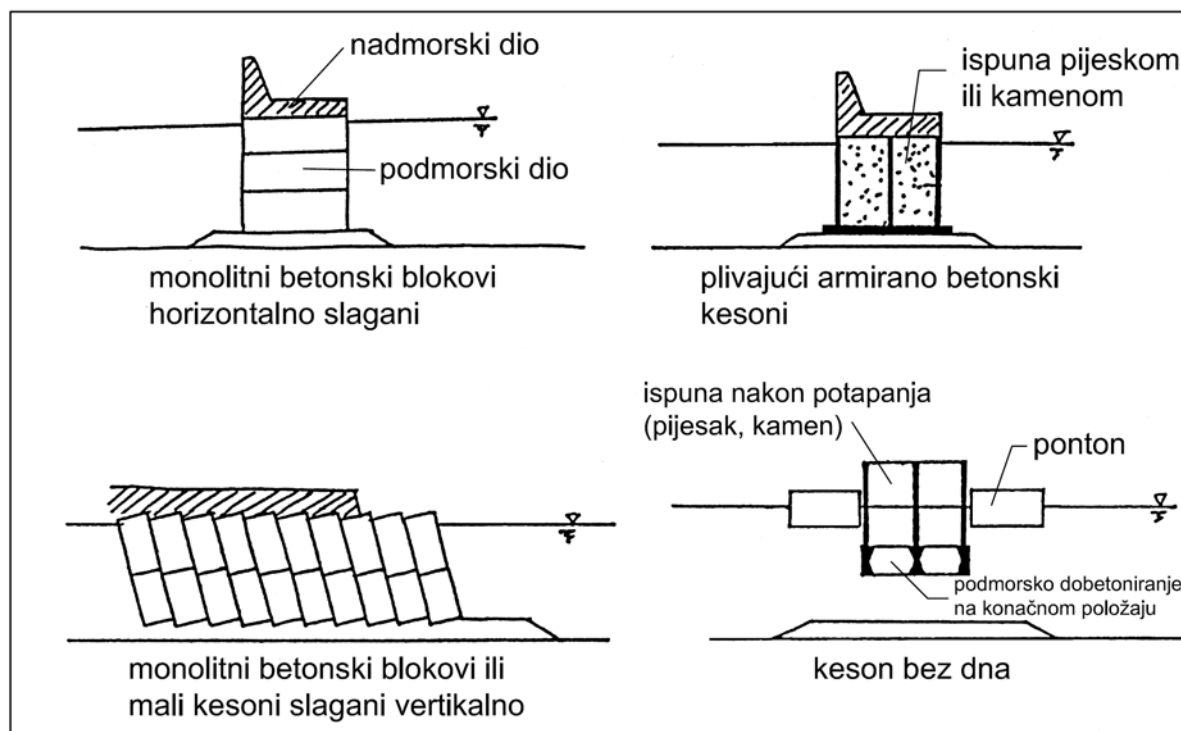
PR = 100 ili 5 godina, projektni val za visinu krune

Sl. 4.8.1.2.1::1 Približne dimenzije vertikalnog lukobrana prema Laras-u

4.8.1.2.2 PRESJEK LUKOBRANA TIP A ZID

Lukobran tipa zid se izrađuje u raznim varijacijama presjeka kao na pr.: slagani monolitni betonski blokovi (Sl. 4.8.1.2.2::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.



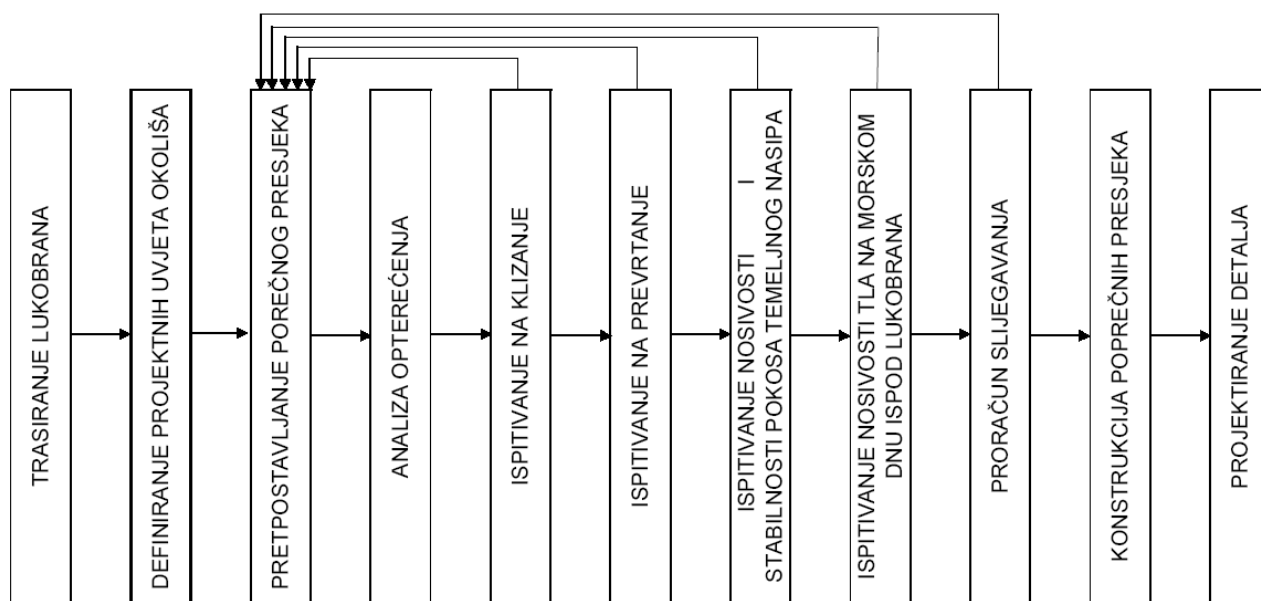
Sl. 4.8.1.2.2::1 Razne varijante lukobrana tipa zid

4.8.1.2.3 PRORAČUN KONSTRUKCIJE LUKOBRA NA TIP A 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.

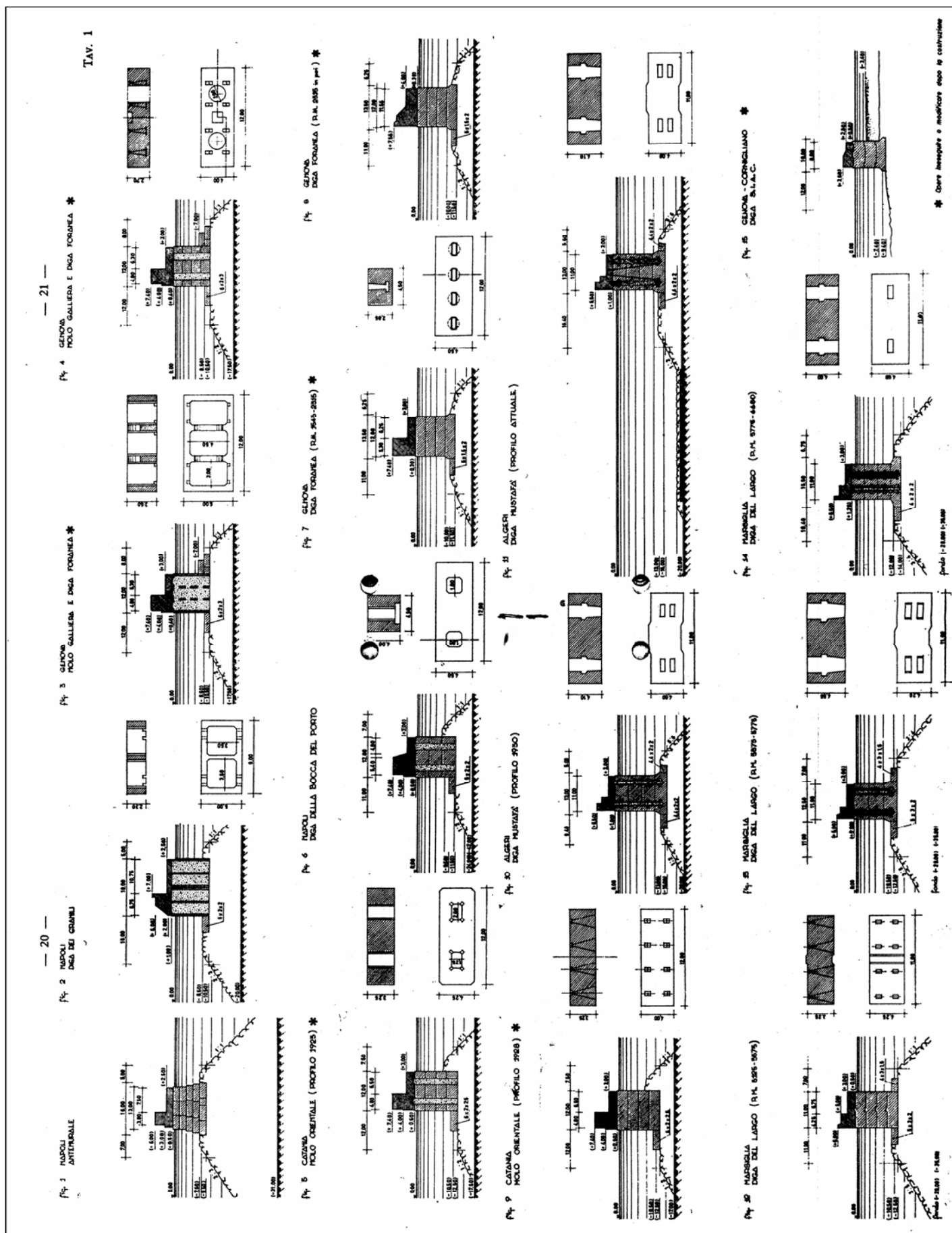
U pogledu čvrstoće, monolitni (nearmirani) betonski blokovi ne smiju dobiti vlačna naprezanja za redovna (stalna i promjenjiva) opterećenja, što se dokazuje položajem rezultante koja tada mora biti u jezgri presjeka. Za izvanredna opterećenja rezultanta u maloj mjeri može izaći iz jezgre. Kod armiranobetonskih 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 vjetrova 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 4.8.1.2.3::1 Dijagram toka projektiranja lukobrana

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

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



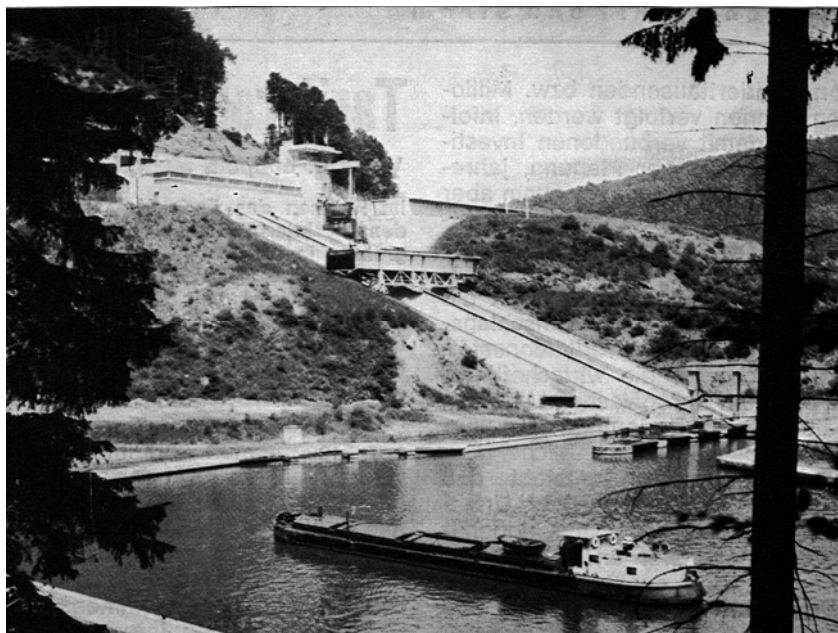
Slika 4.8.1.2.2::2

Primjeri izgrađenih lukobrana tipa zid

4.9 UREĐAJI ZA SVLADAVANJE VISINSKIH PREPREKA NA PLOVNIM PUTEVIMA

Kad je na plovnom putu potrebno plovilo dignuti ili spustiti za visinu brane na rijeci, za visinu plovne stepenice na kanalu, za visinsku razliku među oceanima ili s mora u lučki bazen zatvoren za utjecaje plime to se postiže na dva načina: prevodnicom (Sl. 4.9::3 do 4.9::6) za manje visine ili brodskim dizalom (Sl. 4.9::1 do 4.9::2) za veće visine. Oba ova načina traže posebnu građevinu i znače zadržavanje u plovidbi. Optimalan izbor načina prevođenja podrazumijeva minimizaciju troškova izgradnje, eksploatacije i održavanja. Ipak glavni dio te optimalizacije leži u trošku izgradnje. Ogromna većina takvih uređaja je na rijekama. Na moru su rjeđi, ali puno većih dimenzija, jer su morski brodovi 10 i više puta veći od unutrašnjih.

Iskustvo je pokazalo da je granična visina prevođenja kod prevodnica unutarnje plovidbe na zemljanom tlu 20-25 m, a na stijeni 30-35 m. Nizom brodskih prevodnica može se svladati visina 40-60 m kojemu su dizala već veoma konkurentna. Preko 70 m denivelacije vodnih lica najčešće je opravdano dizalo (sl. 4.9::3). Ograničenje visine prevodnica je konstruktivnog i prometnog karaktera, a primjena dizala je ograničena njihovom propusnom moći. Dizala naime imaju male dimenzije te ne mogu primiti cijeli sastav.

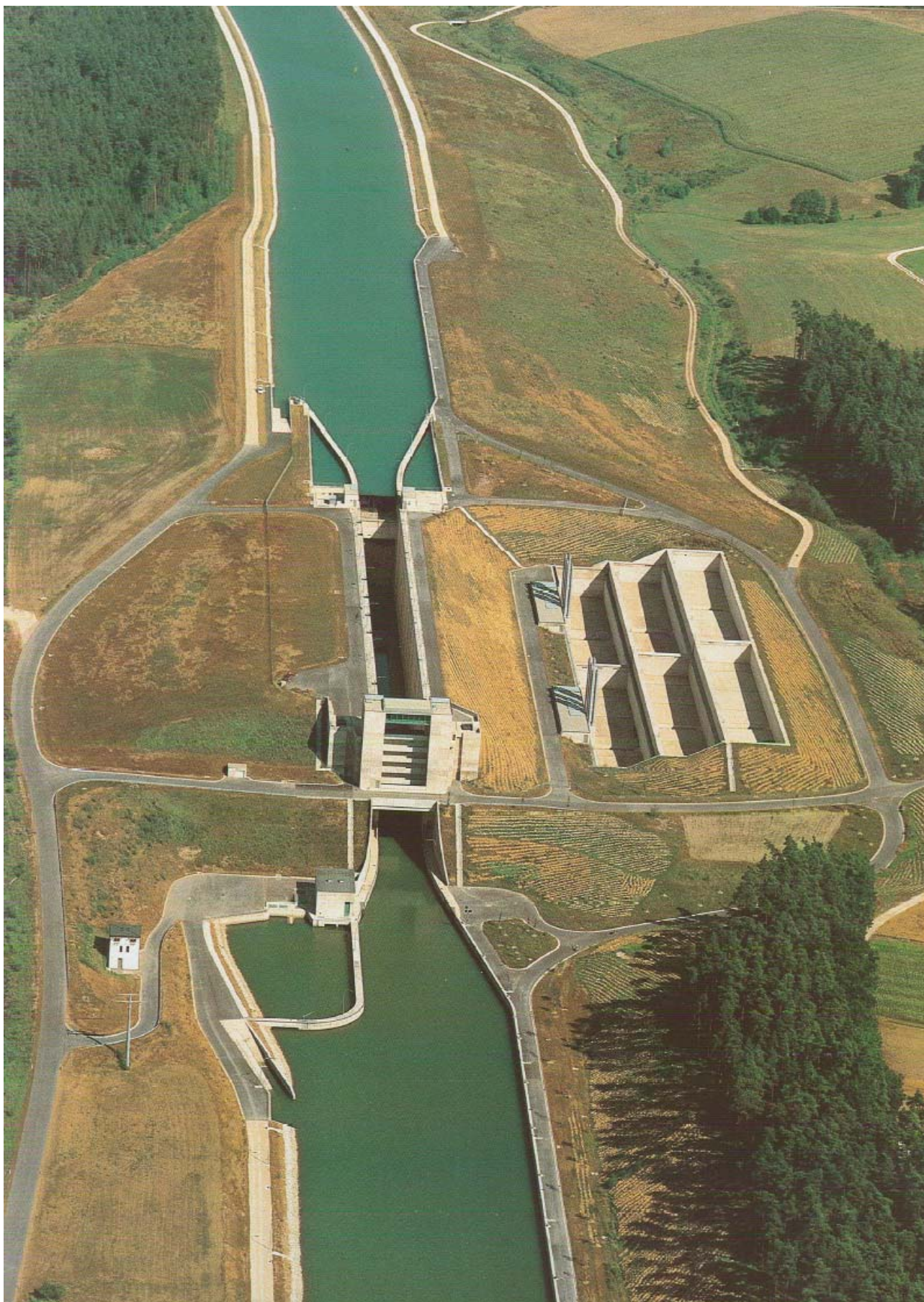


Slika 4.9::1 Brodsko dizalo Arzviller na Rajna-Marna kanalu. Ima visinu prevođenja 44,5 m i zamjenjuje 7 prevodnica čime se uštedi cca 1 dan plovidbe. Mjerodavni brod je nosivosti 400 t [43]

Prevodnica (njem. – Schleuse, engl. – navigation lock) ima zadatak podignuti ili spustiti plovilo za visinu plovne stepenice. Ovo se vrši punjenjem i pražnjenjem betonske komore u kojoj je plovilo, ili plovila. Komora je na oba kraja zatvorena čeličnim vratima smještenim u gornjoj i donjoj masivnoj betonskoj glavi prevodnice. Ispred glava; t.j. u plovnom putu nalaze se gornja i donja predluka za čekanje plovila na prevođenje. Između predluka i glava prevodnice je betonska usmjerena građevina koja služi uvođenja plovila kroz glavu u komoru (Sl. 4.9.1.3::6)



Slika 4.9::2 Brodsko dizalo "Falkirk Wheel" na kanalu Forth & Clyde u Škotskoj. Ima visinu prevođenja 24 m, trajanje prevođenja 15 min i mjerodavni brod dužine 25m, deplasmana 300 t. Služi u turističke svrhe. [Internet]



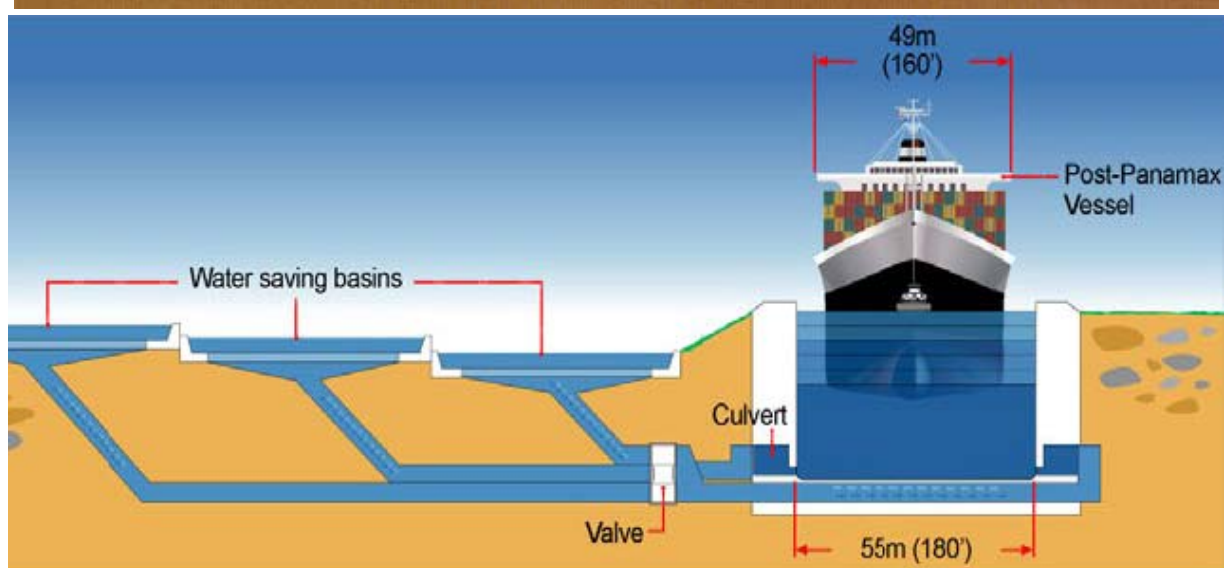
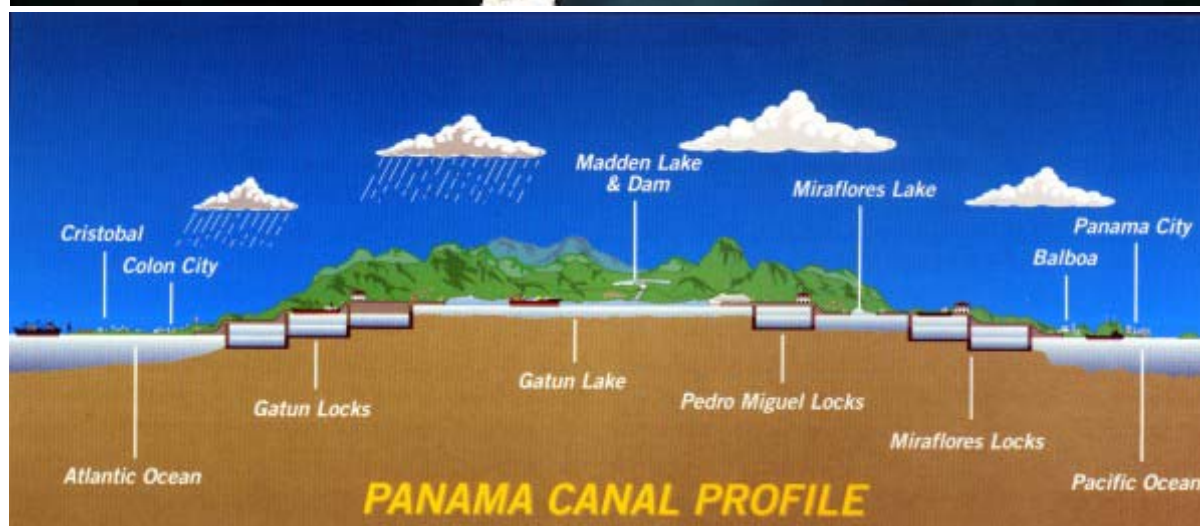
Slika 4.9::3 Štedna prevodnica na RMD kanalu, visina dizanja oko 25[m] [Prospekt RMD 20xy]



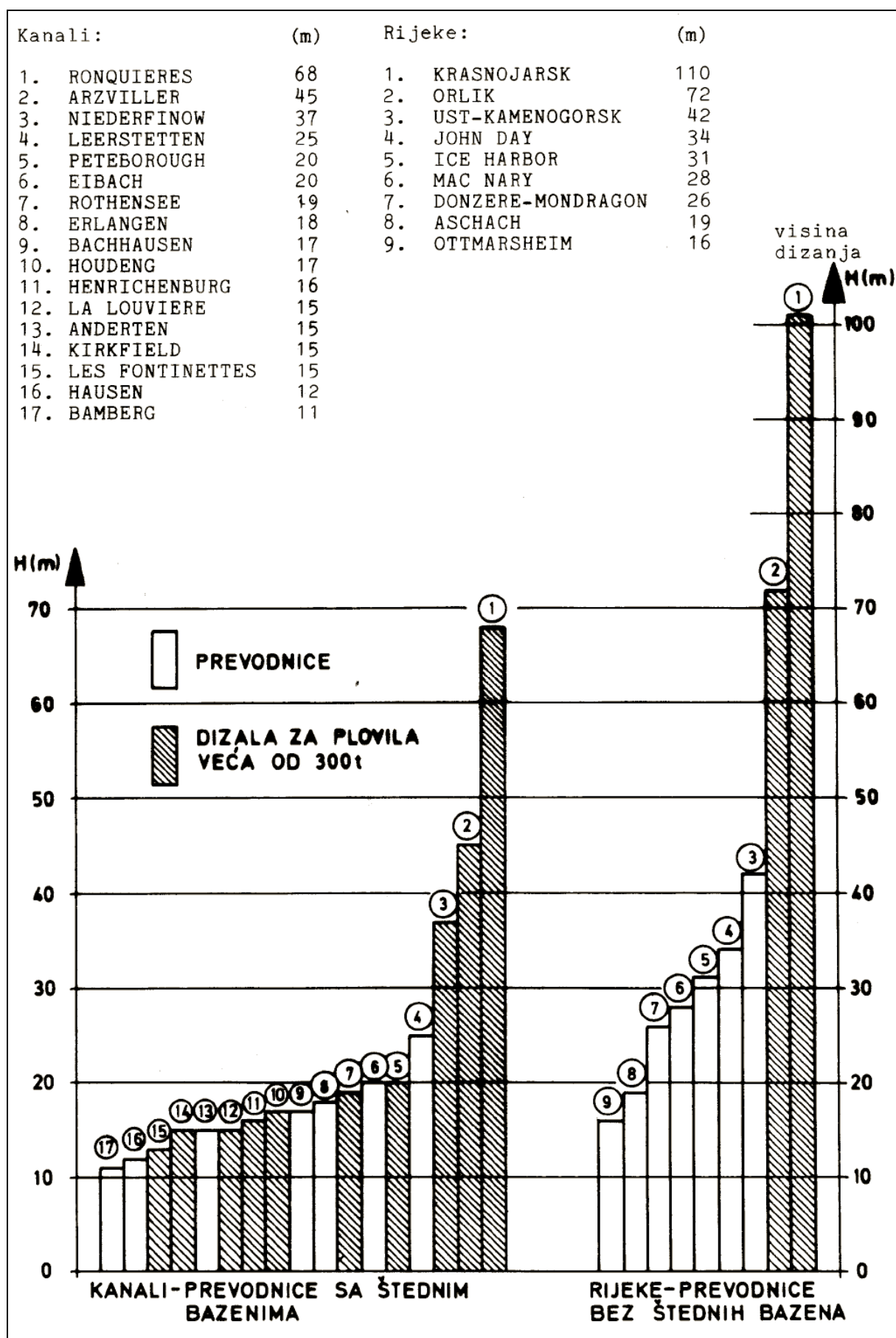
Slika 4.9::4 Dvojna prevodnica na na višenamjenskoj akumulaciji Gabčíkovo, Dunav u Slovačkoj [Prospekt RMD 20xy] n



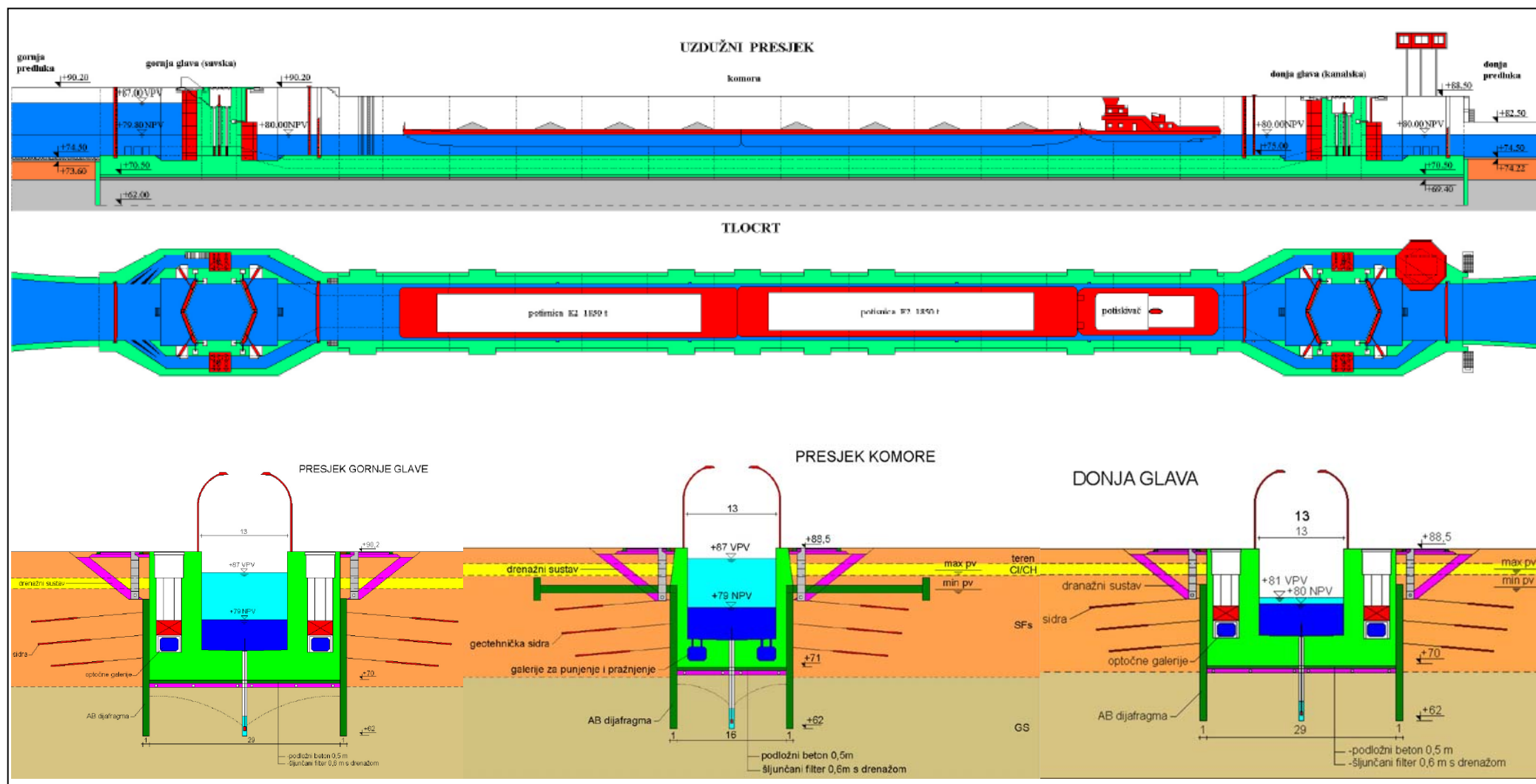
Slika 4.9.:5 Pevodnice u nizu idizalo za čamce na akumulaciji Three Gorges, Jang Tse Qjang, Kina 2002. visina dizanja 110[m]



Sl. 4.9::6 Dvojna morska brodska prevodnica u nizu na Panamskom kanalu i buduća



Slika 4.9::7 Visine dizanja brodskih prevodnica i dizala na unutarnjim plovim putevima [17]



Sl. 4.9.1.3::6 Mmonolitna AB okvirna komora prevodnice i AB glave prevodnice hidročvora Sava na kanalu Dunav-Sava, projekt 1998. [Idejni proj KDS 1998.]

