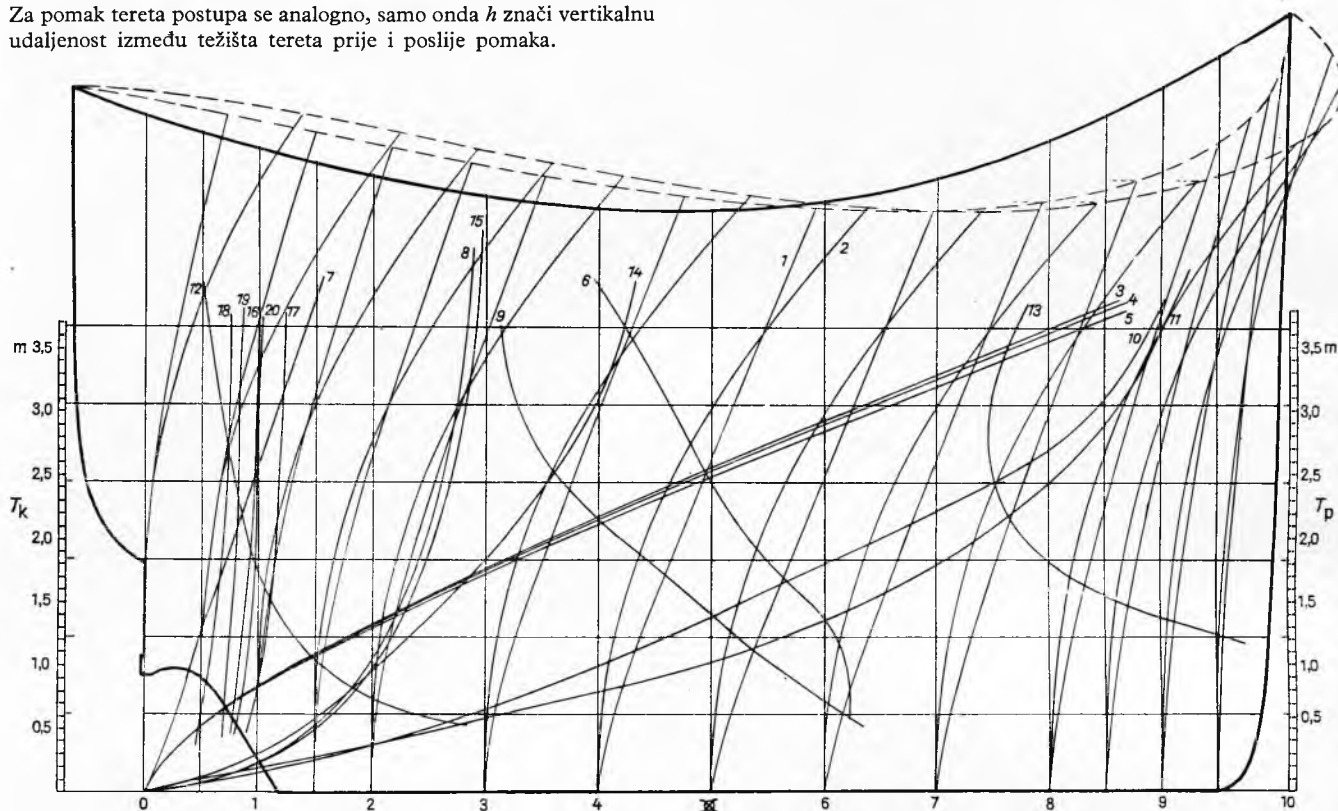


nakon ukrcaja (iskrcaja) tereta, pa se nova početna metacentarska visina dobiva prema formuli:

$$\overline{M}_0 G_1 = \overline{K} M_0 - (\overline{K} G + \overline{G} G_1).$$

Za pomak tereta postupa se analogno, samo onda  $h$  znači vertikalnu udaljenost između težišta tereta prije i poslije pomaka.

praktičnu upotrebu najzgodniji je Petersenov dijagram (sl. 10). Na apscisu os toga dijagrama nanese su uzdužni momenti težine broda (tj. umnožak težine broda  $\Delta$  i udaljenosti težišta sistema



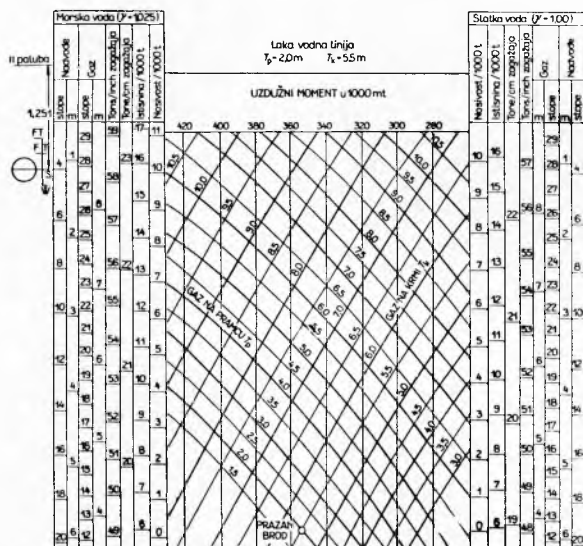
Sl. 9. Dijagramski list. Nanesene su krivulje: 1 površine rebara, 2 momenti površina rebara, 3 istisnina broda na rebrima (od rebra 0), 4 istisnina broda s privjescima (kormilo, ljuljina kobilica, oplata; od r. 0), 5 istisnina u morskoj vodi, 6 apscisa težišta istisnine (od glavnog rebra), 7 aplikata težišta istisnine (od r. 0), 8 površine vodnih linija (od r. 0), 9 apscise težišta vodnih linija (od glavnog rebra), 10 uzdužni moment tromosti vodne linije (od r. 0), 11 poprečni moment tromosti vodnih linija, 12 uzdužni metacentarski radijus, 13 poprečni metacentarski radijus (od krivulje aplikata težišta istisnine u istom mjerilu), 14 jedinični moment pretege (od r. 0), 15 tone po centimetru zagažaja (od r. 0), 16 koeficijent vodne linije  $\alpha$ , 17 koeficijent glavnog rebra  $\beta$ , 18 koeficijent istisnine  $\delta$ , 19 uzdužni prizmatički koeficijent  $\varphi$ , 20 vertikalni prizmatički koeficijent  $\varphi_v$ .

Za veće promjene trima, kao npr. brodova sa strojarnicom na krmi, dijagramski list, u kojemu se računa sa srednjim gazom, ne daje više tačne podatke. Zbog toga se za takve brodove konstruiraju dijagrami trima iz kojih se u ovisnosti od gaza na pramcu i krmi broda može odrediti istisnina i položaj njenog težišta, kao i položaj početnog metacentra. Ima više tipova takvih dijagrama, a za

$G$  od glavnog rebra), a na ordinatnu os njegova istisnina, odnosno nosivost za različite vrijednosti gazova na pramcu i krmi broda (ukrižane linije u dijagramu). Prije ukrcaja tereta kapetan očita gazove na pramcu i krmi broda pa unese u sjecištu odgovarajućih linija jednu tačku u dijagram. Ona određuje nosivost i uzdužni moment prije ukrcaja (iskrcaja) tereta. Nosivost nakon ukrcaja tereta dobiva se tako da se zbroje ukrcani teret i nosivost prije ukrcaja tereta, a uzdužni moment tako da se umnožak težine tereta i njegove udaljenosti od glavnog rebra pribroji uzdužnom momentu prije ukrcaja tereta ako se težište tog tereta nalazi iza glavnog rebra, odnosno odbije od uzdužnog momenta ako je teret ispred glavnog rebra. S tako dobivenim vrijednostima za nosivost (istisninu) i uzdužni moment nalazi se nova tačka u dijagramu, pomoću koje se određuju novi gazovi na pramcu i krmi. Nedostatak je tog dijagrama da ne daje ujedno i položaje početnog metacentra, kao drugi dijagrami trima (npr. dijagram Russo).

#### STABILITET BRODA

Stabilitet je sposobnost broda da se odupire nagibanju izazvanom djelovanjem vanjskih sila ili pomakom masa na brodu, kao i sposobnost da se vrati u raniji položaj ravnoteže nakon što uzroci poremećenja prestanu djelovati. S obzirom na smier nagibanja razlikuje se *poprečni stabilitet* broda i *uzdužni stabilitet* broda. Stabilitet ovisi o formi trupa broda i rasporedu masa na brodu, pa se može podijeliti na *stabilitet forme* i *stabilitet težina*. *Statički stabilitet* je otpor broda protiv djelovanja prekretnih momenata koji nagibaju brod. *Dinamički stabilitet* je rad koji treba da vrše vanjske sile da bi izvele brod iz položaja uspravne ravnoteže. Da bi se mogao odrediti stabilitet nekog broda, treba poznavati prirodu i veličinu vanjskih sila koje na njega djeluju i unutarnje sile sistema koje im se odupiru. Brod mora uvijek ploviti u položaju



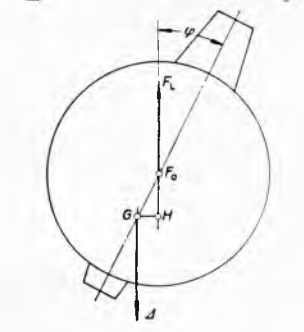
Sl. 10. Petersenov dijagram trima. (Lijevo oznaka najmanjeg nadvođa prema međunarodnim propisima: F slatka voda, T tropi, S ljeto, W zima)

stabilne ravnoteže. Položaji labilne i indiferentne ravnoteže broda su nedopustivi jer bi prouzrokovali prevrtanje i gubitak broda.

Francuski hidrograf P. Bouguer u svojoj knjizi *Traité du navire, de sa construction et de ses mouvements* (O brodu, njegovoj konstrukciji i njegovim gibanjima) dao je 1746 prvi put definiciju stabilneta broda u današnjem smislu. On je uveo pojam i naziv za metacentar, pokazao je način njegova određivanja i njegovu važnost za stabilitet broda. Bouguer je također opisao pokus nagiba i otkrio je da se pri nagibanju broda metacentar pomiče po krivulji čiji oblik ovisi o podvodnoj formi broda i kojoj je dao ime metacentarska krivulja. Znameniti matematičari L. Euler i D. Bernoulli mnogo su se bavili teorijom broda. Naročito je poznata Eulerova knjiga *Scientia Navalis* (1749). G. Atwood, prvi Englez koji se je bavio stabilitetom, u svojim radovima (1796—1798) pokazao je da se stabilitet nekog broda može prikazati i bez pojma metacentra ako se promatraju klinovi brodske forme između vodnih linija uspravnog i nagnutog broda. Rano je uočena i važnost dinamičkog ponašanja broda uslijed djelovanja valova, i to područje je obrađeno u radovima Eulera, Bernoullija i D. Poissona. Zbog visokog teorijskog nivoa tih radova, oni su ostali potpuno nepoznati brodograditeljima onog doba. Naime, u doba jedrenjaka, kada su se brodovi gradili samo prema iskustvu, brodograditelji nisu imali matematičko znanje potrebno da bi mogli razumjeti rasprave Eulera i Poissona. Prvi je praktično primijenio radove teoretičara švedski inženjer F. Chapman koji je krajem XVIII st. vršio pokuse nagiba na ratnim brodovima. 1860. god. osnovano je Udruženje engleskih brodograditelja (Institution of Naval Architects), i u analizama tog Udruženja u drugoj polovici XIX st. razvijeni su svi osnovni pojmovi na kojima danas počiva nauka o stabilitetu broda. W. Froude je dao svoju klasičnu teoriju o liuljanju broda, a E. Reed razjasnio odnose između forme broda i toka krivulje težišta istisnine. Pod kraj XIX stoljeća objelodanene su i prve metode proračuna krivulje poluga stabilneta pomoću površina i momenata površina rebara (Fellow, Middendorff), kao i metode predočivanja proračuna stabilneta (Daynard). U XX stoljeću razrađeno je nekoliko metoda za tačnije proračunavanje krivulje poluga stabilneta, osobito kod malih nagiba (metode Kempfa, Hernera, Horna, Wendela i dr.). Rješava se i problem stabilneta kod prodora vode (metoda ruskog učenjaka Krylova), te se izdaju propisi kojima mora zadovoljiti stabilitet broda kod prodora vode (*Međunarodna konvencija za zaštitu ljudskog života na moru*).

U novije vrijeme pokušava se problem stabilneta riješiti sa dinamičkog stanovišta, tj. ne promatra se više brod na mirnoj vodi, nego na valovima pod dinamičkim djelovanjem vjetra i ostalih vanjskih sila. Time se prelazi na područje teorijske hidrodinamike, koja povezuje stabilitet s drugim granama teorije broda kao što su kormilarenje, manevarska i maritima svojstva broda. Na tom području, nastavljajući klasične radove Eulera i Bernoullija, istakli su se naročito: Krylov, Pavlenko, Firsov, Horn, von den Steinen, Wendel, Weinblum i drugi.

**Stabilitet težina i stabilitet forme.** Tijelo potpuno uronjeno u tekućinu (npr. podmornica) ima stabilan položaj samo ako se težište sistema nalazi ispod težišta istisnine (sl. 1), jer se samo onda pri nagibanju nastali moment para sila, težine i uzgona:

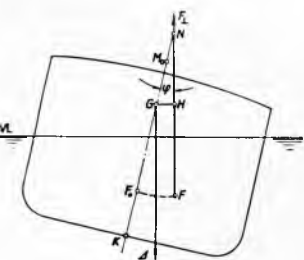


Sl. 1. Stabilitet podmornice

$$M_{st} = \Delta \cdot \overline{F_0 G} \cdot \sin \varphi$$

suprotstavlja nagibanju. Stabilitet podmornice u uronjenom stanju ovisi dakle o položaju težišta sistema, odnosno o smještaju težina, pa se naziva *stabilitet težina*. Forma uronjenog tijela se ne mijenja kad se tijelo nagiba, zato stabilitet forme u tom slučaju ne postoji. Površinski brodovi, naprotiv, mijenjaju za vrijeme nagibanja oblik podvodnog dijela (sl. 2), pa se težište istisnine pomiče iz

$F_0$  u  $F$ , tako da nastaje pozitivan moment statičkog stabilneta, premda se težište sistema  $G$  nalazi iznad težišta istisnine  $F_0$ . Uslov za pozitivan moment statičkog stabilneta jest da se tačka  $N$ , u kojoj smjer uzgona siječe simetralu broda, a koja se naziva *privednim metacentrom*, nalazi iznad težišta sistema  $G$ . Budući da se djelovanje jedne sile ne mijenja ako se ona pomiče u pravcu svoga djelovanja, to se može zamisliti da uzgon djeluje iz tačke  $N$  umjesto iz tačke  $F$ , pa je hvatište uzgona za stabilan položaj broda iznad hvatišta težine, kao i na sl. 1.



Sl. 2. Stabilitet broda

Dakle, osim o smještaju težina (koji uvjetuje položaj tačke  $G$ ), stabilitet ovisi i o podvodnoj formi broda (koja uvjetuje položaj tačaka  $F$  i  $N$ ), pa se govori, osim o stabilitetu težina, i o *stabilitetu forme*. Zato se izraz za moment statičkog stabilneta

$$M_{st} = \Delta \cdot \overline{NG} \cdot \sin \varphi$$

može rastaviti na dva dijela:

$$M_{st} = \Delta \cdot (\overline{NF_0} - \overline{F_0 G}) \cdot \sin \varphi,$$

pa prvi član daje stabilitet forme, koji je pozitivan jer je  $N$  iznad  $F_0$ , a drugi član daje stabilitet težina, koji je negativan jer je iz praktičnih razloga  $F_0$  skoro uvijek ispod  $G$ . Izuzetak su regatne jedrilice, kod kojih se pomoću specijalne teške balastne kobilice spušta  $G$  ispod  $F_0$ , pa za njih vrijedi formula:

$$M_{st} = \Delta \cdot (\overline{NF_0} + \overline{F_0 G}) \cdot \sin \varphi$$

Brod će biti to stabilniji što je niže tačka  $G$  i što je više tačka  $N$ . Tačka  $G$  će ležati nisko ako su glavne težine i tereti smješteni nisko, a tačka  $N$  leži to više što je veći ekscentricitet tačke  $F$ , tj. što su veći širina, nadvođe i gaz broda. Otuda i potječe važnost širine i nadvođa za stabilitet broda. Položaji prividnih metacentara  $N$  ovisi i o obliku podvodnog dijela broskog trupa.

**Utjecaj forme broda na stabilitet.** Pod djelovanjem prekretnih momenata brod se može nagibati oko bilo koje osi. Ipak se stabilitet računa samo za nagibanje oko uzdužne osi, jer u tom smjeru forma broda pruža nagibanju najmanji otpor, pa su i nagibi najveći. Ako brod ima dovoljan stabilitet pri nagibanju u poprečnom smjeru, pretpostavlja se da njegov stabilitet i općenito zadovoljava. Kutovi nagiba oko bilo koje osi mogu se proračunati kao rezultante komponentnih nagiba oko poprečne i uzdužne osi broda. Premda ta pretpostavka ne odgovara stvarnom stanju, jer uslijed nesimetrije brodske forme s obzirom na glavno rebro dolazi do uzdužnog nagibanja broda i kad na nj djeluju samo poprečni prekretni momenti, ipak se to u uobičajenom proračunu stabilneta zanemaruje, pa se promatra samo nagib u poprečnom smjeru. Položaj uzdužne osi oko koje se okreće brod određuje se iz uvjeta jednakosti uronjenog i izronjenog klina brodske forme. Kako je:

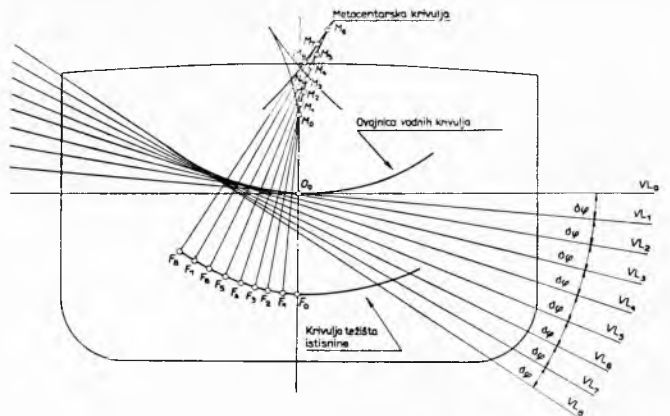
$$V_{ku} = \frac{1}{2} \delta \varphi \int_0^L y_u^2 dx = M_{VLu} \delta \varphi,$$

odnosno:

$$V_{ki} = \frac{1}{2} \delta \varphi \int_0^L y_i^2 dx = M_{VLi} \delta \varphi,$$

mora biti:  $M_{VLu} = M_{VLi}$ , tj. statički moment površine vodne linije na uronjenoj strani broda, s obzirom na uzdužnu os, jednak je statičkom momentu vodne linije na izronjenoj strani broda. To znači da se dvije vodne linije koje zatvaraju dovoljno mali kut  $\delta \varphi$  sijeku u svome težištu. Zato uzdužna os oko koje se brod naginje uvijek prolazi kroz težište  $O$  odgovarajuće nagnute vodne linije. Spoje li se sve tačke  $O$ , dobiva se ovojnica vodnih linija (sl. 3). Kad se brod nagiba u poprečnoj ravnini, može se dakle smatrati da se ovojnica vodnih linija, čvrsto povezana s brodom, odvaljuje po horizontalnoj plovnoj vodnoj liniji  $VL_0$ .

Ako se odrede težišta istisnine  $F$  za sve nagnute vodne linije i dobivene tačke spoje, dobiva se *krivulja težišta istisnine* ( $F$ -krivulja). Pomaci težišta istisnine  $\overline{F_0 F_1}$ ,  $\overline{F_1 F_2}$  itd. paralelni su s odgovarajućim pomacima težišta klinova, pa se po prelazu na graničnu vrijednost,  $\delta \varphi \rightarrow 0$ , pomaci težišta klinova poklapaju s vodnim linijama, a tetive  $F$ -krivulje  $\overline{F_0 F_1}$ ,  $\overline{F_1 F_2}$  itd. s tangentama u tim tačkama. Osnovno je dakle svojstvo  $F$ -krivulje da su njene tangente paralelne s odgovarajućim vodnim linijama. Smjerovi uzgona

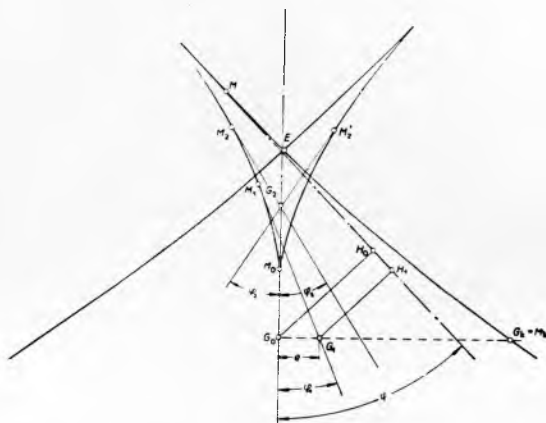


Sl. 3. Metacentarska krivulja, krivulja težišta istisnine i ovojnica vodnih linija

prolaze kroz težišta istisnine  $F$  okomito na pripadne vodne linije. Za mali nagib  $\delta\varphi$  po dva smjera uzgona sijeku se u tačkama  $M$ , koje se zovu *pravi metacentri*, za razliku od prividnih metacentara, tačka  $N$  u kojima smjerovi uzgona sijeku simetralu broda. Kako se smjer uzgona za uspravan brod poklapa sa simetralom broda, to je i početni metacentar pravi metacentar, pa se zato označuje sa  $M$ , a ne sa  $N$ . Geometrijsko mjesto pravih metacentara je *metacentarska krivulja* ( $M$ -krivulja). Iz definicije pravih metacentara slijedi da su oni zapravo središta zakrivljenosti  $F$ -krivulje, pa se zato udaljenosti  $MF$  nazivaju *metacentarski radijusi*, a  $M$ -krivulja je evoluta  $F$ -krivulje.

Ovojnica vodnih linija, krivulja težišta istisnine ( $F$ -krivulja) i metacentarska krivulja ( $M$ -krivulja) karakteristične su za krivulje brodске forme. Za stabilitet broda naročito je važna metacentarska krivulja, odnosno krivulja težišta istisnine, koja je uvjetuje. Matematički se može dokazati da je krivulja težišta istisnine parabola ako su rebra u području vodne linije ravna i na nju okomita, hiperbola ako su ravna i kosa, kružnica ako su rebra kružna, a eliptična ako su jako zakrivljena. Kako je radijus zakrivljenosti parabole i hiperbole najmanji u tjemenu krivulje, a postaje to veći što su dotične tačke krivulje dalje od tjemena, to će i metacentri brodova s ravnim i slabo zakrivljenim rebrima (kad se središte zakrivljenosti rebra i samo rebro nalaze na suprotnim stranama simetralne ravnine broda) za veće nagibe ležati iznad početnog metacentra  $M_0$  (sl. 3). Takvi brodovi imaju pozitivan stabilitet forme (odnosno dodatni stabilitet), pa ako im je početni stabilitet i negativan, neće se prevrnuti. Brodovi s kružnim rebrima imaju središte zakrivljenosti rebara na simetralnoj ravnini, smjerovi uzgona za sve nagibe prolaze kroz istu tačku  $M_0$  (sl. 4), te se može računati s formulama početnog stabiliteta i za veće nagibe. Stabilitet forme tih brodova je jednak nuli. Brodovi s jako zakrivljenim

početnog metacentra  $M_0$  (npr. tačka  $G_0$ ). U slučaju da se težište sistema nalazi iznad  $M_0$  (negativna početna metacentarska visina), brod ne može ploviti u uspravnom položaju, makar se težište sistema i nalazilo u simetralnoj ravnini (npr. u  $G_2$ ), nego će se nagnuti za



Sl. 6 Utjecaj položaja težišta sistema na stabilitet broda

kut  $\varphi_2$  na jedan ili drugi bok. Područje kutova nagiba između  $-\varphi_2$  do  $+\varphi_2$  predstavlja položaje labilne ravnoteže. Brod se naginje od kuta  $\varphi_2$  na jednom boku do kuta  $\varphi_2$  na drugi bok, što može ugroziti stabilitet, pa zato brod u eksploataciji mora imati pozitivnu početnu metacentarsku visinu.

Najviša tačka na simetrali broda na koju može pasti težište sistema jest tačka  $E$ . Ako bi se  $G$  nalazio iznad  $E$ , bilo bi nemoguće iz njega povući tangentu na metacentarsku krivulju i brod bi se prevrnuo. Kad je položaj težišta sistema ekscentričan, dobivaju se manje poluge statičkog stabiliteta za bilo koji nagib broda:

$$\overline{G_1 H_1} = \overline{G_0 H_0} - \overline{G_0 G_1} \cos \varphi$$

ili

$$h_1 = h - e \cos \varphi,$$

pa je stabilitet lošiji. Zbog toga treba na svaki način izbjegavati presipavanje ili pomake tereta za vrijeme eksploatacije broda. Veće i teže terete treba učvrstiti, a presipavanje sipkih tereta (tekućina, žita, rude itd.) treba ograničiti ugradnjom uzdužnih pregrada.

**Utjecaj reakcije podloge.** Može se desiti da brod nasjeda na jednom svom dijelu ili po cijeloj dužini na čvrstu podlogu (npr. pri dokovanju, nasukanju ili porinuću), tako da osim sile uzgona i težine broda na njega djeluje još i reakcija podloge. U tim slučajevima stabilitet se uvijek smanjuje, pa se brod može i prevrnuti. Jednadžba momenata s obzirom na tačku  $K$  je prema sl. 7:

$$M_{st} = F_L' \cdot \overline{KM_0} \cdot \sin \varphi - \Delta \cdot \overline{KG} \cdot \sin \varphi.$$

Kako je uzgon  $F_L' = \Delta - R$ , jednadžba momenta glasi:

$$M_{st} = [(\Delta - R) \overline{KM_0} - \Delta \cdot \overline{KG}] \sin \varphi = (\Delta \cdot \overline{M_0 G} - R \cdot \overline{KM_0}) \sin \varphi$$

ili

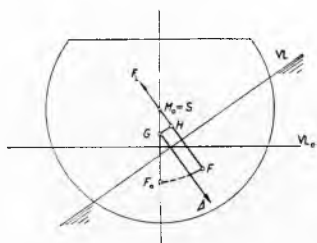
$$M_{st} = \Delta \cdot (\overline{M_0 G} - \frac{R}{\Delta} \overline{KM_0}) \sin \varphi = \Delta \cdot (\overline{M_0 G})_{red} \sin \varphi.$$

Formula za moment početnog stabiliteta (u obzir dolaze samo mali nagibi) ima isti oblik kao i kad brod slobodno pluta na vodi, samo što umjesto početne metacentarske visine  $\overline{M_0 G}$  treba uvrstiti

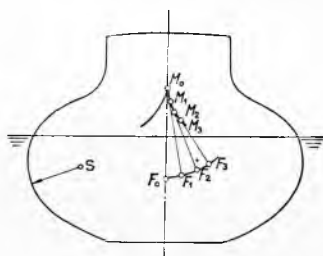
$$tzv. \text{reduciranu metacentarsku visinu } (\overline{M_0 G})_{red} = \overline{M_0 G} - \frac{R}{\Delta} \overline{KM_0}.$$

Što je vodostaj niži to će reakcija  $R$  biti veća a reducirana metacentarska visina manja. Brod će se prevrnuti kad ta reakcija toliko poraste da reducirana metacentarska visina  $(\overline{M_0 G})_{red}$  postane negativna. Dakle, kritična vrijednost reakcije koja se ne smije preoračiti ako brod nije poduprt sa strane jest:

$$R_{krit} = \Delta \cdot \frac{\overline{M_0 G}}{\overline{KM_0}}.$$



Sl. 4. Stabilitet cilindričnih formi



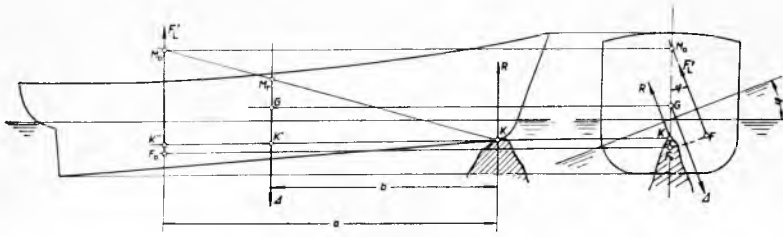
Sl. 5. Forme s jako zakrivljenim rebrima

rebrima imaju središte zakrivljenosti rebra s iste strane simetralne ravnine kao i samo rebro (sl. 5). Zato se povećanjem nagiba smanjuju radijusi zakrivljenosti njihove eliptične krivulje težišta istisnine, pa metacentri  $M$  leže ispod početnog metacentra  $M_0$ . Takvi brodovi imaju negativan stabilitet forme; stoga, da se ne bi prevrnuti, početni im stabilitet mora uvijek biti pozitivan. Nakon kuta nagiba pri kojemu paluba ulazi u vodu, ili dno izranja, metacentri se uvijek spuštaju (sl. 3), pa u toj tački metacentarska krivulja ima drugi šiljak (prvi je u početnom metacentru  $M_0$ ). Zbog simetričnosti forme broda s obzirom na uzdužnu vertikalnu ravninu, simetrične su s obzirom na tu ravninu i ovojnica vodnih linija, i  $F$ -krivulja, i  $M$ -krivulja.

**Utjecaj smještaja težina na stabilitet.** Težište sistema je obično u simetrali broda, ali se ipak može desiti da uslijed presipavanja ili pomaka tereta ono padne van simetrale. Utjecaj proizvoljnog položaja težišta sistema na stabilitet broda može se najbolje uočiti u odnosu na metacentarsku krivulju (sl. 6). U ravnotežnom položaju broda smjer uzgona prolazi kroz težište sistema, tangencijalno na metacentarsku krivulju, pa iz sl. 6 proizlazi da za ekscentrični položaj težišta sistema  $G_1$ , brod plovi nagnut pod kutom  $\varphi_1$ . Maksimalni ekscentricitet težišta sistema dan je tačkom  $G_k$  na silaznoj strani metacentarske krivulje. U toj tački poklapa se diralište tangente (pravi metacentar  $M_k$ ) s težištem sistema  $G_k$ . Izvan tačke  $G_k$  ne može se više povući ni jedna tangenta na metacentarsku krivulju i brod će se prevrnuti. Vertikalna tangenta, odnosno uspravan položaj broda, dobiva se za sve položaje težišta sistema na simetralnoj ravnini broda ispod

Ako je brod poduprt samo na jednom mjestu, on dobiva stanovit uzdužni nagib (trim). Položaj težišta istisnine može se dobiti iz jednadžbe uzdužnih momenata za tačku  $K$  (sl. 7 a):

$$F_L' \cdot a = \Delta \cdot b,$$



Sl. 7. Odnosi stabiliteta pri nasukanju broda

pa je

$$F_L' = \Delta \cdot \frac{b}{a}.$$

Kako je  $b/a = \overline{M_r K'} / \overline{M_o K''}$ , može se pisati

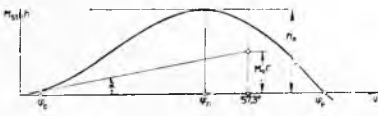
$$F_L' = \Delta \cdot \frac{\overline{M_r K'}}{\overline{M_o K''}},$$

pa uvrstivši to u jednadžbu poprečnih momenata za tačku  $K$  dobiva se:

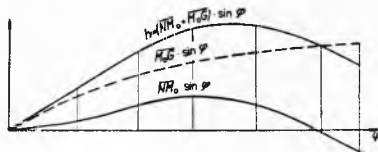
$$M_{st} = \Delta \cdot \frac{\overline{M_r K'}}{\overline{M_o K''}} \cdot \overline{KM_o} \cdot \sin \varphi - \Delta \cdot \overline{KG} \cdot \sin \varphi = \Delta \cdot \overline{M_r G} \cdot \sin \varphi.$$

Dakle, brod će biti stabilan ako je reducirana metacentarska visina  $\overline{M_r G}$  pozitivna, tj. ako spojnica hvatišta reakcije  $R$  u tački  $K$  i početnog metacentra  $M_o$  siječe smjer težine  $\Delta$  iznad težišta sistema  $G$  (sl. 7a). Stabilitet će biti to kritičniji što je tačka uporišta  $K$  bliže težištu sistema  $G$ . Matematički se može dokazati da je utjecaj reakcije podloge  $R$  na stabilitet ekvivalentan iskrcanju tereta težine  $p = R$  iz hvatišta reakcije  $R$  (tačke  $K$ ).

**Krivulja poluga statičkog stabiliteta.** Fizička veličina koja najbolje karakterizira stabilitet broda na mirnoj vodi jest moment statičkog stabiliteta. Njegova veličina ovisi o kutu nagiba broda  $\varphi$ , pa se on prikazuje u dijagramu kao funkcija kutova nagiba prema sl. 8, obično u području od 0 do 90°. Krivulja momenta statičkog stabiliteta je neka deformirana sinusoida, jer član  $\overline{NG}$  nije konstantan nego se mijenja s kutom nagiba  $\varphi$ . Kako je depasman broda  $\Delta$  neovisan o kutovima nagiba  $\varphi$ , u dijagram se nanose samo promjenljivi članovi jednadžbe za  $M_{st}$ , tj. poluge  $h = \overline{GH} = \overline{NG} \sin \varphi$ . Tako se dobiva *krivulja poluga* ili *Reedov dijagram*. Budući da je  $M_{st} = \Delta \cdot h$ , gdje je  $\Delta$  konstantan faktor, tok krivulje poluga je isti kao i tok krivulje momenata.



Sl. 8. Krivulja momenata (poluga) statičkog stabiliteta



Sl. 9. Krivulja poluga dobiva se zbrajanjem krivulja dodatnog i početnog stabiliteta

statičkog stabiliteta rastaviti na dva dijela (sl. 9). Krivulja  $\overline{NM_o} \cdot \sin \varphi$  ovisi samo o formi, a sinusoida  $\overline{M_o G} \cdot \sin \varphi$  samo o položaju težišta sistema  $G$ . Ako je, dakle, poznata krivulja dodatnog stabiliteta stanovitog broda za bilo koji njegov gaz i ako se proračuna položaj težišta sistema  $G$  za zadani raspored težina, može se uvijek na

crtati krivulja poluga jednostavnim zbrajanjem ordinata objiju krivulja.

Za ekscentrični položaj težišta sistema dobiva se krivulja poluga  $h_1$  (sl. 10) tako da se od krivulje  $h$ , koja vrijedi za centrični položaj težišta sistema na istoj visini, odbije krivulja  $e \cos \varphi$ , gdje je  $e$  ekscentricitet težišta sistema (sl. 6).

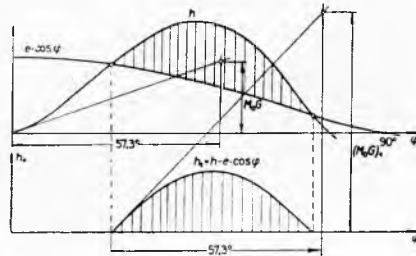
Karakteristične veličine krivulje poluga jesu (sl. 8): početna metacentarska visina  $\overline{M_o G}$ , maksimalna poluga  $h_m$  i pripadni kut nagiba  $\varphi_h$ , kut nagiba  $\varphi_e$  za koji je  $h = 0$  i površina ispod krivulje poluga. Početna metacentarska visina  $\overline{M_o G}$  dobiva se kao tangens kuta nagiba tangente u ishodištu,

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{dh}{d\varphi} = \overline{M_o G},$$

jer je za male nagibe

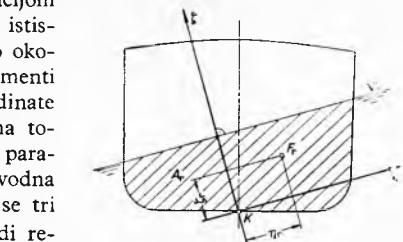
$$h = \overline{M_o G} \sin \varphi = \overline{M_o G} \cdot \widehat{\varphi} \text{ i } dh = \overline{M_o G} d\varphi,$$

ili kao ordinata te tangente kad je kut nagiba  $\widehat{\varphi} = 1$  (57,3°). Kut  $\varphi_e$  daje opseg krivulje poluga. Površina ispod krivulje poluga (tzv. *putovi dinamičkog stabiliteta*) pomnožena s težinom broda  $\Delta$  daje rad koji vrši moment statičkog stabiliteta pri nagibanju broda (tzv. *dinamički stabilitet*), a koji je jednak radu što ga moraju izvršiti prekretni momenti da bi nagnuli brod.



Sl. 10. Krivulja poluga za ekscentrični položaj težišta sistema

Kako su položaji tačaka  $M_o$  (iz dijagramskog lista) i  $G$  (iz proračuna centracije) poznati za bilo koji gaz i raspored težina, proračun krivulje poluga svodi se na određivanje položaja prividnih metacentara  $N$ , odnosno težišta istisnine  $F$  (jer je  $N$  određeno okomicom iz  $F$  na  $VL$ ), za zadanu istisninu i pojedine kutove nagiba  $\varphi$ . Položaj težišta istisnine  $F$  za brod nagnut pod nekim kutom  $\varphi$  određuje se analognim metodama kao i za uspravan brod. Podvodni dio broda se sistemom paralelnih ravnina dijeli u diferencijalne dijelove čije se težište poklapa s težištem karakterističnih presjeka. Integracijom diferencijalnih volumena dobiva se istisnina, a integracijom momenata diferencijalnih istisnina za dvije međusobno okomite osi dobivaju se momenti istisnine, odnosno koordinate njenog težišta. Već prema tome kakvim se sistemom paralelnih ravnina siječe podvodna brodska forma, razlikuju se tri grupe metoda. Po metodi rebara (sl. 11) brodska forma se siječe poprečnim paralelnim ravninama ili rebrima. Dvije takve beskonačno blize paralelne ravnine sijeku iz podvodnog dijela brodske forme diferencijalni volumen veličine



Sl. 11. Određivanje krivulje poluga statičkog stabiliteta pomoću metode rebara

$$dV = A_r dx,$$

gdje je  $A_r$  podvodni dio površine rebara, a  $dx$  razmak dviju paralelnih ravnina. Ukupni volumen do nagnute vodne linije  $VL$  dobiva se integracijom površina rebara po dužini broda:

$$V_{VL} = \int_L dV = \int_L A_r dx.$$

Kako se težište diferencijalnog volumena  $dV$  poklapa s težištem  $F_r$  podvodnog dijela površine rebra, to su momenti diferencijalnog volumena za dvije međusobno okomite osi  $\eta$  i  $\zeta$ :

$$dM_\eta = dV \cdot \zeta_r = A_r \zeta_r dx = M_{r\eta} dx,$$

$$dM_\zeta = \eta_r dV = A_r \eta_r dx = M_{r\zeta} dx.$$

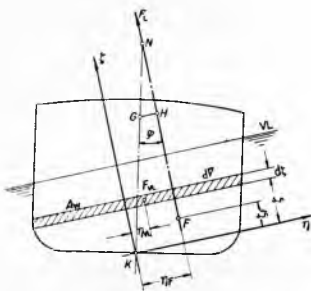
Oni su, dakle, jednaki umnošku statičkih momenata površina rebra i diferencijalne dužine  $dx$ . Momenti ukupne istisnine dobivaju se integracijom diferencijalnih momenata po dužini broda:

$$M'_\eta = \int_L M_{r\eta} dx, \quad M'_\zeta = \int_L M_{r\zeta} dx,$$

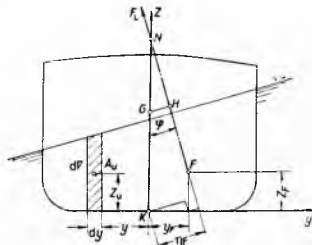
a koordinate težišta istisnine po formulama:

$$\eta_F = \frac{\int_L M_{r\zeta} dx}{\int_L A_r dx} \quad \text{i} \quad \zeta_F = \frac{\int_L M_{r\eta} dx}{\int_L A_r dx}.$$

Integrali u gornjim formulama računaju se metodama numeričke ili mehaničke integracije. Analogno se mogu odrediti koordinate težišta istisnine za bilo koju vodnu liniju i bilo koji nagib ako se



Sl. 12. Određivanje poluga statičkog stabiliteta pomoću metode vodnih linija



Sl. 13. Određivanje poluga statičkog stabiliteta pomoću metode uzdužnica

brodska forma siječe sistemom ravnina paralelnih s nagnutom vodnom linijom (sl. 12), ili sistemom vertikalnih ravnina (sl. 13). U prvom je slučaju:

$$\eta_F = \frac{\int_T M_{VL\zeta} d\zeta}{\int_T A_w d\zeta}, \quad \zeta_F = \frac{\int_T M_{VL\eta} d\zeta}{\int_T A_w d\zeta},$$

gdje su

$$M_{VL\zeta} = A_w \cdot \eta_{VL} \quad \text{i} \quad M_{VL\eta} = A_w \cdot \zeta$$

statički momenti površine vodne linije  $A_w$  za osi  $\xi$  i  $\eta$ , a integracija se mora provesti po visini broda.

Za vertikalne presjeke je:

$$y_F = \frac{\int_B M_{uz} dy}{\int_B A_u dy} \quad \text{i} \quad z_F = \frac{\int_B M_{uy} dy}{\int_B A_u dy},$$

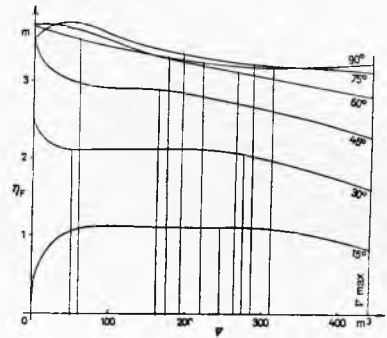
gdje su  $M_{uy} = A_u z_u$  i  $M_{uz} = A_u y$  statički momenti površina ploha uzdužnica  $A_u$  za osi  $Y$  i  $Z$ . Upotrebom koordinatnog sistema  $\eta, \zeta$  u kojem je os  $\eta$  uvijek paralelna s nagnutom vodnom linijom, za proračunavanje poluge  $h$  dovoljno je odrediti samo jednu koordinatu težišta istisnine  $\eta_F$ , jer je  $h = \overline{GH} = \eta_F - \overline{KG} \sin \varphi$  (sl. 12). U koordinatnom sistemu  $Oyz$  u kojem je os  $y$  uvijek paralelna s vodnom linijom za uspravan brod treba za proračunavanje poluge  $h$  odrediti obje koordinate težišta istisnine  $F$ , jer je (sl. 13):

$$\eta_F = y_F \cos \varphi + z_F \sin \varphi,$$

$$h = y_F \cos \varphi + z_F \sin \varphi - \overline{KG} \sin \varphi.$$

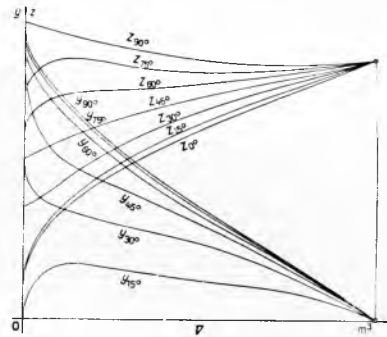
Računanje pomoću dviju koordinata ima ipak tu prednost što je  $z_F$  tačnije i što se rezultati proračuna mogu prikazati u pregled-

njim dijagramima (sl. 14 i 15). Proračunom pomoću jedne koordinate određuju se udaljenosti  $\eta_F$  po metodi rebra, tako da se površine i momenti površina rebra za os  $\xi$  za proizvoljnu vodnu liniju i nagib odrede pomoću integratora, pa se zatim integriraju po dužini broda, obično pomoću Simpsonova pravila. Za male



Sl. 14. Predočivanje rezultata proračuna statičkog stabiliteta pomoću jedne koordinate

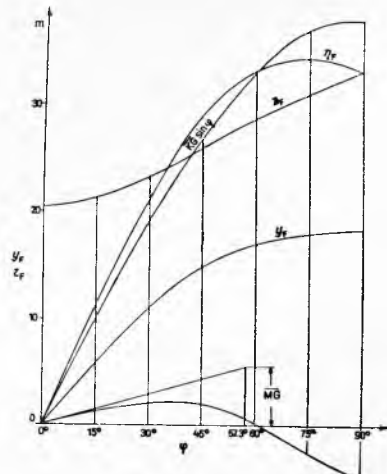
istisnine i veće nagibe tačnije je iscrtati odgovarajuće krivulje i odrediti njihove površine pomoću integratora, pa se tako za svaki nagib i za svaku vodnu liniju dobije druga istisnina, a potrebno je odrediti krivulju poluga za jednu te istu istisninu. Međutim, u praksi se redovito traže krivulje poluga za nekoliko karakteri-



Sl. 15. Predočivanje rezultata proračuna statičkog stabiliteta pomoću dvije koordinate

stičnih istisnina (sl. 17), pa se rezultati takvog proračuna  $\eta_F$  nanose u ovisnosti od volumena u tzv. *dijagram pantokarena*  $\eta_F = f(V)$  (sl. 14) s kutovima nagiba  $\varphi$  kao parametrom. Iz tog dijagrama može se ucrtaivanjem vertikala za bilo koju istisninu odrediti odgovarajuća vrijednost  $\eta_F = f(\varphi)$ .

U proračunu pomoću dvije koordinate upotrebljava se obično metoda uzdužnica. Površine ploha uzdužnica određuju se pla-



Sl. 16. Ovisnost poluga statičkog stabiliteta h o kutu nagiba phi i konstrukcija krivulje

rimetrom i nanose na odgovarajuće vodne linije u poprečnom presjeku broskog trupa, slično kao što se površine rebra nanose u uzdužnom presjeku (*Bonjeanove krivulje*). Površine ispod krivulja površina ploha uzdužnica daju statičke momente površina ploha uzdužnica za osnovku. Integracijom površina ploha uzdužnica i njihovih momenata za vertikalnu i horizontalnu os po širini broda, koja se redovno vrši iscrtavanjem odgovarajućih krivulja i određivanjem njihove površine pomoću planimetra, dobivaju se istisnina i njezini momenti s obzirom na vertikalnu i horizontalnu os. Pomoću tih vrijednosti se nalaze koordinate težišta istisnine  $y_F$  i  $z_F$  na uobičajeni način i nanose u analogan dijagram kao i vrijednosti  $\eta_F$  (sl. 15). Unošenjem odgovarajućih vertikalna iz tog dijagrama mogu se naći vrijednosti  $y_F = f(\varphi)$  i  $z_F = f(\varphi)$  za zadanu istisninu. Krivulja poluga za tu istisninu odredi se prema odnosima na sl. 13 pomoću dijagrama sl. 16. Krivulje poluga crtaju se za nekoliko karakterističnih stanja opterećenja broda (sl. 17).

**Prekretni momenti** nastaju uslijed vanjskih i unutarnjih sila. Vanjske sile potječu od vjetra, valova, sile vuče, sile na kormilu itd., a unutarnje od pomaka, utovara ili istovara tereta, slobodnih površina itd.

Bočni vjetar izaziva velike prekretno momente ako nadvodni, vjetru izloženi dio broskog trupa ima veliku površinu, kao npr. u slučaju putničkih brodova s visokim i dugačkim nadgradem. Prilikom tegljenja nastaju veliki prekretni momenti ako se uže za tegljenje postavi okomito ili gotovo okomito na bok broda, a tačka u kojoj je uže vezano za brod leži visoko iznad plovne vodne linije. Pri većoj brzini broda naglo zakretanje kormila za veliki kut također izaziva prekretni moment koji može biti veći od momenta stabilneta. Slični prekretni momenti mogu nastati uslijed djelovanja valova koji nailaze okomito ili koso na kurs broda. Ako se bilo koja težina  $p$  na brodu pomakne, pomiče se i težište sistema, što ima za posljedicu promjenu stabilneta (ako su pomaci samo u vertikalnom smjeru) ili kuta nagiba (ako su pomaci u horizontalnom smjeru) ili i jedno i drugo (ako su pomaci proizvoljni). Proizvoljni pomak tereta  $d$  rastavlja se

u tri komponente ( $d_x$ ,  $d_y$  i  $d_z$ ) u smjeru uzdužne osi  $x$ , poprečne osi  $Y$  i vertikalne osi  $Z$ . Odgovarajuće komponente pomaka težišta sistema računaju se po poznatim formulama, npr.

$$\overline{(GG_1)}_x = \frac{p d_x}{\Delta}$$

Najprije se izračuna vertikalna komponenta pomaka težišta sistema  $\overline{(GG_1)}_z$ , pa se s novom metacentarskom visinom  $\overline{M_0G_1}$  nacrtaju krivulja poluga. Odredivši ekscentricitet težišta sistema  $\overline{(GG_1)}_y = e$  ucrtaju se krivulja  $e \cos \varphi$ , i u sjecištu tih dviju krivulja nalazi se bočni kut nagiba broda  $\varphi$ , jer prema uvjetu ravnoteže mora moment statičkog stabilneta biti jednak prekretnom momentu. Kad su kutovi nagiba manji, budući da su težine  $p$  koje se pomiču male spram istisnine broda  $\Delta$ , umjesto dugotrajnog konstruiranja odgovarajućih krivulja može se upotrijebiti formula za početni stabilitet:

$$\Delta \cdot \overline{M_0G_1} \cdot \sin \varphi = p \cdot d_y \cos \varphi,$$

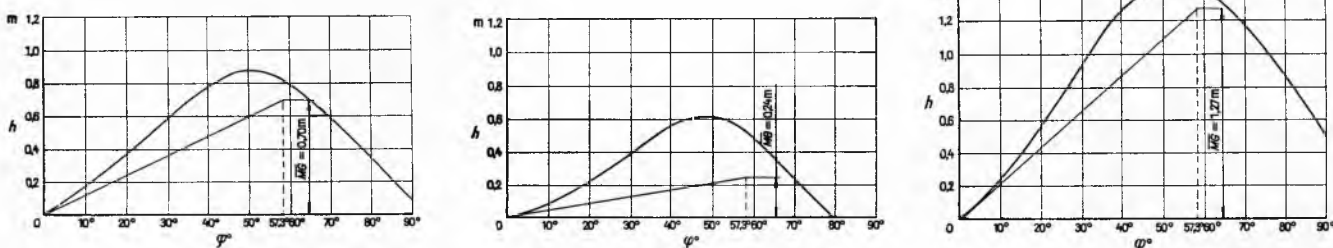
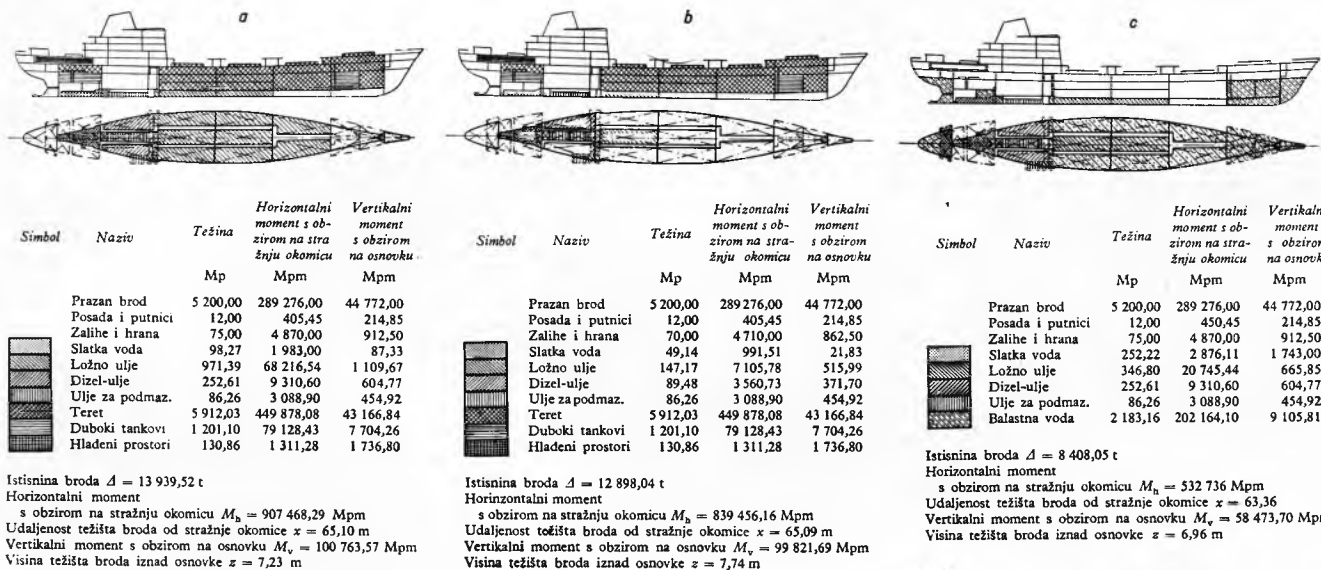
pa je

$$\operatorname{tg} \varphi \approx \widehat{\varphi} \approx \frac{p d_y}{\Delta \cdot \overline{M_0G_1}}$$

Analogno je kut nagiba u uzdužnom smjeru

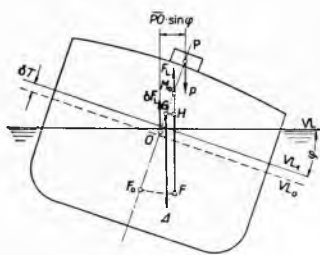
$$\widehat{\vartheta} \approx \frac{p d_x}{\Delta \cdot \overline{M_L G_1}}$$

Formula za početni stabilitet vrijedi samo u području kutova nagiba od 0 do  $\varphi_0$ , gdje tangenta na krivulju poluga iz ishodišta prestaje aproksimirati tu krivulju (v. sl. 8). ( $\varphi_0 \leq 10^\circ$ ). Pri utovaru i istovaru tereta pomiče se osim težišta sistema i težište istisnine, jer brod dolazi na novi gaz. Kad je kut nagiba broda veći, on se određuje tako da se najprije izračunaju pomaci težišta sistema, zamišljajući da je teret najprije utovaren (ili istovaren) u to težište (čime se položaj težišta sistema ne mijenja), a zatim pomaknut na odgovarajuće mjesto. S novim položajem težišta računa se krivulja poluga za novi gaz i pomoću nje odrede kutovi nagiba kao i pri pomaku tereta, samo se sada pomaci računaju od te-



Sl. 17. Krivulje poluga za nekoliko karakterističnih stanja opterećenja. a, b potpuno natovaren brod (a na početku, b na kraju putovanja), c brod u balastu (motorni brod »Ljubljana«)

žišta paralelnog sloja, jer brod uroni (izroni) na paralelnu vodnu liniju jedino ako je teret utovaren (istovaren) u vertikali kroz težište paralelnog sloja. U slučaju manjih poprečnih nagiba i uzdužnih nagiba račun se opet znatno pojednostavljuje upotrebom formula za početni stabilitet. Položaj težišta sistema računa se kao i prije, a položaj početnog metacentra određuje se iz dijagramskog lista za novi gaz (koji se očitava, mjesto kod istisnine  $\Delta$ , kod istisnine  $\Delta + p$ ).



Sl. 18. Stabilitet pri utovaru tereta

na sl. 18. Za kut nagiba  $\varphi$  moment je statičkog stabiliteta prije utovara tereta  $M_{st} = \Delta \cdot \overline{M_0 G} \cdot \sin \varphi$ , a moment statičkog stabiliteta nakon utovara tereta:

$$(M_{st})_1 = (\Delta + p) (\overline{M_0 G})_1 \sin \varphi = \Delta \cdot \overline{M_0 G} \cdot \sin \varphi - p \cdot \overline{PO} \cdot \sin \varphi,$$

pa je metacentarska visina nakon utovara tereta

$$(\overline{M_0 G})_1 = \frac{\Delta \cdot \overline{M_0 G} \mp p \cdot \overline{PO}}{\Delta + p}$$

Metacentarska visina nakon utovara tereta se smanjuje ( $-p \cdot \overline{PO}$ ), ako je teret utovaren iznad težišta  $O$  paralelnog sloja,

$$\delta T = \frac{p}{A_w \gamma}$$

a povećava se ( $+p \cdot \overline{PO}$ ) ako je teret utovaren ispod težišta. U dobrom približenju može se težište paralelnog sloja zamijeniti težištem plovne linije. Analogni izraz može se izvesti za početnu metacentarsku visinu pri istovaru tereta.

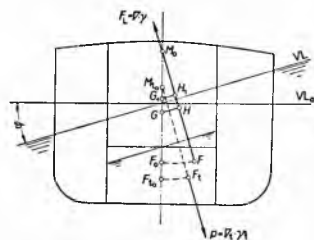
Obješenom teretu (npr. pri prevozu mesa, utovaru ili istovaru tereta pomoću samarica itd.) mijenja se položaj s nagibom broda. Kako se učinak neke sile ne mijenja ako se ona pomiče u pravcu svog djelovanja, može se zamisliti da je obješenom teretu težište u objesištu, jer za bilo koji nagib broda vektor težine obješenog tereta prolazi kroz objesište. Zato se pri podizanju nekog tereta pomoću brodske dizalice naglo smanjuje metacentarska visina.

Analogni odnosi vrijede za sipke ili tekuće terete, tzv. terete sa slobodnom površinom. Kad se brod nagne za neki kut  $\varphi$ , nagnje se i slobodna površina tekućine, tako da njeno težište dolazi iz  $F_{t0}$  u  $F_t$  (sl. 19). Uslijed ekscentričnog položaja težišta tekućine u  $F_t$ , njena težina vrši stanoviti prekretni moment na brod. Težište  $F_t$  zavisi od kuta nagiba broda, pa se promjena stabiliteta jednostavnije odredi zamislivši da težina tekućine  $p = V_t \gamma_t$  djeluje kroz početni metacentar  $M_{t0}$  njene slobodne površine, koji ostaje na istom mjestu za vrijeme nagibanja broda (to vrijedi samo za male nagibe). Kako se, dakle, pri nagibanju broda težište tekućine prividno pomiče iz  $F_{t0}$  u  $M_{t0}$ , težište sistema će se pomaknuti iz  $G$  u  $G_1$  za iznos:

$$\overline{GG_1} = \frac{p \cdot \overline{M_{t0} F_{t0}}}{\Delta} = \frac{V_t \cdot \gamma_t \cdot i/v_t}{V \cdot \gamma} = \frac{i}{V} \cdot \frac{\gamma_t}{\gamma}$$

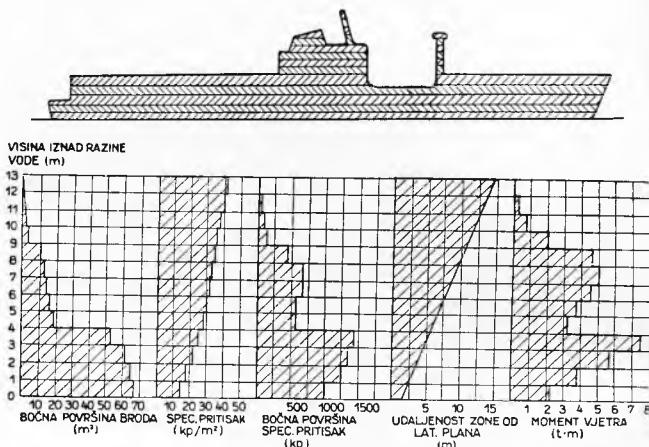
gdje je  $V_t$  volumen tekućine,  $\gamma_t$  njena specifična težina,  $i$  moment tromosti njene slobodne površine. Poluga statičkog stabiliteta  $\overline{GH}$  smanjuje se na:

$$\overline{G_1 H_1} = \overline{GH} - \overline{GG_1} \sin \varphi = \left( M_0 G - \frac{i}{V} \frac{\gamma_t}{\gamma} \right) \sin \varphi =$$



Sl. 19. Utjecaj slobodnih površina

Tablica 2  
PRORAČUN MOMENTA VJETRA ZA JEDAN PUTNIČKI BROD KOD JAČINE VJETRA OD 9 Bf.



1	2	3	4	5	6	7	8	9
Visina iznad razine vode (m)	Broj zone i	Srednja brzina vjetra $V_i$ m/sec	$V_i^3$	Spec. pritisak $P_i$ , kp/m <sup>2</sup> ( $\frac{1}{2} \rho V_i^2$ )	Površina zone $A_i$ , m <sup>2</sup>	Sila vjetra, $P_i A_i$ (5) × (6) kp	Udaljenosti težišta zone od težišta lat. plana, m	Moment vjetra ( $7$ ) × (8) Mpm
0...1	1	14,0	196	15,10	66,8	1009	2,168	2,195
1...2	2	15,5	240	18,38	66,6	1223	3,168	3,890
2...3	3	17,1	292	22,35	62,2	1390	4,168	5,790
3...4	4	18,4	339	25,95	55,6	1442	5,168	7,450
4...5	5	19,2	369	28,25	18,4	519	6,168	3,195
5...6	6	20,0	400	30,60	17,6	539	7,168	3,860
6...7	7	20,7	428	32,80	16,4	534	8,168	4,360
7...8	8	21,3	454	34,75	15,5	538	9,168	4,940
8...9	9	22,0	489	37,00	12,4	459	10,168	4,660
9...10	10	22,3	497	38,05	4,6	175	11,168	1,953
10...11	11	22,7	515	39,40	1,5	59,1	12,168	0,718
11...12	12	23,0	529	40,50	0,4	16,2	13,168	0,213
12...13	13	23,2	538	41,20	0,3	12,3	14,168	0,174

$M_v = 43,398$  Mpm

$$= \left( \frac{I - i \frac{\gamma_t}{\gamma}}{V} - F_0 G \right) \sin \varphi$$

Dakle utjecaj slobodnih površina može se shvatiti i kao smanjenje djelotvornog momenta tromosti slobodne površine pomnoženog s odnosom specifične težine tekućine u tanku i tekućine u kojoj brod plovi. Nepovoljan utjecaj tereta sa slobodnom površinom na stabilitet broda ne ovisi o njegovoj količini, nego o veličini momenta tromosti slobodne površine. Štetan utjecaj slobodnih površina smanjuje se najzgodnije pregrađivanjem tankova. Moment tromosti slobodne površine pri nagibanju pravokutnog tanka dužine  $l$  i širine  $b$  oko uzdužne osi iznosi  $i_t = lb^3/12$ . Ako se tank podijeli uzdužnom nepropusnom pregradom na dva jednaka dijela, iznosi moment tromosti:

$$2 i_t = \frac{l(b/2)^3}{12} = \frac{l b^3}{48} = \frac{l b^3}{4 \cdot 12}$$

dakle se je utjecaj slobodnih površina smanjio na  $\frac{1}{4}$  ( $= (\frac{1}{2})^2$ ). Za  $n - 1$  uzdužnih pregrada, odnosno  $n$  odjeljaka u tanku, analogno proizlazi da se štetan utjecaj slobodnih površina smanjuje u omjeru  $n^2 : 1$ . Stoga se brodske dvodno, u kojem se obično krca tekući teret (gorivo i mazivo ulje, balastna voda itd.), dijeli uzdužnom nepropusnom pregradom (hrptenicom) na dva dijela. Tankovi u brodovima za prijevoz tekućeg tereta podijeljeni su dvjema uzdužnim pregradama, a na teretnim brodovima postavljaju se pri prevozu sipkih tereta u skladištima drvene uzdužne pregrade. Gornji izvodi vrijede samo pod pretpostavkom malih nagiba. Za veće nagibe treba izračunati položaje težišta tekućine u tanku metodama koje se upotrebljavaju za određivanje težišta istisnine pri proračunu krivulje poluga statičkog stabiliteta i izvršiti odgovarajuću korekciju tih poluga.

Od vanjskih sila koje djeluju na brod najznačajnije su sile vjetra i valova. Moment sile vjetra za uspravni brod određuje se po formuli  $M_{vo} = p A_L a$ , gdje je  $p$  pritisak vjetra,  $A_L$  bočna površina nadvodnog dijela broda, uključivši nadgrada, jarbolje itd.,  $a$  je udaljenost hvatišta sile vjetra od hvatišta rezultante bočnog pritiska vode, koja djeluje u težištu podvodnog lateralnog plana broda (projekcije podvodnog dijela trupa na uzdužnu vertikalnu ravninu). Pritisak vjetra računa se po formuli:

$$p = C_z \gamma_z \frac{V_v^2}{2g}$$

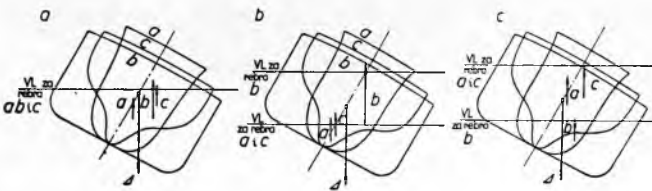
gdje je  $C_z$  koeficijent otpora zraka (srednja vrijednost za brodove s običnom izvedbom nadgrada  $C_z = 1,186$ ),  $\gamma_z$  specifična težina zraka (za temperaturu  $0^\circ\text{C}$  i barometarsko stanje 760 mm Hg,  $\gamma_z = 1,293 \text{ kp/m}^3$ ),  $V_v$  brzina vjetra (određuje se prema Beaufortovoj skali, v. *Meteorologija*),  $g$  akceleracija sile teže. Za tačniji proračun uzima se u obzir i promjenljivost brzine vjetra s udaljenošću od razine mora (vidi tablicu 2). Kad se brod naginje, mijenja se površina izložena vjetru, a i koeficijent  $C_z$ , pa se ovisnost momenta vjetra o kutu nagiba može dobiti samo na osnovu mjerenja na modelima i stvarnim brodovima. Za male brodove naveo je Wendel formulu:

$$M_{v\varphi} = M_{vo} (0,25 + 0,75 \cos^3 \varphi).$$

Za jedrenjake pretpostavlja se zbog pretežno ravnih površina jedara

$$M_{v\varphi} = M_{vo} \cos^2 \varphi.$$

Na valovima je raspodjela istisnine drukčija nego na mirnoj vodi, pa se zbog toga mijenjaju i krivulje poluga. Sl. 20a prikazuje



Sl. 20. Utjecaj valova na moment statičkog stabiliteta

brod na mirnoj vodi, u sl. 20 b se sredina broda nalazi na brijegu vala koji ima jednaku dužinu kao i brod, a nadolazi s krme, a na sl. 20 c val je prestigao brod za toliko da se na sredini broda nalazi valni dol. Iz sl. 20 se vidi da dijelovi uzgona na pramčani, krmni i srednji dio broda, zajedno s konstantnom težinom broda  $\Delta$ , daju moment statičkog stabiliteta, koji je najmanji na valnom brijegu jer tada obje komponente,  $a$  i  $c$ , djeluju suprotno uspravljanju broda. Moment statičkog stabiliteta najveći je na valnom dolu jer tamo sve tri komponente uzgona,  $a$ ,  $b$  i  $c$ , djeluju u smjeru uspravljanja broda. Smanjenje momenta statičkog stabiliteta na valnom brijegu je veće nego povećanje na valnom dolu, pa je srednji moment statičkog stabiliteta na valu manji nego u mirnoj vodi. U približnim proračunima može se ta razlika smatrati prekretnim momentom i pribrojiti ostalim prekretnim momentima. Smanjenje momenta statičkog stabiliteta na valnom brijegu naročito je opasno kad su valovi u krmu, jer, uslijed male relativne brzine vala spram broda, brod ostaje dosta dugo vremena na brijegu vala pa mogu doći do izražaja prekretni momenti.

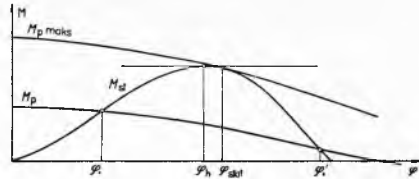
**Prosuđivanje stabiliteta** sastoji se u određivanju kutova nagiba od kojih će se brod nagnuti pod djelovanjem prekretnih momenata. Ti kutovi ne smiju biti toliki da dodu pod vodu otvori koji se ne mogu nepropusno zatvoriti. Osim toga potrebno je odrediti i maksimalne kutove nagiba do kojih se brod može nagnuti a da se ne prevrne. Pri tome se razlikuje statički i dinamičko djelovanje prekretnih sila. Prekretno djelovanje prekretnih sila djeluju statički ako se mijenjaju polagano u ovisnosti od vremena, pa su u svakom času u ravnoteži s momentom statičkog stabiliteta. Češći je slučaj dinamičkog djelovanja sila koje naglo mijenjaju svoju vrijednost, pa se ravnoteža ne može momentano uspostaviti. Dolazi do ubrzanja gibanja broda, pa se u račun moraju uzeti i sile inercije.

Kut do kojega će se brod nagnuti zbog statičkog djelovanja prekretnih momenata dobiva se iz jednadžbe ravnoteže. Suma

momenata svih sila koje djeluju na brod mora u njegovom ravnotežnom položaju biti jednaka nuli:

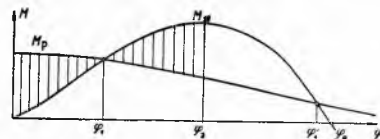
$$\Sigma M = M_{st} + M_p = 0.$$

Ova jednadžba se rješava grafički konstruiranjem krivulje momenta statičkog stabiliteta  $M_{st}$  i krivulje rezultantnog prekretnog momenta  $M_p$  (sl. 21). Sjecište tih krivulja daje kut  $\varphi_1$  do kojeg će



Sl. 21. Odnosi stabiliteta pri statičkom djelovanju prekretnih momenata

se nagnuti brod. Osim položaja ravnoteže s nagibom  $\varphi_1$  postoji položaj ravnoteže i u drugom sjecištu krivulja  $M_p$  i  $M_{st}$ , koje daje kut  $\varphi_2$ . Kut  $\varphi_1$  predstavlja položaj stabilne ravnoteže, a s kutom nagiba  $\varphi_2$  brod je u labilnoj ravnoteži, pa se u tom položaju ne može održati. Ako se poveća kut nagiba preko  $\varphi_2$ , prekretni momenti postaju veći od momenta statičkog stabiliteta, pa kut nagiba dalje raste i brod se ne može više vratiti u položaj ravnoteže  $\varphi_1$ . Analogno se može dokazati da je položaj  $\varphi_1$  stabilan, jer višak momenta koji nastaje uslijed povećanja ili smanjenja kuta  $\varphi_1$  uvijek vraća brod u položaj  $\varphi_1$ . U slučaju statičkog djelovanja prekretnih momenata maksimalni kut nagiba do kojega se može nagnuti brod a da se ne prevrne, tzv. *statički kut prevrtanja broda*, određen je tačkom u kojoj krivulja prekretnog momenta, postepeno se povećavajući, tangira krivulju momenta statičkog stabiliteta (sl. 21). Taj kut ovisi o obliku krivulja prekretnog momenta i statičkog stabiliteta, pa može zauzeti bilo koju vrijednost. Obično se kao statički kut prevrtanja broda definira kut  $\varphi_h$ , određen maksimumom krivulje poluga statičkog stabiliteta. To bi bio zaista kut prevrtanja samo onda kad bi krivulja prekretnih momenata bila pravac paralelan s osi apscisa, tj. kad bi ti momenti bili neovisni o kutovima nagiba, što je vrlo rijedak slučaj. Ako se veličina prekretnih momenata mijenja naglo, dolazi do ubrzanja masa, pa se govori o dinamičkom djelovanju sila i dinamičkom stabilitetu broda. Uslijed nastalog ubrzanja i inercije svoje mase brod se sve više naginje, pa se neće zaustaviti kod kuta statičke ravnoteže  $\varphi_1$  (sl. 22), u kojemu je prekretni moment jednak momentu statičkog stabiliteta, nego će proći kroz njega s maksimalnom brzinom i maksimalnom kinetičkom energijom (ako se zanemari prigušivanje gibanja uslijed otpora vode i zraka) i nagnuti se do kuta  $\varphi_2$ . Naime, poslije kuta nagiba  $\varphi_1$  moment statičkog stabiliteta postaje veći od prekretnog momenta, pa se rezultirajući moment suprotstavlja daljnjem naganjanju i ono se sve više usporava, dok se brod ne zaustavi kod kuta nagiba  $\varphi_2$ . Kut  $\varphi_2$  se pronalazi na osnovu činjenice da kinetička energija koju ima brod kad je kut nagiba  $\varphi_1$  mora biti poništena radom viška momenta statičkog stabiliteta između kutova  $\varphi_1$  i  $\varphi_2$ . To



Sl. 22. Odnosi stabiliteta pri dinamičkom djelovanju prekretnih momenata

se svodi na izjednačavanje šrafiranih površina na sl. 22, budući da je rad jednak umnošku momenta i kuta zaokreta koji on proizvodi u smjeru svog djelovanja, tj. površinom ispod krivulje koja prikazuje moment kao funkciju tog kuta.

Kut  $\varphi_2$  nije ravnotežni položaj ( $\Sigma M \neq 0$ ), pa će se brod pod utjecajem momenta statičkog stabiliteta vratiti prema položaju ravnoteže  $\varphi_1$ , preći će ga i nagnut će se na suprotni bok do  $\varphi_2$ . To osciliranje broda oko položaja statičke ravnoteže  $\varphi_1$  nastavlja se dok ga otpori vode i zraka ne priguše, pa se brod zaustavi u



položaju  $\varphi_1$ , ukoliko se prekretni momenti nisu u međuvremenu promijenili.

Za dinamičko djelovanje prekretnih momenata, dakle, nije važna samo veličina ordinata krivulje momenata, nego i veličina površine ispod krivulje, koja ovisi o opsegu krivulje. Površina ispod krivulje momenata statičkog stabiliteta predstavlja rad koji moraju proizvesti momenti da bi nagnuli brod do određenog kuta, i ona određuje dinamički stabilitet broda:

$$St_d = \int_0^{\varphi} M_{st} d\varphi.$$

Kad prekretni momenti djeluju dinamički, brod se dakle smije nagnuti najviše do kuta  $\varphi_1'$ , tj. do drugog sjecišta krivulja prekretnog momenta i statičkog stabiliteta. Ako bi se nagnuo i dalje, brod bi se morao prevrnuti, jer ne postoji više višak momenta statičkog stabiliteta koji bi se suprotstavljao sve daljem naganju broda. Kut  $\varphi_1'$  određuje tzv. *dinamički kut prevrtanja* broda, a ovisi o obliku krivulje momenata. Da bi se mogao odrediti bez obzira na tu krivulju, kao dinamički kut prevrtanja broda definira se kut  $\varphi_e$  određen opsegom pozitivnog dijela krivulje momenata.

Ordinate krivulje momenata, odnosno poluge statičkog stabiliteta, karakteriziraju stabilitet nekog broda samo uz određeni kut nagiba. U položaju ravnoteže poluge i momenti statičkog stabiliteta jednaki su nuli. Kao karakteristika stabiliteta u tom slučaju, za male kutove nagiba, služi početna metacentarska visina, koja se može odrediti iz jednostavnih formula:

$$\overline{M_0 G} = \frac{I_T}{V} - \overline{F_0 G} \quad \text{i} \quad \overline{M_L G} = \frac{I_L}{V} - \overline{F_0 G}.$$

Početni metacentar  $M_0$  definiran je kao sjecište smjera uzgona sa simetralom broda kad je kut nagiba broda  $\delta\varphi$  beskonačno malen. Praktički može se smatrati da se svi smjerovi uzgona i za konačne ali male kutove sijeku u tački  $M_0$  na simetrali broda, pa je jednadžba momenta statičkog stabiliteta glasi:

$$M_{st0} = \Delta \cdot h = \Delta \cdot \overline{M_0 G} \cdot \varphi$$

jer je za male nagibe  $\sin \varphi = \varphi$ .

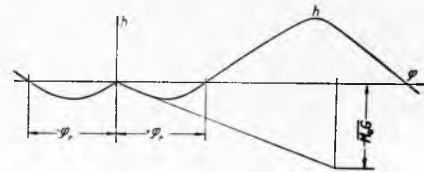
Jednadžba momenta statičkog stabiliteta predočena je grafički tangentom na krivulju momenata statičkog stabiliteta u ishodištu (v. sl. 8). Krivulja momenata i njena tangenta u ishodištu približno se poklapaju do nekog stanovitog kuta  $\varphi_0$ , koji ograničuje područje početnog stabiliteta. Za kutove nagiba veće od  $\varphi_0$  formula početnog stabiliteta daje krive rezultate, a pogreške su to veće što su kutovi veći od  $\varphi_0$ .

Početni stabilitet, odnosno početna metacentarska visina, određuju ponašanje broda u početnom stadiju naganjanja. Što je veća metacentarska visina to se strmije uspinje krivulja poluga i to će se manje nagnuti brod pod djelovanjem vjetra, pomaka tereta, prelaza putnika ili utjecaja slobodnih površina. Međutim, s većom metacentarskom visinom, uz isti raspored masa, pada vlastita perioda ljuljanja broda, pa su veća ubrzanja, a time i sile inercije postaju veće. Boravak na takvom brodu je neugodan jer se brod ljulja s trzajima, lako dolazi do pomicanja tereta, a u krajnjem slučaju i do oštećenja brodske opreme. Zbog toga treba pri projektiranju broda pažljivo odabrati početni stabilitet prikladnim izborom širine broda, odnosno omjera dužine i širine, jer se metacentarska visina može znatno promijeniti već neznatnom promjenom širine površine vodne linije.

Veliki ratni brodovi imaju veliku metacentarsku visinu (i preko 2,0 m), koja im je potrebna kao sigurnost u slučaju prodora vode (gubitka momenta tromosti plovne linije) izazvanog oštećenjem trupa. Velika perioda ljuljanja postiže se velikim momentom tromosti mase broda (velikom težinom, oklopom, gorivom u bočnim bunkerima). Veliki putnički brodovi imaju radi ugodnijeg boravka na brodu malu metacentarsku visinu (od 10 do 20 cm, to manju što je brod veći). Radi dovoljnog stabiliteta u slučaju prodora vode, a u skladu s novim propisima Međunarodne konvencije za zaštitu ljudskog života na moru, prelazi se danas i kod putničkih brodova na veće metacentarske visine, a ljuljanje broda se prigušuje stabilizatorima.

Brodovi s pozitivnim dodatnim stabilitetom mogu imati i negativnu početnu metacentarsku visinu a da se brod ne prevrne, jer se on nagninje samo do onog kuta nagiba  $\varphi_e$  uz koji pozitivni

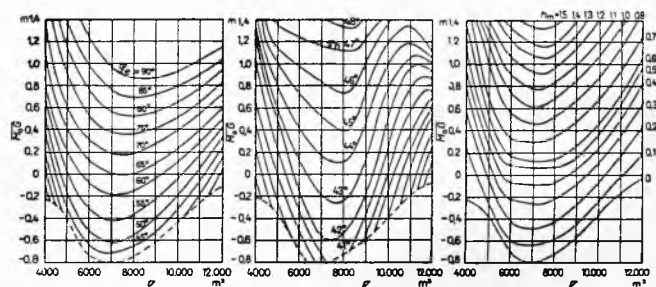
dodatni stabilitet postaje jednak negativnom početnom stabilitetu (sl. 23, v. i sl. 6). Ipak je takav slučaj sasvim nepoželjan za vrijeme eksploatacije broda jer je stabilitet znatno pogoršan zbog manjih ordinata i manjeg opsega krivulje poluga, zatim zbog područja labilne ravnoteže unutar kutova  $\pm \varphi_e$  u kojem se brod ne može održati nego se naglo prekreće s jednog boka na drugi. Pri tom preketanju dolazi do ubrzanja masa i stvaranja kinetičke energije broda, koja dodatno opterećuje i onako smanjenu površinu ispod krivulje momenata statičkog stabiliteta. Brodovi koji nemaju pozitivni dodatni stabilitet (kružne forme i forme s jako zakrivljenim bokovima) neminovno će se prevrnuti ako je početni stabilitet negativan.



Sl. 23. Krivulja poluga za brod s negativnom početnom metacentarskom visinom

Vjeter i valovi mijenjaju tako brzo veličinu i smjer djelovanja da neizbježno dolazi do ubrzanja masa, pri čemu se javljaju sile inercije mase broda i okolne vode, a i druge sile, npr. prigušivanje gibanja uslijed otpora vode; stoga statičko, odnosno quasi-statičko razmatranje stabiliteta daje samo vrlo shematiziranu sliku stvarnosti. Radi što boljeg približenja stvarnim odnosima prešlo se je u novije vrijeme dinamičkom razmatranju stabiliteta na osnovu diferencijalne jednadžbe gibanja broda, nastojeći pri tom što tačnije odrediti sve sile koje na njega djeluju. Pri tome pored teorijskih istraživanja imaju veliku ulogu i eksperimenti.

**Kontrola stabiliteta u eksploataciji broda.** Dovoljan stabilitet je od izvanrednog značenja za sigurnost broda, jer ako se brod prevrne, on je redovito izgubljen. Zbog toga treba da kapetan broda ima jasne pojmove o stabilitetu i mora biti kadar odrediti metacentarsku visinu i krivulju poluga nakon svakog utovara i istovara tereta. U tu svrhu služe mu stanovitni dijagrami i aparati.



Sl. 24. Kapetanski dijagrami von den Steinena

Za upotrebu na brodu vrlo su praktični dijagrami koje je predložio von den Steinen (sl. 24). U tri dijagrama nanosena je na os apscisa istisnina broda, a na os ordinata početna metacentarska visina. Iz prve serije krivulja određuje se opseg statičkog stabiliteta  $\varphi_e$ , iz druge kut nagiba  $\varphi_h$  uz koji nastupaju maksimalne poluge, a iz treće veličina tih maksimalnih poluga  $h_m$ . Ako je potrebno, s tim podacima i početnom metacentarskom visinom može se već dosta dobro nacrtati krivulja poluga. Prednost je ovih dijagrama da je svako stanje natovarenosti broda prikazano jednom tačkom u dijagramu, pa se dva stanja natovarenosti mogu vrlo dobro usporediti, što daje dobar pregled i pokazuje način na koji se stabilitet može poboljšati. U te dijagrame mogu se unijeti i krivulje koje predstavljaju granicu stabiliteta, tako da kapetan može odmah, prema tome da li dotična tačka leži iznad ili ispod te granice, odrediti da li stabilitet broda zadovoljava. U slučaju da granica stabiliteta nije unaprijed određena, može kapetan unoseći tokom vremena pojedine tačke u dijagrame sam skupiti iskustvo o tome kada stabilitet zadovoljava, pa u dijagramima ograničiti područja dobrog i lošeg stabiliteta.

Pri upotrebi ovih i svih ostalih dijagrama za određivanje krivulje poluga potrebno je prethodno odrediti položaj težišta si-

stema po visini, odnosno početnu metacentarsku visinu. U brodogradilištu se te vrijednosti određuju pomoću pokusa nagiba, a na brodovima je najzgodnije očitavati metacentarske visine na odgovarajućim aparatima (v. Brodski instrumenti i specijalni uređaji u ovom članku).

**Propisi o stabilitetu.** Iako su postojala nastojanja da se zbog izvanredne važnosti stabiliteta za sigurnost broda propišu neke minimalne vrijednosti, ipak do danas još uvijek o tome ne postoje internacionalni propisi, nego su samo pojedine pomorske nacije izdale svoje nacionalne propise (npr. Jugoslavija, Sovjetski Savez, Poljska, USA, Japan itd.). Jedini internacionalno priznati propis o stabilitetu je paragraf Međunarodne konvencije o sigurnosti ljudskog života na moru koji određuje da brod pri prodoru vode ne smije imati negativnu metacentarsku visinu i da se nesimetrično naplavljen vodom smije nagnuti najviše 7°. Razlog zbog koga ne postoje internacionalni propisi o stabilitetu jest što su još uvijek nedovoljno poznate vanjske sile kojima na brod djeluju valovi i vjetar i što nema jedinstvenog realnog kriterija za prosudivanje stabiliteta. Zbog toga se još uvijek ne može tačno odrediti stabilitet nekog broda, pa bi preblagi propisi mogli imati za posljedicu katastrofu na moru, a prestrogi bi znatno ugrozili ekonomičnost broda.

U vrijeme jedrenjaka kao kriterij stabiliteta služila je početna metacentarska visina. Nesreće na moru koje su se dešavale uslijed prevrtanja brodova pokazale su da početna metacentarska visina, iako važna za ponašanje na valovima i za stabilitet broda uz statičko djelovanje vanjskih sila, nije ni izdaleka dovoljan kriterij stabiliteta. Zatim se je kao kriterij stabiliteta uzela krivulja poluga. Na osnovu analize brodova koji su se prevrnuli zbog pomanjkanja stabiliteta, Raahola je prvi (1939) predložio neke granične vrijednosti kojima mora zadovoljiti krivulja poluga za najnepovoljniji slučaj opterećenja broda. Prema tom prijedlogu najmanje vrijednosti poluga pri nagibu od 20° i 30° moraju biti 14 i 20 cm. Maksimalna krivulje poluga treba da leži bar kod 35°, a njen opseg mora biti bar 60°. Pod utjecajem dinamičkog djelovanja vanjskih sila brod se ne smije nagnuti preko kuta pri kojemu krivulja poluga ima maksimum, odnosno najviše do 40° ako je taj kut veći. Poluga dinamičkog stabiliteta uz taj kut nagiba mora iznositi najmanje 0,08 m.

Kasniji propisi o stabilitetu pošli su drugim putem, nastojeći odrediti veličinu prekretnih momenata koji djeluju na brod i odnose između tih momenata i krivulje statičkog stabiliteta, odnosno granične kutove nagiba do kojih se brod može nagnuti pod djelovanjem prekretnih momenata. Time su indirektno uvjetovane i minimalne vrijednosti krivulje poluga, ali kako krivulja poluga daje karakteristiku stabiliteta samo u mirnoj vodi, ona nije dovoljan kriterij za stabilitet broda na uzburkanom moru, pa može služiti samo kao baza za uspoređivanje stabiliteta, ali ne i za njegovo određivanje. Zbog toga se u novijim propisima nastoje odrediti granični kutovi nagiba broda na osnovu formula koje se dobivaju rješenjem diferencijalne jednadžbe gibanja broda pod djelovanjem prekretnih momenata svih sila koje na njega djeluju.

#### NEPOTONLJIVOST

Nepotonljivost je sposobnost broda da ostane plutati i nakon što je jedan dio unutarnjeg brodskog prostora naplavila voda. Nepotonljivost se postiže nepropusnim pregrađivanjem unutrašnjeg prostora broda.

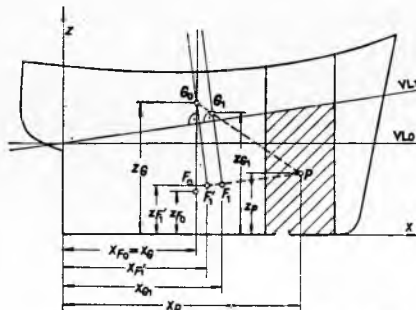
Svrha je proračuna nepotonljivosti da se odredi razmak nepropusnih pregrada broda, kako bi brod sačuvao plovnost, stabilitet i minimalna pomorska svojstva i kad, uslijed oštećenja vanjske oplate nastalog sudarom ili kojim drugim djelovanjem, prodrle voda u njegovu unutrašnjost. Uslijed prodora vode gubi se jedan dio istisnine broda, jer prodrle voda stoji u vezi s vanjskom vodom. Gubitak istisnine se mora nadoknaditi dubljim uronom broda, pri čemu redovno nastaje stanovit trim, a katkada i bočni nagib broda. U novom položaju ni na jednom mjestu ne smije paluba do koje sižu nepropusne pregrade (*pregradna paluba*) doći ispod vode, jer ona nije nepropusna, pa bi se prodor vode raširio po cijelom brodu. Radi sigurnosti uzima se stanovita rezerva, pa se 76 mm ispod pregradne palube, paralelno s njom, poteže tzv. *granična linija* koju smije plovna linija nakon prodora vode u krajnjem slučaju tangirati, ali nikako sjeći. Proračun nepotonljivosti

izvodi se samo za putničke brodove. Prema pravilima Međunarodne konvencije za sigurnost ljudskog života na moru od 1929 putničkim brodom se smatra svaki brod koji prevozi više od 12 putnika.

Kad se je prešlo od drvene na željeznu konstrukciju broda i uveo pogon parnim strojem umjesto jedrima, počeo se je unutarnji brodski prostor dijeliti poprečnim pregradama na nekoliko nepropusnih odjela. Takva podjela je bila potrebna radi sigurnosti broda (u slučaju oštećenja oplate nepropusne pregrade su sprečavale da se voda proširi po čitavom brodu) i radi funkcionalnog rasporeda brodskog prostora (strojarnicu i kotlovnicu je trebalo odijeliti od tovarnog prostora).

Već 1854 donesen je u Engleskoj prvi zakonski propis o brodskim nepropusnim pregradama, a od 1882 klasifikaciono društvo Lloyd's Register of Shipping zahtijeva da brodovi duži od 84 m moraju imati nepropusne pregrade. Koncem XIX st. i Društvo njemačkih brodara (See-Berufsgenossenschaft) izdaje svoje propise o nepropusnoj podjeli broda. Katastrofa putničkog broda "Titanic" 1912, u kojoj je izgubilo život 1490 osoba, dala je poticaj za prvu Međunarodnu konferenciju o sigurnosti ljudskog života na moru (International Conference on Safety of Life at Sea) 1913 u Londonu. Na toj su konferenciji bili doneseni prvi međunarodni propisi o broju nepropusnih pregrada, a na kasnijim konferencijama 1929, 1948 i 1960 ti su propisi dalje razrađivani i dopunjavani, tako da je danas za putničke brodove tačno određen način nepropusne podjele broda.

Voda koja prodire u jedan od brodskih prostora (sl. 1) može se smatrati ili kao ukrcani teret ili kao izgubljeni istisnina. Obje te pretpostavke vode do istog rezultata. Ako brod plovi na vodnoj liniji  $VL_0$ , težište istisnine nalazi se prije prodora vode u položaju  $G_0$  a težište sistema u  $G_0$ . Nakon prodora vode brod plovi na vodnoj liniji  $VL_1$ , pa se voda prodrla do te vodne linije može smatrati kao ukrcani teret sa težištem u tački  $P$ ; težište sistema pomiče se iz  $G_0$  u  $G_1$ . Da bude ispunjen drugi uvjet plovnosti, mora se i težište istisnine pomaknuti u tačku  $F_1$ , tako da je spojnica  $F_1G_1$  okomita na novu vodnu liniju  $VL_1$ .



Sl. 1. Pomak težišta pri prodoru vode

U slučaju da se prodrle voda smatra izgubljenom istisninom, brod će opet uroniti do iste vodne linije  $VL_1$ , da nadoknadi izgubljeni istisninu. Težište sistema ostaje na svom mjestu  $G_0$  (budući da se na težinama nije ništa promijenilo), ali uslijed gubitka jednog dijela istisnine, težište istisnine se pomiče iz  $F_1$  u  $F_1'$ , tako da je  $F_1'G_0$  okomito na  $VL_1$ .

Da se prosudi početni stabilitet broda, treba odrediti položaj početnog metacentra. Ako se prodrle voda smatra kao utovareni teret, novi položaj početnog metacentra  $M_{01}$  daje formulu:

$$z_{M_{01}} = z_{F_1} + \overline{M_{01}F_1},$$

gdje je  $z_{F_1}$  ordinata neoštećene istisnine na vodnoj liniji  $VL_1$ ,  $\overline{M_{01}F_1} = (I_1 - i_1)/V_1$  metacentarski radijus, reduciran uslijed slobodne površine prodrle vode;  $I_1$  je moment cjelokupne (dakle neoštećene) površine vodne linije  $VL_1$ ,  $i_1$  moment tromosti samo njenog oštećenog dijela,  $V_1 = V_0 + V_p$  je volumen istisnine neoštećenog broda na vodnoj liniji  $VL_1$ , koji se je povećao od volumena istisnine  $V_0$  za volumen prodrle vode  $V_p$ .

Početna metacentarska visina jest:

$$\overline{M_{01}G_1} = z_{M_{01}} - z_{G_1}.$$

U slučaju da se prodrle voda smatra kao izgubljena istisnina, položaj početnog metacentra  $M_0'$  po visini je:

$$z_{M_0'} = z_{F_1'} + M_0'F_1',$$

gdje je  $z_{F_1'}$  ordinata težišta oštećene istisnine broda na  $VL_1$ ,  $\overline{M_0'F_1'} = I_1'/V_0$  je metacentarski radijus,  $I_1'$  je moment tromosti oštećene vodne linije  $VL_1$  s obzirom na uzdužnu os kroz vlastito težište,  $V_0$  je volumen istisnine neoštećenog broda na  $VL_0$  ili oštećenog broda na  $VL_1$ .