

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET U RIJECI**

Hrvoje Itković

**ANALIZA PRORAČUNA POPREČNE I UZDUŽNE
STABILNOSTI BRODA**

DIPLOMSKI RAD

Rijeka, 2014.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET U RIJECI**

**ANALIZA PRORAČUNA POPREČNE I UZDUŽNE
STABILNOSTI BRODA
TRANSVERSE AND LONGITUDINAL SHIP STABILITY
CALCULATION ANALYSIS**

DIPLOMSKI RAD

Kolegij: Stabilnost broda

Mentor: prof. dr. sc. Robert Mohović

Student: Hrvoje Itković

Studij: Nautika i tehnologija pomorskog prometa

JMBAG: 0112038380

Rijeka, rujan 2014.

Student: Hrvoje Itković

Studijski program: Nautika i tehnologija pomorskog prometa

JMBAG: 0112038380

IZJAVA

kojom izjavljujem da sam diplomski rad s naslovom ANALIZA PRORAČUNA POPREČNE I UZDUŽNE STABILNOSTI BRODA izradio samostalno pod mentorstvom prof. dr. sc. Roberta Mohovića.

U radu sam primijenio metodologiju znanstvenoistraživačkog rada i koristio literaturu koja je navedena na kraju diplomskog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti, koje sam izravno ili parafrazirajući naveo u diplomskom radu, citirao sam i povezao s podnožnim bilješkama i korištenim bibliografskim jedinicama na uobičajen i standardan način. Rad je pisan u duhu hrvatskoga jezika.

Suglasan sam s objavom diplomskog rada na službenim stranicama.

Student

Hrvoje Itković

SAŽETAK

Kako je stabilnost jedno od temeljnih svojstava broda koje omogućava njegovo postojanje i funkciju, a obrađuje se na pomorskim učilištima kao sastavna vještina i znanje koje treba posjedovati svaki pomorac, svaki doprinos gradivu za učenje jest koristan. Ovaj rad sadrži uvod u stabilnost unutar kojeg se nalazi opsežna klasifikacija, osnovni pojmovi i temeljna načela stabilnosti broda.

Dvije velike tematske cjeline podijeljene su koristeći jednu od u uvodu navedenih podjela stabilnosti, prema kojoj se stabilnost broda dijeli na poprečnu i uzdužnu. U tim cjelinama obrađeni su pripadajući proračuni koji se najčešće izučavaju na pomorskim učilištima iz kolegija koji se tiču stabilnosti broda. Ti proračuni najčešće obuhvaćaju određivanje metacentarske visine i kuta nagiba broda prilikom pomaka, ukrcaja ili iskrcaja određene mase, određivanje utjecaja slobodnih površina i utjecaja visećeg tereta na poprečnu stabilnost broda, te određivanje trima prilikom pomaka, ukrcaja ili iskrcaja u uzdužnoj stabilnosti.

Ključne riječi: stabilnost broda, poprečna stabilnost, uzdužna stabilnost, podjela stabilnosti broda, proračuni stabilnosti broda, analiza proračuna stabilnosti.

SUMMARY

Since stability is one of the major ships characteristics which allows its existence and function, and is dealt with on maritime studies as an integral skill and knowledge of every seaman, all contributions to the learning material are useful. This thesis contains an introduction to stability which gives an extensive classification, basic terms and fundamental principles of ship stability.

Two large chapters are divided based on one of the classifications given in the introduction, which divides the ship stability into transverse and longitudinal stability, deal with the calculations that are usually taught on maritime studies. These calculations usually include determination of the metacentric height due to shifting, loading and discharging of a certain mass, determination of free surface effect and the effect of a hanging cargo which are related to transverse stability, and the determination of trim due to shifting, loading and discharging related to longitudinal stability.

Keywords: ship stability, transverse stability, longitudinal stability, ship stability classification, ship stability calculations, ship stability calculation analysis.

SADRŽAJ

SAŽETAK.....	I
SUMMARY.....	II
SADRŽAJ.....	III
1. UVOD	1
1.1. PROBLEM, PREDMET I OBJEKTI ISTRAŽIVANJA	1
1.2. RADNA HIPOTEZA.....	1
1.3. SVRHA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA.....	1
1.4. ZNANSTVENE METODE.....	1
1.5. STRUKTURA RADA	1
2. OSNOVNO O STABILNOSTI BRODA.....	3
2.1. PODJELA STABILNOSTI BRODA.....	3
2.2. ELEMENTARNE TOČKE POPREČNE STABILNOSTI BRODA	7
2.3. UVJETI PLOVNOSTI U POPREČNOJ STABILNOSTI.....	8
2.4. VRSTE RAVNOTEŽE	14
3. POPREČNA STABILNOST	18
3.1. ODREĐIVANJE POČETNE POPREČNE METACENTARSKE VISINE	19
3.2. ODREĐIVANJE POLUGE <i>GH</i>	22
3.3. POMAK MASE.....	27
3.3.1. Vertikalni pomak mase	27
3.3.2. Horizontalni pomak mase	29
3.3.3. Kombinirani pomak mase	32
3.4. UKRCAJ I ISKRCAJ MASE	35
3.4.1. Ukrcaj mase izvan simetrale broda	38
3.4.2. Iskrcaj mase izvan simetrale broda	41

3.5.	UTJECAJ SLOBODNIH POVRŠINA	45
3.6.	UTJECAJ VISEĆE MASE NA STABILNOST BRODA.....	52
3.6.1.	Ukrcaj samaricom za teške terete	52
3.6.2.	Iskrcaj samaricom za teške terete	58
3.7.	RAČUN POPREČNE CENTRACIJE	65
4.	UZDUŽNA STABILNOST.....	68
4.1.	UZDUŽNI POMAK MASE	73
4.1.1.	Proračun novih gazova koristeći ukupnu promjenu trima	73
4.1.2.	Proračun novih gazova koristeći uzdužni pomak sustavnog težišta broda ..	75
4.2.	UTJECAJ UKRAJA I ISKRAJA MASE NA UZDUŽNU STABILNOST BRODA.....	81
4.2.1.	Proračun novih gazova nakon ukrcaja i iskrcaja mase koristeći ukupnu promjenu trima.....	83
4.2.2.	Proračun novih gazova nakon ukrcaja i iskrcaja mase koristeći uzdužni pomak sustavnog težišta broda	85
4.3.	TRIMOVANJE	88
4.3.1.	Trimovanje pomakom mase.....	89
4.3.2.	Trimovanje ukrcajem ili iskrcajem mase	93
4.4.	RAČUN UZDUŽNE CENTRACIJE.....	95
5.	ZAKLJUČAK.....	98
	POPIS LITERATURE.....	100
	POPIS SHEMA	101
	POPIS GRAFIKONA	102
	POPIS TABLICA	103

1. UVOD

1.1. PROBLEM, PREDMET I OBJEKTI ISTRAŽIVANJA

Sam naslov diplomskog rada već prilično precizno definira predmet istraživanja, a to su proračuni poprečne i uzdužne stabilnosti broda i njihova analiza. Ovaj rad, naime, ne obuhvaća sve moguće proračune stabilnosti broda, već detaljno analizira velik dio osnovnih proračuna koji se najčešće obrađuju na pomorskim učilištima.

1.2. RADNA HIPOTEZA

Budući da se ovim radom ne želi dokazivati ili opovrgavati tvrdnje, nego stvoriti sintezu gradiva za pomoć pri poučavanju, učenju i razumijevanju područja stabilnosti broda, nije potrebno postavljati radnu hipotezu.

1.3. SVRHA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA

Svrha i cilj ovog rada je napraviti razumljivu analizu proračuna poprečne i uzdužne stabilnosti broda koja može pomoći pri poučavanju stabilnosti broda te olakšati razumijevanje navedenoga gradiva.

1.4. ZNANSTVENE METODE

Prilikom izrade diplomskog rada korištene su metoda klasifikacije, metode analize i sinteze, generalizacije i specijalizacije, apstrakcije i konkretizacije, te matematička i komparativna metoda.

1.5. STRUKTURA RADA

U prvoj cjelini, *1. Uvod*, navedeni su problem, predmet i objekt istraživanja, svrha i ciljevi istraživanja, znanstvene metode te je obrazložena struktura rada.

Rad je nakon navedene cjeline strukturiran u nekoliko tematskih cjelina, počevši s *2. Osnovno o stabilnosti broda* koja predstavlja uvod u temeljne značajke i načela stabilnosti broda koje je potrebno poznavati za razumijevanje samih proračuna i ponašanja broda s

gledišta stabilnosti. Sljedeće cjeline odvojene su temeljnom podjelom stabilnosti na poprečnu i uzdužnu.

Cjelina **3. Poprečna stabilnost** obrađuje određivanje početne poprečne metacentarske visine, poluge poprečne stabilnosti, zatim pomak, ukrcaj i iskrcaj mase, utjecaj slobodnih površina, utjecaj visećeg tereta na stabilnost broda (ukrcaj ili iskrcaj samaricom za teške terete), račun poprečne centracije.

Sljedeća cjelina **4. Uzdužna stabilnost** obuhvaća uzdužnu stabilnost broda unutar koje je obrađen uzdužni pomak mase, utjecaj ukrcaja i iskrcaja mase na uzdužnu stabilnost, te trimovanje broda.

Posljednji dio, **5. Zaključak**, objašnjava kako je odabrana tema diplomskog rada i s kojom namjerom. Zatim je obrazloženo na koji način su analizirani proračuni koji su objekt istraživanja ovog diplomskog rada.

2. OSNOVNO O STABILNOSTI BRODA

Stabilnost broda, uz plovnost i čvrstoću, predstavlja jedno od temeljnih svojstava broda. Bez tih svojstava brod ne bi mogao funkcionalno postojati. Među ta svojstva može se još ubrojiti i upravljivost, bez koje brod također ne bi ispunjavao osnovnu namjenu transportnog sredstva, a to je prijevoz ljude i/ili tereta od ishodišta do odredišta po točno utvrđenom plovidbenom putu, već bi on tada predstavljao samo plovni objekt bez mogućnosti samostalnog kretanja i manevriranja.

2.1. PODJELA STABILNOSTI BRODA

Stabilnost broda jest svojstvo broda koje mu omogućava da se odupire silama koje ga nastoje pomaknuti iz početnog položaja te da se nakon prestanka djelovanja tih sila vrati u početni položaj. Ona se može podijeliti prema različitim kriterijima (Shema 1), i to s obzirom na:

- stanje broda
- vrste sila koje djeluju na brod
- osi oko kojih se brod nagiba.

Kako se brod može nalaziti u različitim stanjima, stabilnost pri njima ima određene posebnosti, tako da se stabilnost broda može podijeliti prema stanju u kojem se brod nalazi na:

- stabilnost broda u neoštećenom stanju i
- stabilnost broda u oštećenom stanju.

Najčešće stanje broda je neoštećeno stanje, pa se stoga najveći dio proračuna stabilnosti broda odnosi na stabilnost broda u neoštećenom stanju. Stabilnost broda u oštećenom stanju najčešće podrazumijeva oštećenje oplata broda i prodor vode u brodski prostor¹, pri čemu dolazi do povećanja deplasmana broda, stvaranja mogućih slobodnih površina, gubitka uzgona i sl.

¹ Brodski prostor se može naplaviti i namjerno, npr. kao posljedica gašenja požara.

Sile koje djeluju na brod i uzrokuju njegovo nagibanje mogu djelovati statički i dinamički. Vrijednost sila koje djeluju statički ne mijenja se, a suprotno tome, vrijednost sila koje djeluju dinamički promjenjiva je u vremenu. Na temelju toga, stabilnost se može podijeliti prema vrstama sila koje djeluju na brod na:

- statičku stabilnost i
- dinamičku stabilnost.

Podjela stabilnosti prema osima oko kojih se brod nagiba je najčešće prva podjela koja se spominje u stručnoj literaturi, a dijeli stabilnost na:

- poprečnu stabilnost i
- uzdužnu stabilnost.

Poprečna stabilnost podrazumijeva nagibanje broda oko uzdužne osi (ili kraće uzdužnice) koja dijeli brod na dva simetrična dijela: lijevi i desni bok. Sheme koje služe za pomoć pri razumijevanju poprečne stabilnosti crtaju se na poprečnom presjeku broda.

Za kontrolu stabilnosti broda potrebno je imati konkretan pokazatelj pomoću kojeg se može utvrditi zadovoljava li brod kriterij stabilnosti ili ne. Taj pokazatelj je kod poprečne stabilnosti početna poprečna metacentarska visina M_0G , a ona predstavlja razliku visine početnog poprečnog metacentra iznad kobilice broda i visine sustavnog težišta broda iznad kobilice. Međutim, pri nagibima broda većim od približno 12° , točka metacentra počinje mijenjati svoj položaj i izlazi iz vertikalne simetrale broda, pa stoga početna poprečna metacentarska visina više nije dovoljno dobar pokazatelj stabilnosti broda. Odatle proizlazi sljedeća podjela, a to je podjela poprečne stabilnosti na:

- početnu poprečnu stabilnost (kutovi nagiba do 12°) i
- poprečnu stabilnost pri većim kutovima nagiba (kutovi nagiba veći od 12°).

Pokazatelj stabilnosti pri većim kutovima nagiba jest poluga poprečne stabilnosti GH . Budući da je ona različita za svaki kut nagiba, izrađuje se krivulja poluga poprečne stabilnosti (u kojoj je sadržana i početna poprečna metacentarska visina) na temelju koje se promatra cjelokupna stabilnost, pri svim kutovima nagiba. Važno je imati na umu da za promatranje stabilnosti broda treba sagledati ukupnu stabilnost broda, tj. i početnu poprečnu stabilnost i stabilnost pri većim kutovima nagiba.

Uzdužna stabilnost odnosi se na nagibanje broda oko poprečne osi. Os koja dijeli brod na pramčani i krmeni dio jest glavno rebro, no nagibanje broda u uzdužnoj stabilnosti ne događa se oko njega. Razlog tomu je nesimetričnost broda u uzdužnom smislu. Svakom promjenom rasporeda masa na brodu dolazi do promjene oblika vodene linije, pa se težište plovne vodene linije rijetko nalazi na glavnom rebro, već mijenja svoj položaj oko njega. Promatrajući uzdužnu stabilnost, brod se nagiba oko težišta plovne vodene linije. Pokazateljem uzdužne stabilnosti smatra se trim broda t_u koji predstavlja razliku gaza na pramcu i gaza na krmi.

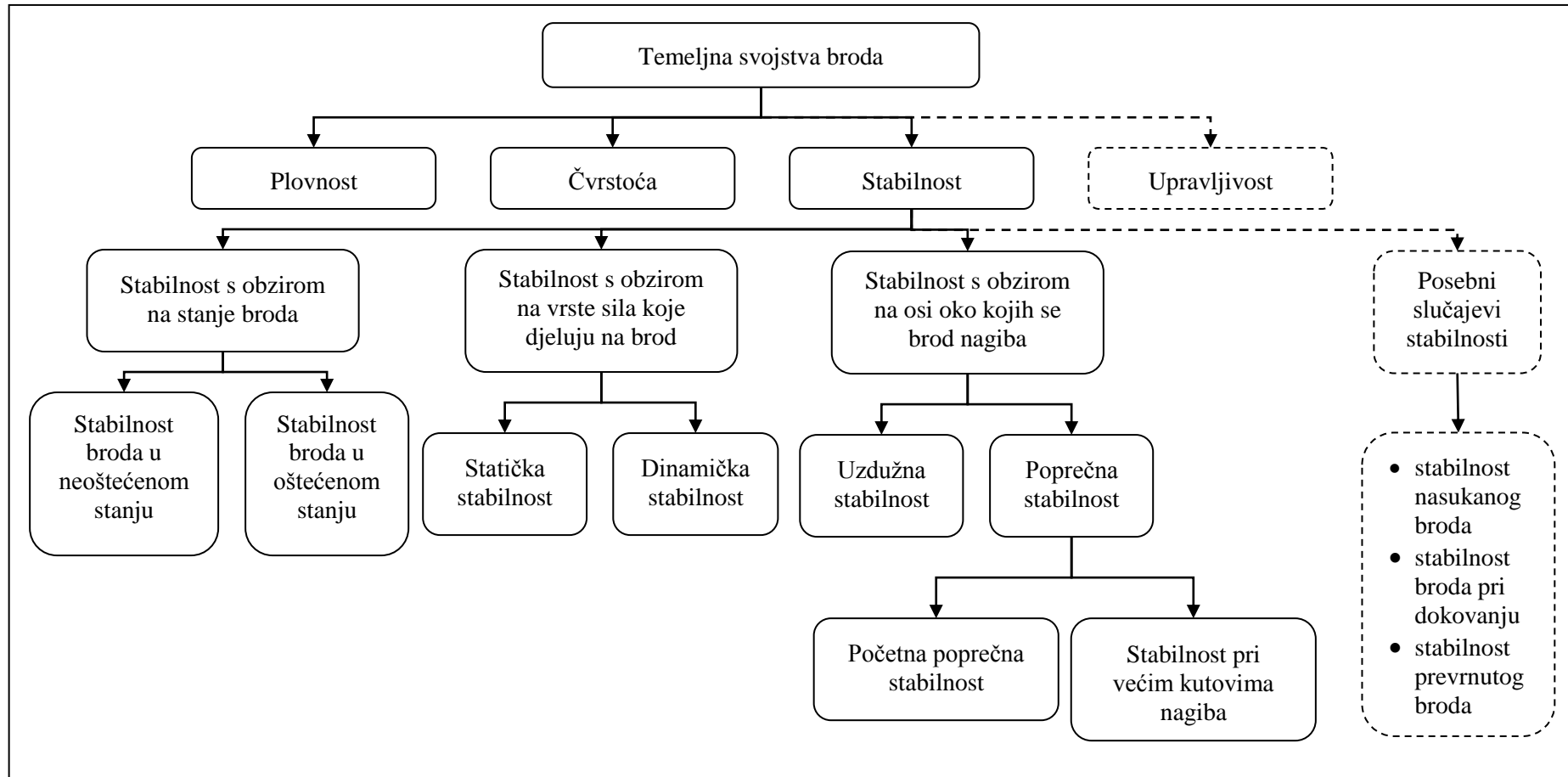
Ako se govori o podjeli stabilnosti prema osima oko kojih se brod nagiba, preostala os je vertikalna, no zakretanje broda oko vertikalne osi ne promatra se u sklopu stabilnosti, iz razloga što je ono zapravo promjena kursa broda i kao takvo spada u upravljivost.

Posebni slučajevi stabilnosti obuhvaćaju:

- stabilnost nasukanog broda
- stabilnost broda pri dokovanju i
- stabilnost prevrnutog broda,

no oni nisu tema ovog rada.

Shema 1. Podjela stabilnosti broda



2.2. ELEMENTARNE TOČKE POPREČNE STABILNOSTI BRODA

Pojam elementarnih točaka stabilnosti podrazumijeva točke koje su bitne za promatranje fenomena stabilnosti broda i određivanje pokazatelja kojima se utvrđuje udovoljavanje broda zahtjevima stabilnosti.

Pod elementarne točke stabilnosti broda ubrajaju se sustavno težište broda, težište uzgona i metacentar. Kobilica broda nije točka, no gledajući poprečni presjek broda nalazi se u sjecištu dna broda i vertikalne simetrale², a u odnosu na nju izražavaju se visine ostalih elementarnih točaka. Kobilica broda se na poprečnom presjeku označava s **K** (eng. *Keel*).

Sustavno težište broda je zamišljena točka iz koje djeluje rezultantna sila svih težina koje se nalaze na brodu, uključujući i silu koju stvara prazan brod. Označava se s **G** (skraćeno od eng. *Gravity*), a njegova visina iznad kobilice s **KG**.

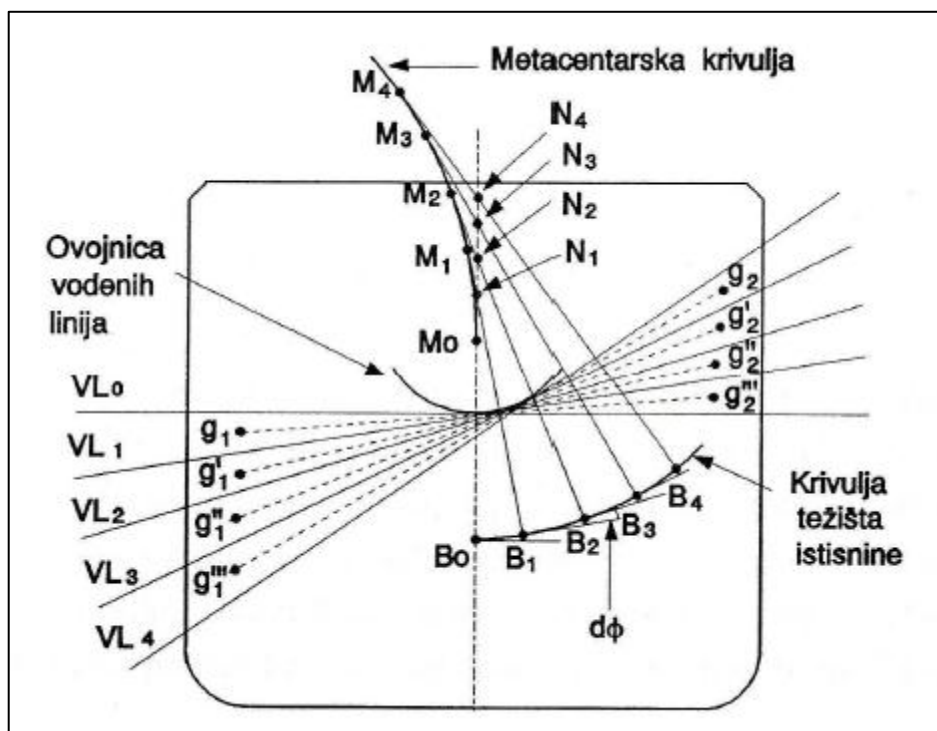
Težište uzgona je zamišljena točka iz koje djeluje rezultantna sila svih sila kojima medij u kojem brod pluta nastoji istisnuti brod. Svaka pojedinačna sila od koje je sastavljena sila uzgona djeluje okomito na oplatu broda. Težište uzgona nalazi se u težištu volumena uronjenog dijela broda, a budući da se taj dio u poprečnom presjeku broda gotovo poklapa s pravokutnikom kojem su stranice gaz i širina broda, težište uzgona se u pomoćnim shemama može odrediti kao sjecište dijagonala tog pravokutnika. Težište uzgona se označava s **B** (skraćeno od eng. *Buoyancy*), a njegova visina s **KB**.

Točka metacentra je središte zakrivljenosti krivulje težišta uzgona. Ona predstavlja sjecište dvaju susjednih smjerova sile uzgona. Promatrajući početnu poprečnu stabilnost (do 12° kuta nagiba), ona se nalazi na presjecištu pravca na kojem djeluje sila uzgona i simetrale broda. Kao takva naziva se početni poprečni metacentar, označava se s **M₀**, a njezina visina iznad kobilice s **KM₀**. Pri većim kutovima nagiba točka metacentra izlazi iz uzdužne osi, a presjecišta sila uzgona i simetrale broda nazivaju se prividni metacentri i

² Vertikalna i uzdužna simetrala broda obje pripadaju uzdužnoj ravnini broda koja dijeli brod na lijevi i desni bok, a nalazi se na polovici širine broda. Vertikalna simetrala dio je poprečnog presjeka broda, uzdužna dio tlocrta. Dalje u tekstu označava se kao „*simetrala*“.

označavaju s N (Shema 2). Prividni metacentri koriste se prilikom određivanja poluge poprečne stabilnosti GH .

Shema 2. Karakteristične krivulje brodske forme



Izvor: Mohović, R., *Komparativna analiza poprečne stabilnosti kod brodova različitih tehnologija*, magistarski rad, Pomorski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 1995.

2.3. UVJETI PLOVNOSTI U POPREČNOJ STABILNOSTI

Da bi brod mogao ploviti, mora zadovoljavati neke od prirodnih zakona fizike, a oni se kod promatranja stabilnosti broda zovu uvjeti plovnosti.

Prvi uvjet plovnosti zahtijeva da su težina i sila uzgona broda jednake i poznat je kao Arhimedov zakon. Težinom broda smatra se sila deplasmana, a deplasman D i sila uzgona U izražavaju se u metričkim tonama (t).

Ono što zapravo nagiba brod nisu sile, već momenti, a oni su umnošci sila i krakova na kojima one djeluju. Važno je istaknuti da se u stabilnosti broda, umjesto sila s mjernom jedinicom *njutn* (N), koriste mase koje se izražavaju u *tonama* (t). Iz toga

proizlazi da se umjesto momenata sila s mjernom jedinicom *njutnmetar* (Nm), koriste momenti mase koji se izražavaju u *tonmetrima* (tm)³, što za potrebe prakse daje sasvim zadovoljavajuće rezultate. Pritom se promatra više njihovih vrsta:

- vertikalni momenti
- nagibni momenti i
- uzdužni momenti.

Vertikalni moment jest umnožak mase i visine njenog težišta iznad kobilice. Suma vertikalnih momenata koristi se pri računu poprečne centracije i označava se s ΣM_v ili ΣV_M .

Nagibni momenti su oni koji stvaraju nagib broda. Brod je uspravan kada je suma nagibnih momenata jednaka nuli, zato što je os oko koje se brod nagiba uzdužna os, a brod se može nagnuti prema lijevom ili desnom boku. Ono što stvara nagibni moment jest masa koja djeluje na određenoj udaljenosti od uzdužne osi broda. Nagibni se momenti koriste prilikom određivanja kuta nagiba broda ili određivanja mase/udaljenosti kojom se brod dovodi u uspravan položaj, a mogu se, između ostalih oznaka, označiti s N_M ili M_n .

Uzdužni momenti su oni koji uzrokuju trim broda. Oni se mogu promatrati u odnosu na krmenu okomicu ili u odnosu na glavno rebro. Prilikom izračuna u kojima se koriste uzdužni momenti u odnosu na glavno rebro, važno im je pridružiti predznak (+ za uzdužne momente koji djeluju prema pramcu od glavnog rebra ili – za uzdužne momente koji djeluju prema krmi od glavnog rebra, no ovisno o sustavu označavanja korištenog u tablicama s hidrostatskim podacima, odnosno planu kapaciteta, može biti i obrnuto). Kada se koriste uzdužni momenti u odnosu na krmenu okomicu, svi imaju pozitivan predznak.

³ Negdje se za mjernu jedinicu momenta mase koristi metartona (mt), no tada je zabunom moguća zamjena te jedinice za metričku tonu, iako se, prema SI sustavu jedinica, ona označava s t. Postoji još nekoliko nepravilnih simbola za mjerne jedinice, npr. T, mT, MT, mt, Mt, i Te. Nepravilnost korištenja tih simbola ogleda se u tome što su neki od navedenih zapravo simboli drugih mjernih jedinica SI sustava, poput tesla (T), megatesla (MT), militesla (mT), megatona (Mt). Metartonu se ne bi trebalo miješati s militonom, iz razloga što je $10^{-3}t$ već izraženo kilogramom (kg). Izvor: <http://en.wikipedia.org/wiki/Tonne> (30.VII. 2014., 11:13).

Suma uzdužnih momenata, koja se označava s ΣM_u ili ΣU_m , koristi se pri računu uzdužne centracije, čime se određuje udaljenost sustavnog težišta broda G od krmene okomice ili glavnog rebra. Uobičajeno je da se udaljenost točke G od krmene okomice označava s XG .

Deplasman (eng. *displacement*) ili istisnina broda jest ukupna masa broda izražena masom tekućine koju brod svojim uronjavanjem istiskuje. Promjena gustoće tekućine u kojoj brod pluta (npr. prelazak iz slane u slatku vodu) ne može promijeniti deplasman broda, već samo volumen njegovog uronjenog dijela.

$$D = U$$

Težina (eng. *gravity*) broda je resultantna sila svih težina koje se nalaze na brodu, a položaj iz kojeg ona djeluje je sustavno težište broda. Znači, sustavno težište broda je zamišljena točka iz koje zajednički djeluju sve težine na brodu, a njegova visina iznad kobilice broda određuje se računom centracije.

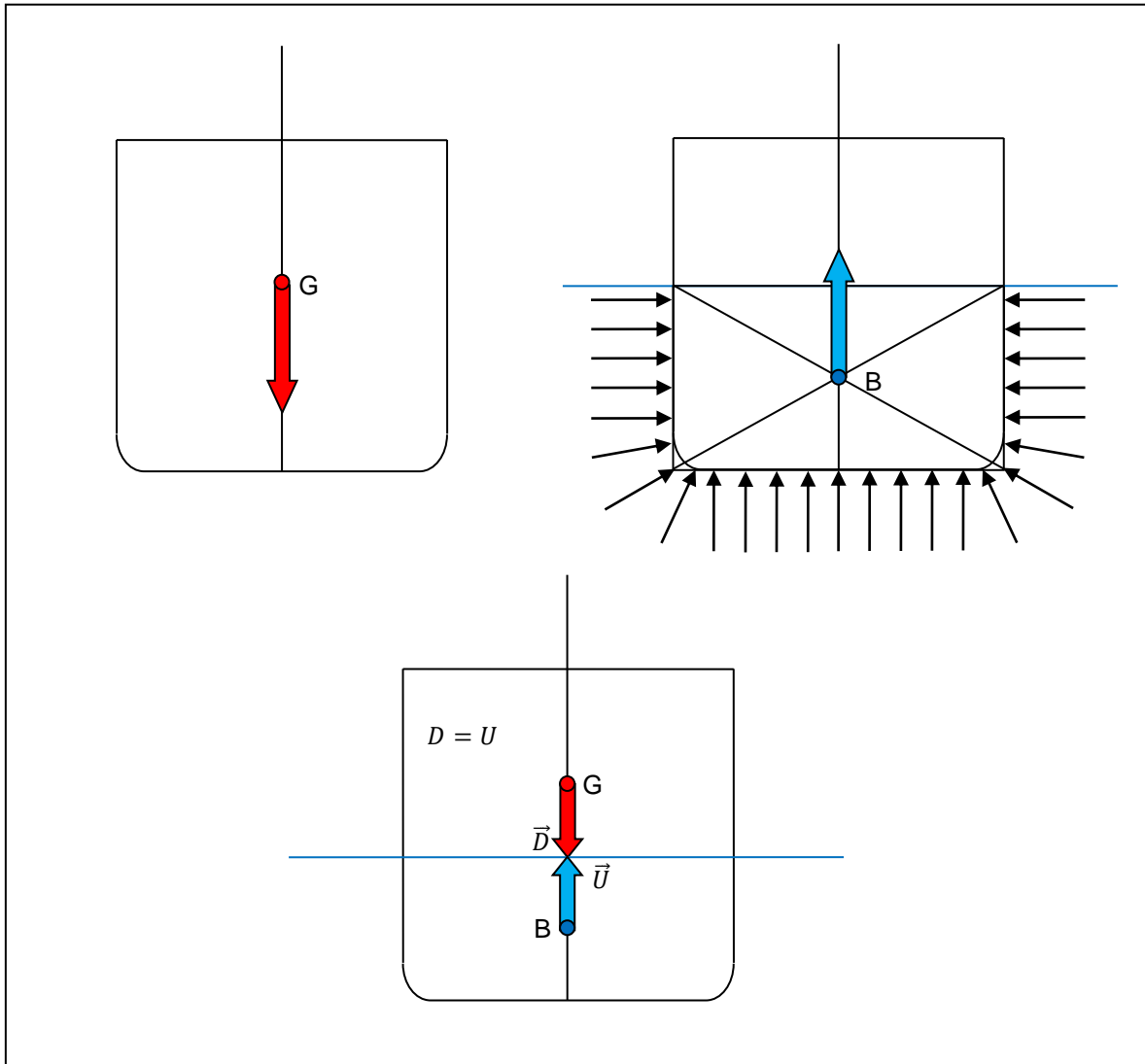
Uzgon (eng. *buoyancy*) je sila koja omogućava plutanje, a određuje je volumen uronjenog dijela broda i gustoće medija u kojem se on nalazi, odnosno morske vode. On je resultantna sila beskonačno mnogo sila koje djeluju okomito na vanjsku stijenk u oplata broda, a može se shvatiti kao sila kojom morska voda nastoji istisnuti brod, pa se često naziva i sila istisnine. Težina i uzgon su sile jednake po veličini, a suprotne po smjeru.

Deplasman (eng. *displacement*) ili istisnina je masa broda izražena masom tekućine koju istiskuje prilikom uranjanja, a jednak je umnošku volumena uronjenog dijela broda i gustoće medija u kojem se nalazi. Gustoća medija u kojem se brod može nalaziti varira između $1,000 \text{ t/m}^3$, što vrijedi za slatku vodu, i $1,025 \text{ t/m}^3$ za morsku vodu, uz neke iznimke. Kako se deplasman kao ukupna masa broda može promijeniti jedino ukrcajem ili iskrcajem neke mase na ili s njega, prilikom promjene gustoće medija u kojem se nalazi brod mora se promijeniti volumen uronjenog dijela broda, kako bi se zadovoljila sljedeća jednakost:

$$D = V \times \rho$$

pri čemu je D deplasman broda, V volumen uronjenog dijela broda u medij i ρ gustoća medija u kojem se brod nalazi.

Shema 3. Prikaz težine, uzgona, prvog i drugog uvjeta plovnosti



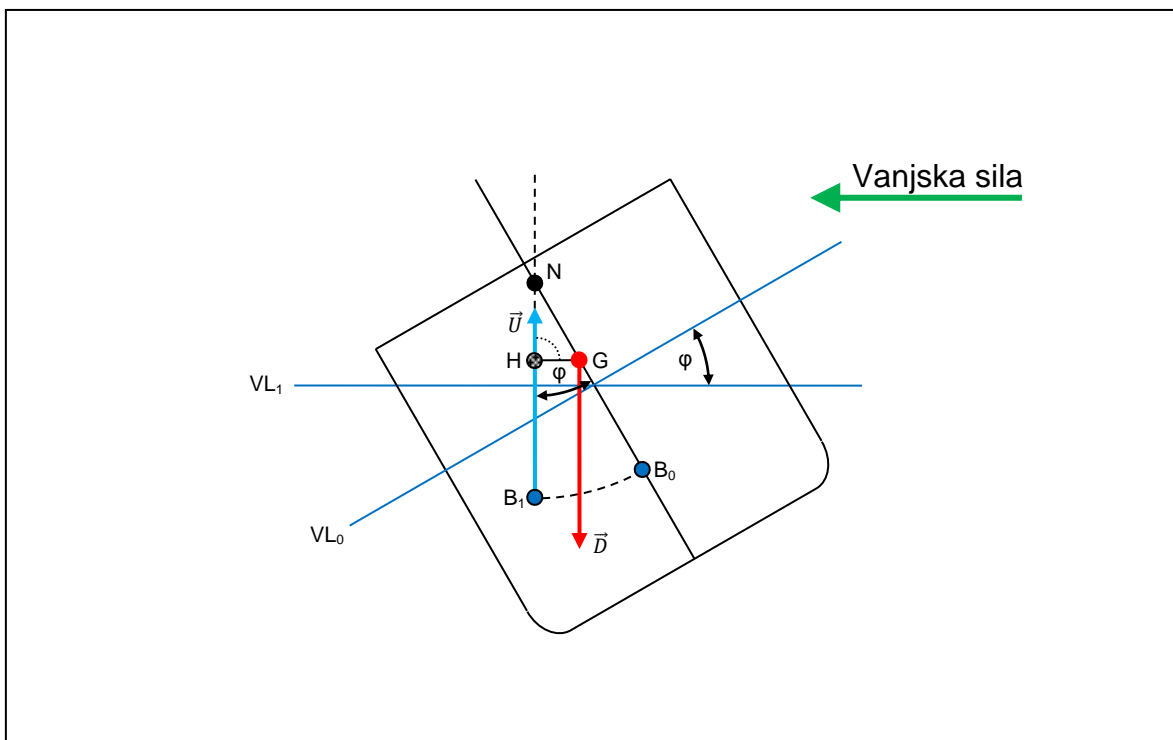
Prema drugom uvjetu plovnosti, sila uzgona i sila deplasmana moraju se nalaziti na istom pravcu okomitom na plovnu vodenu liniju, a to omogućuje ravnotežu broda.

Mehanizam uspravljanja broda može se promotriti na sljedeći način (Shema 4).

Brod je uspravan, a na brod počne djelovati neka vanjska sila koja ga nagiba (npr. vjetar ili val). Nagibanjem broda dolazi do promjene oblika podvodnog dijela broda, što dovodi do promjene položaja težišta uzgona. Tada dolazi do odstupanja od drugog uvjeta

plovnosti, a kako bi se on ispunio, težište uzgona mora se postaviti u takav položaj da se zajedno sa sustavnim težištem broda nalazi na istom pravcu okomitom na vodenu liniju. Sila uzgona sada djeluje okomito prema gore iz nove točke B_1 , a sila deplasmana broda nastavlja djelovati okomito prema dolje iz sustavnog težišta G čiji se položaj nije promijenio, budući da nije došlo do promjene rasporeda tereta na brodu. Između sila uzgona i deplasmana pojavljuje se udaljenost GH koja predstavlja polugu sprega sila u nastojanju vraćanja broda u uspravan položaj.

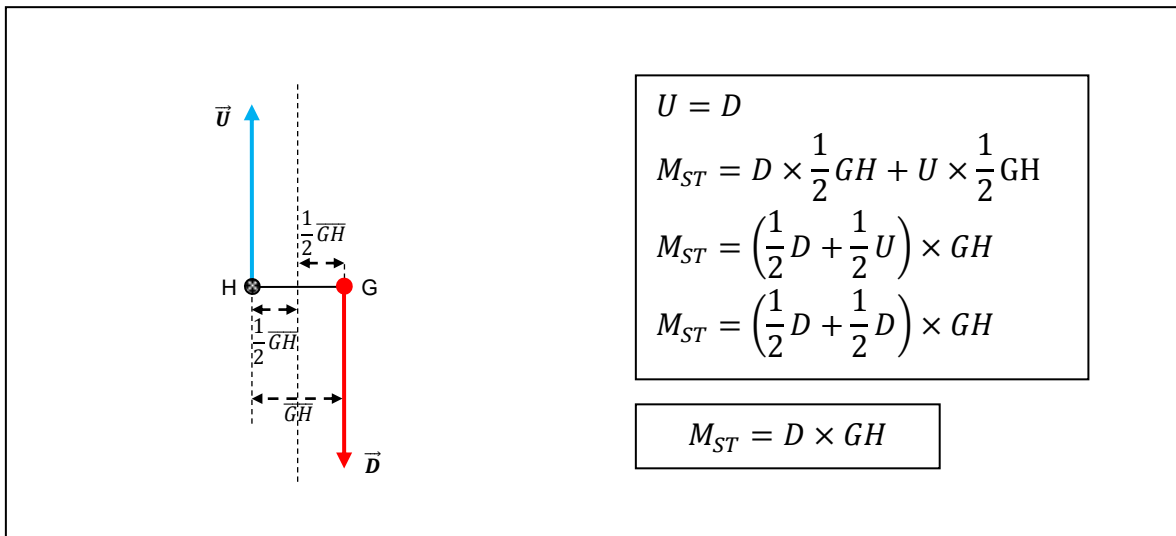
Shema 4. Mehanizam uspravljanja broda



Kako se sile mogu slobodno premještati po pravcu, silu uzgona može se premjestiti u zamišljenu točku H , koja predstavlja točku najmanje udaljenosti sustavnog težišta od pravca na kojem djeluje sila uzgona. GH poluga je dužina okomita na silu deplasmana i uzgona. Poznavajući vrijednost GH poluge, deplasmana D i uzgona U može se odrediti iznos momenta statičke stabilnosti M_{ST} koji predstavlja moment kojim se brod odupire vanjskoj sili (Shema 5).

$$M_{ST} = D \times GH$$

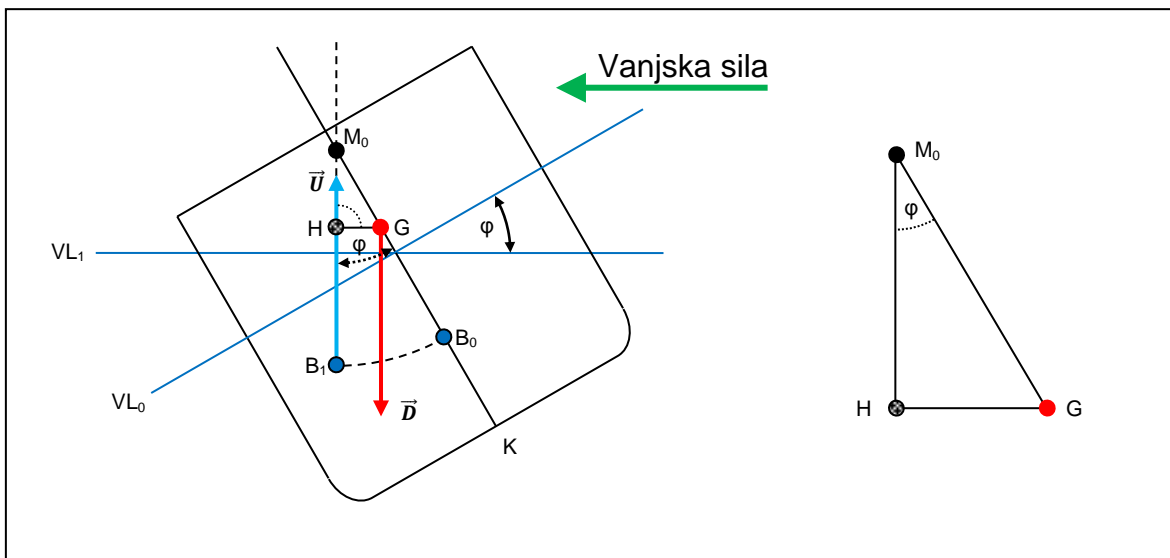
Shema 5. Određivanje momenta statičke stabilnosti



Pri proračunu početnog momenta statičke stabilnosti, poluga poprečne stabilnosti odgovara:

$$GH_0 = M_0 G \times \sin \varphi$$

Shema 6. Određivanje početnog momenta poprečne statičke stabilnosti



Zato se početni moment poprečne statičke stabilnosti može proračunati na sljedeći način:

$$M_{ST_0} = D \times M_0 G \times \sin \varphi$$

Treći uvjet plovnosti zahtijeva da brod ima stabilnu ravnotežu, što će biti približno objašnjeno u potpoglavlju 2.4 Vrste ravnoteže.

2.4. VRSTE RAVNOTEŽE

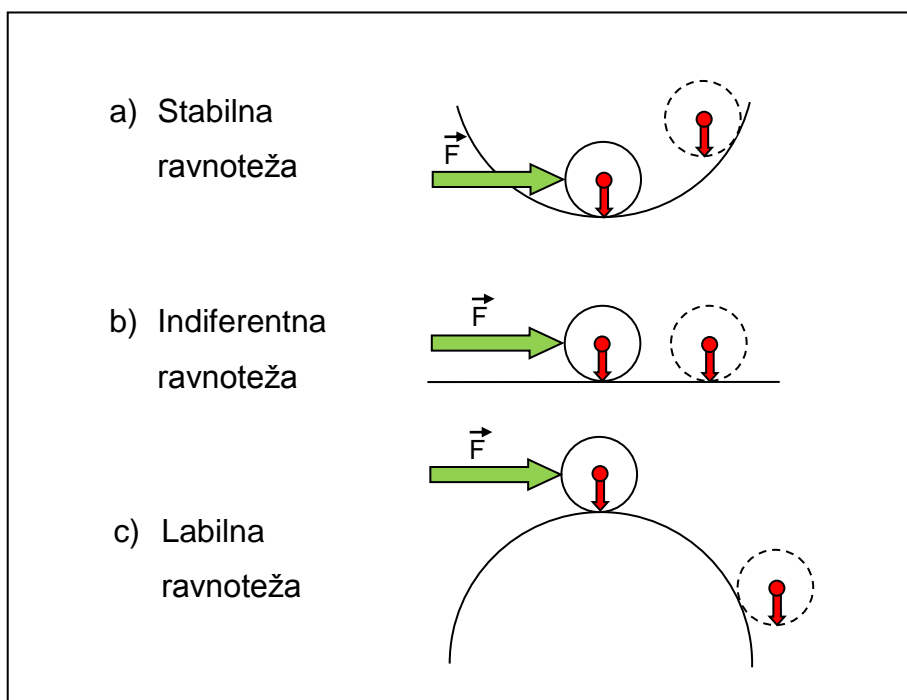
Tijelo se može naći u tri različita položaja ravnoteže, a svaki od njih ima svoja obilježja koja određuju njegovo ponašanje pri djelovanju vanjskih sila na njega (Shema 7). Ti položaji ravnoteže su:

- stabilna ravnoteža
- indiferentna ravnoteža i
- labilna ravnoteža.

Shema 7 prikazuje pojednostavljeno ponašanje tijela za vrijeme i nakon prestanka djelovanja vanjske sile na njega i nije stvarna slika ponašanja broda.

Stabilna ravnoteža je željeno stanje ravnoteže za brod; to je stanje u kojem će se brod moći odupirati vanjskim silama, a nakon prestanka njihovog djelovanja vratiti u prvobitni položaj. Kad na tijelo koje se nalazi u stabilnom ravnotežnom položaju počne djelovati neka vanjska sila, ono se pomiče, a čim vanjska sila prestane djelovati, ono se počinje vraćati u svoj prvobitni položaj dok se konačno u njemu ne umiri (Shema 7, ad. a)).

Shema 7. Prikaz ponašanja tijela prema vrsti ravnoteže



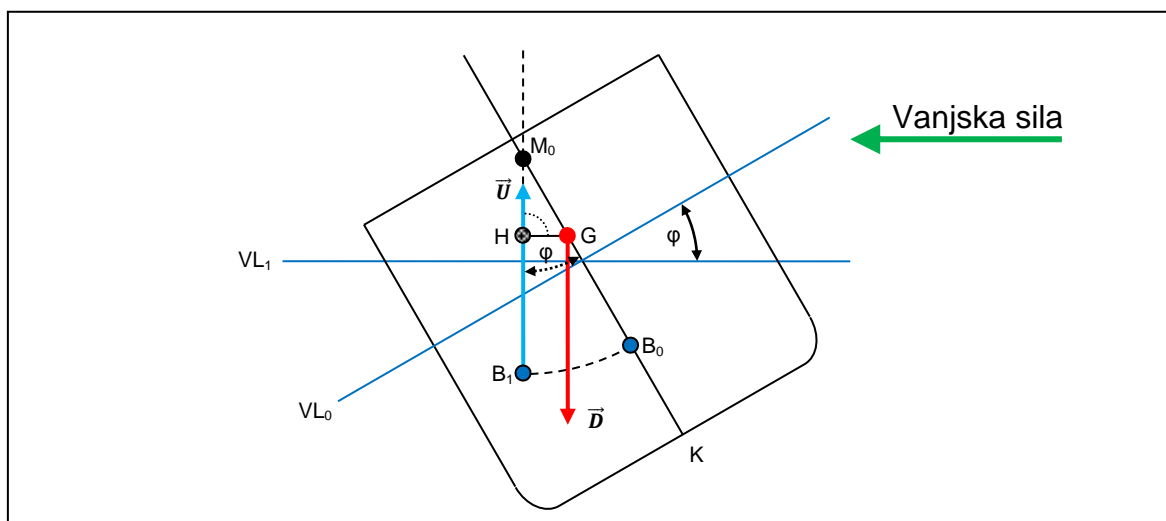
Indiferentna ravnoteža jest nepovoljnije stanje ravnoteže gledano iz perspektive stabilnosti broda. U takvom stanju tijelo nakon prestanka djelovanja vanjske sile ostaje u položaju u koji ga je ona dovela (Shema 7, ad. b)).

Sa stanovišta stabilnosti broda, najnepovoljnije stanje ravnoteže jest labilna ravnoteža. U takvom se stanju tijelo nakon prestanka djelovanja vanjske sile nastavlja gibati u smjeru u kojem ga je ona pomicala. Praktički je dovoljan samo impuls koji će započeti gibanje tijela, a ono samo ima takva obilježja da se nastavlja gibati (Shema 7, ad. c)).

Početna poprečna stabilnost ovisi o međusobnom položaju točaka početnog poprečnog metacentra M_0 i sustavnog težišta broda G .

Stabilna ravnoteža broda, sa stanovišta početne poprečne stabilnosti, podrazumijeva stanje u kojem se točka početnog poprečnog metacentra M_0 nalazi na većoj visini od kobilice broda nego sustavno težište G . Kada se brod s takvim rasporedom točaka M_0 i G nagne uslijed djelovanja vanjske sile, dolazi do promjene oblika podvodnog dijela broda i promjene položaja težišta uzgona B u novi položaj B_1 .

Shema 8. Poprečni presjek broda s pozitivnom metacentarskom visinom



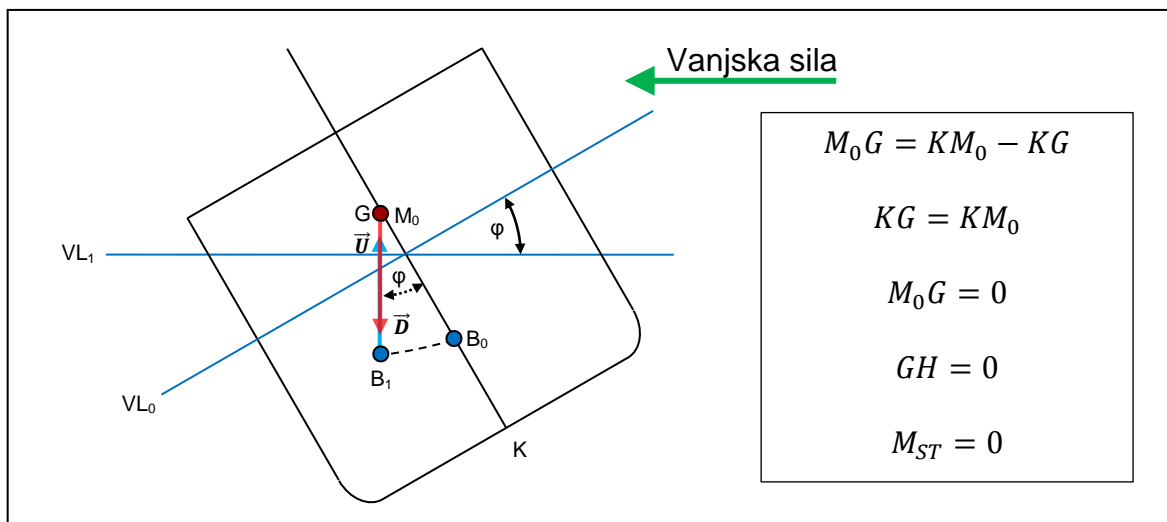
Točka M_0 je sjecište pravca na kojem djeluje sila uzgona i simetrale broda⁴ i njezin je položaj unaprijed poznat, a utvrđuje ga brodogradilište prilikom gradnje broda. U ovom

⁴ Buljan, I., *Stabilnost broda*, Školska knjiga, Zagreb, 1982., str. 8.

nagnutom položaju broda dolazi do nastanka sprega sila uzgona \mathbf{U} i deplasmana broda \mathbf{D} na poluzi \mathbf{GH} , čime je stvoren moment kojim se brod odupire djelovanju vanjske sile koji nakon prestanka njezinog djelovanja vraća brod u položaj u kojem je bio prije nego što ga je vanjska sila iz njega pomaknula. Za stabilnu ravnotežu broda često se koristi izraz „brod s pozitivnom metacentarskom visinom“ (Shema 8).

Kada se točke početnog poprečnog metacentra \mathbf{M}_0 i sustavnog težišta \mathbf{G} nalaze u istom položaju, tada je metacentarska visina $\mathbf{M}_0\mathbf{G}$ jednaka nuli (Shema 9). Takvo stanje broda odgovara indiferentnoj ravnoteži. U tom slučaju, kad vanjska sila nagne brod, nema udaljenosti točke \mathbf{G} i pravca na kojem djeluje sila uzgona \mathbf{U} , pa stoga nema ni poluge \mathbf{GH} . Sile uzgona i težine jednake su po iznosu, a djeluju u suprotnim smjerovima na istom pravcu, tako da se njihovo djelovanje poništava. Budući da je moment statičke stabilnosti \mathbf{M}_{ST} umnožak deplasmana \mathbf{D} i poluge \mathbf{GH} koja je jednaka nuli, znači da ne postoji moment kojim bi se brod opirao vanjskoj sili niti se nakon prestanka njenog djelovanja vratio u prvobitni položaj, već će on ostati u onom položaju u koji ga vanjska sila dovede i nakon prestanka njezinog djelovanja.

Shema 9. Poprečni presjek broda s metacentarskom visinom jednakom nuli

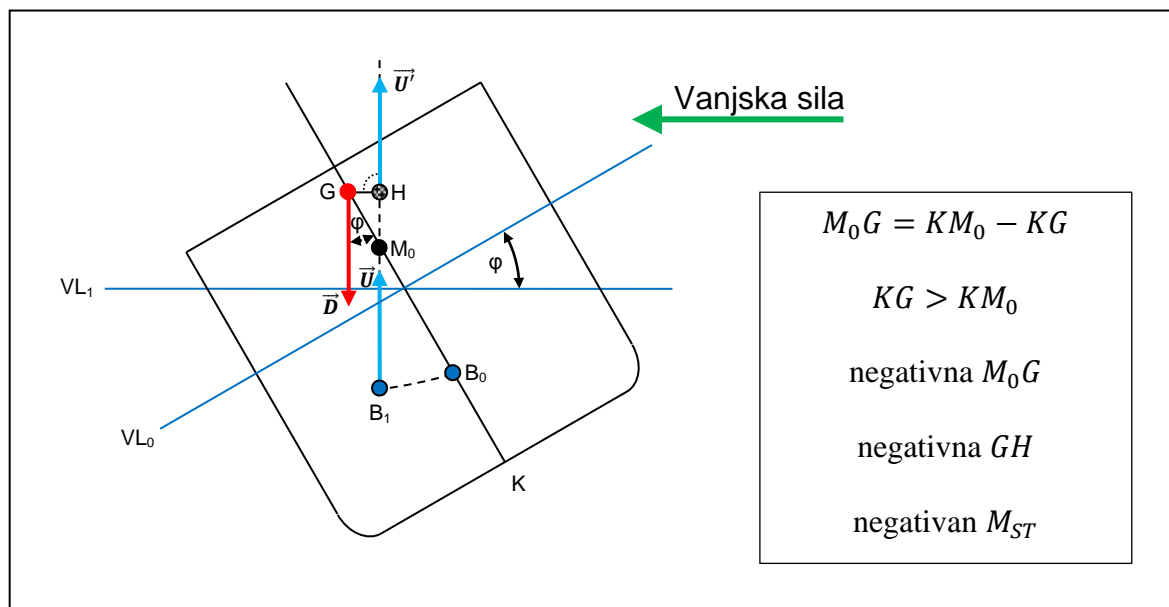


Treći slučaj ravnotežnog stanja broda je stanje labilne ravnoteže, koji se često naziva i slučaj „broda s negativnom metacentarskom visinom“ (Shema 10). Izraz „negativna metacentarska visina“ proizlazi iz međusobnog rasporeda točaka početnog poprečnog metacentra \mathbf{M}_0 i sustavnog težišta broda \mathbf{G} u kojem je početni poprečni metacentar na visini od kobilice \mathbf{KM}_0 manjoj nego što je sustavno težište broda \mathbf{KG} . Kad

vanjska sila nagne brod, mijenja se položaj težišta uzgona iz B_0 u B_1 , a sila uzgona djeluje na pravcu koji presijeca uzdužnu os broda u točki početnog poprečnog metacentra M_0 koja je na nižem položaju iznad kobilice nego sustavno težište G , a najkraća udaljenost točke G i sile uzgona nalazi se u točki H čija je spojnica okomita na sile D i U . Dužina GH predstavlja polugu sprega sila uzgona i težine koji u ovom slučaju ne stvara moment kojim će se brod odupirati vanjskoj sili i nakon prestanka njezinog djelovanja vratiti u prvobitni položaj, već rezultatni moment pomaže nagibanju broda. Pri stanju labilne ravnoteže spreg sila djeluje obrnuto nego kod stanja stabilne ravnoteže.

Iako navedeno ukazuje na prevrtanje broda, ne mora značiti da će do takvog događaja doći, zato što pri većim kutovima nagiba (većim od približno 12°) točka metacentra izlazi iz simetrale broda i može se postaviti iznad točke sustavnog težišta, što dovodi do stabilne ravnoteže i pojave momenta statičke stabilnosti kojim će se brod početi odupirati vanjskoj sili. Ovo vrijedi za brodove s uspravnim bokovima (brodovi sa slabo zakrivljenim rebrima⁵).

Shema 10. Poprečni presjek broda s negativnom metacentarskom visinom



⁵ Uršić, J., *Stabilitet broda – I dio (osnovni pojmovi)*, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1962., str. 38.

3. POPREČNA STABILNOST

Poprečna stabilnost promatra nagibanja broda oko uzdužne osi, a u pripadajuće proračune spadaju određivanje metacentarske visine, račun poprečne centracije, pomak mase (horizontalni, vertikalni i kombinirani), ukrcaj i iskrcaj mase, utjecaj slobodnih površina, utjecaj visećeg tereta na stabilnost broda, te proračunavanje mase ili udaljenosti na koju će se pomaknuti/ukrcati/iskrcati masa kako bi se ispravio brod za određeni nagib.

Pokazateljem početne poprečne stabilnosti smatra se početna poprečna metacentarska visina M_0G , koja predstavlja razliku između visine početnog poprečnog metacentra iznad kobilice KM_0 i visine sustavnog težišta broda iznad kobilice broda KG . Visina KM_0 određuje se iz tablica s hidrostatskim podacima broda za pripadajući deplasman/srednji gaz koje izrađuje brodogradilište, a visina KG računom poprečne centracije.

Mase koje se planski mogu ukrcati/iskrcati/premjestiti, a koje mogu imati utjecaj na stabilnost broda su teret i balast. Međutim, nekad dolazi i do nenamjernog ukrcaja novih masa na brod, kao što je to slučaj pri prelijevanju valova na palubu broda ili naplavljivanje nekog prostora uslijed oštećenja trupa. Uobičajeno je mase označavati s p . Svaka masa ima svoj položaj na brodu u odnosu na kobilicu i simetralu. Njihovo sjecište može se promatrati kao ishodište koordinatnog sustava u poprečnoj stabilnosti. Položaj mase definiran je visinom iznad kobilice (vertikalna koordinata) i udaljenošću od uzdužne osi (horizontalna koordinata). Uobičajene oznake za ove koordinate su:

Kg – visina težišta mase iznad kobilice broda

d – udaljenost težišta mase od uzdužne osi broda.

Kut nagiba broda je onaj koji nastaje između pravca na kojem djeluje sila uzgona i simetrale broda, a uzrokuje ga povećanje nagibnih momenata na jednom od bokova broda. Takvi nagibni momenti premještaju sustavno težište broda G iz simetrale broda, gdje se ono nalazi kad je suma nagibnih momenata jednaka nuli, a brod uspravan. Kut nagiba također može nastati uslijed djelovanja prekretnih momenata koje stvaraju vanjske sile poput valova ili vjetra. Oznaka za kut nagiba jest slovo grčkog alfabeta φ (fi).

3.1. ODREĐIVANJE POČETNE POPREČNE METACENTARSKE VISINE

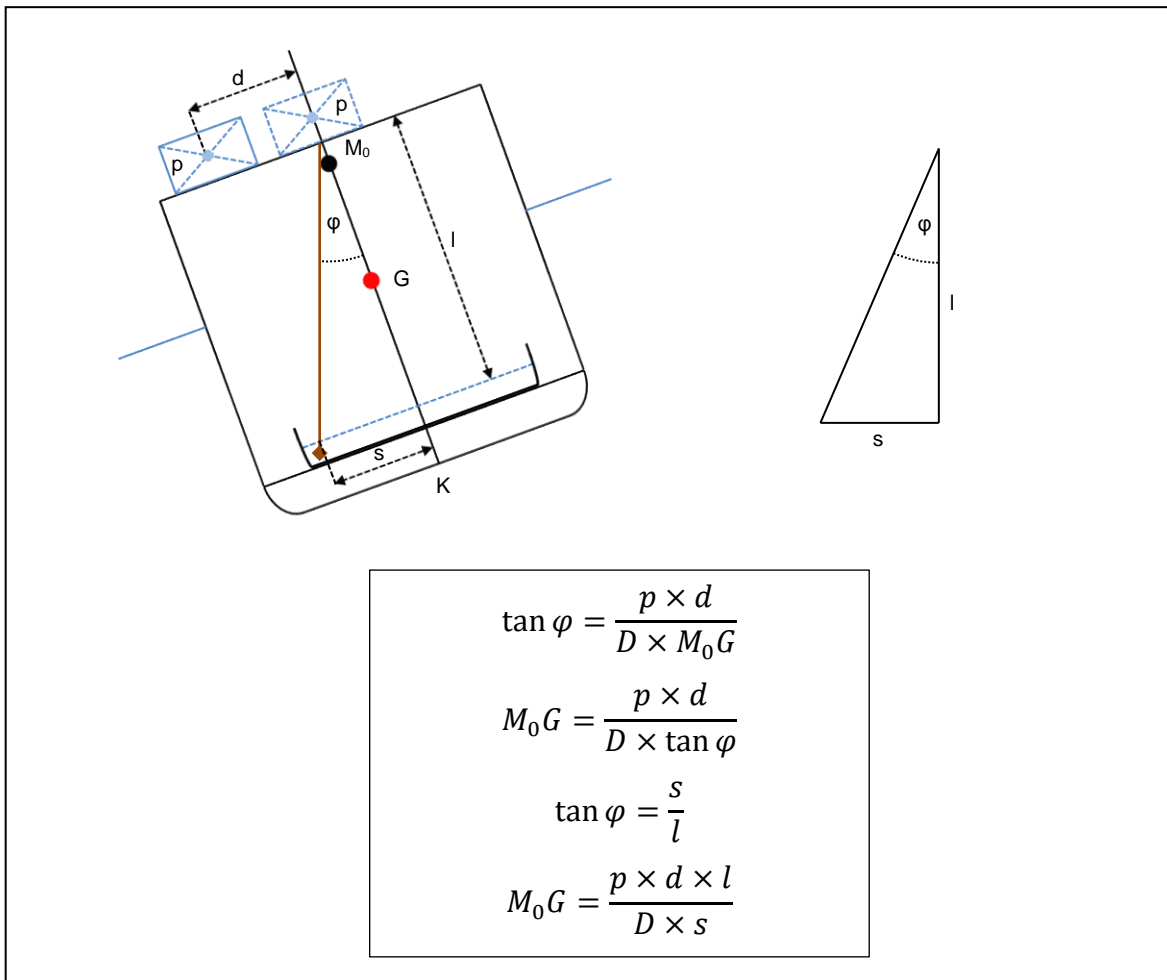
Početna poprečna metacentarska visina je, kao što je već rečeno, pokazatelj stabilnosti pri početnim kutovima nagiba (do približno 12°), a označava se s M_0G . Ona predstavlja udaljenost između točaka početnog poprečnog metacentra M_0 i sustavnog težišta broda G , a izračunava se kao razlika visine točke M_0 iznad kobilice KM_0 i visine točke G iznad kobilice KG .

Visina početnog poprečnog metacentra iznad kobilice KM_0 određuje se koristeći tablice s hidrostatskim podacima broda, a visina sustavnog težišta broda iznad kobilice KG računom poprečne centracije. Poprečna centracija će biti pobliže obrađena u poglavlju **3.7. Račun poprečne centracije.**

Osim navedenog načina, početna poprečna metacentarska visina M_0G može se odrediti se na još dva načina: pokusom nagiba i pomoću perioda valjanja (ljuljanja) broda.

Pokus nagiba jest postupak određivanja početne poprečne metacentarske visine M_0G praznog broda koji se izvodi pomoću viska obješenog u simetrali broda. Njegov je slobodni kraj umočen u posudu s tekućinom koja stvara trenje kako bi se na letvici s podjelom mogla očitati udaljenost od simetrane broda s koja će nastati uslijed kuta nagiba φ uzrokovanog pomicanjem utega mase p za udaljenost d . Duljina viska l podrazumijeva udaljenost od točke o koju je obješen do točke u kojoj siječe letvicu s podjelom kad je brod u uspravnom položaju (Shema 11).

Shema 11. Pokus nagiba



Iz trokuta koji nastaje kutom nagiba φ vidljiv je odnos stranica l i s :

$$\tan \varphi = \frac{s}{l}$$

Povezivanjem izraza za određivanje kuta nagiba (detaljnije objašnjeno u poglavlju 3.3.2. *Horizontalni pomak mase*):

$$\tan \varphi = \frac{p \times d}{D \times M_0 G}$$

$$M_0 G = \frac{p \times d}{D \times \tan \varphi}$$

i odnosa s , l i φ , dobiva se sljedeći izraz za izračunavanje početne poprečne metacentarske visine:

$$M_0 G = \frac{p \times d \times l}{D \times s}$$

Period valjanja⁶ (ljuljanja) broda izravno je povezan s početnom poprečnom metacentarskom visinom M_0G , a on predstavlja podatak o vremenu koje je potrebno brodu da se nagne s jednog boka na drugi i ponovno natrag. To je empirijski utvrđen način dobivanja vrijednosti M_0G .

Početna poprečna metacentarska visina se pomoću perioda valjanja izračunava na sljedeće načine:

- za metrički sustav jedinica:

$$M_0G = \left(\frac{0,8 \times B}{T}\right)^2$$

- za engleski sustav jedinica:

$$M_0G = \left(\frac{0,44 \times B}{T}\right)^2$$

Ukoliko se koristi izraz za metrički sustav jedinica, B označava širinu broda u metrima (m), za razliku od izraza za engleski sustav jedinica gdje je B izražena u stopama (ft). T u oba izraza predstavlja vrijeme u sekundama koje je potrebno brodu da se nagne s jednog boka na drugi i ponovno natrag, tj. period valjanja.

Također, kad je već poznata početna poprečna metacentarska visina M_0G može se odrediti period valjanja T transformacijom navedenih izraza:

- za metrički sustav jedinica:

$$T = \frac{0,8 \times B}{\sqrt{M_0G}}$$

- za engleski sustav jedinica:

$$T = \frac{0,44 \times B}{\sqrt{M_0G}}$$

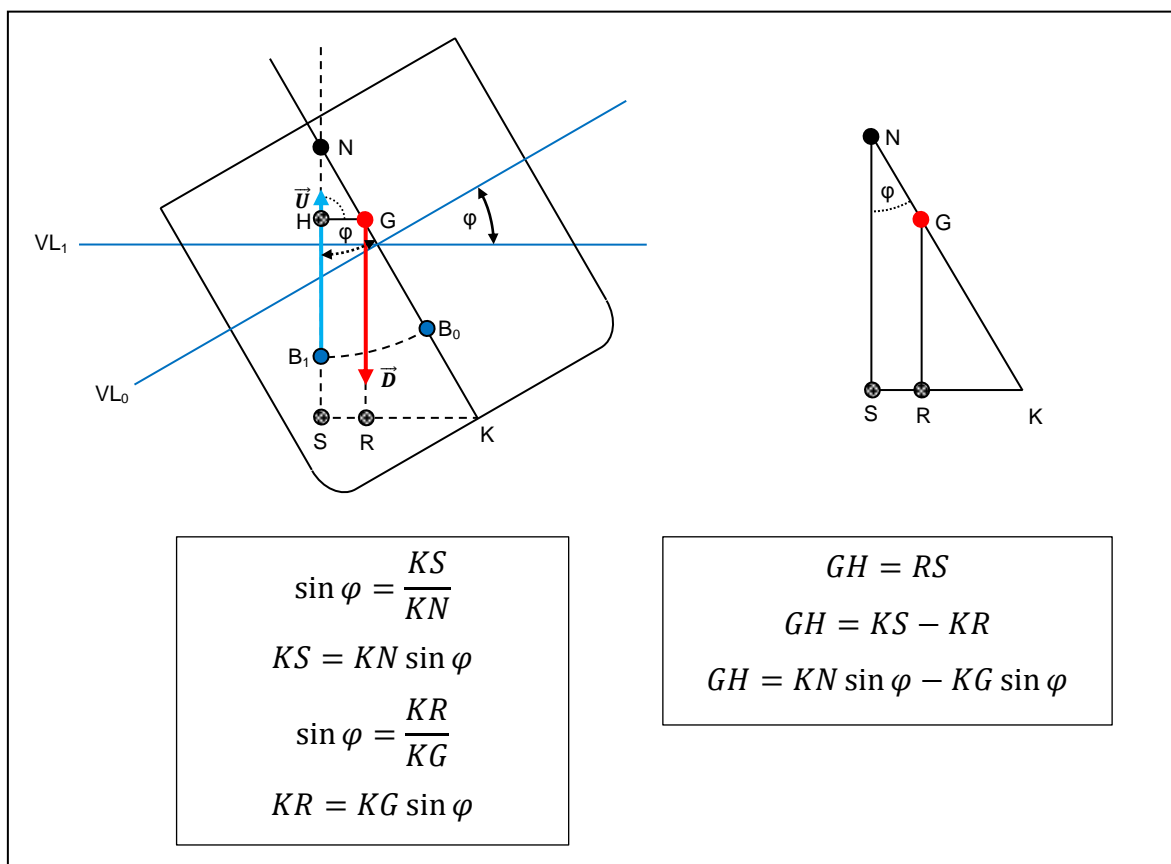
Važno je napomenuti da se za različite vrste brodova koeficijent s kojim se u brojniku množi širina broda B može mijenjati.

⁶ *Vademecum maritimus – podsjetnik pomorcima*, Pomorski fakultet Rijeka, Rijeka, 2002., str. 90.

3.2. ODREĐIVANJE POLUGE GH

Budući da pri većim kutovima nagiba točka metacentra izlazi iz simetrale broda, metacentarska visina se ne može više koristiti kao pouzdan pokazatelj stabilnosti broda, nego tada pokazatelj stabilnosti postaje poluga GH . Njena vrijednost ovisi o kutu nagiba broda, a pri određivanju početnog momenta stabilnosti izračunava se kao umnožak početne poprečne metacentarske visine i prirodne vrijednosti sinusa kuta nagiba. Takav izraz dobiva se tako što se uvode dvije pomoćne točke S i R , čime nastaju dva slična trokuta KNS i KGR (Shema 12). Točka S je sjecište pravca na kojem djeluje sila uzgona U i na njega okomitog pravca koji prolazi kobilicom broda K , a točka R sjecište pravca na kojem djeluje sila deplasmana broda D također s na njega okomitim pravcem koji prolazi kobilicom broda K . Kutovi $\sphericalangle KSN$ i $\sphericalangle KRG$ su pravi, a dužina SR jednaka je poluzi GH . Dužine KS i KR mogu se izračunati koristeći trigonometrijsku funkciju sinus kuta nagiba φ .

Shema 12. Određivanje poluge GH



$$\sin \varphi = \frac{KS}{KN}$$

$$KS = KN \sin \varphi$$

$$\sin \varphi = \frac{KR}{KG}$$

$$KR = KG \sin \varphi$$

Kada su konačno izračunate duljine dužina **KS** i **KR**, njihova razlika **RS** daje vrijednost poluge **GH**.

$$GH = RS$$

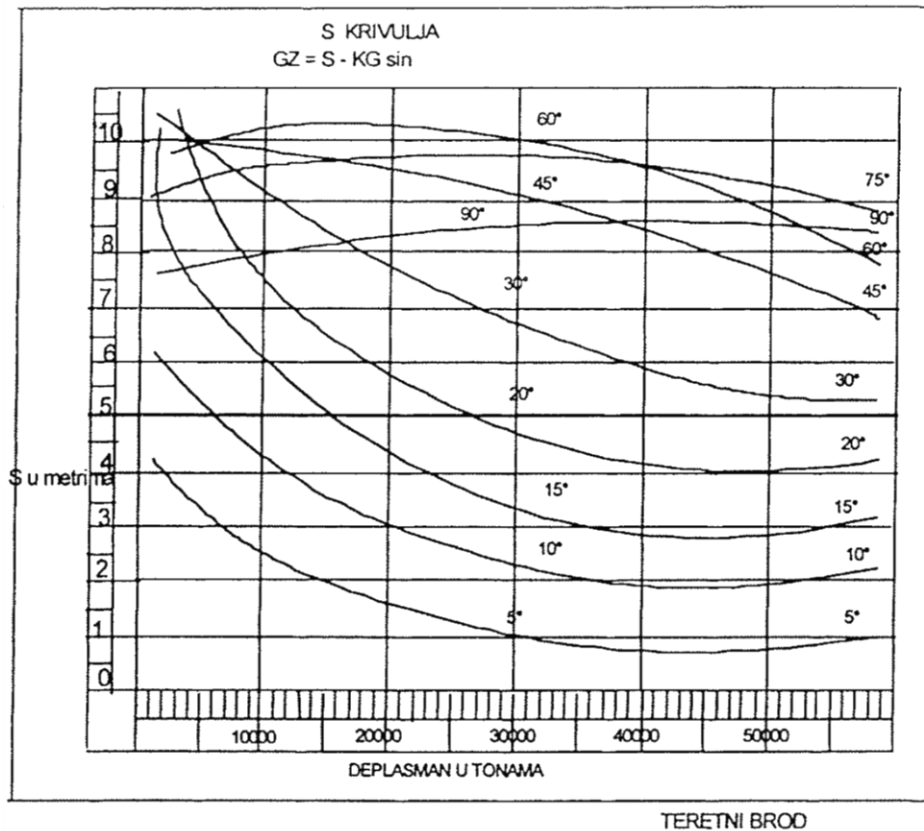
$$RS = KS - KR$$

$$GH = KN \sin \varphi - KG \sin \varphi$$

Vrijednosti **KN sin φ** određuju se iz dijagrama sastavljenih od više krivulja koje se nazivaju *pantokarene izokline*, a svaka daje vrijednost za svoj kut nagiba i sve deplasmane broda. Te se vrijednosti još označavaju s **KM sin φ** ili „**S**“, pa se i navedeni dijagrami često nazivaju „**S**“ *krivulje* (Grafikon 1 i Grafikon 2). Budući da izraz **KN sin φ** nije dobiven množenjem vrijednosti **KN** i **sin φ**, bolje ga je označiti sa „**S**“, pa se izraz za dobivanje **GH** može zapisati kao:

$$GH = „S“ - KG \sin \varphi$$

Grafikon 1. Primjer dijagrama pantokarena izoklina (1)

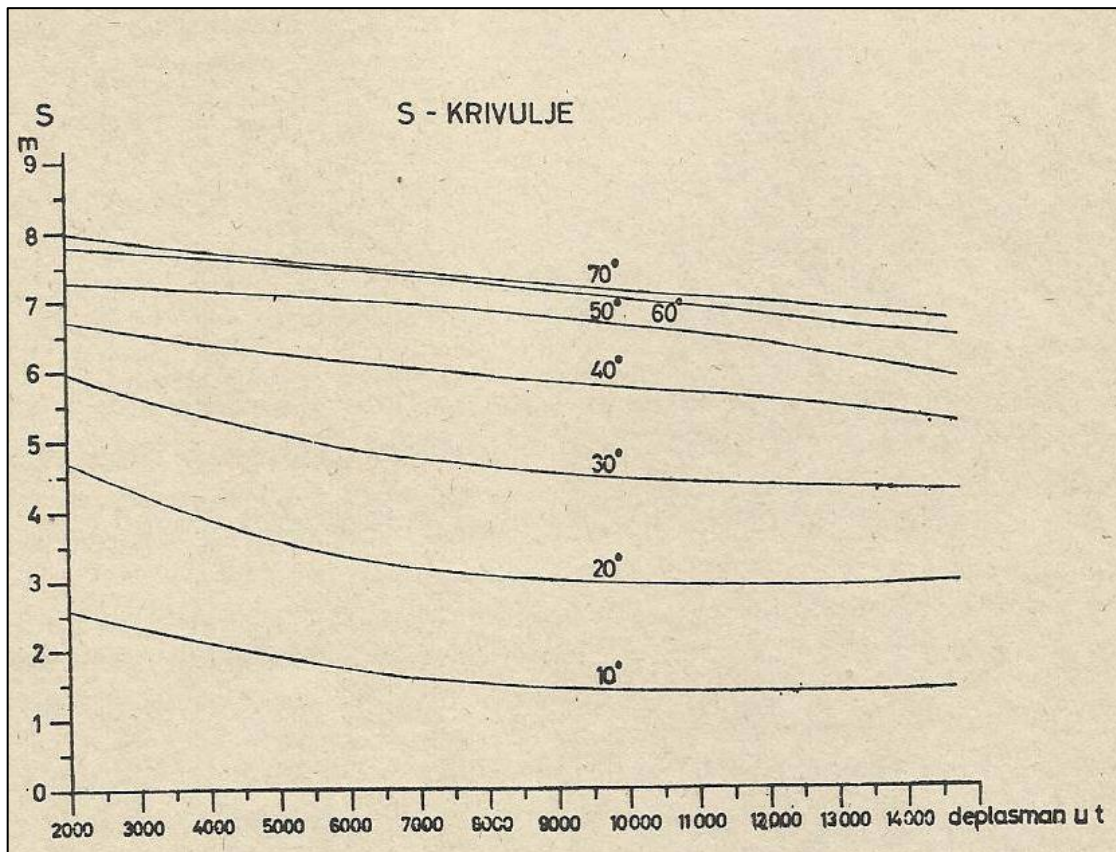


Izvor: Marnika F., *Stabilnost broda*, Znanje, 1999., str. 66.

Vrijednosti $KG \sin \varphi$ se izračunavaju množenjem visine sustavnog težišta broda iznad kobilice KG s prirodnom vrijednošću sinusa kuta nagiba. Ako na brodu postoje slobodne površine (o kojima će više biti rečeno u poglavlju 3.5. *Utjecaj slobodnih površina*), potrebno je uračunati njihov utjecaj na visinu sustavnog težišta broda iznad kobilice i koristiti visinu sustavnog težišta broda iznad kobilice ispravljenu za utjecaj slobodnih površina KG_V .

$$KG_V = KG + FSC$$

Grafikon 2. Primjer dijagrama pantokarena izoklina (2)



Izvor: Buljan, I., *Stabilnost broda*, Školska knjiga, Zagreb, 1982., str. 45.

Prikladno je zbog preglednosti formirati tablicu pomoću koje se određuju vrijednosti GH (određuju se vrijednosti za one kutove nagiba za koje su dani podatci u tablicama ili dijagramima „S“ krivulja), u kojoj će se one izračunavati kao razlika „S“ i $KG_V \sin \varphi$. U toj se tablici može dodati još jedan stupac u kojem će se za različite kutove nagiba odrediti i moment statičke stabilnosti M_{ST} koji je umnožak deplasmana D i poluge GH (Tablica 1).

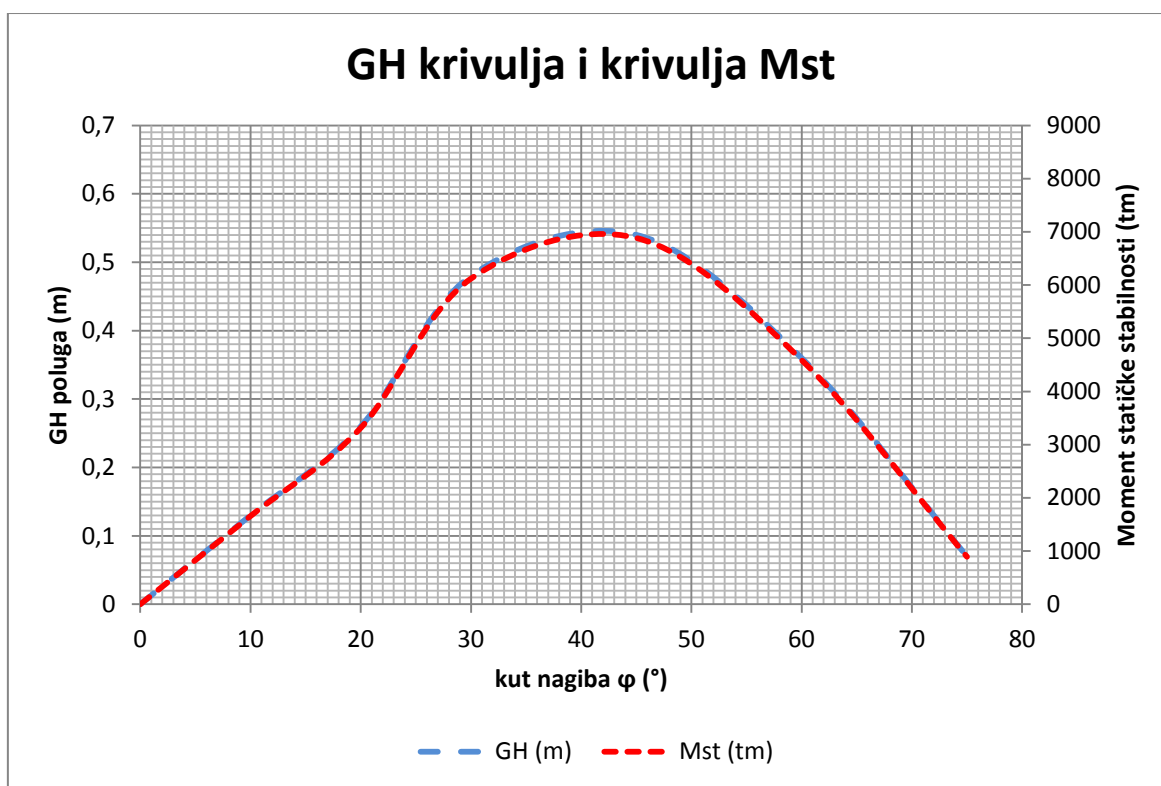
$$GH = „S“ - KG_V \sin \varphi$$

Nakon izrađene tablice, na temelju podataka koje ona sadrži izrađuje se krivulja poluga GH (i ponekad krivulja momenata statičke stabilnosti) kojom se kontrolira stabilnost broda pri većim kutovima nagiba.

Tablica 1. Primjer određivanje poluge GH i momenta statičke stabilnosti M_{ST}

D (t)	12750	FSC (m)	0,12	
KG (m)	6,75	KG_V (m)	6,87	
φ (°)	„ S “ (m)	$KG_V \sin \varphi$ (m)	GH (m)	M_{ST} (tm)
0	0	0	0	0
10	1,32	1,19	0,13	1657,5
20	2,63	2,35	0,26	3315,0
30	3,92	3,44	0,48	6120,0
45	5,40	4,86	0,54	6885,0
60	6,31	5,95	0,36	4590,0
75	6,71	6,64	0,07	892,5

Grafikon 3. Prikaz GH krivulje i krivulje M_{ST}



Izvor: Izradio autor na temelju podataka iz Tablica 1.

3.3. POMAK MASE

Promjenom rasporeda masa na brodu dolazi i do promjene položaja sustavnog težišta broda G . Promatrajući poprečnu stabilnost broda, masa može biti premještena vertikalno, horizontalno i kombinirano (i vertikalno i horizontalno). Vertikalni pomaci masa utječu na promjenu metacentarske visine, a horizontalni na kut nagiba broda.

3.3.1. Vertikalni pomak mase

Vertikalni pomak mase promatra se kroz promjenu visine njezinog težišta iznad kobilice broda Kg . Promjena visine težišta mase h predstavlja razliku visina težišta mase nakon pomaka Kg_1 i prije pomaka Kg_0 . Pomak mase uzrokuje promjenu vertikalnih momenata na brodu koji određuju visinu sustavnog težišta broda KG . Moment je umnožak mase i kraka na kojoj ta masa djeluje, pa stoga vrijedi jednadžba poznata iz poučka o pomaku težišta⁷:

$$\frac{h}{GG_1} = \frac{D}{p}$$
$$D \times GG_1 = p \times h$$

Pri tome D predstavlja deplasman broda, GG_1 pomak sustavnog težišta, p masu koja se pomiče te h udaljenost za koju se masa pomiče. Budući da je GG_1 jedina nepoznanica u navedenoj jednadžbi, vrlo je jednostavno izračunati udaljenost za koju će se pomaknuti sustavno težište broda.

$$GG_1 = \frac{p \times h}{D}$$

Sustavno težište se pomiče u smjeru pomaknute mase za izračunatu udaljenost GG_1 . To znači da ako je masa pomaknuta prema gore, sustavno težište broda će se pomaknuti prema gore, povećavajući visinu sustavnog težišta broda iznad kobilice. Suprotno tome, ako se masa pomiče prema dolje, sustavno će se težište pomaknuti prema dolje, smanjujući tako visinu sustavnog težišta broda iznad kobilice (Tablica 2).

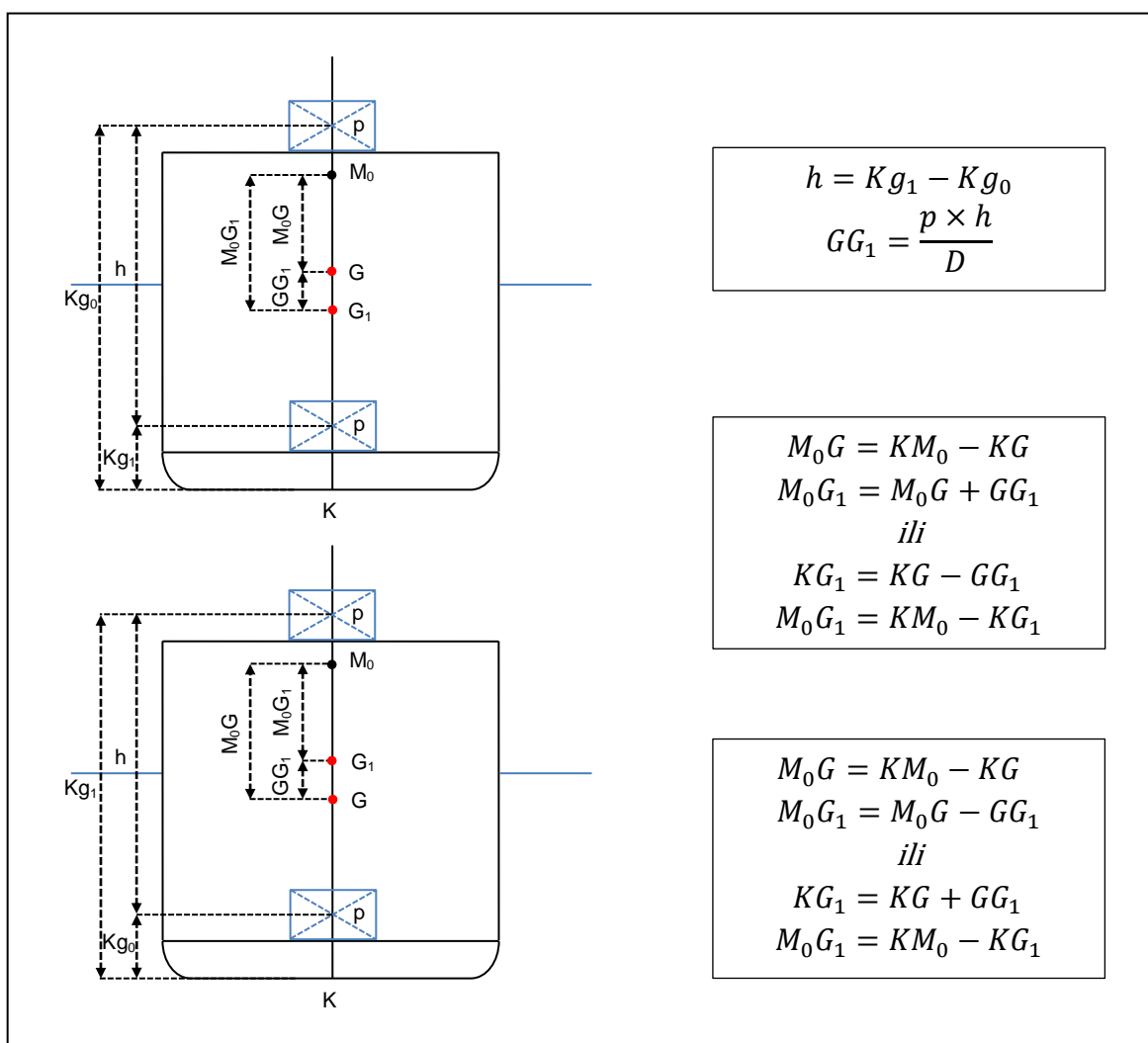
⁷ Buljan, I., *Stabilnost broda*, Školska knjiga, Zagreb, 1982., str. 17.

Tablica 2. Utjecaj smjera pomaka mase na visinu sustavnog težišta broda iznad kobilice i metacentarsku visinu

Pomak mase	Visina sustavnog težišta broda iznad kobilice	Metacentarska visina
Prema gore	$KG_1 = KG + GG_1$	$M_0G_1 = M_0G - GG_1$
Prema dolje	$KG_1 = KG - GG_1$	$M_0G_1 = M_0G + GG_1$

Pomak ovisi i o masi koja se pomiče i o udaljenosti za koju se pomiče, što znači da nije bitna samo sila za određivanje pomaka, već i krak, zato što moment utječe na položaj sustavnog težišta, a sila je samo dio tog momenta.

Shema 13. Vertikalni pomak mase (prema dolje i prema gore)



Početna poprečna metacentarska visina je razlika visina početnog poprečnog metacentra iznad kobilice broda KM_0 i sustavnog težišta broda KG . Kod pomaka mase na brodu, tj. bez ukrcaja ili iskrcaja mase čime bi se promijenio deplasman, vrijednost KM_0 je konstantna. To znači da je kod pomaka mase i pri početnim kutovima nagiba točka M_0 fiksna, a vrijednost početne poprečne metacentarske visine ovisi samo o visini sustavnog težišta broda iznad kobilice.

$$M_0G = KM_0 - KG$$

$$M_0G_1 = KM_0 - KG_1$$

Nova početna poprečna metacentarska visina može se odrediti izravno zbrajajući ili oduzimajući pomak sustavnog težišta broda na prethodnu početnu poprečnu metacentarsku visinu ili od nje (Tablica 2).

3.3.2. Horizontalni pomak mase

Horizontalni pomak mase je pomak kojeg karakterizira promjena udaljenosti težišta mase p od prijašnjeg položaja d . Simetrala predstavlja ishodište kod horizontalnog pomaka, a masa koji se nalazi u simetrali ima krak d jednak nuli.

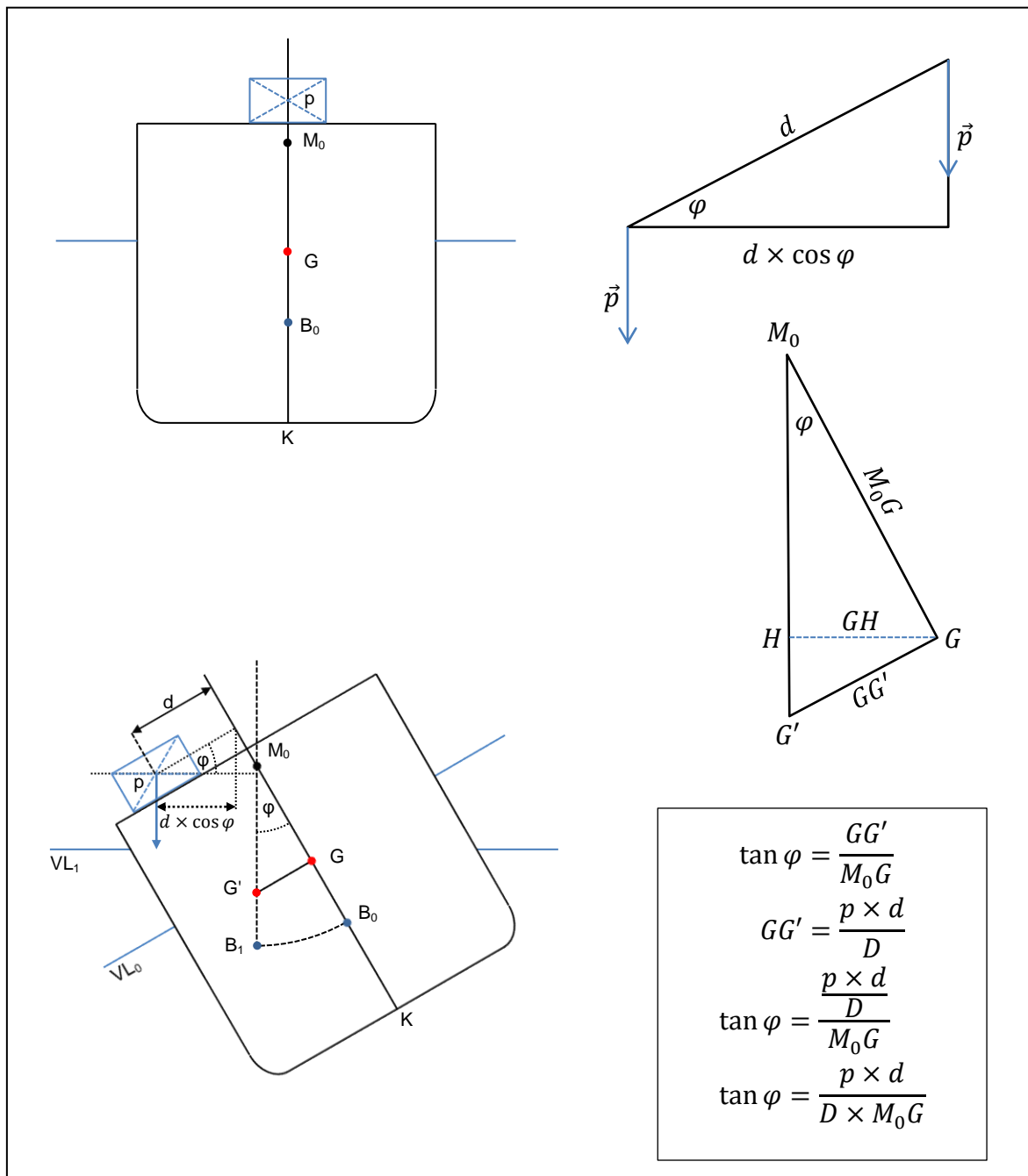
Promjena kraka d na kojem djeluje masa p uzrokuje promjenu momenata koji nagibaju brod oko njegove uzdužne osi stvarajući tako kut nagiba broda φ . Kao i kod vertikalnog pomaka mase, sustavno težište broda G pomiče se prema položaju u koji je masa pomaknuta, a taj pomak ovisi i o masi koja se pomiče i o kraku na kojem će ta masa djelovati. Ako se masa pomiče s boka na bok, već pri maloj promjeni njezine udaljenosti od prijašnjeg položaja, brod će se početi nagibati na bok prema kojem se masa pomiče. Sustavno težište broda se kod horizontalnog pomaka mase pomiče horizontalno za pomak GG' u smjeru u kojem je masa pomaknuta.

Prema drugom uvjetu plovnosti težište uzgona B mora biti u istoj okomici na plovnu vodenu liniju sa sustavnim težištem broda broda G . Pri nagibu broda mijenja se i oblik njegovog uronjenog dijela, te stoga dolazi i do pomaka težišta uzgona, koje dolazi ispod sustavnog težišta broda u okomicu na vodenu liniju. Kut između simetrale broda i okomice na vodenu liniju, koja u slučaju kuta nagiba prolazi točkama koje određuju nove

položaje sustavnog težišta G' i težišta uzgona B_1 , predstavlja kut nagiba broda. Također, kut nagiba broda je i kut između vodene linije prije pomaka mase VL_0 i nakon pomaka mase VL_1 .

Točke G , G_1 i M_0 čine trokut iz kojeg se, koristeći pravila ravne trigonometrije, može doći do izraza za proračun kuta nagiba broda φ .

Schema 14. Horizontalni (bočni) pomak mase i određivanje kuta nagiba



$$\tan \varphi = \frac{GG'}{M_0G}$$

$$\frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} = \frac{GG'}{M_0G}$$

$$GG' \cos \varphi = M_0G \sin \varphi$$

$M_0G \sin \varphi$ odgovara polugi uspravljanja broda GH .

$$M_0G \sin \varphi = GH$$

Također se može primijeniti poučak o pomaku težišta:

$$\frac{d}{GG'} = \frac{D}{p}$$

$$D \times GG' = p \times d$$

$$GG' = \frac{p \times d}{D}$$

$$\frac{p \times d}{D} \cos \varphi = M_0G \sin \varphi$$

Izraz $p \times d \times \cos \varphi$ je moment koji nagiba brod (nagibni moment), a on je jednak momentu kojim se brod odupire njegovom djelovanju, tj. momentu početne poprečne statičke stabilnosti broda $M_{ST_0} = D \times M_0G \times \sin \varphi$.⁸

$$p \times d \times \cos \varphi = D \times M_0G \times \sin \varphi$$

$$p \times d = \frac{D \times M_0G \times \sin \varphi}{\cos \varphi}$$

$$p \times d = D \times M_0G \times \tan \varphi$$

$$\tan \varphi = \frac{p \times d}{D \times M_0G}$$

Kut nagiba φ se iz dobivene vrijednosti tangensa kuta nagiba $\tan \varphi$ dobiva inverznom funkcijom $\arctan \varphi$.

⁸ Buljan, I., *Stabilnost broda*, Školska knjiga, Zagreb, 1982., str. 13.

Izraz za proračunavanje kuta nagiba može se dobiti i na jednostavniji način:

$$\begin{aligned}\tan \varphi &= \frac{GG'}{M_0G} \\ \frac{d}{GG'} &= \frac{D}{p} \\ D \times GG' &= p \times d \\ GG' &= \frac{p \times d}{D} \\ \tan \varphi &= \frac{\frac{p \times d}{D}}{M_0G} \\ \tan \varphi &= \frac{p \times d}{D \times M_0G}\end{aligned}$$

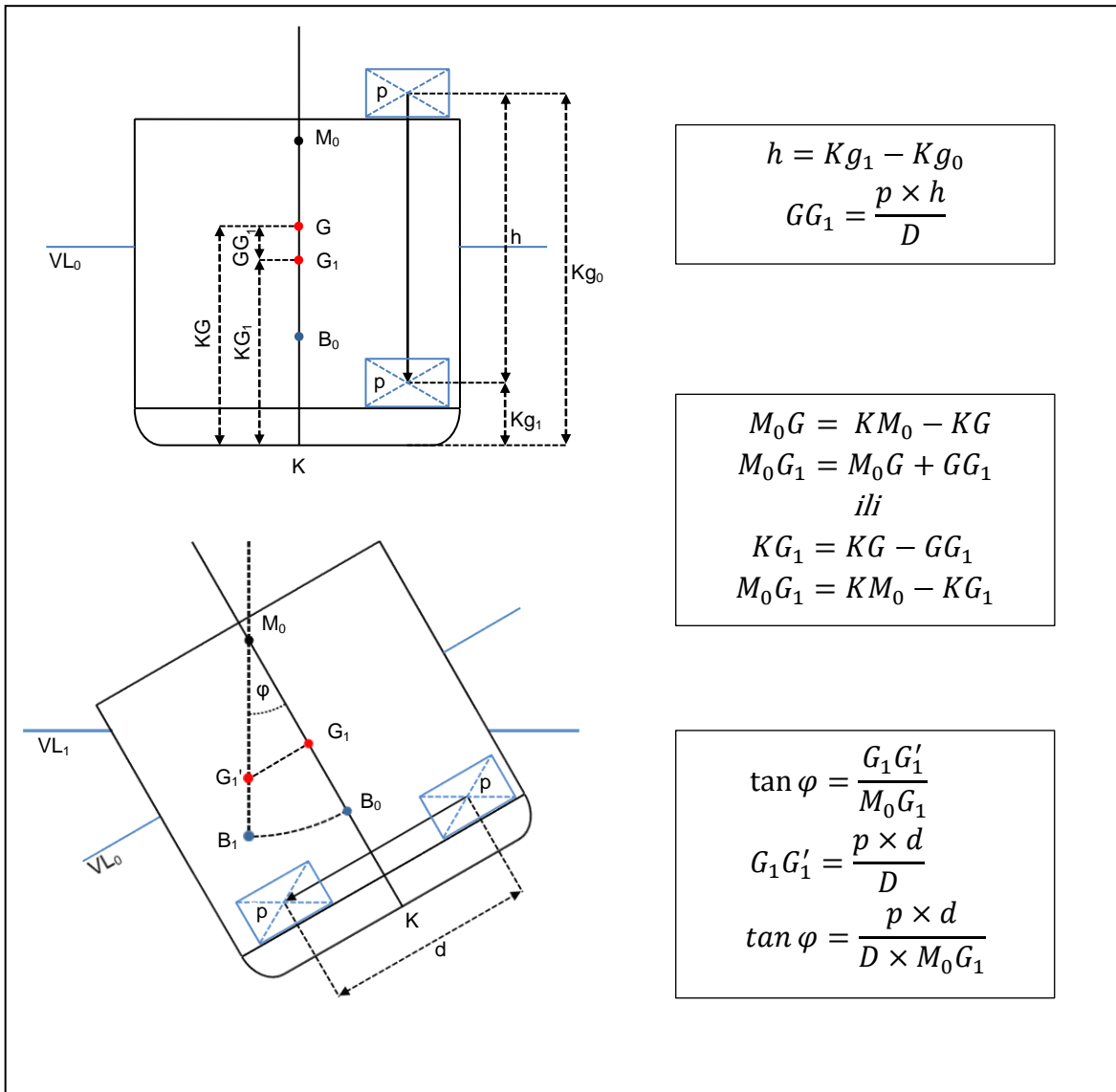
3.3.3. Kombinirani pomak mase

Kombinirani pomak mase predstavlja kombinaciju vertikalnog i horizontalnog pomaka pri kojem dolazi do promjene visine sustavnog težišta broda iznad kobilice, a posljedično s tim i do promjene početne poprečne metacentarske visine pomoću koje se određuje kut nagiba broda. Pomak sustavnog težišta po visini GG_1 jest obilježje vertikalnog pomaka mase i određuje se koristeći udaljenost za koju je masa premještena prema gore ili prema dolje. Pomak sustavnog težišta prema boku $G_1G'_1$ je obilježje koje je svojstveno horizontalnom pomaku. Pomaci se mogu i drukčije označiti, no bitno je da odgovaraju skici kako ne bi došlo do eventualne zabune prilikom uvrštavanja.

Za razliku od horizontalnog i vertikalnog pomaka, kod kojih je bila riječ samo o jednom pomaku sustavnog težišta, kod kombiniranog pomaka mase dolazi do dva pomaka sustavnog težišta. Točka G predstavlja sustavno težište broda prije pomaka mase, G_1 je točka u kojoj se ono nalazi nakon vertikalnog pomaka, a G'_1 sustavno težište broda nakon horizontalnog pomaka. Razlog zbog kojega je prvo obavljen vertikalni pomak je potreba za vrijednošću nove početne poprečne metacentarske visine M_0G_1 koja se promijenila za pomak GG_1 , a pomoću koje se izračunava tangens kuta nagiba koji nastaje nakon horizontalnog pomaka mase.

$$\tan \varphi = \frac{p \times d}{D \times M_0G_1}$$

Shema 16. Kombinirani pomak mase
 (pomak sustavnog težišta broda prema dolje)

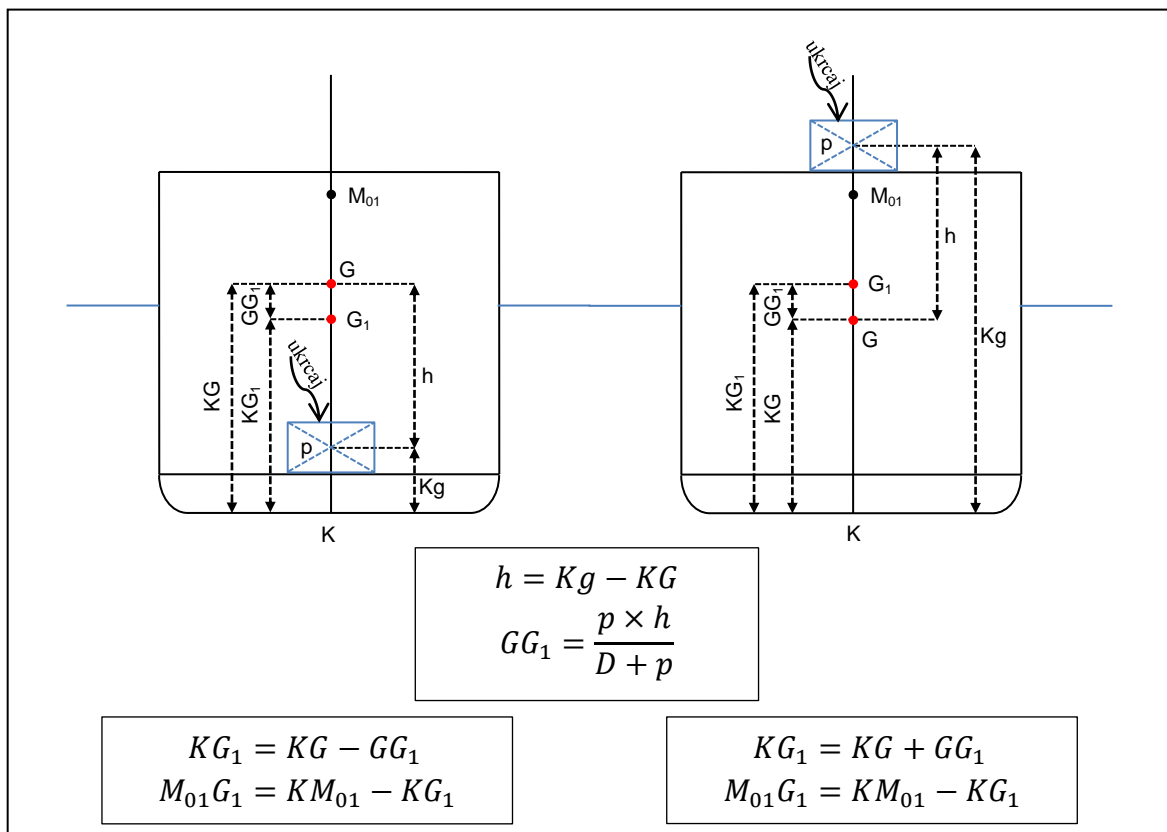


3.4. UKRCAJ I ISKRCAJ MASE

Imajući na umu efekt koji pomak mase ima na stabilnost broda, valja promotriti što se s brodom događa kada se masa ukrcava na brod ili iskrcava s njega.

Kod pomaka dolazi do promjene položaja točke G zato što se mijenja odnos momenata na brodu. Međutim, pri ukrcaju i iskrcaju događa se pomak sustavnog težišta uz promjenu deplasmana broda. Pri ukrcaju deplasman će se povećati za masu koja se ukrcava, a prilikom iskrcaja on će se smanjiti za masu koja se iskrcava. Kod proračuna pomaka sustavnog težišta broda u slučaju ukrcaja/iskrcaja mase uzima se u obzir novi deplasman. On se obično označava sa D' ili D_1 , a može se označiti i kao zbroj $(D + p)$ kod ukrcaja ili razlika $(D - p)$ kod iskrcaja.

Shema 17. Ukrcaj mase u simetralu ispod i iznad sustavnog težišta broda



S obzirom na to da se prilikom ukrcaja i iskrcaja deplasman mijenja (a time i srednji gaz broda), potrebno je iz tablica s hidrostatskim podacima broda odrediti novu visinu početnog poprečnog metacentra iznad kobilice KM_{01} . Što je veća masa koja se ukrcava ili iskrcava u odnosu na deplasman broda, to će i utjecaj na promjenu visine

početnog poprečnog metacentra biti veći. Tako je moguće da, ako su u pitanju manje mase, visina početnog poprečnog metacentra ostane nepromijenjena (tj. zanemarivo promijenjena).

Kao i kod pomaka vrijedi odnos deplasmana, pomaka sustavnog težišta, mase i udaljenosti od sustavnog težišta na koju se masa ukrcava ili iskrcava.

$$\frac{h}{GG_1} = \frac{(D \pm p)}{p}$$

$$GG_1 \times (D \pm p) = p \times h$$

Udaljenost h se u ovim slučajevima proračunava kao razlika visine težišta mase koja se ukrcava iznad kobilice broda Kg i visine sustavnog težišta broda iznad kobilice KG prije ukrcaja ili iskrcaja.

$$h = Kg - KG$$

$$GG_1 = \frac{p \times h}{D \pm p}$$

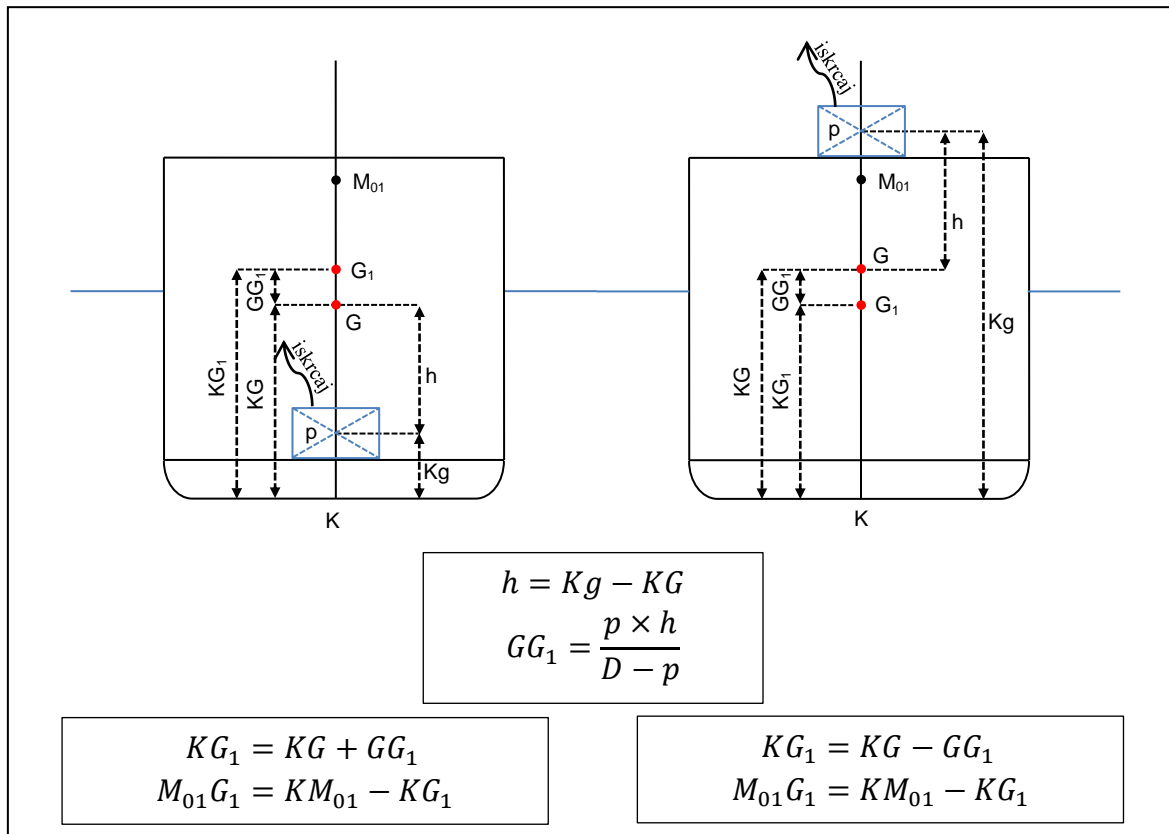
Pri ukrcaju sustavno težište broda pomiče se prema ukrcanoj masi, a pri iskrcaju se ono pomiče suprotno od položaja s kojeg je masa iskrcana.

Ako se masa ukrcava ispod sustavnog težišta, tj. na visinu iznad kobilice Kg koja je manja od visine sustavnog težišta broda iznad kobilice KG , tada će se sustavno težište pomaknuti prema dolje. U slučaju da se masa ukrcava iznad sustavnog težišta, kada je Kg veća od KG , ono se pomiče prema gore.

Ako se masa iskrcava ispod sustavnog težišta, tj. s visine iznad kobilice Kg koja je manja od visine sustavnog težišta broda iznad kobilice KG , tada će se sustavno težište pomaknuti prema gore. U slučaju da se masa iskrcava iznad sustavnog težišta, kada je Kg veća od KG , ono se pomiče prema dolje.

Utjecaj na početnu poprečnu metacentarsku visinu je suprotan utjecaju na visinu sustavnog težišta broda, tj. kada se visina sustavnog težišta broda iznad kobilice povećava, početna poprečna metacentarska visina se smanjuje i obrnuto.

Shema 18. Iskrcaj mase iz simetrale ispod i iznad sustavnog težišta broda



Prilikom ukrcaja i iskrcaja u simetralu broda, odnosno uzdužnicu, ili iz nje dolazi samo do promjene vertikalnih momenata koji povećavaju ili smanjuju visinu sustavnog težišta iznad kobilice broda KG , što je bitno za određivanje početne poprečne metacentarske visine koja je pokazatelj početne poprečne stabilnosti, ali i za određivanje novih poluga poprečne stabilnosti.

Prilikom ukrcaja i iskrcaja izvan simetrale broda, dolazi do premještanja točke G prema jednom od bokova. Utjecaj je sličan kao pri pomaku mase, samo što u ovim slučajevima dolazi do promjene rasporeda masa na brodu uslijed pojave nove mase koja se ukrcava ili prestanka djelovanja mase koja se iskrca s broda.

Uspoređujući postupke ukrcaja u simetralu ili iskrcaja iz simetrale s pomakom mase, može se reći da su oni najbliži kombiniranom pomaku mase, zato što dolazi do premještanja sustavnog težišta broda G i u vertikalnom i u horizontalnom smislu.

Gledano u vertikalnom smislu, ukrcaj i iskrcaj djeluju na promjenu visine sustavnog težišta iznad kobilice, a u horizontalnom smislu dolazi do pomaka sustavnog težišta prema jednom od bokova, posljedica čega je pojava kuta nagiba broda.

Tablica 3. Utjecaj položaja ukrcane i iskrane mase na visinu sustavnog težišta broda

		Visina sustavnog težišta broda iznad kobilice
Ukrcaj	ispod sustavnog težišta	$KG_1 = KG - GG_1$
	iznad sustavnog težišta	$KG_1 = KG + GG_1$
Iskrcaj	ispod sustavnog težišta	$KG_1 = KG + GG_1$
	iznad sustavnog težišta	$KG_1 = KG - GG_1$

3.4.1. Ukrcaj mase izvan simetrale broda

Uvažavajući navedeno, prvi korak jest odrediti novi položaj sustavnog težišta broda G_1 nakon ukrcaja, odnosno novu visinu KG_1 .

$$\frac{h}{GG_1} = \frac{(D + p)}{p}$$

$$GG_1 \times (D + p) = p \times h$$

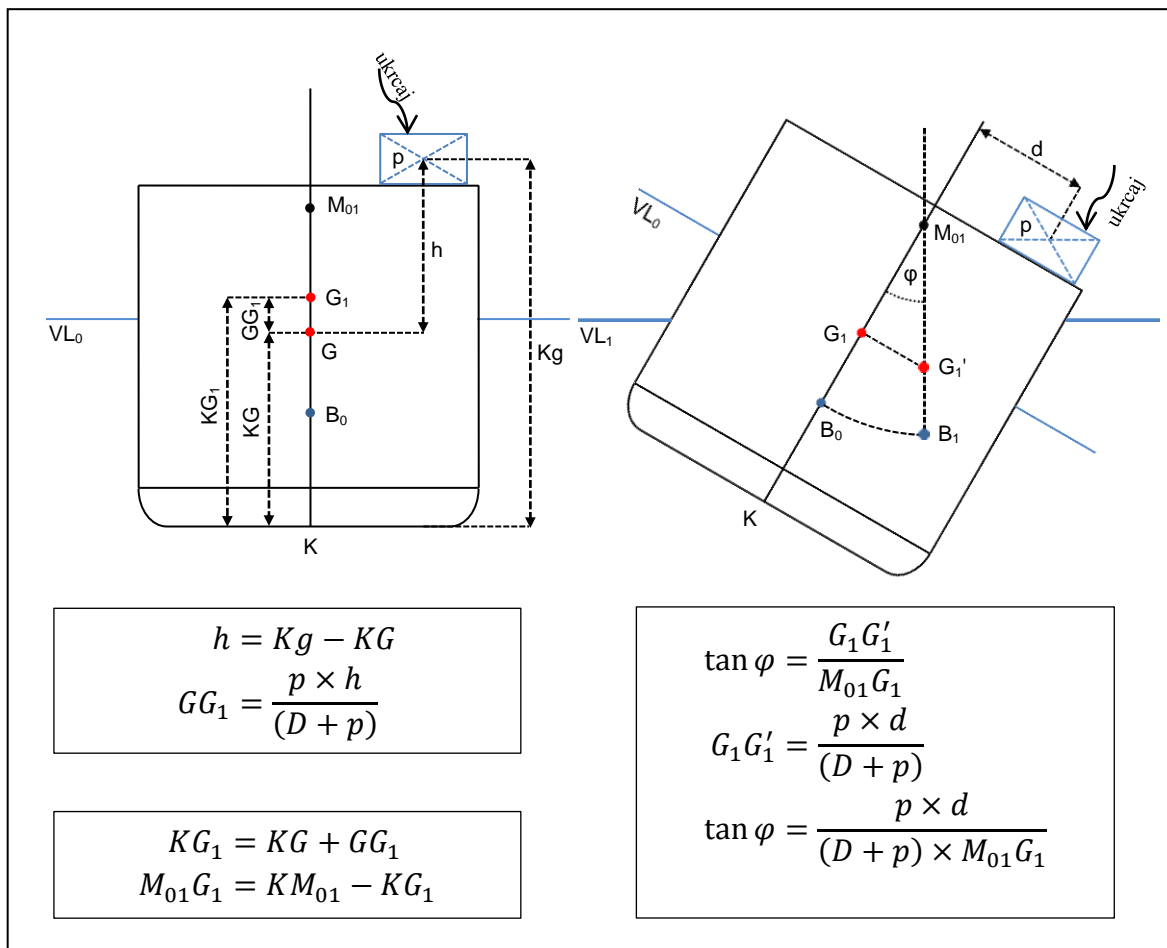
$$GG_1 = \frac{p \times h}{D + p}$$

$$h = Kg - KG$$

Vrijednost h je krak na kojem djeluje masa p , a određen je razlikom visine na kojoj će se nalaziti težište mase koja se ukrcava iznad kobilice Kg i visine sustavnog težišta broda iznad kobilice prije ukrcaja KG .

$$KG_1 = KG \pm GG_1$$

Shema 19. Ukrcaj mase izvan simetrale iznad sustavnog težišta broda
(pomak sustavnog težišta broda prema gore)



Visina sustavnog težišta broda iznad kobilice bit će uvećana za pomak sustavnog težišta broda GG_1 ako je masa ukrcana iznad točke G , a umanjit će se za isti pomak ako je masa ukrcana ispod nje.

Suprotno povećanju visine sustavnog težišta broda iznad kobilice, početna poprečna metacentarska visina smanjit će se ako je masa ukrcana iznad točke G , a povećati ako je masa ukrcana ispod.

Međutim, kako je ukrcajem došlo do promjene visine početnog poprečnog metacentra iznad kobilice, mora se odbiti vrijednost visine sustavnog težišta broda iznad kobilice nakon ukrcaja KG_1 od visine početnog poprečnog metacentra nakon ukrcaja KM_{01} .

$$M_{01} G_1 = KM_{01} - KG_1$$

Nakon određivanja visine sustavnog težišta iznad kobilice i početne poprečne metacentarske visine nakon ukrcaja, podatak čiju je vrijednost potrebno odrediti jest kut nagiba broda φ .

$$\tan \varphi = \frac{G_1 G'_1}{M_{01} G_1}$$

$$\frac{d}{G_1 G'_1} = \frac{(D \pm p)}{p}$$

$$G G_1 \times (D + p) = p \times d$$

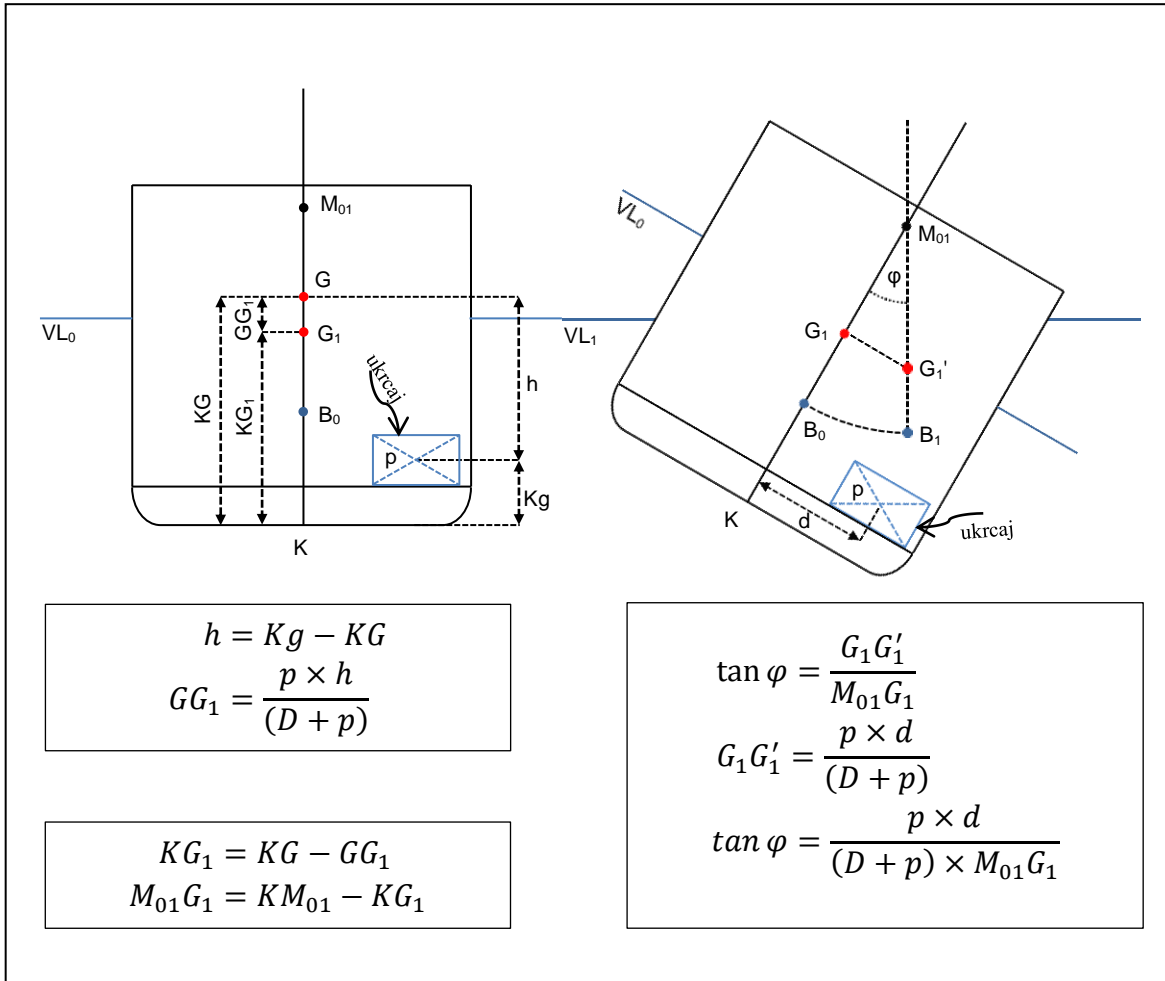
$$G_1 G'_1 = \frac{p \times d}{(D + p)}$$

$$\tan \varphi = \frac{p \times d}{(D + p) \times M_{01} G_1}$$

Pri tome je p masa koja se ukrcava, d udaljenost od simetrale broda na koju se masa ukrcava, $(D + p)$ deplasman broda uvećan za masu koja se ukrcava, te $M_{01} G_1$ novoodređena početna poprečna metacentarska visina koja je nastala pomakom sustavnog težišta broda uslijed ukrcaja i promjenom visine početnog poprečnog metacentra iznad kobilice uslijed promjene deplasmana.

Nagib broda nastaje na onoj strani na koju je masa ukrcana.

Shema 20. Ukrcaj mase izvan simetrale ispod sustavnog težišta broda
(pomak sustavnog težišta broda prema dolje)



3.4.2. Iskrcaj mase izvan simetrale broda

U ovom slučaju valja imati na umu da se depласman broda umanjuje za iskrcanu masu, a sustavno težište broda G pomiče na stranu suprotnu onoj s koje je masa iskrcana, i u vertikalnom i u horizontalnom smislu.

$$\frac{h}{GG_1} = \frac{(D - p)}{p}$$

$$GG_1 \times (D - p) = p \times h$$

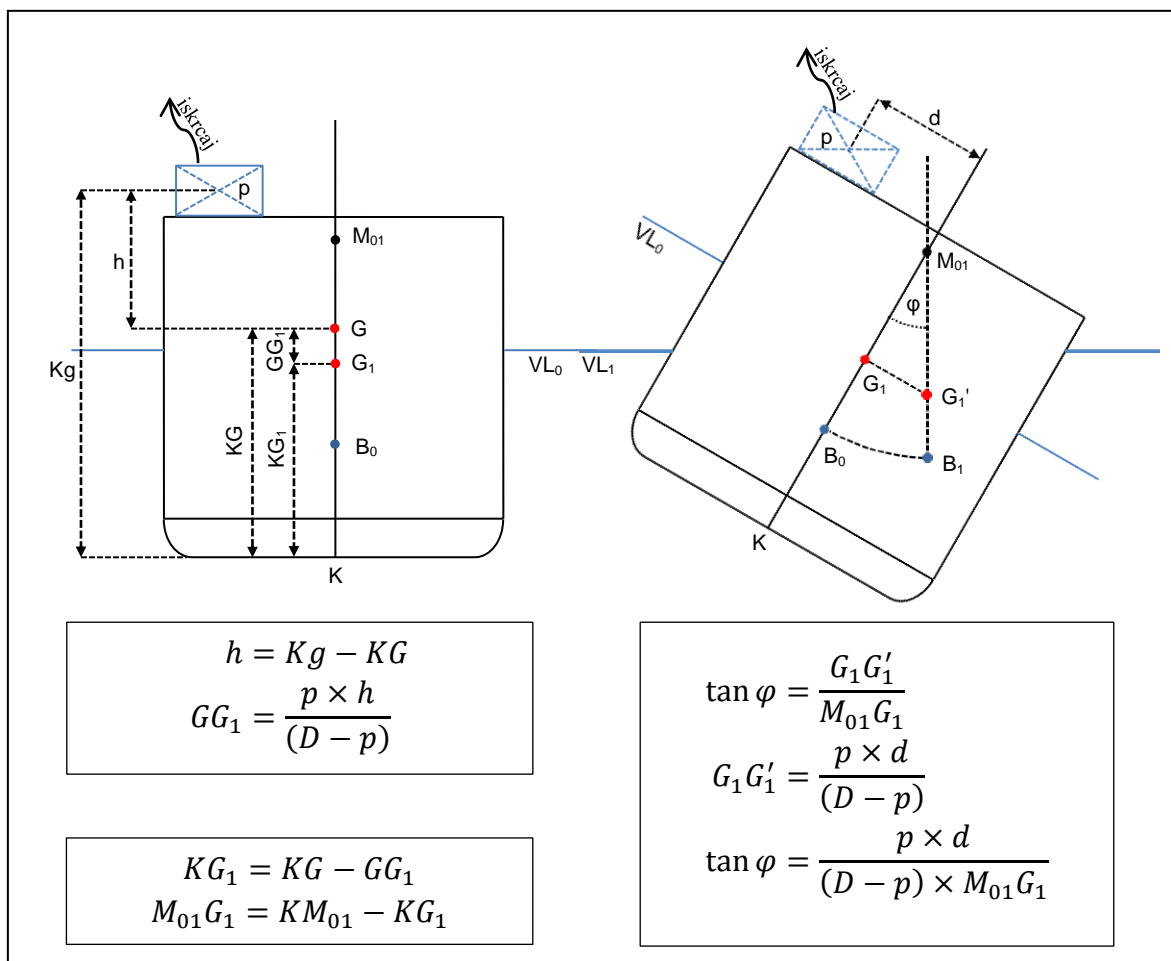
$$GG_1 = \frac{p \times h}{D - p}$$

$$h = Kg - KG$$

Vrijednost h je krak s kojeg nakon iskrcaja prestaje djelovati masa p , dovodeći do smanjenja vertikalnih momenata koji određuju visinu sustavnog težišta broda iznad kobilice. To je razlika visine na kojoj se nalazi težište mase iznad kobilice Kg i visine sustavnog težišta broda iznad kobilice KG prije iskrcaja.

Razlog zbog kojeg je u nazivniku razlika deplasmana D i mase p jest taj što masa p više nije na brodu, a njezin iskrcaj dovodi do promjene rasporeda masa na brodu.

Shema 21. Iskrcaj mase izvan simetrale iznad sustavnog težišta broda
(pomak sustavnog težišta broda prema dolje)



Pomoću pomaka sustavnog težišta broda određuje se nova visina sustavnog težišta broda iznad kobilice KG_1 , a to je visina na kojoj će se sustavno težište broda nalaziti nakon što se masa iskrca.

$$KG_1 = KG \pm GG_1$$

Ako je masa iskrcana iznad sustavnog težišta broda, tj. visina težišta mase iznad kobilice s koje se iskrcava Kg je veća od visine sustavnog težišta broda iznad kobilice prije iskrcaja KG , sustavno težište broda će se pomaknuti prema dolje, tj. nasuprot strani iskrcane mase, a pomak GG_1 će se oduzeti od vrijednosti KG .

U slučaju da je masa iskrcana ispod sustavnog težišta broda, kada je vrijednost Kg manja od vrijednosti KG , tada se visina sustavnog težišta broda iznad kobilice povećava, odnosno ono se pomiče prema gore, nasuprot strani iskrcane mase, te se pomak GG_1 zbraja s visinom sustavnog težišta iznad kobilice prije iskrcaja KG .

Kao i kod ukrcaja mase, zbog promjene deplasmana došlo je do promjene visine početnog poprečnog metacentra iznad kobilice, a njezinu novu vrijednost KM_{01} potrebno je s deplasmanom umanjnim za iskrcanu težinu p odrediti koristeći tablice s hidrostatskim podacima broda. Upotrebom novoodređenih vrijednosti KM_{01} i KG_1 određuje se početna poprečna metacentarska visina nakon iskrcaja $M_{01}G_1$.

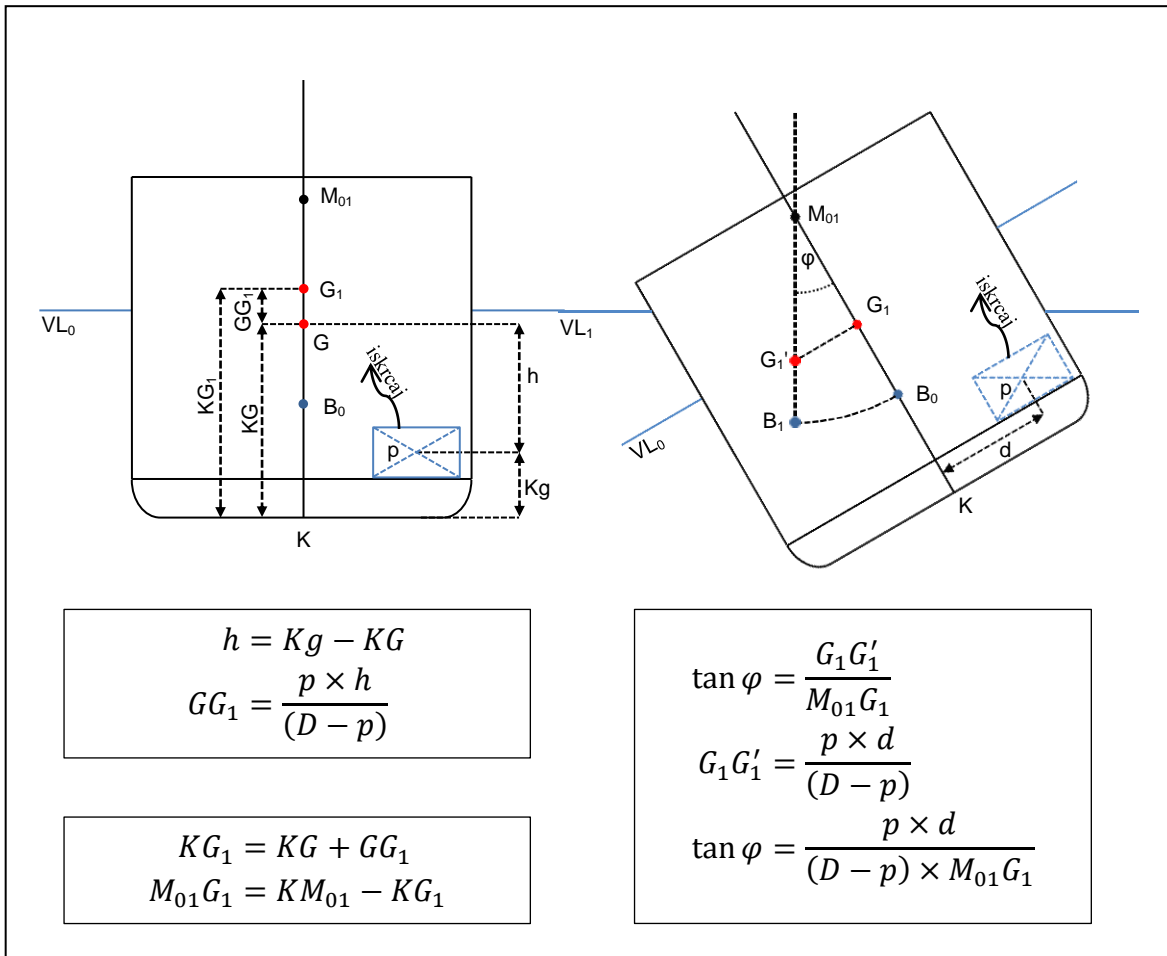
$$M_{01}G_1 = KM_{01} - KG_1$$

Kut nagiba broda φ određuje se koristeći vrijednosti iskrcane mase p , udaljenosti od simetrale broda s koje je masa iskrcana d , deplasman broda D nakon iskrcaja mase p te nove početne poprečne metacentarske visine $M_{01}G_1$ određene razlikom visine početnog poprečnog metacentra iznad kobilice nakon iskrcaja KM_{01} i visine sustavnog težišta broda nakon iskrcaja mase KG_1 , odnosno nakon pomaka sustavnog težišta G .

$$\tan \varphi = \frac{p \times d}{(D - p) \times M_{01}G_1}$$

Nagib broda nastaje na strani suprotnoj onoj s koje je masa iskrcana.

Shema 22. Iskrcaj mase izvan simetrale ispod sustavnog težišta broda
(pomak sustavnog težišta broda prema gore)



3.5. UTJECAJ SLOBODNIH POVRŠINA

Pojam slobodnih površina najčešće se veže uz tekućine, iako isti učinak stvaraju i sipki tereti koji se ponašaju slično tekućinama. Do utjecaja slobodnih površina dolazi u tankovima (ili prostorima) koji nisu potpuno ispunjeni ili prazni. Logični su razlozi zbog kojih kod potpuno ispunjenih i praznih prostora ne dolazi do utjecaja slobodnih površina. Kad je tank potpuno ispunjen nekom tekućinom, bilo teretom, gorivom ili vodom, ona se pri nagibanju broda nema gdje pomicati, već se ponaša poput krute mase čije se težište poklapa s težištem prostora u kojem se nalazi. U slučaju praznog tanka, ne postoji masa koja će se pomicati.

Utjecaj slobodnih površina ogleda se u prividnom smanjenju početne poprečne metacentarske visine zbog tromosti tekućine (ili sipkog tereta) koja se nalazi u nekom prostoru na brodu. Naime, tekućine teže postavljanju u položaj pri kojemu im je površina paralelna s horizontalnom ravninom, što se pri nagibanju broda pod vanjskim utjecajima remeti. Kad se brod nagne, dolazi do premještanja klina tekućine sa strane suprotne nagibu na stranu nagiba, što dovodi do promjene rasporeda masa na brodu i pomaka sustavnog težišta. Premještanje klinova događa se sa svakim nagibom broda, a on zbog tromosti tekućine dulje ostaje u nagnutom položaju te mu treba duže da se uspravi. Premještanjem klina tekućine ili sipkog tereta, sustavno težište broda pomiče se na stranu i prema gore, kao i pri kombiniranom pomaku mase. Brod se tada ponaša kao da mu je sustavno težište na većoj visini iznad kobilice, a početna poprečna metacentarska visina prividno smanjena.

Utjecaj slobodnih površina u najvećoj mjeri ovisi o obliku i dimenzijama prostora koji sadrže tekućine ili sipke terete. Ovaj fenomen od značenja je za poprečnu stabilnost, a konstrukcijska značajka koja najviše utječe na njegovu veličinu jest širina prostora ***b***. Slobodne površine postoje i kod uzdužne stabilnosti, ali je brod u tom smislu vrlo stabilan te se njihov utjecaj ne proračunava. Utjecaj slobodnih površina izražava se ispravkom za utjecaj slobodnih površina koji se izračunava pomoću volumetričkog momenta tromosti površina tekućina u tankovima koji se označava s ***i***. Moment tromosti površina tekućina u tankovima ***i*** određuje se za svaki tekućinom djelomično ispunjeni tank na brodu po sljedećem izrazu:

$$i = \frac{l \times b^3}{12}$$

pri čemu je ***l*** duljina, a ***b*** širina prostora (tanka).

Iz navedenog izraza koji u brojniku sadrži umnožak duljine prostora l i treće potencije širine prostora b u kojem se tekućina nalazi, vidljivo je koliki utjecaj na slobodne površine ima širina prostora. Volumetrički moment i izražava se u m^4 .

Moment mase koji slobodne površine stvaraju određuje se množenjem volumetričkog momenta i s pripadajućom gustoćom tekućine ρ koja se nalazi u tanku i označava se s I . Nakon određivanja svih momenata slobodnih površina I , njihova suma $\sum I$ dijeli se s deplasmanom broda D . Time se dobiva ispravak za utjecaj slobodnih površina **FSC** (skraćeno od eng. *Free Surface Correction*) koji predstavlja prividno povećanje visine sustavnog težišta broda iznad kobilice broda ili prividno smanjenje početne poprečne metacentarske visine, što se još može označiti i s GG_V , budući da se brod ponaša kao da mu je sustavno težište u virtualnom položaju G_V .

$$I = i \times \rho$$

$$FSC = \frac{\sum I}{D}$$

$$KG_V = KG + FSC$$

$$M_0 G_{corr} = KM_0 - KG_V$$

ili

$$M_0 G = KM_0 - KG$$

$$M_0 G_{corr} = M_0 G - FSC$$

Početna poprečna metacentarska visina ispravljena za utjecaj slobodnih površina označava se s $M_0 G_{corr}$ ili $M_0 G_V$.

Utjecaj slobodnih površina obično nastaje iskrcajem ili ukrcajem dijela tekućine, čime se tank dovodi u stanje djelomične ispunjenosti. Međutim, on može nastati i naplavlivanjem nekog brodskog prostora kao posljedica oštećenja brodskog trupa, u slučaju čega dolazi i do ukrcaja nove mase na brod i do smanjenja početne poprečne metacentarske visine.

Slobodne površine uvijek smanjuju početnu poprečnu metacentarsku visinu broda, no nije ispravno reći kako one negativno djeluju na stabilnost broda, iz razloga što je upotrebom kontroliranih slobodnih površina moguće „omekšati“ prestabilan brod.

Prestabilnim brodom smatra se brod velike početne poprečne metacentarske visine koji ima kratak period valjanja T čija je veza s M_0G objašnjena u poglavlju 3.1. **Određivanje početne poprečne metacentarske visine.** Brod s kratkim periodom valjanja T vrlo se dobro odupire vanjskim utjecajima koji remete njegovu stabilnost, no takvo ponašanje broda nije najugodnije za osobe na brodu (na što se više pozornosti obraća kod putničkih brodova). To isto tako može stvoriti i probleme s teretom na brodovima koji prevoze terete koje je potrebno učvrstiti. Brod s velikom početnom poprečnom metacentarskom visinom ima jak moment uspravljanja, što može dovesti do pomicanja raznih stvari na brodu, od opreme do tereta.

Radi jednostavnosti određivanja težišta mase, neka se radi o tanku goriva smještenom u sredini broda. Potrebno je odrediti početnu poprečnu metacentarsku visinu broda nakon potrošnje polovice tanka goriva. Težina p potrošene količine goriva može se odrediti kao umnožak volumena potrošenog goriva V i njegove gustoće ρ .

$$p = V \times \rho$$

Budući da pretpostavljeni tank goriva ima oblik kvadra, njegov volumen V jednak je umnošku njegovih dimenzija: duljine l , širine b i visine h . Duljina je uzdužna dimenzija tanka, širina poprečna, a visina vertikalna.

$$V = l \times b \times h$$

Volumen potrošenog goriva jednak je umnošku duljine, širine i polovice visine tanka, zato što je polovica goriva iz tanka potrošena, a smanjenjem količine tekućine u tanku mijenja se samo visina tekućine.

$$V = l \times b \times \frac{h}{2}$$

potrošenog goriva) iznad kobilice broda Kg i visine sustavnog težišta broda iznad kobilice KG .

$$GG_1 = \frac{p \times h_p}{D - p}$$

$$h_p = Kg - KG$$

Budući da potrošeno gorivo ima isti utjecaj na stabilnost broda kao i iskrcaj neke mase, potrebno je uzeti u obzir smanjenje deplasmana broda za težinu p , tj. u proračunu za pomak sustavnog težišta koristiti novi deplasman ($D - p$).

Potrošnja goriva smanjuje početnu poprečnu visinu broda M_0G zato što su tankovi goriva smješteni ispod prirodnog položaja točke sustavnog težišta broda G . Kako se potrošnja goriva promatra kao iskrcaj težine, u tom slučaju je gorivo „iskrcano“ ispod točke sustavnog težišta broda G , što uzrokuje njeno pomicanje u stranu suprotnu iskrcaju, tj. prema gore.

$$KG_1 = KG + GG_1$$

Pomak sustavnog težišta uslijed „iskrcanja“ potrošenog goriva GG_1 smanjuje početnu poprečnu metacentarsku visinu broda M_0G , no kako je ovdje riječ o tanku koji ostaje napola ispunjen tekućinom (u ovom slučaju, gorivom), pojavljuje se utjecaj slobodnih površina koje prividno smanjuju metacentarsku visinu, tj. brod se ponaša kao da mu je stvarna početna poprečna metacentarska visina nakon potrošnje goriva (iskrcanja dijela tekućeg tereta) M_0G_1 još manja. Ta početna poprečna metacentarska visina ispravljena za utjecaj slobodnih površina može se označiti na više načina, npr. M_0G_{1v} ili M_0G_{1corr} . Utjecajem slobodnih površina sustavno težište broda G pomiče se u virtualni položaj, točku G_{1v} . To znači da je, osim određivanja visine sustavnog težišta broda iznad kobilice, nakon potrošnje goriva (iskrcanja tekućeg tereta) potrebno istu ispraviti za utjecaj slobodnih površina FSC .

$$KG_{1v} = KG_1 + FSC$$

$$M_{01}G_{1corr} = KM_{01} - KG_{1v}$$

$$M_{01}G_1 = KM_{01} - KG_1$$

$$M_{01}G_{1corr} = M_{01}G_1 - FSC$$

Utjecaj slobodnih površina moguće je smanjiti uzdužnim pregrađivanjem prostora u kojem se nalaze tekućine ili sipki tereti. Na taj se način smanjuje širina prostora b koja u izrazu za volumetrički moment slobodnih površina tekućina djeluje na treću potenciju.

$$i = \frac{l \times b^3}{12}$$

$$I = i \times \rho$$

$$FSC = \frac{I}{D - p}$$

Tablica 4. Utjecaj slobodnih površina na visinu sustavnog težišta broda iznad kobilice i metacentarsku visinu ovisno o količini tekućine u tanku

Količina tekućine u tanku	Visina sustavnog težišta broda iznad kobilice	Metacentarska visina
Prazan tank	Nema slobodnih površina	
Djelomično ispunjen tank	$KG_{1V} = KG_1 + FSC$	$M_{01}G_{1corr} = M_{01}G_1 - FSC$
Pun tank	Nema slobodnih površina	

Jedan od potrebnih proračuna prilikom određivanja iskrcaja tekućine ili utjecaja slobodnih površina jest određivanje visine težišta te mase iznad kobilice broda Kg . Moguće je započeti s poznatom visinom iskrcane tekućine h_{isk} (povezano s volumenom) ili s poznatom iskrcanom masom p .

Ako se radi o tanku pravilnog (pravokutnog) oblika, nije problem proračunati težište i masu ako je poznata visina iskrcane tekućine h_{isk} (ta se vrijednost saznaje sondiranjem tankova). Volumen iskrcane mase izračunava se umnoškom duljine l i širine b tanka s visinom h_{isk} . Iskrcana masa p se određuje množenjem volumena V_{isk} i gustoće tekućine koja se iskrcava ρ . Poznato je da se težište mase pravokutnog presjeka nalazi na sjecištu dijagonala, a to je jednako polovici visine. Budući da se iskrcajem smanjuje visina tekućine u tanku, a iskrcana tekućina prestaje biti na vrhu (iako se tekućina crpi s dna tanka), njeno težište nalazi se na presjeku dijagonala pravokutnika dimenzija $b \times h_{isk}$ čije

se težište nalazi na visini iznad kobilice broda Kg_{isk} koja je jednaka razlici ukupne visine tanka h_{tank} i polovici visine iskrcane tekućine $\frac{1}{2}h_{isk}$:

$$V_{isk} = l \times b \times h_{isk}$$

$$P_{isk} = V_{isk} \times \rho$$

$$Kg_{isk} = h_{tank} - \frac{1}{2}h_{isk}$$

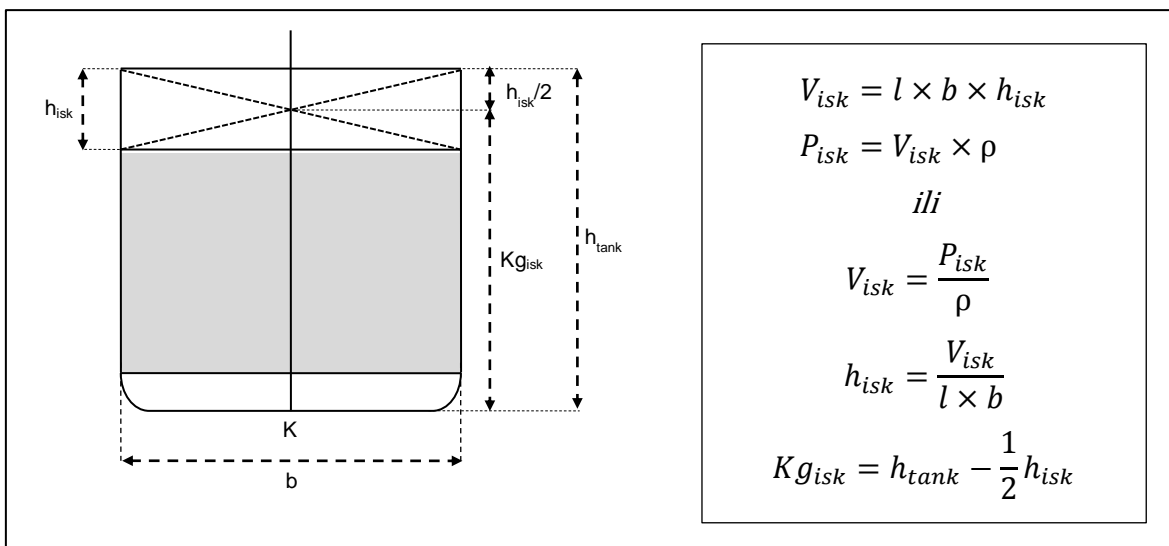
Drugi je slučaj kada je poznata masa p iskrcane tekućine, gdje se, koristeći izraz za volumen, određuje visina iskrcane tekućine $\frac{1}{2}h_{isk}$ pomoću koje se dobiva visina težišta iskrcane tekućine iznad kobilice broda Kg_{isk} .

$$V_{isk} = \frac{P_{isk}}{\rho}$$

$$h_{isk} = \frac{V_{isk}}{l \times b}$$

$$Kg_{isk} = h_{tank} - \frac{1}{2}h_{isk}$$

Shema 24. Određivanje visine težišta iskrcane tekućine pomoću poznate visine iskrcane tekućine (za tankove pravokutnog oblika)



3.6. UTJECAJ VISEĆE MASE NA STABILNOST BRODA

Utjecaj viseće mase na stabilnost broda najčešće se poistovjećuje s ukrcajem ili iskrcajem pomoću samarice za teške terete. Neovisno o opremi koja se koristi za takve operacije, bilo samarica ili kakva druga dizalica, utjecaj viseće mase je isti. No, kako se izraz „ukrcaj/iskrcaj samaricom za teške terete“ ustalio u pomorski žargon, a podrazumijeva određivanje utjecaja viseće mase na stabilnost broda, u ovom se radu obrađuje pod tim pojmom.

3.6.1. Ukrcaj samaricom za teške terete

U prvom koraku samarica zahvaća masu, a čim je podigne od tla ta je masa ukrcana na brod i počinje djelovati na njegovu stabilnost. Deplasman broda se povećava za ukrcanu masu, a težište broda se pomiče prema ukrcanoj masi. Pri ukrcanju mase samaricom sustavno težište broda se uvijek pomiče prema gore i na stranu otklona samarice. Hvatište ukrcane mase nalazi se u glavi samarice (Shema 25).

Sustavno težište se pomiče prema gore za dužinu GG_1 , smanjujući tako početnu poprečnu metacentarsku visinu M_0G .

$$GG_1 = \frac{P \times h}{D + p}$$

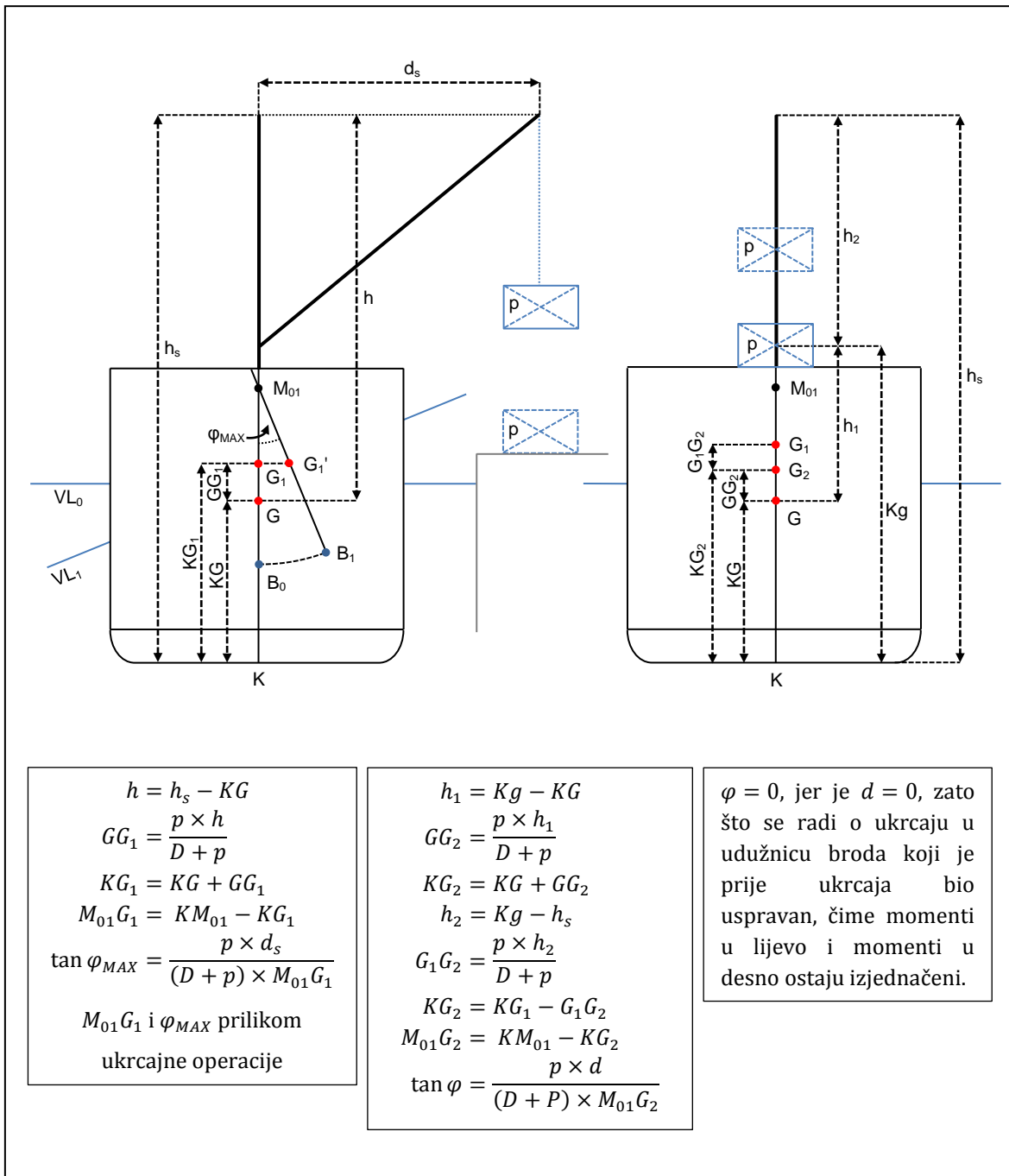
Krak h predstavlja vertikalni pomak mase, što se pri ukrcanju određuje kao razlika visine iznad kobilice na koju je masa ukrcana (u ovom se slučaju hvatište mase nalazi na visini glave samarice iznad kobilice h_s) i visine sustavnog težišta broda iznad kobilice prije ukrcanja KG .

$$h = h_s - KG$$

Budući da je masa ukrcana iznad sustavnog težišta broda G , težište se pomiče prema gore za pomak GG_1 , tj. iznos prethodno određenog pomaka dodaje se na visinu sustavnog težišta iznad kobilice KG .

$$KG_1 = KG + GG_1$$

Shema 25. Ukrcaj mase u simetralu broda samaricom za teške terete



Visina početnog poprečnog metacentra iznad kobilice KM_0 mijenja se s ukrcajem mase, te se s deplasmanom broda D , uvećanim za ukrcaju masu p , određuje nova visina početnog poprečnog metacentra iznad kobilice KM_{01} pomoću tablica s hidrostatskim podacima broda.

Nova početna poprečna metacentarska visina $M_{01}G_1$ dobiva se razlikom novoodređenih visina početnog poprečnog metacentra iznad kobilice KM_{01} i sustavnog težišta iznad kobilice KG_1 .

$$M_{01}G_1 = KM_{01} - KG_1$$

Masa p stvara moment koji nagiba brod oko njegove uzdužne osi, djelujući na kraku d_s . Kut koji nastaje pomakom sustavnog težišta broda u stranu jest maksimalni kut nagiba broda φ_{MAX} pri ovoj ukrcajnoj operaciji, zato što je u ovom slučaju metacentarska visina najmanja, a otklon samarice najveći (Shema 25 i Shema 26).

$$\tan \varphi_{MAX} = \frac{p \times d_s}{(D + p) \times M_{01}G_1}$$

Vrijednost KG_2 se može odrediti na 2 načina, i to promatrajući:

- pomak sustavnog težišta broda iz G u G_2 (što je i klasični način određivanja)

$$KG_2 = KG + GG_2$$

- pomak sustavnog težišta iz G_1 u G_2 .

$$KG_2 = KG - G_1G_2$$

Pomak sustavnog težišta broda iz G u G_2

Pri ovom načinu određivanja pomaka sustavnog težišta zanemaruju se koraci kada samarica zahvaća masu i pomiče je do željene pozicije na koju se ona planira ukrcati, tj. smatra se da je masa ukrcana nekom lučkom dizalicom. Ako je masa ukrcana na palubu, tada se sustavno težište pomiče prema gore, jer je prirodni položaj sustavnog težišta broda negdje unutar trupa.

$$GG_2 = \frac{p \times h_1}{D + p}$$

Pritom je krak h_1 jednak razlici visine težišta mase iznad kobilice na koju se on želi ukrcati Kg i visine sustavnog težišta iznad kobilice prije ukrcaja KG .

$$h_1 = Kg - KG$$

Pomak sustavnog težišta broda iz G_1 u G_2

Određivanje pomaka sustavnog težišta iz točke G_1 u G_2 nastavlja se na prethodne korake kada se sustavno težište pomaklo prema težištu ukrcane mase, tj. prema gore. Budući da se hvatište mase spušta iz glave samarice na neki položaj težišta mase na brodu (tada se hvatište mase podudara s težištem iste mase), koji je uvijek na manjoj visini iznad kobilice nego li je glava samarice, sustavno se težište tada pomiče iz točke G_1 u točku G_2 , tj. prema dolje.

$$G_1G_2 = \frac{p \times h_2}{D + p}$$

Krak h_2 različit je od kraka h_1 , a jednak je razlici visine težišta mase iznad kobilice na koju se on želi ukrcati Kg i visine glave samarice iznad kobilice h_s .

$$h_2 = Kg - h_s$$

U oba slučaja (pristupa) moraju se dobiti isti rezultati, a moguće razlike se događaju pri zaokruživanju. Kako bi se te pogreške izbjegle, poželjno je zaokružiti tek konačne rezultate, a to su metacentarska visina $M_{01}G_2$ i kut nagiba φ_1 koji nastaje ukrcajem mase na neku udaljenost od uzdužne osi broda.

U slučaju da se masa ukrcava na neku udaljenost od uzdužne osi, moguće je odrediti i kut nagiba φ_1 prije nego što se masa spusti na palubu i to koristeći metacentarsku visinu za slučaj u kojem je masa još uvijek obješena o glavu samarice $M_{01}G_1$.

$$\tan \varphi_1 = \frac{p \times d_1}{(D + p) \times M_{01}G_1}$$

$$M_{01}G_1 = KM_{01} - KG_1$$

Udaljenost željenog položaja mase od uzdužne osi d_1 predstavlja odklon samarice iz uzdužne osi koji je potreban da bi se masa smjestila na željeni položaj

Valja napomenuti da ovaj način nije uobičajen za proračun problema ukrcaja i iskrcaja samaricom za teške terete. Preporuča se korištenje klasičnog načina proračuna, zato što predstavlja dva nezavisna dijela, pa ako je u prvom dijelu došlo do pogreške, ona nema utjecaja na krajnji rezultat. Razlog zbog kojega je protumačen ovaj način je prikazivanje promjena položaja sustavnog težišta do kojih dolazi prilikom ukrcaja (i iskrcaja) samaricom za teške terete.

Pod pretpostavkom da je brod bio uspravan prije početka ukrcaja, a masa p se ne ukrcava u simetralu, već na neku udaljenost d_1 od nje, tada će se brod nagnuti na stranu na koju je masa ukrcana za kut nagiba φ (Shema 27).

Kut nagiba φ izračunava se koristeći sljedeći izraz (Shema 27):

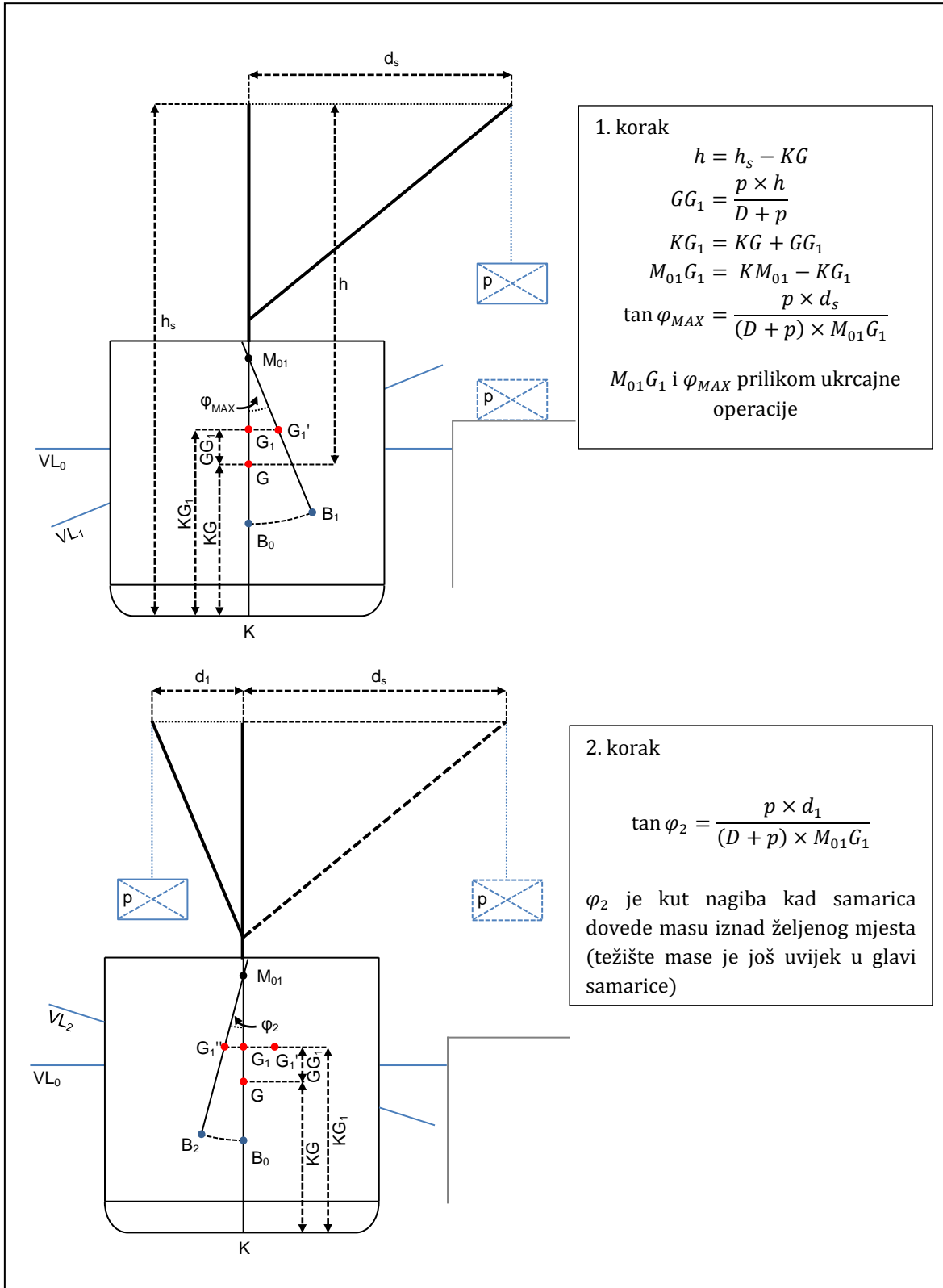
$$\tan \varphi = \frac{p \times d_1}{(D + p) \times M_{01}G_2}$$

Pritom je $M_{01}G_2$ početna poprečna metacentarska visina broda nakon ukrcaja mase p na željenu visinu iznad kobilice Kg .

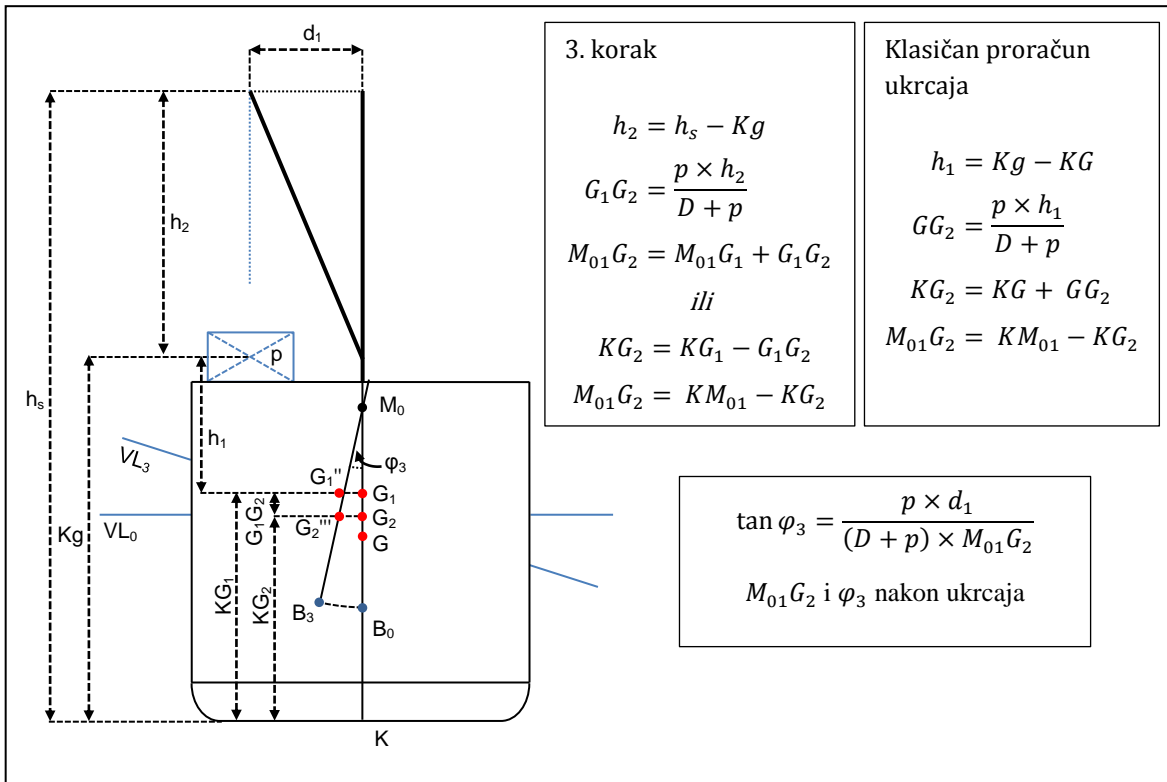
$$M_{01}G_2 = KM_{01} - KG_2$$

Vrijednost KM_{01} je visina početnog poprečnog metacentra iznad kobilice nakon ukrcaja mase p , a KG_2 je visina sustavnog težišta broda nakon ukrcaja mase p na neku visinu iznad kobilice Kg .

Schema 26. Ukrcaj mase izvan simetrale samaricom za teške terete
(prvi dio)



Shema 27. Ukrcaj mase izvan simetrale samaricom za teške terete
(drugi dio)



3.6.2. Iskrcaj samaricom za teške terete

Kod iskrcanja mase samaricom za teške terete, prvi dio zadatka može se sagledati kao uobičajeni kombinirani pomak mase, zato što promjena deplasmana D nastupa tek kad samarica spusti masu p na obalu. Drugi dio zadatka je, kao i pri ukrcaju, moguće riješiti na dva načina, zanemarujući korake kojima je masa dovedena u položaj s kojeg će se iskrcati i kronološki prateći pomak sustavnog težišta broda tijekom prekrcajne operacije.

Prvi korak obilježava vertikalni pomak mase s nekog mjesta na brodu koje se nalazi na određenoj visini iznad kobilice Kg u glavu samarice na visini iznad kobilice h_s . To se događa čim samarica podigne masu s njezinog prijašnjeg položaja, čime dolazi do promjene visine sustavnog težišta broda G iznad kobilice KG . Budući da je glava samarice na većoj visini nego što se nalaze prostori za smještaj mase na brodu, sustavno težište se pomiče prema gore, što znači da se visina sustavnog težišta povećava za pomak GG_1 . Točka G_1 označava novi položaj sustavnog težišta (Shema 28).

$$GG_1 = \frac{p \times h}{D}$$

Krak h predstavlja razliku između visine glave samarice iznad kobilice broda h_s i visine težišta mase iznad kobilice Kg .

$$h = h_s - Kg$$

Značajni podatak za stabilnost broda jest početna poprečna metacentarska visina M_0G , koja se određuje kao razlika visine početnog poprečnog metacentra iznad kobilice KM_0 i visine sustavnog težišta broda iznad kobilice KG .

$$M_0G = KM_0 - KG$$

Visina sustavnog težišta broda iznad kobilice nakon vertikalnog pomaka prema gore je:

$$KG_1 = KG + GG_1$$

Opća definicija metacentarske visine određuje je kao razliku visine početnog poprečnog metacentra iznad kobilice i visine sustavnog težišta broda iznad kobilice.

$$M_0G_1 = KM_0 - KG_1$$

Budući da je masa pomaknuta u vertikalnom smislu, a sustavno težište broda pomaknuto prema gore, može se uračunati pomak sustavnog težišta izravno na novu početnu poprečnu metacentarsku visinu nakon pomaka mase M_0G_1 :

$$M_0G_1 = M_0G - GG_1$$

Pri podizanju mase samaricom ne dolazi do kuta nagiba broda, već on nastupa čim se promijeni krak, tj. otklon samarice iz položaja u kojem je ona zahvatila masu. Moguće je izračunati kut nagiba za bilo koji pomak mase samaricom od trenutka zahvaćanja mase i konačnog položaja samarice s kojeg će se masa iskrcati na obalu. Najveći će kut nagiba nastupiti u položaju samarice pri iskrcaju na obalu φ_{MAX} , pa je stoga od važnosti sagledati samo taj kut nagiba, te kut nagiba u kojem će brod ostati nakon iskrcaja φ .

U slučaju da se iskrcava iz simetrane broda, tada je krak na kojem djeluje masa pri kutu nagiba φ_{MAX} zapravo odklon samarice iz simetrane u položaj s kojeg će se masa iskrcati d_s . Ako je brod prije iskrcanja bio uspravan, a masa se iskrcava s neke udaljenosti od simetrane broda d_1 , tada je krak zbroj ili razlika navedenog odklona samarice d_s i te udaljenosti.

Iskrcaj iz simetrane (Shema 28):

$$\tan \varphi_{MAX} = \frac{p \times d_s}{D \times M_0 G_1}$$

Iskrcaj izvan simetrane (Shema 29):

$$d = d_s \pm d_1$$

$$\tan \varphi_{MAX} = \frac{p \times d}{D \times M_0 G_1}$$

Kada se masa iskrcava preko suprotnog boka broda od onog na kojem se nalazi prije iskrcanja, krak d je zbroj, a kada se masa iskrcava s istog boka na kojem se nalazi prije iskrcanja, krak d je razlika.

U izrazu za određivanje tangensa kuta nagiba φ_{MAX} koristi se metacentarska visina $M_0 G_1$ koja odgovara položaju sustavnog težišta kada je masa obješena o glavu samarice.

U trenutku koji označava iskrcaj mase s broda, kada samarica spusti masu na kopno, težište broda se pomiče u novi položaj, točku G_2''' . Kao i pri ukrcanju, položaj točke G_2''' , točnije njezinu visinu iznad kobilice broda KG_2 , može se odrediti koristeći krak h_1 , koji predstavlja razliku visine sustavnog težišta broda iznad kobilice dok je masa još obješena o glavu samarice KG_1 i visine glave samarice iznad kobilice h_s , ili krak h_2 , koji predstavlja razliku visine sustavnog težišta broda prije prekrcajnih operacija KG i visine težišta mase iznad kobilice s koje je masa iskrcana Kg .

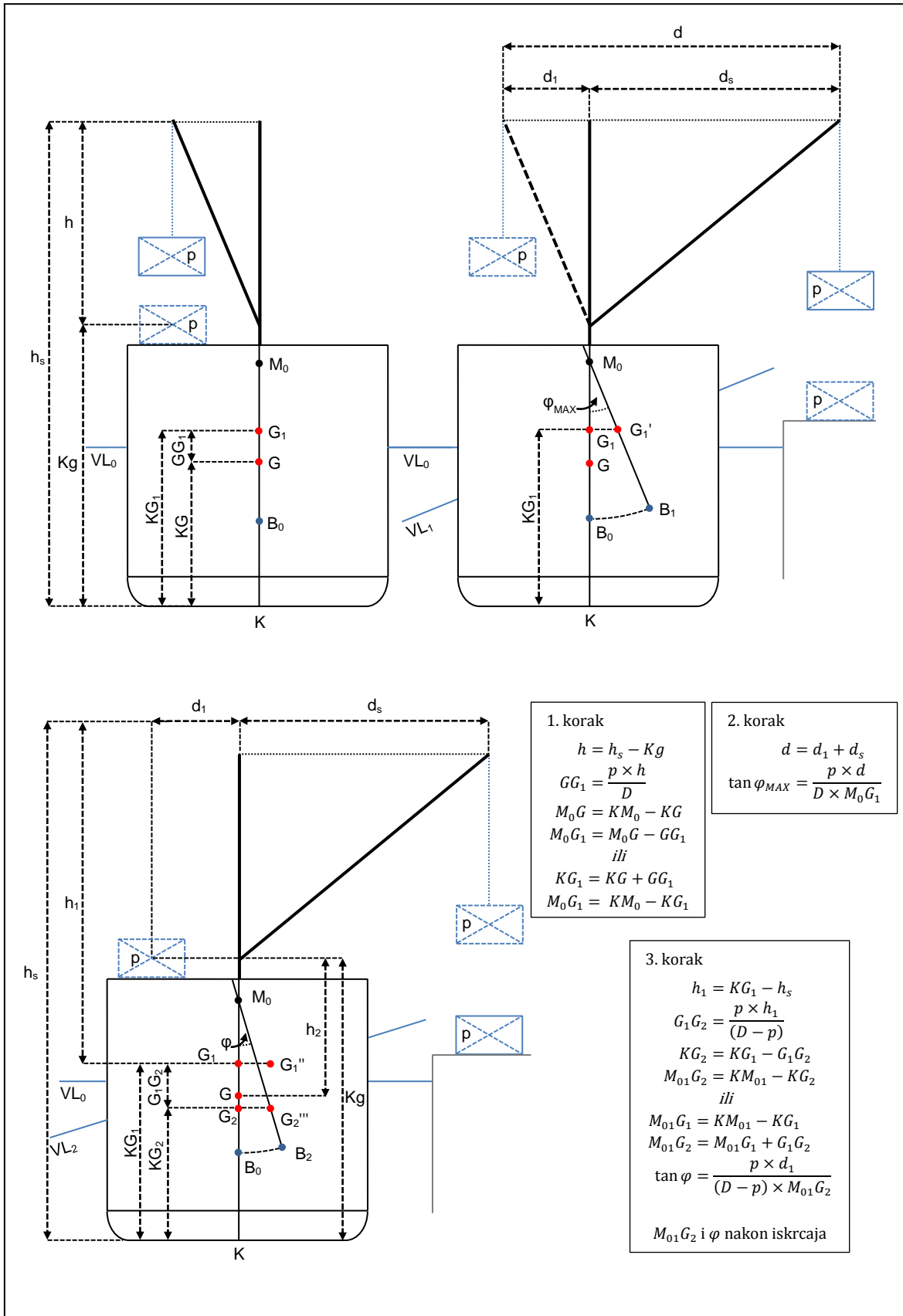
$$h_1 = KG_1 - h_s$$

$$G_1 G_2 = \frac{p \times h_1}{(D - p)}$$

$$h_2 = KG - Kg$$

$$G G_2 = \frac{p \times h_2}{(D - p)}$$

Shema 29. Iskrcaj mase izvan simetrale samaricom za teške terete



U proračunima vertikalnih pomaka sustavnog težišta broda G_1G_2 i GG_2 potrebno je koristiti novi deplasman broda D umanjen za iskrcanu masu p . Također, iskrcajem mase (promjenom deplasmana) dolazi do promjene visine početnog poprečnog metacentra iznad kobilice, čija se nova visina KM_{01} određuje koristeći tablice hidrostatskih podataka broda.

Sljedećim izrazima dolazi se do iznosa konačne početne poprečne metacentarske visine $M_{01}G_2$ i kuta nagiba φ :

$$KG_2 = KG_1 - G_1G_2$$

$$M_{01}G_2 = KM_{01} - KG_2$$

ili

$$M_{01}G_1 = KM_{01} - KG_1$$

$$M_{01}G_2 = M_{01}G_1 + G_1G_2$$

$$\tan \varphi = \frac{p \times d_1}{(D - p) \times M_{01}G_2}$$

Krak d_1 predstavlja udaljenost težišta mase od simetrale broda ako se iskrcava izvan nje.

Kako se hvatište mase pri iskrcaju nalazilo u glavi samarice čija je visina h_s veća od sustavnog težišta broda KG_1 , težište se spušta prema dolje, što znači da se pomak G_1G_2 oduzima od visine KG_1 , a time se početna poprečna metacentarska visina povećava za isti taj pomak.

Ako se promatra pomak sustavnog težišta pri iskrcaju mase zanemarujući međukorake, tada se određuje pomak GG_2 koji se, ovisno o tome je li masa iskrcana iznad ili ispod sustavnog težišta broda G , pomiče prema gore, povećavajući visinu sustavnog težišta broda iznad kobilice (smanjujući početnu poprečnu metacentarsku visinu), ili prema dolje, smanjujući visinu sustavnog težišta broda iznad kobilice (povećavajući početnu poprečnu metacentarsku visinu). Određivanje nove početne poprečne metacentarske visine $M_{01}G_2$ izvodi se sljedećim izrazima:

$$KG_2 = KG_1 \mp GG_2$$

$$M_{01}G_2 = KM_{01} - KG_2$$

Također je moguće ispraviti metacentarsku visinu za pomak sustavnog težišta na sljedeći način⁹:

$$M_{01}G_1 = KM_{01} - KG_1$$
$$M_{01}G_2 = M_{01}G_1 \pm G_1G_2$$

Koristeći novoodređenu početnu poprečnu metacentarsku visinu $M_{01}G_2$ određuje se kut nagiba nakon iskrcaja mase φ :

$$\tan \varphi = \frac{p \times d_1}{(D - p) \times M_{01}G_2}$$

Ako se masa iskrcava iz simetrale, suvišno je proračunavati konačni kut nagiba zbog toga što tada krak d_1 iznosi 0, čime je i kut nagiba jednak nuli, tj. brod ostaje uspravan.

⁹ Ovo je moguće jer ne dolazi do druge promjene vrijednosti visine početnog poprečnog metacentra iznad kobilice, već on ostaje na visini KM_{01} .

3.7. RAČUN POPREČNE CENTRACIJE

Računom poprečne centracije određuje se visina sustavnog težišta broda iznad kobilice KG . Uobičajeno je sastavljanje tablice kojom će se to napraviti na pregledan način, a njezin oblik može varirati (Tablica 5). KG je kvocijent sume vertikalnih momenata ΣM_v i ukupnog deplasmana broda D . Deplasman broda se proračunava kao zbroj svih masa na brodu, uključujući: masu praznog broda, mrtve težine, gorivo i mazivo, pojnu i pitku vodu, balastne vode i teret.

Tablica 5. Primjer tablice računa poprečne centracije

		prostor	masa p (t)	visina težišta iznad kobilice KG, Kg (m)	vertikalni moment M_v (tm)
	LS	Prazan brod	6183	9,23	57069,09
	MT	Mrtve težine	85	9,50	807,50
	p_1	Tank dvodna 3	270	0,75	202,50
	p_2	Tank dvodna 4	360	0,75	270,00
	p_3	Skladište 1	1469	5,23	7682,87
	p_4	Skladište 2	1720	5,48	9425,60
	p_5	Skladište 3	1762	5,50	9691,00
	p_6	Skladište 4	1912	5,80	11089,60
	p_7	Skladište 5	1563	5,37	8393,31
	p_8	Međupalublje 1	823	10,98	9036,54
	p_9	Međupalublje 2	902	11,32	10210,64
	p_{10}	Međupalublje 3	850	11,10	9435,00
	p_{11}	Međupalublje 4	986	11,82	11654,52
	p_{12}	Međupalublje 5	960	11,73	11260,80
			deplasman	visina sustavnog težišta iznad kobilice	suma vertikalnih momenata
		TOTAL	D 19845	KG 7,87	ΣM_v 156229,00
ukrcaj	p_{13}	Skladište 2	320	5,67	1814,40
ukrcaj	p_{14}	Skladište 3	417	5,90	2460,30
ukrcaj	p_{15}	Međupalublje 2	212	11,86	2514,32
ukrcaj	p_{16}	Međupalublje 5	140	12,20	1708,00
iskrcaj	p_{17}	Skladište 2	-231	5,21	-1203,51
iskrcaj	p_{18}	Međupalublje 4	-184	11,63	-2139,92
iskrcaj	p_{19}	Pramčani pretežni tank	-198	12,29	-2433,42
			deplasman	visina sustavnog težišta iznad kobilice	suma vertikalnih momenata
		TOTAL	D_1 20321	KG_1 7,82	ΣM_{v_1} 158949,10

Tablica 5 prikazuje pojednostavljen prikaz računa poprečne centracije fiktivnog broda, no obuhvaća masu praznog broda, mrtve težine, gorivo, teret i dio balastnih voda koje se iskrcavaju iz pramčanog pretežnog tanka. Gornjim dijelom tablice određena je visina sustavnog težišta broda trenutnog deplasmana D prije ukrcajno-iskrcajnih operacije koje su prikazane u donjem dijelu tablice. Nakon ukrcajno-iskrcajnih operacija određuje se novi deplasman D_1 i nova suma vertikalnih momenata $\sum M_{v1}$ uzevši u obzir ukrcane, odnosno iskrcane mase. Vertikalni momenti M_v se proračunavaju kao umnošci masa p_i i visina njihovog težišta iznad kobilice Kg_i .

Poprečna centracija može se izvesti i bez sastavljanja tablice, tako da se u brojniku zbroje svi vertikalni momenti koji su umnošci masa i njihovih visina iznad kobilice, te da se podijele sa sumom svih masa na brodu, tj. novim deplasmanom D_1 . Prvi pribrojnik u brojniku jest umnožak deplasmana D i visine sustavnog težišta broda iznad kobilice KG prije ukrcajnih operacija, a ostali pribrojnici su umnošci masa p_i i pripadajućih visina njihovih težišta iznad kobilice broda Kg_i . Prvi pribrojnik u nazivniku jest deplasman D , a ostale pribrojnici čine mase p_i koje se ukrcavaju (s predznakom +) na brod i iskrcavaju (s predznakom -) s broda. Dobiveni rezultat predstavlja visinu sustavnog težišta broda iznad kobilice nakon ukrcajnih operacija KG_1 .

$$KG_1 = \frac{D \times KG \pm p_1 \times Kg_1 \pm p_2 \times Kg_2 \pm \dots \pm p_n \times Kg_n}{D \pm p_1 \pm p_2 \pm \dots \pm p_n}$$

$$KG_1 = \frac{D \times KG \pm \sum_{i=1}^n (p_i \times Kg_i)}{D \pm \sum_{i=1}^n p_i}$$

$$KG_1 = \frac{\sum M_{v1}}{D_1}$$

Iako nije čest slučaj, moguće je novi položaj sustavnog težišta odrediti na način da se izračuna pomak sustavnog težišta uslijed prekrcajnih operacija GG_1 te se on zbroji s KG prije prekrcajnih operacija ili oduzme od nje, ovisno o predznaku dobivene vrijednosti pomaka GG_1 . Takav način bi bio da se u brojniku, zbroje vertikalni momenti koji pomiču sustavno težište. Krakovi h_i na kojima djeluju mase predstavljaju udaljenosti težišta ukrvanih, odnosno iskrcanih masa od sustavnog težišta broda. Kako ne bi došlo do zabune, pri korištenju ovog načina suma vertikalnih momenata označena je s $\sum \Delta M_{v1}$, što predstavlja ukupnu promjenu vertikalnih momenata.

$$h_i = Kg_i - KG$$

$$GG_1 = \frac{p_1 \times h_1 \pm p_2 \times h_2 \pm \dots \pm p_n \times h_n}{D \pm p_1 \pm p_2 \pm \dots \pm p_n}$$

$$GG_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (p_i \times h_i)}{D \pm \sum_{i=1}^n p_i}$$

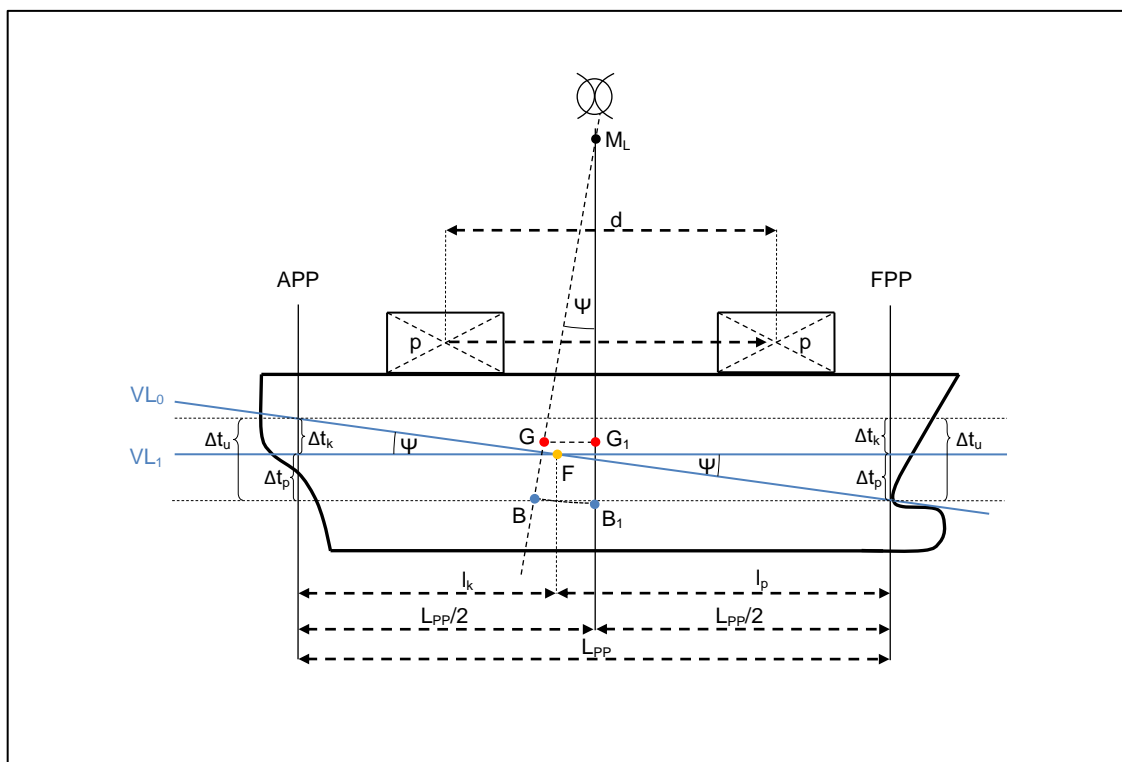
$$GG_1 = \frac{\sum \Delta M_{v1}}{D_1}$$

$$KG_1 = KG \pm GG_1$$

4. UZDUŽNA STABILNOST

Uzdužna stabilnost podrazumijeva nagibanje broda oko poprečne osi, a kao pomoć pri njenom razumijevanju koriste se sheme prikazane na uzdužnom presjeku broda. Iako temeljena na istim načelima, uzdužna stabilnost se značajno razlikuje od poprečne prema presjeku broda, dimenzijama, koordinatama, pokazatelju stabilnosti i oznakama. I u uzdužnoj stabilnosti brod ima metacentarsku visinu, koja se označava s $M_L G$, no njezina je vrijednost vrlo velika, uglavnom veća i od duljine broda, pa se ona ne koristi kao pokazatelj uzdužne stabilnosti. Pokazateljem uzdužne stabilnosti smatra se trim, a to je razlika gaza na pramcu i gaza na krmi. Zbog velike uzdužne stabilnosti brodova, gotovo je nemoguće da se brod prevrne preko pramca ili krme, tako da se značaj uzdužne stabilnosti temelji na postavljanju broda u položaj koji je najpovoljniji za teret i manevriranje brodom.

Shema 30. Uzdužni presjek broda s detaljima bitnim za proračune uzdužne stabilnosti



Elementi koji se koriste u uzdužnoj stabilnosti su (Shema 30):

L_{PP} – duljina broda između okomica ili „perpendikulara“ (eng. *LBP – length between perpendiculars*)

$L_{PP}/2$ – polovica duljine broda između okomica, tj. udaljenost od okomice do glavnog rebra

l_p – udaljenost točke F od pramčane okomice FPP

l_k – udaljenost točke F od krmene okomice APP

F – težište plovne vodene linije

G – sustavno težište broda

G_1 – sustavno težište broda nakon promjene rasporeda masa na brodu

B – težište uzgona

B_1 – težište uzgona nakon promjene oblika podvodnog dijela broda nastalog uslijed promjene rasporeda masa na brodu

p – masa

d – udaljenost za koju je masa premještena

VL_1 – vodena linija broda prije pomaka mase

VL_2 – vodena linija broda nakon pomaka mase

Ψ – uzdužni kut nagiba broda (slovo grčkog alfabeta ψ)

M_L – točka uzdužnog metacentra

Δt_u – ukupna promjena trima

Δt_p – promjena gaza na pramcu

Δt_k – promjena gaza na krmi

t_u – trim


t_p – razlika gaza na pramcu u odnosu na srednji gaz

t_k – razlika gaza na krmi u odnosu na srednji gaz

T_p – gaz na pramcu

T_k – gaz na krmi

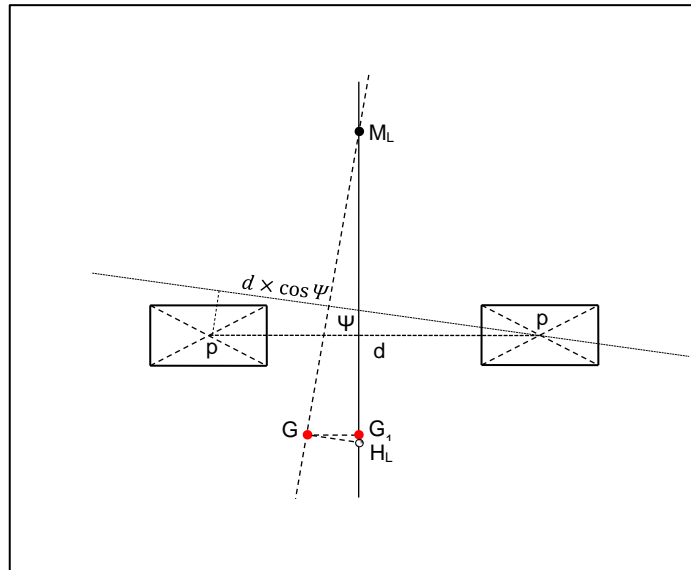
T_s – srednji gaz broda (aritmetička sredina gaza na pramcu i gaza na krmi), razlikuje se od gaza na sredini broda

 – oznaka glavnog rebra

APP – krmena okomica (eng. *aft perpendicular*)

FPP – pramčana okomica (eng. *fore perpendicular*)

Shema 31. Trokuti koji prikazuju odnos krakova momenta koji nagiba brod i momenta kojim se brod odupire nagibanju



Prema zakonu o ravnoteži, u kojem je moment koji nagiba brod $p \times d \times \cos \Psi$ jednak momentu kojim se brod odupire $D \times M_L G \times \sin \Psi$, slijedi izraz¹⁰ (Shema 31):

$$p \times d \times \cos \Psi = D \times M_L G \times \sin \Psi$$

($M_L G \times \sin \Psi$ odgovara poluzi GH_L)

$$p \times d \times \cos \Psi = D \times GH_L$$

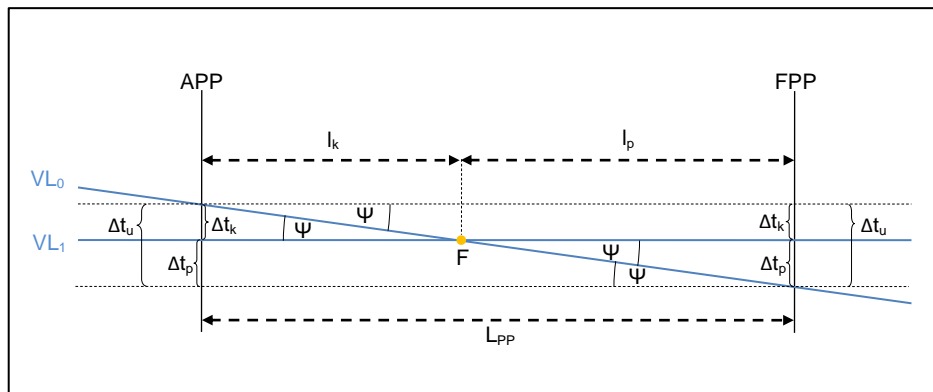
$$p \times d = D \times M_L G \times \frac{\sin \Psi}{\cos \Psi}$$

$$p \times d = D \times M_L G \times \tan \Psi$$

$$\tan \Psi = \frac{p \times d}{D \times M_L G}$$

¹⁰ Buljan, I., *Stabilnost broda*, Školska knjiga, Zagreb, 1982., str. 58.

Shema 32. Odnos kutova i stranica trokuta za proračun uzdužnog kuta nagiba Ψ



Budući da brod u uzdužnom smislu nije simetričan, nego se oblici njegova krmenog i pramčanog dijela razlikuju, on se ne nagiba oko glavnog rebra koje se nalazi točno na polovici duljine između okomica L_{PP} , već se to nagibanje događa oko težišta plovne vodene linije, točke F . Položaj točke F može se prikazati udaljenošću od krmene okomice l_k , udaljenošću od pramčane okomice l_p ili od glavnog rebra d_c . Tablice s hidrostatskim podacima broda obično sadrže podatak l_k , no u nekima je položaj točke F dan kao udaljenost od glavnog rebra d_c ¹¹. To valja razlikovati, jer je tada potrebno pomoću te vrijednosti odrediti udaljenosti od krmene i pramčane okomice l_k i l_p . Vrijede sljedeći odnosi (Shema 32):

$$\tan \Psi = \frac{\Delta t_u}{L_{PP}} = \frac{\Delta t_p}{l_p} = \frac{\Delta t_k}{l_k}$$

$$\Delta t_u = \Delta t_p + \Delta t_k$$

$$\frac{\Delta t_u}{L_{PP}} = \frac{\Delta t_p}{l_p}$$

$$\Delta t_p = \frac{\Delta t_u \times l_p}{L_{PP}}$$

$$\frac{\Delta t_u}{L_{PP}} = \frac{\Delta t_k}{l_k}$$

$$\Delta t_k = \frac{\Delta t_u \times l_k}{L_{PP}}$$

¹¹ *Vademecum maritimus – podsjetnik pomorcima*, Pomorski fakultet Rijeka, Rijeka, 2002., str. 154., položaj težišta plovne vodene linije određen udaljenošću od glavnog rebra d_c , u takvom se obliku koristi pri određivanju ispravka deplasmana za trim broda (trim-korekcija).

Može se povezati izraze za tangens Ψ :

$$\tan \Psi = \frac{p \times d}{D \times M_L G}$$

$$\tan \Psi = \frac{\Delta t_u}{L_{PP}}$$

$$\frac{\Delta t_u}{L_{PP}} = \frac{p \times d}{D \times M_L G}$$

$$\Delta t_u = \frac{p \times d \times L_{PP}}{D \times M_L G}$$

Ako se iz navedenog izrazi moment $p \times d$ koji je potreban za promjenu trima Δt_u , dobije se sljedeći izraz:

$$p \times d = \frac{D \times M_L G \times \Delta t_u}{L_{PP}}$$

$$\frac{p \times d}{\Delta t_u} = \frac{D \times M_L G}{L_{PP}}$$

Nadalje, uvrsti li se ukupna promjena trima od jednog metra ($\Delta t_u = 1$ m), dobiveni izraz odgovara momentu koji je potreban za ukupnu promjenu trima od 1 m, koji se naziva jedinični moment trima M_j .

$$\frac{p \times d}{1} = \frac{D \times M_L G}{L_{PP}}$$

$$M_j = \frac{D \times M_L G}{L_{PP}}$$

Proračun novih gazova broda (nakon pomaka, ukrcaja ili iskrcaja mase) moguće je napraviti na dva načina:

- proračun novih gazova koristeći ukupnu promjenu trima i
- proračun novih gazova koristeći uzdužni pomak sustavnog težišta broda.

4.1. UZDUŽNI POMAK MASE

Uzdužni pomak mase događa se promjenom udaljenosti težišta mase koja se nalazi na brodu od krmene okomice broda. Takvim pomakom dolazi do promjena rasporeda masa na brodu i do pomaka sustavnog težišta broda u uzdužnom smislu. Posljedica uzdužnog pomaka je promjena gaza broda na krmi i na pramcu koji se mogu proračunati koristeći:

- ukupnu promjenu trima ili
- pomak sustavnog težišta broda.

4.1.1. Proračun novih gazova koristeći ukupnu promjenu trima

Otprije je poznat izraz kojim pomoću mase p , udaljenosti za koju se masa pomiče d , duljine broda između okomica L_{PP} , deplasmana broda D i uzdužne metacentarske visine broda $M_L G$ određuje ukupna promjena trima broda Δt_u . Ako se u izraz uvrsti vrijednost jediničnog momenta trima M_j , koji se proračunava kao kvocijent duljine broda između okomica L_{PP} i umnoška deplasmana broda D s uzdužnom metacentarskom visinom $M_L G$, dolazi se do izraza za ukupnu promjenu trima broda. On se može proračunati za svaku promjenu gaza (odnosno deplasmana), a njegova se vrijednost vadi iz tablica s hidrostatskim podacima broda.

$$\Delta t_u = \frac{p \times d \times L_{PP}}{D \times M_L G} = p \times d \times \frac{L_{PP}}{D \times M_L G} = p \times d \times \frac{1}{M_j}$$
$$\Delta t_u = \frac{p \times d}{M_j}$$

Udaljenost d jest udaljenost za koju se masa pomiče, tj. razlika udaljenosti težišta mase od krmene okomice na koju se masa pomiče Xg_1 i udaljenosti težišta mase od krmene okomice na kojoj se masa nalazila prije pomaka Xg_0 .

$$d = Xg_1 - Xg_0$$

Kada je poznata vrijednost ukupne promjene trima Δt_u , tada se određuje koliki dio trima otpada na pramčani dio broda, a koliki na krmeni, tj. koliko se trim promijenio na pramcu Δt_p te koliko se trim promijenio na krmi broda Δt_k .

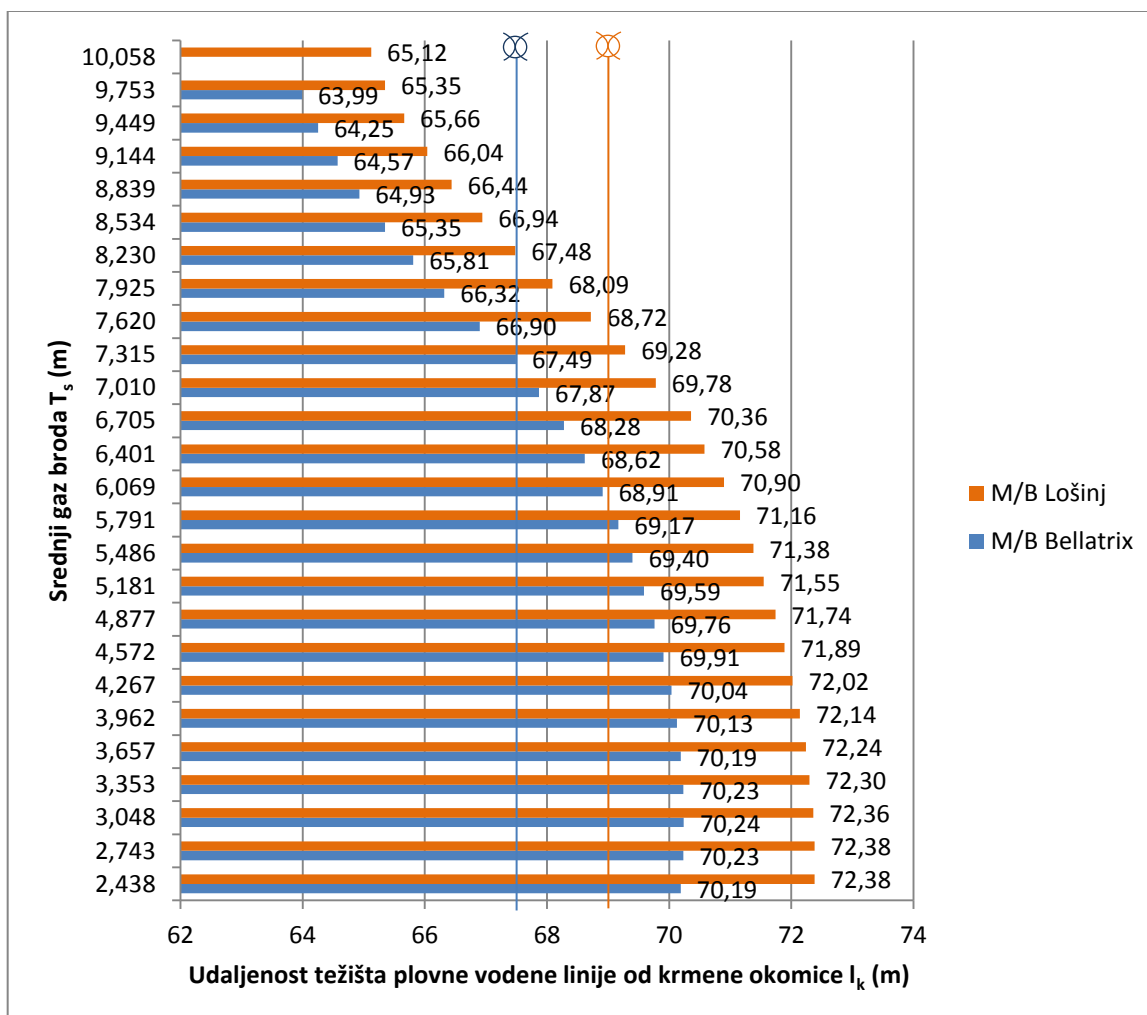
Navedene promjene trima na pramcu i na krmi određuju se prema sljedećim izrazima:

$$\Delta t_p = \frac{\Delta t_u \times l_p}{L_{PP}}$$

$$\Delta t_k = \frac{\Delta t_u \times l_k}{L_{PP}}$$

U izrazima za promjene trima nalaze se ukupna promjena trima Δt_u , duljina broda između okomica L_{PP} , te udaljenost težišta plovne vodene linije F od krmene okomice l_k (u izrazu za Δt_k) i udaljenost težišta plovne vodene linije F od pramčane okomice l_p (u izrazu za Δt_p).

Grafikon 4. Prikaz ovisnosti položaja težišta plovne vodene linije o srednjem gasu broda



Izvor: Izradio autor na temelju tablica s hidrostatskim podacima za M/B Bellatrix i M/B Lošinj.

Duljina broda između okomica L_{PP} je konstanta, tj. podatak koji se ne mijenja, no težište plovne vodene linije F nije fiksna točka i njezin se položaj mijenja s promjenom oblika vodene linije. (Grafikon 4)

Nakon određivanja promjena trima na krmi i na pramcu, one se dodaju, odnosno oduzimaju od gazova na krmi T_k i na pramcu T_p . Ako je masa pomaknuta prema pramcu, tj. na veću udaljenost od krmene okomice Xg , tada će se povećati gaz na pramcu T_p , odnosno smanjiti gaz na krmi T_k . Suprotno tome, gaz na krmi T_k će se povećati ako je masa pomaknuta prema krmi, tj. na manju udaljenost od krmene okomice Xg nego što je ona iznosila prije pomaka, dok će se gaz na pramcu T_p smanjiti.

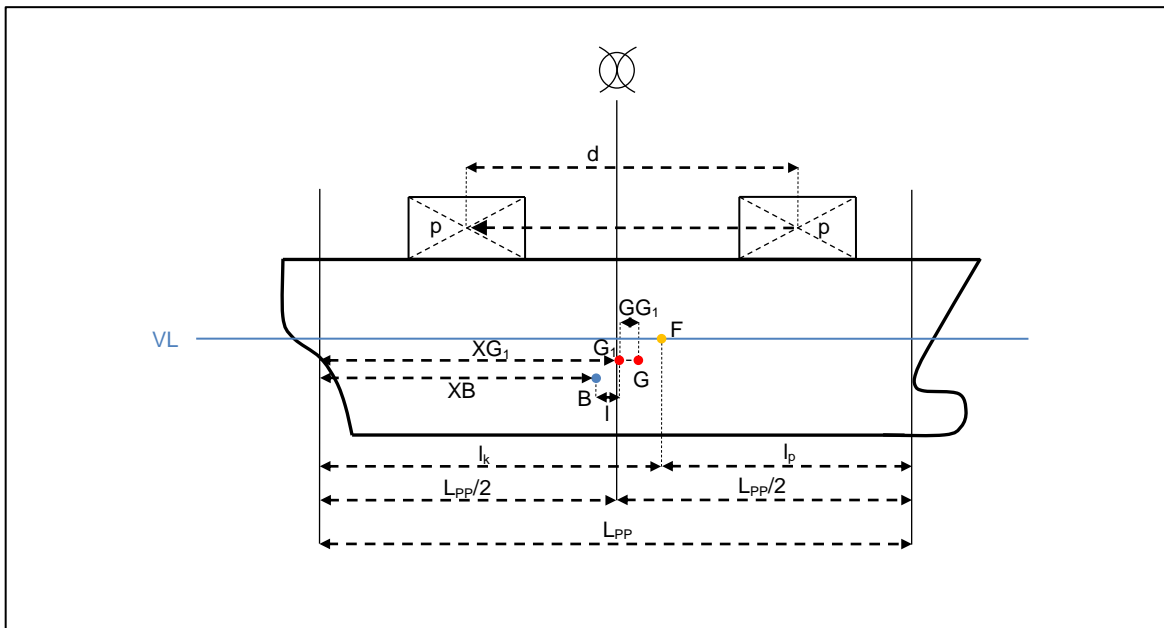
$$\begin{array}{r} T_k = \\ \pm \Delta t_k = \\ \hline T_{k_1} = \end{array} \qquad \begin{array}{r} T_p = \\ \mp \Delta t_p = \\ \hline T_{p_1} = \end{array}$$

4.1.2. Proračun novih gazova koristeći uzdužni pomak sustavnog težišta broda

Proračun novih gazova koristeći pomak sustavnog težišta broda počiva na pretpostavci da postoji spreg sila deplasmana i uzgona na poluzi koju predstavlja udaljenost između okomica na kojima djeluju. Takva poluga nastaje pomakom sustavnog težišta broda G u novi položaj G_1 čime se remeti drugi uvjet plovnosti. Tada se težište uzgona B nastoji postaviti u istu okomicu na vodenu liniju s novim položajem sustavnog težišta G_1 .

Prema drugom uvjetu plovnosti sile deplasmana D i uzgona U djeluju na istom pravcu koji je okomit na plovnu vodenu liniju. Prema tom zakonu težište uzgona B prati sustavno težište G i s promjenom rasporeda masa na brodu postavlja se ispod njega. To znači da kad se brod postavi u ravnotežan položaj, ne postoji udaljenost između okomica na kojima djeluju sila deplasmana i sila uzgona, tj. nema poluge na kojoj bi sile deplasmana i uzgona tvorile spreg sila, odnosno moment.

Shema 33. Podatci koji se koriste pri proračunu novih gazova koristeći pomak sustavnog težišta broda prikazani na uzdužnom presjeku broda



Neka se, prema drugom uvjetu plovnosti, pretpostavi da se sustavno težište broda **G** i težište uzgona **B** nalaze na istom pravcu okomitom na plovnu vodenu liniju (Shema 34, ad. a)). Ako se tom položaju pramac i krma učvrste, tj. onemogući se njihovo pomicanje, te se neka masa **p** koja je već dio deplasmana **D** pomakne za udaljenost **d**, dolazi do promjena rasporeda masa na brodu i promjene položaja sustavnog težišta **G** (Shema 34, ad. b)). Promatrajući uzdužnu stabilnost, položaj točke **G** promatra se kroz njegovu horizontalnu udaljenost od krmene okomice ili glavnog rebra što se označava s **XG**. Budući da se tablice s hidrostatskim podacima izrađuju za brod na ravnoj kobilici (kada je kobilica paralelna s vodenom linijom), primjenjuju se ti podatci, a izraz „horizontalna udaljenost“ shvaća se u odnosu na brod. Vrijednost **XG** proračunava se postupkom uzdužne centracije.

Ako su pramac i krma pričvršćeni, tada promjena rasporeda masa neće dovesti do promjene podvodnog oblika broda, odnosno neće se ispunjavati drugi uvjet plovnosti, a tada će između okomica na kojoj djeluju sila deplasmana i sila uzgona nastati udaljenost, točnije poluga trima **l**. Podatak o položaju težišta uzgona **B** sadržan je u tablicama s hidrostatskim podacima broda u obliku udaljenosti od glavnog rebra ili krmene okomice **XB**.

Poluga trima predstavlja horizontalnu udaljenost između okomica na kojima djeluju sila deplasmana i sila uzgona, a budući da su u početnom stanju one bile na istom pravcu, te poluge nema dok ne dođe do promjene rasporeda masa na brodu.

$$l = XG - XB = 0$$

Kako se pomakom mase nije promijenio deplasman D , udaljenost težišta uzgona od krmene okomice XB ostala je nepromijenjena¹², ali je potrebno proračunati pomak sustavnog težišta GG_1 koristeći izraz:

$$GG_1 = \frac{p \times d}{D}$$

što je proizišlo iz sljedećih odnosa:

$$\frac{d}{GG_1} = \frac{D}{p}$$

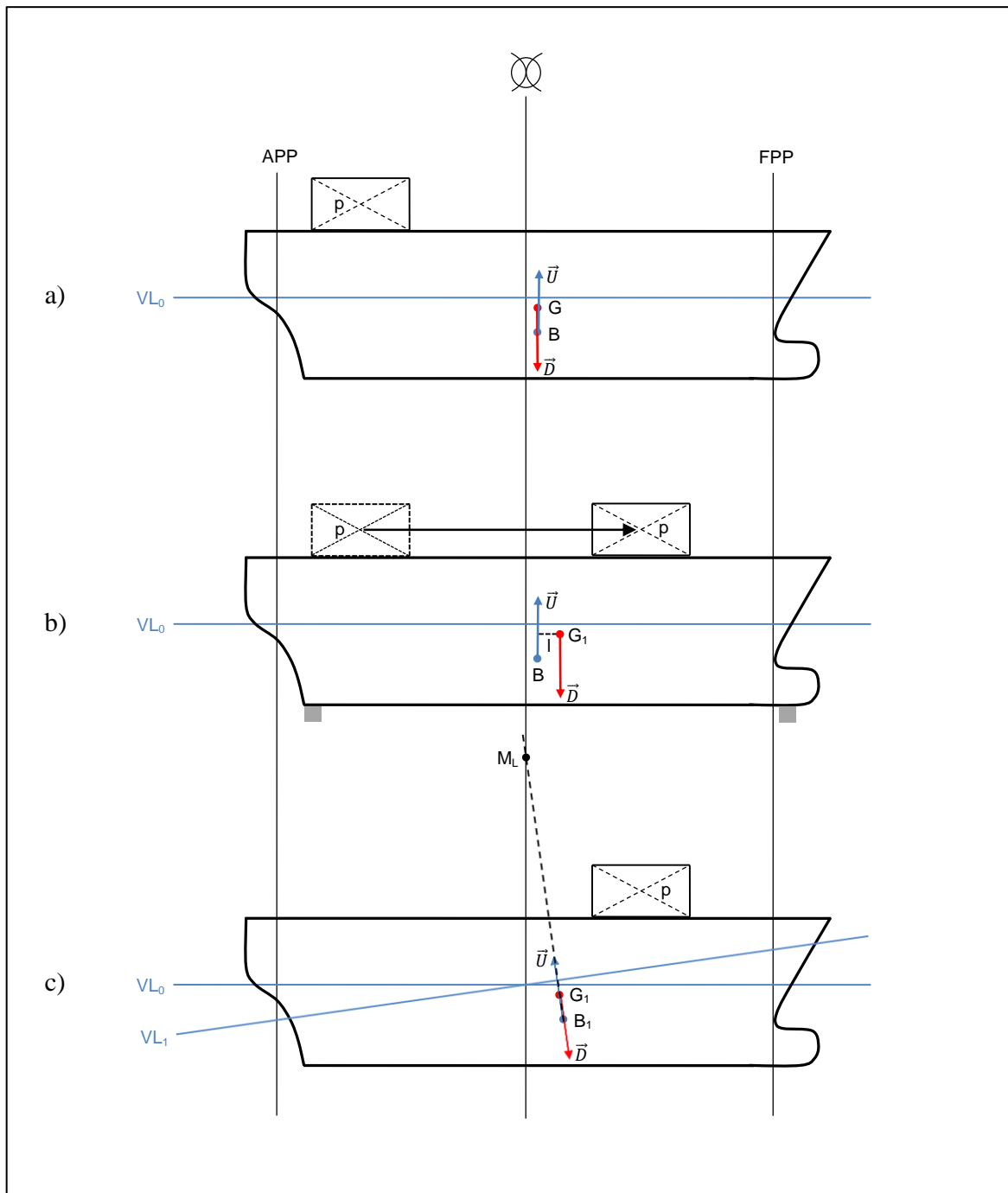
$$p \times d = D \times GG_1$$

Ako se masa premjestila prema pramcu, tj. na veću udaljenost od krmene okomice ($Xg_1 > Xg_0$), tada se udaljenost sustavnog težišta broda od krmene okomice XG povećava za određeni pomak GG_1 , odnosno sustavno težište prati smjer pomaka mase. Suprotno tome, ako se masa premjestila prema krmi, na manju udaljenost od krmene okomice ($Xg_1 < Xg_0$), tada se udaljenost sustavnog težišta broda od krmene okomice XG smanjuje.

$$XG_1 = XG \pm GG_1$$

¹² Zapravo se položaj točke B mijenja, jer promjenom rasporeda masa na brodu dolazi do promjene oblika podvodnog dijela broda. Također, u stvarnosti dolazi i do promjene srednjeg gaza broda T_s , zbog razlike oblika broda na pramcu i na krmi, no za potrebe prakse ovo se zanemaruje.

Shema 34. Prikaz nastanka poluge trima i ispunjenja drugog uvjeta plovnosti u uzdužnoj stabilnosti



Uvažavajući navedeno, poluga trima prilikom pomaka mase izračunava se kao razlika udaljenosti sustavnog težišta od krmene okomice XG_1 nakon pomaka i udaljenosti težišta uzgona od krmene okomice XB za pripadajući srednji gaz.

$$l = XG_1 - XB$$

Kada bi se pramac i krma otpustili (dopustilo bi se njihovo pomicanje), omogućilo bi se ispunjenje drugog uvjeta plovnosti i promijenio bi se oblik podvodnog dijela broda, a težište uzgona \mathbf{B} postavilo bi se u istu okomicu na vodenu liniju sa sustavnim težištem broda \mathbf{G} (Shema 34, ad. c)).

Kad je udaljenost sustavnog težišta od krmene okomice \mathbf{XG} manja od udaljenosti težišta uzgona od krmene okomice \mathbf{XB} , brod je zatežan. Deplasman i uzgon čine spreg sila na poluzi trima \mathbf{l} , koja je horizontalna udaljenost točaka okomica na kojima djeluju sile deplasmana i uzgona. Svaka od navedenih sila djeluje na polovici poluge trima \mathbf{l} , a s obzirom na to da su prema prvom zakonu plovnosti one jednake veličine, nakon sređivanja može se izraziti kao:

$$D = U$$

$$M_t = D \times \frac{l}{2} + U \times \frac{l}{2} = D \times \frac{l}{2} + D \times \frac{l}{2} = D \times \left(\frac{l}{2} + \frac{l}{2} \right) = D \times l$$

To je moment koji uzrokuje trim i naziva se moment trima \mathbf{M}_t , a jednak je umnošku deplasmana \mathbf{D} i poluge trima \mathbf{l} .

$$M_t = D \times l$$

Trim broda \mathbf{t}_u dobiva se kao kvocijent momenta trima \mathbf{M}_t i jediničnog momenta trima \mathbf{M}_j .

$$t_u = \frac{M_t}{M_j}$$

$$t_u = \frac{D \times l}{M_j}$$

Nakon određivanja trima, potrebno je odrediti kolike su razlike gazova na pramcu \mathbf{t}_p te na krmi \mathbf{t}_k u odnosu na srednji gaz \mathbf{T}_s .

$$t_p = \frac{t_u \times l_p}{L_{PP}}$$

$$t_k = \frac{t_u \times l_k}{L_{PP}}$$

Budući da trim odgovara zbroju razlika gaza na pramcu u odnosu na srednji gaz i razlike gaza na krmi u odnosu na srednji gaz, nakon određivanja jedne od njih, druga se može izračunati kao razlika trima i prvoodređene razlike.

$$t_u = t_p + t_k$$

Kako bi se izbjegle zabune, poželjno je nove gazove označiti drukčije od gazova prije pomaka, npr. novi gaz na krmi T_{k_1} i novi gaz na pramcu T_{p_1} .

$$\begin{array}{r} T_s = \\ \pm t_k = \\ \hline T_{k_1} = \end{array} \qquad \begin{array}{r} T_s = \\ \mp t_p = \\ \hline T_{p_1} = \end{array}$$

$$T_s = \frac{T_k + T_p}{2}$$

Budući da je deplasman broda D premještajem masa ostao nepromijenjen, tako bi i srednji gaz broda T_s trebao ostati isti.

$$T_{s_1} = \frac{T_{k_1} + T_{p_1}}{2}$$

$$T_s = T_{s_1}$$

Ipak, moguće su razlike u srednjim gazovima prije i nakon pomaka masa, iz razloga što su tablice s hidrostatskim podacima izrađene za brod na ravnoj kobilici, a podatak koji je bitan za izračun trima jest položaj težišta vodene linije F , tj. njegova udaljenost od krmene okomice ili glavnog rebra, koja ovisi o obliku vodene linije koji se mijenja s promjenom gaza. Također i svaka promjena rasporeda masa na brodu u uzdužnom smislu dovodi do promjena međusobnog položaja sustavnog težišta broda i težišta uzgona, što definira trim, a time dolazi i do promjene oblika vodene linije i njezinog težišta F . Teoretski, i beskonačno mali pomak mase za neku udaljenost dovodi do promjene položaja težišta plovne vodene linije, tako da bi nekoliko puta trebalo određivati njezin stvarni položaj, no najčešće su u pitanju zanemarive promjene koje nemaju nikakvog utjecaja na vrijednosti konačnih gazova broda.

4.2. UTJECAJ UKRCAJA I ISKRCAJA MASE NA UZDUŽNU STABILNOST BRODA

Ukrcana i iskrcana masa, osim što najčešće stvaraju promjenu trima, dovode i do promjene u srednjem gasu broda T_s , zato što se tada mijenja deplasman¹³ D . Utjecaj ukrcane ili iskrcane mase može se sagledati kroz dva dijela. Ako se radi o ukrcaju, može se pretpostaviti da se masa ukrkala u težište plovne vodene linije koje se nalazi na udaljenosti od krmene okomice l_k što je dovelo do promjene srednjeg gaza, a zatim se ukrcana masa premjestila na željenu udaljenost od krmene okomice Xg , odnosno za udaljenost d od težišta plovne vodene linije F . Ako se radi o iskrcaju, tada se može pretpostaviti da se masa premjestila s udaljenosti od krmene okomice Xg u težište plovne vodene linije koje se nalazi na udaljenosti od krmene okomice l_k , tj. za udaljenost d , a zatim se s položaja težišta plovne vodene linije iskrkala s broda.

Promjena srednjeg gaza koja u ovim slučajevima nastaje zove se paralelno uronuće ili izronuće, ovisno radi li se o ukrcaju ili iskrcaju, a može se označiti kao ΔT s predznakom + za ukrcaj i – za iskrcaj. U stvarnosti ne dolazi do takvog paralelnog uronuća, tj. jednake promjene gaza na krmi i gaza na pramcu, već bi ono nastalo isključivo ukrcajem/iskrcajem u/iz težišta plovne vodene linije¹⁴ F . Međutim, vrlo je praktično promjenu gaza ΔT koristiti za dobivanje međurezultata gazova na krmi T_{k1} i na pramcu T_{p1} , a zatim pomoću njih odrediti konačne gazove nakon ukrcaja/iskrcaja T_{k2} i T_{p2} .

Paralelno uronuće ili izronuće jednako je kvocijentu mase p koja se ukrcava ili iskrcava i podatka TPC (skraćeno od eng. *Tonnes per 1 Centimetre Immersion*), a označava koliko tona mase je potrebno ukrcati/iskrcati da bi se gaz broda promijenio za 1 cm. TPC se može označiti i kao t/cm , što je ujedno i mjerna jedinica tog podatka, a u hrvatskom jeziku se koristi izraz *tone po centimetru zagažaja*. Tone po centimetru zagažaja

¹³ Srednji gaz može se, osim promjenom deplasmana, promijeniti i promjenom gustoće ρ tekućine u koju je brod uronjen, npr. prelaskom broda iz slane u slatku vodu brod će više uroniti, zbog manje gustoće slatke vode.

¹⁴ U stvarnosti je nemoguće ukrcati jednu veliku masu u točku F , zato što se svakom promjenom deplasmana njezin položaj mijenja. Ako je riječ o manjim masama, pomak točke F je vrlo malen, stoga je za potrebe prakse zanemariv.

TPC su podatak koji se dobiva iz tablica s hidrostatskim podacima broda, a u engleskom sustavu jedinica ekvivalent tom podatku su *tone po palcu zagažaja TPI* (skraćeno od eng. *Tonnes per 1 Inch Immersion*). Dobiveno paralelno uronuće/izronuće ΔT izraženo je u centimetrima, a može se preračunati u metre tako da se pomnoži sa 100.¹⁵

$$\Delta T = \frac{p}{TPC}$$

Budući da je **TPC** podatak koji je ovisan o gasu, a tako i o deplasmanu broda, potrebno je voditi računa o promjeni njegove vrijednosti s promjenom srednjeg gaza T_s , tako da se pri ukrcaju/iskrcanju nekoliko masa p iz tablica s hidrostatskim podacima nekoliko puta vade vrijednosti **TPC**, ili ako je u pitanju jedna velika masa, da se podijeli na nekoliko manjih dijelova čiji će se ukrcaj proračunati s pripadajućim podatkom **TPC**. Također, ovaj je podatak vezan i za gustoću, a tablice s hidrostatskim podacima broda su obično rađene za gustoću morske vode od $\rho = 1,025 \text{ t/m}^3$, stoga ga je potrebno odrediti za onu gustoću vode ρ' u kojoj se brod nalazi¹⁶:

$$TPC_{\rho'} = TPC_{1,025} \times \frac{\rho'}{1,025}$$

pri čemu $TPC_{\rho'}$ predstavlja tone po centimetru zagažaja za gustoću vode u kojoj se brod nalazi, $TPC_{1,025}$ tone po centimetru zagažaja za gustoću morske vode ($\rho = 1,025 \text{ t/m}^3$) koje su dane u tablicama s hidrostatskim podacima broda i ρ' gustoća vode u kojoj se brod nalazi.

U vodi manje gustoće bit će potrebno manje tona da bi se promijenio gaz za 1 cm.

¹⁵ Budući da se gaz broda uobičajeno izražava u metrima, a paralelno uronuće/izronuće se dodaje ili odbija od njega, može doći do pogreške tako da se vrijednost paralelnog uronuća/izronuća izražena u centimetrima doda ili odbije od gaza broda koji je izražen u metrima.

¹⁶ *Vademecum maritimus – podsjetnik pomorcima*, Pomorski fakultet Rijeka, Rijeka, 2002., str. 161.

4.2.1. Proračun novih gazova nakon ukrcaja i iskrcaja mase koristeći ukupnu promjenu trima

Ako se nove gazove određuje koristeći ukupnu promjenu trima Δt_u , tada ju je potrebno izračunati pomoću obrasca koji je već naveden u poglavlju 4.1.1. *Proračun novih gazova koristeći ukupnu promjenu trima:*

$$\Delta t_u = \frac{p \times d}{M_j}$$

Vrijednost d u ovom slučaju predstavlja udaljenost težišta mase od težišta plovne vodene linije F , p podrazumijeva masu koja se ukrcava ili iskrcava, a M_j označava jedinični moment trima.

$$d = Xg - l_k$$

Nakon što je određena ukupna promjena trima Δt_u , potrebno je izračunati kolika se promjena trima dogodila na krmi Δt_k , a kolika na pramcu Δt_p . Kako se točka F najčešće nalazi izvan glavnog rebra, opći izrazi za promjene trima na krmi i na pramcu su sljedeći:

$$\Delta t_k = \frac{\Delta t_u \times l_k}{L_{PP}}$$
$$\Delta t_p = \frac{\Delta t_u \times l_p}{L_{PP}}$$

pri čemu je L_{PP} duljina broda između okomica, l_k udaljenost od krmene okomice do točke F , l_p udaljenost od točke F do pramčane okomice, a Δt_u ukupna promjena trima.

Ako se točka F nalazi na glavnom rebro, tada su udaljenosti l_k i l_p jednake i iznose polovicu duljine broda između okomica $\frac{L_{PP}}{2}$, a izraz za promjene trima uvrštavanjem navedenog postane:

$$\Delta t_k = \frac{\Delta t_u \times l_k}{L_{PP}} = \frac{\Delta t_u \times \frac{L_{PP}}{2}}{L_{PP}} = \frac{1}{2} \Delta t_u$$
$$\Delta t_p = \frac{\Delta t_u \times l_p}{L_{PP}} = \frac{\Delta t_u \times \frac{L_{PP}}{2}}{L_{PP}} = \frac{1}{2} \Delta t_u$$

To znači da su, kada se točka F nalazi na glavnom rebru, promjene trima na krmi i na pramcu jednake.

$$\Delta t_k = \Delta t_p = \frac{1}{2} \Delta t_u$$

$T_k =$	$T_p =$
$\pm \Delta T =$	$\pm \Delta T =$
$T_{k_1} =$	$T_{p_1} =$
$\pm \Delta t_k =$	$\mp \Delta t_p =$
$T_{k_2} =$	$T_{p_2} =$

Prilikom ukrcaja mase p u težište plovne vodene linije F teoretski ne bi trebalo doći do promjene trima, zato što je tada udaljenost $d = 0$, a uvrštavanjem te udaljenosti u izraz za izračun ukupne promjene trima Δt_u , on kao rezultat daje nulu. Položaj točke F je hidrostatski podatak broda, što znači da se svakom promjenom srednjeg gaza njegova vrijednost mijenja (Grafikon 4).

Predznaci promjena trima na krmi Δt_k i na pramcu Δt_p ovise o tome je li brod uronio krmom, a izronio pramcem ili obrnuto.

Ako se ukrcava po pramcu od težišta plovne vodene linije F , brod uranja pramcem, a izranja krmom. Kod ukrcaja po krmi od točke F , brod uranja krmom, a izranja pramcem. Suprotan učinak na promjene trima ima iskrcaj. Kako se prilikom određivanja udaljenosti d ukrcane ili iskrcane mase može pojaviti negativna vrijednost u slučaju ukrcaja po krmi od točke F , iz razloga što je tada masa p smještena na manjoj udaljenosti od krmene okomice (prije iskrcaja ili nakon ukrcaja) nego što iznosi udaljenost l_k , ukupna promjena trima ima svoj predznak koji je pozitivan ako je brod uronio pramcem, a izronio krmom ili negativan ako je brod uronio krmom, a izronio pramcem¹⁷. (Tablica 6)

¹⁷ Navedeni predznaci mogu biti i suprotni, ovisno o načinu označavanja.

Tablica 6. Predznaci promjena trima na krmi i na pramcu i ukupne promjene trima ovisno o položaju ukrcane/iskrcane mase na brodu

	UKRCAJ				ISKRCAJ			
težište mase	po pramcu od točke F		po krmi od točke F		po pramcu od točke F		po krmi od točke F	
promjene trima na krmi i na pramcu	$-\Delta t_k$	$+\Delta t_p$	$+\Delta t_k$	$-\Delta t_p$	$+\Delta t_k$	$-\Delta t_p$	$-\Delta t_k$	$+\Delta t_p$
ukupna promjena trima	$\Delta t_u = +$		$\Delta t_u = -$		$\Delta t_u = -$		$\Delta t_u = +$	

4.2.2. Proračun novih gazova nakon ukrcaja i iskrcaja mase koristeći uzdužni pomak sustavnog težišta broda

Pri proračunu novih gazova koristeći uzdužni pomak sustavnog težišta GG_1 , umjesto ukupne promjene trima Δt_u koristi se trim t_u koji je razlika gaza na pramcu T_p i gaza na krmi T_k . Trim koji se određuje je trim nakon ukrcaja/iskrcaja. On se može izraziti kao zbroj razlike novog gaza na krmi u odnosu na srednji gaz t_k i razlike novog gaza na pramcu u odnosu na srednji gaz t_p . Također, u ovom načinu određivanja proračuni počinju koristeći srednji gaz T_s .

$$\begin{array}{r}
 T_s = \\
 \pm \Delta T = \\
 \hline
 T_{s1} = \\
 \pm t_{k1} = \\
 \hline
 T_{k1} =
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{r}
 T_s = \\
 \pm \Delta T = \\
 \hline
 T_{s1} = \\
 \mp t_{p1} = \\
 \hline
 T_{p1} =
 \end{array}$$

Na srednji gaz T_s računa se paralelno uronuće/izronuće, čime se dobiva srednji gaz nakon ukrcaja/iskrcaja T_{s1} , a nakon toga se zbrajaju, odnosno oduzimaju razlike novih gazova u odnosu na srednji gaz na krmi t_{k1} i na pramcu t_{p1} , poštivajući predznake.

Trim se, kako je objašnjeno u poglavlju **4.1.2. Proračun novih gazova koristeći uzdužni pomak sustavnog težišta broda**, određuje pomoću poluge trima l . Kako se koriste vrijednosti nakon ukrcaja/iskrcaja, poželjno ih je drugačije označiti (dodavanjem indeksa ili crtica), kako ne bi došlo do zabune i upotrebe krivih podataka u proračunima.

$$t_{u1} = \frac{D_1 \times l_1}{M_{j1}}$$

Poluga trima l_1 se prilikom ukrcaja i iskrcaja određuje kao razlika udaljenosti sustavnog težišta broda od krmene okomice nakon ukrcaja/iskrcaja XG_1 i udaljenosti težišta uzgona od krmene okomice nakon ukrcaja/iskrcaja XB_1 . Vrijednost XG_1 dobiva se zbrajanjem ili oduzimanjem pomaka sustavnog težišta GG_1 na ili od vrijednosti XG koja odgovara udaljenosti sustavnog težišta broda od krmene okomice prije ukrcaja/iskrcaja. Vrijednost XB_1 određuje se iz tablica s hidrostatskim podacima broda za novi deplasman D_1 , odnosno novi srednji gaz T_{s1} nakon ukrcaja/iskrcaja.

$$l_1 = XG_1 - XB_1$$

Pomak sustavnog težišta broda GG_1 određuje se koristeći sljedeći izraz:

$$GG_1 = \frac{p \times d}{D \pm p}$$

u kojemu je potrebno koristiti deplasman nakon ukrcaja/iskrcaja mase p , a to je $(D + p)$ kod ukrcaja ili $(D - p)$ kod iskrcaja. Udaljenost d predstavlja udaljenost težišta ukrcane/iskrcane mase p od sustavnog težišta broda prije ukrcaja ili iskrcaja mase G , a jednaka je razlici udaljenosti težišta mase p od krmene okomice Xg i udaljenosti sustavnog težišta broda od krmene okomice prije ukrcaja/iskrcaja XG .

$$d = Xg - XG$$

Sljedeći izrazi prikazuju određivanje novog položaja sustavnog težišta uslijed ukrcaja/iskrcaja jedne mase:

$$XG_1 = XG \pm GG_1$$

$$XG_1 = XG \pm \frac{p \times d}{D \pm p}$$

Nakon određivanja trima nakon ukrcaja/iskrcaja t_{u_1} , još je potrebno proračunati kolika je razlika gaza u odnosu na srednji gaz nakon ukrcaja/iskrcaja T_{s_1} ostvarena na krmi t_{k_1} , a kolika na pramcu t_{p_1} .

$$t_{k_1} = \frac{t_{u_1} \times l_{k_1}}{L_{pp}}$$

$$t_{p_1} = \frac{t_{u_1} \times l_{p_1}}{L_{pp}}$$

Bitno je naglasiti da je za određivanje razlika gazova na pramcu i na krmi u odnosu na srednji gaz potrebno iz tablica s hidrostatskim podacima broda odrediti i novu vrijednost udaljenosti l_{k_1} . Pomoću vrijednosti l_{k_1} određuje se udaljenost l_{p_1} , a zbroj tih dviju udaljenosti daje duljinu broda između okomica L_{pp} .

Predznaci t_{k_1} i t_{p_1} određuju se u odnosu na međusobni položaj točaka G_1 i B_1 , odnosno polugu trima l . Ako se sustavno težište broda G nalazi po pramcu od težišta uzgona B , tj. na većoj udaljenosti od krmene okomice, tada je brod pretežan. Ako je njihov raspored obrnut, tada je brod zatežan. Granični slučaj je kada se obje točke nalaze na istoj udaljenosti od krmene okomice, u tom slučaju je brod na ravnoj kobilici, a trim jednak nuli.

Ako je iz međusobnog rasporeda točaka G i B utvrđeno da je brod zatežan, tada se razlika gaza na krmi u odnosu na srednji gaz t_{k_1} zbraja sa srednjim gazom, a razlika gaza na pramcu u odnosu na srednji gaz t_{p_1} oduzima od srednjeg gaza. Suprotno tome, ako je utvrđeno da je brod pretežan, razlika gaza na krmi u odnosu na srednji gaz t_{k_1} oduzima se od srednjeg gaza, a razlika gaza na pramcu u odnosu na srednji gaz t_{p_1} zbraja sa srednjim gazom (Tablica 7).

Tablica 7. Određivanje predznaka razlika gazova u odnosu na srednji gaz i trima iz međusobnog položaja točaka G i B

međusobni položaj točaka G i B	$XG < XB$		$XG = XB$		$XG > XB$	
položaj broda	zatežan		na ravnoj kobilici		pretežan	
razlike gazova u odnosu na srednji gaz	$+ t_k$	$- t_p$	$t_k = 0$	$t_p = 0$	$- t_k$	$+ t_p$
trim ¹⁸	$t_u = -$		$t_u = 0$		$t_u = +$	

4.3. TRIMOVANJE

Postupak trimovanja podrazumijeva dovođenje broda na željeni trim t_u , odnosno na željene gazove na pramcu T_p i na krmi T_k . Čest slučaj je dovođenje broda na ravnu kobilicu (eng. *Even Keel*, položaj broda u kojem su gazovi jednaki, a trim jednak nuli), no najčešći je slučaj dovođenje broda u zatežan položaj (u kojem je gaz na krmi veći nego gaz na pramcu), jer su usisi balasta, goriva i tereta smješteni u krmenom dijelu tankova. Također, to je i povoljan položaj sa stajališta manevriranja.

Trimovanje se izvodi pri kraju ukrcaja tako da se ostavi određena količina tereta koju je potrebno podijeliti u dva prostora za skladištenje tereta, jedan smješten prema krmi, a drugi prema pramcu u odnosu na točku F . Također, trimovanje se može izvesti ukrcajem ili iskrcajem balasta u/iz pramčanog pretežnog tanka i/ili krmenog zatežnog tanka kojima je zbog njihove velike udaljenosti od poprečne osi moguće proizvesti uzdužni moment koji će dovesti brod na željene gazove.

¹⁸ Predznaci trima mogu biti i suprotni, ovisno o načinu označavanja.

Budući da se brod nagiba u uzdužnom smislu uslijed djelovanja uzdužnih momenata, a poznato je da je moment mase umnožak mase i kraka na kojem ona djeluje, trimovanjem je potrebno odrediti masu ili udaljenost od poprečne osi kojom će se proizvesti dovoljan uzdužni moment kako bi brod postigao željeni trim.

Kao i kod proračuna novih gazova uslijed uzdužnog pomaka mase, ukrcaja ili iskrcaja, postupak trimovanja moguće je proračunati koristeći ukupnu promjenu trima ili koristeći uzdužni pomak sustavnog težišta broda.

4.3.1. Trimovanje pomakom mase

Ako se brod trimuje pomakom mase koristeći ukupnu promjenu trima, vrijednost mase p ili udaljenosti d , ovisno o potrebi, određuje se iz izraza za izračun ukupne promjene trima Δt_u :

$$\Delta t_u = \frac{p \times d}{M_j}$$

$$p = \frac{\Delta t_u \times M_j}{d}$$

$$d = \frac{\Delta t_u \times M_j}{p}$$

Vrijednost d je udaljenost težišta mase nakon pomaka i prije pomaka.

$$d = Xg_1 - Xg_0$$

Budući da se kod trimovanja određuju masa ili udaljenost na koju će se pomaknuti masa kako bi se postigao željeni trim, željena ukupna promjena trima se može označiti s Δt_{u_z} , a određuje se kao razlika željenog trima t_{u_z} i postojećeg trima t_u .

$$\Delta t_{u_z} = t_{u_z} - t_u$$

Postojeći trim broda je razlika gaza na pramcu T_p i gaza na krmi T_k , a ako se proračunava na taj način, tada pozitivan trim označava pretežan brod, a negativan trim zatežan brod.

Nakon što je određena ukupna promjena trima koju je potrebno ostvariti da bi brod postigao željeni trim, ako je poznata udaljenost d za koju će se pomaknuti masa, tada se proračunava masa p koja će na toj udaljenosti ostvariti željenu ukupnu promjenu trima broda $\Delta t_{u\check{z}}$.

$$p = \frac{\Delta t_{u\check{z}} \times M_j}{d}$$

Drugi je slučaj kada je poznat iznos mase p koju je potrebno pomaknuti, a potrebno je odrediti udaljenost d na kojoj će ta masa ostvariti ukupnu promjenu trima $\Delta t_{u\check{z}}$.

$$d = \frac{\Delta t_{u\check{z}} \times M_j}{p}$$

Ako se trimuje pomakom mase koristeći uzdužni pomak sustavnog težišta broda, cilj je postaviti sustavno težište broda u takav položaj da između okomica na kojima djeluju sile deplasmana i uzgona nastane poluga koja će proizvesti željeni trim. Tada se proračuni temelje na sljedećem izrazu:

$$t_u = \frac{D \times l}{M_j}$$

$$t_{u\check{z}} = \frac{l_{\check{z}} \times M_j}{D}$$

$$l_{\check{z}} = \frac{t_{u\check{z}} \times M_j}{D}$$

Vrijednost $t_{u\check{z}}$ predstavlja željeni trim broda, a $l_{\check{z}}$ polugu trima pri kojoj će nastupiti željeni trim s trenutnim deplasmanom D i jediničnim momentom trima M_j .

Poluga trima pri kojoj će nastupiti željeni trim proračunava se kao razlika željene udaljenosti sustavnog težišta broda od krmene okomice $XG_{\check{z}}$ i udaljenosti težišta uzgona od krmene okomice XB .

$$l_{\check{z}} = XG_{\check{z}} - XB$$

Željena udaljenost sustavnog težišta broda od krmene okomice XG_z određuje se na sljedeći način:

$$XG_z = XG + GG_z$$

pri čemu je XG udaljenost sustavnog težišta broda od krmene okomice prije pomaka mase, a GG_z pomak sustavnog težišta koji je potrebno prouzrokovati da bi sustavno težište došlo na željenu udaljenost od krmene okomice.

Budući da je prema poučku o pomaku težišta pomak sustavnog težišta GG_z sljedeći:

$$\frac{D}{p} = \frac{d}{GG_z}$$

$$GG_z = \frac{p \times d}{D}$$

izraz za željeni položaj sustavnog težišta može se pisati kao:

$$XG_z = XG + \frac{p \times d}{D}$$

Ako se umjesto vrijednosti XG_z uvrsti navedeni izraz pomoću kojeg se ona određuje, proizlazi sljedeće:

$$l_z = XG_z - XB$$

$$l_z = XG + \frac{p \times d}{D} - XB$$

$$\frac{p \times d}{D} = l_z - XG + XB$$

Odatle se može izraziti p i d :

$$p = \frac{D \times (l_z - XG + XB)}{d}$$

$$d = \frac{D \times (l_z - XG + XB)}{p}$$

Također, vrijednosti mase p i udaljenosti d mogu se odrediti na drukčiji način, iz izraza za željeni pomak sustavnog težišta:

$$GG_z = \frac{p \times d}{D}$$

Tada je potrebno odrediti vrijednost željenog pomaka sustavnog težišta GG_z razlikom željene udaljenosti sustavnog težišta broda od krmene okomice XG_z i udaljenosti sustavnog težišta broda od krmene okomice prije pomaka XG .

$$GG_z = XG_z - XB$$

Iz izraza:

$$l_z = XG_z - XB$$

može se izvesti izraz za željenu udaljenost sustavnog težišta broda:

$$XG_z = XB + l_z$$

a uvrštavanjem željene poluge trima proračunate iz izraza za trim:

$$t_{u_z} = \frac{l_z \times M_j}{D}$$

$$l_z = \frac{t_{u_z} \times M_j}{D}$$

izraz postaje sljedeći:

$$XG_z = XB + \frac{t_{u_z} \times M_j}{D}$$

Kad je nakon toga proračunat željeni pomak sustavnog težišta broda GG_z , iz izraza:

$$GG_z = \frac{p \times d}{D}$$

mogu se izraziti vrijednosti p i d :

$$p = \frac{D \times GG_z}{d}$$

$$d = \frac{D \times GG_z}{p}$$

4.3.2. Trimovanje ukrcajem ili iskrcajem mase

Načini trimovanja ukrcajem ili iskrcajem mase mogu biti različiti, pa se stoga razlikuju i pripadajući proračuni, npr.:

- treba odrediti koliku masu je potrebno ukrcati, odnosno iskrcati s položaja poznate udaljenosti od krmene okomice
- na koju udaljenost od krmene okomice treba ukrcati, odnosno iskrcati neku poznatu masu
- podjela jedne mase na dvije različite udaljenosti od krmene okomice
- ukrcaj ili iskrcaj balasta kako bi brod postigao povoljan trim za prelazak plićine i sl.

Također, trimovanje ukrcajem ili iskrcajem mase moguće je proračunati koristeći ukupnu promjenu trima ili uzdužni pomak sustavnog težišta broda.

Ako se proračunava trimovanje koristeći ukupnu promjenu trima, tada se koriste sljedeći izrazi:

$$\begin{aligned}\Delta t_{u_{\bar{z}}} &= t_{u_{\bar{z}}} - t_u \\ p &= \frac{\Delta t_{u_{\bar{z}}} \times M_j}{d} \\ d &= \frac{\Delta t_{u_{\bar{z}}} \times M_j}{p}\end{aligned}$$

Udaljenost d u ovom slučaju predstavlja udaljenost težišta ukrcane, odnosno iskrcajne mase od težišta plovne vodene linije F .

$$d = Xg - l_k$$

u kojima $\Delta t_{u_{\bar{z}}}$ označava ukupnu željenu promjenu trima, $t_{u_{\bar{z}}}$ željeni trim, t_u trenutni trim, p masu koja se ukrcava, odnosno iskrcaja, d udaljenost na koju se ukrcava, odnosno s koje se iskrcaja masa, M_j jedinični moment trima, Xg udaljenost težišta ukrcane, odnosno iskrcajne mase od krmene okomice, a l_k udaljenost težišta plovne vodene linije od krmene okomice.

Ako je potrebno odrediti masu koju će se ukrcati ili iskrcati na poznatu udaljenost, a žele se odrediti gazovi koji su nastali ukrcaja ili iskrcaja, tada je nakon određivanja te

mase potrebno izračunati promjenu u srednjem gazu koja je nastala ukrcajem, odnosno iskrcajem, tj. paralelno uronuće ili izronuće.

Ako se trimuje koristeći uzdužni pomak sustavnog težišta broda, tada se to izvodi sljedećim izrazima:

$$XG_z = XB_1 + \frac{t_{u_z} \times M_{j_1}}{D \pm p}$$

Udaljenost težišta uzgona od krmene okomice XB_1 i jedinični moment trima M_{j_1} predstavljaju nove hidrostatske podatke koji odgovaraju deplasmanu nakon ukrcaja ili iskrcaja ($D \pm p$):

$$GG_z = XG_z - XG$$

$$GG_z = \frac{p \times d}{D \pm p}$$

$$d = Xg - XG$$

iz kojih proizlaze izrazi za p i d :

$$d = \frac{(D \pm p) \times GG_z}{p}$$

$$p = \frac{(D \pm p) \times GG_z}{d}$$

Udaljenost d može se lako proračunati iz pripadajućeg izraza, no u izrazu za određivanje mase p nastaje problem jer se nepoznanica p nalazi s obje strane znaka jednakosti. Masa p se tada proračunava metodom iteracije, dok se ne dobije dovoljno malena razlika koja se može zanemariti.

Može se još naglasiti da je, sa stanovišta proračuna, metoda proračuna koja koristi uzdužni pomak sustavnog težišta broda točnija od metode koja koristi ukupnu promjenu trima.

Nakon što je određena masa p ili udaljenost d , moguće je provjeriti proračune određivanjem trima i novih gazova koristeći postupke koji su objašnjeni u poglavlju 4.2. *Utjecaj ukrcaja i iskrcaja mase na uzdužnu stabilnost broda.*

4.4. RAČUN UZDUŽNE CENTRACIJE

Slično računu poprečne centracije, računom uzdužne centracije također se određuje položaj sustavnog težišta broda, samo u uzdužnom smislu. Položaj sustavnog težišta broda u uzdužnom smislu određen je njegovom udaljenošću od krmene okomice ili od glavnog rebra. Te se koordinate proračunavaju kao kvocijent sume uzdužnih momenata $\sum M_u$ i deplasmana broda D , no ako se koristi udaljenost sustavnog težišta broda od krmene okomice, tada su svi uzdužni momenti pozitivni, jer djeluju na kraku od krmene okomice do težišta mase. Kada se koristi udaljenost sustavnog težišta broda od glavnog rebra, tada je uzdužnim momentima potrebno pridružiti predznak (uobičajeno je + za uzdužne momente koji djeluju po pramcu od glavnog rebra, a – za momente koji djeluju po krmu od glavnog rebra). Ovdje će se prikazati račun uzdužne centracije koristeći udaljenosti sustavnog težišta i težišta ostalih masa na brodu od krmene okomice.

Tablica 8 daje primjer računa uzdužne centracije za isti fiktivni brod prikazan poprečnom centracijom (Tablica 5), duljine $L_{PP} = 172$ m.

Tablica 8. Primjer računa uzdužne centracije

	prostor	masa p (t)	udaljenost težišta od krmene okomice XG, Xg (m)		uzdužni moment M_u (tm)		
LS	Prazan brod	6183	73,15		452286,45		
MT	Mrtve težine	85	72,79		6187,15		
p_1	Tank dvodna 3	270	92,26		24910,20		
p_2	Tank dvodna 4	360	63,62		22903,20		
p_3	Skladište 1	1469	138,85		203970,65		
p_4	Skladište 2	1720	116,09		199674,80		
p_5	Skladište 3	1762	83,90		147831,80		
p_6	Skladište 4	1912	62,54		119576,48		
p_7	Skladište 5	1563	22,23		34745,49		
p_8	Međupalublje 1	823	139,66		114940,18		
p_9	Međupalublje 2	902	116,32		104920,64		
p_{10}	Međupalublje 3	850	89,48		76058,00		
p_{11}	Međupalublje 4	986	62,98		62098,28		
p_{12}	Međupalublje 5	960	19,76		18969,60		
		deplasman		udaljenost sustavnog težišta od krmene okomice		suma uzdužnih momenata	
TOTAL		D	19845	XG	80,07	ΣM_u	1589072,92
ukrcaj	p_{13}	Skladište 2	320	116,09	37148,80		
ukrcaj	p_{14}	Skladište 3	417	83,90	34986,30		
ukrcaj	p_{15}	Međupalublje 2	212	116,32	24659,84		
ukrcaj	p_{16}	Međupalublje 5	140	19,76	2766,40		
iskrcaj	p_{17}	Skladište 2	-231	116,09	-26816,79		
iskrcaj	p_{18}	Međupalublje 4	-184	62,98	-11588,32		
iskrcaj	p_{19}	Pramčani pretežni tank	-198	156,00	-30888,00		
		deplasman		udaljenost sustavnog težišta od krmene okomice		suma uzdužnih momenata	
TOTAL		D_1	20321	XG_1	79,69	ΣM_{u_1}	1619341,15

Ako se računu uzdužne centracije pristupa bez sastavljanja tablice, izraz za određivanje udaljenosti sustavnog težišta broda od krmene okomice je sljedeći:

$$XG_1 = \frac{D \times XG \pm p_1 \times Xg_1 \pm p_2 \times Xg_2 \pm \dots \pm p_n \times Xg_n}{D \pm p_1 \pm p_2 \pm \dots \pm p_n}$$

$$XG_1 = \frac{D \times XG \pm \sum_{i=1}^n (p_i \times Xg_i)}{D \pm \sum_{i=1}^n p_i}$$

$$XG_1 = \frac{\sum M_{u1}}{D_1}$$

pri čemu je D deplasman broda prije ukrcaja/iskrcaja masa, XG sustavno težište broda prije ukrcaja/iskrcaja masa, p_i mase koje se ukrcavaju/iskrcavaju i Xg_i udaljenosti od krmene okomice (ili glavnog rebra ako se koristi taj način) na koje se ukrcavaju/iskrcavaju mase p_i .

Kako je već prikazano u potpoglavlju 3.7. **Račun poprečne centracije**, položaj sustavnog težišta broda moguće je odrediti zbrajanjem, odnosno oduzimanjem pomaka sustavnog težišta broda GG_1 na njegovu prijašnju koordinatu ili od nje, što je u ovom slučaju udaljenost od krmene okomice XG . U ovom načinu uzimaju se u obzir samo oni uzdužni momenti (umnošci masa p_i i udaljenosti njihovih težišta od sustavnog težišta broda d_i) koji stvaraju pomak sustavnog težišta broda G , a njihov zbroj označen je s $\sum \Delta M_{u1}$.

$$d_i = Xg_i - XG$$

Izraz za određivanje pomaka sustavnog težišta broda prilikom ukrcaja i iskrcaja više masa je sljedeći:

$$GG_1 = \frac{p_1 \times d_1 \pm p_2 \times d_2 \pm \dots \pm p_n \times d_n}{D \pm p_1 \pm p_2 \pm \dots \pm p_n}$$

$$GG_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (p_i \times d_i)}{D \pm \sum_{i=1}^n p_i}$$

$$GG_1 = \frac{\sum \Delta M_{u1}}{D_1}$$

$$XG_1 = XG \pm GG_1$$

5. ZAKLJUČAK

Prilikom izbora teme diplomskog rada postojala je određena težnja prema kolegijima koji se izravno tiču broda, budući da je nastavni program ustrojen tako da preddiplomski studij obuhvaća cijelo strukovno područje nautike, uz dodatne predmete kojima se širi naobrazba pohađatelja, a diplomski studij nudi nadogradnju usmjerenu prema kopnu koja pruža mogućnosti osposobljavanja za radna mjesta za ljude kojima nije primarni cilj plovidba.

Kako je kolegij „Stabilnost broda“ preko predavača zadovoljio sve kriterije koji su postavljeni prilikom izbora teme diplomskog rada, počevši od obujma informacija, preko nastavnih aktivnosti, pa do usvojenog znanja kao krajnjeg rezultata, odluka je bila vrlo jednostavna. Među ponuđenim okvirnim temama našao se i naslov „Metodika nastave stabilnosti na pomorskim učilištima“, stoga je u razgovoru s mentorom, prilikom definiranja naslova diplomskog rada, izabrana tema „Analiza proračuna poprečne i uzdužne stabilnosti broda“. Cilj je bio dati detaljnu analizu proračuna koji se koriste u stabilnosti broda, a pri kojima često dolazi do raznih nesporazuma i zabuna, jer postoji velik broj pojmova koji se u različitoj literaturi različito označavaju. U radu se pokušalo objasniti svaki od tih pojmova na jednoznačan način, a u skladu s tim pridružiti im oznake.

Često dolazi do zabune i nerazlikovanja trima i ukupne promjene trima, stoga su u ovom radu ponuđene nove oznake: Δt_u za ukupnu promjenu trima, Δt_k za promjenu trima na krmi i Δt_p za promjenu trima na pramcu. Oznake za trim i razlike gazova na krmi i na pramcu u odnosu na srednji gaz su t_u , t_k i t_p . Također, početne udaljenosti težišta masa označene su s Kg_0 za visinu težišta iznad kobilice i Xg_0 za udaljenost težišta od krmene okomice, a svakim sljedećim pomakom raste vrijednost indeksa, npr. Kg_1 i Xg_1 za prvi pomak.

Iz razloga što je stabilnost broda prilično stara disciplina i nije podložna velikim promjenama, gotovo sve skice su izrađene od strane autora, kako bi se radu povećala razina izvornosti. U popisu literature se također može zamijetiti malen broj bibliografskih jedinica, a razlog tome je korištenje vrlo opsežne bilježnice ispunjene za vrijeme pohađanja nastave iz kolegija „Stabilnost broda“ i velikog broja obrađenih primjera.

Rad pruža i neke načine rješavanja zadataka iz stabilnosti broda koji se ne tumače prilikom održavanja nastave, a to su: kontinuirani proračun pomaka sustavnog težišta broda uslijed ukrcaja ili iskrcaja mase samaricom za teške terete, zatim proračun pomaka sustavnog težišta pri ukrcaju i iskrcaju većeg broja masa, a koji je potrebno zbrojiti ili oduzeti od visine sustavnog težišta broda iznad kobilice prije ukrcajno-iskrcajnih operacija, te trimovanje pomakom mase koristeći pomaka sustavnog težišta broda.

Zbog opsega rada izuzeti su proračuni vezani za krivulju statičke stabilnosti, proračuni stabilnosti u oštećenom stanju i proračuni dinamičke stabilnosti.

Iako je zbog prisutnosti suvremenih pomagala za proračun stabilnosti broda kontroliranje stabilnosti uvelike olakšano, potrebno ih je koristiti u skladu s temeljnim načelima stabilnosti i poznavati fenomene do kojih može doći. S obzirom da je brod pomorcima mjesto života i rada, području stabilnosti zbog sigurnosti treba posvećivati veliku pažnju i vrijeme.

Za svaki od proračuna obrađenih u ovom radu nastojalo se pružiti i primjerena objašnjenja, bez preskakanja koraka naizgled jednostavnih matematičkih operacija, čije izostavljanje zna priuštiti pregršt problema pohađateljima pri razumijevanju materije i praćenju nastave. Kako se često podrazumijeva da je pohađatelj upućen u matematičke operacije koje se koriste prilikom proračunavanja ne samo u području stabilnosti, već i u drugoj problematici, često dolazi do preskakanja nekih manje bitnih, a nekad i bitnijih činjenica koje mogu olakšati praćenje i razumijevanje pohađateljima naobrazbe.

POPIS LITERATURE

Knjige:

1. Buljan, I., *Stabilnost broda*, Školska knjiga, Zagreb, 1982.
2. *Knjiga trima i stabilnosti – M/B Bellatrix*
3. *Knjiga trima i stabilnosti – M/B Lošinj*, Brodogradilište 3. Maj, Rijeka, 1972.
4. Marnika, F., *Stabilnost broda*, Znanje, Zagreb, 1999.
5. Mohović, R., *Komparativna analiza poprečne stabilnosti kod brodova različitih tehnologija*, magistarski rad, Pomorski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 1995.
6. Mohović, R., *Poprečna stabilnost broda – teorijske osnove*, nastavni tekst na internetskim stranicama, Pomorski fakultet Rijeka, Rijeka, 2014.
7. Uršić, J., *Stabilitet broda – I dio (osnovni pojmovi)*, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1962.
8. *Vademecum maritimus – podsjetnik pomorcima*, Pomorski fakultet Rijeka, Rijeka, 2002.

Internet izvori:

1. <http://en.wikipedia.org/wiki/Tonne> (30.07.2014., 11:13)

POPIS SHEMA

Shema 1. Podjela stabilnosti broda.....	6
Shema 2. Karakteristične krivulje brodske forme	8
Shema 3. Prikaz težine, uzgona, prvog i drugog uvjeta plovnosti.....	11
Shema 4. Mehanizam uspravljanja broda.....	12
Shema 5. Određivanje momenta statičke stabilnosti	13
Shema 6. Određivanje početnog momenta poprečne statičke stabilnosti.....	13
Shema 7. Prikaz ponašanja tijela prema vrsti ravnoteže	14
Shema 8. Poprečni presjek broda s pozitivnom metacentarskom visinom.....	15
Shema 9. Poprečni presjek broda s metacentarskom visinom jednakom nuli.....	16
Shema 10. Poprečni presjek broda s negativnom metacentarskom visinom.....	17
Shema 11. Pokus nagiba.....	20
Shema 12. Određivanje poluge <i>GH</i>	22
Shema 13. Vertikalni pomak mase (prema dolje i prema gore)	28
Shema 14. Horizontalni (bočni) pomak mase i određivanje kuta nagiba	30
Shema 15. Kombinirani pomak mase (pomak sustavnog težišta broda prema gore).....	33
Shema 16. Kombinirani pomak mase (pomak sustavnog težišta broda prema dolje).....	34
Shema 17. Ukrcaj mase u simetralu ispod i iznad sustavnog težišta broda.....	35
Shema 18. Iskrcaj mase iz simetrale ispod i iznad sustavnog težišta broda	37
Shema 19. Ukrcaj mase izvan simetrale iznad sustavnog težišta broda (pomak sustavnog težišta broda prema gore)	39
Shema 20. Ukrcaj mase izvan simetrale ispod sustavnog težišta broda (pomak sustavnog težišta broda prema dolje).....	41
Shema 21. Iskrcaj mase izvan simetrale iznad sustavnog težišta broda (pomak sustavnog težišta broda prema dolje).....	42

Shema 22. Iskrcaj mase izvan simetrale ispod sustavnog težišta broda (pomak sustavnog težišta broda prema gore)	44
Shema 23. Utjecaj slobodnih površina prilikom iskrcaja polovice središnjeg tanka (potrošnja goriva)	48
Shema 24. Određivanje visine težišta iskrcane tekućine pomoću poznate visine iskrcane tekućine (za tankove pravokutnog oblika)	51
Shema 25. Ukrcaj mase u simetralu broda samaricom za teške terete	53
Shema 26. Ukrcaj mase izvan simetrale samaricom za teške terete (prvi dio)	57
Shema 27. Ukrcaj mase izvan simetrale samaricom za teške terete (drugi dio)	58
Shema 28. Iskrcaj mase iz simetrale broda samaricom za teške terete	60
Shema 29. Iskrcaj mase izvan simetrale samaricom za teške terete.....	62
Shema 30. Uzdužni presjek broda s detaljima bitnim za proračune uzdužne stabilnosti	68
Shema 31. Trokuti koji prikazuju odnos krakova momenta koji nagiba brod i momenta kojim se brod odupire nagibanju	70
Shema 32. Odnos kutova i stranica trokuta za proračun uzdužnog kuta nagiba Ψ	71
Shema 33. Podatci koji se koriste pri proračunu novih gazova koristeći pomak sustavnog težišta broda prikazani na uzdužnom presjeku broda.....	76
Shema 34. Prikaz nastanka poluge trima i ispunjenja drugog uvjeta plovnosti u uzdužnoj stabilnosti	78

POPIS GRAFIKONA

Grafikon 1. Primjer dijagrama pantokarena izoklina (1).....	24
Grafikon 2. Primjer dijagrama pantokarena izoklina (2).....	25
Grafikon 3. Prikaz GH krivulje i krivulje M_{ST}	26
Grafikon 4. Prikaz ovisnosti položaja težišta plovne vodene linije o srednjem gasu broda.....	74

POPIS TABLICA

Tablica 1. Primjer određivanje poluge GH i momenta statičke stabilnosti M_{ST}	26
Tablica 2. Utjecaj smjera pomaka mase na visinu sustavnog težišta broda iznad kobilice i metacentarsku visinu	28
Tablica 3. Utjecaj položaja ukrcane i iskrcane mase na visinu sustavnog težišta broda.....	38
Tablica 4. Utjecaj slobodnih površina na visinu sustavnog težišta broda iznad kobilice i metacentarsku visinu ovisno o količini tekućine u tanku.....	50
Tablica 5. Primjer tablice računa poprečne centracije.....	65
Tablica 6. Predznaci promjena trima na krmi i na pramcu i ukupne promjene trima ovisno o položaju ukrcane/iskrcane mase na brodu	85
Tablica 7. Određivanje predznaka razlika gazova u odnosu na srednji gaz i trima iz međusobnog položaja točaka G i B	88
Tablica 8. Primjer računa uzdužne centracije.....	96