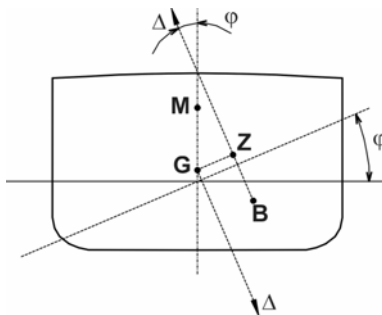


### 2.3.2.2.1.2 Keresztirányú stabilitás nagy dőlésszögeknél

A keresztirányú stabilitás számszerűsítésénél, amint korábban láttuk, korlátozott a metacentrikus magasságra való támaszkodás lehetősége. Csak olyankor használható a metacentrum fogalma, ha a dőlésszög kicsi, maximálisan 10 fok értékű. Amikor azonban a hajó megdőlését okozó erők, pl. szél, hullám, rakománykezelés, kis sugáron való fordulás, nagyobb megdőlést okoz, a metacentrumra alapozott vizsgálatok már nem elegendőek a hajó irányításáért felelős tiszt számára. A hajók esetében gyakran fordul elő jelentős *dőlésszög*, ha a *kitérítő nyomaték* jelentős mértékű. Tehát elengedhetetlen, hogy azt is megvizsgáljuk, hogyan viselkedik a hajó nagyobb dőlésszögek esetében.

#### 2.3.2.2.1.2.1 Visszatérítő nyomaték és visszatérítő kar

Bármilyen szögben is dől meg a hajó, stabilitásának, vagyis annak a képességének, hogy visszatérjen a vízszintes úszási helyzetbe, igazi mérőszáma a *visszatérítő nyomaték*, vagyis a hajó súlyának ( $\Delta$ ) és a *visszatérítő karnak* ( $GZ$ ) a szorzata, amint ez a 2.3.2.2.1.2.1.1 ábrán látható. Ezt az ábrát, amely a nagy dőlésszögeknél kialakuló állapotot mutatja, összevethetjük a 2.3.2.2.1.1.4 ábra jelöléseivel.



2.3.2.2.1.2.1.1 ábra  $GZ$  nagy dőlésszögnél

A különbség az, hogy nagy dőlésszögeknél a felhajtóerő hatásvonala nem megy át a metacentrumon ( $M$ ). Ennek az az oka, hogy amint a dőlés nagyobbra nő néhány foknál, a „*B-pálya*” eltér a  $BM$  sugarú körívtől. Az eltérés eredménye, hogy a visszatérítő kart már nem lehet egyszerűen összefüggésbe hozni a metacentrikus magassággal, tehát a  $GZ$  már nem fejezhető ki a  $GM \sin \varphi$

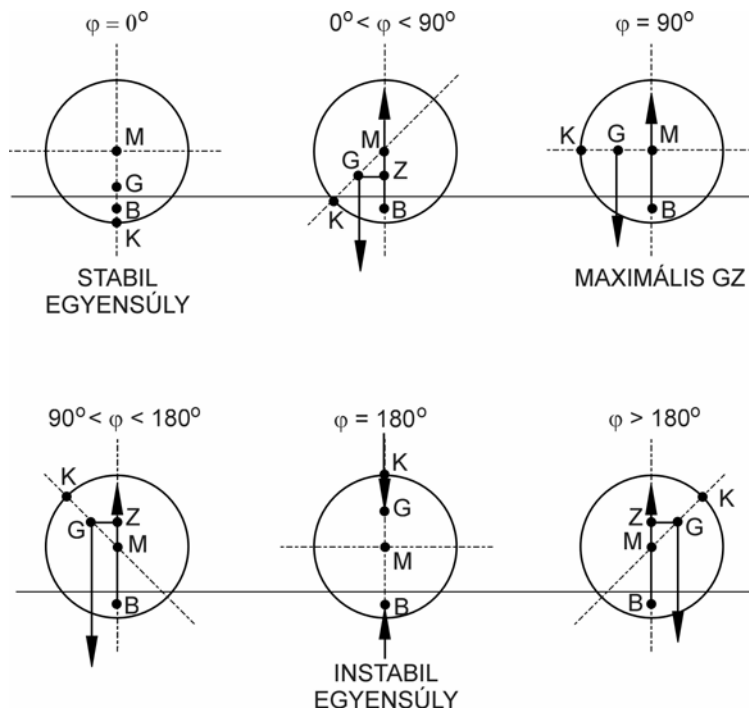
formulával, ahogy a nagy kis *dőlésszögek* esetében. Az igazság az, hogy nem ismerünk olyan egzakt képletet, amely nagy dőlésszögeknél a  $GM$  és a  $GZ$  közötti kapcsolatot kifejezné, kivéve néhány speciális hajótest alakot, amikor a vízkiszorítás súlypontja bármilyen dőlésszög esetén köríven mozdul el. Ez azonban csak a forgástesteknél van így. Ebbe a kategóriába azonban csak pontonok és tengeralattjárók tartoznak, a szokásos hajótestek nem ilyenek.

#### ***Forgástestek stabilitása***

A forgástest a felszíni hajóknál nem fordul elő, mégis érdemes megvizsgálni az ilyen testformájú hajók viselkedését nagy dőlésszögeknél. Képzeljünk el egy hajót, amelynek valamennyi bordametszete kör-alakú (lényegtelen, hogy valamennyi metszet azonos sugarú, vagy esetleg szivar-alakú a test), úgy van megrakva, hogy trim nélkül úszik (forgás-szimmetria tengelye vízszintes), és rendszersúlypontja a tengely alatt helyezkedik el. A 2.3.2.2.1.2.1.2 ábra a testet több különböző úszáshelyzetben mutatja, A vízszintes helyzet ( $\varphi = 0$ ) a stabil egyensúlyi állapot, amikor a  $G$  függőlegesen a forgástengely alatt van. Szemmel látható, hogy minden vizsgált helyzetben, azaz

## BBBZ-kódex

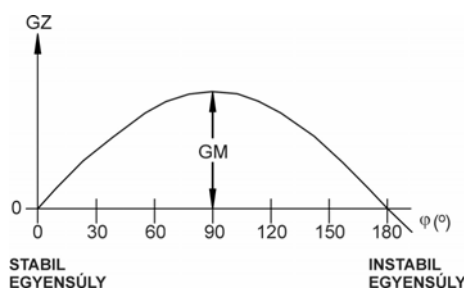
minden dőlésszögnél, a vízkiszorítás-felhajtóerő hatásvonala a forgástengelyen megy át, amely így a keresztirányú metacentrum ( $M$ ). A visszatérítő karok hossza ( $GZ$ ) minden dőlésszögnél a  $GM\sin\varphi$  értékkel egyenlő. Az ábráról jól látható, hogy a visszatérítő kar nagysága 90 foknál a legnagyobb, akkor  $GM$  értékű, majd megint nullára csökken, a test fordított helyzetében, illetve 180 fokos dőlésnél. Ez a helyzet tehát szintén *egyensúlyi állapot*, de *instabil*, mert a legkisebb zavar kitéríti ebből a helyzetből, és addig fordul vissza, amíg el nem éri az egyenes úszáshelyzetet.



2.3.2.2.1.2.1.2 ábra  
Fogástest stabilitása

Az ilyen úszótest stabilitása nagy dőlésszögeknél úgy ábrázolható, hogy koordinátarendszerbe visszük fel a visszatérítő kar ( $GZ$ ) értékeit a dőlésszög ( $\varphi$ ) függvényében, amint azt a 2.3.2.2.1.2.1.3 ábra mutatja. Ezt a görbét a *sztatikus stabilitás görbéje* néven ismerjük. Ebben a különleges esetben a sztatikus stabilitás görbéje egy szinuszhullám  $GM$  amplitúdóval. A görbe a

forgástest más merüléseinél illetve vízkiszorításainál ugyanilyen lesz, mert a  $KM$  értéke a test sugarával egyezik meg a vízbemerült térfogattól függetlenül. A merülés és vízkiszorítás növekedésével azonban a visszatérítő nyomaték nő, bár a kar nem.



2.3.2.2.1.2.1.3 ábra Forgástest sztatikus stabilitási görbéje

Ez a sztatikus stabilitási görbe jól mutatja, hogy a forgástestnek egy teljes fordulat alatt két egyensúlyi állapota létezik (nulla és 180 fok), de ebből csak az egyik stabil (a nulla fok). Tehát egy ilyen test bármilyen dőlésből visszatér az

egyensúlyi úszáshelyzetbe, ha a kitérést külső hatás okozta.

A *körszimmetrikus hajótest* egyedi tulajdonsága, ami miatt sztatikus stabilitási görbéje szinuszhullám alakú, hogy a vízbemerült térfogat alakja minden dőlésszögnél azonos. Másképpen fogalmazva a vízkiszorítás eredeti helyének a hajó bejelölt pontja  $BM$  sugarú kört ír le egy körülfordulás alatt.

A visszatérítő karok nagyságát legjobban a  $G$  súlypont helyzete befolyásolja. Ha az lejjebb kerül, minden dőlésszögnél nagyobbak lesznek a visszatérítő karok, fordított esetben a súlypont feljebb kerülése csökkenti a karok nagyságát. Ez azonban már nemcsak a forgástest alakú hajókra érvényes, hanem minden hajótest esetében.

### 2.3.2.2.1.2.2 A visszatérítő karok meghatározása bármilyen hajótestnél

A felszíni hajóknál szokásos hajótestek esetében a hajótervezőknek egy adott vízvonalhoz, tehát vízkiszorításhoz számos dőlésszögnél kell meghatározni a visszatérítő karok nagyságát numerikus integráció segítségével. A 2.3.2.2.1.2.1.1 ábra rámutat, hogy egy adott hajónál bármilyen változás akár  $G$ , akár  $B$  helyzetében módosítani fogja a visszatérítő kar nagyságát. A  $B$  helyzete a vízkiszorítástól (felhajtóerőtől) és a dőlésszögtől függ. A  $G$  helyzetét a hajó *rakodási állapota* határozza meg, és három koordinátájával helyettesíthető. A fenti állításokat a következő komplett fizikai egyenlet fejezi ki:

$$GZ = f(\varphi, \Delta, KG, LCG, TCG)$$

Az egyenlet nem használható közvetlen gyakorlati számításokra, mivel a lehetőségek nagy száma miatt azok igen időigényesek lennének. Ha csak öt különböző értékét vennénk mindegyik változónak (ami nyilvánvalóan nem elégséges), összesen 3.125 visszatérítő kar értékét kellene kiszámítanunk.

A feladat nagyságát azonban jelentősen csökkenteni lehet a következő két szempont figyelembe vételével.

- A hajó rendszersúlypontjának hosszirányú helyzete ( $LCG$ ) ill. ezzel a trim csak elhanyagolható mértékben befolyásolja a visszatérítő kar nagyságát. Elegendő, ha egyenes úszásnál (trim nélkül) határozzuk meg.
- A  $KG$  és  $TCG$  változásának hatásait egyszerű korrekcióval ki lehet küszöbölni azt követően, hogy a  $GZ$  értékeket meghatároztuk egy tetszőlegesen kiválasztott  $KG$  értékhez. Tehát a  $G$  tetszőlegesen választott helyzete, amelyet „póluspont” néven is emlegetnek a  $GZ$  számításánál, bármilyen megfelelő ponton lehet a gerinc felett; a  $TCG$  helyzetét pedig nullára vesszük.

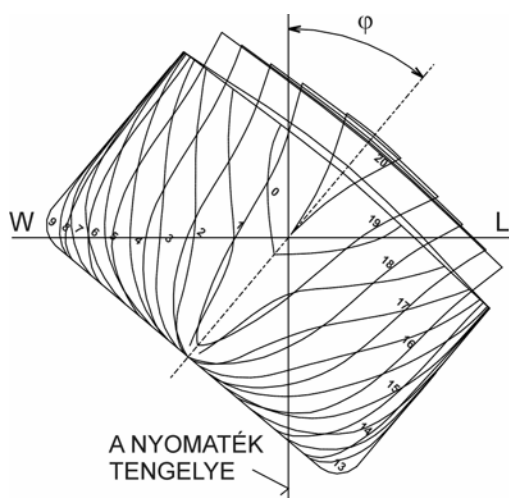
A fentiek figyelembe vételével a hajó  $GZ$  értékeinek fizikai egyenlete a következőre redukálódik:

$$GZ = f(\varphi, \Delta)$$

A számításokat öt vagy hét vízvonalhoz és mindegyiknél a dőlésszög 10 vagy 15 fokos növelésével végezzük el. Így az eljárást minimálisan 30-szor maximálisan 60-szor kell megismételni.

Ennyi számítást elvégezni még mindig nagyon fárasztó és monoton művelet, azonban a manuális munka legfeljebb a vonaltervről a méretek leolvasását jelenti, mert a

numerikus integrálást már számítógépes programokkal el lehet végezni. A hajótest hidrosztatikai jellemzőinek számítására készített szoftver csomagok rendszerint a visszatérítő karok számítására is alkalmasak. Azonban ezek input adatait ki kell egészíteni olyan elemekkel, amelyek a jellemzők között nem szerepelnek, pl. a víz feljutása a fedélzetre adott dőlésszögnél, vagy a vízbemerülő fedélzeti házak méretei. A programok azt is figyelembe veszik, ha a hajó a megdőlés következtében trimelődik, és korrekciót alkalmaznak. Annak figyelembe vételével, hogy bármilyen fejlett programot alkalmazunk, azzal tisztában kell lenni, mi is az, amit a gép számol és eredményül közöl, a következőkben ismertetjük az eljárás menetét, amikor manuálisan kell elvégezni. Alapvetően két módszer létezik, egyik a teljes test módszer és az ék módszer.



2.3.2.2.1.2.2.1 ábra Bordametszet-rajz a teljes test módszerhez

#### **A teljes test módszer**

A teljes test módszernél, a ferde vízvonalat, mint a 2.3.2.2.1.2.2.1 ábrán *WL*-lel jelölt vízvonal, a bordametszetek mindkét oldalát ábrázoló bordametszet-rajzon keresztül húzzuk meg. A súlypontként önkényesen kiválasztott  $G_0$  ponton át a *WL*-re merőleges függőleges tengelyt húzzunk. Mindegyik bordametszethez két mennyiséget határozunk meg, ezek egyike a bordametszet vízbemerült területe ( $A_S$ ), a másik a terület nyomatóka a függőleges

tengelyre ( $M_S$ ). A területeket és azok nyomatókait ezután a hajó hossza mentén numerikusan integráljuk a vízbemerült térfogat ( $\nabla$ ) és a térfogat függőleges tengely körüli nyomatókának kiszámítása érdekében. A kapott vízkiszorítás eltér a kiindulási értéktől, ezért azt korrigálni kell, hogy a következő lépésnél meghúzott vízvonal helyét kijelölhessük. A számítást minden vízvonalra és dőlésszögre meg kell ismételni.

#### **Az ék módszer**

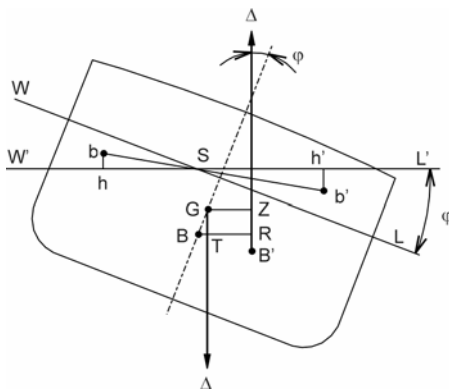
Az ék módszer a hajó megdőlése miatt kiemelkedő és bemerülő éktérfogattal és azok nyomatókával dolgozik. Az elemzés kicsit komplikáltabb, mint a másik módszer, de kevesebb mérést kell végezni a bordarajzon, mivel csak a vízvonalszélességeket és az éktérfogatok geometriáját kell meghatározni. A manuális számításoknál ez volt a legelterjedtebb módszer. A térfogatelemek kiszámításához számos eljárást dolgoztak ki. Amikor a hajó nagy szögben megdől, a vízkiszorítás felhajtóerejének hatásvonalja nem megy keresztül a metacentrumon, az egyenes és a ferde úszáshelyzethez tartozó vízvonalak pedig nem a hossz-szimmetria síkban metszik egymást. Ezt mutatja a 2.3.2.2.1.2.2.2 ábra. Az ábrán a következő jelöléseket használjuk:

$\varphi$  = külső erőhatás által létrehozott megdőlés szöge

*WL* = egyenes úszási állapot vízvonala

$W'L'$  = vízvonal  $\varphi$  dőlésszögnél

- $B, B'$  = a vízkiszorítás súlypontja egyenes és ferde úszásnál
- $b, b'$  = kiemelkedő és bemerülő térfogatok súlypontja
- $h, h'$  =  $b$  és  $b'$  vetülete a ferde úszás  $W'L'$  vízvonalán
- $G$  = a hajó rendszersúlypontja
- $GZ$  = visszatérítő kar  $\varphi$  dőlésszögnél
- $\Delta$  = a hajó súlya (vízkiszorítása)
- a  $BB'$  elmozdulás párhuzamos a  $bb'$  elmozdulással
- a  $GZ, BR$  és  $hh'$  szakaszok párhuzamosak a  $W'L'$  ferde vízvonallal és merőlegesek a felhajtóerő  $B'Z$ -n áthaladó hatásvonalára.



2.3.2.2.1.2.2.2 ábra Visszatérítő kar számítása ék módszerrel

Mivel a hajó megdőlését külső erőhatás okozza, vízkiszorítása változatlan. Tehát a kiemelkedő éktérfogat megegyezik a bemerülővel.

Legyen  $v$  = az ék térfogata  
 $\nabla$  = a hajó vízkiszorításának térfogata

A hajó vízkiszorításának súlypontja a  $B$  pontból a  $B'$  pontba mozdul el az ékek ( $b$  és  $b'$ ) között lezajló térfogat-áthelyezés hatására. Ezt kifejezhetjük a térfogatok nyomatékaként

$$v \times bb' = \nabla \times BB'$$

Az egyenlet felírható a súlypontelmozdulásoknak a ferde  $W'L'$  vízvonalon levő vetületeire is

$$v \times hh' = \nabla \times BR$$

Tehát

$$BR = v \times hh' / \nabla$$

A hajó súlya függőlegesen lefelé hat a  $G$  súlypontban. Így

$$GZ = BR - BT$$

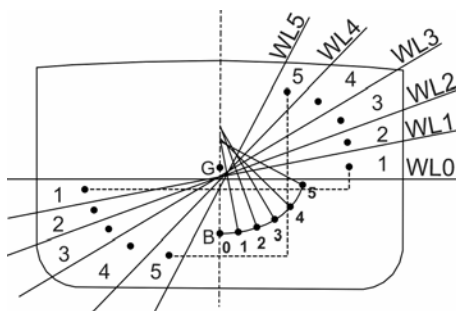
ahol a  $GBT$  háromszögben, amelynek csúcshöge  $\varphi$  a  $G$  pontban,

$$BT = GB \sin \varphi$$

Az előző három egyenlet kombinálásával:

$$GZ = (v \cdot hh' / \nabla) - GB \sin \varphi$$

Ez az egyenlőség a *stabilitás alapvető egyenlete*, amely bármilyen dőlésszög esetén alkalmazható, akár kicsi, akár nagy. Ránézésre egyszerűnek tűnik, azonban megoldása a gyakorlatban elég sok számítást igényel. Nyilvánvaló azonban, hogy ha a hajó egyenes úszásához már rendelkezésre állnak a *jellemző görbék*, és kiválasztottuk a feltételezett  $KG$  értéket, bármelyik  $WL$  egyenes *úszásvonalnál* (merülésnél) ismerjük a vízkiszorítást és azzal a  $\nabla$ ,  $KB$ ,  $KG$  és  $GB$  értékét. Akkor már akármilyen dőlésszöget választhatunk. Tehát a  $GZ$  meghatározása egy adott esetben redukálódik a  $v$  éktérfogatra és a  $hh'$  vízszintes „vetületre”. Itt jelentkezik a nehézség ennek a formulának a használatánál. Iterációs megközelítéssel kell ugyanis meghatározni a ferde vízvonal helyét úgy, hogy a két éktérfogat megegyezzen. Az ékek térfogatát numerikus integrálással számítjuk ki a bordametszetekről leolvasott területek alapján a hajó hossza mentén. Amikor a vízvonal helyét sikerült helyesen kiválasztani, az ékek nyomtatékát kell szintén integrálással kiszámítani az  $S$  pontra (az egyenes és a ferde úszáshelyzethez tartozó  $WL$  és  $WL'$  vízvonalak metszéspontja), hogy a  $b$  és  $b'$  súlypontokat illetve a  $h$  és  $h'$  pontokat megkapjuk. A számítások során több nehézség is felmerülhet, különösen olyan esetekben, amikor a víz eléri a fedélzet szélét.



2.3.2.2.1.2.2.3 ábra A vízkiszorítás súlypontjának pályája a hajó egyre nagyobb megdőlése során

Amikor az adott (vagy önkényesen kiválasztott) rendszersúlypont helyzetéhez és merüléshez (vízkiszorításhoz) a statikus stabilitás görbéjét kell megszerkesztetni, és ehhez a vízkiszorítás súlypontjának a hajó megdőlése miatti vándorlását határozzuk meg, a koordinátarendszert, amelyben

dolgozunk, két módon választhatjuk meg. A fenti elemzés során a koordinátarendszer a környezethez volt rögzítve, tehát a megdőlt úszáshelyzet vízvonala vízszintes volt, a hajó fordult el, ahogy ez a valóságban történik. Ez egy dőlésszögre vonatkozik. Amikor a következő dőlésfokozathoz a vizsgálatnál használt  $\delta\varphi$  szöggel megnöveljük a dőlésszöget (pl. ha  $\delta\varphi = 15$  fok, 30 fokról 45 fokra), akkor a koordinátarendszerhez képest a hajó  $\delta\varphi$  szöggel ferdebben fog állni. a 2.3.2.2.1.2.2.2 ábrán alkalmazott jelölések mind érvényesek maradnak.

A koordinátarendszert azonban rögzíthetjük a hajóhoz is, abban az esetben a ferde vízvonalakat kell minden újabb dőlésszögnél  $\delta\varphi$  értékkel ferdebben meghúzni. Ennek azonban megvan az az előnye, hogy a 2.3.2.2.1.2.2.3 ábra értelmében látható a vízkiszorítás súlypontjának a hajóhoz képesti pályája. A számítógépes programnak jobban megfelel, ha az eredeti méretábrázolat értékeire támaszkodhat, amely a hajóhoz rögzített koordinátarendszerben adja meg az adatokat.

A számítás menete, ha a szerkesztést és méretek leolvasását manuálisan, a numerikus számításokat számítógéppel végezzük, a következő.

1. Egyenes úszás

Meghatározzuk azokat az adatokat, amelyek a következő dőlésszögeknél szükségesek lesznek a vízkiszorítás-súlypont és a visszatérítő kar számításához.

Ezek:

$T$  = merülés egyenes úszásnál

$\nabla$  = vízkiszorítás térfogata

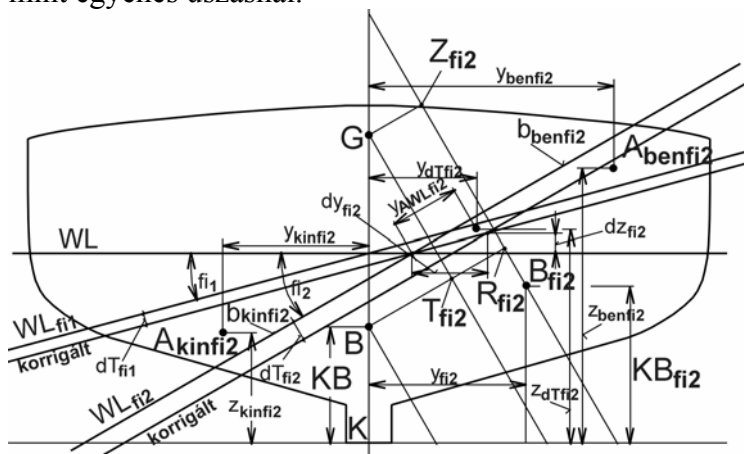
$KB$  = vízkiszorítás-súlypont magassága egyenes úszásnál

$GB$  = rendszersúlypont és vízkiszorítás-súlypont távolsága egyenes úszásnál

2. Ferde úszás  $\delta\varphi$  ( $\varphi_1$ ) dőlésszögnél

A ferde  $WL_{\varphi_1}$  úszásvonalat (korrigálatlan) úgy húzzuk meg, hogy áthaladjon a hossz-szimmetriasík és az egyenes úszásvonal metszéspontján (ld. 2.3.2.2.1.2.2.4 ábra). Az ábrán a  $\varphi_2$  dőlésszöghöz tartozó értékek vannak jelölve.

Természetesen ez nem az a vízvonal, amely  $\delta\varphi$  dőlésszögnél ki fog alakulni, mivel a taláalomra felvett úszásvonalig nem pontosan akkora lesz a vízbemerült térfogat, mint egyenes úszásnál.



2.3.2.2.1.2.2.4 ábra A  $\varphi_2$  dőlésszögű ferde úszási helyzet

Lemérjük minden bordametszeten a kiemelkedő és bemerülő ék-alakú felületeket a  $WL$  egyenes úszásvonal és a  $WL_{\varphi_1}$  ferde úszásvonal között, meghatározzuk azok

súlypontját (leginkább becsléssel úgy, hogy háromszöggel közelítjük). Ezekből az adatokból numerikus integrálással 0 és  $n$  ( $n$  számú bordametszetenél) között kiszámítjuk az éktérfogatok köbtartalmát és nyomatékát a hossz-szimmetriasíkra és az alapvonalra. A hosszirányú koordinátákat és nyomatékokat azért nem vizsgáljuk, mert azok trimet okoznak, amelynek figyelembe vétele viszonylag egyszerű, és a visszatérítő karok mértékére csak elhanyagolható befolyással van.

$$v_{ki\ \varphi_1} = \sum A_{ki\ n\ \varphi_1} dx$$

$$v_{be\ \varphi_1} = \sum A_{be\ n\ \varphi_1} dx$$

A kiemelkedő térfogat negatív, a bemerülő pozitív előjellel szerepel.

$$M_{y\ ki\ \varphi_1} = \sum A_{ki\ n\ \varphi_1} y_{ki\ n\ \varphi_1} dx$$

$$M_{y\ be\ \varphi_1} = \sum A_{be\ n\ \varphi_1} y_{be\ n\ \varphi_1} dx$$

$$M_{z\ ki\ \varphi_1} = \sum A_{ki\ n\ \varphi_1} z_{ki\ n\ \varphi_1} dx$$

$$M_{z\ be\ \varphi_1} = \sum A_{be\ n\ \varphi_1} z_{be\ n\ \varphi_1} dx$$

Az ék-alakú felületek súlypontja pozitív, ha a kiemelkedő felület súlypontja a magasabb, a bemerülőé pedig az alacsonyabb oldalra esik a hajó hossz-

## BBBZ-kódex

---

szimmetriasíkjától.

A kiemelkedő és bemerülő éktérfogat keresztirányú és magassági helyzete:

$$y_{ki \varphi 1} = M_{y_{ki \varphi 1}} / v_{ki \varphi 1}$$

$$y_{be \varphi 1} = M_{y_{be \varphi 1}} / v_{be \varphi 1}$$

$$z_{ki \varphi 1} = M_{z_{ki \varphi 1}} / v_{ki \varphi 1}$$

$$z_{be \varphi 1} = M_{z_{be \varphi 1}} / v_{be \varphi 1}$$

A súlypont-koordináták közül a z mindig pozitív. Az y pozitív, ha a hossz-szimmetriasíktól az alacsony oldal felé esik.

Most meg kell határoznunk azt a (kis) távolságot, amennyivel az önkényesen felvett ferde vízvonalat önmagával párhuzamosan el kell tolni ahhoz, hogy a ferde úszáshelyzetben a helyes értékű  $\nabla$  vízkiszorítás alakuljon ki. Ehhez lemérjük minden bordametszeten a kiemelkedő és bemerülő félszélességeket a ferde vízvonalon az előző (egyenes úszáshelyzethez tartozó) és a jelenlegi vízvonala metszéspontjától a hajótest széléig. Ezekből numerikus integrálással a hajó teljes hosszára kiszámítjuk a ferde vízvonala területét.

$$A_{WL \varphi 1} = \Sigma (b_{be \varphi 1} + b_{ki \varphi 1})$$

A  $b_{be \varphi 1}$  és  $b_{ki \varphi 1}$  értéke akkor pozitív, ha  $b_{be \varphi 1}$  az alacsony,  $b_{ki \varphi 1}$  pedig a magas oldalon van a vízvonala metszéspontjától.

A vízvonala-korrekción értéke, ha a korrekciós térfogatot a vízvonalfelülettel megegyező alakú vékony réteggel helyettesítjük:

$$dT_{\varphi 1} = (v_{be \varphi 1} + v_{ki \varphi 1}) / A_{WL \varphi 1}$$

(a tört számlálója a kiemelkedő térfogat negatív előjele miatt a két térfogat különbsége; pozitív, ha a bemerülő térfogat nagyobb a kiemelkedőnél és ellenkezőleg)

A  $\varphi_1$  dőlésszögű úszáshelyzethez tartozó korrigált vízvonala és az egyenes úszáshelyzet vízvonala metszéspontjának helyzete az előző metszésponthoz képest (ebben az esetben ilyen nem létezik, tehát az egyenes vízvonala és a hossz-szimmetriasík metszéspontjához képest)

$$dy_{\varphi 1} = dT_{\varphi 1} / \sin \varphi_1 \quad dz_{\varphi 1} = 0 \text{ (a metszéspont a vízszintes vízvonala ra esik)}$$

a hossz-szimmetriasíkhöz és az alapvonala hoz képest

$$\Sigma dy_{\varphi 1} = 0 + dT_{\varphi 1} / \sin \varphi_1 \quad \Sigma dz_{\varphi 1} = T + 0$$

A korrekcióval elértük, hogy a ferde úszáshelyzetben a korrigált vízvonala alatti térfogat megegyezik az egyenes úszáshelyzethez tartozó vízkiszorítás térfogatával. Szükségünk van azonban a korrekciós térfogat súlypontjának helyzetére, ehhez előbb a vízvonala nyomatókát kell a két vízvonala metszéspontjára (ebben az esetben az megegyezik a hossz-szimmetriasík és a ferde vízvonala metszéspontjával)



meghatározni saját síkjában.

$$M_{y_{WL\varphi_1}} = \Sigma 0,5(b_{be\ n\ \varphi_1} + b_{ki\ n\ \varphi_1})(b_{be\ n\ \varphi_1} - b_{ki\ n\ \varphi_1}) dx$$

$$y_{AWL\ \varphi_1} = M_{y_{WL\ \varphi_1}} / A_{WL\ \varphi_1}$$

A korrekciós térfogat súlypontjának koordinátái:

$$y_{dT\ \varphi_1} = y_{AWL\ \varphi_1} \cos\varphi_1 + 0,5 dT_{\varphi_1} \sin\varphi_1$$

$$z_{dT\ \varphi_1} = T + y_{AWL\ \varphi_1} \sin\varphi_1 - 0,5 dT_{\varphi_1} \cos\varphi_1$$

A vízkiszorítás súlypontjának helyzetéhez ki kell számolnunk a ferde úszáshoz tartozó vízkiszorítás nyomatékát a hossz-szimmetriasíkra és az alapvonalra.

$$M_{y_{\varphi_1}} = v_{be\ \varphi_1} y_{be\ \varphi_1} - A_{WL\ \varphi_1} dT_{\varphi_1} y_{dT\ \varphi_1} - v_{ki\ \varphi_1} y_{ki\ \varphi_1}$$

$$M_{z_{\varphi_1}} = \nabla KB + v_{be\ \varphi_1} z_{be\ \varphi_1} - A_{WL\ \varphi_1} dT_{\varphi_1} z_{dT\ \varphi_1} - v_{ki\ \varphi_1} z_{ki\ \varphi_1}$$

A vízkiszorítás súlypontjának koordinátái:

$$y_{\varphi_1} = M_{y_{\varphi_1}} / \nabla$$

$$z_{\varphi_1} = M_{z_{\varphi_1}} / \nabla$$

A visszatérítő kar mérete:

$$GZ_{\varphi_1} = y_{\varphi_1} + (z_{\varphi_1} - KB) \operatorname{tg}\varphi_1 - GB \sin\varphi_1$$

### 3. *Ferde úszás* ( $\varphi_n$ ), azaz $\varphi_1 + (n-1)\delta\varphi$ dőlésszögnél

A  $\varphi_2$  dőlésszöghöz tartozó korrigálatlan ferde úszásvonalat azon a ponton át húzzuk meg, amelyet az egyenes és a  $\varphi_1$  dőlésszögű úszáshoz tartozó korrigált vízvonal metszéspontja jelöl ki (koordinátái a hajóhoz rögzített koordinátarendszerben  $dy_{\varphi_1}$  és  $dz_{\varphi_1}$ ).

Megismételjük az adatfelvételt és a numerikus integrálási műveleteket. A vízvonal metszéspont eltolódása miatt azonban a korrekciós térfogat számításától kezdve eltérések vannak az előző úszáshelyzethez képest. Korrigált vízvonal és az előző vízvonal metszéspontjának koordinátái:

$$dy_{\varphi_2} = (dT_{\varphi_2} / \sin\delta\varphi) \cos\varphi_1 \quad dz_{\varphi_2} = (dT_{\varphi_2} / \sin\delta\varphi) \sin\varphi_1$$

$$\Sigma dy_{\varphi_2} = dy_{\varphi_1} + dy_{\varphi_2} \quad \Sigma dz_{\varphi_2} = T + dz_{\varphi_1} + dz_{\varphi_2}$$

A korrekciós térfogat koordinátái:

$$y_{dT \varphi_2} = dy_{\varphi_1} + y_{AWL \varphi_2} \cos \varphi_2 + 0,5 dT_{\varphi_2} \sin \varphi_2$$

$$z_{dT \varphi_2} = T + dz_{\varphi_1} + y_{AWL \varphi_2} \sin \varphi_2 - 0,5 dT_{\varphi_2} \cos \varphi_2 \quad (dz_{\varphi_1} = 0)$$

A vízkiszorítás súlypontjának meghatározásakor az előző esettel szemben, amikor az előző (vízszintes) úszáshoz tartozó y koordináta nulla értékű volt, a keresztirányú nyomaték

$$M_y \varphi_2 = \nabla y_{\varphi_1} + v_{be \varphi_2} y_{be \varphi_2} - A_{WL \varphi_2} dT_{\varphi_2} y_{dT \varphi_2} - v_{ki \varphi_2} y_{ki \varphi_2}$$

Az alapvonalra vett nyomaték kifejezése analóg az előzővel, csak a megfelelő indexű mennyiségeknek kell szerepelniük benne

$$M_z \varphi_2 = \nabla KB + v_{be \varphi_2} z_{be \varphi_2} - A_{WL \varphi_2} dT_{\varphi_2} z_{dT \varphi_2} - v_{ki \varphi_2} z_{ki \varphi_2}$$

A vízkiszorítás súlypontjának koordinátái és a visszatérítő kar analóg az előző lépéssel ( $\varphi_1$ ).

Általános esetben, amikor a T merülésnél és a hozzátartozó  $\nabla$  vízkiszorítás térfogatnál az m-edik ferde úszásvonalat vizsgáljuk, a számításnál használt mennyiségek az alábbiak

n = bordametszet sorszáma

m = dőlésszög sorszáma

$\varphi$  = dőlésszög

$x_{AWL \varphi_m}, y_{AWL \varphi_m}$  = ferde vízvonal súlypont koordinátái  $\varphi_m$  dőlésnél saját síkban

$b_{kin \varphi_m}, b_{ben \varphi_m}$  = vízvonal szélességi méretei saját síkjában n-edik bordánál

( $b_{kin \varphi_m}$  negatív,  $b_{ben \varphi_m}$  pozitív)

$A_{kin \varphi_m}, A_{ben \varphi_m}$  = bordaterület kiemelkedő ill. bemerülő része n-edik bordánál (ki negatív, be pozitív)

$dT_{\varphi_m}$  = merülés-korrekciónál  $\varphi_m$  dőlésnél (pozitív, ha  $V_{be \varphi_m} > V_{ki \varphi_m}$ )

$dy_{\varphi_m}, dz_{\varphi_m}$  =  $\varphi_m$  dőlés korigált vízvonal és  $\varphi_{m-1}$  korigált vízvonal metszéspontjának y és z irányú távolsága az előző vízvonal-metszéstől

$\Sigma dy_{\varphi_m}, \Sigma dz_{\varphi_m}$  =  $\varphi_m$  dőlés korigált vízvonal és  $\varphi_{m-1}$  korigált vízvonal metszéspontjának y és z irányú távolsága a hossz-szimmetriasíktól és az alapvonalától

$y_{dT \varphi_m}, z_{dT \varphi_m}$  =  $A_{WL \varphi_m} \times dT_{\varphi_m}$  korrekciós térfogat súlypont koordinátái

$y_{\varphi_m}, z_{\varphi_m}$  = vízkiszorítás súlypont koordinátái  $\varphi_m$  dőlésnél

$GZ_{\varphi_m}, G, B$  = a stabilitás karja  $\varphi_m$  dőlésnél; rendszersúlypont és vízkiszorítás súlypont egyenes úszásnál

A  $\varphi_m$  dőlésszöghöz tartozó számítás menete analóg a  $\varphi_2$  dőlésszöggel, azonban a

korrigált vízvonala és az előző vízvonala metszéspontjának koordinátái, valamint a korrekciós térfogat súlypontjának koordinátái az alábbi kifejezésekkel írhatók le:

$$dy_{\varphi_m} = (dT_{\varphi_m} / \sin\delta\varphi) \cos\varphi_{m-1} \quad dz_{\varphi_m} = (dT_{\varphi_m} / \sin\delta\varphi) \sin\varphi_{m-1}$$

$$\Sigma dy_{\varphi_m} = dy_{\varphi_1} + dy_{\varphi_2} + \dots + dy_{\varphi_{(m-1)}} + dy_{\varphi_m}$$

$$\Sigma dz_{\varphi_m} = T + dz_{\varphi_1} + dz_{\varphi_2} + \dots + dz_{\varphi_{(m-1)}} + dz_{\varphi_m}$$

$$y_{dT_{\varphi_m}} = \Sigma dy_{\varphi_m} + y_{AWL_{\varphi_m}} \cos\varphi_m + 0,5 dT_{\varphi_m} \sin\varphi_m$$

$$z_{dT_{\varphi_m}} = T + \Sigma dz_{\varphi_m} + y_{AWL_{\varphi_m}} \sin\varphi_m - 0,5 dT_{\varphi_m} \cos\varphi_m$$

A visszatérítő nyomaték karja

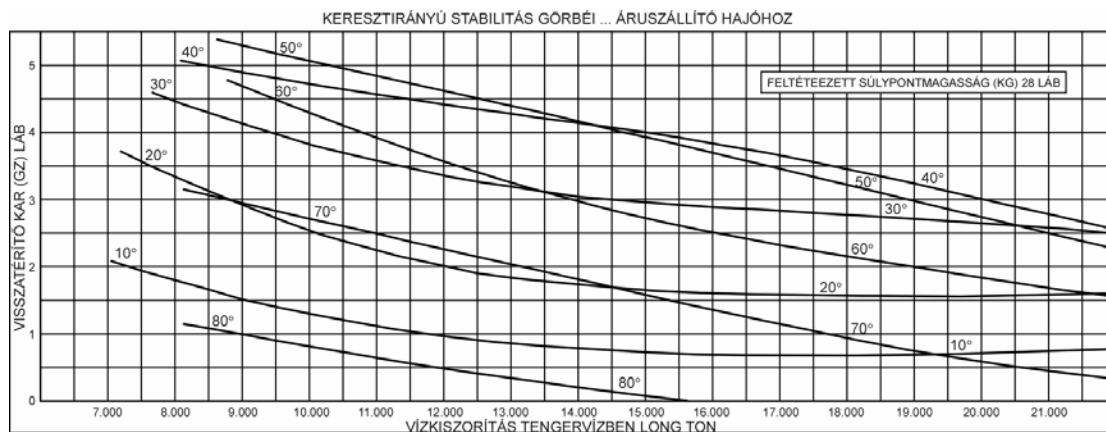
$$GZ_{\varphi_m} = y_{\varphi_m} + (z_{\varphi_m} - KB) \operatorname{tg}\varphi_m - GB \sin\varphi_m$$

### 2.3.2.2.1.2.3 A keresztirányú stabilitás görbéi

A hajóhoz a különböző merülésekhez, vagyis vízkiszorításokhoz meghatározott visszatérítő karok görbeseregben ábrázolhatóak, ahol a görbék paramétere a dőlésszög. Ezeket a görbéket a hajó *keresztstabilitási görbéinek* nevezik. A görbékben nyert adatok csak abban az esetben adnak egzakt eredményt, ha a hajó rendszersúlypontja egybeesik a *pólussal*, vagyis a *G* súlypontnak azzal a helyzetével, amelyet a számításoknál feltételeztek. A 2.3.2.2.1.2.3.1 ábrán egy szokásos keresztstabilitási görbesereg látható. A görbék vízkiszorítás intervalluma az üres hajóval kezdődik, felső határa jóval a maximális terhelés vízvonalán túl van, mivel szükség van a stabilitás értékeire az esetleges *lékesedett állapotban* is.

A *keresztstabilitási görbék megszerkesztésénél* a következő feltételezéseket teszik.

- A hajó rendszersúlypontja a dőlés szögétől függetlenül fix helyzetben marad a pólusban, vagyis a feltételezett súlypontban.
- A hajótest *fenék-, oldal- és szabad (időjárás vagy szabadoldal) fedélzeti szerkezete* teljesen vízzáró.
- A *felépítmények és fedélzeti házak* a szabad fedélzet felett nem vízzáróak. A *vízmentesség* ezeknél a szerkezeteknél, amely a *vízmentes ajtók* jó zárása miatt jöhet létre, további biztonságot jelent a stabilitásban ahhoz képest, ami az érintett szerkezetek víz alá kerülése esetén a keresztstabilitási görbékben kiszámítható.
- A *vízbermült függelék*ek esetében, amilyen a kormánylapát, a hajócsavarok, stb., valamint *szabadon elárasztható terek*, mint a nagyobb méretű *vízszekrények*, a térfogat figyelembe vétele érdekében korrekciókat kell alkalmazni.



2.3.2.2.1.2.3.1 ábra Áruszállító hajó keresztstabilitási görbéi

#### 2.3.2.2.1.2.4 A sztatikus stabilitási görbe megszerkesztése

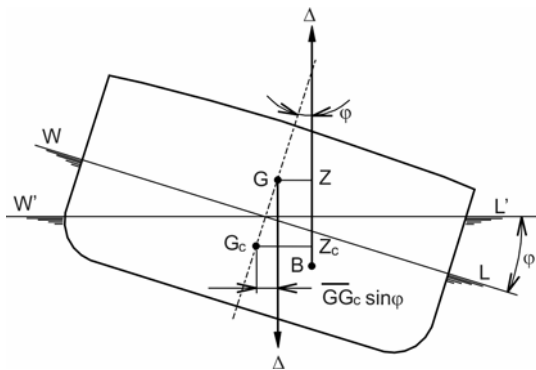
A keresztstabilitás görbéi megfelelő alakot biztosítanak annak az információnak a tárolására, amely ahhoz szükséges, hogy a hajó nagy dőlésszögnél mérhető stabilitásának jellemzőit meg lehessen határozni bármilyen vízkiszorításnál, de ugyanolyan feltételezett rendszersúlypont helyzetnél. Ami azonban a hajó üzemeltetőjének, illetve a tervezés során a hajótervezőnek kell, olyan eszköz, amivel meghatározhatók a visszatérítő karok vagy nyomatékok, amikor a hajó bármilyen szögben megdől, mégpedig egy adott rakodási állapotban, tehát adott vízkiszorításnál, és olyan rendszersúlypont helyzetnél, amely eltér attól, amelyet a keresztstabilitás görbéinek meghatározása során feltételeztek. Ez a megfelelő formátum a *sztatikus stabilitási görbe*, ahol a visszatérítő karok a dőlésszög függvényében vannak ábrázolva. Korábban láttuk már, milyen a sztatikus stabilitási görbe forgástesteknél. Ha egy hajónál adottak a keresztstabilitás görbéi, a sztatikus stabilitási görbe úgy szerkeszthető meg, hogy a keresztstabilitás görbéiből a megfelelő vízkiszorításnál leolvassuk a visszatérítő karok értékeit, és *korrekciót* alkalmazunk a *tényleges rendszersúlypont helyzetre*. Kétféle korrekcióra lehet szükség: egyik a  $G$  súlypont helyzete a gerinc felett ( $KG$ ), a másik a  $G$  helyzete a hossz-szimmetriasíktól ( $TCG$ ). A függőleges helyzet korrekciója szinte mindig szükséges, hiszen csak csodával határos esetekben egyezik meg a hajónál ténylegesen érvényes  $KG$  érték a megadott rakodási helyzetben azzal, amit teljesen önkényesen *póluspontnak* választottak a keresztstabilitás görbéinek megszerkesztése során. A keresztirányú súlyponthelyzet korrekciója ezzel szemben ritkán válik szükségessé rutin rakodási helyzetben, mert a hajók rakodásakor mindig törekednek arra, hogy a súlypont középre essen, és a hajó egyenesen ússzon. A  $G$  függőleges korrekciójának elve a 2.3.2.2.1.2.4.1 ábrán látható. A jelölések jelentése:

$G_c$  = a keresztstabilitás görbéinek szerkesztésekor feltételezett súlypont (pólus)

$G_c Z_c$  = a keresztstabilitás görbéiből leolvasott visszatérítő kar

$G$  = tényleges súlypont

$GZ$  = tényleges visszatérítő kar  
 $\varphi$  = dőlésszög



2.3.2.2.1.2.4.1 ábra A  $G$  súlypont függőleges mozgásának hatása a  $GZ$  értékére

A tényleges és a keresztstabilitás görbéiből leolvasott visszatérítő kar összehasonlításakor látható, hogy

$$GZ = G_c Z_c - GG_c \sin \varphi$$

és az is nyilvánvaló, hogy valamennyi visszatérítő kar kisebb lesz, mint a görbékéből leolvasott, mivel a tényleges súlypont magasabban fekszik, mint a feltételezett. Tehát a  $G$  felfelé történő elmozdulása csökkenti a stabilitást, ahogy azt a kezdeti stabilitás mérésére alkalmas  $GM$  csökkenése esetén láttuk. Ha feltételezzük, hogy a tényleges súlypont a feltételezettnél lejjebb helyezkedik el, könnyű belátni, hogy a fenti egyenlet értelmében nagyobb lesznek a visszatérítő karok, mint a görbékéből leolvasott értékek. Ezért a képletben az előjelet  $\pm$  jelre változtatjuk, a plusz akkor érvényes, ha a valóságos súlypont a feltételezett alatt van.

*Példa*

Határozzuk meg annak a hajónak a sztatikus stabilitási görbéit, amelynek keresztstabilitási görbéi a 2.3.2.2.1.2.3.1 ábrán láthatók, ha a hajó vízkiszorítása 12.000 long ton, a  $KG$  értéke pedig a következő három értéket veszi fel:

- a)  $KG = 26$  láb
- b)  $KG = 28$  láb
- c)  $KG = 30$  láb

Rajzoljuk fel a három görbét egy koordinátarendszerben.

A keresztstabilitás görbéinek szerkesztésénél a  $KG$  feltételezett értéke 28 láb volt, így a b) sztatikus stabilitási görbe felrajzolását a görbékről 12.000 long ton vízkiszorításnál leolvasott  $GZ$  értékekkel végezhetjük el.

Az a) görbéhez

$$GG_c = 28 - 26 = 2 \text{ láb}$$

$GG_c \sin \varphi = 2 \sin \varphi$ , amelyet hozzá kell adni, mert a tényleges  $G$  a feltételezett  $G_c$  alatt van.

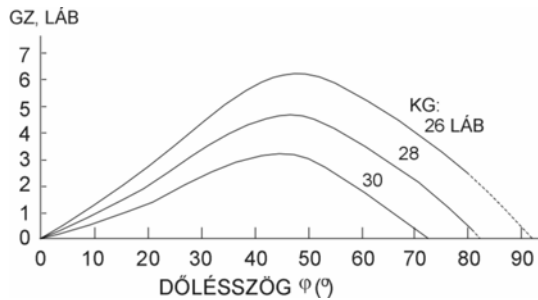
A c) görbéhez

$GG_c = 30 - 28 = 2$  láb a korrekciós  $2 \sin \varphi$  pedig levonandó, mivel a tényleges  $G$  a feltételezett  $G_c$  fölé esik. A munkát táblázatos alakban lehet legjobban elvégezni.

Visszatérítő karok hossza  $\Delta = 12.000$  long ton vízkiszorításnál

Dőlés $\varphi^\circ$	$KG$ 28 láb	$GG_c \sin \varphi$	$KG$ 26 láb	$KG$ 30 láb
-----------------------	-------------	---------------------	-------------	-------------

0	0	0	0	0
10	0,95	0,35	1,30	0,60
20	2,00	0,68	2,68	1,32
30	3,38	1,00	4,38	2,38
40	4,42	1,29	5,71	3,13
50	4,62	1,53	6,15	3,09
60	3,60	1,73	5,33	1,87
70	2,27	1,88	4,15	0,39
80	0,50	1,97	2,47	-1,47

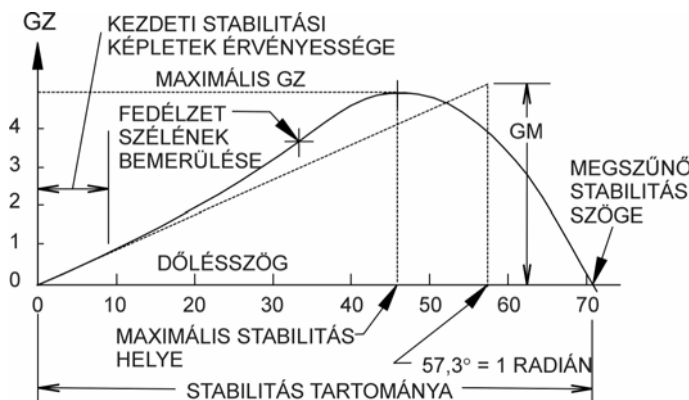


2.3.2.2.1.2.4.2 ábra

A táblázat oszlopainak megfelelő három sztatikus stabilitási görbe a 2.3.2.2.1.2.4.2 ábrán látható. Jól mutatja, hogy a visszatérítő karok minden dőlésszögnél csökkennek, amikor a rendszersúlypont felfelé mozog és a KG értéke nő.

### 2.3.2.2.1.2.5 A sztatikus stabilitási görbe elemzése

A 2.3.2.2.1.2.5.1 ábra tipikus sztatikus stabilitási görbét mutat.



2.3.2.2.1.2.5.1 ábra A sztatikus stabilitási görbe jellemzői

A hajó geometriai és súlyponti szimmetriája miatt mindegy, hogy a megdőlés balra vagy jobbra történik. A görbéket ugyan fel lehet rajzolni olyan dőlésszögekre is, ahol a visszatérítő karból kitérítő vagy felborító kar lesz, vagyis negatív

értékű, a görbéket csak a pozitív visszatérítő karok tartományában rajzolják meg. A hajó stabilitásának teljes megértése érdekében nemcsak azt kell tudnunk, hogyan lehet meghatározni a görbék értékeit, hanem azt is, miért olyan alakja van, amilyen, és milyen jelentősége van a görbe tipikus jellemzőinek. Ezért van szükség arra, hogy elemezzük a sztatikus stabilitási görbét, vagyis „anatómiájukat tanulmányozzuk.

#### Az első néhány fokos dőlés

A sztatikus stabilitási görbe érvényessége nincs a nagy dőlésszögeknél korlátozva úgy, ahogy a kezdeti stabilitást kis dőlésszögekre kellett korlátozni. A visszatérítő karokat kis és nagy dőlésszögeknél egyaránt megadja. Tehát a görbe kezdeti szakaszának (az első 10 fok) összhangban kell lennie a kezdeti stabilitás értékeivel, vagyis a metacentrikus magassággal ( $GM$ ). A mint korábban láttuk,

$$GZ = GM \sin \varphi \quad [\text{a } \varphi \text{ értéke kicsi}]$$

amint pedig a  $\varphi$  zéróhoz közelít, a  $\sin \varphi = \varphi$  (radián). Tehát ezeknél a kis szögeknél, írhatjuk, hogy

$$GZ = GM \times \varphi \quad [\text{a } \varphi \text{ értéke nagyon kicsi}]$$

Ezeket az egyenleteket ábrázolhatjuk a sztatikus stabilitási görbében, az utóbbi az egyszerűbb, amely annak az egyenes vonalnak felel meg, amelynek meredeksége (differenciálja) a metacentrikus magassággal egyenlő ( $GM$ ). A sztatikus stabilitási görbe az origóban egybeesik az egyenessel, tehát annak a meredeksége is  $GM$ . Az első néhány fokos dőlésnél alig tér el tőle. A görbe megrajzolásánál ezt a tulajdonságot fel lehet használni, mivel az egy radián ( $180/\pi$ , azaz 57,3 fok) dőlésszögnél felrajzolt  $GZ = GM$  azt a derékszögű háromszöget jelöli ki, amelynek átfogója a görbe érintője az origóban. Ha a  $GZ = GM \sin \varphi$  egyenletet is ábrázoljuk, látható, hogy mindhárom nagyon közel van egymáshoz az origó környékén.

#### ***A meredekség növekedése a kezdeti egyeneshez képest***

A szokásos hajótest formáknál a sztatikus stabilitási görbe eltér kezdeti irányától, és meredeksége nő a dőlésszöggel. Ennek okára a 2.3.2.2.1.2.2.3 ábra világít rá. Amint a hajó az egyenes úszáshoz képest ( $WL0$ ) megdől, és a  $WL1$  új vízvonal alakul ki, a vízkiszorítás alakja megváltozik, a kiemelkedő éktérfogat áthelyeződik a bemerülő ékbe (az ábrán 1-gyel jelölve). Mivel a vízkiszorítás súlypontjának mozgása nagyobb a hossz-szimmetriásakra merőlegesen, mint azzal párhuzamosan felfelé, amint a  $B$  új helyzete (1) mutatja (amely elmozdulás a korábban már látottak alapján párhuzamos az 1-es éktérfogatok súlypontjainak összekötő egyenesével), a  $B$  vízkiszorítás súlypont pályájának kezdő érintője vízszintes, tehát a visszatérítő kar mérete kezdetben gyorsan nő. A második és harmadik lépésben is még dominál a vízszintes elmozdulás, ezért kezdetben a  $GZ$  visszatérítő kar mérete egyre növekedő ütemben nő.

#### ***A fedélzet szélének bemerülése***

A dőlésszög növekedése során a hajó elér egy olyan pontot, amikor a fedélzet széléig ér a víz a bemerülő (alacsony) oldalon, az ábrán ezt a  $WL3$  vízvonal jelzi. Valójában, mivel a hajó bordametszetei változnak a hajóhossz mentén, a *fedélzet szélének bemerülése* nem egyszerre történik a teljes hajóhosszon, hanem egy néhány fokos intervallumban fokozatosan. Az azonban általános trend, ahogy az ábra is mutatja, hogy a fedélzet bemerülése után már a térfogatékek közötti súlypontmozgás vízszintes összetevője jóval kisebb, és a  $B$  súlypont pályája felfelé görbül. Ez a hatás azonban azt is magával hozza, hogy a  $GZ$  értékei lassabban nőnek, tehát ezen a részen a sztatikus stabilitási görbében inflexiós pont van (görbületváltás). Ez a folyamatosan csökkenő meredekség a görbében oda vezet, hogy maximumot ér el, utána pedig viszonylag gyorsan csökken az amplitúdója.

A fedélzet szélének bemerülése nagy hatással van tehát a nagy dőlésszögeknél érvényes

stabilitásra, aminek fontos következményei vannak mind a hajótervezőre, mind a hajó üzemeltetőjére nézve. A tervezési szempont az, hogy azok a hajók, ahol kisebb lehet a szabadoldal (amelyek nagy fajsúlyú rakományt szállítanak, tehát nem kell nagy térfogatú raktér), hajlamosabbak arra, hogy nem lesz megfelelő méretű a visszatérítő kar és a nyomaték nagyobb dőlésszögeknél, mivel a fedélzet szélének bemerülése és a *sztatikus stabilitási görbe maximuma* viszonylag kis dőlésszögeknél található. Ennek a problémának az elkerülése érdekében a kis szabadoldallal rendelkező hajókat úgy kell megépíteni, hogy viszonylag nagy legyen a metacentrikus magasságuk, ugyanis a görbe nagyobb kezdeti meredeksége biztosíthatja, hogy akkor is elegendő visszatérítő nyomatékkal rendelkezzenek, ha a maximális  $GZ$  érték kisebb dőlésszögnél alakul ki. A hajót üzemeltető tiszt számára pedig, akinek kötelessége a hajó biztonságára ügyelni, a fedélzet szélének víz alá merülése, amelyet okozhat nagyobb *billegés* (rollázás) vagy a rakomány elmozdulása a viharos tenger miatt, olyan állapotot jelent, amely ellen lehetőleg azonnali intézkedéseket kell hozni, mivel ez esetleg a hajó *felborulásának* előjele lehet.

### ***A görbe maximuma***

A sztatikus stabilitási görbe legmagasabb pontja két mennyiséget képvisel, amelyek a hajó általános stabilitási állapotáról igen lényeges dolgokat közölnek. Ezek egyike a *visszatérítő kar legnagyobb értéke*, a másik pedig az a dőlésszög, ahol ez ébred. A maximális visszatérítő kar ( $GZ_{\max}$ ) fontossága abban van, hogy annak és a hajó vízkiszorításának a szorzata adja ki azt a maximális állandó kitérítő (borító) nyomatékot, amelyet a hajó el tud viselni felborulás nélkül; másként fogalmazva, ha a hajót egy állandó külső kitérítő nyomaték (pl. szélero) a maximális stabilitású dőlésszögig megdönti, a hajó fel fog borulni.

### ***A stabilitás tartománya***

A maximális stabilitás helyén túl (nagyobb dőlésszögeknél) a visszatérítő kar csökken, gyakran sokkal gyorsabban, mint ahogy nőtt a maximumig. A gyors csökkenéssel a  $GZ$  eléri azt a pontot, ahol nullára csökken, a görbe metszi a dőlésszög-tengelyt. Ez a dőlésszög az úgy nevezett *stabilitás megszűnésének szöge*, ennél nagyobb dőlésnél a  $GZ$  értéke negatív. Utána már kitérítő vagy borító karról beszélnek. Amelyik hajó ennél a dőlésszögnél jobban megdől, az felborul, függetlenül a megdőlés okától vagy időtartamától. A szokásos sztatikus stabilitási görbe két pontban (dőlésszögnél) metszi a vízszintes tengelyt, mindkettő sztatikus egyensúlyi állapotot jelent, mivel a  $GZ$  értéke nulla. Ezek azonban a hajó viselkedése szempontjából homlokegyenest ellenkező értelműek. A tengely „felfelé” való metszése (a  $GZ$  értéke pozitív a metszésponttól jobbra) *stabil egyensúlyi állapotot* jelent, mert az átmeneti jellegű nagyobb megdőlés visszatérítő nyomatékot generál, amely a hajót vissza akarja téríteni abba az úszáshelyzetbe, ahol egyensúlyban lehet, amint a dőlést előidéző ok megszűnik. A „lefelé” történő metszés pontjától azonban (a  $GZ$  értékei negatívak a nagyobb dőlésszögeknél), amilyen a megszűnő stabilitás szöge, a további dőlés arra készíti a hajót, hogy a külső hatás megszűnése után billenjen ki az egyensúlyi állapotból. Tehát a lefelé való átmenet a tengelyen *labilis egyensúlyi állapotot* jelez. A fel- és lefelé való metszés között a hajó, amelyet külső kitérítő nyomaték kényszerít megdőlésre vagy



billegésre, vissza fog térni stabil egyensúlyi állapotába, amint a külső kitérítő nyomaték megszűnik, ezért a két metszéspont közötti intervallumot a *stabilitás tartományának* nevezzük. A stabilitás tartományának megadásakor mindkét egyensúlyi állapot dőlésszögét meg kell jelölni, még akkor is, ha a stabil egyensúly nulla foknál alakul ki. Tehát ha a hajó egyenes úszásnál van stabil egyensúlyban és megszűnő stabilitásának szöge 80 fok, azt mondják, hogy a hajó nullától 80 fokig terjedő stabilitás-tartománnyal rendelkezik. A későbbiekben azonban fogunk látni olyan eseteket, amikor a stabil egyensúlyi állapot nem egyenes úszásnál van.

A hajó stabilitásának, vagyis azon tulajdonságának, hogy még legnagyobb stabilitásának helyénél nagyobb dőlésszögekből is vissza tud térni egyenes úszáshelyzetébe, a gyakorlatban vannak rejtett buktatói. Ugyanis a keresztirányú stabilitás görbéit azzal a feltételezéssel szerkesztették meg, hogy a *szabadoldal fedélzet* tökéletesen ép, vagyis vízálló. Ez kizárólag a tengeralattjárók esetében igaz. A felszíni hajók fedélzetén vannak *nyílások*, mint pl. rakodónyílások, lejárók, szellőztetés, csövek és még számos más célra készült nyílás. A megfelelően megépített fedélzeti nyílások vízmentesek, de valójában nem lehet mindet tökéletesen vízzáróra készíteni, azon kívül mindig ott van az emberi hiba lehetősége is, pl. a rakodónyílás fedelek és ajtók nem kellő elővigyázatos lezárása. Olyan dőlésszögek esetén, ahol a fedélzet egy részére is felmegy a víz, mindig megvan annak lehetősége, hogy ilyen nyílásokon *víz kerül a hajótestbe*. Ezt a jelenséget *vízbejutásnak* nevezik, és azt a legkisebb szöveget, ahol ez előfordulhat, *vízbejutási szögnek*. Ha a hajóba ilyen módon túl sok víz jut be, többé már nem érvényes eredeti formájában a sztatikus stabilitási görbe, ugyanis megváltozott a hajó rakodási állapota. Tehát a vízbejutási szögnél nagyobb dőlésszögek esetén a sztatikus stabilitási görbét érvénytelennek kell tekinteni. Nagyobb hajóknál a vízbejutást ritkán tekintik kritikus kérdésnek, kisebb hajóknál azonban, mint pl. a halászhajók, a nyitott fedélzeti haltároló és a viszonylag kis szabadoldal komoly vízbejutási veszélyt képez. Ilyen hajóknál ezért a stabilitás tartományát csak a vízbejutás szögéig számolják, nem a megszűnő stabilitás szögéig.

### ***A negatív kezdeti stabilitás és a sztatikus stabilitási görbe kapcsolata***

Az a hajó, amelynek metacentrikus magassága negatív (a  $G$  az  $M$  felett van) nem úszhat egyenes helyzetben, mivel az labilis egyensúlyi helyzet. Akkor tehát ez a hajó fel fog borulni a legkisebb külső hatásra? Szerencsére a legtöbb hajónál erre a kérdésre a válasz az, hogy nem, bár erre a következtetésre nem lehet eljutni, ha csak a kezdeti stabilitást vizsgáljuk. A helyzet megvilágítása érdekében lássuk a következő példát, ahol az eredményül felrajzolt sztatikus stabilitási görbén megtaláljuk a magyarázatot.

#### ***Példa***

Az a hajó, amelynek keresztstabilitási görbéi a 2.3.2.2.1.2.3.1 ábrán láthatóak, tengervízben 27 láb 0 hüvelyk merüléssel úszik,  $KG = 31,8$  láb súlypontmagassággal. Állapítsuk meg, hogy a hajó egyenes úszásnál labilis. Számítsuk ki a sztatikus stabilitási görbe értékeit ( $GZ$ ) és rajzoljuk fel a görbét ehhez a rakodási helyzethez. A hajó jellemző görbéiből leolvassuk, hogy 27°0' merülésnél a vízkiszorítás  $\Delta = 18.800$  long ton és a metacentrum magassága a gerinc felett  $KM = 31,1$  láb. Tehát a metacentrikus magasság

$$GM = KM - KG = 31,1 - 31,8 = -0,7 \text{ láb}$$

Tehát a  $GM$  valóban negatív értékű, a hajó labilis egyenes úszáshelyzetben, ezért nem tud egyenesen úszni. Mivel a hajó súlypontjának helyzete feljebb van, mint a 28 láb  $KG_c$ , amellyel a keresztstabilitás görbéit mint pólussal megrajzolták, a görbékben leolvasott visszatérítő kar értékeket korrigálni kell, azaz le kell vonni belőlük a  $GG_c \sin \varphi$  értékeket,

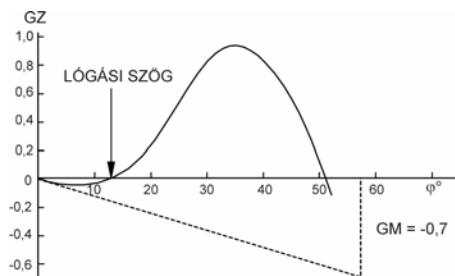
$$GG_c = KG - 28 = 31,8 - 28 = 3,8 \text{ láb}$$

A keresztstabilitás görbéiről 18.800 long ton vízkiszorításnál leolvassuk a  $GZ$  értékeket, és az alábbi táblázatban elvégezzük a számítást:

Visszatérítő karok értéke  $\Delta = 18.800$  long ton és  $KG = 31,8$  láb esetén

$\varphi$	$G_c Z_c$	$GG_c \sin \varphi =$	$GZ$
0	0	0	0
10	0,63	0,66	-0,03
20	1,53	1,30	0,23
30	2,72	1,90	0,82
40	3,26	2,44	0,82
50	3,02	2,91	0,11
60	2,04	3,29	-1,25

60-fokos dőlés felett nem érdemes tovább számolni, mert minden  $GZ$  negatív lesz.



2.3.2.2.1.2.5.2 ábra

A megrajzolt sztatikus stabilitási görbe az 1 radián dőlésszögnél feltüntetett negatív  $GM$ -mel együtt az ábrán látható.

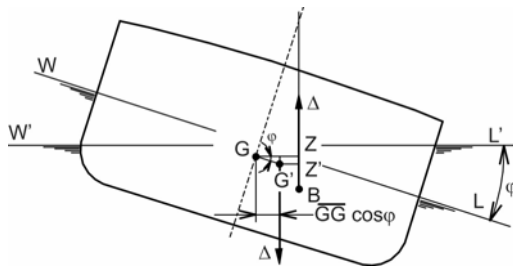
Nem kerülheti el a figyelmünket a görbe különleges formája. Három tengelymetszési pont van, amelyek mind egyensúlyi állapotra utalnak,

azonban kettő ezek közül labilis egyensúlyi helyzetet képvisel, mert lefelé lépi át a görbe a tengelyt növekedő dőlésszög esetén. A negatív metacentrikus magasság a tengely alatt van berajzolva, a sztatikus stabilitási görbe pedig negatív meredekséggel indul, ahogy várni lehet. Mivel azonban a hajótest formája olyan, hogy a görbe a kezdeti érintő felett halad, a görbe ismét metszi a tengelyt  $\varphi = 13$  fok dőlésnél, és mindaddig pozitív is marad, amíg csak el nem éri a megszűnő stabilitás dőlésszögét, ami 51 fok ebben az esetben. Azt a szöveget, amelynél a hajó visszanyeri stabil egyensúlyát, *lógási szögnek* nevezik, a jelenséget magát pedig *lógásnak* (lollázásnak). Csendes vízben ez a hajó 13 fok lógásnál jön egyensúlyba. Ennél a hajónál a stabilitás tartomány a lógási szögtől a megszűnő stabilitás szögéig terjed, tehát 13 foktól 51 fokig. A lógási szög egyedi jellemzője, hogy a hajó egyenes úszáshelyzetétől mindkét oldalon

megvan. A hajó attól függően állapodik meg a lógási szögnél bal- vagy jobboldalt, hogy melyik oldalról jött a zavar, ami a kezdeti megdőlést okozta. Amint az ellenkező oldalról érkezik megfelelő intenzitású kitérítő hatás, a hajó átbillen, és utána azon az oldalon foglalja el a lógási szöget. A lógással úszó hajó mozgása nem harmonikus, gyakorlott tengerésztiszt rövid idő alatt felismeri, és minden körülmények között arra törekszik, hogy megszüntesse a negatív  $GM$  által okozott helyzetet.

**A kitérítő nyomatékok és a sztatikus stabilitási görbe kapcsolata**

Az olyan súlyok, amelyek azt okozzák, hogy a hajó súlypontja keresztirányban nem esik a hossz-szimmetriasíkba, amennyiben kis dőlésszöget okoznak, meghatározhatóak a döntéspróba kiértékelésére használt formulával. Amikor azonban a dőlésszög az excentrikus súly miatt nagyobb, mint 10 fok, már a sztatikus stabilitási görbéhez kell fordulni segítségért.



2.3.2.2.1.2.5.3 ábra A  $G$  oldalirányú elmozdulásának hatása a  $GZ$  értékére

Amikor egy hajó súlypontja  $G$  pontból  $G'$  pontba mozdul el egy súlyösszetevő excentrikus elhelyezése miatt, az ábrán látható úszáshelyzet alakul ki. A  $GZ$  visszatérítő

karok nagyságát a keresztirányú stabilitás görbéiből határoztuk meg, természetesen korrigálva a súlypont tényleges helyzete szerint, amely viszont feltételezésünk szerint a hossz-szimmetriasíkban van. Meg kell azonban határozni a visszatérítő kar csökkenésének mértékét  $GZ$  értékről  $G'Z'$  értékre, amikor a hajó  $\varphi$  szögben megdől. Tegyük fel, hogy a súlypont mozgása tisztán keresztirányban történik ( $GG'$ ), azaz merőlegesen a hossz-szimmetriasíkra illetve párhuzamosan az eredeti egyenes úszási helyzet vízvonalaival. Mindkét visszatérítő kart a ferde úszásvonallal párhuzamosan mérjük. A korrigált visszatérítő kar hossza

$$G'Z' = GZ - GG' \cos \varphi$$

amely az ábrából leolvasható. Az ábrán látható állapot nem csupán a  $G$  súlypont elmozdulása miatt kialakult egyensúlyi helyzet, hanem a külső kitérítő nyomaték és a súlypont elmozdulása által okozott dőlésszög együttes értéke. A  $GG' \cos \varphi$  korrekció ebben az esetben csökkenti a visszatérítő kart, mivel a két kitérítő hatás összeadódik. Ha a külső kitérítő hatást az ellenkező oldalon vizsgáltuk volna, a  $GZ$  értékét növelni kellett volna  $GG' \cos \varphi$  értékkel. Általában azonban a negatív hatás érdekli a hajótervezőt és a hajó irányításáért felelős tisztet is a  $G$  keresztirányú elmozdulásánál, mivel azzal kell tisztában lennie, mennyivel csökkenti a hajó stabilitását az, ha a bekövetkező külső kitérítő hatás miatt az alacsony oldalon a hajó még jobban megdől.

**Példa**

Az előbbi példában szereplő hajó tengervízben úszik egyenes úszási helyzetben,

## BBBZ-kódex

---

merülése elől és hátul egyaránt  $22'0''$ , a  $KG = 28,0$  láb értékű. Mintegy 500 long ton súlyú rakomány 30 láb távolsággal elmozdul balra. Számítsuk ki a  $GZ$  értékeit és rajzoljuk fel a sztatikus stabilitási görbét ehhez az úszáshelyzethez, és hasonlítsuk össze a kapott dőlésszöget azzal, amelyet a döntéspróba képletével kapunk.

A hajó jellemző görbéiből 22 láb merülésnél a vízkiszorítás  $\Delta = 14.800$  long ton és a metacentrum a gerinc felett  $KM = 31,4$  láb magasan helyezkedik el. Tehát:

$$GM = KM - KG = 31,4 - 28,0 = 3,4 \text{ láb}$$

Ebben az esetben nincs szükség a súlypont miatti mínusz korrekcióra, mert a tényleges  $KG$  megegyezik a görbék szerkesztésénél feltételezett értékkel. Azonban a rakomány elmozdulása a hajó súlypontját az alábbi mértékkel oldalra elmozdítja:

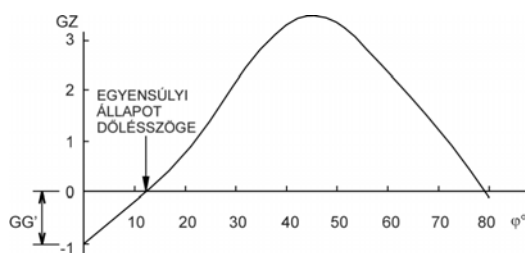
$$GG' = wd / \Delta = (500 \times 30) / 14.800 = 1,01 \text{ láb}$$

A visszatérítő karok súlypontmozgás miatti korrekciójához le kell vonnunk mindegyik  $GZ$  értékéből az  $1,01 \cos \varphi$  értékét. A számítást az alábbi táblázat tartalmazza, a görbe pedig az ábrán látható.

Visszatérítő karok értéke  $\Delta = 14.800$  long ton és  $GG' = 1,01$  láb esetén

$\varphi$	$G_c Z_c$	$GG' \cos \varphi$	$GZ$
0	0	1,01	-1,01
10	0,81	0,99	-0,18
20	1,67	0,95	0,72
30	2,98	0,87	2,11
40	4,00	0,77	3,23
50	3,97	0,65	3,32
60	2,82	0,51	2,31
70	1,63	0,35	1,28
80	0,10	0,18	-0,08

Ahogy vártuk, a sztatikus stabilitási görbe azt mutatja, hogy az excentrikus súlypont miatt a hajó nem képes egyenes úszásra, mivel az nem egyensúlyi állapot.



2.3.2.2.1.2.5.4 ábra

A stabil egyensúlyi helyzet (felfelé való metszés) 12 foknál alakul ki, ezt okozza a súlypont oldalirányú elmozdulása. Tehát a stabilitás tartománya 12 fokról 79 fokig terjed. Egyenes úszáshelyzetben a hajóra

kitérítő nyomaték hat, amelynek karja  $GG'$  nagyságú, ami megfelel a hajó súlypontjának oldalirányú elmozdulásának.

Nézzük meg, mekkora dőlésszöget ad a döntéspróba egyenlete:

$$\tan \varphi = wd / (\Delta GM) = GG' / GM = 1,01 / 3,4 = 0,297$$

$$\varphi = 16,5 \text{ fok}$$

A két eredmény közül a sztatikus stabilitási görbe adja a helyes értéket. A döntéspróba egyenlete csak nagyon kis dőlésszögek esetén ad jó értéket, nagyobb szögeknél már minden esetben túlzottan nagy dőlést prognosztizál.

***Kitérítő és visszatérítő nyomaték görbék***

A sztatikus stabilitási görbéket más módon is ábrázolhatjuk. Nem kell mást tenni, mint a visszatérítő karok helyett a visszatérítő nyomatékokat rajzoljuk fel a dőlésszög függvényében, ahhoz pedig egyszerűen meg kell szorozni minden  $GZ$  értéket a hajó vízkiszorításával ( $\Delta$  vagy  $\Delta_m$ ). Ez a *visszatérítő nyomaték görbe*. A görbe alakja egyáltalán nem változik, mivel a vízkiszorítás állandó, csupán a  $GZ$  skála helyét nyomatékskála veszi át ( $\Delta \times GZ$  vagy  $\Delta_m \times GZ$ ). Ha ugyanabban a koordináta-rendszerben a visszatérítő karokat és a kitérítő nyomatékokat is ábrázoljuk, a két görbe metszéspontjai az egyensúlyi állapotok helyét, azaz dőlésszögét jelzik. A következő példa szemlélteti az eljárást, az adatok az előző példával egyeznek meg.

*Példa*

Végezzük el az alábbi műveleteket az előző példa visszatérítő kar értékeit és súlyponteltolódását figyelembe véve.

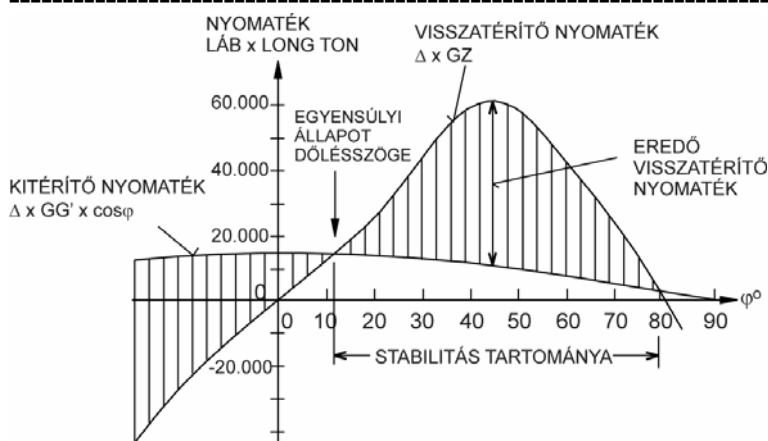
- (a) Rajzoljuk meg a hajó visszatérítő nyomaték görbét a súlyponteltolódást megelőzően. Hosszabbítsuk meg a görbét 30 fokkal az origótól balra, hogy az ellenkező oldali billenést is vizsgálhassuk.
- (b) Rajzoljuk fel a kitérítő nyomatékokat, amelyeket a súlyponteltolódás okoz ugyanabban a koordináta-rendszerben.
- (c) Állapítsuk meg az egyensúlyi úszáshelyzet állandó dőlésszögét, a megszűnő stabilitás szögét és a stabilitás tartományát.

A visszatérítő és kitérítő nyomatékok értékeit úgy kapjuk meg, hogy az előző példa táblázatának értékeit megszorozzuk a vízkiszorítás értékével, ami 14.800 long ton. A számítást a következő táblázat tartalmazza.

Visszatérítő és kitérítő nyomatékok értéke  $\Delta = 14.800$  long ton és  $GG' = 1,01$  láb esetén

$\varphi$	$\Delta \times GZ$	$\Delta \times GG' \cos \varphi$
0	0	14.948
10	11.988	14.652
20	24.716	14.060
30	44.104	12.876
40	57.200	11.396
50	58.756	9.620
60	41.736	7.548
70	24.124	5.182
80	1.480	2.664

A görbéket az alábbi ábrán láthatjuk.



2.3.2.2.1.2.5.5 ábra

A ferde egyensúlyi állapot dőlésszögét a két görbe első metszése jelzi (12 fok), a megszűnő stabilitás szögét pedig a második metszés (79 fok). A diagramon a stabilitás tartománya is fel van tüntetve. A görbék meghosszabbítása az

origótól balra jól mutatja, hogy amennyiben a külső kitérítő hatás a súlypont-eltolódással ellenkező irányba billenti ki a hajót, a visszatérítő nyomatékok nagyobbak, mint egyenes egyensúlyi állapotban úszó hajó esetében (súlypont a hossz-szimmetriasíkban) lennének.

A diagram a dőlésszög függvényében a kitérítő és visszatérítő nyomatékokat ábrázolja. Mivel a visszatérítő nyomatékok görbéje csupán léptékben különbözik a sztatikus stabilitási görbétől, alternatívaként úgy is megkaphatjuk ugyanezt a diagramot (visszatérítő és kitérítő karok értékeihez skálázva), ha a kitérítő nyomatékokat osztjuk el a vízkiszorítással, tehát a  $GG' \cos\varphi$  értékeit mérjük fel.

### Néhány alkalmazási példa a kitérítő karok és nyomatékok számítására

#### Excentrikusan berakott rakomány

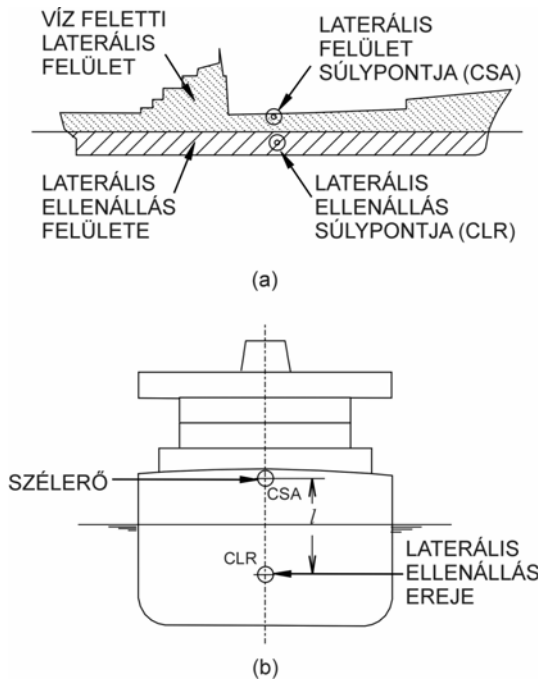
Az előző két példa rámutatott, milyen hatása van a hajó stabilitására az excentrikusan (nem a hossz-szimmetriasíkban) levő rendszersúlypont, például a rakomány elmozdulása miatt. Ennek tipikus esetei.

1. Nem megfelelően elrendezett rakomány a rakterekben, amikor a hajó erősen hullámzó viharos tengeren hajózik.
2. Rakománykezelés a hajó saját emelő-berendezéseivel.
3. A hajó egyik oldalán csoportosuló emberek.
4. Ónos csapadék által okozott jegesedés a hajó szélfelőli oldalán.

Ezekben az esetekben a hajó súlypontja oldalra helyeződik át  $GG' = wd/\Delta$  távolsággal, amint azt korábban láttuk. A fenti esetekben azonban, a rakománykezelés kivételével, ennek a képletnek a gyakorlatban való alkalmazása nagyon sok fejtörést okozhat, mivel meg kell határozni becsléssel a súly nagyságát és helyét, amely elmozdult illetve többletsúlyként a hajóra került. Emellett, ha a kérdéses súly a hajó  $KG$  értékét és vízkiszorítását is megváltoztatja, amikor a hajóra kerül vagy elmozdul (pl. utasok felfelé haladása az oldalirányú mozgáson kívül), ki kell számítani az új  $KG$  és vízkiszorítás értékét is, mielőtt a  $GG'$  távolságot számolni tudnánk, amely csak a keresztirányú változást jelzi a súlypontnál. Nehéz rakomány berakásakor ismerjük a súlyt is és viszonylagos pontossággal annak súlypont helyét is, amikor azonban saját rakodó-berendezéssel rakjuk be a tételt, annak súlya az ismert módon a darugém végére koncentrálódik.

*Oldalszél*

Egy hajó *laterális felületére* erős oldalszélben ható erők képesek nagy megdőléseket okozni, főleg magasabb hajóknál, amilyenek a *konténerszállítók*. A szélerők méretére vonatkozóan sok kutatást végeztek a tengeren és szélsatornában modelleken, de elméleti módszereket is dolgoztak ki a folyadékok mechanikája alapján. A nyilvánosságra hozott formulák és számítási eljárások közül az alábbiakban az egyik legismertebb képletet ismertetjük, amelyhez a 2.3.2.2.1.2.5.6 ábra szolgál segédletként.



2.3.2.2.1.2.5.6 ábra A szél kitérítő nyomatéka

Ezek a képletek csak közelítő eredményt adnak, mivel az együttható (0,0035 ill. 0,0171) mindkét rendszerben szélsatornában meghatározott átlagérték, a szélsébséget pedig az egész laterális felület mentén állandónak tételezték fel. A tengeren végzett mérések azt mutatják, hogy a valóságos szélsébségek jelentősen változnak attól függően, milyen magasan van elhelyezve a szélsébség mérő műszer a tengerszint felett. A számításokhoz azt ajánlják, hogy a műszert az átlagos 10 m magasan a víz felett helyezték el. Ez a szél kitérítő karjának formulája, amely a szél borító nyomatéka osztva a hajó

víz kiszorításával. A kitérítő nyomatékot közvetlenül a hajó sztatikus stabilitási görbéjére lehet felrajzolni. A szél kitérítő karjának (wind heel arm, *WHA*) képlete:

$$WHA = (0,0035 V_w^2 A l \cos^2 \varphi) / (2.240 \Delta)$$

ahol *WHA* = szél kitérítő karja, láb

$V_w$  = szélsébség, csomó

*A* = a hajó oldalnézetében látható laterális felülete a víz felett, láb<sup>2</sup>

*l* = függőleges távolság a víz feletti laterális felület súlypontja és a hossz-szimmetriásíkból levő víz alatti felület (más néven laterális ellenállás felülete) súlypontja között

$\varphi$  = dőlésszög

$\Delta$  = víz kiszorítás, long ton

SI rendszerben, ha a *WHA* *l* mértékegysége méter, *A* m<sup>2</sup>, a  $\Delta_m$  pedig MT, de a  $V_w$  marad csomó, a képlet alakja

$$WHA = 0,0171 V_w^2 A l \cos^2 \varphi / (1.000 \Delta_m)$$

**Megdőlés állandó sugarú körön történő forduláskor**

Ha egy tömeg körpályán mozog, a mozgásra érvényes gyorsulás egyik összetevője a pályával érintőleges, a másik arra merőleges (normál), és a középpont felé mutat. A gyorsulási összetevők hatása alatt mozgó test dinamikus egyensúlyban van azoknak az erőknek a hatására, amelyek a gyorsulás összetevőivel ellentétesek. A normál irányban ható erő kifelé mutat, ezért megnevezése centrifugális erő. A tömegre ható centrifugális erő nagysága

$$F_c = mv^2 / r = wv^2 / (gr)$$

ahol  $F_c$  = centrifugális erő  
 $m$  = a mozgó test tömege  
 $v$  = a test sebessége érintőlegesen (kerületi sebessége)  
 $r$  = a körpálya sugara  
 $w$  = a test súlya  
 $g$  = gravitációs gyorsulás

Állandó sugarú körön forduló hajónál a centrifugális erő, amely a hajó súlypontjában hat, és a fordulási középponttal ellentétesen kifelé mutat, a következőképpen fejezhető ki:

$$F_C = (\Delta v^2) / (gR)$$

ahol  $\Delta$  = a hajó vízkiszorítása (súlya)  
 $v$  = a hajó sebessége fordulás közben  
 $R$  = a fordulókör sugara

Amikor a hajó egyensúlyi állapotba kerül fordulás közben, a centrifugális erőt egy azzal azonos nagyságú, de ellentétes értelmű erő egyenlíti ki, amely a *laterális ellenállás felületének súlypontjában* (kb. a gerinc felett fél-merüléssel) hat. A két erő függőleges távolsága  $KG - T/2$ , amikor a hajó egyenesen úszik, és lecsökken  $(KG - T/2) \cos \varphi$  nagyságúra a hajó  $\varphi$  szögű megdőlésénél. Az így keletkező kitérítő nyomatékot „*fordulási kitérítő kar*” formába tudjuk átalakítani (turn heel arm, *THA*), ha elosztjuk a hajó vízkiszorításával:

$$\begin{aligned} THA &= F_C (KG - T/2) / \Delta = (\Delta v^2 / (gR)) ((KG - T/2) \cos \varphi / \Delta) = \\ &= (v^2 / (gR)) (KG - T/2) \cos \varphi \end{aligned}$$

A fenti egyenletben a hajó sebességének a „*g*” gravitációs gyorsulás mértékegységének megfelelő rendszerben kell lennie. A hajó fordulási sugara ismeretes a *modellkísérleti fordulósugar tesztek*ből, amelyek az új hajónál előírt manőverkísérletek standard részét képezik. A legtöbb kereskedelmi áruszállító hajónál a *fordulási átmérő teljesen*



*kifordított kormányval* kettő és négy hajóhossz között van. Tehát a képletben szereplő  $R$  fordulósugár tipikus minimális értéke egy-két hajóhossz.

A fordulásnál kialakuló dőlésszöget úgy lehet megközelítően meghatározni, hogy az egyenletből kiadódó fordulási kitérítő karokat felrajzoljuk a hajó adott rakodási helyzetéhez tartozó sztatikus stabilitási görbére. A két görbe metszéspontja adja ki a megdőlés szögét.

A fordulás mint manőver kereskedelmi hajóknál általában nem jelent kockázatot, mert a hajók által elérhető sebesség ahhoz nem elegendő. A nagyobb sebességű hadihajóknál azonban a fordulás képes olyan dőlést okozni, amely akár veszélyes is lehet. Az ilyen hajók tisztjei és kormányosai ezért különleges képzést kapnak.