

ΣΧΟΛΗ
ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ II
ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ & ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ



ΝΑΥΠΗΓΙΚΗ (ΜΑΧΙΜΩΝ)

ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΜΕΓΑΛΩΝ ΓΩΝΙΩΝ
ΕΓΚΑΡΣΙΑΣ ΚΛΙΣΗΣ

Δρ. Στυλιανός Πολύζος
spolyzos@hna.gr

Ευστάθεια Μεγάλων Γωνιών Εγκάρσιας Κλίσης



Ευστάθεια Μεγάλων Γωνιών Εγκάρσιας Κλίσης

Αντικείμενο Μαθήματος

- ✓ Ευστάθεια Μεγάλων Γωνιών Εγκάρσιας Κλίσης
 - Εγκάρσια κλίση & Ισορροπία
 - Μετάκεντρο & Ψευδομετάκεντρο
 - Καμπύλες Ευστάθειας
 - Διάγραμμα Στατικής Ευστάθειας
 - Κριτήρια Ευστάθειας

Το πρόβλημα της εγκάρσιας κλίσης

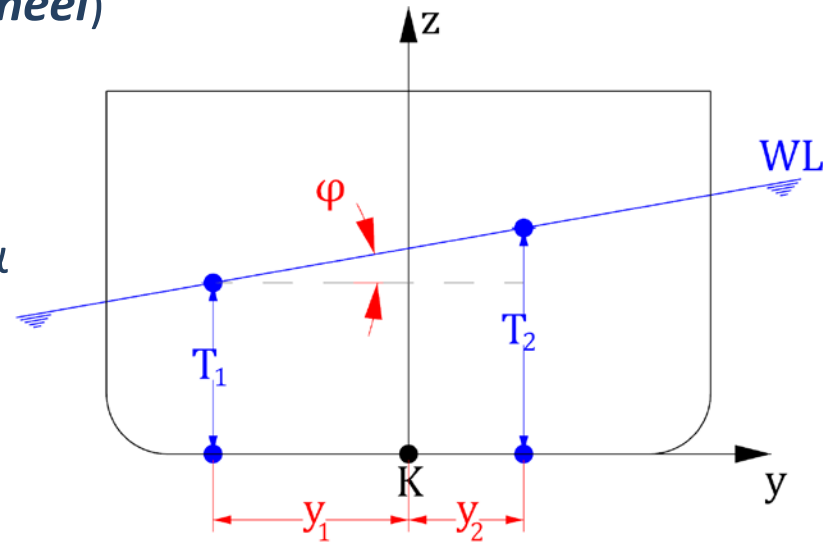
- Υποθέτουμε πως το πλοίο υπό την επίδραση εξωτερικής ροπής M_H λαμβάνει **μόνο Εγκάρσια κλίση, ϕ (roll, heel)**

$$\tan\phi = \frac{T_2 - T_1}{y_2 - y_1}$$

- ✓ Για δεδομένο και σταθερό εκτόπισμα
- ✓ Δεδομένη φόρτωση πλοίου
- ✓ Σταθερή διαγωγή
- ✓ **Θετική εγκάρσια κλίση:**

αύξηση του βυθίσματος προς τα θετικά του y -άξονα (**port side**)

- Η εγκάρσια κλίση διαβάζεται από
 - ✓ τη διαφορά των βυθισμάτων port-starboard
 - ✓ το κλινόμετρο της γέφυρας
 - ✓ τη γυροπυξίδα



Μετάκεντρο

- ✓ Ποία είναι η ροπή που εξισορροπεί τη ροπή εγκάρσιας κλίσης M_H ?
- ✓ Ροπή του ζεύγους δυνάμεων F_B , W , **ροπή επαναφοράς (Righting Moment) M_R** :

$$M_H = M_R = \Delta \cdot GZ$$

$$GZ = GM \cdot \sin\varphi$$

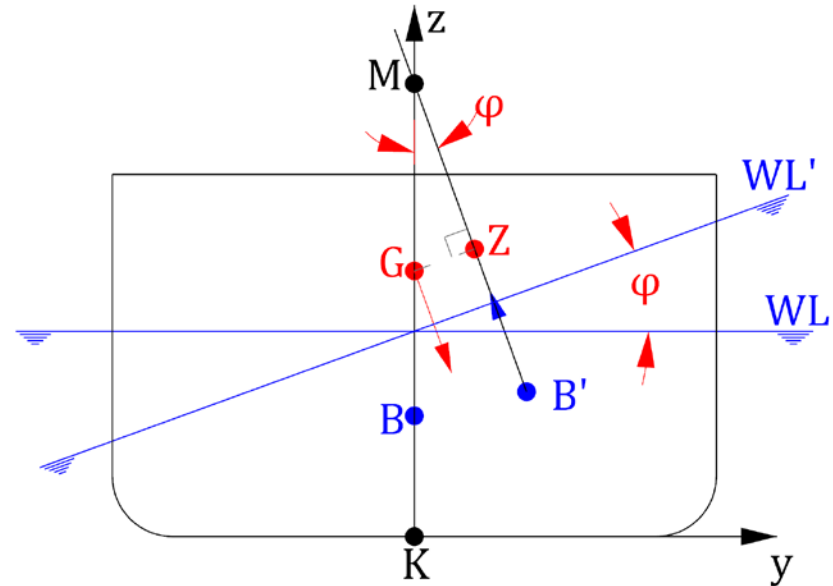
- ✓ Η απόσταση **GZ** ονομάζεται **Μοχλοβραχίονας Επαναφοράς (Righting Arm)**

- ✓ **Μετακεντρικό Ύψος GM**

$$GM = KB + BM - KG$$

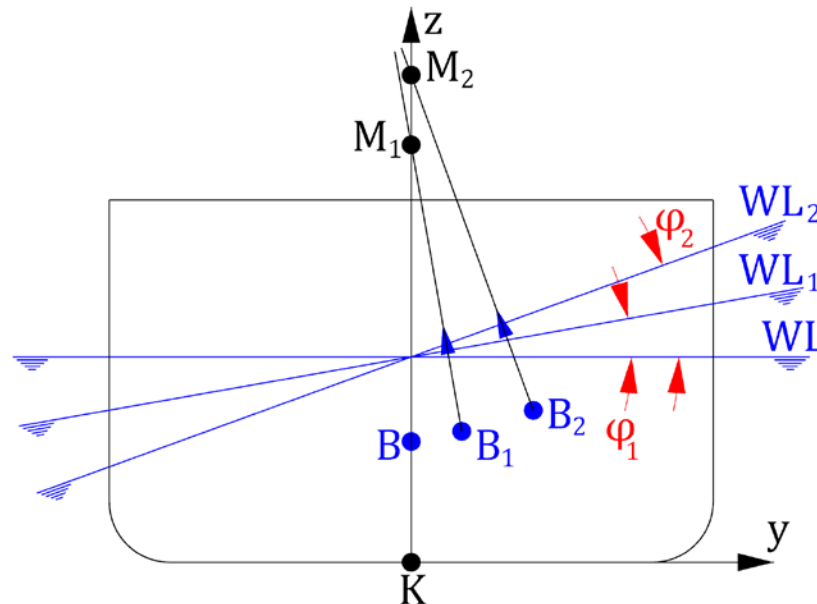
- ✓ **Μετακεντρική Ακτίνα BM**

$$BM_T = \gamma \cdot \frac{I_{XX}}{\Delta}$$



Αρχικό Μετακεντρικό Ύψος

- ✓ Η θέση του μετάκεντρου M δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται καθώς αλλάζει η γωνία κλίσης
- ✓ Συνεπώς το μετακεντρικό ύψος GM μεταβάλλεται καθώς μετακινείται το μετάκεντρο

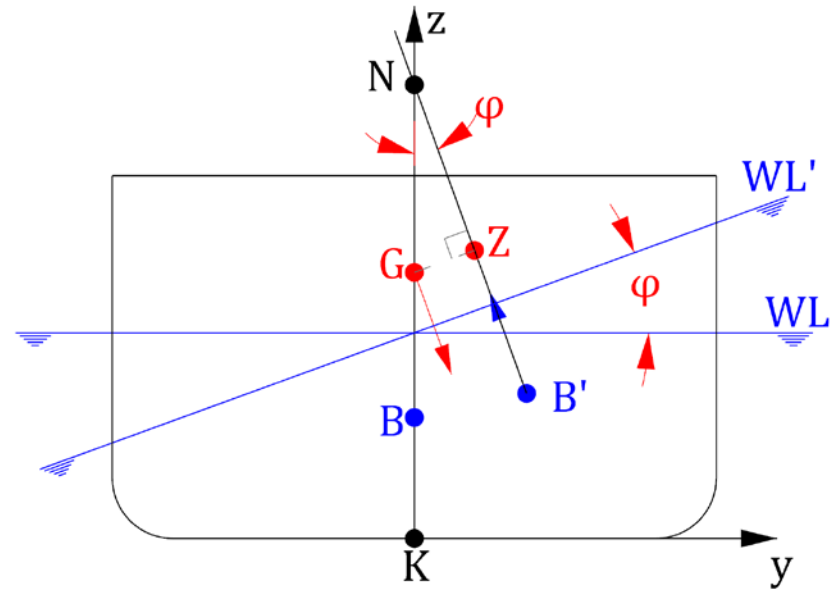


- ✓ **Αρχικό μετακεντρικό ύψος** ονομάζεται το μετακεντρικό ύψος για απειροστά μικρή γωνία κλίσης ϕ για την οποία ισχύει:

$$GM = KB + BM - KG$$

Ψευδομετάκεντρο

- ✓ Καθώς τα πλοία **δεν είναι συμμετρικά περί τη μέση τομή** (η πλώρη διαφέρει από την πρύμνη), μαζί με (μεγάλη) εγκάρσια κλίση, **αποκτούν και διαγωγή**
- ✓ Τότε **η κατακόρυφος που διέρχεται από το B' δεν τέμνει την αρχική κατακόρυφο από το B** άρα δεν μπορεί να οριστεί το μετάκεντρο
- ✓ Ορίζουμε το **ψευδομετάκεντρο N**, ως το σημείο όπου η προβολή της κατακορύφου από το B', στο επίπεδο της αρχικής κατακορύφου, τέμνει την αρχική κατακόρυφο από το B
- ✓ Προφανώς όταν έχουμε μόνο εγκάρσια κλίση, τότε $M \equiv N$
- ✓ Για μικρές γωνίες κλίσης, αναφερόμαστε πάντα στο μετάκεντρο M



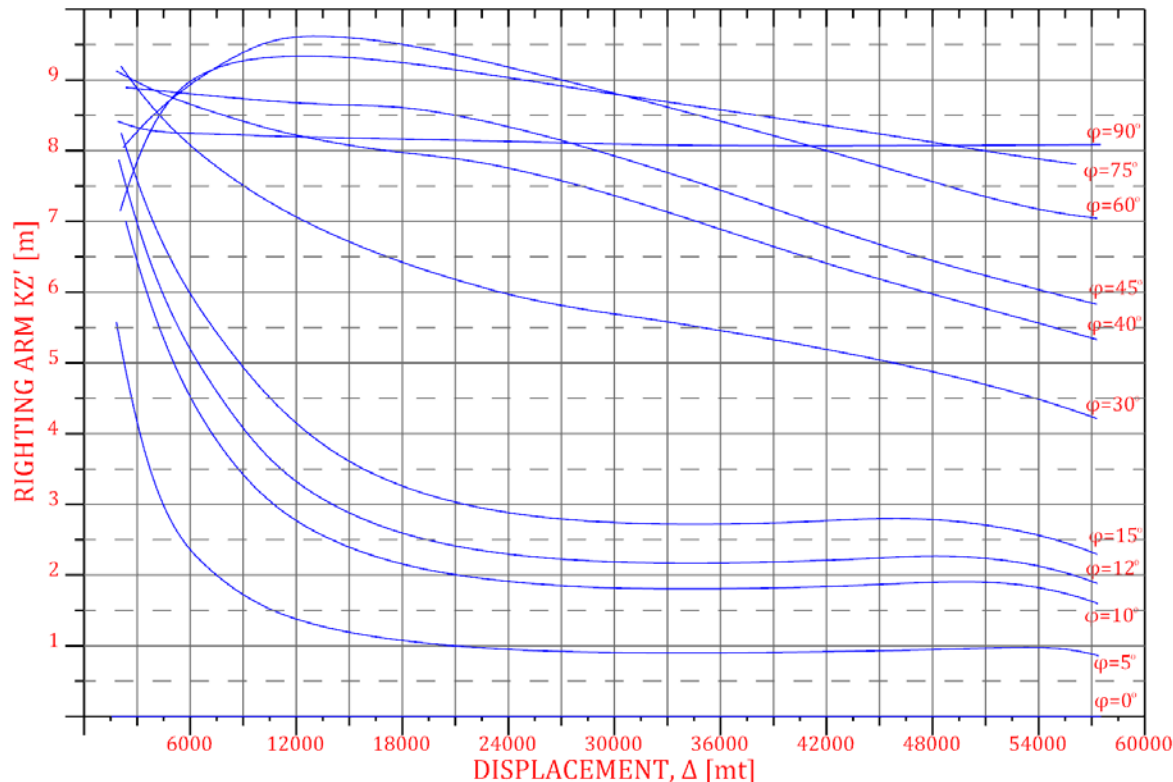
$$GZ = GN \cdot \sin\varphi$$

$$GN = KB + BN - KG$$

Καμπύλες Ευστάθειας

✓ Καμπύλες Ευστάθειας (Cross Curves of Stability)

- Σύνολο παραμετρικών καμπυλών με παράμετρο τη γωνία εγκάρσιας κλίσης ϕ
- Αποτυπώνουν τον μοχλοβραχίονα KZ' (κατακόρυφος άξονας) συναρτήσει του εκτοπίσματος Δ (οριζόντιος άξονας)



$$GZ = KZ' - KG \cdot \sin\phi$$

Καμπύλες Ευστάθειας

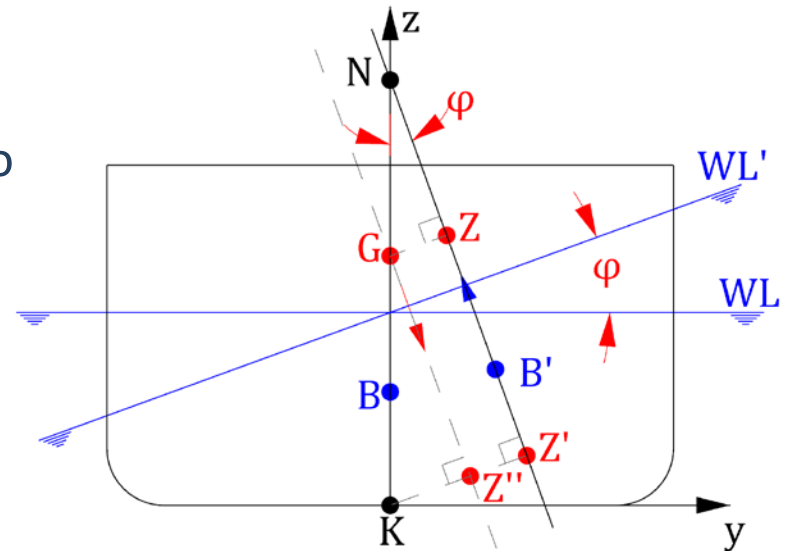
- ✓ Αναφέρονται σε **συγκεκριμένη διαγωγή**
 - Συνήθως ισοβύθιστο πλοίο ($T_{AP}=T_{FP}=T_M$)
- ✓ Εξαρτώνται αποκλειστικά από τη **γεωμετρία του πλοίου**
 - Ανεξάρτητες από την κατανομή των βαρών και τη φόρτωση (δηλαδή το KG)
 - Συνοδεύουν το πλοίο σε όλη τη ζωή του, νέες μετά από μετατροπή του πλοίου που αλλάζει τη μορφή της γάστρας
- ✓ Εγχειρίδιο Ευστάθειας Πλοίου - Trim & Stability Booklet

Καμπύλες Ευστάθειας

- Σε ορισμένες περιπτώσεις, αντί του μοχλοβραχίονα KZ' , αποτυπώνεται το **ύψος του ψευδομετάκεντρου KN** :

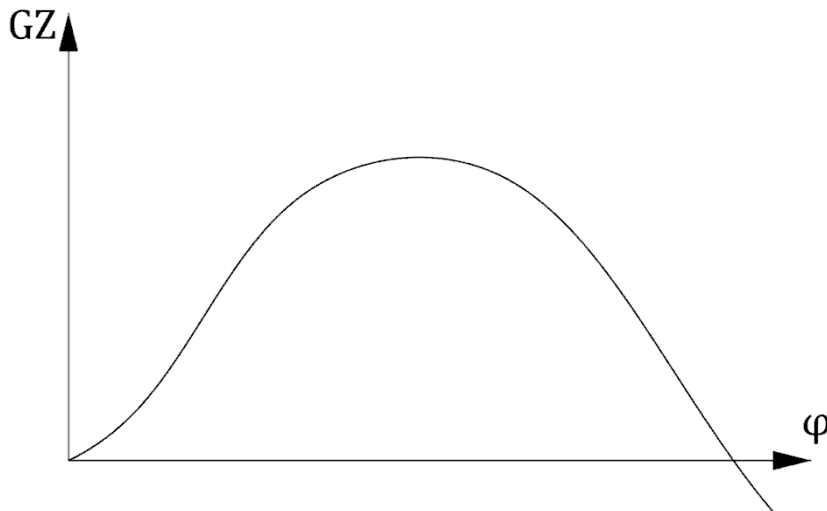
$$GZ = (KN - KG) \cdot \sin\varphi \quad \text{ή} \quad GZ = (KN - KG_{\text{Corr}}) \cdot \sin\varphi$$

- ✓ Σύνολο παραμετρικών καμπυλών, παράμετρος η γωνία φ
- ✓ Αποτυπώνουν το ύψος KN (κατακόρυφος άξονας) συναρτήσει του εκτοπίσματος Δ (οριζόντιος άξονας)
- ✓ Αναφέρονται σε **συγκεκριμένη διαγωγή**, συνήθως **ισοθύθιστο** πλοίο
- ✓ Εξαρτώνται αποκλειστικά από τη γεωμετρία του πλοίου, ανεξάρτητες από την κατανομή των βαρών και τη φόρτωση



Διάγραμμα Στατικής Ευστάθειας

- Ο μοχλοβραχίονας επαναφοράς δεν έχει σταθερή τιμή αλλά είναι συνάρτηση της γωνίας κλίσης (και του μετακεντρικού ύψους)
- Μπορούμε να κατασκευάσουμε το διάγραμμα του μοχλοβραχίονα επαναφοράς συναρτήσει της γωνίας κλίσης ή αλλιώς το **Διάγραμμα Στατικής Ευστάθειας $GZ-\varphi$**

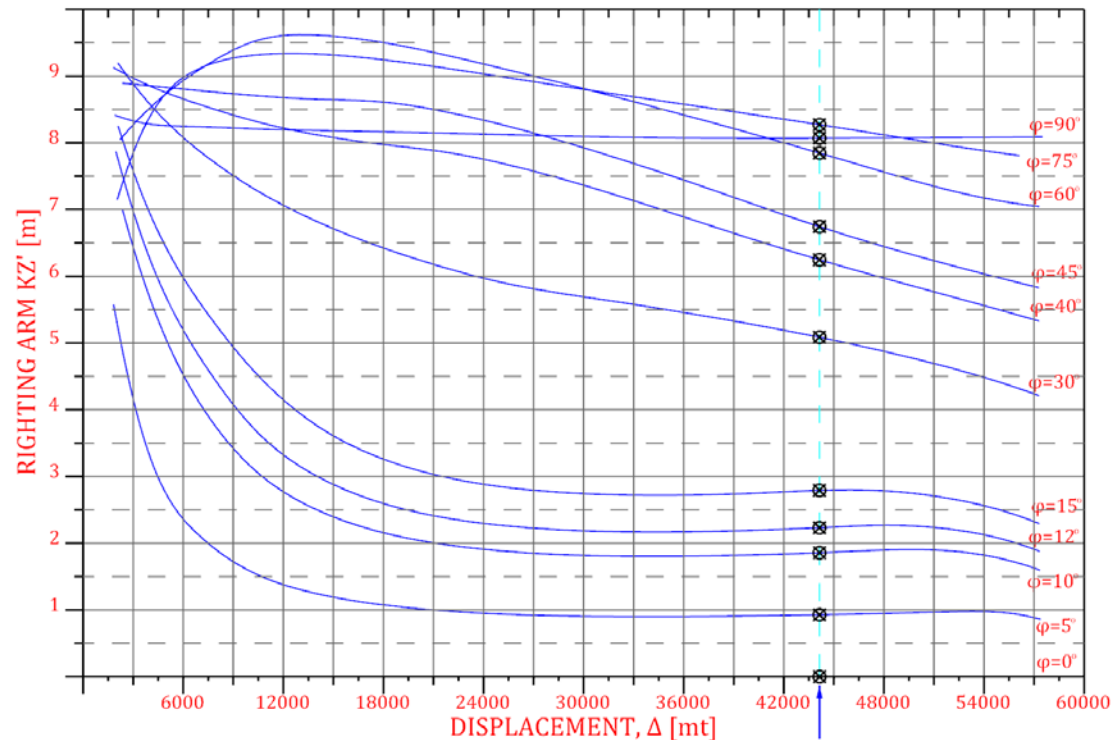


- ✓ Αποτυπώνει το μοχλοβραχίονα επαναφοράς GZ (κατακόρυφος άξονας) συναρτήσει της γωνίας κλίσης (οριζόντιος άξονας)
- ✓ Εξαρτάται από τη γεωμετρία του πλοίου και αναφέρεται σε **συγκεκριμένη κατάσταση φόρτωσης**, (Δ , KG , LCG + Ελεύθερες επιφάνειες)

Διάγραμμα Στατικής Ευστάθειας

- Η καμπύλη του μοχλοβραχίονα επαναφοράς GZ ή GZ_R μπορεί να κατασκευαστεί από τις καμπύλες ευστάθειας για δεδομένο εκτόπισμα (Δ , KG):

- ✓ Χαράσσουμε κατακόρυφη ευθεία στο επιθυμητό εκτόπισμα
- ✓ Διαβάζουμε τα ζεύγη τιμών (ϕ, KZ') ή (ϕ, KN)
- ✓ Για κάθε ϕ , υπολογίζουμε, την τιμή του GZ :



$$GZ = KZ' - KG \cdot \sin\phi \quad \text{ή} \quad GZ = (KN - KG) \cdot \sin\phi$$

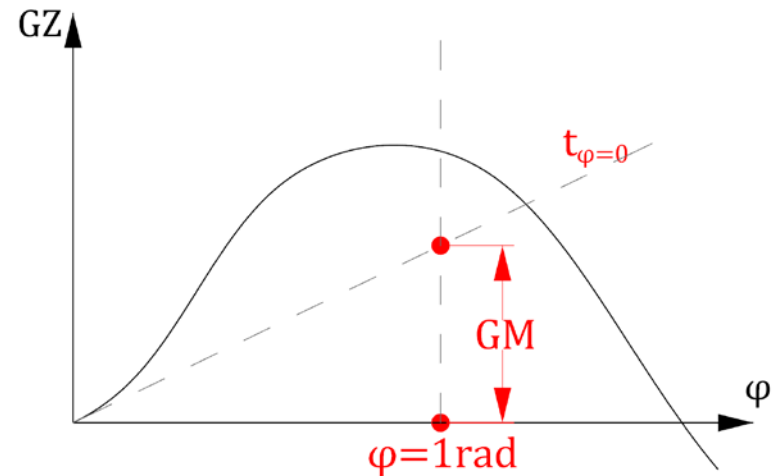
$$GZ = KZ' - KG_{\text{Corr}} \cdot \sin\phi \quad \text{ή} \quad GZ = (KN - KG_{\text{Corr}}) \cdot \sin\phi$$

Διάγραμμα Στατικής Ευστάθειας

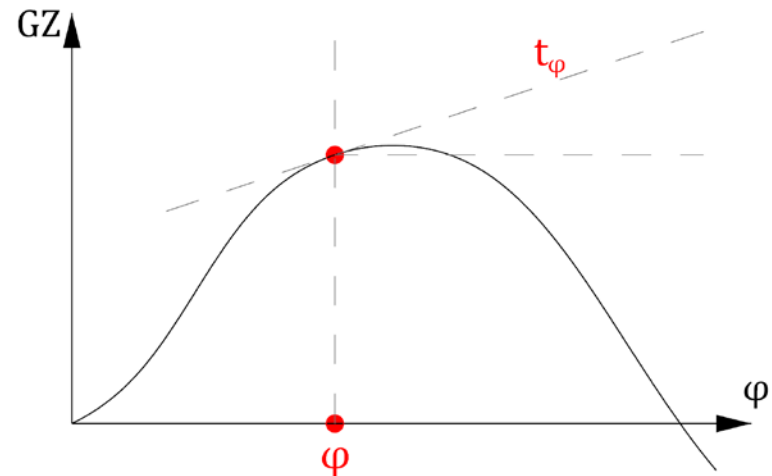
- Στην προηγούμενη μέθοδο η διαγωγή θεωρείται σταθερή και ίση με τη διαγωγή των καμπυλών ευστάθειας (συνήθως μηδενική)
 - ✓ Δε μπορεί να ληφθεί υπ' όψη η διαγωγή λόγω εγκάρσιας κλίσης
- Εναλλακτικά η καμπύλη μοχλοβραχίονα επαναφοράς GZ_R -φ μπορεί να υπολογιστεί αριθμητικά (με τη βοήθεια λογισμικού H/Y) οπότε:
 - ✓ εξαρτάται από τη γεωμετρία του πλοίου
 - ✓ αναφέρεται σε **συγκεκριμένη κατάσταση φόρτωσης**, (Δ , LCG, KG + ελεύθερες επιφάνειες)
 - ✓ **Λαμβάνεται υπ' όψη και η διαγωγή** λόγω εγκάρσιας κλίσης

Διάγραμμα Στατικής Ευστάθειας

- Ιδιότητες Διαγράμματος Στατικής Ευστάθειας
 - ✓ *Η εφαπτομένη της καμπύλης για $\varphi=0$ είναι ίση με το αρχικό μετακεντρικό ύψος GM*

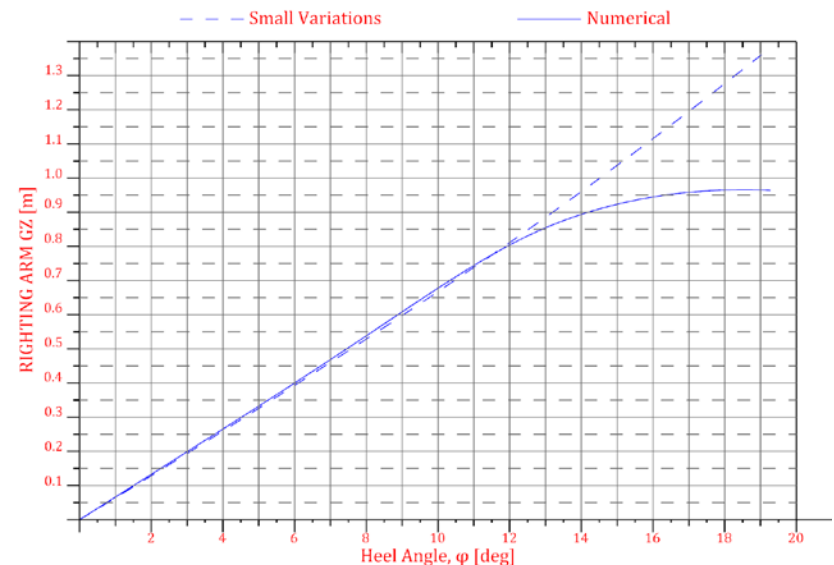
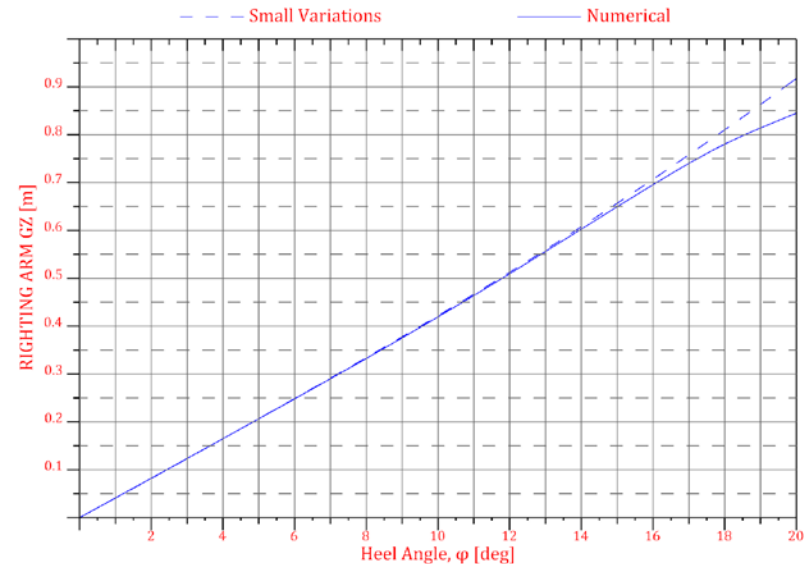


- ✓ Σε κάθε άλλη γωνία, η κλίση της καμπύλης μπορεί να θεωρηθεί ως ένα «αρχικό» μετακεντρικό ύψος, με αναφορά στην ίσαλο με γωνία εγκάρσιας κλίσης γ , WL_{ϕ}



Διάγραμμα Στατικής Ευστάθειας

- ✓ Η περιοχή γωνιών κοντά στο $\phi=0^\circ$, όπου η κλίση της καμπύλης παραμένει περίπου σταθερή και ίση με το μετακεντρικό ύψος, ονομάζεται **περιοχή αρχικής ευστάθειας**. Στην περιοχή αυτή ισχύει η θεωρία μικρών μεταβολών
- ✓ Για **ογκώδη πλοία** ($C_B > 0.75$) ή για πλοία με νομείς τύπου “U”, η **περιοχή αρχικής ευστάθειας φτάνει μέχρι $\phi=15^\circ$**
- ✓ Για **λεπτόγραμμα πλοία** ή για πλοία με νομείς τύπου “V”, η **περιοχή αρχικής ευστάθειας περιορίζεται στις $\phi=5^\circ$**

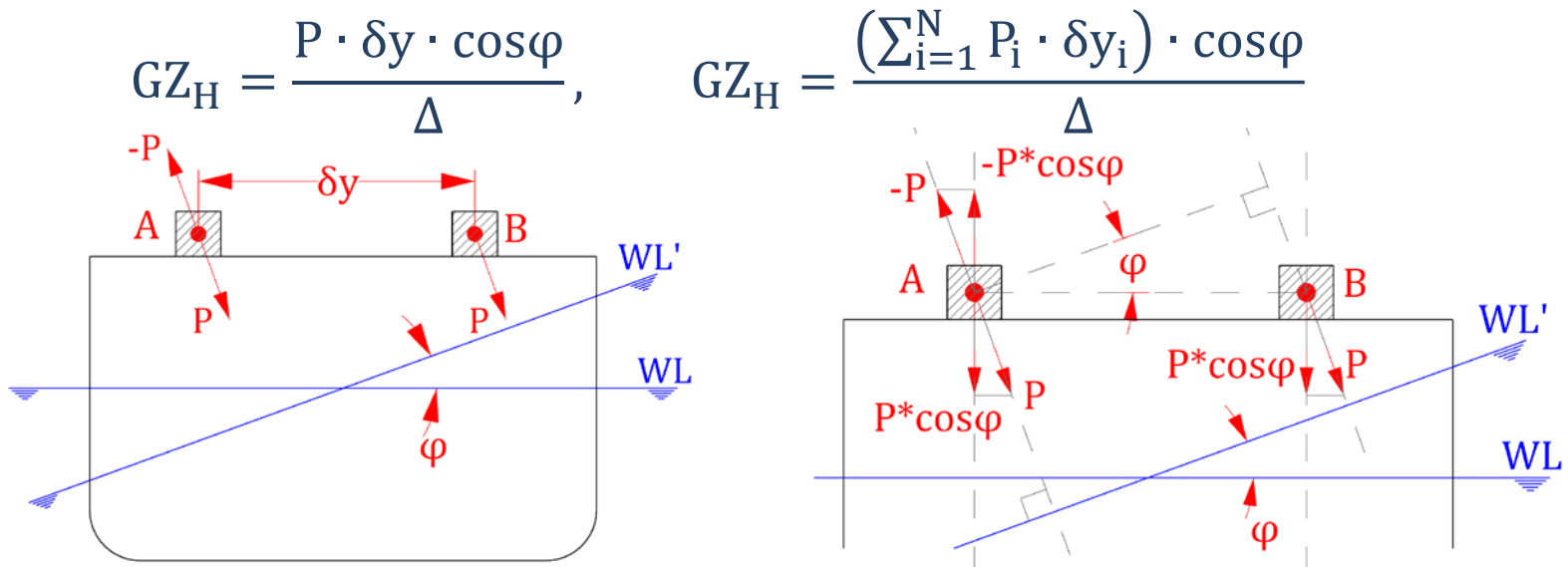


Μοχλοβραχίονας Κλίσης

- Στο διάγραμμα Στατικής Ευστάθειας μπορεί να αποτυπωθεί και η **καμπύλη του μοχλοβραχίονα ροπής κλίσης GZ_H** :

$$GZ_H = \frac{M_H}{\Delta}$$

- Η μορφή της καμπύλης εξαρτάται από τη φύση της εξωτερικής ροπής:
 - ✓ Στην περίπτωση ροπής ανέμου, η καμπύλη είναι μία ευθεία σταθερού πλάτους
 - ✓ Στην περίπτωση μετακίνησης βάρους (ή βαρών) η καμπύλη έχει συνημιτονική μορφή:



Διάγραμμα Στατικής Ευστάθειας

- ✓ Υπό την επίδραση ροπής κλίσης M_H , το πλοίο ισορροπεί όταν:

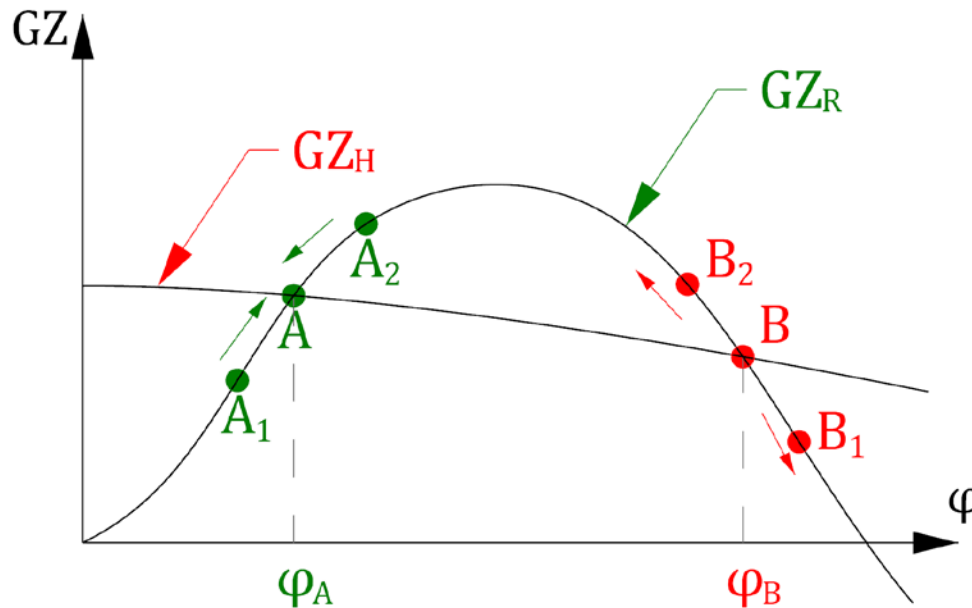
$$M_H = M_R$$

$$\Delta \cdot GZ_H = \Delta \cdot GZ_R$$

ή

$$GZ_H = GZ_R$$

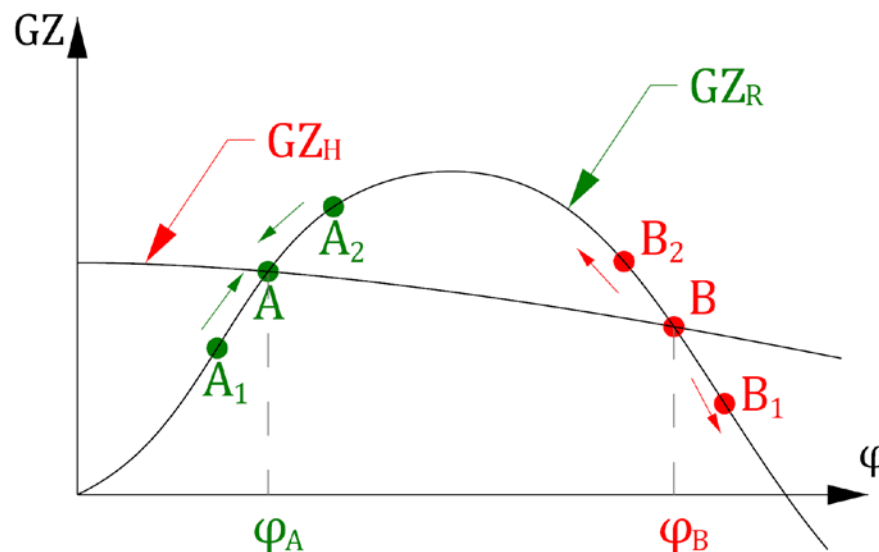
- ✓ Εμφανίζονται **δύο σημεία (γωνίες) ισορροπίας**, ένα **ευσταθούς** (A) και ένα **ασταθούς** ισορροπίας (B)



Ευστάθεια Μεγάλων Γωνιών Εγκάρσιας Κλίσης

Διάγραμμα Στατικής Ευστάθειας

- ✓ Αν το πλοίο εκτραπεί από τη γωνία ισορροπίας ϕ_A :
 - Προς μικρότερη γωνία, ο μοχλοβραχίονας επαναφοράς θα είναι μικρότερος ($M_H > M_R = \Delta \cdot GZ_R$) και το πλοίο θα τείνει να κλίνει περισσότερο
 - Προς μεγαλύτερη γωνία, ο μοχλοβραχίονας επαναφοράς θα είναι μεγαλύτερος ($M_H < M_R = \Delta \cdot GZ_R$) και το πλοίο θα τείνει να κλίνει λιγότερο
- ✓ Το αντίστροφο ισχύει για τη γωνία ισορροπίας ϕ_B .
- ✓ **Αν η γωνία ισορροπίας βρίσκεται στην περιοχή όπου η καμπύλη έχει θετική κλίση πρόκειται για ευσταθή ισορροπία. Αντίθετα, η περιοχή αρνητικής κλίσης είναι περιοχή αστάθειας**

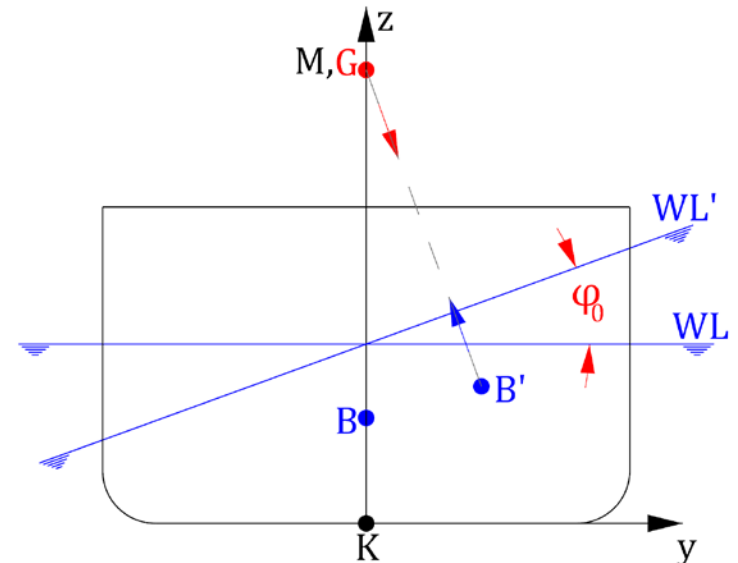
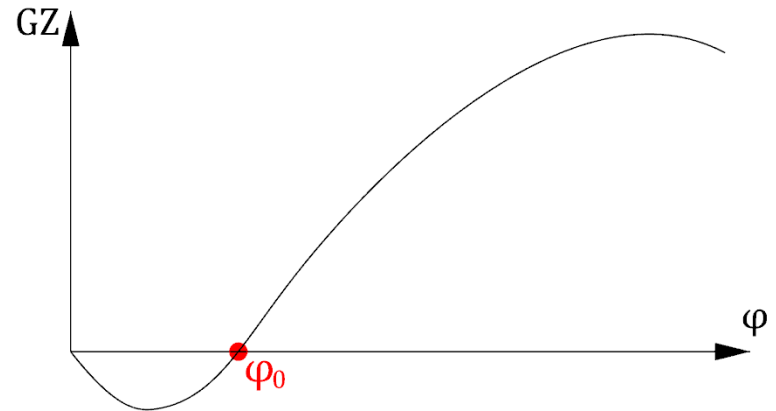


Διάγραμμα Στατικής Ευστάθειας

- ✓ Στην περίπτωση όπου $KG > KM$, το αρχικό μετακεντρικό ύψος είναι αρνητικό $GM < 0$
- ✓ Η κλίση της καμπύλης στατικής ευστάθειας είναι **αρνητική**
- ✓ Η γωνία $\varphi = 0$ αποτελεί σημείο **ασταθούς ισορροπίας**
- ✓ Το πλοίο θα πάρει κλίση φ_0 όπου ο Μοχλοβραχίονας Επαναφοράς μηδενίζεται και συνεπώς το διάνυσμα του βάρους βρίσκεται στην ίδια κατακόρυφο με το διάνυσμα της άνωσης
- ✓ Από Θ. Μικρών Μεταβολών:

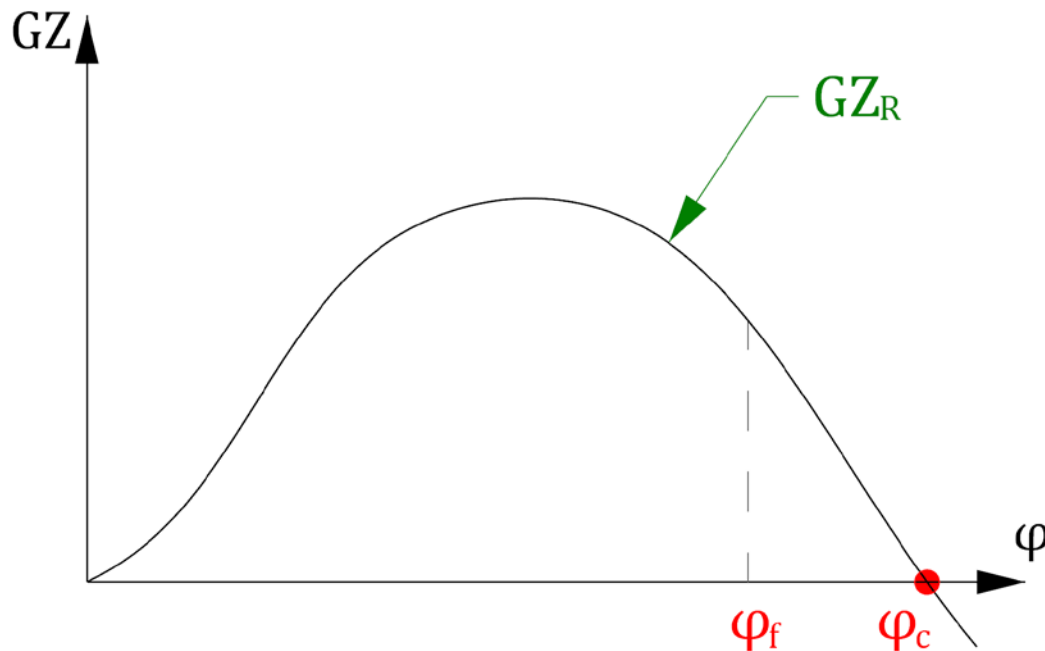
$$\tan \varphi_0 = \sqrt{-2 \cdot \frac{GM}{BM}}$$

- ✓ Το σημείο αυτό είναι σημείο **ευσταθούς ισορροπίας**



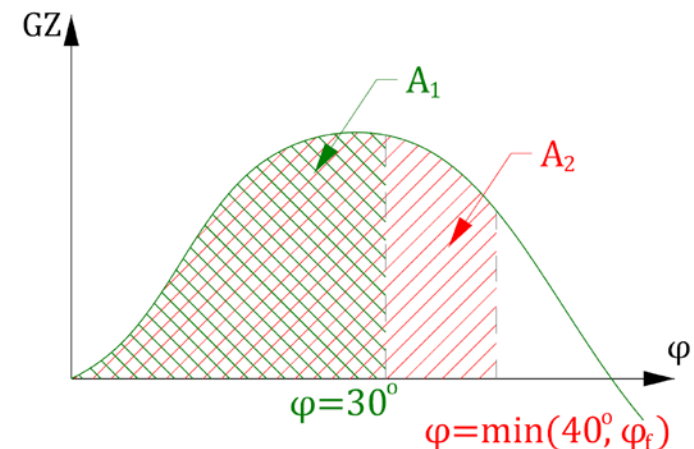
Διάγραμμα Στατικής Ευστάθειας

- ✓ Η γωνία μετά την κορυφή της καμπύλης, στην οποία μηδενίζεται ο μοχλοβραχίονας επαναφοράς, ονομάζεται **γωνία ανατροπής φ_c**
- ✓ Αποτελεί σημείο ασταθούς ισορροπίας και συνεπώς αν το πλοίο βρεθεί σε αυτή την κατάσταση θα ανατραπεί
- ✓ Ορίζεται ακόμη η γωνία **φ_f** πάνω από την οποία μεγάλα **μη στεγανά ανοίγματα** στη γάστρα ή των υπερκατασκευών του πλοίου αρχίζουν να **κατακλύζονται**



Κριτήρια Ευστάθειας IMO A.749(18)

- Το 1991, ο **IMO** προχώρησε στην αναθεώρηση της οδηγίας A.749 του 1987 και καθόρισε νέες απαιτήσεις για πλοία μήκους άνω των 25 [m]:
 - ✓ Αρχικό μετακεντρικό ύψος **$GM > 0.15$ [m]**
 - ✓ **$GZ \geq 0.20$ [m]** σε γωνία εγκάρσιας κλίσης **$\varphi \geq 30^\circ$**
 - ✓ Η μέγιστη τιμή του μοχλοβραχίονα στατικής ευστάθειας **GZ_{max}** θα εμφανίζεται σε μια γωνία εγκάρσιας κλίσης μεγαλύτερη κατά προτίμηση από **$\varphi_{max} > 30^\circ$** , και πάντως όχι μικρότερη από 25°
 - ✓ Η επιφάνεια **A1** κάτω από την καμπύλη στατικής ευστάθειας (GZ- φ) πρέπει να είναι μεγαλύτερη από **0.055 [m*rad]** μέχρι τη γωνία **$\varphi = 30^\circ$**
 - ✓ Η επιφάνεια **A2** κάτω από την καμπύλη στατικής ευστάθειας (GZ- φ) πρέπει να είναι μεγαλύτερη από **0.09 [m*rad]** μέχρι τη γωνία **$\varphi = \min(40^\circ, \varphi_f)$**
 - ✓ Η επιφάνεια **$A3 = A2 - A1$** πρέπει να είναι μεγαλύτερη από **0.03 [m*rad]**



Εγχειρίδιο Φόρτωσης Πλοίου

- Η ευστάθεια του πλοίου ελέγχεται σε πλήθος καταστάσεων φόρτωσης. Οι υπολογισμοί αποτυπώνονται στο **Εγχειρίδιο Φόρτωσης Πλοίου (Loading Manual)**:
 - ✓ Τυπικές καταστάσεις φόρτωσης:
 - Κατάσταση Αφόρτου Σκάφους (Light Ship Condition)
 - Πλήρες Φορτίου, κατάσταση Απόπλου (Full Load Departure)
 - Πλήρες Φορτίου, κατάσταση Κατάπλου (Full Load Arrival)
 - Κατάσταση Ερματισμού, κατάσταση Απόπλου (Ballast Departure)
 - Κατάσταση Ερματισμού, κατάσταση Κατάπλου (Ballast Arrival)
 - Κατάσταση Δεξαμενισμού (Docking Condition)
 - Κατάσταση Επισκευής Έλικας (Propeller Repair Condition)
 - Επιπλέον τυπικές καταστάσεις μεταφοράς φορτίου και ερματισμού

Στις καταστάσεις απόπλου (departure) το πλοίο είναι πλήρες αναλωσίμων (καύσιμα, λιπαντικά, νερό, τρόφιμα κλπ)

Στις καταστάσεις κατάπλου (arrival) απομένουν στο πλοίο το 10% των αναλωσίμων (πλην λιπαντικών που απομένει το 50%)

Εγχειρίδιο Φόρτωσης Πλοίου

- ✓ Για τις καταστάσεις φόρτωσης που εξετάζονται δίνονται:
 - Το βάρος και η φόρτωση του πλοίου (Δ , LCG, KG, Πίνακες Κυτών & Δεξαμενών)
 - Η ίσαλος πλεύσης (T, t)
 - Τα υδροστατικά μεγέθη (LCB, LCF, KB, BM_T , BM_L , MT1, TP1)
 - Η επίδραση ελευθέρων επιφανειών (Ροπή Ελευθέρων Επιφανειών)
 - Η καμπύλη μοχλοβραχίονα στατικής ευστάθειας GZ-φ
 - Έλεγχος ικανοποίησης κριτηρίων ευστάθειας
- ✓ Για πολεμικά πλοία ελέγχονται λιγότερες καταστάσεις οπότε το εγχειρίδιο φόρτωσης συχνά αποτελεί τμήμα του εγχειριδίου ευστάθειας

Εγχειρίδιο Φόρτωσης Πλοίου

4.5.10 HOMO.SCANLING LOADING DEPARTURE CONDITION

WEIGHT ITEM	FILL %	S.G t/m3	WEIGHT t	V.C.G m	L.C.G m	T.C.G m	FRSM tm
-------------	--------	----------	----------	---------	---------	---------	---------

CONTENTS=Solid cargo

NO.1 CARGO HOLD	100.0	0.7638	10402.3	10.789	66.936	-0.003	0.0
NO.2 CARGO HOLD	100.0	0.7638	11356.0	10.512	38.061	-0.004	0.0
NO.3 CARGO HOLD	100.0	0.7638	10928.0	10.543	9.048	-0.001	0.0
NO.4 CARGO HOLD	100.0	0.7638	11360.9	10.513	-19.961	0.003	0.0
NO.5 CARGO HOLD	100.0	0.7638	10915.1	10.844	-49.303	0.003	0.0
TOTAL CARGO			54962.3	10.637	8.414	-0.000	0.0

CONTENTS=Ballast Water

NO.5 W.B.TK(P)	0.0	1.0250	0.0	0.000	-91.650	0.000	4628.2
NO.5 W.B.TK(S)	0.0	1.0250	0.0	0.000	-91.650	0.000	4628.2

TOTAL BALLAST WATER			0.0	0.000	0.000	0.000	9256.3
----------------------------	--	--	------------	--------------	--------------	--------------	---------------

BUNKERING			2733.2	15.225	-51.141	-0.321	2325.3
------------------	--	--	---------------	---------------	----------------	---------------	---------------

TOTAL DEADWEIGHT			57695.6	10.854	5.593	-0.016	2325.3
-------------------------	--	--	----------------	---------------	--------------	---------------	---------------

LIGHTSHIP			10100.0	12.000	-7.322		
------------------	--	--	----------------	---------------	---------------	--	--

TOTAL DISPLACEMENT			67795.6	11.025	3.669	-0.013	11581.6
---------------------------	--	--	----------------	---------------	--------------	---------------	----------------

DRAFT MEAN	=	13.015 m
DRAFT FORE	=	12.871 m
DRAFT AFT	=	13.159 m
DRAFT EQUIV.	=	13.020 m
TOTAL TRIM	=	-0.287 m
KMT	=	13.579 m
KG	=	11.025 m
GM	=	2.554 m
GGo	=	0.171 m
GoM	=	2.383 m

WATER DENSITY	=	1.025
L.C.B	=	3.651 m
L.C.F	=	-3.080 m
M.T.C	=	796.9 TM/CM
T.P.C	=	57.3 T/CM
HEEL.ANG.	=	-0.3 DEG
PROP. IMMER.	=	212.2 %

STABILITY CALCULATION

Heel angle (deg.)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	50	60
KN (m)	-0.013	-1.172	-2.361	-3.559	-4.767	-5.869	-6.839	-7.721	-8.550	-9.815	-10.538
KGo'sinθ (m)	0.000	0.976	1.944	2.898	3.829	4.732	5.598	6.422	7.197	8.577	9.696
GoZ (M)	-0.013	0.196	0.417	0.661	0.937	1.138	1.242	1.300	1.353	1.238	0.842
Area (m-rad)	0.000	0.008	0.035	0.081	0.151	0.243	0.347	0.458	0.574	0.805	0.950

CRITERIA	REQUIRED	ACTUAL	STATUS
Initial metacentric height (m)	0.150	2.383	OK
GoZ at angle of equal to or greater than 30 deg. (m)	0.200	1.362	OK
Heel angle at Max GoZ value (deg.)	25.0	42.0	OK
under curve, 0 - 30 deg. (m-rad)	0.055	0.347	OK
Area under curve, 0 - 40 deg. or θ is less (m-rad)	0.090	0.574	OK
Area under curve, 30 - 40 deg. or θ is less (m-rad)	0.030	0.227	OK
Flooding angle (deg.)	30.0	60 Over	OK

