

## BILAGA: TEKNISK ANALYS AV LOTSÅTENS KANTRING

### Introduktion

Denna bilaga kompletterar i fråga om båtstabilitet och extern belastning beskrivningen av lotsbåt L-242:s kantring enligt utredningsreferatet "M2017-04 Lotsbåt L-242 (FIN), kantring och förlisning i Finska viken söder om Emsalö 8.12.2017".

Att ett helt fartyg kantrar beror i allmänhet på två omständigheter, antingen försämrad stabilitet eller inverkan av en extern belastning. Fartygets stabilitet kan försämrans av flera orsaker:

- Att fartygets tyngdpunkt förflyttas bort från symmetriplanet orsakar en permanent krängning och försvagad stabilitet. Förskjutning av tyngdpunkten kan bero till exempel på att lasten förflyttas på fartyget.
- Lyftning av last med en egen lyftkran försämrar stabiliteten, eftersom lyftet leder till att tyngdpunkten flyttas uppåt.
- Ansamling av is i fartygets övre konstruktioner orsakar att tyngdpunkten förflyttas i lodrät och vågrät riktning.

Ett fartygs stabilitet kan också påverkas av externa dynamiska faktorer, såsom den rådande sjögången. Till följd av växelverkan mellan fartyget och sjögången uppkommer ett rörelsetillstånd, som i extrema situationer kan leda till att fartyget kantrar. Med kalkyler eller modellprovtekniker är det möjligt att bedöma de vågbelastningar som riktar sig mot fartyget och fartygets rörelser. I beräkningen beaktas belastningarnas och rörelsernas dynamiska karaktär. Antagandet i den allmänt använda beräkningsmetoden är att vågorna är plana och rörelserna små. I så fall är den använda matematiska modellen lineär, och den kan enkelt lösas på frekvensplanet. Lineariteten innebär bland annat att båtens rätande hävarm beskrivits enbart med initialmetacenterrhöjden. Som ett resultat av den beräkning som grundar sig på detta fås överföringsfunktioner rörande fartygets rörelser och belastningar, vilka gör det möjligt att bedöma fartygets rörelser på grund av vågorna.

I en situation där det kan förväntas att fartygets rörelseutrymme är stort och det är nödvändigt att bedöma fartygets stabilitetsförlust i sjögången, behövs en mer avancerad matematisk modell. Modellen ska beakta rörelsedynamiken och den icke-linjära karaktären på växelverkan mellan skrovet och sjögången. Lösningen av denna matematiska modell sker på tidsplanet. Till och med tillämpning av en välutvecklad beräkningsmodell ger inte alltid garantier om ett tillförlitligt resultat i olika typer av fall av förlust av den dynamiska stabiliteten.

I de så kallade andra generationens bestämmelserna om fartygs stabilitet förutsätts förenklade beräkningsmodeller då ett fartygs stabilitet i sjögång bedöms. I granskningen fastställs gungningens parametriska resonans, stabilitetsförlusten på vågtoppen och fartygets ridning på/skärning genom vågen.

Båtar opererar i samma förhållanden som avsevärt större fartyg. Följaktligen är de risker som gäller förlust av stabilitet större hos båtar jämfört med risken för fartyg. Det är väldigt svårt att med en fullständig matematisk modell beskriva beteendet hos en båt som rör sig i snabba och branta vågor. Redan i lugnt vatten ändras båtens stabilitet då den rör sig, eftersom en våg bildas till följd av det dynamiska trycket på grund av hastigheten. Också fartygets färdposition ändras. I extremfall är det möjligt att initialmetacenterrhöjden ( $GM_0$ ) kan sänkas och bli till och med negativ, då fartyget blir instabilt.

Ett ytterligare bidrag till stabilitetsändringen utgörs av fartygets position i en våg som orsakas av externa faktorer (sjövägor, andra fartyg). Att i synnerhet en bred akter lyfts upp från vattnet kan leda till en stor ändring i stabiliteten. Om detta sker i en våg som kommer akterifrån eller diagonalt, föreligger risk för att fartyget skär genom vågen (eng. *broaching to*). Ett tillstånd då stabiliteten varit försvagad under lång tid och ett roder som fungerar dåligt leder till en situation där fartygets kurs ändras plötsligt, hastigheten minskar och den våg som följer fartyget kan fälla det. Följaktligen är det faktum att fartyget förlorar sin stabilitet på vågtoppen och rider på och/eller skär genom vågen omständigheter som kan leda till att ett skepp kantrar.

När båtens beteende bedöms i förhållanden där vågorna är ungefär två gånger längre än båtens längdmått, kan det förmodas att båtens beteende i extremsituationer påverkas i första hand av statiska krafter, det vill säga båtens vikt och det hydrostatiska tryck som riktar sig mot båten, det vill säga lyftet. I beräkningen av det hydrostatiska trycket ska fartygets position och vågprofilen beaktas. Som ett resultat av detta fås en graf som beskriver fartygets statiska balansposition och den rätande hävarmen i en regelbunden våg, det vill säga GZ-kurvan. Ovan beskrivna omständigheter bildar en så kallad kvasistatisk modell. Denna modell tillämpas bland annat vid utvecklingen av stabilitetsregler för nya hela fartyg. Information om ändringarna i den rätande hävarmen möjliggör att man fastställer krängningen till följd av den belastning som orsakas av externa faktorer på ett skepp som befinner sig i en våg.

## **Den matematiska modell som använts i analysen av lotsbåtens kantring**

Den stabilitetsändring i sjögången vilken ledde till att lotsbåt L-242 kantrade har undersökts med NAPA-programmet genom att använda 3D-modellen över fartyget. Analysen har gjorts genom att sätta lotsbåten statiskt i olika vågförhållanden.

### **Antaganden i modellen**

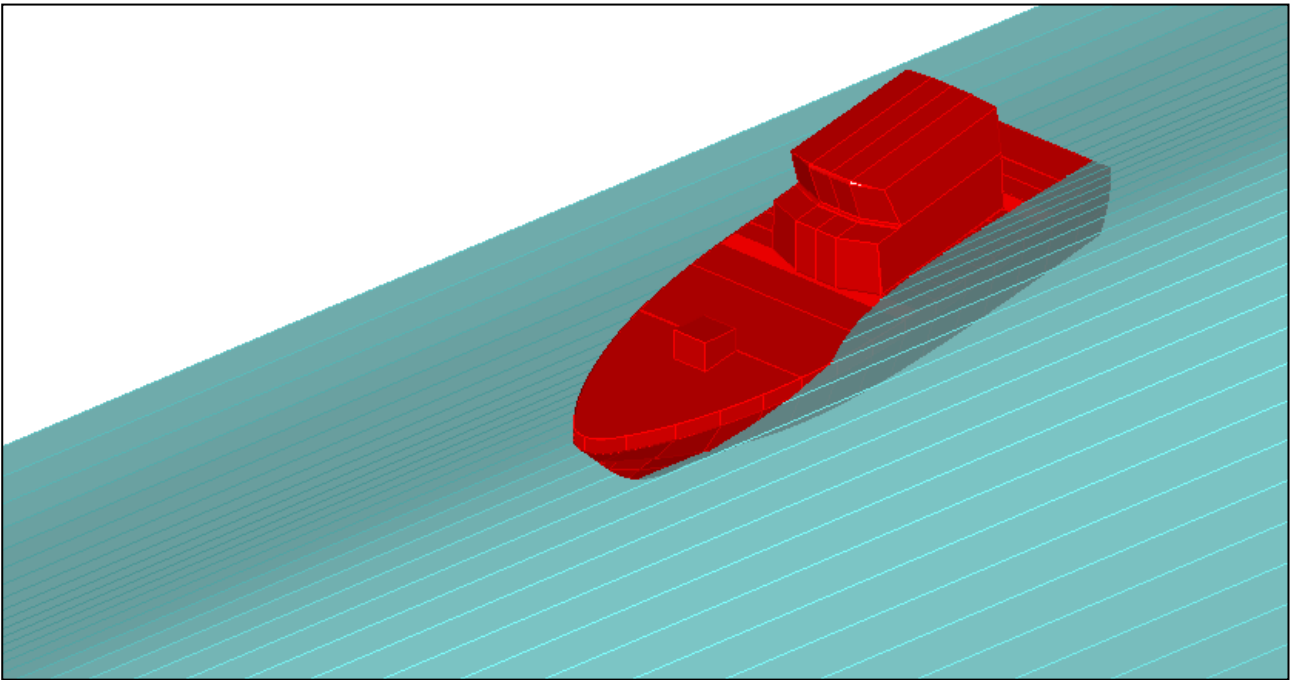
I denna granskning antas det att båten följer och väl ackompanjerar de långa vågor som den möter, då båtens rörelser fastställs av fartygets vikt och hydrostatiska tryck, som beaktar vågens form och fartygets position i vågen. I granskningen beaktas inte tröghets-, diffraktions- och impulsartade vågbelastningar. Inverkan av båtens hastighet på stabiliteten har inte heller beaktats i beräkningen, eftersom den konstaterats varit väldigt låg.

### **Beräkning av flytkraft och stabilitet med NAPA-programmet**

I beräkningen av flytkraften och stabiliteten har möjligheten att räkna stabiliteten i statiska vågor i NAPA-programmet utnyttjats. Denna approach håller på att utvecklas i bland annat de andra generationens stabilitetsföreskrifterna av internationella sjöfartsorganisationen IMO. Vad gäller IMO:s regler om ett fartygs stabilitet beaktar beräkningen fartygets stabilitetsförlust på toppen av en våg. Utöver balanspositionen räknas också fartygets stabilitet i vågen i form av grafen över den rätande hävarmen, GZ-kurvan. Beräkningsmodellen är med andra ord statisk, i vilken enbart balansen mellan fartygets vikt och hydrostatiska tryck granskas i statiska vågor. Det förmodas att krängningen äger rum runt långaxeln.

I beräkningen användes regelbundna sinusformade vågor. De använda vågorna var av olika storlek och längd. Som en parameter i beräkningen användes vågornas mötesvinkel i förhållande till båten. Våglängderna var 40–150 meter och våghöjderna 1,5–4,5 meter, dock på så sätt att våghöjden i förhållande till längden inte översteg 9 % (den allmänt använda gränsen för vågbrytning). De mötesvinklar som granskades var 20–60 grader. 0-grader innebär vågor i motkommande riktning. I varje våg som granskades räknades stabiliteten i olika vågskeden genom att förflytta platsen för vågtoppen med 5 meters axlar längs hela

våghöjden. Det mest kritiska skedet, där stabiliteten är sämst, rapporterades som resultat för den våg som granskades. En exempelbild av en statisk balanssituation, där fartygets stabilitet är på miniminivå har presenterats nedan.



**Bild 1.** Lotsbåt L-242:s statiska balansposition i en sinusformad våg, vars höjd är 3,0 meter, våglängd 40 meter och mötesvinkel 50 grader. (Bild: NAPA Oy)

Trots simplificeringen kan det förmodas att den statiska modellen med tillräcklig precision beskriver hur båten beter sig i långa vågor. Modellen gör det möjligt att uppskatta hur stor belastning fartyget klarar av i form av ett krängande moment utan att kantra. Belastningen kan vara antingen statisk, det vill säga att den tilltar långsamt, eller en dynamisk belastning, som beskrivits med en funktion av stegform.

### **Det båtkrängande moment som rodren orsakade och båtens respons**

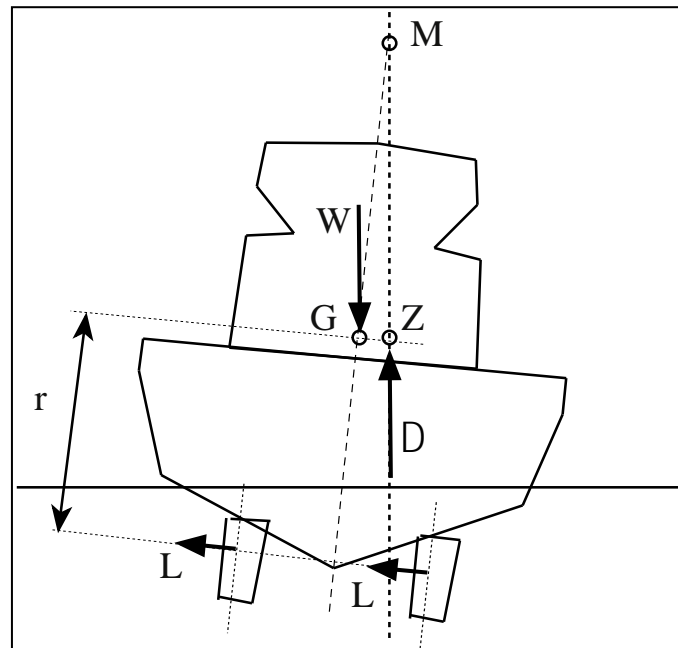
Vad gäller lotsbåt L-242 finns det inte information om när och med vilken hastighet rodret har svängts. Det är möjligt att rodret svängts till vänster på grund av att man försökte styra båten till vänster till det skydd som fartygets skrov gav innan de kritiska vågorna mötte båten. Det är dock väldigt sannolikt att lotsbåten dock först utsatts för försämrad stabilitet under inverkan av vågorna, varefter rodret vänts. Roderkraften har dock haft en väldigt viktig andel i lotsbåtskantringen.

Av de externa båtkrängande momenten är det mest betydande det moment som bildas av de vända rodren (2 roder). I undersökningen av lotsbåt L-242 har det konstaterats att bägge roders vinkel varit cirka 40 grader till vänster. Likaså visar fotografier över aktern på den upp och ner vända båten att rodren varit vända till vänster (bild 2).



**Bild 2.** Lotsbåt L-242 vid sidan av VL Turva innan sjunkningen. Lotsbåtens roder var vända till vänster. Bilden är en bildkapning från den video som filmats från VL Turva. (Bild: Gränsbevakningsväsendet)

Med den matematiska modellen granskas båtens statiska och dynamiska krängning och det krängande moment som rodret framkallat. Den lyftkraft som rodret utvecklar orsakar krängning hos fartyget (bild 3).



**Bild 3.** Roderkraften orsakar krängning hos båten (Obs! Rodren på lotsbåt L-242 var vända till vänster, till följd av vilket båten krängde också till BB-sidan). (Bild: OTKES)

Utöver roderkrafterna och den rätande hävarmen påverkas båten av den hydrodynamiska reaktionskraften och tröghetskraften mot skrovet och en eventuell vindkraft. Tröghetskraften påverkar båten på tyngdpunkt G, det vill säga att den inte genererar något krängande

moment. Enligt Molland<sup>1</sup> kan en hydrodynamisk reaktionskraft lämnas bort från beräkningsmodellen, i synnerhet i fall av ett skrov av V-form. Följaktligen utgörs det båtkrängande momentet av:

$$M_{ulk} = 2Lr, \quad (1)$$

Där  $l$  är rodrets lyftkraft,  $r$  är det lodräta avståndet från rodrets verkningspunkt till båtens tyngdpunkt. Praxis är att visa den externa belastningen med den externa rätande hävarmen enligt följande:

$$l_{ulk} = M_{ulk} / D, \quad (2)$$

där  $D$  är displacementets lyftkraft.

### Statisk belastning

Först behandlas statisk belastning, vilket innebär att rodret vänts relativt långsamt till maximivinkeln eller till en vinkel efter vilken överstegring ägt rum (lösgöring från strömningen), utan att lyftet tilltar ytterligare.

Statisk balans uppnås, om summan av bägge moment är noll, det vill säga att det

$$M_{ulk} + M_{st} = 2Lr - D\bar{GZ} = 0. \quad (3)$$

statiska balansvillkoret (3) uppnås om maximi för den rätande hävarmen är tillräckligt stor, det vill säga att

$$GZ(\max) > l_{ulk}. \quad (4)$$

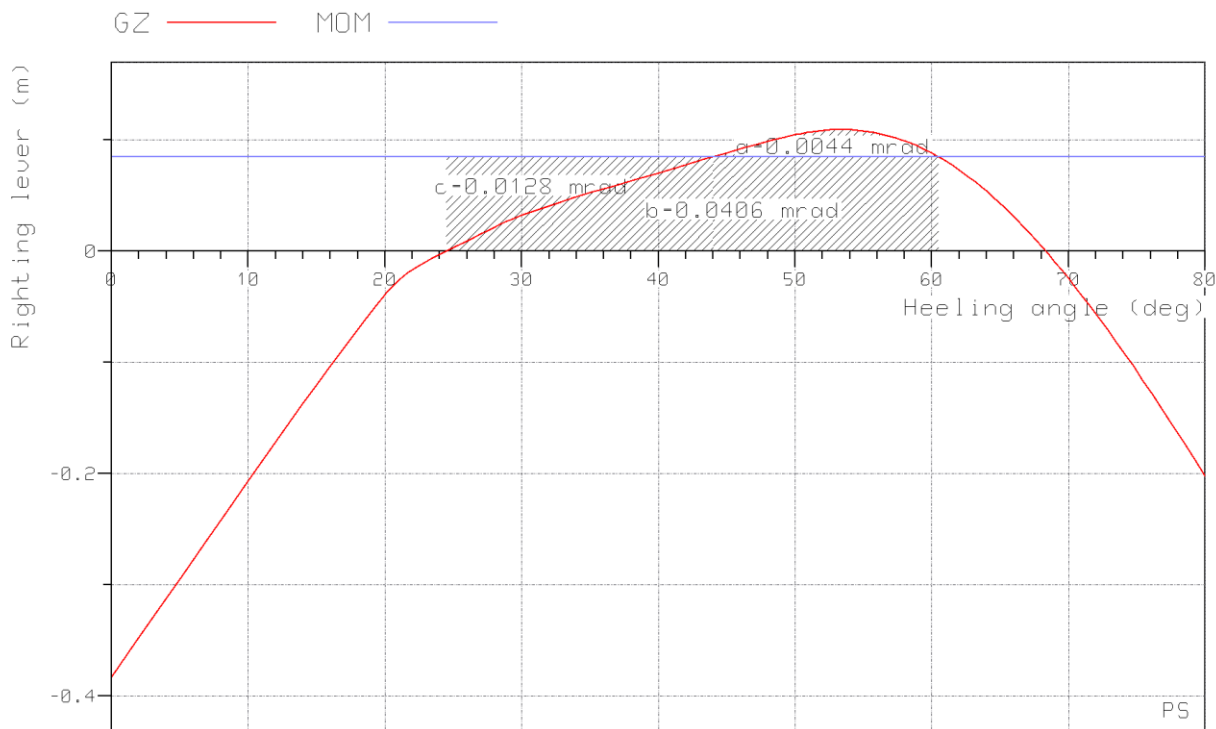
Detta förtydligas av bild 4, med en ritning över GZ-kurvan och grafen över den externa belastningen  $l_{ext}$  (visas som MOM på bilden). I det fall som visas på bilden lutar båten i en vinkel på ungefär 45 grader utan att kantra., trots att den befinner sig i en våg och är föremål för en belastning med statisk inverkan vilken beror på vändningen av rodret.

### Dynamisk belastning

Det andra alternativet för belastning är en axelformad belastning i ett tidsplan, vilken på en kort stund ökar från noll till det slutliga värdet. Denna belastningstyp kallas nedan i detta referat för *dynamisk belastning*, som beskriver belastningen på båten till följd av ett väldigt snabbt roderkommando. Genom att använda GZ-kurvan och det rätande moment som är representativt för den externa belastningen är det möjligt att bedöma om båten klarar av belastningen utan att kantra. Om båten klarar av belastningen, är det möjligt att räkna upp till vilken maximivinkel den tillfälligt gungar. Bedömningen grundar sig på det så kallade begreppet *dynamisk stabilitetsarbetsresa*, som finns i den yta som lämnar under den GZ-kurva som fastställts grafiskt. Denna yta innebär det arbete som fartyget utför då den motarbetar den dynamiska belastningen. På motsvarande sätt har det arbete som den externa belastningen utför fastställs med en yta, som lämnar under den graf över hävarmen vilken beskriver den externa belastningen. Detta visas i form av en graf i bild 4.

---

<sup>1</sup> Molland A.F. Marine Rudders and Control Surfaces. Principles, Data, Design and Applications. Elsevier 2007. ISBN: 978-0-75-066944-3.



**Bild 4.** Grafen över den rätande hävarmen (röd GZ-kurva) för en båt i en sinusformad våg, vars höjd är 3 meter och längd är 40 meter. Mötesvinkeln är 40 grader. Båten klarar inte av den dynamiska belastningen. (Bild: NAPA Oy)

I bild 4 är yta b+c större än a+b, vilket innebär att det arbete som den externa belastningen utför är större än det arbete som båten utför i en situation, där den motarbetar den externa belastningen. Till följd av detta kantraras en båt i en kritisk våg snabbt till följd av inverkan av det vända rodet.

#### Bedömning av roderkraften

Beräkningen av roderkraften följer den modell som Molland<sup>2</sup> lagt fram. I den bedöms maximi för koefficienten för lyftkraften ( $CL_{max}=1.2$ ), den strömningshastighet som propellern inducerat (närmevärde på 20 % av båtens hastighet). Dessutom räknas lyftkraften för ett roder (4.8 kN). Höjddifferensen från roderkraftens verkningspunkt till båtens tyngdpunkt är  $r=1.74$  m och den båtdeplacementvolym som använts i beräkningen är  $20 \text{ m}^3$ . Med dessa utgångsvärden fås ett värde på hävarmen för den externa belastningen vilket uppgår till  $l_{ext}=0.084$  m.

#### Resultat

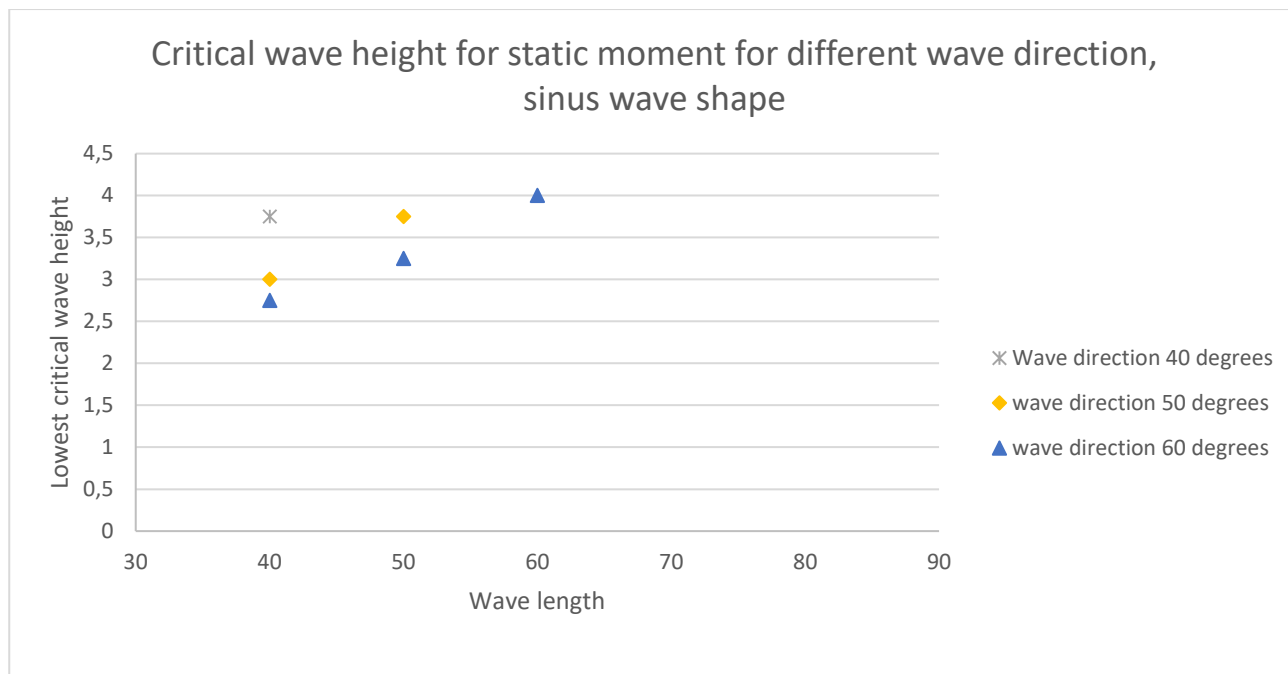
Bild fem visar ett sammandrag av resultaten av den statistiska beräkningen. Av hundratals beräknade fall, har man valt de fall där maximi för längden på båtens rätande moment understiger storleken på det rätande moment som beskriver roderbelastningen, det vill säga fall, där

$$GZ(\max) < l_{ulk}$$

Bild 5 visar att en vågs branthet är en parameter som äventyrar båtens stabilitet. Därtill ses det att en blir allt mer kritisk, ju mer den kommer från sidan. För att den statistiska

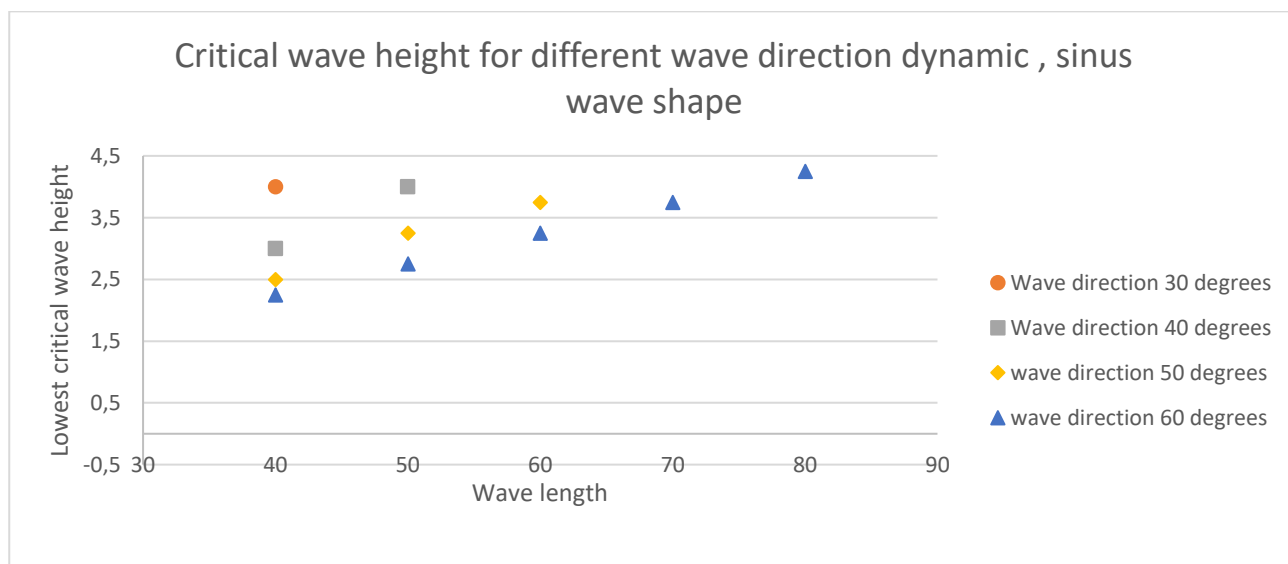
<sup>2</sup> Molland A.F. Marine Rudders and Control Surfaces. Principles, Data, Design and Applications. Elsevier 2007. ISBN: 978-0-75-066944-3.

roderbelastningen ska vara till fara för båten behövs en åtminstone 2.75 m hög våg som samtidigt är väldigt brant samt en kritisk position för båten, i det hänseendet att den statiska roderbelastningen är till fara för båten. Med andra ord, den lägsta våg som orsakar att båten kantrar till följd av den uppskattade roderkraften har fastställts som kritisk.



**Bild 5.** Kritiska vågor för ett roderkommando med statisk inverkan (Bild: NAPA Oy).

Bild 6 visar ett sammandrag av resultaten av den dynamiska granskningen. Som väntat finns det fler kritiska situationer (vågor) och därtill är deras (vågornas) höjder i viss mån lägre. Detta innebär att hastig vändning av rodret är farligare än långsam vändning av rodret.



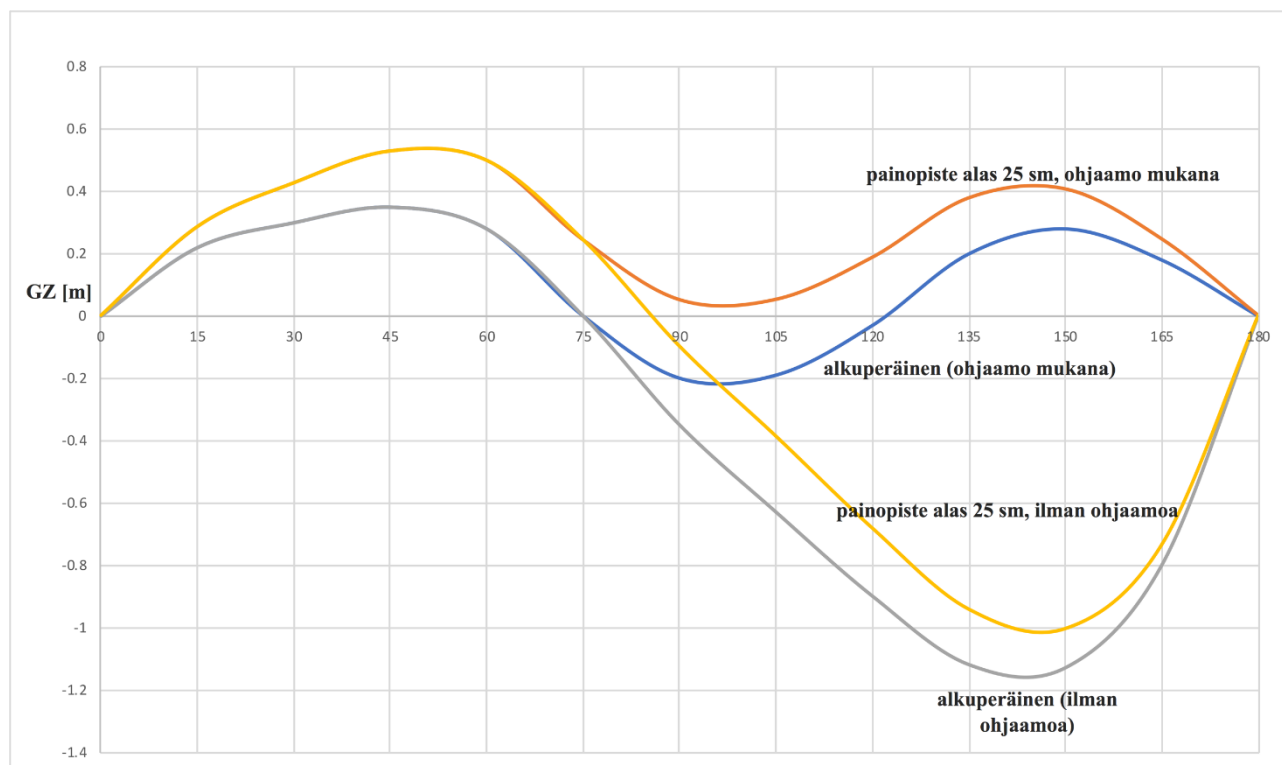
**Bild 6.** Kritiska vågor för ett dynamiskt roderkommando (Bild: NAPA Oy).

Bilderna 5 och 6 visar att det är möjligt att lotsbåt L-242 kantrade till följd av roderkraften i de verkliga vågor som förekom under tidpunkten för olyckan. Ovan presenterade deterministiska granskning bevisar att kantringen påverkats av flera faktorer, vars samtida

förekomst är ett sporadiskt fenomen. Kantring kräver en kritisk våg (längd, höjd och riktning), en kritisk position för båten i vågen och en roderkraft som på samma gång används i styrningen. På grund av växelverkan mellan sjögången och skrovet på Sten Nordic som vände har de brantare vågorna, som eventuellt brutits, avsevärt ökat möjligheten för kantring och eventuellt orsakat att båten kantrat till och med utan roderbelastning.

### Inverkan av höjden på lotsbåt L-242:s tyngdpunkt på den rätande hävarmen

Höjden på tyngdpunkten har stor inverkan på ett fartygs stabilitet. Detta kan visas med den rätande hävarmen, det vill säga GZ-kurvan. På bild 7 har fenomenet visats med två GZ-kurvor.



**Bild 7.** Inverkan av höjden på tyngdpunkten lotsbåt L-242:s GZ-kurva. (Bild: OTKES, material från Finnpilot Pilotage Ab och NAPA Oy)

Bild 7 visar att en sänkning av tyngdpunkten med ungefär 0,25 meter hade gjort lotsbåten självvrätande i ett fall där styrhyttens volym genererar lyftkraft.

### Slutsats

När havsvågorna träffade MT Sten Nordics skrov ändrade de och blev brantare och på samma gång högre. Växelverkan mellan den diagonala sjögången och fartyget i rörelse och de vågor som det vändande fartygets skrov orsakade ledde till periodiska och höga vågor, vars toppar gick i så gott samma riktning som fartygets färdriktning. Därtill rådde en turbulent strömning bakom aktern, vilken orsakats av den roterande propellern, det vända rodet och det svängande skrovet.

Ovan beskrivna omständigheter och de förhållanden som följde av dessa bildade en väldig utmanande situation för den lotsbåt som färdades i fenomenets verkningsområde. Den försvagade stabilitet som orsakades av sjögången bakom fartyget och de krafter som rodet orsakade utgjorde tillsammans omständigheter, som påverkade båtens balansposition på så sätt att den till slut förlorade sin stabilitet och kantrade.