

# LIITE: LUOTSIVENEEN KAATUMISEN TEKNINEN ANALYYSI

## Johdanto

Tämä liite täydentää tutkintaselostuksessa ”M2017-04 Luotsivene L-242 (FIN) kaatuminen ja uppoaminen Suomenlahdella, Emäsalon eteläpuolella 8.12.2017” -esitettyä luotsiveneen L-242 kaatumisen kuvausta veneen vakavuuden ja ulkoisen kuormituksen osalta.

Ehjän aluksen kaatuminen johtuu yleensä kahdesta tekijästä, joko vakavuuden heikentymisestä tai ulkoisen kuorman vaikutuksesta. Aluksen vakavuus voi kärsiä useista syistä:

- Aluksen painopisteen siirtyminen pois symmetriatasosta aiheuttaa pysyvää kallistumaa ja vakavuuden heikkenemistä. Painopisteen siirtyminen voi johtua esimerkiksi lastin siirtymisestä aluksessa.
- Lastin nostaminen omalla nosturilla heikentää vakavuutta, koska nostoa seuraa painopisteen siirtyminen ylöspäin.
- Jään kertyminen aluksen ylärakenteisiin aiheuttaa painopisteen siirtymistä sivu- ja pystysuunnassa.

Aluksen vakavuuteen voivat vaikuttaa myös ulkoiset dynaamiset tekijät, kuten vallitseva aallokko. Aluksen ja meriaallokon vuorovaikutuksesta syntyy liiketila, joka voi ääritilanteessa johtaa aluksen kaatumiseen. Laskennallisesti tai mallikoetekniikkaa käyttäen voidaan arvioida alukseen kohdistuvia aaltokuormia ja aluksen liikkeitä. Laskennassa otetaan huomioon kuormien ja liikkeiden dynaaminen luonne. Yleisesti käytetyn laskentamenetelmän oletuksena on, että aallot ovat loivia ja aluksen liikkeet pieniä. Tällöin käytetty matemaattinen malli on lineaarinen ja helposti ratkaistavissa taajuustasossa. Lineaarisuus tarkoittaa muun muassa, että laivan oikaisevan momentin varsi on kuvattu ainoastaan alkuvaihtokeskuskorkeudella. Tähän perustuvan laskennan tuloksena saadaan aluksen liikkeistä ja kuormista siirtofunktiot, jotka tekevät mahdolliseksi arvioida aalloista johtuvia aluksen liikkeitä.

Tilanteessa, jossa odotettavissa oleva aluksen liiketila on suuri ja on tarpeen arvioida aluksen vakavuuden menettämistä aallokossa, tarvitaan kehittyneempää matemaattista mallia. Mallin on otettava huomioon liikedynamiikan sekä rungon ja aallokon vuorovaikutuksen epälineaarisuudet. Tämän matemaattisen mallin ratkaiseminen tapahtuu aikatasossa. Jopa hyvin kehitettyneen laskentamallin soveltaminen ei aina anna takeita luotettavasta tuloksesta erityyppisissä dynaamisen vakavuuden menettämisen tapauksissa.

Niin sanotuissa toisen sukupolven laivan vakavuutta koskevista säännöissä edellytetään yksinkertaistettuja laskentamalleja arvioitaessa aluksen vakavuutta aallokossa. Tarkastelussa määritellään keinunnan parametrinen resonanssi, vakavuuden menettäminen aallon harjalla ja aluksen ratsastaminen aallolla/leikkaaminen aaltoon.

Veneet toimivat samoissa olosuhteissa kuin niitä huomattavasti suuremmat laivat. Näin ollen veneisiin liittyvät vakavuuden menettämisen riskit ovat laivojen vakavuusriskejä suurempia. Nopean ja jyrkissä aalloissa liikkuvan veneen käyttäytymistä on hyvin vaikea kuvata täydellisellä matemaattisella mallilla. Jo pelkästään tyynessä vedessä veneen vakavuus muuttuu sen liikkuessa, koska nopeudesta johtuvan dynaamisen paineen seurauksena muodostuu aalto ja aluksen kulkuasento muuttuu. Äärimmillään alkuvaihtokeskuskorkeus ( $GM_0$ ) saattaa alentua jopa negatiiviseksi, jolloin alus muuttuu epävakaaksi.

Oman lisänsä vakavuuden muutokseen tuo aluksen asento ulkoisten tekijöiden muodostamissa aalloissa (meriaalto, muut alukset). Varsinkin leveän perän nousua vedestä saattaa seu-

rata suuri muutos vakavuudessa. Jos tämä tapahtuu myötä- tai sivumyötäisessä aallossa, vaarana on niin sanottu leikkaaminen aaltoon (engl. *broaching to*). Pitkäkestoinen heikentyneen vakavuuden tila ja heikosti toimiva peräsin aiheuttavat tilanteen, jossa aluksen kurssi äkillisesti muuttuu, nopeus pienenee ja alusta seuraava aalto saattaa kaataa sen. Näin ollen vakavuuden menettäminen aallon harjalla ja aluksen ratsastaminen aallolla ja/tai leikkaaminen aaltoon ovat aluksen kaatumiseen johtavia vaaratekijöitä.

Arvioitaessa veneen käyttäytymistä olosuhteissa, joissa aallot ovat noin kaksi kertaa veneen pituusmittaa pidempiä, voidaan olettaa, että veneen käyttäytymiseen ääritilanteissa vaikuttavat ensisijaisesti staattiset voimat, eli veneen paino ja veneeseen kohdistuva hydrostaattinen paine eli noste. Hydrostaattisen paineen laskennassa on otettava huomioon aluksen asento ja aallon profiili. Tulokseksi saadaan aluksen staattisen tasapainoasennon ja vakavuutta kuvaavan oikaisevan momenttivarren kuvaaja säännöllisessä aallossa, eli ns. GZ-käyrä. Edellä kuvatut tekijät muodostavat ns. kvasistaattisen mallin. Tätä mallia sovelletaan mm. kehitettäessä uusia ehjän aluksen vakavuussäntöjä. Tieto oikaisevan momenttivarren muutoksista mahdollistaa aallossa olevan aluksen kallistuman määrittämisen ulkoisten tekijöiden aiheuttamien kuormien seurauksena.

## **Luotsiveneen katumisen analysoinnissa käytetty matemaattinen malli**

Luotsiveneen L-242 kaatumiseen johtuva vakavuuden muutosta aallokossa on tutkittu NAPA-ohjelmistolla käyttäen aluksesta saatua 3D-mallia. Analyysi on tehty asettamalla luotsivene staattisesti erilaisiin aalto-olosuhteisiin.

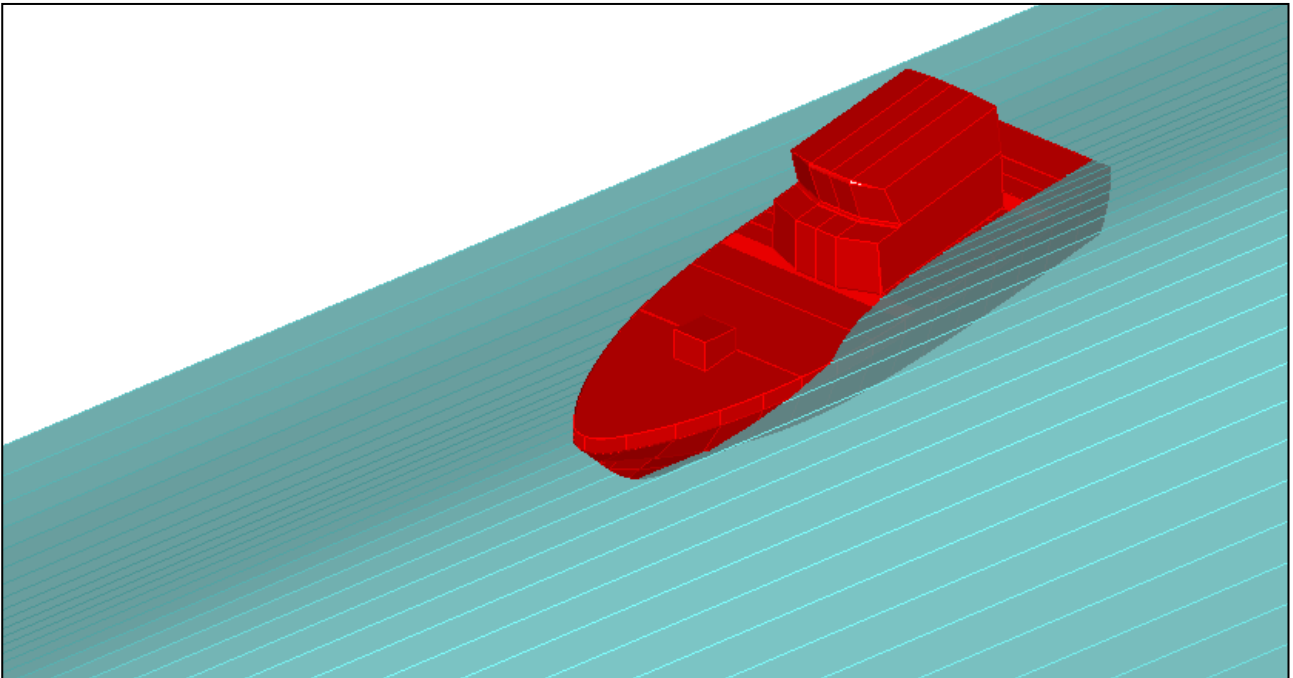
### **Mallin oletukset**

Oletuksena tässä tarkastelussa on, että vene seuraa ja myötäilee hyvin kohtaamiaan pitkiä aaltoja, jolloin veneen liikkeitä määräävät aluksen paino ja hydrostaattinen paine, joka ottaa huomioon aallon muodon ja aluksen asennon aallossa. Tarkastelussa ei oteta huomioon hitaus-, diffraktio- ja iskumaisia aaltokuormia. Veneen nopeuden vaikutusta vakavuuteen ei myöskään oteta huomioon laskennassa, koska se on todettu hyvin pieneksi.

### **Kelluvuuden ja vakavuuden laskenta NAPA-ohjelmistolla**

Kelluvuuden ja vakavuuden laskennassa on käytetty apuna NAPA-ohjelmistossa olevaa mahdollisuutta laskea vakavuutta staattisessa aallossa. Tämä lähestymistapa on muun muassa kehitteillä olevissa kansainvälisen merenkulkujärjestö IMO:n toisen sukupolven vakavuuskriteereissä. Laskenta noudattaa IMO:n laivan vakavuutta käsittelevien sääntöjen osalta laivan vakavuuden menettämistä aallon harjalla. Tasapainotilan lisäksi lasketaan myös aluksen vakavuutta aallossa oikaisevien momenttivarrien muodostaman kuvaajan, GZ-käyrän, muodossa. Laskentamalli on siis staattinen, jossa tarkastellaan ainoastaan aluksen painon ja hydrostaattisen paineen tasapainotilaa staattisessa aallossa. Aluksen kallistumisen oletetaan tapahtuvan pitkittäisen akselin ympäri.

Laskennassa käytettiin säännöllisiä sinimuotoisia aaltoja. Käytetyt aallot olivat eri korkuisia ja eri pituisia. Laskennan yhtenä muuttujana (parametrina) käytettiin aaltojen kohtauskulmaa veneeseen nähden. Aaltojen pituudet olivat 40-150 metriä ja korkeudet 1,5-4,5 metriä, kuitenkin niin, ettei aallon korkeus suhteutettuna pituuteen ylittänyt 9 % (yleisesti käytetty aallon murtumisraja). Tarkasteltavat kohtauskulmat olivat 20-60 astetta. 0-astetta tarkoittaa vasta-aaltoa. Jokaisessa tarkasteltavassa aallossa vakavuus laskettiin eri aallonvaiheissa siirtämällä aallon harjan paikkaa 5 metrin askeleilla koko aallon pituuden matkalla. Kriittisin aallon vaihe, jossa vakavuus on heikoin, raportoitiin tuloksena tarkasteltavasta aallosta. Esimerkkikuva staattisesta tasapainotilanteesta, jossa aluksen vakavuus on minimissä, on esitetty alla.



**Kuva 1.** Luotsiveneen L-242 staattinen tasapainoasento sinimuotoisessa aallossa, jonka korkeus on 3,0 m, aallonpituus 40 metriä ja kohtauskulma 50 astetta. (Kuva: NAPA Oy)

Yksinkertaistamisesta huolimatta, staattisen mallin voidaan olettaa kuvaavan riittävällä tarkkuudella veneen käyttäytymistä pitkissä aalloissa. Malli tekee mahdolliseksi arvioida, kuinka suurta kuormaa kallistavan momentin muodossa alus pystyy ottamaan vastaan kaatumatta. Kuormana voi olla joko staattinen, eli hitaasti kasvava, tai dynaaminen kuorma, joka on kuvattu askelmuotoisella funktiolla.

### **Peräsimien aiheuttama venettä kallistava momentti ja veneen vaste**

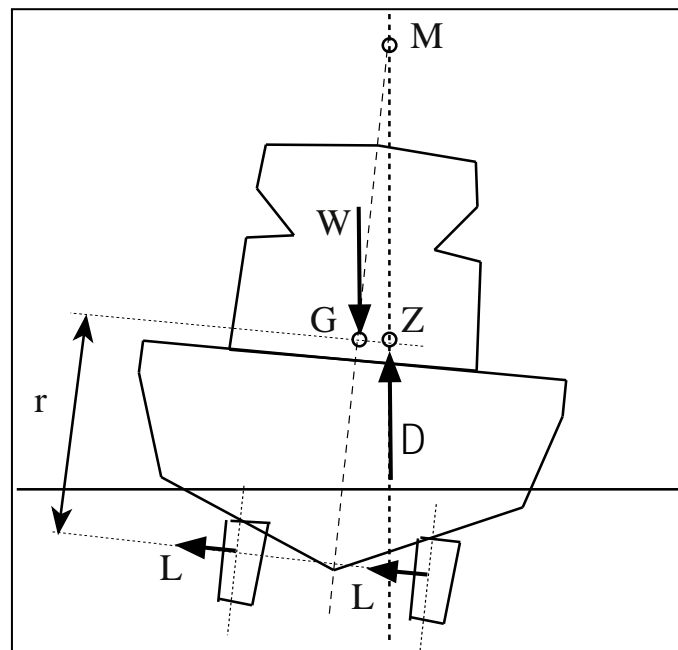
Luotsiveneen L-242:n osalta ei ole tietoa, milloin ja millä nopeudella ruoria on käännetty. On mahdollista, että ruori oli käännetty vasempaan, koska venettä pyrittiin ohjaamaan vasemmalle laivan rungon tarjoamaan suojaan ennen kuin kriittiset aallot ovat kohdanneet veneen. Hyvin todennäköisesti luotsivene on kuitenkin ensin alistunut aaltojen vaikutuksesta heikentyneen vakavuuden tilaan, jonka jälkeen ruoria on käännetty. Peräsinvoimalla on kuitenkin ollut hyvin tärkeä osuus luotsiveneen kaatumisessa.

Ulkoisista venettä kallistavista momenteista merkittävin on käännettyjen peräsinten (2 peräsintä) muodostama momentti. Luotsiveneen L-242:n tutkinnassa on todettu, että molempien peräsinten kulma on ollut noin 40 astetta vasemmalle. Samoin valokuva ylösalaisin kaatuneen veneen perästä osoittaa, että peräsimet ovat olleet kääntyneinä vasempaan (kuva 2).



**Kuva 2.** Luotsivene L-242 VL Turvan kyljessä ennen uppoamista. Luotsiveneen peräsimet ovat kääntyneinä vasempaan. Kuva on kuvakaappaus VL Turvalla kuvatusta videosta. (Kuva: Rajavartiolaitos)

Matemaattisen mallin avulla tarkastellaan veneen staattista ja dynaamista kallistumista sekä peräsimen synnyttämää kallistavaa momenttia. Peräsimen kehittämä nostovoima aiheuttaa alukselle kallistumaa (kuva 3).



**Kuva 3.** Peräsinvoima aiheuttaa veneen kallistumista (Huom. luotsiveneen L-242:n peräsimet olivat kääntyneinä vasempaan, jonka seurauksena vene kallistui myös BB-puolelle). (Kuva: OTKES)

Peräsinvoimien ja oikeasevan momentin lisäksi veneeseen vaikuttavat runkoon kohdistuva hydrodynaaminen reaktivoima ja hitausvoima sekä mahdollinen tuulikuorma. Hitausvoima

vaikuttaa veneen painopisteessä G, eli se ei tuota kallistavaa momenttia. Mollandin<sup>1</sup> mukaan hydrodynaamisen reaktivoiman voi jättää pois laskentamallista varsinkin V-muotoisen rungon tapauksessa. Näin ollen veneettä kallistava momentti on:

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

jossa L on peräsimen nostovoima, r on korkeussuuntainen etäisyys peräsimen vaikutuspisteestä veneen painopisteeseen. Ulkoisen kuormituksen on tapana esittää ulkoisen kuormituksen momenttivarren avulla seuraavaksi:

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

jossa D on uppouman nostovoima.

#### *Staattinen kuormitus*

Ensin käsitellään staattista kuormitusta, joka tarkoittaa, että ruoria on käännetty suhteellisen hitaasti maksimikulmaan tai kulmaan, jonka jälkeen on tapahtunut sakkaus (virtauksen irtaantuminen) eikä noste kasvanut enää.

Staattinen momenttien tasapaino toteutuu, jos molempien momenttien summa on nolla, eli

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

Staattinen tasapainoehto (3) toteutuu jos oikeasevan momenttivarren maksimi on tarpeeksi suuri, eli

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

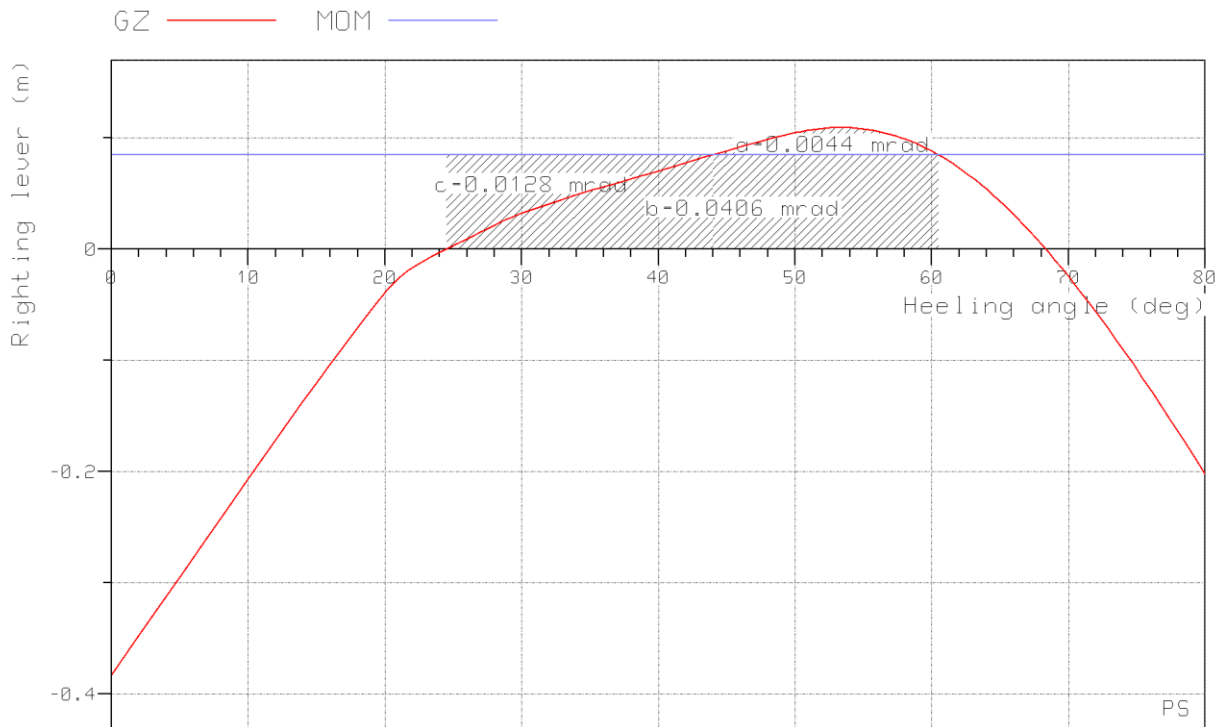
Asiaa selventää kuva 4, jossa on piirretty GZ-käyrä ja ulkoisen kuormituksen kuvaaja  $l_{ulk}$  (kuvassa merkitty MOM). Kuvassa esitetyssä tapauksessa aallokossa oleva vene, johon kohdistuu staattisesti vaikuttava peräsimien kääntämisestä johtuva kuormitus, kallistuu kulmaan noin 45 astetta, eikä kaadu.

#### *Dynaaminen kuormitus*

Toinen vaihtoehto kuormitukselle on aikatasossa tapahtuva askelmuotoinen kuormitus, joka kasvaa hetkessä nollassa lopulliseen arvoonsa. Tätä kuormitustyyppiä kutsutaan jatkossa tässä selostuksessa *dynaamiseksi kuormitukseksi* ja sillä kuvataan kuormaa, joka aiheutuu veneelle hyvin nopean ruorikomennon seurauksena. Käyttäen GZ-käyrää ja ulkoista kuormitusta edustavaa momenttivarretta voidaan arvioida kestäkö vene kaatumatta. Jos vene kestää kuormitusta, voidaan laskea mihin maksimikulmaan se hetkellisesti heilahtaa. Arviointi pohjautuu niin sanotun *dynaamisen vakavuustyömatkan* käsitteeseen, joka on graafisesti määriteltä GZ-käyrän alle jäävällä pinta-alalla. Tämä pinta-ala tarkoittaa työtä, jota alus tekee, kun se vastustaa dynaamista kuormitusta. Vastaavasti työ, jota ulkoinen kuormitus tekee, on määriteltä pinta-alalla, joka jää ulkoista kuormitusta kuvaavan momenttivarren kuvaajan alle. Graafisesti tämä on esitetty kuvassa 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.



**Kuva 4.** Oikaisevan momenttivarren kuvaaja (punainen GZ-käyrä) veneellä sinimuotoisessa aallossa, jonka korkeus on 3.5 metriä ja pituus 40 metriä. Kohtaamiskulma on 40 astetta. Vene ei selviä dynaamisesta kuormasta. (Kuva: NAPA Oy)

Kuvassa 4 pinta-ala  $b+c$  on suurempi kuin  $a+b$ , mikä tarkoittaa, että ulkoisen kuormituksen tekemä työ on suurempi kuin veneen tekemä työ tilanteessa, jossa se vastustaa ulkoista kuormitusta. Tämän seurauksena kriittisessä aallossa oleva vene kaatuu nopeasti kääntyneen ruorin vaikutuksesta.

#### Peräsinvoiman arviointi

Peräsinvoiman laskenta seuraa Mollandin<sup>2</sup> esittämää mallia. Siinä arvioidaan nostovoiman kertoimen maksimia ( $CL_{max}=1.2$ ), potkurin indusoimaa virtausnopeutta (likiarvo 20 % veneen nopeudesta) ja lasketaan yhden peräsimen nostovoima (4.8 kN). Korkeusero peräsinvoiman vaikutuspisteestä veneen painopisteeseen on  $r=1.74$  m ja laskennassa käytetty veneen upouman tilavuus  $20$  m<sup>3</sup>. Näillä lähtöarvoilla saadaan ulkoisen kuormituksen momenttivarreksi  $l_{ulk}=0.084$  m.

#### Tulokset

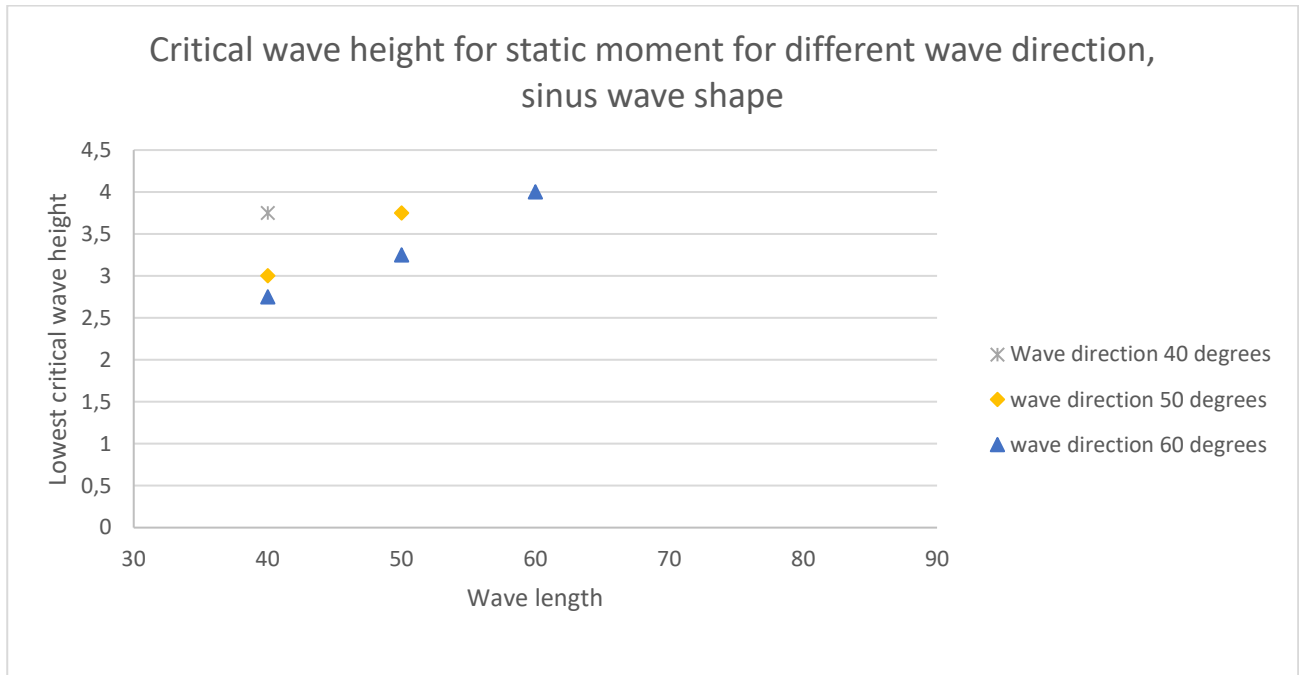
Kuvassa viisi on esitetty yhteenveto staattisen laskennan tuloksista. Sadoista lasketuista tapauksista on valittu tapaukset, joissa veneen oikaisevan momenttivarren pituuden maksimi alittaa peräsienien kuormitusta kuvaavan momenttivarren suuruuden, eli tapaukset, joissa

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

Kuvasta 5 nähdään, että aallon jyrkkyys on tekijä, joka vaarantaa veneen vakavuutta. Lisäksi nähdään, että aalto muuttuu kriittisemmäksi mitä enemmän se tulee sivulta. Tarvitaan aina-

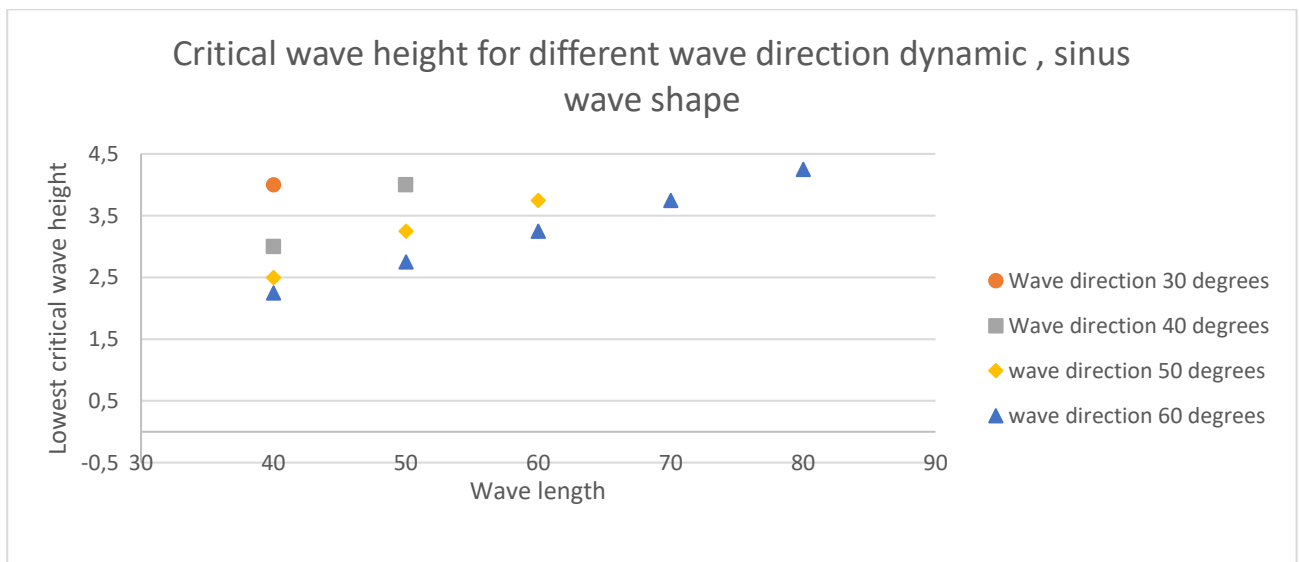
<sup>2</sup> Molland A.F. Marine Rudders and Control Surfaces. Principles, Data, Design and Applications. Elsevier 2007. ISBN: 978-0-75-066944-3.

kin 2.75 m korkea ja samalla hyvin jyrkkä aalto sekä veneen kriittinen asema siinä, jotta staattisesta peräsinkuormasta olisi varaa veneelle. Toisin sanoen, kriittiseksi on määritelty alin aalto, joka aiheuttaa veneen kaatumisen arvioidun peräsinvoiman vaikutuksesta.



**Kuva 5.** Kriittiset aallot staattisesti vaikuttavalle peräsinkomennolle (Kuva: NAPA Oy).

Kuvassa 6 on esitetty yhteenveto dynaamisen tarkastelun tuloksista. Kuten on voitu odottaa, kriittisiä tilanteita (aalloja) on enemmän, ja lisäksi niiden (aaltojen) korkeudet ovat jossakin määrin pienempiä. Tämä tarkoittaa, että nopea ruorin kääntäminen on vaarallisempi kuin hitaasti toteutettu ruorin kääntö.



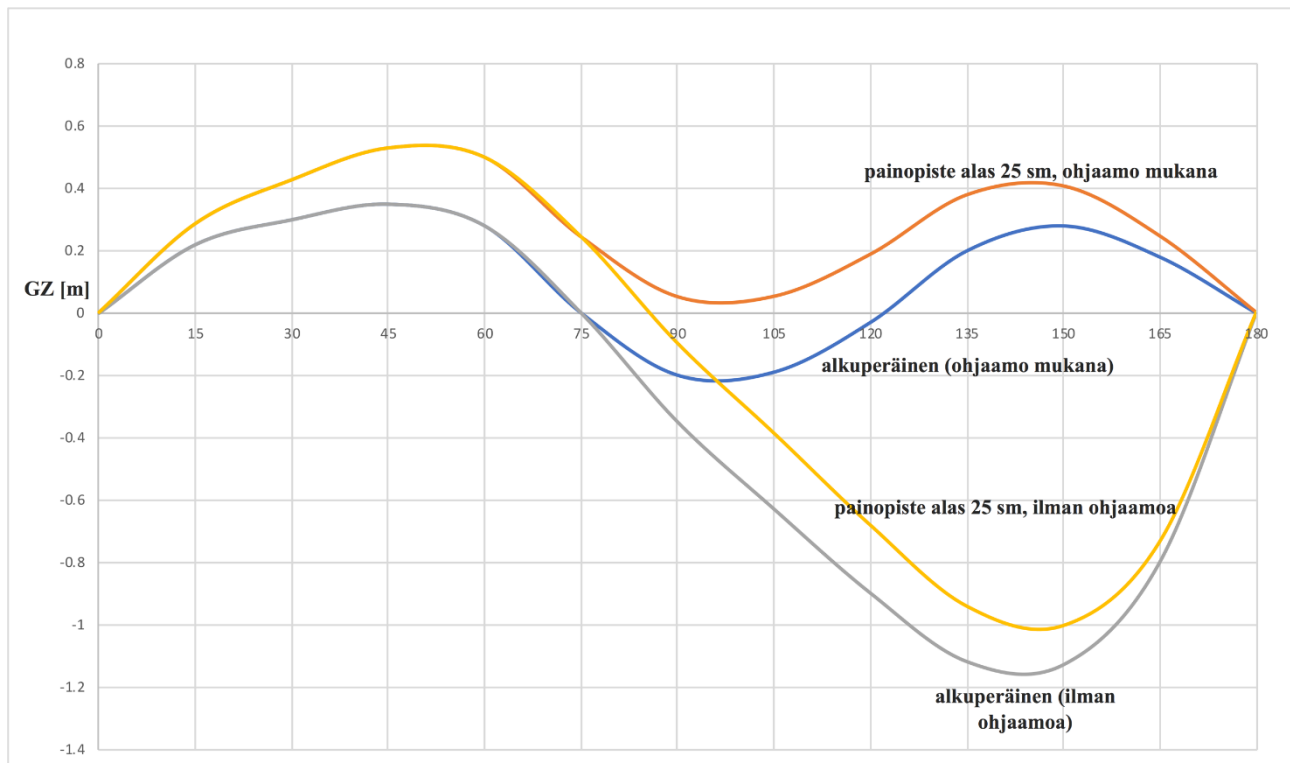
**Kuva 6.** Kriittiset aallot dynaamiselle peräsinkomennolle (Kuva: NAPA Oy).

Kuvista 5 ja 6 nähdään, että todellisissa onnettomuuden aikana esiintyneissä aalloissa luotsivene L-242 saattoi kaatua ruorivoiman seurauksena. Yllä esitetty deterministinen tarkastelu

todistaa, että kaatumiseen ovat vaikuttaneet useat eri tekijät, joiden samanaikainen esiintyminen on satunnainen ilmiö. Kaatumiseen tarvitaan kriittinen aalto (pituus, korkeus ja suunta), veneen kriittinen asento aallossa ja samanaikaisesti ohjauksessa käytetty ruorivoima. Meriaallokon ja kääntyvän Sten Nordicin rungon vuorovaikutuksesta johtuva aaltojen jyrkentymisen ja mahdollinen murtuminen ovat kasvattaneet kaatumisen todennäköisyyttä huomattavasti ja mahdollisesti aiheuttanut veneen kaatumisen jopa ilman ruorikuormaa.

### Luotsiveneen L-242 painopisteen korkeuden vaikutus oikaisevaan momenttivarteen

Painopisteen korkeudella on suuri vaikutus aluksen vakavuuteen. Tämä voidaan esittää oikaisevan momenttivarren, eli GZ-käyrän avulla. Kuvassa 7 ilmiö on esitetty kahden GZ-käyrän avulla.



**Kuva 7.** Painopisteen korkeuden vaikutus luotsiveneen L-242 GZ-käyrään. (Kuva: OTKES, aineistot Finnipilot Pilotage Oy ja NAPA Oy)

Kuvasta 7 nähdään, että painopisteen alentaminen noin 0.25 metrillä olisi tehnyt luotsiveneestä itseoikaisevan tapauksessa, jossa ohjaamon tilavuus tuottaa nostovoimaa.

### Johtopäätös

Meriaaltojen törmätessä MT Sten Nordicin runkoon ne muuttuivat jyrkemmäksi kasvattaen samalla korkeuttaan. Sivuvastaisen meriaallokon ja kääntyvän aluksen rungon aiheuttamien aaltojen vuorovaikutus synnyttivät aluksen perään jaksollisia jyrkkiä ja korkeita aaltoja, joiden harjat olivat lähes yhdensuuntaisia aluksen kulkusuunnan kanssa. Lisäksi aluksen perässä vaikutti toimivan potkurin, käännetyin peräsimen ja kääntyvän rungon aiheuttama pyörteinen virtaus.

Edellä kuvatut tekijät ja niistä seuranneet olosuhteet muodostivat erittäin haastavan tilanteen ilmiön vaikutusalueella kulkeneelle luotsiveneelle. Laivan perässä vallitsevan aallokon aiheuttama vakavuuden heikkeneminen sekä peräsimen aiheuttamat voimat olivat yhdessä tekijöitä, jotka vaikuttivat veneen tasapainotilaan siten, että se lopulta menetti vakavuutensa ja kaatui.