



## Tutkintaselostus

B 2/1997 M

### **Proomu CARAn kaatuminen Raahen edustalla 25.5.1997**

Tämä tutkintaselostus on tehty turvallisuuden parantamiseksi ja uusien onnettomuuksien ennalta ehkäisemiseksi. Tässä ei käsitellä onnettomuudesta mahdollisesti johtuvaa vastuuta tai vahingonkorvausvelvollisuutta. Tutkintaselostuksen käyttämistä muuhun tarkoitukseen kuin turvallisuuden parantamiseen on vältettävä.



## TIIVISTELMÄ

Terramare Oy:n itsekulkeva palkoproomu ms CARA kaatui saman yhtiön Raahen sataman ruoppausyömaalla matkalla ruoppaaja KOURA II:lta vesiläjitysalueelle sunnuntaina 25.5.1997 noin klo 14:10. Terramaren suorittama Raahen Lapaluodon sataman ruoppausurakka oli lopuillaan ja onnettomuuspäivänä suoritettiin satama-altaan viimeistelyruoppauksia. Aluksen lastina oli vellimäistä ruoppausmassaa. Lastia kuvailtiin jälkepäin seuraavasti: ”oikein vetistä liejua, myös paljon vettä, lieju hyvin höllyvää” tai ”liejuista savea”. Aluksen päällikön vastuulla oli lastiksi otettavan massan määrästä päättäminen kuten myös lastimerkin noudattaminen.

CARA oli tehnyt matkoja ruoppaajalta läjitysalueelle noin kerran tunnissa ympäri vuorokauden. Ruoppaajan kuljettaja ja sen lastaaja muistavat CARAn olleen hieman vasemmalle kallellaan sen lähtiessä onnettomuusmatkalle kohti läjitysalueita. Luotsit, jotka olivat tarkkailleet proomun liikumisia, sen sijaan eivät kauempana olevalta luotsiasemalta havainneet aluksella kallistumaa tai muutakaan erikoista.

Onnettomuusmatkalla aluksella oli vain ohjaaja, jolla oli erittäin paljon kokemusta vastaavanlaisista töistä. Hän oli aloittanut työt Terramaren edeltäjällä jo vuonna 1964. CARA irrottautui ruoppaajasta noin kello 14:05. Proomu kaatui joko käänöksessä tai välittömästi sen jälkeen. Kaatumisella ei ollut silminnäkijöitä. Pelastustoimet käynnistyivät välittömästi, koska pinnalla ylösalaisin ollut proomu huomattiin lähellä sijaitsevalta Raahen luotsiasemalta kello 14:12. Ohjaaja menehtyi aluksen ohjaamoon, josta sukeltaja löysi hänet seuraavana päivänä.

Kaarreaajosta johtuva aluksen kallistuminen aloitti kaatumiseen vasemmalle johtaneen tapahtuman. Aluksella oli muutaman asteen kallistuskulman jälkeen negatiivisen vakavuuden alue, jolloin kallistuskulma kasvoi ilman ulkoista kallistavaa momenttia. Samalla kallistumisnopeus kiihtyi. Kallistuminen aiheutti nopeutuvan massan pintaosan siirtymisen ja kallistuman lisääntyessä myös osa kiinteämmistä lastinosista siirtyi ja keot alkoivat tasoittua sortumalla. Kun kallistuskulma ylitti noin 25 astetta, lastia alkoi syöksyä ruuman reunan yli.

Massan siirtyminen ei sinällään, jos se olisi tapahtunut hitaasti, olisi kaatanut alusta, koska osa lastista olisi valunut yli laidan ohuena kerroksena sivukannelle ja mereen. Sen sijaan lasti ”romahti”, eli siirtyi ruumassa vaakatasoon kierähtämällä. Nopea kallistuminen aiheutti massan liikkeellelähden paksuna kerroksena. Lastin syöksyessä ruuman reunan yli suureholla nopeudella se aiheutti reaktivoiman, joka kasvatti kallistavaa momenttia. Kallistumisnopeus kiihtyi niin suureksi, että alus jatkoi liikettä omalla hitaudellaan kaatumiseen saakka. Onnettomuuden syy oli lastin vellimäisyys ja sen määrä. Laskelmien perusteella aluksen kaatuminen hyvin vellimäisellä lastilla on mahdollista jo keskisyvyydellä 2,27 m, joka alittaa lastimerkkisyvyyden (liikennealue kotimaa I) noin 16 senttimetrillä.



## THE CAPSIZING OF SELF-PROPELLED BARGE AT RAAHE 25.5.1997

### SUMMARY

The self-propelled, self-unloading barge ms CARA capsized at the dredging work area off the harbour of the city of Raahen in north-western Finland on Sunday May 25<sup>th</sup> 1997 at about 14:10. The barge, which is owned by dredging company Terramare Oy, was on its way from the dredger KOURA II to the offloading area.

The dredging work by Terramare Oy was nearing completion at Lapaluoto Harbour in Raahen at the date of the accident and the finishing dredging was going on in the harbour basin.

As the dredging was in final stage, the dredged cargo material was watery soil. The material was described as being "very soft mud including much water". It was the skipper's responsibility to decide about the amount of cargo carried by the barge as well as to observe the loadline mark.

CARA had made trips from the dredger to the offloading area about once every hour through day and night. The driver of the dredger and the person who loaded the barge remember that it had a slight heeling angle to port when it embarked towards offloading area. The pilots at the nearby pilot station had been watching the movements of the barge, but they did not notice anything unusual, such as heel, on this trip.

When the accident occurred, only the skipper of the barge was onboard. The skipper was very experienced in this work. He had started working for the predecessor of the company already in 1964. CARA departed from the dredger at about 14:05. The barge capsized either in a turn or immediately after it. There were no eye-witnesses for the accident. The rescue work was started immediately, because the upturned floating barge was observed by a pilot from the Raahen pilot station at 14:12. The skipper died and his body was found in the wheelhouse by a diver on the following day.

Heel of the vessel initiated by a turn led to the capsize to port. The vessel had a negative region in the stability from about six degrees of heel. In this region the heel increased without an outside heeling moment. The rate of heel accelerated simultaneously. The heel set the upper layer of the cargo to accelerating motion and with the larger heeling angle also part of the more solid cargo shifted and the stacks started to even out. When the heeling angle exceeded about 25 degrees, the cargo started flowing out to the sea from the hold.

The shift of the cargo as such, if it had happened slowly, would not have capsized the vessel, because part of the cargo would have flowed out onto the side deck and to the sea as a thin layer. Instead the cargo "collapsed" or shifted even in rotary motion. The fast heeling initiated the motion of the cargo mass as thick layer. This outflowing cargo, on the other hand, caused a reaction force, which increased the heeling moment. The heeling motion accelerated to so high a value that the vessel continued capsizing until it was upside down. Analysis showed that the capsizing was caused by the fluidity and the amount of the cargo. According to the calculations the capsizing with a very muddy cargo is possible with a mean draft of 2,27 metres, which is 16 centimetres below the permissible national loadline (traffic area domestic I).



## SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	I
SUMMARY.....	II
1 ONNETTOMUUDEN YLEISKUVAUS JA TUTKINTA .....	1
1.1 Alus 1	
1.1.1 Yleistiedot.....	1
1.1.2 Aluksen rekisteriasiakirjat.....	3
1.1.3 Vakavuusasiakirjat .....	3
1.1.4 Miehitys ja liikennerajoitukset.....	3
1.1.5 Ohjaamo ja sen laitteet.....	3
1.2 Onnettomuustapahtumat .....	4
1.2.1 Sääolosuhteet .....	4
1.2.2 Ruoppaus- ja läjitysalueet .....	4
1.2.3 Onnettomuusmatka .....	5
1.3 Pelastustoimet.....	7
1.3.1 Meripelastusjärjestelmä .....	7
1.3.2 Ihmishengen pelastaminen .....	7
1.3.3 Aluksen pelastaminen.....	9
1.3.4 Vauriot ja hallintalaitteiden asennot .....	9
1.4 Onnettomuuden tutkimus.....	10
1.4.1 Tutkintalautakunnan asettaminen .....	10
1.4.2 Onnettomuustutkinnan vaiheet .....	10
1.4.3 Onnettomuustutkinnassa tehdyt erityistarkastelut .....	10
1.4.4 Tutkinnasta annettu lausunto .....	11
2 ANALYYSI.....	13
2.1 Viranomaisohjeet ja määräykset ruoppauskuljetuksista.....	13
2.1.1 Kotimaanliikenteen lastimerkki ja vakavuusmääräykset.....	13
2.1.2 Muita kansainvälisiä säädöksiä ja ohjeita .....	14
2.2 Yhtiön omat turvallisuusohjeet.....	14
2.3 Lastaaminen ja lastin laatu .....	15
2.4 Vakavuusanalyysi .....	18
2.4.1 Staattiset vakavuuslaskelmat.....	18
2.4.2 Kallistavat herätteet.....	22
2.4.3 Dynaamiset vakavuustarkastelut .....	23



2.5	CARAn kaatuminen ja yhteenveto vakavuustarkastelun tuloksista .....	27
2.6	Muut vakavuuslaskelmat .....	30
2.6.1	Shipconsulting Oy:n tekemät laskelmat.....	30
2.6.2	Emoyhtiö Boskalis B.V.:n teettämät laskelmat .....	31
2.7	Ohjaajien ja miehistön opastus.....	31
2.7.1	Ohjaajien tietämys proomun vakavuudesta vellimäisessä lastissa.....	31
2.7.2	Koulutus erilaisten lastien kuljettamiseen.....	32
2.8	Pelastustoimet .....	32
2.8.1	Hätäilmoitus ja pelastustoimien käynnistyminen .....	32
2.8.2	Pelastautuminen kaatuvan proomun ohjaamosta .....	33
2.9	Muita lastin liikkumisen aiheuttamia onnettomuuksia tai vaaratilanteita.....	34
3	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	35
3.1	Onnettomuuteen johtanut tapahtumaketju .....	35
3.2	Onnettomuuteen vaikuttaneita tekijöitä .....	36
3.3	Vakavuuslaskennasta esiin tullutta.....	36
4	SUOSITUKSET.....	37
4.1	Viranomaisohjeistus ja määräykset .....	37
4.2	Ruoppausyhtiöiden ohjeistus.....	37
4.3	Vakavuuslaskelmien kehittäminen .....	37

## LÄHDELUETTELO

## LIITTEET

Liite 1. Vakavuusanalyysi

Liite 2. Lastin käyttäytyminen ja tutkimusmenetelmät



Kuva 1. ms CARA välittömästi kääntämisen jälkeen Raahessa 4.6.1997.

## 1 ONNETTOMUUDEN YLEISKUVAUS JA TUTKINTA

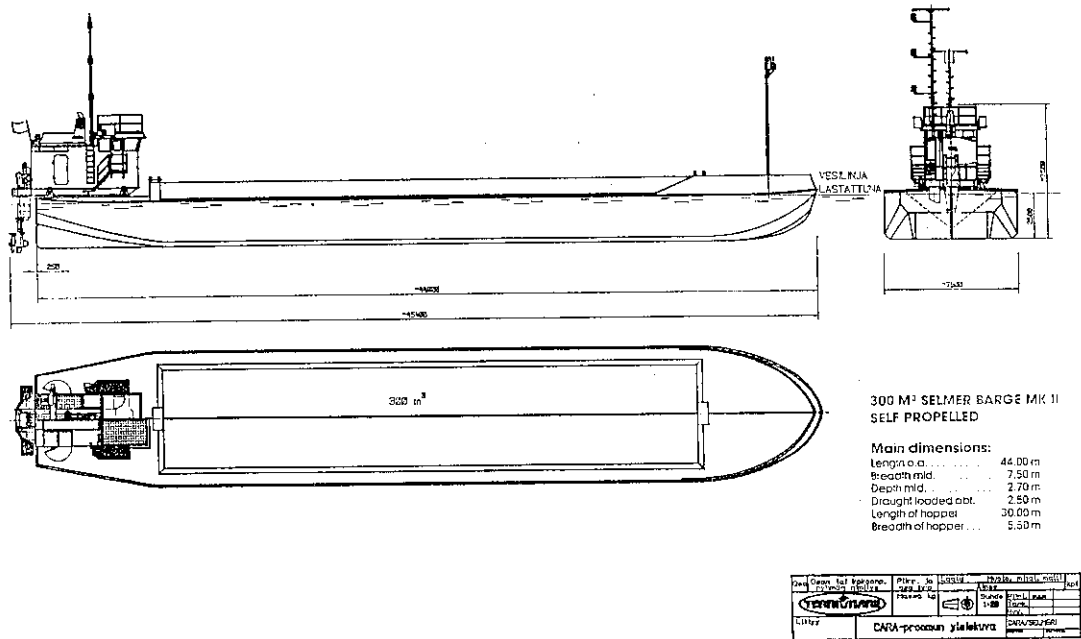
### 1.1 Alus

#### 1.1.1 Yleistiedot

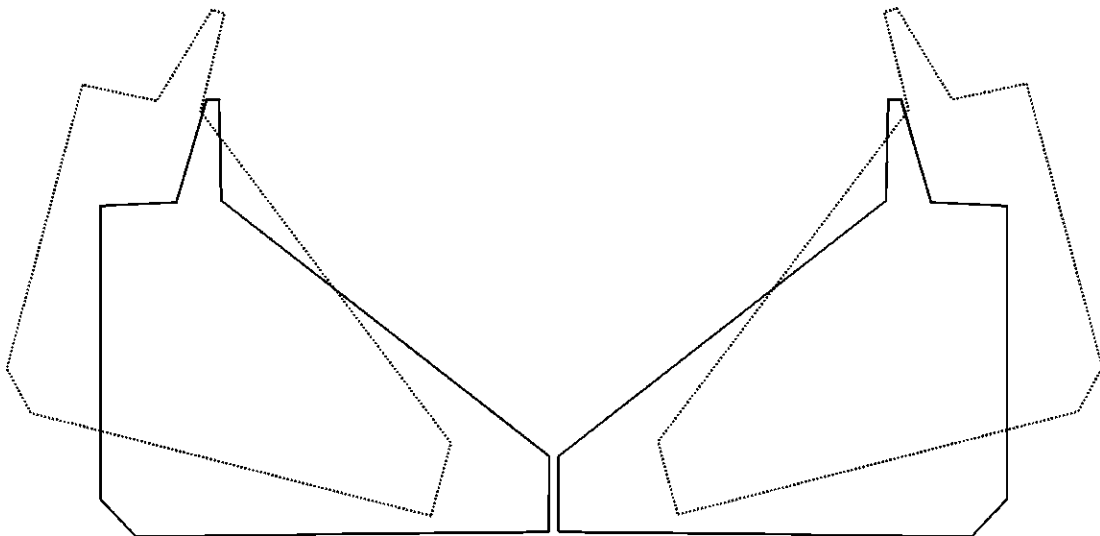
Nimi	ms CARA, ex TIUKKA
Omistaja	Terramare Oy
Tyyppi	Moottorialus
Kansallisuus	Suomi
Rakennusvuosi	1980 Brevik, Norja
Pituus	44,00 m
Leveys	7,52 m
Syväys	2,45 m (liikennealueena kotimaa I), 2,20 m (kotimaa II)
Uppouma	720 t (kotimaa I), 628 t (kotimaa II)
Lastimäärä	440 t (kotimaa I), 350 t (kotimaa II)
Sivukorkeus kanteen	2,70 m
Varalaita	250 mm (kotimaa I), 500 mm (kotimaa II)
Vetoisuus, brutto	245
Nopeus max	8 solmua
Akseliteho	279 kW

Ms CARA (jäljempänä CARA) on itsekulkeva ja itsetyhjentyvä ns. palkoproomu (kuva 2a). Alkujaan alus on ollut hinattava, entiseltä nimeltään TIUKKA, ja se on muutettu Suomessa itsekulkevaksi varustamalla se dieselmoottorilla ja hydraulikalla toimivalla ohjailupotkurilla sekä ohjaamalla. Proomu muodostuu kahdesta erillisestä puoliskosta, jotka on liitetty toisiinsa kannen päällä olevilla saranoilla. Alus tyhjenetään lastista avaamalla hydraulisesti lastitilan pohja eli halkaistaan koko alus. (kuva 2b)

CARAn tyyppisiä proomuja käytetään sekä kiinteän että pehmeän ruoppausmassan kuljettamiseen.



Kuva 2a. ms CARAn yleisjärjestelypiirustus.



Kuva 2b. Kaaviokuva palkoproomun poikkileikkauksesta ja aukaisutavasta.





### 1.1.2 Aluksen rekisteriasiakirjat

Aluksen todistuskirjat ja katsastukset olivat kunnossa.

### 1.1.3 Vakavuusasiakirjat

CARAA koskevat vakavuusmääräykset ovat asetukset alusten varalaidasta<sup>1</sup> ja vakavuudesta<sup>2</sup> sekä Merenkulkuhallituksen määräykset alusten vakavuudesta<sup>3</sup>.

Vakavuudesta annetun asetuksen 7§ perusteella kotimaan liikennealue I:lle katsasteuille lastialuksille ei vaadita vakavuushyväksyntää. CARAn tyyppiset motorisoidut proomut ovat lastialuksia, joille merenkululaitos ei ole vaatinut täydellisiä vakavuuslaskelmia. Ainoa vaadittu kelluvuustarkastelu on ollut kotimaanliikenteen lastimerkin määrittäminen.

Suomessa CARAsta ei ole ollut varustajalla eikä merenkululaitoksella ennen onnettomuutta tarkempaa tietoa aluksen vakavuudesta. Proomu on tosin alun perin ollut hinattava.

### 1.1.4 Miehitys ja liikenneajoitukset

Aluksen 4.6.1996 päivätty miehitystodistus edellyttää rajoitetussa liikenteessä kahden hengen miehitystä; ohjaajaa, jolla on kuljettaja 1 kirja, ja kansimiestä. Alueeksi miehitystodistuksessa on määritelty Kokkolan 13 metrin väylän ruoppaustyömaa Kokkolan majakan ja Ykspihlajan majakan välisellä alueella. Onnettomuustyömaalle Raahen satamaan ei vastaavaa todistusta ole kirjoitettu. CARAn katsastusalue on Kotimaa I. Alukselle oli määritelty sekä kotimaanliikennealue I:n että II:n lastimerkki.

Onnettomuusmatkalla aluksella oli vain ohjaaja (s. 1938), jolla oli erittäin paljon kokemusta vastaavanlaisista töistä alkaen vuodesta 1964. Proomun kansimies oli onnettomuusmatkan aikana ruoppaajalla muissa töissä.

### 1.1.5 Ohjaamo ja sen laitteet

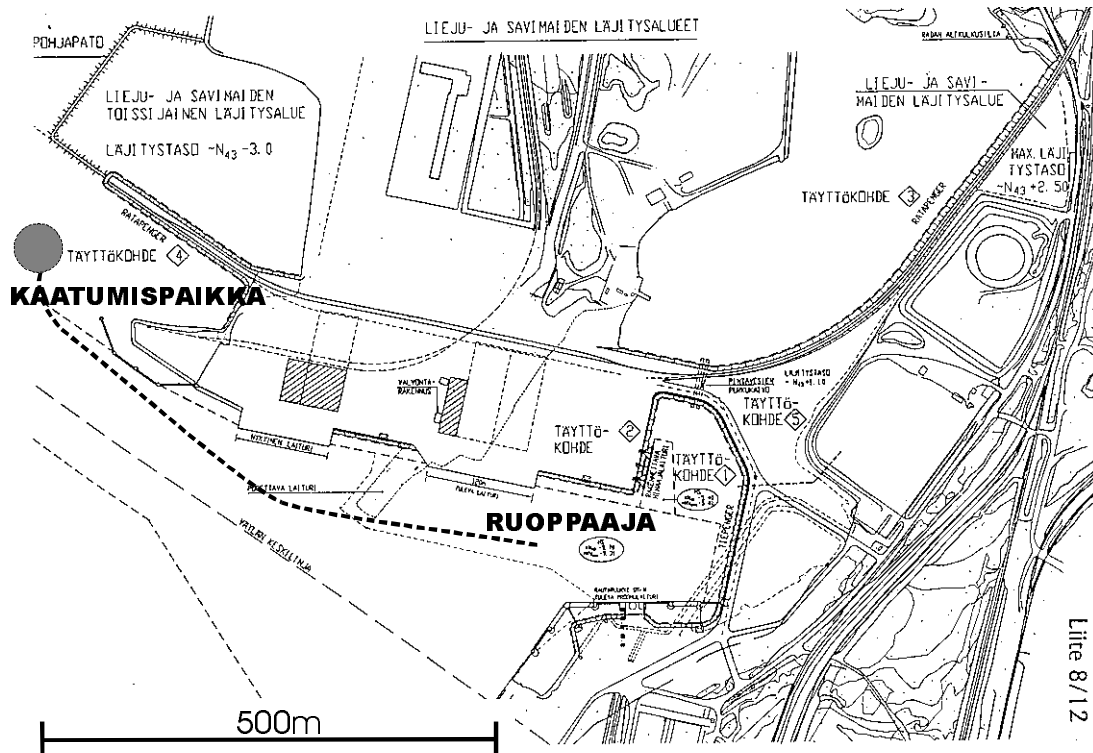
CARA on varustettu alustyyppiin nähden monipuolisella navigointivarustuksella ja laitteet olivat yhtiön edustajien mukaan kunnossa. Aluksen navigointivarusteet ovat:

- Tutka
- Radiosuuntimalaite
- Hyrräkompassi
- Magneetikompassi
- Kaikuluotain
- GPS-vastaanotin
- VHF-puhelin

<sup>1</sup> Asetus alusten varalaidasta kotimaanliikenteessä (855/1988)

<sup>2</sup> Asetus alusten vakavuudesta (588/72).

<sup>3</sup> Alusten vakavuusmääräykset 1972/1985



Kuva 3. Kartta Raahen sataman ruoppaus ja läjitysalueista. Kuvassa on ruoppaaja KOURA II:n sijainti sekä CARAn arvioitu ajoreitti kaatumispaikalle.

## 1.2 Onnettomuustapahtumat

### 1.2.1 Sääolosuhteet

Raahen luotsiaseman päiväkirjan mukaan 25.5.1997 oli tuulta 2,4 m/s suunnasta 235° ja näkyvyys oli hyvä. Tämä tyyni säätila on myös todettavissa pelastustoimien yhteydessä muutama tunti onnettomuuden jälkeen kumollaan olevasta CARAsta otetuista valokuvista (kuva 5). Jäät Raahen satamasta olivat lähteneet eikä tapahtumahetkellä satama-altaassa ollut jäätä.

### 1.2.2 Ruoppaus- ja läjitysalueet

CARAn lastaus onnettomuusmatkalle tehtiin kauharuoppaaja KOURA II:lla satama-altaassa n. 60 metriä Raahen kaupungin laiturin edustalla ja n. 75 metriä Rautaruukin tulevan proomulaiturin ulkopuolella. Ruoppauspaikalla on tehty Geobotnia Oy:n toimesta pohjatutkimuksia 1990-luvulla. Pohjatutkimusleikkauksessa ruoppauspaikan vesisyvyys on noin 4 metriä. Ruoppauspaikalla oli tuolloin liejua noin 1 metri, löyhää hiekkaa n. 1–2 m, löyhää moreenia n. 1,5 m ja sen alla pohjamoreenia tuntemattomaan syvyyteen. Lähellä ilmoitettua ruoppauspaikkaa oli myös savi- ja silttikerrostuma (ks. kartta kuva 3).

Satama-altaan ruoppaussyvyystavoite oli 9,31 metriä (MW2000), joten ruoppauksen aikana ruoppauspaikalla kaivettiin lieju-, hiekka- ja moreenimassoja. Koska ruoppaustyö oli ennen proomun kaatamista edennyt puhtaaksiruoppausvaiheeseen, niin ruopattu

massa koostui lähinnä sekalaisista aiemmin häiriintyneistä massoista sekä mahdollisesti satunnaisista korkeiksi jääneiden kohtien moreenimassoista (tiivein maa-aines). Raahen ruoppaustyömaan läjitysalue oli sataman alueella noin kilometrin päässä lastauspaikasta.

### 1.2.3 Onnettomuusmatka

Terramare Oy:n itsekulkeva palkoproomu CARA kaatui saman yhtiön Raahen sataman ruoppaustyömaalla matkalla ruoppaaja KOURA II:lta vesiläjitysalueelle sunnuntaina 25.5.1997 noin klo 14:05.

Terramaren suorittama Raahen Lapaluodon satama-altaan ruoppausurakka oli lopuiltaan ja aluksen lastina viimeistelyruoppauksissa oli vellimäistä ruoppausmassaa. Lastia kuvailtiin jälkeinpäin seuraavasti: ”oikein vetistä liejua, myös paljon vettä, lieju hyvin höllyvää” tai ”liejuista savea”. Kuvassa 4 näkyy proomu Raahen sataman työmaalla lastattavana tällaisella lastilla.

Proomun lastin tarkka määrä onnettomuusmatkalla ei ole tiedossa. Todistajien kertomukset lastin määrästä vaihtelevat hieman vajaasta täyteen lastiin. CARA oli onnettomuuspäivänä tehnyt matkoja ruoppaajalta läjitysalueelle noin kerran tunnissa ympäri vuorokauden.



Kuva 4. Proomu lastattavana Raahen satamatyömaalla (kuva on otettu ennen onnettomuuspäivää).

Ruoppaajan kuljettaja ja sen lastaaja muistavat CARAn olleen hieman vasemmalle kallellaan sen lähtiessä onnettomuusmatkalle kohti läjitysaluea. Luotsit, jotka olivat tarkkailleet proomun liikkumisia, sen sijaan eivät kauempana olevalta luotsiasemalta havainneet aluksella kallistumaa tai muutakaan erikoista aiemmilla matkoilla.



*Kuvat 5 a&b. CARA kaatuneena onnettomuuspaikalla. Kuvat on ottanut paikalle saapunut poliisi noin pari tuntia onnettomuuden jälkeen.*

Onnettomuusmatkalla aluksella oli vain ohjaaja, jolla oli erittäin paljon kokemusta vastaavanlaisista töistä. Hän oli aloittanut työt Terramaren edeltäjällä jo vuonna 1964. CARA irrottautui ruoppaajasta noin kello 14:05 ja lähti kohti läjitysalueetta. Proomu kaatui joko käännoksessä tai välittömästi sen jälkeen (ks. kartta kuva 3). Kaatumisella ei ollut silminnäkijöitä. Pelastustoimet käynnistyivät välittömästi, koska pinnalla ylösalaisin ollut proomu huomattiin lähellä sijaitsevalta Raahen luotsiasemalta kello 14:12 (kuva 5). Ohjaaja menehtyi aluksen ohjaamoon, josta sukeltaja löysi hänet seuraavana päivänä.

### **1.3 Pelastustoimet**

#### **1.3.1 Meripelastusjärjestelmä**

Suomen meripelastusjärjestelmä rakentuu rajavartiolaitoksen organisaatioon ja aluejakoon. Muiden meripelastuspalveluun osallistuvien viranomaisten ja vapaaehtoisten järjestöjen toiminta sovitetaan meripelastusorganisaatioon yhteistoiminnassa rajavartiolaitoksen kanssa.

#### **1.3.2 Ihmishengen pelastaminen**

CARAn kaatuminen havaittiin lähellä sijaitsevalta Raahen luotsiasemalta, jonka editse proomu jatkuvasti kulki aseman vieressä olleelle läjitysalueelle. Luotsiaseman päivystystiloissa ollut luotsi huomasi proomun kaatuneen kello 14:12, minkä hän myös sanoi päivystysvuorossa olleelle luotsille. Tämä teki heti hälytyksen hälytyskeskukseen sekä ilmoitti asiasta vuorossa olleelle luotsiaseman henkilökunnalle. Ruoppaaja KOURA II:lle tehtiin ilmoitus kaatumisesta tämän jälkeen kello 14:17.

Ensimmäisenä kaatuneen proomun luo saapui hinaajalla kolme henkilöä ruoppaajan miehistöstä. He alkoivat koputella vasaralla aluksen pohjaa siltä varalta, että ohjaaja olisi jäänyt ilmataskuun aluksen sisälle. Mitään vastausta ei kuitenkaan kuulunut.

Noin 14:25 lähti onnettomuuspaikalle luotsikutteri kolmen hengen miehityksellä luotsiasemalta. Vähän myöhemmin toi luotsiaseman vene onnettomuuspaikalle palomiehet ja sukeltajat.

Onnettomuuspäivänä sukelluksia CARAan teki kaksi urheilusukellusseura Mursujen jäsentä. Uhrin pelastussukellusten yhteydessä sukeltajat eivät saaneet ohjaamon vasemman- eikä oikeanpuoleista ovea auki. Vasemmanpuoleisesta ovesta sukeltaja mainitsi, että se oli pudonnut alaspäin jumiin kattolipan väliin. Sisään ohjaamoon sukeltajat menivät rikkomalla ohjaamon etuikkunan. He tarkastivat ohjaamon, mutta eivät löytäneet uhria.

Uhrin löysi CARAn ohjaamosta seuraavana päivänä 26.5.1997 paikalle kutsuttu ammattisukeltaja. Uhrin kuolinsyyksi todettiin oikeuslääketieteellisissä tutkimuksissa hukkuminen. Jälkiä alkoholista ei löytynyt.





Kuva 6. CARAn kääntäminen oikeinpäin Raahen satamassa 4.6.1997.



Kuva 7. CARAn ohjaamo kuvattuna välittömästi kääntämisen jälkeen. Konsolin keskellä ovat ohjauksen hallintalaitteet: ruori, ohjausjoystick, ruorikulman osoitin ja koneen kierrosluvun säätö. Konsolin oikeassa reunassa (lähellä kameraa) on palkoproomun avauksen ohjaus.



Kuva 8. CARAn ruoripotkurin asento onnettomuuden jälkeen.

### 1.3.3 Aluksen pelastaminen

Onnettomuuden uhrin löytymisen jälkeen CARA hinattiin ylösalaisin Lapaluodon laituriin. Paikalle tuotiin Terramaren omistama uiva nosturi. Tämän nosturin avulla CARA käännettiin oikeinpäin 4.6.1997 (kuva 6).

### 1.3.4 Vauriot ja hallintalaitteiden asennot

Välittömästi CARAn kääntämisen jälkeen Raahen poliisi ja Onnettomuustutkintakeskuksen edustaja tutkivat aluksen vauriot ja hallintalaitteiden asennot. Aluksen vesitiiviit osastot olivat ulkopuolisen tarkastuksen mukaan ehjät. Suoritettaessa hinaustarkastusta aluksen hinaamiseksi Kokkolaan käynnön jälkeisenä päivänä havaittiin, että oikeanpuoleisen ponttoonin takimmainen tankki lastitilan kohdalla sisälsi vettä arviolta 20–30 tonnia. Tämä vesimäärä aiheuttaa alukselle tarkastuksen yhteydessä havaitun 2–3 asteen kallistuman. Veden tankkiin joutumisen ajankohtaa ei tiedetä. Tutkintalautakunnan mielestä on todennäköistä, että vuoto on tapahtunut onnettomuuden jälkeen aluksen ollessa ylösalaisin.

Ohjaamon kaikki ikkunat olivat rikki. Aluksen mastot olivat taittuneet joko kaatumisen yhteydessä tai aluksen sorruttua matalampaan veteen.

CARAn ohjaamossa tarkastettiin ohjauspotkurin asetuskulma sekä potkurin kierrosluvun säädön ja proomun aukaisujärjestelmän asetukset. Kuvassa 7 on aluksen ohjaamon hallintalaitteet. Ohjauslaitteista pääkoneen kierrosluvun säädin oli noin 1/3 asennossa

eteenpäin (kuva 7 keskellä) ja ohjauspotkurin kääntökulma oli noin 10 astetta oikealle (styyrpuuriin). Kuvassa 8 kääntyvän ohjailupotkurin asento on kuvattuna aluksen vielä ollessa ylösalaisin.

Tarkastettaessa palkoproomun avauslukkojen asentoa havaittiin, että sulkulukon hydraulisylinteri oli 100–150 mm auki (koko hydraulimännän liike on noin 1 m), eli lastitilan pohja saattoi aluksen kaatuessa olla muutamia senttimetrejä auki.

## 1.4 Onnettomuuden tutkinta

### 1.4.1 Tutkintalautakunnan asettaminen

Onnettomuustutkintakeskus nimitti 3.6.1997 onnettomuuden tutkintaan tutkintalautakunnan. Tutkintalautakunnan puheenjohtajaksi määrättiin johtava tutkija Martti **Heikkilä** Onnettomuustutkintakeskuksesta sekä lautakunnan jäseniksi tutkimusinsinööri Karl-Johan **Furustam** ja tutkija Rainer **Laaksonen** molemmat VTT:stä. Lautakunnan asiantuntijana on toiminut hallintopäällikkö Pirjo **Valkama-Joutsen** Onnettomuustutkintakeskuksesta.

### 1.4.2 Onnettomuustutkinnan vaiheet

Lautakunnan puheenjohtaja oli paikalla Raahessa, kun CARA käännettiin. Lautakunta on tutustunut alukseen ja onnettomuuspaikkaan. Tutkinta-aineistona on ollut työmaalla olleiden haastatteluja, kuulustelupöytäkirjat ja eri viranomaisten toimintapäiväkirjoja.

Tutkintalautakunnan pyynnöstä Raahen poliisi tutki CARAn ovien avaamiseen liittyviä mahdollisia vaikeuksia aluksen ollessa ylösalaisin.

Tutkintalautakunta on ollut yhteydessä merenkulkuviranomaisiin ja aluksen varustamoon onnettomuuden tutkinnan aikana. Lautakunnan selvittämistä onnettomuuden syistä kerrottiin osapuolille ennen uuden liikennekauden alkua pidetyssä neuvottelussa keväällä 1998.

Erityisesti päätettiin selvittää liikkuvalla massalastilla lastatun aluksen kaatumisen dynamiikkaa ja sitä mitkä seikat myötävaikuttavat niin nopeasti tapahtuvaan kaatumiseen, että pelastautuminen pienestä kahdella ovella varustetusta ohjaamosta ei onnistu. Heti alusta alkaen oli selvää, että vellimäisen lastin käyttäytyminen avoimessa lastiruumassa oli tärkeä seikka onnettomuuden kulussa. Lisäksi osoittautui, että kaatumista ei voitu laskea oikein, ellei oteta huomioon lastin purkautuminen mereen. Vakavuuslaskelmat osoittautuivat kuitenkin huomattavasti oletettua vaikeammiksi ja tutkinnan aikataulua pidentäviksi.

### 1.4.3 Onnettomuustutkinnassa tehdyt erityistarkastelut

**Maamassan mallintaminen.** Vellimäisen lastin aiheuttaman kallistavan momentin laskeumiseksi tutkittiin lastin eri käyttäytymisvaihtoehtoja aluksen vakavuuden kannalta. Nestemäisen ja kiinteän lastityyppien lisäksi käytettiin myös mallia, jossa lastin sisäinen



kitka otettiin huomioon. Tämä ns. plastisesti häiriintynyt maamassa mallinnettiin käyttäen hyväksi VTT Yhdyskuntatekniikassa tehtyjä maamassan liikkeiden laskelmia. Lastin sisäisen dynamiikan lisäksi arvioitiin myös vellimäisen lastin purkautumisnopeus pois lastitilasta aluksen kaatuessa.

**Kallistuskoe.** CARAlle tehtiin 5.9.1997 kallistuskoe laivan painon ja painopisteen paikan määrittämiseksi Oy Shipconsulting:in toimesta. Sama yritys laati myös Terramaren tilaamat ja Merenkululaitokselle toimitetut vakavuuslaskelmat uutta purjehduslupaa varten.

**Vakavuuslaskelmat.** VTT Valmistustekniikassa tehtiin em. kallistuskokeen perusteella erilliset vakavuuslaskelmat NAPA-ohjelmistolla. Aluksi CARAn vakavuutta tutkittiin perinteisillä staattisen ja dynaamisen tilanteen laskentamenetelmillä. Laskennan edetessä kävi ilmi, ettei kaatumista voitu selittää niistä saaduilla tuloksilla. Laskentamalla on tutkinnan yhteydessä kehitetty ja tarkennettu kahteen suuntaan.

Ensiksi staattista laskentamenetelmää kehitettiin siten, että voitiin mallintaa lastin valuminen yli laidan CARAn avoimesta lastitilasta eli lastin poistuminen aluksesta lähes kokonaan jo noin 50 asteen kallistuskulmalla. Koska alus ei näiden staattisten laskelmien perusteella kaatunut, oli ilmeistä, että proomun kaatamiseen ovat myötävaikuttaneet oleellisesti myös dynaamiset ilmiöt. Kaatumisen dynamiikkaa tarkasteltiin laskemalla dynaaminen vakavuustyö. Koska kaatuminen ilmeisesti tapahtui käännöksen yhteydessä, oli epäiltävissä kaarreajon aiheuttaman kallistavan momentin olevan yksi kaatumiseen johtavan kallistusliikkeen aloittavista tekijöistä. Vaikka tämä ulkoinen kallistava momentti huomioitiin dynaamisen vakavuustyön laskennassa, ei alus tällä laskentamenetelmällä kaatunut.

Toiseksi on mallitettu lastin nopean poistumisen vaikutusta. Vasta, kun laskentamenetelmässä huomioitiin yli laidan purkautuvan lastin synnyttämän reaktivoiman aikaansaama merkittävä kaatava momentti, voitiin proomun kaatuminen selittää alusta kaatavien momenttien yhteisvaikutuksella. Ratkaisemalla aluksen keinunnan differentiaaliyhtälö differentenssimenetelmällä saatiin myös arvio kaatumisen nopeudesta ja kaatumisen mahdollistavasta lastin ulosvirtausnopeudesta.

**Terramaren teettämät laskelmat.** Terramare on myös teettänyt omat laskelmat emoyhtiössä Boskalis B.V:ssä. Käytetty laskentatapa on Bureau Veritas'in Guidance Note NI 144 BM1 mukainen. Lastin käyttäytymistä on simuloitu yläpinnan "viiveellä" suhteessa laivan kallistuskulmaan. Lastin purkautuminen mereen on huomioitu näissä laskelmissa.

#### 1.4.4 Tutkinnasta annettu lausunto

Tutkintaselostus lähetettiin onnettomuuksien tutkinnasta annetun asetuksen (79/1996) 24 §:ssä tarkoitettua lausuntoa varten Merenkululaitoksen merenkulkuosastolle, jonka antama lausunto on tämän tutkintaselostuksen liitteenä. Lausunnossaan merenkulkuosasto toteaa, että parhaillaan on valmistelussa uusia aluksen vakavuutta koskevia sääntöjä. Näitä työalusta koskevia vaatimuksia tullaan soveltamaan aluksiin, jotka suorittavat mm. nostamista ja ruoppausta. Lisäksi merenkululaitos toteaa ehdotuksenaan



tämänkaltaisten kuljetusten turvallisuuden parantamiseksi, että moottorialusta tulisi voida ohjailta ”avo-ohjaamosta” ja että siirtymävaaralliset lastit tulisi vaihtoehtoisesti kuljettaa hinattavilla proomuilla.

## 2 ANALYYSI

### 2.1 Viranomaisohjeet ja määräykset ruoppauskuljetuksista

#### 2.1.1 Kotimaanliikenteen lastimerkki ja vakavuusmääräykset

CARAn tyyppinen itsekulkeva proomu on suomalaisten säädösten mukaan rahtialus, jota kotimaanliikenteessä olevana aluksena koskevat asetus alusten vakavuudesta (588/72), merenkulkuhallituksen määräykset alusten vakavuudesta 1972 ja asetus alusten varalaidasta kotimaan liikenteessä (855/1988). Asetuksessa alusten varalaidasta kotimaan liikenteessä (855/1988) määrätään, että aluksen vakavuuden tulee täyttää ko. alustyyppille asetetut vakavuusmääräykset. Lisäksi erivapauksia määräyksistä voidaan asetuksen mukaan myöntää pituudeltaan alle 24 m aluksille.

Ainoa CARAn tyyppisille proomuille vaadittu uppoamattomuus- tai vakavuustarkastelu on ollut kotimaanliikenteen lastimerkin määrittäminen. Kotimaan liikenteessä aluksessa tulee olla ns. kotimaan lastimerkki kuten CARAssa onkin. Lastimerkin paikka määräytyy purjehdusalueiden mukaan, CARAn tapauksessa purjehdusalueet ovat kotimaanliikenne I ja II. CARAlle oli myönnetty kansallinen lastiviivatodistus, varalaidat eri liikennealueilla olivat 250 mm (kotimaa I) ja 500 mm (kotimaa II). Koska lastimerkki oli ylimaalattu, sen lukeminen lastauksen yhteydessä on kuitenkin ollut hankalaa. Tämä näkyy kuvasta 9.



Kuva 9. CARAn ylimaalattu lastimerkki. Kuvassa alus on käännettävänä eli se on vielä ylösalaisin.

Terramaren proomukalusto on ostettu valmiina. Jos aluksille ja erityisesti CARAlle on tehty vakavuuslaskelmat telakalla, niin niiden tuloksia ei ole varustajalla eikä merenkulkuviranomaisilla. Se, että merenkulkulaitos ei ole aiemmin vaatinut vakavuuslaskelmia, perustuu asetuksessa viranomaisille annettuun mahdollisuuteen myöntää erivapaus ja siihen, että proomuja ei ole koettu ongelmallisiksi.

Proomuilla tehtävistä ruoppauskuljetuksista ei ole viranomaisten antamia erillisiä määräyksiä. Alueeksi CARAn miehitystodistuksessa oli määritelty Kokkolan 13 metrin väylän ruoppaustyömaa Kokkolan majakan ja Ykspihlajan majakan välisellä alueella. Onnettomuustyömaalle, suojaisampaan Raahen satamaan ei vastaavaa todistusta ole kirjoitettu.

### **2.1.2 Muita kansainvälisiä säädöksiä ja ohjeita**

Ranskalaisen luokituslaitoksen Bureau Veritas'in säännöissä on proomujen vakavuuden laskentamenetelmä. Tässä menetelmässä on laskentamalli myös palkoproomujen vakavuuden arvioimiseksi. Sen mukaan velliäisen lastin käyttäytyminen simuloidaan siten, että lastin yläpinnalla oletetaan olevan "viive" suhteessa laivan kallistuskulmaan. Laskennallinen viive määritetään lastin tiheyden funktiona siten, että tiheyden ollessa 1,0 tai pienempi, lasti oletetaan täysin nestemäiseksi ja sen yläpinta seuraa laivan kallistuskulmaa. Tiheyden ollessa välillä 1,0–3,0 viive kasvaa nolasta arvoon, joka on puolet kallistuskulmasta. Lastin purkautuminen mereen ja veden pääsy ruumaan tulee ottaa huomioon Bureau Veritas'in menetelmän mukaan.

## **2.2 Yhtiön omat turvallisuusohjeet**

Terramare Oy on vesirakennusyhtiö, joka on alun perin perustettu Vesi-Pekka-nimisenä 1960-luvulla. Yhtiön toiminta jatkui 1970- ja 1980-luvuilla osana HAKA-konsernia. Terramare yhtiöitettiin erilleen HAKA-konsernista 1989 ja emoyhtiön konkurssin jälkeen 1990-luvun alussa toimiva johto osti sen. Tässä vaiheessa yhtiön vähemmistöosakkaaksi tuli hollantilainen, maailmanlaajuisesta vesirakennustoimintaa harjoittava Royal Boskalis Westminster nv. Vuodesta 1996 lähtien Terramare on ollut Boskaliksen kokonaan omistama tytäryhtiö.

Terramaren liikevaihto koostuu pääasiassa pohja- ja vesirakentamisesta sekä kotimaassa että muualla Euroopassa. Euroopassa rakennuskohteita on ollut Pohjoismaissa, Hollannissa, Britanniassa ja Espanjassa. Vakinaista henkilökuntaa on noin 100, kokonaismäärän ollessa noin 360. Aliurakoitsijoita, so. hinaajia, käytetään ainoastaan siirtohinausten yhteydessä.

Terramarella oli onnettomuuden tapahtuma-aikaan yhdessä henkilöstön kanssa käsitelty ja hyväksytty työsuojelun toimintaohjelma, joka määritteli tehtävät ja tavoitteet organisaation eri tasoilla ja vastuut työsuojeluasioissa. Yhtiöllä oli käytössä myös työturvallisuuskansio, johon oli kerätty määräykset, ohjeet ja kaavakkeet.

Terramarella on työsuojeluun liittyvät työmaakohtaiset kirjalliset ohjeet nimellä "Riskien kartoitus eri työvaiheissa". Kokkolan 13 metrin väylän ruoppausurakkaa varten riskien kartoitus oli tehty työn eri vaiheille ja lueteltu toimenpiteet riskien eliminoimiseksi. Ne

ruoppauksen työvaiheet, joiden osalta Terramaren työntekijöiden riskit oli kartoitettu olivat vuoronvaihto, vedenalainen louhinta, kuokka- ja krapikauharuoppaus, ruopatun materiaalin proomukuljetus ja läjitys, kaluston korjaus, tankoharaus ja mittaukset sekä sukellustyöt.

Ruopatun materiaalin proomukuljetuksessa ja läjityksessä riskeinä pidettiin henkilöstön veteen putoamista, proomun kiinnitystä ja irrotusta ruoppaajasta, rutiinihuoltoja ja merivaaraa. Merivaaraa ei oltu tarkemmin eritelty tai määritelty. Pelastusliivien käytöstä proomulla oli ohjeet. Proomun lastaukseen, lastin laatuun ja määrään sekä proomun vakavuuteen liittyviä kysymyksiä ei ohjeissa ole käsitelty lainkaan. Lastausta, lastin laatua ja ruoppaajan vakavuutta ei ole mainittu.

Proomuilla on yksi varsinainen päällikkö. Niitä ajetaan kuitenkin kahdessa vuorossa, jolloin ajamassa on myös nk. "kakkoskippari". Lastimerkin noudattaminen eli päätös lastin määrästä on päällikön vastuulla. Työmaakirjanpidon mukaan on suuri osa lasteista vajaita eli 150–200 tonnia. Yhtiöllä ei ole ollut sisäistä kontrollia, esimerkiksi pistokokeita, lastimerkin noudattamisesta. Miehistystodistuksen mukaan CARAlla olisi pitänyt olla kahden hengen miehistys. Proomun kansimies oli onnettomuusmatkan aikana ruoppaajalla muissa töissä. Hänelle ei oltu kertomansa mukaan sanottu, että proomulla pitää olla kahden hengen miehistys eikä myöskään pelastusliivin käyttöpakosta.

CARAn onnettomuuden jälkeen on konsernin pysyväiskäytännön mukaisesti kuolemantapaukseen johtaneesta työtapaturmasta raportoitu emoyhtiöön ja sitä on käsitelty konsernitasolla. Terramare on myös teettänyt CARAn vakavuudesta omat laskelmat emoyhtiössä Boskalis:issa. Emoyhtiöltä ei ole kuitenkaan tullut turvallisuuteen liittyviä korjausehdotuksia, koska muualla käytettävä kalusto on erilaista kuin Suomessa.

### 2.3 Lastaaminen ja lastin laatu

**Lastin määrä.** Terramaren ilmoittama käytäntö lastin määrästä on yksikäsitteinen: aluksen päällikkö päättää itsenäisesti lastattavan massan määrän tapauskohtaisen harkinnan ja lastiviivan mukaan. Lastin määrästä ja kuormaustavasta ei ollut kirjoitettuja ohjeita.

CARAn kotimaan liikenteen lastimerkin mukainen varalaita oli 250 mm (kotimaa I). Proomun lastin tarkka määrä onnettomuusmatkalla ei ole tiedossa. Todistajien kertomukset lastin määrästä vaihtelevat hieman vajaasta täyteen lastiin. Kukaan todistajista ei mainitse kuulusteluissa itse tarkkailleensa lastimerkkiä lastauksen yhteydessä. Käytännössä lastin määrää on arvioitu varalaidan avulla. Yksi ruoppaajan kuljettaja mainitsi kuulustelussa, että oli olemassa ohje kannen jättämisestä noin 20 cm veden pinnan yläpuolelle. Tutkintalautakunnan mielestä CARAssa on ollut lastia 375–440 tonnia.

Edellisenä päivänä lastaaja muisti kuulustelupöytäkirjan mukaan keskustelleensa proomun ohjaajan kanssa siitä, että kuormat eivät saisi olla liian suuria kaatumisvaaran takia. Ohjaaja oli lastaajan mukaan tunnistanut kaatumisvaaran, vaikkakaan hän ei pitänyt vaaraa ilmeisenä.

**Lastaustapa.** Terramaren mukaan proomun lastaustapa vaihteli kuormaajan ja kapteenin mukaan. Tavoitteena oli lastata proomun keskiosa tasoon, jonka määrää lastausmäärä, lastin tasoittuminen ja veden poistuminen. Keskiosan täyttäminen ensin varmistaa massan mukana tulevan veden poistumisen lastitilan päissä karvelissa olevista rei'istä. Tämän jälkeen lastaus etenee käytännössä keskeltä keulaan ja perään.

Lastaustavan valinnalla voidaan vaikuttaa lastitilaan jäävän veden määrään - sallitusta veden määrästä ei ollut ohjeita - veden poistamiseksi lastitilasta oli kuitenkin lastitilan päätyihin lisätty valumareikiä. Ohjeita lastauksessa syntyneiden "kekojen" sallitusta korkeudesta tai niiden tasoittamisesta ei ollut, ja käytännössä matalampia kekoja ei tasotettu kauhakuormaajalla.

**Lastin laatu.** Pohjatutkimusten mukaan ruopattavat maamateriaalit olivat liejua, löyhää hiekkaa ja löyhää moreenia. Tällaisilla massoilla tapahtuu Terramaren henkilökunnan havaintojen mukaan massan tasoittumista proomun liikkeessä ja massan pyrkiessä tasoittumaan lastauksen aikana syntyneistä keoista lähes vaakatasoon. Toisaalta massa ei tasoittunut itsestään proomua lastattaessa, vaan esimerkiksi epätasaisen lastauksen aiheuttaman kallistuman oikaisemiseksi jouduttiin proomua painamaan laidasta kaivinkoneen kauhalla sen aikaa (arvion mukaan minuutteja) kunnes lasti liikkui tarpeellisen määrän tasapainon saavuttamiseksi.

Koska ruoppaustyö oli ennen proomun kaatumista edennyt puhtaaksiruoppaukseen, niin ruopattu massa koostui lähinnä sekalaisista aiemmin häiriintyneistä massoista sekä mahdollisesti satunnaisista korkeiksi jääneiden kohtien moreenimassoista. Ruoppaajan kuljettajana toiminut lastaaja kuormasi proomulle ns. normaalin kokoisen kuorman "liejuista savea". Kuvassa 4 on ennen onnettomuutta kuvattu proomun lastaus Raahen satamatyömaalla. Tämä kuva on otettu ennen onnettomuuspäivää, mutta myös siinä näkyvä lastin laatu on vellimäistä ruoppausmassaa vastaten kohdassa 1.2.2 esitettyä pohjatutkimuksen tulosta. Kaikki edellä luetellut materiaalit muuttuvat vedessä kaivettaessa (rakenteen häiriintyessä ja ylimääräisen veden läsnäollessa) varsin "vellimäisiksi" eli niistä muodostuu lähes juoksevaa massaa.

*Taulukko 1. Erilaisten maalajien kuiva- ja märkätiheyksiä häiriintymättömässä tilassa.*

Maalaji	Kuivatiheys (t/m <sup>3</sup> )	Märkätiheys (t/m <sup>3</sup> )	Löyhtymiskerroin (löyhä-tiivis)
Lieju		1,1–1,6	
Liejuinen savi		1,4–1,6	
Savi	1,4–1,6	1,5–1,7	
Siltti	1,5–1,8	1,8–2,0	
Hiekka	1,6–1,9	1,9–2,1	1,1–1,4
Sora	1,6–2,0	1,9–2,2	1,1–1,4
Löyhä moreeni	1,7–1,9	2,0–2,3	1,2–1,4
Tiivis moreeni	1,8–2,2	2,0–2,4	1,3–1,5

Häiriintyneen ruoppausmassan vakavuuteen vaikuttavat massan sisäinen koheesio ja rakeiden välinen kitka. Häiriintyneellä ruoppausmassalla koheesio on hyvin pieni. Kitkan määrään vaikuttaa massan jännitystila, jonka suuruuteen vaikuttaa kerrospaksuus, tiheys ja huokosveden paine. Liejusta, savesta, siltistä ja moreenista koostuvan ruoppausmassan voi lastauksen jälkeen arvioida olevan löyhässä vedellä kyllästetyssä tilassa, jolloin tehokas jännitys on pieni. Tehokas jännitys on vallitseva pystyjännitys vähennettynä huokosveden paineella. Taulukossa 1 on esitetty eri maalajien suuntaa-antavia märkätiheystietoja. Tiheys voidaan arvioida myös kuivatilavuuspainon ja materiaalille tyypillisen löyhtymiskertoimen avulla.

Terramare suoritti pyynnöstä vastaavan tyyppisen ruoppausmassan tiheysmäärittämisen Kokkolan työmaallaan. Määrittämisessä ruoppausmassalle saatiin märkätiheydeksi n. 1,7 t/m<sup>3</sup>. Tämä arvo tarkoittaa sitä, että kyseinen ruoppausmassa koostui pääosin savesta tai siltistä ja sitä karkeammista materiaaleista. Tätä tiheyttä on käytetty onnettomuustutkimuksessa tehdyissä CARAn vakavuuslaskelmissa.

Ruopattaessa ja proomuun läjitettäessä häiriintynyt ja juokseva "vellimäinen" massa ei pysy keossa, jos massaan kohdistuu ohjausliikkeestä, aallokosta tai muusta syystä pakovoimia tai tärinää. Näiden tekijöiden vaikutuksesta massa pyrkii tasoittumaan - ei kuitenkaan välttämättä aivan vaakatasoon asti vapaan nestepinnan tavoin.

**Lastin velliintyminen.** Vellimäisistä lasteista ovat esimerkkejä häiriintyneet liejut, savet, siltit ja hienorakeiset moreenit. Yleensä silttien ja moreenien muuttuminen vellimäisiksi vaatii veden lisäämistä kaivettaessa häiriintyneeseen massaan, kuten ruoppauksessa aina tapahtuu. Löyhissä massoissa voi kehittyä äkillisen kuormituksen seurauksena ns. progressiivinen murtotila. Tällöin sisäinen tai ulkoinen kuormitushäiriö aiheuttaa paikallisesti massan huokostilassa paineen nousun, joka puolestaan vähentää kitkavoimia rakeiden välillä ja mahdollistaa rakeiden liikkumisen ja raerungon tiivistymisen. Tiivistyminen edelleen ylläpitää, kehittää ja levittää huokospainetta ympäröivään massaan, jolloin kasvava osa massasta muuttuu veden ja maa-aineksen suspensioksi, joka käyttäytyy kuin neste. Ulkoisina häiriöinä voivat olla esimerkiksi kaarreajo tai aallokko ja sisäinen häiriö on keon sortuminen.

**Lastin käyttäytyminen kuljetuksessa.** Maa-aines voi proomukuljetuksen aikana olla kolmessa eri tilassa: kiinteässä, kiinteästä vellimäiseksi muuttuvassa tai vellimäisessä tilassa. Kiinteän lastin tavoin käyttäytyvät massat, joissa on suuria lohkarkeitä ja kiviä sekä vähän hienoainesta, tai joiden rakenne on hyvin avoin eli vesi valuu esteettä pois massan läpi. Matkan aikana hetkellisesti tai pysyvästi olotilaansa muuttavia lasteja ovat esim. veden ja äkillisen kuormituksen esimerkiksi kallistuksen ja tärinän vaikutuksesta "nesteytyvät" massat, joita ovat tasarakeinen hiekka, siltit ja eräät malmirikasteet.

Aluksen vakavuuden kannalta vellimäisten materiaalien käyttäytyminen on vaikeasti ennakoitavaa. Lasti käyttäytyy vaarallisimmassa tapauksessa lähes kuin vesi, joten sen kuljetuksessa täytyy minimoida kaikki riskitekijät kuten alkukallistuma, kaarreajo, aallokko ja ylikuorma. Liikkeelle lähtenyt ja riittävästi alusta kallistanut vellimäinen lasti purkautuu esim. proomun laidan yli kuin vesi, mutta massan sisältämien maa-ainespaakkujen takia vain paksumpana kerroksena. Tätä on tarkemmin käsitelty seu-

raavassa kohdassa, missä on kuvassa 11 esitettynä kuvasarja lastin valumisesta mereen eri kallistuskulmilla.

## 2.4 Vakavuusanalyysi

Vakavuuslaskelmien tarkoituksena on määrittää aluksen kellumisasennoille oikaisevan ja kallistavan momentin tasapainotila. Oikaiseva momentti riippuu vettä syrjäyttävän osan geometriasta, kokonaismassasta ja sen painopisteen sijainnista. Kallistava momentti koostuu sekä sisäisistä että ulkoisista momenteista. Sisäisiin momentteihin on tässä analyysissä sisällytetty lastin siirtymisestä ja sen aluksesta poistumisesta aiheutuvat kallistavat momentit. Laskelmissa on mukana myös aluksen kaarreaajosta johtuva ulkoinen kallistava momentti.

CARAn kaatumisen vakavuuslaskelmissa käytettiin useita erilaisia laskentatekniikoita tutkimuksen edetessä. Vakavuuslaskelmissa käytettiin NAPA-vakavuuslaskentaohjelmistoa. Laskelmissa käytettiin CARAn rungon 3-ulotteista mallia. Pääongelma oli lastin siirtymisen aiheuttaman kallistavan momentin mahdollisimman oikea mallintaminen.

Analyysi aloitettiin perinteisillä staattisilla vakavuuslaskelmilla vakiouppoumalla. Lopulta siirryttiin laskentamenetelmään, jossa lastin purkautuminen yli laidan huomioidaan. Lisäksi laskentamenetelmässä mallinnettiin lastin nopean poistumisen vaikutusta huomioidamalla yli laidan purkautuvan lastin synnyttämän reaktivoiman aikaansaama kallistava momentti.

Seuraavassa on lyhyesti esitetty vakavuusanalyysi ja sen tulokset. Tarkemmin vakavuusanalyysi on esitetty liitteessä 1. Analyysissä on käsitelty lastin mallintaminen vakavuuslaskujen kannalta, vakavuuden laskenta muuttuvalla uppoumalla, käännöksestä aiheutuva kallistava momentti, staattiset vakavuuslaskelmat erilaisilla oletuksilla lastin käyttäytymisestä, dynaaminen vakavuustyö, lastin purkautumisen reaktivoima ja aluksen kaatumisen vaiheet. Lisäksi on tehty lopullisella laskentamallilla parametritarkastelu lastin määrän ja sen purkautumispaksuuden vaikutuksista.

### 2.4.1 Staattiset vakavuuslaskelmat

Vakavuuslaskelmia tehtiin aluksi vertailun mahdollistamiseksi eri lastityypeille. Nämä lastityypit olivat kiinteä lasti (homogeeninen bulkkilasti ilman vapaan pinnan momenttia), nestelasti (valuminen yli laidan on estetty) ja nestelasti, jonka sallitaan valua yli laidan.

Laskettujen GZ-käyrien muodot poikkeavat toisistaan varsin paljon. Näistä tuloksista käy selvästi ilmi, kuinka tärkeää lastin käyttäytymisen oikea huomioonottaminen on. Staattinen vakavuus paranee suurilla kallistuskulmilla poistuvan lastin takia. Tätä on tarkasteltu lähemmin ja havainnollistettu jäljempänä kohdassa Laskelmat muuttuvalla uppoumalla.

**Vertailu vakavuusvaatimukseen.** CARAn vakavuutta on liitteessä 1 verrattu Merenkululaitoksen lastialuksille antamien määräysten vakavuuskriteereihin. Tarkastelu tehtiin yllä mainituille lastityypeille 350 tonnin lastilla. Laskettujen tulosten suuri hajonta korostaa entisestään laskentaolettamusten merkitystä. Ongelmana näiden vaatimuksien so-



veltamisessa palkoproomuun ovat lähinnä laskennassa käytettävät olettamukset. Laskeuissa tapauksissa CARA täyttää merenkulkulaitoksen vaatimukset vain kiinteän lastin osalta.

### Laskelmat muuttuvalla uppoumalla

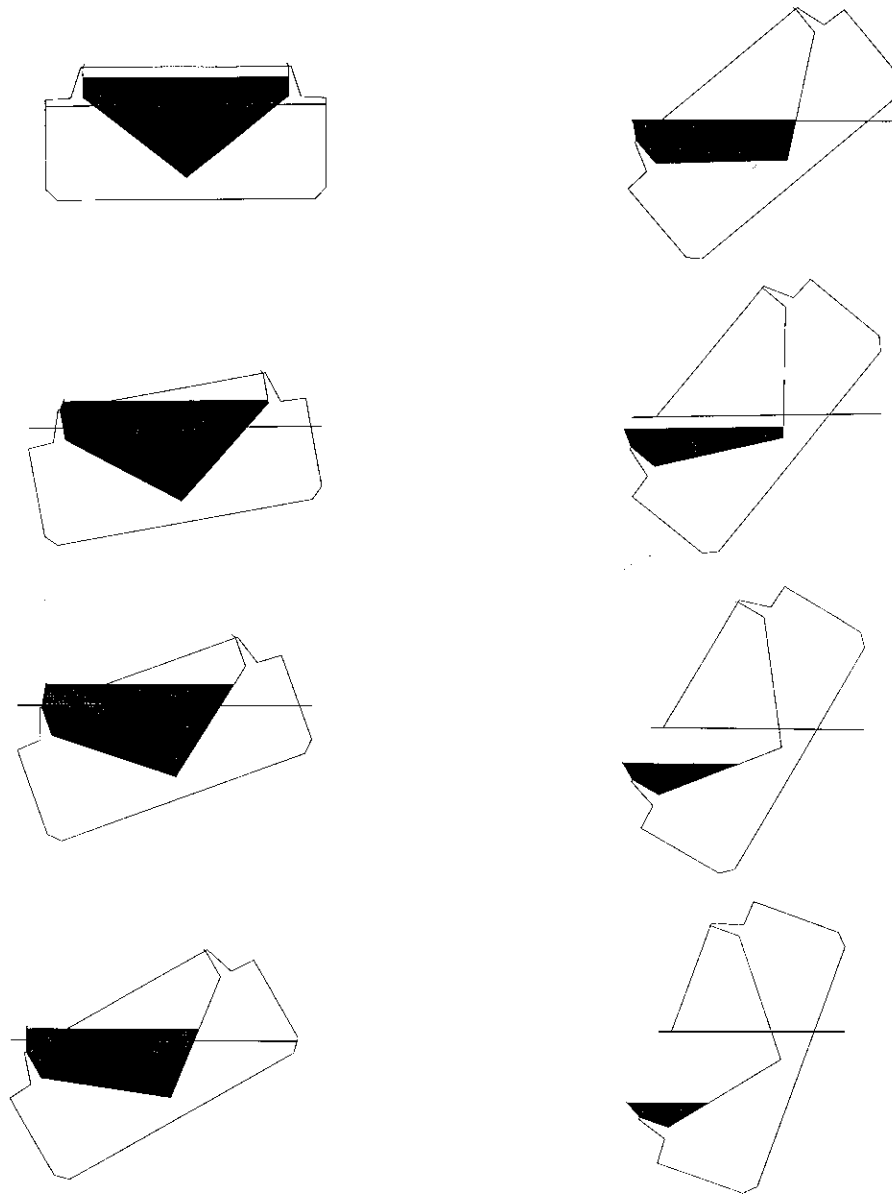
CARAn lasti oli vellimäistä epähomogeenistä ruoppausmassaa. Sillä on jokin ylivuotopaksuus sen valuessa yli laidan pois aluksesta. Kaikissa vakavuuslaskelmissa, jotka tehtiin muuttuvalla uppoumalla, on ollut parametrinä ylivuotopaksuus. Ylivuotopaksuudella havaittiin olevan huomattava vaikutus vakavuuslaskelmien tuloksiin. Näitä parametrituloksia on esitetty alla.

Onnettomuustutkinnassa CARAn vakavuutta tutkittiin aluksi perinteisillä staattisen ja dynaamisen tilanteen laskentamenetelmillä. Vakavuuslaskelmissa ei normaalisti huomioida lastin poistumista aluksesta. Tämä on epärealistinen olettaus CARAn tapauksen analysoinnissa, koska aluksen ruuma on avoin. CARAn avoimen ruuman muoto näkyy kuvasta 10. Lastin valuminen mereen tällaisesta ruumasta eri kallistuskulmilla on esitetty kuvassa 11. Kuvasarja perustuu laskelmaan, jossa lastin määrä on 435 t ja ylivuotopaksuus 0,6 m.

Staattista laskentamenetelmää kehitettiin siten, että voitiin mallintaa lastin valuminen yli laidan CARAn avoimesta lastitilasta eli lastin poistuminen aluksesta lähes kokonaan jo noin 50 asteen kallistuskulmalla. Vertailuna laskettiin oikeaseva momenttivarsi kallistuskulman funktiona (GZ-käyrä) kahdella tavalla, kun lastia on 400 tonnia (laskentatulokset on esitetty liitteessä 1). Laskelmien perusteella CARAn vakavuus suurilla vellimäisen lastin määrillä on erittäin heikko pienillä kallistuskulmilla molemmissa laskentatapauksissa.



Kuva 10. CARAn avoin lastitila.



Kuva 11. Periaatekuva lastin valumisesta palkoproomusta mereen eri kallistuskulmilla. Kuvasarja perustuu laskelmaan, jossa lastin määrä on 435 t ja ylivuotopaksuus 0,6 m.

Ensimmäinen vertailutapaus laskettiin siten, että lastin purkautuminen pois lastitilasta estyy kuten lastiluukkujen peittämästä ruumasta. Tässä tapauksessa aluksen vakavuus on positiivinen vain kuuden asteen kallistuskulmaan saakka. Sitä suuremmilla kallistuskulmilla alus kaatuu.

Toisessa laskentatapauksessa lasti valuu kallistuskulman kasvaessa vähitellen kokonaan yli laidan 0,6 metrin ylivuotopaksuudella. Myös tässä tapauksessa vakavuus on pienillä kallistuskulmilla positiivinen vain kuuteen asteeseen saakka. Aluksen staattinen vakavuus paranee kuitenkin lastin poistuessa ruumasta ja staattinen vakavuus muuttuu

jälleen positiiviseksi (ks. kuva 12). Hitaasti tapahtuvassa kallistuksessa aluksella on kuutta astetta suuremmilla kallistuskulmilla uusi tasapainotila, missä kallistuminen pysähtyy. Ylivuotopaksuuden ollessa 0,6 m tämä tasapaino saavutetaan 25 asteen kallistuskulmalla (tätä tilannetta vastaa käyrä 4 kuvassa 12). Jos lastilla ei ole lainkaan ylivuotopaksuutta, eli lasti on täysin juoksevaa, on vakavuus uudelleen positiivinen jo 9 asteen kallistuskulmalla (tätä tilannetta vastaa käyrä 1 kuvassa 12).

**Lastiparametrien vaikutus vakavuuteen.** Onnettomuusmatkan lastin tarkka laatu ja määrä eivät ole tiedossa. Näillä on huomattava vaikutus aluksen vakavuuteen. Lastin laatu vaikuttaa vakavuuteen nestemäisyyden ja ylivuotopaksuuden kautta. Mitä nestemäisempi lasti on, sitä lähempänä laskelmissa käytettyä olettamusta vapaan nestepinnan vaikutuksesta ollaan. Tällöin lasti purkautuu aluksen laidan yli kuin vesi. Massan ylivuoto tapahtuu koheesion ja maa-ainepaakkujen yhteisvaikutuksen takia paksuna kerroksena. Toinen tekijä, joka kasvattaa ylivuotopaksuutta on tapahtuman nopeus.

CARAssa oli kotimaan liikenteen lastimerkki, jonka mukaan suurimmat sallitut syväydet olivat 2,20 m (kotimaa II) ja 2,45 m (kotimaa I). Pienemmällä syväydellä lastin määrä on 350 tonnia ja suuremmalla syväydellä 440 tonnia. Seuraavassa on esitetty lastin määrän ja ylivuotopaksuuden vaikutusta aluksen staattiseen vakavuuteen muuttuvalla uppoumalla.

**Lastimäärän kasvaessa** vakavuus huononee. Syinä tähän ovat painopisteen nousu ja muotovakavuuden heikkeneminen varalaidan pienentyessä.

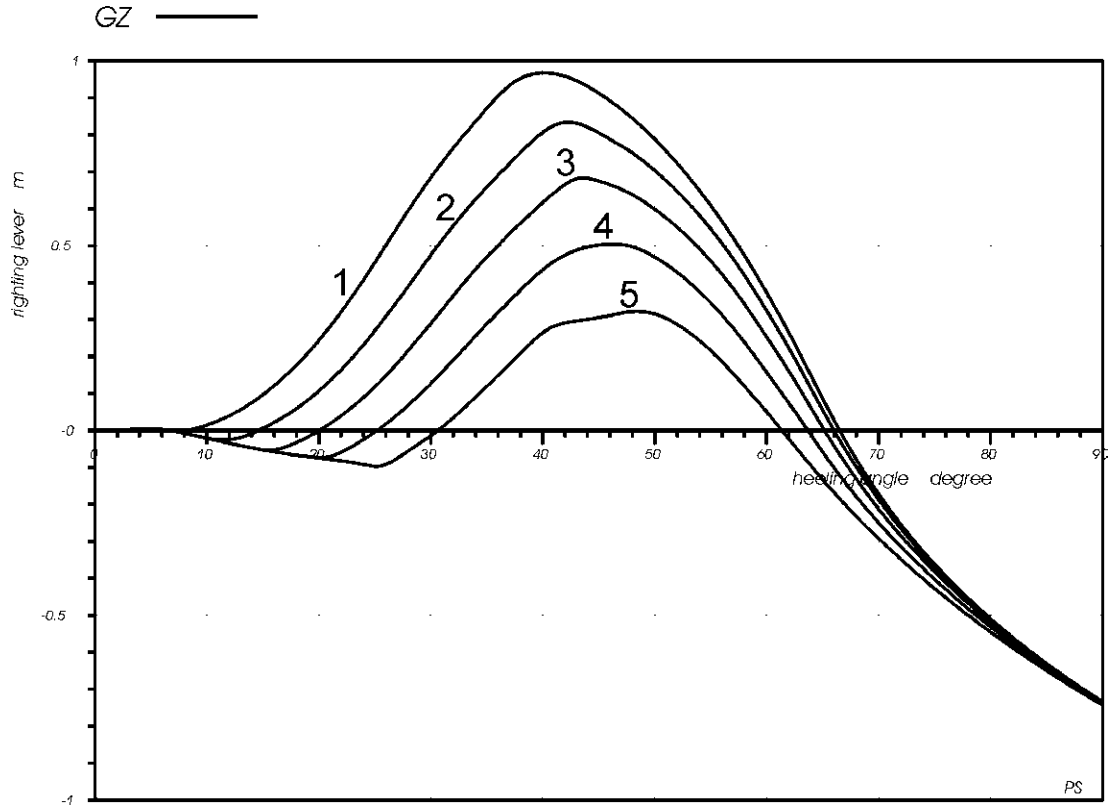
Laskelmissa tarkasteltiin oikeasevaa momenttivartta kallistuskulman funktiona neljällä lastimäärällä 375 tonnista 435 tonniin. Tuloksista havaittiin, että oikeasevat momenttivartat poikkeavat eri lastimäärillä ainoastaan kallistuskulma-alueella 0–23 astetta. Tämä johtuu lastin poistumisesta lastiruumasta mereen, jolloin 23 asteen jälkeen lastitilanne on sama. CARAn kaatumisen kannalta hyvin oleellinen on momenttikäyrien negatiivisen alueen pinta-ala, joka on suoraan verrannollinen alusta kallistavan energian määrään. Tämä negatiivinen pinta-ala kasvaa lastimäärän kasvaessa.

Kun lastin poistumisen yhteydessä huomioidaan äärellinen **ylivuotopaksuus**, kuten edellä on kuvattu, on sillä huomattava vaikutus aluksen staattiseen vakavuuteen. Tämä johtuu siitä, että samalla kallistuskulmalla aluksessa jäljellä oleva lastimäärä on suurempi ja sen painopiste on korkeammalla ylivuotopaksuuden kasvaessa .

Tämä vakavuuden heikkeneminen käy ilmi kuvasta 12, jossa CARAn vakavuus on laskettu 400 tonnin lastilla viidellä eri ylivuotopaksuudella. Käytetyt ylivuotopaksuudet ovat nollassa 20 cm:n välein 0,8 metriin. Tällä vaihteluvälillä oikeasevan momenttivarren maksimiarvo pienenee 30 %:iin alkuperäisestä. Lastin ulospurkautuminen alkaa eri ulosuotopaksuuksilla tarkastelluissa tapauksissa 8 ja 24 asteen välillä.

**Yhteenveto staattisesta vakavuudesta.** Merkittävin vakavuutta heikentävä tekijä lastin määrän lisäksi on ylivuotopaksuus. Vellimäinen, nestemäisesti käyttäytyvä lasti, joka siirtyy lastitilassa paksuna kerroksena, on vaarallinen. Samalla tavalla vaaralliseksi on

todettu myös malmilastit vettyneenä. Nopean kaatumistapahtuman edellytyksenä on, että massa lähtee liikkeelle paksuna kerroksena.



Kuva 12. Lastin ylivuotopaksuuden vaikutus CARAn vakavuuteen laskettuna 400 t lastilla viidellä eri paksuudella, jotka ovat: 1=0 m, 2=0,2 m, 3=0,4 m, 4=0,6 m ja 5=0,8 m. Purkautumiskerroksen paksuudella on huomattava merkitys aluksen vakavuudelle.

Vaikka CARAn vakavuus pienillä kallistuskulmilla ja suurilla lastimäärillä on erittäin heikko, se paranee huomattavasti lastin purkautuessa yli laidan. CARAn kaatumista ei näin ollen voi selittää pelkästään staattisilla vakavuuslaskelmilla.

## 2.4.2 Kallistavat herätteet

Jotta alus lähtisi kallistumaan tasapainotilasta, tarvitaan sisäisestä tai ulkoisesta herätteestä syntyvä kallistava momentti. Tämä voi olla seurausta ympäröivistä olosuhteista tai aluksen omasta liiketilasta tai sen muutoksesta. Se voi vaikuttaa joko kallistumisen alussa tai koko kaatumisen ajan. Näitä mahdollisia herätteitä CARAn kaatumisessa ovat kaarreajo, aallokko, tuulen ja jään vaikutus.

**Käännöksen kallistava vaikutus.** Käännöksessä alukseen vaikuttaa sekä keskipakovoiman että kääntyvän propulsiolaitteen aiheuttamat kallistavat momentit. Keskipakovoimasta aiheutuva kallistava momentti on sitä suurempi mitä pienempi on ajettava kaarresäde ja mitä suurempi nopeus on. Vaikka käännöksestä aiheutuva kallistuskulma

olisi pienikin, se on saattanut olla häiriö, joka pani liikkeelle kaatumiseen johtavan tapahtumaketjun.

Jos koko CARAn ajama käänнос laiturialueelta läjitysalueelle (ks. kartta kuvassa 3) ajetaan yhdellä kerralla, on sen suuruus valittavasta ajoreitistä ja käännostavasta riippuen noin 60 astetta. Käänнос alkaa noin 700 metrin päässä ruoppauspaikalta. CARAn onnettomuusmatkalla käännokseen tultaessa nopeuden on tutkimuksessa arvioitu olleen noin viisi solmua ja ajetun kaarresäteen 50–100 m.

Aluksen kallistuminen käänöksessä voidaan laskea keskipakovoiman ja oikeasevan vakavuusmomentin tasapainotilana. Tutkijalautakunta on arvioinut (valinnut) jatkolaskelmissa käytetyksi arvoksi kallistavalle momentille 121 kNm (12 tm), joka on varovainen yläraja-arvio. Tähän suuruusluokkaan päädytään 50 metrin kaarresäteellä sekä 5 solmun nopeudella. Tämän suuruisella kallistusmomentin vaikutuksesta alus kallistuu noin 2° lastin ollessa kiinteässä muodossa. Kaarroksen alkaessa voi kallistus hetkellisesti saavuttaa tätä suuremman arvon.

**Aallokon, tuulen ja jään mahdollinen vaikutus.** Käännoksen lisäksi muita ulkoisia kallistavia tekijöitä olisivat voineet olla aallokko, tuuli ja törmääminen jäälauttaan. Tuulta onnettomuuden tapahtuma-aikaan oli Raahen luotsiaseman päiväkirjan mukaan 2,4 m/s suunnasta 235°. CARAn kaatumispaikka Raahen Lapaluodon satamassa on vallinneella tuulen suunnalla saarten suojaama. Jäät Raahen satamasta olivat lähteneet eikä tapahtumahetkellä satama-altaassa ollut irrallisia jäälautoja. Tyyni säätila ja alueen jäätömyys ovat todettavissa CARAsta pari tuntia onnettomuuden jälkeen otetuista valokuvista (kuva 5). Näistä syistä ei ole luultavaa, että muut ulkoiset kallistavat tekijät kuin kaarrajo olisivat vaikuttaneet CARAn kaatumiseen.

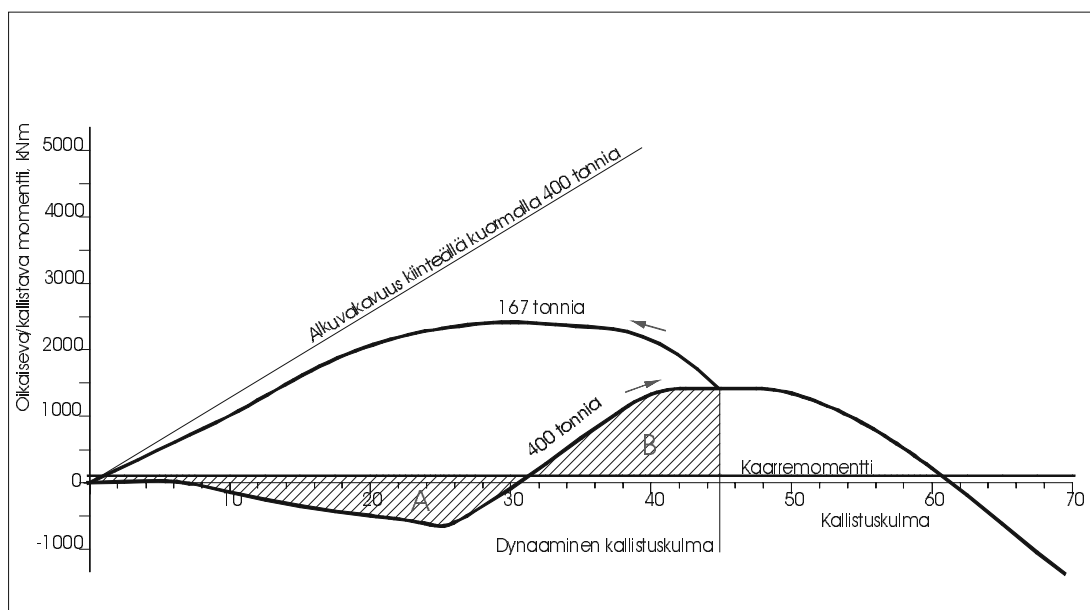
### 2.4.3 Dynaamiset vakavuustarkastelut

Edellä kohdassa 2.4.1 todettiin CARAn vakavuuden paranevan lastin purkautuessa yli laidan niin paljon, että aluksen kaatumista ei voi selittää pelkästään staattisilla vakavuuslaskelmilla. Staattisessa vakavuuslaskelmassa ei oteta huomioon laivan liiketilaa. Kaatumistapahtuman ilmeisen nopeuden vuoksi siihen liittyviä dynaamisia tarkasteluja tehtiin alusten vakavuustarkastelussa tavanomaisen dynaamisen vakavuustyön avulla<sup>4</sup>. Dynaamista vakavuustyötä käytetään, jos alukseen vaikuttaa impulssikuorma. Tällä tarkastelulla voidaan kallistumaan lähteneelle alukselle laskea sen saavuttama suurin kallistuskulma liikkeen päättyessä. Tämän jälkeen alus palaa staattisen tasapainotilan määrittämään kallistuskulmaan.

#### Dynaaminen vakavuustyö

<sup>4</sup> Dynaaminen vakavuustyö esitetään normaalisti GZ-käyrän pinta-alan avulla, jos uppouma pysyy vakiona. Vakavuustyö laskettavien kallistuskulmien välillä on verrannollinen pinta-alaan käyrän ja kallistuskulman akselin välissä. Oikeasevaa vakavuustyötä vastaa tällöin GZ-käyrän pinta-ala ja kallistavaa työtä kallistavan momenttivarsikäyrän pinta-ala. Tulosten esittämisessä dynaamisen vakavuuden laatuina käytetty momentin yksikkö [kNm] on havainnollisempi kuin GZ-käyrän laatu [m], koska vakavuutta verrataan ulkoisiin herätteisiin, joiden laatu on käytetty kNm:ä.

Laskettaessa CARAn vakavuutta dynaamisen vakavuustyön avulla, on oletettu, että kaarreajon kallistusmomentti vaikuttaa kallistuksen aiheuttavana impulssina. Laskelmis-  
sa kallistavan momentin integraali kallistuskulman suhteen edustaa energiamäärää, joka pyrkii kallistamaan laivaa. Vastaavasti oikaisevan momentin integraali vastaa työtä, joka pyrkii oikaisemaan laivaa. Suurin hetkellinen kallistuskulma on se kulma, jolla oikaiseva työ on yhtä suuri kuin kallistava työ. Mikäli kaatava vakavuustyö on suurempi kuin oikaiseva vakavuustyö aluksen kaatumiskulmalla, alus kaatuu. (Kaatumiskulmalla tarkoitetaan sitä kallistuskulmaa, jolla oikaiseva vakavuusvarsi muuttuu negatiiviseksi, mikä CARAlla on 60–70 asteen välillä; kuva 12.)



Kuva on tehty seuraavasti:

NAPA:ssa on ajettu DCR-puolella CARATURN-makro jolloin on saatu pundainen käyrä sekä tasapainokulma. Musta käyrä on lisätty käsin ACAD:ssa käyttäen LIS GZ-arvoja NAPA:sta korjattuna uppoumalle 678 tonnia.

Lastia 400 tonnia

Reunakorkeus 0,8 m

1400'D4 ja 11 67/D4

Ajettu constant displacementilla

**Kuva 13.** Dynaaminen kallistuskulma vellimäisessä lastissa kaarreajossa. Kuvassa on oikaiseva momenttikäyrä muuttuvalla uppoumalla tilanteessa, jolloin alussa on lastia 400 t, uppouma 678 t ja ylivuotopaksuus 0,8 m, sekä vakiouppoumalla, kun lastia on 167 tonnia. Kuvassa on myös kaarreajosta aiheutuva kallistava momentti, kun nopeus on 6 solmua ja kaarresäde 50 m.

Sinänsä normaalin dynaamisen vakavuustarkastelun soveltamista CARAn kaatumiseen vaikeuttaa se, että aluksen uppouma muuttuu jatkuvasti lastin purkautuessa yli laidan. Lastin ulospurkautuminen alkaa alkuperäisestä lastimäärästä ja ulosvuotopaksuudesta riippuen tarkastelluissa tapauksissa 8 ja 23 asteen välillä (kuva 12). Muuttuvan uppouman vuoksi CARAn kohdalla asiaa tarkastellaan oikaisevan/kallistavan momentin kuvaajan avulla. Kullakin kallistuskulmalla on laskettu oikaiseva momentti hetkellisellä



uppoumalla. Kuvassa 13 on tämän periaatteen mukaisesti esitetty oikaisevan ja kaarreajosta aiheutuvan kallistavan momentin käyrät kallistuskulman suhteen. Kuvassa on oikaiseva momenttikäyrä muuttuvalla uppoumalla tilanteessa, jolloin lastia on alussa 400 t ja uppouma 678 t, sekä vakiouppoumalla, kun lastia on 167 tonnia. Laskelmat on tehty 0,8 m ylivuotopaksuudella. Kuvassa on myös kaarreajosta aiheutuva kallistava momentti, kun aluksen nopeus on 6 solmua ja kaarresäde 50 m.

Kuvasta voidaan nähdä, että oikaiseva momentti noin 30° kallistuskulmaan saakka on negatiivinen lukuun ottamatta käyrän alkua. Oikaiseva momentti on siis itse asiassa kallistava ko. kulmavälillä. Tällä kulmavälillä oikaisevan ja kallistavan työn summa vastaa viivoitettua aluetta 30° kallistuskulmaan saakka (alue A). Tätä suuremmilla kallistuskulmilla oikaiseva momentti on positiivinen, ja oikaisevan ja kallistavan työn summa vastaavasti positiivinen. Dynaaminen kallistuskulma on kulma, jolla oikaisevan ja kallistavan työn summa on nolla. Kuvassa 13 tämä merkitsee, että pinta-ala B:n tulee olla yhtä iso kuin A.

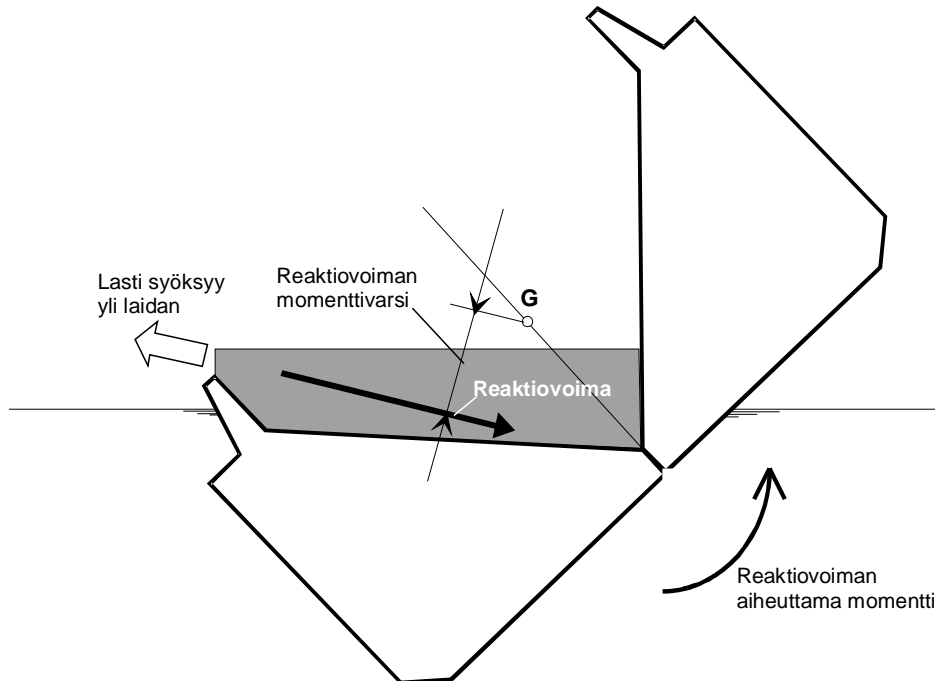
Edellä mainituilla oletuksilla laskettuna CARA saavuttaa 45 asteen kallistuskulman, jolloin ruumassa on jäljellä 167 tonnia lastia. Kun tämä suurin dynaaminen kallistuskulma on saavutettu, tapahtuu aluksen oikeneminen 167 tonniin vakiintuneen lastitilanteen vakavuuskäyrän mukaisesti. Tällöin alus palaa staattisen tasapainotilan määräämään noin 1 asteen kallistuskulmaan edellyttäen että alukseen edelleen vaikuttaa sama kaarreajosta aiheutuva momentti. Kuvassa 13 kallistuminen tapahtuu siis 400 t käyrää ja oikeneminen 167 t käyrää seuraten. Lastin poistuminen aluksesta parantaa ratkaisevasti vakavuutta. Tämä auttaa alusta pysymään pystyssä huolimatta suuresta dynaamisesta kallistuskulmasta.

### **Lastin purkautumisen reaktivoima ja dynaaminen kallistusmomentti**

CARAn kaatumista ei pystytty selittämään perinteisillä dynaamiseen vakavuustyöhön perustuvilla vakavuuslaskelmilla. Tämän johdosta vakavuustarkastelu laajennettiin koskemaan myös tapausta, jossa lastin purkautuminen lastiruumasta mereen aiheuttaa kaatavan lisämomentin.

Laskelmissa käytetyssä 400 tonnin lastitilanteessa CARAn vakavuus siirtyvän lastin takia on kallistuman alkuvaiheessa negatiivinen jolloin kallistuma kasvaa nopeasti. Kun kallistuskulma ylittää noin 25 astetta, lastia alkaa syöksyä ruuman karvelin yli. Kuvasta 13 tämä voidaan havaita oikaisevan momenttikäyrän muuttumisesta laskevasta nousvaksi. Lastin poistuessa aluksesta syntyy reaktivoima, joka CARAn tapauksessa aiheuttaa kallistavan momentin. Reaktivoiman periaate on esitetty kuvassa 14. Ulosvirtauksen suunta on hieman ylöspäin, mikä käy ilmi lastin liikkumista havainnollistavasta liitteen 1 kuvasta 2. Reaktivoiman suunnaksi on valittu lastin pinnan siirtymävektorien mukaan 20 astetta.

Lastin purkaantuessa ruumasta mereen, aluksen uppouma pienenee muutamassa sekunnissa noin puoleen alkuperäisestä. Tämän vuoksi alus myös kohoaa.



Kuva 14. Lastin mereen syöksymisestä aiheutuva lisämomentti.

### Differenssiyhtälötarkastelu

Lastin siirtymistapahtuma ja varsinkin laidan yli purkautuvan massan määrä ja nopeus vaihtelee koko kaatumistapahtuman ajan. Tätä tapahtumaa on kuitenkin analysoinnissa käsitelty huomattavasti yksinkertaistetussa muodossa, eli ulospurkautumispaksuus on oletettu vakioksi. Dynaamisen differenssiyhtälön tarkka ratkaisu olisi vaatinut oletuksen kaatumistapahtumasta sen avulla lasketut ylivirtauspaksuudet, massan poistumissuunnat ja nopeudet koko kaatumistapahtuman ajalta.

Jotta saatiin arvio sekä kaatumisen nopeudesta että myös ulosvirtauksen nopeudesta, ratkaistiin keinunnan likeyhtälö aikatasossa. Seuraavassa esitetyt laskelmat on esitetty yksityiskohtaisemmin liitteessä 1.

**Laskentamenetelmän kuvaus.** Kallistusliikkeen differentiaaliyhtälö ratkaistiin aikatasossa differenssimenetelmällä. Ratkaisua varten taulukoitiin edellä esitetyt muuttuvalla uppoumalla lasketut staattiset momentit. Aluksen oikaiseva momentti on kuvan 13 mukainen (sisältää lastin siirtymän vaikutuksen) ja kallistumisen aloittava momentti aiheutuu kaarreajasta. Taulukointi tehtiin viiden asteen välein eri kallistuskulmille nolasta 90 asteeseen. Varsinaisten vakavuuslaskelmissa käytettyjen suureiden lisäksi taulukoitiin aluksen uppouma (tarvittiin hitausmomentin ja sivuttaissiirtymän hitaustermien laskemiseen), lastin määrä (muutos), aluksen trimmistä ja ulosvirtauspaksuudesta riippuva ulosvirtauspinta-ala sekä reaktiovoiman momenttivarsi aluksen ja sen lastin painopisteen suhteen.

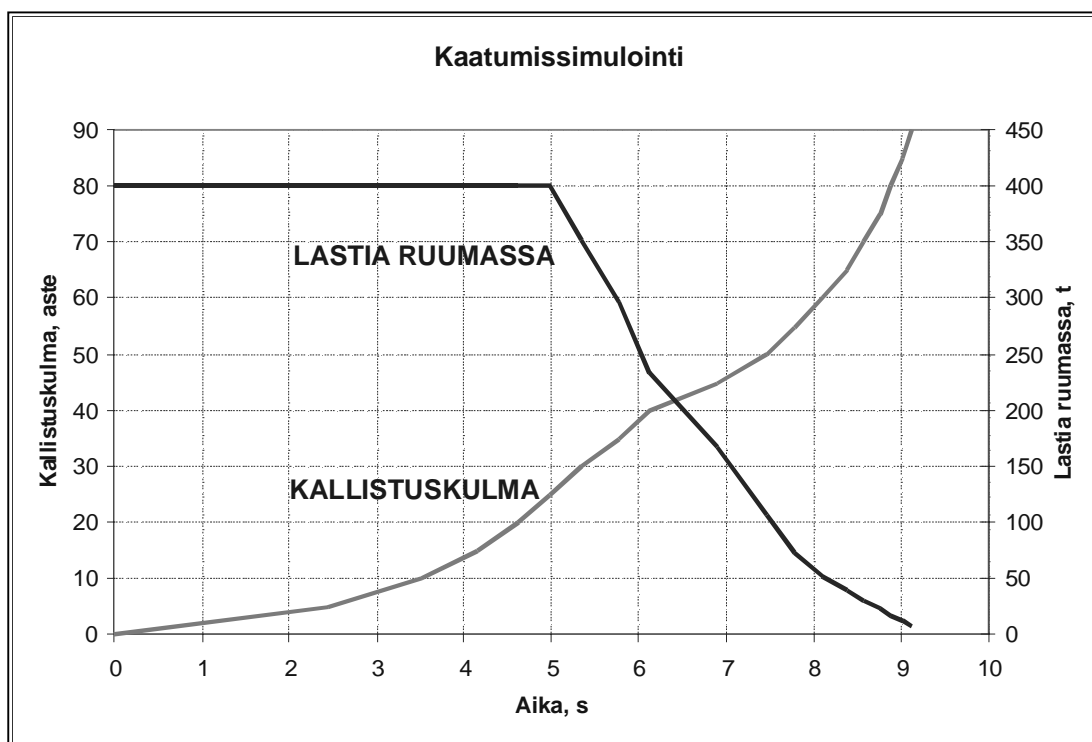
Esitetyn yksinkertaistetun laskentamenetelmän avulla saadaan arvio CARAn kaatumistapahtuman nopeudesta.



**Laskentatapauksessa** oli lastia 400 tonnia ja sen ylivuotopaksuutena käytettiin 0,8 metriä. Laskentatapaus on sama kuin edellä dynaamisen vakavuustarkastelun tuloksena kuvassa 13 esitetty. Valittu laskentatapaus ei ole lastin määrän suhteen pahin mahdollinen. Laskennan aloitushetkellä alus oli täysin pystyssä ja kallistumisnopeus oli nolla. Kallistavana momenttina, joka aloittaa kaatumisen, on kaarreajon aiheuttama momentti.

**Tulokset.** Simulointilaskelmien tulokset on esitetty kuvassa 15. Kallistuminen 90 asteen saakka tapahtuu 9 sekunnissa. CARAn kaatumiseen riittävä lastin ulosvirtauksen keskinopeus on 4,5 m/s.

**Yhteenvetona reaktivoiman huomioivasta tarkastelusta** voidaan todeta, että ottamalla se mukaan dynaamisiin laskelmiin, CARAn kaatuminen voidaan todentaa. Laskelmien mukaan kaatuminen tapahtuu nopeasti. Lisäksi tarvittavan reaktivoiman suuruuden voidaan todeta olevan realistinen samoin kuin vastaava lastin ulosvirtausnopeus.



Kuva 15. CARAn kaatumisen aikahistoria.

## 2.5 CARAn kaatuminen ja yhteenveto vakavuustarkastelun tuloksista

Seuraavassa on kuvattu tutkintalautakunnan analyysiin perustuvat kaatumisen vaiheet.

CARAn reitti ruoppaajalta läjitysalueelle oli lyhyt, vain noin 0,5 mailia eli 950 metriä. Läjitysalueelle ajettaessa tehdään oikealle käänнос, jonka suuruus on valittavasta ajoreitistä ja käännostavasta riippuen ilmeisesti 40–60 astetta. CARA kaatui joko tässä käännoksessa tai välittömästi sen jälkeen. Ensimmäiseksi kaatuneen aluksen luo tulleen ruoppaajan miehistön jäsenten mukaan proomu oli ylösalaisin käännoksen kohdalla.

Myös kuvassa 5a, joka on otettu muutama tunti kaatumisen jälkeen, CARA on suunnilleen käännöksen päättymiskohdassa. Kaatumisella ei ollut silminnäkijöitä.

**CARAn alkuvakavuus** on suurimmilla sallituilla lastimäärillä vaarallisen huono, jos lasti on kokonaisuudessaan homogeenista vellimäistä helposti liikkuvaa savea. Alkuvakavuus on savilastilla huono jo 350 tonnin lastitilanteessa (syväys vastaa tällöin kotimaa II -lastimerkkiä).

**Alkukallistuma.** Todistajalausuntojen perusteella CARAlla oli sen lähtiessä onnettomuusmatkalle alkukallistuma vasemmalle. Tutkintalautakunnan arvion mukaan kallistuma on ollut korkeintaan 2 astetta ja sen merkitys kaatumisen kannalta on vähäinen.

**Lastin poistumisen merkitys.** Jos oletetaan CARAn kallistumisen tapahtuvan niin hitaasti, että aluksen massan hitautta ei tarvitse ottaa huomioon, paranee vakavuus lastin alkaessa poistua lastiruumasta. Kun lastia on poistunut aluksesta, palataan kallistuskulmaan, jonka määrittää lastin määrä ja sen koheesio. Jos lastista on poistunut suurin osa, oikaiseva momentti kääntää aluksen takaisin pystyyn (ks. kuva 13). Myös dynaamisen vakavuustyön avulla tehty tarkastelu johtaa samaan tulokseen.

**Lastin liikkeellelähtö.** Ruopattaessa ja proomuun läjitettäessä häiriintynyt ja juokseva "vellimäinen" massa ei pysy keossa, jos massa kohdistuu ohjausliikkeestä, aallokosta tai muusta syystä pakkovoimia tai tärinää. Näiden tekijöiden vaikutuksesta massa pyrkii lastitilassa tasoittumaan lähes vaakatasoon.

Ruoppausmassan geotekniseen vakavuuteen vaikuttavat massan sisäinen koheesio ja rakeiden välinen kitka. Häiriintyneellä ruoppausmassalla koheesio ja sisäinen kitka ovat hyvin pieniä, jolloin sen geotekninen vakavuus on vähäinen.

Aluksen lisääntyvä kallistuma aiheuttaa ruoppausmassassa ensin paikallisesti geoteknisen vakavuuden menetyksen, joka vähentää kitkaa rakeiden välillä. Tämä mahdollistaa rakeiden liikkumisen, jolloin kasvava osa massasta muuttuu veden ja maa-aineksen seokseksi (suspensioksi). Massa alkaa käyttäytyä kuin neste. Tällöin vielä paikoillaan pysynyt ja aluksen kallistumasta jälkeen jäänyt massa voi "romahtaa" uuteen tasapainoon varsin nopeasti.

Ruoppausmassan sisältämät "savipaakut" ja mahdolliset kivet vaikuttavat massaa stabiloivasti liiketilän ollessa hyvin hidas. Lastin siirtymän edetessä paakkujen vaikutus vähenee olemattomaksi, rajoittuen paikkoihin, joissa paakun koolla on merkitystä (esimerkiksi reunan yli purkautuvan kerroksen paksuuteen).

**Kaatumistapahtuman nopeus.** CARAn kaatuminen on tapahtunut nopeasti. Kaatumisen kestoksi voidaan arvioida korkeintaan kymmeniä sekunteja. Tämän johtopäätöksen tueksi voidaan esittää seuraavat perustelut:

- Kukaan ei nähnyt kaatumistapahtumaa.
- Ohjaaja olisi ehtinyt poistua ohjaamosta hitaasti tapahtuvan kaatumisen aikana.
- Ohjaaja ei ehtinyt tehdä lastin hätäpurkausta.



Myös kaatumisen mallintaminen differenssiyhtälötarkasteluna johti tulokseen, jonka mukaan kaatuminen tapahtuu noin kymmenessä sekunnissa.

**Kaatumistapahtuman taustatekijät.** Välttämättömiä tekijöitä kaatumiseen johtaneen tapahtumaketjun käynnistymiseen ovat olleet ainakin: lastin suuri määrä ja ruoppausmassan koostumus (mataliin kekoihin jäänyt juokseva lieju). Käynnistävänä tekijänä on ilmeisesti ollut käänнос. Lisätekijänä on voinut vaikuttaa äkillinen korjaava ohjausliike kallistumisen alussa.

**Tapahtumaketju.** Aluksen liikkeellelähtö, ajo läjityspaikalle sekä lopulta kaarreajo saivat massan liiketilään, joka lopulta johti proomun kaatumiseen. Liike on voinut alkaa kekojen tasoittumisesta ja myös pituussuuntaisena lastin siirtymisenä. Massan liikkeellelähdön nopeuteen vaikuttavat massaan kohdistuvat ulkoiset voimat sekä massan oma hitaus.

Tapahtumaketju voidaan olettaa seuraavanlaiseksi:

- Lastaus. Massa oli lastauksen jälkeen hitaassa liikkeessä kohti tasapainoa. Liikkeen nopeuteen vaikuttivat lastauksessa jääneiden kekojen korkeus, pinnalla ollut juokseva lieju/vesi, massan vellimäisyys ja alkukallistuma. Hitaan tasoittumisen aikana liikkeessä oli lähinnä juokseva aines, vesi ja lieju, kiinteämpi aines pysyi paikoillaan ja keoissa. Lasti on tällöin stabiilin tuntuista. Aluksen alkuvakavuus on näennäisesti hyvä johtuen ruoppausmassan sisäisestä kitkasta, mikä antaa miehistölle väärän kuvan aluksen turvallisuudesta. Potentiaalista aluksen vakavuuden heikkenemistä matkan aikana ei pysty ennakoimaan ennen lähtöä.
- Liikkeellelähtö ja ajo ennen käännostä. Liikkeellelähdön jälkeen tapahtui kekojen tasoittumista ja massa menetti geoteknistä vakavuuttaan. Lasti muuttui vähitellen nestemäiseksi, jolloin aluksen vakavuus heikkeni siten, että pienillä kallistuskulmilla se oli labiili ja hieman suuremmilla kulmilla negatiivinen. Koska kallistavia momentteja ei ollut suoralla osuudella, alus pysyi pystyssä olemattomasta vakavuudesta huolimatta.
- Kaatumisen alku. Kaarreajosta johtuva aluksen kallistuminen aloitti kaatumiseen johtavan tapahtuman. Aluksella on muutaman asteen kallistuskulman jälkeen negatiivisen vakavuuden alue, jolloin kallistuskulma kasvaa ilman ulkoista kallistavaa momenttia. Samalla kallistumisnopeus kiihtyy. Kallistuminen aiheutti nopeutuvan massan pintaosan siirtymisen - ensin alkoi siirtyä juokseva massa, kallistuman lisääntyessä myös osa kiinteämmästä lastinosista siirtyi ja keot alkoivat tasoittua sortumalla. Tässä vaiheessa saattoi tapahtua myös korjaava ohjausliike - äkillinen ruorin oikaisu tai käänntö toiselle puolelle, joka hetkellisesti lisäsi kallistumaa ja aiheutti dynaamisen kallistavan herätteen.
- Lastin purkautuminen. Tämän jälkeen lasti "romahti", eli siirtyi ruumassa vaakatasoon kierähtämällä lähinnä ympyränmuotoista liukupintaa myöden - samalla loputkin keot latistuivat. Massan siirtyminen ei sinällään, jos se olisi tapahtunut hitaasti, olisi kaatanut alusta, koska osa lastista olisi valunut yli laidan sivukannelle ja mereen, minkä jälkeen alus olisi jälleen saavuttanut tasapainon. Lastin syöksyessä

ruuman reunan yli suurella nopeudella se aiheuttaa reaktivoiman, joka kasvattaa kallistavaa momenttia.

- Kaatuminen johtui siitä, että 1) massan siirtyminen, 2) massan ulosvirtaus ja siitä aiheutunut reaktivoima sekä 3) aluksen dynaaminen hitaus saivat aikaan kaatumista sekä kiihdyttävän (1 ja 2) että ylläpitävän tapahtuman (2 ja 3).
  1. Kaatumisen välttämätön ehto oli riittävän ison massan siirtyminen romahdusmaisen nopeasti. Massan siirtyessä nopeasti, se liikkui paksuna kerroksena, jolloin sen painopiste siirtyi huomattavasti aluksen sivusuunnassa.
  2. Massa pyörähti lastitilassa sen geometrian määräämää lähes ympyränmuotoista geoteknistä liukupintaa pitkin. Lasti poistui aluksesta tangentialisesti liukupinnan jatketta pitkin lastitilan geometrian mukaisesti. Riittävän suuren massan nopea siirtymä ja ulospurkautuminen tuotti suuren reaktivoiman ja alusta kallistavan momentin. Reaktivoima kiihdytti aluksen pyörähdystä ja aiheutti samalla sivuttaisliikkeen, jolloin alus myös pyörähti lastin alta pois.
  3. Aluksen vakavuuden kannalta oli kriittistä liikkuvan massan suuruus sekä sen liikkeen suunta ja nopeus. Kallistumisnopeus kiihtyi niin suureksi, että alus jatkoi liikettä omalla hitaudellaan kaatumiseen saakka.

Massan purkautuminen yli laidan aiheuttaa kaatumisen kannalta oleellisen kaatavan momentin lisätermin massan liikevoiman ja suunnan takia. Massan ja aluksen liikkeitä rajoittavat hitausvoimat. Lyhyessä ajassa ja rajatulla kallistuskulmalla massan ulospurkautumisnopeus ei ehdi kasvaa isoksi. Noin 400 t lasti kierähtää ruumassa tasapainotilaan 30 asteen kallistuskulmasta noin 1,8 sekunnissa. Tämä tai pienempi aika vaaditaan aluksen vastaavalta kallistumalta, jotta alus ei jää massasta jälkeen. Massan kehänopeus 30 asteen oikaisun jälkeen on noin 2,7 m/s.

## 2.6 Muut vakavuuslaskelmat

### 2.6.1 Shipconsulting Oy:n tekemät laskelmat

CARAlle tehtiin Terramaren tilaamana kallistuskoe 5.9.1997 Oy Shipconsulting:in toimesta. Sama yritys laati myös Merenkululaitokselle toimitetut vakavuuslaskelmat<sup>5</sup> uutta purjehduslupaa varten. Nämä ovat laivoille tehtävät normaalit staattiset vakavuuslaskelmat käyttäen merenkululaitoksen kriteerejä. Niissä ei ole huomioitu avoimen lastiruuman aiheuttamaa lastin purkautumista mereen.

Oy Shipconsulting:in tekemät laskelmat olivat tietävästi ensimmäiset CARAlle tehdyt vakavuuslaskelmat. Ne esitettiin merenkululaitokselle purjehduslupan saantia varten onnettomuuden jälkeen. Laskelmissa ei ole otettu huomioon lastin purkautumista mereen. Lastin mallintamisessa on yksi tärkeä olettaimus, joka poikkeaa tutkintalautakunnan käsityksestä. Säätiivis runko on Oy Shipconsulting:in laskelmissa mallinnettu siten,

---

<sup>5</sup> MS CARA VAKAVUUS JA VIIPPAUS, Ship Consulting Ltd Oy, 3.11.1997



että lastitila on yhteydessä mereen. Tällöin muodostuu toinen vapaa nestepinta lastin pinnan lisäksi. Tutkintalautakunnan käsityksen mukaan tämä johtaa liian huonoon tulokseen alkuvakavuudessa.

## 2.6.2 Emoyhtiö Boskalis B.V.:n teettämät laskelmat

Terramaren emoyhtiö Boskalis B.V. teki CARAlle onnettomuuden jälkeen vakavuuslaskelmat<sup>6</sup> käyttäen ranskalaisen luokituslaitoksen Bureau Veritas'in menetelmää. Sen mukaan vellimäisen lastin käyttäytyminen simuloidaan siten, että lastin yläpinnalla oletetaan olevan "viive" suhteessa laivan kallistuskulmaan.

Raportissa "CARA Split hopper barge Stability Booklet Offshore" lasti on jaettu kahteen osaan. Tiheämmässä alemmassa kerroksessa esiintyy viive, kun taas sen päällä oleva vesikerros on merenpinnan suuntainen. Lastin jako johtaa suuremmilla lastin tiheyksillä liian edulliseen painopisteen korkeuteen. Lisäksi tiheämmän alemman osan kallistava momentti jää pienemmäksi kuin laskettaessa homogeenisella lastilla. Lastin purkautuminen mereen ja veden pääsy ruumaan tulee ottaa huomioon Bureau Veritas'in menetelmän mukaan.

Nämä laskelmat ja käytetty menetelmä tulivat tutkintalautakunnan tietoon sen jälkeen, kun VTT:n laskelmat olivat suurimmalta osalta tehty. Vaikka niissä ei ole esitetty juuri onnettomuusmatkaa vastaavaa lastitilannetta, tulokset ovat samansuuntaisia tutkintalautakunnan laskelmien kanssa.

On mielenkiintoista havaita, että laskelmien olettamukset suurelta osalta vastasivat tutkintalautakunnan siihenastista käsitystä. Olennainen asia, joka Bureau Veritas'in menetelmästä kuitenkin puuttuu, on lastin dynaaminen kallistusmomentti. Tämä onkin hankala asia sisällyttää yleispätevästi vakavuuskriteeriin.

Terramaren emoyhtiön teettämät vakavuuslaskelmat tehtiin onnettomuuden jälkeen ilmeisesti avomeriruoppauksen tarpeisiin kehitetyllä laskentamenetelmällä.

## 2.7 Ohjaajien ja miehistön opastus

### 2.7.1 Ohjaajien tietämys proomun vakavuudesta vellimäisessä lastissa

Poliisin tutkinnassaan tekemien kuulustelujen mukaan CARAn päällikkö oli ollut tietoinen "vellimäisen" lastin mahdollisista vaaroista.

Kokeneet kuljettajat tekevät yleensä tiettyjä varotoimia kuljettaessaan herkästi liikuvaa lastia (siltti, savivelli...), jos esimerkiksi ruoppaajan luota lähdetäessä syntyy pysyvä kallistuskulma. Näitä varotoimia ovat:

- 1) hiljennys
- 2) pienemmän ruorikulman käyttö
- 3) proomun sulkulukon avaaminen (normaali aukaisu kokonaan kestää noin 10 s)
- 4) proomun avaaminen (normaali aukaisu kokonaan kestää noin 20–25 s)

<sup>6</sup> "CARA" split hopper barge, STABILITY BOOKLET, OFFSHORE, June 1998

Joskus vellimäistä lastia ajetaan lukot auki (vaihtoehto 3). Tämä on itse asiassa kiellettyä, koska osa lastista voi valua pois ja väärään paikkaan.

Kun CARA oli käännetty oikeinpäin, selvitettiin välittömästi missä asennossa palkoproomun avauslukot tällöin olivat. Tarkastuksessa havaittiin, että sulkulukon hydraulisylinteri oli 100–150 mm auki (koko hydraulimännän liike on noin 1 m). Tämä liike riittää käytännössä avaamaan lukituksen. Avaussylintereitä ei oltu aukaistu, mutta aluksen kaatuessa lukkojen ollessa auki lastitilan pohja saattoi olla muutamia senttimetrejä auki.

Sulkulukon avaaminen kestää 5–10s. Eri tehtävävaiheet ohjauspaneelissa ovat: 1) hydraulipumpun kytkimen kytkentä (yksi painallus) ja 2) lukko ajetaan auki (painonappia painetaan koko ajan).

Jos halutaan vielä viimeisenä turvatoimena lisäksi avata koko proomu ja tyhjentää lasti, niin tällöin tehdään vielä yksi vaihe eli 3) pääsylinteri ajetaan auki (painonappia painetaan koko ajan). Nämä painonapit ovat välittömästi ruorista oikealle (ks. kuva 7).

## 2.7.2 Koulutus erilaisten lastien kuljettamiseen

**Ruoppaukseen ja lasteihin liittyvä koulutus.** Ruoppaustyöhön ja kyseessä olevan proomun hallintaan ei vaadita eikä siihen ole järjestettyä koulutusta vaan työ opitaan käytännössä. Lastin vaarallisuudesta aluksen ohjaajilla oli ainoastaan kokemukseen perustuvaa tietoa.

**Ohjeistus.** Yhtiö ei ollut ohjeistanut ko. lastin kanssa käytettäviä varotoimenpiteitä eikä kouluttanut henkilöstöä vaaran varalta. Yritys ei ollut ohjeistanut lastin määrää suhteessa lastityyppiin eikä sitä, miten eri tavalla käyttäytyvät lastit tunnistetaan.

## 2.8 Pelastustoimet

### 2.8.1 Häät ilmoitus ja pelastustoimien käynnistyminen

CARA irrottautui onnettomuusmatkalle ruoppaajasta noin kello 14:05. Pinnalla ylösalaisin olleen proomun huomasi klo 14:12 päivystystiloissa ollut luotsi lähellä sijaitsevalta Raahen luotsiasemalta. Päivystävä luotsi teki heti hälytyksen hälytyskeskukseen sekä ilmoitti asiasta vuorossa olleelle luotsiaseman henkilökunnalle. Ruoppaaja KOURA II:lle tehtiin ilmoitus kaatumisesta tämän jälkeen kello 14:17. Vaikka kaatumisella ei ollut silminnäkijöitä, käynnistyivät pelastustoimet välittömästi.

Ensimmäisenä kaatuneen proomun luo saapui hinaajalla kolme henkilöä ruoppaajan miehistöstä. He alkoivat koputella vasaralla aluksen pohjaa siltä varalta, että ohjaaja olisi jäänyt ilmataskuun aluksen sisälle. Mitään vastausta ei kuitenkaan kuulunut.

Myöhemmin onnettomuuspäivänä sukelluksia CARAan teki kaksi urheilusukeltajaa. He tarkastivat ohjaamon, mutta eivät löytäneet uhria, jonka löysi CARAn ohjaamosta seuraavana päivänä 26.5.1997 paikalle kutsuttu ammattisukeltaja.

## 2.8.2 Pelastautuminen kaatuvan proomun ohjaamosta

Koska uhrin kuolinsyynä oli hukkuminen, on tutkinnassa selvitetty pelastautumis- ja pelastamismahdollisuuksia CARAn ohjaamosta. Ensimmäisten pelastussukellusten yhteydessä sukeltajat eivät saaneet ohjaamon kumpaakaan ovea auki. Vasen ovi oli ollut jumissa. Se oli pudonnut niin, että se oli jumissa kattolipan välissä. Tutkintalautakunnan pyynnöstä Raahen poliisi tutki CARAn kääntämisen jälkeen, miten aluksen ovet voi avata aluksen ollessa ylösalaisin.



*Kuva 16. CARAn oven sarana, joka sallii pystyliikkeen.*



*Kuva 17. CARAn oven yläpuolella oleva lipa estää oven aukenemisen oven siirtyessä ylöspäin.*

CARAn ovien tiivistämiseksi kiertää ovien reunoja kaksi 25 mm korkeata huulosta, joiden väli on 40 mm ja siihen on liimattu kumitiiviste. Oviaukon karmin muodostaa aukkoa kiertävä lattarauta. Karmin korkeus ulospäin on 22 mm ja se osuu oven ollessa kiinni oven huulosten väliin. Ovien saranat ovat normaalia, myös maissa käytettyä mallia, joissa seinään kiinnitettyjen tappien päälle ovissa olevien saranoiden holkit lasketaan. Tällainen sarana mahdollistaa oven liikkumisen pystysuunnassa, kun alus on kaatunut ja jäänyt ylösalaisin (kuva 16). Ohjaamon ovien yläpuolella on lippa, joka on saattanut aiheuttaa ovien jumiutumisen aluksen ollessa ylösalaisin (kuva 17).

Raahen poliisin selvityksen mukaan ovi saattoi jäädä jumiin yhdessä asennossa, mutta silloinkin oven pystyliike oli milleistä kiinni. Suljettu ovi voi liikkua 16 mm pystysuunnassa. Hytin seinään ja oviin oli hitsattu erilliset lenkit oven lukitsemiseksi riippulukolla. Ovessa oleva lenkki oli hitsattu muutama millimetri oven yläreunan tason alapuolelle. Jos ovea avattiin niin, että ovessa oleva lenkki on yläpuolella olevan lipan ulkopuolella, mutta ovi itse oli lipan sisäpuolella, niin ovi ei auennut, koska lenkki on alempana kuin oven yläreuna. Tässä asennossa ovi aukesi vain 10 cm. Oven yläreunasta oli lähtenyt maalia juuri siitä kohtaa missä jumiutuminen on mahdollista.

Jos ovea avataan yli 10 cm, niin se ei pääse liikkumaan pystysuunnassa kuin muutaman millimetrin. Tässä asennossa ovi on avattavissa. Aluksen ollessa ylösalaisin avaamista

vaikeuttaa yläreunan (kaatuneessa aluksessa alareunan) osuminen seinälippaan, koska ovi on painava.

Terramare on onnettomuuden jälkeen uusintu ovien saranat sellaisiksi, että ne eivät pysty liikkumaan pystysuunnassa.

Kaatuminen oli erittäin nopea ja CARA oli analyysin mukaan kyljellään noin kymmenesä sekunnissa. Tapahtuman nopeuden takia ohjaamosta olisi pitänyt poistua heti, koska viivästymisen aikana kehittyvä kallistuma tekee ohjaamosta poistumisen vaikeaksi. Jos ohjaaja kallistuman alkaessa valmistautuu esimerkiksi proomun avaamiseen, hän menettää kalliita pelastautumisessa tarvittavia sekunteja.

## 2.9 Muita lastin liikkumisen aiheuttamia onnettomuuksia tai vaaratilanteita

Hienorakeisilla, saven, siltin ja hienon hiekan raekokoaluetta edustavilla (maksimi rae-koko  $\leq 2$  mm) teollisuuden raaka-aine- tai sivutuotelasteilla on sattunut lastin liikkumisen aiheuttamia vaaratilanteita tai onnettomuuksia.

Tunnetuin lastin liikkumisen aiheuttama onnettomuus Suomen aluevesillä on FINN-BALTIC nimisen puskuproomu -yhdistelmän kaatuminen Hangon edustalla 27.12.1990. Proomun lastina oli rautarikastetta matkalla Luulajasta Koverhariin. Vuonna 1999 tapahtui Australiassa nikkelikastetta kuljettaneen bulkkerin kallistuminen kovassa merenkäynnissä (ms PADANG HAWK). Syyksi ilmeni lastin nesteytyminen neljässä aluksen viidestä ruumasta. Nesteytyminen johtui rikasteen liian suuresta lastauskosteudesta. Vastaavasti 7.11.2000 tapahtui Selkämerellä ilmeniittisavea kuljettaneen lastialuksen (ms MARIA VG) vakava kallistuminen lastin liikkumisen takia. Tässä tapauksessa lähes koko lasti lukuun ottamatta maston tukirakenteiden ja päätylaipioiden lähellä ollutta osuutta, liikkui. Syy lastin liikkumiseen oli lastin liian suuri lastauskosteus.

Tapauksia yhdistävät tekijät ovat lastin liian suuri vesipitoisuus ja aluksen voimakkaat kallistelut merenkäynnistä johtuen.

FINN-BALTICin tapauksessa alunperinkin kostea ja matkalla lisää kastunut rikaste lähti liikkeelle siirtymällä tasaisen lastitilan kannella joko toistuvina reunan sortumina tai yhtenä kappaleena. Syy tapahtumaan oli lastin sisältämä vesi, joka lietti lastin sekä merenkäynnin aiheuttama aluksen voimakas kallistelu.

PADANG HAWK'in ja MARIA VG:n tapauksissa lasti oli jo lastattaessa niin märkää, että kuljetuksen ja merenkäynnin aiheuttama värinä ja kallistelu aiheuttivat lastin nesteytyksen tai ainakin veden erottumisen pintaan ja liikkuvan liettyneen pintakerroksen kehittymisen. Veden puristuminen pintaan aiheuttaa myös huokospaineen kehittymistä lastiin, joka mahdollistaa lastin nesteytyksen. Jälkimmäinen mekanismi on hyvinkin mahdollinen näillä massoilla, joissa kiintoaineksen ominaistiheys on suuri.





### 3 JOHTOPÄÄTÖKSET

#### 3.1 Onnettomuuteen johtanut tapahtumaketju

Moottoriproomu CARA kaatui lastin siirtymisen takia. Lastin laatuun nähden liian syväälle lastatun aluksen kaatumiseen johtaneen tapahtumaketjun käynnistämiseen on riittänyt hyvin pieni häiriö.

- CARA oli lastattu vellimäisellä ruoppausmassalla sallittuun syvyyteen ilmeisesti Kotimaa I ja II lastimerkkien välille eli lastia oli noin 400 tonnia.
- Massa oli lastauksen jälkeen hitaassa liikkeessä kohti tasapainoa. Lasti on tällöin stabiilin tuntuista. Liikkeellelähdön jälkeen tapahtui kekojen tasoittumista ja massa menetti geoteknistä vakavuuttaan. Lasti muuttui vähitellen nestemäiseksi, jolloin aluksen vakavuus heikkeni siten, että pienillä kallistuskulmilla se oli labiili ja hieman suuremmilla kulmilla negatiivinen.
- Kaarreajosta johtuva aluksen kallistuminen aloitti kaatumiseen vasemmalle johtaneen tapahtuman. Aluksella oli muutaman asteen kallistuskulman jälkeen negatiivisen vakavuuden alue, jolloin kallistuskulma kasvoi ilman ulkoista kallistavaa momenttia. Samalla kallistumisnopeus kiihtyi.
- Kallistuminen aiheutti nopeutuvan massan pintaosan siirtymisen ja kallistuman lisääntyessä myös osa kiinteämmistä lastinosista siirtyi ja keot alkoivat tasoittua sortumalla.
- Massan siirtyminen ei sinällään, jos se olisi tapahtunut hitaasti, olisi kaatanut alusta, koska osa lastista olisi valunut yli laidan ohuena kerroksena sivukannelle ja mereen. Sen sijaan lasti "romahti", eli siirtyi ruumassa vaakatasoon kierähtämällä. Nopea kallistuminen aiheutti massan liikkeellelähdön paksuna kerroksena. Lastin syöksyessä ruuman reunan yli suurehkolla nopeudella se aiheutti reaktivoiman, joka kasvatti kallistavaa momenttia.
- Kaatuminen johtui siitä, että 1) massan siirtyminen, 2) massan ulosvirtaus ja siitä aiheutunut reaktivoima sekä 3) aluksen dynaaminen hitaus saivat aikaan kaatumista sekä kiihdyttävän (1 ja 2) että ylläpitävän tapahtuman (2 ja 3). Kallistumisnopeus kiihtyi niin suureksi, että alus jatkoi liikettä omalla hitaudellaan kaatumiseen saakka.

Kaatuminen oli tapahtumana niin nopea, että CARAn ohjaaja ei ehtinyt pelastautua ohjaamosta. Noin 10 sekunnissa alus oli kyljellään, ja täysin ylösalaisin muutamia sekuntia myöhemmin. Tällaisissa olosuhteissa tasapainon menettää nopeasti, minkä jälkeen pelastautuminen ulos vedellä täyttyvästä ohjaamosta on vaikeaa. Poistumista ylösalaisin olevan aluksen ohjaamosta vaikeutti ohjaamon oven avaamista haittaava seinälippa.

### 3.2 Onnettomuuteen vaikuttaneita tekijöitä

Riittävää tietoa helposti veltimäiseksi muuttuvan **lastin vaarallisuudesta** CARAn tyyppiselle alukselle ei ilmeisesti ollut valvovalla viranomaisella eikä yhtiöllä, koska alukselle ei oltu vaadittu tai tehty vakavuuslaskelmia, joissa aluksen vakavuutta olisi tarkasteltu lähes nestemäisesti käyttäytyvällä lastilla. Tutkinnassa ei selvinnyt, oliko Suomessa ennen onnettomuutta tietoa niistä ilmeisesti avomeriruoppauskalustolle tehdyistä vakavuuslaskelmista, joita CARAn operointiyhtiön emoyhtiö oli Hollannissa teettänyt.

Yhtiö ei ollut **ohjeistanut** ko. lastin kanssa käytettäviä varotoimenpiteitä eikä kouluttanut henkilöstöä vaaran varalta, joten aluksen ohjaajilla oli ainoastaan kokemukseen perustuvaa tietoa lastin vaarallisuudesta. Tiedon tai ohjeistuksen puute veltimäisen lastin käyttäytymisen nopeasta muutoksesta johti riskin aliarviointiin ja liian suuren lastiin kuljettamiseen.

Etenkin kyseessä olevalla lastityypillä **suuri lastin määrä** oli kohtalokasta. Lastimerkin noudattaminen oli vaikeata, koska lastimerkki oli maalattu samalla värillä kuin proomun runkokin, ja jäi lastausvaiheessa piiloon ruoppaajan laidan taakse. Lastauksessa syntyneen mahdollisen alkukallistuman merkitys on vähäinen.

Lastin laadusta johtuvan **lastin siirtymän nopeus** esti normaalien varotoimenpiteiden käytön. Kiinteämmällä lastilla alus kallistuu riittävän hitaasti, jotta pohjasta voidaan purkaa lastia mereen ja parantaa vakavuutta.

### 3.3 Vakavuuslaskennasta esiin tullutta

Tutkinnan yhteydessä selvitettiin liikkuvalla massalastilla lastatun aluksen kaatumisen dynamiikkaa ja sitä mitkä parametrit myötävaikuttavat niin nopeasti tapahtuvaan kaatumiseen. Osoittautui, että kaatumista ei voitu mallittaa, ellei oteta huomioon lastin purkautumista mereen ja siitä aiheutuvaa kaatavaa lisämomenttia.

Vakavuustarkastelun tekee vaikeaksi aluksen keinunnan dynamiikan sekä irtolastin dynamiikan yhteisvaikutus. Vastattavia kysymyksiä ovat: miten lasti liikkuu, kun siihen vaikuttavat dynaamiset aluksen liikkeistä aiheutuvat kuormat eli kuinka suuri osa lastista (siirtymäpaksuus) lähtee liikkeelle ja millä nopeudella.

CARAn kaatumisen välttämättömät ehdot olivat aluksen huono alkuvakavuus ja ison massan siirtyminen romahdusmaisen nopeasti. Aluksen vakavuuden kannalta oli kriittistä liikkuvan massa suuruus sekä sen liikkeen suunta ja nopeus. Tutkinnassa tehty vakavuustarkastelu osoittaa, että aluksesta poistuvan massan reaktivoiman ja sen suunnan huomioiminen on tärkeitä laskettaessa vakavuutta sellaisen liikkuvan lastin yhteydessä, joka voi purkautua mereen.



## 4 SUOSITUKSET

### 4.1 Viranomaisohjeistus ja määräykset

CARAn onnettomuus osoittaa, että ruoppausproomuille tulee tehdä kattavat vakavuuslaskelmat. Vakavuuslaskelmat tulee tehdä sekä kiinteälle että nestemäisesti käyttäytyvälle lastille. Lastin määrä tulisi sitoa aluskohtaisin määräyksin sekä liikennealueeseen että lastin liikkuvuuteen.

Tutkintalautakunta ehdottaa, että

- 1) *merenkululaitos vaatii kaikilta ruoppauksessa käytettäviltä lastialuksilta, joihin luetaan myös itsekulkevat proomut, vakavuuslaskelmat ja määrittää niille liikennealueen mukaiset lastin laadun huomioivat vakavuusvaatimukset. Vakavuuskäyrää koskevien vaatimuksien tulisi myös täytyä laskettaessa lasti täysin nestemäisenä homogeenisenä lastina.*

### 4.2 Ruoppausyhtiöiden ohjeistus

Ruoppausta harjoittavien yritysten lastausmenettelyn ohjeistusta pitää kehittää ja yritysten tulee antaa henkilökunnalle koulutusta siitä, miten eri tavalla käyttäytyvät lastit tunnistetaan.

Ohjeet lastin käyttäytymisen tutkimiseen tulee tehdä ja selvittää tarkoitukseen sopiva lastin laadun määritysmenettely. Menetelmiä ovat silmämääräinen tarkastelu ja lastille tehtävät kokeet (Liite 2). Työnjohdon on annettava tieto lastin laadusta (kuljetettavuudesta) kuormaajalle ja aluksen päällikölle, joilla tulee olla lastin laatuun sidotut lastaus- ja kuljetusohjeet. Lastimerkin noudattamista tulisi edistää helpottamalla syväyden määritystä ennen matkan alkamista.

Myös ohjeet poikkeavien tilanteiden käsittelyyn tulisi ohjeistaa osaksi turvajärjestelmää.

Tutkintalautakunta ehdottaa, että ruoppausyhtiöt

- 2) *laativat ohjeet lastin laadun vaikutuksesta lastaus- ja kuljetusmenettelyyn siten, että niissä käsitellään lastin laadun määrittämistä, alusten vakavuutta, lastimerkin noudattamista ja varotoimia sekä antavat henkilökunnalleen niihin liittyvän koulutuksen,*
- 3) *kehittävät alusten syvyyttä osoittavia laitteita ja niiden käyttöönottoa.*

### 4.3 Vakavuuslaskelmien kehittäminen

CARAn onnettomuuden tutkinta on osoittanut, että alustyyppin vakavuuden määrittäminen on vaikea ongelma ja että valmiit työkalut ovat puutteelliset. Tutkinnassa olisi tarvittu laskentamenetelmää, jolla voidaan analysoida aluksen dynaaminen vakavuus otta-

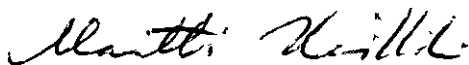
en myös huomioon irtolastin sisäinen dynamiikka. Näitä samoja menetelmiä voidaan soveltaa myös viranomaistarkastukseen tehtävässä vakavuuslaskennassa.

MKL:n tulisi selvittää laskentamenettelyjä, joilla käsitellään staattisessa tapauksessa kiinteästä ja nestelastista poikkeavat lastit, sekä etsiä mahdollisuuksia ratkaista dynaamisesti aluksessa liikkuvan lastin tai aluksesta purkautuvan lastin tapaus.

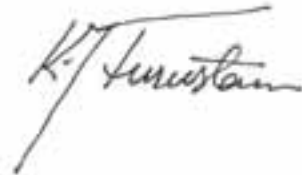
Tutkintalautakunta ehdottaa, että

- 4) *merenkulkulaitos selvittää mahdollisuuksia kehittää irtolasteja koskevien vakavuuslaskelmien tekemistä ja niiden käyttöönottoa myös proomualueen aluksille.*

Helsingissä 11.6.2003



Martti Heikkilä



Karl-Johan Furustam



Rainer Laaksonen



Pirjo Valkama-Joutsen

## LÄHTEET

- 1 CARA - Ilmoitus merionnettomuudesta, Pohjanlahden merenkulkupiiri 138/32/97
- 2 Rungon katsastustodistus 22.04.1994, Katsastustodistus 16.04.1996, Päätös aluksen miehityksestä ja Miehitystodistus 4.6.1996, Merenkulkuhallitus
- 3 Raahen poliisin 28.5.–10.7.1997 suorittamien kuulustelujen kuulustelupöytäkirjat.
- 4 Raahen kihlakunnan poliisilaitos, PÖYTÄKIRJA TEKNISESTÄ TUTKINNASTA Nro 6610/S/5393, 13.6.1997 (valokuvia CARA:n ovesta)
- 5 TYÖTURVALLISUUSKANSIO, Terramare Oy, 30.11.1995, (kopioituja sivuja)
- 6 *RISKIEN KARTOITUS ERI TYÖVAIHEISSA*, Työsuojelu Kokkolan 13 m:n väylän ruoppausurakka, Terramare Oy, (kopio)
- 7 Lieju- ja savimaiden läjitysalueet, Kartta Raahen Lapaluodosta, TERRAMARE OY
- 8 CARA:n kaatumispaikka, Kartta Raahen Lapaluodosta, TERRAMARE OY, 04.06.1997
- 9 *MOOTTORIPROOMU CARA:N VAKAVUUS*, VTT Valmistustekniikka, Tutkimusselostus VAL36-980263
- 10 *Proomu CARA:n ruoppausmassan käyttäytyminen ja ruoppausmassan painopisteen sijainnin määrittäminen proomun kallistuskulman funktiona*, VTT Yhdyskuntatekniikka, Tutkimusselostus YKI 324/98
- 11 *MS CARA VAKAVUUS JA VIIPPAUS*, Ship Consulting Ltd Oy, 3.11.97
- 12 "CARA" split hopper barge, STABILITY BOOKLET OFFSHORE, Vuyk Engineering B.V. June 1998 (kopio)
- 13 Valokuvia CARA:n kääntämisen yhteydessä 4.6.1997, Onnettomuustutkintakeskus
- 14 Valokuvia CARA:sta 25.5.1997, Raahen kihlakunnan poliisilaitos