

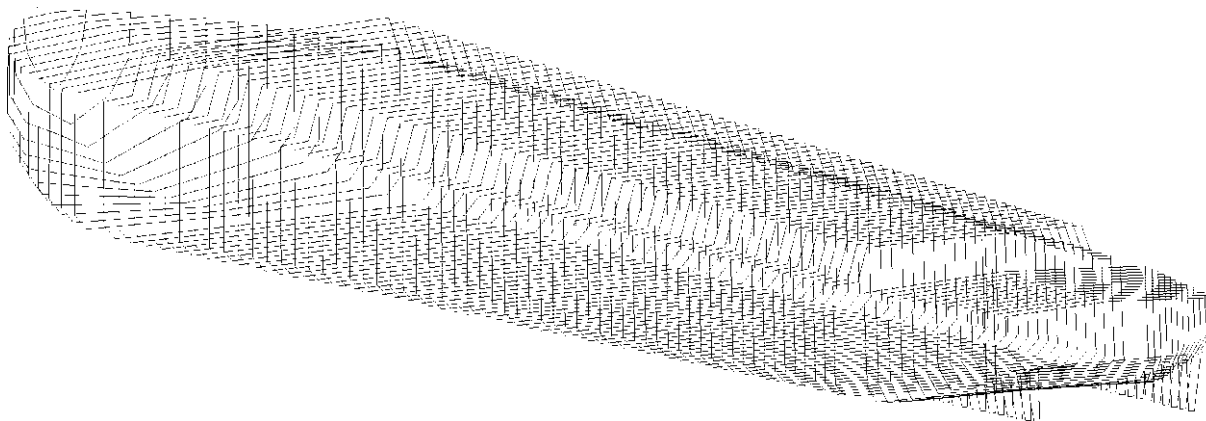
Liite 1. Vakavuusanalyysi

1 Johdanto

Vakavuuslaskelmien tarkoituksena on määrittää oikaisevan ja kallistavan momentin tasapainotila. Aluksen 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. Kuvassa 1 on laskelmissa käytetty CARAn rungon 3-ulotteinen malli. Pääongelma oli lastin siirtymisen aiheuttaman kallistavan momentin mahdollisimman oikea mallintaminen.

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



Kuva 1. CARAn rungon 3-ulotteinen NAPA-laskentamalli.

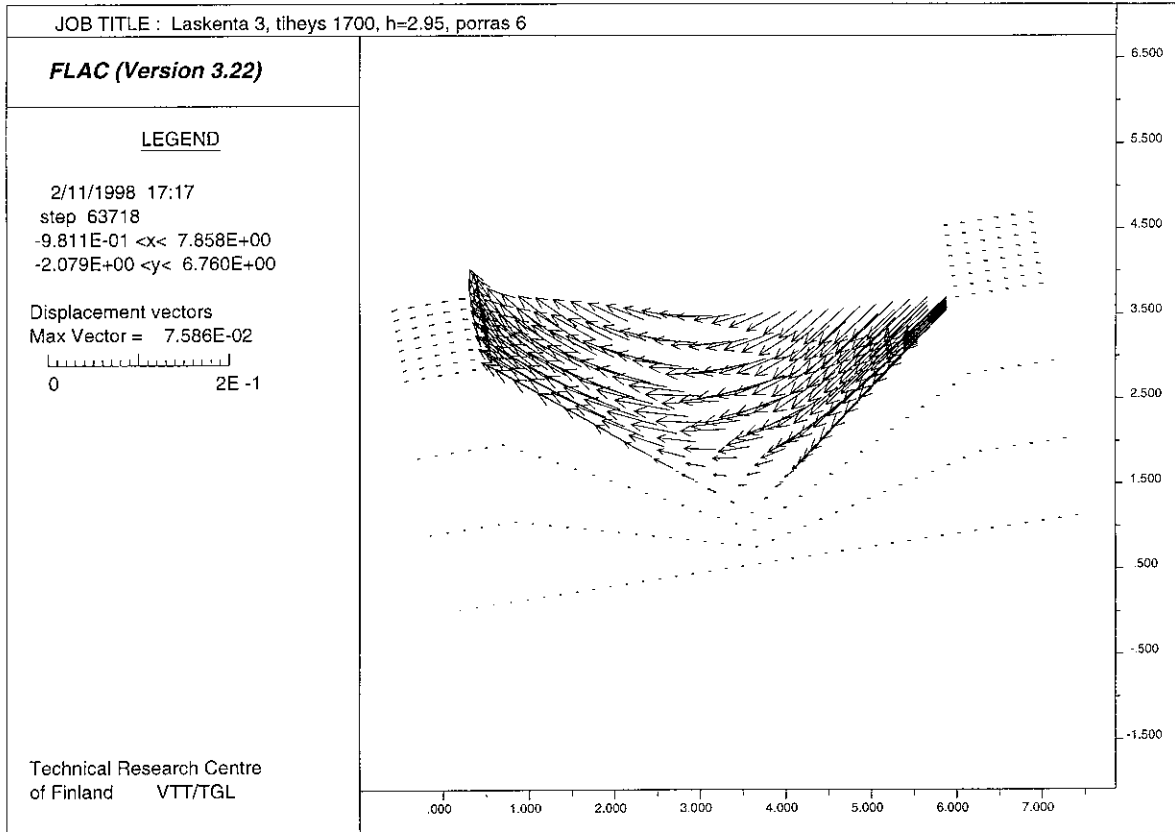
Seuraavassa on esitetty vakavuusanalyysi ja sen tulokset. Analyysissä on käsitelty lastin mallintaminen vakavuuslaskujen kannalta, vakavuuden laskenta muuttuvalla uppoumalla, käännöksestä aiheutuva kallistava momentti, staattiset vakavuuslaskelmat erilaisilla oletuksilla lastin käyttäytymisestä, dynaaminen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

2 Vakavuuslaskelmat ulos purkautuvalla lastilla

Lastin käyttäytymisen tarkastelu vakavuuslaskuja varten. Lastin määrän ja juoksevuuden vaikutuksen tutkimiseksi vakavuus määritettiin kolmella eri lastityypillä: vellimäinen juokseva massa joka käyttäytyy kuten neste, plastinen häiriintynyt maamassa ja kiinteä massa, joka laskettiin lähinnä vertailun vuoksi. Lastimäärä vaihdeltiin 300–400 tonnin välillä, kiinteällä lastilla 350–400 välillä. Nestemäisen lastin tapauksessa otettiin huomioon lastin valumisen mereen. Plastisesti häiriintyneen maamassan kallistava momentti laskettiin maa- ja kallioperän mallinnukseen kehitetyllä FLAC-ohjelmistolla VTT Yhdyskuntatekniikan toimesta. Tarkastelu tehtiin materiaalilla, jonka geotekniset lujuus- ja jäyk-

Liite 1

kyysominaisuudet vastasivat häiriintyneen saven tai siltin staattisen tilan ala-arvoja (taulukko 1). Simuloinnilla pyrittiin sekä visualisoimaan lastin siirtymätilaa (kuva 2) että määrittämään siirtyvän lastin painopisteen paikka proomun vakavuuslaskelmia varten proomun kallistuessa pituusakselinsa ympäri. Nämä laskelmat tehtiin vain pituusakselia vastaan kohtisuorassa tasossa, joten lastin mahdollisia liikkeitä proomun pituussuunnassa ei ole niissä huomioitu. Tällä menetelmällä massan käyttäytymistä voitiin simuloida vain siihen asti kuin lasti alkoi purkautua lastitilan reunan yli mereen tai sivukannelle. Proomun kallistuma oli tällöin lastin määrästä riippuen n. 25 astetta.



Kuva 2. Lastin siirtymä aluksen kallistuessa pystyasennosta 10 asteeseen. (Laskettu FLAC-ohjelmalla)

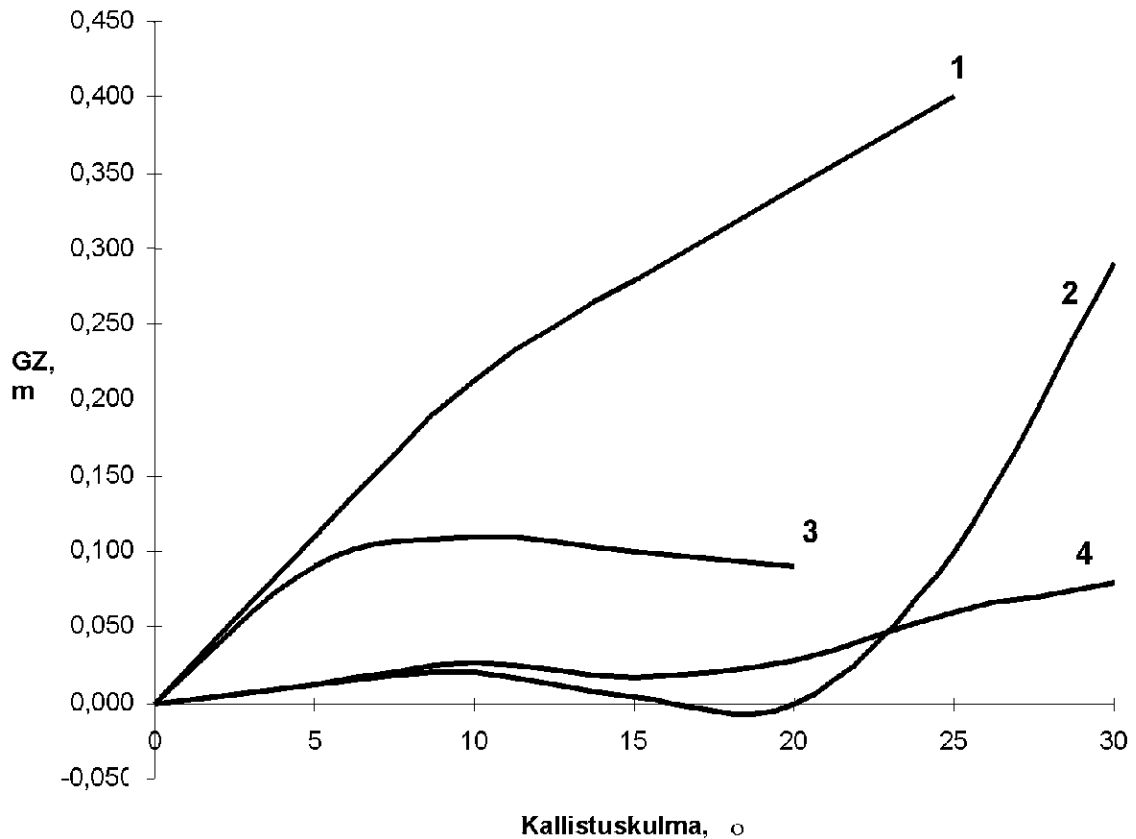
Taulukko 1. Häiriintyneen ruoppausmassan siirtymätilan tarkasteluissa käytetyt materiaaliparametrit.

Tiheys t/m ³	Koheesio kPa	Kitkakulma ° (huippu)	Kitkakulma ° (jäännös)	Poissonluku
1,5	1	1	0	0,45
1,7	2	5	2	0,45
1,7	1	1	0	0,45

Kuvassa 2 on havainnollistettu lastin siirtymätilaa proomun kallistuessa ja lastin kiertyessä uuteen tasapainotilaan. Siirtymävektorit kuvaavat massapisteen siirtymän suuntaa ja suuruutta. Kuvasta nähdään myös yli laidan purkautuvan massavirran suunta, joka massan kierähdysliikkeestä sekä laidan ohjauksen takia suuntautuu jyrkästi yläviistoon. Laskelmissa suuntakulmaa on pienennetty maan veto-voiman ja veden aiheuttaman hidastumisen takia.

Eri lastityypeille määritetyt GZ-käyrät. Jos laskennassa käytetään eri malleja lastin käyttäytymiselle, niin laskettujen GZ-käyrien muodot poikkeavat toisistaan varsin paljon. Yhdessä laskentatapauksessa

on oletettu lastin purkautuvan ulos ruumasta, jolloin vakavuuslaskelmat joudutaan tekemään muuttuvalla uppoumalla.



Kuva 3. Eri lastityypeille laskettuja GZ-käyriä Kotimaa II:n lastimerkkisyväydellä (lastin määrä 350 t). Lastityypit on merkitty samoin kuin taulukossa 3.

Taulukko 2. Vakavuusarvot Kotimaa II:n lastimerkkisyväydellä (lastin määrä 350 t) verrattuna Merenkulkulaitoksen vaatimuksiin eri tavoilla laskettuna.

Lastityyppi	GM	Max GZ	Φ_{GZMAX}	Area30	Area40	Area3040
	$\geq 0,15$ m	$\geq 0,2$ m	$\geq 25^\circ$	$\geq 0,055$	$\geq 0,090$	$\geq 0,030$
1	1,25	0,45	35	0,137	0,214	0,077
2	0,11	0,29	30	0,025	-	-
3	-	0,11	10	-	-	-
4	0,11	0,09	35	0,016	0,030	0,014

1. Kiinteä lasti (homogeeninen bulk-lasti ilman vapaan pinnan momenttia)
2. Nestelasti (lastin sallitaan valua yli laidan, ylivuotopaksuus = 0,4 m)
3. FLAC-laskelmista saaduilla lastin vapaan pinnan momenteilla laskettuja GZ-arvoja
4. Nestelasti (valuminen yli laidan on estetty)

Kuvassa 3 on esitetty yhteenveto eri menetelmillä lasketuista GZ-käyristä lastin määrän ollessa 350 tonnia, joka vastaa kotimaa II:n lastimerkkisyväyttä 2,20 metriä. Kuvan käyrä 1 on kiinteälle lastille (homogeeninen bulkkilasti ilman vapaan pinnan momenttia). Käyrä 4 on laskettu nestelastilla, jossa valuminen yli laidan on estetty. Käyrä 3 esittää FLAC-laskelmista saaduilla lastin vapaan pinnan momenteilla laskettuja GZ-arvoja. Käyrä 2 on laskettu nestelastilla, jonka sallitaan valua yli laidan. Tämä on muuttuvalla uppoumalla tehty laskenta. Notkahdus 15–20° välillä johtuu siitä, että osan lastista on oletettu jäävän sivukannelle kallistaen proomua lisää.

Liite 1

Näistä tuloksista käy selvästi ilmi, kuinka tärkeää lastin käyttäytymisen oikea huomioonottaminen on. Huomaa erityisesti ero menetelmien 2 ja 4 välillä suuremmilla kallistuskulmilla, joka johtuu lastin valumisesta mereen. Staattinen vakavuus paranee suurilla kallistuskulmilla poistuvan lastin takia. Tätä on tarkasteltu lähemmin ja havainnollistettu alla kohdassa Vakavuuden laskenta muuttuvalla uppoumalla.

Vertailu vakavuusvaatimuksiin. Eri lastityypeille laskettuja tuloksia on verrattu taulukossa 2 Merenkululaitoksen vakavuuskriteereihin lastialuksille. Laskettujen arvojen suuri hajonta korostaa entisestään laskentaolettamusten merkitystä.

Vakavuusvaatimukset ovat:

- GM:n tulee olla vähintään 0,15 m
- GZ:n tulee 30° kallistuskulmalla olla vähintään 0,20 m
- Suurimman GZ-arvon tulee esiintyä yli 25° kallistuskulmalla
- Pinta-alan GZ-käyrän alla 30° saakka tulee olla vähintään 0,055 mrad
- Pinta-alan GZ-käyrän alla 40° saakka tulee olla vähintään 0,09 mrad
- Pinta-alan GZ-käyrän alla 30° ja 40° välillä tulee olla vähintään 0,03 mrad

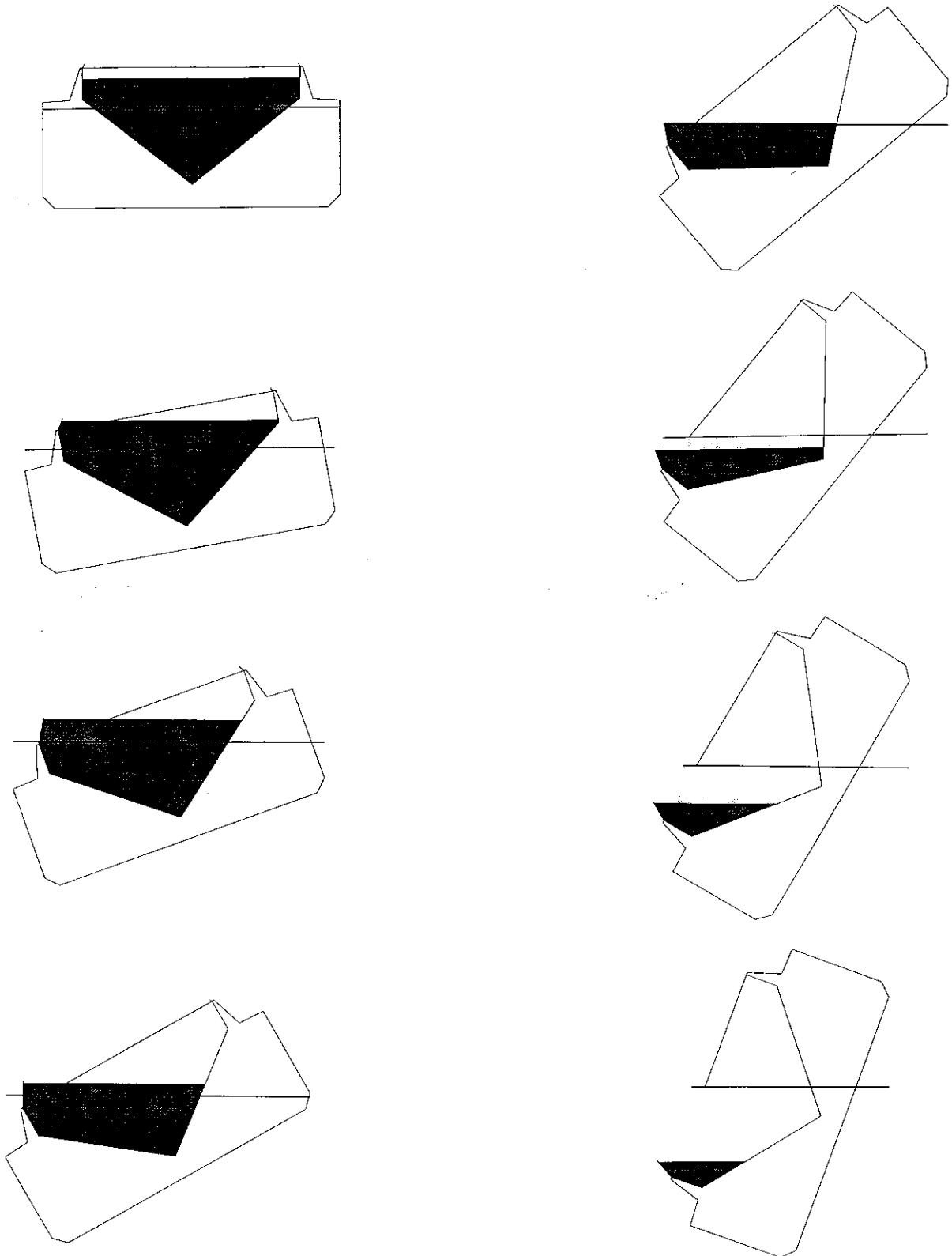
Ongelmina näiden vaatimuksien soveltamisessa palkoproomuun ovat lähinnä laskennassa käytettävät olettamukset.



Kuva 4. CARAn avoin lastitila

Vakavuuden laskenta muuttuvalla uppoumalla. CARAn lasti oli vellimäistä epähomogeenistä ruopausmassaa. 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.

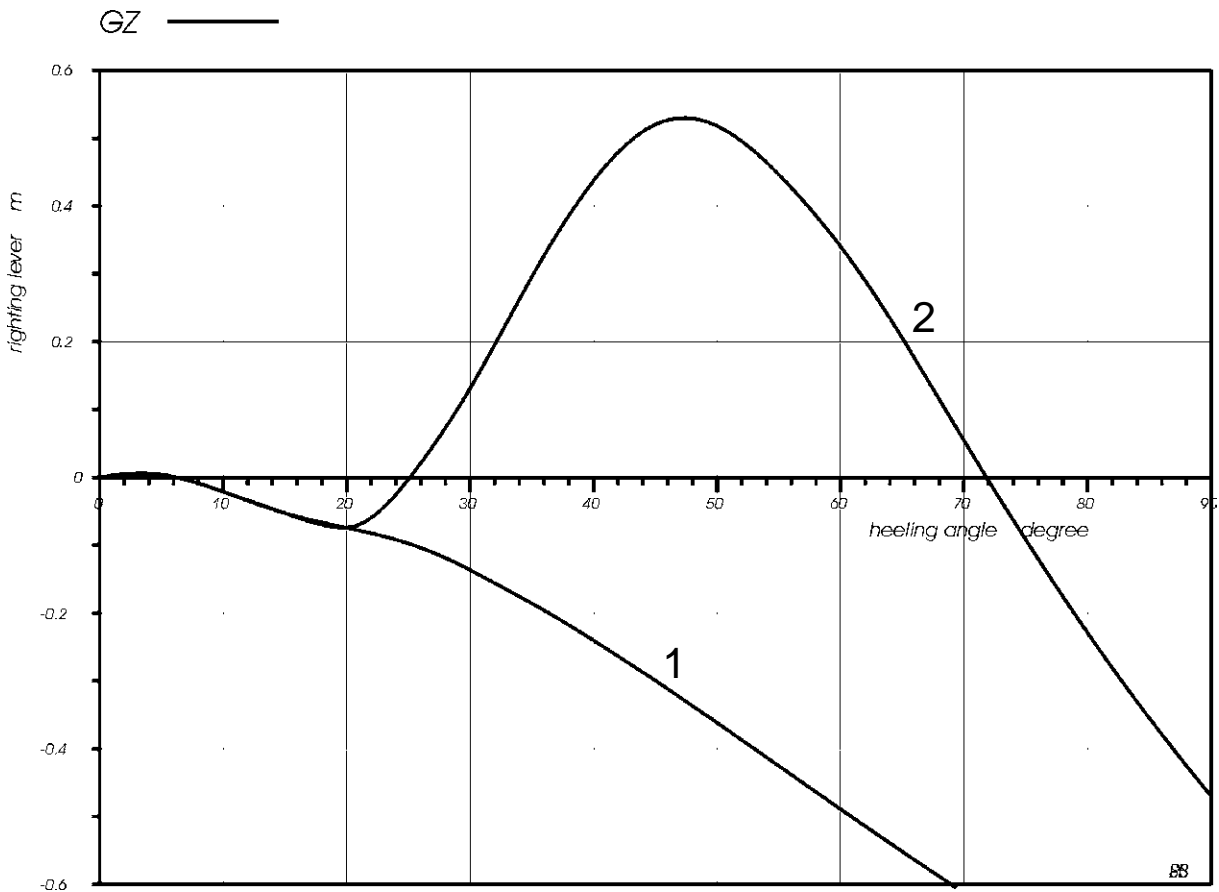
Aluksi CARAn vakavuutta tutkittiin perinteisillä staattisen ja dynaamisen tilanteen laskentamenetelmillä. Vakavuuslaskelmissa ei normaalisti huomioida lastin poistumista aluksesta. Tämä on epärealistinen olettamus CARAn tapauksen analysoinnissa, koska aluksen ruuma on avoin. CARAn avoimen ruuman muoto näkyy kuvasta 4. Lastin valuminen mereen tällaisesta ruumasta eri kallistuskulmilla on esitetty kuvassa 5. Kuvasarja perustuu laskelmaan, jossa lastin määrä on 435 t ja ylivuotopaksuus 0,6 m.



Kuva 5. Periaatekuva lastin valumisesta palkoproomusta mereen eri kallistuskulmilla. Kuvasarja perustuu laskelmaan, jossa lastin määrä on 435 t ja ylivuotopaksuus 0,6 m.

Liite 1

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. Kuvassa 6 on vertailun vuoksi esitetty oikeaseva momenttivarsi kallistuskulman funktiona (GZ-käyrä) laskettuna kahdella tavalla, kun lastia on 400 tonnia. Ensimmäinen tapaus (1) on laskettu siten, että lastin purkautuminen pois lastitilasta estyy kuten lastiluukkujen peittämästä ruumasta. Toisessa tapauksessa (2) taas lastin sallitaan valua kokonaan yli laidan 0,6 metrin ylivuotopaksuudella (ks. myös kuva 5). Kullakin kallistuskulmalla on laskettu oikeaseva momenttivarsi hetkellisellä uppoumalla⁷. CARAn vakavuus on suurilla lastimäärillä vellimäistä lastia erittäin heikko pienillä kallistuskulmilla molemmissa laskentatapauksissa. Tapauksessa 1 aluksen vakavuus on positiivinen vain kuuden asteen kallistuskulmaan saakka. Sitä suuremmilla kallistuskulmilla alus kaatuu. Toisessa laskentatapauksessa staattinen vakavuus paranee nopeasti noin 20 asteen kallistuskulman jälkeen lastin purkautuessa yli laidan. Vakavuus on positiivinen kuuteen asteeseen saakka, jonka ylittämisen jälkeen alus hakeutuu hitaasti tapahtuvassa kallistuksessa uuteen tasapainotilaan 25 asteen kallistuskulmalla vakavuuden muuttuessa jälleen positiiviseksi.



Kuva 6. CARAn staattinen vakavuus (GZ-käyrät) 400 tonnin vellimäisellä lastilla. Laskennassa on käytetty kahta eri olettamusta lastin käyttäytymisestä. Tapauksessa 1 lasti ei purkaudu yli laidan ja tapauksessa 2 lasti purkautuu kokonaan yli laidan. Jälkimmäisessä tapauksessa 50 asteen kallistuskulmalla aluksessa on lastia jäljellä enää 74 tonnia.

⁷ Muuttuvalla uppoumalla tehtävissä laskelmissa oikeaseva momenttivarsi GZ lasketaan NAPA-ohjelmassa jakamalla kutakin kallistuskulmaa vastaava oikeaseva momentti joko oletuksena alkuperäisellä uppoumalla tai vaihtoehtona ko. kallistuskulman hetkellisellä uppoumalla. Oletusvaihtoehdon käyttäminen johtaa CARAn tapauksessa liian pieniin GZ-arvoihin, koska ulos valuvan lastin määrä on suuri verrattuna aluksen kokonaisuppoumaan. GZ-käyrän esittäminen suhteessa muuttuvaan uppoumaan on todellista tilannetta vastaava, fysikaalisesti oikea tapa ja sitä vaihtoehtoa on käytetty CARAn tutkinnan laskelmissa.

Lastin parametrien vaikutuksesta 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-ainespaakkujen 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. Kuvissa 7 ja 8 on esitetty lastin määrän ja ylivuotopaksuuden vaikutusta aluksen staattiseen vakavuuteen muuttuvalla uppoumalla.

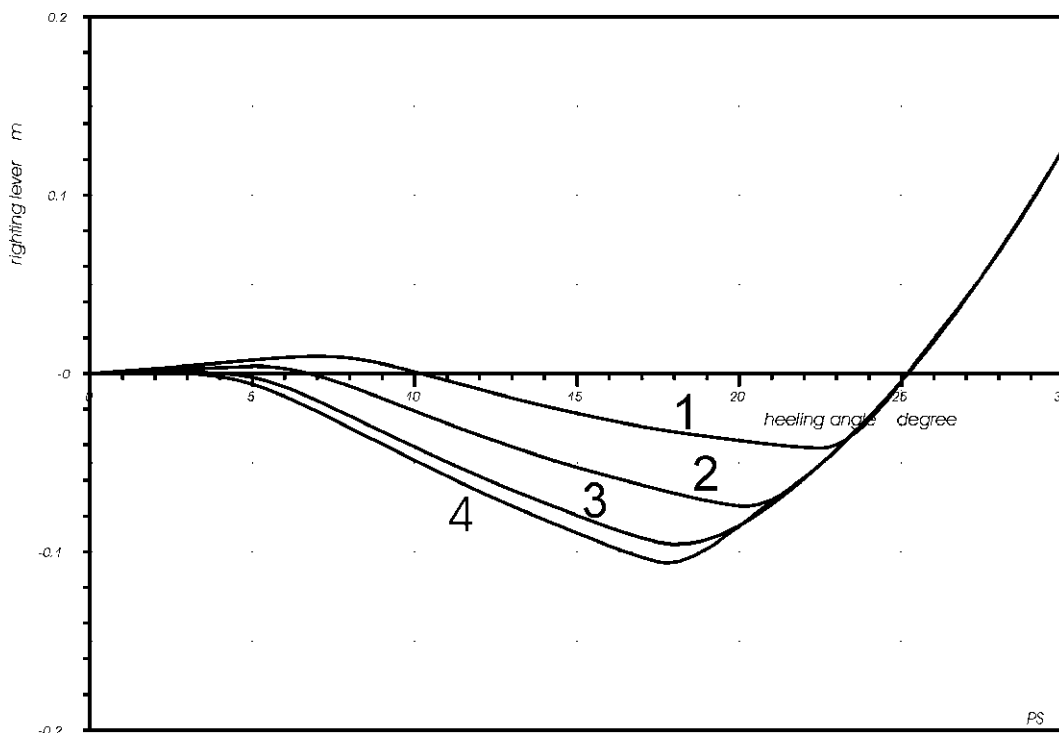
Lastimäärän kasvaessa seuraavat ilmiöt vaikuttavat huonontavasti vakavuuteen:

- Aluksen painopisteen korkeus perusviivasta, K_G , nousee.
- Alkuvaihtokeskuksen korkeus perusviivasta, K_{M_0} , pienenee suuremman syväyden johdosta
- Molempien edellisten seurauksena alkuvaihtokeskuskorkeus, GM_0 , pienenee
- Suuremmalla syväydellä varalaita pienenee ja sen seurauksena aluksen muotovakavuutta kuvaava ns. jäännösvakavuusvarsi, M_0S , pienenee kannen veteen painumiskulmaa suuremmilla kallistuskulmilla.

Oikaiseva momenttivarsi kallistuskulmalla ϕ , GZ_ϕ , määräytyy seuraavan kaavan mukaan:

$$GZ_\phi = GM_0 \cdot \sin\phi + M_0S$$

GZ ———



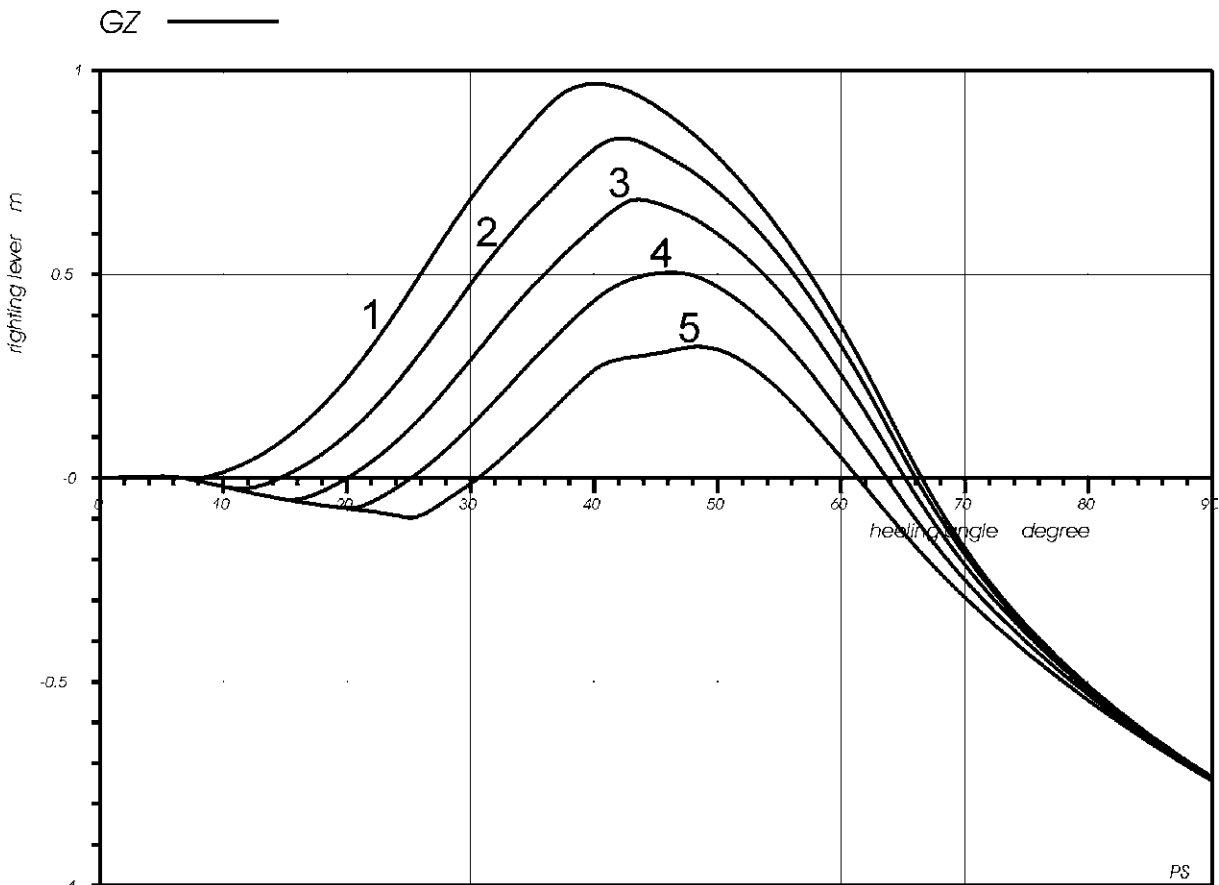
Kuva 7. Lastin määrän vaikutus CARAn vakavuuteen nesteytyneellä vellimäisellä lastilla. Oikaiseva momenttivarsi GZ on laskettu neljässä lastitilanteessa, jotka ovat: 1=375 t, 2=400 t, 3=425 t ja 4=435 t. Koska lasti alkaa poistua lastitilasta määrästä riippuen 17–23 asteen kallistuskulmilla, vaikuttaa lastin määrä vain alle 25 asteen kallistuskulmilla. Poistumispaksuutena on laskelmissa käytetty 0,6 m.

Liite 1

Kuvassa 7 on esitetty oikeaseva momenttivarsi kallistuskulman funktiona neljällä lastimäärällä 375 tonnista 435 tonniin. Kuvasta voidaan havaita, että oikeasevat momenttivarret poikkeavat eri lastimäärillä ainoastaan kallistuskulma-alueella 0–23 astetta, minkä jälkeen niiden käyrät yhtyvät. Tämä johtuu lastin poistumisesta lastiruumasta mereen, jolloin 23 asteen jälkeen lastitilanne on sama. Lastin ulospurkautuminen alkaa eri lastimäärillä tarkastelluissa tapauksissa 18 ja 23 asteen välillä. Momenttivarsikäyrä muuttaa suuntaa ulospurkautumisen alkaessa. Momenttivarsi yli 30 asteen kallistuskulmilla on sama kuin kuvan 6 tapaus 2. Käytetyllä 0,6 metrin ylivuotopaksuudella, vaikuttaa lastin määrä vakavuuteen vain alle 23 asteen kallistuskulmilla. CARAn kaatumisen kannalta hyvin oleellinen on momenttikäyrien negatiivisen alueen pinta-ala, joka on suoraan verrannollinen alusta kallistavan energian määrään.

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 8, 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 ulosvuotopaksuuksilla tarkastelluissa tapauksissa 8 ja 24 asteen välillä.



Kuva 8. 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. Purkautumis-kerroksen paksuudella on huomattava merkitys aluksen vakavuudelle.

Lastin tiheydeksi arvioitiin $1,7 \text{ t/m}^3$. Tätä on käytetty kaikissa vakavuuslaskelmissa. Tiheys perustuu Terramare Oy:n vastaavasta ruoppausmassasta mittaamaan arvoon. Tiheyden vaikutusta staattiseen vakavuuteen voidaan arvioida seuraavasti. Jos tiheys on pienempi:

- lastin painopiste nousee, koska lastin tilavuus on suurempi samalla massalla.
- lastin vapaan pinnan momentti on pienempi.
- lasti on löysempää ja juoksevampaa.

Aluksen staattinen vakavuus paranee nestemäisesti käyttäytyvän lastin tiheyden pienentyessä, koska toisen kohdan vaikutus on voimakkaampi kuin ensimmäisen.

Yhteenveto staattisesta vakavuudesta. Merkittävin vakavuutta heikentävä tekijä lastin määrän lisäksi on ylivuotopaksuus. Vellimäinen, nestemäisesti käyttäytyvä lasti, jolla on merkittävä paksuus sen siirtyessä lastitilassa, on vaarallinen. Samalla tavalla vaaralliseksi on todettu myös malmilastit vettyneenä. Geotekniikan kannalta, kun kaatumistapahtuma on nopea, massa lähtee liikkeelle paksuna kerroksena.

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.

3 Kallistavat herätteet

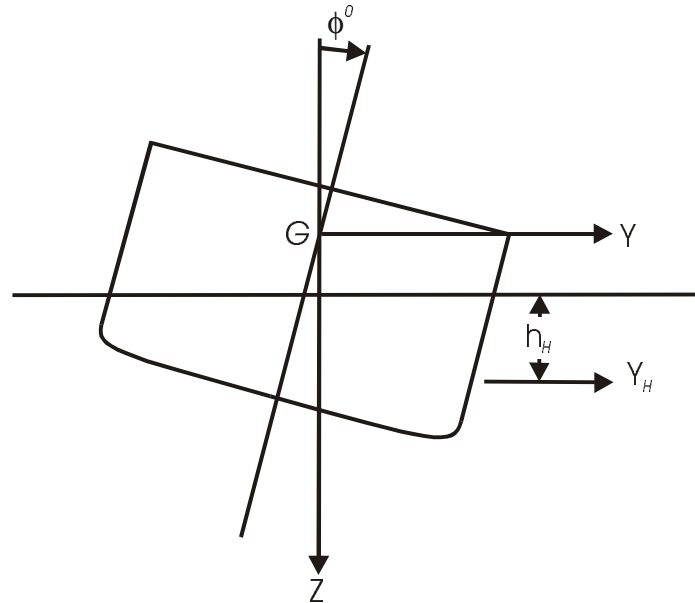
Jotta alus lähtisi kallistumaan tasapainotilasta, tarvitaan sisäisestä tai ulkoisesta herätteestä syntyvä kallistava momentti. Tämä voi olla seurausta ympäröivistä olosuhteista tai aluksen omasta liiketilasta tai sen muutoksesta. Se voi vaikuttaa joko kallistumisen alussa tai koko kaatumisen ajan. Näitä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

Käännöksen kallistava vaikutus. Luosit olivat aiemmin havainneet proomun kallistuvan käännöksessä ja saman laivamaisen käyttäytymisen vahvistaa ruoppaushenkilökunta. 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 tangentiaalinen nopeus on. Vaikka käännöksestä aiheutuva kallistuskulma olisi pienikin, se on saattanut olla häiriö, joka pani liikkeelle kaatumiseen johtavan tapahtumaketjun.

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

Aluksen kallistuminen käännöksessä voidaan laskea keskipakovoiman ja oikaisevan vakavuusmomentin tasapainotilana. Tällöin laskentatulosta voidaan esittää kallistavan momenttivarren TL (turning lever) muodossa. Tämän momenttivarren TL avulla voidaan laskea eri lastitilanteissa kallistava momentti tai verrata momenttivarretta aluksen laskettuihin vakavuusvarren arvoihin. Kuvassa 9. on esitetty voimatasapainon periaate käännöksessä.

Liite 1



Kuva 9. Voimatasapainon periaate käännöksessä. Y = keskipakovoima, Y_H = hydrodynaaminen poikittaisvoima, h_H = poikittaisvoiman vaikutuspisteen etäisyys vesiviivasta.

Kallistavan momenttivarren TL kaava on esitetty esimerkiksi IMO:n nopeita aluksia koskevan sääntökoodin liitteen 7 kohdassa 1.4.2 (Code for the High Speed Craft, HSC, Annex 7, 1.4.2). Kaava on muotoa:

$$TL = (1/g) \times (v_0^2/R) \times [KG - (d/2)] \quad \text{missä}$$

TL	=	käännöksen kallistava momenttivarsi [m]
g	=	maan vetovoiman aiheuttama kiihtyvyyys [m/s^2]
v_0	=	aluksen nopeus käännöksessä [m/s]
R	=	aluksen kaarresäde käännöksessä [m]
KG	=	aluksen painopisteen korkeus köliiviivan yläpuolella [m]
d	=	aluksen syväys [m]

Kallistava momentti lasketaan TL:stä kertomalla se aluksen uppoumalla ja painovoiman kiihtyvyydellä. Lausekkeen viimeinen termi [$KG - (d/2)$] voidaan päämitoiltaan CARAn tyyppiselle alukselle esittää japanilaisten Hirano & al.⁸ mukaan myös muodossa [$KG - (d/4)$]. Laskennassa näistä jälkimmäinen esitysmuoto antaa suuremman kallistavan vaikutuksen.

Käännöksen aiheuttaman kallistuman osuutta/vaiikutusta CARAn onnettomuudessa on arvioitu laskelmilla, joissa käytettiin yllä esitettyä kaavaa. Vaikutuksen suuruutta on haarukoitu vaihtelemalla laskelmissa niitä ko. kaavan muuttujia, joita ei tiedetä varmuudella. Tällaisia muuttujia ovat ne, jotka määrittelevät aluksen kulkeman reitin (kaarresäteen ja nopeuden) ja uppouman. Muuttujana on myös käytetty viimeisen termin kahta yllä esitettyä vaihtoehtoa. Kaarresäteen pienentäminen ja nopeuden kasvattaminen suurentavat kallistavaa momenttia. Eri oletuksilla lasketut kallistavat momentit on esitetty taulukossa 3.

CARAn kääntämisen jälkeen aluksen ohjaamossa tarkistettiin ohjailupotkurin asetuskulma ja potkurin nopeuden säädön asetukset. Ohjailupotkuri oli noin kymmenen asteen asetuskulmassa oikealle. Tämä säätökulma vastaa ilmeisesti sellaista CARAn käännöstä (käännösympyrää), jonka halkaisija on 2–4

⁸ M. Hirano & al., A Calculation of Ship Turning Motion Taking Coupling Effect due to Heel into Consideration, Trans. Of West-Japan Society of Naval Architects, No. 59, 1980

aluspituutta (90–180m). Potkurin nopeuden säätö oli noin 1/3 eteenpäin, mikä vastaa 4–6 solmun nopeutta.

CARAn potkurilaitteen työnnöksi paaluvetotilanteessa on arvioitu 30 kN (3 t). Tämä arvio perustuu VTT:llä tehtyyn aluksen vastuslaskelmaan, jonka kautta on voitu arvioida työntölaitteen tehokkuutta (Liite 2). Ohjauspotkurin aiheuttama maksimaalinen kallistavan momentin (täydellä teholla) voidaan arvioida olevan 2 metrin momenttivarrella 60 kNm (6 tm). Tämänsuuruinen momentti olisi voinut kallistaa CARAa hetkellisesti samaan suuntaan kuin kaarreajo, jos ohjailulaite olisi käännetty poikittain (90 astetta vasemmalle) kesken käännöstä kääntymisen ja sen aiheuttaman kallistuman lisääntymisen pysäyttämiseksi. Koska ohjailulaitteen asetuskulma todettiin aluksen kääntämisen yhteydessä olleen 10 astetta oikealle, tätä ei ole pidetty todennäköisenä eikä sitä ole huomioitu laskelmissa.

Tehtäessä kaarreajosta aiheutuvan momentin herkkyytarkastelua eri parametreillä käytettiin laskelmissa seuraavia parametrejä 400 tonnin lastilla, jota vastaava uppouma on 678 tonnia:

Taulukko 3. Kaarreajon aiheuttama kallistava momentti

Nopeus [solmua]	Kaarresäde [m]	Momenttivarasi [m]	Kallistava momentti [kNm]
4	50	0,92	54
4	50	1,51	88
4	100	0,92	27
4	100	1,51	44
5	50	1,51	137
6	50	0,92	121
6	50	1,51	198
6	100	0,92	61
6	100	1,51	100

Kallistava momentti, jonka kaarreajo on aiheuttanut, on laskelmien mukaan suurimmillaan noin 198 kNm (19,8 tm) 6 solmun nopeudella ja 50 metrin kaarresäteellä sekä laskettuna edellä mainitulla suuremmalla momenttivarrella.

Tutkijalautakunta on arvioinut (valinnut) jatkolaskelmissa käytetyksi arvoksi kallistavalle momentille 121 kNm (12 tm), joka on varovainen yläraja-arvio. Tähän suuruusluokkaan päädytään 50 metrin kaarresäteellä IMO:n laskukaavalla 6 solmun nopeudella sekä suurempaa momenttivarvartta käyttäen 5 solmun nopeudella.

Tämän suuruisella kallistusmomentin vaikutuksesta alus kallistuu noin 2° lastin ollessa kiinteässä muodossa. Kaaroksen alkaessa voi kallistus hetkellisesti saavuttaa tätä suuremman arvon.

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

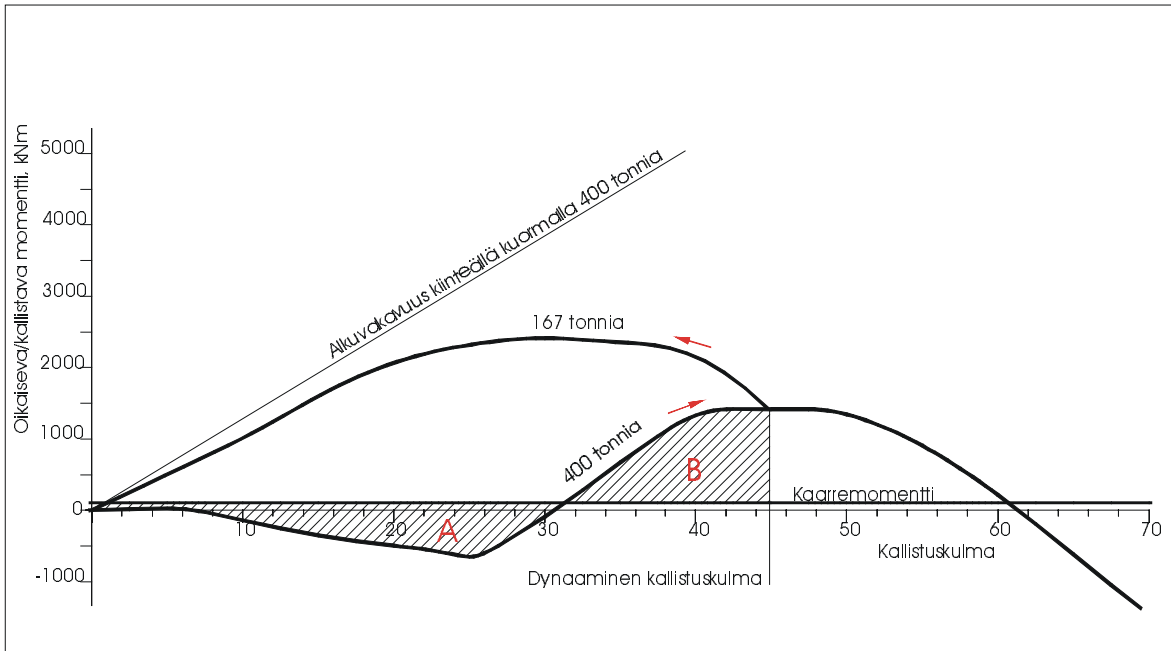
4 Dynaamiset vakavuustarkastelut

Edellä todettiin CARAn vakavuuden paranevan lastin purkautuessa yli laidan niin paljon, että aluksen kaatumista ei voi selittää pelkästään staattisilla vakavuuslaskelmissa. Staattisessa vakavuuslaskelmas-

Liite 1

sa ei oteta huomioon laivan liiketilaa. Kaatumistapahtuman ilmeisen nopeuden vuoksi siihen liittyviä dynaamisia tarkasteluja tehtiin alusten vakavuustarkastelussa tavanomaisen dynaamisen vakavuustyön avulla. Dynaamista vakavuustyötä käytetään, jos alukseen vaikuttaa impulssikuorma⁹. Tällä tarkastelulla voidaan kallistumaan lähteneelle alukselle laskea sen saavuttama suurin kallistuskulma liikkeen päättyessä. Tämän jälkeen alus palaa staattisen tasapainotilan määrittämään kallistuskulmaan.

Dynaaminen vakavuustyö



Kuva on tehty seuraavasti:

NAPA:ssa on ajettu DCR-puolella CARATURN-makro jolloin on saatu punainen 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 1167/D4
Ajettu constant displacementilla

Kuva 10. 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 kallistavamomentti, kun nopeus on 6 solmua ja kaarresäde 50 m.

Laskettaessa CARAn vakavuutta dynaamisen vakavuustyön avulla, on oletettu, että kaarreajon kallistusmomentti vaikuttaa kallistuksen aiheuttavana impulssina. Laskelmissa 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 eli noin 70 astetta; ks. kuva 10.)

⁹ 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. Oikaisevaa 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 laatuina on käytetty kNm:ä.

Tämä voidaan esittää kaavan muodossa seuraavasti:

$$\int_{\phi 1}^{\phi 2} M_{oikaiseva} d\phi + \int_{\phi 1}^{\phi 2} M_{kallistava} d\phi = 0$$

Kaavassa $\phi 1$ on staattinen kallistuskulma kallistuksen alkaessa ja $\phi 2$ sen loppuessa. Siinä tapauksessa, että aluksella ei ole alkukallistumaa, kulma $\phi 1$ on nolla.

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 (kuvat 7 ja 8). Muuttuvan uppouman vuoksi CARAn kohdalla asiaa tarkastellaan oikaisevan/kallistavan momentin kuvaajan avulla. Kullakin kallistuskulmalla on laskettu oikaiseva momentti hetkellisellä uppoumalla. Kuvassa 10 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 10 tämä merkitsee, että pinta-ala B:n tulee olla yhtä iso kuin A.

Edellä mainituilla oletuksilla laskettuna CARA saavuttaa 45° 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° kallistuskulmaan edellyttäen että alukseen edelleen vaikuttaa sama kaarreajosta aiheutuva momentti. Kuvassa 10 kallistuminen tapahtuu siis 400 t käyrää ja oikeneminen 167 t käyrää seuraten.

Lastin poistuminen aluksesta parantaa ratkaisevasti vakavuutta. Tämä auttaa alusta pysymään pysyvässä huolimatta suuresta dynaamisesta kallistuskulmasta. Edellä esitetyillä menetelmillä ja parametreillä tehdyt laskelmat eivät vielä selitä CARAn kaatumista.

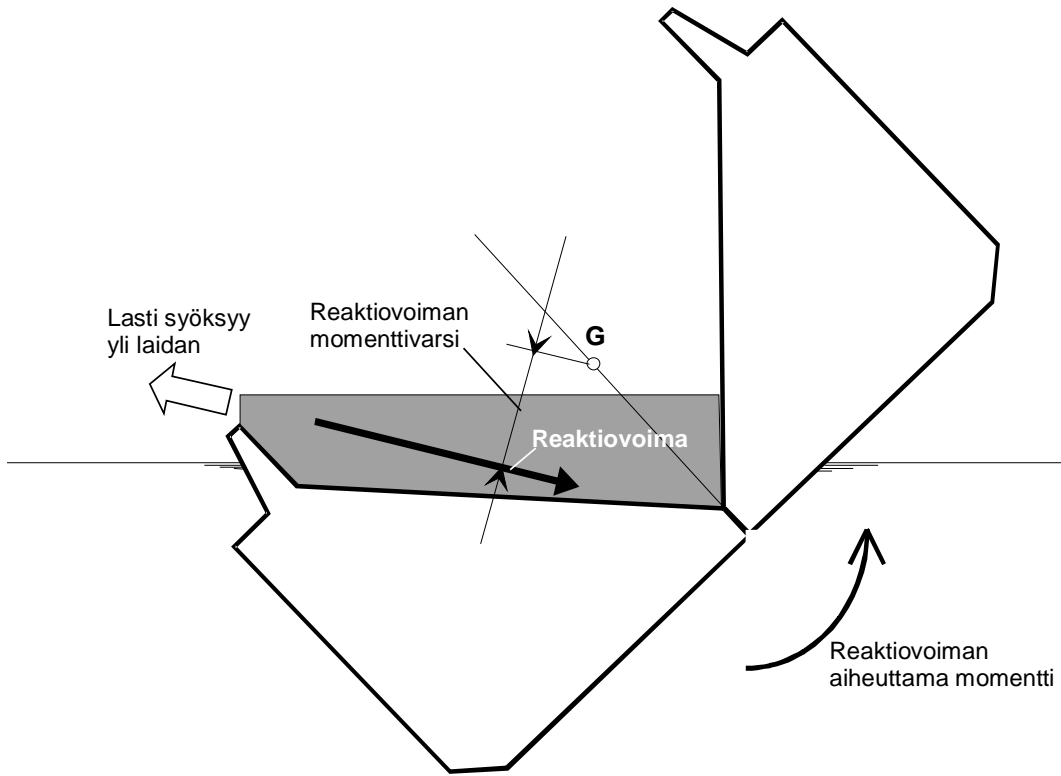
Lastin purkautumisen reaktivoima ja dynaaminen kallistusmomentti

CARAn kaatumista ei pysty 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 kallistuksen alkuvaiheessa negatiivinen jolloin kallistuma kasvaa nopeasti. Kun kallistuskulma ylittää noin 25 astetta, lastia alkaa syöksyä ruuman karvelin yli. Kuvasta 10 tämä voidaan havaita oikaisevan momenttikäyrän muuttumisesta laskevasta nousevaksi. Lastin poistuminen aluksesta aiheuttaen reaktivoiman, joka CARAn tapauksessa aiheuttaa kallistavan momentin. Reaktivoiman periaate on esitetty kuvassa 2. Todellisuudessa ulosvirtauksen suunta on hieman ylöspäin, mikä käy ilmi lastin liikkumista

Liite 1

havainnollistavasta kuvasta 2. Kuvan tulokset osoittavat massavirran suunnan olevan aluksen vaakatasosta yläviistoon. Reaktiovoiman suunnaksi on valittu lastin pinnan siirtymävektorien mukaan 20 astetta. (Raportin kuvan 11 vektorin suunta on noin 35 astetta, joten käytetty suunta on valittu konservatiivisesti.)



Kuva 11. Lastin mereen syöksymisestä aiheutuva lisämomentti.

Lastin purkaantuessa ruumasta mereen, aluksen uppouma pienenee muutamassa sekunnissa noin puoleen alkuperäisestä. Tämän vuoksi alus myös kohoaa¹⁰.

Reaktiovoiman laskeminen perustuu seuraaviin oletuksiin:

- Lasti alkaa poistua aluksesta, kun lastin yläpinta nousee ylivuotopaksuuteen.
- Ylivuotopaksuudeksi on valittu 0,8 m.
- Ylivaluva lasti poistuu aluksen vaakatasoon nähden 20 asteen kulmassa ylöspäin.
- Lasti poistuu laidan yli ylivuotopaksuuskorkeuden ja ruuman reunan määrittämästä pinta-alan A_V ¹¹ läpi.

Reaktiovoima F , joka syntyy kun lasti valuu yli, on laskettu seuraavan kaavan mukaisesti:

$$F = \rho \cdot Q \cdot V_1 \quad [N] \quad (1)$$

$$\rho = \text{lastin tiheys} \quad [kg/m^3]$$

$$Q = \text{tilavuusvirta} = A_V \cdot V \quad [m^3/s]$$

$$V = \text{nopeus, jolla lasti valuu yli laidan} \quad [m/s]$$

¹⁰ Kohoamista vastustava hitausvoima aiheuttaa aluksi kallistusta lisäävän ja lopuksi kallistusta vastustavan momentin. Hitautsvoiman momentin on arvioitu olevan pienemmän kuin kaarreaajosta aiheutuvan kallistavan momentin. Koska hitautsvoima lisäksi vaikuttaa lyhyemmän ajan ja molempiin suuntiin, ei sitä ole otettu huomioon näissä laskelmissa.

¹¹ CARA on koko kaatumisen ajan peräviippauksessa, jonka määrittämä lastin ylätasoa on huomioitu ulosvirtauksen pinta-alassa.

Kallistava momenttivarsi on laskettu ulosvirtauspinta-alan painopisteen kautta kulkevan vaikutus-suoran etäisyytenä uppouman massan painopisteeseen. Lisäksi on oletettu että, vaikutussuora on 20 asteen kulmassa ylöspäin ja että alus kallistuu vaaka-akselin ympäri. Aluksen peräviippauksen vaikutus momenttivarteen on otettu huomioon.

Tasapainoon pyörähtävän massan kehänopeus. Yksinkertaistamalla lasti "kiinteäksi" ympyränmuotoista kitkatonta liukupintaa pitkin kierähtäväksi kappaleeksi voidaan liitteessä 2 esitetyllä menetelyllä laskea, että n. 400 t lasti kierähtää ruumassa tasapainotilaan 30° kallistuskulmasta n. 1,8 sekunnissa. Eli tämä tai pienempi aika vaaditaan aluksen vastaavalta kallistumalta, jotta alus ei jää masstasta jälkeen.

Jos alus kallistuu 20–25°/s, niin ruuman laidalla kehänopeus (lastin kiertokeskuksen etäisyys laidasta r=2,8 m) on 1–1,2 m/s. Massan kehänopeus 30° oikaisun jälkeen on n. 2,7 m/s.

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 ja sen avulla lasketut ylivirtauspaksuudet, massan poistumissuunnat ja nopeudet koko kaatumistapahtuman ajalta.

Jotta saatiin arvio sekä kaatumisen nopeudesta että myös ulosvirtauksen nopeudesta, ratkaistiin keinnun liikeyhtälö aikatasossa. Seuraavassa esitettyjen laskelmien tulokset on esitetty yksityiskohtaisemmin tämän liitteen lopussa. Aluksen keinumisliikettä voidaan kuvata seuraavalla differentiaaliyhtälöllä:

$$I'_{XX} \ddot{\Phi} + \Delta h(\Phi) = M_{X,ulk}(\Phi)$$

missä

$$I'_{XX} = \text{aluksen hitausmomentti}^{12}$$

$$\ddot{\Phi} = \text{kallistumisen kulmakiihtyvyyden}$$

$$\Delta h(\Phi) = \text{oikaiseva momentti}$$

$$M_{X,ulk}(\Phi) = \text{kallistavat ulkoiset momentit}$$

Laskentamenetelmän kuvaus. Kallistusliikkeen differentiaaliyhtälö, joka on esitetty yllä, ratkaistiin aikatasossa differenssimenetelmällä. Ratkaisua varten taulukoitiin edellä esitetyt muuttuvalla uppoumalla lasketut staattiset momentit. Aluksen oikaiseva momentti on kuvan 10 mukainen (sisältää lastin siirtymän vaikutuksen) ja kallistava staattinen momentti aiheutuu kaarreajosta. Taulukointi tehtiin viiden asteen välein eri kallistuskulmille nollasta 90 asteeseen. Varsinaisten vakavuuslaskelmissa käytettyjen suureiden lisäksi taulukoitiin aluksen uppouma (tarvittiin hitausmomentin ja sivuttaissiirtymän hitaustermin laskemiseen), lastin määrä (muutos), aluksen trimmistä ja ulosvirtauspaksuudesta riippuva ulosvirtauspinta-ala sekä reaktiovoiman momenttivarsi aluksen painopisteen suhteen.

¹² Aluksen hitausmomentti laskettiin kaavalla

$$I'_{xx} = m \cdot (k_{xx}^2 + k'_{xx}{}^2)$$

missä m = aluksen (muuttuva) massa
 k_{xx} = aluksen hitaussäde = 0,35·B
 k'_{xx} = näennäinen hitaussäteen lisäys = 0,15·B
 B = aluksen leveys

Liite 1

Differenssiratkaisu etenee normaalisti laskemalla muutos pienen vakiona pidettävän aika-askeleen aikana. Tässä ratkaisussa etsittiin iteroimalla taulukoitua kallistuskulman muutosaskelta vastaava aika. Laskelmissa käytetty kulman muutosaskel oli edellä mainittu 5 astetta.

Lastin ulosvirtauksesta aiheutuva reaktiovoima, joka aiheuttaa myös kallistavan momentin, ratkaistaan laskelmassa ulosvirtausnopeuden kautta. Ulosvirtausnopeus voidaan kullakin kulma-askeleella ratkaista staattisista tuloksista saatavan ulosvirtaavan lastin määrän ja ulosvirtauspinta-alan sekä iteroitavan aika-askeleen avulla. Massavirran ja sen nopeuden avulla voidaan laskea reaktiovoima. Lopuksi kallistava momentti lasketaan käyttäen reaktiovoiman momenttivartta.

Esitetyn yksinkertaistetun laskentamenetelmän avulla saadaan arvio CARAn kaatumistapahtuman nopeudesta.

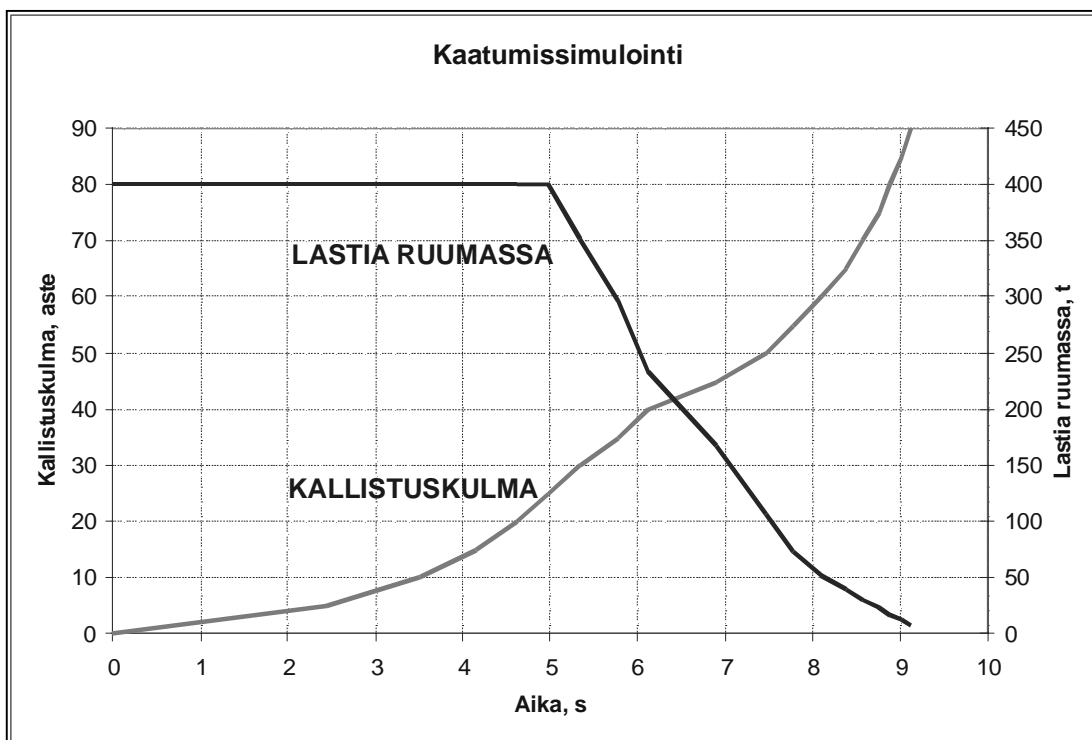
Laskentatapauksessa oli lastia 400 tonnia ja sen ylivuotopaksuutena käytettiin 0,8 metriä. Laskentatapaus on sama kuin edellä dynaamisen vakavuustarkastelun tuloksena kuvassa 10 esitetty. Valittu laskentatapaus ei ole lastin määrän suhteen pahin mahdollinen. Laskennan aloitushetkellä alus oli täysin pystyssä ja kallistumisnopeus oli nolla. Kallistavana momenttina, joka aloittaa kaatumisen, on kaarreajon aiheuttama momentti.

Laskelmissa käytettyjä oletuksia. Lastin ulosvirtauksen aiheuttama reaktiovoima on mukana kaatumissimuloinnissa kallistuskulman ollessa 35–60 astetta. Tässä valinnassa käytetyt oletukset ovat: ylempi lastikerros siirtyy 20 asteen kallistuman jälkeen, mutta suurin osa lastista lähtee liikkeelle noin 25–30 asteessa ja sen nopeus kiihtyy reaktiovoiman kannalta oleelliseksi 35 asteeseen mennessä. Suurin osa lastista on poistunut lastiilasta 60 asteen kallistuskulmalla, johon reaktiovoiman laskenta on lopetettu.

Tulokset. Simulointilaskelmien tulokset on esitetty taulukossa 4 ja kuvassa 12. Kallistuminen 90 asteeseen saakka tapahtuu 9 sekunnissa. Lastin ulosvirtauksen keskinopeudeksi saatiin 6,4 m/s.

Taulukko 4. Kaatumissimuloinnin tulokset

Kallistuskulma	Lastia ruumassa t	Massan nopeus m/s	Reaktiovoima kN	Kaatumisnopeus astetta/s	Kaatumisaika s
0	400	0		0	0
5	400	0		-2,0	2,45
10	400	0		-4,7	3,51
15	400	0		-7,8	4,15
20	400	0		-10,7	4,62
25	400	0	0	-13,5	4,99
30	352	0	0	-14,3	5,34
35	296,5	0	0	-11,1	5,79
40	232,9	8,43	1644,5	-14,7	6,12
45	166,9	4,73	402,0	-6,7	6,89
50	105,6	7,14	741,5	-8,5	7,48
55	72,1	7,66	829,4	-14,1	7,79
60	52,2	4,10	246,2	-17,0	8,12
65	40	0		-19,6	8,38
70	30,8	0		-24,0	8,59
75	23,1	0		-29,2	8,76
80	16,9	0		-34,8	8,90
85	12	0		-40,4	9,03
90	8,2	0		-46,1	9,13



Kuva 12. CARAn kaatumisen aikahistoria.

Ulosvirtausnopeuden tarkastelu. Tämä tarkastelu on tehty massan virtausnopeuden suuruusluokan tarkistamiseksi. Simulointilaskelmasta saadaan lisäksi tuloksena alusta oikaiseva ja kaatava vakavuustyö. Kaatava vakavuustyö sisältää nyt myös reaktivoiman vaikutuksen. Verrattaessa näitä vakavuustyön arvoja voidaan todeta, että kaatavan työn arvo (ja samalla reaktivoima) on merkittävästi suurempi kuin oikaisevan, eli pienempikin reaktivoima riittää kaatamaan CARAn.

Aluksen kaatumiselle on riittävä ehto vakavuustyötarkastelussa, että kaatava työ kasvaa reaktivoiman impulssin vaikutuksesta suuremmaksi kuin oikaiseva työ kaatumiskulmalla. Kaatavan vakavuustyön muutos on kaksinkertainen verrattuna siihen lisäykseen, joka on riittävä ylittämään oikaisevan vakavuustyön maksimiaron (arvon kaatumiskulmalla). Kaatumiseen riittävä ulosvirtausnopeus voidaan laskea puolittamalla reaktivoiman aiheuttama kaatavan työn lisäys. Momentti, joka on suoraan verrannollinen reaktivoimaan, on funktio virtausnopeuden neliöstä, joten vain 70 % laskennassa saadusta nopeudesta riittää aluksen kaatamiseen vakavuustyötarkastelussa. Täten riittävä virtausnopeus on 4,5 m/s.

Kun tätä aluksen kaatamiseen tarvittavaa massan virtausnopeutta verrataan aiemmin esitettyyn massan kehänopeuteen, kun sen liikkeellelähtö tapahtuu gravitaation vaikutuksesta, voidaan huomata kaatumissimuloinnista lasketun nopeuden olevan lähes kaksinkertainen massan kehänopeuslaskelman tulokseen 2,7 m/s verrattuna.

Yhtenä osana tässä aluksen suhteen lasketussa virtausnopeudessa 4,5 m/s on kehänopeus 0,6 m/s, joka johtuu aluksen pyörittämisestä alta pois 12,2 astetta sekunnissa. Kun tämä huomioidaan, saadaan massan virtausnopeudeksi 3,9 m/s.

Tulokseksi saadut massan virtausnopeudet 2,7 ja 3,9 m/s ovat suuruusluokaltaan hyväksyttävän lähellä toisiaan, kun huomioidaan laskentamenetelmän epätarkkuudet.

Menetelmän tarkistukset. Laskentamenetelmän toimivuutta tarkistettiin siten, että sen avulla laskettiin kuvan 10 tilannetta vastaava dynaaminen vakavuuskulma, johon saakka alus kallistuu ilman ulosvirtauksesta aiheutuvaa reaktivoimaa. Vakavuuskulmaksi saatiin 39 astetta, mikä vastaa riittäväällä

Liite 1

tarkkuudella kuvassa 10 esitettyä dynaamisen vakavuustarkastelun yhteydessä saatua dynaamisen kallistuskulman arvoa 45 astetta.

Reaktiovoiman suuruusluokkatarkistuksena tehtiin lisäksi simulointilaskelma sen aiheuttamasta sivuttaissiirtymästä ja -nopeudesta¹³. Tämä laskelma katsottiin tarvittavan suuruusluokan tarkistamiseen sellaisen voiman yhteydessä, josta ei ole mitään tuntumaa. Laivan vastus ja hitaustermit sivuttaisliikkeessä ovat suuruusluokaltaan tiedossa CARAn päämittasuhteet omaavalle alukselle. Oletuksena tässä laskelmassa oli, että reaktiovoiman suunta on koko ajan vaakasuoraan. (Tämä on realistinen oletus kuvan 5 perusteella). Laskelmien tuloksena saatiin CARAn suurimmaksi sivuttaisnopeudeksi 1,6 m/s ja siirtymäksi noin 4 metriä, mitkä katsottiin realistisiksi. Niiden perusteella voidaan arvioida, että laskettu reaktiovoima ei ole epärealistisen suuri.

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

5 Ulospurkautuvan lastin nopeuden tarkastelu

Lähtökohta

Lasti pyörähtää kiertokeskuksen ympäri ympyräpinnan segmentin muotoisena kappaleena. Ympyrän muotoisen pyörähdyskappaleen valinta johtuu siitä, että kuormitetun "koheesiomaan" pyörähdyspinta on ympyränmuotoinen sekä teoriassa että kokemukseen perustuen.

Pyörähtävän massan koko

Massan koko määräytyy kinemaattisesta reunaehdosta. Kappaleen on pystyttävä pyörähtämään ruumassa kaikkia laitoja sivuten.

Tarkastelun idea

Tarkastellaan "kiinteän" veltimäisen kappaleen liiketilan tasapainoehtoja pyörähdysliikkeessä.

Liike-energia:
$$T = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (2)$$

¹³ Poikittaiskiihtyvyyden on laskettu kaavalla:

$$\dot{y} = (F \cdot \cos(\Phi - 20) - Y'_{v|v|} \cdot (0.5 \cdot \rho \cdot L \cdot T) \cdot v^2) / (m + m'_y)$$

missä

F = reaktiovoima,
Φ = aluksen kallistuskulma,
F · cos(Φ - 20) = reaktiovoiman vaakasuora komponentti,
Y'_{v|v|} = aluksen dimensioidun poikittaisvastuskerroin = 0.8 (arvioitu samat päämittasuhteet omaavan aluksen mukaan),
Y'_{v|v|} · (0.5 · ρ · L · T) = dimensiollinen poikittaisvastuskerroin (L = aluksen pituus = 44 m, T = aluksen syväys = 2,36 m),
Y'_{v|v|} · v² = aluksen poikittaisvastus nopeudella v,
m + m'_y = aluksen massa + poikittainen lisätty massa ≈ 2 m

Simulointitulokset ovat liitteen lopussa olevassa taulukossa.

Potentiaalienergia: $V(\Theta) = -\int M(\Theta)d\Theta$ (3)

Missä:

I on massahitautsmomentti, $I = \int (x^2 + y^2) dm = \rho_A \int (x^2 + y^2) dA$ (4)

Θ kiertokulma

ω kulmanopeus, $\omega = d\Theta/dt$ (5)

Tasapainoehto: $\frac{1}{2} I \omega^2 = -\int M(\Theta)d\Theta$ (6)

Kuvan 12 merkinnöillä saadaan yhteys:

$$\frac{1}{2} I \omega^2 = m \cdot g \cdot a(1 - \cos(\Theta_0))$$
 (7)

Mistä seuraa kulmanopeuden maksimiarvoksi arvoksi:

$$\omega = \sqrt{2 \cdot m \cdot g \cdot a(1 - \cos(\Theta_0)) / I}$$
 (8)

Missä:

- a on segmentin painopisteen etäisyys kiertokeskuksesta (m)
- g maan vetovoiman kiihtyvyys (m/s²)
- m pyörähtävä massa (kg)
- Θ_0 kaltevuuskulma ennen pyörähtämistä

Laskenta perustuu seuraaviin oletuksiin:

- r = 2,8 m ympyrän säde (m)
- $\rho_A = 1700 \text{ kg/m}^3$ massan tiheys (kg/m³)
- m = 435 t lastin massa

Kitka ja koheesio (viskoosi tai ei) on jätetty huomioimatta.

Lauseke (8) voidaan integroida, jolloin tietyn kulmavälin viemä aika voidaan laskea. Ratkaisuun tulee kuitenkin nimittäjään $\tan(\Theta)$ -termi, joka aiheuttaa 0:lla jaon, jos lopetuskulma on 0. Laskuissa on siis käytettävä jotain pientä arvoa, esim. 1° tai vastaava arvo radiaaneissa.

$$T_2 - T_1 = \sqrt{2} \cdot Y \cdot \ln \left(\frac{\tan\left(\frac{\Theta_2}{4}\right)}{\tan\left(\frac{\Theta_1}{4}\right)} \right)$$
 (8)

Missä:

$$\text{Vakio } Y = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot m \cdot g \cdot a / I}}$$
 (9)

Pyörähtävän massan kehänopeus laidalla eri alkukaltevuuksilla on esitetty taulukossa 5.

Liite 1

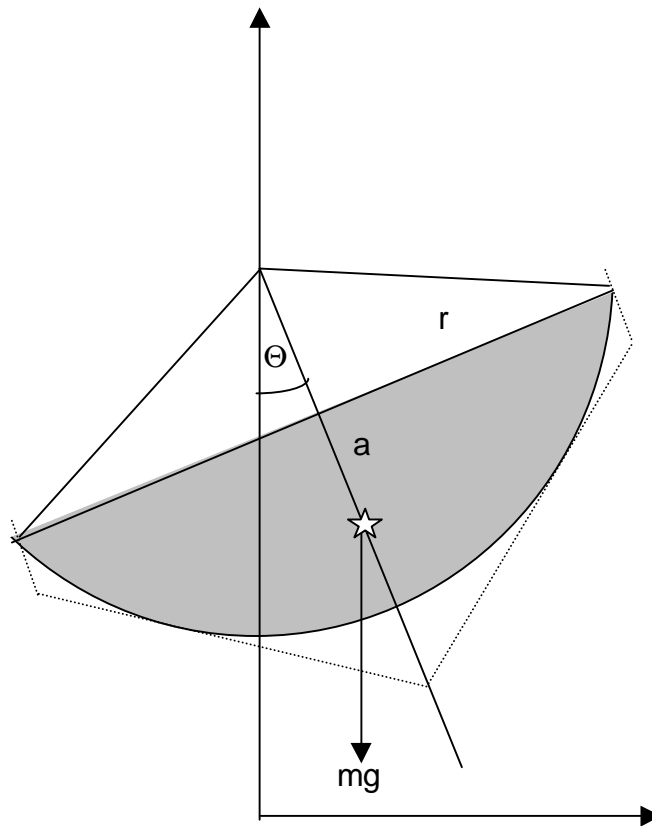
Taulukko 5. Pyörähtävän massan kehänopeus, $r = 2,8 \text{ m}$

Alkukaltevuuskulma ($^{\circ}$)	Kulmanopeus, maksimi ($^{\circ}/\text{s}$)	Nopeus laidalla (m/s) massa vaakatasossa
30	55,8	2,73
25	46,7	2,28
20	37,5	1,83
15	28,2	1,38
10	18,8	0,92
5	9,4	0,46

Pyörähdykseen kuluva aika on vastaavasti esitetty taulukossa 6. Aika on likimääräinen edellä esitetystä syystä.

Taulukko 6. Alkukaltevuudesta vaakatasoon kuluva pyörähdysaika.

Alkukaltevuuskulma ($^{\circ}$)	Aikaväli / 5° pyörähdys (s)	Pyörähdys vaakatasoon (alkukaltevuuskulma $\rightarrow 1^{\circ}$)(s)
30 (-25)	0,098	1,79
25 (-20)	0,119	1,69
20 (-15)	0,153	1,57
15 (-10)	0,216	1,42
10 (-5)	0,368	1,20
5 (-1)	0,836	0,84



Kuva 12. Kaavoissa käytetyt merkinnät.

6 Kaatumislaskelmien tulokset

ALKUARVOT STAATTISISTA VAKAVUUSLASKELMISTA								
Kallistus	Uppouma	Painop.	Painop.	Trimmi	Lastia	Mereen	Oikaiseva	Kaarre-
kulma		korkeus	sivusuunn.		ruumassa	syöksynyt	momentti	momentti
		VCG	TCG			lasti		
	t	m	m	m	t	t	kNm	kNm
0	678	2,06	0	-0,31	400	0	0	107,4
5	678	2,06	0,027	-0,32	400	0	26,6	107,4
10	678	2,06	0,11	-0,39	400	0	-139,7	107,4
15	678	2,06	0,18	-0,46	400	0	-352,5	107,4
20	678	2,06	0,26	-0,51	400	0	-492,2	107,4
25	678	2,06	0,3	-0,60	400	0	-645,2	107,4
30	630	2,06	0,3	-0,64	352	48	-86,5	99,8
35	574,5	2,06	0,3	-0,76	296,5	55,5	670,7	91,0
40	510,9	2,06	0,2	-1,01	232,9	63,6	1323,1	80,9
45	444,9	2,06	0,1	-1,33	166,9	66	1331,2	70,5
50	383,6	2,06	0	-1,64	105,6	61,3	1185,4	60,8
55	350,1	2,06	0	-1,69	72,1	33,5	741,8	55,5
60	330,2	2,06	0	-1,63	52,2	19,9	162,0	52,3
65	318	2,06	0	-1,51	40	12,2	-414,9	50,4
70	308,8	2,06	0	-1,40	30,8	9,2	-887,6	48,9
75	301,1	2,06	0	-1,33	23,1	7,7	-1264,2	47,7
80	294,9	2,06	0	-1,28	16,9	6,2	-1579,6	46,7
85	290	2,06	0	-1,23	12	4,9	-1849,2	45,9
90	286,2	2,06	0	-1,16	8,2	3,8	-2086,1	45,3

Liite 1

REAKTIOVOIMA SEKÄ KAATAVA JA OIKAISEVA VAKAVUUSTYÖ							Vakavuustyöt summattuna pystyasennosta kallistuskulmaan		
Kallistus kulma	Ulosvirtaus pinta-ala	Reaktio- voiman varsi	Massan nopeus	Reaktio- voima	Reaktio- mom	Reaktio- työ	Kaarre- työ	Kaatava työ	Oikaiseva työ
	m ²	m	m/s	kN	kNm	kNm rad	kNm rad	kNm rad	kNm rad
0	20,79	-0,80	0		0	0	9,4	9,4	0
5	20,75	-0,57	0		0	0	18,8	18,8	1,2
10	19,99	-0,41	0		0	0	28,1	28,1	-3,8
15	19,32	-0,18	0		0	0	37,5	37,5	-25,3
20	18,75	0,06	0		0	0	46,9	46,9	-62,1
25	17,82	0,35	0	0	0	0	56,3	56,3	-111,8
30	17,44	0,66	0	0	0	0	65,3	65,3	-143,7
35	16,22	0,95	0	0	0	0	73,6	73,6	-118,2
40	13,61	1,25	8,43	1644,5	2050,8	171,4	81,1	252,6	-31,2
45	10,56	1,51	4,73	402,0	606,7	226,6	87,7	314,3	84,7
50	8,57	1,74	7,14	741,5	1289,2	339,1	93,5	432,6	194,5
55	8,32	1,93	7,66	829,4	1602,2	461,3	98,5	559,9	278,6
60	8,63	2,11	4,10	246,2	518,7	512,3	103,2	615,5	318,1
65	9,33	2,26	0		0	534,9	107,7	642,7	307,1
70	10,01	2,40	0		0	534,9	112,1	647,0	250,2
75	10,54	2,51	0		0	534,9	116,3	651,2	156,3
80	10,99	2,61	0		0	534,9	120,4	655,3	32,1
85	11,46	2,68	0		0	534,9	124,4	659,4	-117,5
90	12,14	2,72	0		0	534,9	128,4	663,4	-289,3

KAATUMISLASKELMAN TULOKSET								
Kallistus	Kaatumis-	Iteroitu	Iteroitu	Kaatumis-	Sivuttaissiirtymä			
kulma	nopeus	kallistus-	aika-askel	aika	y kiiht	y nop	y siirtymä	
	astetta/s	kulma	s	s	m/s ²	m/s	m	
	astetta	astetta	s	s				
0	0	0		0				
5	-2,0	-5	2,45	2,45				
10	-4,7	-10	1,06	3,51				
15	-7,8	-15	0,64	4,15				
20	-10,7	-20	0,47	4,62				
25	-13,5	-25	0,37	4,99	0	0	0	
30	-14,3	-30	0,35	5,34	0	0	0	
35	-11,1	-35	0,45	5,79	0	0	0	
40	-14,7	-39,79	0,33	6,12	1,51	0,49	0,16	
45	-6,7	-45	0,78	6,89	0,40	0,80	0,78	
50	-8,5	-50	0,59	7,48	0,80	1,28	1,54	
55	-14,1	-54,37	0,31	7,79	0,88	1,55	2,02	
60	-17,0	-60	0,33	8,12	0,13	1,59	2,54	
65	-19,6	-65	0,26	8,38	-0,17	1,55	2,94	
70	-24,0	-70	0,21	8,59	-0,16	1,52	3,26	
75	-29,2	-75	0,17	8,76	-0,16	1,49	3,51	
80	-34,8	-80	0,14	8,90	-0,16	1,47	3,72	
85	-40,4	-85	0,12	9,03	-0,15	1,45	3,90	
90	-46,1	-90	0,11	9,13	-0,15	1,43	4,06	

LIITE 2. Lastin käyttäytyminen ja tutkimusmenetelmät

Lastin käyttäytyminen. Maa-aineksesta koostuva kuorma/massa voidaan jakaa käyttäytymiseltään karkeasti kolmeen luokkaan:

- vellimäiseen - lähes juoksevaan - massaan (**vapaa nestepinta**)
- kiinteään tuntuiseen, mutta ulkoisesta kuormituksesta tai muista syistä äkillisesti lujuutensa menettävään tai ”juoksevaksi” muuttuvaan massa
- kiinteään massa, jonka käyttäytymiseen ei sanottavasti vaikuta aluksen lievä kallistuminen tai muut olosuhdetekijät

Ensimmäisestä luokasta ovat esimerkkeinä häiriintyneet savet, siltit ja hienorakeiset moreenit.

Toiseen luokkaan kuuluvat esim. veden ja äkillisen kuormituksen (kallistuksen, tärinän) vaikutuksesta ”nesteytyvät” massat - tasarakeinen hiekka, siltit ja eräät malmirikasteet.

Kolmanteen luokkaan kuuluvat massat, joissa on suuria partikkeleita (lohkareita, kiviä) ja vähän hienoainesta tai joiden rakenne on hyvin avoin (vesi valuu esteettä pois).

Lastin ”vaarallisuus”. Vellimäisten materiaalien käyttäytyminen on vaikeasti ennakoitavaa. Lasti käyttäytyy vaarallisemmassa tapauksessa lähes kuin neste, joten sen kuljetuksessa täytyy minimoida kaikki riskitekijät (kallistumat, kaarteet, aallokko, ylikuorma).

”Nesteytyvien” massojen aiheuttamat vaaratilanteet liittyvät lastin kuormaukseen ja tasaukseen. Keikoihin tai jyrkkiin luiskiin lastatun materiaalin reunaosa ”luiska” saattaa lähteä liikkeelle ulkoisen kuormituksen johdosta, mikä saattaa johtaa myös aiemmin kuvattuun progressiiviseen massan vyöryyn. Tasaiseksikin lastattu materiaali saattaa liikkua vaakasuunnassa mikäli lastin pohja ”nesteytyy” ja lasti ei saa vaakatukea ruuman reunoista/seinistä.

Kiinteät massat, kitkan tai koheesion johdosta muodossaan pysyvät, eivät aiheuta ongelmia jos aluksen kallistuminen pysyy normaaleissa rajoissa ja massa ei tietoisesti kuormata liian jyrkkiin kasoihin.

Lastien tutkiminen/tarkastaminen

Vellimäiset lastit. Lastin laadun tarkastaminen voidaan tehdä silmämääräisellä tarkastelulla, häiritsemällä mekaanisesti ruoppausmassaa ja arvioimalla häirityn massan ”juoksevuus”. Juoksevouden tarkasteluun käy todennäköisesti jokin seuraavassa kohdassa esitetyistä menettelyistä.

Kiinteään tuntuiset ”nesteytyvät” massat. Tähän tarkoitukseen on kehitetty useita menetelmiä (IMO Flow table, Proctor -C, Vibrating platform, ”Sankomenetelmä”, Penetration method, ..), mutta niiden käyttö ruoppaustöissä lienee jäänyt vähäiseksi. Mikään menetelmä ei kuitenkaan sovi kaikille bulk-kilasteille tai ruoppausmassoille.

Kiinteät massat. Massa voidaan kasata >35 asteen kartioon ja rakenne on avoin.

Tutkimusmenetelmät

Proomuissa kuljetettavien ”vellimäisten” lastien ”liikkeellelähtöherkkyyden” arviointiin voidaan käyttää silmämääräisen tarkastelun lisäksi ainakin Flow table, Vibrating platform, Penetration rod -menetelmiä. Flow table menetelmä ei tarvitse sähköä eikä kalliita investointeja ja on siten helppo viedä myös työmaalle.

Flow table -menetelmä. Vaakasuoralle tasaiselle pinnalle asetetaan tutkittavasta maa-aineksesta (materiaalista) muotilla tehty kartio. Tasoa pudotetaan 25 kertaa 3/4” korkeudelta ja mitataan levinneen keon halkaisija. Halkaisijan muutoksesta määritetään materiaalin ”juoksetuminen”.

Liite 2

Vibrating platform -menetelmä. Tässä menettelyssä tärypöydälle asennetun astian pohjalle laitetaan neljä pöytätennispalloa ja tutkittava massa kaadetaan niiden päälle. Nesteytyvässä massassa pallot nousevat pintaan tärytyksen vaikutuksesta.

Penetration rod -menetelmä. Japanilaisten kehittämässä menetelmässä astiaan täytetyn materiaalin pinnalle asetetaan mittaustanko. Astia itsessään on kiinnitetty tärypöytään. Mittatangon uppoama määrittää materiaalien nesteytymisherkkyden.

Sanko -menetelmä. Menetelmässä täytetään sanko tutkittavalla materiaalilla ja sangon pohjaa kopistellaan kovaa pintaa vastaan 25 kertaa. Mikäli massan pintaan erottuu vettä, niin massa todennäköisesti "nesteytyy" kuljetuksessa.

MTe 233/03

SAAPUNUT

24.07.2000

27/54

ONNETTOMUUSTUTKINTAKESKUS
 Sörnäisten rantatie 33 C
 00580 Helsinki

Tutkintaselostus B 2/1997 M, Proomu CARAn kaatuminen Raahen edustalla 25.5.1997

Olemme tutustuneet asiantuntijoidemme kanssa tutkintaraporttiin ja lausumme kohdasta 4
Suositukset seuraavaa:

Aluksen vakavuutta ei ole aikaisemmin tutkittu. Alusten vakavuutta koskevan asetuksen (588/72) mukaan sisäliikenteen alukselle ei tarvitse suorittaa kallistuskoetta eikä vakavuuslaskuja, jollei merikelpoisuuden- tai rungonkatsastaja katso vakavuuden selvitystä tarpeelliseksi aluksen erikoisen rakenteen tai käyttötarkoituksen perusteella. Tämän takia merenkulkulaitokselle ei ole toimitettu aluksen vakavuuspapereita hyväksyttäväksi. Vaikka liikennealueella I liikennöiviltä lastialuksilta ei ole vaadittu vakavuustietoja, on kuitenkin vanhalla kiertokirjeellä vaadittu ruoppaajilta vakavuustietojen hyväksymistä.

Asetuksessa vaaditaan, että alus on rakennettava niin, että sillä on riittävä vakavuus niissä lastitilanteissa, joissa alus on suunniteltu käytettäväksi. Aluksen vakavuus katsotaan riittäväksi, kun alus kestää kohtuuttomasti kallistumatta tuulesta, aallokosta tai aluksen kääntymisestä aiheutuvat kallistavat momentit.

Katsastusasetuksen (1123/1999) mukaan, *proomu* on alus, jolla ei ole omaa kuljetuskoneistoa. *Lastialus* on jokainen alus, joka ei ole matkustaja-alus. Asetuksen mukaan alustyyppiä *itse kulkeva proomu* ei ole olemassa, vaan katsastus- ja tarkastusmielessä alus on tyyppiltään lastialus.

Merenkulkulaitos valmistele parhaillaan aluksen vakavuutta koskevia uusia sääntöjä, jotka sisältävät seuraavia muutosehdotuksia:

TYÖALUS

Tämän kohdan vaatimuksia sovelletaan alukseen, joka suorittaa nostamista, ruoppausta tai muita toimintaa, josta aiheutuu kallistavia momenteja muiden k.o. aluksen tyyppistä ja liikennealueesta johtuvien vaatimusten lisäksi.

Aluksen työssä esiintyvää, esimerkiksi nostosta aiheutuvaa, suurinta kallistumaa laskettuessa pätevät seuraavat kriteerit:

1. *Kallistuskulma ei saa ylittää 10 astetta*
2. *Aluksen kannen reuna ei saa mennä veteen*
3. *Avoimella aluksella kohtisuoran etäisyyden vedenpinnasta alimpaan vuotokohtaan pitää olla vähintään [0,05B]"*

Muut kallistavia momenteja aiheuttavat tapahtumat ovat lähinnä lastin liikkuminen tai nestemäisen homogeenisen lastin siirtyminen.

Lausunto 1

KOMMENTIT SUOSITUKSIIN:

- 4.1 Merenkululaitoksen tavoitteena on saattaa uudet vakavuusmääräykset voimaan sen jälkeen, kun vaatimustaso ja laskentakaavojen käyttökelpoisuus on arvioitu ja asiantuntijoita kuultu.
- 4.3 Alusten vakavuustarkastelu tapahtuu yleensä staattisella menetelmällä. Vakavuuslaskentaohjelmiin on lisätty menetelmä, joka ottaa huomioon ulosvirtaavan lastin mutta ei "reaktiovoimaa". IMO:n SLF -alacomiteassa on käynnistymässä useampia "dynaamisen vakavuuden" tarkasteluun tähtäviä projekteja, kuten uuden säälukriteerin kehittäminen.
- 4.4 Kansainvälinen irtolastikoodi (= BC Code) koskee lähinnä erilaisten lastien erityispiirteitä koskevia suosituksia. Ruoppausmassat eivät ole homogeenisiä, vaan sisältävät eri maa-aineesosia joiden vesipitoisuus on alati muuttuva.

MERENKULKULAITOKSEN EHDOTUS TÄMÄNKALTAISTEN KULJETUSTEN TURVALLISUUDEN PARANTAMISEKSI

Ruoppausyhtiöiden turvaohjeet tulisi sisältää ohjeistusta seuraavista aiheista:

1. Moottorialusta tulisi voida ohjailta "avo-ohjaamosta", mikäli kuljetetaan kriittisiä lasteja. Lastin ollessa kovin vetinen tai epähomogeeninen, tulisi aluksen varalaidan ylittää riittävästi sääntöjen määräämän vähimmäisvaralaidan.
2. Siirtymävaaralliset lastit tulisi vaihtochtoisesti kuljettaa hinattavilla proomuilla.

Helsingissä 18.7.2003

Toimistopäällikkö


Pertti Haatainen

Merenkuluntarkastaja


Bo Fagerholm