



2 ANALYYSI

2.1 Yleistä Suomesta vietävistä puutavaralasteista

Sahatavaran kokonaisvienti Suomesta vuonna 2001 oli 7 182 000 m³. Kuljetus tapahtuu laivoilla, jotka ovat enimmäkseen ilman omia nostolaitteita, tai niiden nostolaitteet eivät täytä järjestysohjeiden mukaisia kriteerejä lastattaessa Suomen satamissa. Välimeren alueelle ja Pohjois-Afrikkaan suuntautuvat laivaukset toimitetaan hakurahtina. Laivatyyppit ovat usein perinteisiä. Kansilastin osuus on noin 1/3 koko lastista.

Sahatavaraa viedään useiden satamien kautta. Nykyään sahatavaran tuotantokapasiteetista huomattava osa sijaitsee sisämaassa lähellä raaka-aineita. Tärkeimpiä sahatavaran vientä koskevia muutoksia olivat siirtyminen ympärivuotiseen laivaukseen, keino-kuivaukseen ja standardoituun pakettikokoon.

Sahatavaran siirtyminen puhtaaseen linjaliikenteeseen on ollut hidasta. Liikenne on edelleenkin useasti hakurahtiliikennettä. Tähän on vaikuttanut osaltaan se, että kauppa Pohjois-Afrikan maihin on kasvanut (sahatavaran kokonaisvientimäärästä yli 20%). Toimitusehdot ovat yleensä perinteiset ja ostajat hoitavat itse toimitukset käyttäen suuria hakurahtialuksia. Myös usean Länsi-Euroopan maan sahatavaran tuonti kulkee suurten maahantuojien ja puutavaraliikkeiden kautta, jotka pyrkivät hoitamaan kuljetukset itse sahatavaran kuljetukseen erikoistuneilla aluksilla.

Sataman tehokkuuteen ja palvelutasoon vaikuttavat oheispalvelut. Aluksen käynti satamassa edellyttää huomattavaa määrää erilaisia toimenpiteitä. Laivaselvittäjät huolehtivat aluksen satamakäyntiin liittyvistä asiapapereista. Huolitsijat toimivat tavarán lähettäjän tai vastaanottajan edustajana tehtävissä, joita ovat mm: tavaroiden siirtoon ja käsittelyyn liittyvät koordinoititehtävät, tullimuodollisuudet, maksujen maksaminen, tarvittavista kuljetuksista huolehtiminen, kuljetusasiakirjojen laatiminen.

Huolintayritys voi toimia joko agenttina, jolloin sillä ei ole rahdinkuljettajan vastuuta, tai itsenäisenä rahdinkuljettajana. Kuljetus tapahtuu sovittujen laivausehtojen mukaan. Ahtausliike lastaa ja/tai purkaa aluksen sopimuksen mukaisesti ja suorittaa tavaroiden käsittelyä satama-alueella. Sahatavaran vientikäsittely tapahtuu samojen periaatteiden mukaisesti eri satamista. Satamalla on merkittävä osuus kustannustekijänä kuljetusketjussa.

Sahatun puutavaran yleisimmät koot paksuuden ja leveyden osalta on määritelty Suomessa esim. RT 21 10626:ssa. Poikkileikkausmittojen suurimmat sallitut mittapoikkeamat noudattavat EN 336 standardia. Paksuus- ja leveysmitat tarkoittavat tavarán nimellismittoja 20% kosteudessa. Runkorakenteisiin käytetyn sahatavaran kosteusaste on tavallisesti 15-24% kuivapainosta. Sahatavaran yleisimmät pituudet vaihtelevat 1800-5400 millimetriin 300 mm välein siten, että sivulautojen pituus vaihtelee 1800-4200 mm ja keskitavara 3900-5400 mm. Sahatavara on yleisnimitys vähintään neljältä sivulta sa-

hatulle puutavaralle. Mänty- ja kuusisahatavaran ohjeelliset laatuluokat perustuvat yhteispohjoismaisiin sahatavaran lajitteluohjeisiin. Kuivan puutavaran keskimääräiset tilavuuspainot ovat männyllä $0,52 \text{ t/m}^3$ ja kuusella $0,42 \text{ t/m}^3$ (absoluuttisen kuiva puu).

Paketoitua sahatavaraa toimitetaan sekä pituuspaketoituna, että trukkipakettina (toinen pääty epätasainen). Nykyään lähes kaikki vientilainattu sahatavara on pituuspaketoitua. Yleisin koko on $1,15 \cdot 1,15 \cdot 1,80 - 6,00 \text{ m}$. Paino vaihtelee kosteuden mukaan. Sitominen paketiiksi suoritetaan teräsvanteilla ilman aluspuita. Pituuspaketoituiden sahatavaraniput voidaan huputtaa, mikäli ostaja niin haluaa. Huputtaminen on sahatavaran käyttökelpoisena pysymisen kannalta usein välttämätöntä, sillä ostaja varastoi sahatavaraniput usein ulkona. Tyypillisiä materiaaleja sahatavarahupuille ovat pahvi-/paperihuput, joita on vahvistettu keinokuitulangoituksella ja pinnoitettu sään kestävällä materiaalilla, tai materiaalina on säänkestävä muovi (kirkas, värillinen). Huppumateriaalien kitkakerroin vaihtelee. Jotkut sahat käyttävät hupuissa kitkaa lisäävää pinnoitetta. Suojausominaisuuksien riittävän lujuuden ja toisaalta pakkauskustannusten sekä jälkikäsitteilytarpeen keskinäinen optimointi on vaativa tehtävä. Ympäristöystävällisyydellä ja kierrätykseen sopivuudella on suuri merkitys.

Sahatavaraniput varastoidaan satamissa ja sahoilla ulkovarastoissa, katoksissa tai sisävarastoissa päällekkäin pinottuina. Käsitteily tehdään yleensä haarukkatrukilla. Kuljetus satamiin tapahtuu joko junalla tai kuorma-autolla. Ahtausliike suorittaa tavarakäsittelyn satamavarastointiin laivausta varten tai tavara voidaan toimittaa myös suoraan aluksen kupeelle. Toimitusehdot määrittävät toimitustavan.

Sahatavaraniput lastataan alukseen nosturilla (lo-lo) tai ne voidaan kuljettaa lauttavauunuilla, trailereilla tai kuorma-autoilla (ro-ro), myös storo-lastausta käytetään. Aluksen koosta riippuen voi ahtaaja käyttää aluksen ruumassa työkonetta (lo-lo, storo). Nosturilla nostettaessa nostoapuvälineinä käytetään yleisimmin polypropyleeniköysiä tai keinokuituvöitä, jotka kulkevat lastin mukana. Teräsvaijereiden käyttö on vähäistä. Nostoapuvälineet mitoitetaan tavarain painon ja nostotavan mukaan. Sahatavaran kuljetus koneteissa on lisääntymässä.

Laivattavasta lastista toimitetaan tarpeelliset tiedot aluksen päällikölle (Manifest of Cargo, Loading Order, erityisominaisuudet, merkinnät, määrä jne.). Ahtaaja suorittaa aluksen lastauksen aluksen laatiman hyväksytyt/hyväksymän lastaussuunnitelman mukaisesti (Cargo plan), josta ilmenee lastin sijoitus aluksessa.

2.2 Lastinkiinnityskäsikirja ja lastaus

Lastinkiinnityskäsikirjassa on annettu mm. seuraavia ohjeita koskien sahatavarapakettilastia:

Ohje: tavarain lähettäjän tulee antaa aluksen kapteenille ainakin seuraavat tiedot:

- pakettien määrä ja lastin kokonaistilavuus



- lastin todellinen kosteus (kosteuden ollessa suurempi kuin kuljetuskosteus, jolloin tiheys on 0,435)
- pakettien mitat jaoteltuina vakiopituisiin ja vaihtelevanpituisiin paketteihin
- kitkakertoimet materiaalipareille lasti/lasti, lasti/teräs ja lasti/puu paketeille, jotka on suojattu vedenpitävillä päällysteillä
- nimellinen lastaustilavuus, lastattavaksi ilmoitetut puulajit ja niiden tiheydet

FJORD PEARL:n päällikkö ei saanut kitkakerrointitietoja. Toisaalta lastinkiinnityskäsikirjassa ei ole esitetty, miten kitkakertoimia käytetään. Käsikirjassa laskenta perustuu sahatavarapakettipinon stabiliteettikulmaan, joka puolestaan riippuu kitkakertoimesta ja pinon kaatumiskulmasta. Muuttuvien olosuhteiden vaikutusta ei ole esitetty.

Lastin sijoittelusta johtuen syntyi puutavarapakettien keskinäisten ja pakettien ja alustan välisten vaakasuorien kitkapintojen lisäksi pystysuoria pakettien välisiä kitkapintoja. Lastilla oli tasainen alusta vain lastiluukuilla ja kannella. Tilannetta mutkistivat edelleen paketteja ympäröivät lastausköydet ja pakettien suojahuput.

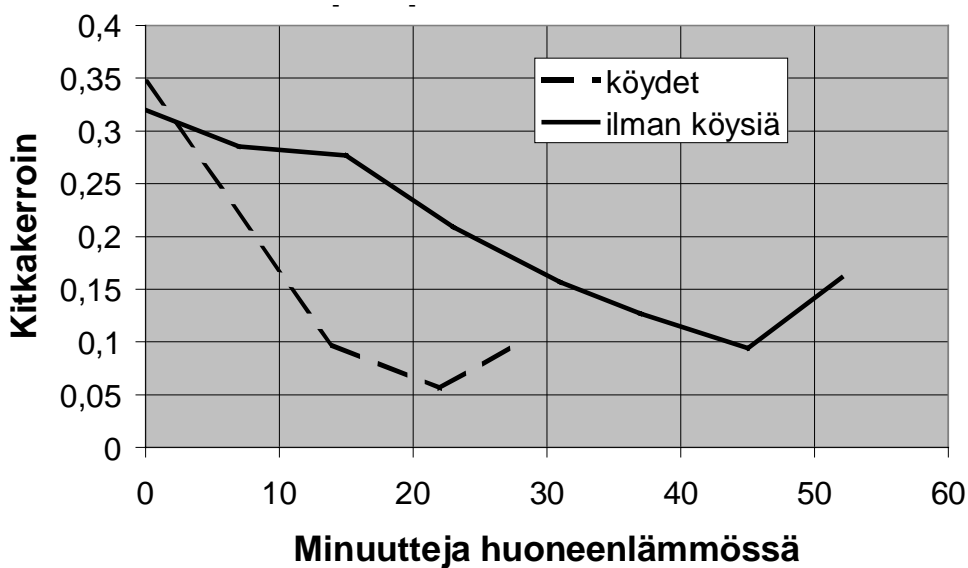
Liitteessä 4 on esitetty yleisesti saatavilla olevia kitkakertoimia. Ne on annettu kuiville tai märille puu- ja metallipinnoille. FJORD PEARL:n lastinkiinnityskäsikirjassa käytetty pakettipinon stabiliteettikulma 17° vastaa kitkakerrointa $\mu = 0,3$. Kun sitä verrataan yleisesti käytettyihin kitkakertoimiin, voidaan todeta, että se sisältää merkittävää turvamarginaalia. Eri lähteissä esitetään liikkeellelähtökitkakertoimeksi materiaaliparilla puu/teräs kosteana $\mu = 0,4-0,5$, jolloin pintojen välissä ei ole köysisiä eikä huppuja. FJORD PEARL:n haverilastin kiinnityksen laskentatapa ei ole selvinnyt tutkinnassa.

Tässä tapauksessa olisi tarvittu tietoja talvisista kitkakertoimista, sillä ne saattaisivat tulla niin pieniksi, että pinon stabiliteettikulma määräytyisi niiden perusteella. ICHCA:n (International Cargo Handling Co-Ordination Association) suositus mainitsee lumisille ja jäisille puu/metallipintapareille kitkakertoimeksi $\mu = 0,1$. IMO:n puutavarakansilastia koskevista suosituksista varoitetaan kitkan heikkenemisestä jäätyneellä lastiluukulla. Kuitenkaan mitään käytännöllistä menettelytapaa ei ole annettu tilanteen hallitsemiseksi näissä ohjeissa tai lastinkiinnityskäsikirjassa. Lastauksen aikana lumi ja jää poistettiin sahatavarapaketeista ja lastiluukuilta kitkakertoimen pitämiseksi mahdollisimman suurena.

Vallinneessa tuulessa ja aallokossa aluksen kansilasti kastui osittain, vaikka se oli peitetty pressuilla. Lasti oli kylmä, lastaustilanteessa -20°C . Matkan aikana kansilastin ulommat osat lämpenivät ulkoilman -4 asteeseen. Lastiruumissa lasti oli kylmintä. Oletettavasti kaikille pinnoille syntyi huurretta, joka pienensi kitkaa. Veden lämpötila oli noin $+1^\circ\text{C}$. Ilman kosteudesta ei ole tietoa. Todennäköisesti lastin kanssa kosketuksiin päässyt merivesi jäätty paikalla paikoin. Kerrosten välissä saattoi siten olla yhtä aikaa vettä ja jäätä. Köysien vaikutuksesta lastikerrokset eivät kaikkialla koskettaneet tiiviisti toisiaan. Jäi välejä, joihin saattoi päästä vettä, joka jäätty. Syntyi yhdistelmä kitkasta, voitelusta ja liimauksesta.

Tutkintaryhmä päätti teettää kitkakoesarjan, joka jäljittelisi mahdollisuuksien mukaan yllä olevia talviolosuhteita. Aluksella materiaalipari puu-köysi-metalli ja puu-metalli ovat tärkeimmät ja ne vastasivat tilannetta lastiluukuilla. Muissa kerrosväleissä oli puu-köysihuppu. Osa kokeista tehtiin jääpintaisella, -22°C jäähdytetyllä teräslevyllä. Mittauksia toistettiin jään vähitellen sulaessa huoneenlämpötilassa. Kuvassa 22 on esitetty sulamisen vaikutus. Aluksi pinnat olivat jäiset, pintalämpötila $-2-4^{\circ}\text{C}$ pakkasta. Lopuksi pinnat olivat täysin sulaneet.

Liite 4 sisältää tulokset tästä koesarjasta. Kitkakerroin pienenee voimakkaasti sulamisen edetessä ja alkaa kasvaa, kun jää on kokonaan sulanut.



Kuva 22. Lämpenemisen vaikutus kitkakertoimeen VTT:llä tehdyissä kitkakokeissa

Kitkan käyttäytymisestä tehtyjen selvitysten ja havaintojen perusteella voidaan todeta, että FJORD PEARL joutui olosuhteisiin, joissa kitkakertoimet ja sahatavarapakettipinon stabiliteettikulmat oleellisesti heikkenivät kansilastin kiinnityksen lähtökohtana olleista oletusarvoista.

Ohje: lastiluukkujen päälle saa pinota puutavarapaketteja pitkittäin tai pitkittäin ja poikittain. Jos käytetään pitkittäistä ja poikittaista pinoamista, asetetaan toinen kerros poikittain, kun on kaikkiaan kolme kerrosta ja ensimmäinen ja kolmas kerros poikittain, kun on kaikkiaan neljä kerrosta.

Aluksella oli paketit sijoitettu kolmen kerroksen sekavaihtoehdon mukaan vaikka osa lastista oli neljässä kerroksessa. Päällikkö oli päätyynyt tähän, koska neljäs kerros oli alle puolet kansilastin pituudesta. Pinoamistapa vaikuttaa pakettipinon stabiliteettikulmaan.

Lastinkiinnityskäsikirjan kuva 4.2.2 tulee korjata siten, että pitkittäiset paketit tulee sijoittaa laidoille myös poikittaispakettikerroksessa.



Ohje: pinottaessa paketteja pitkittäin kahteen tai kolmeen kerrokseen tulee ennen lastauksen aloittamista pystyttää aluksen laidoille tukitolpat. Jos kansilasti suojataan pressulla, lastin ja tolppien väliin tulee jättää 30-50 mm rako. Pakettien suojaaminen pressuilla tehdään, jos vastaanottaja sitä vaatii.

Tukitolpat pystytettiin, vaikka käytettiin pitkittäis-poikittaista pakettien sijoittelua. Ohjeiden mukaan tukkia ei tarvita myöskään, jos pitkittäin pinottujen kahden tai kolmen kerroksen ylin kerros on siirretty keskilaivalle päin. Tukitolpat asetettiin työturvallisuuden parantamiseksi (pakettipinojen sortumisen varalta, kun niitä ei vielä ole kiinnitetty).

Ohje: lastikiinnitys tulee aina kiristää tiukalle. Kiinnitykset tarkistetaan merellä kaksi kertaa tai tarvittaessa useamman kerran vuorokaudessa. Kun saadaan myrskyvaroitus, on tehtävä ylimääräinen tarkastus.

Viimeksi kiristykset oli tehty kuusi tuntia ennen haveria, jolloin oli jo tiedossa myrskyvaroitus. Ei ole selvillä, oliko tämä normaalin tarkastusohjelman mukainen vai ylimääräinen, myrskyvaroituksesta johtuva tarkastus. Haveriin mennessä kiristykset olivat ehtineet löystyä. Kiristysvoimaa ei mitattu, joten ei voitu tietää miten lähellä se oli tavoitearvoa. Tutkinnassa ei ole selvinnyt, mikä oli tämä tavoitearvo.

Lisäksi IMO:n ohjeistossa mainitaan mm.:

Ohje: ilmaputket ja tuuletuskanavat tulee suojata hyvin.

Ilma- ja peilausputket sekä tuuletuskanavat oli rakennettu määräysten mukaan. Siirtynyt kansilasti rikkoi osan partaasta, jolloin sillä alueella ilma- ja peilausputket rikkoontuivat.

Ohje: lastauksen aikana puutavarakansilasti tulee pitää puhtaana lumesta ja jäädästä.

On tiedossa, että ahtaaja poisti lunta ilmapuhalluksella ja jäätä nuijimalla. Jonkin verran lunta jäi sahatavaraketeille ja luukuille, koska sitä satoi lastauksen aikana.

2.3 Aluksen lastaus ja talviset olosuhteet

Talviaikana sahatavaranippuihin kerääntyy kuljetusketjun aikana vettä, lunta, jäätä ja kosteutta. Osa nipuista varastoidaan ulkosalla, osa katetuissa, mutta osittain avonaisissa varastoissa. Tuulen vaikutuksesta pakettien väleihin, rakoihin ja pintoihin huppujen alla pääsee vettä ja lunta. Myös alus voi olla luminen ja jäinen lastauksen aikana.

Talviaikana lämpötila voi vaihdella lastauksen ja merimatkan aikana kovasta pakkasesta useisiin lämpöasteisiin. Kun tämä seikka yhdistyy tuuleen, vesi- ja lumisateeseen ja merellä vielä roiskeisiin tai aaltojen kasteluun, voi tuloksena olla painon lisäys ja kitkaker toimien huomattava pieneneminen. Jäissä ajo tärisyttää lastia huomattavasti enemmän kuin avovesikulku. Pimeys ja kylmyys haittaavat ihmisten toimintaa.

Kansilastin kiinnityksen suunnittelua varten päällikön tulisi saada tietoja sahatavarapakettien fysikaalisista ominaisuuksista ja varastoinnista. Lisäksi olosuhteet merellä vaikuttavat kitkakertoimeen. Lastin tilaa seuraamalla voidaan arvioida, onko syntymässä kriittinen kitkatilanne. Tämä tulee ottaa huomioon alusta navigoitaessa. Lastinkiinnityskäsikirjaan tulisi lisätä vastaavat ohjeet.



Kuva 23. Ulkosäilytyksessä olleita puupaketteja, varastoinnissa tulisi huomioida työturvallisuus (Työterveyslaitokselta saatu kuva)

2.4 Kallistuma-kitkakerroin vuorovaikutuksen arviointi

2.4.1 Lastinkiinnityskäsikirjaan perustuva laskelma

Lastinkiinnityskäsikirjan mukaan, tutkinnassa laskettu, tarvittava kiristävä kokonaisvoima on 4592 kN. Se on laskettu liitteessä 2. Maksimikulma, johon alus kallistuu on 34° ja dynaaminen stabiliteettikulma, jonka kansilasti kestää siirtymättä merenkäynnissä, on 16,5°. Kiinnitystä tarvitsevan kansilastin painoksi on oletettu 1250 t.

2.4.2 Vallinneet kitkakertoimet

Erilaisia vastakkain olevia vaakasuoria liukupintatyyppejä oli useita. Kaikissa, paitsi reunimmaisessa alinna olevassa oli lastausköysi mukana. Lisäksi köydet saattoivat olla päällekkäin ja ristikkäin monissa eri asennoissa. Myös pakettien mittavaihtelut ja epäta-saisuudet sekä lumen, jään ja huurteen esiintyminen oli todennäköisesti ollut hyvin

epätasaista. Paikoin pintapaine saattoi tulla niin suureksi, että jää sulii, jolloin kitkakerroin siinä kohdassa pieneni huomattavasti. Aluksen liikkeiden vaikutuksesta lasti liikkui hie-man ja tiivistyi. Sellaisen lastin pinta-ala, joka lepäsi jään päällä, saattoi kasvaa ja pienentää keskimääräistä kitkakerrointa.

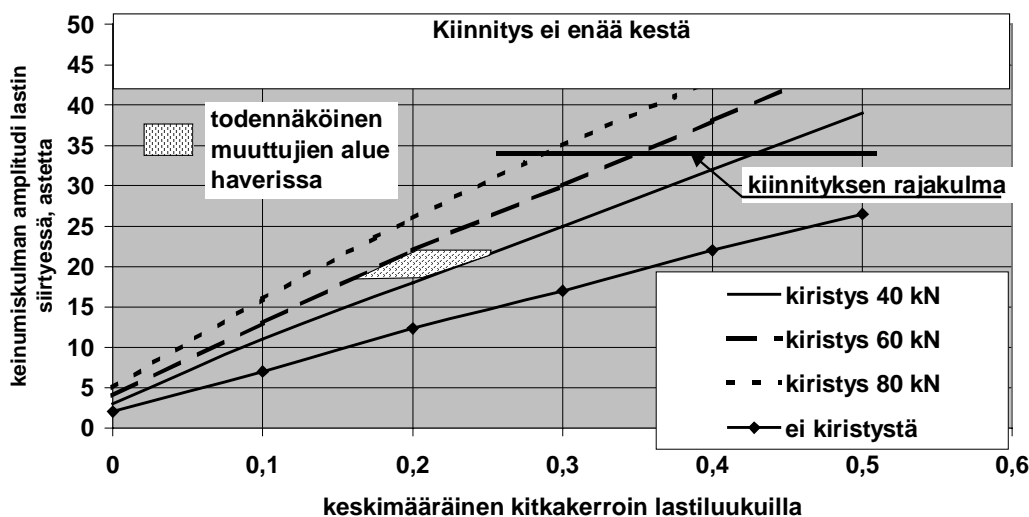
Jäätä ja lunta jäi lastauksessa lastipakettien väleihin. Vaikka lasti oli suojattu pressuilla, jäätä kertyi lisää roiskeveden, aaltoilun ja pakkaslämpötilan yhteisvaikutuksesta. Jäisten lastipintojen välissä oli hetkittäin vettä. Voidaan olettaa, että kitkakertoimet pienenevät huomattavasti matkan edistyessä ja lämpötilan noustessa.

Pietarsaaresta lähdettäessä lasti oli kylmää, varsinkin ruumissa. Matkan aikana ilman lämmitessä, syntyi pinnoille huurretta, joka pienensi kitkaa.

Yllä olevista tekijöistä johtuen voidaan vain selvittää keskimääräiselle kitkakertoimelle ja kansilastin liikkeelle lähtökulmalle rajat, joiden sisällä ne ovat olleet.

Laskelman tulokset on esitetty kuvassa 24. Kiristysvoiman suuruudeksi haverihetkellä on arvioitu 40-60 kN. Kiristyksestä haverihetkeen kului noin kuusi tuntia. Sinä aikana sääolosuhteet olivat huonoimmillaan, minkä johdosta lasti todennäköisesti vielä tiivistyi. Tästä seurasi kiristysvoiman pieneneminen.

Fjord Pearl, kriittiset keinumiskulman amplitudit eri kiristysvoimilla kitkakertoimen funktiona



Kuva 24. Kriittiset kitkakerroin-keinumiskulma-kiristysvoimayhdistelmät

Raporttien mukaan alus kallistui ensin vasemmalle 15°. Kansilasti ei lähtenyt liikkeelle, mutta sen stabiileetti saattoi häiriintyä. Voidaan päätellä, että kitkakerroin oli vähintään 0,12-0,17. Kitkakertoimeksi haverihetkellä on arvioitu 0,18-0,25 kiristysvoimasta riippuen. Kuvan 24 perusteella voidaan todeta, että lastinkiinnityskäsikirjan ohjeiden mukaan laskettu kiinnitys on riittävä, jos kitkakerroin ylittää 0,35-0,4.

2.4.3 Lastin paikan vaikutus

Keinuminen, mutkailu ja jyskintä ovat liikkeitä, jotka tapahtuvat kiertymisakselin ympäri. Kiertymisliikkeestä johtuvat voimat ovat suoraan verrannollisia lastin osan etäisyyteen kiertymisakselista.

Jyskinnästä ja mutkailusta johtuvat voimat ovat pieniä verrattuna aluksen perä- ja keulapään lasteihin vaikuttaviin, massasta johtuviin voimakomponentteihin kallistuneessa asennossa. Liitteen 3 mukaan 1. kerroksessa sivusuuntainen voima saadaan kaavalla massa x 0,25 ja neljännessä kerroksessa kaavalla massa x 0,38. Vaikutus on enimmäislään 6% lisäys staattisiin voimiin.

Ylimmässä kerroksessa vain yhden kansilastikerroksen massa aiheuttaa kitkavoiman ja toisaalta siirtävän voiman. Kiinnitysvaijerin kiinnitysvoima on noin 90% kiristysvoimasta, johtuen vaijerin kaltevasta asennosta yläkulmassa. Ylimmässä kerroksessa kansilastin massasta johtuvat voimat ovat pienimmillään verrattuna kiristysvoimiin. Tilanne muuttuu mentäessä alaspäin. Kiristysvoima saavuttaa seuraavassa kerroksessa maksiminsa, mutta massasta johtuvat voimat kasvavat edelleen.

Kitkakertoimen suuresta paikallisesta vaihtelumahdollisuudesta johtuen on vaikea arvioida, mistä kohdasta kansilasti on ensin liikahtanut. Se, että kansilasti on liikkunut eniten aluksen peräosassa, saattaa johtua siitä, että peräpää on aallokossa aluksen kallistuesssa samalla liukunut aallon kylkeä alas.

Ei ole selvää, liikahtiko lasti ensin ruumassa vai kannella. Ruumassa ei ollut pysytysuoraa puristavaa lisävoimaa, vaan pitovoima muodostui sahatavarapakettien omasta painosta. Pinot ovat huojuneet hieman. Toisaalta kitkakerroin ruumassa saattoi olla suurempi kuin kannella. Ruuman olosuhteiden vaikutusta lastin pintojen kitkaominaisuuksiin on vaikea arvioida. Ruuman lasti oli alun perin hyvin kylmää, -22°C.

Vertailemalla eri pintaparien kitkakertoimia, voidaan päätellä, että lastiluukun päällä oleva lastikerros oli kriittisin siirtymisen kannalta.

2.4.4 Lastinkiinnitysvaijerien kuormituksen arviointi

Raporttien mukaan vaijerit säilyivät ehjinä. Ensi vaiheessa kiinnitysvaijerit kuormittuivat köysikitkan johdosta kansilastin lähtiessä liikkeelle. Toinen kuormitushuippu syntyi, kun siirtyvä kansilasti pysähtyi kiinnitysvaijerien varaan. Ennen lopullista pysähtymistä osa kansilastin liike-energiasta oli kulunut seuraaviin ilmiöihin: tukitolppien katkaisu, laivan kallistaminen, kiinnitysvaijerien ja kansilastin välinen hankaus, sahatavarapakettien sisäinen muodonmuutos ja niiden välinen hankaus.

Kiinnitysvaijereiden venymän tulee olla alle 5%, kun kuormitus on 80% murtolujuudesta. Tämä raja on 110 kN. Köysikitka saattoi aiheuttaa lähellä tätä arvoa olevan kuormituksen. Kansilastin pysähtymisen vaikutuksen on arvioitu olleen pienempi.



Miehistö tarkasti kiinnitysvaijerit silmämääräisesti aluksen vaurioiden korjauksen yhteydessä. Jotkin vaijerit katkaistiin. Mitään vaurioita kiinnitysvaijereissa ei löydetty.

Kiinnitysvaijereissa on kuitenkin saattanut tapahtua muutoksia, minkä johdosta niiden tarkkailua on syytä lisätä.

2.5 Aluksen haveritilanteen arviointia

2.5.1 Aluksen tilanteen vaarallisuus

Vallinneissa olosuhteissa FJORD PEARLia uhkasivat useat vaaratekijät:

- Aluksen kääntäminen myötätuuliasemasta tuulta vasten 22° kallistumalla oli vaativa operaatio. Alus keinu vielä voimakkaasti tämän tasapainoaseman molemmille puolille. Tässä käänöksessä oli ilmeinen lisävaurioiden syntymisen vaara.
- Kansilasti saattoi siirtyä lisää. Keinuminen saattaisi katkaista joitakin vaijereita. Päälylystöllä ei voinut olla varmuutta lastinkiinnityslaitteiden kunnosta kansilastin siirtyttyä. Osa kansilastista saattaisi jäädä roikkumaan ulkosivuihin ja osa joutua potkuriin. Siirtyvä kansilasti saattaisi rikkoa lisää ilmaputkia sekä aluksen parrasta ja laidoitusta. Lisäkallistuma olisi vaarallista.
- Pumput kykenivät vaivoin pitämään tilanteen vakaana. Häiriö pumppauksessa olisi johtanut kallistuman lisääntymiseen.
- Sääennusteiden mukaan sää oli paranemassa, mutta jäätämismvaroitusta oli edelleen voimassa. Vallinneissa olosuhteissa jään poistaminen olisi ollut mahdotonta, joten jään kerääntymisen aiheuttama vakavuuden huonontuminen oli otettava huomioon. Jään kertyminen ja kallistuma estivät ankkuripelin käytön.
- Kallistuneen aluksen hallinta oli vaikeaa. Pystyttiin käyttämään vain vasemman puolen dieselöljytankkeja. Alus kulki ilman luotseja noin 13 tuntia.
- Oikealla puolella olevat asuintilojen alimmat ikkunaventtiilit ja yksi asuintiloihin johtava oven kynnyksen olivat veden alla.

2.5.2 Aluksen vakavuus kallistuskulmalla 26°

Haverin jälkeen alus ohjattiin keula vasten tuulta ja aaltoja. Ristiaallokko johdosta alus kallisteli muutaman asteen. Liitteen 3 mukaan voidaan todeta, että jos alus pysyy vasten tuulta, tuulenpuuskista ei ole vaaraa.

Jos alus joutuisi sivutuuleen, se keinuisi 10° ja saattaisi kallistua noin 40°. Tällöin lähestytään lastin irtoamisen rajaa.

Jään kertyminen vaikuttaa kahdella tavalla. Ensinnäkin se nostaa painopistettä, jolloin vakavuus huononee. Toiseksi jäätä kertyy enemmän kallistuneelle laidalle, mikä kallistaa alusta. Seuraavassa tarkastellaan 200 tonnin jään lisäyksen vaikutusta. Jää sijoite-

taan 12 m korkeudelle ja 3 m etäisyydelle keskiviivasta kallistuneelle puolelle. Aluksen uusi kallistuskulma olisi 30°, ja se kallistelisi noin 38° asti keula vastatuuleen.

Aluksen reitti Utöhön oli onneksi vasten tuulta, joten aluksen keinunta pysyi alle 5°. Matka Utöstä Turkuun kulki sivutuulella, mutta tuuli tuli kallistuman ja rannikon puolelta. Lisäksi tuuli oli heikkenemässä.

Yhteenvetona voidaan todeta, että alus oli saatettu Pietarsaaresta lähdetäessä lastitilanteeseen, jossa vakavuus riitti 26° pysyvällä kallistumalla. Laskelmissa oli sääntöjen mukaan varauduttu noin 43 m/s nopeudella puhaltavaan tuuleen.

2.5.3 Vedentulon vaikutus alukseen

Seuraavassa arvioidaan kohdassa 1.3.7 esitettyjen vaurioiden aiheuttaman vedentulon vaikutusta. Ruumiin kertyi vettä todennäköisesti peilausputkien ja/tai lastiluukun ja karvelin välin tiivistevuodosta. Polttoainetankki nro 2 on keskilaivalla ja se oli polttoainetta noin puolillaan, joten sinne kertyvä vesi ei kallistanut laivaa, mutta lisäsi hieman syvyyttä ja peräviippausta. Polttoaineesta tuli käyttökelvotonta. Toiseen polttoainetankkiin johtavat putket säilyivät ehjinä. Ruumiin kertyvä vesi jäi ruumien laidoille kulmiin ja vaikutti siten kallistavasti ja syvyyttä lisäävästi. Kuivatankki sijaitsee laidalla ja sinne kertyvä vesi kallisti laivaa ja lisäsi syvyyttä.

Ilmaputkien halkaisija oli 133 mm, peilausputkien 57 mm ja niiden rikkoontuneet päät olivat noin 2,5 m vedenpinnan alapuolella. Veden sisäänvirtausnopeus putkien kautta voidaan laskea tunnetusta kaavasta $v = k\sqrt{2gh}$, jossa vesi purkautuu pienestä astian kyljessä olevasta reiästä. Saadaan veden purkautumisnopeudeksi $= \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 2,5} = 7,0$ m/s. Yhden ilmaputken pinta-ala on 139 m² ja peilausputken 26 m². Arvioidaan putkien ja ruumien luukkujen tiivistevuotojen aukkoja olleen tehollisesti kaikkiaan 450 m². Oteetaan huomioon virtausvastus, jolloin käytetään kerrointa $k = 0,3$ ja saadaan noin 340 t/h. Tätä kompensoitiin kahdella tyhjennyspumppulla, joiden tuotto oli à 100 t/h. Näin ollen pumpputeho ei olisi riittänyt. Kuitenkin raporttien mukaan tilanne saatiin stabiloitua. Tämä voidaan selittää seuraavasti: kertyvän veden oli myös painettava ilmaa pois tieltään, jolloin yllä olevan kaavan oletus, että ilmanpaine tankissa on sama kuin ulkoilman paine, ei pidä paikkaansa. Todennäköisesti myöskään aukot eivät olleet siistejä reikiä. Myös aukkojen yhteiskoko on vain arvio. Aluksella oli onnea sikäli, ettei syntynyt suurempia aukkoja.

Tankkien täytyminen ei vielä olisi ollut kohtalokasta, mutta kolmen ruuman täytyminen olisi ajan mittaan upottanut aluksen. Toisaalta ruumien vuoto oli hidasta. Tilanne kyettiin kahdella pumpulla pitämään hallinnassa, mutta esim. toisen pumpun häiriö olisi johtanut noin 100 t kertymiseen tunnissa. Noin 17 t lisäys merkitsee 1 cm syväyslisäystä, ts. tunnissa syväys olisi kasvanut noin 6 cm. Kallistuma olisi kasvanut 3°. Aluksen hydrostaatiikka- ja vakavuuden peruskäyrästä ei ole tiedossa, mutta voidaan arvioida, että aluksen tilanne olisi toisen pumpun rikkoontuessa ilman ulkopuolista pumppausapua tullut kriittiseksi lähitunteina.



2.6 Pelastustoimien arviointia

Aluksen henkilöstö osoitti korkeata merimiestaitoa hallitessaan vaikean tilanteen.

Aluksen lähettämän vaaratilannetta koskevan ennakoilmoituksen ja haverihetken väliä on noin 7 tuntia. IAMSAR-sopimuksen mukaisen ennakoilmoituksen olisi voinut lähettää huomattavasti nopeammin. Lähettämällä ennakoilmoituksen aikaisemmin aluksen päällikkö olisi varmistanut henkilöstönsä turvallisuuden ja olisi nopeuttanut pelastustoimien käynnistymistä siinä tapauksessa, että jotain yllättävää olisi sattunut.

Pelastustoimissa varauduttiin aluksen evakuointiin riittävällä kalustolla. Toiminta oli niin nopeaa kuin käytännössä oli mahdollista. Alukseen pidettiin yhteyttä. Aluksen luotsaus tehtiin kahdella luotsilla, koska tilanne oli vaikea. Tilannetta analysoitiin onnistuneesti, mm. hinausapua hankittiin. Puutavaralastin purku järjestettiin joustavasti.



3 JOHTOPÄÄTÖKSET

3.1 FJORD PEARLIn lastin siirtyminen

Kansilastin siirtymiseen johtanut tapahtumaketju voidaan jakaa seuraaviin vaiheisiin:

1. Kääntyminen ja siitä johtuva kallistuminen tulessa ja merenkäynnissä.
2. Kallistuman ja kiihtyvyyksien johdosta kitkaraja ylittyi ja lasti lähti liikkeelle.
3. Lasti siirtyi ja sai liike-energiaa ja laiva kallistui lisää.
4. Lasti pysähtyi vaijerien varaan, liike-energia absorboitui, mm. tolpat katkesivat. Ilmaputkia rikkoontui, kannen kulmaan tuli repeämä, aluksen kallistuma pieneni hieinan keinunnan vaimennuttua.
5. Alus jäi uuteen tasapainoasentoon, vettä alkoi valua syntyneistä vaurioituneiden rakenteiden rei'istä.
6. Pumppujen käynnistyttyä alus saatiin uuteen tasapainoasentoon.

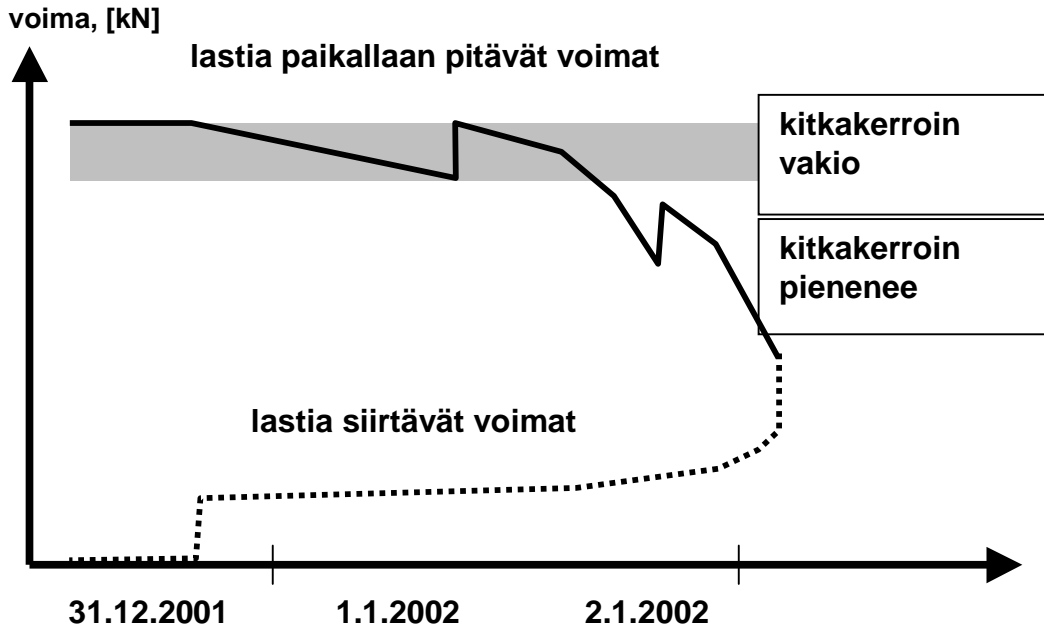
Alus alkoi kääntyä sivuaallokosta sivumyötäiseen aalokkoon. Päällystön kertoman mukaan alus ei aluksi lähtenyt kääntymään. Nopeutta jouduttiin nostamaan kääntymisen onnistumiseksi. Alus kallistui yli kriittisen kansilastin kitkarajan ja lasti lähti liikkeelle. Tämän tuloksena alus keinahti 30°.

Lastauksen ja matkan aikaisen sään johdosta kitkakertoimet olivat oletettua pienemmät. Lasti lähti liikkeelle kallistuman ollessa 19-22°, jolloin liikkeellelähtökitkakerroin oli 0,18-0,25. Liikkeelle lähteneen lastin kitkakerroin pieneni edelleen. Kitkakertoimen määrittämiseksi tehdyissä kokeissa saatiin varoittavaa näyttöä ulkosäilytyksessä olleen jäätyneen puutavaralastin kitkan arvaamattomasta kehityksestä, kun lasti lämpenee. Tällaiselta lastilta saattaa kitkan oleellinen pieneneminen aiheuttaa yllättäviä seuraamuksia olosuhteissa, joissa lastin siirtymisen vaaraa ei vielä pitäisi olla. Tästä syystä tulee talvella puutavaralasteja kuljettaessa kiinnittää erityistä huomiota lastin sitomiseen siten, että sidonnalla estetään lastin vakavuudelle vaarallinen suurehko siirtyminen. Toisena turvallisuutta parantavana ratkaisuna voidaan pitää sahatavaran kansilastina kuljettamisesta pidättymistä talviolosuhteissa.

Lasti oli kiinnitetty ohjeiden mukaan. Tutkinnassa tehtyjen laskelmien mukaan kiinnitysvaijerien kireydellä on suuri vaikutus kansilastin paikallaan pysymiseen. Jos on syytä epäillä kiinnitysten löystymistä, on navigoinnissa kiinnitettävä huomiota aluksen liikkeiden vähentämiseen. Kiristuksen merkitys korostuu pienillä kitkakertoimilla. Todellista kiristysvoimaa ei aluksella tiedetty, koska sitä ei mitattu.

Voidaan todeta, että aalokko- ja tuuliolosuhteet eivät ylittäneet mitoitusrajoja. Aluksen pituus oli lähellä aalokkon vallitsevaa pituutta. Vasten aaltoja kulkiessaan alus jyski voimakkaasti. Erilaisissa kulmissa aalokkoa kohdattaessa aluksen keinunta oli arvaamaton. Myötääalokkoon kulkiessa ohjailu oli vaikeaa.

Kääntymisen aikana syntyneet lastia siirtävät voimat ylittivät kitkakertoimen pienenemisen johdosta lastia paikallaan pitävät voimat. Tilanteen mahdollinen kehittyminen on esitetty kuvassa 25.



Kuva 25. Eräs mahdollinen voimien kehittyminen FJORD PEARL:n matkalla, hyppäykset lastia paikallaan pitävissä voimissa kuvaavat vaijerien kiristämisiä

Aluksen turvallisuuden kannalta sen oli mahdollisimman nopeasti käännyttävä vasta tuuleen. Ajon jatkaminen myötätuuleen olisi saattanut aiheuttaa lastille uuden liikkeen. Tästä olisi voinut syntyä lisää vaurioita aluksen rakenteille.

Alus joutui muuttamaan kurssiaan avoimella merellä tuulen ja aallokon maksimin hetkellä. Toisaalta pelastumista auttoi se, että tuuli heikkeni haverin jälkeen ja tuulen suunta oli edullinen.

3.2 Onnettomuuteen vaikuttaneita taustatekijöitä

Ilmaputket olivat suojatut määräysten mukaisesti, mutta liikkuva kansilasti rikkoi niitä. Tästä syystä haverin seuraukset pahenivat. Lastiluukkujen tiivisteet ovat saattaneet vaurioitua kansilastin liikkua, jolloin ruumiin pääsi vettä.

Sääennusteiden mukaan odotettiin avoimelle merialueelle Ahvenanmaan eteläpuolelle myrskyä, joka oli tavanomainen. Ei ollut mitään syytä poiketa alkuperäisestä reittisuunnitelmasta, koska kitkakertoimen alenemista ei pidetty riskinä.



3.3 Tutkinnassa esiin tulleita muita tekijöitä

Toiminta aluksessa, joka oli kallellaan 26° ja keinui muutaman asteen oli vaikeaa ja miehistön kestävyys joutui koetukselle. Nopea avun saanti ja pääsy oikaisemaan alus on tärkeää. Tässä mielessä nopeampi avunpyyntö olisi ollut paikallaan.

Luotsien kertoman mukaan aluksen luotsaus Utöstä Turkuun oli heidän uransa vaativin. Yli yhdeksän tunnin luotsaus vaati veronsa niin henkisesti kuin ruumiillisestikin. Matkalla tuli sakea sumu. Kallistuman vuoksi tutkat antoivat kallistuman puolelta kaikuja jäistä, joten tutkakuva oli ajoittain epäselvä ja hävisi välillä kokonaan. Tilanne oli todella vaarallinen, etenkin kapeikoissa.

Merenkulun turvallisuudesta huolehtivien viranomaisten tulee huolehtia, että vastaavissa vaaratilanteissa työtään suorittaville luotseille järjestetään kaikki tarvittava tuki haveristin saamiseksi miehistöineen turvaan ilman tarpeettomia riskejä. Teknisten paikannusjärjestelmien käyttö, saattohinaus ja luotsien riittävä monitorointituki on saatava käyttöön.

Tutkinnassa kansilastin kiinnitystä on arvioitu lastikerrosten välisten kitkakertoimien avulla. Lastinkiinnityskäsikirjassa laskenta pohjautuu pakettipinon stabiliteettikulmaan.

Lastinkiinnityskäsikirjan mukaan aluksen päällikölle on ilmoitettava muun muassa lastin kitkakertoimet. Kuitenkaan ei ole esitetty, miten kitkakertoimia pitää käyttää lastin kiinnityksessä tai miten ne vaikuttavat pakettipinon stabiliteettikulmaan.

Puutavaralasteja kuljetetaan yleisesti talviolosuhteissa. Kuitenkaan lastinkiinnityskäsikirja ei sisällä ohjeita, miten kitkakertoimet tai stabiliteettikulma muuttuvat eri olosuhteissa.

Ei myöskään ole esitetty täydellistä laskentaesimerkkiä.

3.4 Turvallisuutta parantavat toimenpiteet

Tutkinnassa on käynyt ilmi, että kiinnitysvaijereiden kireyttä ei käytännössä tiedetä. Kireydellä on suuri vaikutus lastin paikallaan pysymiseen ja siten laivan turvallisuuteen. Tieto kiristysvoimasta tulisi olla käytettävissä koko matkan aikana. Lisäksi lastinkiinnityskäsikirjassa tulee olla menetelmät tarvittavan kiristysvoiman määrittämiseksi eri kitkakertoimilla ja keinumiskulmilla. Tällöin päällikön mahdollisuudet arvioida lastin kiinnityksen turvallisuutta vaihtuvissa kitka- ja merenkäyntiolosuhteissa paranevat ja hän voi ottaa tämän huomioon navigointisuunnitelmissaan.

Tutkinnassa on käynyt ilmi, että lastinkiinnitysvälineiden lujuusarvojen käsitystavoissa on puutteita. Tilannetta tulisi korjata siten, että kaikissa laitteiden mitoituksissa nojaututaan murtolujuuteen ja erikseen harkittavaan, tilanteen vaatimaan varmuuskertoimeen.

Tutkinnassa on käynyt ilmi, että sahatavarapakettien suojahuppujen kitkakertoimissa on suuria eroja. Koko kuljetusketjun turvallisuuden parantamiseksi on ensiarvoisen tärkeää, että huppujen kitkaominaisuudet normitetaan tiettyihin rajoihin ja ominaisuuksia määri-



teltäessä lähtökohtana tulee olla talviolosuhteet ja ennen kaikkea henkilöturvallisuus. Huppujen kitkatietojen tulee olla sahatavaraerän mukana.

Tutkinnassa on käynyt ilmi, että sahatavarakettien lastauksessa käytettyjen nostoköysien vaikutusta pakettien kitkakertoimiin ja pakettipinon kaatumiskulmaan ei tiedetä. Tilannetta voitaisiin parantaa esim. siten, että sopiva taho lähtee ajamaan kansallista tai kansainvälistä tutkimushanketta tästä aiheesta.



4 SUOSITUKSET

Tässä tutkinnassa ilmenneet talviolosuhteiden turvallisuusriskit tulee pyrkiä minimoimaan. Havaittujen tekijöiden ilmoittaminen kuljetuksen vastaanottavan aluksen päällikölle on muodostettava sellaiseksi rutiiniksi, että päällikkö saa ne automaattisesti tietoonsa. Tutkijat esittävät, että:

1. Huolitsijat saattavat tässä raportissa julkaistavat kitkatiedot rahdin mukana lastaavan aluksen päällikölle.

Tutkinnassa on käynyt ilmi, että aluksen lastinkiinnityskäsikirjassa ei ole riittäviä ohjeita eikä selkeätä laskentaesimerkkiä vaihtelevien talviolosuhteiden varalta. Tutkijat ovat havainneet sahatavaran sijoittelua käsittävissä piirroksissa turvallisuuteen liittyvän riskin, joka olisi ainakin tiedostettava. Tutkijat esittävät, että:

2. Lastinkiinnityskäsikirjaan lisätään sahatavarapakettien kitkakertoimia talvisissa olosuhteissa koskevat tiedot sekä selkeä laskentaesimerkki.
3. Lastinkiinnityskäsikirjan kuva 4.2.2 tulee korjata siten, että laidoille sijoitetaan pitkitäiset sahatavarapaketit.

Talviolosuhteissa puutavaralla lastattu alus matkaa useimmiten lämpeneviin sääolosuhteisiin. Tällöin kylmänä lastatun lastin kitkakertoimet saattavat käyttäytyä ennalta arvaamattomasti. Tutkijat esittävät, että:

4. Merenkululaitos ryhtyy toimenpiteisiin tiedottaakseen kansainvälisesti pakkasessa lastatun puutavaralastin kitkakertoimien merkittävästä pienenemisestä aluksen tullessa lämpimämmille vesille.

Helsingissä 21.10.2003

Pertti Siivonen

Kai Mäcklin

Kalervo Mattila

Olavi Huuska



LÄHDELUETTELO

Seuraavat lähdeliitteet on taltioituna Onnettomuustutkintakeskuksessa:

1. Aluksen lastinkiinnityskäsikirja, venäjäksi, osin suomeksi
2. Aluksen vakavuuslaskelmat, päällikön tekemät
3. Otteita aluksen piirustuksista, joista selviää tankkijako, ilmaputkien tiedot sekä tyhjennys/painolastiputkisto ynnä näihin liittyvä saatekirje
4. Tutkinnan yhteydessä syntyneet muistiot
5. Tutkinnan yhteydessä tehdyt laskelmat
6. Valokuvia
7. Kitkakokeiden aineistot, ja niiden analyysi
8. Ilmatieteen laitoksen säätiedot
9. Merentutkimuslaitoksen meritiedot
10. Merikorttipiirroksset
11. Loppuraportti: Puutavarapeitteiden turvallisuus ahtaustyössä, Carita Aschan, Erkki Rajamäki, Mikko Hirvonen & Tarmo Mannelin, Työterveyslaitos, Fysiikan osasto, Helsinki 21.12.2001
12. The Securing of Vehicles on Roll-on/Roll-off Ships, S R Turnbull and D Dawson, RINA 1995
13. Code of Safe Practice for Ships Carrying Timber Deck Cargoes
14. Kuormansidontakäsikirja, ICHCA, 1998
15. Luonnos eurooppalaiseksi standardiksi pyöräajoneuvoille: lastinkiinnityksen laskenta, prEN 12195-1
16. Venäläiset lastinkiinnityssäännöt, osa 2, niteet 1 ja 2, Pietari 1996 ja 1997 (venäjäksi)
17. Lisäksi tutkinnan aikana on käytetty mm. seuraavaa lähdekirjallisuutta
 - Jerzy Matusiak, Laivan kelluvuus ja vakavuus, Otatieto 557
 - Principles of Naval Architecture, SNAME 1988
 - John R Knott, Lashing and Securing of Deck Cargo, Third Edition, The Nautical Institute
 - Outinen, Koski, Salmi, Lujuusopin perusteet, Pressus Oy 2000
 - Anderson P, et al: Safe Stowage and Securing of Cargo OnBoard Ships, Research Report, MariTerm AB, 1982
18. Internetissä löytyy lukuisia puutavaralastin siirtymisraportteja

Liite 1. Alukselta saadut vakavuuslaskelmat

№ отход: JAKOBSTAD
31/12/01

m/v Pioneer Oregi Date 12-31-2001 Time 00:03:29 File sawngood

Cargo items	Number	Weight	X	Z
Timber cargo hold 1		495.10	41.40	7.57
Timber cargo hold 2		659.77	25.70	5.12
Timber cargo hold 3		1027.48	5.40	5.15
Timber cargo hold 4		983.92	-18.30	5.28
Timber cargo deck F		312.50	24.28	11.48
Timber cargo deck A		533.16	6.43	12.08
Timber cargo deck 4		587.12	-18.48	12.60
Total Timber cargo		4599.05	5.47	7.61
Ballast		1001.60	15.33	1.06
Fuel		383.40	-6.95	1.80
Fresh water		192.50	-28.82	5.19
Oil		26.19	-39.36	3.57
Total liquids		1603.69	3.81	1.77
aw		5.00	-5.00	5.00
Stores		10.00	-55.00	10.00
Supply		75.00	5.00	5.00
Ice		130.15	-6.50	13.61
Deadweight		6292.75	4.94	6.09
Light ship condition		3936.60	-11.35	7.59
Displacement		10359.50	-1.40	6.76

FREE SURFACE CORRECTION (dMz) 1686.6 (tm) / 0.16 m
 GRAIN CORRECTION (dMz) 0.0 (tm) / 0.00 m
 WATER DENSITY 1.002
 Added weight in tanks did not take into account

Signature MASTER Profy , 31 , DECEMBER 2001
 2 off. Stand.
 Ch. off. [Signature]

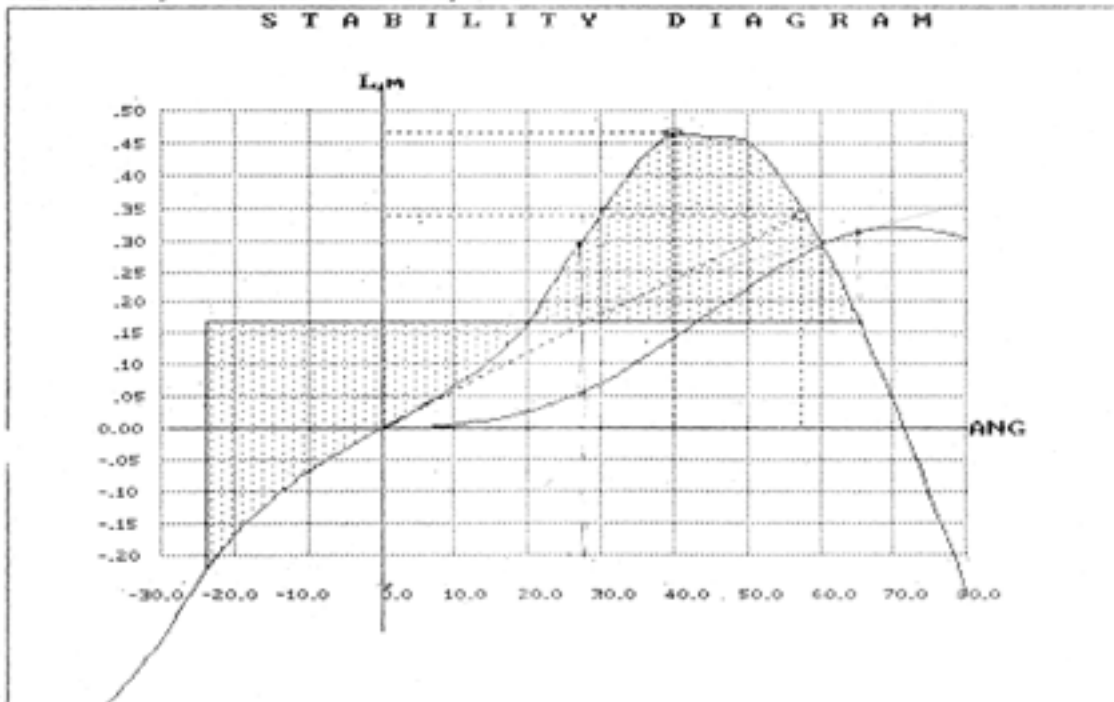
итривод SKIRDA: 1/1/01

ICE CONDITION

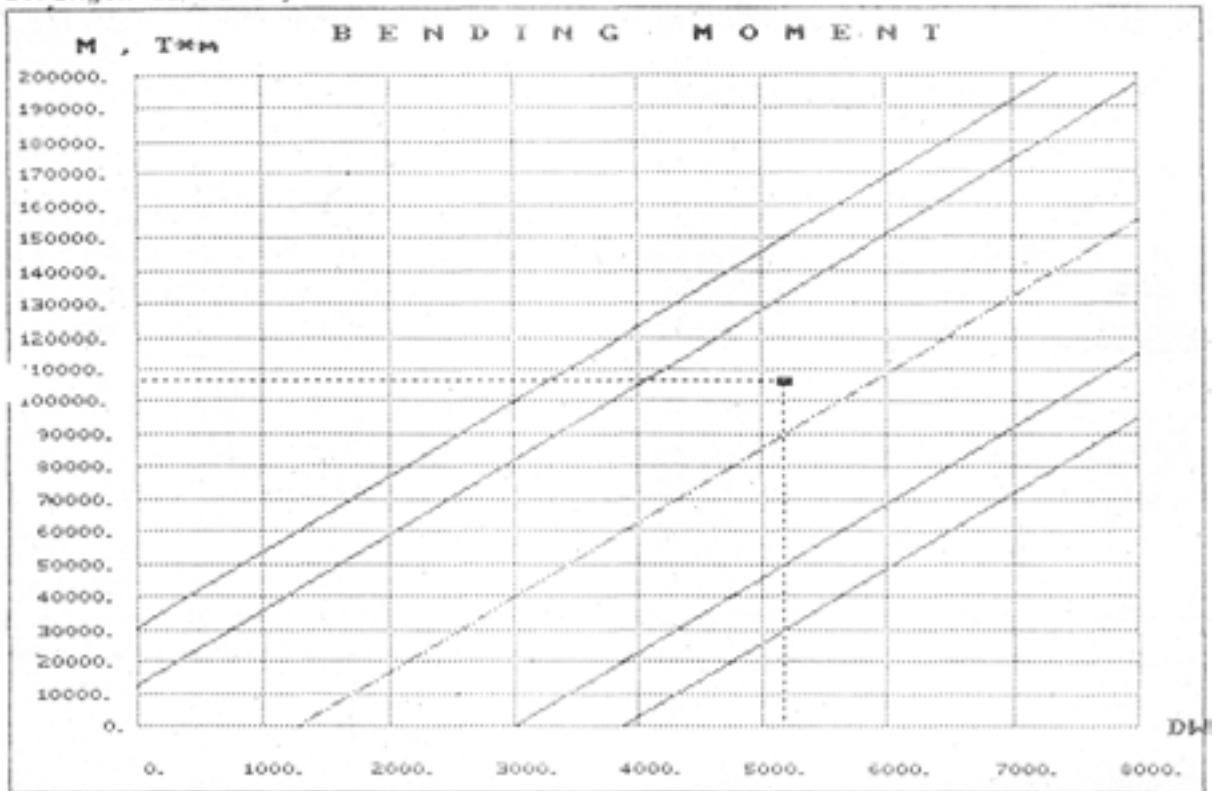
DRAUGHT MEDIUM	7.29	7.01
FORE DRAUGHT MARK	7.04	6.84
AFT DRAUGHT MARK	7.52	7.17
TRIM	-0.51	-0.35
METACENTRIC HEIGHT GMo, m	0.50	
METACENTRIC HEIGHT GM, m	0.34 > 0.21	0.317, 0.14
Zg, m	6.92 < 7.09	6.87
Maximum Arm	0.47 > 0.25	0.53
Angle of max arm	40.00 > 30.00	49.6
Weather criterion	2.305 > 1.000	2.5
Angle of vanishing, deg	72 > 55	75
Area under curve 0-40, (m*rad)	0.149 > 0.080	0.161

HEEL	0	10	20	30	40	50	60	70
ARMS	-0.00	0.07	0.17	0.34	0.47	0.45	0.30	0.04

The summary trim and stability are SAFETY



Actual moment, tm 106325
Deadweight ,t 5172
Strength is safety



Liite 2. Aluksen kansilastin kiinnityksen tarkastelu

M/S FJORD PEARL, Paketoidun sahatavarakansilastin kiinnitys

Paketoidun sahatavarakansilastin kiinnitysmenetelmät ovat edelleen kehitysvaiheessa. IMO:n ja kansallisten viranomaisten ohjeissa on epä johdonmukaisuuksia, viitteet /Knott/. Käytännössä kiinnitys tehdään IMO:n vaatiman lastinkiinnityskäsikirjan ohjeiden mukaan. Tällöin tämän käsikirjan laadulla on suuri merkitys. FJORD PEARLin lastinkiinnityskäsikirja on varsin perusteellinen, mutta tutkinnan aikana on havaittu, että siihen tulisi tehdä täydennyksiä ja sisällyttää perusteelliset laskentaesimerkit.

Seuraavan esityksen tarkoituksena on tuoda esiin paketoidun sahatavarakansilastin kiinnityksen laskentaan liittyvät tekijät, eikä päätyä tarkkoihin tuloksiin.

1 Kansilastin paikallaan pysymisehto

Tässä liitteessä tarkastelemme pääasiassa poikittaisia voimia, koska pitkittäiset ovat yleensä selvästi pienempiä. Tutkitaan staattista tilannetta; keinunnasta johtuva dynamiikka on otettu huomioon liitteessä 5. Aluksi tarkastelemme sivusuuntaista liukumista.

Aluksi oletamme, että kuvassa 1 kansilasti pysyy vielä paikoillaan, kun kallistuskulma on θ_s . Tällöin kansilastin ja alustan välinen kitkakerroin $\mu = \tan \theta_s$. Sitten alus kallistuu lisää, kulmaan θ_{DIN} . Nyt tarvitaan kannen suuntainen lisävoima K pitämään lastia paikallaan. Saadaan

$$K = mg(\sin \theta_{DIN} - \cos \theta_{DIN} \tan \theta_s)$$

$$\Rightarrow K/\cos \theta_{DIN} = mg(\tan \theta_{DIN} - \tan \theta_s)$$

Seuraavaksi on selvitettävä, miten voima K saadaan aikaan. Tässä tapauksessa kansilastin puristumista alustaa vasten lisätään lastin yli menevällä sidonnalla. Sivusuunnassa vaikuttava voima K syntyy kansilastin ja alustan välisen kitkan vaikutuksesta.

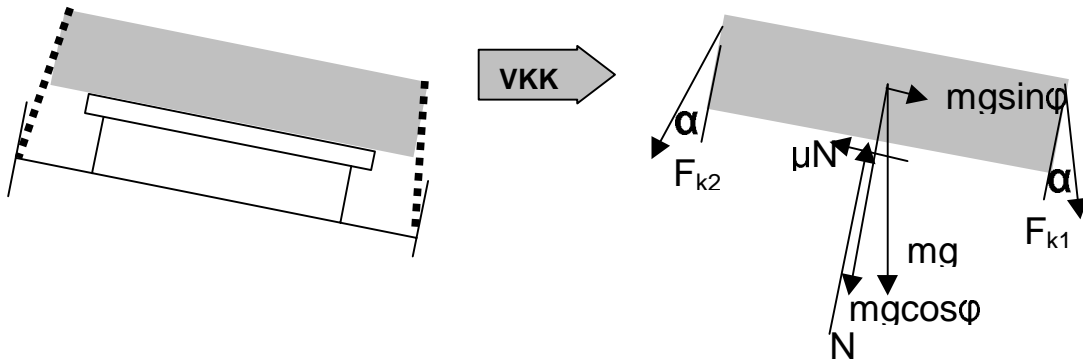
2 Kiinteä lastiyksikkö, kiinnitetty kulmista

Tarkastellaan aluksi lastiluukuilla olevaa kiinteätä lastia, kun alus on kallellaan kulman φ verran. Kansilasti on kiinnitetty vaijerien avulla yläkulmistaan kanteen. Kiinnitysvoimat ovat F_{k1} ja F_{k2} ja ne eroavat kulman α verran pystysuorasta. N on alustan tukivoima ja μ on alustan ja kansilastin välinen kitkakerroin. Vapaakappalekuvion (VKK) avulla saadaan kappaleen paikallaan pysymisehto luukun suunnassa:

$$mg \sin \varphi \leq \mu [(mg \cos \varphi + (F_{k1} + F_{k2}) \cos \alpha] + (F_{k2} - F_{k1}) \sin \alpha$$

Tilanteen yksinkertaistamiseksi otetaan jatkossa $\alpha = 5^\circ$, jolloin $\sin \alpha \approx 0$ ja $\cos \alpha \approx 1$. FJORD PEARLilla oli tämä tilanne.

Sahatavarakappaleita ei voi kiinnittää edellä esitetyllä tavalla, vaan käytetään lastin yli menevää sidontaa ja/tai tukitolppia.



Kuva 1. Kiinteä, yläkulmistaan kiinnitetty lasti lastiluukulla

3 Kiinteä lastiyksikkö, sidonta

Muutetaan lastin kiinnitystä siten, että kiinnitysvaijerit yhdistetään lastin yli, kuva 2. Tätä kutsutaan lastin yli kulkevaksi sidonnaksi (kitkaan perustuva kiinnitys). Nyt tulee edellisen tilanteen lisäksi vaikuttamaan kiinnitysvaijerin kulman muutoksesta johtuva jännityksen kasvu juuri ennen kansilastin liikahtamista. Tilanne vastaa köysi- tai hihnakitkaa. Ensimmäisen mutkan jälkeen syntyy kiinnitysvaijeriin voima F_{k3} , joka lasketaan kaavasta:

$$F_{k3} = F_{k1} e^{\mu \cdot 0.85 \cdot \pi / 180}$$

Toisen mutkan jälkeen kiinnitysvaijerissa on voima:

$$F_{k2} = F_{k1} e^{\mu \cdot 0.170 \cdot \pi / 180}$$

Kun nämä otetaan huomioon, saadaan seuraava lastin paikallaan pysymisehto:

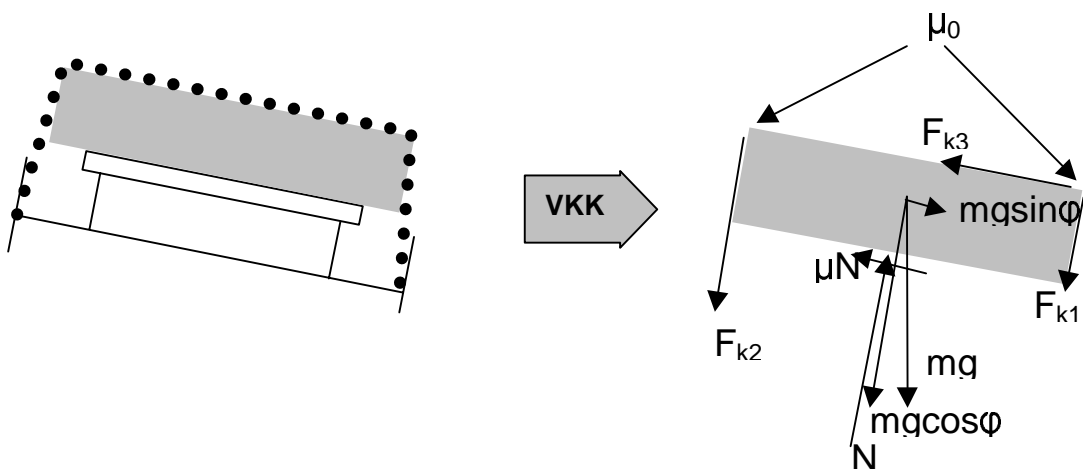
$$mg \sin \varphi \leq \mu [mg \cos \varphi + F_{k1}(1 + k)]$$

jossa:

$$k = e^{\mu \cdot 0.170 \cdot \pi / 180}$$

μ_0 = kitkakerroin vaijerin ja lastin kulmien välillä

$$F_{k2} = k \cdot F_{k1}$$



Kuva 2. Kansilasti kiinnitetty sen yli vedetyllä kiinnitysvaijerilla

Vaijerivoimien laskemiseksi on arvioitava μ_0 . Sen voi olettaa riippuvan kiinnitysvaijerin kireydestä sekä vaijerin ja lastin kulman ominaisuuksista. Kireyden kasvaessa kiinnitysvaijeri puristuu voimakkaammin lastin kulmaa vasten. Rajaksi tulee kiinnitysvaijerin kestävyys sekä lastin kulman ja koko lastin puristuslujuus.

Kiristettäessä kiinnitysvaijereita köysikitka vaikuttaa toiseen suuntaan. Jos kiristyskohta on lastin päällä, saadaan sivuilla vaikuttavat kiristysvoimat jakamalla nimellinen kiristysvoima kertoimella \sqrt{k} . Jos kiristys on toisella laidalla, saadaan toisen laidan voima jakamalla kertoimella k . Kun kiristys tehdään lastin päältä, on kiinnitys symmetrinen. Samoin syntyy symmetrinen kiinnitys, jos kiristetään erikseen kiinnitysvaijerin molemmat päät laidoilla. Symmetrinen kiristys on parempi. FJORD PEARLin tapauksessa kiristys tehtiin lastin päältä. Tutkintaryhmän laskelmissa tämä on otettu huomioon pienentämällä pystysuoraa kiristysvoimaa vastaavasti.

Kun kiristys- ja liikeyhtälöt yhdistetään saadaan merkittävällä lastin päällä vaikuttava heti kiristuksen jälkeen vaikuttava kiristysvoima = Q

$$F_{k1} = \frac{Q}{\sqrt{k}} \text{ ja alustan suuntainen lastia paikallaan pitävä voima:}$$

$$\mu (1 + k)F_{k1} = \mu (1 + k) \frac{Q}{\sqrt{k}} \approx 2 \mu Q$$

Vaijerin kiristysvoimasta johtuva kannen suuntainen voima, jota kohdassa 1 merkittiin kirjaimella K , on siis likimain $2 \mu Q$. Saadaan:

$$2 \mu Q / \cos \theta_{DIN} \approx mg(\tan \theta_{DIN} - \tan \theta_s)$$

Termi $2 \mu / \cos \theta_{DIN}$ on tavallisesti hieman alle 1. Lastinkiinnityskäsikirjassa θ_s on pinon stabiiliteettikulma, joka on yleensä pienempi kuin kitkakerrointa μ vastaava kulma, joten termin mg kerroin kasvaa. Lopputuloksena saadaan lastinkiinnityskäsikirjan kaava

$$Q = mg(\tan \theta_{DIN} - \tan \theta_s)$$

Se sisältää siis hieman turvallisuusreserviä, kun Q on lastin päällä vaikuttava kiinnitysvaijerin kiristysvoima. Toisaalta, reservi on tarpeen tilanteen epämääräisyyden vuoksi. Eurooppalaisessa standardiehdotuksessa /prEN 12195-1/ on vastaava kaava, jossa kulmien tilalla ovat kiihtyvyydet.

Kitkakulmaa on käytettävä pinon kaatumiskulman sijaan, jos edellinen tulee pienemmäksi kuin jälkimmäinen, katso kohta 4.2.

4 Sidottu sahatavaralasti

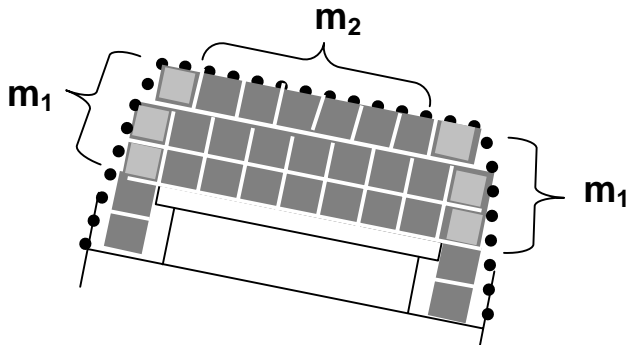
4.1 Kiinteät paketit

Tilanne on monimutkaisempi, kun kappale muodostuu paketeista, kuva 3. Liukumisen lisäksi tulee mahdolliseksi pinon kaatuminen. Jokaista pakettia tulisi tarkastella erikseen sen vapaakappalekuvion avulla. Tämä johtaisi monimutkaiseen laskentaan. Lisäksi tarvittavia lähtötietoja on paljon ja ne ovat epätarkkoja. Tilannetta voidaan yksinkertaistaa esimerkiksi siten, että ajatellaan vain laitimaiset pakettipinot täysin kiinnitysvaijerin

pystysuoran kiristysvoiman alaisiksi. Käsittelemme tarkemmin vain lastin liukumista. Pinon kaatuminen otetaan huomioon venäläisissä lastinkiinnityssäännöissä ilmoitettujen, kokeellisesti saatujen stabiliteettikulmien avulla.

Riittää tarkastella luukun tason yläpuolisia kerroksia, koska luukkujen välissä ja luukkujen karvelien ja partaan välissä lastin siirtyminen on käytännössä estetty. Kun laitimmaisena luukun tason yläpuolella oleva pinon massa on m_1 ja luukun alueella oleva m_2 ja vastaavasti kitkakertoimet ovat μ_1 ja μ_2 , saadaan luukun tason suuntainen tasapainoyhtälö:

$$(2m_1+m_2)g\sin\varphi \leq \mu_2[m_2g\cos\varphi + F_{k1}(1+k)] + \mu_1[(2m_1g\cos\varphi + F_{k1}(1+k))]$$



Kuva 3. Sahatavarapakettilasti luukulla

Kitkakertoimet μ_1 ja μ_2 ovat yleensä erisuuret, koska vastaavien massojen alimpien kerrosten alla on eri materiaali. FJORD PEARLin tapauksessa m_2 :n puinen alapinta oli teräksen päällä ja m_1 :n puinen alapinta huputetun puupinnan päällä. Molemmissa väleissä oli lisäksi nostoköydet.

Tätä yhtälöä on käytetty määrittäessä keinuntakulmaa, jolla lasti vielä pysyy paikallaan eri kitkakertoimilla. Kerättyihin kitkakerrointietoihin perustuen on laskelmissa käytetty $\mu_1 = \mu_2 + 0,15$. Lisäksi on otettu huomioon dynaamiset tekijät, ja tuulen paine, jotka on selvitetty liitteessä 5.

Usein köysikitkakerroin on 0,4-0,5, mutta kohdassa 3 luetelluista syistä johtuen arvioidaan sen olevan tässä tapauksessa selvästi pienempi. Taulukossa 1 ovat arvioidut kitkakertoimet ja lasketut k-arvot.

Taulukko 1. Vaijerikitkan arvioitu kitkakerroin ja laskettu k-arvo

Kireys [kN]	μ_0	k
40	0,12	1,428
60	0,16	1,608
80	0,20	1,810

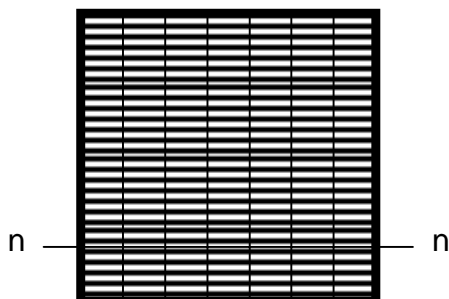
Kiinnitysvaijerissa vaikuttava voima voi kasvaa juuri liikahtamisen alkaessa 30-40% suuremmaksi kuin lastin päällä vaijerissa ennen liikahtamista vaikuttava voima.

4.2 Sahatavarapakettilasti

Sahatavarapaketti on esimerkki lastiyksiköstä, jossa on otettava huomioon sen sisäinen rakenne. Lautakerrosten väliin syntyy liikkeen sallivia pintoja. Ne on edellä voitu jättää

huomiotta. Sahatavarapaketti on muodostettu pinoamalla koneellisesti saman poikkileikkauksen omaavat laudat tai lankut siten, että syntyy noin $1,1m \cdot 1,1m$ poikkipintainen paketti.

Syntynyt tiivis paketti suojataan tarvittaessa hupulla ja ympäröidään 2-3 teräksisellä vannenauhalla, jotka kiristetään. Näin syntyneessä paketissa on useita kitkapintoja, kuva 4.



Kuva 4. Sahatavarapaketti, teräsvanteen kiristysvoima puristaa pakettia, reunimmais- ja ylimmät sekä alimmat laudat ovat eniten puristuksissa, kitkakerroin pintojen välissä sahatavaran ollessa kuivaa, on noin 0,5, eräs mahdollinen liukupinta on $n \cdot n$, paketin ollessa puristuksessa (päällä olevat paketit + lastinkiinnitysvoima), paketti puristuu kasaan, jolloin vanteiden kiristys saattaa pienentyä

Kun paketteja pinotaan päällekkäin, voidaan tarkastella pinon stabiilisuutta. Selvitetään kokeellisesti kulma, jolla eri tavoin pinotut ja erikorkuiset kallistetut sahatavarapakettipinot pysyvät stabiileina. Venäläisissä säännöissä on ilmoitettu kokeellisesti saatuja sahatavarapakettipinojen stabiliteettikulmia sahatavaran ollessa kuivaa. Pakettipinoa ei ollut sidottu eikä pakettien alla ollut nostoköysiä. Paketit olivat ilman suojahuppua.

Kun paketit pinotaan pitkittäin, stabiliteettikulma on 23° , 16° , 11° ja 0° kun pino on 1, 2, 3 ja 4-7 kerroksinen. Nämä kulmat ovat pienempiä kuin teoreettiset johtuen pakettien keskinäisistä eroista ja pinoamisen epätarkkuuksista. Näitä kulmia voidaan käyttää, jos kitkakulma on suurempi. Jos kitkakulma on pienempi, sitä tulee käyttää.

Lastinkiinnityskäsikirjan laskentamenetelmässä kulma θ_s on pinon staattinen stabiliteettikulma. Se muunnetaan dynaamiseksi stabiilisuuskulmaksi ottamalla aluksen keinnun vaikutus huomioon. FJORD PEARLin lastitilannetta lähinnä vastaava staattinen stabiliteettikulma on lastinkiinnityskäsikirjassa 17° . Köysien ja huppujen johdosta kulmaa tulisi pienentää. Termin $\tan \theta_s$ sijaan tulee käyttää kitkakerrointa, jos se on pienempi kuin $\tan \theta_s$.

4.3 Tutkinnassa käytetyt kitkakertoimet

Jos yritämme tarkastella sahatavarapakettikansilastia yhtenä kokonaisuutena yhden pinon sijaan, tilanne tulee liian monimutkaiseksi tässä lähestyttäväksi. Sen vuoksi, laskettaessa kansilastin liikahtamisen ehtoja, on tutkinnassa käytetty muuttujana välissä lastiluukku - sahatavarapaketin alapinta vallitsevaa kitkakerrointa. Tämän kitkakertoimen yhteyttä stabiliteettikulmaan ei ole tutkittu enempää kuin edellä on esitetty.

5 Vaijerin kiristävä voima

Lastinkiinnityskäsikirjasta on poimittu seuraavat kiinnityselementtien lujuustiedot. Kiinnitysvaijerin halkaisijan tulee olla vähintään 16 mm (suluissa liitteen E IMO:n puutavara-lastiohjeistossa olevat vaatimukset).

BL on murtokuorma, SWL on turvallinen työkuorma. SWL:n sijaan olisi parempi käyttää termiä MSL, maksimi kiinnitysvoima. Todellinen murtokuorma ei ole tiedossa. Kiinnitysvälineet ovat venäläisiä. On mahdollista, että BL on suurempi kuin 133 kN, ehkä jopa 200 kN.

Ainoa lastinkiinnitysvälineelle ilmoitettava ljuusarvo tulisi olla murtokuorma (BL). Tilanteen mukaan käyttäjä voisi sitten valita sopivan varmuusluvun. Esim. kansilastin tulisi irrota, kun aluksen kallistuskulma ylittää 40°, mutta ruumassa lasti ei saisi siirtyä.

Taulukko 2. Lastinkiinnitysvälineiden ljuuustietoja

Nimike	kpl	SWL [kN]	BL [kN] (kg)
Kiinnitysvaijeri 14 m	88	77,5	yli 133 (13600)
Kiinnitysvaijeri 8 m	8	77,5	yli 133 (13600)
Ketju 3 m	48	54	yli 133 (13600)
Vanttiruuvi	59	34,3	yli 133 (13600)
Korvake kannella	44	50	yli 138,3 (14100)

Todellinen kiristävä voima vaijerissa jää epäselväksi, sillä aluksella sitä ei mitattu. Ensi-kiristys ja tarkistuskiristykset merellä tehtiin käsin, kokemuksen pohjalta. Merellä aluksen liikkua ja värähdellessä lasti tiivistyy ja kiristävä voima pienenee. Tämän vuoksi vaijereita kiristettiin lastinkiinnityskäsikirjan ohjeita noudattaen kaksi kertaa vuorokaudessa. Viimeinen kiristys tehtiin 6 tuntia ennen haveria noin kello 20.00. Sen jälkeen kiristys oli saattanut jo hieman löystyä. Todennäköisesti eri vaijereissa on ollut eri kiristysvoimat. Sen vuoksi on laskettu tilanne vaijerin eri kiristysvoimilla ja lisäksi ilman kiristysvoimaa. Laskelmien tulokset on esitetty liitteessä 4.

Sahatavarapakettilastin siirtyessä on todennäköistä, että lastin ympäröimä kasvaa, mikä kasvattaa vaijerissa olevaa kiristysvoimaa ja siten myös lastin siirtymistä vastustavaa voimaa. Toisaalta, paketit puristuvat kasaan. Tuloksena on uusi tasapainotilanne. Todelliset vaijereissa vallitsevat kiristysvoimat ovat epämääräisiä, koska sahatavarapakettirakennelma muotoutuu jatkuvasti uudelleen.

6 FJORD PEARLIN kansilastin kiinnityksen laskenta

Siirtyvän lastin määräksi on arvioitu 1250 t. Kaavan mukaan saadaan $Q = 1250 \cdot 9,81 (\tan 34^\circ - \tan 16,5^\circ) = 4639 \text{ kN}$. Käytössä oli 44 suoraan poikki aluksen vedettyä kiinnitysvaijeria. Lisäksi kansilastin yli oli vedetty 6 ristosidosparia, joista vinouden vuoksi voidaan ottaa huomioon 4. Kaikkiaan oli siis käytössä $44 + 8 = 52$ kiinnitysvaijeria. Saadaan tarvittavaksi kiristysvoimaksi 89 kN. Jos otetaan huomioon vain poikittaiset vaijerit, saadaan 105 kN.

Taulukon 2 mukaan nämä voimat ovat melko suuria ja johtavat varmuuskertoimiin 1,5 ja 1,25 pienimmällä murtokuormalla. Todellinen kiristysvoima eikä kiinnitysosien murtokuorma ole tiedossa.

Tutkinnassa tehtyihin laskelmiin sisältyy likimääräisyyksiä ja epätarkkuuksia. Ei ole otettu huomioon sitä, että pakettikerrosten määrä lastiluukuilla oli osin kolme, osin neljä. Tällöin korkeamman pinon alueella kiristysvoiman tulisi olla suurempi tai vaijerien tulisi olla tiheämmässä. Myös arvio liikkumaan pääsevän lastin määrästä, 1250 t, saattaa olla epätarkka. Toisaalta lastinkiinnityskäsikirjan tausta-ajatuksia ei ole tiedossa. Ei ole myöskään tiedossa, miten lastinkiinnityslaskelmat tehtiin FJORD PEARLilla.

Yhteenvetona näyttää siltä, että lastinkiinnityskäsikirja vaatii selvennyksiä ja lisäyksiä. Käsikirjassa ei ole selkeää, täydellistä kiinnitysten laskentaesimerkkiä. Kitkakertoimien vaikutusta sahatavarapakettipinon stabiiliteettikulmaan ei ole esitetty. Ei myöskään ole esitetty, että vaijerien kireydet tulisi todentaa, eikä todennuskeinoja. Mitoituksen tulisi perustua tunnettuun murtolujuuteen ja kyseisen kuljetuksen edellyttämiin varmuusker-toimiin. Lomake laskelmien tekemiseen tulisi lisätä. Satamaviranomaisten tulisi tarkistaa se.

Liite 3. Aluksen vakavuuden tarkastelu

M/S FJORD PEARL, Aluksen vakavuuden tarkastelu

Alukselle suunnitellaan sellaiset vakavuusominaisuudet, että se pysyy pystyssä suunnitelluissa lastilanteissa. Mitoitusolosuhteita vastaavat minimikriteerit on määritelty kansainvälisissä ja kansallisissa määräyksissä. Normaaleissa käyttöolosuhteissa sääntöjen mukainen vakavuus on riittävä, mutta se saattaa olla riittämätön onnettomuustilanteissa.

Seuraavassa tarkastellaan M/S FJORD PEARL:n vakavuutta sääntöihin verrattuna, vakavuusominaisuuksien muuttumista merenkäynnissä sekä lastin siirtymisen ja vakavuusominaisuuksien vuorovaikutusta.

Lastin siirtymisestä johtuvaa hetkellistä kallistumista on jatkossa kutsuttu keinahdukseksi.

1 Aluksella tehdyt laskelmat

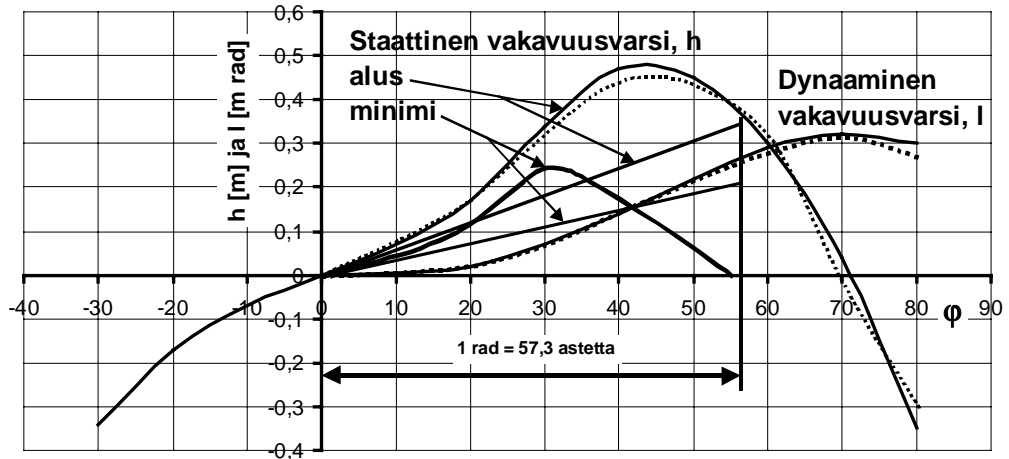
Alukselta saadut vakavuuslaskelmat ovat asianmukaiset ja osoittavat vakavuuden täyttävän sääntöjen vaatimukset. Vapaiden nestepintojen vaikutuksella korjattu alkuvaihtokeskuskorkeus oli 0,34 m, kun vaatimus on 0,20 m. Staattinen ja dynaaminen vakavuuskäyrä ovat alla olevassa kuvassa 1. Ne on laskettu ohjeiden mukaan ja ne täyttävät kaikki kriteerit, jotka ovat myös näytetty. Kuvassa on myös aluksella vaurion jälkeen lasketut vakavuuskäyrät. Näiden käyrien pohjalla on tutkintaryhmä tehnyt eri tilanteiden vaatimia vakavuustarkasteluja.

Aluksessa tehdyissä laskelmissa on laskettu ns. sääkriteeri ja verrattu sitä vaadittuun. Sääkriteeri eli suhde kaatava momentti/maksimi kallistava momentti oli 2,3, mikä on hyvä. Sääntöjen mukainen tarkastelu lähtee ajatuksesta, että aallot keinuttavat alusta vakiotuulen aiheuttamasta pysyvästä kallistumasta puolelta toiselle tietyn kulman verran. Sen lisäksi otetaan huomioon tuulenpuuskan kallistava vaikutus. Laskelmissa käytettävä tuulen nopeus riippuu purjehdusalueesta. Tässä tapauksessa purjehdusalue oli rajoittamaton ja tuulen paine noin 1100 Pa, mikä vastaa tuulen nopeutta noin 43 m/s. Laskelmissa oletetaan, että aluksen painopiste sijaitsee keskiviivalla.

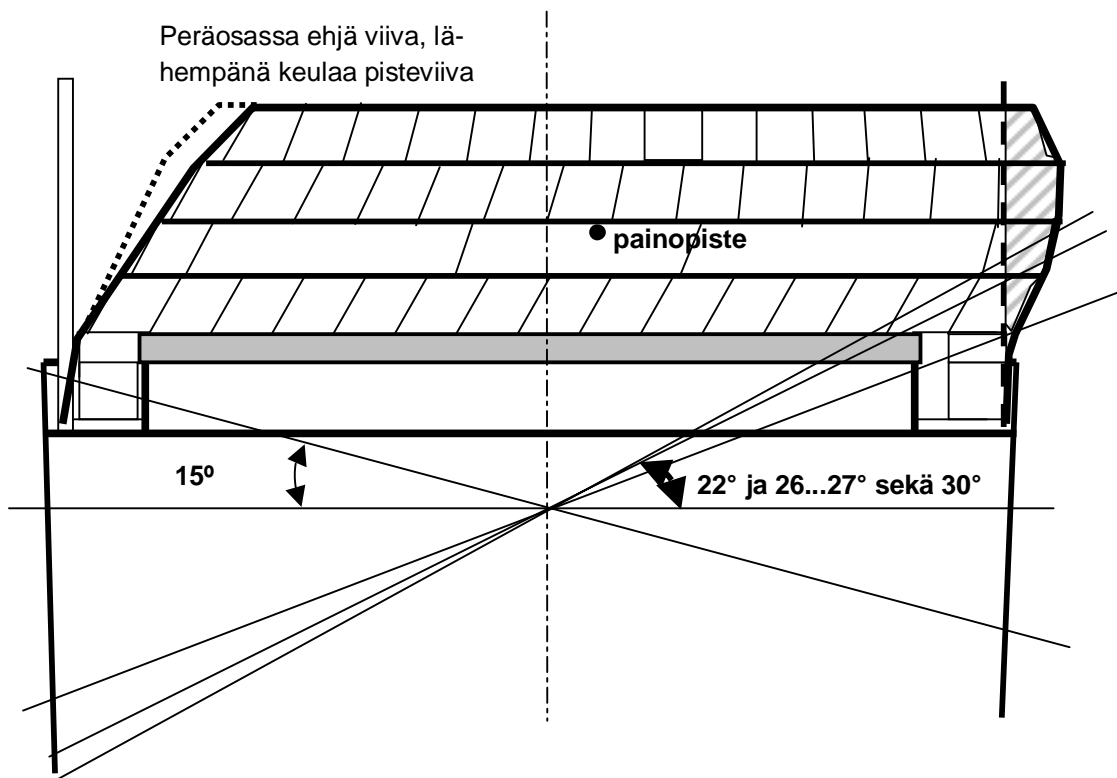
Kun painopiste ei ole keskiviivalla, aluksella on vakiokallistuma, jonka lisäksi vaikuttavat vakiotuuli, keinunta ja tuulenpuuska. Kallistavan momentin vaikutus esitetään yleensä korjaamalla staattista vakavuusvartta kallistavaa momenttia vastaavalla varrella kerrottuna tekijällä $\cos(\text{kallistuskulma})$. Näin korjatut 22° ja 26° kallistumia vastaavat tilanteet on esitetty kuvissa 5 ja 6. Koska alus keinuu uuden tasapainoaseman molemmin puolin, antaa käyrä mahdollisuuden tarkastella kallistuneen aluksen vakavuutta.

Kun puutavarakansilasti siirtyy, syntyy laidalle ylimääräistä oikaisevaa tilavuutta eli oikaisevaa momenttia. Tämän varaan ei voi vakavuuslaskelmia perustaa, mutta haverin tilaneanalyyseissä se on syytä ottaa huomioon. Lisätilavuuden läpäisevyys on 25% kuten muunkin kannella olevan puutavaran. Se vettyy ajan mittaan, joten sen oikaiseva vaikutus pienenee. Kuvan 2 mukaan lisätilavuus alkaa vaikuttaa yli 22° kallistumuilla, ja on vielä 26° kallistumalla vähäinen noin 75 tm.

Vakavuuskäyrät, alukselta saadut laskelmat ja staattisen varren minimiesimerkki
 Lähtötilanne Pietarsaaresta 31.12.2001 — Laivan arvio vauriotilanteesta



Kuva 1. Aluksella lasketut vakavuuskäyrät, kuvassa on myös esimerkki staattisen vakavuusvarren minimikäyrästä, kuvassa on esitetty käyrien kaltevuus origossa, mistä selviää alkuvaihtokeskuskorkeus kallistuskulmalla 1 radiaani



Kuva 2. Siirtynyt kansilasti, viivoitettu alue on ylimääräinen kansilastin tilavuus muotovakavuusvarren laskelmiin verrattuna

2 Vakavuutta heikentävät tekijät

Aluksen yllä olevaa vakavuuskäyrää muuttavat tämäntapaisessa onnettomuustilanteessa seuraavat tekijät.

1. Aluksen sijainti aaltoon nähden (myötävaikuttii keinahdukseen), kuvan 3 tapaus 1

- a: Aaltojen harjat aluksen päissä
- b: Tyyni vesi
- c: Aallon harja aluksen keskellä

Vakavuuskäyrät vastaavat tilannetta tyynessä vedessä. Kun alus on aallokossa, on vakavuus välillä parempi välillä huonompi kuin tyynessä vedessä. Kun alus on kohtisuoraan aaltoja vasten siten, että keskiosa on aallon harjalla, tilanne huononee. Normaalisti alus kohtaa aaltoja vaihtelevasti, eikä vakavuus huonone pitkäaikaisesti. FJORD PEARL kulki ennen haveria sivuaallokossa ja alkoi sitten kääntyä sivumyötäiseen.

Aluksen nopeus aaltojen suuntaan oli selvästi pienempi kuin aaltojen. Tällöin alus oli aallon harjalla kerrallaan lyhyen aikaa, mutta monta kertaa. Saattaa olla, että vakavuus heikkeni hetkellisesti myötävaikuttaen aluksen keinahdukseen. Toisaalta, vaikutusta vähensi se, että alus kohtasi aallot hyvin vinosti.

2. Aluksen painopisteen siirtyminen sivuun keskilinjalta (vaikuttii lastin siirtymisen jälkeen), kuvan 3 tapaus 2

Alempi käyrä: aluksen painopiste sivussa keskilinjalta. Puutavarakansilastin tapauksessa lastin siirtyessä, tulee siirtymän puoleisella laidalla ylimääräistä oikaisevaa momenttia, jos lasti pysyy paikallaan. Vaikutus esitetty pisteviivalla. Kuvassa 5 on esitetty 22° kallistuneen aluksen staattinen vakavuusvarsi.

3. Aluksen syvyyksen muutos haverin johdosta (vaikuttii lastin siirtymisen jälkeen), kuvan 3 tapaus 3

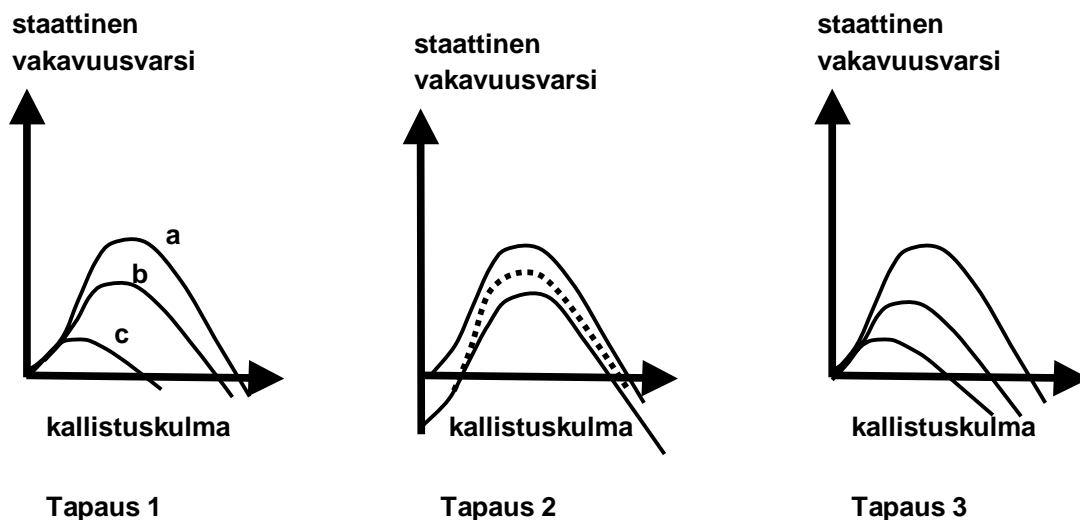
Kansilastin, kallistuman ja aluksen muotojen johdosta FJORD PEARLin syväys väheni lopputilanteessa noin 8 cm, millä oli pieni vakavuutta huonontava vaikutus aluksella tehtyjen laskelmien mukaan.

4. Vapaiden nestepintojen muutokset (vaikuttii lastin siirtymisen jälkeen)

Vettä kertyi kapeisiin tankkeihin. Niiden vapaiden nestepintojen vakavuutta huonontava vaikutus oli hyvin vähäinen. Ruumiin 2,3 ja 4 alkoi myös kerääntyä vettä. Ne olivat täynnä lastia, joten vapaita nestepintoja ei päässyt syntymään.

5. Aluksen painopisteen pystysuora siirtyminen (vaikuttii lastin siirtymisen jälkeen)

Osa vedestä kertyi kaksoispohjaan, osa ruumiin, osa laitatankkeihin ja osa kannelle. Jäätä muodostui kannelle, aluksen rakenteisiin ja kansilastiin. Laskelmien mukaan painopiste nousi noin 5 cm. Tällöin vakavuuskäyrää on korjattava tekijällä $-5 \text{ cm} \times \sin(\text{kallistuskulma})$.



Kuva 3. Vakavuuskäyrien muuttuminen eri tilanteissa

3 Lastin siirtyminen ja vakavuus

Lastin siirtymisessä on kysymys dynaamisesta ilmiöstä, jota on seuraavassa tarkasteltu likimääräisesti erillisinä vaiheina.

Aluksen päälystön mukaan alus oli tuulen vuoksi kallellaan oikealle noin 5° . Aallokossa alus kallistui vasemmalle puolelle 15° , sitten kallistui ja keinahti oikealle puolelle 30° , palautui 22° ja muutaman tunnin kuluttua stabiloitui $26-27^\circ$.

Voidaan päätellä, että staattinen kallistava momentti vastasi aluksi 22° kallistumaa. Hetkellinen kallistuma 30° johtui dynaamisista tekijöistä. Lopputilanne $26-27^\circ$ vastasi uutta staattista tilannetta lähinnä tankkeihin ja lastiruumiin kerääntyneen veden johdosta.

Aluksen keinahdus

Aluksen painopisteen kautta kulkevan pituussuuntaisen x-akselin ympäri tapahtuvaa keinuntaa käsitellään keinumisen differentiaaliyhtälöllä, joka sisältää seuraavat tekijät:

- Hitausmomenteista ja hitausvoimista johtuvat momentit
- Vaimennuksesta johtuvat momentit
- Staattiset momentit
- Ulkoiset momentit
- Sisäiset momentit

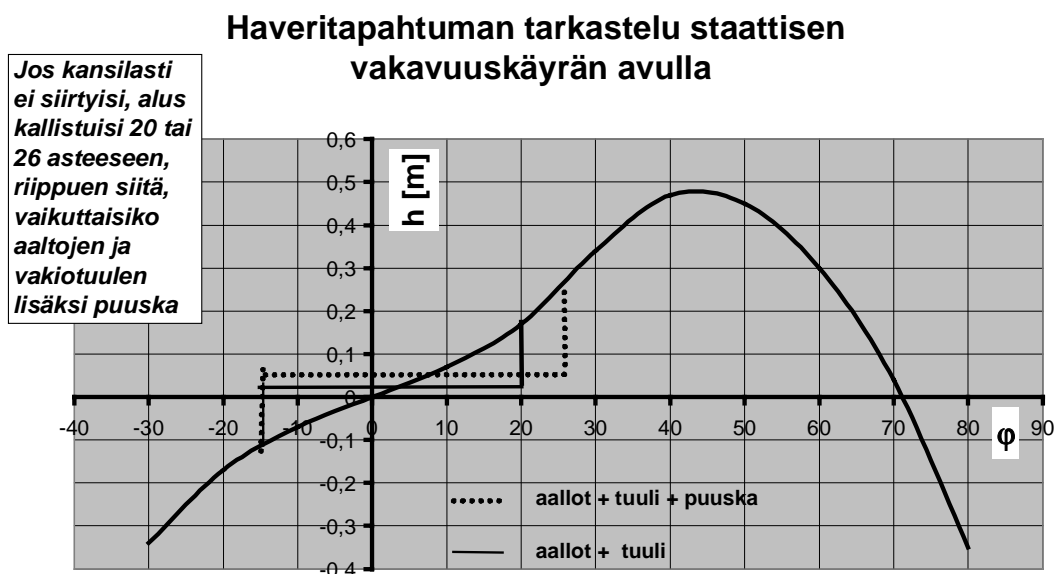
FJORD PEARLin keinahdus on ollut epämääräisistä herätteestä johtuva, joten yllä olevien momenttien pohjalta syntyvän differentiaaliyhtälön ratkaisun tarvittavat reunaehdot ovat liian epämääräisiä. Tarkastelemme sen sijaan onnettomuutta staattisen vakavuuskäyrän avulla.

Oletamme ensin, että kansilasti ei siirry. Kuvan 4 vakavuuskäyriin perustuen saamme selville maksimi kallistuskulman. Lastin on täytynyt lähteä liikkeelle ennekuin alus kallistui tähän kulmaan keinahduksessa. On kaksi mahdollisuutta, katso kuva 4:

1. Maksimikallistuskulma johtuen vakiotuulesta ja aallokosta on noin 20° .

2. Maksimikallistuskulma johtuen vakiotuulesta, puuskasta ja aallokosta on noin 26°.

Voimme todeta, että aluksen kansilasti lähti liikkeelle kallistuskulman ollessa 16-25°, todennäköisesti 19-22°. Siirtymisen aiheuttama dynamiikka keinautti aluksen 30°.



Kuva 4. Eri mahdollisuuksia 30 ° kallistuman syntymiselle

Keinahduksen dynamiikka

Aallokossa alus kallistui 15° vasemmalle ja kertyneellä potentiaalienergialla ja tuulen avulla takaisin oikealle likimain 20°. Samalla vaikutti todennäköisesti tuulenpuuska, enintään 27 m/s. Lisäksi esimerkiksi seuraavat dynaamiset tekijät olisivat voineet vaikuttaa:

- Alus oli sivumyötäisessä asennossa aaltoon nähden ja ylitti muutaman kerran aallon, mistä saattoi johtua aluksen kiertymisliike pystysuoran akselin ympäri (mutkailuliike).
- Epäedullinen sijainti aallon kaltevalla sivulla saattoi myötävaikuttaa aluksen kallistumiseen.
- Keinahdusliike on saattanut aallokossa olla nopeampi kuin aluksen keinumisperiodista voisi päätellä.
- Aluksen ylittäessä vinottain aaltoa oikaiseva vakavuusvarsi pieneni, jolloin alus kallistui enemmän.
- Siirtyvän lastin liike-energia absorboitui osittain lisäkallistumiseen tehtyyn työhön. Tätä osuutta on vaikea arvioida aallokon johdosta. Lisäksi ruumassa sen laittaa vasten pysähtyvällä tiivistyvällä lastilla oli myös liike-energiaa.

Pysyvä kallistuma pian keinahduksen jälkeen

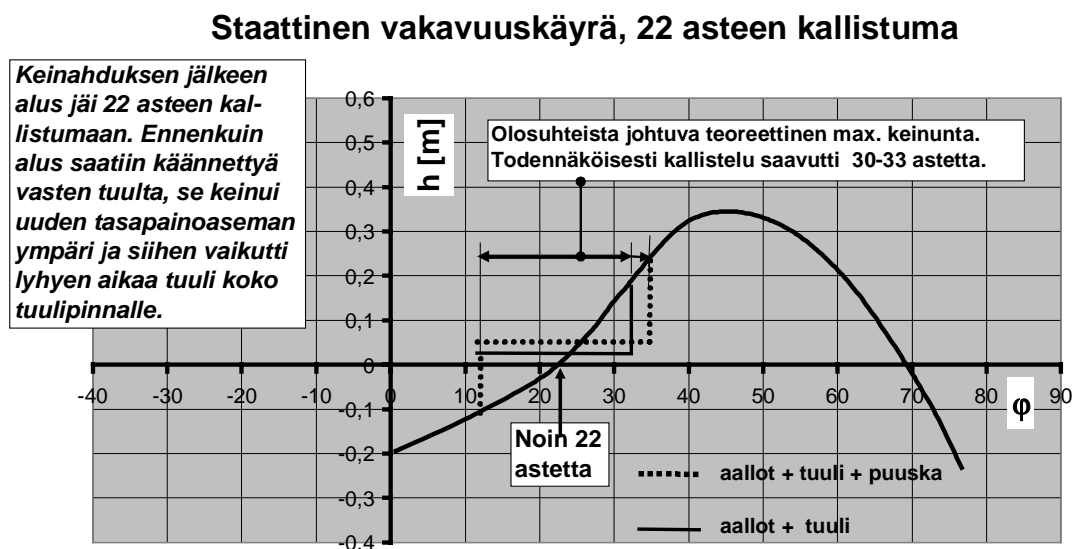
Kuvan 2 perusteella lastin painopiste siirtyi sivulle pelkän geometrisen tarkastelun pohjalta noin 0,8 m. Arvioidaan pakettien ja köysien puristumisen ja tiivistymisen oikealle puolelle aiheuttavan 5 cm painopisteen siirtymän. Lisäksi alimpien pakettien kastumisesta ja niiden pintaan ja aukkoihin kertyneestä jäästä ja vedestä johtuvasta lisäpainon momentista (noin $8m \cdot 50t$) arvioidaan aiheutuvan 0,2-0,3 m siirtymän, eli yhteensä

1,05-1,15 m siirtymä. Tästä siirtymästä aiheutuva kallistava momentti, kun kansilastin paino plus lisäpaino on 1483 tonnia, on n. $1,1 \cdot 1483 \cos 22^\circ =$ noin 1512 tm.

Staattiseen kallistumaan 22° tarvitaan lähtötilannetta vastaavan vakavuuskäyrän mukaan noin 2070 tm. Kansilastin siirtymisen lisäksi on mm. seuraavia kallistumaa kasvattavia tekijöitä:

- Ruuman lastin tiivistyminen toiselle laidalle, ei varsinaisesti siirtyminen, ehkä noin 35 cm $\Rightarrow 3166 \cdot 0,175 \cos 22^\circ =$ noin 510 tm.
- Syväyksen pienestä kasvusta johtuu pieni heikennys muotovakavuuskäyrässä.
- Kansilastin kastuminen ja jään kertyminen nostavat aluksen painopistettä 1-2 cm.

Kallistavia momentteja on yhteensä alkutilanteessa $1512 + 510 = 2022$ tm. Erotuksen voi olettaa johtuvan yo. arvion ja lähtötietojen epätarkkuuksista. Lastin aukkojen sisällä vellova vesi on ollut jo mukana laskettaessa aluksen suunnitteluvaiheessa muotovakavuusvartta. Kuvassa 5 on tämän tilanteen staattinen vakavuuskäyrä.



Kuva 5. Staattinen vakavuuskäyrä 22° kallistumalla

Keinahduksen jälkeen aluksen keula käännettiin tuuleen. Käännöksen aikana alus saattoi kallistua hieman yli 30° . Kun alus oli saatu vasten tuulta, sen keinuminen väheni, mutta oli edelleen muutaman asteen, koska oli ristiaallokkoa.

Kallistuman staattinen lopputilanne

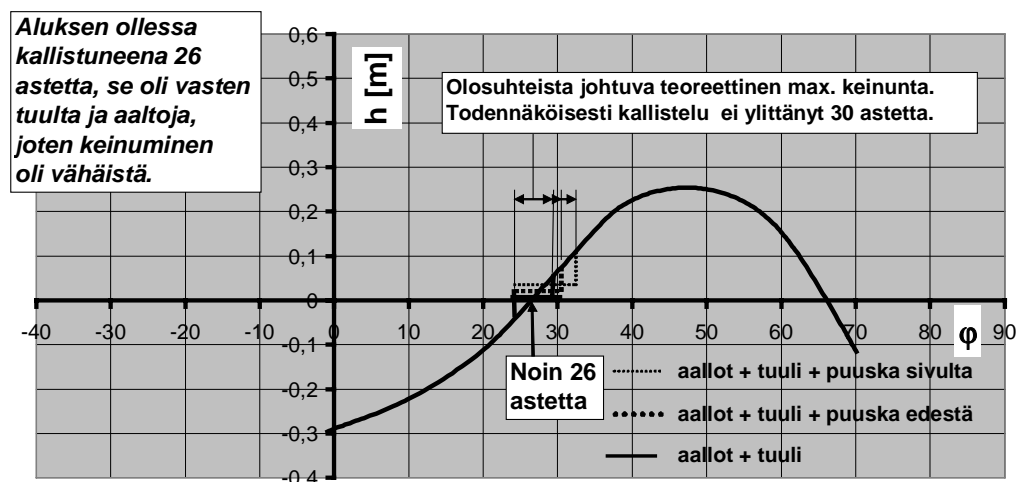
Muutaman tunnin kuluttua alus jäi uuteen tasapainoasentoon, jossa kallistuma oli $26-27^\circ$. Kallistuma oli kasvanut pääasiassa vuotojen johdosta ja se saatiin vakiinnutettua pumpuilla.

Kuvan 5 vakavuuskäyrän mukaan $26-27^\circ$ kallistuma vaatii noin 930 tm lisää kallistavaa momenttia. Lisätekiöitä verrattuna 22° kallistumaan ovat mm:

- Veden pääsy ruumiin 2, 3 ja 4, $6m \cdot 100t = 600 \text{ tm}$
- Veden pääsy SB laidalla olevaan kuivatankkiin, $8m \cdot 30t = 240 \text{ tm}$
- Veden pääsy polttoainetankkiin TT N 2, $6m \cdot 30t = 180 \text{ tm}$
- Veden pääsy dieselöljytankkiin N 2, $8m \cdot 25t = 200 \text{ tm}$
- Toisen laidan painolastitankkiin pumpattiin vettä, jolloin kompensoiva momentti -400 tm , painon lisäys noin 55 t
- Lasti tiivistyi hieman lisää, esim. kannella 10 cm ja ruumassa 5 cm , vaikutus noin $70 + 80 \text{ tm} = 150 \text{ tm}$
- Jäänmuodostus ei ollut voimakasta, mutta sitä muodostui hieman enemmän kallistuneelle puolelle, arvio 100 tm (painon lisäys noin 20 t)
- Kansilasti kastui ja jäättyi hieman lisää, arvio $7m \cdot 10t = 70 \text{ tm}$
- Kansilastin siirtyminen laidan ulkopuolelle synnytti lisää oikaisevaa tilavuutta, jonka vaikutukseksi on arvioitu 75 tm (lisäuppoumaa 10 t)
- Vakavuuskäyrän oikaiseva varsi heikkeni hieman
- Aluksen korkeussuuntainen painopiste nousi näissä muutoksissa $2\text{-}3 \text{ cm}$

Yhteensä kallistavien momenttien lisäys = $(600 + 240 - 400 + 180 + 200 + 150 + 100 + 70 - 75)\cos 26^\circ = 958 \text{ tm}$. Erotus, $958\text{-}930$ selittyyneen kuten edellä. Tätä tilannetta vastaava vakavuuskäyrä on kuvassa 6.

Staattinen vakavuuskäyrä, 26 asteen kallistuma



Kuva 6. Staattinen vakavuuskäyrä kallistuskulman ollessa 26°

Aluksen kallistuma on selitettävissä näillä likimääräistarkastelulla. Alus keinui tämän tapapainoaseman molemmille puolille, tosin vain muutaman asteen, koska keula oli käännetty vasten tuulta.

Aluksen uppouma kasvoi arviolta 50 t (ensi vaiheen jää + kastuminen) + 100 t (ruumat) + 30 t (kuivatankki) + 55 t (BB - laidan painolastitankki) + 25 t (dieselöljytankki) + 20 t (lisäjäätyminen) + 10 t (lastin lisäkastuminen ja -jäätyminen) + 10 t (kansilastista johtuva lisätilavuus) = 300 t , jolloin uppoumaksi saadaan 10660 tonnia. Se on lähellä aluksella suoritettujen laskelmien tulosta 10592 tonnia.

Aluksessa tehtyjen laskelmien mukaan syväys väheni ja vakavuuskäyrä hieman heikkeni. Alla on taulukko eräistä muuttujista ja jäljempänä vakavuuskäyrät.

Uppouma	Perä-syväys	Keskim. syväys	Keulasyväys	Kallistuma	Painopiste	
10360 t	7,52 m	7,29 m	7,04 m	0°	6,76 m	Lähtö
10592 t	7,50 m	7,21 m	6,91 m	25,7°	6,81 m	Haveri

4 Vaurioituneen aluksen vakavuuden arviointia

Arvioidaan aluksen vakavuutta, kun se on kallistuneena 26°. Analyysi perustuu kuvan 6 vakavuuskäyrään.

Keinunta ja puuskainen tuuli

Vallinneissa olosuhteissa, keula vasten tuulta ja aaltoja alus kallisteli ristiaallokossa muutaman asteen. Tuulen puhaltaessa keulan puolelta, tuulipinnan vastuskerroin on 0,2. Jos tuuli tulisi aivan keulasta, vastuskerroin olisi nolla, mutta puuska saattaa tulla hieman sivummalta. Jos puuska jostain syystä sattuisi puhaltamaan täysin sivulta, tuulipinnan vastuskerroin on 1,2, jolloin kallistavaksi momentiksi saadaan:

$$0,5 \cdot 1,225 \cdot 27^2 \cdot 1044 \cdot 1,2 \cdot 5,2 = 2909 \text{ kNm} = 297 \text{ tm}$$

Ilman tiheys = 1,225 kg/m³, tuulipinta-ala = 1044 m², vastuskerroin = 1,2 ja tuulipinnan momenttivarsi = 5,2 m. Tätä momenttia vastaava vakavuusvarsi on 297/10592 = noin 3 cm. Kuvasta 6 nähdään, että alus kallistuu noin 33°. Tämä kallistuma ei vielä ole vaarallinen. Näin ollen, jos alus pysyy vasten tuulta, puuskista ei ole sille vaaraa.

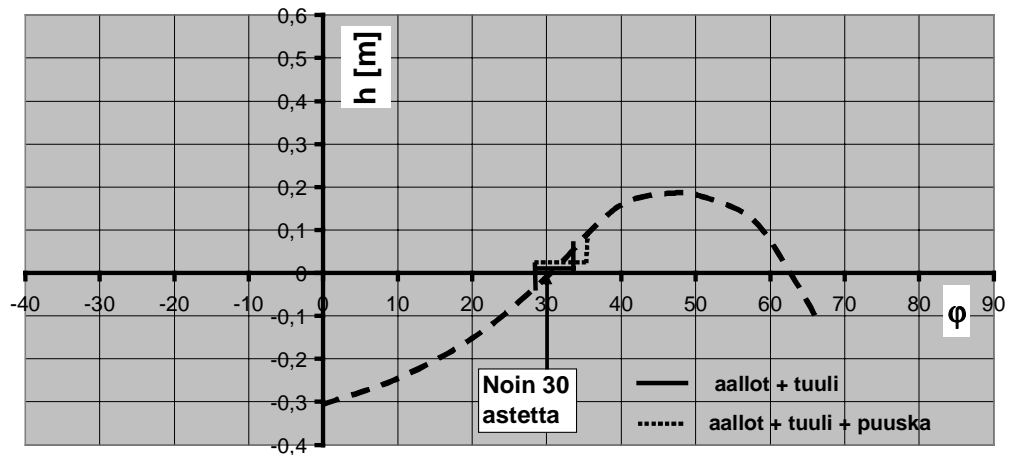
Jos alus joutuisi sivutuuleen, se saattaisi kallistua noin 40°. Tämä kallistuma saattaa irrottaa lastin kokonaan.

Mahdollinen jään kertyminen

Haverin jälkeen oli vielä voimassa jäätämismääräys, joten alukseen saattoi kertyä lisää jäätä. Jään kertyminen vaikuttaa kahdella tavalla. Ensinnäkin se nostaa painopistettä, jolloin vakavuus huononee. Toiseksi jäätä kertyy enemmän kallistuneelle laidalle, mikä kallistaa alusta. Tarkastellaan seuraavassa 200 tonnin jään lisäyksen vaikutusta. Jää sijoitetaan 12 m korkeudelle ja 3 m etäisyydelle keskiviivasta kallistuneelle puolelle. Saadaan kuvaan 7 katkoviivalla piirretty käyrä. Jään lisäyksen jälkeen aluksen uusi kallistuskulma olisi 30°, ja se kallistelisi 34-36° riippuen puuskan voimakkuudesta keulan ollessa tuulta vasten.

Aluksen reitti Utöhön oli vasten tuulta, joten keinunta oli muutaman asteen. Matka Utöstä Turkuun kulki sivutuulella, mutta tuuli tuli kallistuman puolelta. Tuulen vaikutus oli heikkenemässä tuulen nopeuden vähetessä ja aluksen lähestyessä rannikkoa. Näiden syiden vuoksi jään kertyminen ja keinunta vähenivät.

**Staattinen vakavuuskäyrä, 26 asteen kallistuma
+ 200 jäätä ==> kallistuma 30 astetta**



Kuva 7. Arvioitu tilanne, jos jäätä kertyy haverin jälkeen lisää 200 t

5 Yhteenveto

Yhteenvetona voidaan todeta, että alus oli saatettu Pietarsaaresta lähdeettäessä lastitilanteeseen, jossa oli riittävät vakavuusreservit tässä onnettomuustapauksessa.

Sahatavarakansilasti alkoi siirtyä aluksen kallistuman edettyä käännöksen aikana 16-25°. Liikkuva lasti keinautti aluksen 30°.

Liite 4. Kitkatarkastelu

M/S FJORD PEARL, Kitka ja kitkakertoimet

1 Kitkavoimat

Lastin ja alustan välinen kitkavoima R , joka vastustaa lastin liukumista, saadaan lasketua kaavasta $R = \mu \sum N_i$, jossa lasketaan yhteen kaikki liukumispintaa vasten kohdistuoraan vaikuttavat tukivoimat ja kerrotaan tulos kitkakertoimella. Liukumista estävän kokonaisvoimanvoiman määrittämiseksi on siis tunnettava nämä tukivoimat ja kitkakerroin sekä lisäksi muut mahdolliset liukumista vastustavat voimat.

Kitkaa käsittelevää kattavaa matemaattista teoriaa ei ole. Paljolti nojaututaan kokeellisesti saatuihin tuloksiin. Niiden pohjalta kitkakertoimen oletetaan noudattavan seuraavia "lakeja":

1. Kerroin ei riipu pinta-alasta, jollei ala ole niin pieni, että päällä oleva kappale tunkeutuu alempana olevaan, eli paine kasvaa liian suureksi.
2. Kerroin ei riipu melko suurella nopeusalueella liikenopeudesta.
3. Kerroin ei riipu puristavasta voimasta, vrt. "laki" 1.

Kerroin riippuu vastakkain olevien pintojen laadusta ja niiden välissä olevasta aineesta. Kun pinnat ovat kuivia tai lähes kuivia puhutaan kuivakitkasta. Kerroin pienenee tiettyyn rajaan asti kuivien pintojen tullessa sileämmiksi, mutta alkaa kasvaa kun pintoja tehdään yhä sileämmiksi, rajana kiinni "hitsautuminen" adheesion johdosta. Kun pintojen väliin kerääntyy nestemäistä ainetta, tilanne lähestyy voitelua, jolloin puhutaan viskoosista kitkasta. Välimuotona voidaan määrittää kitkakerroin esim. märille, likaisille tai rasvaisille pinnoille. Toisena ääritapauksena voidaan pitää liimaliitosta, jonka eräs esimerkki on toisiinsa kiinni jäätyneet kappaleet. FJORD PEARLin tapauksessa pinnat olivat paikoin kuivat, paikoin jäiset tai huurteiset, paikoin vetiset ja paikoin saattoi olla kyse toisiinsa kiinni jäätyneistä pinnoista.

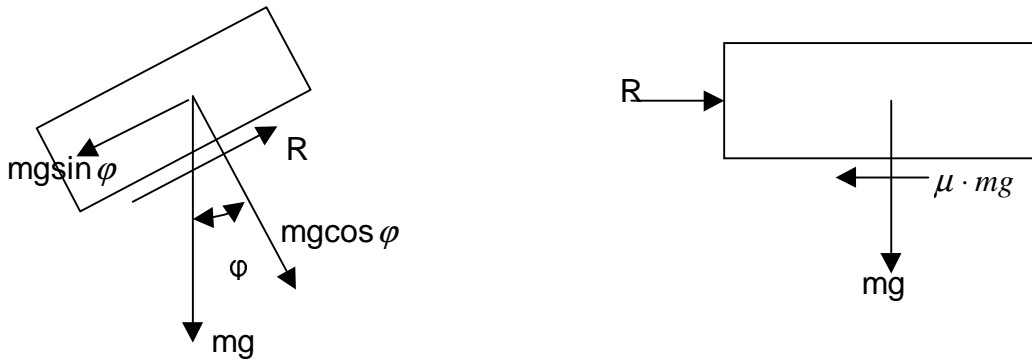
Kitkakerroinlajeja on käytössä yleensä kaksi. Lepokitkakertoimen μ_s määrittelee yhtälö $R \leq \mu_s \sum N_i$. Sen raja-arvo on liikkeellelähtökitkakerroin. Kun kappaleet liukuvat toisiinsa nähden, vaikuttaa liikekitkakerroin, jonka määrittelee yhtälö $R = \mu_k \sum N_i$.

Periaatteessa liikkeellelähtö- ja liukukitkakertoimet ovat samat, mutta käytännössä pinnat kuluvat jo liikahduksessa tasaisemmiksi, minkä johdosta kokeissa saadaan yleensä liikkeellelähtökitkakerroin suuremmaksi kuin liukukitkakerroin.

Kitkakerroin määritetään useimmiten seuraavilla tavoilla:

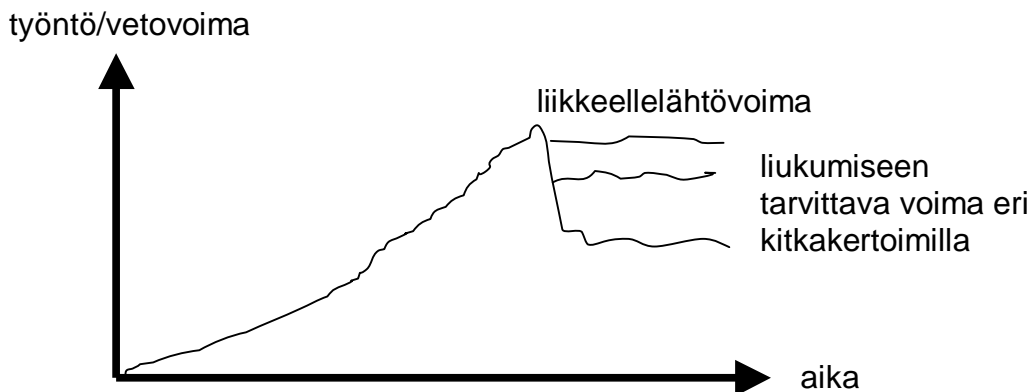
1. Alustaa, jolla kappale on, kallistetaan. Mitataan kallistuskulma, jolla kappale lähtee liikkeelle ja toinen kulma, jolla kappale liikkuu tasaisella nopeudella. Kallistuskulman tangentti = kitkakerroin.
2. Työnnetään tai vedetään kappaletta kasvavalla voimalla alustalla. Mitataan voima, kun kappale lähtee liikkeelle ja kun se on tasaisessa liikkeessä.

Näiden tapojen koejärjestelyjen periaatteet on esitetty kuvassa 1. Tavalla 2 saadaan tulokseksi tyypillisesti kuvan 2 mukainen käyrä. Liikkeellelähtökierroin on suhde liikkeellelähtövoima/puristava voima.



Kuva 1. Kitkakertoimen määrittäminen

1. Kallistaminen: tasapainotilanteessa $\mu = \tan \varphi$, jossa μ on kitkakerroin lastin ja alustan välillä ja φ on kallistuskulma. Tällä tavalla saadaan selville osista koostuvan kappaleen stabiiliisuuskulma eli sisäinen kitkakerroin.
2. Työntö tai veto vaakasuoralla alustalla: $R = \mu mg$, jossa R on voima, jolla massa m lähtee liikkeelle tai liikkuu tasaisella nopeudella.



Kuva 2. Tyypillinen kitkakokeen tulos

2 Kitkakertoimen suuruus

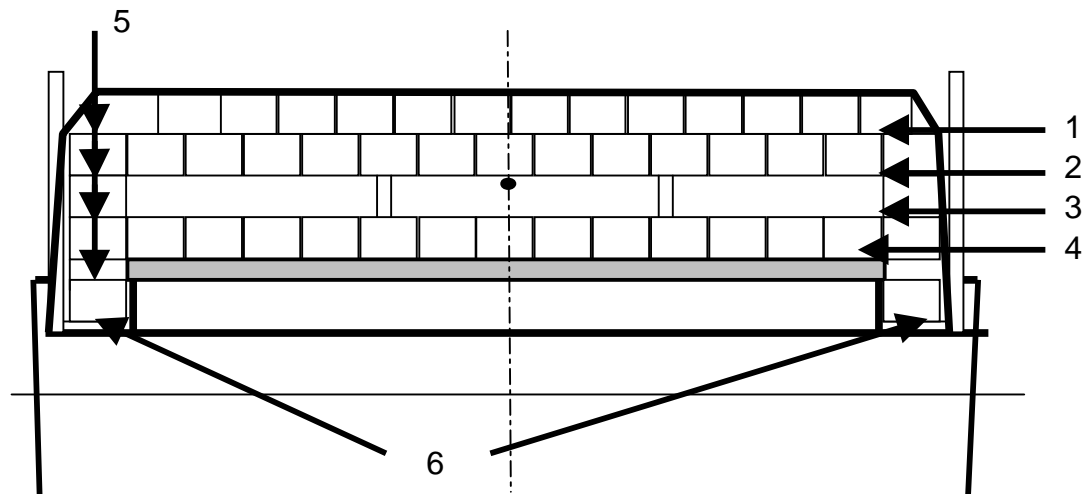
Lastin sijoittelusta johtuen syntyi useita erilaisia kitkapintatyyppejä. Puutavarapakettien keskinäisten ja pakettien ja alustan välisten vaakasuorien kitkapintojen lisäksi syntyi pystysuoria pakettien välisiä kitkapintoja. Näitä kutsutaan ulkoisiksi kitkapinnoiksi. Lisäksi pakettiin sisällä itse puutavarassa syntyi vaaka- ja pystysuoria sisäisiä kitkapintoja. Lastilla oli tasainen alusta vain lastiluukuilla ja kannella. Pakettien välisissä kerroksissa kitkatarkastelut tulevat monimutkaisiksi pakettien pienten mittaerojen ja eri asentojen johdosta. Tällöin kerrosten välistä liikettä ei vastusta pelkkä kitka, vaan erilaiset kulmaukset ja kohoumat. Ne voidaan likimääräisesti ottaa huomioon suurentamalla vastaavien tasaisten pintojen välistä kitkakerrointa. Seuraavassa tarkastellaan aluksi ulkoisia, tasaisia kitkapintoja.

Tilannetta mutkistivat edelleen paketteja ympäröivät lastausköydet ja pakettien suojahuput. Paikoin köydet menivät ristikkäin. Huppua oli useita erityyppisiä. Yleensä huppujen

ylä- ja alapinnat olivat erilaisia. Sen vuoksi hupun yläpinnan ja yläpuolella olevan sahatavaran välinen kitkakerroin erosi hupun alapinnan ja hupun suojaaman sahatavaran välisestä kitkakertoimesta.

Kuvassa 3 on näytetty kahden vaakasuoran pinnan kohtaamisten päätyypit.

1. kaksi pitkittäistä pakettia limittäin päällekkäin
2. pitkittaiset paketit poikittaisten pakettien päällä
3. poikittaiset paketit pitkittäisten pakettien päällä
4. pitkittaiset paketit lastiluukun päällä
5. reunoilla pitkittaiset paketit tasan toistensa päällä
6. reunoilla alimmat pitkittaiset paketit aluspuiden päällä



Kuva 3. FJORD PEARLin kansilastin erilaisia kitkapintoja

Sahatavarapakettipinon stabiilisuus

Aluksen lastinkiinnityskäsikirjassa tarvittava kiinnitysvoima määritetään sahatavarapakettipinon stabiilisuuskulman avulla. Kun pakettipinoa kallistetaan, se pysyy stabiilina staattiseen stabiilisuuskulmaan saakka. Kulma määritetään kokeellisesti, ilman kiinnitysvaijereita. Stabiilisuuskulma riippuu kerrosten lukumäärästä, pakettien välisestä kitkakertoimesta, pinoamistavasta (kaikki paketit pitkittäin tai joka toinen poikittain), sahatavaran mitoista ja kitkakertoimesta, pakettia puristavien teräsvanteiden kireydestä, jne. Lastinkiinnityskäsikirjassa on staattiseksi stabiilisuuskulmaksi χ annettu 17° . Tällöin ensimmäinen ja kolmas kerros ovat pitkittäin ja toinen kerros poikittain. Jos tämä kulma muunnetaan kitkakertoimeksi, saadaan 0,306. Tutkinnassa ei ole selvinnyt, mitä stabiilisuuskulmaa tai kitkakerrointa aluksen lastinkiinnityslaskelmissa käytettiin. Lastin tiedot eivät sisältäneet kitkakertoimia.

Kitkakertoimet

Tutkintaryhmän tekemät laskelmat perustuvat kitkakertoimiin. Niiden arvioimiseksi kerättiin eri lähteistä tietoja. Tapauksia, joissa köydet ovat pintojen välissä, ei tullut esille. Tietojen täydentämiseksi tutkintaryhmä teetti koesarjan Valtion teknisellä tutkimuskeskuksella (VTT).

ICHCA:n (International Cargo Handling CO-Ordination Association) ohjeissa on annettu kitkakertoimille taulukossa 1 esitetyt arvot: Taulukosta ei käy selville, ovatko kertoimet liikkeellelähtö- vai liukukitkatilanteessa. Suluissa on kuorma-autoille käytettyjä kertoimia. Pintaparit ovat ilman köysiä.

Taulukko 1. ICHCA:n ohjeiden kitkakertoimia

Materiaalipari	Kuiva, puhdas	Kostea, epäpuhdas	Luminen, jäinen
Puu-Puu	0,30 (0,3-0,5)	0,30 (0,3-0,4)	0,20 (0,2-0,3)
Puu-Metalli	0,30 (0,3-0,5)	0,30 (0,3-0,4)	0,10 (0,1-0,2)
Puu-Kitkavaneri	0,40	0,40	0,30

Viitteessä 12, RINA 95 (Royal Institution of Naval Architects) on annettu seuraavat kitkakertoimet, köysiä ei mukana (dyn. on liukukitkakerroin ja staatt. on liikkeellelähtökitekerroin).

Taulukko 2. Viitteen 12 kitkakertoimia

Materiaalipari	Kuiva (dyn./staatt.)	Kostea (dyn./staatt.)
Kumi-teräs	0,5/0,7	0,3/0,6
Puu-teräs	0,4/0,6	0,25/0,4

Sahatavarapakettien huppujen liukkautta on tutkittu työturvallisuuden liittyen Sosiaali- ja terveysministeriön toimeksiannosta Työterveyslaitoksella askelsimulaattorilla, viite 11. Mittaukset tehtiin huurteen peittämällä suojahupulla. Hupun pintalämpötila oli $-8 \pm 2^\circ\text{C}$. Tulosten yhteenveto on alla olevassa taulukossa 3. Kitkakertoimet vaihtelevat huomattavasti eri hupputyypeillä. Kertoimet ovat liikekitkakertoimia.

Taulukko 3. Työterveyslaitoksen tuloksia huurteisilla hupuilla

Happu	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
μ	0,45	0,18	0,24	0,38	0,27	0,47	0,31	0,24	0,19	0,43	0,74	0,48	0,18

Lisäksi Työterveyslaitos teki mittauksia sijoittamalla askelsimulaattoriin kengän paikalle 2" x 4" lankunpätkä. Tällöin kitkakertoimet vaihtelivat välillä 0,17-0,36, järjestyksen ollessa suunnilleen sama. Koetilanne vastasi 2500 kg paketin aiheuttamaa pintapainetta hupun päällä.

Näistä hupputyypeistä aluksella yleisimmät olivat todennäköisesti C, A and B.

Työterveyslaitoksen mittausten lopputuloksena kitkakerroinvaatimukset hupuille ryhmiteltiin seuraavasti:

- Luokka 1, erittäin pitävä, vähintään 0,3
- Luokka 2, pitävä, 0,20-0,29
- Luokka 3, epävarma, 0,15-0,19
- Luokka 4, liukas, 0,05-0,14
- Luokka 5, erittäin liukas, alle 0,05

Viitteessä /Knott/ on kerrottu lastiluukkujen päällä luukkuja avattaessa kallistamalla tehdyistä kitkamittauksista. Tulokset olivat:

- Märkä puu märällä luukulla, $\mu = 0,51$
- Märkä puu kuivalla luukulla, $\mu = 0,645$
- Keskiarvo, jossa mukana myös kuiva puu märällä luukulla, $\mu = 0,584$

Euroopan standardisoimiskomitea on laatimassa lastinkiinnitysstandardia, jonka luonnos on viitteenä /Draft prEN 12195-1/. Siellä on esitetty seuraavat staattiset kitkakertoimet sahatavaralle:

- Karhennettu laminaatti tai vaneri, $\mu = 0,5$
- Uurrettu alumiini, $\mu = 0,4$
- Maalattu karhea teräs, $\mu = 0,5$

Luvut pätevät puhtaille ja kuiville pinnoille, joilla ei ole huurretta, lunta eikä jäätä. Ne perustuvat useiden mittausten minimiarvoihin. Märissä olosuhteissa on kiinnitysten määrä kaksinkertaistettava. Dynaaminen kitkakerroin on 0,7 x staattinen, jos muuta tietoa ei ole.

Venäläisissä lastinkiinnityssäännöissä /18/ ovat mm. seuraavat kitkakertoimet:

- Puu-teräs, $\mu = 0,3-0,6$
- Puu-puu, $\mu = 0,45-0,65$

VTT:n koesarjassa saatiin taulukossa 4 esitetyt keskiarvotulokset, viite 7.

Taulukko 4. VTT:n koesarjan tulokset

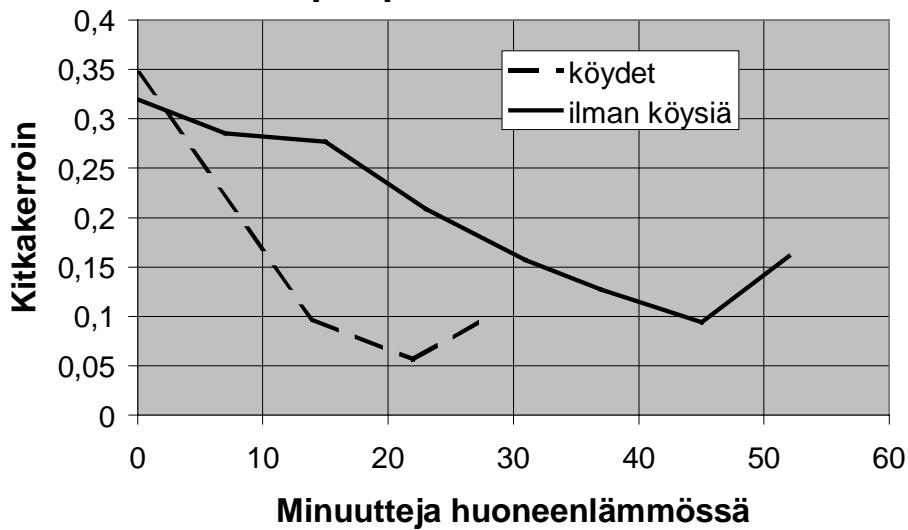
Materiaalipari	Kuiva	Kostea	Sulava
Puu-metalli	0,53		
Puu-metalli, jäiset	0,32	0,15	0,10
Puu-köysi-metalli	0,35		
Puu-aluspuut-metalli	0,48		
Puu-köysi-metalli, jäiset	0,35	0,10	0,06
Puu-köysi-valkea huppu, jäiset	0,40		
Puu-köysi-kirkas huppu, jäiset	0,21		
Puu-köysi-ruskea huppu, jäiset	0,44		

Aluksella materiaalipari puu-köysi-metalli ja puu-metalli ovat tärkeimmät ja ne vastasivat tilannetta lastiluukuilla. Muissa kerrosväleissä oli puu-köysi-huppu.

Osa kokeista tehtiin jääpintaisella, -22° jäädytetyllä teräslevyllä. Mittauksia toistettiin jään vähitellen sulaessa huoneenlämpötilassa. Kuvassa 4 on esitetty sulamisen vaikutus. Aluksi pinnat olivat jäiset, pintalämpötila 2-4°C pakkasta. Lopuksi pinnat olivat täysin sulaneet. Kitkakerroin pienenee voimakkaasti sulamisen edetessä. Ne alkavat kasvaa, kun jää on kokonaan sulanut.

Pakkaslämpöisen sahatavaralastin kitkakerroin voi siis pienetä huomattavasti aluksen matkatessa pakkasalueelta plus-asteiselle alueelle.

Sulamisen vaikutus kitkakertoimeen puupaketti lastiluukulla



Kuva 4. Sulamisen vaikutus kitkakertoimeen

3 Vallinneet sääolosuhteet ja kitkakerroin

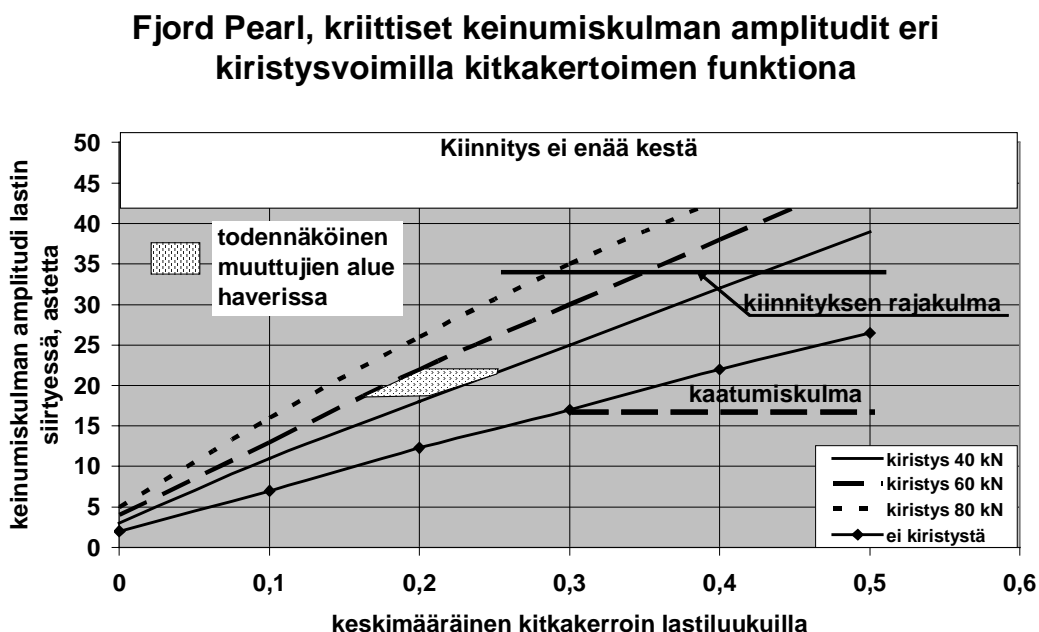
Vallinneessa tuulessa ja aallokossa aluksen kansilasti kastui osittain, vaikka se oli peitetty pressuilla. Lasti itsessään oli kylmä, lastaustilanteessa jopa -20°C . Matkan aikana sen ulommaiset osat lämpenivät ulkoilman lämpötilaan, joka oli noin -4°C . Lastiruumissa lasti oli kylmintä. Lämpötilan tasaantumisen vaikutusta luukkujen yläpintaan ja kitkakertoimeen on vaikea arvioida. Oletettavasti syntyi huurretta, joka pienensi kitkaa. Veden lämpötila oli noin $+1^{\circ}\text{C}$. Ilman kosteudesta ei ole tietoa. Todennäköisesti lastin kanssa kosketuksiin päässyt vesi jäätty paikka paikoin. Pakettien välissä saattoi siten olla yhtä aikaa vettä ja jäätä. Köysien vaikutuksesta lastikerrokset eivät kaikkialla koskettaneet tiiviisti toisiaan, vaan jäi välejä, joihin saattoi päästä vettä, joka jäätty. Syntyi yhdistelmä kitkasta, voitelusta ja liimauksesta, jota voidaan tarkastella keskimääräisen kitkakertoimen avulla.

Kitkapinnat koostuivat siten monenlaisista alueista:

1. Köysien kohdalla ylöspäin oli materiaalipari köysi/puu ja alaspäin köysi/huppu tai köysi/teräs.
2. Köysien vieressä ei ollut lainkaan kosketusta tai syntynyt jää oli pintojen välissä.
3. Suurehkoilla alueilla paketin taipumasta johtuen syntyi materiaalipareja puu/huppu tai puu/teräs, kosketuspaineen vaihdellessa.
4. Puutavarapakettien mitoista johtuen saattoi pakettien välisissä kosketuspinnoina olla kohoumia, kulmia, uria ja kuoppia.
5. Lisäksi syntyivät materiaaliparit köysi/köysi ja hupun alapuoli/puu ja hupun yläpuoli/puu. Hupun rakenteen ollessa kerrosmainen syntyi sen sisäisiä kitkapintoja.
6. Jo lastauksessa oli syntynyt lumisia, jäisiä ja huurteisia alueita. Lisäksi jääpalasten murskaantuessa matkalla kertyi jäämursketta. Matkan aikana vesi ja kosteus lisäsivät jään muodostusta.
7. Lämpötilan nousun johdosta (-20°C ja $-14^{\circ}\text{C} \Rightarrow -4^{\circ}\text{C}$) syntyi pintoihin huurretta.

4 Kriittiset kitkakerroin/kallistuskulmayhdistelmät

Seuraavassa kuvassa 5 on esitetty lasketut kriittiset kitkakerroin/kallistuskulmayhdistelmät. Ne perustuvat liitteen 2 puutavarakansilastin kiinnitystä kuvaaviin yhtälöihin, joihin on lisätty liitteessä 5 määritetyt dynaamiset tekijät: Kuvassa on näytetty myös pinon kaatumiskulma, joka voidaan esittää tilanteessa, jossa ei ole kiristystä.



Kuva 5. Kriittiset kitkakerroin/keinumiskulmayhdistelmät

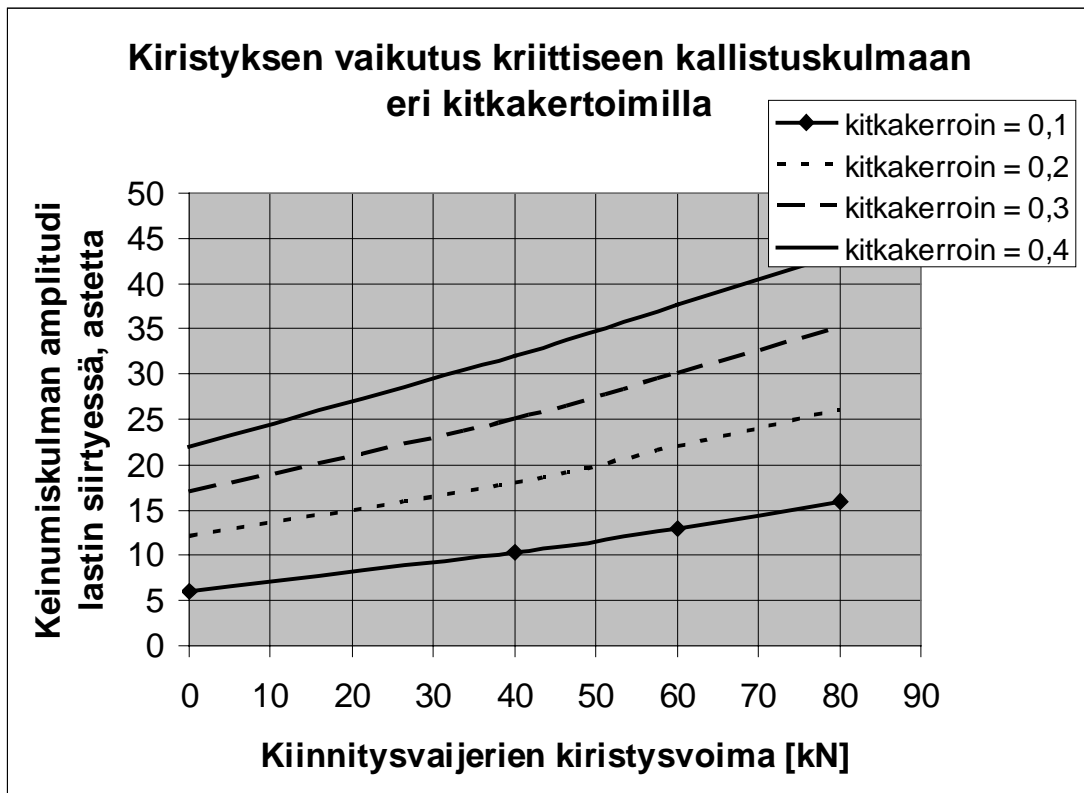
Käyrien alapuolella kansilasti pysyy paikoillaan. Kiinnitysvaijereita oli 52 kpl mukaan lukien 2/3-osaa diagonaalisista vaijereista. Kiristysvoima on vaijeriin syntynyt voima kiristyskohdassa kiristettäessä lastin päältä. Pystysuora voima lastin sivuilla on pienempi johtuen vaijerikitkasta lastin kulmia vasten. Voimat tasaantuvat kansilastin tiivistyessä. Laskelmissa on oletettu, että laitimaisten pakettien kohdalla kitkakerroin on luukuilla oleva kitkakerroin +0,15. Sen vuoksi saadaan lastiluukkujen kitkakertoimen arvolla = 0 pieni sallittu keinumiskulma. Vaikka vaijerissa ei ole kiristystä, se alkaa vastustaa lastin siirtymistä, jos kallistuskulma ylittää stabiilisuuskulman.

Aluksessa tehdyissä lastinkiinnityslaskelmissa alus on ilman pallekölöjä. Tällöin alus voi keinahtaa 34° kulmaan saakka. Todellisuudessa aluksessa oli palleköliä, jotka pienensivät äärikulmaa noin 32°.

Vakavuuslaskelmien pohjalta kuvaan 5 on merkitty kallistuskulma - kitkakerroin - kireys - yhdistelmä, jolla kansilastin siirtymisen oletetaan tapahtuneen. Kuvaan on myös merkitty alue, jolla vaijeriin tulee liian suuri jännitys ja se katkeaa. Raja on likimääräinen ja se riippuu myös vaijerien ja muiden kiinnitysosien kunnosta. On todennäköistä, että kansilastikerrosten eri kohdissa sulamistilanne on vaihdellut, minkä johdosta keskimääräinen kitkakerroin on ollut yli 0,15. Voidaan myös olettaa, että se on ollut enintään 0,25.

Nähdään, että kiinnitysvaijerien kireydellä on huomattava vaikutus sallittuun keinumisamplitudiin. Kuvassa 6 on kiristyksen vaikutus esitetty tarkemmin. Esimerkiksi kitka-

kertoimen arvolla 0,2 lasti liikahtaa 12° kulmalla, kun kiristystä ei ole ja 26° kulmalla, kun kiinnitysvaijeri on hyvin kireä.



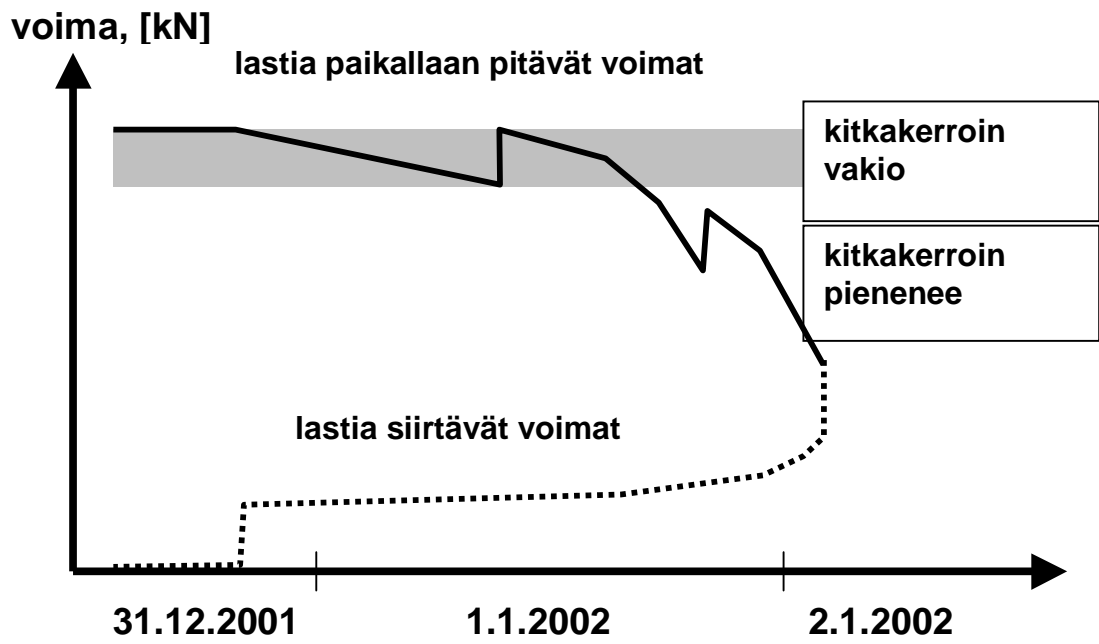
Kuva 6. Kiristuksen vaikutus kriittiseen kallistuskulmaan eri kitkakertoimilla lastiluu-kuilla

Kiinnitysvaijereita kiristettiin noin 12 tunnin välein. Voidaan olettaa, että tällöin päästiin lähelle kuvan 5 ylintä rajakäyrää. Ennen seuraavaa kiristystä lähestyttiin 40 kN:n rajakäyrää. Mitä voimakkaampi merenkäynti, sitä nopeammin kiinnitysvaijerit löystyvät.

Kiinnitysvaijerien kireys tulisi siis tietää ainakin kiristettäessä. Aluksessa tulisi olla vaijerien kireyden mittausrakenteet.

Kuvassa 7 on näytetty eräs mahdollinen eri voimien kehittyminen FJORD PEARLin matkan aikana. Todellisuudessa käyrissä olisi piikkejä. Hyppäykset paikallaan pitävissä voimissa näyttävät kiristystapahtuman.

Saadut tulokset eivät ole mitoitusarvoja, koska niissä ei ole pyritty ottamaan huomioon turvallisuusreserviä.



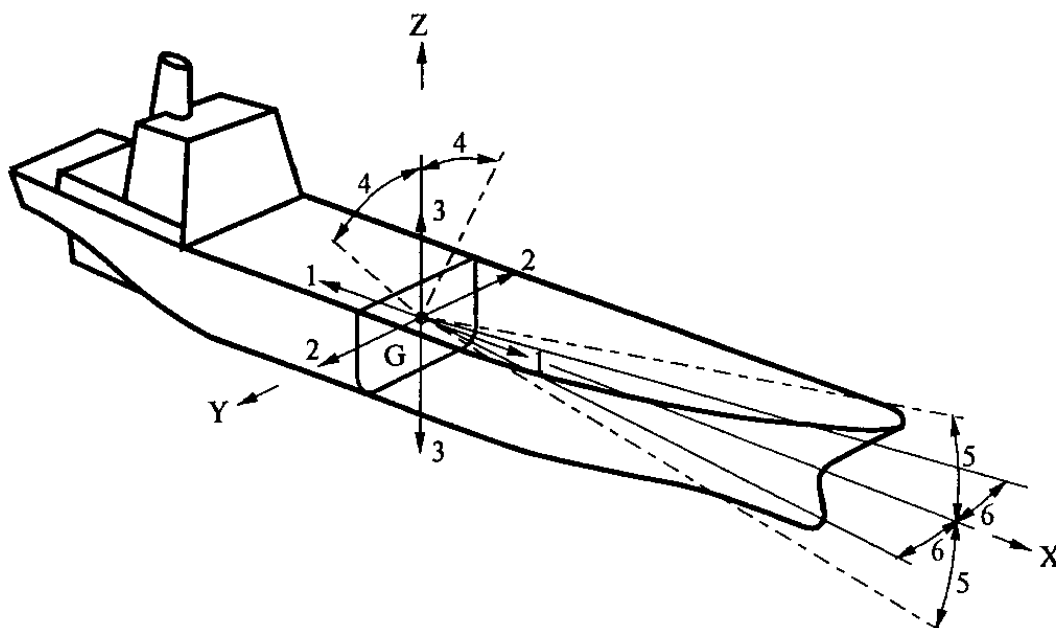
Kuva 7. Eräs mahdollinen voimien kehittyminen FJORD PEARLin matkalla

LIITE 5. KANSILASTIIN VAIKUTTAVAT VOIMAT

M/S FJORD PEARL, Kansilastiin vaikuttavat voimat

Vakiokallistuman aiheuttamien staattisten voimien lisäksi aluksen lastiin kohdistuu merenkäynnissä voimia, jotka johtuvat aluksen asennon muutoksista.

Aallokko aiheuttaa alukselle kuusi liikekomponenttia. Translaatiokomponentit ovat: pituussuuntainen työntyily eli surge, 1, sivusuuntainen huojunta eli sway, 2 ja pystysuora kohoilu eli heave, 3. Kiertymisliikekomponentit ovat: keinunta eli roll pituusakselin ympäri, 4, jyskiminen eli pitch poikittaisakselin ympäri, 5 ja mutkailu eli yaw pystyakselin ympäri, 6.



Kuva 1. Aluksen liikkeet merenkäynnissä

Seuraavassa liikkeistä otetaan merkittävimpinä huomioon laskennallisesti keinunta ja kohoilu sekä kuvailevasti jyskinnän, huojunnan ja mutkailun yhteisvaikutus keinunnan kanssa. Näiden liikkeiden seurauksena syntyy kaltevuuden muutoksia ja kiihtyvyyksiä, ja näistä edelleen lastiin vaikuttavia voimia. Translaatioliikkeiden vaikutus on sama koko aluksessa, sen sijaan kulmamutosten vaikutus kasvaa, kun siirrytään kauemmas kiertymisakselistä. Lasti lähtee liikkeelle, kun nämä voimat ylittävät lastia paikallaan pitävät kitka- ja kiinnitysvoimat. Pituussuuntaiset voimien komponentit ovat selvästi pienemmät kuin poikittaissuuntaiset, joten edellisiä ei jatkossa tarkastella.

Voimia on tarkasteltu yksinkertaisesti, ilman laajojen laivan liikeohjelmistojen käyttöä, mikä on tässä tapauksessa arvioitu riittäväksi, sillä tiedossa on aluksen liikkeet haverin aikana riittävällä tarkkuudella.

Lastinkiinnityskäsikirja suosittelee, että kansilastin tulee irrota, kun alus kallistuu yli 40°. Kansilastin tulee olla riittävästi, mutta ei liian lujasti kiinnitetty.

Kansilastiin vaikuttavat voimat

Seuraavat voimat (kiihtyvyydet) vaikuttavat kansilastiin aluksen liikkeessä merenkäynnissä:

- painovoiman kiihtyvyys ja sen komponentit keinunnan aikana kannen suunnassa ja kantta vastaan kohtisuorassa suunnassa
- aallokon aiheuttamat merkittävimmät ovat
 - keinumisesta johtuva tangentiaalinen ja radiaalinen kiihtyvyys ja niiden kannen suuntainen ja kantta vastaan kohtisuora komponentti. Aluksen vakavuusominaisuuksilla on suuri vaikutus keinumtaan
 - pystysuora kiihtyvyys jyskintä ja kohoilu liikkeistä
 - sivusuuntainen kiihtyvyys mutkailu ja huojunta liikkeistä
- kitkavoimat
- kiinnitysvälineiden voimat
- tuulivoimat
- aaltovoimat
- veden alla olevaan kansilastiin vaikuttava noste
- ohjailusta johtuvat kiihtyvyydet
- lisäksi siirtymään lähteneen kansilastin pysähtymisestä johtuva hitausvoima

Nämä voimat voidaan jakaa lastin siirtymisen suhteen seuraavasti:

1. Lastia paikallaan pitävät staattiset voimat

- $\mu mg \cos \varphi$, lastin massasta johtuva alustan suuntainen kitkavoima, jossa
 - μ = kitkakerroin lastin ja luukun tai lastikerrosten välissä
 - m = tarkasteltavan lastinosan massa
 - g = maan vetovoiman kiihtyvyys, painovoiman kiihtyvyys
 - φ = kallistuskulma
- kiinnitysvaijerissa vaikuttava voima F_k ja siitä johtuva kiinnipitovoima μF_k
 - tässä tapauksessa F_k on lähes kohtisuoraan kantta vasten, joten ei ole otettu huomioon kosinikorjausta. Lisäksi on otettava huomioon vaijerin taipumisesta johtuva hihnavaikeus lastin kulmissa, koska vaijeri on vedetty lastin yli
- mahdollisten tukien tukivoimat

2. Lastia siirtämään pyrkivät voimat

- $m g \sin \varphi$, on staattinen kallistumasta johtuva alustan suuntainen voima
- dynaaminen, keinunnasta johtuva sivusuuntainen tangentiaalivoima
- dynaaminen, kääntymisestä johtuva keskipakoisvoima*
- tuulesta johtuva lastin sivupintaan kohdistuva voima
- aaltojen paine lastin sivua vasten

3. Kallistavat voimat ja momentit

- liikkeelle lähteneen lastin pysähtymisestä johtuva hitausvoima ja sen momentti
- lastin siirtyneen painopisteen aiheuttama momentti
- tuulen paineesta johtuva momentti*
- aaltojen paineesta johtuva momentti*

- tankkeihin valuneen veden momentti ja pumpatun veden synnyttämät momentit

4. Lisäksi tilanteeseen vaikuttavat

- kansilastin eri pintojen sekä vaijerin ja lastin väliset kitkakertoimet, joissa otetaan huomioon lumen, jään, pakkasen ja pintojen välissä olevien muiden materiaalien vaikutus
- pystysuorat kiihtyvyydet lähinnä keinunnan ja kohoilun johdosta (lisäävät tai vähentävät painovoiman vaikutusta)
- veden alle joutuvaan lastin osaan vaikuttava nostevoima aluksen pohjauskut
- (slamming)*
- laivan rungon muoto, ulokkeet kuten pallekölit*

Merkittävimmät voimat on käsitelty tarkemmin jäljempänä. Voimista, jotka ovat merkityt tähdellä, voidaan todeta:

- a) Kääntymisestä johtuva kesipakoisvoima $F = mv^2/r$, jossa v on nopeus ja r on kääntymissäde. Aluksen nopeus oli noin 4 m/s. Vallitsevissa olosuhteissa kääntymissäde oletetaan tiukkaa käännöstä selvästi suuremmaksi, arviolta 10 kertaa laivan pituus eli noin 1200 m. Saadaan kallistavaksi voimaksi noin 140 kN. Aluksen painopisteen korkeus on 6,76 m. Arvioidaan vastustavan vedenalaisen voiman vaikuttavan 4 m korkeudella. Tällöin saadaan kallistavaksi momentiksi $2,76 \cdot 140 = 386$ kNm, mikä vastaa aluksen vakavuuskäyrien mukaan tyynessä vedessä alle yhden asteen kallistumaa. Kallistuma on vasemmalle.

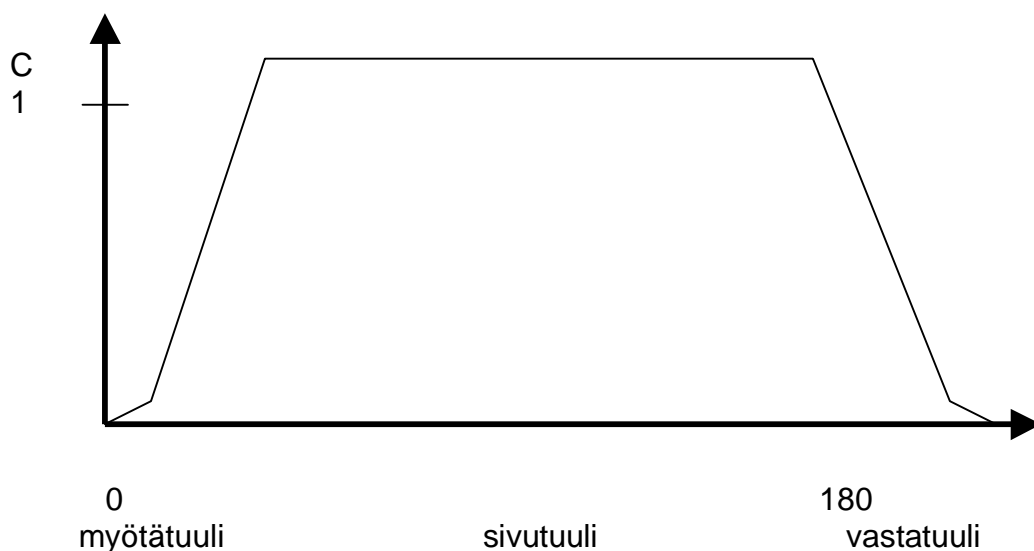
Vastaava voima lastiin on noin 17 kN, joka vaikutti siirtymistä vastustavasti. Tämä voima on pieni merkittäviin voimiin verrattuna.

Nämä voimat voidaan jättää huomioonottamatta pienuutensa lisäksi myös siksi, että aluksen kääntyminen aallokossa ei seurannut ympyrän kaarta. Lisäksi on epävarmaa, että nämä voimat olivat vaikuttamassa lastin siirtyessä.

- b) Aluksen tuulipinta-ala on vakavuuslaskuissa 1044 m^2 ja sen painopiste on 5,2 m vedenpinnan yläpuolella. Tuulen nopeus puuskissa oli 27 m/s. Tuulen kallistava voima lasketaan kaavasta $\frac{1}{2}C_p \rho v^2$. C on vastuskerroin, joka riippuu aluksen asennosta tuuleen nähden ja on sivulta puhaltavalle tuulelle kuvan 2 mukaan 1,2, A = on pinta-ala, ρ = ilman tiheys. Saadaan $0,5 \cdot 1,2 \cdot 1044 \cdot 1,225 \cdot 27^2 = 559$ kN ja kallistavaksi momentiksi 2908 kNm. Vastaava kallistuma on noin 5° . Tasaisella tuulen nopeudella 18 m/s saadaan kallistavaksi momentiksi 1292 kNm ja kallistumaksi noin 2° . Tuulen kallistava momentti vaikuttaa haveriolosuhteissa vastakkaiseen suuntaan kuin ohjailun aiheuttama. Haverin sattuessa alus oli kääntymässä sivutuulesta myötäiseen.
- c) Käännöksen aikana aallokon pääsuunta oli tuulen puolelta. Aallot ylettyivät kansilastiin vaihtelevalle korkeudelle keinunnan johdosta. Alus kallistui päällystön raporttien mukaan käännöksen aikana ensin 15° vasemmalle, jolloin kansilastin parrasalue joutui veteen. Tämän vaikutusta on vaikea arvioida, mutta saattaa olla, että vettä pääsi laidalla olevien laitimmaisten pakettikerrosten väliin. Tällöin kitkakerroin saattoi paikoin pienentyä.

Mitoitusolosuhteissa aluksen keinumiskulmaksi saadaan lastinkiinnityskäsikirjan mukaan 24° . Tällöin pallekölejä ei ole otettu huomioon. Todellisuudessa pallekölit vä-

hensivät keinuntaa noin 4° , joten laskennallinen keinumiskulma on 20° . Raportoitu 15° keinahdus oli tuulen puolelle. Tuuli aiheutti $2-5^\circ$ kallistuman. Näin ollen alus itse asiassa kallistui aaltojen vaikutuksesta $17-20^\circ$.



Kuva 2. Tuulen vastuskertoimen C riippuvuus aluksen asennosta tuuleen nähden

Lastin tuulipinta-ala oli noin 200 m^2 , ja siihen vaikuttava tuulesta johtuva siirtävä voima $0,5 \cdot 200 \cdot 1,225 \cdot 1,2(18 - 27)^2 \cos \varphi = (48-107) \cos \varphi \text{ kN}$.

Haveriolosuhteet olivat mitoitusolosuhteita lievemmiä. Tuulen nopeus oli $18-27 \text{ m/s}$, kun mitoitusolosuhde vastaa tuulen nopeutta noin 43 m/s . Merkittävä aallonkorkeus oli noin 4 m . Mitoitusta varten laskennallinen aallon korkeus oli 11 m . Tämä ylittyi 3% todennäköisyydellä. Vastaava merkittävä aallonkorkeus on $7-7,5 \text{ m}$. On ilmeistä, että aluksen keinahduksen 15° aiheutti epäedullinen asento aaltoihin nähden käännyksen aikana.

Vallitsevan aallon kulmataajuus ω on neliöjuuri ($2\pi g / \text{aallon pituus}$) = $0,72 \text{ 1/s}$ ja periodi siis $8,7 \text{ s}$. Lastinkiinnityskäsikirjan mukaan keinumisperiodi oli noin 23 s . Vastaava kulmataajuus on $0,27 \text{ 1/s}$. Näin ollen aaltojen kulmataajuus oli selvästi suurempi kuin aluksen keinunna kulmataajuus. Aluksen ominaiskulmataajuudella aallokolla ei enää ollut energiaa. Kääntymisen aikana ei tämän vuoksi syntynyt resonanssia.

Toisaalta aluksen kohtaamat aallot vaihtelivat tilastollisesti. Aluksen kääntyminen kesti muutamia minutteja ja alus kohtasi minuutissa $7-8$ aaltoa, joten joukkoon kuului todennäköisesti keskimääräistä epäedullisempia aaltoja.

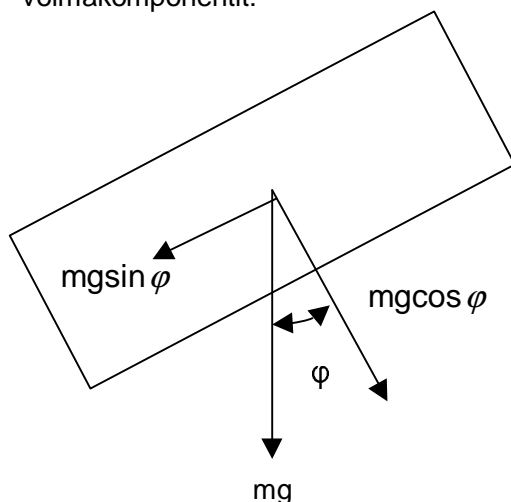
- d) Pohjaiskuja ei ole raportoitu, mutta sen sijaan voimakkaasta jyskinnästä. Jyskintä aiheutui siitä, että aallokon merkittävä aallonpituus oli lähellä aluksen pituutta. Alueella oli tuolloin ristiaallokkoa niin, että ennen kääntymistä oli myös vasta-aallokkoa. Nämä seikat saattoivat nopeuttaa kiristyksen löystymistä.
- e) Rungon muoto on normaali. Aluksen jääluokka on УЛ, jolloin mitoituslaskelmissa ei saa palleköliä ottaa huomioon. Todellisuudessa palleköli oli haveritilanteessa keinu-

mista pienentämässä. Sen vaikutus voidaan arvioida lastausohjeen menettelyllä. Niiden vaikutuksesta keinumiskulma 24° pienenee $4\text{-}5^\circ$. Vastaavasti, dynaaminen kallistuskulma pienee 34 asteesta 32 asteeseen.

Merkittävät voimat

Painovoima, staattinen

Kansilastin osaan, jonka massa on m vaikuttaa kallistuneessa tilanteessa seuraavat voimakomponentit:



Kuva 3. Staattinen kallistumatilanne

Kallistuskulma = φ . Alla olevassa taulukossa on kerroin, jolla massa (kg) on kerrottava, jotta saadaan voima (N). Sinikomponentti pyrkii siirtämään lastia ja kosinikomponentti kerrottuna kitkakertoimella pyrkii pitämään lastia paikallaan.

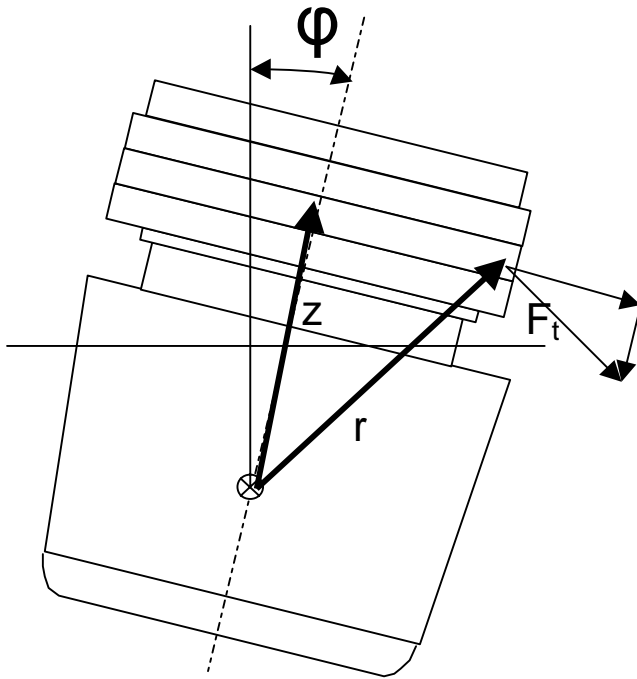
Taulukko 1. Staattisten voimien komponentit kertoimien muodossa

kulma	$g \sin \varphi$	$g \cos \varphi$
5	0,85	9,77
10	1,70	9,66
15	2,54	9,48
20	3,36	9,22
25	4,15	8,89
30	4,91	8,50
35	5,63	8,04
40	6,31	7,51

Aallokosta johtuvat dynaamiset voimat

Keinumisesta johtuvat

Keinuminen tapahtuu ns. keinuntakeskiön ympäri. Sen likimääräinen paikka on aluksen korkeussuuntaisen painopisteen ja uppouman painopisteen puolivälissä. Usein keinuntakeskiö sijoitetaan aluksen painopisteeseen tai myös vesiviivalle aluksen keskelle. Aluksen painopisteen paikka on tiedossa vakavuuslaskelmien pohjalta, mutta uppouman painopisteestä ei ole vastaavaa tietoa; arvioidaan korkeudeksi puutavarasyväyksellä $7,3$ m $4,4$ m. Tällöin keinumiskeskiö on kohdassa $(4,4 + 6,8)/2 = 5,6$ m perusviivasta.



Kuva 4. Keinuva alus, jolla on kansilastia

Keinumista voidaan kuvata yhtälöllä $\varphi = \phi_A \sin \omega t$, jossa

φ = kallistuskulma

ϕ_A = maksimi keinumiskulma, keinumita-amplitudi

ω = kulmataajuus = $2\pi/T$

T = keinumisperiodi

Keinumisesta syntyy lastin liikeradan tangentin suuntainen tangentiaalivoima sekä kei-
nuntasäteen suuntainen keskipakoisvoima eli radiaalivoima.

Tangentiaalivoima:

$$F_t = \frac{mr4\pi^2\phi_A}{T^2}$$

jossa

m = tarkasteltavan kappaleen massa

r = tarkasteltavan kappaleen painopisteen etäisyys keinumiskeskiöstä

Tangentiaalivoima on maksimissaan, kun alus on ääriasennossaan eli kun $\varphi = \phi_A$ ja
kun lastinosa on kauimpana keinumiskeskiöstä. Tangentiaalivoimalla on kaksi kompo-
nenttia: kannen suuntainen ja kohtisuoraan kantta vastaan vaikuttava komponentti, ks.
kuva 4.

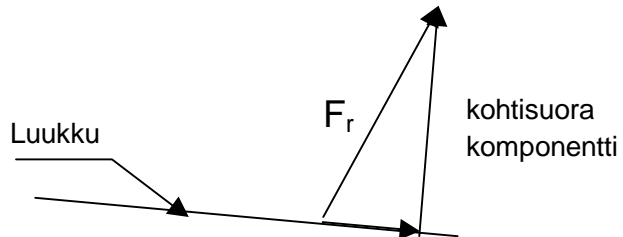
Kannen suuntainen komponentti saadaan, kun yo. kaavassa r korvataan sen pys-
tysuoralla projektiolla z, joka tässä tapauksessa on kussakin pakettikerroksessa vakio.
Tämä komponentti pyrkii siirtämään lastia.

Kantta vastaan kohtisuora komponentti riippuu tarkasteltavan lastin osan vaakasuorasta etäisyydestä aluksen keskilinjalta ja on suurin lastin reunalla, keskilaivalla se on nolla. Se ei siis riipu pystysuorasta etäisyydestä aluksen painopisteestä. Tämä komponentti lisää lastin painoa kantta vastaan.

Radiaali- eli keskipakovoima:

$$F_r = mr \left(\frac{d\phi}{dt} \right)^2$$

jossa $\frac{d\phi}{dt}$ = kulmanopeus = $\phi_A (2\pi \cos \omega t)/T$



Keskipakovoima on nolla, kun alus on ääriasennossaan ja maksimissaan, kun keinumiskulma on nolla. Muilla kulmilla sillä on sekä kannen suuntainen että kohtisuoraan kantta vastaan oleva komponentti. Miinusmerkki tarkoittaa sitä, että voiman kantta vastaan kohtisuora komponentti vaikuttaa vastakkaiseen suuntaan kuin maan vetovoima. Lastin siirtymisen kannalta pahin tilanne on kun alus on ääriasennossaan.

Seuraavassa taulukossa on laskettu kyseisten voimien komponentteja. Luvut ilmoittavat kertoimen, jolla massa on kerrottava, jotta saadaan voima. Vertaamalla taulukkoa 1 näihin taulukoihin 2 ja 3, nähdään dynaamisten ja staattisten voimien suhteellinen suuruus. Taulukossa 2 on laskettu keinumisamplitudilla 30° tilanne ääriasennossa ja kulmalla 0 astetta kertoimet eri lastikerroksille. Taulukossa 3 on laskettu kertoimet alimmalle lastikerrokselle keinumisamplitudilla 10°, 20°, 30° ja 40° ääriasennossa ja kulmalla 0°.

Taulukko 2. Voimien komponentit kertoimien muodossa eri lastikerroksissa kun keinumisamplitudi on 30°

		kaikki kulmat			ääriasento kulma = 30°			keskiasento kulma = 0°		
Kerros	z [m]	tangentiaali- voiman kannen suuntainen komponentti	tangentiaali- voiman kohtisuora komponentti	radiaali- voima	tangentiaali- voiman kohtisuora komponentti	radiaali- voiman kannen suuntainen komponentti	radiaali- voiman kohti- suora komponentti			
1	5,5	0,21	0,30	0	0	0	-0,11			
2	6,6	0,36	0,30	0	0	0	-0,14			
3	7,7	0,30	0,30	0	0	0	-0,16			
4	8,8	0,34	0,30	0	0	0	-0,18			

Taulukko 3. Voimien komponentit kertoimien muodossa eri keinunta- amplitudeilla ensimmäisessä lastikerroksessa

	Kaikki kulmat	ääriasento = keinuntakulma		keskiasento kulma = 0°		
Keinuntakulma	Tangentiaali-voiman kannen suuntainen komponentti	tangentiaali-voiman kohtisuora komponentti	radiaali-voima	tangentiaali-voiman kohtisuora komponentti	radiaali-voiman kannen suuntainen komponentti	radiaali-voiman kohtisuora komponentti
10	0,07	0,10	0	0	0	-0,01
20	0,14	0,20	0	0	0	-0,05
30	0,21	0,30	0	0	0	-0,11
40	0,29	0,41	0	0	0	-0,20

Kohoilusta johtuu pystysuora voima

$$F_{\text{pysty}} = \frac{m4\pi^2 h}{T^2}$$

jossa

h = aallon amplitudi eli ½-korkeus

T = aallon periodi

Merentutkimuslaitokselta saatujen tietojen pohjalta otetaan h = 1,8 m ja T = 9 s, jolloin pystysuoraksi voimaksi saadaan noin 0,9 kertaa massa. Tämä vastaa puhdasta sini- muotoista sivuaallokkoa. Todellinen tilanne eroaa tästä ja arvioidaan sopivaksi valita voimaksi 0,6 kertaa massa. Tämän voiman kantta vastaan kohtisuora komponentti vuorotellen suurentaa ja pienentää lastin painoa kantta vasten. Voiman kannen suuntainen komponentti vuorostaan lisää tai vähentää lastia siirtävää voimaa. Se voi vaikuttaa keinuntavoimien kanssa yhtä aikaa. Tässä tapauksessa epäedullista on painon vähennys, koska silloin kitkavoima pienenee vastaavasti.

Voimien yhdistäminen

Otetaan näiden voimien vaikutukset kokonaisuuteen huomioon vertaamalla taulukkoa 1 taulukoihin 2 ja 3. Tangentiaali-voiman kannen suuntainen komponentti lisää kallistuksesta johtuvaa kerrointa eli siirtävää voimaa lastiluukun ja lastin välisessä kerroksessa 4-5% kulmilla 10-40°. Kohoilun kiihtyvyyden kannen suuntainen komponentti vähentää kerrointa määrällä (sin φ)6%, joten saadaan yhteisvaikutuksena lisäys 0%, 3,5%, 3%, 2% ja 1,5% kallistuskulmilla 0°, 10°, 20°, 30° ja 40°.

Tangentiaali-voiman kohtisuora komponentti lisää painoa kantta vastaan 5,5%, 3,5%, 2% ja 1% kallistuskulmilla 40°, 30°, 20° ja 10°. Kohoilu puolestaan keventää painoa määrällä (cos φ)6%, joten saadaan yhteisvaikutukseksi kevennys 0%, 2%, 4%, 5% ja 6% kallistuskulmilla 40°, 30°, 20°, 10° ja 0°.

Jatkolaskelmissa on siten käytetty seuraavan taulukon esittämiä tuloksia.

Taulukko 4. Dynaamisten voimien antama lisäys/vähennys staattisiin voimiin

keinumisamplitudi	kohtisuora muutos [%]	kannen suuntainen muutos [%]
0	-6	0
10	-5	+3,5
20	-3,5	+3
30	-1,5	+2
40	+1,0	+1,5

Kaiken kaikkiaan dynaamisten voimien vaikutus on vähäinen ja jopa laskentatarkkuuden rajoissa. Usein vaikutus jätetään kokonaan pois. Lastinkiinnityskäsikirjassa vaikutus otetaan huomioon pienentämällä pakettipinon staattista stabiliteettikulmaa. FJORD PEARLilla tämä kulma pieneni 17 asteesta 16,5 asteeseen.

Liite 6. Merenkululaitoksen keskushallinnon lausunto



15.9.2003

Dnro 1311/335/2003

Onnettomuustutkintakeskus
Sörnäisten rantatie 33 C
00580 HELSINKI

SAAPUNUT

16.09.2003
317/54

M/S FJORD PEARL, LASTIN SIIRTYMINEN JA VAARATILANNE 2.1.2002

Olemme tutustuneet asiantuntijoidemme kanssa tutkintaraporttiin ja lausumme seuraavaa:

Nostoköydet ehkä litistyivät lastin alla. Keinokuituköysi on liukasta erityisesti metallia vasten. Välipuita ilmeisesti ei käytetty.

Kiinnitys tapahtui pelkästään vetämällä vajjerit lastin ylitse. Mitään pakettityypistä kiinnitystä ei tapahtunut.

Tukitoilppia olisi tullut hyödyntää kiinnityksessä. Niistä olisi saatu välikiinnikkeiden kanssa tanakka kokonaisuus. Välikiinnikkeitä ei ilmeisesti käytetty lainkaan.

Lastia ei myöskään kiinnityksen jälkeen kiilattu ylhäältä millään tavalla.

Puutavarapakettien korkeus vaihteli. Korkeusvaihtelu ei kuitenkaan ollut kovin suuri. Välipuita ei ilmeisesti taaskaan käytetty.

Puutavarapaketit muovitetaan sateen ym. varalta normaalisti päältä, päistä ja sivuilta. Alapuolelta suojaaminen ei ole tavallista. Tällöin tulee muovi vasten puuta ja välipuita tulisi käyttää.

Lastia ei menetetty. Tämä osoittaa, että kiinnikkeiden lujuus riitti, mutta ne eivät olleet kireällä eivätkä kulkeneet lasti ympäri.

Mielestämme IMO:n Code of Safe Practice for Ships Carrying Timber Deck Cargoes noudatettuna antaisi tähänkin tapaukseen ohjeet. Merimiestaitoakin voitaisiin käyttää hyödyksi.

Suosituks:

1. Kitkatiedot auttavat aina aluksen päällikköä. Kannatamme.
2. Lastinkiinnityskäsikirja näyttäisi tässä tapauksessa kaipaavan tarkennuksia. Myös laskentaesimerkki on hyödyksi.

Käyntiosoite
Porkkalankatu 5
00180 Helsinki

Postiosoite
PL 171
00181 Helsinki


Puhelin
0204 481

Faksi
0204 48 4355

NORDEA 166030-107626
OKO 500001-20377634
SAMPO 800015-38014

3. Kansilastit saadaan pysymään paikoillaan erilaisilla lastaustavoilla.
Oikeanlainen kiinnitys on kaiken perusta.
Lippuhallinnon on syytä harkita parannuksia käsikirjaan.
3. Tällainen tieto voitaisiin nähdäksemme toimittaa IMO:n välityksellä jäsenhallinnoille.

Toimistopäällikkö


Pekka Korhonen

Merenkuluntarkastaja


Marko Rahikainen

Liite 7. Central Marine Research & Design Institute (CNIIMF) lausunto

ЗАО «Центральный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт морского флота» (ЦНИИМФ)



JSC Central Marine
Research & Design Institute
(CNIIMF)

Лаборатория крепления грузов

Cargo Securing Laboratory

FAXIMILE MESSAGE

ФАКСИМУЛ

16.09.2003 г

29.09.2003

TO: Finnish Accident Investigation Board

Our. Ref. No. OBC-1/31-03

350/5M

ATT: Pertti Silvonen, accident investigator
maritime accidents

Fax: +358 400 979 113

+358 916 067 311

No. of pages, including first 5

Ref. No. 231/5 M on 2 July 2003

Dear Sirs!

M/S FJORD PEARL, SHIFTING OF CARGO ON 2 JANUARY 2002

We thank you for the continuation of our cooperation in the matter of investigation of conditions of safe carriage of timber cargoes.

We with great satisfaction perceived completeness, objectivity and thoroughness of the investigation of circumstances, connected with shifting of the deck saw timber cargo on m/s FJORD PEARL on 2 January 2002, reflected in the presented Investigation Report C 1/2002 M of the Finnish Accident Investigation Board.

Special satisfaction was evoked by the investigator's attention to influence of friction effect upon deck packaged sawn timber cargo's shiftability.

For us as elaborators of the ship's Cargo Securing Manual, the most significant was the establishment of the fact, that the cargo had been stowed and secured in accordance with its requirements.

We also consider important to note, that in spite of the fact of shifting of the whole cargo for about 1.5 m to starboard, none of the timber lashings broke, the cargo hung by the lashings, making a dangerous least, bounding the ship's ability to maneuver and enter the port of refuge. In a similar situation excessive lashing's strength led m/s Kodima into shallow water with loss of practically the whole cargo and substantial damages of the ship but all the wires, securing the deck cargo were intact.

Then the question arises: "Why did, nevertheless, shifting of the cargo take place?"

In the course of preparing the present comments our own investigation on the friction coefficients of a large number of possible combinations of friction pairs, formed inside a multi-tier (from 2 up to 6 tiers) stack between packages of sawn timber, covered by different types of protective hood only on five sides, except for the bottom side, and stowed in a stack together with the thrown upon them during loading polypropylene lifting ropes, was carried out.

191015, Санкт-Петербург,
ул. Кавалергардская, 6.
телефон: (812) 275-8965
тел./факс: (812) 327-2638



6, Kavalergardskaya str.,
St.-Petersburg, 191015, Russia
Phone: +7 (812) 275-8965
Fax/phone: +7 (812) 327-2638



Лаборатория крепления грузов

Cargo Securing Laboratory

FAXIMILE MESSAGE

The results of our investigations, individual fragments of which are presented on the attached photos, showed a wide range of values of the friction angles of different contacting pairs inside a multi-tier stack.

The lowest angles of slope of sliding surfaces at the moment of initial shifting amounted $12^\circ - 14^\circ$ (photo 1), which corresponds with friction coefficients of about 0.21 - 0.25.

Prevailing angles of slope amounted $20^\circ - 24^\circ$, and maximum ran up to 39.4° (photo 2).

Steadily low values were shown by the friction angles of the polypropylene lifting ropes over almost all of the kinds of the used surfaces (photo 3).

The friction tests performed at the Technical Research Centre of Finland on the effect of warming on the friction coefficients were of a great interest for us.

However, it is necessary to admit, that a carrier has no possibility to determine any of the values specified in the Investigation Report and above in this paper.

The Shipper shall provide the Master with such information prior to loading taking into account the season and conditions of an intended carriage.

Accumulation of such information will allow in future to elaborate valid calculation methods of steel uprights' strength, application of which with number of tiers more than 3, probably would solve the problem of taking into account the need of reduction of the friction coefficients as a result of an undecleared by the shipper change of conditions of producing of sawn timber packages, presented for carriage on a ship.

Such work could be carried out by joint efforts of Finland and Russian investigators on demand of Finland and Russian shippers under the supervision of both Finland and Russian Maritime Administrations with subsequent presentation of the results to the IMO's attention.

Look forward for continuation of our cooperation.

Yours sincerely,

Evgeniy Karpovich,
the Head of Cargo Securing Laboratory, CNIMF

191015, Санкт-Петербург,
ул. Кавалергардская, 6.
телефон: (812) 275-8965
тел./факс: (812) 327-2638



6, Kavalergardskaya str.,
St.-Petersburg, 191015, Russia
Phone: +7 (812) 275-8965
Fax/phone: +7 (812) 327-2638



Photo 1



Photo 2



Photo 3

Liite 8. Malta Maritime Authority, Merchant Shipping Directorate lausunto

The prefix 21 has been
added to all the Directorate
Telephone and Fax lines



*Malta Maritime Authority
Merchant Shipping Directorate
Maritime House, Lascaris Wharf
Valletta VLT01 MALTA*

FAX TRANSMISSION

N.B. If you are not the named recipient of this Fax, please notify us, preferably by telephone or E-mail, forthwith, and do not read, copy or disclose this Fax to any person.

Date: 22 August 2003

To: MR. PERTTI SIIVONEN

From: Anthony Zerafa
Technical Dept.

Organisation: ONNETTOMUUSTUTKINTAKESKUS
SORNAISTEN RANTATIE 33 C
FIN-00580 HEKSINKI
FINLAND

Phone: +356 21250360

Fax: +356 21241460

E-Mail: anthony.zerafa@mma.gov.mt

Telex: 1362 REGSHP MW

Fax: ~~00358918257811~~

00358 91606 7811

Copied to: --

Number of pages two
including this one:

Subject: MV FJORD PEARL IMO #7524354 COMMENTS ON DRAFT REPORT C 1/2002 M.

Regarding the above-mentioned subject;

We have read and agree with the draft report.

There are only minor comments from our side to some details.

Included with this fax message, please find enclosed a copy of page 2 of the draft report, with the corrections for your perusal.

These are;

Home port Valletta, (not La Valletta, Malta.)
Displacement max 10,000 mt, (not 10720)
DWT, max 6070 mt, (not 6780)

Thanking you for your cooperation.

Regards

Anthony Zerafa