

LUKU 15

Visiirin ja rampin kiinnikkeiden lujuudet

15.1 Keulavisiirin suunnitteluperusteet ja suunnitteluvaatimukset

15.1.1 Bureau Veritas'n vaatimukset visiirin kiinnikkeille

Visiirin rakenteet suunniteltiin ja rakennettiin Bureau Veritas'n vuodelta 1977 olevien sääntöjen mukaisesti. Rakenteiden vaatimusten mukaisuutta ei tässä tutkimuksessa ole yksityiskohtaisesti todettu.

Visiirin lukkojen piti Bureau Veritas'n kyseisen ajan sääntöjen mukaan varmistaa visiirin "pitävä kiinnitys" (*firmly secured*). Yleisin ohjein oli määrätty käytettäväksi rakennevahvistuksia helojen, saranoiden ja vipujen kiinnityskohtiin.

Näin ollen Bureau Veritas'n säännöt eivät määränneet vähimmäiskeulapainetta sovellettavaksi visiirin vaaka- ja pysty-poikkipinnoille. Telakka on ilmoittanut tämän vuoksi käyttäneensä suunnittelukuormien määrittämiseen Bureau Veritas'n 5.4.1976 päivättyä, numerolla BM2 varustettua muistiotä "Note Documentaire". Tämä muistio oli tarkoitettu opastukseksi suunniteltaessa suurten tankkereiden ja rahtialusten keuloja. Ei ole ollut täysin mahdollista selvittää, miten tätä opastavaksi tarkoitettua muistiotä on tulkittu ja käytetty saatuihin sovellettaviin kuormiin pääsemiseksi. Saadut kuormat olivat kuitenkin samaa luokkaa kuin muiden luokituslaitosten mukaiset suunnittelukuormat tuona aikana.

Ro-ro-aluksen keulavisiirin kiinnikkeisiin kohdistettavat suunnittelukuormat ovat jatkuvasti tarkentuneet uusien tietojen myötä, eivätkä ne olleet yleisesti vakiintuneet ESTONIAN rakennusaikana. Keulapaine ja sovellettava laskentamenetelmä määriteltiin selkeämmin ja yksityiskohtaiset säännöt annettiin esimerkiksi vuonna 1982 annetuissa Kansainvälisen luokituslaitosten liiton, IACS:n yhdenmukaistetuissa vaatimuksissa ja myöhemmissä säännöissä. IACS 1982 määritteli lukkoa kohti suunnitte-

lukuormat, jotka olivat noin kaksinkertaiset verrattuna ESTONIAN suunnittelussa käytettyyn lukko kohtaiseen suunnittelukuormaan. Kuitenkin Germanischer Lloyd antoi jo vuonna 1978 visiirin suunnittelukuormalle määrityksen, joka olisi antanut kolminkertaisen suunnittelukuorman ESTONIAN suunnittelussa käytettyyn nähden.

15.1.2 Telakan käyttämät suunnittelumenetelmät

Yllä mainitulla menetelmällä saadulla, visiirin pintaan vaikuttavalla suunnittelukeulapaineella telakka lasi suunnittelukuorman komponenteiksi 536 tonnia (5,3 MN) nostetta ja 381 tonnia (3,7 MN) taakse vaakasuoraan vaikuttavaa voimaa. Näiden oletettiin vaikuttavan visiirin projisoitujen pintojen keskellä. Pohjalukon kohdalla vaikuttava reaktivoima määritettiin laskemalla sen momentti (vipuvoima) pisteessä, joka oli pituus suunnassa sivulukkojen ja saranapisteen puolivälissä ja saranoiden korkeudella. Voimaksi saatiin 152,5 tonnia (1,5 MN). Tätä vaakasuuntaista voimaa ja visiirin painolla vähennettyä nostovoimaa käytäten laskettiin voimaresultantti, joka jaettiin tasan kaikille viidelle visiirin kiinnikkeelle, jolloin kiinnikekohtaiseksi suunnittelukuormaksi saatiin 100 tonnia (1 MN) saranat mukaan lukien.

Vaikka kiinnikekohtaisen suunnittelukuorman arviointimenetelmästä ilmeisesti puuttui logiikka, sille oli jossakin määrin saatavissa tukea muiden luokituslaitosten, esimerkiksi Lloyd's Register of Shippingin, säännöistä tuona aikana. Kuitenkin näissä suunnitteluohjeissa sallittiin suunnittelukuorman jakaminen tasan heloille poislukien saranat. Komission käsityksen mukaan telakan laskelmat johtivat selkeästi alhaisempiin kiinnikekohtaisiin suunnittelukuormiin kuin realistisempaa suunnittelukuorman jakoa sovellettaessa.

Telakka käytti kiinnikkeiden teräsoisien kuormaa kantavien minimipoikkeileikkausalojen laskemisessa kiinnikekohtaista suunnittelukuormaa ja sai arvon

6 100 m² yhdelle kiinnikkeelle. Tämä tulos saatiin soveltamalla vetoon jännitystä 164 N/mm². Tämä jännitys oli saatu jakamalla tavalliselle laivanrakennusteräkselle sallittu vetojännitys 123 N/mm² korkealujaan teräkseen sovellettavalla materiaalivakiolla 0,75, sillä tarkoituksena oli ollut käyttää lujempaa terästä St 52-2. Laskelmissa ei otettu huomioon alhaisempaa lujuutta leikkauskuormituksessa eikä sitä, että useat lukko-osat olivat leikkauksen alaisia. Jäljennös telakan laskelmista on tämän raportin liitejulkaisussa (Supplement 204).

Telakan käsin kirjoitettuja laskelmia ei annettu Bureau Veritas'n hyväksyttäväksi. Asennetussa pohjalukossa ei ollut laskelman mukaista poikkipintaa. Mikään komission tutkimista lukkokorvakeista ei ollut valmistettu korkealujasta teräksestä.

Bureau Veritas keskusteli maaliskuussa 1980 von Tell-yhtiön kanssa tämän käyttämistä suunnittelukuormista kiinnikkeiden mitoittamiseksi ja lujuuden huomioimiseksi niiden rakentamisessa. Von Tell selitti lyhyessä teleksissä, että he olivat Bureau Veritas'n sääntöjen puuttessa käyttäneet Lloyds Register of Shippingin sääntöjä ja saaneet suunnittelu-kuormaksi 80 tonnia kullekin kiinnikkeelle. Vaikkakaan yksityiskohtia ei tunneta, tämä kirjeenvaihto näyttää tyydyttäneen Bureau Veritas'ta.

Kaksi Bureau Veritas'n tarkastajan tekemää huomautusta – toinen visiirin kokoonpanopiirustuksessa ja toinen visiirin ja rampin järjestelmiä koskevassa yleisjärjestelypiirustuksessa – kuuluivat ”Lukitusjärjestelmä kansallisen merenkulkuviranomaisen hyväksyttäväksi” ja ”Paikalliset vahvikkeet laivan rakenteisiin lukituslaitteiden, hydraulisyntereiden ja saranoiden kiinnityskohtiin laivatarkastajan hyväksynnän mukaan”. Kokoonpanopiirustuksessa oli myös huomautus, että ”vipukiinnityksen lenkit varsissa, pohjalukkolenkki ja sivulukkojen lenkit tehdään teräsluokan St 52-3 levystä”, s.o. korkealujasta teräksestä. Bureau Veritas hyväksyi nämä piirustukset näillä kommentteilla; von Tellin piirustuksen marraskuussa 1979 ja telakan piirustuk-

sen kesäkuussa 1980.

Telakan visiiripiirustus toimitettiin Bureau Veritas'n hyväksyttäväksi vasta vähän ennen aluksen toimittamista tilajalleen. Bureau Veritas'n paikallinen tarkastaja kiinnitti kuitenkin telakan huomiota von Tellin piirustukseen merkittyyn huomautukseen maaliskuussa 1980, mikä käy ilmi hänen päivittäisestä työselostuksestaan. On syytä panna merkille myös, että von Tell oli joulukuussa 1979 yhteydessä Suomen Merenkulkuhallitukseen piirustusten yleishyväksynnästä, mutta ei maininnut tässä yhteydessä piirustukseen kuukautta aikaisemmin tehdystä merkinnästä, missä Bureau Veritas vaati lukitusjärjestelmän erillistä hyväksyttämistä kansallisella merenkulkuviranomaisella.

Suomen Merenkulkuhallitus oli kansallisen asetuksen nojalla vapautettu laivan rungonkatsastuksesta, jos laivalla oli hyväksytyyn luokituslaitoksen antama luokitussertifikaatti. Toisaalta Bureau Veritas ei suorittanut visiirin kiinnityslaitteiden yksityiskohtaista tarkastusta, koska luokituslaitoksen silloisiin ohjeisiin ei sisällynyt vaatimuksia niiden rakenteesta. Tämä tilanne ja kiinnityslaitteiden hyväksymiseen liittyvien toimenpiteiden sekava ajoitus näyttää johtaneen siihen, ettei sen paremmin Bureau Veritas kuin Suomen Merenkulkuhallitukseen tarkastanut lukituslaitteiden kiinnitysten laskelmia ja suunnitelmia.

15.2 Visiiriin kohdistuvat aaltokuormat

Kun alus liikkuu kovassa merenkäynnissä, visiiriin vaikuttaa hydrodynaamisia ja hydrostaattisia kuormia. Visiirin muodon vuoksi aaltokuorman amplitudi kasvaa epälineaarisesti suhteessa keulan liikkeeseen aallon pinnan suhteen. Pieni keulan suhteellisen liikkeen siirtymän ja nopeuden kasvu aiheuttaa merkittävästi suuremman aaltokuorman kasvun.

ESTONIAN visiirin muodosta johtui, että vastaisessa tai sivuvastaisessa aallo-

kossa visiiriin vaikutti voimaresultantti noin 45 asteen kulmassa vesiviivapintatasoon nähden. Voima synnytti ylöspäin ja peräänpäin vaikuttavat kuormakomponentit, jotka olivat likimain yhtä suuria. Sivuvastaisessa aallokossa visiiriin vaikutti lisäksi poikittainen kuormakomponentti, mutta se oli useimmiten pienempi. Suurempien visiiriin vaikuttavien voimien vaikutuspiste sijaitsi korkealla ylhäällä ja edessä synnyttäen avaavan momentin ja sivuvastaisessa aallokossa myös pitkittäisen akselin ympäri vääntävän ja pystyakselin ympäri kääntävän momentin. Matalammassa aallokossa aaltoiskut aiheuttivat yleisesti ottaen visiiriä sulkevan momentin.

ESTONIAN visiiriin vaikuttaneiden suurimpien kuormien arviointi on melkoisen epävarmaa johtuen merenkäynnin korkeuden arvioinnin epävarmuudesta, suhteellisten liikkeiden satunnaisuudesta ja visiiriin vaikuttaneiden voimien epälineaarisuudesta. Numeeristen simulointien ja mallikokeiden (ks. 12.1–12.3) perusteella komissio on päätellyt, että visiiriin vaikuttanut todennäköisin suurin voimaresultantti oli 4–9 MN aluksen reittipisteessä tekemän kurssinmuutoksen jälkeen ja merkitsevän aallonkorkeuden ollessa noin 4 m. Voimakomponentteihin jaettuna tämä vastasi yhtäaikaan ylöspäin ja peräänpäin vaikuttaneita 3–6 MN:n voimia ja oikealle vaikuttanutta 0,5–2,5 MN:n poikittaisvoimaa. Saranapisteiden suhteen vaikuttaneet suurimmat momenttiresultantit olivat 4–20 MNm:n avaava momentti, 0,5–7,5 MNm:n vääntävä momentti ja 0,5–2,5 MNm:n kääntävä momentti. Aaltokuorma on voinut ylittää joitakin kertoja vaihteluvälin alapäässä olevia voiman ja avaavan momentin tasoja. Vaihteluvälin ylärajan ylittäviä kuormatasoja pidetään epätodennäköisinä, mutta niitä ei voida kokonaan sulkea pois.

Komissio on pannut merkille, että visiiriin onnettomuushetkellä vaikuttaneet suurimmat aaltokuormat ovat pysty- ja pitkittäisvoiman osalta olleet samaa suuruusluokkaa kuin telakan käyttämät mitoituskuormat. Myöhemmin onnettomuusyön aikana aallokon korkeus kas-

voi ja voimat olisivat kasvaneet merkittävästi, jos alus olisi jatkanut matkaa samalla nopeudella ja kurssilla päin aaltoja.

Tukivoimien jakautumaan ja suuntiin visiirin kiinnityspisteissä vaikuttaa kiinnityspisteiden sijainti visiirin aaltokuorman vaikutuspisteen suhteen, lukituslaitteiden välykset, koko visiirin jäykkyys ja kiinnityspisteiden paikallinen jäykkyys. Seuraavissa kappaleissa tarkastellaan erikseen eri kiinnitysten lujuutta liiteosassa kuvattujen laskelmien ja koekiden perusteella. Arvio koko kiinnitysjärjestelmän kantokyvystä on esitetty kohdassa 15.10.

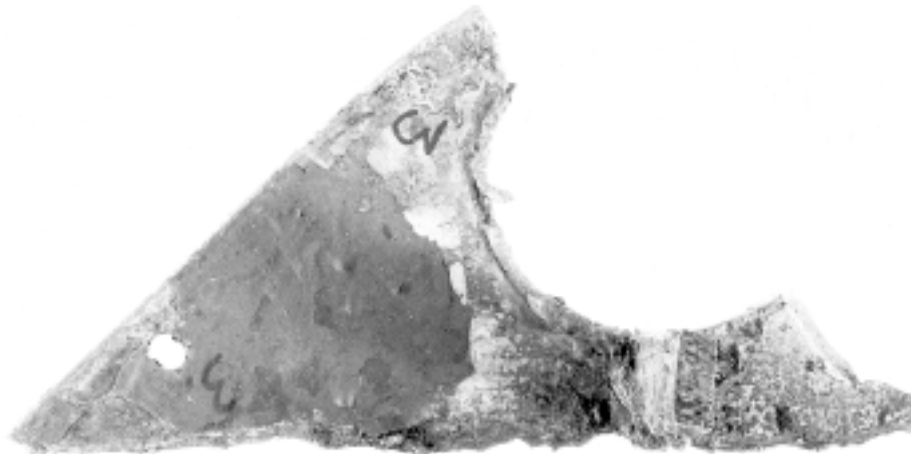
15.3 Pohjalukon arviointi

Pohjalukko murtui laivanpuoleisista kiinnikkeistään (kuva 8.13). Murtumat syntyivät kolmeen korvakkeeseen ja kiinnityshitseihin, joilla lukkotapin runkoholkki ja tukiholkki oli kiinnitetty laivan keulapiikin kanteen (kuva 8.14). Murtumat ovat syntyneet eteenpäin vetävän voiman vaikutuksesta.

Oikeanpuoleinen ja keskimäinen kiinnityskorvake olivat murtuneet laivan suhteen pitkittäisen vedon takia, mutta vasemmanpuoleinen korvake oli pitänyt lukkotappia pitempään ja lopulta taipunut. Lukkotappi oli luiskahtanut visiirin korvakkeesta noin 30 asteen kulmassa.

Murtuneet korvakkeet otettiin talteen hylystä ja tutkittiin metallurgisin menetelmin sekä murtopintojen ja perusaineen lujuuskokein (Supplement 516–519). Kaikki merkit viittaavat siihen, että korvakkeet murtuivat paikallisesti vaikuttavan ylikuormituksen takia yhden tai muutaman kuormituksen vaikutuksesta. Yleiskuva murtuneesta korvakkeesta on kuvassa 15.1. Hitsausauman murtuma on osittain itse hitsipalossa ja osittain ympäröivässä aineessa. Hitsin paksuus oli noin 3 mm. Merkkejä ennen turmaa syntyneistä juurisäröistä tai liitosvirheistä voidaan havaita hitsipalon murtuman alueella.

Kuva 15.1 Murtunut pohjalukon oikeanpuoleinen kiinnityskorvake.



Pohjalukon (kuva 15.2) murtokuorma on arvioitu laskelmin, kuten liiteosassa tarkemmin selostetaan (Supplement 507, 511, 515 ja 516). Vain lähinnä visiirin korvaketta symmetrisesti olleet kaksi lukkorungon korvaketta osallistui tehokkaasti korvakkeen kautta tulleen pitkittäisen kuorman kantamiseen. Oletettu murtuman syntytyyppi saa tukea myös Hampurin yliopistossa tehtyistä kokeista, joihin viitataan jäljempänä.

Paikallista, pohjalukkoon kohdistuvaa voimaa kantoivat kiinnityskorvakkeiden kannakset sekä hitsausliitokset, joilla lukkotapin holkit olivat kiinni. Korvakkeiden poikkipinta-ala oli noin 1 100 mm². Korvakkeet oli tehty tavallisesta laivanrakennusteräksestä ja kukin korvake kykeni kantamaan noin 0,3 MN:n osuuden koko lukon murtokuormasta. Tämä arvio perustuu siihen, etteivät korvakkeet veny kuin myötölujuutta vastaavaan venymään silloin, kun hitsausliitokset jo murtuvat vähäisemmän muodonmuutoskykynsä takia. Hitsausliitoksilla oli noin 0,3–0,5 MN suuruinen kuormankantokyky korvaketta kohden tarkan arvon riippuessa hitsauksen laadusta ja esimerkiksi juurisäröjen vaikutuksesta.

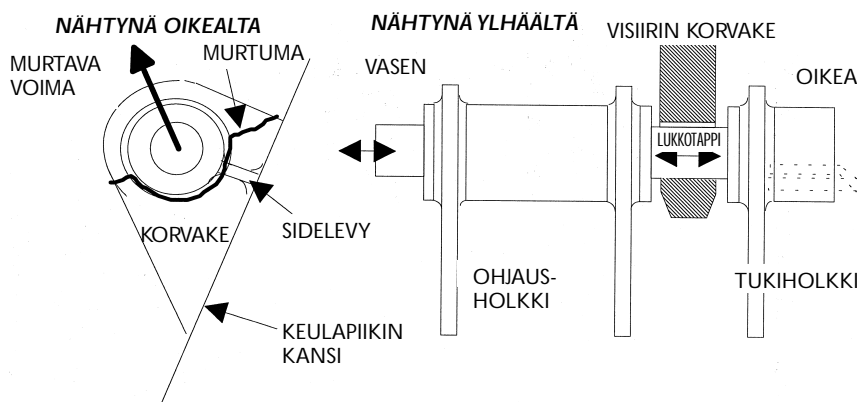
Pohjalukon koko murtolujuus koostuu siten hitsausliitosten murtolujuudes-

ta, johon on lisättävä korvakkeiden myötöön tarvittava kuorma, kaiken kaikkiaan noin 0,6–0,8 MN korvaketta kohden. Kahden kuormaa kantavan korvakkeen murtokuormaksi saadaan siten noin 1,5 MN. Oikeanpuoleisen tukiholkin lisäsidetalalla on tässä laskelmassa pieni osuus. Komission käsityksen mukaan saatu arvo on suurin mahdollinen pohjalukon murtokuorma.

Komissio on tietoinen täysmittakaavaisilla ja korkealujasta teräksestä valmistetuilla pohjalukkumalleilla tehdystä murtotestikoearjasta, joka toteutettiin Hampurin yliopistossa telakan valmistamilla malleilla. Näissä kokeissa, joissa hitsauksen määrää kiinnityskorvakkeiden ja lukkotapin holkkien välillä vaihdeltiin kokeesta toiseen, murtovoimat vaihtelivat välillä 1–2 MN. Katkonaisella hitsauksella toteutettu ratkaisu murtui voimalla 1,42 MN.

Visiirin korvakkeen murtovoima on 1,8 MN, kun korvake on tehty tavallisesta laivanrakennusteräksestä ja otetaan lisäksi huomioon, että korvakkeen kärki kuormittuu kriittisemmin leikkauksesta kuin suunnitteluperusteena käytetystä vedosta. Visiirinpuoleinen korvake oli siten vain vähän lujempi kuin keulapiikkikannen lukkorakenne. Tulokset, jotka saatiin analysoimalla visiirin korvakkeen

Kuva 15.2 Pohjalukko



muodonmuutokset mittausten ja mallikokeiden avulla, viittaavat siihen, että visiirin korvakkeeseen olisi joskus vaikuttanut noin 1,5 MN suuruinen veto-voima (Supplement 511).

Komissio on saanut tietoja, joiden mukaan pohjalukko olisi valmistettu osakokoonpanona telakan konepajassa ja hitsattu valmiiksi kokoonpantuna laivan keulapiikin kanteen. Tästä osakokonaisuudesta ei ollut erillistä piirustusta hitsaustietoineen, koska telakka käytti hitsaukset määrittelevää standardihitsaus- taulukkoa. Komissio ei ole löytänyt tietoja siitä, että pohjalukkoa olisi joskus muutettu tai korjattu. Maalitutkimukset (ks. kuva 12.7 ja Supplement 509) sekä lukon kunnossapidosta vastanneiden kertomukset viittaavat siihen, että lukko oli alkuperäinen tai peräisin aluksen ensimmäisiltä ajoilta.

Jotta pohjalukko olisi täyttänyt telakan mitoituslaskelmien vaatimukset, korvakkeiden vähimmäispoikkipinta-alojen olisi pitänyt olla suuremmat. Näyttää siltä kuin korvakkeiden valmistuksessa olisi käytetty von Tellin laatimissa pohjalukon kokoonpanopiirustuksissa olleita mittoja telakan laskelmien sijasta. On todettu myös, että mitoituslaskelmat pohjautuivat suunnitelmaan käyttäen kor-

kealujaa terästä, vaikka kiinnityskorvakkeet valmistettiin todellisuudessa tavallisesta laivanrakennusteräksestä. Tavallisesta laivanrakennusteräksestä valmistettujen korvakkeiden poikkipintojen olisi pitänyt käytettyjen laskentaperusteiden mukaan olla noin 8 300 mm², kun toteutunut poikkipinta oli, ottaen huomioon pienet hitsit ja vain kahden korvakkeen osallistuminen voiman kantamiseen, vain noin 4 600 mm².

Komission käsityksen mukaan alukseen asennetun pohjalukon kuorman- kantokyky ei vastannut suunnittelukuorman mukaisia vaatimuksia eikä mitoituslaskelmien mukaista vähimmäispoikkipinta-alaa.

15.4 Sivulukkojen arviointi

Sivulukot murtuivat siltä kohtaa, missä visiirin korvakkeet oli kiinnitetty visiirin takalaipioon. Piirustuksia sivulukon korvakkeiden asentamisesta ei ole löytynyt. Ote von Tellin laatimasta sivulukkokorvakkeiden kokoonpanopiirustuksesta on ilmeisesti luovutettu sivulukkokorvakkeiden valmistajan käyttöön. Kyseisen

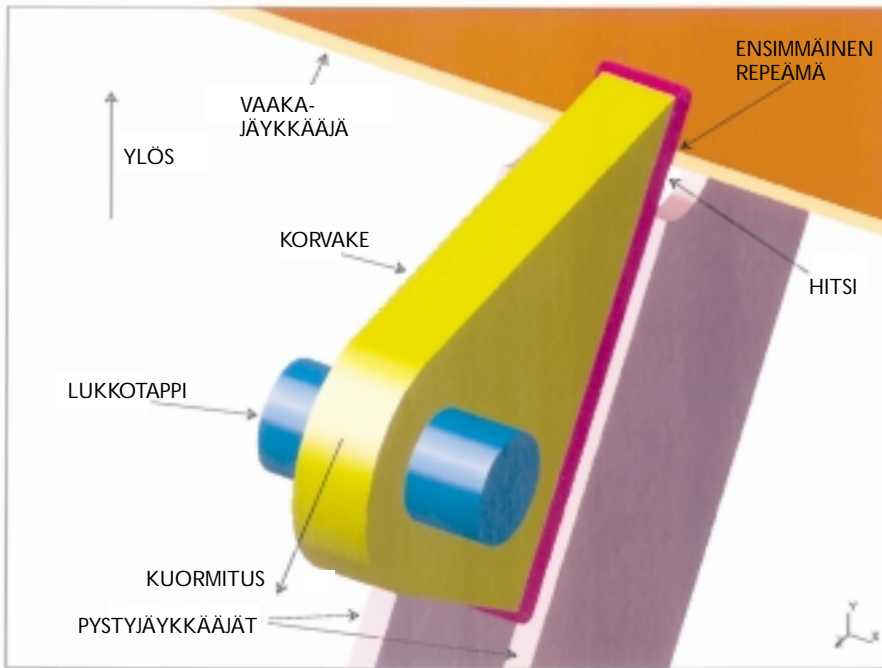
luonnoksen mukaan sivulukon korvakkeen tyven pituus oli noin 370 mm, kun taas telakan kokoonpanopiirustuksessa korvakkeen tyven pituus oli noin 550 mm.

Korvakkeet repeytyivät irti visiiristä. Kumpikin vei mukanaan osan visiirin takalaipiosta. Jäljelle jäivät reiät, joiden koko oli 390 x 85 mm. Murtumat olivat suurelta osalta leikkausmurtumia takalaipiolevyn läpi (kuvat 8.19 ja 8.20). Korvakkeet ovat kiinni laivan hyllyssä lukkotapeissa. Korvakkeiden pohjat ovat kuvissa 8.17 ja 8.18.

Visiirin takalaipiolevyn paksuus oli 8 mm. Kummankin sivulukkokorvakkeen kohdalle, takalaipiolevyn etupuolelle visiirin sisään oli asennettu kaksi pystyjäykkääjää Bureau Veritas'n tarkastajan vaatimuksen mukaisesti lukon asennuskohdan vahvistamiseksi (kuva 15.3). Toinen näistä jäykkääjistä oli sijoitettu niin, että korvakkeen pienahitsin kohdalla takalaipion toisella puolella oli pystyjäykkääjän toinen pienahitsi, mutta saman pystyjäykkääjän toinen pienahitsi oli korvakkeen pohjan ulkopuolella. Toinen pystyjäykkääjä hitseineen oli kokonaan korvakkeen äärimittojen ulkopuolella. Näin ollen näiden jäykkääjien lujuuttava vaikutus oli vähäinen. Vaakajäykkääjälevy visiirin sisällä korvakkeen yläpään kohdalla oli murtunut visiirin oikeanpuoleisen lukon kohdalla leikkautumalla koko korvakkeen leveydeltä, kun taas vasemmalla puolella osa vaakajäykkääjän murtumasta liittyi takalaipion ja vaakajäykkääjän väliseen pienahitsiin ja oli sen pienuudesta johtuvaa leikkausmurtumaa. Mitään muuta lujuutta turvaavia rakenteita, jotka olisivat vieneet sivulukkoihin kohdistuvia voimia visiirirakenteisiin, ei ollut.

Tarvittavaksi voimaksi sivulukkokorvakkeen repäisemiseksi irti visiiristä suunnassa, joka pitää visiiriä kiinni saranoiden ympäri tapahtuvaa avautumista vastaan ja sivulukkokorvakkeen tasossa on arvioitu täysmittakaavakokeiden ja laskelmien avulla vasemmalla puolella enintään 1,2 MN ja oikealla puolella enintään 1,6 MN (Supplement 511). Näissä arvioissa on otettu huomioon vasemmalla

Kuva 15.3 Visiirin sivulukkukorvakkeen kiinnityskohta. Takalaipio tehty kuvassa läpinäkyväksi.



puolella todetut pienahitsien pienet palot puolessa lujuuteen vaikuttavaa takalaipion ja vaakajäykkääjän välistä hitsausliitosta sekä pystyjäykkääjien sijainti, joka aiheutti sen, että pystyjäykkääjät osallistuivat vain hieman kuorman kantamiseen. Murtovoima olisi pienempi, jos voima vaikuttaisi enemmän visiirin takalaipion suuntaisesti ja suurempi, jos se vaikuttaisi enemmän laipiosta pois päin.

Erityisesti on pantu merkille, että sivulukkujen murtovoiman pienuus johtuu takalaipioon välittyvästä primääristä leikkauksesta. Tämän vuoksi – vaikka sivulukkukorvakkeen pienin poikkipinta-ala vastasikin mitoituslaskelmaa – sivulukkujen kuormankantokyky oli karkeasti vain puolet sitä, mitä vastaava vedon alainen poikkipinta olisi kyennyt kantamaan. Vaakajäykkääjän kuorman kantamiseen osallistuva pinta-ala ja hyvin vähäinen pystyjäykkääjihitsausliitos lisäsivät hieman murtoon tarvittavaa voimaa.

Sivulukkukorvakkeiden hitsausliitosten lujuus olisi ollut pienempi kuin yllä mainitut arvot, jos korvakkeen kiinnityspienaliitos olisi ollut pienempi kuin edellä oletettu 8 mm, mutta korvakkeen todellisen hitsauksen mitoista tai kovuudesta ei ole tietoa. Murtuma ei tosin sattunut hitsausliitokseen.

Johtopäätökseksi jää, että korvakkeiden ja niiden tukirakenteiden riittävien valmistus- ja asennuspiirustusten puute johti riittämättömään kuormankestoon verrattuna laskettuun suunnittelukuormavaatimukseen.

15.5 Saranoiden arviointi

Saranoihin visiirin kansipalkkien takapäässä kohdistui normaalien avaamis- ja sulkemisvaiheiden aikana 1,2–1,5 MN suuruisia voimia. Voimien suunnat visiirin suhteen vaihtelivat välillä alas – taakse riippuen visiirin asennosta. Saranale-

vyn kannakset olivat murtuneet alaosiin vetävän ja yläosat taivuttavan voiman vaikutuksesta. Alempien kannasten murtumat olivat voimakkaasti kuroutuneita sitkeitä leikkausmurtumia ja ylempissä oli selvät merkit taivutuksen vaikutuksesta (kuvat 8.21 ja 8.24). Saranan tukiholkin hitsaus oli murtunut etuosastaan jättäen palan saranalevyn kannasta kiinni irtirepeytyneeseen laakerin tukiholkkiin.

Saranalevy ja yksi talteen otettu tukiholkki on tutkittu metallurgisesti ja lujuusominaisuuksiensa osalta, kuten jaksossa 12.7 ja yksityiskohtaisesti liiteosassa (Supplement 516–518) on selostettu. Talteen otetun laakeritukiholkin kiinnityspienahitseistä löydettiin merkittävää säröilyä, erityisesti alasektorista. Tämä säröily oli saanut alkunsa pienahitsien juurista ja kasvanut hitsien läpi, erityisesti toisessa fuusiovyöhykkeessä. Parisa kohdassa säröt jatkuivat hitsin ulkopintaan asti, kuten myös maalaustöitä aluksella tehnyt opiskelija oli raportoinut. Normaalikäytön yhteydessä syntyvät voimat on arvioitu tarpeeksi suuriksi väsymissäröjen ydintämiseksi hitsien juurivirheisiin ja kasvattamiseksi.

Saranalevyjen kannaksista alemmat murtuivat vetävän voiman takia ja ylempät taivuttavan voiman vaikutuksesta ilman aiempaa väsymissäröä, kuten talteen otetuista näytteistä voidaan selvästi todeta. Kannasten murtopinnat osoittavat, että murtumat syntyivät yhden tai korkeintaan muutaman kuormituksen vaikutuksesta.

Paikallisten voimien suunnasta johdun havaituilla hitsien aiemmilla säröillä oli nähtävästi vain marginaalinen vaikutus saranoiden lujuuteen aaltokuormituksessa.

Saranoiden kuormaa kantavat poikkipinnat muodostuivat levyjen kannaksista ja pienahitseistä laakeritukiholkkien ympärillä. Kunkin kannaksen mitat olivat 60 x 25 mm. Yhden saranakokonaisuuden kannakset (kaksi levyä) olisivat murtuessaan kantaneet noin 2,7 MN taakse suuntautuvaa vetovoimaa, mikä saadaan, kun materiaalin vetomurtolujuudeksi on vetokokeessa saatu 450 N/mm².

Hitsatussa rakenteessa kannas venyy vain myötölujuutta vastaavasti hitsin murtuessa, joten kannasten osuudeksi jää noin 1,5 MN. Samoissa kuormitusolosuhteissa hitsin osuus saranan murtovoimasta olisi 5,8 MN, mistä saadaan saranan lujuudeksi taakse vetävän voiman alaisena noin 7 MN.

Saranan murtolujuudeksi nostavaa voimaa vastaan on arvioitu noin 4,6 MN, kun oletetaan, että välys laakeritukiholkin ja saranalevyn reiän välillä on suurempi kuin noin 1 mm.

Saranalevyjen holkinreikien pinta oli suurelta osalta erittäin epätasainen kuin ne olisivat olleet käsiohjauksella polttoleikatut. Tämä koskee kaikkia neljää saranalevyn holkinreikää, mutta eniten oikeanpuoleista saranaa. Polttoleikkausjälkiä oli vain saranalevyjen reiässä eikä vastaavaa ollut talteenotetun holkin puolella. Tämän lisäksi reiän etureuna oli oikeanpuoleisessa saranassa noin 10 mm edempänä kuin vasemmanpuoleisessa suhteessa saranapalkkien ulkoreunoihin. Ei ole ollut mahdollista löytää syytä reikien rosoisuudelle – selvittää onko kysymyksessä saranoiden säätötoimenpide niiden asennuksen yhteydessä vai myöhempi korjaustoimenpide. Mitään asiakirjaa korjauksesta tässä kohdassa ei ole löytynyt.

Todennäköisintä on, että saranat rikkoneet voimat ovat syntyneet visiirin avauduttua saranoidensa ympäri ja menetettyä kohdistussakaroiden antaman sivuttaistuen, jolloin sitä kuormittivat vääntävät ja avaavat momentit. Johtuen saranapalkin suuresta jäykkyydestä verrattuna visiirin ja lukkoinstallaatioiden jäykkyyksiin on myös mahdollista, että sarana olisi murtunut ennen kuin kaikki lukot olivat murtuneet.

Komission käsityksen mukaan saranoiden lujuustaso vastasi yleisesti ottaen suunnittelussa asetettuja tavoitteita. Normaalin käytön yhteydessä syntyneet säröt merkitsivät kuitenkin sitä, että saranalevyjen holkinreikien kannakset ja laakeritukiholkkien hitsaukset eivät olleet kyllin lujia. Myös saranalevyjen kannasten jäykkyys visiiriä nostavaa voimaa vastaan voidaan katsoa vähäiseksi. Tämä

yhdistettynä laakeritukiholkin niukkaan kiinnityspienahitsiin sekä suureen välykseen tukiholkin ja saranalevyn välissä myötävaikutti saranan lujuuden riittämättömyyteen.

15.6 Käsiikäyttöiset lukot

Visiirin molemmilla puolilla olleisiin käsiikäyttöisiin lukkoihin kuului kaksi levykoukkuja, jotka oli hitsattu visiirin takalaipiolevyn pintaan sekä laivanpuoleiset lenkkiruuvit, jotka voitiin kääntää koloissaan visiirikoukkujen väliin niin, että ruuvien mutterit voitiin kiristää visiirikoukkuihin. Kummankin käsiikäyttöisen lukon lujuudeksi on arvioitu enintään 0,7 MN. Mikäli ne olisivat olleet lukittuina, ne olisivat lisänneet jossakin määrin visiirin koko lukituslaitteiston lujuutta. Se, ettei niille ollut käyttöohjeita, on kuitenkin ymmärretty merkiksi siitä, ettei niitä pidetty toimivan lukitusjärjestelmän osina.

15.7 Visiirin nostosylinterien ja niiden kiinnikkeiden arviointi

Visiirin avaamista ja sulkemista varten oli raskaat hydrauliset nostosylinterit. Niiden yläpää oli yhdistetty visiirin sarana-varsiin 1,3 metrin etäisyydelle saranoista ja alapää vahvistettuihin alakiinnikkeisiin laivan eturakenteissa. Hydrauliikan osalta sylinterit oli kytketty solenoidityyppiseen säätöventtiiliin, joka oli kiinni paitsi silloin, kun visiiriä liikuteltiin. Visiirin liikenopeuden rajoittamiseksi avaamisen ja sulkemisen aikana oli käytössä erilaisia kuristusventtiilejä. Hydrauliset painepumput oli kerran vaihdettu suurempipaineisiin, sillä alkuperäiset oli koettu voimattomiksi.

Kun aaltovoimat pyrkivät avaamaan visiiriä, hydraulisyntereihin vaikuttanut ylöspäin suuntautuva voima, jota sylinteri vastusti. Aaltovoiman ja hydraulisyntereiden vipuvarsien suhde merkitsi, että sylintereihin kohdistui suuri veto-

voima. Vasemman puoleinen sylinteri repi tässä tilanteessa irti koko alakiinnikkeensä ja osan laivarakennetta (kuva 8.26), vaikka sylinteri avautui vain osittain sisään lukkiutuneen hydraulinestepatsaan takia. Nestepatsas välitti nostovoiman alakiinnikkeeseen. Alakiinnikerakenteen irti repäisseen voiman suuruudeksi on arvioitu enintään 4 MN, mutta se on voinut olla niinkin pieni kuin 2 MN, kun otetaan huomioon kiinnikkeen epäsymmetrinen muoto, huomattava – jo ennen onnettomuutta syntynyt – väsymissärö kiinnikerakenteissa sekä kannen 3 levy-

materiaalin iskutkeysluokka. Kokeissa tässä materiaalissa havaittiin taipumusta kylmähaurauteen jopa huoneen lämpötilassa. Vasemmanpuoleisen hydraulisynterierin alakiinnike on tutkittu yksityiskohtaisesti (Supplement 511).

Normaalit hydraulisynterierien käyttövoimat näyttävät olleen riittävän suuret synnyttääkseen väsymissäröjä alakiinnikerakenteiden hitsien viereisiin levyihin ja hitsausliitoksiin, erityisesti sellaisiin kohtiin, joissa oli säröjä edistäviä jyrkkiä muotoja. Erityisesti vasemmanpuoleisen alakiinnikkeen ympärillä oli runsasta säröilyä, joka oli syntynyt visiirin normaalin avaamisen ja sulkemisen yhteydessä vaikuttavien pystysuorien vaihtelevien voimien vaikutuksesta.

Oikeanpuoleisen sylinterin tiivisteet vaurioituivat, jolloin hydraulinestepatsas ei enää välittänyt voimia. Tämän sylinterin männän varsi tuli ulos sylinteristä ja koko hydraulisynterieri pysyi kiinni laivassa visiirin heiluessa sen keulassa. Voima, joka tarvittiin oikeanpuoleisen sylinterin irrottamiseen laivasta, on voinut olla jopa 8 MN, jolloin tapahtumien alussa oikeanpuoleiseen nostosylinteriin vaikuttava voima on ollut tätä pienempi.

15.8 Rampin lukituslaitteet

Ramppi oli suljettuna ollessaan lukittu kuudella lukolla, joista kaksi oli kiinni-

vetokoukkuja rampin yläpäässä ja neljä kiilatapin avulla kiristettäviä tappilukkoja, kaksi kummallakin sivulla.

Onnettomuuden jälkeisen yläosan kiinnetokoukut olivat suljetussa asennossa, kuten koukun hydraulisynterinin ja vipumekanismien asennoista voidaan ROV-kuvien avulla päätellä. Ei ole kuitenkaan ollut mahdollista todeta, miten itse koukut vaurioituivat. Yläraja-arvio koukun murtamiseen tarvittavasta voimasta voisi olla voima, jolla koukun kosketuskohta vastahelaan alkaa myötää. Tämä voima on likimääräisesti 0,2 MN. On arvioitu, että koukun pito tapista on hellittänyt, kun koukun kärki on hieman myötänyt, sillä se oli muodoltaan varsin laakea ja lyhyt.

Rampin sivulukkojen lukkotapit sopivat rampin sivupalkkeihin hitsattuihin koloihin. Nämä kolot repeytyivät auki hitsien petettyä. Kolojen murtamiseen tarvittava voima on arvioitu 0,2–0,3 MN:ksi. Vasemman puolen alin lukko ei ollut vaurioitunut. On päätelty, ettei se ole ollut lukitussa asennossa, kun visiiri on pakottanut rampin aukeamaan. Avoimeksi jää kysymys, mikä oli ollut tämän lukon kunto juuri ennen onnettomuutta. Lukon kunnolla ei kuitenkaan näytä olleen myötävaikutusta onnettomuuteen.

Lukot murtuivat yksi kerrallaan visiirin kuormitettua ramppia ylhäältä vasemmalta alkaen. Visiirin rampin vasemman yläkulmaan aiheuttamalla voimalla oli lukkojen sijainnin kannalta edullinen vipuvarsi, mikä vähensi lukkojen rikkomiseen vaadittavan ulkoisen voiman tarvetta. Visiirin rampin sisäpuolisten jäykisteiden paikalliseen taivuttamiseen tarvittava voima on arvioitu noin 0,3–0,4 MN:n suuruiseksi.

15.9 Muut visiirin vauriot

Muita onnettomuuden aiheuttamia visiirin vaurioita olivat pohjan painuminen ja edustan lommot. Visiirin pohja oli painunut ylöspäin ja siinä oli useissa koh-

dissa säröjä, erityisesti hitsausliitoksissa. Keulan alakulman tukirautaa oli irronnut visiirin sivulevytyksestä ja taipunut sisään yhdessä pohjalevyn kanssa (kuva 8.6). Vauriojäljet viittaavat siihen, että tämä tapahtui, kun visiiri alkoi kaatua eteenpäin ja pyörähti keulabulbin jääkynnen varassa ennen putoamistaan. Tämä jääkynnen aiheuttama vaurio jatkuu ylöspäin keularangan sivulla ja päättyy isoon lommoon keulan keskellä (kuva 8.5). Muutama painuma, raapaisujäljet ja maalihankautumat oikealla puolella osoittavat visiirin liikkeen jatkumisesta sen pudotessa keulabulbilta ja vajotessa pohjaan.

Suureen lommoon hankautuneen maalin analyysi osoittaa, että kysymys on samasta maalista, mitä käytettiin aluksen vesilinjan alaisissa osissa, myös keulabulbissa.

Johtopäätös on, että pohjalevyn painuma syntyi, kun aallot nostivat visiiriä kiinnikkeiden murruttua ja visiiri putoi ensin keulapakan päälle ja sitten vielä rajummin keularangan ylänurkan varaan.

Hitseistä on löytynyt joitakin viitteitä vanhoista säröistä, erityisesti alaketukulman tukipalan ja sivulevyn liitoksista. Osa näistä on ollut jaksottaisten kuormitusten alaisia. Nämä kuormitukset ovat aiheutuneet visiirin avaamisesta ja sulkemisesta sekä aalloista ja jäistä. Väsymissäröjä on voinut syntyä jännityskeskittymiin hitsipalkojen juurissa. Säröjen laatua on ollut vaikea selvittää tapahtumien jälkeisen runsaan korroosion takia.

Keularangan alapään tukipalassa, joka oli taipunut sisään visiirin alle, oli etupuolella neljä poikittaista säröä. Nämä säröt ovat oletettavasti syntyneet tukipalan taipuessa visiirin iskuissa vasten jääkynntä, vaikkei voidakaan sulkea pois sitä mahdollisuutta, että säröt olisivat syntyneet jo aiemmin ennen onnettomuutta.

Pieniä merkkejä maalista, jota käytettiin myös laivarungossa, löydettiin yhdestä säröstä. Tutkinnassa ei ole voitu varmistaa, olivatko nämä maalin palaset

peräisin säröä ympäröivältä alueelta, vai oliko maali tunkeutunut säröön laivaa maalattaessa.

Johtopäätös on, että jotkut säröt ovat syntyneet hitsialueille laivan käyttöaikana. Laivan ikä huomioon ottaen tällaiset säröt ovat normaaleja eikä niiden voida katsoa myötävaikuttaneen onnettomuuden syntyyn tai syihin. Säröjen kasvun jatkuminen joissakin hitseissä on voinut vaikuttaa onnettomuuden jatkuessa syntyneisiin toissijaisiin murtumiin sen jälkeen, kun vaurio on päässyt alkuun.

Kaksi pitkittäistä lattarautaa, joiden piti olla pohjalevyssä olevan kohdistussakaran kolon molemmin puolin, puutuivat kokonaan, vaikka ne oli merkitty visiirin piirustuksiin. Näyttää siltä kuin niitä ei olisi asennettu. Visiirin pohjalevyssä ei siten ollut muuta rakenteellista vahviketta kuin takimmainen poikkipalkki, johon pohjalukon korvake oli kiinnitetty. Visiirin pohja oli siten tarkoitettua heikompi, etenkin pystysuunnassa vaikuttavia voimia vastaan. Tämä on saattanut vaikuttaa myös pohjan painumisen määrään, koska heikompi pohja antoi vain vähän muodonmuutosvastusta pystyvoimia vastaan onnettomuuden aikana.

Visiirin sisällä on useita vaakasuurassa olevia likarajoja merkinä visiiriin nousseesta ja siellä seisoneesta vedestä. Öljyä, otaksuttavasti hydraulioöljyä, joka on vuotanut pohjalukon hydrauliliikasta, on kellunut veden pinnalla ja jättänyt jälkiään visiirin pystyseiniämiin ”vesirajoiksi”. Visiirin ja keulapiikin kannen välinen tiiviste ei ollut aina riittävän hyvä pitämään visiirin sisäpuolen alaosia kastumatta. Komissiolle on kerrottu, että muissa vastaavissa matkustaja-autolauttoissa tämä on sangen tavallista, sillä keulapiikin kannen tiiviste kuluu ja vaurioituu helposti visiiriä avattaessa ja suljettaessa.

Komission johtopäätös on, että visiirin yleinen kunnossapito on ollut tyydyttävää. Visiirin teräsovat olivat vain hyvin vähäisessä määrässä ruosteiset eikä levyjen ohenemista tai kuoppakorroosiota ollut havaittavissa missään tutkimuksia varten irroitetuissa osissa.

15.10 Visiirin kiinnikkeiden rikkoutumistapa ja yhdistetty lujuus

Visiirin kiinnikkeiden murtumisjäljet viittaavat visiirin ylikuormittumiseen sekä liikkumiseen eteen ja ylös. Komissio on verrannut useita syyvaihtoehtoja visiirin kiinnikkeiden murtumiselle ja visiirin irtoamiselle ja on päätenyt siihen, että ulkoinen aallon isku synnytti näihin seurauksiin vaadittavat voimat.

ESTONIAN visiiri ei ollut täysin vesitiivis ja vettä tunkeutui visiirin sisään voimakkaassa vastaisessa ja sivuvastaisessa aallokossa, jossa laiva teki matkaa. Visiirin sisäpuolinen hydrostaattinen paine saisi aikaan resultoivan voiman, joka vaikuttaisi noin 45 asteen kulmassa eteen ja alas. Paine ja resultoiva voima suurensivat keulan pystyliikkeiden (kiihtyvyyksien) johdosta. Visiiriin mahtuva vesi ei olisi kuitenkaan saanut aikaan riittävän suuria visiirin kiinnikkeisiin kohdistuvia voimia niiden murtamiseksi. Esimerkkinä on laskettu, että 3 metrin korkeuteen visiirin sisälle noussut vesi aiheuttaisi noin 0,5 MN suuruisen resultoivan hydrostaattisen voiman.

Vihreä vesi visiirin kannella olisi voinut olla kriittinen johtuen epäedullisesta vipuvarresta, koska visiirin saranat olivat melko takana. Metri vettä kannella olisi kaksinkertaistanut visiirin painon, mutta kiinnikkeiden murtamiseen tarvittaisiin monta kertaa enemmän vettä. Mallikokeiden ja numeeristen simuloitien perusteella todennäköisyys, että kannella olisi vallinneessa merenkäynnissä ollut merkittävä vesimäärä, on mitätön.

Yleisesti ottaen vallinnut merenkäynti aiheutti harva se minuutti vain pieniä voimia, jotka synnyttivät sulkevia momentteja visiirin saranoiden suhteen. Visiirin keularangan alatukipiste ja kaksi terästukipalaa pohjan alla keulapiikin kannessa tuottivat tällöin tarvittavat tukivoimat. Mallikokeet osoittavat, että suurimmat sulkevat momentit yhdessä visiirin oman painon vaikutuksen kans-

sa olivat noin 8 MNm. Mikäli keularangan alatukipiste olisi kantanut tämän momentin yksin, jännitys keularangan alapäässä olisi ollut luokkaa 120 N/mm² puristusta, mahdollisesti lisäksi hieman taivutusjännityksiä. Mikäli visiirin lukot olisivat antaneet tukea tätä sulkevaa momenttia vastaan, tukivoimat olisivat suuntautuneet eteenpäin ja lenkit olisivat olleet puristuksessa. Vauriojäljet eivät tue tätä, joten sulkevaa momenttia ei ole pidetty kriittisenä kiinnikejärjestelmälle.

Kun resultoivat aaltovoimat ylittivät arvon 2–2,5 MN, suuntautui voiman vaikutusviiva sarana-akselin yli, jolloin syntyi edellytykset aaltojen aiheuttamalle avaavalle momentille. Onnettomuusolosuhteissa syntyi keskimäärin kymmenen minuutin välein tilanne, jolloin avaava momentti ylitti arvon 3 MNm, mikä ylitti visiirin omapainosta syntyvän sulkevan momentin. Suurempia aaltoja, joista aiheutui paljon suurempia avaavia momentteja, kohdattiin harvemmin. Avaavat momentit aiheuttivat vetäviä voimia lukkojen korvakkeisiin ja alas eteen suuntautuvia tukivoimia saranoihin. Sivuvastainen aallokko synnyttäisi epätasaisen voimajaon sivulukkojen välille ja tuulenpuoleinen sivu joutuisi ottamaan suuremman osuuden visiirin kiinnipitämistä varten vaadittavasta voimasta. Tämä on selvästi havaittavissa visiirin vaurioista, jotka osoittavat voimakasta liikkumista myötäpäivään ja vasemmalta oikealle.

Visiirin kiinnikejärjestelmä oli staattisesti määrittelemätön ja voimien jakautuminen kiinnikkeisiin riippui paitsi kiinnikealueiden jäykkyydestä myös vällyksistä. Tarkastelemalla erilaisia aaltokuormayhdistelmiä sekä vaihtelemalla voimien jakautumista kiinnikkeiden välillä on saatu arvio visiirin kiinnikejärjestelmän lujuudesta ennen jonkun kiinnikkeen murtumista. Kunkin kiinnikkeen yksittäinen lujuusarvio on annettu aikaisemmin tässä luvussa. Olettaen, että jokainen kiinnike toimi tehokkaasti ja käyttäen aaltovoiman ja syntyvien momenttien suhteen realistisia arvoja, jotka on mitattu sivuvastaisessa aallokossa

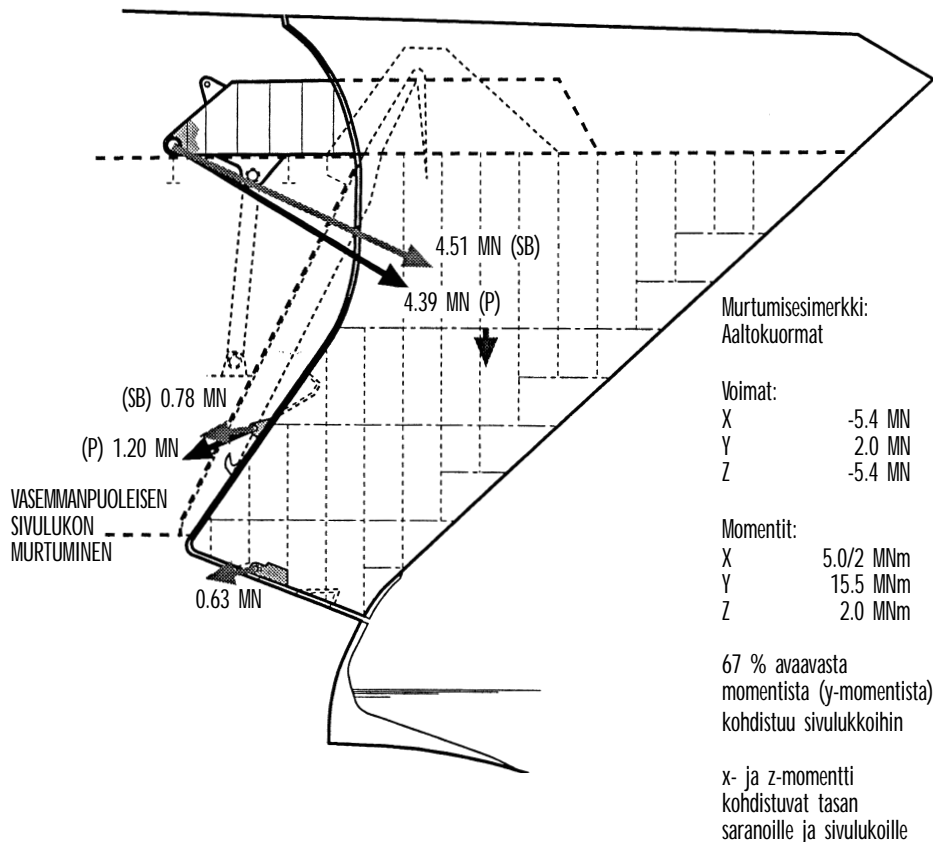
tehdyissä mallikokeissa on arvioitu, että kiinnikejärjestelmän yhdistetty lujuus ylitettäisiin aaltovoiman arvolla 7–9 MN, jolloin avaava momentti olisi 13–20 MNm.

Todennäköisimmin vasen sivulukko murtui ensin, mahdollisesti alemmalla aaltovoiman arvolla kuin seuraava kiinnike. Seuraava vaurio on voinut sattua leikkautumisena vasempaan saranaan tai vedon avulla pohjalukkoon. Arvio tarvittavasta aaltovoimasta on suurin piirtein sama näille molemmille tapahtumille. Näin ollen koko kiinnikkeiden vaurioiden sarja on voinut sattua samalla tai kahdella aaltoiskulla. Mikäli vain vasemmanpuoleinen sivulukko vaurioitui yhdessä aaltoiskussa ja muut kiinnikkeet säilyivät ehjinä, visiiri olisi pysynyt paikallaan ja näyttänyt vaurioitumattomalta pitkäänkin. Hypoteesia sivulukon vaurioitumisesta erikseen aikaisemmassa vaiheessa tukee samankaltainen visiirin kiinnikkeiden vaurioituminen DIANA II:ssa vuonna 1993.

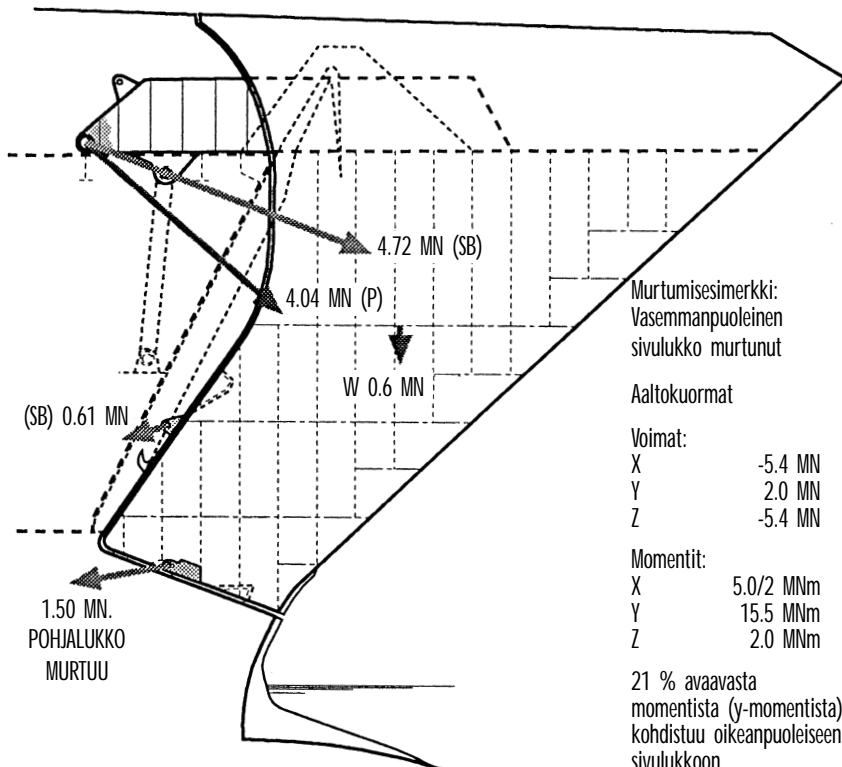
Kuva 15.4 esittää mahdollista visiirin tukivoimien jakautumista kiinnikkeiden välille, kun tuulenpuoleisen eli vasemman sivulukon murtoon tarvittava voima saavutetaan. Saranoissa vaikuttavat suuret voimat, mutta ne suuntautuvat osittain saranoiden vahvaan suuntaan, kun toisaalta tyvenen puoleinen eli oikea sivulukko ja pohjalukko kuormittuvat noin puoleen lujuudestaan. Kuva 15.5 esittää mahdollista voimien jakautumista, kun tuulenpuoleinen sivulukko on pettänyt, ja pohjalukko kuormittuu lujuuttaan vastaavalla voimalla. Tuulenpuoleisen saranan hitsin kriittinen jännitys saatetaan myös saavuttaa.

Lopullinen kiinnikkeiden murtuminen tapahtui jäljellä olevissa saranalenteissa sekä nostosylinteriteivisteessä oikealla puolella ja myös vasemman nostosylinterin kiinnikkeen irtoamisena sen jälkeen, kun visiiri pääsi vapaasti liikkumaan. Nostosylintereihin merkittäviä voimia on arvioitu syntyneen vasta, kun kaikki lukot olivat murtuneet. Suurin tarvittava aaltokuorma nostosylinterien murtamiseksi samanaikaisesti olisi mahdollisesti luokkaa 6 MN, mutta ne

Kuva 15.4 Vasemmanpuoleisen sivulukon murtumisen aiheuttavien reaktivoimien jakautumisen esimerkki



Kuva 15.5 Reaktivoimien jakautumisen esimerkki vasemmanpuoleisen sivulukon murruttua.



pettivät oletettavasti peräkkäin dynaamisissa olosuhteissa huomattavasti pienemmällä voimalla.

Ääriarvojakautuma aaltokuormille onnettomuuden aikaisissa olosuhteissa, joka on esitetty jaksossa 12.3, viittaa siihen, että 5 %:n todennäköisyydellä yksi ainoa aaltokuorma ylittäisi visiirin kiinnikkeiden teoreettisen lujuuden 30 minuutin aikana, kun laiva kulkee 14 solmun nopeudella sivuvastaisessa aallokossa, jossa merkittävä aallonkorkeus on 4,0–4,1 m. Todennäköisyys, että aaltovoimat ylittävän visiirin kiinnikkeiden lujuuden, kasvaa nopeasti aallonkorkeuden kasvaessa.

Komissio päätelee, että suurimmat aaltokuormitukset vallinneissa olosuhteissa olivat suurempia kuin visiirin kiinnikkeiden yhdistetty lujuus ja saivat siksi kiinnikkeet murtumaan ja lopulta visiirin irtoamaan laivasta.

Merkille pantavaa on, että visiirin kiinnikejärjestelmän lujuus oli samaa luokkaa suunnittelukuorman kanssa ja kohdalokas aaltokuormituksen taso syntyi sääolosuhteissa, jotka olivat vielä kaukana niistä, mitkä laivan voitiin olettaa joskus kohtaavan. Visiirin kiinnikejärjestelmän lujuuteen ei siten ollut rakennettu mitään varmuusvaraa.

15.11 Suunnittelunäkökohtia

Tutkittuaan laivan suunnittelua, valmistusta ja hyväksymismenettelyä komissio toteaa, ettei mikään näihin osallistunut taho katsonut visiirin kiinnikkeitä kriittisiksi komponenteiksi laivan turvallisuudelle. Ei ole kuitenkaan mitään merkkejä siitä, että nämä rutiinit olisivat poikenneet muihin Itämeren liikennettä varten suunniteltujen uudisrakennusten vastaavista rutiineista tuona aikana. On kuitenkin löytynyt tietoja, joiden mukaan 1970-luvulla muualla maailmassa visiirit kiinnikkeineen suunniteltiin perusteellisemmin ja katsottiin laivan turvallisuuden kannalta kriittisiksi.

ESTONIA rakennettiin sellaisen vuosikymmenen lopulla, jonka aikana laivansuunnittelussa ja -rakentamisessa tapahtui voimakasta kehitystä. Laivojen koko kasvoi, telakoiden teknologiaa uudistettiin ja uusia tietokonepohjaisia suoralaskentamenetelmiä otettiin käyttöön lujussuunnitteluun ja merenkäynnin aiheuttaman kuormituksen arviointiin suunnitteluprosessin osina. Seurauksena oli, että alusten käyttökokemus jäi jälkeen teknisestä kehityksestä. Laivat ovat yleensä pitkälle optimoituja rakenteiden lujisuuden osalta ja kokemukset vaurioista, vaaratilanteista ja onnettomuuksista ovat aina olleet tärkeä lähtökohta menetelmien ja suunnitteluohjeiden kehittämisessä.

Ro-ro-matkustaja-autolautat kehittyivät Itämerellä hyvin nopeasti 1970-luvulla, kuten luvussa 10 on selostettu. ESTONIA oli rakennusaikanaan yksi suurimmista koskaan rakennetuista, keulavisiirillä varustetuista aluksista. Kokemukset samantyyppisistä rakenteista olivat ilmeisen rajalliset.

Tämän päivän tietämyksellä on helppo löytää useita arvostelun kohteita visiirin suunnittelussa. Jos joku olisi kuitenkin rationaalisesti analysoinut tätä konseptia, samoja kohtia olisi voitu arvostella myös laivan suunnittelun aikana. Seuraavassa luetellaan joitakin tällaisia, komission tärkeinä pitämiä suunnittelunäkökohtia.

Kaikki keulaportin kiinnikkeet tulee katsoa voimakkaasti kuormitetuiksi suunnittelukohteiksi ja ne on pantava seikkaperäiseen kuormitus- ja lujuusanalyysiin.

Kohteista, joissa käyttökokemukset ovat rajalliset ja suunnitteluohjeista saa vain vähän tukea, on äärimmäisen tärkeää tehdä vauriotapahtumien seurausanalyysi. Jopa hyvin alkeellinen seurausanalyysi olisi tässä tapauksessa kiinnittänyt huomion visiirin ja rampin riskialttiiseen yhteenkytkentään ja autokannelle päässeen veden aiheuttamiin seurauksiin visiirin kiinnikkeiden petettyä. Tuloksena olisi silloin ollut näiden kahden seinämän erottaminen toisistaan tai hyvin suuren lujuusmarginaalin rakenta-

minen visiirin kiinnikkeisiin.

Suunnittelukuorman arviointi ja sen jako tasan visiirin kiinnikkeille, mikä sai tukea myös eräiden luokituslaitosten tuonaikaisista suunnittelunormeista, oli vailla fysiikan tukea. Lasketut kiinnikevoimat eivät olleet tasapainossa ulkoisen kuormituksen kanssa eikä mitään tarkempia kuormitusten suuntia arvioitu. Johtuen siitä, että keulan suunnittelu-paine jaettiin tasan visiirin kuorelle, vinnosti vaikuttavaa aaltokuormitusta ei otettu edes huomioon. Komission mielipide on, että keskeisten kohteiden jopa hyvin yksinkertaisiin suunnittelulaskelmiin tulee sisällyttää eri suuntiin vaikuttavien voimien ja vaurioitumistapojen arviointi. Kun tukivoimat muodostavat staattisesti määräämättömän järjestelmän, tulisi joko suorittaa yksityiskohtainen laskenta kiinnikkeiden joustot huomioon ottaen tai varmistaa riittävä lujuus kiinnikejärjestelmän sellaisille eri osakokonaisuuksille, joita koskien laskelmat saadaan toimimaan voimien suhteen tasapainoisina.

ESTONIAN rakennetyypiltään tavanomaiset visiirin lukot olivat alttiit kulumiselle ja ruostumiselle lukkotappien ja -lenkkien osalta. Tämä johtaa kasvaviin välyksiin järjestelmässä. Lukot rakennetaan myös alun perin tietyin välyksin, jotta lukot toimisivat niitä avattaessa ja suljettaessa. ESTONIAN lukkojen välykset olivat luokkaa 10 mm. Muista aluksista tunnetaan suuria, jopa 35 mm:n välyksiä. Yhteenkytkettyjen osien välisistä välyksistä on seurauksena, ettei kosketuksista johtuvien voimien jakautumista kiinnikkeiden välillä voida arvioida, jolloin ääritilanteessa koko ulkoinen aaltokuorma saattaa kohdistua yhteen yksittäiseen lukkoon. Dynaamisesti kuormitetun kytkennän välitys johtaa aina nopeutuneeseen kulumiseen ja mahdollisesti kiinnikkeiden väsymiseen. Tämän vuoksi komissio katsoo, että visiirin kiinnikkeet tulisi suunnitella niin, että ne voidaan lukita välyksettä. Keulaportit tulisi voida kiristää suljettuina liittymäpintojaan vasten.

ESTONIAN visiirin kiinnikkeiden yksityiskohdissa oli rakenteellisia heik-

kouksia, erityisesti siksi, että kuorman kanssa yhdensuuntaisten rakennepoikkipintojen alemmaa lujuutta leikkauksessa altistettujen yhtä suurten poikkipintojen lujuuteen verrattuna ei ollut otettu huomioon lujussuunnittelussa. Saranat olivat heikkoja, sillä pystyvoimien aiheuttama kuormitus kohdistui laakeritukiholkkien kiinnityspienahitsein leikkauksena ja saranalenkkeihin taivutuksena. Sivulukon korvake aiheutti visiirin takalevyyn leikkausta kaikilla kuormitustavoilla. Pohjalukon murtovoimaa olisi rajoittanut visiirin puoleisen korvakkeen kärjen leikkautuminen, vaikkakin keulapiikkikannen lukko olisi hitsattu paremman standardin mukaisesti.

15.12 Suunnitteluvaatimusten ja toteutettujen rakenteiden vertailu

Visiirin kiinnikkeitä koskevat suunnitteluvaatimukset merkitsivät yleensä noin 1 MN suuruista suunnittelukuormaa kiinnikettä kohti perustuen siihen, että keulakuorma oli jaettu tasan kiinnikkeiden kesken. Tämä koskee tapaa, jolla telakka oli määritellyt kuormat, mutta tämä oli tuona aikana myös joidenkin luokituslaitosten suunnittelunormien mukaista.

Kiinnikekohtaisen murtokuorman olisi 1 MN suuruisen suunnittelukuorman tasolla pitänyt olla luokkaa 3 MN kiinnikettä kohden, kun lujuuslaskenta perustui tavanomaiselle yksinkertaiselle laskennalle, missä arvio perustetaan materiaalin murtolujuuden ja sallitun suunnittelujännityksen väliseen suhteeseen. Tämä suhde ei päde kuitenkaan sellaiseen, jos laite koostuu useasta osasta ja murtuminen on usean toisiaan seuraavan osatapahtuman sarja.

Asennetun mukaisten pohja- ja sivulukkojen murtokuormat on määritetty noin 1,5 MN:n suuruisiksi kiinnikettä kohden. Tässä luvussa on kuitenkin kuor-

mituksen suunnasta ja murtumistavasta aiheutuvaa pientä epävarmuutta.

Komission mielestä on ilmeistä, että visiirin kiinnikkeiden murtokuorma olisi ollut huomattavasti suurempi, jos kuorman kanssa yhdensuuntaisten leikkauspintojen alempi lujuus olisi otettu huomioon ja kiinnikkeet olisi rakennettu suunnittelussa tarkoitettulla tavalla.

Suunnittelukuormat olivat kuitenkin alhaiset. Merkille pantavaa on myös, että laitteet – vaikkakin ne olisivat olleet täysin sen ajan suunnittelukäytännön mukaisia – eivät olisi kaikissa olosuhteissa kestäneet onnettomuusyönä syntyneitä hydrodynaamisia rasituksia, kun otetaan huomioon aallonkorkeuden kasvaminen yön kuluessa. Tätä kuvaavat mallikoikeissa saadut tulokset, joiden mukaan avaava momentti olisi ollut onnettomuushetken verrattuna kolminkertainen sivuvastaisessa aallokossa, jonka korkeus olisi ollut 5,3 m, laivan nopeuden ollessa 10 solmua.

15.13 Luokituslaitosten ja merenkulkuviranomaisten toiminnalle asetettavia vaatimuksia

Luvussa 11 mainitaan lukuisia visiirin rikkoutumisia. Nämä tapaukset ovat sellaisia, joista komissio on löytänyt tietoja ilman laajoja tutkimuksia. Nämä laivat liikennöivät pohjoismaisilla vesillä. Kohetuudella voidaan olettaa, että myös muualla on tapahtunut vastaavia rikkoutumisia.

Laivat, joiden visiirilaitteet rikkoutuivat, vahvistettiin useimmissa tapauksissa asianomaisista kohdista vaurion aiheuttaman välttämättömän korjauksen yhteydessä. Useissa tapauksissa myös sisäluksia vahvistettiin. Kuitenkin joissakin tapauksissa luokituslaitos oli tyytyväinen korjaukseen, jossa rikkoutuneen laitteen lujuus palautettiin alkuperäiselle tasolle. Näin meneteltiin esimerkiksi DIA-

NA II:lle tammikuussa 1993 tapahtuneen vaurion yhteydessä. Laiva oli siinä vaiheessa 13 vuotta vanha ja vaurio katsottiin ilmeisesti yksittäiseksi eikä mitään varoituksia annettu eikä liioin ryhdytty muihinkaan toimenpiteisiin.

Komissio on todennut, että asianomainen merenkulkuviranomainen oli vauriotapauksissa ollut yhteydessä luokituslaitokseen ja oli ollut tyytyväinen, kun lujuusvaatimuksia oli lisätty. Tämä oli koskenut uusia aluksia. Vahvistamistoimenpiteisiin taannehtivasti pakottavia, sääntöjä ei normaalisti hyväksytty merenkulkualalla. Tämä asenne hyväksyttiin sekä IMO:ssa että luokituslaitoksissa.

Komissio ei hyväksy tätä asennetta tapauksissa, jotka vaikuttavat vakavasti turvallisuuteen. Komissio on sitä mieltä, että kaikki todelliseen riskiin pohjautuvat parannukset on toteutettava taannehtivasti sekä IMO:n määräyksissä että luokituslaitosten säännöissä. Komissio toteaa myös, että tällaisiin toimiin on ryhdytty ESTONIAN onnettomuuden jälkeen.

