



Tutkintaselostus

C4/2009M

M/S SILJA EUROPA (FIN), oikeanpuoleisen peräsinakselin katkeaminen Ahvenanmaan saaristossa 22.11.2009

Tämä on lyhennelmä suomenkielisestä laajasta tutkintaselostuksesta. Lyhennelmä julkaistaan suomeksi, ruotsiksi ja englanniksi.

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

**Onnettomuustutkintakeskus
Olycksutredningscentralen
Safety Investigation Authority, Finland**

Osoite / Address: Sörnäisten rantatie 33 C
FIN-00500 HELSINKI

Adress: Sörnäs strandväg 33 C
00500 HELSINGFORS

Puhelin / Telefon: (09) 1606 7643
Telephone: +358 9 1606 7643

Fax: (09) 1606 7811
Fax: +358 9 1606 7811

Sähköposti/ E-post/ Email: onnettomuustutkinta@om.fi

Internet: www.onnettomuustutkinta.fi

Käännös / Översättning / Translation Minna Bäckman

ISBN 978-951-836-362-3 (Nid.)

ISBN 978-951-836-363-0 (PDF)

ISSN 1797-8122 (Nid.)

ISSN 2242-7724 (PDF)

ISSN-L 1797-8122

Multiprint Oy, Vantaa 2012

TIIVISTELMÄ

M/S SILJA EUROPA (FIN), OIKEANPUOLEISEN PERÄSINAKSELIN KATKEAMINEN AHVENANMAAN SAARISTOSSA 22.11.2009

Matkalla Tukholmasta Turkuun 22.11.2009 alkoi M/S SILJA EUROPAn ohjailussa esiintyä normaalia poikkeavaa käännöksissä Sottungan länsipuolella noin klo 15.17. Aluksessa oli noin 1660 henkilöä. Kello 15.40 alus päätettiin ohjata läheiseen kulkuväylän levennykseen ja päällikkö kutsuttiin komentosillalle. Hän ryhtyi ohjaamaan alusta ohjailupotkureilla ja alus saatiin pysähtymään levennykseen. Hinaajan avustamana alus ajettiin myöhemmin Airiston selälle, missä sukeltaja totesi ohjailuvaikeuksien syyksi oikeanpuoleisen peräsinakselin katkeamisen.

Tutkinnassa tehdyn selvityksen perusteella peräsinakseli katkesi noin klo 15.10. Peräsinakselin katkeamisesta ei saada suoraa indikaatiota komentosillalle, vaan vika on havaittavissa vain välillisesti aluksen liiketilaa, muuttunutta ohjailukäyttäytymistä ja ohjailusuureita tarkkailemalla. Komentosiltamiehistö havaitsi aluksen ohjailussa normaalia poikkeavaa ensimmäisessä suuremmassa käännöksessä katkeamisen jälkeen noin klo 15.17. Matkaa jatkettiin ja komentosiltamiehistön tietoisuus tilanteen vakavuudesta kehittyi vähitellen lisähavaintojen kertyessä aluksen ohjailuvaikeuksista. Peräsinakselin katkeaminen on kuitenkin hyvin harvinaista, eikä sitä osattu kuvitella ohjailuvaikeuksien syyksi. Syntynyt tilanne oli niin epäselvä, että siltamiehistöltä kului aikaa havaintojen keräämiseen ennen päätöstä matkan keskeyttämisestä. Vaikka vian vakavuuden ymmärtäminen vei aikaa ja matkaa jatkettiin heikentyneellä ohjauskyvyllä, miehistö, joka oli simulaattoriharjoituksissa saanut valmiuksia ohjailla poikkeavasti käyttäytyvää alusta, sai aluksen pidettyä väylällä ja pysäytettyä sen lopulta turvallisesti.

Onnettomuuden jälkeisessä telakoinnissa vuonna 2009 todettiin oikeanpuoleisen peräsinakselin katkenneen taivutusväsymiskuormituksen johdosta. Molempien peräsien alalaakerin pesän suuret syöpymät oli korjattu vuoden 2004 telakoinnissa valuepoksitaytteellä. Alalaakereihin oli syntynyt syöpmisen johdosta huomattava tyhjä tila, poikittainen liikevara, minkä johdosta peräsinakselit saattoivat taipua suunniteltua enemmän. Vuoden 2009 telakoinnissa havaittiin, että oikeanpuoleisen alalaakerin valuepoksitäyte oli kokonaan hävinnyt, joten suuri poikittainen liikevara oli nyt vain tässä peräsimestä. Tällöin peräsinvoimien akseliin synnyttämät muuttuvat jännitykset ylittivät huomattavasti suunnitteluarvot. Peräsinvoimat toistuvat linjaliikenteessä liikennöintikausittain samanlaisina. Sen sijaan näiden voimien aiheuttamat jännitykset riippuvat alalaakerin poikittaisesta liikevarasta. Liikevaran kasvaessa jännitys peräsinakselissa kasvaa.

Peräsinakselin väsymismurtuma oli mahdollinen kolmen samanaikaisesti vaikuttaneen tekijän johdosta. Kaksi tärkeintä näistä, tavallisuudesta poikkeavaa, olivat oikeanpuoleiseen akseliin sen valmistusvaiheessa jäänyt terävä, 0,3 mm syvyinen olake ja alalaakerien rakenteesta johtunut laakeripesien pitkään jatkunut galvaaninen korroosio. Nämä yhdessäkin olisivat aiheuttaneet vaurion, mutta murtumisprosessia nopeutti merkittävästi kolmantena tekijänä vaikuttaneet peräsien resonanssivärähtelyt.

Väsymismurtuma kehittyi 17 vuoden aikana kolmessa vaiheessa. *Ensimmäisessä vaiheessa* kummankin peräsinakselin alalaakerin pesä syöpyi galvaanisen korroosion johdosta. Tämän teki mahdolliseksi pesän rakenne, jossa pronssiholkki ja pesän valuteräs olivat ilman eristystä yhteydessä toisiinsa. Pesän syövyttyä holkkien ympäriltä, holkit saattoivat pyöriä. Pyöriminen kulutti syöpymisruostetta, mikä nopeutti huomattavasti liikevaran kasvua. Alalaakerien liikevarat sivusuunnassa olivat olleet jonkin aikaa moninkertaiset mitoitusarvoon verrattuina, minkä johdosta peräsinakselin jännitykset olivat olleet normaalia suuremmat. Prosessin ensimmäinen vaihe kulutti suuren osan, tutkinnassa tehtyjen laskelmien mukaan jopa 85 %, oikeanpuoleisen akselin väsymiseliniästä.

Syöpymiset havaittiin vasta vuoden 2004 telakoinnin yhteydessä. Alalaakerin pesä korjattiin täytämällä syöpynyt tila valuepoksilla ja laakeriholkit vaihdettiin uusiin. Lisäksi peräsinakselin ylälaakerien ympärykset (valukappaleen pinta) rungon ulkopuolelta tarkastettiin magneettijauheella. Peräsinakseleissa mahdollisesti olleita alkavan väsymismurtuman hiushalkeamia ei ollut mahdollista havaita, koska tarkastus ei ulottunut peräsinakseleihin.

Prosessin *toisessa vaiheessa* valuepoksen asennuksen jälkeen alalaakerien pesien syöpyminen jatkui, mutta aiempaa hitaammin epoksin eristävän vaikutuksen johdosta. Vielä vuoden 2007 telakoinnissa epoksi näytti ehjältä.

Kolmannessa vaiheessa oikeanpuoleisen alalaakerin valuepoksi rikkoontui kokonaan. Holkki irtosi ja saattoi nyt pyöriä pesässä akselin mukana. Tämän johdosta alalaakeriin syntyi toisen kerran suuri liikevara, peräsinakselin jännitykset nousivat suuriksi ja akseli katkesi. Kolmas vaihe kesti laskelmien mukaan korkeintaan muutaman päivän.

Onnettomuustutkintakeskus suosittelee *Bureau Veritakselle ja muille luokituslaitoksille*, että välysten mittausmenetelmiä täsmennetään ja menetelmä kirjataan luokituslaitoksen tarkastuskertomukseen sekä aluksen korjaushistorian perusteella päätetään, onko syytä tehdä perusteellisemmat peräsinlaitteiston tarkastukset. Lisäksi suositellaan luokituslaitosten harkitsevan täydennystä säätöihinsä koskien peräsinakselin irrottamista ja tarkastamista määrävälein. Valuepoksen käyttö alalaakerin korjauksessa tulee olla väliaikainen ratkaisu ja korjaustarpeeseen johtanut syy tulee selvittää oikean korjausratkaisun suunnittelua ja toteutusta varten.

Varustamolle suositellaan, että simulaattorikoulutusta tulee kehittää siten, että koulutettavien valmiuksia parannetaan tilanteen systemaattiseen selvittämiseen ja analysointiin aluksen ohjailujärjestelmien toimiessa poikkeavasti. Tavoitteena tulee olla matkan keskeyttämisestä tai sen jatkamisesta tehtävän päätöksen tueksi kerättävän tiedonhankinnan kehittäminen.

SAMMANDRAG

M/S SILJA EUROPA (FIN), BROTT AV STYRBORDS RODERAXEL I ÅLANDS SKÄRGÅRD DEN 22 NOVEMBER 2009

SILJA EUROPA var på väg från Stockholm till Åbo den 22 november 2009 då styrningen började te sig annorlunda än vanligt i girar väster om Sottunga, ca kl. 15.17. Det fanns ca 1660 personer ombord på fartyget. Kl. 15.40 beslöt man att styra fartyget till en närbelägen farledsbreddning och befälhavaren kallades till kommandobryggan. Han började styra fartyget med styrpropellrar och lyckades stanna fartyget i breddningen. Med hjälp av bogserbåtar kördes fartyget senare till Erstan, där en dykare konstaterade att manövreringssvårigheterna berodde på att styrbords roderaxel hade gått av.

Enligt utredningen gick roderaxeln av ca kl. 15.10. Man får ingen direkt indikation om brottet av roderaxeln till kommandobryggan, utan felet kan upptäckas endast indirekt genom att observera fartygets rörelsetillstånd, dess förändrade manöverbarhet och styrstorheter. Bryggbesättningen lade märke till att manövreringen av fartyget var annorlunda än normalt i den första större giren efter att roderaxeln hade gått av, ca kl. 15.17. Man fortsatte resan och bryggbesättningens medvetenhet om situationens allvar utvecklades efter hand då man gjorde mera iakttagelser av manövreringssvårigheterna. Det är dock ytterst sällsynt att en roderaxel går av och man kunde inte föreställa sig det som orsak till styrproblemen. Situationen som uppstod var så pass oklar att det tog tid för bryggpersonalen att samla iakttagelser innan beslutet att avbryta resan fattades. Fastän det tog tid att förstå felets allvar och resan fortsattes med försämrad styrförmåga, lyckades besättningen, som i simulatorövningar hade byggt upp färdigheter i att styra ett fartyg med avvikande beteende, hålla fartyget på farleden och slutligen stanna henne på ett säkert sätt.

I dockningen efter olyckan fastställdes det att styrbords roderaxel hade gått av p.g.a. utmattningsbelastning till följd av böjningar. De stora korrosionsskadorna i rodertappslagrens lagerhus i bägge rodren i samband med dockningen år 2004 hade reparerats med epoxifyllning. Ett betydande tomt utrymme, ett tvärgående fritt utrymme, hade uppstått i rodertappslagren p.g.a. korrosion, vilket ledde till att roderaxlarna kunde böjas mer än avsett. I dockningen år 2009 upptäcktes det att gjutepoxifyllningen helt hade försvunnit från styrbords rodertappslager, dvs. det stora transversa fria utrymmet fanns endast i detta roder. Då överskred de varierande spänningarna förorsakade av roderkrafterna på styrbords axel avsevärt planeringsvärdena. Roderkrafterna upprepas likadana i linjetrafik varje trafikeringsperiod. Däremot beror spänningarna genererade av dessa krafter på rodertapplagrets transversa fria utrymme. Då det fria utrymmet växer, ökar spänningen i roderaxeln.

Roderaxelns utmattningsbrott möjliggjordes av tre samtidiga faktorer. De två viktigaste av, som avvek från det normala, var en 0,3 mm djup ansats som hade lämnats kvar i styrbords axel under tillverkningskedet, samt lagerhusens långvariga galvaniska korrosion som berodde på rodertappslagrens struktur. Redan dessa faktorer tillsammans skulle ha lett till skadan, men brytningsprocessen blev betydligt snabbare p.g.a. den tredje faktorn, dvs. rodrets resonansvibrationer.

Utmattningsbrottet utvecklades under 17 år i tre olika faser. *I den första fasen* korroderades lagerhusen till bägge roderaxlarnas rodertappslager p.g.a. galvanisk korrosion. Lagerhusens struktur möjliggjorde detta. I lagerhuset var bronsbussningen och lagerhusets gjutstål i kontakt med varandra utan isolering. Efter lagerhusets korrosion omkring bussningarna, kunde de rotera. Rotationen förslet korrosionsrosten, vilket gjorde ökningen av det fria utrymmet betydligt snabbare. P.g.a. korrosionen hade rodertappslagrens transversa fria utrymmen redan en tid varit flerdubbelt jämfört med märkvärdet, vilket ledde till att spänningarna i roderaxlarna hade varit större än normalt. Processens första skede åt upp en stor del av utmattningstidslängd i styrbords axel, t.o.m. 85 % enligt kalkylerna gjorda under utredningen.

Korrosionsskadorna upptäcktes först i samband med dockningen år 2004. Rodertappslagrets lagerhus reparerades genom att fylla det korroderade utrymmet med gjutepoxi och lagerbussningarna byttes till nya. I tillägg inspekterades skrovet omkring roderaxlarnas övre lagren (ytan av gjutet) med magnetisk pulver. De hårsprickor som möjligen fanns i roderaxeln p.g.a. utmattningsbrottet som var i sitt inledande skede var omöjligt att observera, eftersom granskningen inte nådde till roderaxlarna.

I processens *andra fas* fortsatte korrosionen av rodertappslagrens lagerhus efter att gjutepoxin hade installerats, men processen var långsammare än tidigare p.g.a. epoxins isolerande inverkan. Ännu i dockningen år 2007 såg epoxin hel ut.

I den tredje fasen gick gjutepoxin i styrbords roderstopplager helt sönder. Bussningen losnade och kunde nu rotera i lagerhuset med axeln. Detta ledde till att det för andra gången uppstod ett stort fritt utrymme i rodertappslaget, spänningarna i roderaxeln blev höga och axeln gick av. Enligt beräkningarna varade den tredje fasen högst några dagar.

Olycksutredningscentralen rekommenderar för Bureau Veritas och andra klassifikationssällskap att mätmetoderna för spelrum preciseras och att den använda metoden registreras i klassifikationssällskapets besiktningsrapport samt att det på basis av fartygets reparationshistoria följs upp om det finns skäl att utföra en mer grundlig granskning av roderinrättningen. Därtill föreslås att klassifikationssällskapen borde överväga komplettering av sina regler så att roderaxeln löst-
agas och inspekteras på specificerat mellanrum. Användningen av gjutepoxi i reparationer av rodertappslaget bör vara en tillfällig lösning och orsakerna som ledde till reparationsbehovet skall utredas för att planera ett korrekt reparationssätt och utförande av reparationen.

Rederiet rekommenderas utveckla simulatorskolningen så att de utbildades beredskap av en systematisk klarläggning och analysering av en sådan situation då fartygets manöversystem fungerar på ett avvikande sätt förbättras. Målsättningen skall vara att utveckla insamlandet av den information som används som stöd för beslut att avbryta eller fortsätta resan.

SUMMARY

M/S SILJA EUROPA (FIN), BREAKING OF THE STARBOARD RUDDER SHAFT IN THE ALAND ARCHIPELAGO ON 22 NOVEMBER 2009

The M/S SILJA EUROPA was on her way from Stockholm to Turku on 22 November 2009 when irregularities in the manoeuvring of turns began to occur west of Sottunga at approx. 15:17. There were approx. 1660 persons onboard the vessel. At 15:40 it was decided that the vessel would be manoeuvred to a nearby extension of the shipping channel, and the Master was called to the navigating bridge. He started to manoeuvre the vessel by using thrusters and succeeded in stopping the vessel in the extension. The vessel was later taken to the Airisto open sea with tug assistance. There a diver concluded that the difficulties in manoeuvring were caused by the breaking of the vessel's starboard rudder shaft.

On the basis of the analysis completed in the investigation, it can be concluded that the rudder shaft broke at approx. 15:10. The breaking of a rudder shaft does not cause any direct indication on the navigating bridge; the failure can be detected only indirectly by observing the vessel's motion state, its changed manoeuvring behaviour and the manoeuvring variables. The bridge crew noticed manoeuvring irregularities in the first major turn after the failure from approx. 15:17 onwards. The voyage was continued and the bridge crew grew gradually aware of the gravity of the situation as they got more observations of the manoeuvring difficulties. The breaking of a rudder shaft is, however, highly unusual so it was not even considered to be the reason for the manoeuvring difficulties. The situation was so unclear that it took time for the bridge crew to gather observations before the decision to interrupt the voyage was made. Even if it took time to understand the severity of the situation and the voyage was continued with reduced manoeuvrability, the crew, who had in simulator training got readiness to steer a vessel with irregular behaviour, managed to keep the vessel in the fairway and finally to stop her in a safe manner.

In the docking after the accident in 2009 it was found out that the starboard rudder shaft had broken because of bending fatigue stresses. The extensive corrosion on the pintle bearings housing of both rudders had been repaired with cast epoxy filling in the docking in 2004. The corrosion had caused in the pintle bearings a significant empty space, a transverse free play, which might have made the rudder shafts bend more than intended. In the docking in 2009 it was discovered that the cast epoxy filling had disappeared entirely of the starboard side pintle bearing thus the large transverse free play was now only on this rudder. The changing stresses generated by the rudder forces on the shaft then considerably exceeded the design values. In scheduled traffic rudder forces recur similar each service period. The stresses caused by these forces depend, however, on the transverse free play of the pintle bearing. When the free play increases, the stress in the rudder shaft grows.

Three factors working simultaneously made the bending fracture of the rudder shaft possible. The two most important of these are anything but common. Firstly, in the production stage a sharp, 0.3-mm-deep notch was left on the starboard shaft and, secondly, there was sustained galvanic corrosion in the bearing housings caused by the structure of the pintle bearings. These two together would have been enough to cause the failure, but the breaking process was significantly accelerated by a third factor, i.e. the resonant vibration of the rudder.

The fatigue breakage developed in 17 years in three stages. *In the first stage* the housing of the pintle bearings of both rudder shafts corroded because of galvanic corrosion. This was made possible by the structure of the housing, in which a bronze bush and the cast steel of the housing were in contact without any insulation. After the housing had corroded around the bushes, they could rotate. The rotation wore the corrosion rust and this accelerated significantly the increase of free play. Because of the corrosion, the transverse free plays of the pintle bearings had for quite a while been manifold when compared with the rated value, which had caused the stresses in the rudder shafts to be higher than normally. The first stage of the process used a large part of the fatigue life of the starboard shaft, up to 85% on the basis of the calculations made in connection with the investigation.

The corrosion was not detected until in the docking in 2004. The pintle bearing housing was repaired by filling the corroded space with cast epoxy and the bearing bushes were replaced with new ones. Additionally, the hull areas (the surface of the cast iron) around the upper bearings of the rudder shafts were inspected from outside. The hairline cracks of the early fatigue breakage then possibly existing in the rudder shafts were impossible to be detected, because the inspection did not include the rudder shafts.

In the *second stage* of the process, the corrosion of the pintle bearing housings continued after the installation of cast epoxy, but the process was slower because of the insulating effect of the epoxy. In the docking in 2007 the epoxy still looked intact.

In the third stage the cast epoxy of the starboard pintle bearing broke entirely. The bush came loose and could now rotate in the housing due to the axle rotation. Therefore a large free play was generated in the pintle bearing for the second time, the stresses in the rudder shaft became high and the shaft broke. According to the calculations, the third stage only took a couple of days.

The Safety Investigation Authority of Finland recommends to *Bureau Veritas and other classification societies* that the measuring methods concerning clearances be specified and the method be entered into the inspection report of the classification society, and that the reparation history of a vessel be used as the basis for deciding whether a more detailed inspection of the steering gear is in order. In addition, it is suggested that classification societies consider adding an inspection of a removed rudder shaft at specified regular intervals in their rules. The use of cast epoxy when repairing a pintle bearing must be a temporary solution and the reason for the need for repair must be established in order to plan and realise a correct repair method.

It is recommended to the shipping company that simulator training should be developed further in such a way that the preparedness of the trainees to work out and analyze in a systematic way a situation in which the maneuvering systems of the vessel do not function in a normal way will improve. The objective must be the development of gathering data to support the decision-making on whether a voyage should be interrupted or continued.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	I
SAMMANDRAG.....	III
SUMMARY	V
ALKUSANAT	IX
1 TAPAHTUMAT JA TUTKIMUKSET	1
1.1 Aluksen päätiedot.....	1
1.1.1 Yleistietoja	1
1.1.2 Miehistys	1
1.1.3 Komentosilta ja sen laitteet.....	1
1.1.4 Kuljetuskoneisto	3
1.1.5 Peräsimet ja muut ohjailulaitteet.....	3
1.1.6 Korroosiosuojaus	8
1.1.7 Matkustajat ja lasti	8
1.2 Onnettomuusmatka	8
1.3 Aluksen vauriot.....	12
1.4 Pelastus- ja hälytystoiminta	14
1.5 Onnettomuuden turvallisuustutkinta	14
1.5.1 Aluksen ja peräsimien historia	15
1.5.2 Laakerivälykset ja alalaakerin liikevara.....	17
1.5.3 Alalaakerin liikevara ja peräsinakselin jännitykset	22
1.5.4 VDR-datan keruu ja analysointi	23
1.5.5 Peräsimien tutkiminen – väsymisvaurioon johtaneet tekijät.....	24
1.5.6 Alalaakerin korroosio	28
1.5.7 Peräsimen värähtely	28
1.5.8 Peräsimen kavitaatio	30
1.6 Peräsinakselin väsymisprosessi.....	30
1.6.1 Vaikuttavat voimat ja peräsinakselin jännitykset.....	31
1.6.2 Luokituslaitosten mitoitusperusteet.....	32
1.6.3 Simuloidut staattiset voimat	32
1.6.4 Staattisten ja syklisten voimien yhdistäminen	32
1.6.5 Voimien muunto jännityksiksi.....	33
1.6.6 Peräsinakselin väsymislujuuden arviointi.....	34
1.6.7 Peräsinakselin elinikien arviointi	35



1.7	Arvio tutkinnassa käytetyn laskentamenettelyn luotettavuudesta	36
1.8	Toimintaa ohjaavat säädökset ja määräykset	37
2	ANALYYSI	39
2.1	SB akselin murtumiseen vaikuttaneet tekijät	39
2.2	Analyyysin pääaiheet	40
2.2.1	Korjaustapa ja sen merkitys	41
2.2.2	Vuoden 2004 korjaustavan arviointia	42
2.3	Yhteenvedo murtumisprosessista	43
2.4	Laivan hallinta onnettomuusmatkalla	45
2.4.1	Akselin katkeamisen ajankohta	45
2.4.2	Tilanteen havainnointi ja hallinta	46
2.4.3	Arvio tilanteen hallinnasta	51
3	JOHTOPÄÄTÖKSET	53
3.1	Toteamukset	53
3.2	Tapahtuman syyt	54
3.3	Muita turvallisuushavaintoja	55
4	TOTEUTETUT TOIMENPITEET	57
5	TURVALLISUUSSUOSITUKSET	59

LIITTEET

Liite 1. Yhteenvedo saaduista lausunnoista

M/S SILJA EUROPA (FIN), oikeanpuoleisen peräsinakselin katkeaminen Ahvenanmaan saaristossa 22.11.2009



Kuva 1. M/S SILJA EUROPA.

ALKUSANAT

Matkalla Tukholmasta Turkuun 22.11.2009 alkoi M/S SILJA EUROPAn ohjailussa esiintyä normaalia poikkeavaa käännöksissä Sottungan länsipuolella. Noin klo 15:40 jouduttiin ottamaan käyttöön hätäohjaus, mutta sekään ei auttanut. Alusta alettiin ohjata potkureilla ja ohjailupotkureilla ja se saatiin pysähtymään Långholmskobbenin ja Rönnskärin väliseen väylän leveään osaan. Teilin selällä alusta ajettiin myötäpäivään ellipsin muotoista reittiä odoteltaessa hinausapua. Päälikön apuun tilaama hinaaja UKKO saattoi aluksen Tervin ankkuripaikalle, jossa sukeltaja totesi oikeanpuoleisen peräsinakselin olevan poikki. Hinaajien UKKO ja KRAFT avustamina alus saapui Turkuun 23.11 klo 16:46. Alus vietiin telakalle Riikaan, jossa se osoittautui liian suureksi ja se siirrettiin Gdanskiin, Remontowa S.A. telakalle. Alus palasi liikenteeseen 19.12.2009.

Saatuaan tiedon onnettomuudesta Onnettomuustutkintakeskus päätti 24.11.2009 käynnistää tutkinnan ja määräsi tutkintalautakunnan puheenjohtajaksi vesiliikenneonnettomuuksien johtavan tutkijan Martti **Heikkilän** sekä jäseniksi tekniikan tohtori Sauli **Ahvenjärven**, tekniikan lisensiaatti Olavi **Huuskan** sekä ylikonemestari Ari **Niemisen**. DI Ville **Grönvall** nimettiin lautakunnan jäseneksi 27.9.2011. Asiantuntijoina ovat toimineet DI Jorma **Salonen** ja DI Markku **Hentinen** VTT:ltä.

Peräsinakselin katkeaminen on hyvin harvinainen onnettomuus. Tutkintaa aloitettaessa ei ollut käytettävissä teknistä perusmateriaalia samantyyppisistä tapauksista, joten sen toistumisen estämiseksi oli perehdyttävä laajasti tapahtuman tekniisiin taustoihin ja aluksen koko käyttöhistoriaan. Tutkinnasta tuli tavanomaista vaativampi ja tutkintasuunnitelmaa jouduttiin tarkentamaan useasti. Hitaasti kehittyneen vaurion syntyminen ensi vaiheessa yli kymmenen vuoden aikana oli mahdollista arvioida (ekstrapoloida) aluksella olleen matkatietojen tallentimen (VDR) yhden kauden pituisen rekisteröinnin avulla. Epoksilla tehdyn korjauksen korjaustekniikan ja korjauksen rikkoontumisen sekä peräsinakselin katkeamiseen johtaneen väsymisprosessin selvittäminen oli vaativa kokonaisuus.

Onnettomuustutkintakeskus on vaihtanut tietoja ja käynyt keskusteluja varustamon, Liikenteen turvallisuusviraston (entinen Merenkulkulaitoksen Meriturvallisuusosasto) ja aluksen luokittaneen luokituslaitoksen Bureau Veritasin kanssa.



Tutkintaselostusta koskevat lausunnot. Tutkintaselostuksen lopullinen luonnos lähetettiin 27.8.2012 Turvallisuustutkintalain (525/2011) 28 §:ssä tarkoitettua lausuntoa varten Liikenteen turvallisuusvirastolle, aluksen luokituslaitokselle ja varustamolle sekä aluksen komentosiltamiehistöille. Määräaikaan mennessä saatiin lausunnot Liikenteen turvallisuusvirastolta, aluksen luokituslaitokselta ja varustamolta sekä yhdeltä komentosiltamiehistön jäseneltä. Niistä tehty yhteenveto on tutkintaselostuksen liitteenä. Lausunnot on huomioitu tutkintaselostusta viimeisteltäessä.

Lähdemateriaali on taltioitu Onnettomuustutkintakeskukseen.

Tutkintaselostuksen lyhennetyn version on kääntänyt ruotsiksi ja englanniksi Minna Bäckman.

1 TAPAHTUMAT JA TUTKIMUKSET

1.1 Aluksen päätiedot

Tiedot perustuvat aluksen piirustuksiin, merionnettomuusilmoitukseen 7.12.2009 sekä päälystön haastatteluihin. Aluksen kotipaikka ja rekisteröintipaikka on Maarianhamina. Sen omistaa Tallink Autoexpress Ltd, Limassol Kypros ja sitä operoi Oy Silja Line Ab, Helsinki. Sen suurin sallittu matkustajamäärä on 3123, se on valmistunut Jos. L. Meyer Werft-telakalla Papenburgissa Saksassa vuonna 1993 ja sen luokituslaitos on Bureau Veritas.

1.1.1 Yleistietoja

Vetoisuus:	Brutto: 59914, Netto: 41309
Suurin pituus/Pituus L_{pp} :	201,78 m/171,6 m
Leveys:	32,00 m
Syväys:	6,80 m
Nopeus:	22,50 solmua

1.1.2 Miehistys

Aluksen kansi- ja konemiehistöä oli 41 ja palveluhenkilökuntaa 245. Vahdissa olivat merikapteenin pätevyys omaavat perämies vahtipääällikkönä ja linjaluotsi¹. Myös vahtipääälliköllä oli linjaluotsikirja kyseiselle väylälle. Linjaluotsien vahdinvaihto 22.11.2009 tehtiin klo 15.32, jolloin linjaluotsiksi tuli aluksen yliperämies.

Vahtipääällikkönä konevalvomossa toimi vahtikonemestarin pätevyys omaava kone-mestari. Lisäksi konevalvomossa oli moottorimies konevahtina.

1.1.3 Komentosilta ja sen laitteet

Alus kulki reittiä Turku-Långnäs-Tukholma-Maarianhamina-Turku, joka on reittisuunnitelmana ohjelmoitu integroidun navigointijärjestelmän automaattiohjauslaitteistoon. Automaattiohjaus kääntää peräsimiä ja nopeus säädetään koneiston ohjauskahvasta (Ka-MeWa), jonka automatiikka muuttaa samanaikaisesti potkurien kierroslukua ja lapakulmia. Satelliittinavigaattorista automaattiohjauslaitteisto saa paikkatiedon ja vertailee sitä tavoiteltuun reittitietoon tehden tarpeen mukaan säädöt. Käsi-ohjaus on pääasiassa käytössä satamaoperointien aikana, jolloin myös ohjailupotkurit voivat olla käytössä. Satamissa ohjailun tehostamiseksi oli käytössä peräsimeen asennettu Jastram-rulla.

¹ Linjaluotsi on aluksen perämies, jolla on kyseiselle väylälle luotsauslain mukainen linjaluotsin kirja.

Komentosillalla on normaalisti kaksi henkilöä, vahtipäällikkö ja linjaluotsi. Heidän paikansa on komentosillan etuosassa, kuva 2. Tärkeimmät näytöt ovat etuosan ohjauspaikkojen tutka ja ns. conning-näyttö² (kuvassa 8). Nämä näytöt ovat myös sivuohjauspaikoissa komentosillan sivustoilla. Lisäksi ikkunan yläpuolella ja katossa on näytöt muun muassa peräsinkulmille. Komentosillalla seurataan pääasiassa tutkaa ja varsinkin sen prediktoria; ts. ennustetta aluksen liikkeistä³. Normaalin käytännön mukaisesti näytöissä, syvyyttä lukuun ottamatta, on näkyvissä vain hetkellinen tieto.

Navigointilaitteet

Aluksessa on kaksi toisistaan riippumatonta integroitua navigointijärjestelmää tyypiltään Atlas Nacos 25-2 Intergrated Bridge System, johon kuuluvat muun muassa seuraavat tutkat: 2 kpl Atlas 9600 X-band 2 kpl Atlas 9600 S-band. Automaattiohjauslaitteina on 2 kpl ATLAS TRACKPILOT.



Kuva 2. Näkymä komentosillalla, aluksen ohjauspaikat. Kuvattu 24.11.2009 Turussa. Punaiset nuolet osoittavat tutkanäytöt (yksi näyttö on piilossa tuolin takana) ja keltaiset nuolet conning-näytöt. Keskellä on linjaluotsin (pääohjauspaikka), oikealla vahtipäällikön (monitoroiva navigaattori) ja vasemmalla päällikön tuoli.. Valkoinen nuoli näyttää peräsinkoneen paineakkujen käyttökonsolin, vivut oikealla ja vasemmalla.

² Conning Display, laivojen keskitetty hälytys-, turva- sekä informaatiojärjestelmän näyttöruutu on integroitu komentosillajärjestelmään. Ruutuun on koottu tärkeitä navigointiin ja laivan hallintaan liittyviä tietoja kuten aluksen paikka, nopeus, kul-kusuunta, peräsinkulmat, kääntymisnopeus, tuulitiedot, veden syvyys yhteen paikkaan. Tyypillisiä hälytyksiä ovat esimerkiksi seuraavat: tutkakohde liian lähellä, laiva ulkona asetetuista reittirajoista, ohjaushälytykset, navigointivaloissa vikaa, kom-passivika, koneautomaation hälytykset jne. Hälytyksiä voidaan kuitata yksittäin tai keskitetysti.

³ Aluksen liiketilän ennuste (prediktori) osoittaa aluksen sen hetkisen paikan ja asennon sekä liikkeen ennusteen nykyisten liiketilaparametrien pysyessä muuttumattomina valitun lyhyen ajan kuluttua (esim. yksi minuutti).

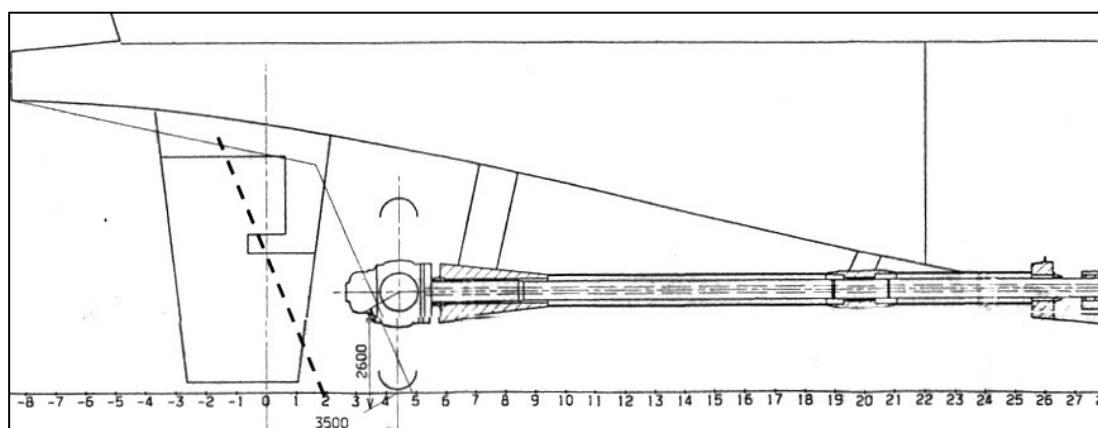
1.1.4 Kuljetuskoneisto

Kuljetuskoneiston kuuluu kaksi Kamewan ulospäin pyörivää säätösiipipotkuria. Yhtä potkuria käyttää alennusvaihteen kautta kaksi MAN B&W 6L58/64 dieselmoottoria á 7950 kW 428 1/min. Alennusvaihteet käyttävät myös akseligeneraattoria. Potkurien halkaisija on 5,0 m ja kierroslukualue 100–143 1/min, akseligeneraattorin ollessa kytkettynä 130 1/min. Potkurin lavan juuren keskiön etäisyys peräsinakselin keskiöstä on 3,5 m. Kuva 3a.

1.1.5 Peräsimet ja muut ohjailulaitteet

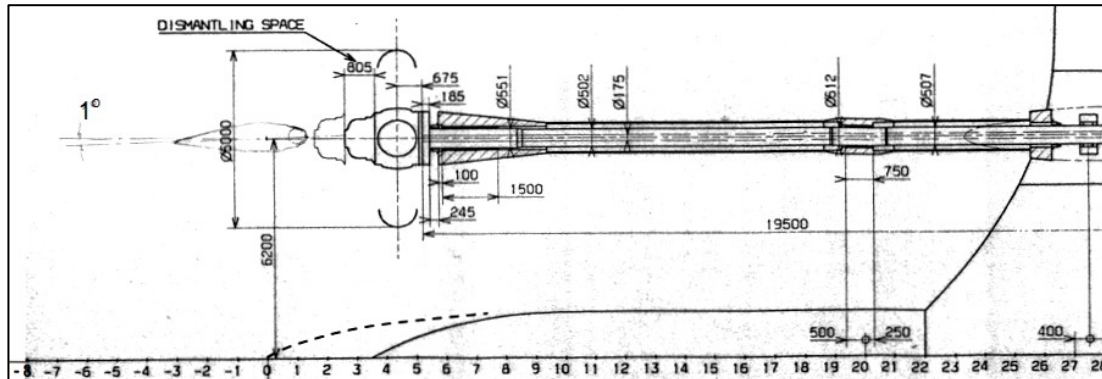
Aluksen oikeanpuoleinen (SB) peräsinakseli katkesi, mutta myös vasemmanpuoleisessa (BB) peräsimessä oli vaurioita⁴. Tämän vuoksi peräsinlaitteistot kuvaillaan melko laajasti.

Kuvat 3a ja 3b esittelevät aluksen peräsimien sijoituksen. Lisäksi aluksessa on kolme tunneli-tyyppistä ohjailupotkuria keulassa ja yksi perässä.



Kuva 3a. SILJA EUROPA:n potkuri-peräsinjärjestely. Peräevää pidennettiin jo 1993 keuhalla (katkoviiva). Arvioitu valokuvasta, joka on otettu 2.12.2009 Gdanskissa.

⁴ Jatkossa käytetään lyhennettä SB-peräsinakseli oikeanpuoleisesta peräsinakselista ja BB-peräsinakseli vasemmanpuoleisesta peräsinakselista.



Kuva 3b. SILJA EUROPA:n potkuri-peräsinjärjestely. Kaariväli on 800 mm.

Peräsimet.⁵ Aluksessa on kaksi sarviperäsintä⁶, kuva 4. Peräsimen lavan pinta-ala on noin 20 m² ja paino⁷ noin 21 tonnia. Peräsimet ovat linjassa potkureiden takana käännettynä yhden asteen sisäänpäin, kuva 3b. Aluksen käyttöönoton jälkeen vuonna 1993 todettiin, että sen ohjailuominaisuuksia, muun muassa suuntavakavuutta oli syytä parantaa. Ennen luovutusta peräsimiä oli jo pidennetty noin 30 cm ja keulaan oli lisätty ohjailupotkuri. Elokuussa 1993 alus telakoitiin Vuosaaressa. Tuolloin lisättiin pallekölit, peräevää pidennettiin, perään asennettiin ohjailupotkuri, keulaan keulaevä ja ruoripumppujen tehoa suurennettiin.

Peräsin on kiinnitetty yläosastaan peräsinakselin kartiomaiseen alaosaan puristusliitoksella. Yläosastaan peräsinakseli on hydraulisella kytkimellä kiinnitetty peräsin koneeseen. Peräsin on alempana kiinnitetty vastaavanlaisella puristusliitoksella ala-akselin kartiomaiseen alaosaan. Ala-akselin yläosa on laakeroitu peräsinsarveen.

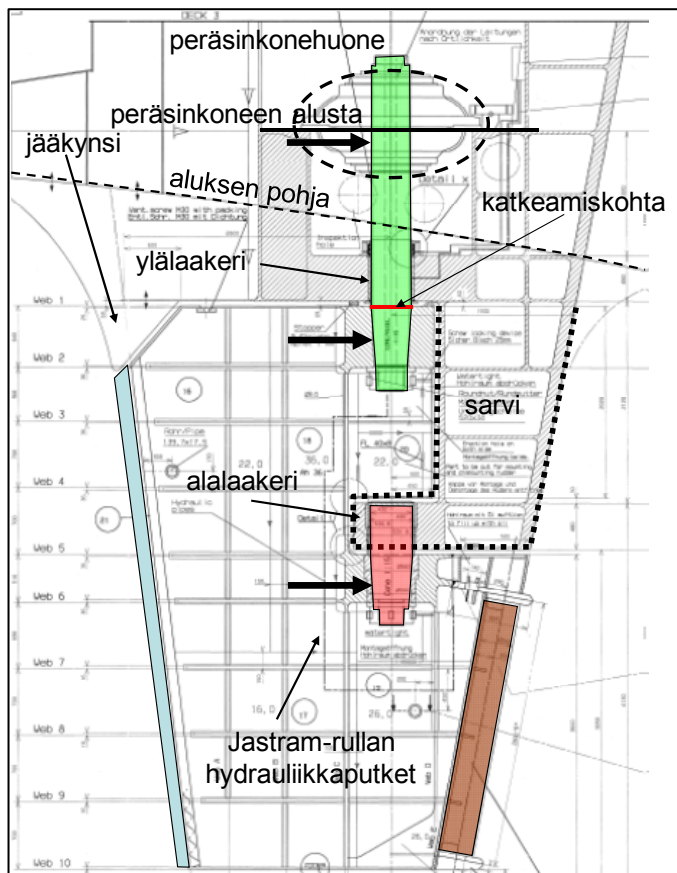
Peräsinsarvi on teräsvalukappale, joka jatkuu peräsimen yläpuolella virtaviivaisena aluksen runkoon yhtyvänä osittain levyrakenteisena ja ulottuu paikoin rungon sisälle (katso esimerkiksi kuva 4). Tämän rakenteen peräosa muodostaa ns. jääkynnen, joka suojaa peräsintä peruutettaessa jäissä. Peräsinsarvi ottaa vastaan pääosan peräsimen ja siten myös peräsinakseliin kohdistuvista taivutusvoimista, minkä johdosta peräsinakselin rasitukset pysyvät sallituissa rajoissa. Edellytyksenä on, että alalaakeri on kunnossa, jolloin peräsinsarvi rajoittaa peräsinakselin taipuman pieneksi.

SILJA EUROPA:n peräsimessä on kaksi liukulaakeria: peräsinakselin rasvavoideltu laakeri (ylälaakeri), kuva 5a ja ala-akselin merivesi voideltu laakeri (alalaakeri) peräsinsarvessa, kuvat 5b ja 5c.

⁵ Varustamolta saatiin peräsinlaitteiston piirustukset PDF-muodossa.

⁶ Sarviperäsimien asennustapoja on useita. Toinen yleinen peräsimintyyppi on ns. lapioperäsin, jossa sarvea ei ole.

⁷ Peräsimen piirustuksessa ilmoitettu paino, joka on tutkinnassa tulkittu nostopainoksi peräsintä irrotettaessa. Tällöin painoon sisältyy ala-akseli, mutta ei pienehköjä peräsimen levytyksen osia, jotka poistetaan irrotuksen yhteydessä.



Kuva 4. Peräsin. Vihreällä on näytetty peräsinakseli, punaisella ala-akseli (pintleakseli, alatappi), ruskealla Jastram-rulla ja sinisellä peräsimen jatko-osa, joka tehtiin jo ennen aluksen luovutusta. Paksut nuolet näyttävät puristusliitokset. Pisteviivalla on näytetty peräsinsarvi, joka liittyy kiinteästi aluksen runkoon virtaviivaisen välirakenteen kautta. Peräsinkone on ympyröity katkoviivalla. Vinoviivoituksella on näytetty valuosat.

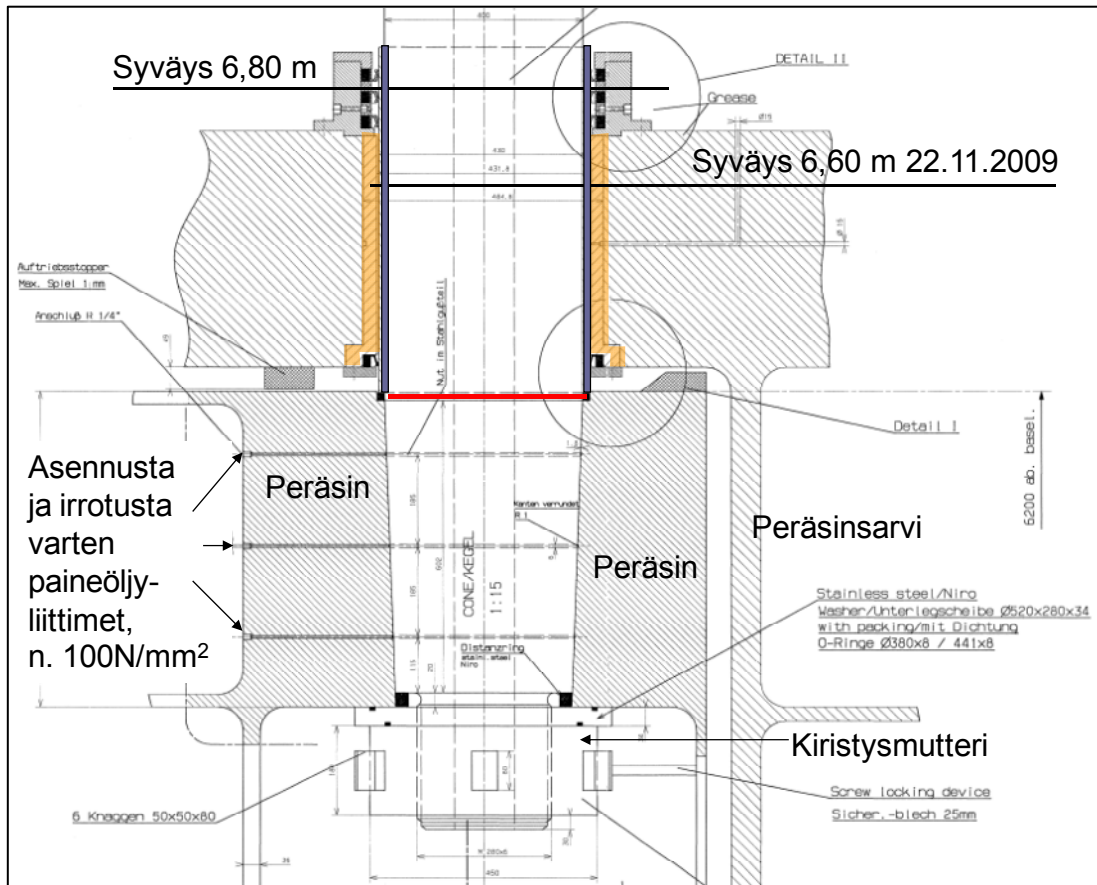
Peräsimen etureunassa, sarven alapuolella oli telakointiin vuonna 2009 asti hydraulisesti toimiva Jastram-rulla. Peräsiintä kääntää kiertomäntätyyppinen peräsinkone Tenfjord SR 782, jonka nimellinen vääntömomentti on 800 kNm ja

maksimikulma 2x68 astetta. Kääntymisnopeus 2x35 astetta on 28 s yhdellä ja 14 s kahdella pumpulla.

Molemmat laakerit ovat liukulaakereita, joissa laakerimateriaalina on pronssi. Vastinpin-tana on laakereiden kohdalla molemmissa akseleissa ruostumattomasta teräksestä teh-ty päällyste, joka on kiinnitetty puristusliitoksella. Peräsimen toiminnan ja kestävyysden kannalta on oleellista, että laakerivälkykset⁸ ovat alun perin oikeat ja että ne pysyvät käy-tön aikana sallituissa rajoissa.

Peräsिमien laakerit. Ylälaakerin kuvaan on merkitty kiristysmutteri, paineöljyn liitännät, akselin katkeamiskohta ja syväyksiä. Materiaalit ovat samat kuin alalaakerissa, kuva 5b.

⁸ Laakerivälky on laakerin sisähalkaisijan ja akselin ulkohalkaisijan välinen erotus. Välyksen puolikas on akselin mahdollinen liikevara, olettaen, että akselin ja laakerin keskiöt yhtyvät ja mahdolliset kulumat ovat symmetriset. Akselin liikevara kasvaa välyksen kasvaessa ja kasvaa lisää, jos pronssiin ja pesän teräksen väliin syntyy tyhjä tila esim. syöpymisen johdosta.



Kuva 5a. Peräsimen ylälaakerin piirustus, jossa näkyy peräsinakselin kartioliitos peräsimen. Pronssiholkki on näytetty oranssilla, ruostumaton teräspäällyste siniharmaalla. Laakerivälily on 1,8 mm (431,8–430,0). SB-peräsinakselin katkeamiskohta on merkitty punaisella (siinä kartio muuttuu sylinteriksi). Vinoviivoitus esittää valuosia.

Laakerivälilyksille on luokituslaitosten säännöissä asetettu alaraja, yläraja ja tarkkailuraja, jotka riippuvat peräsinakselin ja ala-akselin halkaisijoista. SILJA EUROPA:n akselleille nämä rajat ovat noin 1,4 mm, 5 mm ja 4 mm. Luokituslaitoksen sääntöjen perusteella välilyks mitataan telakointien yhteydessä ja pronssiholkit uusitaan tarpeen vaatiessa. Käytännössä pronssiholkit uusitaan jos välyks ylittää selvästi 2 mm. Normaaleilla välilyksillä ja tavanomaisilla peräsinvoimilla peräsinakseli ei osu ylälaakerin pronssiholkkiin, mikä vuoksi ylälaakerin kuluminen on vähäistä.

Alalaakerin akselin suoran osan halkaisija on 432 mm ja sen päällä olevan kutistusliitoksella asennetun ruostumattoman teräspäällysteen paksuus 24 mm, kuva 5b. Akselin pituus on n. 1,3 m ja paino n. 1,2 t. Pronssiholkin yläosan paksuus oli alun perin 26,5 mm ja alaosan 25 mm. Holkin puolivälissä oli olake samoin kuin pesässä helpottamassa holkin asennusta ja paikallaan pysymistä. Ylhäältä holkki oli varmistettu kiertymistä ja kohoamista vastaan kuudella ruuvilla, jotka oli vielä hitsattu kiinni valuosaan. Pesän ja holkin korkeus on 480 mm. On syytä huomata, että laakeripesän valuteräs on suoraan yhteydessä pronssiholkkiin merivesiympäristössä (galvaaninen pari).

merivesi

50

50

432

480

481,8

Laakerivällys 481,8-480 = 1,8 mm

534,8

531,8

480

merivesi

50

50

Ruostumaton st, Niro 1.4571,6 kpl M12x30

Sarvi GS-45

Ruostumaton teräs, G-X 10 CrNi 18 8 eli C ≤ 0,1%, Cr 18 %, Ni 8 %

Laakerivällys 481,8-480 = 1,8 mm

Pesän seinämä

RG10 pronssi Cu 85,8%, Sn 10,7%, Zn 2,8%

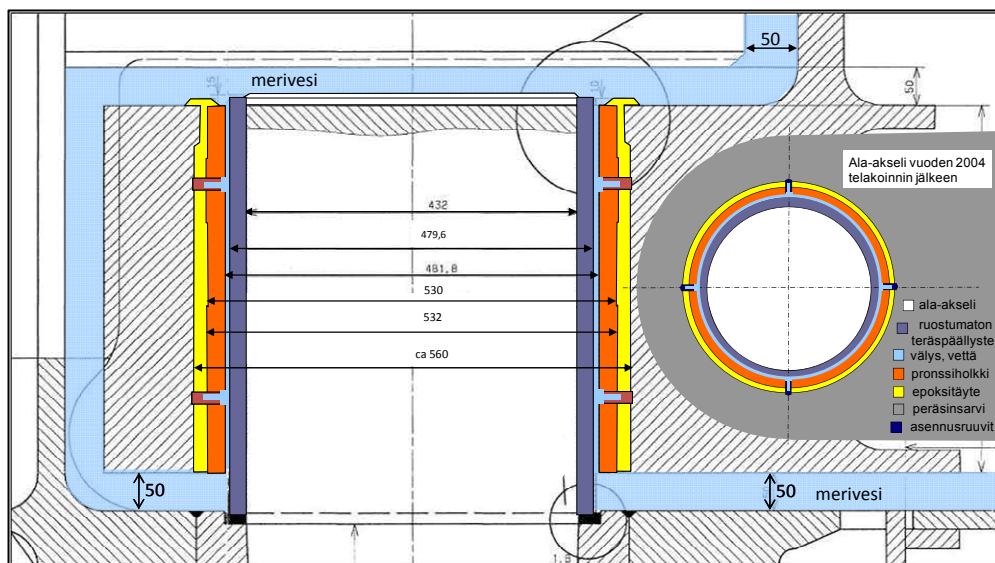
GS-45 valuteräs seostamaton C ≤ 0,25%

Tiivisterengas, neopreeni

Peräsin

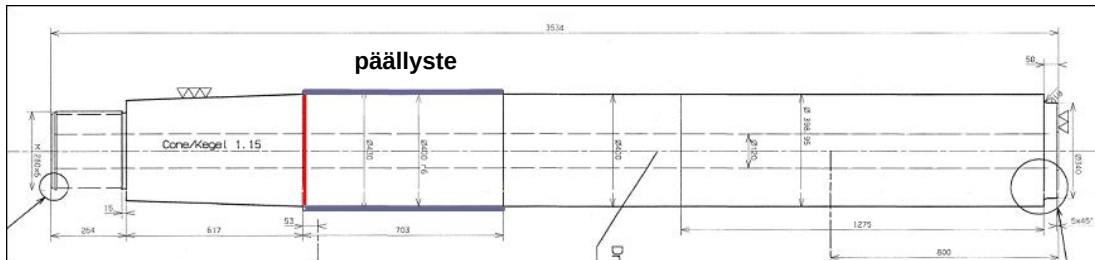
Peräsin

Vuoden 2004 telakoinnin yhteydessä pesän syöpymä korjattiin valuepoksitäytteellä samalla kun asennettiin uudet pronssiholkit, kuva 5c. Holkkien keskittämiseksi epoksin valun aikana käytettiin holkin läpi pesän seinämään saakka ulottuvia kuusiokoloruuveja, jotka jäivät paikoilleen valun jälkeen. Tämä epoksin ja ruuvien muodostama rakenne oli rikkoontunut vuonna 2009. On syytä huomata, että laakeripesän valuteräs on suoraan yhteydessä pronssiholkkiin nyt ruuvien välityksellä (galvaaninen pari).



7

Peräsinakselit. Peräsinakselin pituus on n. 3,5 m ja paino n. 3,1 t, kuva 6, oli valmistettu seostamattomasta teräksestä CK 22 N, joka oli valamisen jälkeen taottu ja normalisointihehkutettu. Materiaalilla oli luokitustodistus, jonka mukaan se täytti sille asetetut normit. Peräsinakselin halkaisija on 400 mm. Akselin lujuusominaisuudet olivat tavanomaiset vastaten aluksen jääluokkaa⁹. Kutistusliitoksella asennetun akselin päällysteen paksuus oli 15 mm. Jastram-rullan hydraulikkaa varten akselin keskelle oli porattu halkaisijaltaan 120 mm reikä, jolla oli vain vähäinen akselin lujuutta heikentävä vaikutus.



Kuva 6. Peräsinakseli. Ruostumattomasta teräksestä tehty päällyste on näytetty siniharmaalla. Peräsinakselin läpi oli porattu halkaisijaltaan 120 mm reikä Jastram-rullan hydraulikkaputkia varten. Punaisella on näytetty SB-peräsinakselin katkeamiskohta.

1.1.6 Korroosiosuojaus

Aluksella on aktiivinen ja passiivinen korroosiosuojaus maalauksen lisäksi. Peräsimen paikallisina passiivisina suojauksina toimivien sinkkianodien (5-7 kpl per peräsimen puoli, määrä on vaihdellut, samoin anodien paikat). Aktiivinen, runkoa suojaava järjestelmä on SAVCOR Consulting Oy:n toimittama ja ylläpitämä. Anodeja lisättiin vuoden 1997 telakoinnin yhteydessä. Tämä suojaus on tarkoitettu laajoja pintoja varten, eikä se todennäköisesti kykene estämään paikallista korroosiota, jos ko. paikassa on otolliset olosuhteet galvaaniselle korroosiolle esim. epäedullisten materiaalikontaktien johdosta¹⁰. Peräsin oli maadoitettu¹¹ aluksen runkoon.

1.1.7 Matkustajat ja lasti

Aluksessa oli onnettomuushetkellä 1373 matkustajaa ja RoRo -lastia 1133,1 tonnia. Lasti sisälsi vaaralliseksi luokiteltuja aineita.

1.2 Onnettomuusmatka¹²

Alla oleva karttapiirros (kuva 7) esittää onnettomuusmatkan reitin Långnäs luona Ahvenanmaan saaristossa peräsinvaurion syntymisen aikana. Punaisen nuolen kohdalla oletetaan SB-akselin katkenneen, mustan nuolen osoittamassa kohdassa alus pysäytettiin ja ohjattiin sivuun väylältä, "taskuun".

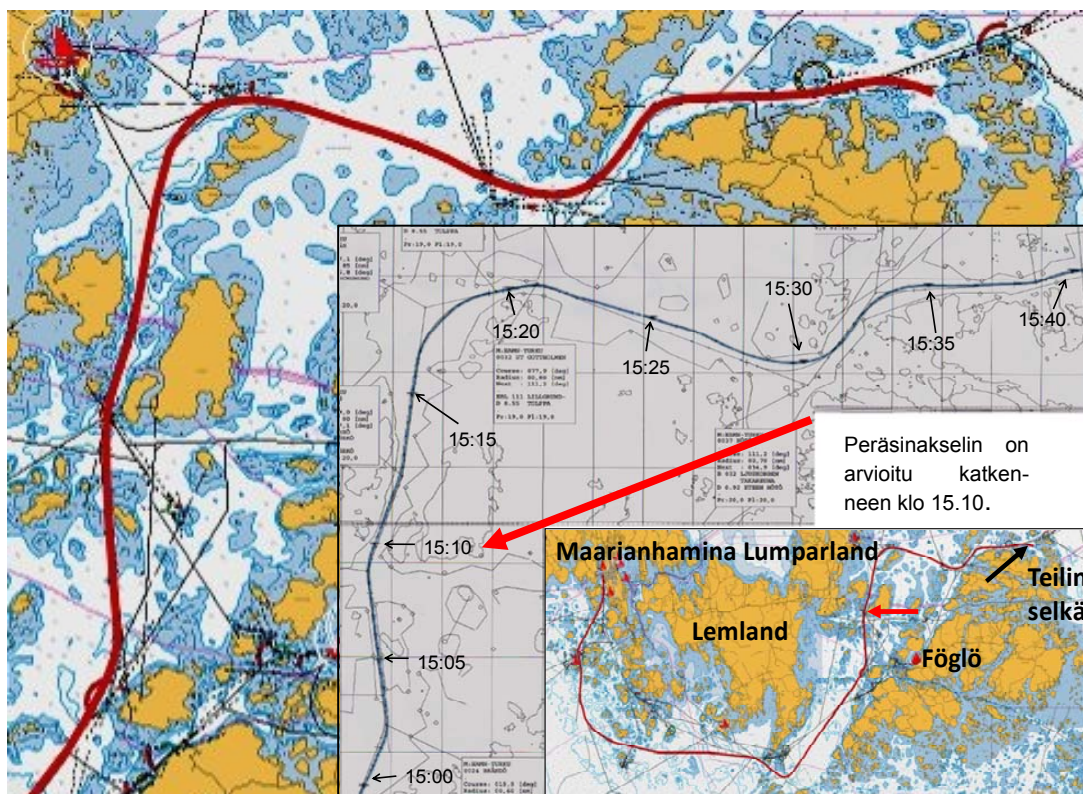
⁹ Aluksen nopeus on yli 20 solmua. Tällöin vain nopeus määrittää akselin mitoituksen. Murtolujuus 470 N/mm², myötölujuus 270 N/mm² peräsimen luokituspiirustuksen mukaan.

¹⁰ Keskustelut järjestelmän valmistajan kanssa Mikkelissä 28.4.2010.

¹¹ Aktiivinen korroosiosuojaus saadaan näin ulottumaan myös peräsimien pinnoille.

¹² Keskustelut päällysteen kanssa ja VDR-tiedot mukaan lukien kommentosiltakeskustelujen nauhoituksen kuuntelu. Nauhoituksen laatu on paikoitellen niin heikko, ettei puheesta saa kaikilta osin selvää.

M/S SILJA EUROPA (FIN), oikeanpuoleisen peräsinakselin katkeaminen Ahvenanmaan saaristossa 22.11.2009



Kuva 7. Onnettomuusmatka Långnäsin luona. SB akselin oletetaan katkenneen punaisen nuolen osoittamassa kohdassa. Alus pysäytettiin paksun mustan nuolen kohdalla. Väylä Maarianhaminasta Teilin selälle sisältää useita mutkia sekä ahtaita ja matalia osuuksia.

Matkan tapahtumat. Matkalle 22.11.2009 oli lähdetty aikataulun mukaan Tukholmasta. Pari päivää aiemmin ohjailussa oli havaittu poikkeamia. Aluksella arvioitiin voimakkaalla tuulella olleen osuutta siihen, että alus otti käännökset ajoittain liian loivasti tai liian jyrkästi. Myös 21.11 havaittuun poikkeavuuteen käännoksessä Maarianhaminan lähellä ajateltiin puuskaisen tuulen, 18 m/s, olevan syynä.

22.11.2009 havaittiin Långnäsin luona oikealle kaartuvassa käännoksessä klo 15:15 jälkeen automaattiohjauksessa laivan jälleen käyttäytyvän epätavallisesti. Siitä alettiin keskustella komentosillalla. Tutkinnassa tehdyn selvityksen perusteella peräsinakseli katkesi noin klo 15:10. Nyt kyseessä oli ensimmäinen isompi käännos peräsinakselin katkeamisen jälkeen (katkeamisesta oli kulunut noin seitsemän minuuttia). Suuria peräsinakulmia ihmeteltiin ja niihin reagoitiin tekemällä autopilottiin pieniä kurssimuutoksia. Kello 15:21:07–15:22:22 automaattiohjaus käytti poikkeuksellisen suuria peräsinakulmia (30 astetta), kuva 8. Ne pantiin komentosillalla merkille, mutta niiden lukuarvoista eikä ajallisesta kestosta keskusteltu. Poikkeavaa ohjailukäyttäytymistä ei ryhdytty analysoimaan, vaan havainnot jäivät irrallisiksi toteamuksiksi. Keskustelu taukosi M/S FJÄRDVÄGENin ohituksen ajaksi noin viideksi minuutiksi.



Kuva 8. Oikealle klo 15:20 tehdyn käännöksen (kuva 7) stötteauksessa käytettyjä suuria peräsinkulmia conning näytöllä (vasemmalla) ja vastaavia tutkakuviä (oikealla). Peräsimet on käännetty vasemmalle: vasemmalla BB ja oikealla SB - peräsinkulma. Tutkakuviissa prediktorin ennakoima paikka minuutin kuluttua on merkitty valkoisella nuolella ja aluksen sen hetkinen paikka punaisella nuolella. Valkoisen nuolen lähellä oleva vihreä tutkakaiku on M/S FJÄRDVÄGEN.

FJÄRDVÄGENin ohitus klo 15:25–15:29 aloitettiin autopilotilla. SILJA EUROPA näytti käyttäytyvän suoraan ajettaessa normaalisti. Rekisteröidyissä peräsinkulmissa on nähtävissä ohituksen aikana pieni pysyvä poikkeama oikealle. Ohituksen loppuvaiheessa siirryttiin ensimmäisen kerran käsiohjaukseen klo 15:27. Ruori käännettiin vasempaan hetkellisesti 30 asteen kulmaan seuraavan S-mutkan ensimmäisen käännöksen aloittamiseksi vasemmalle. Käännös sujui hyvin vaikkakin jouduttiin käyttämään noin 20 asteen peräsinkulmaa vasemmalle lähes koko käännöksen ajan.

Samalla linjaluotsien vahdinvaihto oli tulossa. Komentosillalle saapuneelle uudelle linjaluotsille kerrottiin ohjailuhavainnoista ja että käsiohjaus oli otettu käyttöön FJÄRDVÄGENin ohituksen yhteydessä. Aluksen ohjailukäyttäytyminen synnytti keskustelua ja tuoti esille ajatus, että alus ohjaa huonosti.

S-mutkan suoran osuuden aikana käytettiin autopilotia, ja vahdinvaihto voitiin tehdä klo 15:32¹³. Aikaisemmin tehtyjä havaintoja alettiin nyt kerätä yhteen ja tilanteen analysointi alkoi vähitellen. Uudelle linjaluotsille kerrottiin, että aluksen ohjaus oli toiminut moitteettomasti klo 15:15 aloitettuun käännökseen saakka. Uusi linjaluotsi ryhtyi heti seuraavan oikealle olevan käännöksen aloituksen jälkeen käyttämään käsiohjausta. Hän totesi tämän ensimmäisen ajamansa käännöksen lopulla klo 15:35:22 ääneen, ettei aluksen kääntymisen pysäyttäminen vastaruorilla (stötteaus) tapahtunut kunnolla. Seuraavassa

¹³ Vahdinvaihtoa ei voida tehdä käsiohjauksen ollessa käytössä.

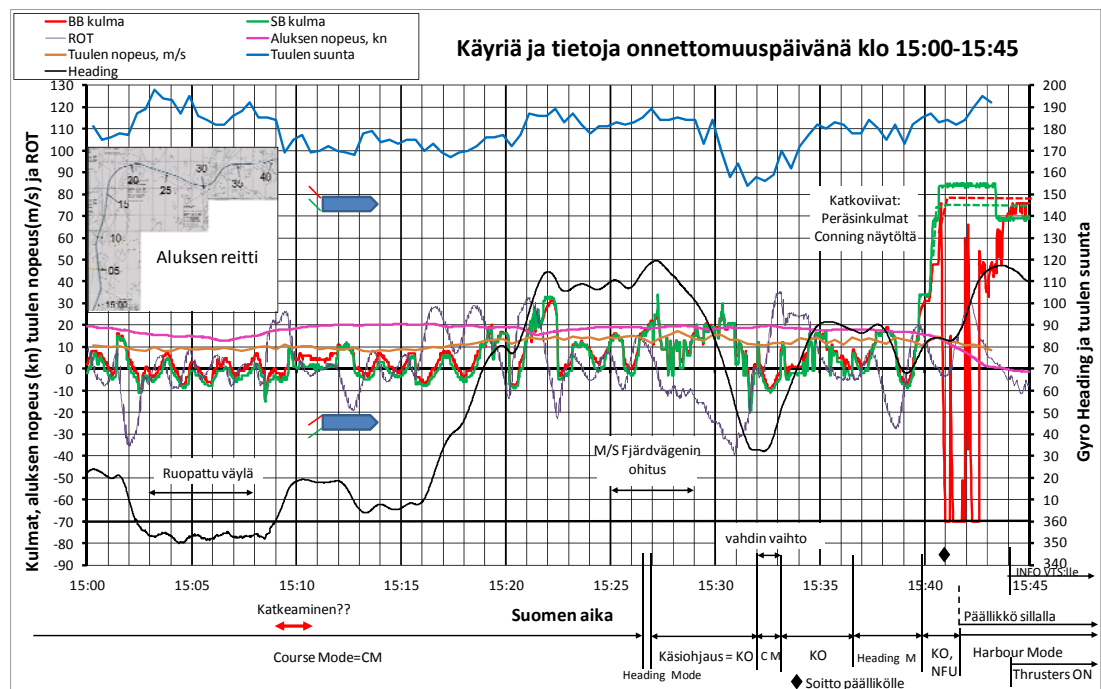
M/S SILJA EUROPA (FIN), oikeanpuoleisen peräsinakselin katkeaminen Ahvenanmaan saaristossa 22.11.2009

pienessä käännöksessä vasemmalle ongelmat jatkuivat ja linjaluotsi epäili vikaa peräsinkulmien näytössä. Tässä vaiheessa, kun ohjailuongelmien havaitsemisesta oli kulunut noin 20 minuuttia, alettiin ensimmäisen kerran ääneen epäillä, ettei aluksen poikkeava ohjailukäyttäytyminen johtunut ympäristötekijöistä, vaan että vika oli aluksessa itsessään. Tämän jälkeen tehtiin normaali liikenneilmoitus Archipelago VTS:lle; ohjailulaitteiden poikkeava toiminta ei ollut synnyttänyt selvää tarvetta matkan keskeyttämiseen.

Noin klo 15:38 huomattiin, että alus ei käännä tai kääntyy huonosti vasemmalle. Autopilotilla vasemmalle tehdyn pienen käännöksen jälkeen tehtiin pieni kurssikorjaus oikealle. Autopilotti yritti oikaista käännöstä ja otti 20–30 astetta vasemmalle, mutta kääntymisen edelleen jatkuessa siirryttiin ensin käsiohjaukseen ja sitten hätäohjaukseen. Kello 15:40:07 linjaluotsi päätti ohjata aluksen edessä lähellä olevaan väylän levennykseen. Hän käytti pääkoneita ensin ristiin ja otti sitten täydet taakse. Päälikkö kutsuttiin komentosillalle klo 15:40:45 ja hän pysäytti aluksen väylän levennykseen ohjauspotkurien avulla. Archipelago VTS:lle ilmoitettiin klo 15:44:05, että aluksella on teknisiä ongelmia.

Myöhemmin kokeiltiin ohjailun toimintaa ja kyettiin siirtymään Teilin selälle, jossa hinaaja-apua odoteltaessa alusta ajettiin myötäpäivään soikion muotoista reittiä muuta liikennettä häiritsemättä. Hinaajan mukana alukselle tuli sukeltaja, joka myöhemmin sään parannuttua pääsi sukeltamaan ja totesi oikeanpuoleisen peräsinakselin olevan poikki. Alus saapui Turkuun vajaan vuorokauden myöhässä.

Kuvassa 9 on kootusti esitetty tärkeimmät muuttujat akselin katkeamisen aikoihin.

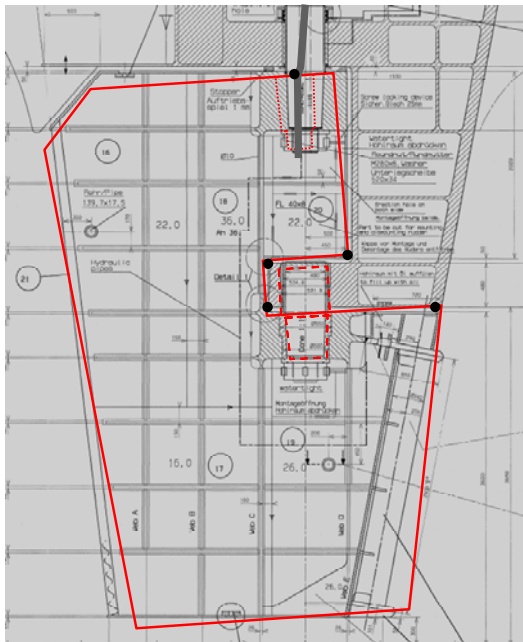


Kuva 9. Onnettomuusajankohdan tietoja aluksen kulusta ja ohjauksesta. ROT on Rate Of Turn (aluksen kääntymisnopeus, astetta minuutissa), Heading on keulan suunta. SB-peräsinkulma akselin katkeamisen jälkeen on näyttölaitteen näyttämä kulma, tosiasiallinen peräsinkulma on tuntematon.

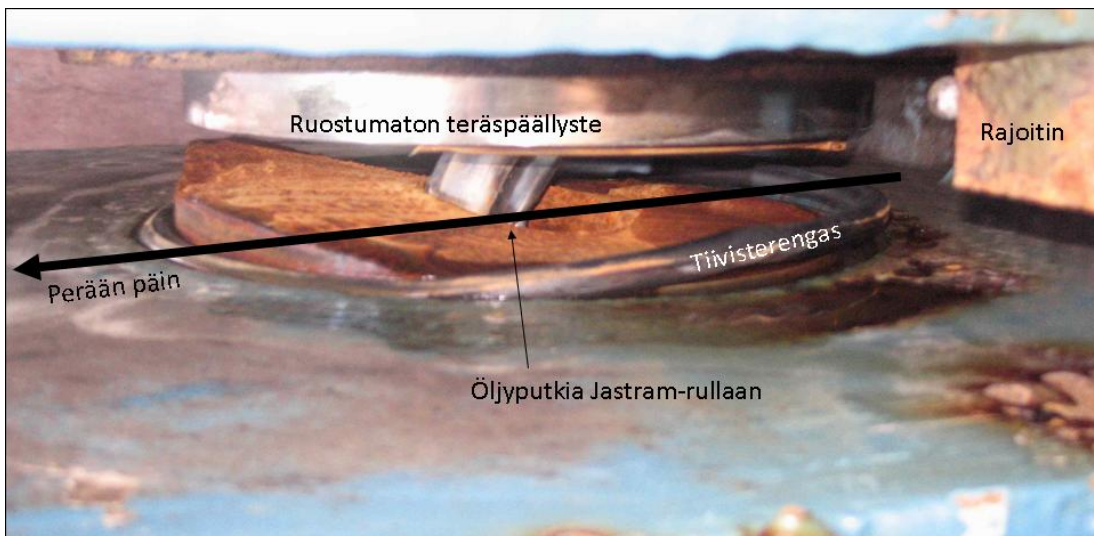
1.3 Aluksen vauriot

SB-peräsinakseli oli poikki. Peräsin oli pudonnut peräsinsarven varaan tukeutuen myös Jastram-rullan hydraulikkaputkiin (paksu harmaa viiva), kuva 10a. Sukeltajan tutkiessa peräsinä se oli kääntyneenä noin 45 astetta vasemmalle.

VTT:n asiantuntija tunnisti akselin murtopinnan ulkonäön perusteella syyksi väsymis-murtuman, kuva 10b.

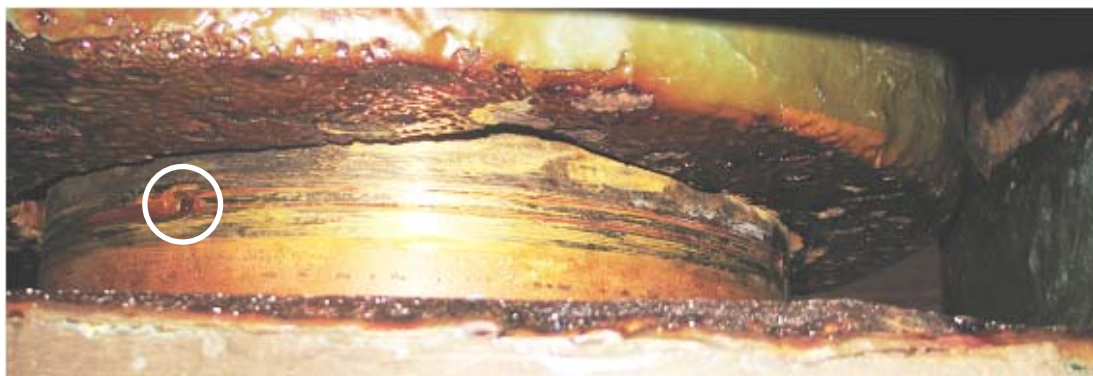


Kuva 10a. Arvioitu SB-peräsimen asento (jos peräsin keskellä) peräsinakselin katkettua. Kallistuma pituussuunnassa oli 3-4 astetta. Mustat pisteet näyttävät mahdolliset tukipisteet peräsinakselin katkeamisen jälkeen.



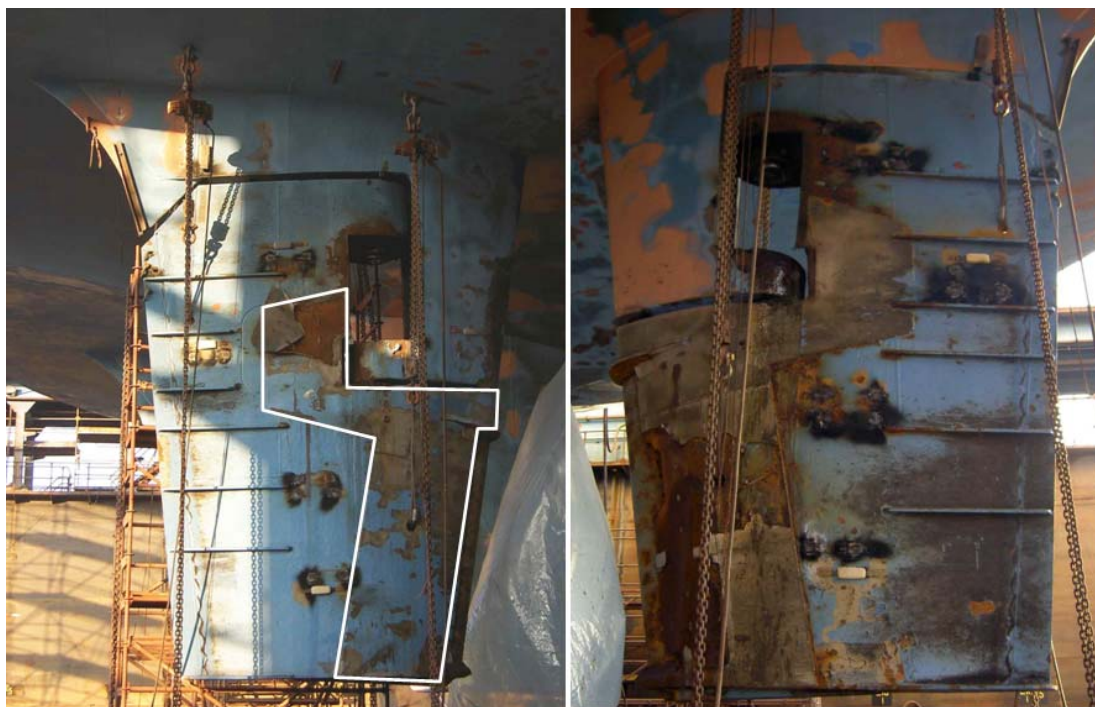
Kuva 10b. Katkennut SB - peräsinakseli kuvattuna Riikassa 28.11.2009. Peräsin oli pudonnut alaspäin noin 5 cm ja siirtynyt hieman perään päin. Keskellä on näkyvissä Jastram-rullaan menevät putket. Peräsin on keskiasennossa ja nuoli osoittaa perään.

Korjauksessa vuonna 2004 valettu epoksitäyte ruuveineen oli hävinnyt kokonaan SB puolella, ja osittain BB puolella. SB puolen alalaakerin pronssiholkki oli pudonnut 130–140 mm nojaten peräsimeen, kuva 11.



Kuva 11. SB alalaakeri kuvattuna 2.12.2009 siten, että rako, josta epoksi on poistunut, on näkyvissä. Sisäpuoli, keulan suunta on vasemmalle. Yksi holkin asennusruuveista on merkattu valkoisella ympyrällä.

Kuvassa 11 on yksi epoksivalun asennuksessa käytetyistä ruuveista vuodelta 2004 katkenneena näkyvissä. Ruuvien alue holkista on tullut näkyviin siinä vaiheessa kun peräsin on pudonnut sarven yläpuolella olevan raon verran. Lisäksi peräsinakseleissa todettiin kartion yläosassa fretting-säröjä sekä peräsimissä ja peräsinsarvissa useita säröjä. Peräsimien pinnat olivat paikoin syöpyneet, kuvat 12 ja 13.



Kuva 12. SB-peräsin Gdanskissa 3.12. Vasemmalla on ulkopuoli, oikealla sisäpuoli. Valkoisen viivan osoittamalla alueella peräsimen molemmilla pinnoilla oli ruostumattomasta teräslevystä tehty pinnoite.

Ruostumattomalla teräslevyllä päällystetty alue on näytetty valkoisella viivalla kuvassa 12. Päällyste oli kaikilla neljällä pinnalla. Peräsimien kunto on aikaisemminkin ollut hyvin samankaltainen.

Molemmissa sarvissa aluksen keskilaivan puolella oli voimakkaita kavitoinnin aiheuttamia syöpyimiä. Ne olivat yläosastaan niin syviä, että sarven kestävyys vaarantui, kuva 13.



Kuva 13. Peräsinsarven kavitaatiosyöpyimiä. Vasemmalla BB (kuvattu 3.12), oikealla SB (Trafin kuva 4.12), molemmat keskilaivan puolella.

1.4 Pelastus- ja hälytystoiminta

Hälytystä ei tehty, tilanteesta ilmoitettiin Archipelago VTS:lle. Eräs matkustaja oli ilmoittanut tilanteesta MRCC:lle, joka otti yhteyttä alukseen. Päällikkö arvioi, että tilanne ei vaatinut hinausavun lisäksi muita pelastustoimia; alus oli ohjailtavissa ja merikelpoinen. Päällikkö ei pitänyt tarpeellisenä ryhtyä evakuointiin, sillä alus oli ehjä ja ohjailtavissa. Matkustajille tiedotettiin tilanteesta ja sen kehittymisestä.

1.5 Onnettomuuden turvallisuustutkinta

Vaurio, *SB - peräsinakselin katkeaminen*, joka aiheutti vaaratilanteen, tapahtui kapealla ja mutkaisella väylällä, joka on vilkkaasti liikennöity. Aluksessa oli yhteensä noin 1660 henkilöä ja myös vaaralliseksi luokiteltua lastia. Ohjailukyvyyn heikentyminen kesken vaativien käännösten voi johtaa aluksen ajautumiseen sivuun väylältä suurella nopeudella ja karilleajo on tai yhteentörmäykseen. Kuitenkin on syytä huomata, että toinen peräsin on vain yksi aluksen monista ohjailuun käytettävissä olevista laitteista.

Peräsinakselin katkeaminen on hyvin harvinaista. Vastaavaa ei ole Suomessa tapahtunut, eikä luokituslaitoksilta saatuja tietoja tällaisista tapauksista ole kuin kaksi¹⁴. Peräsinakselia ei irroteta tarkastettavaksi telakointien aikana¹⁵. Turvallisuustutkinta on edellä mainitun perusteella katsottu tarpeelliseksi toteuttaa hyvin laaja-alaisena. Tutkinta on myös ensimmäinen laatuaan eikä sen vuoksi siitä ole saatavissa mallia eikä valmista näkemystä mahdollisista syistä.

¹⁴ Det Norske Veritas, Casualty Information 2/00, korroosio oli todettu katkeamisen syyksi. Bureau Veritas sähköposti 31.5.2011, akseli oli katkennut aluksen kulun aikana.

¹⁵ Bureau Veritasin säännöissä todetaan muun muassa, että peräsinakselin näkyvät kohdat tarkastetaan säännöllisesti. Mikäli luokan tarkastaja katsoo tarpeelliseksi, peräsin voidaan irrottaa ja/tai sen tarkastuslevyt voidaan avata alalaakerin tarkastamiseksi. (Bureau Veritasin lausunto tutkintaselostuksesta, tutkintaselostuksen liite 1) Huom. Peräsinakselin irrottamisesta ei ole mainintaa kyseisissä sääntökohdissa.

Turvallisuustutkinnan sisällöksi muotoutui:

1. Aluksen historian ja peräsimille tehtyjen toimenpiteiden selvittäminen.
2. VDR datan keruu ja analysointi.
3. Peräsimen ja sen osien tutkimukset onnettomuuden jälkeen.
4. Peräsiimiin vaikuttavien voimien arviointi.
5. Peräsinakselin väsymiskestävyyden määrittäminen.
6. Onnettomuustilanteen hallinnan arviointi.
7. Peräsimen valmistus- ja korjausprosessin arviointi.

Näiden aiheiden kuvaukset ja tulokset ovat raportin kohdissa 1.5.1–1.9.

1.5.1 Aluksen ja peräsimien historia

Aluksen käytöstä saatujen tietojen perusteella sen peräsinlaitteisto ei ole kohdannut ylimääräisiä kuormituksia esim. pohjakosketusten muodossa. Sen sijaan talvikautena peräsimintä ovat kuormittaneet jääkuormat.

Taulukko 1. Aluksen reittijakautuma 1993–2004 ja 2004–2009.

Reitti	1993–2004		2004–2009	
	kk	%	kk	%
Turku-Maarianhamina-Tukholma	54	26,9	0	0
Helsinki-Maarianhamina-Tukholma	0	0	1,5	0,7
Helsinki-Tukholma	22	10,9	0	0
Turku-Maarianhamina/Långnäs-Tukholma	36	17,9	39,5	19,7
Turku-Maarianhamina/Långnäs-Kapellskär	37,5	18,7	10,5	5,2
YHTEENSÄ	149,5	74,4	51,5	25,6

Tutkinnassa on selvitetty aluksen 17-vuotisen käyttöhistorian aikaiset telakoinnit ja niiden aikana peräsinlaitteistoille tehdyt tarkastukset, huollot ja korjaukset. Telakoinnit, jolloin välkykset on mitattu, ovat taulukossa 2. Kuvassa 15 on esitetty välysmittausten tulokset. Tässä lyhennelmässä esitetään tarkemmin vain vuosien 2004 ja 2007 telakoinneissa tehdyt toimenpiteet, koska 2004 tehdyllä alalaakerin korjauksella oli ratkaiseva vaikutus SB-peräsinakselin katkeamiseen ja 2007 tarkasteltiin korjauksen kuntoa. Telakointia vuonna 2009 esitetään lähinnä kuvin.

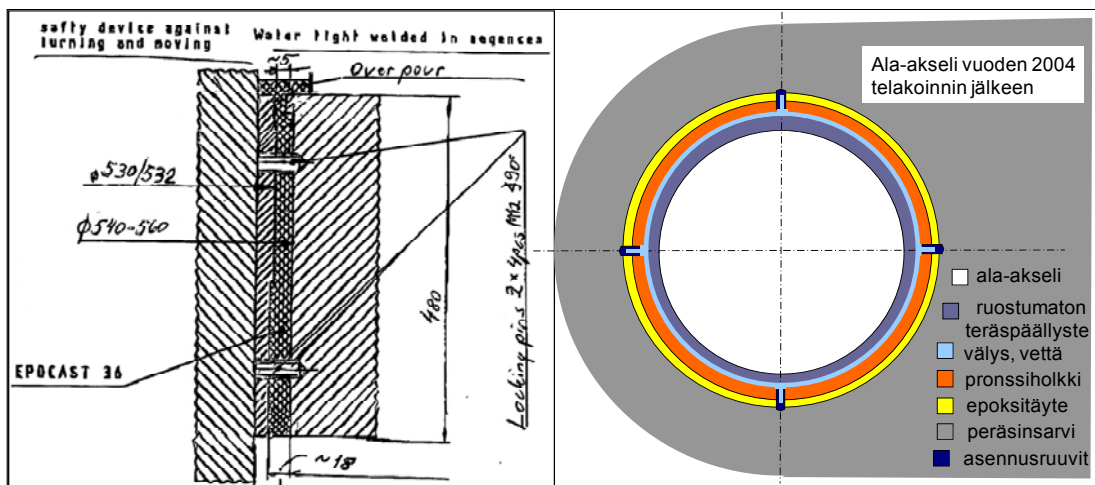
Turku Repair Yard 30.8–8.9.2004. Ilmeisesti vuoden 2002 telakoinnissa havaittujen kasvaneiden välysten johdosta aluksella oli mukanaan uudet alalaakerin pronssiholkkien aihiot¹⁶. Molempien peräsimien alalaakerien pronssiholkit olivat pudonneet noin 50 mm. Yläreunan kaikki lukitusruuvit olivat hävinneet. Välysten todettiin edelleen kasvaneen ja nyt ne ylittivät luokituslaitoksen salliman rajan. Välysmittaus tehtiin siten, että mitattiin ala-akselin ja pronssiholkin (sisäpinnan) kulumat. Välysmittauksessa ei todennäköisesti havaittu syöpmisen koko määrää. Se saatiin selville mittaamalla alalaakerin pesän aukko¹⁷. Aukko osoittautui liian suureksi pelkälle holkille. Aukko ei ollut ympyrämainen.

¹⁶ Telakan työmääräinluettelossa, työnro 5100 oli: "ruoritappien laakerien SB/BB uusiminen irrottamalla peräsimet".

¹⁷ Mittauksen samoin kuin akselin linjauksen teki Kvaerner Masa Yardsin spesialisti.

Telakointiajan lyhyden vuoksi etsittiin sellainen ratkaisu tilanteen korjaamiseksi, joka ehdittäisiin toteuttaa. Pesään tehtyä päällehitsausta ja sen jälkeistä aarpörausta ei voitu ajatella. Päädyttiin syöpymän täyttämiseen Epocast-merkkisellä valettavalla epoksilla, jota käytettiin yleisesti koneistojen asennuksessa, kuvat 14a ja b. Korjaustelakalla ei tätä korjaustapaa ollut aiemmin käytetty SILJA EUROPA:n kokoluokan aluksissa.

Epoksivalun suunnittelu tehtiin muutaman päivän aikana vaihtamalla toteutusluonnoksia faksilla epoksimateriaalin toimittajan, epoksivalun tekijän ja varustamon kesken keskustellen samalla luokituslaitoksen edustajan kanssa. Tutkijoiden tietoon ei ole tullut, että korjauksen lujuutta ja kestävyyttä olisi laskelmin arvioitu.



Kuvat 14a ja b. Epoksimassan asennuspiirustus (a, vasemmalla) ja alalaakerin poikkileikkaus (b, oikealla) vuoden 2004 telakoinnissa. Ruuvien kuusiokolot, jotka täyttyvät vedellä on piirretty näkyviin.

Pronssiholkki oli pudottuaan 50 mm pyörinyt pesässä niin kauan, että yläosaan oli muodostunut 50 mm korkeudelta noin 7 mm reunus. Sarven aukkoa tasoitettiin ja suurennettiin hieman hiomalla. Epoksivalua varten tehtiin yläosaan kolme koloa. Molempien alalaakerien pronssiholkit olivat voimakkaasti kuluneet ja ne korvattiin uusilla, joissa yhden olakkeen sijaan oli useita noin 1 mm olakkeita, katso kuvat 23a ja 23b. Holkkien molemmat pinnat olivat todennäköisesti työstön (rouhinnan) jäljiltä, eikä niitä puhdistettu.

Pronssiholkin ja pesän väliseen rakoon valettiin ylhäältä epoksimassa (Epocast 36¹⁸) siten, että ylös muodostui lieri, kuvat 14a ja b 5c. Alhaalla oli valun aikana vastinkappale. Pronssiholkin keskitystä varten käytettiin holkin ja epoksin läpi meneviä kuusiokoloruuveja, katso kuvat 14a ja b.

Luokituslaitos kirjoitti Memorandumin No 5, joka merkitsi sitä, että korjaus oli tarkoitettu pysyväksi ja varustamolle tiedoksi.

¹⁸ H.A.Springer marine + industrie service GmbH kauppanimi. Kaksikomponenttinen. Erotukseksi levitettävistä vastaavista tuotteista käytetään nimitystä "valuepoksi". Jos sekaannuksen vaaraa ei ole, on käytetty myös lyhyttä muotoa "epoksi".

Peräsinakseliin yläläakerien ympärykset (valukappaleen pinta) rungon ulkopuolelta tarkastettiin magneettijauheella¹⁹. Vaurioita ei havaittu, mutta uudet yläläakerien tiivisteet asennettiin silti. Tarkastus ei ulottunut akseleihin.

Turku Repair Yard 21–25.1.2007. Välykset mitattiin ja todettiin täyttävän vaatimukset, mutta peräsin oli käännetty kokonaan sisään, eikä mittaustulos ole vertailukelpoinen. Luokituslaitoksen tarkastaja tarkasti kertomansa mukaan linkkuveitsen ja peilin avulla sekä sormella tunnustelemalla alalaakerin alareunan kunnon. Tarkastus ulottui ahtaan tilan johdosta 270–300 astetta laakerin ympäri. Epoksivalu tuntui olevan ehjä, siinä ei näkynyt halkeamia, eikä siitä veitsellä irronnut mitään.

Remontowa, Gdansk, 30.11–18.12.2009. SB - peräsinakseli oli poikki ja BB - peräsinakselissa todettiin säröjä kartio-osan yläosassa. Myös peräsimissä, peräsinsarvesa ja peräsinsarven yläpuolella löydettiin säröjä. SB puolella alalaakerissa epoksi oli poissa kokonaan, BB puolelta osittain. Irrotettaessa BB puolen pronssiholkkia, osa epoksista jäi pesään kiinni.

Alalaakerien pesät korjattiin päälle hitsaamalla reikään useita kerroksia. Lopuksi sisäpuoli avarrettiin uuden pronssiholkin mittoihin ja ulkopuoli hiottiin sileäksi.

1.5.2 Laakerivälykset ja alalaakerin liikevara

Laakerivälyksellä, (lyhyesti välys) tarkoitetaan holkin sisähalkaisijan ja akselin halkaisijan erotusta. Alalaakerin liikevara koostuu välyksen puolikkaasta, johon lisätään mahdollinen holkin ulkopinnan ja pesän seinämän välisen raon sallima liikevara. Rako voi syntyä esimerkiksi syöpymällä.

Välysten mittaukset tehdään normaalisti peräsimen ollessa keskiasennossaan sen pituus- ja poikkisuunnassa laakerin alareunasta neljästä kohtaa, joiden väli on 90 astetta (pitkittäin "aft-fore" ja poikittain "SB-BB"). **Välyksen mittaustavalla** on suuri merkitys tulosten luotettavuudelle ja tulkinntalle. *Rakotulkilla*, ns. käärmekielellä, saadaan selville päällysteen ja holkin (ruostumaton teräs ja pronssi) välisen raon suuruus mittauskohdasta laakerin alareunassa. Välys on vastakkaisilta puolilta mitattujen rakojen summa.

Toinen yleinen välysten mittaustapa on *tunkkaus tai talja*. Peräsimiä työnnetään tunkilla (tai vedetään taljalla), kunnes ruostumaton teräsholkki osuu pronssiholkkiin; ts. liike loppuu. Siirtymä luetaan mittakellosta. Vastakkaisiin suuntiin mitattujen siirtymien summa on välys.

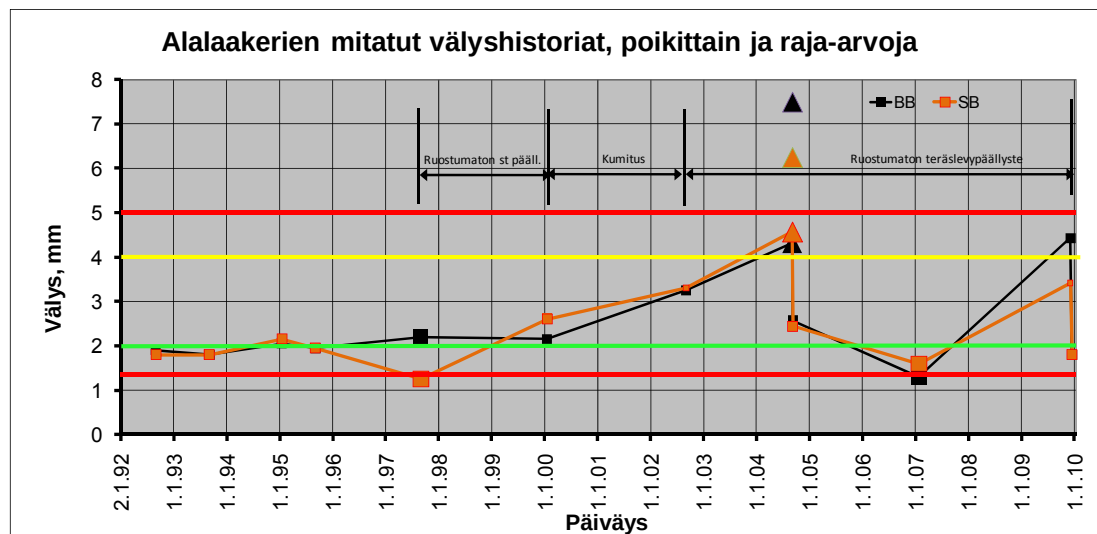
Alalaakeri. Taulukossa 2 on esitetty mittausten tulokset ja telakointien väliset ajat. Alalaakerin välykset on mitattu useimmiten rakotulkilla laakerin alareunasta, mutta myös tunkkausta on voitu käyttää. Varmuutta mittaustavasta ei useimmissa tapauksissa ole. Taulukossa esitetyt mittaustavat ovat tutkijoiden oletuksia käytyjen keskustelujen pohjalta. Varmoksi oletetut mittaustavat on merkitty harmaalla.

¹⁹ Inspecta Oy:n tarkastuspöytäkirja 3.9.2004 magneettijauhetarkastuksesta. Pinnan laatu "valettu, esipuhdistus hiekkapuhalluksella".

Taulukko 2. Aluksen telakoinnit ja alalaakerien välysten mittaukset²⁰. Vuosina 2004 ja 2009 mittaustulos on näytetty ennen ja jälkeen korjauksen.

Pvm.	telakoin- tiväli, kk	Alalaakerien välykset, mm				Telakka	Telakoin- nin kesto vrk	Välyksen mittaustapa
		BB-akseli		SB-akseli				
		poikittain	pitkittäin	poikittain	pitkittäin			
1.9.92		1,90	1,80	1,80	1,80	Meyerwerf		rakotulkki
3.9.93		1,80	1,95	1,80	1,95	Vuosaari/Kotka Shipyard	8	rakotulkki
16.1.95	16,4	2,05	1,80	2,15	1,65	Turku Repair Yard	5	tunkki/r-tulkki
5.9.95	7,6	1,95	1,85	1,95	1,80	Vuosaari/Kotka Shipyard	5	rakotulkki
1.9.97	23,9	2,20	2,00	1,25	1,35	Turku Repair Yard	5	rakotulkki
18.1.00	28,6	2,15	2,10	2,60	2,00	Finnyards, Rauma	11	tunkki/r-tulkki
4.9.02	31,5	3,25	3,40	3,30	3,20	Helsinki Repair Yard	6	rakotulkki
4.9.04	24,0	4,32	4,02	4,57	3,82	Turku Repair Yard	10	holkki-akseli
8.9.04		2,57	2,20	2,44	2,20	Turku Repair Yard		holkki-akseli
25.1.07	28,6	1,30	-	1,60	-	Turku Repair Yard	5	rakotulkki
4.12.09	34,3	4,43	3,80	3,42	2,13	Remontowa, Gdansk		holkki-akseli
17.12.09		1,80	1,80	1,80	1,75	Remontowa, Gdansk	20	holkki-akseli

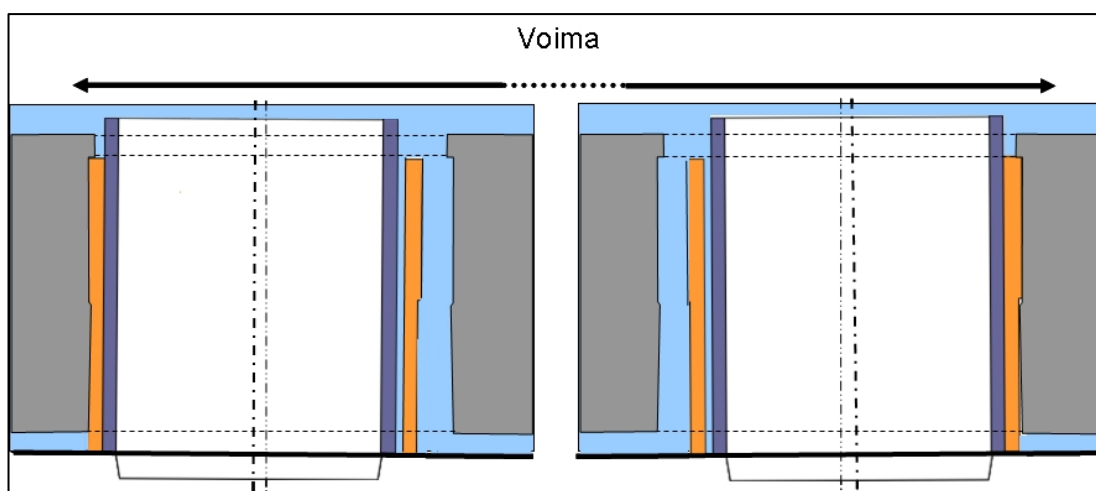
Mitatus alalaakerin välykset poikittaissuunnassa ja eräät välyksen raja-arvot on esitetty kuvassa 15. Eri aikoina tehtyjen välysten mittaustulosten vertailukelpoisuutta ei ole tutkinnassa pystytty varmistamaan. Käytännössä pronssiholkit uusitaan jos välitys ylittää selvästi 2 mm.



Kuva 15. Alalaakerin välysmittauksia, vastaa taulukkoa 2. Suuremmalla neliöllä on näytetty mittaukset, joissa peräsin oli käännetty sivulle. Suurimmat välysmittaustulokset on saatu pronssiholkin sisähalkaisijan ja ala-akselin halkaisijan erotuksena, joten ne ovat tarkimmat tulokset. Vihreä suora esittää tavanomaista hyvää 2 mm välystä, keltainen luokituslaitoksen hälytysrajaa ja punainen ehdotonta ala- ja ylärajaa SILJA EUROPA:n peräsinakselin mitoilla. Myös eri päällystysten aikavälit on esitetty.

²⁰ Kaltevalla fontilla on merkitty epäluotettavat mittaukset, niistä paksulla fontilla merkityt on otettu kuvaan.

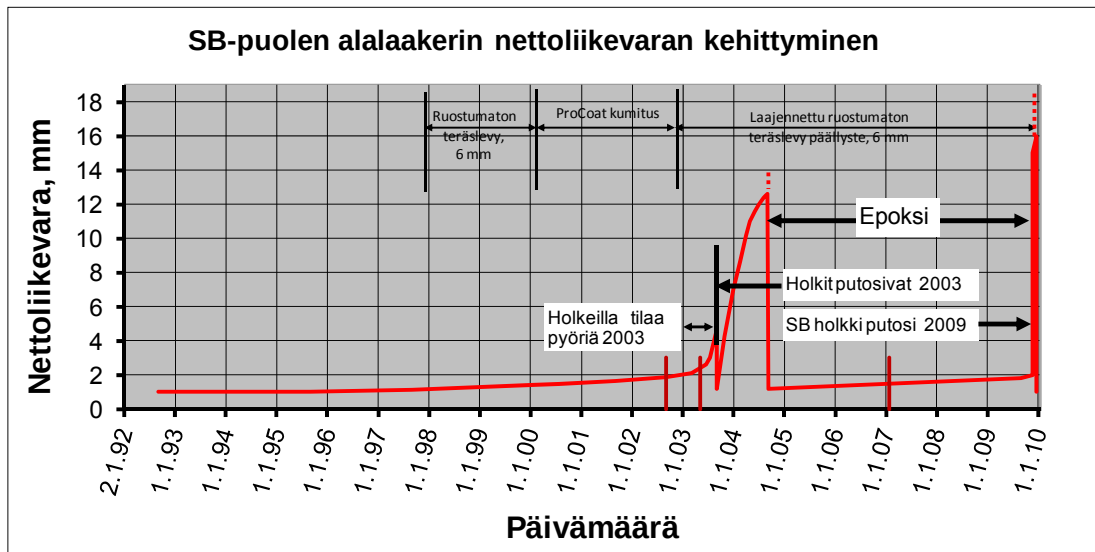
Peräsinakselin taipumisen kannalta oli SILJA EUROPAn tapauksessa ratkaiseva merkitys *alalaakerissa tapahtuneella syöpymisellä*, joka moninkertaisti pelkästään välyksen mahdollistaman taipuman. Syöpyminen johtui galvaanisesta korroosiosta. Syöpyminen lähes pysähtyi vuoden 2004 korjauksen jälkeen. Kuvassa 16 syöpyminen on oletettu niin suureksi, että holkki on pudonnut. Tilanne oli tällainen aluksen tullessa telakalle vuonna 2004. Jatkossa ala-akselin teoreettista tilaa liikkua vaakasuoraan kutsutaan termillä *liikevara*. Se on erisuuruinen alalaakerin eri korkeuksilla ja eri kohdissa kehällä. Ala-akseli liikkuu poikittain noin 8 kertaa sekunnissa, mikä saa veden liikkeelle välyksessä ja syöpyneessä tilassa (sekä vuoden 2004 jälkeen ruuvien kuusiokoloissa) nopeuttaen syöpymistä.



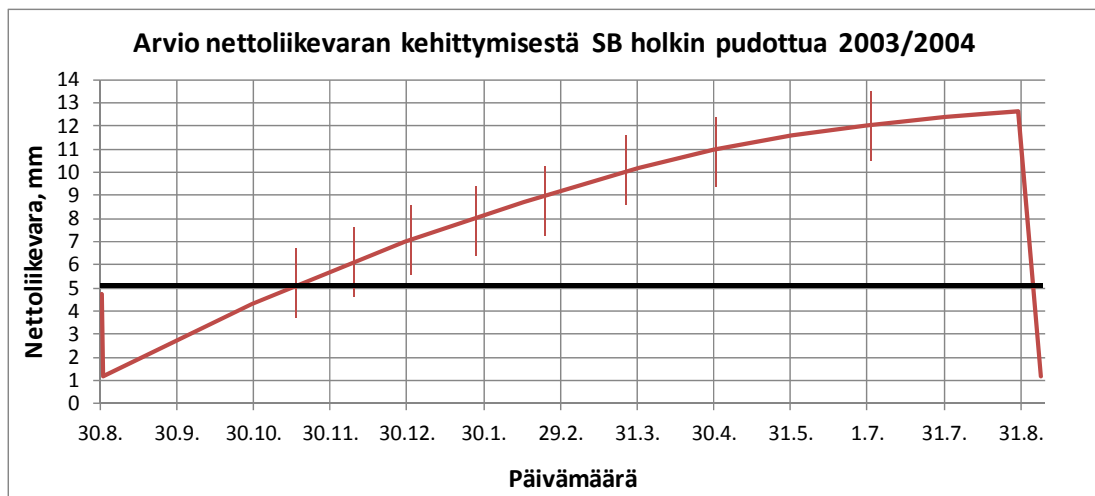
Kuva 16. Alalaakeri katsottuna perästä. Vasemmalla peräsinakseli on taipunut vasemmalle ja oikealla oikealle. Ala-akseli ja pudonnut holkki siirtyvät ± 15 mm puolelta toiselle pesän syöpymisen johdosta. Samalla peräsin kallistuu. Pesän korkeus on 480 mm ja laakerin halkaisija 533 mm.

Kun otetaan huomioon alalaakerin pesän poikkileikkauksen soikiomuoto ja pintojen epätasaisuudet, tullaan käsitteeseen ”**nettoliikevara**”, joka ilmoittaa realistisen liikevaran

Yhdistämällä edellä esitetyt mittaustulokset ja arviot syöpmän etenemisestä päädyttiin seuraavaan näkemykseen alalaakerien nettoliikevaran kehittymisestä, kuvat 17a ja b. Katkoviivoilla on näytetty arvioitu epävarmuusalue.



Kuva 17a. Arvio SB alalaakerin **nettoliikevaran** kehitymisestä. Holkin pudotessa 2009 epoksia on oletettu jäävän vielä paikoilleen. Epoksin poistuttua liikevara kasvoi hyppäyksenomaisesti. Katkoviiva näyttää maksimiarvion. Telakointiajankohdat vuosina 2002, 2003 (välyksiä ei tarkastettu) ja 2007 (välysmittaus ei ollut vertailukelpoinen) on näytetty ruskealla pystyviivalla.

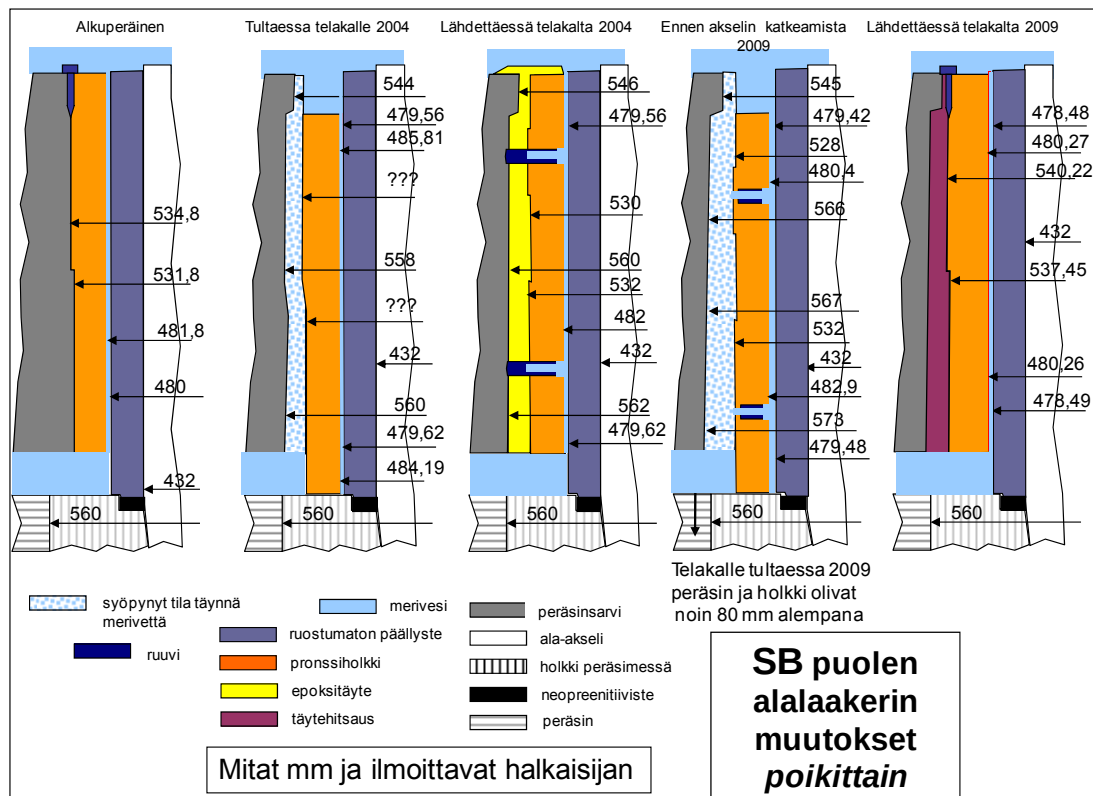


Kuva 17b. **Nettoliikevaran** kehitymisearvio, joka on tarkennettu kuvasta 17a. Kuvan pystyviivojen avulla on arvioitu yli 5 mm nettoliikevarojen kestot 1 mm välein. Tutkinnassa on arvioitu, että BB puolen holkki saattoi pudota hieman aiemmin.

Kuvassa 17b on myös väsymislaskelmien perusteella määritetty likimääräinen nettoliikevaran raja-arvo (noin 5 mm), jonka alapuolella vaihtojännitys on ikuisen keston²¹ alueella.

²¹ Ikuisen kesto raja, jota käytetään väsymislukuustarkastelussa, on kokeellisesti määritetty materiaali-kohtainen vaihtojännityksen raja-arvo, jossa syntyy vaurio, kun vaihtojen määrä kasvaa hyvin suureksi, yli miljoonaan teräksellä. Monilla materiaaleilla, kuten esim. alumiinilla ikuisen keston rajaa ei ole.

Kuvassa 18 on esitetty tärkeimmät alalaakerien rakenteet eri aikoina poikittain tehtyjen mittausten perusteella.



Kuva 18. SB alalaakerin eräät poikittaiset mittaustulokset.

Kuvaa laadittaessa on oletettu, että holkin olakkeesta pesään syntynyt mutka hiottiin pois vuonna 2004 ja seinämää tasoitettiin myös muualta, jolloin ainesta poistettiin todennäköisesti 1–2 mm.

Noin vuoden **2003 kesään** saakka liikevaraa kasvatti hitaasti pelkästään syöpyminen. Sen jälkeen holkit saattoivat pyöriä, aluksi vähän ja lopulta täysiä kierroksia. Pyöriminen kulutti syöpymisruostetta, mikä nopeutti huomattavasti liikevaran kasvua. Lopulta tilaa oli ympäri koko pesän niin paljon, että holkit putosivat

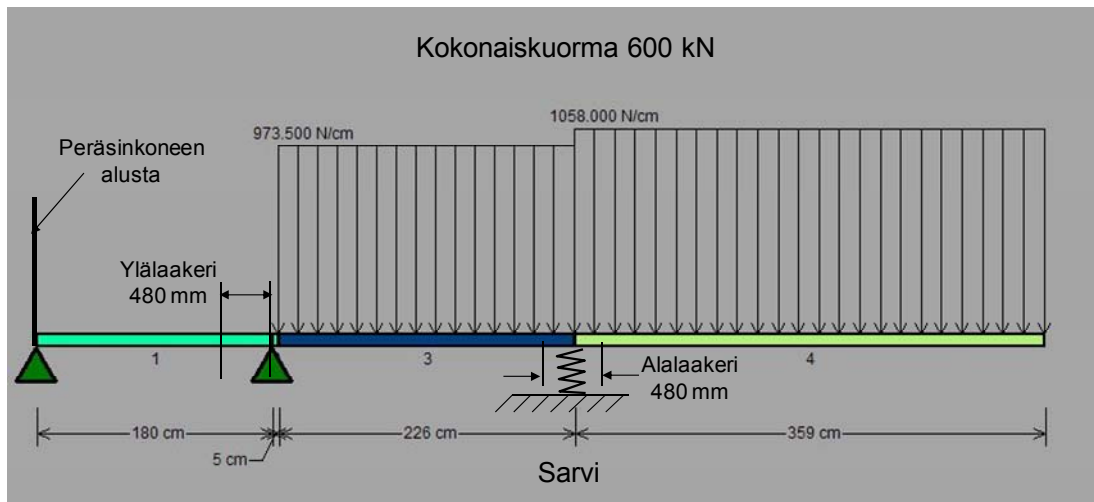
Kun holkki putosi, nettoliikevara kuvassa 17a pieneni välyksen puolikkaan suuruiseksi, koska pesän seinämässä oli holkille vastinolake. Holkit pyöivät edelleen, mikä ylläpiti liikevaran kasvunopeutta suurena. Myöhemmin kuluminen hieman hidastui, koska liikevaran ollessa suurempi, vain suurimmat peräsinvoimat aiheuttivat niin suuren taipuman, että alalaakerin holkki saattoi osua pesän seinämään. Suurimmillaan nettoliikevara oli 12–13 mm.

Vuoteen 2009 mennessä edenneen muutaman millimetrin lisäsyöpmisen ja ruuvien katkeamisen johdosta SB pronssiholkki putosi. Liikevara pysyi kuitenkin pienenä, sillä valuepoksia oli todennäköisesti vielä paikoin kiinni pesässä. Epoksin irrottua kokonaan liikevara kasvoi äkillisesti arvoon 16–18 mm (välys 32–36 mm).

Gdanskissa tilanne palautettiin vastaamaan alkuperäistä rakennetta siten, että pronssiholkin paksuutta kasvatettiin noin 2,5 mm, sen sisähalkaisijaksi työstettiin noin 480,3 mm ja ala-akselin paksuudeksi noin 478,5 mm.

1.5.3 Alalaakerin liikevara ja peräsinakselin jännitykset

Liikevaran vaikutusta peräsinakselin taivutusjännitykseen on tarkasteltu likimääräisesti peräsimen palkkimallin avulla, kuva 19. Peräsinakselin kriittinen kohta on ylälaakerin alaosassa, jossa jännitys on suurin ja jossa katkeaminen tapahtui.



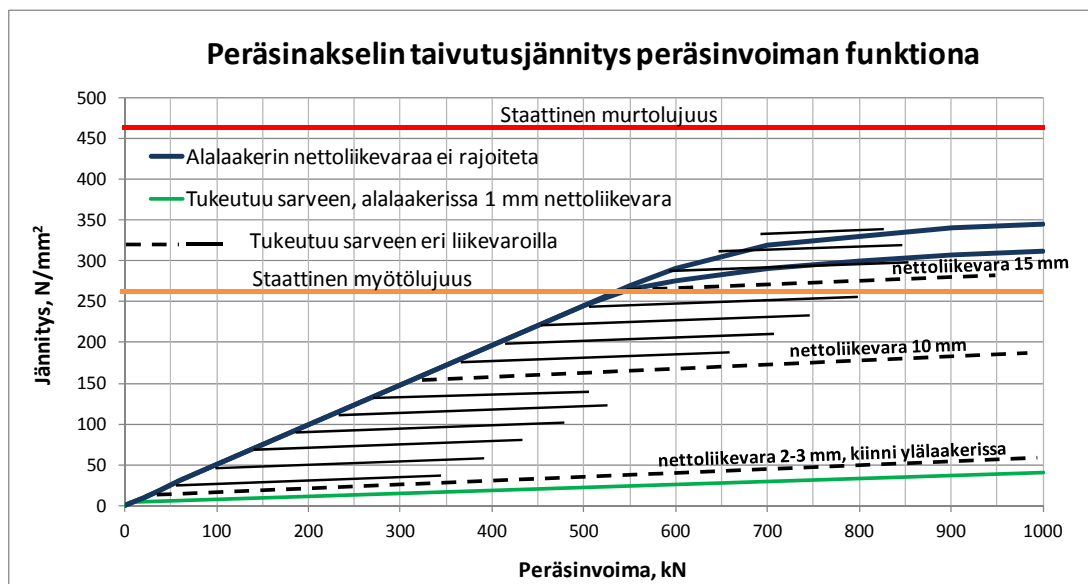
Kuva 19. Peräsimen tarkastelussa käytetty palkkimalli. Palkin eri osat on näytetty eri väreillä, koska eri osien neliömomentti ja taivutusvastus on erilainen. Kiinnitys peräsinkoneeseen on niveltuki-tyyppiä vastaten luokituslaitoksen oletusta. Todellisuudessa kiinnitys on hieman jäykempi.

Kuvassa 20 on peräsinakselin taivutusjännityksen riippuvuus taivuttavasta voimasta. Siinä, paksu käyrä vastaa tilannetta, jossa peräsinakselin ja peräsimen muodostama palkki taipuu ulokepalkkina, ilman peräsinsarven antamaa tukea. Akselin myötörajan ylityessä, tilanne muodostuu epätarkaksi, minkä vuoksi kuvassa on kaksi rajakäyrää²². Kuvaan on merkitty myös millimetrin nettoliikevaran välein kohta, jossa sarvi alkaa kantaa. Jännityksen kasvu voiman kasvaessa hidastuu sarven tullessa mukaan.

Luokituslaitoksen mitoituskaavojen mukainen mitoitusvoima on noin 1700 kN. Kuvassa on tilanne esitetty vain 1000 kN asti, koska hyvin suuret voimat ovat harvinaisia poikkeuksia.

Vääntöjännityksen oletetaan riippuvan vain hyvin vähän ala- ja ylälaakerin välyksistä, joten sen suhteellinen osuus pienenee taivutusjännityksen kasvaessa. Keskimääräinen vääntöjännitys on noin 3-5 N/mm² peräsinvoiman 100 kN kohti.

²² Peräsinä taivuttavien voimien muutoksista syntyvien peräsinakselin maksimijännitysten kesto-aika on niin lyhyt, että jännitys voi ylittää standardin mukaisessa vetokokeessa saadun myötölujuuden.



Kuva 20. ***Ehjän** peräsinakselin taivutusjännityksen riippuvuus peräsinvoimista erisuuruksilla alalaakerin nettoliikevaroilla. Jännitys nousee peräsinvoiman kasvaessa sinisen, paksun käyrän mukaisesti siihen saakka kunnes alalaakeri tukeutuu sarveen. Sen jälkeen jännitys kasvaa hitaasti. Jännityksen noustessa yli myötörajan, tilanne on sen verran epämääräinen, että on esitetty oletetut rajakäyrät.*

Ylälaakerin kohdalla peräsinakseliin vaikuttaa leikkausvoima, jonka synnyttämä jännitys on vähäinen silloin kun alalaakeri on kunnossa. Käytännössä suurillakin alalaakerin nettoliikevaroilla määräävänä on väännöstä ja taivutuksesta muodostuva yhdistetty jännitys, jota on laskelmissa käytetty.

1.5.4 VDR-datan keruu ja analysointi

VDR-laitteisto oli tallentanut kolmenlaista tietoa: numeerista sekunnin välein, kuvat Conning-näytöstä 25 sekunnin välein ja tutkanäytöstä 15 sekunnin välein sekä komentosilalla käydyt keskinäiset keskustelut samoin kuin keskustelut lähellä liikkuvien alusten ja VTS:n kanssa. Tietoja käytettiin seuraaviin tarkoituksiin:

- Ohjailun simulointimallilla laskettiin peräsinvoimat²³. Voimista määritettiin peräsinakselia taivuttavan voiman suuruus ja suunta. Taivuttavat voimat yhdistettyinä nopeuksiin ja kierroslukuihin laadittiin yleisyystilasto.
- Vertailtiin peräsinkulmien, kääntymisnopeuden ja aluksen asennon muutoksia muutama tunti ennen aluksen pysäyttämistä samassa reitin kohdassa vastaaviin tietoihin muutama viikko ennen onnettomuutta, jolloin akselin voitiin olettaa olevan vielä ehjä. Näin pyrittiin arvioimaan akselin katkeamishetki ja – paikka.
- Aluksen paikkatietojen avulla selvitettiin ja piirrettiin karttapohjalle aluksen reitti muutaman tunnin ajalta ennen aluksen pysäyttämistä ja tulosta verrattiin tavoiteltuun reittiin²⁴.

²³ Simulco Oy

- Kuva- ja äänitallenteiden avulla arvioitiin komentosiltamiehistön toimintaa.

Valittiin käsittelyyn kolme aikaväliä, joiden avulla kuvattiin aluksen koko historia:

1. Maarianhaminasta aluksen kulkuun Teilin selällä 22.11.2009 klo 21.20 saakka.
2. Maarianhaminasta Tukholmaan ja takaisin Maarianhaminaan 21–22.11.2009.
3. Muutama edestakainen matka Turku-Tukholma, noin kahden viikon väliajalla 29.10–1.11 ja 8–11.11.2009.

VDR-tietojen pohjalta laadittujen käyrien sisältämää historiatietoa ei komentosillalla ollut aluksen kulun aikana käytettävissä; näytöissä oli tietoa vain hetki kerrallaan.

1.5.5 Peräsimien tutkiminen – väsymisvaurioon johtaneet tekijät

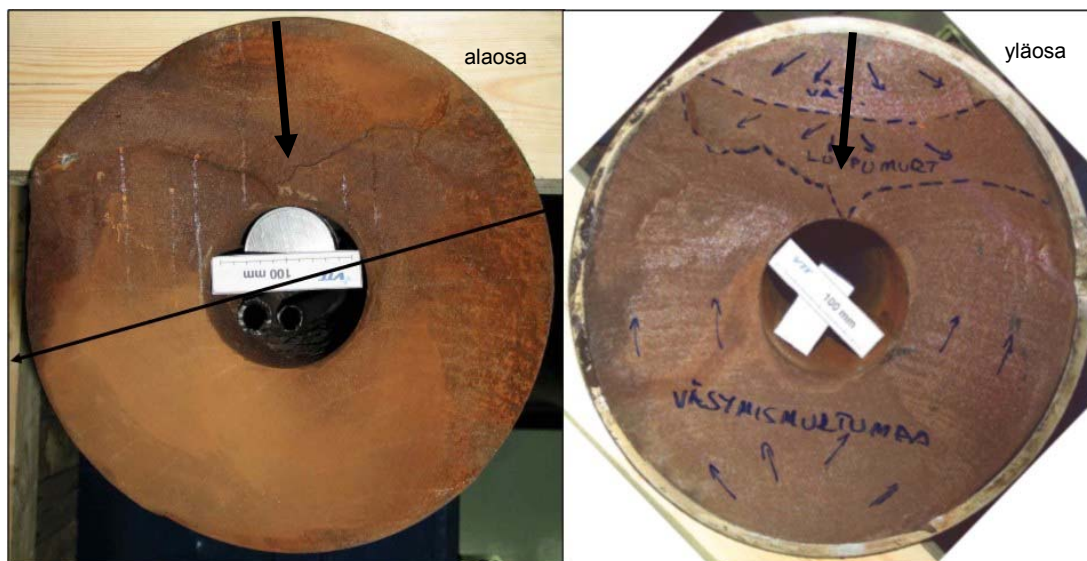
Peräsinakselit, alalaakerien pronssiholkit ruuveineen ja epoksin palasia lähetettiin tarkempia tutkimuksia varten VTT:lle. Pääosa VTT:n metalliosille tekemien tutkimusten tuloksista on raportissa²⁵, joka on taltioitu Onnettomuustutkimuskeskukseen. Peräsinakseleille tehtiin magneettijauhetautitarkastus. Katkenneen peräsinakselin murtopintojen ulkopintaa tutkittiin VTT:llä stereomikroskoopilla ja akselistä tehtiin metallografisia näytteitä, joita tutkittiin valomikroskoopilla. Katkenneesta akselistä katkeamiskohdan ulkopuolelta todettuja säröjä avattiin ja niiden avattuja murtopintoja tutkittiin pyyhkäiselektronimikroskoopilla (SEM). Katkenneen akselin materiaalin koostumus määritettiin optisella emissiospektrometrillä. Akseliteräksen, pronssiholkkien ja vuonna 2004 käytettyjen asennusruuvien kovuus mitattiin ja alalaakerin pesän materiaalin kovuus arvioitiin Vickers-yksiköissä. Katkenneesta akselistä tehtiin kaksi koesauvaa, joille tehtiin vetokokeet. Tähän on kerätty tärkeimmät tulokset.

Murtopinnat. Tutkittaessa katkenneen akselin murtopintoja (kuva 21), löytyi kohdasta, jossa kartio muuttuu sylinteriksi, 0,3 mm teräväkulmainen olake (kuva 22). Olakkeella on arvioitu olleen merkittävä väsymislujuutta heikentävä lovivaikutus. Tämä kohta akselin ympärillä seuraa pääosin hyvin murtopinnan reunaa. Pinnoissa on havaittavissa taivutusväsymisestä syntyneet *murtuman etenemistä kuvaavat kaaret*, pysähtymisjäljet ("aikarengaat"). Murtopinnan ulkonäöstä selvisi myös, että loppumurtuma on tapahtunut *lohkomurtumana*²⁶ ja että SB - peräsin on ollut katkeamishetkellä käännettynä muutama asteen sisäänpäin.

²⁴ Simulco Oy

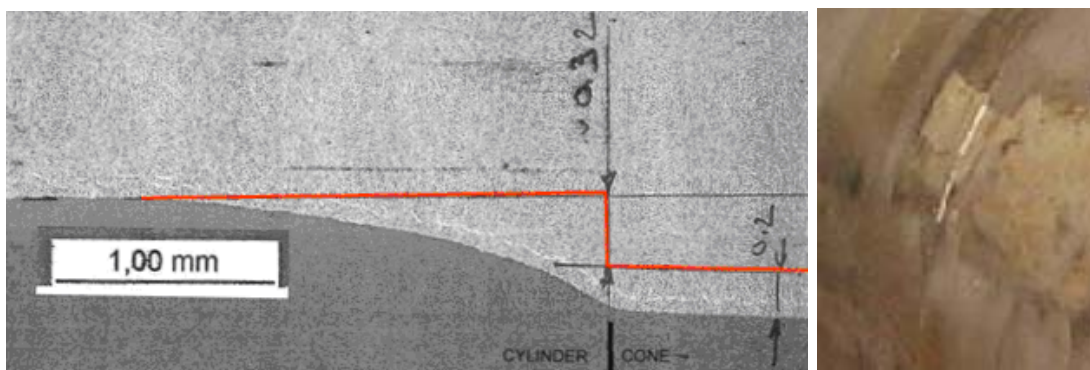
²⁵ VTT:n raportti VTT-R-0222-10

²⁶ Lohkomurtuma on äkillinen haurasmurtuma, johon vaikuttaa lämpötila, lovet, hitsisaumat, kuormitusnopeus ja teräksen alttius lohkomurtumalle (mitataan iskutestikokeella teräksen laatuolosuhteiden määrittämiseksi). Kun murtuma on lähtenyt liikkeelle, se ei enää pysähdy ilman merkittävää olosuhteiden muutosta.



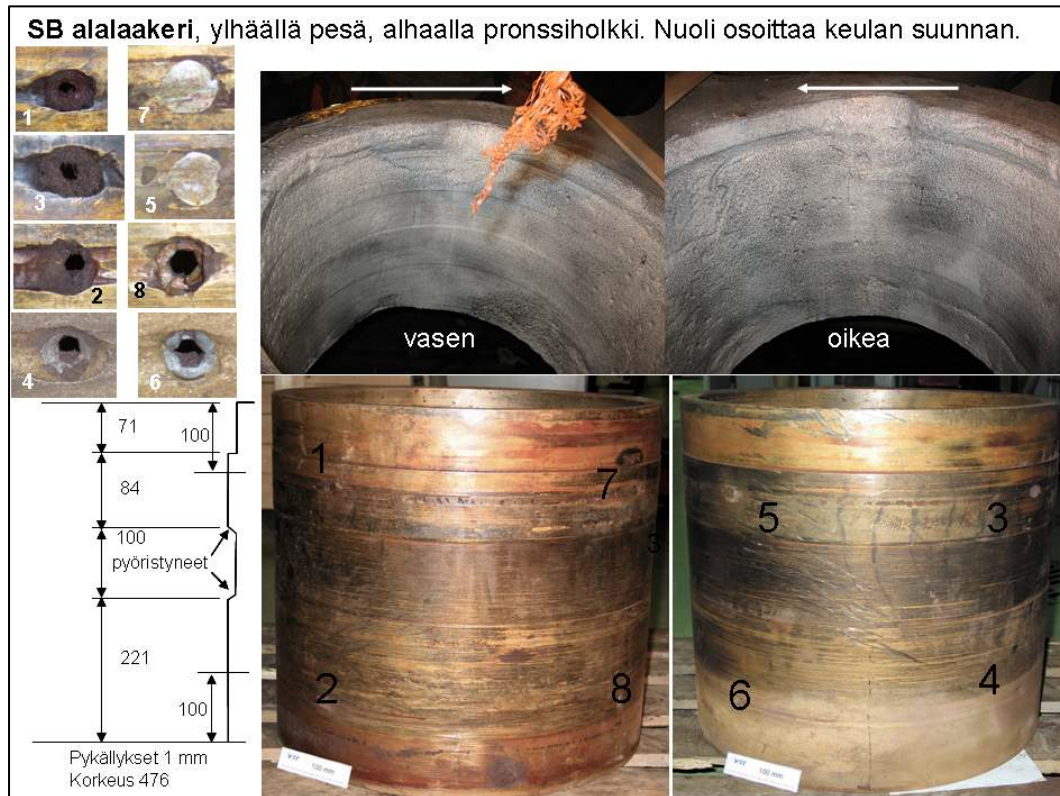
Kuva 21. Katkenneen akselin yläosa oikealla ja alaosa vasemmalla. Yläosassa on vielä akselin päällä ruostumattomasta teräksestä tehty päällyste. Yläosaan on piirretty väsymisen ja loppumurtuman rajat. Alaosaan on merkitty suunta perään peräsimen ollessa keskellä. Puoliskot on yritetty asettaa toisiaan vastaavaan asentoon. Kuvat VTT.

BB-akselin olakekohta oli VTT:n valumuottimittauksen mukaan kuvan 22 mukainen Gdanskissa tehdyn 0,2 mm työstön jälkeen. Alkupe-
räisen olakkeen muotoa ei ole pys-
tytty selvittämään. Ei ole poissuljettua, etteikö BB-akselissa ollut samanlaista terävää olaketta kuin katkenneessa SB-akselissa. Vieressä varalla olleen akselin, joka sitten otettiin käyttöön, vastaava kohta.

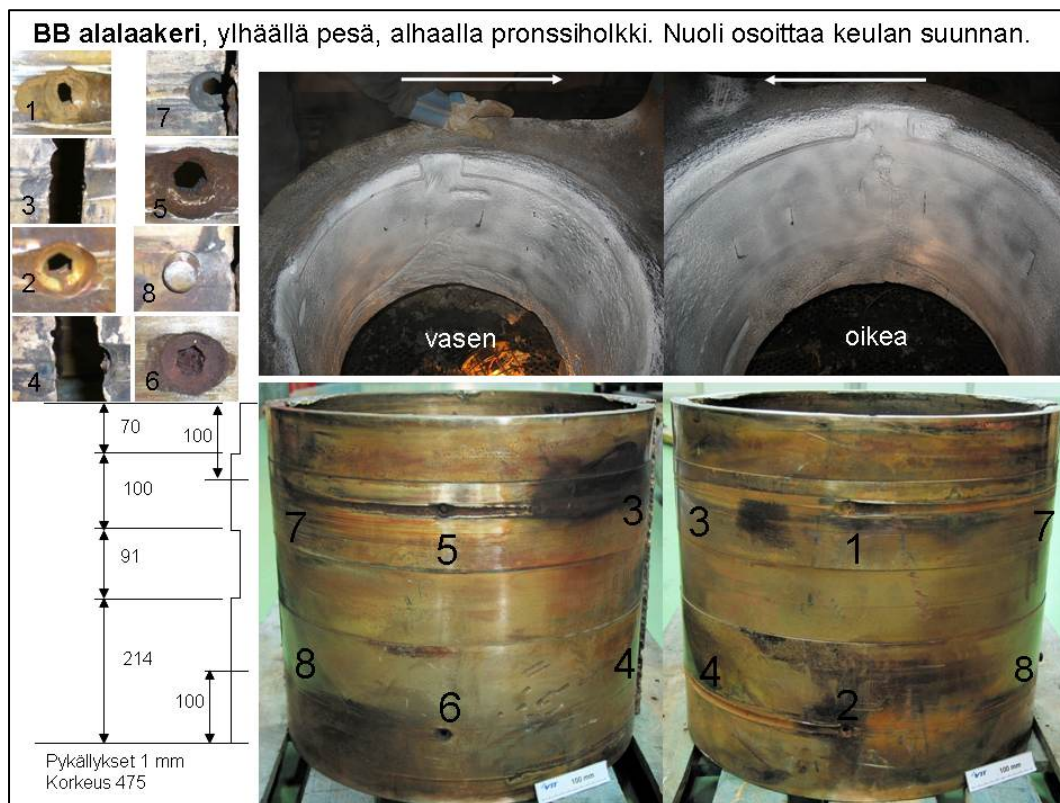


Kuva 22. "Ehjän" (BB) peräsinakselin profiili olakkeen kohdalla, vasemmalla (VTT:n raportista muokattu) ja varalla olleen akselin olakekohta, oikealla. "Ehjän" akselin kartiosta työstettiin pois 0,2 mm, joten varmuutta olakkeen alkupe-
räisestä profiilista ei ole. Punainen viiva näyttää katkenneen akselin profiilin.

Alalaakerien pesän yläreunassa oli noin 50 mm korkeudelta paksunnos, jonka paksuus oli noin 10 mm. Paksunnoksessa oli 3 kpl noin 40 mm levyistä koloa. Paksunnos (ilman koloja ja hieman matalampana) oli jo olemassa vuoden 2004 telakoinnissa. Sen oletetaan syntyneen pudonneen pronssiholkin kulutettua pyöriessään pesään kertynyttä korroosiojätettä, kuvat 23a ja b.



Kuva 23a. SB-alalaakeri. Pesän kuvat telakka, holkki VTT.



Kuva 23b. BB-alalaakeri. Pesän kuvat telakka, holkki VTT.

Pudonneen SB- laakeripesän seinämässä näkyy jälkiä vastaten holkin pykällyksiä, mikä kertoo holkin pyörimisestä epoksin poistuttua ja holkin pudottua. Myös ruuvien jälkiä on näkyvissä pesän seinämässä ja holkin pinnalla.

BB alalaakerissa valuepoksi oli pääosin paikoillaan. Alalaakerin alaosaista sitä oli irronnut noin 120 asteen alueelta, paikoin yli 20 cm syvyydeltä. Kuvassa 24 on näkyvissä raot epoksin ja holkin sekä epoksin ja pesän välissä.



Kuva 24. Osittain irronnutta epoksia BB alalaakerissa. Näkyvissä on selvästi ohuet raot toisaalta epoksin pesän, toisaalta epoksin ja pronssiholkin välissä. Kuvattu 3.12.2009.

Holkkien pinnat valuepoksin puolella todettiin sileiksi paikallisia edellä mainittuja naarmuja lukuun ottamatta. Holkit oli niiden työstön jälkeen ilman erityistä työstönesteen poistoa keskitetty ruuveilla paikoilleen epoksin valun ajaksi, minkä johdosta epoksin ja holkin välinen tartunta jäi heikoksi. Tästä seurasi myös mahdollisuus, että vettä pääsi melko pian vuoden 2004 telakoinnin jälkeen holkin ja epoksin väliin.

BB-pronssiholkki saatiin pois vain polttoleikkaamalla, vaikka se oli päässyt pyörimään. Ilmeisesti ruuvit estivät sen putoamisen. Molemmat holkit ovat jossakin vaiheessa pyörineet, ilmeisesti epoksia vasten. Ruuvien palasia on todennäköisesti jäänyt valuepoksiin kiinni ja uurtanut holkkia, kuvat 23a ja b.

Ruuvit. Vuonna 2004 holkkien asennuksessa oli käytetty apuna kuusiokoloruuveja M16 holkin pitämiseksi oikealla kohdalla epoksivalun aikana. Ruuvit lävistivät holkin ja epoksin ja ulottuivat pesän seinämään, johon oli mahdollisesti tehty niitä varten kolo.

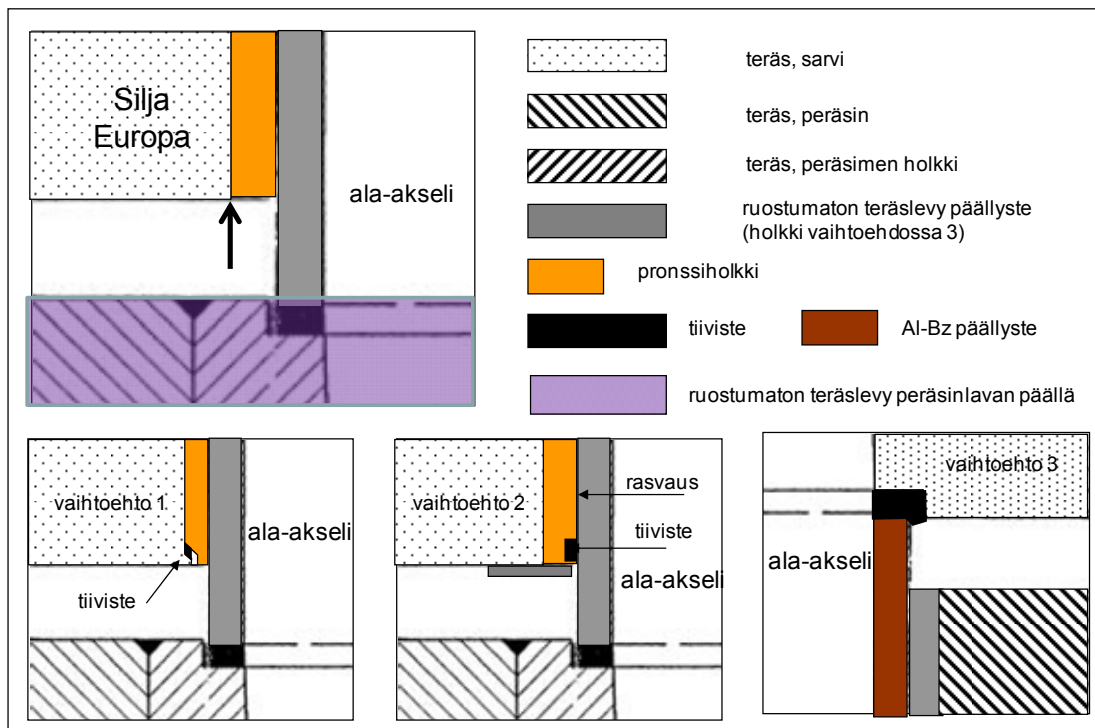
Valuepoksin ominaisuudet. BB-puolen alalaakerin pronssiholkin irrotuksen yhteydessä saatiin talteen muutama valuepoksin palanen. Kaksi palasta toimitettiin VTT:lle tarkempaa tutkimusta varten. Lisäksi VTT sai valun tehneeltä yhtiöltä epoksia ja kovetetta koe-

valun tekoa varten²⁷. Koepaloista saadut arvot olivat pääosin lähellä valmistajan ilmoittamia arvoja ja valua voidaan sinänsä pitää onnistuneesti tehtynä.

1.5.6 Alalaakerin korroosio

Aluksen alalaakerin rakenne on galvaanista korroosiovaaraa ajatellen epäedullinen, koska pronssi on suojaamattomana merivesi-elektrolyytissä välittömässä yhteydessä valuteräkseen, kuvat 5a, 5b ja 25.

Kuvassa on näytetty vain alalaakerin alareuna; vastaava kohta yläreunassa SILJA EUROPA:ssa oli suojaamatta ja vaihtoehdoissa suojattu.



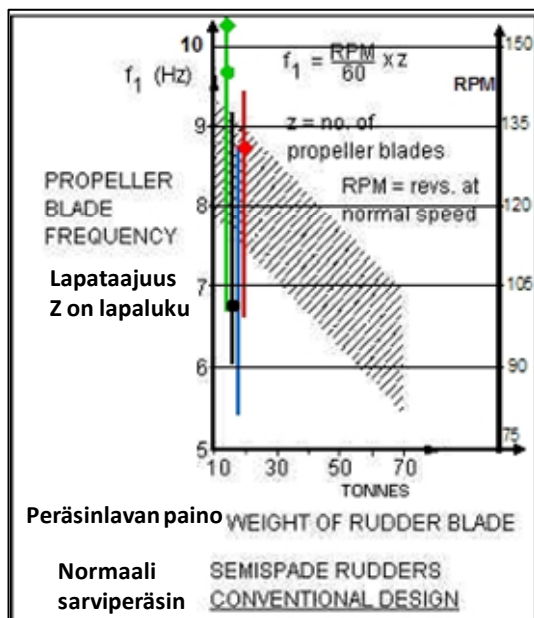
Kuva 25. SILJA EUROPA:n alalaakerin alareunan rakenne sekä vaihtoehtoisia, muissa aluksissa käytettyjä rakenteita. SILJA EUROPA:n peräsinen päällysteen laajuus on esitetty kuvassa 12. Vaihtoehto 1 on useimmin käytetty, mm SILJA SERENADE ja SILJA SYMPHONY.

1.5.7 Peräsinen värähtely

Peräsinen vaikuttaa ohjailusta syntyvän peräsinvoiman lisäksi potkurivirtauksen synnyttämät voimat. Näiden voimien yhteisvaikutus taivuttaa peräsinä. Peräsinvoimat muuttuvat hitaasti muutaman sekunnin kuluessa. Sen sijaan potkurista johtuvat voimat muuttuvat nopeasti potkurin pyöriessä. Muutos toistuu yhden kierroksen aikana yhtä monta kertaa kuin potkurissa on lapoja. Tätä kuvaa lapataajuus, joka riippuu kierrosluvusta ja lapojen lukumäärästä. SILJA EUROPA:n lapataajuus on 6,7–9,5 Hz, kuva 26. Peräsin on palkki, jolla on rakenteesta johtuva ominaisvärähdysluku. Mikäli se sattuu

²⁷ VTT:n raportti VTT-S-09524-10

olemaan sama tai lähellä potkurin lapataajuutta, peräsimen poikittaisliike vahvistuu resonanssin johdosta.



Kuva 26. Ehjän sarviperäsimen ominaistajuus peräsinlavan painon funktiona. SILJA EUROPA:n potkurin kierroslukualue on merkitty punaisella. Kuvassa on myös kolmen muun aluksen tilanne. Vinoneliö ilmoittaa potkurin kierrosluvun kun akseligeneraattori on käytössä. Ympyrät ilmoittavat yleisimmin käytetyn kierrosluvun. Vaarallinen alue on viivoitettu. Det Norske Veritasin alkuperäistä kuvaa on muokattu. ("Semispade rudder of conventional design" on sama kuin sarviperäsin)

Peräsimen poikittaisliikkeen voimistuminen lisää peräsinakselin jännityksiä. Kuvassa 26²⁸ on näytetty sarviperäsimelle vaarallinen potkurin kierroslukualue viivoitettuna. SILJA EUROPA:n lapataajuusalue on merkitty kuvaan punaisella. Kuvaa on lisätty kolmen muun vastaavanlaisen aluksen tiedot. Normaali kierrosluku vaihtelee välillä 100–143 1/min.

Teknillisen korkeakoulun (TKK) laskelmien pohjalta on voitu arvioida potkurien synnyttämä peräsinakselia taivuttava syklinen voima. Arvion mukaan voiman suuruus on noin 180 kN ja se aiheuttaa noin 885 kNm taivuttavan syklisen momentin²⁹. TKK:n tulosten mukaan ehjän peräsimen ominaistajuus on 6–7 Hz ja vaurioituneen 2–3 Hz. Tutkinassa on arvioitu ominaistajuuksien suhteeksi noin 2,5. Aluksen nopeus on TKK:n laskelmissa 22,7 solmua. Muilla nopeuksilla voimat voidaan muuttaa nopeuksien neliön suhteessa. Väsymislaskelmiin edellä esitetty voima ja momentti on skaalattu vastaamaan aluksen rekisteröityä nopeusjakautumaa (taulukko 3).

Resonanssin merkitys riippuu käytetyistä kierrosluvuista, siitä kuinka lähellä ollaan peräsimen ominaistajuutta. Noin 30 % ajasta kierrosluku näyttää olevan vaarallisella alueella 135–112,5 Hz.

²⁸ Kuva perustuu Det Norske Veritasin vaurioraporttiin 3/93. Siinä kuvataan peräsimen syntynyt halkeama. Se oli todennäköisesti johtunut lapataajuuden osumisesta kuvan esittämälle vaaralliselle (viivoitettu) taajuusalueelle. Sisäraluksella ei ollut tällaista vauriota; sen potkurissa oli 3 lapaa, yksi lapa vähemmän, joten lapataajuus oli pudonnut 25%.

²⁹ Syklisen voiman vaikutuspiste on alempana kuin peräsinvoiman resultantin.

1.5.8 Peräsimen kavitaatio

Telakointiraporteista on selvinnyt, että peräsimen kavitoitinvaurioita oli jouduttu korjaamaan jokaisen telakoinnin aikana. Kavitoinnin laajuus on tyypillistä sarviperäsimmille. Kavitoinnin voimakkuus kasvaa, kun potkuriteho potkurin pinta-alaa kohti kasvaa. Raja-arvoksi³⁰ on esitetty 800 kW/m^2 , SILJA EUROPAlla arvo on 810 kW/m^2 .

1.6 Peräsinakseliä väsymisprosessi

Onnettomuuteen mennessä alus oli ollut liikenteessä lähes 17 vuotta. Oletetaan ajopäiviksi 350 vrk/vuosi ja ajotunneiksi 22h/vrk. Näillä oletuksilla saadaan potkuriherätteen 8 Hz taajuudella jännityksen vaihtoluvuksi $17 \times 350 \times 22 \times 3600 \times 8 = 3,8$ miljardia. Lisäksi vuorokaudessa peräsinvoiman merkittäviä hitaita vaihtoja on tutkinnassa tehtyjen simulointilaskelmien perusteella muutama sata kpl. Kuormitusvaihtelujen suuren lukumäärän vuoksi peräsinakselin ja peräsinrakenteen muidenkin osien kestävyyttä tässä vauriotilanteessa on tarkasteltava väsymisilmiönä.

Väsymisilmiön riittävän luotettava teoreettinen hallinta on toistaiseksi hankalaa. Väsymisilmiön huomioon ottava mitoituksen samoin kuin väsymisvaurion tarkastelun on käytännössä pohjautettava yksinkertaistettuun teoriaan, kokeellisiin tuloksiin, taulukoihin ja käyrästöihin. Tässä tapauksessa on käytetty samoja menettelyjä, mutta toiseen suuntaan: arvioitu katkenneen osan väsymiskestävyyttä.

SILJA EUROPAn tapauksessa kohdataan useita väsymislaskentaan liittyviä monimutkaisia tekijöitä ja lähtötietojen epätarkkuuksia. Toisaalta, tämä on tehnyt mahdolliseksi valita lähtötiedot siten, että SB akseli katkesi. Saadut tulokset ovat suuntaa antavia ja esittävät erään mahdollisen väsymisprosessin kulun.

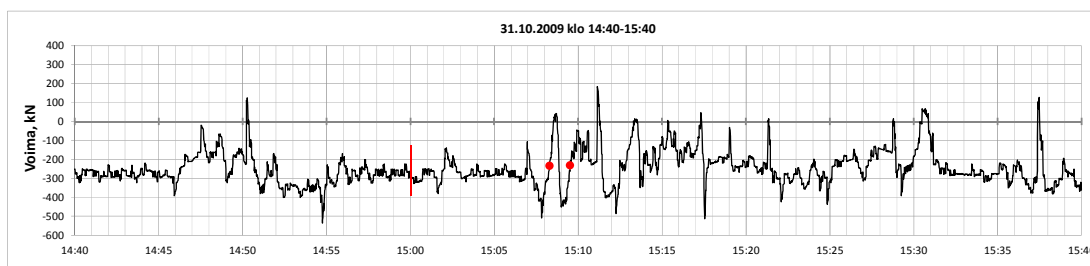
Peräsinakselin väsymisestä johtuvan katkeamisen arviointi voidaan jakaa seuraaviin osatehtäviin:

1. Peräsimeen ja siten myös peräsinakseliin vaikuttavien voimien ja voimiin vaikuttavien tärkeimpien tekijöiden ja niiden keskinäisten riippuvuussuhteiden määrittäminen.
2. Erisuuruisten voimien yleisyysjakautuman määrittäminen *vuorokautta* kohti. On oletettu, että vuorokausien kesken ei ole kovin suuria eroja. Monistamalla vuorokaudet saadaan eripituisia väsymisjaksoja. Jäiden vaikutus on otettu huomioon erikseen.
3. Muunto voimajakautumista jännitysjakautumiin.
4. Peräsinakselin väsymislajuuden määrittäminen (Wöhler-käyrä).
5. Kumulatiiviset väsymislaskelmat (Minerin summa).

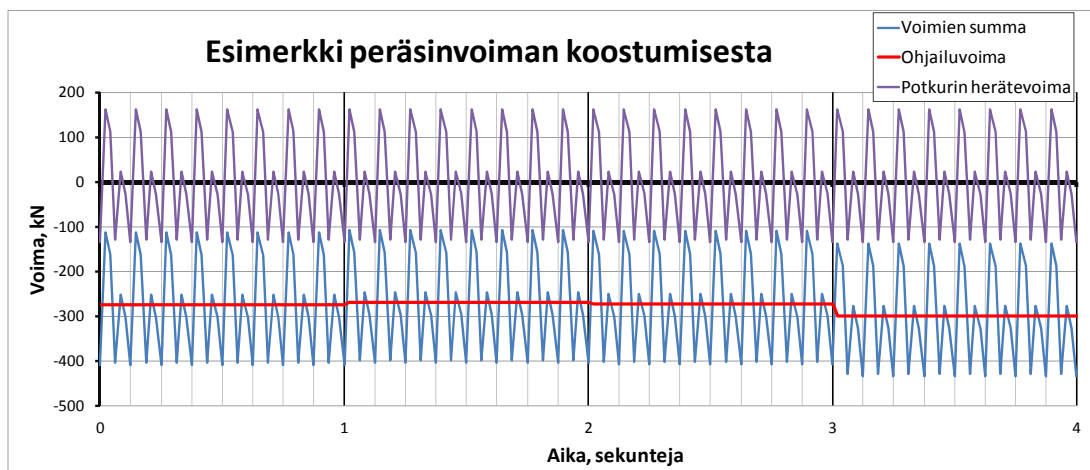
³⁰ Rudder Cavitation-osa, Proceedings of 25th ITTC (International Towing Tank Conference) – Volume II, sivu 495, Fukuoka.

1.6.1 Vaikuttavat voimat ja peräsinakselin jännitykset

Taivuttavat voimat. Peräsimeen kohdistuva taivuttava voima muodostuu kahdesta komponentista: muutaman sekunnin lähes vakiona pysyvistä ns. *stationaarisesta* peräsimeen kohdistuvasta peräsinvoimasta ja potkurivirtauksen synnyttämästä aluksen nopeudesta ja potkurin kierrosluvusta riippuvasta useita kertoja sekunnista muuttuvasta, syklisestä ns. *epästationaarisesta* voimasta. Stationaarinenkin voima on muuttuva ja synnyttää ns. hitaasti muuttuvan vaihtojännityksen, kuva 27a.



Kuva 27a. Peräsintä taivuttava voima tunnin ajalta 30.10.2009 klo 14:40–15:40.



Kuva 27b. Peräsintä rasittavan voiman periaatteellinen malli. Voima koostuu stationaarisesta peräsinvoimasta ja potkurin pyörimisestä johtuvasta noin 8 Hz taajuudella vaihtuvasta epästationaarisesta voimasta. Vaaka-asteikon pienin väli vastaa potkurin pyörimistä 90 astetta, kun kierrosluku 120 1/min. Kuva on ote edellisestä kuvasta klo 15:00 alkaen 4 sekuntia.

Kuvaan on merkitty punaisin pistein yksi ns. hidas jakso. Kuvassa 27b on näytetty neljän sekunnin ajalta alkaen klo 15:00 (punainen viiva kuvassa 27a), miten nämä kaksi voimaa summautuvat³¹ aluksen nopeuden ollessa 20,14 solmua.

Alalaakerin liikevaran kasvettua tilanne tuli monimutkaisemmaksi, koska välillä alalaakeri osui pesän seinämään ja välillä ei. Peräsimen ominaistaajuus on näissä tilanteissa erilainen. Tilannetta monimutkaistaa vielä se, että syklisen voiman johdosta alalaakeri voi välillä irrota seinämästä. Liikettä vaimensi voiteluaineena toimiva merivesi.

³¹ TKK:n 22,7 solmun nopeutta vastaava, epästationaarinen voima on muunnettu (nopeuden neliösuhteella) vastaamaan aluksen nopeutta 20,14 solmua kyseessä olevalla hetkellä ilman muita mahdollisia korjauksia.

Peräsinakseliin vaikuttaa taivutusjännityksen lisäksi samanaikaisesti nopeasti vaihteleva vääntöjännitys, taivutuksesta johtuva leikkausjännitys sekä kartio-osassa vaikuttava puristusjännitys. Kriittisessä kohdassa puristusjännityksen lisäävä vaikutus keskijännitykseen on suhteellisesti suurimmillaan pienillä taivutusjännityksillä. Väsymislaskelmissa jännitykset on summattu kriittisessä kohdassa kahdella tavalla: taivutus+vääntö sekä taivutus+vääntö+puristus

Jäissä kulun vaikutus on otettu huomioon siten, että staattisten suurten vaihtelujen lukumäärää on jonkin verran lisätty syksyn 2009 arvoista.

1.6.2 Luokituslaitosten mitoitusperusteet

Peräsinvoiman mitoitusarvo määräytyy luokituslaitosten säännöistä. Näin saadaan selville voiman yläraja. Mitoitusvoimaksi tulee SILJA EUROPA:n tapauksessa noin 1700 kN ja mitoitusvääntömomentiksi noin 600 kNm.

Bureau Veritasin luokituslaskelmat 1991–1993 oli tehty vuoden 1987 säännöillä. Kokonaisperäsinvoimaksi oli tuolloin saatu 1412 kN. Luokituslaitoksen tarkistuslaskelmien mukaan mitoitus oli oikein³².

1.6.3 Simuloidut staattiset voimat

Simulointimallissa käytetyn aluksen perän muodot ja mitat, peräsin- ja potkurijärjestely sekä vanavesi vastaavat SILJA EUROPAa. Taulukossa 3 on näkyvissä simuloitujen peräsinvoimien itseisarvon yhden vuorokauden jakautuma 100 kN suuruisiin voima-alueisiin ryhmiteltynä.

1.6.4 Staattisten ja syklisten voimien yhdistäminen

Simuloidut staattiset voimat ovat sellaisinaan käytettävissä jatkolaskentaan. Sen sijaan TKK:n yhdellä nopeudella laskema syklinen voima on muutettava vastaamaan aluksen nopeutta ja sitä, kuinka lähellä vallitseva kierrosluku on peräsimen ominaistajuutta vastaavaa kierroslukua. Näin resonanssivaikutuksella korjattu syklinen voima lisätään staattiseen voimaan.

Tämän vuoksi nopeus on jaettu neljään ryhmään ja kierrosluku kolmeen ryhmään jokaisessa 100 kN levyisessä voima-alueessa. Voima-alueet on valittu staattisen voiman itseisarvon perusteella. Nämä ryhmittelyt on katsottu riittäviksi, vastaten lähtöarvojen ja koko laskentaproseduurin likimääräisyyttä. Samalla on yksinkertaistettu laskentatyötä.

Taulukossa 3 on esimerkki näiden kolmen muuttujan suhteen tehdystä lajittelusta. Esimerkiksi vaarallisimmalla kierroslukualueella 115–135 1/min (merkitty harmaalla) löytyy voimavälille 400–500 kN nopeusalueella 15–18 solmua 41 kpl sekunnin kestoista tapausta/vrk. Kaikkiaan tapauksia on 86401 kpl, mikä on sekuntien määrä+1 vuorokaudessa. Ruudut, joissa on tapauksia 0 kpl, on jätetty jatkolaskennasta pois. Värillisillä ruuduil-

³² Bureau Veritasin Suomen konttorin välittämä sähköposti 12.11.2010. Vuoden 1987 säännöissä voiman laskentakaava erosi nykyisestä.

la on laskennassa näytetty voima-alueet, joilla alalaakeri ei osu pesän seinämään ja peräsimen ominaistajuus on 2,5 Hz. Taulukko perustuu 9-10.11.2009 tietoihin.

Taulukko 3. Tapausten määrä vuorokaudessa lajiteltuna kolmen muuttujan avulla.

kierroslukualue voima-alue nopeus- alue ja kerroin	alle 115 RPM							115-135 RPM							yli 135 RPM						
	0-100	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600	600-700	0-100	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600	600-700	0-100	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600	600-700
alle 10 kn/ 0.10	11469	153	0	0	0	0	0	8868	682	333	131	51	35	1	3	0	0	0	0	0	0
10-15 kn/0.33	1659	761	47	0	0	0	0	3045	6540	230	9	1	0	0	105	1370	253	13	2	0	0
15-18 kn/0.56	62	196	76	0	0	0	0	342	3366	875	92	41	0	0	300	4890	4000	221	25	0	0
yli 18 kn/0.74	0	34	2	0	0	0	0	31	336	520	55	13	0	0	273	4069	26626	4029	161	5	0
Yhteensä	13190	1144	125	0	0	0	0	12286	10924	1958	287	106	35	1	681	10329	30879	4263	188	5	0

Sykliellä voimalla on 8^{33} kertaa sekunnissa esiintyvä huippuarvo 345 kN TTK:n laskelmien pohjalta, vastaten aluksen nopeutta 22,7 solmua. Huippuarvoja on siten 691200 kpl vuorokaudessa. Taulukossa on nopeuden neliösuhteesta laskettu nopeusaluekohdainen kerroin, jolla huippuarvo on kerrottava. Lisäksi on otettava vielä huomioon kerroin, joka riippuu kierrosluvusta kahdella alalaakerin liikevaralla: alalaakeri ei osu pesään (nettoliikevara suuri, peräsimen ominaistajuus 2,5-3 Hz) ja nettoliikevara pieni (alalaakeri kiinni pesässä, peräsimen ominaistajuus 8 Hz). Tulosta on vielä pienennetty 25 % perustuen TTK:n raportin mainintaan, että voima on tuloksissa liian suuri, koska peräsin on jäykkä.

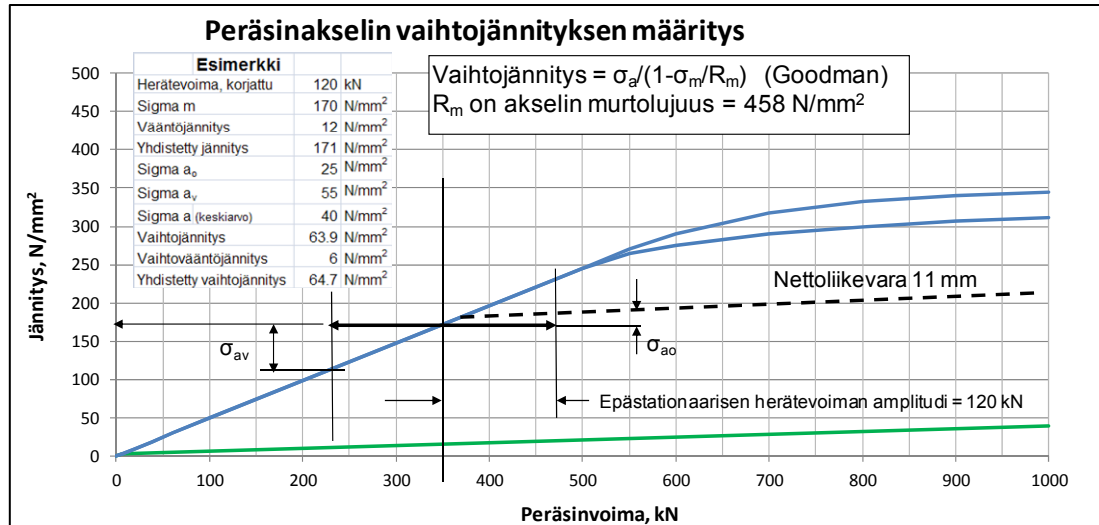
1.6.5 Voimien muunto jännityksiksi

Voimajakautuma on ensin muunnettava vaihtojännitysjakautumaksi. Sen ja peräsinakselin Wöhler-käyrän avulla voidaan arvioida peräsinakselin elinikä.

Eräs tapa on muuntaa jännitysvaihtelut sellaisiksi, että keskiarvo on nolla. SILJA EUROPAn tapauksessa jännitysvaihtelut jakaantuvat nopeisiin, 8 kertaa sekunnissa tapahtuviin ja hitaasti vaihteleviin, jopa useiden kymmenien sekuntien välein muuttuviin. Kuormitus on käytännössä ollut satunnaista. Esimerkiksi kuvassa 27a punaisilla ympyröillä merkitty väli muodostaa yhden hitaan jakson.

Muunnos vaihtojännityksiksi on tehty kuvassa 28 esitetyllä periaatteella. Ensin on määritetty tilanteessa vallinneen epästationaarisen potkurista johtuvan voiman aiheuttama vaihtojännityksen keskiarvo. Se on sitten Goodmanin kaavalla muunnettu sellaiseksi, että keskijännitys on nolla.

³³ Potkurin kierrosluku on ollut keskimäärin 122 1/min, joten 8 Hz lapataajuus on sopiva.



Kuva 28. Väsymislaskelmissa käytettävän nollakeskiarvoisen vaihtojännityksen määrittäminen Goodmanin kaavalla ilman puristusjännitystä. Esimerkin luvut eivät vastaa mitään SILJA EUROPA:n tilannetta. Voimaväli on esimerkissä 300–400 kN, epästationaarisen voiman amplitudiksi on esimerkissä otettu 120 kN. Vääntöjännityksen vaikutus on vähäinen.

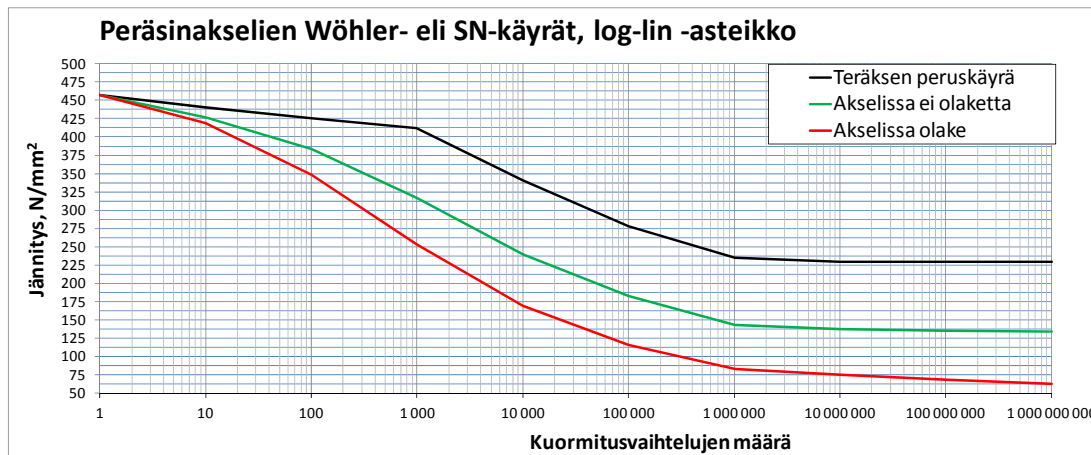
Näiden vaiheiden kautta syntyi uusi taulukko, jossa on vaihtojännitykset taulukon 3 ruutuja vastaavissa kohdissa. Tämän jälkeen voitiin laskea valitulla 50 N/mm² jännitysväliportaalla syklisistä voimista kertyvä jännitysvaihtelujen määrä kullekin jännitysvälille. Alalaakerin ollessa kunnossa, peräsinarvi kantaa pääosan kuormituksesta ja akselin staattinen ja syklinen jännitys ovat pieniä. Tilanne oli tällainen alkuvuosina noin vuoteen 2004 asti sekä aluepöytä asennuksen jälkeen lähes vaurioon saakka.

Menettely toistettiin kaikilla merkittävillä liikevaroilla ilman kartiossa vaikuttavaa puristusjännitystä ja sen kanssa. Vuoteen 2004 mennessä 5-12 mm liikevaroilla yhden millimetrin välein sekä syksyllä 2009 yli 16 mm liikevaralla. Puristusjännitys lyhentää hieman akselin elinikää.

1.6.6 Peräsinakselin väsymislajuuden arviointi

Peräsinakselin väsymislajuuden arviointi perustuu Wöhler-käyrään, kuva 29. Käyrä esittää, kuinka monta vaihtuvaa tietyn suuruista jännitystä (lukumäärä yli noin tuhat) tai venytys/puristus vaihdosta (lukumäärä alle noin tuhat) materiaali kestää. Lähtökohtana on peräsinakselin arvioitu peruskäyrä, musta. Siihen on tehty normaalit korjaukset johtuen pinnan laadusta ja kappaleen koosta ja saatu vihreä käyrä. Mikäli rasituksen alaisessa kappaleessa on lovi, säröjä tai vastaavaa, väsymislajuus heikkenee. Loven vaikutus voidaan ottaa huomioon esimerkiksi ns. loven vaikutusluvun avulla. Kun SB-akselissa olleen 0,3 mm terävän olakkeen vaikutus otetaan huomioon, päädytään punaiseen käyrään.

Kuten kuvasta 29 käy ilmi, teräksellä on sellainen ominaisuus, että tietyn jännitysrajan alapuolella kappale kestää käytännöllisesti katsoen rajattoman määrän jännitysvaihtelua. Tämän rajan alapuolella olevat vaihtojännitykset ovat ns. *ikuisen keston* alueella, eikä niitä yleensä tarvitse ottaa huomioon väsymislaskelmissa.



Kuva 29. Teräksen väsymislujuuden peruskäyrä (musta) ja peräsinakselin arvioidut väsymislujuuskäyrät, Wöhler- eli SN-käyrät keskijännityksen ollessa nolla. Vaaka-asteikko on logaritminen.

Väsyttävän kuormituksen ollessa satunnaista Wöhler-käyrät saattavat olla vielä edellä esitettyä heikompia. Tätä ei ole yritetty arvioida.

1.6.7 Peräsinakselin elinikien arviointi

Minerin teorian osuudesta tässä proseduurissa käytetään nimitystä *kumulatiivinen väsymiskestävyyslaskenta*. Sen avulla selvitetään, kuinka suuren osuuden akselin eliniästä tietyn suuruinen jännitysvaihtelu kuluttaa. Erisuuruisten jännitysvaihtelujen kulu-tusosuudet lasketaan yhteen, ja summan tulee yleisen käytännön mukaan olla alle 1, jotta rakenne kestäisi kyseisen vaihtelevan kuormituksen.

Laskentaproseduurissa on etsitty kokeilemalla sellainen muuttujien kombinaatio, että havainnot ja mittaustulokset voidaan selittää. Erityisen voimakkaasti tuloksiin vaikuttaa pienikin muutos SN-käyrässä. Myös kierrosluvusta ja värähtelyn vaimennuksen suuruudesta riippuvalla herätevoiman vahvistuskertoimella voidaan tuloksia säätää (värähtelyn vaimennuskerroin on arvioitu melko suureksi). Proseduurissa ei ole otettu huomioon sitä, että väsymiskestävyys hieman heikkenee keskijännityksen kasvaessa (Wöhler -käyrä laskeutuu). Tässä esitetyt tulokset ovat ilman puristusjännityksen vaikutusta. Sen mukana olo lyhentää hieman akselin elinikää.

Normaalivälilykset. Laskelmat osoittavat, että ilman syöpymistä akselit olisivat kestäneet, eikä väsyminen olisi kuluttanut elinikää.

Akseli ilman olaketta, mutta alalaakeri syöpyy. Akseli olisi kestänyt alalaakerin liikevaralla syöpymisen 12 mm nettoliikevaralla koko elinikänsä. Nettoliikevaralla 16 mm akseli olisi kestänyt alle kaksi vuotta. Fretting-ilmiön vaikutusta ei ole näissä arvioissa otettu huomioon. Suurilla nettoliikevaroilla ilmiö alkaa esiintyä, mutta sen vaikutusta elinikään ei ole kyetty arvioimaan. Ei ole poissuljettu, että elinikä voi lyhentyä edellä esitetyistä.

Onnettomuustilanne, siis olakkeellinen akseli

Laskelma 1993–2004. Nettoliikevaran kasvettua yli 5 mm, alkoi akselien väsymiskestävyyttä kulua. Vuoden 2004 telakointiin mennessä oli SB akselin eliniästä kulunut valtaosa, noin 85 %. Tämä tarkoittaa, että mikäli tilanne olisi jatkunut keskimäärin samanlaisena kuin kuluneiden 11 vuoden aikana, olisi elinikää ollut jäljellä noin 2 vuotta. Jos tilanne olisi jatkunut sellaisena kuin se oli viimeiset kaksi kuukautta ennen telakointia, olisi elinikää ollut jäljellä vajaa vuosi, mutta särön kiihtyvän kasvun johdosta aika olisi voinut olla huomattavasti lyhyempi, joitakin kuukausia. Nämä ikäarviot ovat vain suuntaa antavia. Pääosin elinikää kulutti potkurin herätevoima taajuudella noin 8 Hz. Vasta 11–12 mm nettoliikevaralla hitaat voimavaihtelut tulevat merkittäviksi.

BB – akselin elinikää ei kulunut, koska jännityksen pysyivät ikuisen keston rajan alapuolella.

Laskelma 2004–2009. Pääosan ajasta jännitykset pysyivät pieninä, eikä jäljellä olevaa elinikää kulunut, koska nettoliikevara oli 1 mm (vällys pysyi normaalina valuepoksin ollessa ainakin osittain paikoillaan). Laskelmassa on samat vaiheet kuin yllä, mutta nyt liikevara oli epoksin poistuttua niin suuri, että peräsimen ominaistajuus oli lähes koko ajan 2,5 Hz, jolloin pääosa oli hitailla voimavaihteluilla. Jännitys nousi noin 550 kN peräsinvoimalla teräksen myötörajalle. Maksimissaan jännitys saattoi nousta yli myötörajan, jännityksiin 300–350 N/mm² suurilla ohjailuvoimilla, jolloin sarvi kantoi osan kuormasta (jos nettoliikevara oli ollut noin 18 mm). Tällöin väsymistarkasteluun olisi otettava mukaan väsymisvenymätarkastelu. Tätä ei ole katsottu tarpeelliseksi tehdä, vaan todetaan, että SB akselin jäljellä ollut elinikä kului syntyneessä kuormitustilanteessa 1-2 vuorokaudessa loppuun.

BB akselin elinikää ei kulunut, koska vällys pysyi sallituissa rajoissa (valuepoksi oli valtaosin paikoillaan).

1.7 Arvio tutkinnassa käytetyn laskentamenettelyn luotettavuudesta

Rakenteen väsymiskestävyyslaskenta sisältää luotettavienkin lähtötietojen ollessa käytettävissä suurempaa epävarmuutta kuin staattinen mitoitus. SILJA EUROPA:n tapauksessa lähtötiedoissa on huomattavia epävarmuutta kasvattavia tekijöitä. Sen sijaan lopputulos, peräsinakselin katkeaminen, on tiedossa. Tätä seikkaa onkin käytetty hyväksi valittaessa muuttujien arvoja sellaisiksi, että haluttu lopputulos saavutettiin. Sama lopputulos voidaan saavuttaa muillakin muuttujakombinaatioilla; tutkinnassa käytetylle ei ole haettu muita vaihtoehtoja.

Laskelman eräs lähtökohta on peräsinakselin väsymiskestävyyttä kuvaava Wöhler (SN)-käyrä. Tutkinnassa käytetyt käyrät ovat likimääräisiä ja niiden pienetkin muutokset vaikuttavat lopputulokseen voimakkaasti. Lisäksi on huomattava, että laskelmissa käytetyt Wöhler-käyrät perustuvat väsytykokeisiin, jotka on tehty ilmassa. Tässä tapauksessa peräsinakseli on ollut tiivisteellä suojattuna meriveden ympäröimänä, mutta tiivistys ei välttämättä ole ollut vedenpitävä. Tästä johtuen meriveden ympäristövaikutuksella on voinut olla Wöhler-käyrää alentava vaikutus, ts. akselin väsymiskestävyys on vedessä heikompi kuin ilmassa. Vaikutusta ei voida kuitenkaan arvioida.

Toinen epävarma tekijä on peräsimen värähtely ja sen voimistumisen voimakkuus (vaimennuskertoimen arviointi) resonanssissa potkuriherätteen kanssa tai lähellä sitä. Kolmas epävarma tekijä on peräsimen ominaistajuuden suuruus, joka perustuu TKK:n laskelmiin ja Det Norske Veritasin likimääräiseen tilastoon. Samoin herätevoiman suuruuden laskentamenetelmä sisältää yksinkertaistuksia. Lisäksi holkkien putoamisajan kohdat ovat arvioita.

Peräsinakselin staattisten jännitysten ja simuloitujen ohjailuvoimien luotettavuus on parempi. Käytetyn VDR datan uskotaan olevan riittävän luotettavaa. Korroosion etenemisen arviointi perustuu mitattuihin halkaisijoihin ja yleisiin korroosionopeustietoihin.

Käytetyt kumulatiiviset väsymiskestävyyden laskentamenettelyt: Goodmanin laskenta-kaava ekvivalentin nollakeskiarvoisen vaihtojännityksen määrittämiseksi ja lopulta Mineirin sääntö eivät sovellu hyvin tähän tapaukseen (satunnainen kuormitusvaihtelu, muuttuva keskijännitys, välillä pitkä hyvin pienen jännityksen kausi, ajoittain yli myötörajan nousevat keskijännitykset loppuvaiheessa).

Näistä puutteista huolimatta tutkijoiden käsityksen mukaan tutkinnassa on kyetty löytämään oikea tapahtuman prosessikuvaus.

1.8 Toimintaa ohjaavat säädökset ja määräykset

Luokituslaitosten sääntöjen mukaan aluksen luokitus on uusittava viiden vuoden välein (class renewal survey). Tänä aikana alus on telakoitava kaksi kertaa, jolloin on tehtävä mm. peräsinlaitteiston tarkastus. Tarkastuksesta on tehtävä merkintä pöytäkirjaan, johon tarkastaja voi lisätä muistion (memorandum) puutteista, jotka eivät vaikuta luokasertifikaatin voimassaoloon. Peräsinakselia ei irroteta tarkastettavaksi telakointien aikana. Luokituslaitoksella ei ole sääntöjä tai ohjeita peräsimen korroosiosuojauksesta eikä alalaakerin korjaustavasta, koska nämä eivät ole luokituksen piirissä³⁴.

Hälytykset. Kansainvälisessä ohjeistuksessa, kuten radio-ohjesäännössä, määritellään päällikön oikeus mutta ei velvoitusta vaaratilanteesta lähettää pika- tai hätäsanoma. Suomen lainsäädännössä merilaki ja alusliikennepalvelulaki velvoittavat päällikköä ilmoittamaan vaaratilanteesta tai onnettomuudesta, mutta velvoitusta lähettää hätäsanoma ei ole.

³⁴ Bureau Veritasin lausunto (27.9.2012 Silja Europa <38J418> Bureau Veritas comments on Draft Report dated on 27th August 2012): "Corrosion protection is not a Class item. The Classification rules are not designed, intended or required to include repair methods."

Varustamon laatujärjestelmät ja ohjeet

Aluksella oli vaurion aikana käytössä MPM (Marine Planned Maintenance) huoltojärjestelmä, joka on korvannut aiemmin käytössä olleen AMOS-järjestelmän. Tiedot AMOS-järjestelmästä on siirretty uuteen. Peräsimien ja peräsinkoneen huoltotiedoissa on tiedot telakointien aikana korjaustelakan tekemistä välysmittauksista ja laakerien uusimisista. Ennakkohuoltosuunnitelma ei sisällä toimenpiteitä peräsin- eikä ala-akselille.

Aluksen ISM ohjeistus sisältää sähköisessä muodossa aluksen operointiin liittyvät ohjeet. Kommentosillalla on käsillä ns. keltainen kirja, jossa on ohjeet erilaisia hätätilanteita varten, mm. hätäohjaustoimenpiteet. Normaali toimintaa varten ohjeet ovat ns. vihreässä kirjassa.

Aluksella oli käytössä aluskohtainen BRM-menettely. Menettelyn tarkoituksena on kehittää aluksen komentosillan henkilökunnan käyttämiä ohjailumenettelyjä varmistamaan aluksen turvallisuutta. Aluksen ohjailuun liittyvää koulutusta annetaan vuosittain 1-2 päivää BRM-moduulien³⁵ pohjalta. Kolme moduulia ajetaan simulointimallilla ja sen jälkeen analysoidaan miten toiminnassa onnistuttiin. Moduulit voivat olla esim.: vikaketjut, tilanetaju, komentosiltamiehistö tiiminä, kommunikaatio, reittisuunnittelu, hätätilanteet.

Varustamo on harjoitellut laivasimulaattorissa erilaisten poikkeavien tilanteiden ja laitevi-kojen hallintaa ja analysointia säännöllisesti 1990-luvun loppupuolelta alkaen. Nämä harjoitukset sisältävät myös BRM-harjoituksia.

³⁵ Kansainvälinen STCW-yleissopimus 1978 siihen myöhemmin tehtyine muutoksineen (Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers, *merenkulkijoiden koulutus, pätevyyskirjat ja vahdinpito*) sisältää vapaaehtoisin "Code B" ohjeen koskien vahdinpitoa navigoitaessa sekä ehdottaa varustamojen ottavan käyttöön BRM – menettelyn, Bridge Resource Management.

2 ANALYYSI

Peräsinakselin katkeaminen on hyvin harvinainen onnettomuus erityisesti ilman ulkoista pohjakosketusta tms. Samanlaisen vaurion toistumisen estämiseksi tutkimuksessa tarkasteltiin laajasti tapahtuman teknisiä taustoja. Tavoitteena on selittää peräsinakselien vaurioituminen, joka oli 17 vuoden aikana kehittynyt kolmivaiheinen prosessi.

Ensimmäisessä vaiheessa väsymismurtumaprosessi eteni niin hitaasti, että sen syynä ollut peräsimen alalaakerin pesän pitkälle kehittynyt galvaaninen korroosio havaittiin vasta vuoden 2004 telakoinnissa, 11 vuoden kuluttua aluksen käyttöönotosta. Peräsinakselissa mahdollisesti ollutta alkavan väsymismurtuman hiushalkeamaa, joka myöhemmin kehittyi väsymismurtumaksi, ei vuonna 2004 tehdyissä tarkastuksissa havaittu (kohta 1.5.1, Turku Repair Yard 30.8–8.9.04).

Toisessa vaiheessa prosessi saatiin valuepoksikorjauksella pysähtymään, mutta sen syitä ei poistettu. Valuepoksi rikkoontui viiden vuoden kuluessa. Kolmannessa vaiheessa valuepoksen poistuttua kokonaan väsymismurtuman kehittyminen jatkui ja SB akseli katkesi muutamassa päivässä.

2.1 SB akselin murtumiseen vaikuttaneet tekijät

Terävä, 0,3 mm syvyinen olake (kuva 22) SB akselissa heikensi merkittävästi sen väsymislujuutta ja on akselin katkeamisen merkittävin syy. Peräsinakselin olake oli tuntemattomasta syystä jäänyt teräväksi. **Galvaaninen korroosio alalaakerissa** (kuva 25) on tutkijoiden mielestä toinen pääsyy vaurioon. Se ei yksin kuitenkaan olisi riittänyt aiheuttamaan toteutunutta pitkällistä peräsinakselin väsymisprosessia. Näiden tekijöiden samanaikaisuus aiheutti sen, että **akselin kestävyys oli oletettua heikompi ja sen jännitykset ylittivät mitoitusarvot kahdessa vaiheessa**. Nämä tekijät olivat täysin normaalista laivanrakennuskäytännöstä poikkeavia.

Alalaakerin materiaalivalinta mahdollisti korroosion, jota ei ollut rakenteellisesti estetty. Alukseen olivat sen suunnittelun ja rakentamisen yhteydessä jääneet nämä piilevät puutteet, joita ei missään vaiheessa noteerattu tai niitä ei pidetty vaarallisena. Rakentajatelakalla nämä puutteet olivat läpäisseet kontrollin, eikä luokituslaitos samoin kuin tilaajan valvonta ollut kiinnittänyt näihin yksityiskohtiin huomiota. Ensin mainittu puute aiheutti prosessin (nettoliikevaran kasvun), jonka tuloksena akselin staattinen sekä väsymiskuormitus pääsivät ajoittain ylittämään huomattavasti tavanomaiset arvot.

Niin kauan kuin laakerivällykset pysyvät sallituissa rajoissa peräsinsarvi tukee peräsintä, keskimääräiset jännitykset ja vaihtojännitykset ovat vastaaviin vääntöjännityksiinkin yhdistettyinä niin pieniä, että ne alittavat selvästi peräsinakselin materiaalin staattisen mitoitusjännityksen ja laskennallisen ikuisen keston väsymisrajan.

Luokituslaitosten säännöt eivät määrittele välysmittausten tekotapaa³⁶. Yleisesti käytetyllä rakotulkkimittauksella ei havaita alalaakerin pesän alkavaa syöpymää. Peräsinakselia ei irroteta määrävälein tarkastettavaksi telakointien aikana. Tarkastaminen edellyttäisi normaalia laajempia peräsinlaitteiston purkutöitä, mikä pidentäisi telakointiaikaa. Alusten telakoinnit tehdään kustannussyistä hyvin tiukassa aikataulussa, mikä vaikuttaa korjausten toteutustavan valintaan. Telakointiväliä pidennetään joskus luokan sallimaan maksimiin saakka, jolloin hitaastikin etenevä prosessi saattaa päästä liian pitkälle.

Resonanssi-ilmio ja peräsimien värähtely. Tämänäyttypisten autolauttojen peräsimen rakenne ja potkurien optimikierroslukualue johtavat siihen, että lapataajuusresonanssia ei voi kokonaan välttää. Vertailulaivoista (kuva 26) SILJA EUROPA osui pahiten vaaralliselle alueelle. Peräsimen resonanssivärähtely nopeutti olakkeen ja korroosion vaikutusta.

Resonanssista johtuvat peräsimen värähtelyt rasittavat lähinnä peräsintä ja peräsinsarvea, joiden vaurioita yleensä osataan etsiä ja ne on helppo korjata. SILJA EUROPAN peräsimien ja peräsinsarven säröt osoittavat, että aluksen peräsimet värähtelivät ajoittain voimakkaasti. Vaikeissa resonanssin synnyttämissä ongelmissa muutetaan rakennetta siten, että peräsimen ominaistaajuus muuttuu. Joskus voidaan muuttaa lapataajuutta vaihtamalla potkuri toiseen, jossa on eri lukumäärä lapoja.

SILJA EUROPAN peräsimen värähtelyt eivät olisi muodostuneet ongelmaksi peräsinakselin kannalta, jos alalaakerin liikevara olisi pysynyt sallittujen välysten suuruksena (maksimi liikevara 2,5 mm). Vaarallisin on nettoliikevara välillä noin 7–10 mm. Pienillä liikevaroilla peräsinsarveen tukeutuminen estää suuret jännitykset (suuret taipumat) ja suurilla liikevaroilla peräsin toimii pääosin lapioperäsimenä, jolloin resonanssia ei ole.

Aluksella oli valmistuttuaan suuntavakavuudessa ongelmia, joita vähennettiin vuoden 1993 telakoinnin aikana. Aluksen ohjaaminen vaati kuitenkin edelleen tavanomaista enemmän pienten peräsinkulmien käyttöä suoraan ajettaessa. Peräsimien ja potkurien vuorovaikutuksesta johtuvat ongelmat, peräsimen kavitointi ja värähtely, jäivät ennalleen ja olivat jatkuvasti syynä peräsimen korjauksiin telakointien aikana.

Kavitointi saattoi nopeuttaa SILJA EUROPAN alalaakerin syöpymistä. Erityisesti alalaakerin pesän ulkopinta syöpyi niin voimakkaasti, että sitä oli jouduttu korjaamaan aiempien telakointien yhteydessä päällehitsaamalla. Kun myös pesän sisäpuoli syöpyi, pesän rakenteen kestävyys alkoi tulla kyseenalaiseksi.

2.2 Analyysin pääaiheet

Tutkinnassa on selvinnyt, että kaikissa edellä mainituissa väsymisprosessin kolmessa vaiheessa on tehty havaintoja alalaakerien välyksistä. Vuoden 2004 telakoinnissa havaittiin alalaakerin pesän huomattava syöpyminen. Tämä korjattiin valuepoksilla ja uusilla holkeilla.

³⁶ Bureau Veritasin lausunto (27.9.2012 Silja Europa <38J418> Bureau Veritas comments on Draft Report dated on 27th August 2012): "The Classification Rules are not designed, intended or required to include instruction on methods of measurements."

Vuoden 2004 telakoinnissa tehtyä havaintoa pesän huomattavasta syöpymisestä huolimatta ei tutkittu syitä tehtyihin havaintoihin. Näin ollen ei havaittu taustalla piilossa vaikuttaneita tekijöitä, jotka vuonna 2009 aiheuttivat peräsinakselin katkeamisen väsymismurtuman johdosta. Väsymisvaurio pääsi etenemään piilossa.

Analyysin lähestymistapa on esitetty kuvassa 30. Kuvassa punaisella katkoviivalla merkity aiheet on analysoitu erikseen tarkemmin kohdissa 2.2.2 ja 2.4.2.

Väsymismurtumaprosessin vaihe 1 – alku ja kehittyminen	Väsymismurtumaprosessin vaihe 2 – valuepoksikorjaus ja sen rikkoontuminen		Väsymismurtumaprosessin vaihe 3 – peräsinakselin katkeaminen
1993–2004	Telakointi 2004*	2004–2009	2009**
Havainnot ja toimenpiteet			
Havainnot Vällys kasvanut 2002 telakoinnissa	Alalaakerin pesässä yllättävä syöpyminen ja holkki pudonnut. Liikevara 12–13 mm.	Vällys säädetyissä rajoissa 2007	Aluksen ohjailuvaikeudet 22.11.2009.
Toimenpiteet Säännöt, menettely rutiinia ja vaihtelevaa Vällysmittaukset telakointien yhteydessä	Korjaus valuepoksilla ilman aikaa analysoida vaurion syntyyn vaikuttaneita tekijöitä ja suunnitella pysyvää korjausta.	2007 erilainen vällysmittaus, pintapuolinen epoksin tarkastus	Matkan keskeyttäminen ja aluksen telakointi.
Piilossa olleet seikat			
Väsymisvaurion synty (1993–2009)			
1. Alalaakerin korroosioaltis konstruktio <i>(alalaakerin galvaaninen korroosio tuli mahdolliseksi ja aiheutti suuren nettoliikevaran alalaakerissa)</i> 2. SB-peräsinakselin olake <i>(SB-peräsinakselin väsymiskestävyyden heikkeneminen oleellisesti)</i> 3. Peräsinvoimat ja peräsinmen resonanssivärähtelyt synnyttivät vaihtojännitykset <i>(suuren nettoliikevaran johdosta vaihtojännitykset ylittivät selvästi akselin mitoitusarvot; akseli oli olakkeen johdosta suunniteltua heikompi)</i>			
Väsymisvaurion eteneminen			
Alalaakerin korroosion hidaskasvu. Nettoliikevara kasvoi v. 2004 mennessä 12–13 millimetriin. Väsymisvaurio alkaa kehittyä. Peräsinakselin eliniästään suuri osa kului 2004 mennessä	Valuepoksikorjauksen myötä väsymisvaurion eteneminen pysähtyi ja korroosion eteneminen hidastui oleellisesti.	Epoksi alkaa hitaasti hajota. Lisäsyöpymä laakeripesässä. Epoksi hajoaminen kiihtyy ja se murentuu kokonaan.	Epoksi on kokonaan poistunut ja alalaakerin liikevara kasvanut 16–18 millimetriin. Väsymismurtuma prosessi jatkui. Akseli katkesi.

Kuva 30. Analyysin pääaiheet. Väsymismurtumaprosessin vaiheet 1–3, eri vaiheissa tehty havainnot ja toimenpiteet sekä prosessin aikana piilossa olleet seikat. Kuvaan on merkitty katkoviivoilla kaksi jäljempänä tarkemmin analysoitua aihetta:

- *) vuoden 2004 telakoinnissa tehdyn valuepoksikorjauksen suunnittelun ja toteutuksen analysointi sekä korjauksen vaikutukset (kohta 2.2.2) ja
- **) laivan hallintaan vaikuttaneet seikat peräsinakselin katkettua (kohta 2.4.2).

2.2.1 Korjaustapa ja sen merkitys

Telakointiaika oli niin lyhyeksi suunniteltu, että täytyi löytää nopea ratkaisu. Eri vaihtoehdoista valittiin nopeimmin toteutettava, EPOCAST 36 -valuepoksien käyttö; siihen oli luokituslaitoksen hyväksymä tekijäkin paikkakunnalla. Valamisella oli se etu, että pesää ei tarvinnut työstää; riitti, että poistettiin ruoste ja pahimmat epätasaisuudet. Valamisella saatiin täysin täytettyä holkin ja pesän välinen vaihtelevan suuruinen rako.

Korjaustoimenpide muutti alalaakerin rakennetta ratkaisevasti, kuvat 5b ja c sekä 14a ja b. Uusi pronssiholkki paikoitettiin valun ajaksi holkin läpi menevillä kuusiokoloruuveilla, jotka jätettiin paikoilleen. Alalaakerin yläreunaan syntyi epoksilieri. Uudessa pronssiholkissa oli useita noin 1 mm olakkeita valuepoksia vasten. Useat ruuvit ruuvattiin niin syvälle holkkiin, että kuusiokolo ulottui holkin läpi, mikä heikensi ruuvien kestävyyttä sen kuormittuessa.

Perusteellista suunnittelua ei ehditty tehdä: fax-vaihto alkoi valuepoksin toimittajan, valan ja telakan kesken 31.8 ja jo 2.9 tapahtui toisen alalaakerin valu. Valuepoksi oli kuin lääke, joka paransi vaivan, mutta ei poistanut sairautta. Sen käyttö loi uudenlaisen piilevän vaaratekijän: valuepoksin rikkoontumisesta johtuvine seurauksineen. Rakenne sisälsi erikoislaatusina osina kuusiokoloruuvit.

2.2.2 Vuoden 2004 korjaustavan arviointia

SILJA EUROPALLA valuepoksi palautti alalaakerin välykset normaaleiksi, mutta mikäli se häviäisi, alalaakerin liikevara kasvaisi jyrkästi ja äkillisesti. Ruuvien käyttö toi rakentamiseen haittapuolia: pronssi ja teräs olivat suorassa yhteydessä toisiinsa, ruuvit olivat heikkoja kuusiokolon johdosta, valtaosa oli ruuvattu niin syvälle, että ruuvien katkettua lisää vettä pääsi voitelemaan holkin ja epoksin väliin. Pienentyneestä kitkasta johtuen ruuvit synnyttivät paikallisia jännityshuippuja epoksiin. *Asennusruuvit nopeuttivat valuepoksin hajoamista. Oleellista olisi ollut holkin pyörimisen estäminen muulla tavalla.* Ilman ruuveja pronssiholkki olisi päässyt joka tapauksessa pyörimään, epoksi olisi vähitellen kulunut ja alkanut todennäköisesti jossain vaiheessa murtua alareunastaan.

Epoksille olisi pitänyt laatia erityinen tarkkailusuunnitelma ja aikataulu sen korvaamiseksi pysyvällä ratkaisulla, esimerkiksi pesän korjaaminen päälle hitsaamalla ja alkuperäisen kaltaisen pronssiholkin asentamisella, kuten sitten lopulta onnettomuuden jälkeen tehtiin.

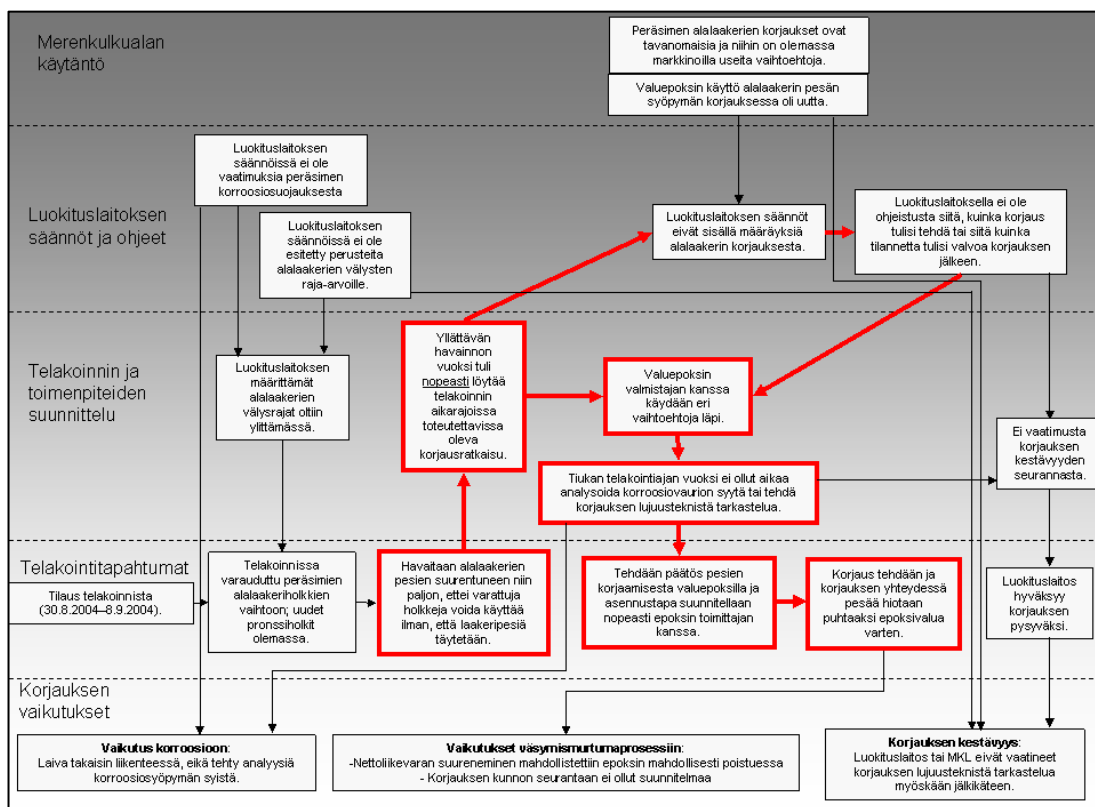
Valuepoksin käyttö peräsimen alalaakerin rakenteen osana kosketuksessa meriveteen näin suuressa aluksessa oli harvinaista, ja kyseisellä korjaustelakalla ainutkertaista. Valuepoksia käytetään yleisesti aluksen sisätiloissa kuten konehuoneessa koneiden asennuksessa alustoilleen. Epoksiin kohdistui siis eri suuntiin vaikuttavia voimia ja jännityksiä tyypillisessä käytössä esiintyvän puristuksen sijaan. Toteutetulla tavalla käytettynä valuepoksia ei voi näistä syistä tutkijoiden käsityksen mukaan pitää pysyvästä ratkaisuna alalaakerin syöpymien korjaukseen. Tämän osoittaa tapahtunut epoksin rikkoontuminen molemmissa laakereissa ja häviäminen oikeanpuoleisesta laakerista.

Tämän korjausratkaisun käyttö olisi edellyttänyt ottamaan huomioon laakeriholkista epoksiin kohdistuvat voimat³⁷ ja valun kunnon seurantaan normaalia useammin. Epoksin irtoamiseen olisi ollut syytä varautua esimerkiksi putoamista estävällä rakenteella.

³⁷ Valuepoksilla tehtävä korjaus tulisi suunnitella ottaen huomioon myös laakeriholkista epoksiin kohdistuvat leikkausvoimat ja niiden hallinta. Luokituslaitoksen tulisi tehdä tai vaatia lujuuslaskelmat. Riittävä tartunta epoksin ja laakeriholkin ja pesän välillä tulisi varmistaa. Lujuusvaatimukset saattavat sitten edellyttää vaihtoehtoisia materiaaleja, kuten Belzonaa tai vastaavaa.

Valuepoksikorjauksen merkitys väsymismurtuman kehittymiseen. Korjauksella saatiin väsymismurtuman kehittyminen pysähtymään, vaikka siitä ei oltu tietoisia. Toisaalta epoksivalua varten laakeripesiä hiottiin muutama millimetri korroosiojätteiden poistamiseksi ja seinämien tasoittamiseksi. Samalla huomaamatta mahdollistettiin suuremman liikevaran syntyminen, mikäli valuepoksi poistuisi. Näin tietämättä nopeutettiin väsymisprosessin kolmatta vaihetta.

Kuvassa 31 on esitetty vuoden 2004 telakoinnissa tehdyn valuepoksikorjauksen suunnittelun ja toteutuksen analysointi sekä korjauksen vaikutukset. Punaisilla tekstilaatikoilla ja nuolilla on kuvattu nopeaa, noin kolmen vuorokauden mittaista korjausprosessia, joka sisälsi korjauksen suunnittelun varustamon, korjaustelakan ja valuepoxsin toimittajan ja tekijän kesken, konsultaation luokan kanssa ja toteutuksen.



Kuva 31. Vuoden 2004 telakoinnissa tehdyn valuepoksikorjauksen suunnittelun ja toteutuksen analysointi sekä korjauksen vaikutukset. Punaisilla tekstilaatikoilla ja nuolilla on kuvattu nopeaa, noin kolmen vuorokauden mittaista korjausprosessia, joka sisälsi korjauksen suunnittelun, konsultaation luokan kanssa ja toteutuksen.

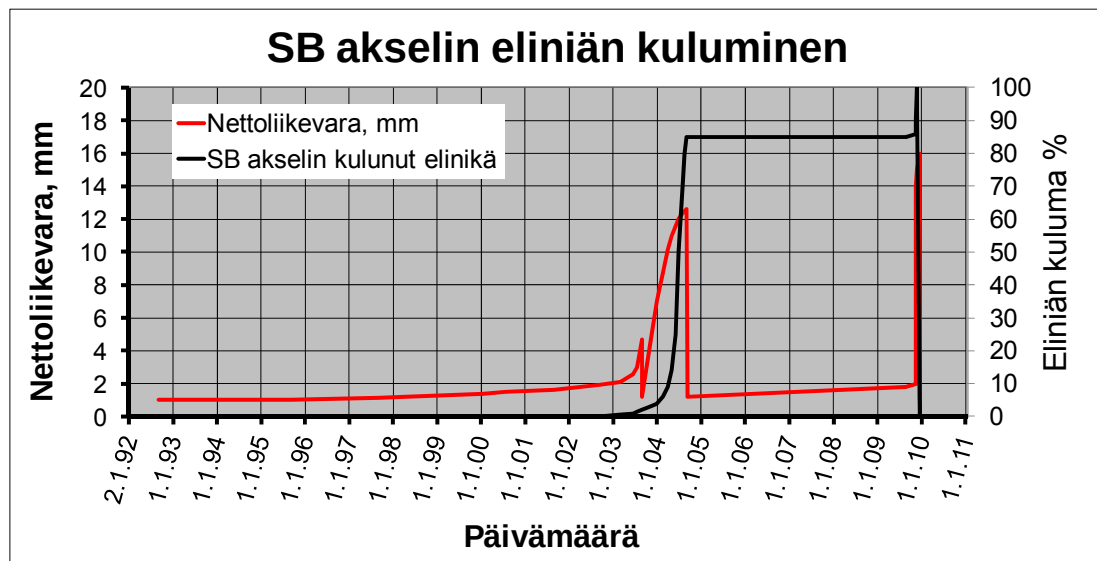
2.3 Yhteenveto murtumisprosessista

Murtumisprosessin kulkua ja sen syitä on seuraavassa tarkasteltu eri näkökulmista. Taulukossa 4 on arvioitu eri tekijöiden ja niiden samanaikaisuuden merkittävyyttä SILJA EUROPA:n peräsinakselin katkeamisprosessissa. On oletettu, kuten edellä on perusteltu, että BB akselin Wöhler-käyrä oli SB akselin käyrää parempi.

Taulukko 4. Eri syiden samanaikaisuuden merkitys SB-akselin katkeamiseen. Harmaalla värillä merkitty rivi vastaa peräsinakselin katkeamiseen johtanutta tilannetta, muut rivit ovat mahdollisia vaihtoehtoja; ylin rivi vastaa hyvää laivanrakennuskäytäntöä.

Korroosio	Resonanssi	Olake BB akselissa	BB akseli	Olake SB akselissa	SB akseli
ei	kyllä	pyöristetty	Ei katkea	pyöristetty	Ei katkea
ei	kyllä	terävä	Ei katkea	terävä	Ei katkea
kyllä	kyllä	pyöristetty	Ei katkea	pyöristetty	Ei katkea
kyllä	kyllä	pyöristetty	Ei katkea	terävä	KATKEAA
kyllä	ei	pyöristetty	Ei katkea	terävä	MYÖHEMMIN

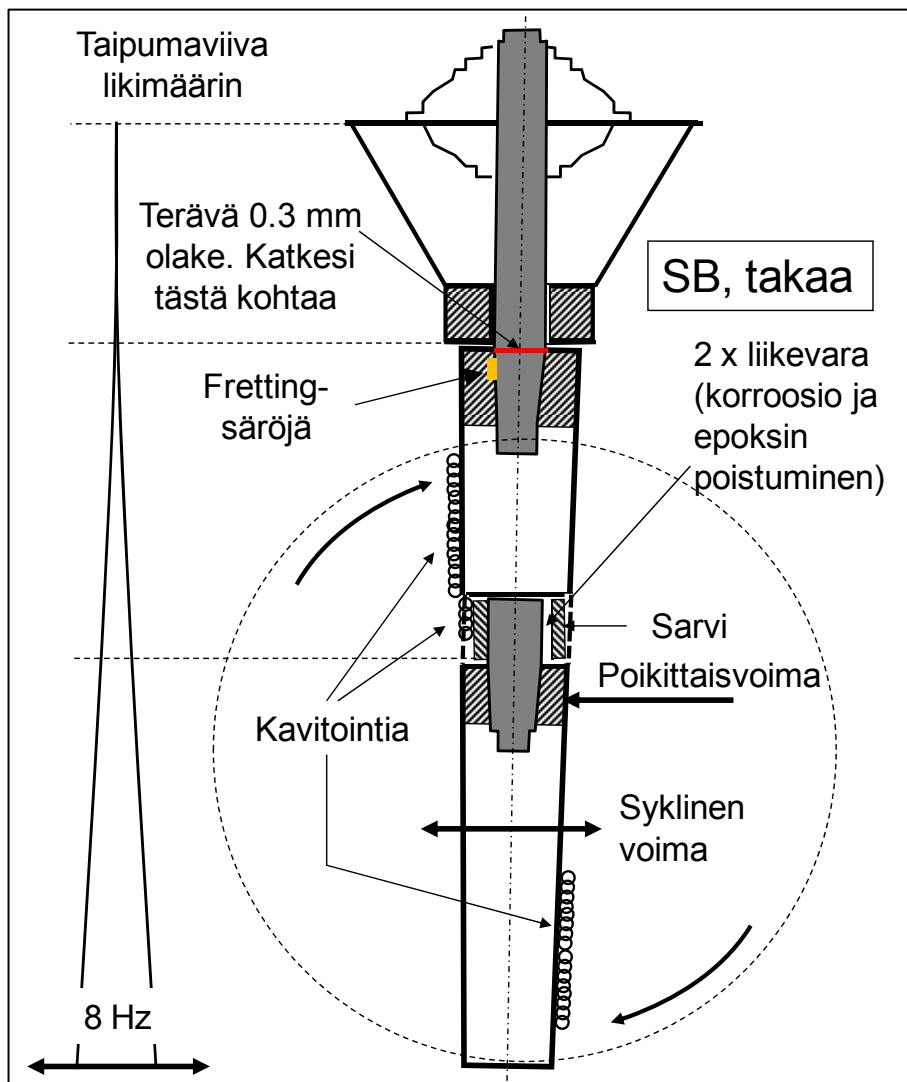
Kuvassa 32 on havainnollistettu väsymisvaurioprosessin ajallista kulkua SILJA EURO-PAn SB-akselin osalta. Merkillepantavaa on väsymisilmiölle luonteenomainen, murtuman kasvun nopeutuminen sen päästyä alkuun. Vastaavia tapauksia ajatellen tästä seuraa tarve harkita tarkkaan telakointivälien pituutta.



Kuva 32. SB-akselin liikevaran kehittyminen ja eliniän kuluminen. Eliniän kulumisen alkuehti ja taso, jolle se pysähtyy epoksivalun jälkeen, ovat arvioita. Kuva kertoo tapahtumien perusluonteen.

Kuvassa 32 esitetyt nettoliikevaran ja eliniän kuluman luonteenomaiset kehitystrendit ovat tutkijoiden mielestä oikeita. Sen sijaan ajanhetkissä ja varsinkin eliniän kulumaa osoittavat numeroarvot ovat epävarmoja.

Kuvassa 33 on kootusti peräsimen kuvan avulla näytetty oleelliset SB-akselin katkeamiseen vaikuttaneet tekijät.

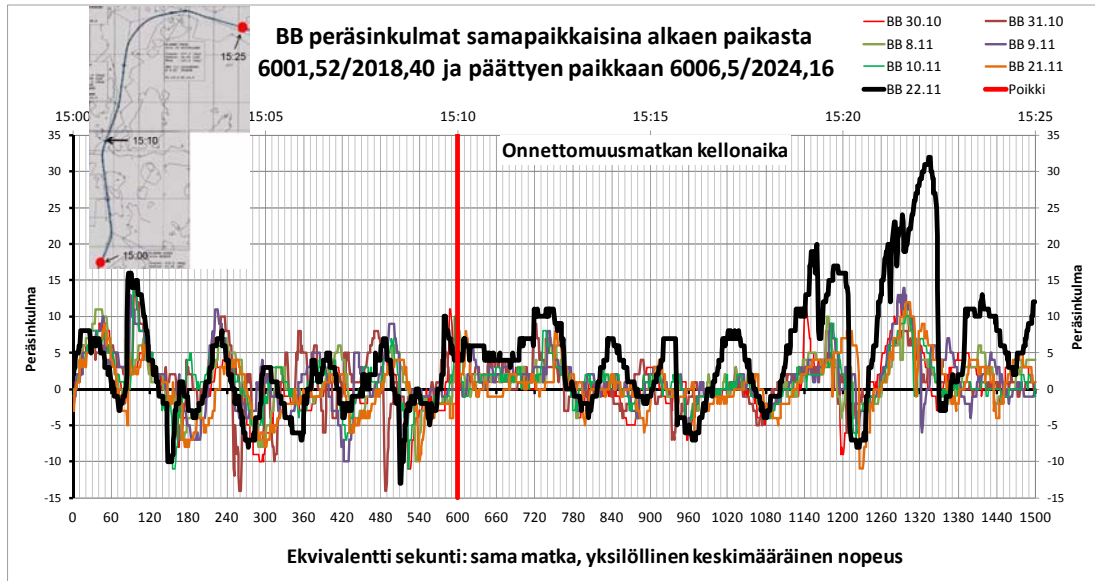


Kuva 33. SB-peräsin katsottuna takaa. Kuvassa on näytetty peräsimen poikittaisliike sekä SB-akselin katkeamiseen vaikuttaneet tekijät. Kuvassa akseli ja peräsin ovat taipuneet aluksen keskiviivan suuntaan. Alalaakeri on kiinni peräsinsarven pesän seinämässä. Tällöin toisella puolella on tyhjää 2 x netto-liikevara.

2.4 Laivan hallinta onnettomuusmatkalla

2.4.1 Akselin katkeamisen ajankohta

Tutkijat ovat arvioineet katkeamishetken ajankohdan perustuen seitsemän eri päivän samapaikkaisiksi siirrettyjen peräsinkulmien vertailuun (kuva 34). Lisäksi käytettiin hyväksi kuvan 34 peräsinkulmien tilastollista analyysiä (piirrettiin keskiarvo $\pm$ kaksi kertaa keskihajonta) sekä kyseisten päivien keulan suunnan tietoja. Onnettomuuspäivän peräsinkulmat alkoivat poiketa muiden päivien kulmista näiden kuvien perusteella klo 15.10 jälkeen.



Kuva 34. Eri päivien BB-peräsinkulmat samapaikkaisiksi muunnettuina. Onnettomuspäivän käyrä on näytetty mustalla. Alku- ja päätepiste on näytetty reittipiirroksessa punaisilla ympyröillä.

Peräsinakselin murtopinnan tarkastelun perusteella akseli on katkennut taipuessaan ulospäin (toisin sanoen: kun peräsimet ovat olleet käännettyinä vasemmalle). Tämä on mahdollista käännöksen noin klo 15:10 aikana (tällöin käännös oikealle pysäytettiin vas-
taruorilla vasemmalle, ”stöttaamalla”).

Näillä perusteilla on arvioitu peräsinakselin katkeamishetkeksi noin klo 15:10.

2.4.2 Tilanteen havainnointi ja hallinta

Peräsinakselin katkeaminen on niin harvinaista, että sitä on vaikea kuvitella ohjailuvai-
keuksien syyksi. Vaikka ongelmien alkulähdettä ei välttämättä saada heti selville, on tär-
keää tiedostaa ohjailuvaikeuksien riskit aluksen kulkiessa mutkikkaalla ja ahtaalla saa-
ristoväylällä, missä huonosti ohjaavalla aluksella on jatkuva riski ajautua ulos väylältä.
Aluksen kulkuun liittyvät päätökset on mahdollista tehdä vain tältä pohjalta. Tämänkal-
taisen poikkeustilanteen hallinta voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen:

1. sen tiedostaminen, että aluksen ohjailussa on jotain selvästi poikkeavaa,
2. ryhtyminen tarvittaviin toimiin, ja
3. todellisen vian määrittäminen.

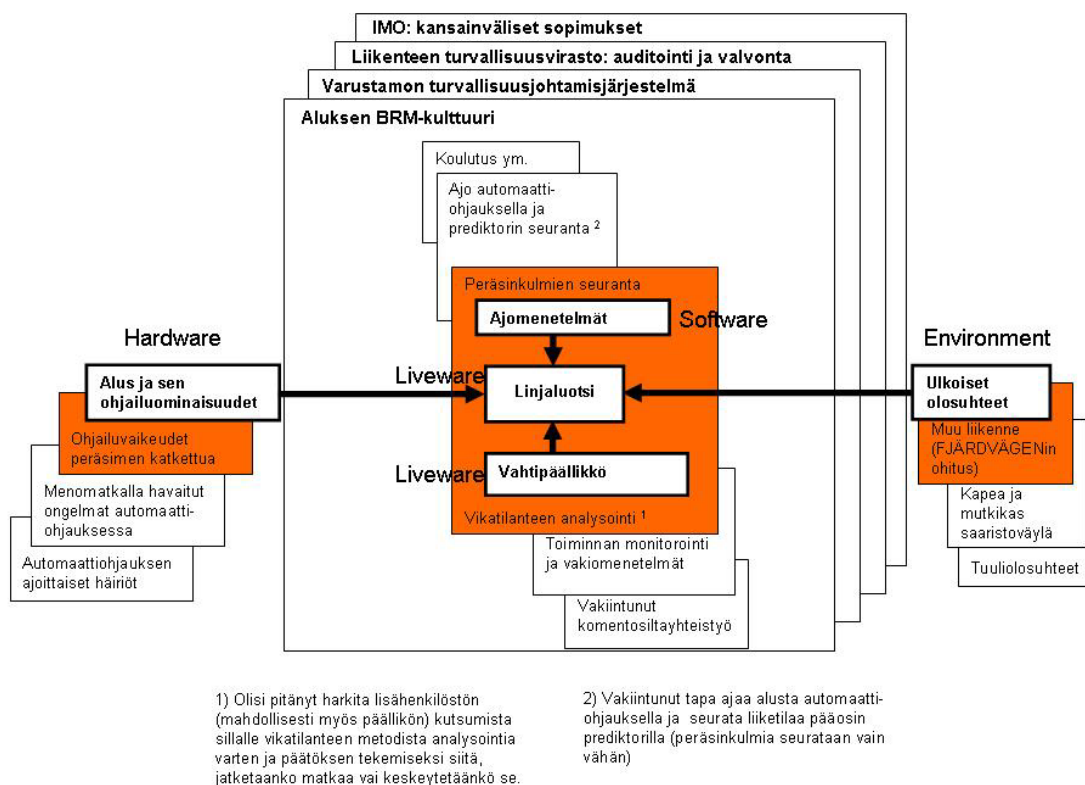
Ensimmäinen vaihe on tärkein, koska vasta se johtaa kahteen seuraavaan vaiheeseen.
Se kesti tässä tapauksessa melko pitkään, koska peräsinakselin katkeamisen jälkeen
kahdella peräsimellä varustetun aluksen ohjailukyky säilyi, joskin heikentyneenä. Tällai-
sesta vauriosta ei saada mitään indikaatiota komentosillalle, joten se oli havaittavissa
vain aluksen muuttanutta ohjailukäyttäytymistä ja mittaristoa tarkkailemalla.

Analyysissä on pyritty vastaamaan tilanteen hallinnan kannalta oleellisiin kysymyksiin;
miten vaurion vakavuus havaittiin ja olisiko se voinut tapahtua nopeammin sekä miksi
aluksen ohjailu väylällä onnistui kuitenkin niin hyvin ohjailukyvyn heikennyttyä.

Operatiivisen komentositaitoiminnan keskipisteenä ovat alusta ohjaavat linjaluotsi ja hänen kanssaan komentositatiimin muodostava vahtipäällikkö, jotka havaitsevat aluksen poikkeavan käyttäytymisen ensimmäisenä ja joilla on parhaat edellytykset ryhtyä analysoimaan vikatilannetta. Heidän toimintaansa vaikutti komentositayhteistyön menetelmät (BRM-kulttuuri) ja vuorovaikutus myös teknisen järjestelmän kanssa. Teknisen järjestelmän käyttöön vaikuttavat aluksen ja sen ohjailulaitteiden tunnetut ja tilapäiset ominaisuudet, käytetyt mahdollisesti rutiininomaiset ajomenetelmät, kulloisetkin ulkoiset olosuhteet ja muu liikenne.

Aluksen ohjailussa esiintyneiden poikkeavuuksien selvittely ja tilanteen hallinta on analysoitu alusta ohjanneiden henkilöiden näkökulmasta hyödyntäen sovellettua SHELL-ajatusmallia³⁸ (kuva 35), joka kuvaa komentositaitoiminnassa aluksen ohjailun kannalta merkittäviksi katsottuja inhimillisiä ja teknisiä vuorovaikutuksia.

Analysoitavan tilanteen aikana alusta ajanut linjaluotsi vaihtui. Tämän vuoksi myös analyysin keskeinen kohde, komentositatiimi muuttui. Tämä on huomioitu analyysissä kaksivaiheisena lähestymisenä.



Kuva 35. Aluksen käsittelyyn ja päätöksentekoon vaikuttaneet seikat komentositalla peräsinakselin katkettua kuvattuna sovelletun SHELL-mallin avulla.

³⁸ SHELL-mallin avulla tarkastellaan ihmisen toimintaa ympäristössään ja pyritään selvittämään eri tekijöiden vaikutusta ihmisen suoritukseen. Mallin nimi tulee seuraavista kirjaimista (osa-alueista): S(oftware): mm. koulutus, ohjeet, menetelmät ja määräykset. H(ardware): mm. laitteet tai itse laiva, jota ihminen käyttää. E(nvironment): toimintaympäristö. Keskellä oleva L(iveness): se ihminen, jonka toimintaa tarkkaillaan ja ulompi L: muut ihmiset, joiden kanssa laitetta käyttävä ihminen toimii. Mallin tarkoitus ei ole paneutua yksittäiseen osa-alueeseen vaan tarkastella kokonaisuutta ja eri osa-alueiden välisiä vuorovaikutuksia. IMO suosittelee SHELL-mallia yhtenä onnettomuustutkimusmenetelmänä sen systemaattisuuden vuoksi.

Kuvassa 35 on esitetty tarkastelun kohteena olleet tekijät: linjaluotsi (liveware), vahtipäällikkö (liveware), ajomenetelmät (software), alus ja sen ohjailuominaisuudet (hardware) ja ulkoiset olosuhteet (environment). Lisäksi analyysissä on huomioitu eri tekijöiden taustalla vaikuttaneita seikkoja.

Komentosiltayhteistyö (BRM, Bridge Resource Management) toimii viitekehyksenä operatiiviselle toiminnalle komentosillalla. Alukselle vakiintuneita komentosiltayhteistyön käytäntöjä voidaan kutsua BRM-kulttuuriksi. Se perustuu varustamon turvallisuusjohtamisjärjestelmään, jonka Liikenteen turvallisuusvirasto auditoi, hyväksyy ja jota se valvoo. Perustana ovat IMO:n kansainväliset sopimukset. Analyysissä BRM-kulttuuri on kuvan mukaisesti keskeinen taustatekijä.

Miten vaurion vakavuus havaittiin ja olisiko se voinut tapahtua nopeammin?

Komentosiltatiimin reagointi aluksen käyttäytymiseen ja ulkoisiin olosuhteisiin³⁹

Linjaluotsi on komentosillalla pääasiallinen toimija aluksen ohjailussa. Hän toimii kuitenkin komentosiltatiiminä tiiviissä yhteistyössä vahtipäällikön kanssa. Ulkoiset olosuhteet, kuten esimerkiksi väylän mutkat ja tuuli vaikuttavat aluksen käyttäytymiseen ja siten komentosiltatiimin ohjailulaitteiston käyttöön.

Kun peräsinakseli katkesi ja aiheutti ohjailuvaikeuksia, aluksen poikkeavan ohjailukäyttäytymisen syyksi ei osattu epäillä niin vakavaa vikaa kuin peräsinakselin katkeaminen. Peräsin saattoi hetkittäin jumiutua tiettyyn kulmaan tai hetkittäin kääntyä potkurivirrassa. Tämä on saattanut tehdä aluksen ohjailukäyttäytymisestä epäloogista ja siten vaikeuttaa luotettavien havaintojen tekemistä tilanteesta. Tuulen epäiltiin vaikuttaneen aluksen poikkeavaan ohjailukäyttäytymiseen. Erityisesti käännökset oikealle tuottivat vaikeuksia. Tällaisia käännöksiä oli katkeamisen jälkeen vain kaksi, joista jälkimmäisen jälkeen alus pysäytettiin. Näiden käännösten välillä alus ohitti FJÄRDVÄGENin, mikä keskeytti myös havainnointia ja vikatilanteen analysointia.

Mikään komentosillan laitteista ei antanut hälytystä koko tapahtuman aikana. Tämä osaltaan vaikutti siihen, ettei ohjailuvaikeuksien syyksi osattu aluksi epäillä vikaa ohjailulaitteistoissa. Peräsinakselin katkeamisesta ei saada suoraa indikaatiota komentosillalle. Vika oli havaittavissa vain välillisesti aluksen liiketilaa, muuttunutta ohjailukäyttäytymistä ja ohjailusuureita tarkkailemalla. Peräsinakselin katkeaminen ei kuitenkaan ollut selvästi havaittavissa kahdella peräsimellä varustetun aluksen ohjailukäyttäytymisessä, koska vaurioitunut peräsin ei jumiutunut ääriasentoon. Kahdella peräsimellä varustetun aluksen ohjailukyky säilyi, joskin heikentyneenä – yhdellä peräsimellä varustettu alus olisi menettänyt ohjattavuutensa vastaavassa tilanteessa.

Epätavallisen suuret peräsinkulmat ja niiden pitkä ajallinen kesto olivat merkittävin mittariston kautta saatu merkki peräsinviasta. Ylisuuret peräsinkulmat (noin 30°) olivat nähtävissä ensimmäisen kerran Stockgrundin käännöksen lopussa, joka oli ensimmäinen suurempi käännös peräsinakselin katkeamisen jälkeen. Ylisuuret peräsinkulmat olivat

³⁹ Liveware – Hardware + Environment -vuorovaikutusten tarkastelu SHELL-mallissa

havaittavissa vain oikealle tehtyjen käännösten pysäytyksessä sekä vasemmalle kääntymisen alussa. Kun yhdestä käännöksestä oli selvitty, oli odotettava seuraavaa ennen kuin oli taas mahdollisuus tehdä havaintoja.

Lisäksi aluksen ohjaamisessa tarvittavat peräsinkulmat olivat toispuoleiset. Myös nämä peräsinkulmat olivat ajoittain suhteellisen suuria (noin 20°). Tämä poikkeava käyttäytyminen oli kuitenkin huomattavasti vaikeampaa havaita, kuin ylisuuret peräsinkulmat. Koska vikaa ei havaittu välittömästi ylisuurista peräsinkulmista, aikaa kului ennen kuin lisähavaintoja saatiin (useampia yli 20° peräsinkulmia ja muutama yli 30° peräsinkulma).

Komentosiltatiimi muuttui linjaluotsien vahdinvaihdossa ja vahvistui yhdellä hengellä. Ennen vahdin aloitusta uudelle linjaluotsille kerrottiin havaituista ongelmista. Hän ajoi alusta yhden ison ja yhden pienen käännöksen. Niiden aikana hän totesi, ettei aluksen kääntymisen pysäyttäminen vastaruorilla onnistunut kunnolla ja vian vakavuus alkoi selvitä.

Alus päätettiin pysäyttää kohdalle osuneeseen sopivaan väylänosaan. Ohjailuongelmien ilmaannuttua kapean ja mutkikkaan saaristoväylän ulkopuoliset vapaavesialueet tarjosivat vain muutaman vartenotettavan mahdollisuuden suuren matkustaja-aluksen pysäyttämiseen niin, ettei se häiritse muuta liikennettä.

Komentosiltayhteistyö ja ajomenetelmät⁴⁰

Ensimmäisessä käännöksessä peräsinakselin katkeamisen jälkeen linjaluotsi 1 ja vahtipäällikkö havaitsivat poikkeavuuksia aluksen ohjailukäyttäytymisessä. Autopilotin toimintaa sekä suuria peräsinkulmia ihmeteltiin ja niihin reagoitiin tekemällä autopilottiin pieniä kurssimuutoksia. Suurimpien peräsinkulmien (30 astetta) lukuarvoista ei kuitenkaan keskusteltu, vaikka ne olivat huomattavasti tavallista suuremmat. Autopilotti käyttää normaaliolosuhteissa lyhytaikaisesti, kestoaltaan enintään noin kymmenen sekuntia, 15–20 asteen peräsinkulmia⁴¹. Nyt autopilotti käytti 25–30 asteen peräsinkulmia (kuvat 8, 9 ja 34, klo 15.21–15.22) yhtäjaksoisesti noin yhden minuutin ajan. Ne olivat suuruudeltaan kaksinkertaiset ja niiden kesto jopa neljä kertaa pidempi kuin normaalisti väyläajossa voi esiintyä käytetyllä 18 solmun nopeudella. Normaalisti alus kääntyisi näillä peräsinkulmilla voimakkaasti ja kallistuisi samalla paljon.

Ohjailuun oli vakiintunut tapa seurata tutkaa ja ikkunasta näkyvää maisemaa normaalisessa väyläajossa. Tutkalla tarkkaillaan erityisesti siinä näkyvää ennustetta (prediktoria), aluksen hetkellistä ja tulevaa sijaintia suhteessa käytettävissä olevaan väyläalueeseen sekä muuta liikennettä. Peräsinkulmia havainnoidaan hetkellisesti, ei pitkäaikaisesti. Mikäli komentosillalla ei satuta katsomaan oikeaan aikaan peräsinkulman näyttöä, tieto pitkään poikkeavan suurena olleesta peräsinkulmasta jää havaitsematta. Peräsinkulman näyttölaitteet ovat Conning-näytössä, etuikkunan yläpuolella olevassa mittaristossa ja katossa.

⁴⁰ Liveware – Liveware + Software -vuorovaikutusten tarkastelu SHELL-mallissa

⁴¹ Esimerkiksi MS ISABELLAN karilleajon yhteydessä samanmerkinen autopilotti oli käyttänyt 34 m/s nopeudella vaikuttaneen sivutuulen kääntävän voiman tasapainottamiseksi keskimäärin 10 asteen peräsinkulmaa (tutkintaselostus B1/2001M, s. 25)

Komentosillalla oli kaksi henkilöä vastaamassa navigoinnista, kun ensimmäiset viitteet ohjailuongelmista saatiin. Uuden linjaluotsin tultua komentosillalle komentosiltamiehitys vahvistui yhdellä henkilöllä jo hieman ennen vahdinvaihtoa. Vahdinvaihdossa komentosiltayhteistyötä tekevän ryhmän keskiössä oleva henkilö vaihtui. Vahdin jättänyt linjaluotsi jäi komentosillalle myös vahdinvaihdon jälkeen. Tämä osoittaa, että havaittuja ohjailuongelmia pidettiin merkittävinä.

Komentosiltatiimin muututtua toimintatapa ja tilanneanalyysi kehittyivät, vaikka selkeää työnjakoa eri suureiden seuraamisesta komentosiltahenkilöstön kesken ei muodostunut. Uuden linjaluotsin alettua kysymyksen perehtyä tilanteeseen kommunikointi lisääntyi; edellinen komentosiltatiimi raportoi aiempia havaintojaan aluksen poikkeavasta käyttäytymisestä ja yhteinen tilannekuva alkoi terävöityä.

Koska uudelle linjaluotsille oli ennen vahdin aloittamista kerrottu ongelmista aluksen ohjailussa, hänellä oli paremmat valmiudet havaita ongelman vakavuus. Lisäksi hän sai ohjailutuntuman vialliseen alukseen ikään kuin ”puhtaalta pöydältä”. Uusi linjaluotsi kertoi jatkuvasti muille tekemistään havainnoista aluksen käyttäytymisestä.

Vahdinvaihdon jälkeisissä käänöksissä uuden linjaluotsin havaitsemat aluksen stötausvaikeudet vahvistivat hänelle, että syy oli aluksessa itsessään, ei ympäristöolosuhteissa, ja alus pysäytettiin.

Lisähenkilöstön ja etenkin päällikön kutsuminen sillalle aiemmin, jo ensimmäisten selkeiden oireiden ilmaannuttua, olisi lisännyt resursseja ja vauhdittanut vikatilanteen analyysiä ja päätöksentekoa matkan keskeyttämisestä jo aiemmassa vaiheessa.

Miksi aluksen ohjailu väylällä onnistui kuitenkin niin hyvin ohjailukyvyyn heikennyttyä?

Ajomenetelmän ja koulutuksen vaikutus aluksen hallintaan

Vaikka vian vakavuuden ymmärtäminen vei aikaa ja matkaa jatkettiin heikentyneellä ohjauskyvyllä, ammattitaitoinen miehistö, jolla oli vankka kokemus kyseisestä väylästä, sai aluksen pidettyä väylällä ja pysäytettyä sen lopulta turvallisesti. Alusta ajettiin tehokaimman ajotavan ja poikkeavan käyttäytymisen syyn löytämiseksi vaihtelemalla automaattiohjaustapoja ja käyttämällä välillä käsiohjausta. Toiminta oli varovaista ja harkittua.

Simulaattoriharjoituksissa oli saatu valmiuksia ohjailta poikkeavasti käyttäytyvää alusta. Myös tilannetta, jossa toinen peräsin oli jumiutunut, oli harjoiteltu. Molemmat linjaluotsit ajoivat käsiohjauksessa ison käänöksen vaurioituneella aluksella. Tämä oli vaativa tehtävä.

Ilmeisesti simulaattorikoulutuksessa harjoiteltu ja normaalina proseduurina käsiohjauksessa käytetty ajotapa seurata prediktorilla aluksen liiketilan nopeita muutoksia auttoi pitämään ohjailulaitteiltaan vaurioituneen aluksen hallinnassa ja väylällä. Toisaalta kyseinen ajotapa ei tukenut peräsinkulmien tarkkailua niin paljon, kuin tilanteen havainnoinnin kannalta olisi ollut edullista.

2.4.3 Arvio tilanteen hallinnasta

Tapahtumien kulku osoittaa, että syntynyt tekninen ongelma oli erittäin vaikea tai jopa mahdoton havaita ja tulkita oikein. Peräsinvika ei ilmentynyt suoraan siltamiehistöille vaan vaati *tilanteen kokonaisanalyysia (vastakohtana vika-analyysille)*. Tämä on vaativa tehtävä. Alus käyttäytyi epäjohdonmukaisesti, mutta mikään suoranainen näyttölaite ei kertonut vian todellista luonnetta eli toisen peräsinakselin katkeamista. Juuri tällaista vikaa ei ole myöskään simuloitu koulutuksen yhteydessä.

Kun aluksen käännöskäyttäytyminen selvästi poikkeaa tavanomaisesta ilman havaittavaa ulkopuolista tekijää tai tiedossa olevaa aluksen teknistä vikaa, ainoa mahdollisuus on aloittaa *metodinen syyn etsintä*. Tavoitteena on selvittää voidaanko matkaa jatkaa turvallisesti vai onko aluksen kulku keskeytettävä välittömästi.

Syntyneessä päätöksentekotilanteessa olisi ollut hyödyllistä käynnistää *välitön resurssien vahvistaminen* hyvän BRM-käytännön mukaan. Sillalle olisi voinut kutsua lisää ammattitaitoisia navigaattoreita ja ainakin aluksen päällikön. Joka tapauksessa tehokkaan BRM-toimintaan kuuluu metodinen aluksen kulun rekisteröinti erityisesti käännöksissä tarvittavien peräsinkulmien tarkkailu ja kirjaaminen.

BRM-käytännön ydin on *tehokas viestintä*. Tässä tapauksessa se olisi merkinnyt sitä, että jo ennen vahdinvaihtoa olisi ollut hyödyllistä johdonmukaisesti keskustella havainnoista ja analysoida tilannetta, toimenpiteitä ja esimerkiksi riskiä toista alusta ohitettaessa ohjailun ollessa tavanomaisesta poikkeavaa. Kun vahdinvaihto aikanaan tapahtui, uuden henkilön läsnäolo käynnisti aktiivisen tilanteen analysoinnin ja johti suhteellisen nopeaan päätöksentekoon.

Syntynyt tilanne oli niin epäselvä, että siltamiehistöltä kului aikaa havaintojen keräämiseen ennen päätöstä matkan keskeyttämisestä. Päätöstä olisi kuitenkin voinut nopeuttaa tehokkaampi BRM-käytäntö – aktiivinen viestintä tilanteen metodista seurantaan varren sekä päätös käyttää kaikkia navigaattoriresursseja, joita aluksella oli käytettävissä tilanteen analysoimiseksi.

Hälytys- ja pelastustoimet

Hälytystä ei tehty. Kun alus oli pysäytetty, tilanteesta ilmoitettiin alusliikennepalvelulain mukaisesti Archipelago VTS:lle. Eräs matkustaja oli ilmoittanut tilanteesta MRCC:lle, joka otti yhteyttä alukseen. Näin ollen päällikön ei tarvinnut tehdä MAS-ilmoitusta MRCC:lle. Päällikön arvion mukaan tilanne ei vaatinut hinausavun lisäksi muita pelastustoimia, koska alus oli ohjailtavissa ja täysin merikelpoinen. Tutkijat yhtyivät tähän näkemykseen.

Aluksen päällikkö sopi nopeasti hinaaja-avusta varmistamaan aluksen pääsy perille Turkuun. Aluksen ohjailumahdollisuudet selvitettiin kokeiluina ja alus siirrettiin pois ahtaalta väylältä aavalle merialueelle. Siellä tuuli esti ankkuroinnin ja aluksella alettiin ajaa ellipsin muotoista reittiä.

Ohjailuvaikeuksien syyn selvittämiseksi hankittiin sukeltaja, joka sai selville vaurion laadun.

Tutkijoiden käsityksen mukaan hinaaja-avun nopea tilaaminen, ohjailuominaisuuksien selvittäminen väljemmällä vesialueella ympyrää ajaen, aluksen tuominen perille ja vaurion laadun selvittäminen tehtiin asianmukaisesti ja aluksen turvallisuutta vaarantamatta.

3 JOHTOPÄÄTÖKSET

Peräsinakselin katkeaminen on erittäin harvinainen tapahtuma. Sen aiheutti peräsinakselin liiallisen taipumisen synnyttämä väsymismurtuma. Liiallisen taipumisen teki mahdolliseksi alalaakerin pesän poikkeuksellinen syöpyminen, joka aiheutti alalaakeriin suuren liikevaran kahteen otteeseen, ennen ja jälkeen valuepoksikorjauksen vuonna 2004.

3.1 Toteamukset

1. SB-peräsinakselin katkeaminen saaristoväylällä aiheutti vakavan vaaratilanteen.
2. Peräsinakseli katkesi väsymisvaurion tuloksena.

Väsymisvaurion synty

3. Väsymisvaurion syntyyn vaikutti kolme tekijää:
 - alalaakerin korroosioaltis konstruktio (alalaakerin galvaaninen korroosio tuli mahdolliseksi ja aiheutti suuren nettoliikevaran alalaakerissa),
 - peräsinakseliin työstövaiheessa jäänyt 0,3 mm olake (SB-peräsinakselin väsymiskestävyys heikkeni oleellisesti), ja
 - peräsinvoimat ja peräsimen resonanssivärähtelyt, jotka synnyttivät vaihtojännitykset (suuren nettoliikevaran johdosta vaihtojännitykset ylittivät selvästi akselin mitoitussarvot; akseli oli olakkeen johdosta suunniteltua heikompi).
4. Peräsimen alalaakerin korroosio alkoi hitaasti. Ala-akselin nettoliikevara kasvoi vuoteen 2004 mennessä 12–13 millimetriin. Väsymisvaurio alkoi kehittyä. Peräsinakselin väsymiseliniästä suuri osa kului vuoteen 2004 mennessä.
5. Vuoden 2004 telakoinnissa alalaakerin pesässä havaittiin yllättävä syöpyminen. Alalaakerin holkki oli pudonnut peräsinä vasten.
6. Syöpymä korjattiin valuepoksilla ilman selvitystä vaurion syntyyn vaikuttaneista tekijöistä. Luokitustulos hyväksyi tämän korjauksen pysyväksi.
7. Valuepoksikorjauksen myötä väsymisvaurion eteneminen pysähtyi ja korroosion eteneminen hidastui oleellisesti.
8. Välys oli säädetyissä rajoissa vuoden 2007 telakoinnissa. Välysmittaus ei ollut kuitenkaan vertailukelpoinen edellisiin mittauksiin. Valuepoksen kunto tarkastettiin pin-tapuolisesti.
9. Korjaukseen käytetty valuepoksi alkoi hitaasti hajota. Siihen vaikutti lisäsyöpymä laakeripesässä ja epoksen hajoaminen kiihtyi ja se murentui kokonaan. Epoksi poistui kokonaan ja alalaakerin liikevara kasvoi 16–18 millimetriin. Väsymismurtuma prosessi jatkui.
10. Peräsinakseli katkesi 22.11.2009.

Aluksen hallinta

11. Peräsinakselin katkeaminen aiheutti alukselle ohjailuvaikeuksia. Säätilalla ei ollut vaikutusta tapahtumiin.
12. Peräsinakselin katkeamisesta ei saada suoraa indikaatiota sillalle; se täytyy havaita aluksen liiketilasta ja ohjailusuureista. Siltamiehistölle kertyi tämän vuoksi vain vähitellen viitteitä siitä, että aluksen ohjailulaitteissa saattoi olla vikaa. Siltamiehistö ei ryhtynyt välittömiin toimenpiteisiin aluksen matkan keskeyttämiseksi.
13. Matka keskeytettiin noin 30 minuutin kuluttua ohjailuvaikeuksien alkamisesta. Paikalle kutsuttiin hinaaja ja matkaa jatkettiin hitaasti Turkuun.

3.2 Tapahtuman syyt

SB-peräsinakselin katkeaminen johtui kahdesta alukseen jo rakennusvaiheessa piileväksi jääneestä rakennevirheestä. Peräsinakselissa oli *terävä olake* ja alalaakerin materiaalivalinnat ja rakenne mahdollistivat *galvaanisen korroosion*. Alalaakerin korroosion seurauksena ala-akselin liikevara kasvoi, minkä vuoksi peräsinakselin pääsi taipumaan suunniteltua enemmän. Tämän vuoksi peräsinakselin jännitykset kasvoivat huomattavasti yli mitoitusarvojen. Lisäksi kasvaneet jännitykset kohdistuivat olakkeen vuoksi suunniteltua heikompaan peräsinakseliin. Jännitykset olivat luonteeltaan vaihtuvia, mikä johti metallin väsymiseen.

SB-peräsinakselin katkeamisprosessi kesti kaikkiaan 17 vuotta. Prosessi eteni *kolmessa* vaiheessa. *Ensin hitaana* alalaakerin pesän syöpymisenä 11 vuoden aikana, minkä tuloksena peräsinakseliin jäi piileviä väsymisvaurioita. Valuepoksilla tehty korjaus poisti syöpymisestä syntyneen alalaakerin liikevaran. *Toisessa vaiheessa* prosessi eteni hitaana valuepoksin rikkoontumisena päättyen korjausvaikutuksen täydelliseen häviämiseen ja liikevaran muodostumiseen hieman enimmäistä vaihetta suuremmaksi. *Kolmannessa vaiheessa* ensimmäisen vaiheen väsymisprosessissa jäljelle jäänyt elinikä kului nopeasti loppuun.

SILJA EUROPALLA esiintyy tämäntyyppisille aluksille ominaista peräsimen resonanssivärähtelyä. Peräsimen ominaistaajuus osuu käytetyille potkurin lapataajuuksille. Se nopeutti akselin väsymisprosessia. Sarviperäsimen värähtelyominaisuuksia olisi mahdollista selvittää resonanssivaaran vähentämiseksi alusten suunnitteluvaiheessa, kuten eräät luokituslaitokset suosittelevat.

Myötävaikuttaneet tekijät

Syöpyminen havaittiin molemmissa alalaakereissa vuonna 2004 telakoinnin yhteydessä ja sen laajuus oli yllätys. Lyhyeksi suunniteltu telakointiaika vaikutti valuepoksin valintaan korjaustoimenpiteenä, koska sitä käyttäen korjaus oli toteutettavissa nopeasti. Lisäksi sen käyttö oli tuttua muissa sovelluksissa. Toteutuksessa ei nähty rakenteeseen liittyviä piileviä haittoja varsinkin kun luokituslaitos hyväksyi ratkaisun pysyväksi.

3.3 Muita turvallisuushavaintoja

Rakenteiden suunnittelu ja tarkastus. Alukseen rakennusvaiheessa piileväksi jääneet rakennevirheet olisivat olleet mahdollisia havaita ennen aluksen käyttöönottoa. Alalaakerin syöpymismahdollisuus oli tunnistettavissa rakennepiirustuksista tavanomaisen korroosiotietämyksen perusteella, koska materiaalivalinnat olivat tiedossa eikä toistensa yhteydessä olevia metalleja ollut korroosiosuojattu. Tämä havainto oli mahdollista tehdä sekä suunnitteluvaiheessa että milloin tahansa laivan käytön aikana. Ennen laivan luovutusta luokituslaitoksen ja varustamon vastaanottotarkastuksen yhteydessä olisi ollut mahdollista havaita myös SB-peräsinakselissa ollut olake.

Korroosion syyhyn ja mahdollisiin seurauksiin peräsinakselissa ei puututtu vuosien 2004 ja 2009 korjausten yhteydessä, ainoastaan vauriot korjattiin. Peräsinakselia ei irroteta määrävälein tarkastettavaksi telakointien aikana

Valuepoksen käyttökelpoisuus alalaakerin korjauksessa. Toteutetulla tavalla käytettynä valuepoksia ei voi pitää pysyvänä ratkaisuna alalaakerin syöpymien korjaukseen, tämän osoittaa tapahtunut valuepoksen rikkoontuminen molempien peräsien laake-reissa ja häviäminen oikeanpuoleisesta. Valuepoksia käytettiin laakeriholkin kiinnitykseen ottamatta huomioon kaikkia epoksimateriaaliin ja sen rajapintoihin kohdistuvia kuormia ja kuormitus-suuntia. Pysyvät korjaukset valuepoksilla ovat mahdollisia vain, jos sen käytöstä on kokemusta pitkältä ajalta. Mikäli korjausratkaisun on suunniteltu kestävän aluksen katsastusvaatimusten mukaisen telakointivälin, se edellyttää valuepoksikorjauksen suunnittelua, kunnon seurannan suunnittelua ja kunnon seurantaa riittävän usein. Lisäksi riittävä tartunta epoksin ja laakeriholkin ja pesän välillä tulee varmistaa, tai muulla tavoin estää laakeriholkin pääsy pyörimään.

Telakoinnit. Telakointien ajankohdat pyritään sovittamaan siten, että aluksen liikennöinnille olisi mahdollisimman vähän haittaa. Tämän johdosta telakointiaika on mahdollisimman lyhyt, yleensä 7–10 vuorokautta, minkä johdosta yllätyksellisten vaurioiden korjaus saatetaan joutua tekemään puutteellisesti suunniteltuina.

Muutamat telakointivälit olivat olleet niin pitkiä, että kiihtyvästi etenevä syöpymis- ja väsymisprosessi ehtivät aikaansaamaan vaurioita.

Laakerivälysten mittausmenettely rakotulkeilla tai tunkkauksella on rutiininomaista eikä poikkeavaa liikevaraa – esimerkiksi laakeripesän syöpymisestä johtuvaa – ole varauduttu etsimään.

Laivan hallinta. Siltamiehistö ei ryhtynyt välittömiin toimenpiteisiin aluksen matkan keskeyttämiseksi. Tämän voi selittää se, että tilanne oli vaikeasti tulkittava. Tehokkaampi BRM-käytäntö olisi kuitenkin voinut nopeuttaa päätöstä. Aiemmin muun muassa simulaattorilla tehtyjen ohjailuharjoitusten ansiosta siltamiehistö kykeni kuitenkin reagoimaan tähän poikkeukselliseen tilanteeseen turvallisesti.

Tilanteesta tiedottaminen merenkulun valvonta- ja pelastusorganisaatioille tapahtui säädösten mukaisesti.

Simulaattorikoulutuksessa voidaan harjoitella aluksen liiketilan hallintaa käsiohjauksella sen selvittämiseksi, miten aluksen käyttäytyminen (liiketilasuureiden muuttuminen) riippuu ohjausparametreista (lähinnä peräsinkulma). Näin voidaan saada perusteita aluksen pysäyttämispäätöksen harkinnassa ohjailun toimiessa poikkeavasti.

4 TOTEUTETUT TOIMENPITEET

Asianosaisia ja elinkeinon osapuolia on pidetty ajan tasalla tutkinnan tärkeimmistä havainnoista. Varustamo on varoitettu tutkinnan tulosten esittelyn yhteydessä alalaakeissa edelleen piilevästä korroosio-ongelmasta.

Mahdollisten korroosiovaurioiden esiintyminen on nyttemmin tarkemmassa valvonnassa. Varustamo merkinnyt alalaakerin pesän ja holkin siten, että jo sukeltaja pystyy toteamaan onko holkki pyörinyt. Samalla tarkastetaan vällys rakotulkillä. Rakotulkillä mitattaessa sukeltaja käyttää myös erikoisvalmisteista tunkkia, jolloin saadaan luotettavat arvot. Näitä sukeltajan tai telakan tarkastuksia on vähintään neljä vuodessa. Tunkkausmitausta ei tehdä joka sukelluksen yhteydessä, mutta holkki tarkastetaan aina.

5 TURVALLISUUSSUOSITUKSET

SILJA EUROPAn rakennusajankohtana laatujärjestelmien käyttö yrityksissä oli harvinaista. Nykyään yrityksissä on voimassa sertifioidut ja auditoidut laatujärjestelmät kuten esimerkiksi ISO 9001. Havaitut puutteet suunnittelussa, valmistuksessa ja tarkastuksissa ovat sen luonteisia, että niitä ei tulisi ilmetä, mikäli toiminta noudattaa laatujärjestelmää. Laivan rakennusprosessin onnistunut läpivienti oikeiden rakenneratkaisujen saavuttamiseksi yksityiskohtia myöten (kuten tässä tapauksessa alalaakerin rakenne sellaiseksi, että pesän korroosio on estetty) lopputuotteessa edellyttää erityisesti, että varustamon, luokituslaitoksen, telakan ja alihankkijoiden toiminnan yhteensovittamiseen panostetaan. Laadunvalvontaan ei kuitenkaan ole katsottu tarpeelliseksi antaa turvallisuussuosituksia, koska olemassa olevat ohjeet tässä suhteessa ovat riittäviä.

Sen sijaan **peräsinlaitteiston tarkastusmenettelyä** on syytä täsmentää. Telakointien yhteydessä tehtävät välysten mittaukset tavanomaisin menetelmin eivät havaitse peräsin alalaakerin poikkeuksellisen suuria pesän syöpymiä. Alalaakerin liian suuri liikevara aiheuttaa peräsinakselille vaarallisen suuria jännityksiä, jotka saattavat jatkuessaan vahingoittaa sitä. Eri aikoina tehty välysmittaukset eivät ole olleet vertailukelpoisia, mikä on haitannut tulosten tarkoituksenmukaista käyttöä.

Väsymisilmiö saattaa kehittyä murtumisvaiheeseen alkuun päästyään yllättävän nopeasti. Varustamoilla on taipumus pidentää telakointivälejä, mikä saattaa tulla joissakin tapauksissa liian pitkäksi piilevää väsymisvaurioprosessia ajatellen.

Peräsinakseleita ei nykyään määrävälein irroteta tarkastettavaksi telakointien aikana, kuten esimerkiksi potkuriakselit.

OTKES suosittelee Bureau Veritakselle ja muille luokituslaitoksille, että tarkastajien ohjeet tulisivat sisältämään muun muassa seuraavat asiat:

1. *Välysten mittaamenetelmä tulee kirjata luokituslaitoksen tarkastuskertomukseen. Vaikka mittaamenetelmää ei säännöissä määritellä, sen tulee olla sellainen, että se antaa aina vertailukelpoiset tulokset ja sen tulee perustua alalaakerin rakenteeseen niin, että kaikki eri materiaalien rajapintojen muutokset (mahdolliset syöpymät) voidaan havaita.*
2. *Mikäli toistuvasti on havaittu 3–4 mm välyksiä, peräsinakseli ja sen vastinosat tulee tarkastaa säröjen ja syöpymien varalta. Luokituslaitoksen tulee sopiessaan varustamon kanssa telakointiajoista harkita, onko aluksen korjaushistoriassa viitteitä mahdollisesta väsymisvaurioprosessista peräsin- tai muussa laitteistossa.*

OTKES suosittelee Bureau Veritakselle ja muille luokituslaitoksille, että:

3. *Luokituslaitosten tulee harkita täydennystä säätöihinsä koskien peräsinakselin irrottamista ja tarkastamista määrävälein.*

Valuepoksen käyttö peräsimen alalaakerin rakenteen osana kosketuksessa meriveteen näin suuressa aluksessa oli harvinaista, ja kyseisellä korjaustelakalla ainutkertaista.

OTKES suosittelee Bureau Veritakselle ja muille luokituslaitoksille, että:

4. *Peräsinakselin alalaakerin valuepoksikorjauksen tulee olla väliaikainen. Väliaikaisuus on huomioitava päätettäessä korjauksen kunnon seuranta-menetelmistä ja tarkastusväleistä. Korjauksen suunnittelussa on otettava huomioon kaikki laakeriholkista epoksiin kohdistuvat voimat.*
5. *Ennen peräsinakselin laakerien väliaikaista tai pysyvää korjausta on selvitettävä korjaustarpeen syntyyn vaikuttaneet syyt. Ne tulee huomioida korjauksen suunnittelussa.*

Aluksen käyttäytymisen arviointi poikkeavissa tilanteissa on mahdollista tehokkaalla BRM-toiminnalla, johon kuuluu työnjako aluksen hallintaan ja tilanteen analysointiin. Jos aluksen ohjausjärjestelmät toimivat poikkeavasti, tulee selvittää, voidaanko aluksella jatkaa matkaa.

Tilanteen tavoitteellinen analysointi perustuu aluksen peruskäyttäytymisen syväliikkeen ymmärtämiseen ja edellyttää ohjailusuureiden rekisteröimistä, esimerkiksi käännöksissä tarvittavien peräsinkulmien metodista tarkkailua ja kirjaamista. Lisäksi on tehtävä niihin perustuva arviointi tilanteen vakavuudesta ja päätös jatko-toimista, muun muassa päällikön ja/tai lisähenkilöstön kutsumisesta sillalle.

OTKES suosittelee varustamolle, että:

6. *Simulaattorikoulutusta tulee kehittää siten, että koulutettavien valmiuksia parannetaan tilanteen systemaattiseen selvittämiseen ja analysointiin aluksen ohjailujärjestelmien toimiessa poikkeavasti. Tavoitteena tulee olla matkan keskeyttämisestä tai sen jatkamisesta tehtävän päätöksen tueksi kerättävän tiedonhankinnan kehittäminen.*

Helsingissä 9.11.2012

Martti Heikkilä

Olavi Huuska

Ville Grönvall

Sauli Ahvenjärvi

Ari Nieminen

YHTEENVETO SAADUISTA LAUSUNNOISTA

Liikenteen turvallisuusviraston lausunto

Liikenteen turvallisuusvirastolla ei ollut lausuttavaa tutkintaselostuksen lopulliseen luonnokseen.

Bureau Veritasin lausunto

Bureau Veritas kiinnitti lausunnossaan huomiota siihen, että peräsinakselissa mahdollisesti vuoden 2004 telakoinnin aikana olleen hiushalkeaman olemassaolosta ei ole todisteita.

Lisäksi Bureau Veritas painottaa, viitaten omiin sääntöihinsä (Rules for the Classification of Steel Ships, PtA, NR467, Ch3, Sec4, 2.5 (Bottom Survey)), että peräsinakselin näkyvät kohdat tarkastetaan säännöllisesti. Mikäli luokan tarkastaja katsoo tarpeelliseksi, peräsin voidaan irrottaa ja/tai sen tarkastuslevyt voidaan avata alalaakerin tarkastamiseksi.

Lausunnossa todetaan, että korroosiosuojaus ei kuulu luokituksen piiriin, ja että peräsimen alalaakerin välysmittaus- tai korjaustavasta ei anneta ohjeita. Näissä tulee noudattaa laitevalmistajan tai varustamon ohjeita.

Lisäksi lausunnossa kommentoidaan valuepoksin käyttöä pysyvänä korjauksena.

Tallink Silja Oy:n lausunto

Tallink Silja Oy halusi lausunnossaan tarkentaa muutamia kohtia selostuksessa. Näitä olivat muun muassa aluksen ohjailu ja komentositelaitteisto, simulaattorissa tehdyt poikkeavien tilanteiden harjoitukset, aluksen nopeuden vaikutus ohjailuvoimalaskelmiin sekä valuepoksin käyttö peräsinlaakerikorjauksissa. Lisäksi saatiin tarkennus varustamon toteuttamista toimenpiteistä onnettomuuden jälkeen.