



Tutkintaselostus

C4/2009M

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

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

ISBN 978-951-836-368-5 (PDF)

ISSN 2242-7724 (PDF)

ISSN-L 1797-8122

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 taivutusväsymiskuurituksen 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 struk-

tur 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
KÄYTETYT LYHENTEET ja TERMIT	XI
ALKUSANAT	XIII
1 TAPAHTUMAT JA TUTKIMUKSET	1
1.1 Aluksen päätiedot.....	1
1.1.1 Yleistiedot.....	1
1.1.2 Miehistys	2
1.1.3 Komentosilta ja sen laitteet.....	2
1.1.4 Kuljetuskoneisto	4
1.1.5 Peräsimet ja muut ohjailulaitteet.....	5
1.1.6 Korroosiosuojaus.....	13
1.1.7 Matkustajat ja lasti	14
1.1.8 Todistukset ja asiakirjat	14
1.2 Onnettomuustapahtuma.....	15
1.2.1 Sääolosuhteet.....	15
1.2.2 Onnettomuusmatka ja sen valmistelu	17
1.2.3 Tapahtumapaikka	17
1.2.4 Tapahtuma	19
1.2.5 Toimenpiteet tapahtuman jälkeen.....	28
1.2.6 Henkilövahingot	30
1.2.7 Aluksen vauriot.....	30
1.2.8 Muut vahingot.....	38
1.2.9 Navigointi- ja yhteydenpitolaitteet	38
1.2.10 Rekisteröintilaitteet	38
1.2.11 VTS- ja valvontajärjestelmien toiminta.....	38
1.3 Pelastus- ja hälytystoiminta.....	38
1.4 Onnettomuuden turvallisuustutkinta	39
1.4.1 Tutkinnan lähtökohta	39
1.4.2 Tutkinnan sisältö ja laajuus.....	39
1.5 Aluksen ja peräsimien historia.....	43
1.5.1 Aluksen käyttö ja onnettomuudet.....	43

1.5.2	Telakoinnit.....	45
1.6	Laakerivällykset ja alalaakerin liikevara	52
1.6.1	Vällykset.....	52
1.6.2	Alalaakerin liikevara	55
1.6.3	Alalaakerin liikevara ja peräsinakselin jännitykset	62
1.7	VDR-datan keruu ja analysointi	64
1.7.1	Numeerinen data.....	64
1.7.2	Kuva- ja äänidata	66
1.8	Peräsimen tutkiminen – väsymisvaurioon johtaneet tekijät.....	67
1.8.1	Metalliosat	67
1.8.2	Valuepoksen ominaisuudet	79
1.8.3	Alalaakerin korroosio.....	81
1.8.4	Peräsimen värähtely.....	82
1.8.5	Peräsimen kavitaatio	84
1.9	Peräsinakseliä väsymisprosessi	85
1.9.1	Vaikuttavat voimat ja peräsinakselin jännitykset	86
1.9.2	Luokitustietojen mitoitusperusteet	88
1.9.3	Peräsinvoimien suuruusluokkien arviointi.....	89
1.9.4	Simuloidut staattiset voimat.....	91
1.9.5	Staattisten ja syklisten voimien yhdistäminen	92
1.9.6	Voimien muunto jännityksiksi	93
1.9.7	Peräsinakseliä väsymislajuuden arviointi	94
1.9.8	Peräsinakseliä elinikäarviointi	96
1.10	Arvio tutkimuksessa käytetyn laskentamenettelyn luotettavuudesta	97
1.11	Toimintaa ohjaavat säädökset ja määräykset	99
2	ANALYYSI.....	101
2.1	Analyytin perusteet.....	101
2.1.1	Analyytin lähtökohta ja johtoajatus	101
2.1.2	SB-akselin murtumiseen vaikuttaneet tekijät.....	102
2.1.3	Analyytin pääaiheet	104
2.2	Väsymismurtumaproessin vaihe 1 – alku ja kehittyminen	105
2.2.1	Molempien alalaakerien korroosio.....	105
2.2.2	Peräsinakseliä väliset erot ja samankaltaisuudet	106
2.2.3	Akseliä ja peräsimien muut säröt.....	106
2.3	Väsymismurtumaproessin vaihe 2 – valuepoksikorjaus ja sen rikkoontuminen	107
2.3.1	Korjaustapa ja sen merkitys	108
2.3.2	Valuepoksen rikkoontuminen	108

2.3.3	Vuoden 2004 korjaustavan arviointia	110
2.4	Väsymismurtumaprosessin vaihe 3 – peräsinakselin katkeaminen.....	112
2.5	Suunnittelu-, valmistus- ja tarkastusprosessien arviointi	113
2.5.1	Alalaakerin korroosioherkkyys – piilevänä pysynyt vika.....	113
2.5.2	Peräsinakselin terävä olake – piilevä vika	114
2.5.3	Telakointiväli – liian pitkä	114
2.5.4	Peräsinakselin tarkastus.....	115
2.6	Yhteenveto murtumisprosessista	115
2.7	Laivan hallinta onnettomuusmatkalla	119
2.7.1	Akselin katkeamisen ajankohta	119
2.7.2	Tilanteen havainnointi ja hallinta.....	121
2.7.3	Arvio tilanteen hallinnasta.....	125
3	JOHTOPÄÄTÖKSET	127
3.1	Toteamukset	127
3.2	Tapahtuman syyt.....	128
3.3	Muita turvallisuushavaintoja	128
4	TOTEUTETUT TOIMENPITEET	131
5	TURVALLISUUSSUOSITUKSET.....	133

ERILLISET RAPORTIT JA AINEISTOT

LIITTEET

- Liite 1. Lisätietoja akselist ja laakereista
- Liite 2. Holkkien pyörimisen tarkastelu
- Liite 3. Alalaakerin korroosio merivedessä
- Liite 4. Peräsimien värähtelyn arviointi
- Liite 5. Peräsimien staattisen lujuuden tarkastelu
- Liite 6. Peräsimien väsymiskestävyyden tarkastelu
- Liite 7. Yhteenveto saaduista lausunnoista

KÄYTETYT LYHENTEET JA TERMIT

Lyhenne	Nimi alkukielellä	Nimi suomeksi
BV	Bureau Veritas (Classification Society)	Bureau Veritas (luokituslaitos)
BRM	Bridge Resource Management	Komentosiltayhteistyö
FMEA	Failure Mode Effect Analysis	Vika- ja vaikutusanalyysi
IMO	International Maritime Organization	Kansainvälinen merenkulkujärjestö
ITTC	International Towing Tank Conference	Kansainvälinen mallikoelaitos yhteiskokous
DP	Designated Person	Nimetty henkilö
MRCC	Maritime Rescue Co-ordination Centre	Meripelastuskeskus
TKK	-	Teknillinen korkeakoulu
VDR	Voyage Data Recorder	Matkatietojen tallennin
VTSS	Vessel Traffic Service	Alusliikennepalvelu
VTT	-	Teknologian tutkimuskeskus

Termi	Termin selitys
Course Mode	COURSE MODE tarkoittaa automaattiohjauksen ohjailumoodia, jossa automaattiohjaus pitää aluksen kulkusuunnan pohjan suhteen annetussa arvossa kompensoiden samalla tuulen, aallokon ja virtauksen aiheuttaman siron.
Fretting	Kitkakuluminen, joka johtuu kahden pinnan keskinäisestä pienestä edestakaisesta värähtelyliikkeestä.
Heading Mode	HEADING MODE tarkoittaa automaattiohjauksen ohjailumoodia, jossa automaattiohjaus pitää laivan keulasuunnan annetussa arvossa.
Minerian menetelmä	Menetelmän avulla selvitetään, kuinka suuren osuuden akselin eliniästä tietyn suuruinen jännitysvaihtelu kuluttaa; erisuuruisien jännitysvaihtelujen kulutusosuudet lasketaan yhteen, ja lopputuloksena saadaan kulutetun eliniän määrä. Menetelmää kutsutaan myös Palmgren-Minerin menetelmäksi.
Peräsinvoima	Peräsimen mitoitusvoima, säännöissä rudder force. Voima, joka kohdistuu aluksen peräsimen lapaan aluksen kulun tai satamaoperointien aikana. Se taivuttaa peräsinakselia sekä taivuttaa ja vääntää peräsinarvea.
Stöttaus	Aluksen kääntymisen pysäyttäminen vastaruorilla, eli kääntämällä peräsinä päinvastaiseen suuntaan, kuin millä käännös on aloitettu.
Track Mode	TRACK MODE tarkoittaa automaattiohjauksessa ajoa annettua reittiä seuraten.

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



Kuva 1. Kuva aluksesta.

ALKUSANAT

Matkalla Tukholmasta Turkuun 22.11.2009 alkoi M/S SILJA EUROPA:n ohjailussa esiintyä normaalia poikkeavaa käännoksissä 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 SB-puolen 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 siirtyi 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 teknisiin 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. Korjaustekniikan ja epoksikorjauksen rikkoontumisen sekä peräsinakselin katkeamiseen johtaneen väsymisprosessin selvittäminen oli vaativa kokonaisuus.

Lautakunnan jäsenet ovat keskustelleet useaan otteeseen luokituslaitosten, varustamon, korjaus-
telakan ja viranomaisten edustajien kanssa sekä hankkineet alukseen ja telakointeihin liittyviä va-
lokuvia ja asiakirjoja. Onnettomuustutkintalautakunnasta kaksi jäsentä keskusteli aluksen päällys-
tön kanssa aluksella 24.11.2009 Turussa ja otti valokuvia. Kaksi jäsentä oli tekemässä havaintoja
ja mittauksia sekä otti valokuvia aluksen ollessa telakalla Riikassa ja Gdanskissa. Gdanskissa oli
mukana onnettomuustutkintakeskuksen toimeksiannosta myös VTT:n materiaalitekniikan asian-
tuntija. Onnettomuustutkintalautakunta teki yhden edestakaisen Turku-Tukholma matkan, jonka
aikana havainnointiin perän värähtelyä, aluksen ohjailua, kerättiin lisää asiakirjoja sekä keskustel-
tiin päällystön kanssa. Lautakunnan yksi jäsen selvitti erikseen aluksen huoltojärjestelmän pe-
rásintä koskevaa osuutta ja keräsi lisää asiakirjoja.

Molemmista peräsimistä, akseleista ja holkeista otettiin runsaasti valokuvia tutkinnan eri vaiheis-
sa. Tutkintalautakunta kuunteli onnettomuuden ajankohdan VDR-äänitallenteet komentositityös-
kentelystä useaan otteeseen toukokuussa 2011 ja tallensi Conning- ja tutkanäyttöjen kuvat tut-
kinnan jatkokäsittelyyn. Lautakunnan omien laskelmien lisäksi on tilattu VTT:ltä laskelmia ja ma-
teriaalitutkimuksia ja TKK:lta laskelmia sekä keskusteltu eri alojen asiantuntijoiden kanssa. Luoki-
tuslaitokselta saatiin alkuperäiset ja tarkistettut peräsimen luokituslaskelmat. Tapaamisissa näiden
tahojen kanssa Onnettomuustutkintakeskus on esitellyt tutkinnan sen hetkistä tilannetta.

Tutkinnan kannalta oli merkittävää, että aluksen liiketilaa ja laitteistojen toiminnan parametreja tal-
tioinut VDR-rekisteröinti (ns. musta laatikko) oli toiminut ja tiedot olivat tallessa noin kuukauden
ajalta. Tietojen purku, käsittely ja analysointi ovat vieneet runsaasti aikaa.

Tutkinnan alkuvaiheessa Gdanskissa ei ollut vielä tietoa vuonna 2004 tehdystä epoksikorjaukses-
ta ja siksi peräsinlaitteiston purkamisen yhteydessä ei tehty kaikkia tarpeellisia havaintoja ja mit-
tauksia. Varsinkin epoksin purkamisen valvonta jäi puutteelliseksi. Tällä ei katsota olevan vaiku-
tusta tutkinnan tuloksiin.

Tutkintaan kuului ulkopuolisilla toimijoilla teetettyjä selvityksiä, jotka eivät laajuutensa vuoksi ole
liitteinä, vaan ne on taltioitu Onnettomuustutkintakeskukseen. Niiden tulokset on otettu huomioon
ja kuvailtu tutkintaselostuksen vastaavissa kohdissa.

Tutkintaselostuksen sisällöstä

Ensimmäisessä luvussa esitellään alus ja erityisesti sen peräsinlaitteisto. Onnettomuusmatkan tapahtumien jälkeen esitellään toimenpiteet, joilla alus saatiin turvallisesti määräsatamaansa Turkuun. Useiden kuvien ja taulukoiden avulla esitellään aluksen saamat vauriot ja näin on pyritty havainnollistamaan tapahtumaa ja sen syitä. Onnettomuuden tutkintasuunnitelman kuvailun jälkeen käydään läpi tutkinnan pääkohdat. Ensinnä esitetään aluksen liikennöinti- ja telakointitietojen kokoamisen tulokset. Erityisesti välysmittauksia ja niiden merkitystä vaurion kannalta on käsitelty perusteellisesti. Raportin ykkösosa jatkuu VDR-tiedon taltioinnin kuvauksen jälkeen laajalla osiolla, jossa esitetään VTT:n tutkimusten tulokset koskien vaurioituneita osia. Seuraavaksi esitellään värähtely-, korroosio- ja kavitointi -ilmiöitä niihin liittyvine havaintoineen. Peräsinlaitteiston lujuutta on tarkasteltu laajasti sekä staattisen lujuuden, että väsymislujuuden kannalta sekä esitetään näiden laskelmien tulokset. Päätteksi on arvioitu käytettyjen laskentamenettelyjen luotettavuutta sekä vaurioon liittyä sääntöjä ja ohjeita. Tutkintaselostuksessa käytetty kellonaika on Suomen talviaikaa.

Toisessa luvussa, analyysiosassa, on tarkasteltu eri syiden muodostamaa syyketjua ja miten onnettomuus olisi voitu välttää. Siellä on myös esitetty tutkijoiden analyysi tilanteen hallinnan tehokkuudesta sekä peräsinmen suunnittelu-, valmistus- ja tarkastusprosessin onnistumisesta.

Kolmannessa luvussa, johtopäätös-osassa, on esitetty tapaukseen liittyviä huomiota ja peräsinakselin katkeamisen syyt tiivistetysti.

Neljännessä luvussa on esitetty onnettomuuden johdosta tehdyt toimenpiteet.

Viidennessä luvussa raportin lopuksi annetaan luokituslaitokselle ja varustamolle suosituksia alalaakerin tarkastusten tehostamisesta ja tarkastusmenettelyn kirjaamisesta. Suositellaan myös peräsinakselin irrottamista tarkastusta varten, mikäli on havaittu alalaakerin välysten kasvua.

Liitteisiin on koottu tapahtumaan liittyvät useat teknillisluonteiset esitykset laskelmineen, joiden tulokset on pyritty esittämään itse tekstissä lyhyinä ja pelkistettyinä. Mikäli liitteen tulokset perustuivat laskelmiin, ovat vastaavat tiedostot myös mainittu kyseisessä liitteessä.

Valokuvat joiden lähteitä ei ole mainittu ovat tutkijoiden ottamia. Piirustukset on saatu varustamolta.

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 päälylystön haastatteluihin.

1.1.1 Yleistiedot

Laivan nimi:	SILJA EUROPA
Laji:	matkustaja-autolautta
Suurin sallittu matkustajamäärä:	3123
Kotipaikka:	Maarianhamina
Rekisteröintipaikka:	Maarianhamina
Rekisterinumero:	50105
IMO-numero:	8919805
Tunnuskirjaimet:	OJFN
Omistaja:	Tallink Autoexpress Ltd, Limassol
Varustamo:	Oy Silja Line Ab, Helsinki
Vetoisuus:	Brutto: 59914 Netto: 41309
Suurin pituus:	201,78 m
Pituus L _{pp}	171,6 m
Leveys:	32,00 m
Syväys:	6,80 m
Konetehto:	4 x 7950 kW ¹
Nopeus:	22,50 solmua
Jäämaksuluokka:	1A Super
Rakentaja:	Jos. L. Meyer Werft, Papenburg, Saksa
Valmistumisvuosi:	1993
Luokituslaitos:	Bureau Veritas

¹ Tieto komentosillan seinällä, "Wheelhouse Poster", 100 % MCR (maksimi jatkuva teho).

1.1.2 Miehistys

Aluksen kansi- ja konemiehistöä oli 41 ja palveluhenkilökuntaa 245. Vahdissa olivat merikapteenin pätevyyden omaavat perämies vahtipäällikkönä ja linjaluotsi². Myös vahtipäälliköllä oli linjaluotsikirja kyseiselle väylälle. Linjaluotsien vahdinvaihto 22.11.2009 tehtiin klo 15.32, jolloin linjaluotsiksi tuli aluksen yliperämies.

Vahtipäällikkönä konevalvomossa toimi vahtikonemestarin pätevyyden omaava kone-mestari. Lisäksi konevalvomossa oli moottorimies konevahtina.

1.1.3 Komentosilta ja sen laitteet

Alus kulki reittiä³ Turku-Långnäs-Tukholma-Maarianhamina-Turku, joka on reittisuunnitelmana ohjelmoitu integroidun navigointijärjestelmän automaattiohjauslaitteistoon. Reittisuunnitelma on jaettu väylän ominaisuuksien mukaan osiin, joissa kussakin on tavoiteltu nopeus, suunta ja suunnan muutoksen paikka sekä uusi suunta. Automaattiohjauksen ohjailutavat ovat Heading Mode, Course Mode, Track Mode ja käsiohjaus⁴. Poikkeustilanteessa otetaan käyttöön hätäohjaus. Reittisuunnitelmaan voidaan hetkellisen liikennetilanteen mukaan tehdä suunnan, kääntösäteen ja nopeuden muutoksia. Automaattiohjaus säättää peräsinkulmia kompassin, paikan ja nopeustiedon perusteella. Satelliittipaikantimesta automaattiohjauslaitteisto saa aluksen paikkatiedon ja vertailee sitä ohjelmoituun reittiviivaan tehden tarpeelliset ohjailulaitteiden säädöt. Nopeus säädetään koneiston ohjauskahvasta (KaMeWa), jonka automatiikka muuttaa samanaikaisesti potkurien kierroslukua ja lapakulmia⁵. Käsiohjaus on pääasiassa käytössä satamaoperaation aikana, jolloin myös ohjailupotkurit ovat käytössä. Satamissa ohjailun tehostamiseksi oli käytössä peräsimen Jastram-rulla (selostettu myöhemmin, sivulla 10).

Komentosiltamiehistöä on normaalisti kaksi henkilöä, vahtipäällikkö ja linjaluotsi. Heidän paikkansa on komentosillan etuosassa, kuva 2a. Heidän käytössään on taaempaa karttapöytä ja muita laitteita, kuva 2b. Tärkeimmät näytöt ovat etuosan ohjauspaikkojen tutka ja niin sanotut conning-näytöt⁶, kuvat 3a ja 3b. Lisäksi ikkunan yläpuolella ja katossa on näytöt muun muassa peräsinkulmille. Tutka- ja conning-näytöt ovat myös komentosillan siivillä olevilla ohjauspaikoilla. Alusta ohjattaessa tärkein ja käytetyin näyttölaite komentosillalla on tutka ja varsinkin sen prediktori, ts. ennuste aluksen liikkeistä⁷.

² Linjaluotsi on aluksen perämies, jolla on kyseiselle väylälle luotsauslain mukainen linjaluotsin kirja.

³ Tämä reitti oli yleisin siten, että välillä Tukholman sijalla oli Kapellskär.

⁴ HEADING MODE tarkoittaa automaattiohjauksen ohjailumoodia, jossa automaattiohjaus pitää laivan keulasuunnan annetussa arvossa ja COURSE MODE tarkoittaa automaattiohjauksen ohjailumoodia, jossa automaattiohjaus pitää aluksen kulusuunnan pohjan suhteen annetussa arvossa kompensoiden samalla tuulen, aallokon ja virtauksen aiheuttaman sorron. TRACK MODE tarkoittaa ajoa annettua reittiviivaa seuraten.

⁵ Alus ei käytä navigointijärjestelmän Speed Pilot -toimintoa, joka on kytketty kokonaan pois käytöstä.

⁶ Conning Display, laivojen keskitetty hälytys-, turva- sekä informaatiojärjestelmän näyttöruutu on integroitu komentosiltajärjestelmään. Ruutuun on koottu tärkeitä navigointiin ja laivan hallintaan liittyviä tietoja kuten aluksen paikka, nopeus, kulusuunta, peräsinkulmat, kääntymisnopeus, tuulitiedot, veden syvyys yhteen paikkaan. Tyypillisiä hälytyksiä ovat esimerkiksi seuraavat: tutkakohde liian lähellä, laiva ulkona asetetuista reittirajoista, ohjaushälytykset, navigointivaloissa vikaa, kompassivika, koneautomaation hälytykset jne. Hälytyksiä voidaan kuitata yksittäin tai keskitetysti.

⁷ 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).

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

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. Muut navigointilaitteet:

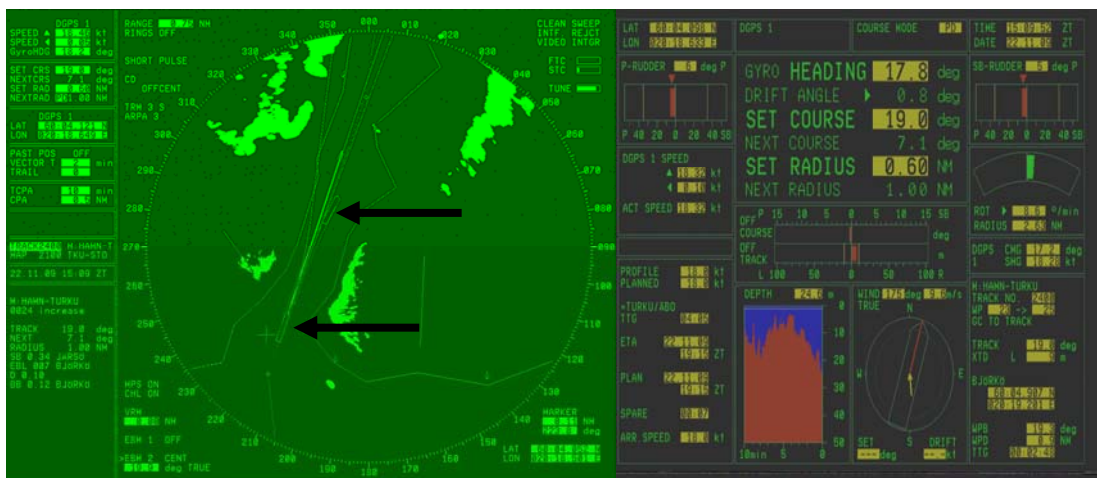
Tutkat:	2 kpl Atlas 9600 X-band 2 kpl Atlas 9600 S-band
Satelliittinavigaattorit:	DGPS1: Hemisphere GPS Cresent VS 100 Series DGPS2: CSI Wireless DGPS Max
Kaikuluotain:	Atlas Folia 522
Hyrräkompassit:	Gyro 1: Sperry Marine Navigat 2100 Fiber Optic Gyro 2: Sperry Marine Navigat X MK1 Digital Gyrocompass Gyro 3: (GPS compass Vector)
Magneettikompassi:	Casseus & Plath
Automaattiohjaus:	2 kpl ATLAS TRACKPILOT
Loki:	Atlas Dolog 20



Kuva 2a 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.



Kuva 2b. Näkymä komentosillalla ohjauspaikkojen takana. Kuvattu 24.11.2009 Turussa. Vasemmalta: turvakonsoli, karttapöytä ja työpöytä, jonka alla on VDR-laitteisto (musta laatikko).

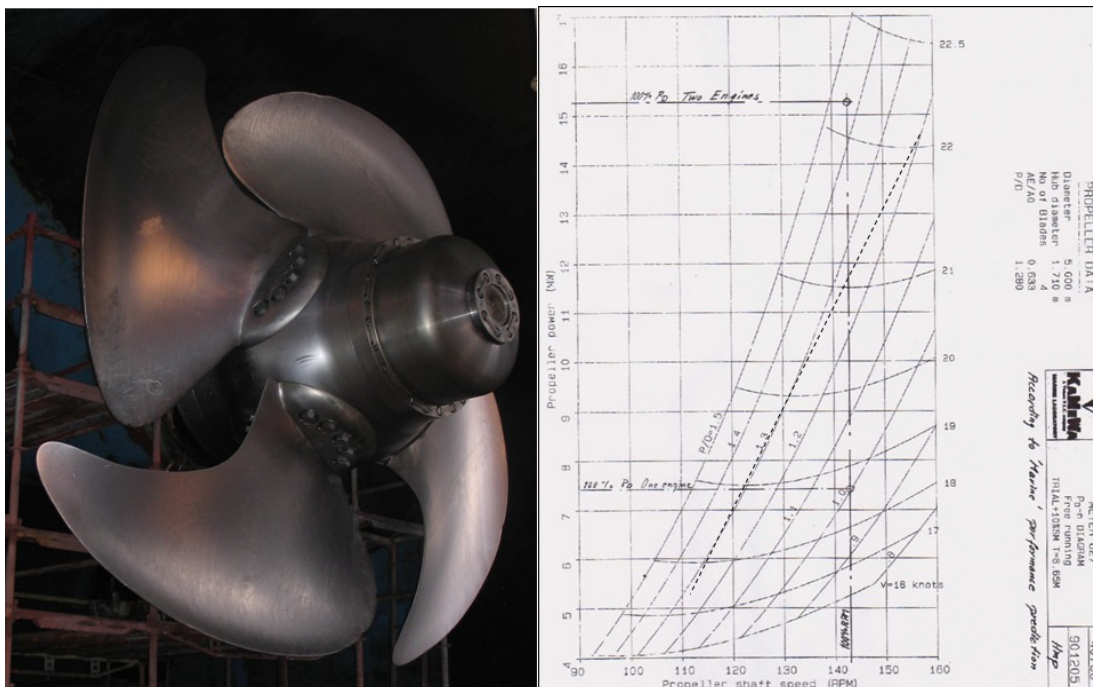


Kuvat 3a ja 3b. Kuvakaappaus tutkanäytöstä vasemmalla (a) ja conning-näytöstä oikealla (b) 15:09:52. Komentosillalla nämä kuvat päivittyvät jatkuvasti. Tutkanäytössä näkyy aluksen paikka (alempi nuoli) ja ennuste (prediktor) minuutin päähän (ylempi nuoli), jos sen hetkinen liiketila jatkuisi.

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 5a.

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



Kuva 4. BB-potkuri ja potkurikäyrästä, johon on lisätty pienimmän tehon likimääräinen suora. Potkuri on kuvattu Gdanskissa 3.12.2009.

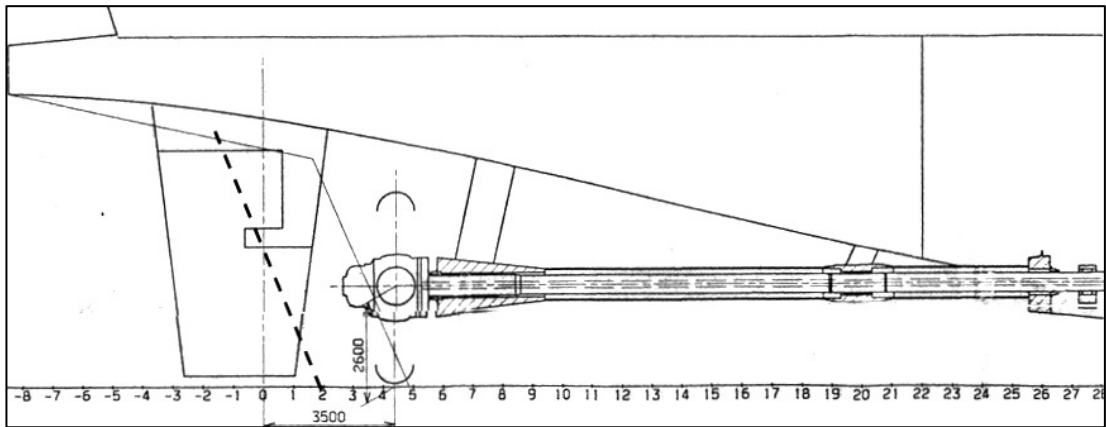
1.1.5 Peräsimet ja muut ohjailulaitteet

Aluksen oikeapuoleinen (SB) peräsinakseli katkesi, mutta myös vasemmanpuoleisessa (BB) peräsimessä oli vaurioita⁸. Tämän vuoksi peräsinlaitteistot kuvaillaan melko laajasti.

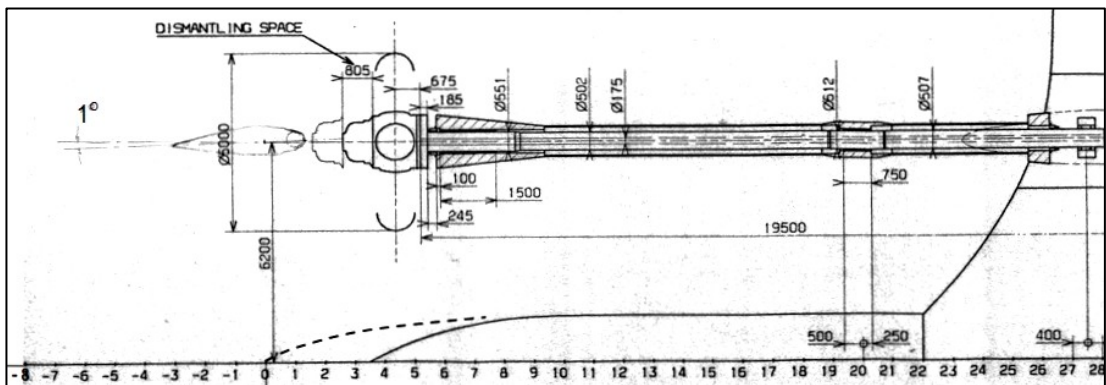
Peräsinjärjestely

Kuvat 5 esittelevät aluksen ohjailulaitteiden sijoituksen.

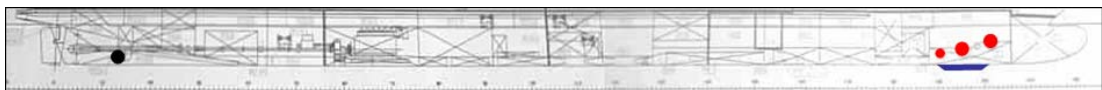
⁸ Jatkossa käytetään lyhennettä SB-peräsinakseli oikeanpuoleisesta peräsinakselista ja BB-peräsinakseli vasemmanpuoleisesta peräsinakselista.



Kuva 5a. SILJA EUROPA:n potkuri-peräsinjärjestely. Peräevää pidennettiin jo 1993 ke-sällä (katkoviiva). Arvioitu valokuvasta, joka on otettu 2.12.2009 Gdanskissa. (Myös kuva 6c).



Kuva 5b. SILJA EUROPA:n potkuri-peräsinjärjestely. Kaariväli on 800 mm.



Kuva 5c. Aluksen ohjailulaitteet: ohjailupotkureita on 3 keulassa (punaiset) ja yksi pe-rässä (musta), kaksi peräsintä, kaksi säätösiipipotkuria sekä pidennetty pe-räevä ja keulaevä (sininen).

Peräsimet ovat linjassa potkureiden takana käännettynä yhden asteen sisäänpäin, kuva 5b. Tutkinnassa on oletettu, että tämä asento vastaa peräsimen nolla-kulmaa. Peräsimi-en keskilinjan välinen etäisyys peräsinakselin kohdalla on 12,4 m.

Aluksen käyttöönoton jälkeen 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 telakointiin Vuosaaressa. Tuolloin lisättiin pallekölit, peräevää pidennettiin (kuvat 5), perään asennettiin ohjailupot-kuri, keulaan keulaevä ja ruoripumppujen tehoa suurennettiin. Peräevä ulottuu selvästi pidemmälle peräsimien väliin kuin muilla vastaavilla aluksilla, samoin SILJA EUROPA:n pituus/leveys-suhde on hieman pienempi.

Peräsimet⁹

Aluksessa on kaksi sarviperäsintä¹⁰, kuva 6. Peräsimen lavan pinta-ala on noin 20 m² ja paino¹¹ noin 21 tonnia. Peräsin on kiinnitetty yläosastaan teräksisen peräsinakselin kartiomaiseen alaosaan puristusliitoksella. Asennuksen aikana kartion uriin syötetään kovalla paineella öljyä, peräsin työnnetään suurella voimalla 4–5 mm kartion päälle ja akseli kiristetään paikoilleen alhaalta mutterilla, kuva 7a. Kartion yläpuolella on peräsimen ylälaakeri. Yläosastaan peräsinakseli on kiinnitetty hydraulisella kytkimellä ja puristusliitoksella peräsinkoneeseen. Peräsin on alempana kiinnitetty vastaavanlaisella puristusliitoksella ja mutterilla ala-akselin¹² kartiomaiseen alaosaan. Ala-akselin yläosa on laake-roitu peräsinsarveen. Tätä varten on peräsinsarveen tehty reikä, joka muodostaa alalaakerin pesän. Peräsinkoneen ohjaamana peräsinakseli kääntyy ja siten myös peräsin.

Peräsinsarvi on teräsvalukappale, joka jatkuu peräsimen yläpuolella virtaviivaisena aluksen runkoon yhtyvänä osittain levyrakenteisena ja ulottuu paikoin rungon sisälle (katso esimerkiksi kuva 6). Tämän rakenteen peräosa muodostaa ns. jääkynnen, joka suojaa peräsintä peruutettaessa jäissä. Peräsinsarven varsinainen sarviosa on mitoitettu niin, että se taipuu ja vääntyy peräsimen kohdistuvan peräsinvoiman vaikutuksesta vain muutamia millimetrejä. 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.

Molemmat laakerit ovat liukulaakereita, joissa laakerimateriaalina on pronssi. Vastinpin-tana on laakereiden kohdalla molemmissa akseleissa ruostumattomasta teräksestä teh-ty päällyste (holkki), joka on kiinnitetty puristusliitoksella. Laakerit on näytetty tarkemmin kuvissa 7a, 7b ja 7c.

Aluksen ja myös peräsimien jääluokka on 1A Super. Sen johdosta peräsimien levyjen paksuus on sama kuin rungossa tällä alueella. Peräsimet ovat molemmin puolin olleet aika ajoin etuosastaan osittain päällystettyinä 6 mm ruostumattomalla teräslevyllä tai kumituksella¹³, kuva 24c. Tarkoituksena on ollut suojata peräsimiä kavitaation¹⁴ aiheut-tamalta syöpymiseltä. Peräsimen molemmilla pinnoilla on virtausta ohjaavat rivat, kuvat 21 ja 24. Pienemmät ulkopinnalla olleet rivat, joita oli 4 kappaletta peräsinsarven keula-puolella, poistettiin vuoden 2000 telakoinnin yhteydessä.

Peräsimen etureunassa, sarven alapuolella oli telakointiin vuonna 2009 asti hydraulises-ti toimiva Jastram-rulla. Se voitiin kytkeä hitailla nopeuksilla pyörimään ohjailua tehos-tamaan. Sen hydraulikkaputket oli johdettu peräsinakselin läpi poratun reiän kautta.

⁹ Varustamolta saatiin peräsinlaitteiston piirustukset PDF-muodossa.

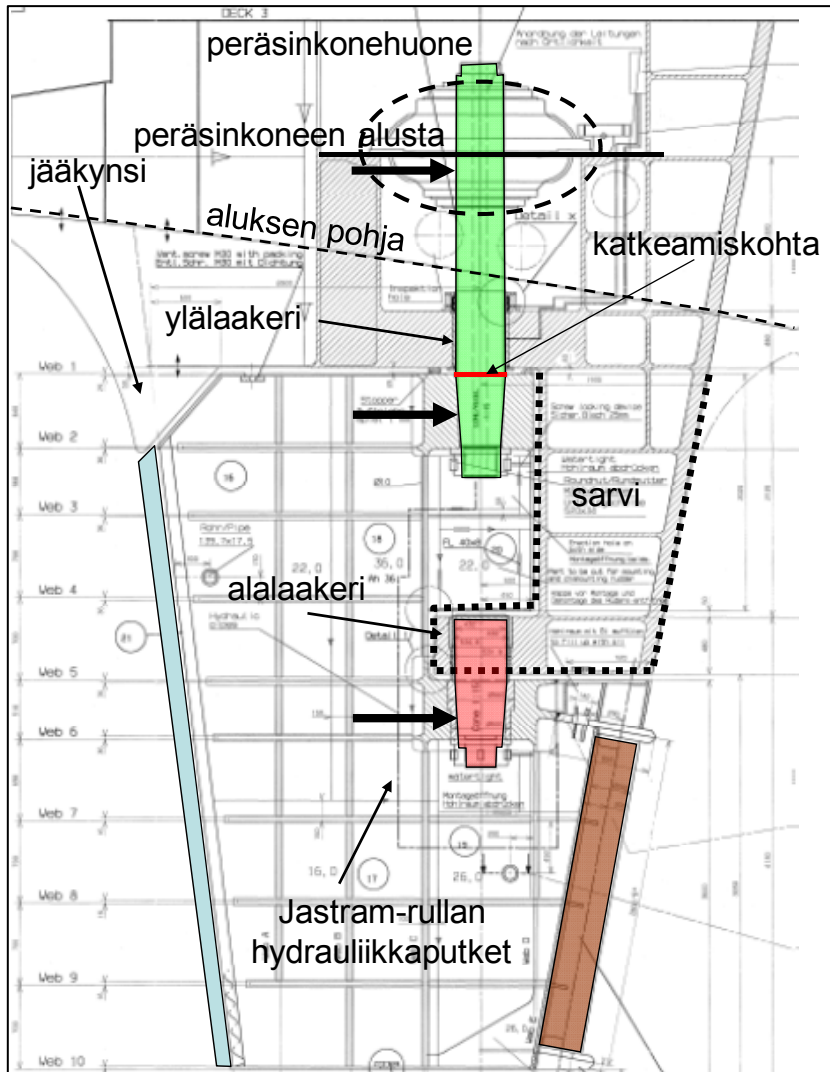
¹⁰ Sarviperäsimien laakerointitapoja on useita. Toinen yleinen peräsintyyppi on ns. lapioperäsin, jossa sarvea ei ole.

¹¹ 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.

¹² Raportissa käytetty nimitys. Muita käytössä olevia nimityksiä: pintleakseli, alatappi, ruoritappi.

¹³ Ruostumattoman teräksen tyyppi ei ole tiedossa.

¹⁴ Esimerkiksi potkurissa tai peräsimessä syntyy paikallisesti alipainetta, jolloin vesi höyrystyy. Höyrykuplat voivat joutuessaan korkeamman paineen alueelle puhjeta aiheuttaen paineiskuja, mikä saattaa aiheuttaa kohdalle sattuvan pinnan syöpymistä. Aihetta on käsitelty tarkemmin kohdassa 1.8.5



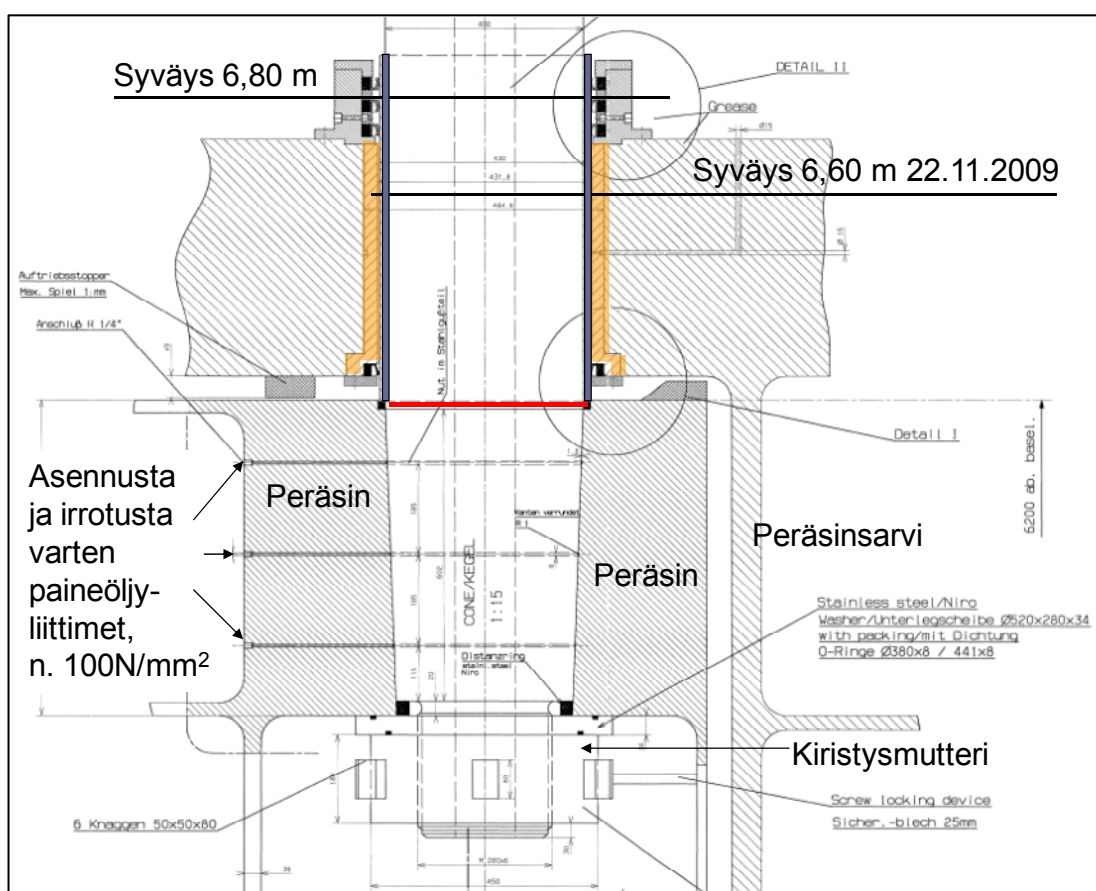
Kuva 6. Peräsin. Vihreällä on näytetty peräsinakseli, punaisella ala-akseli (pintaleakseli, alatappi), ruskealla Jastram-rulla ja sinisellä peräsimen jatko-osa, joka tehtiin jo ennen aluksen luovutusta. Paksut nuolet näyttävät puristusliitokset. Pisteviivalla on näytetty peräsinsarvi, joka liittyy kiinteästi aluksen runkoon virtaviivaisen välirakenteen kautta. Peräsinkone on ympäröity katkoviivalla. Vinoviivoituksella on näytetty valuosat.

Peräsintä 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.

Peräsimen laakerit

SILJA EUROPA:n peräsimessä on kaksi liukulaakeria: peräsinakselin rasvavoideltu laakeri (ylälaakeri), kuva 7a (tarkemmin kuvassa 39b) ja ala-akselin merivesi voideltu laakeri (alalaakeri) peräsinsarvessa, kuvat 7b ja 7c. Peräsimen toiminnan ja kestävyyskannalta on oleellista, että laakerivälkykset¹⁵ ovat alun perin oikeat ja että ne pysyvät käytön aikana sallituissa rajoissa.

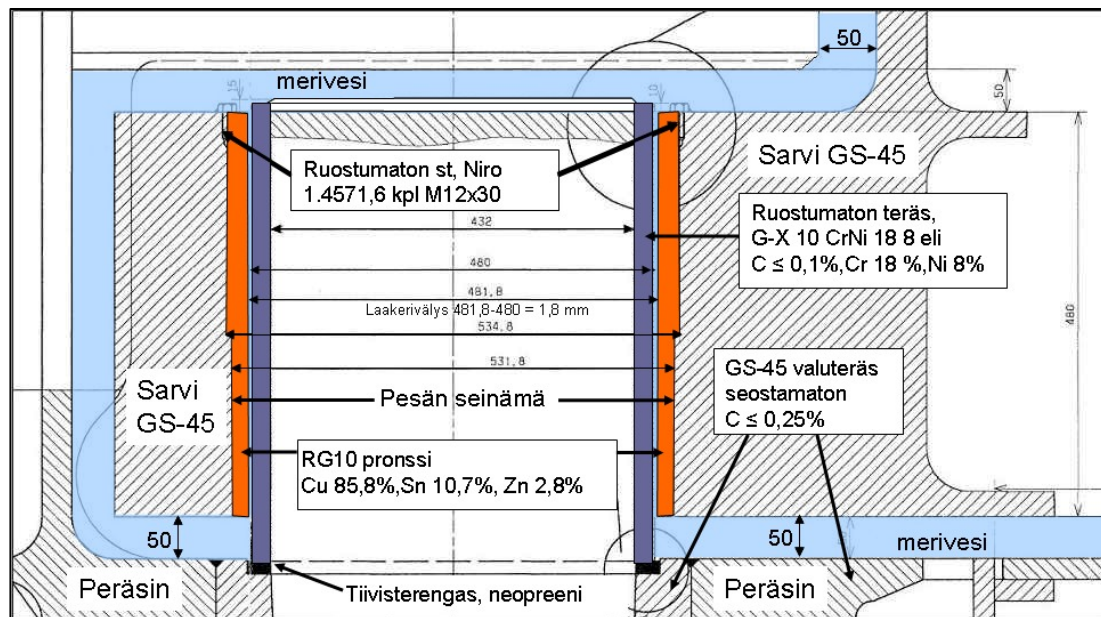
Ylälaakerin kuvaan on merkitty kiristysmutteri, paineöljyn liitännät, akselin katkeamiskohta ja syväyksiä. Materiaalit ovat samat kuin alalaakerissa, kuva 7b.



Kuva 7a. Peräsimen ylälaakerin piirustus, jossa näkyy peräsinakselin kartioliiotos peräsiimeen. Pronssiholkki on näytetty oranssilla, ruostumaton teräspäällyste siniharmaalla. Laakerivälys on 1,8 mm (431,8–430,0). SB-peräsinakselin katkeamiskohta on merkitty punaisella (siinä kartio muuttuu sylinteriksi). Viivoviivitus esittää valuosia.

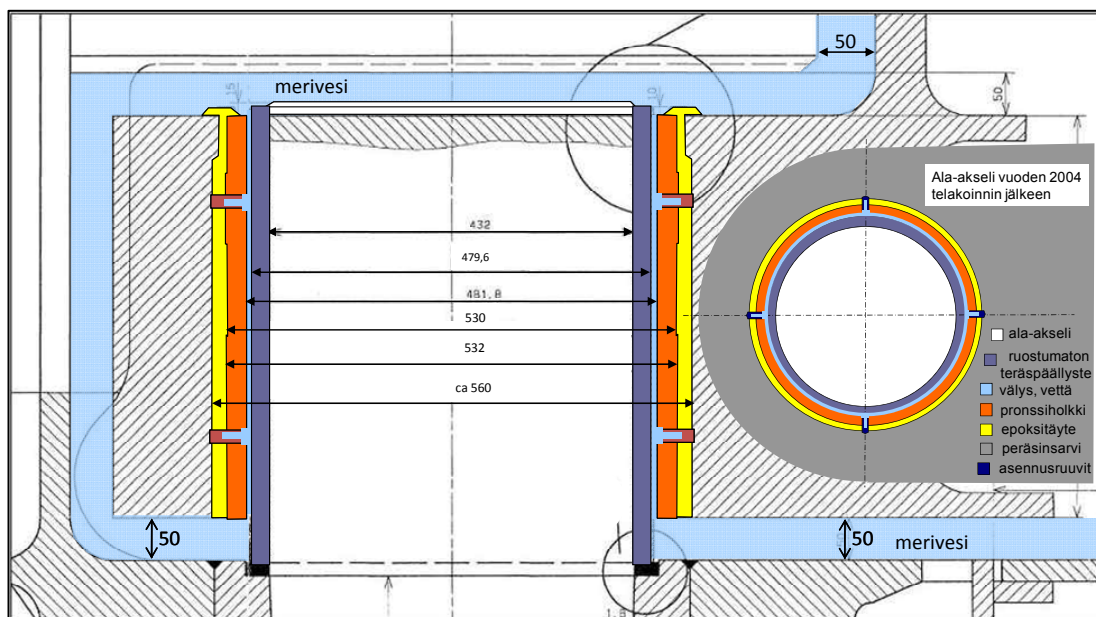
¹⁵ Laakerivälys on laakerin sisähalkaisijan ja akselin ulkohalkaisijan välinen erotus. Välyksen puolikas on akselin mahdollinen liikevara, olettaen, että akselin ja laakerin keskiöt yhtyvät ja mahdolliset kulumat ovat symmetriset. Akselin liikevara kasvaa välyksen kasvaessa ja kasvaa lisää, jos pronssiholkin ja pesän teräksen väliin syntyy tyhjä tila esim. syöpymisen johdosta.

*Alalaakerin akselin suoran osan halkaisija on 432 mm ja sen päällä olevan kutistusliitoksella asennetun ruostumattoman teräspäällysteen paksuus 24 mm, kuva 7b. 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 ko-
hoamista vastaan kuudella ruuvilla, jotka oli vielä hitsattu kiinni valuosaan. Pesän ja holkin korkeus on 480 mm. Holkin pronssi ja sarven valuteräs ovat kosketuksessa toisiinsa merivedessä ilman eristystä (galvaaninen pari).*



Kuva 7b. Alalaakerin alkuperäinen piirustus, johon on lisätty mm. materiaalitiedot. Pronssiholkki on näytetty oranssilla, ruostumaton teräspäällyste sinisellä. Laakerivälitys on 1,8 mm (481,8–480). On syytä huomata, että holkin pronssi ja sarven valuteräs ovat kosketuksessa toisiinsa merivedessä ilman eristystä (galvaaninen pari).

Vuoden 2004 telakoinnin yhteydessä pesän syöpymä korjattiin valuepoksitaytteellä samalla kun asennettiin uudet pronssiholkit, kuva 7c. Holkkien keskittämiseksi epoksin valun aikana käytettiin holkin läpi pesän seinämään saakka ulottuvia kuusiokoloruuveja, jotka jäivät paikoilleen valun jälkeen.



Kuva 7c. Vuonna 2004 korjauksessa tehty rakenne. Uuden holkin keskittämiseksi epoksivalun aikana käytettiin kuusiokoloruuveja, (yhteensä 8 kpl). Välykset palautuivat normaaleiksi. Kuusiokolot täyttyivät merivedellä.

On syytä huomata, että laakeripesän valuteräs on edelleen suoraan yhteydessä pronssiholkkiin ruuvien välityksellä merivesiympäristössä (galvaaninen pari). Tämä epoksin ja ruuvien muodostama rakenne oli rikkoontunut vuonna 2009.

Laakerivälykset

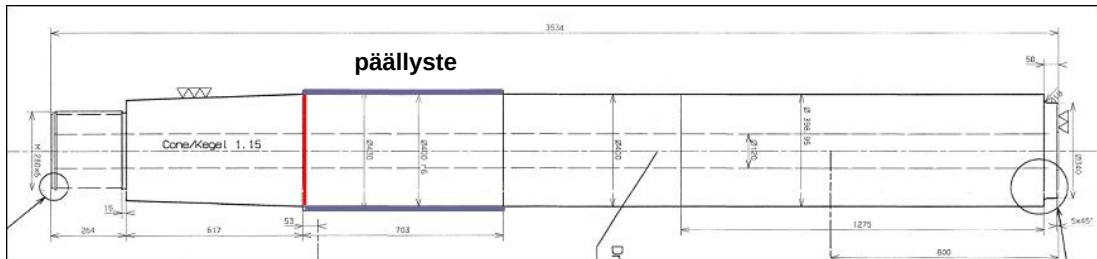
Laakerivälyksille on luokituslaitosten säännöissä asetettu alaraja, yläraja ja tarkkailuraja, jotka riippuvat peräsinakselin ja ala-akselin halkaisijoista. SILJA EUOPAn akseleille nämä rajat ovat noin 1,4 mm, 5 mm ja 4 mm. Alalaakeriin kohdistuvien vaihtelevien ja ajoittain suurten peräsinvoimien johdosta ja peräsimen kääntyillessä sen pronssiholkki kuluu ja välys kasvaa. Luokituslaitoksen sääntöjen perusteella välykset mitataan telakointien yhteydessä ja pronssiholkit uusitaan tarpeen vaatiessa. Käytännössä pronssiholkit uusitaan jos välys ylittää selvästi 2 mm.

Alalaakerin välyksen ollessa normaali, ala-akseli tukeutuu peräsinsarveen siirryttyään vain noin millin. Tällöin peräsinakselin taipuma rajoittuu sarven taipuman ja kiertymisen sekä välyksen puolikkaan sallimaan määrään. Näin ylälaakeriin kohdistuva poikkivoima ja peräsinakselin jännitys pysyvät suunnitelluissa rajoissa.

Normaaleilla välyksillä ja tavanomaisilla peräsinvoimilla peräsinakseli ei osu ylälaakerin pronssiholkkiin, minkä vuoksi ylälaakerin kuluminen on vähäistä.

Peräsinakselit

Peräsinakselin pituus on n. 3,5 m ja paino n. 3,1 t, kuva 8, 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 jääluokkaa¹⁶. Kutistusliitoksella asennetun akselin päällysteen paksuus on 15 mm. Jastram-rullan hydraulikkaa varten akselin keskelle on porattu halkaisijaltaan 120 mm reikä, jolla on vain vähäinen akselin lujuutta heikentävä vaikutus.



Kuva 8 Peräsinakseli. Ruostumattomasta teräksestä tehty päällyste on näytetty si-niharmaalla. Peräsinakselin läpi on porattu halkaisijaltaan 120 mm reikä Jastram-rullan hydraulikkaputkia varten. Punaisella on näytetty SB-peräsinakselin katkeamiskohta.

Jastram-rulla

Peräsimen alaosassa sen johtoreunassa oli Jastram – rulla (kuva 9), joka tehosti ohjailua pienillä nopeuksilla. Rullan ollessa käynnissä peräsinkulma voi olla 65 astetta. Sitä käytettiin pienillä, alle 7-8 solmun nopeuksilla. Sen korkeus oli 2,8 m, paksuus 340 mm, arvioitu paino noin 1,4 tonnia ja kierrosluku 800 1/min. Sitä käytti 45 kW tehoinen hydraulikkayksikkö. Rulla käynnistyi pienillä nopeuksilla, kun peräsinkulma ylitti 10 astetta. Sen jälkeen sen kierrosluku kasvoi tasaisesti, kunnes peräsinkulma oli 25 astetta, jolloin se pyöri täysillä. Näin saatiin myös pienillä nopeuksilla peräsin toimimaan tehokkaasti, sillä rulla esti virtauksen irtoamisen suurilla peräsinkulmilla. Ilman rullaa peräsin alkaa menettää tehokkuuttaan yli 25–30 asteen kulmilla. SB-puolen rulla oli noin vuoden ollut poissa käytöstä mekaanisen vian ja vuodon johdosta. Rullat poistettiin onnettomuuden jälkeisen korjauksen yhteydessä.

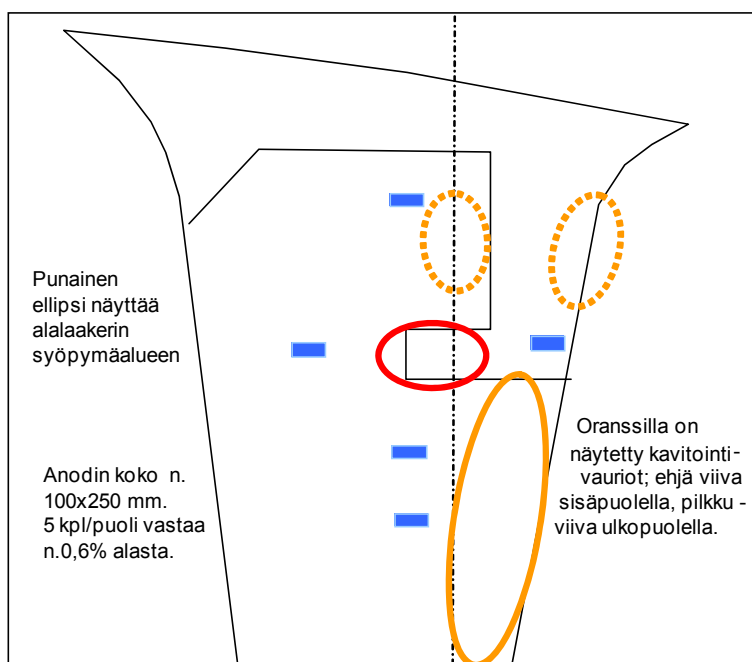


Kuva 9 Jastram-rulla kuvattuna irrotetussa SB-peräsimessä 4.12.2009. Vasemmal-la näkyvät vuonna 2004 asennetut rullan alaosan tuet, "sukset".

¹⁶ Aluksen nopeus on yli 20 solmua. Tällöin vain nopeus määrittää akselin mitoituksen. Murtolujuus 470 N/mm², myötölujuus 270 N/mm² peräsimen luokituspiirustuksen mukaan.

1.1.6 Korroosiosuojaus

Aluksella on aktiivinen ja passiivinen korroosiosuojaus¹⁷ maalauksen lisäksi. Peräsimen paikallisina passiivisina suojauksina toimivien sinkkianodien (5-7 kpl per peräsimen puoli, määrä on vaihdellut, samoin anodien paikat) sijainti korjauksen vuonna 2009 jälkeen on näytetty kuvassa 10 (katso myös kuva 50, kohta 1.8.5). Kuvaan on lisätty jo ensimmäisenä kesänä havaitut peräsimen syöpymisen ongelmakohdat. Myös ohjauspotkurien aukkojen ympärillä on sinkkianodit.



Kuva 10. Peräsimen sinkkianodien sijainti telakoinnin 2009 jälkeen, molemmin puolin peräsintä sekä peräsimen syöpymis- ja kavitointialueet.

Aktiivinen, runkoa suojaava järjestelmä on SAVCOR Consulting Oy:n toimittama ja ylläpitämä. Sen kaavio on liitteessä 3. Suojaus ei kuitenkaan aina ollut toiminut suunnitelmien mukaisesti. Esimerkiksi vuonna 1997 havaittiin, että aluksen keulaosassa anodit eivät olleet toimineet ja seurauksena oli voimakasta korroosiota laidoituksessa molemmien puolin vesirajasta alaspäin. Tämän vuoksi 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 johdosta¹⁸. Peräsin oli maadoitettu¹⁹ aluksen runkoon.

¹⁷ Kahden eri metallin sijaitessa lähellä toisiaan, syntyy (tässä tapauksessa) merivedessä sähkövirta (galvaaninen pari, ts. paristo), jolloin epäjalompi metalli syöpyy. Passiivisessa suojauksessa asennetaan ongelmakohdan lähelle metallinen anodi, joka on riittävän epäjalo, jolloin se syöpyy. Aktiivisessa suojauksessa synnytetään vastakkainen sähkövirta, jolloin syöpmistä ei tapahdu. Maalauksella pyritään katkaisemaan virran kulku. Tarkemmin kohdassa 1.8.3 ja liitteessä 3.

¹⁸ Keskustelut järjestelmän valmistajan kanssa Mikkelissä 28.4.2010.

¹⁹ Näin aktiivinen korroosiosuojaus saadaan ulottumaan myös peräsimien pinnoille.

1.1.7 Matkustajat ja lasti

Aluksessa oli onnettomuushetkellä 1373 matkustajaa ja RoRo -lastia 1133,1 tonnia. Lasti sisälsi vaaralliseksi luokiteltuja aineita (IMDG-koodi, International Maritime Dangerous Goods Code) seuraavasti: class 8, UN 1855 PG III 3690 kg ja class 3, UN 1266 PG II 229 kg. Polttoöljyä oli 426,8 tonnia.

Matkaa varten oli tehty vakavuuslaskelmat. IMO:n vakavuuskriteerit täyttyivät selvällä marginaalilla.

1.1.8 Todistukset ja asiakirjat

Aluksen luokka on Bureau Veritas I 3/3 E + Passenger Ferry, joka vastaa nykyisin (vuoden 2000) jälkeen merkintää I + Ro-Ro Passenger Ship. Jääluokka on suomalainen 1A Super. Aluksen runko ja koneisto ovat ns. jatkuvassa luokituksessa, ts. tietyn kohteen tarkastusväli ei saa ylittää 5 vuotta. Kuivatelakointi on tehtävä vähintään kaksi kertaa 5 vuoden aikana siten, että telakointiväli ei ylitä 3 vuotta (+3kk). Matkustajalaivojen pohja on tarkistettava vähintään vuosittain; myös sukeltajan tekemä tarkastus hyväksytään. Pohjan tarkastukseen sisältyy myös peräsin.

Liikenteen turvallisuusvirasto Trafín (entinen Suomen Merenkululaitos) ja Bureau Veritasin (BV) välillä on voimassa sopimus²⁰, jonka perusteella BV hoitaa lippuvaltion hallinnolle kuuluvat tarkastukset.

Viimeisin luokituslaitoksen suorittama tarkastus oli tehty 24.9.2009, merenkulun tarkastajan tarkastus 26.5.2009, varusteturvallisuustarkastus 21.4.2009, viimeisin telakointi oli ollut 20–26.1.2007. Seuraava telakointi oli suunniteltu syksyksi 2009, mutta Tallink Silja Oy oli 14.10.2009 hakenut telakoinnin siirtoa Suomen merenkululaitokselta. Merenkululaitos oli 16.10.2009 antanut uudeksi takarajaksi 8.3.2010 edellyttäen (telakointiväliksi olisi tullut 3v ja 1½kk), että Bureau Veritasin omistajalle 14.10.2009 toimittaman kirjeen vaatimukset täytetään. Luokituslaitoksen vaatimat tarkastukset tuli tehdä 26.1.2010 mennessä.

IOPP-todistus (International Oil Pollution Prevention) on voimassa 4.3.2013 saakka. Matkustaja-alusten turvallisuuskirjan päiväys on 24.4.2009, radiokirja 21.4.2009, kansainvälinen lastiviivatodistus 8.12.2008. Magneettikompassin eksymätaulukko on päivätty 19.10.2009. ISM-todistus on annettu 2.9.2009. Pelastuslauttojen vuositarkastukset oli tehty. Aluksella oli vapautuskirjoja koskien mm eräitä satamakohtaisia vaatimuksia ja lyhyitä kansainvälisiä matkoja. Aluksen GMDSS-merialue on katsastustodistuksen mukaan A1-A2.

²⁰ Sopimus 497/315/2007, päiväys 8.1.2007.

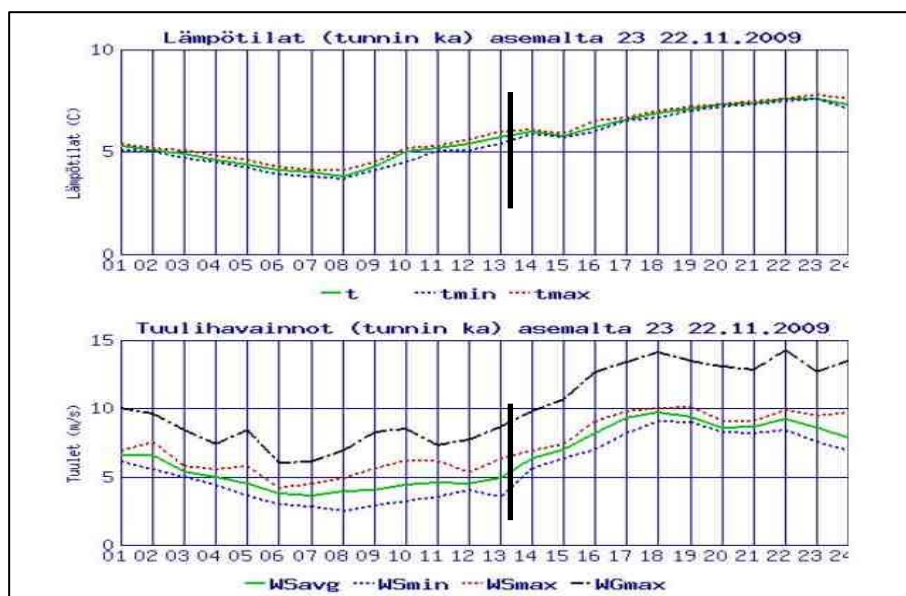
1.2 Onnettomuustapahtuma

1.2.1 Sääolosuhteet²¹

Sää tietoja saatiin neljältä havaintoasemalta, lueteltuna idästä länteen: Fagerholm, Turku, Rajakari ja Kumlinge. Kumlinge on lähinnä onnettomuuspaikkaa ja siitä on sen vuoksi esitetty eniten tietoja. Se sijaitsee noin 25 km koilliseen onnettomuusalueelta. Tuulen suuntatiedot on näytetty kaikilta asemilta. Rajakarin tiedot on esitetty myös, jotta hinaustoiminnan aikaiset sääolot olisivat näkyvissä.

Onnettomuuden aikaiset sää tiedot muutamilla alueen havaintoasemilla ovat kuvissa 11a-11d. Suomen aika saadaan lisäämällä aikoihin 2 tuntia kuvissa 11a, 11b ja 11d. Onnettomuuden aikoihin noin klo 15:40 keskituuli oli voimistumassa noin 10 m/s. Lämpötila oli 6-8 astetta.

Sää tilalla ei tutkijoiden mielestä ollut osuutta peräsinvaurion syntyyn.

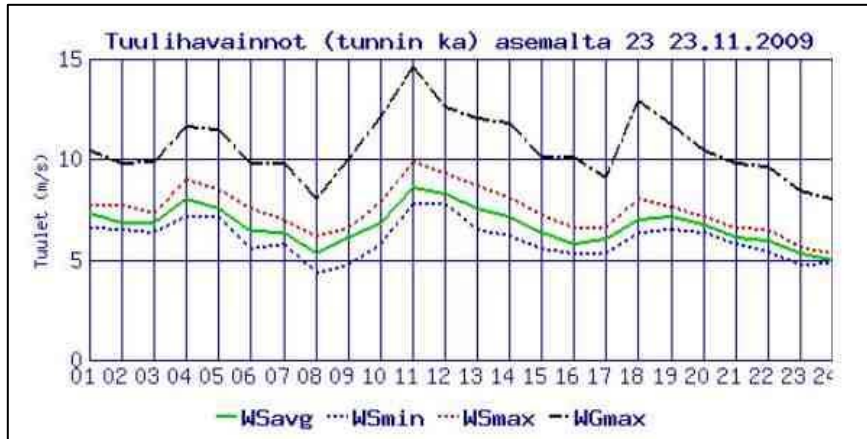


Kuva 11a. Tuulen nopeus ja ilman lämpötila 22.11.2009 Kumlingessa. Suomen aika saadaan lisäämällä aikaan 2 h, tämä ja seuraavat kuvat b ja d.

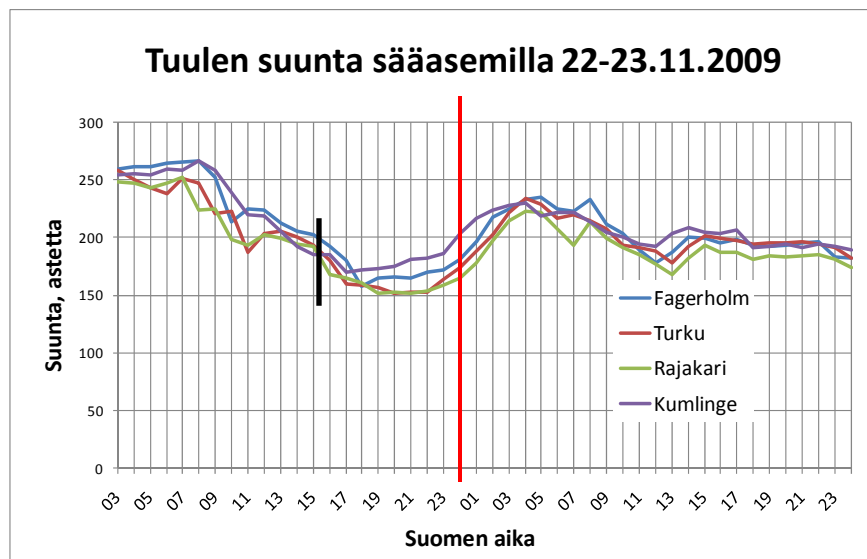
Hinaaja UKKO saapui paikalle 23.11 klo 5 UTC (klo 7) ja alus ankkuroi Airistolle klo 11:22 UTC (klo 13:22). Keskituuli oli aluksi 6–7 m/s, lämpötila 7–8 astetta. Loppumatkan aikana Turkuun tuuli hieman voimistui (kuva 11e), mutta alusta hinattiin jo suojaaisella väylällä.

Sadealue liikkui Itämeren yli siten, että sade alkoi Maarianhaminassa noin 14 UTC (klo 16, ja loppui klo 23 maissa) ja Turussa 17 UTC (klo 19, ja loppui klo 03 maissa). Näkyvyys oli ensin hyvä (yli 10 km, näkyvytydet perustuvat sääkartoista katsottuihin). Sateen yhteydessä näkyvytydet ovat olleet 3–10km välillä. Sateen jälkeen on ollut vielä utua, näkyvytyys 5 km tienoilla. 23.11 päivän aamuna klo 8 eteenpäin oli taas enimmäkseen hyvä näkyvytyys.

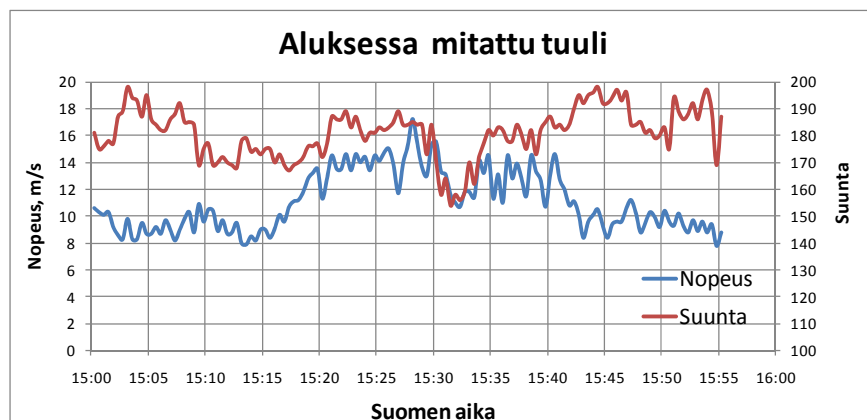
²¹ Tiedot ilmatieteen laitokselta 3.6.2010.



Kuva 11b. Tuulen nopeus Kumlingessa 23.11.2009.

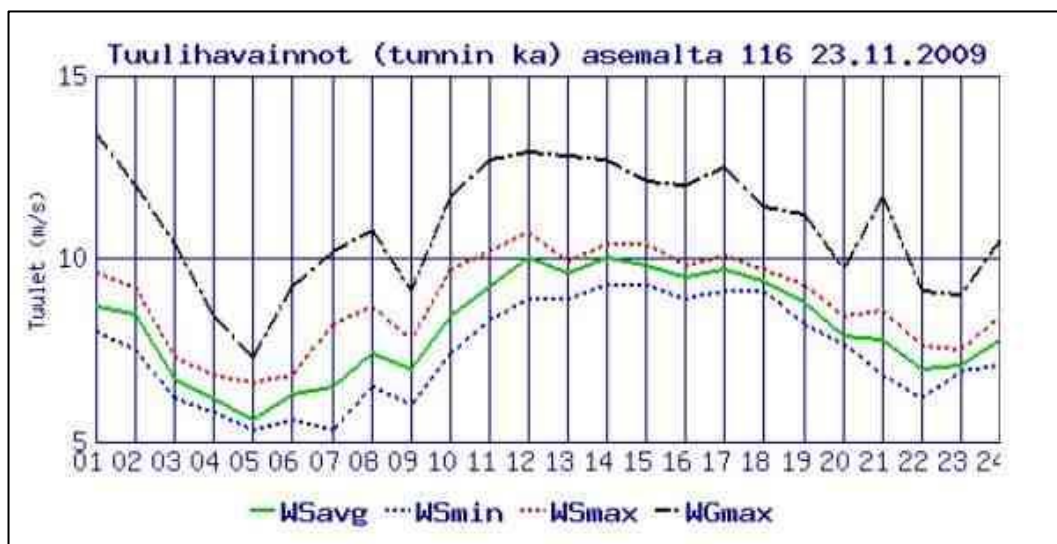


kuva 11c. Tuulen suuntatiedot 22–23.11.2009. Onnettomuusajankohdan tuulitiedot vastaavat aluksella mitattuja arvoja, alla.



Kuva 11d. Aluksessa mitattu tuuli onnettomuuden aikoihin.

Aurinko nousi tällä alueella noin klo 8:55 ja aamuhämärä alkoi noin 7:10. Aurinko laski noin klo 15:55. Pimeys alkoi noin klo 17:45. Kumlingen asema sijaitsee noin 25 km koilliseen onnettomuus-paikasta. Rajakaran asema sijaitsee Airistolla.



Kuva 11e. Tuulen nopeus Rajakarissa 23.11.2009.

1.2.2 Onnettomuusmatka ja sen valmistelu

Matkalle 22.11.2009 oli lähdetty aikataulun mukaan Tukholmasta. Pari päivää aiemmin ohjailussa oli havaittu poikkeamia, minkä johdosta päällikkö otti yhteyttä automaattiohjauksen valmistajan Suomen edustajaan, joka lupasi miettiä asiaa. Aluksella arvioitiin voimakkaalla tuulella olleen osuutta siihen, että alus otti käännökset ajoittain liian loivasti tai liian jyrkästi. Tämän jälkeen kaikki 12 lähtöä/tuloa menivät normaalisti.

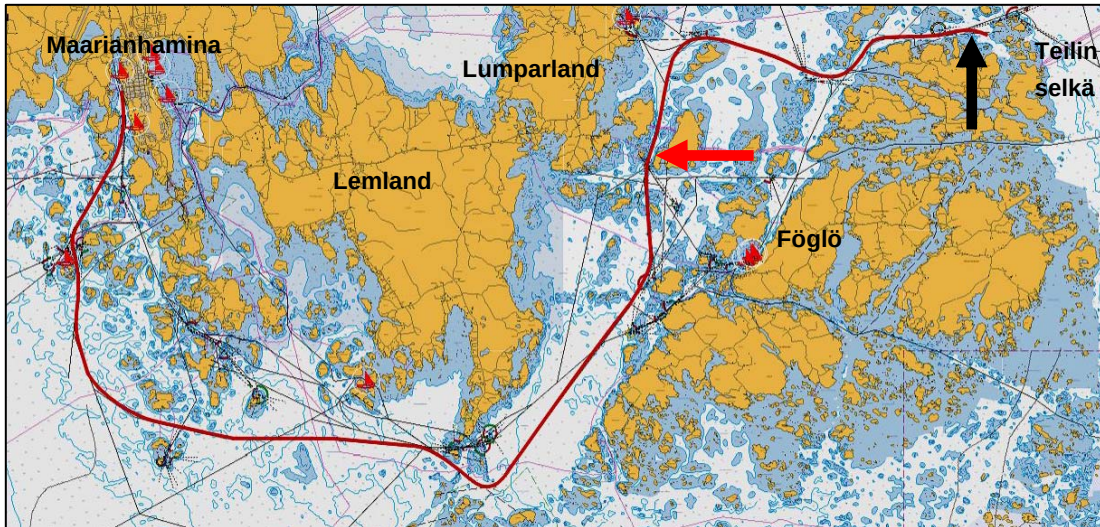
Lauantai-aamuna Granholmin käänнос²² ei sujunut normaalisti. Puuskaisen tuulen, 18 m/s, ajateltiin olevan syynä. Sunnuntaina 22.11.2009 havaittiin noin kaksi tuntia Maarianhaminasta lähdön jälkeen automaattiohjauksessa laivan jälleen käyttäytyvän epätavallisesti. Jyrkkä käänнос oikeaan ja sitä seurannut S-mutka jäivät loiviksi. Noin klo 15.40 huomattiin, että alus ei käänny tai kääntyy huonosti vasemmalle. Siirryttiin hätäohjaukseen, päällikkö kutsuttiin komentosillalle ja hän pysäytti aluksen väylän levennykseen.

1.2.3 Tapahtumapaikka

Alla olevat karttapiirrokset (kuvat 12a-12b) esittävät onnettomuusalueen peräsinvaurion syntymisen aikana. Punaisen nuolen kohdalla oletetaan SB-akselin katkenneen, mustan nuolen osoittamassa kohdassa alus pysäytettiin ja ohjattiin sivuun väylältä, ”taskuun”.

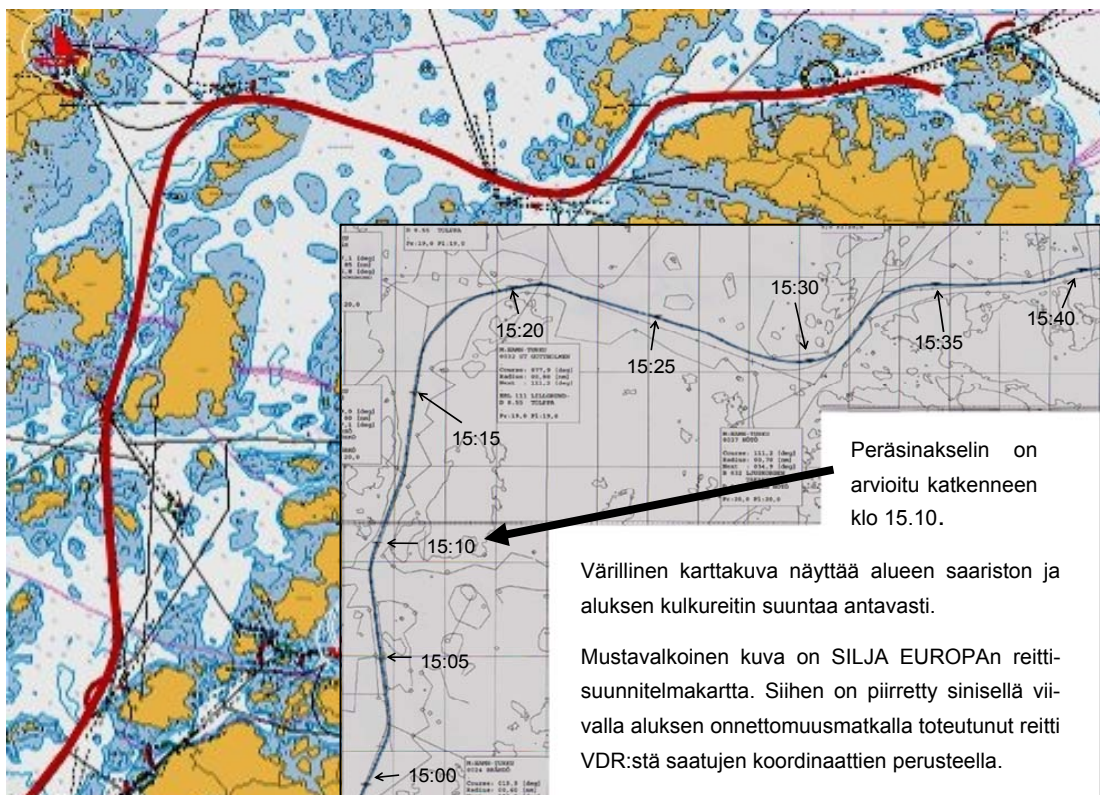
Väylä Maarianhaminasta Teilin selälle sisältää useita mutkia sekä ahtaita ja matalia osuuksia.

²² Lähellä Maarianhaminaa.



Kuva 12a. Onnettomuusalue. SB-akselin oletetaan katkenneen punaisen nuolen osoittamassa kohdassa. Alus pysäytettiin mustan nuolen kohdalla. (kartta © Liikennevirasto, esitetty Uusiloisto-ohjelmalla)

Alla olevan tapahtumakuvauksen yhteyteen on vastaaviin kohtiin liitetty aluksessa käytetyt reittiohjeet ja kuvakaappauksia näyttöiltä.



Kuva 12b. Aluksen reitti klo 15:00–15:40. Tarkemmin seuraavissa kuvissa. (kartta © Liikennevirasto, esitetty Uusiloisto-ohjelmalla)

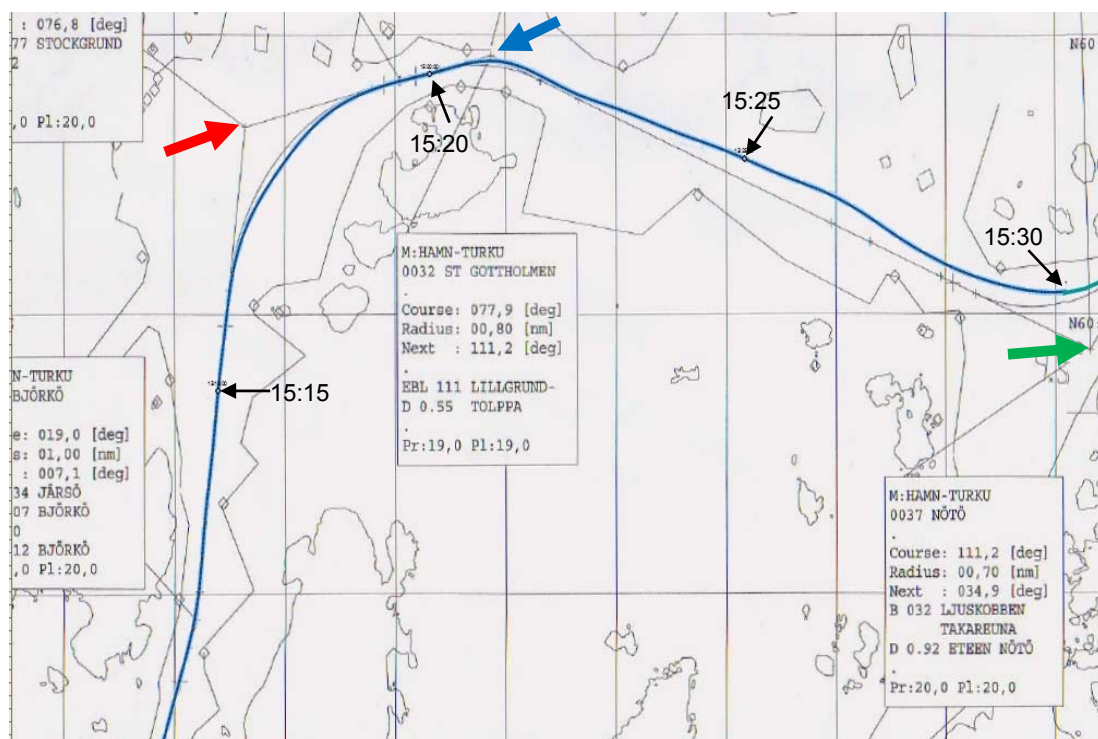
Kuvat 12c–12f ja 13–18 täydentävät alla olevaa tapahtumien kulun esitystä.

1.2.4 Tapahtuma²³

Alus oli lähtenyt 22.11.2009 Maarianhaminasta aikataulun mukaan, eikä ohjailussa ollut tuolloin havaittu poikkeavaa²⁴. Päällikkö ohjasi aluksen merelle, minkä jälkeen perämies vastasi ohjailusta. Aluksi oli käsiohjaus käytössä, koska Viking Linen aluksia tuli vastaan. Sen jälkeen perämies kytki päälle automaattiohjauksen, jolloin ensin automaattisesti tuli käyttöön Heading Mode. Perämies siirtyi käyttämään Course Modea.

Kuvissa 12c ja 12f on näytetty aluksen reitti sinisellä päällystön kertomusta vastaavalta ajalta piirrettynä alukselta saadun reittisuunnitelmakartan päälle VDR-tietojen pohjalta.

Analyysissä päätelty (kohta 2.7.1) peräsinakselin katkeamishetki on noin klo 15.10 Staholmin käännöksen stöttäusvaiheessa. Taulukossa 1 on yhteenveto komentosillalla käydystä keskusteluista klo 15.04–15.44 välisenä aikana.



Kuva 12c. Aluksen reitti (sininen käyrä) noin klo 15:10–15:30. Paksuilla värillisillä nuolilla on osoitettu reittisuunnitelmassa olevat käännökset: Stockgrund (punainen); Gottholmen (sininen) ja Nötö (vihreä).

Stockgrundin käännös alkoi klo 15:15:40 (007→077, **punainen nuoli**). Noin klo 15:16 havaittiin, että käännös oikeaan ei mennyt normaalisti, se meni "sisään". Ihmeteltiin sitä, että käännöksen aikana automaattiohjaus käytti vastaruoria. Käännös jatkui edelleen oi-

²³ Keskustelut päällystön kanssa ja VDR-tiedot mukaan lukien komentosiltakeskustelujen nauhoituksen kuuntelu. Nauhoituksen laatu on paikoitellen niin heikko, ettei puheesta saa kaikilta osin selvää.

²⁴ Eräs matkustaja raportoi onnettomuudesta kuultuaan tutkintalautakunnalle jo 23.11, että hän oli matkallaan 20–21.11 havainnut aluksen ohjauksen olevan epänormaali, koska joidenkin käännösten aloituksessa tuntui aluksen perässä selvästi havaittava nykäys sivulle. Joka kerta oli kyseessä käännös vasemmalle; käännös ei alkanut jouhevasti, vaan selvästi voimakkaalla nykäisyllä. Yksi tutkintalautakunnan jäsenistä oli ollut aluksella 19–20.11, mutta ei ollut havainnut tällaista.

keaan (*Gottholmen*, 078→111 **sininen nuoli**, alkoi 15:20:09) noin klo 15:20. Nopeutta pudotettiin (20 solmua → alle 18,5 solmua). Edelleen autopilotti käytti suuria peräsinkulmia; laiva kääntyi oikealle, vaikka peräsin oli käännettynä 28 astetta vasemmalle. Kuvassa 12d on kuvakaappausotteita klo 15:21:07–15:22:22 conning- ja tutkanäytöistä. Peräsinkulmat pysyivät poikkeavan suurina koko tuon ajan, 20–30 astetta. Suuret peräsinkulmat pantiin merkille, mutta niiden pitkää ajallista kestoa ei noteerattu. Epäiltiin, että laitteisto ei laske sortokulmia oikein tai syy olisi tuulessa.

Aluksen päällikön mukaan ohjattaessa tarkkaillaan tutkaa ja siinä olevaa liiketilaennustetta, prediktoria (katso esim. alla oleva tutkanäytön osa, jossa oikean puoleinen aluksen ääriviivakuva näyttää, missä alus olisi minuutin kuluttua senhetkisten liiketilasuureiden pysyessä muuttumattomina) ja suuntavektoria. Lisäksi katsotaan ulos. Peräsinkulmia ei katsota jatkuvasti vaan hetkittäin.



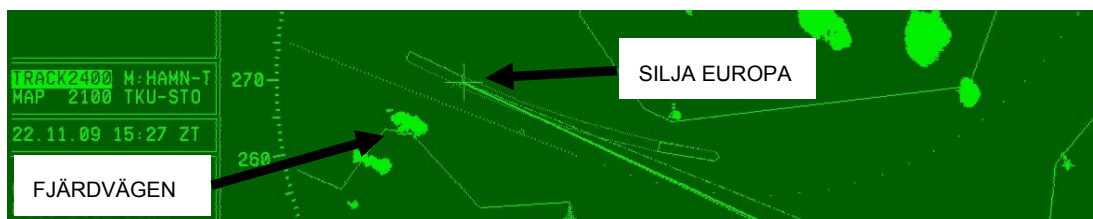
Kuva 12d. *Gottholmenin* käännöksen stötteyksessä käytettyjä suuria peräsinkulmia conning näytöllä (vasemmalla) ja vastaavia tutkanäytön kuvia (oikealla). Peräsinkulmat conning-näytössä on tässä tapauksessa näytetty punaisella, koska peräsimet on käännetty vasemmalle: vasemmalla BB- ja oikealla SB-peräsinkulma. Sekä ennen (-25s) että jälkeen (+25s) tämän kuvasarjan peräsinkulmat olivat conning-näytön mukaan keskiasennossa. Tutkakuvissa prediktorin näyttämä paikka minuutin kuluttua on merkitty valkoisella nuolella ja aluksen sen hetkinen paikka punaisella nuolella. Valkoisen nuolen lähellä oleva vihreä tutkakaiku on M/S FJÄRDVÄGEN.

Gottholmenin jälkeen (**sininen nuoli**) SILJA EUROPA alkoi ohittaa vasemmalta puolelta Långnäsistä lähtenyt M/S FJÄRDVÄGENiä²⁵ yli 100 m marginaalilla (kuva 12e). Ohitus tapahtui klo 15:25–15:29 noin 19 solmun nopeudella. Ohitus vaati siirtymisen väylän vasempaan reunaan ja ohituksen jälkeen takaisin. Ohitus aloitettiin automaattiohjauksella.

²⁵ Suurin pituus 109,5 m, leveys 20,43 m, suurin syväys 4,9 m ja nopeus 17,5 solmua.

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

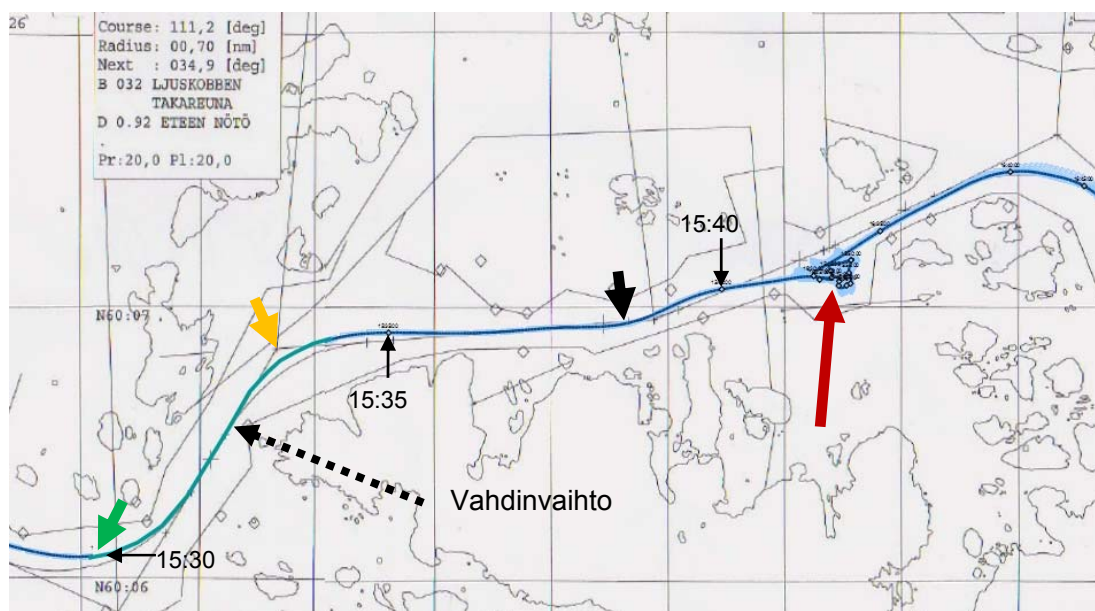
la. Kun ohituksen jälkeen tehtiin suunnanmuutos oikealle takaisin väyläviivalle, tarvittiin tavallista suurempia peräsinkulmia käännöksen lopettamiseksi. Tässä vaiheessa vaihdettiin käsiohjaukselle noin klo 15:27:00 ja aloitettiin seuraava käännös.



Kuva 12e. Osakuva kuvakaappauksesta tutkakuvasta FJÄRDVÄGENin ohituksen aikana noin klo 15:27.

Nötön käännös vasempaan alkoi klo 15:27:00 (111→034, **vihreä nuoli**). Tässä vaiheessa vaihdettiin käsiohjaukseen. Ruori käännettiin vasempaan hetkellisesti 30 asteen kulmaan käännöksen aloittamiseksi. Käännös sujui hyvin vaikkakin jouduttiin käyttämään noin 20 asteen peräsinkulmaa lähes koko käännöksen ajan. Linjaluotsien vahdinvaihto oli tulossa, ja uudelle linjaluotsille kerrottiin havaituista ongelmista tämän ihmeteltyä käsiohjauksen käyttöä. Aluksen ohjailukäyttäytyminen synnytti keskustelua ja tuotiin esille ajatus, että alus ohjaa huonosti. Käännös vasempaan meni normaalia pienemmällä kääntösäteellä (normaali 0,7 merimailia, nyt 0,5–0,6).

Vahdinvaihtoa ei voitu tehdä kesken käsiohjauksen. Noin klo 15:32:00 autopilotti laitettiin päälle (Course Mode) ja linjaluotsien vahdinvaihto saatettiin tehdä. Tämän S-käännöksen suoran osuuden kesto oli noin minuutti.

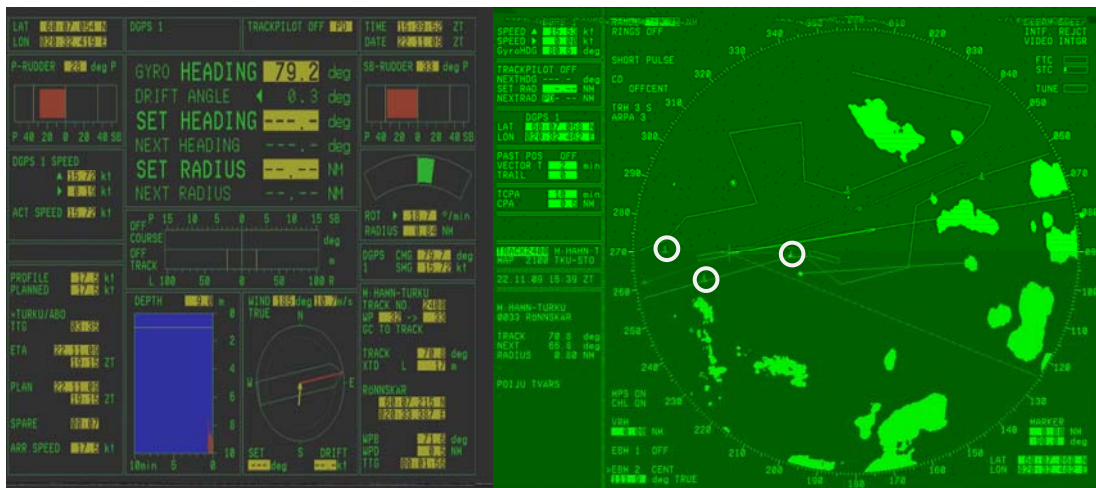


Kuva 12f. Aluksen reitti (sininen viiva) klo noin 15:30–16:45. Paksuilla värillisillä nuolilla on osoitettu reittisuunnitelmassa olevat käännökset: Nötö (vihreä), Skarpskär (oranssi) ja Getskär/Måssör (musta). Punaruskealla nuolella on osoitettu aluksen pysäytyspaikka.

Skarpskärin käännös oikealle alkoi klo 15:32:20 (034→086, **oranssi nuoli**). Aluksen nopeutta hiljennettiin. Kääntyminen alkoi nopeasti, ja uusi linjaluotsi otti käsiohjauksen käyttöön klo 15:33:20. Käännöstä jarrutettiin ottamalla ruoria 10 astetta vasemmalle. Uudelle linjaluotsille kerrottiin, että aluksen ohjaus oli toiminut moitteettomasti Stockgrundin käännökseen saakka. Pysäyttäessään käännöstä uusi linjaluotsi totesi, että alus ei stötaa (kääntymisen pysäyttäminen vastaruorilla) laisinkaan. Siirryttiin autopilotin käyttöön Heading Modella klo 15:36:32. Alus pysyi 1–2 minuuttia suunnassa ruorien ollessa vasemmalle.

Getskär/Måssör käännös vasemmalle alkoi klo 15:37:40 (086→071, **musta**). Käännös meni kurssille 068. Uusi linjaluotsi sanoi, että hänen mielestään ruorikulman osoitin näytti liian suuria kulmia. Kun kurssi käännettiin suuntaan 072, autopilotti otti oikealle ja alus alkoi kääntyä oikealle. Autopilotti yritti oikaista käännöstä ja otti 20–30 astetta vasemmalle, mutta käännös oikealle jatkui. Käsiohjaus kytkettiin klo 15:39:52 ja ruorilla otettiin kaikki vasemmalle, mutta mitään ei tapahtunut. Myös NFU-ohjausta²⁶ kokeiltiin, mutta ilman toivottua tulosta. Linjaluotsi päätti tällöin ajaa pääkoneita ristiin käännöksen pysäyttämiseksi klo 15:40:07. Ruoripumput pysäytettiin, ja hätäohjaus kytkettiin päälle paineakuista. Samalla ilmoitettiin tilanne päällikölle klo 15:40:45. *Käännös oikealle jatkui Långholmskobbenin ja Rönnskärin väliseen ”taskuun” (punaruskea nuoli)*, vaikka koneita ajettiin uudelleen ristiin. Molemmilla koneilla otettiin täysi taakse klo 15:40:28.

Kuvassa 13 on näytetty tilanne conning- ja tutkanäytöillä juuri ennen potkurin ohjausvi-
puihin tarttumista. Kuvaan 14 on koottu tärkeimmät tiedot onnettomuuden ajankohdalta. Kuvassa 15 on aluksen pysäytykseen liittyvät toimenpiteet ja pysäytyksen kulku.



Kuva 13. Tilanne komentosillan näytöillä klo 15:39:52, juuri ennen potkurien säätövi-
puihin tarttumista. Valkoiset ympyrät osoittavat alusta lähinnä olevat väylän
reunapoijujen paikat.

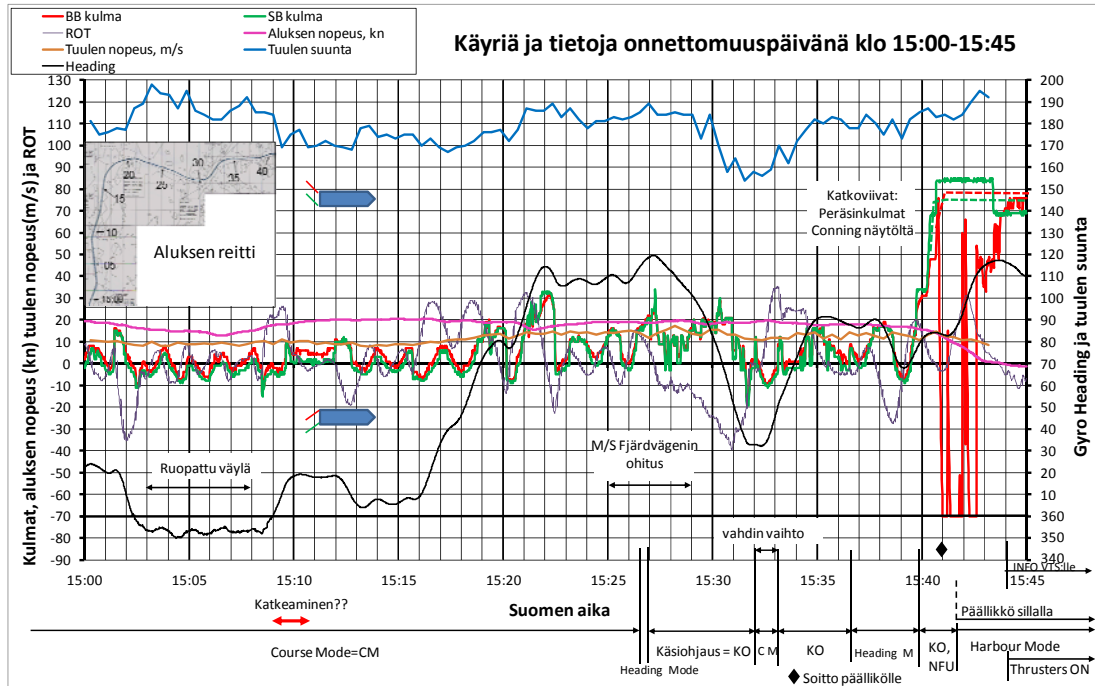
²⁶ Non Follow Up ohjaustapa, jossa peräsin kääntyy niin kauan kuin ohjausvipua pidetään oikealle tai vasemmalle.

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

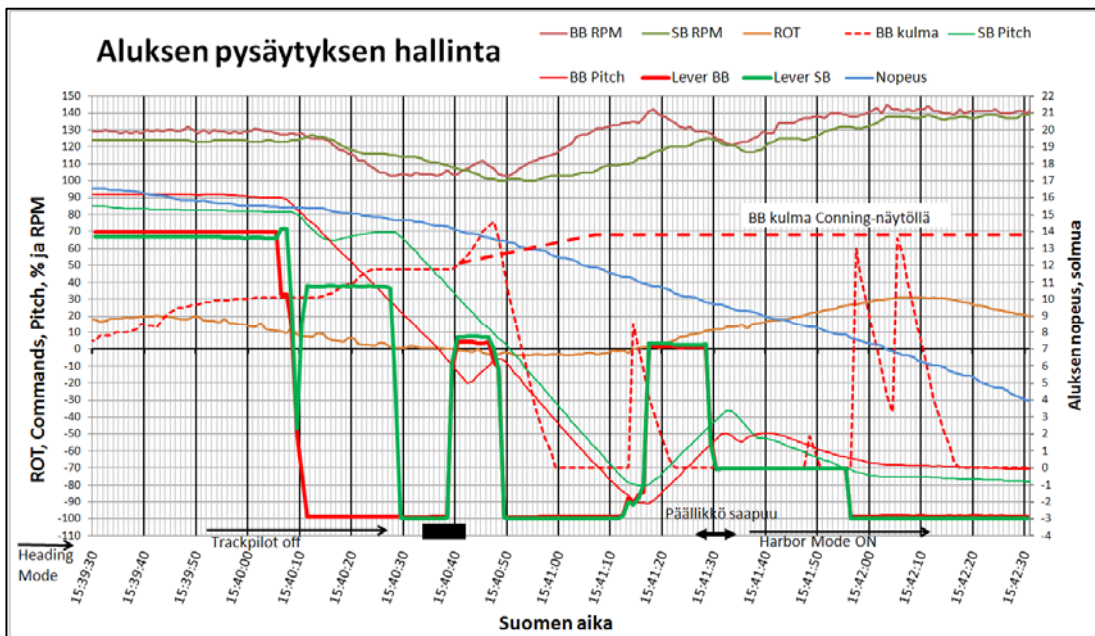
Taulukko 1. Tapahtumien ajankohtia ja yhteenveto komentosillan keskusteluista.

Kellonaika	Tapahtuma
15:03:57	M/S FJÄRDVÄGEN keskustelee Archipelago VTS:n kanssa
15:05:57	M/S FINNFELLOW keskustelee Archipelago VTS:n kanssa
15:08:00	Alus tullut kapeikon (Väst Prästkär) läpi ja on aloittamassa Staholmin käännöksen. Komentosillalla hiljaista.
15:09:40	Hiljaista puhetta
Noin 15:10	Analyysissä (kohta 2.7.1) päätelty peräsinakselin katkeamishetki Staholmin käännöksen stöttausvaiheessa
15:15:51	VHF-keskustelu aluksen ja M/S FJÄRDVÄGENin kanssa koskien ohitusta
15:16:30	Joku tulee komentosillalle. Keskustelua ohituksesta.
15:17:41–18:09	Ihmetellään kääntymisen hitautta, mutta oletetaan sen johtuvan tuulesta
15:21:29–23:32	Keskustelu, jossa ihmetellään aluksen käyttäytymistä ja onko tuulella siihen osuutta. Lopuksi toteamus, että ei käännä normaalisti
15:23:48–24:02	Kommentoivaa keskustelua käännöksen etenemisestä, koskien tavanomaista suurempia peräsinkulmia.
15:24:04	M/S LÄRKAN keskustelee Archipelago VTS:n kanssa. Tämän jälkeen komentosillalla hiljaista keskustelua.
15:26:50	M/S FINNSAILOR keskustelee Archipelago VTS:n kanssa
15:26:43–26:57	Tällä aikavälillä tapahtuu siirtyminen Course Modesta Heading Modeen.
15:27:02–27:07	Tällä aikavälillä tapahtuu siirtyminen Heading Modesta käsiohjaukseen.
15:29:17	Ihmetellään suuria (18–19 astetta) peräsinkulmia, tuuliko vaikuttaa?
15:30:04	Joku tulee komentosillalle, kieli muuttuu ruotsiksi. Keskustelua miksi käsiohjaus, vastaus FJÄRDVÄGENin ohitus.
15:30:52	M/S KIITONEN keskustelee Archipelago VTS:n kanssa
15:30:57–31:14	Keskustelua siitä että ohjaa huonosti
15:31:25	Piippaus
15:31:58	Siirtyminen käsiohjauksesta Course Modiin. Hiljaista keskustelua. Linjaluotsit vaihtavat vahtia.
15:32:59–33:13	Tällä aikavälillä tapahtuu siirtyminen Course modista käsiohjaukseen. Kuuluu värähtelyääntä
15:33:25	Piippaus ja jotain puhetta. Sen jälkeen keskustelua, että kulku sujui hyvin aina Stockgrundin käännökseen saakka.
15:34:04	M/S ISABELLA keskustelee Archipelago VTS:n kanssa
15:34:19	M/S FINNCLIPPER keskustelee Archipelago VTS:n kanssa
15:35:22	Toteamus, että ei stöttaa. Käännösten sanotaan menevän jäykästi
15:36:28–36:34	Tällä aikavälillä tapahtuu siirrytään käsiohjauksesta Heading Modeen
15:36:32	Alus keskustelee Archipelago VTS:n kanssa normaalisti.
15:37:37–38:48	Keskustelu, jossa arvellaan peräsinkulman näytön näyttävän liian suuria kulmia. Maininta, että siinä täytyy olla jokin vika. Ihmetellään suuria kulmia ja hitautta.
15:38:48	Nyt ilmeisesti päätös, että pysähdytään edessä olevaan väylän levennykseen. Jatkuva keskustelua ylisuurista vastakulmista ja kääntymisen hitauteista.
15:39:41	Ihmettelyä, mistä tämä johtuu
15:39:44–39:53	Siirtyminen Heading Modista käsiohjaukseen
15:40:00	Pyyntö huolehtia ohjauksesta. Ilmeisesti tartutaan pääkoneiden ohjaussauvoihin
15:40:10	Printerin raksutus kuuluu; pääkoneita käytetään ristiin.
15:40:20	Hälytysääniä, todetaan, että nyt tapahtui jotakin
15:40:34	Ilmoitetaan päällikölle, että vaikeuksia ohjailussa
15:41:31	Päällikkö komentosillalla. Määräys "Harbor Mode"
15:44:00	Ohjauspotkurit alkavat toimia
15:44:05	Ilmoitus VTS:lle teknisistä ongelmista ja pysähtymisestä lounaaseen Enskäristä

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



Kuva 14. 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.

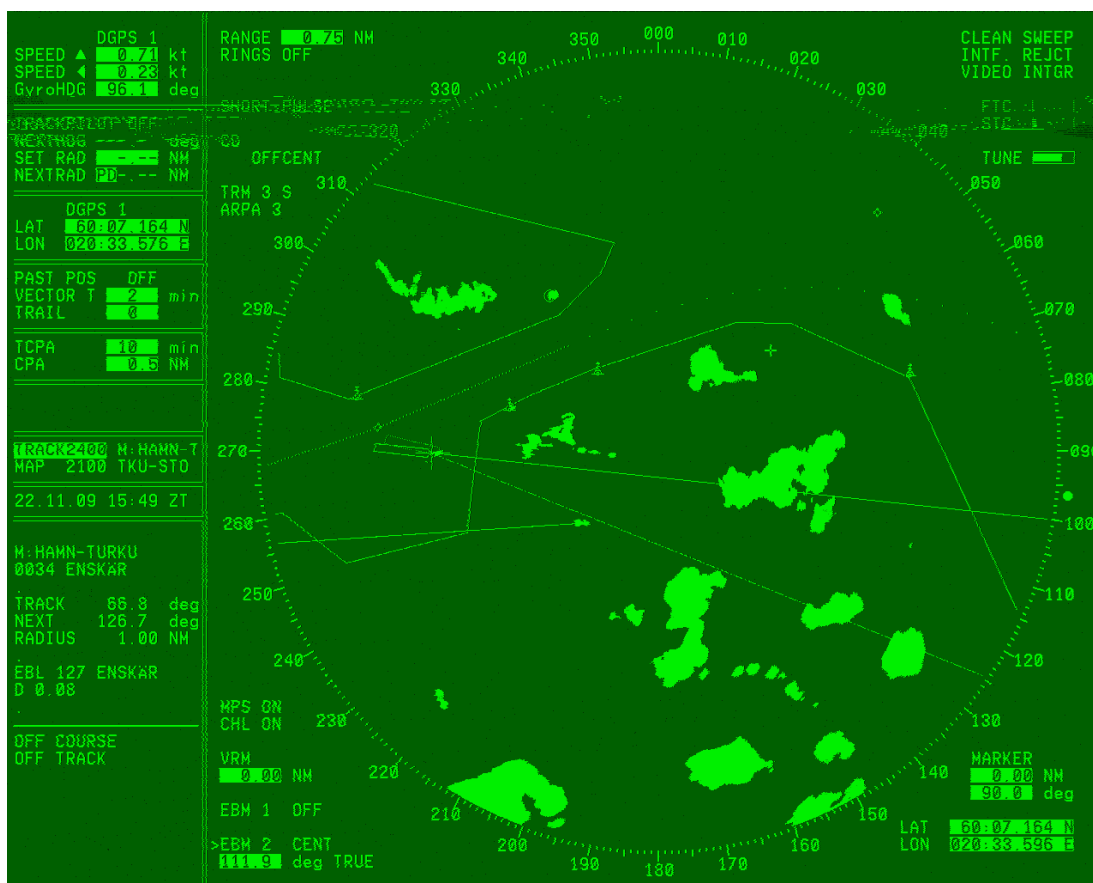


Kuva 15. Aluksen pysäytyksen hallinta. Paksuilla viivoilla on näytetty potkureiden säätövipujen (lever) asennot. Miinusmerkki tarkoittaa peruutusta. Musta suorakaide näyttää ajankohdan, jolloin päällikölle soitettiin. Pitch on potkurin nousu, RPM potkurin kierros-luku minuutissa. SB-peräsinkulma akselin katkeamisen jälkeen on näyttölaitteen näyttämä kulma, tosiasiallinen peräsinkulma on tuntematon.

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

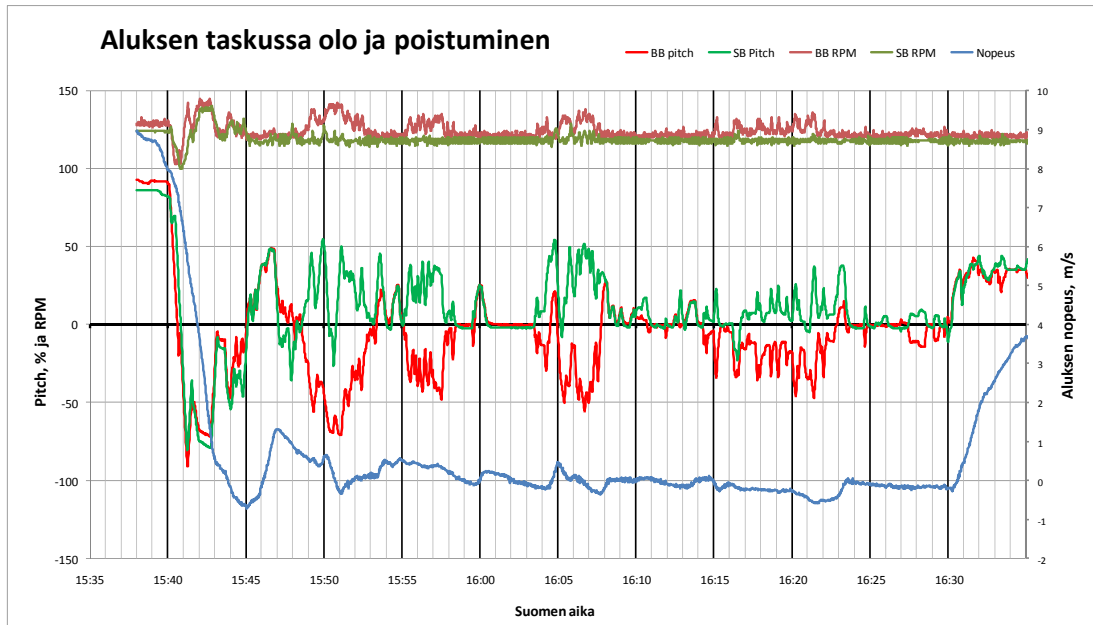
Päällikön saavuttua komentosillalle hän määräsi Harbour Moden²⁷ klo 15:41:37 päälle, käynnistämään ohjailupotkurit ja otti ohjauksen oikealle siivelle käyttäen Joystickiä. Ohjailupotkurit käynnistyivät normaalin, parin minuutin viiveen jälkeen noin klo 15:44.

Archipelago VTS:lle ilmoitettiin klo 15:44:05, että aluksella on teknisiä ongelmia ja se pysäytetään lounaaseen Enskäristä.



Kuva 16. Tutkanäyttö klo 15:49. Alus on paikallaan "taskussa".

²⁷ HARBOUR MODE tarkoittaa sitä, että ohjailupotkureille sähkötehoa tuottavat akseligeneraattorit ovat kytkettyinä ja ohjailupotkurit ovat käytettävissä. Harbour modessa laivan pääpotkurien pyörimisnopeus on vakio akseligeneraattoreiden toiminnan mahdollistamiseksi. Määräyksestä kestää jonkin aikaa, ennen kuin pääkoneiden kierrokset ovat säätyneet sellaisiksi, että akseligeneraattorit voidaan kytkeä alennusvaihteeseen. Sen jälkeen kuluu aikaa, ennen kuin akseligeneraattorit tuottavat sähköä ohjauspotkureille. (Ohjauspotkureiden tehontarve on niin suuri, että aluksen normaali sähköntuotto ei riitä).



Kuva 17. Aluksen hallinta väylän levennyksessä ja lähtö liikkeelle.

Alus saatiin pysähtymään ja ajettua hieman syvemmälle ”taskuun”, jotta muille aluksille olisi tilaa (M/S FINNSAILOR tuli vastaan, M/S ISABELLA meni ohi), kuva 16. Pysäytyksen aikana peräsinkulman indikaattorit osoittivat, että peräsimet olivat edelleen kaikki vasemmalle. Peräsimet kytkettiin normaali ohjaukselle ja indikaattorit osoittivat, että peräsimet palautuivat keskelle klo 15:58. Ohjausta testattiin ja todettiin kaiken toimivan, mutta jäätin edelleen paikalleen, jotta M/S FJÄRDVÄGEN, M/S FINNSAILOR ja M/S ISABELLA ohittavat paikan. Joystickillä ohjaten lähdettiin (kuva 18) klo 16:30 Teilin selälle, jossa aloitettiin ruorin testaukset.



Kuva 18. Pysähtymispaikka (vasemmanpuoleinen nuoli) ja kiertely Teilin selällä. (Lähde: marittraffic.com)

Peräsinkonehuoneessa tarkastettiin peräsinkulmien indikaattorit ja verrattiin ruoriakseliin päällä oleviin indikaattoreihin; tulos oli sama. Myös peräsimien ajo peräsinkonehuoneesta käsin testattiin, se toimi. Ohjaus otettiin takaisin komentosillalle ja vauhti nostettiin noin 11 solmuun. Käännös oikealle sujui normaalisti, mutta kun käännettiin vasem-

malle, alus jatkoi suoraan ja vasta jonkin ajan kuluttua se alkoi hitaasti kääntyä vasemmalle.

Päällikkö päätti, että matkaa ei voida jatkaa ennen kuin saadaan hinausapua. Päällikkö totesi, että tuuli oli liian voimakas (10–15 m/s) ankkurointiin. Päättiin ajaa Teilin selällä edestakaisin pohjois-eteläsuunnassa myötäpäivään. Tätä ennen tarkastettiin päällikön mukaan riittävä veden syvyys selällä ja valittiin mahdolliset ankkurointipaikat.

Tilanne oli jo klo 15:48 kerrottu TallinkSiljan nimetylle henkilölle (DP) ja tekniselle tarkastajalle. Päällikkö antoi aluksen tiedottajalle ohjeet kuuluttaa klo 16.03, että alus on pysäytetty teknisen vian vuoksi. Tilanteen kehittymisestä ilmoitettiin kuulutuksilla 3–4 kertaa tunnissa. Matkustajilla oli hyttinsä edelleen käytössä ja heille tarjottiin ruokaa ja juotavaa. VTS Archipelago pidettiin ajan tasalla.

Pelastustoimet käynnistettiin klo 17:57 kun päällikkö otti yhteyttä Neste Oy:n saattohinaajaan M/S UKKOon. Kello 18:44 avustusoperaatio oli sovittu TallinkSiljan ja Nesteen kesken²⁸.

Taulukkoon 1 on koottu tapahtumien ajankohtia ja yhteenveto komentosillan keskusteluista. Taulukko perustuu VDR-äänityksen kuunteluun. Paikoin äänitys oli huonolaatuinen, eikä kaikesta puheesta saatu selvää. Myös keskustelut muiden alusten tai VTS:n kanssa peittivät alleen komentosillan keskusteluja.

Yhteenveto tilanteen havainnoinnista. Aluksen poikkeava ohjailukäyttäytyminen huomattiin ja siitä alettiin keskustella komentosillalla oikealle kaartuvassa Stockgrundin käännöksessä. Tämä oli ensimmäinen isompi käännös peräsinakselin katkeamisen jälkeen (katkeamisesta oli kulunut noin seitsemän minuuttia). Komentosillamiehistö kävi useita lyhyitä sananvaihtoja ja epänormaalin käyttäytymisen syyksi epäiltiin tuulen vaikutusta. Autopilotin käyttäytymistä sekä suuria peräsinkulmia ihmeteltiin ja niihin reagoitiin tekemällä autopilottiin pieniä kurssimuutoksia. Suuret peräsinkulmat (30 astetta) pantiin merkille, mutta niiden lukuarvoista eikä ajallisesta kestosta keskusteltu.

Poikkeavaa ohjailukäyttäytymistä ei ryhdytty analysoimaan, vaan havainnot jäivät irrallisiksi toteamuksiksi. Matkaa jatkettiin ja keskustelu taukosi FJÄRDVÄGENin ohituksen ajaksi noin viideksi minuutiksi. Ohitus aloitettiin autopilotilla. Alus näytti käyttäytyvän suoraan ajettaessa normaalisti. Rekisteröidyissä peräsinkulmissa on nähtävissä ohituksen aikana pieni pysyvä poikkeama oikealle. Ohituksen loppuvaiheessa siirryttiin ensimmäisen kerran käsiohjaukseen.

Ohituksen jälkeen linjaluotsien vahdinvaihto oli tulossa. Komentosillalle saapuneelle uudelle linjaluotsille kerrottiin ohjailuhavainnoista ja että käsiohjaus oli otettu käyttöön FJÄRDVÄGENin ohituksen yhteydessä. Tässä yhteydessä aikaisemmin tehtyä havainnoja alettiin kerätä yhteen ja tilanteen analysointi alkoi vähitellen.

²⁸ Hinaaja UKKO, päällikön raportti 24.11.2009.

Kun linjaluotsit olivat vaihtaneet vahtia, uusi linjaluotsi totesi ensimmäisen ajamansa käännöksen lopulla ääneen, ettei aluksen kääntymisen pysäyttäminen vastaruorilla (stöttaus) tapahtunut kunnolla. Seuraavassa pienessä käännöksessä 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 oltiin vielä tavanomaisesti yhteydessä Archipelago VTS:ään, joten tällöin ei ohjailulaitteiden poikkeava toiminta ollut synnyttänyt selvää tarvetta matkan keskeyttämiseen.

Pian tämän jälkeen linjaluotsi päätti ohjata aluksen edessä lähellä olevaan väylän levennykseen. Nyt päällikkö kutsuttiin paikalle. Sillalle tultuaan hän käski käynnistää poikittaistyöntölaitteet (harbour mode) ja pysäytti aluksen. Ensimmäinen väylän oikeassa reunassa ollut ankkurointitila käytettiin hyväksi.

Peräsinkonehuoneessa tehty tarkistus näytti, että peräsinakseli kääntyy annetun käskyn mukaan, koska peräsinkoneen näkyvissä oleva osa kääntyi. Vasta sukeltajan tekemä havainto selvitti vian laadun Airistolla seuraavana päivänä. Vian määrittäminen kesti sen vuoksi melko pitkään.

1.2.5 Toimenpiteet tapahtuman jälkeen

Hinaaja UKKO saapui M/S SILJA EUROPA:n luo 23.11 klo 7 mukanaan TallinkSiljan tekninen tarkastaja, Merenkululaitoksen tarkastaja, luokituslaitoksen (Bureau Veritas) tarkastaja, sukeltaja ja hänen apumiehensä sekä hinaajan toinen päällikkö, jotka nousivat alukseen. Edellisenä iltana SILJA EUROPA:n ja hinaajan päälliköt olivat sopineet operaation vaatimista valmisteluista, mm. köysien kiinnityksistä ja siitä, että hinaajan toinen päällikkö tulee avustuksen ajaksi SILJA EUROPA:n komentosillalle varmistamaan kommunikaation selkeyden hinaaja UKKOon.

Neuvottelussa todettiin, että sukeltaminen olisi hankalaa vallitsevissa olosuhteissa, joten se päätettiin tehdä Airistolla. Hinaaja UKKO kiinnitettiin SILJA EUROPA:n perään saatohinauskäytännön mukaisesti, kuva 19. Aluksi tehtiin ohjailutestejä ja todettiin, että voidaan lähteä matkaan turvallisesti. Saattomatka alkoi klo 8:15. Myöhemmin tilattiin lisäavuksi hinaaja KRAFT loppumatkalle Airistolta Turkuun.

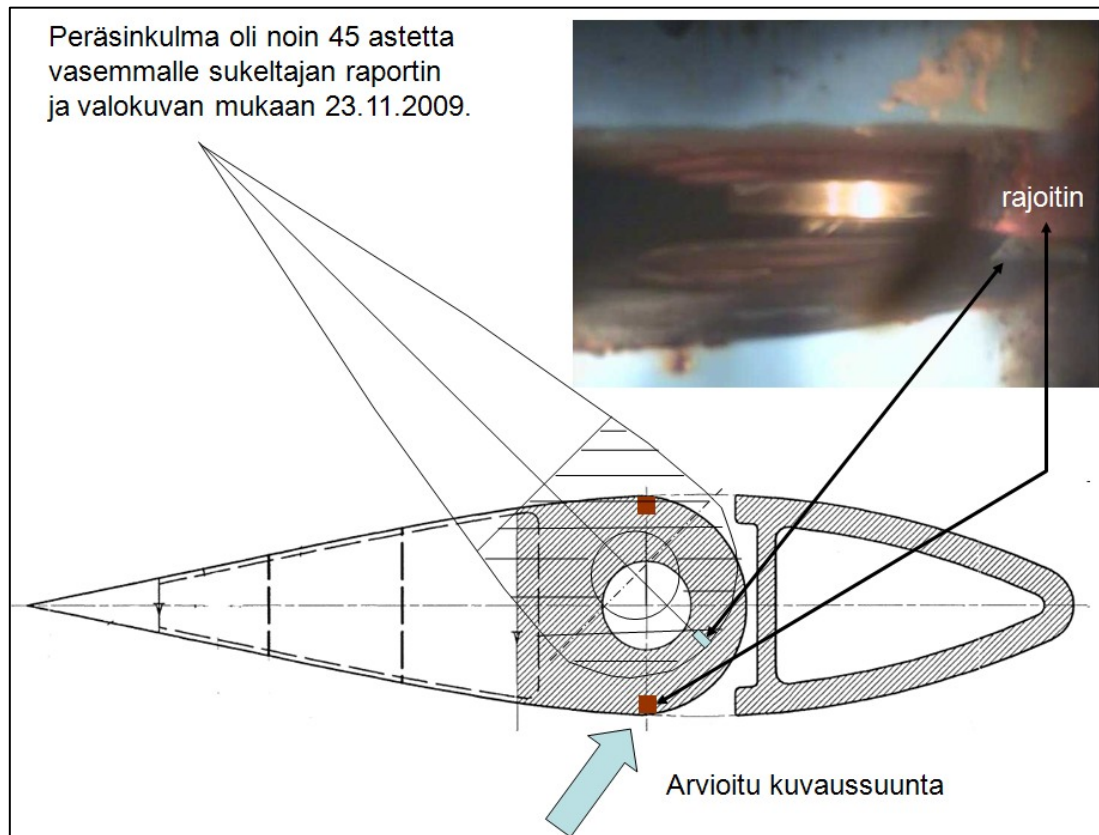
M/S SILJA EUROPA (FIN), oikeanpuoleisen peräsinakselin katkeaminen Ahvenanmaan saaristossa 22.11.2009



Kuva 19. Hinaaja UKKO saattaa SILJA EUROPAa aamulla 23.11.2009 matkalla Airistolle. Kuvan lähde hinaaja UKKO, päällikkö.

Matka ankkuripaikalle eteni ilman vaikeuksia ja alus ankkuroi klo 13:22. Sukeltaja tarkasti peräsimet ja totesi SB-puolen peräsinakselin olevan poikki ja peräsimen pudonneen noin 50 mm ja olevan kääntyneenä noin 45 asteen kulmaan vasemmalle²⁹, kuva 20. Matkaa jatkettiin klo 15:23 hinaajien saattamana (UKKO perässä, KRAFT keulassa). Turun terminaaliin saavuttiin klo 16:46. Hinaajan avustamana alus siirrettiin klo 19 toiseen laituriin.

²⁹ DG-DIVING GROUP, sukeltajan raportti 25.11.2009 tarkastuksista Airistolla 23.11 ja Turun satamassa 24.11. Turussa tarkastettaessa peräsin oli suorassa.



Kuva 20. Peräsimen arvioitu asento 23.11.2009 klo noin klo 14 sukeltajan valokuvan ja lausunnon perusteella.

Alus oli saanut tämän vaurion juuri pikkujouluristeilysesongin aikana. Yhtiö kartoitti mahdollisuudet nopeaan telakointiin. Vaurioitunut peräsin käännettiin keskelle ja tuettiin paikoilleen ennen lähtöä telakalle. Yhtiö valitsi Riikan telakan, jonne alus saapui hinaajan saattamana 27.11. Uivan telakan nostoyritys 28.11 oli keskeytettävä, koska alus osoittautui ylittävän telakan turvallisen nostokyvyn. Gdanskista löytyi telakka, joka oli tarpeeksi suuri ja se pystyi ottamaan aluksen vastaan 1.12. Alus kulki Gdanskiin ilman hinaajan saattoja.

1.2.6 Henkilövahingot

Ei henkilövahinkoja.

1.2.7 Aluksen vauriot

Aluksi esitellään valokuvien erilaisia telakoinnin yhteydessä peräsimissä havaittuja ja niiden kuntoa esitteleviä vaurioita.

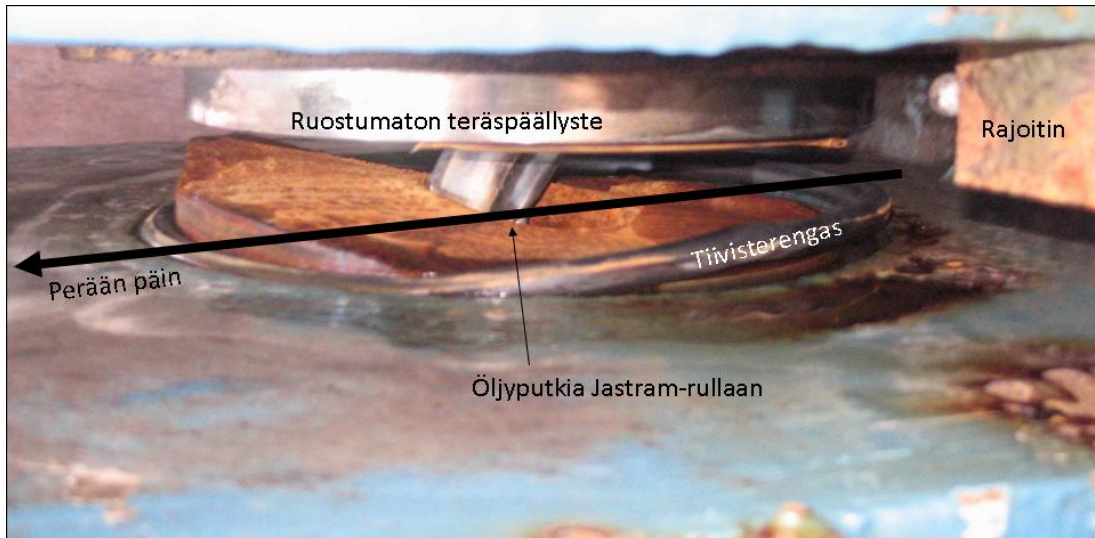
SB-peräsinakseli oli poikki. Tuettu SB-peräsin näkyy kuvassa 21, joka on otettu keskeytyneen nostoyrityksen aikana Riikassa. Punainen nuoli näyttää ehjässä peräsimessä raon, minkä verran peräsin voi pudota. Keltaisilla nuolilla on näytetty sarven alapuoliset raot ehjässä ja vaurioituneessa peräsimessä.

Katkennut peräsinakseli on kuvassa 22a. VTT:n asiantuntija tunnisti akselin murtopinnan ulkonäön perusteella syyksi *väsymismurtuman*³⁰. Peräsin oli akselin katkettua kallistunut perään päin ja oli tukeutunut peräsinsarveen ja Jastram-rullan hydrauliiikkaputkiin, kuva 22b. Katkenneen akselin alapää näkyy kuvassa 22c.

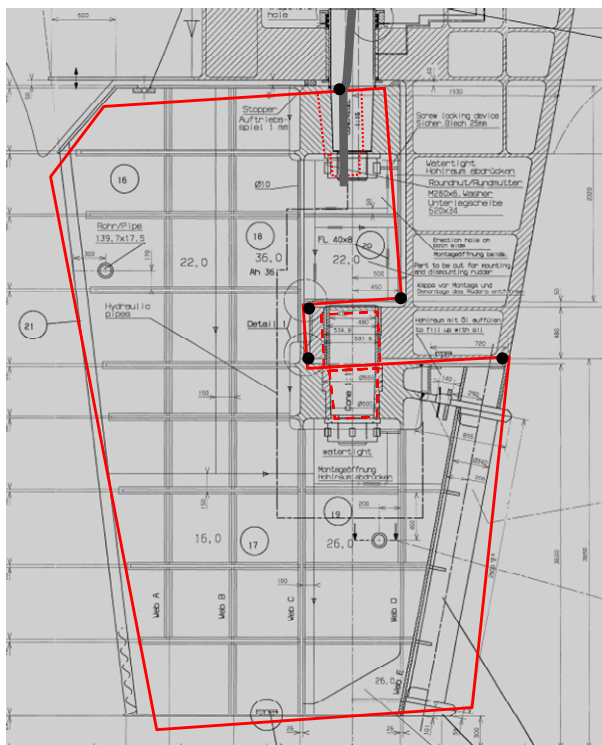


Kuva 21. Peräsimet varustamon kuvaamina Riikassa 28.11.2009 nostoyrityksen aikana. Huomaa pudonneen SB-peräsimen tuenta (oranssi soikio) aluksen siirtojen ajaksi. Punainen nuoli BB-peräsिमessä näyttää raon, jonka verran peräsin voi pudota. Keltaiset nuolet näyttävät sarven alapuolisen raon ehjässä ja vaurioituneessa peräsिमessä. Ruostumatonta teräslevypäälystettä oli irronnut.

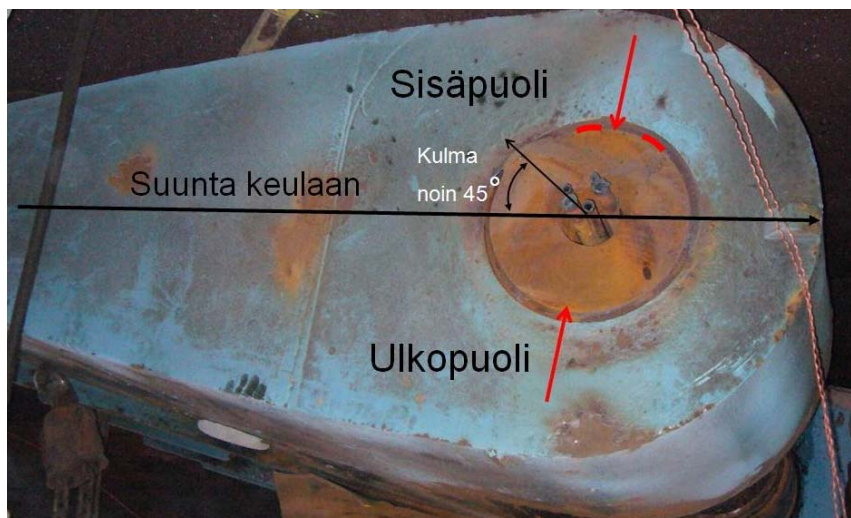
³⁰ Metallin väsymisellä tarkoitetaan pitkäaikaisen vaihtuvan kuormituksen aiheuttamaa vauriomekanismia. Vaurion alkuvaiheessa tapahtuu hyvin paikallista deformaatiota, joka johtaa vähittäiseen särön kasvuun ja lopulta murtumiseen.



Kuva 22a. 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.

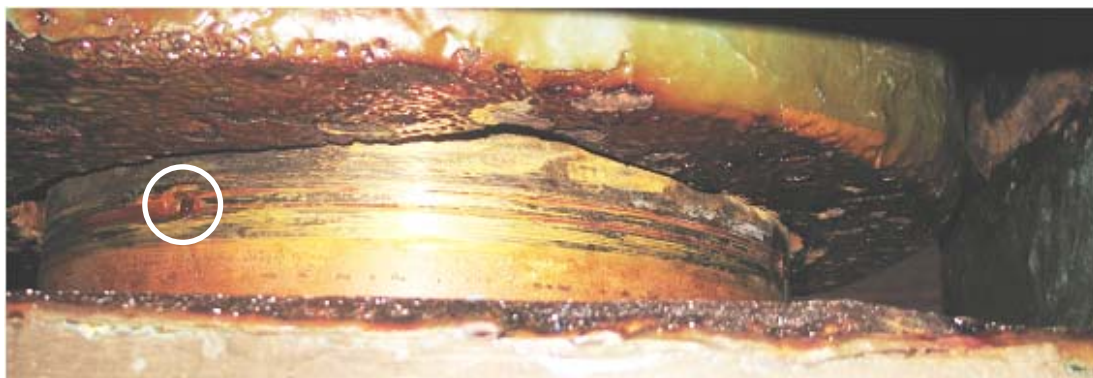


Kuva 22b. Arvioitu SB-peräsimen asento (jos peräsin keskellä) peräsinakselin katket-
tua. Kallistuma pituussuunnassa oli 3–4 astetta. Mustat pisteet näyttävät
mahdolliset tukipisteet peräsinakselin katkeamisen jälkeen.



Kuva 22c. SB-peräsin kuvattuna ylhäältä päin. Näkyvissä on katkenneen kartion murtopinta ja Jastram-rullan katkaistuja hydraulikkaputkia. Murtopinnan asento on määritetty tämän kuvan (erikseen tehdyn suurennoksen) avulla. Väsymismurtuman alkukohdat on näytetty punaisilla nuolilla ja löydettyjen fretting-säröjen paikat punaisilla kaarilla (myös kuva 25). Alempana oleva väsymissärön pinta (siis peräsimen oikealla, ulkopuolella) on suurempi, se ulottui yli poikkipinnan puolivälin, katso kuva 38a. Kuvattu 3.12.2009.

Korjauksessa vuonna 2004 valettu epoksitäyte ruuveineen oli hävinnyt kokonaan SB-puolella, kuva 23a ja osittain BB-puolella (esim. kuvat 44). SB-puolen alalaakerin pronssiholkki oli pudonnut 130–140 mm nojaten peräsimeen, kuva 23b. Ennen peräsinakselin katkeamista se oli pudonnut noin 60–70 mm ja akselin katkeamisen jälkeen peräsimen putoamisen mukana vielä lisää saman verran. Pronssiholkin pinnassa on näkyvissä jäljet tästä kaksivaiheisesta putoamisesta. BB-puolella pronssiholkki oli pysynyt paikoillaan.



Kuva 23a. 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.

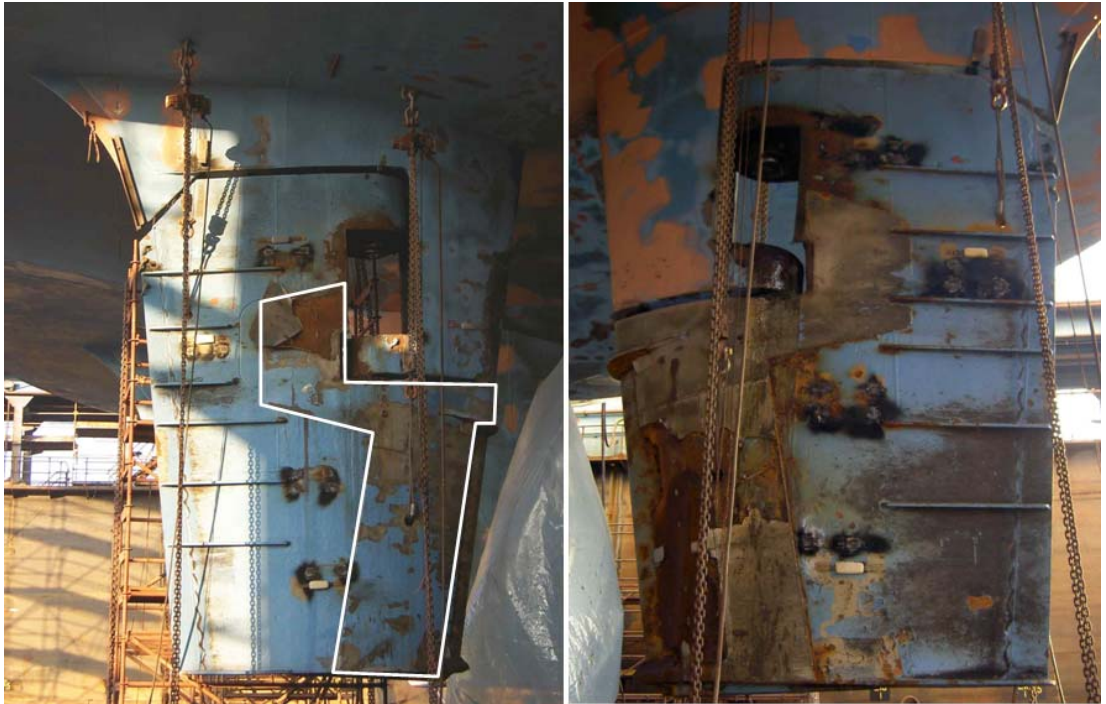


Kuva 23b. SB-peräsimen alalaakerin alas pudonnut pronssiholkki. (2.12 Gdansk). Ulkopuoli, keulan suunta on oikealle. Näkyvissä on yksi asennusruuveista (valkoinen ympyrä), jonka etäisyys holkin alareunasta on 100 mm. Peräsimen ja sarven väli on siten 130–140 mm. Nuoli näyttää kohdan, joka on saattanut hankautua peräsimen ollessa sarven varassa, katso kuva 22b.

Kuvissa 23a ja b näkyy holkin kaksivaiheisen putoamisen rajat. Kuvassa 23b on yksi epoksivalun asennuksessa käytetyistä ruuveista vuodelta 2004 katkenneena näkyvissä. Ruuvien alue holkista on tullut näkyviin siinä vaiheessa kun peräsin oli pudonnut sarven yläpuolella olevan raon verran, kuva 21. Alkuperäisen piirustuksen mukaan peräsimen pudottua peräsimen ja sarven välin olisi tullut olla 100 mm, eikä ruuvien olisi pitänyt tulla näin selvästi näkyviin. Ilmeisesti telakointien ja vaurion jälkeen tehdyn kiinnityksen johdosta peräsimen ja sarven keskinäinen sijainti oli hieman muuttunut. Holkki oli myös hieman painunut peräsimen alaosan yläpintaan syntyneeseen uraan.

Nuolella näytetty kohta on sileäksi hankautunut. Syynä saattaa olla pudonneen peräsimen kääntyily sen nojatessa sarveen. Peräsimien ulkopintojen kunto aluksen saavuttua telakkaan näkyy kuvissa 24.

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



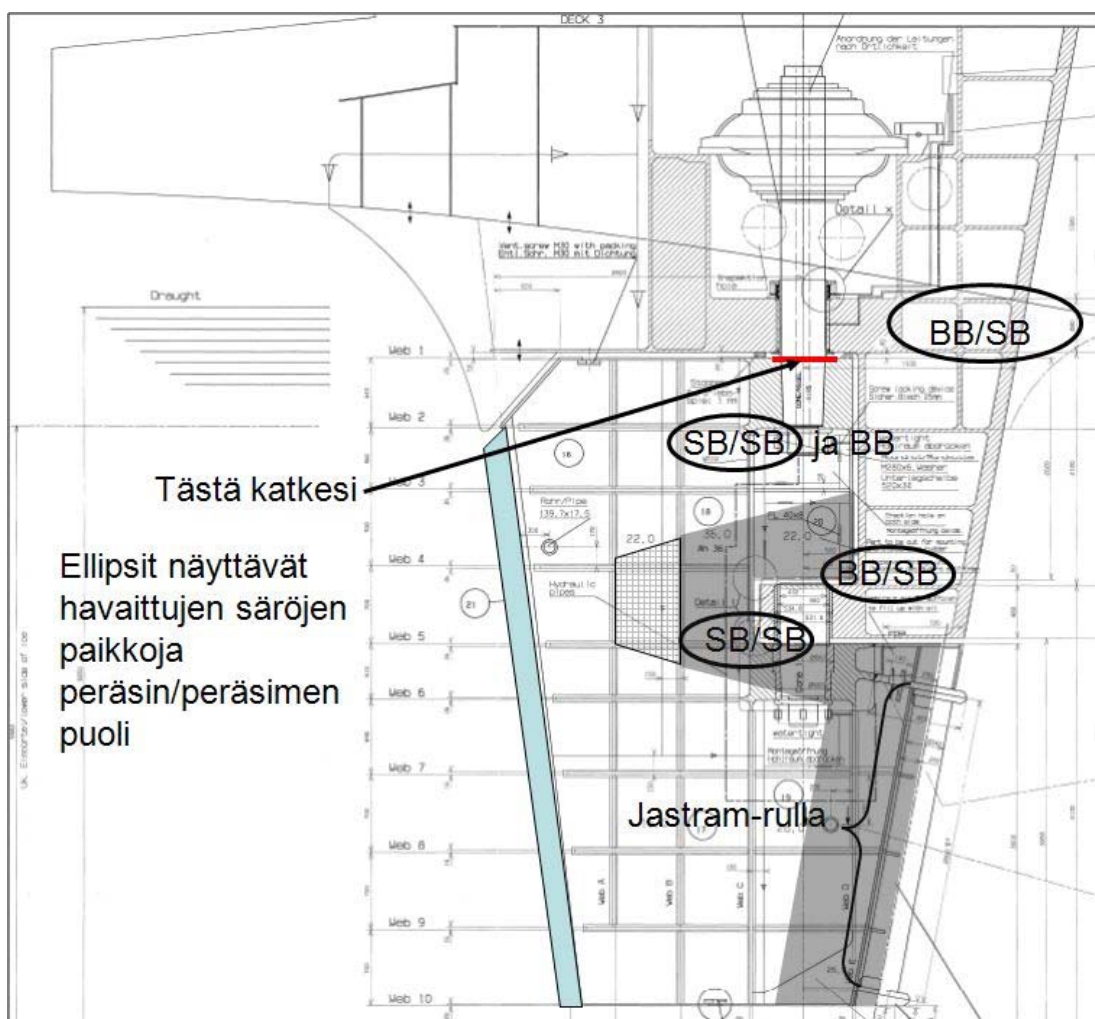
Kuva 24a. SB-peräsin Gdanskissa 3.12. Vasemmalla on ulkopuoli, oikealla sisäpuoli. Valkoisen viivan osoittamalla alueella peräsimen kaikilla pinnoilla oli ruostumattomasta teräslevystä tehty pinnoite.



Kuva 24b. BB-peräsintä nostetaan Gdanskissa pois paikoiltaan 3.12. Vasemmalla on sisäpuoli ja oikealla ulkopuoli.

Ruostumattomalla teräslevyllä päällystetty alue on näytetty valkoisella viivalla kuvassa 24a. Päällyste oli kaikilla neljällä pinnalla. Sisäpinnalla päällyste ulottui hieman pidemmälle perään päin, kuva 24c. Kuvien perusteella päällystettä on vähiten paikoillaan peräsimien sisäpinnoilla. Päällysteen laajuus on vaihdellut aikojen kuluessa, kuva 24c. Vuosina 2000–2002 tilalla oli kumitus. Eräiden muiden telakointien aikana otettujen valokuvien perusteella peräsimien kunto on aikaisemminkin ollut hyvin samankaltainen.

Molemmissa peräsimissä oli halkeamia ja säröjä, kuva 24c. Hankalasti korjattavaksi osoittautunut suurehko särö oli BB-peräsimessä, sarven ja rungon liitoksen alueella oikealla puolella, pituudeltaan noin 500 mm, kuvassa oikealla ylhäällä.



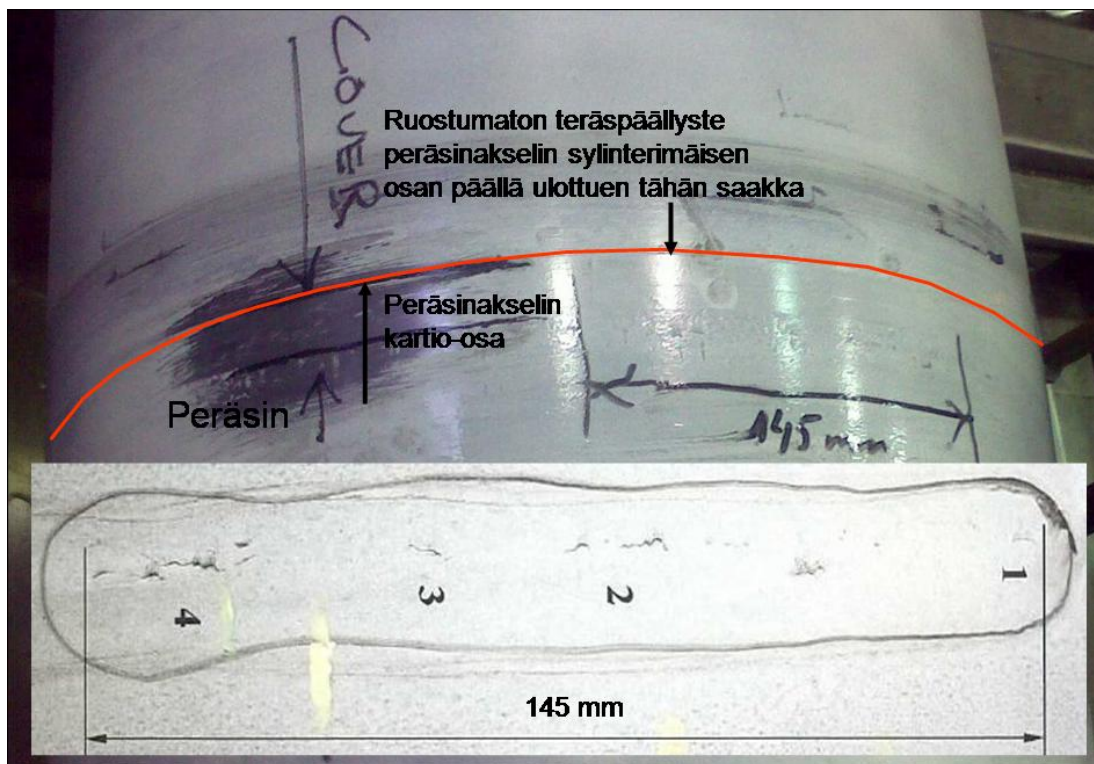
Kuva 24c. *SILJA EUROPAn peräsimien vaurioita. Molemmissa peräsimissä oli syöpy-
miä ja säröjä. Tummennettuna on näytetty ruostumattoman teräslevy- tai
kumituspäällysteen sijainti. Onnettomuushetkellä peräsimissä oli ruostuma-
ton teräspäällyste. Kumipäällyste oli aikoinaan ulottunut ruudutetulle alueel-
le peräsimen keskilaivan puoleisella pinnalla.*

Kummankin sarven laakeripesän aluksen keskiviivan puoleisella ulkosyrjällä oli voimakkaita kavitoinnin aiheuttamia syöpymiä. Ne olivat yläosastaan niin syviä, että sarven kestävyys vaarantui, kuva 24 d.



Kuva 24d. Peräsinsarven kavitaatiosyöpymiä. Vasemmalla BB (kuvattu 3.12), oikealla SB (Trafin kuva 4.12), molemmat keskilaivan puolella.

Telakka tarkasti magneettijauheella ehjän peräsinakselin Merenkululaitoksen vaatimuksesta. Peräsinakselin kartio-osan yläreunassa havaittiin säröjä, kuva 25 (säröjä on esitelty tarkemmin liitteessä 1). Ne eivät hävinneet ohuen lastuamisen jälkeen. Näin ollen tämäkin akseli jouduttiin korvaamaan uudella. Näiden säröjen sijainti peräsinakseliin ja peräsimen nähden on jäänyt epäselväksi. Myös alalaakerien holkit oli uusittava.



Kuva 25. BB-peräsinakselin fretting-säröt ja niiden sijainti, nuoli, jonka alla "145 mm". Punaisella viivalla on merkitty olakkeen paikka. Varustamolta saatuun kuvaan on liitetty telakan kuva, suurennos 145 mm pituisesta alueesta.

1.2.8 Muut vahingot

Alus oli pois liikenteestä joulua edeltävän vilkkaan risteilyesongin aikana noin 4 viikkoa.

1.2.9 Navigointi- ja yhteydenpitolaitteet

Laitteet olivat toimineet normaalisti.

1.2.10 Rekisteröintilaitteet

Aluksen VDR-laite (Voyage Data Recorder) tallentaa jatkuvasti noin kuukauden ajalta aluksen kulkuun ja ohjailuun liittyvien noin 180 parametrin arvot sekunnin välein. Kommentosillalla käydyt keskustelut rekisteröityvät jatkuvana äänitallenteena usealla mikrofonilla. Kuvakaappauksina oli tallennettu toinen tutkanäyttö 15 s (kuva 3a) ja toinen Conning näyttö 25 s (kuva 3b) välein. VDR:n kello oli 4 tuntia jäljessä Suomen ajasta.

Taulukko 2. Esimerkki taulukosta jatkokäsittelyä varten. Sarakkeita on noin 90.

Date	Suomen aika	Rudder angle	Rudder SB angle	Lever Command	Pitch Response	Lever Command	Pitch Response	RPM	RPM	RPM	RPM	Bow Thruster 1	Bow Thruster 2	Bow Thruster 3	Lever Command	Lever Command	Lever Command	Lever Command	Lever Command	Lever Command
22.11.2009	15:00:00	-2	2	73.5	94.9	75.3	89.3	0	92.1	0	90.8	0	0	0	2.4	-0.2	-0.3	-0.4	0.6	0.6
22.11.2009	15:00:01	-2	2	73.5	94.9	75.5	89.1	0	90.6	0	90.9	-1	-1	-1	2.4	-0.2	-0.3	-0.4	0.7	0.7
22.11.2009	15:00:02	-3	1	73.5	94.8	75.5	88.9	0	89.3	0	91.1	0	0	0	2.4	-0.2	-0.3	-0.4	0.6	0.6
22.11.2009	15:00:03	-3	1	73.3	94.6	75.3	88.7	0	90.3	0	91.1	-1	-1	-1	2.4	-0.2	0.3	-0.4	0.6	0.6

Tutkintaa varten otettiin talteen kaikki VDR-tallenteet. Lautakunta valitsi tiedoista jatkokäsittelyyn ne, joilla katsottiin olevan merkitystä onnettomuuden tutkinnassa. Onnettomuuspäivän tietojen avulla pyrittiin täydentämään tapahtumakertomuksia. Kuukauden ajanjaksoa käytettiin hyväksi arvioitaessa peräsimen kohdistuvia kuormituksia aluksen koko käyttöajan aikana.

Konekäskyt olivat tulostuneet konekäskyprintterillä paperille. Tutkijoiden käyttöön saatiin tulostuskopio alkaen klo 15:08:24 siihen saakka kunnes printteri meni epäkuuntoon klo 15:42:37. Kopion laatu on paikoin heikko. Kun konekäskyprintterin tulostusta verrattiin vastaavaan VDR tietoon, todettiin, että printterin kello on ollut 15–20 s jäljessä. Printteri ei kirjaa jatkuvasti, vain muutokset.

1.2.11 VTS- ja valvontajärjestelmien toiminta

VDR:n ääniosuudessa on kuultavissa normaalia VTS-liikennettä.

1.3 Pelastus- ja hälytystoiminta

Hälytystä ei tehty, tilanteesta ilmoitettiin Archipelago VTS:lle. Eräs matkustaja oli ilmoittanut tilanteesta MRCC:lle, joka otti yhteyttä alukseen. Päällikön arvion mukaan tilanne ei vaatinut hinausavun lisäksi muita pelastustoimia; alus oli ohjailtavissa ja täysin merikelpoinen.

Päällikkö sopi hinausavusta Neste Oy:n kanssa.

Päällikkö ei pitänyt tarpeellisena ryhtyä evakuointiin, sillä alus oli ehjä ja ohjailtavissa.

1.4 Onnettomuuden turvallisuustutkinta

1.4.1 Tutkinnan lähtökohta

Vaaratilanne, *SB-peräsinakselin katkeaminen*, 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 karilleajoon. Jos ohjailukyky oleellisesti heikkenee, saattaa ohitus- tai kohtaamistilanteessa seurauksena olla yhteentörmäys. Tapahtuma-aikaan oli kylmä ja pimeä vuodenaika, mutta kriittisillä hetkillä oli vielä valoisaa. Pimeän aikana tilanne olisi ollut vaativampi. 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 kaksi³¹. Peräsinakselia ei irroteta tarkastettavaksi telakointien aikana³².

Turvallisuustutkinta on edellä mainitun perusteella katsottu tarpeelliseksi toteuttaa hyvin laaja-alaisena niin, että onnettomuuteen vaikuttaneet tekniset, inhimilliset, organisatoriset ja ympäristötekijät aluksen koko toiminta-ajalta tulevat riittävästi otetuiksi huomioon. Tutkinta on myös ensimmäinen laatuaan eikä sen vuoksi siitä ole saatavissa mallia eikä valmista näkemystä mahdollisista syistä.

Tutkinnassa haluttiin selvittää myös, miksi BB-peräsinakseli ei katkennut. Lisäksi arvioitiin miten ja millä edellytyksillä käytetty valuepoksi soveltui alalaakerin korjaukseen.

Tutkintasuunnitelma muokkaantui alla esitettyjä aiheita käsitteleväksi melko pian, mutta täsmentyi ja laajeni työn kuluessa.

1.4.2 Tutkinnan sisältö ja laajuus

Onnettomuuden ja vaaratilanteen tutkinta on jaettu seuraaviin päätehtäviin:

1. Aluksen historia ja peräsimille tehtyjen toimenpiteiden selvittäminen

- a. Selvitettiin aluksen vakioireitit ja erillisristeilyt, tapahtuneet onnettomuudet ja korjaukset sekä omistajuusvaihdokset.
- b. Selvitettiin aluksen säännönmukaisten ja poikkeuksellisten telakointien aikana havaitut peräsinlaitteiston vauriot, niiden korjaukset ja huollot, erityisesti laakerien *välyshistoria ja välysmittauksen tekotapa*. Erityisen tarkasti pyrittiin selvittämään vuonna 2004 poikkeuksellisella epoksivalulla tehdyn alalaakerin korjauksen tapahtumat.

³¹ Det Norske Veritas, Casualty Information 2/00, korroosio oli todettu katkeamisen syyksi. Bureau Veritas sähköposti 31.5.2011, akseli oli katkennut aluksen kulun aikana.

³² 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.

2. VDR datan keruu ja analysointi

- a. Valittiin VDR laitteistoon tallennetuista noin 180 parametrasta oleelliset kopioitaviksi, noin 50 kpl.
- b. Kopioitiin kuukauden VDR-tiedoista (onnettomuuspäivästä taaksepäin) kuuden vuorokauden ajalta sekunnin välein tallennettu niiden muuttujien historia, joilla katsottiin olevan merkitystä tutkinnan kannalta, kuten ne, jotka vaikuttavat peräsimen kohdistuvien voimien suuruuteen: aluksen nopeus, peräsinkulma, potkurin kierrosluku ja nousu, aluksen asento, asennon muutosnopeus ja aluksen paikka sekä tuulen suunta ja voimakkuus. Tiedot muunnettiin oikeisiin yksiköihin ja oikean suuruiseksi rekisteröintilaitteiston kalibrointikertoimilla.
- c. Tulokset ekstrapoloitiin aluksen koko käyttöhistorian pituiselle ajalle. Oleelliset muuttujat lajiteltiin aluksen koko käyttöänsä aikaiseksi suuruusjakaumaksi (nopeus, peräsinkulmat ja kierrosluku).
- d. Tarkasteltiin ja tallennettiin tutkijoiden käyttöön VDR:n tallentamat Conning- ja tutkanäyttöjen kuvat noin tunnin ajalta ennen aluksen pysäyttämistä. Vertailun vuoksi tehtiin samoin 31.10.2009 tiedoille.
- e. Kuunneltiin VDR-tietoihin sisältyvää komentositakeskustelujen nauhoitusta tarkoituksena arvioida tapahtumien kulkua ja onnettomuustilanteen hallintaa.

3. Peräsimen ja sen osien tutkimukset onnettomuuden jälkeen

- a. ”Ehjän” BB-puolen peräsinakseli tarkastettiin (MKL:n, nykyisin Trafi vaatimus) magneettijauheella mahdollisten säröjen löytämiseksi paikan päällä Gdanskissa sen selvittämiseksi, voidaanko akseli asentaa takaisin. VTT:n, tutkintalautakunnan, Trafin ja luokituslaitoksen edustajat antoivat ohjeet tutkimista varten.
- b. Kaikki vaurioituneet osat toimitettiin VTT:lle Otaniemeen niiden materiaallitekniistä tutkimista, mittauksia ja kuvauksia varten³³. (Peräsinakselit, alalaakerien pronssiholkit, palasia rikkoontuneesta epoksitäytteestä ja vuonna 2004 käytetyt pronssiholkin asennusruuvit). Lisäksi käytetystä epoksista tehtiin VTT:llä koevalu, jonka ominaisuudet mitattiin. Rikkoontuneesta peräsinakselista otettiin koesauva vetokoetta varten. Rikkoontunut peräsinakseli tarkastettiin VTT:llä magneettijauheella mahdollisten säröjen löytämiseksi.
- c. Todettiin, että alalaakerin rakenne on epäedullinen galvaanista korroosiota ajatellen. Korroosion johdosta alalaakerin sivuttainen liikevara saattoi kasvaa huomattavasti, eikä tähän varauduta mitoituksessa. Arvioitiin tämän rakenteen galvaanisen korroosion nopeus merivedessä³⁴ ja edelleen alalaakerin liikevaran kasvunopeus. Selvitettiin aluksen aktiivisten ja passiivisten korroosiosuojausten vaikutus alalaakerin korroosioon. Arvioitiin peräsimien ruostumattoman teräslevypäällysteen vaikutusta korroosioon.

³³ VTT: raportit VTT-R-0222-10 (metalli) ja VTT-S-09524-10 (epoksi).

³⁴ Keskustelut korroosiosuojajärjestelmän toimittajan kanssa Mikkelissä 28.4.2010 ja VTT:n raportti korroosiosta merivedessä VTT-R-08624-10.

- d. Määritettiin peräsinakseliin syntyvän taivutusjännityksen riippuvuus peräsimen vaikuttavasta taivuttavasta voimasta (peräsinvoima) parametrimina alalaakerin liikevara. Peräsin mallinnettiin luokitussääntöjen esittämällä tavalla pystysuorana palkkina, joka on alalaakerin kohdalla joustavasti peräsinsarveen tuettu ja jota kuormittaa peräsinlapaan kohdistuva peräsinvoima
- e. Ehjän peräsimen ominaistajuus arvioitiin luokituslaitoksen (Det Norske Veritas) kokemuseräisen tiedon avulla ja todettiin, että ominaistajuus on lähellä potkurin lapataajuutta. Todettiin, että peräsimen värähtelyt voivat vahvistua tietyllä kierroslukualueella resonanssi-ilmiön johdosta. TKK:n laivatekniikan laboratoriossa laskettiin lapataajuudella syntyvät herätevoimat sekä ehjän ja vaurioituneen peräsimen ominaistajuus.
- f. Peräsimissä todettiin runsaasti kavitoinnista johtuvia syöpymiä. Arvioitiin kavitoinnin merkitystä peräsinakselin katkeamisessa. Jastram-roottorin syöpyessä sen balanssi pyöriessä häiriintyy. Tarkasteltiin tämän vaikutusta värähtelyihin.

4. Peräsimiin vaikuttavien voimien arviointi

- a. Peräsinvoimien suuruusluokan selvittämistä varten laskettiin muutaman luokituslaitoksen nykysääntöjen perusteella mitoittava peräsinvoima (säännöissä rudder force). Tulosta vertailtiin aluksen luokituslaskelmiin.
- b. Määritettiin peräsimen vaikuttavien peräsinvoimien suuruusluokka peräsinkulman ja aluksen nopeuden funktiona muutamalla eri menetelmällä.
- c. Simulco Oy määrittä SILJA EUROPA:n ohjailun simulointimallilla SB- ja BB-peräsimiin kohdistuvat pituus- ja poikittaissuuntaiset voimat VDR-tiedoista sekunnin välein valittujen vuorokausien aikana ennen onnettomuutta ja onnettomuuspäivän aikana. Näistä voimista lasketut taivuttavat voimat lajiteltiin kumulatiivisia väsymislaskelmia varten. Jääkuormien vaikutukset on tutkinnassa arvioitu vähäisiksi³⁵.
- d. Arvioitiin peräsimen ominaistajuuden ja potkurin lapataajuuden läheisyyden (resonanssin) merkitys potkurien herätevoimien määrittämisessä.

5. Peräsinakselin väsymiskestävyyden laskenta

- a. Laadittiin peräsinakselin erisuuruisten taivutusjännitysten tilastot. Muodostettiin yhdistetty jännitys lisäämällä tuloksiin vääntöjännitys.
- b. Arvioitiin peräsinakselin väsymislujuus. SB-peräsinakselin ulkokehällä todettiin sen väsymislujuutta alentava lovi. BB-peräsinakselin loven muotoa ei saatu luotettavasti selville. Peräsinakseleille laadittiin tämän vuoksi kaksi Wöhler- käyrää, ilman lovea ja lovellinen.

³⁵ Alalaakerin liikevara oli tarpeeksi suuri synnyttämään peräsinakseliin merkittävän suuruisia jännityksiä vain jäättömänä aikana, keväällä ja kesällä 2004 sekä syksyllä 2009. Jäissä ajettaessa on talvella/kevällä 2003/2004 saattanut hetimitäin synnyttää merkittäviä kuormituksia. Nämä on otettu huomioon lisäämällä ns. hitaiden jännitysvaihtelujen määrää.

- c. Yhdistämällä a- ja b- kohtien tulokset etsittiin molempien peräsinakseleiden kumulatiivisilla väsymiskuormituslaskelmilla sellaiset laskelmiin vaikuttavien muuttujien kombinaatiot, joilla SB-akseli katkesi ja BB-akseli ei katkennut. Laskelmassa arvioitiin tilanne erikseen vuoden 2004 telakointiin saakka ja aika tuosta telakoinnista vaurioon. Arvioitiin myös akselien väsymiskestävyys tilanteessa, jossa alalaakerin pesä ei ollut syöpinnyt.

6. Onnettomuustilanteen hallinnan arviointi

- a. Vertailtiin onnettomuusajankohdan VDR-tietoja vastaaviin aiempiin VDR-tietoihin. Näin pyrittiin arvioimaan SB-peräsinakselin rikkoontumistapah-tuman kulkua ja selvittämään akselin katkeamispaikka ja -hetki.
- b. Arvioitiin toimenpiteitä BRM-ohjeistuksen³⁶ pohjalta aluksen komentosil-lalla akuutista tilanteesta selviämiseksi VDR-tietojen analysoinnin, ko-mentosiltakeskustelun äänitteen sekä Conning ja tutkanäyttöjen tallen-kekuvien avulla.
- c. Arvioitiin varustamon organisaation varautumista tällaiseen tilanteeseen, pelastustoimien käynnistämistä, tiedottamista matkustajille ja aluksen henkilökunnan toimintaa tilanteen jatkohallinnassa.

7. Peräsimen valmistus- ja korjausprosessin arviointi

- a. Tutkinnassa arvioitiin myös peräsimen suunnitteluun, valmistukseen, huoltoon ja korjaukseen liittyvien toimien onnistumista. Osapuolina olivat ensi vaiheessa varustamo, luokituslaitos, rakentajatelakka ja korjauste-lakka. Peräsimen suunnitteluprosessi oli läpäissyt alalaakerin ratkaisun, joka oli altis galvaaniselle korroosiolle. Peräsinakselin valmistusprosessi oli läpäissyt olakkeellisen akselin.
- b. Alalaakerin korjausvaiheessa vuonna 2004 osapuolina olivat varustamo, luokituslaitos, korjaustelakka, valuepoxsin toimittaja ja epoksivalun tekijä. Peräsimen alalaakerin korjauksen suunnittelussa päädyttiin valuepoksi-vaihtoehtoon. Sen käytöstä tuossa tarkoituksessa korjaustelakalla ei ol-lut aiempaa kokemusta. Sekä vuoden 2004, että vuoden 2009 korjauk-sissa alalaakerin korroosiomahdollisuus jäi ennalleen.
- c. Arvioitiin lyhyen telakointiajan vaikutusta yllättävän syöpymän korjaus-prosessiin ja tehtyihin valintoihin.

Näiden aiheiden kuvaukset ja tulokset ovat raportin kohdissa 1.5–1.9 ja erikseen maini-tuissa liitteissä.

Lopuksi kaikki edellä saadut tulokset yhdistettiin **analyysissä** ja määritettiin molempien alalaakerien vaurioiden todennäköiset syyketjut siten, että tarkastelussa on kaksi ajan-jaksoa: **1) 1993–2004**, alalaakereissa normaalirakenne, ennen epoksitäytettä ja **2) 2004–2009**, alalaakereissa epoksitäyte.

³⁶ Bridge Resource Management. Menettelytapojen kokoelma, jolla toiminta komentosillalla toteutetaan mm harjoiteltujen tilan-teiden avulla.

1.5 Aluksen ja peräsienien historia

1.5.1 Aluksen käyttö ja onnettomuudet

Alus on rakennettu Jos L Meyer Werft-telakalla Papenburg-Emsissä Saksassa ja se valmistui maaliskuussa 1993³⁷. Aluksen oli tilannut Rederi Ab Slite, joka ei kuitenkaan kyennyt vastaanottamaan alusta. Vuoden 1993 alussa telakka otti aluksen omistukseensa ja muodosti oman varustamon, Papenburg Shipping Kb. Alus luovutettiin 5.3.1993 yhtiölle Fährschiff Europa Kb (Papenburg Fährschiffsreederei G.m.b.H&Co, Papenburg), Papenburg ja kastettiin SILJA EUROPaksi. Rederi Ab Slite ei kyennyt charttaamaan alusta, vaan se siirtyi Oy Silja Line Ab:n charttraukseen. Seacontainers osti 42 % Papenburg Fährschiffsreederei G.m.b.H & Co osakkeista toukokuussa 2002. Alus rekisteröitiin Silja Europa Oy:n nimiin toukokuussa 2005. Vuoden 2006 marraskuussa alus rekisteröitiin Tallink Silja Oy:n nimiin. Se myytiin syyskuussa 2008 Tallink Autoexpress Ltd:lle, Limassol, Kypros. Edelleen se on kuitenkin rekisteröity Ahvenanmaalle.

Aluksen peräsiimeen kohdistuvien kuormitusten määrittämistä varten tutkinnassa on tarkasteltu aluksen koko käyttöhistoria, joka on koottu taulukoihin 3a ja 3b. Alus aloitti liikennöinnin reitillä Helsinki-Tukholma 14.3.1993. Se siirtyi reitille Turku-Maarianhamina-Tukholma 12.1.1995. Seuraavana päivänä alus ajoi karille Furusundin lähellä ja oli pois liikenteestä muutaman päivän³⁸. Elokuussa 1997 alus ja moottoripurjvene FLANÖR törmäsivät Ahvenanmaan eteläpuolella³⁹. Maarianhaminan rinnalle tuli reitille mukaan Långnäs 1.7.1999. Vaihtoehtoisesti alus on liikennöinyt Ruotsissa Tukholman sijaan Kapellskäriin.

Toisinaan aluksella on tehty poikkeavia risteilyjä ja se ollut luokituksen vaatimissa tai korjaustelakoinneissa. Aluksen Turku-Tukholma–Turku aikataulu: Turku 20:15, Långnäs 00:40/00:45, Tukholma 06:10/07:10, Maarianhamina 13:35/13:45, Turku 19:15.

Aluksen käytöstä saatujen tietojen perusteella sen peräsinlaitteisto ei ole kohdannut ylimääräisiä kuormituksia esim. pohjakosketusten muodossa. Sen sijaan talvikautena peräsiintä ovat kuormittaneet jääkuormat. Tutkinnassa on jääkuormien merkitys arvioitu vähäiseksi, koska vaurioita edeltävät ratkaisevat ajanjaksot ennen vuoden 2004 telakointia ja peräsinakselin katkeamista 22.11.2009 ovat pääosin olleet jäättömiä.

Taulukko 3a. 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

³⁷ Aluksen historiatiedot perustuvat suurelta osin internet-sivustoon "Fakta om fartyg" <http://www.faktaomfartyg.se>

³⁸ Onnettomuustutkintakeskuksen tutkintaselostus 1/1995

³⁹ Onnettomuustutkintakeskuksen tutkintaselostus C7/1997 M

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

Taulukko 3b. SILJA EUROPA:n liikennöinti. Valuepoksi asennettiin syksyllä 2004.

Aikaväli	Reitti	Huom.
14.3.1993–12.1.1995	Helsinki-Tukholma	Telakalla elokuussa 93
12.1.1995–1.7.1999	Turku-Maarianhamina-Tukholma	13.1.1995 karille, 5 pv poissa telakalla, Naantali
1.7.1999–23.12.2000	Turku-M:hamina/Långnäs-Tukholma	19.7.2000 potkuriongelmia, 5 pv poissa
23.12–25.12.2000	Jouluristeily Turku-Riika	
25.12.2000–1.3.2001	Turku-M:hamina/Långnäs-Tukholma	Telakalla tammikuussa ja heinäkuussa 2000, Raumalla ja Naantalissa
1.3.2001–14.5.2001	Turku-M:hamina/Långnäs-Kapellskär	18.3.2001 autopilottiongelmia
15.5–31.8.2001	Turku-M:hamina/Långnäs-Tukholma	19.7.2001 potkuriongelmia
1.9.2001–23.12.2001	Turku-M:hamina/Långnäs-Kapellskär	2.10.2001 tuhopoltto yhdessä hytissä
23.12–25.12.2001	Jouluristeily Turku-Tukholma	
26.12.2001–14.5.2002	Turku-M:hamina/Långnäs-Kapellskär	
14.5.2002–1.9.2002	Turku-M:hamina/Långnäs-Tukholma	Telakointi 1-8.9 Helsingissä
8.9.2002–24.12.2002	Turku-M:hamina/Långnäs-Kapellskär	
24.12–26.12.2002	Jouluristeily Turku-Långnäs-Tukholma	
26.12.2002–5.5.2003	Turku-M:hamina/Långnäs-Kapellskär	Telakointi 18.3-5.5 Helsingissä
5.5.2003–8.9.2003	Turku-M:hamina/Långnäs-Tukholma	
9.9.2003–22.1.2004	Turku-M:hamina/Långnäs-Kapellskär	22-26.12 Turku-M:hamina/Långnäs-Tukholma
30.1.2004–3.5.2004	Turku-M:hamina/Långnäs-Kapellskär	Hotellina Tukholmassa 22-29.1.2004
3.5.2004–29.8.2004	Turku-M:hamina/Långnäs-Tukholma	Tämän jälkeen telakointi Naantalissa
8.9.2004–3.5.2005	Turku-M:hamina/Långnäs-Kapellskär	Joulun aikoina Tukholma ja Riika risteilyt
3.5.2005–8.1.2006	Turku-M:hamina/Långnäs-Tukholma	Hotellina Tukholmassa 2-7.9.2005
8.1.2006–13.2.2006	Tukholma-Maarianhamina-Helsinki	
14.2.2006–x.5.2006	Turku-M:hamina/Långnäs-Kapellskär	
x.5.2006–3.9.2006	Turku-M:hamina/Långnäs-Tukholma	
4.9.2006–26.4.2007	Turku-M:hamina/Långnäs-Kapellskär	Jouluristeily Riikaan, tammikuussa 5 pv telakointi Naantalissa
26.4.2007–17.9.2007	Turku-M:hamina/Långnäs-Tukholma	
18.9.2007–27.9.2007	Turku-M:hamina/Långnäs-Kapellskär	
27.9.2007–4.10.2007	Turku-M:hamina/Långnäs-Tukholma	
5.10.2007–20.12.2007	Turku-M:hamina/Långnäs-Kapellskär	
20.12.2007–22.11.2009	Turku-M:hamina/Långnäs-Tukholma	Joulu- ja uudenvuoden risteilyt (Riika, Tukholma)
		Jouluristeily 24-26.12.2008
19.12.2009->	Turku-M:hamina/Långnäs-Tukholma	Peräsinvaurio 22.11, telakointi 2-19.12.2009 Gdanskissa

1.5.2 Telakoinnit

Tutkinnassa on selvitetty aluksen 17-vuotisen käyttöhistorian aikaiset telakoinnit ja niiden aikana peräsinlaitteistoille tehdyt tarkastukset, huollot ja korjaukset. Kaikista telakoinneista on hankittu luokituslaitoksen tarkastusraportti, aluksen ns. telakointimäpin peräsinä koskeva osuus sekä mahdollisuuksien mukaan telakointeihin liittyvät aluksella ja telakoilla tehdyt muistiinpanot. Lisäksi on keskusteltu yhtiön telakoinneista vastaavien henkilöiden, telakoineen telakan edustajien, luokituslaitoksen tarkastajien ja eräiden alihankintana töitä tehneiden yritysten henkilöiden kanssa. Varustamossa ja luokituslaitoksessa on tapahtunut henkilövaihdoksia vuosien 2000–2007 aikana. Lisäksi aluksen omistajuus on vaihtunut useaan otteeseen.

Telakoinnit, joissa välykset on mitattu, on esitetty taulukossa 4. Kuvassa 31 on esitetty välysmittausten tulokset.

Alla on luettelo telakoinneista ja kuvaus peräsinlaitteistolle tehdyistä töistä. Kaikkia tiedossa olleita asiakirjoja ei tutkinnassa onnistuttu saamaan. Seuraaviin yhteenvetoihin on koottu peräsinlaitteistoa koskevat osuudet.

Meyerwerf syyskuu 92. Välykset oli mitattu ja todettu täyttävän vaatimukset.

Vuosaari/Kotka Shipyard 1-7.9.93. Välykset mitattiin ja todettiin täyttävän vaatimukset. Ohjailuominaisuuksien parantamiseksi peräevää pidennettiin kolme kaariväliä (2,4 m), keulaan asennettiin kaarille 190–201 keulaevä, asennettiin pallekölit, asennettiin perään ohjailupotkuri sekä peräsinkoneen pumpput vaihdettiin suurempiin (ne liitettiin olemassa oleviin putkistoihin). Peräsimien kavitoitinvauriot korjattiin ja ne maalattiin. Jastram-rullat hiekkapuhallettiin ja maalattiin.

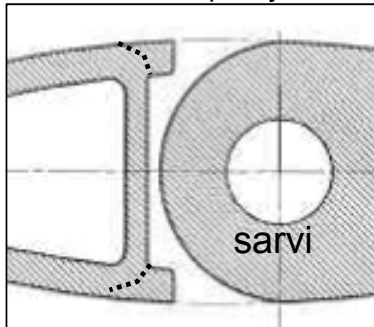
Turku Repair Yard 15–19.1.95. Välykset mitattiin ja todettiin täyttävän vaatimukset. Peräsinarven vuoto korjattiin. Peräsimet koeponnistettiin ilmalla eikä vuotoja havaittu. Jastram-rullien suojalevyjen vauriot korjattiin.

Vuosaari/Kotka Shipyard 4-8.9.95. Välykset mitattiin ja todettiin täyttävän vaatimukset.

Turku Repair Yard 1-5.9.97. Välykset mitattiin ja todettiin täyttävän vaatimukset. Peräsinlavat oli käännetty täysin sisäänpäin mittausten aikana Jastram-työn takia eivätkä välysmittaustulokset ole vertailukelpoisia. Kavitaatiovaurioita ilmeni alalaakerin alueella ja Jastram-rullien lähellä. Syöpyneitä kohtia päällystettiin ruostumattomalla teräslevyllä. Aktiivisen katodisuojausten järjestelmää parannettiin asentamalla 4 uutta anodia ja 2 uutta elektrodia. 10 vanhaa anodia ja elektrodia korvattiin uusilla.

Finnyards, Rauma 9-19.1 00. Toukokuussa 1999 sukeltaja tarkasti mm. peräsimet ja totesi raportissaan, että peräsimissä on kavitoinnin jälkiä ja suojalevyt olivat revenneet alalaakerin kohdalla molemmiin puolin sisäreunasta. Telakalla todettiin, että peräsinarvet ja peräsinlavat olivat voimakkaasti syöpyneet kavitoinnin johdosta. Peräsimet irrotettiin ja huollettiin verstaalla. Peräsinarven kohdalla virtauksen kulkua parannettiin kuvan 26 mukaisesti. Peräsinarven kohdalla olleet neljä lyhyttä virtausohjainta poistettiin. Pe-

räsimen etuosa päällystettiin osittain kumilla, "ProCoat". Korjauksiin harkittiin myös Belzona⁴⁰-muovimetallia. Välykset mitattiin ja todettiin täyttävän vaatimukset. Jastramin edustajat huolsivat Jastram-rullat. BB-puolen peräsinkoneen irrotti ja huolsi valmistajan (Ulstein Tenfjord) edustaja.



Kuva 26. Finnyardsin ehdotus, joka toteutettiin kavitoinnin vähentämiseksi alalaakerissa virtausta parantamalla.

Turku Repair Yard heinäkuu 00. Potkurin hydraulikassa havaittu vaurio korjattiin. Välyksiä ei tarkastettu. Peräsimien kumituspäällysteen rikkoontuneet kohdat korjattiin epoksilla.

Helsinki Repair Yard 1-6.9.02. Sukeltaja oli tarkastanut mm. peräsimen elokuussa ja todennut, että peräsimet ovat kokonaisuutena hyvässä kunnossa. Hänen piirroksestaan käy ilmi, että rullien takana oli pintavaurioita sekä paikoin pieniä syöpymiä rullien ylä- ja alakiinnityksissä. Välykset mitattiin ja todettiin täyttävän vaatimukset, mutta olivat hie- man kasvaneet. Molemmissa peräsimissä todettiin särö, joka paikattiin. Kumituksen jäänteet poistettiin ja tilalle kiinnitettiin ruostumattomasta teräslevystä tehty päällyste. Jastram-laitteistolle tehtiin perusteellinen huolto.

Helsinki Repair Yard 18.3–5.5.03. Telakoinnin tarkoitus oli korjata vaurioituneet palle- kölit ja tarkastaa pohja. Telakoinnin aikana välyksiä ei tarkastettu. SB-peräsimen keski- laivan puolista ruostumatonta teräslevypäällystettä uusittiin osittain.

Turku Repair Yard 30.8–8.9.04. Ilmeisesti vuoden 2002 telakoinnissa havaittujen kas- vaneiden välysten johdosta aluksella oli mukanaan uudet alalaakerin pronssiholkkien ai- hiot⁴¹. Molempien peräsimien alalaakerien pronssiholkit olivat pudonneet noin 50mm. 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. Ala-akseli oli kulunut 0,2-0,3 mm ja holkki sisäpinnaltaan 2-3,5 mm⁴², mikä merkitsi, että välykset olivat paikoin jopa n.7 mm. Holkkien kulumat olivat yläosassa 1-3 mm suuremmat kuin alaosassa. Välysmittaukses- sa ei todennäköisesti havaittu syöpymisen koko määrää. Se saatiin selville mittaamalla alalaakerin pesän aukko⁴³. Aukko osoittautui liian suureksi pelkälle holkille. Aukko ei ol- lut ympyrämainen. Telakointiajan lyhyiden vuoksi etsittiin sellainen ratkaisu tilanteen korjaamiseksi, joka ehdittäisiin toteuttaa. Pesään tehtyä päällehitsausta ja sen jälkeistä

⁴⁰ Belzona on Belzona International Ltd yrityksen kaksikomponenttinen pii-teräseoksella vahvistettu polymeeri, jota on useita eri laatuja. Pinnalle levityksen jälkeen se saa kuivua ja sen jälkeen se työstetään. Sitä käytetään mm syöpyneiden laakeri- pesien korjaamiseen.

⁴¹ Telakan työmääräluettelossa, työnro 5100 oli: "ruoritappien laakerien SB/BB uusiminen irrottamalla peräsimet".

⁴² Laivakone Oy mittauspöytäkirja.

⁴³ Mittauksen samoin kuin akselin linjauksen teki Kvaerner Masa Yardsin spesialisti.

aarpörausta ei voitu ajatella. Päädyttiin syöpymän täyttämiseen joko Thordonilla⁴⁴ tai Epocast-merkkisellä valettavalla epoksilla. Thordon olisi pitänyt tilata Kanadasta, joten päädyttiin Epocastiin, jota käytettiin yleisesti koneistojen asennuksessa. Korjaustelakalla ei tätä korjaustapaa ollut aiemmin käytetty SILJA EUOPAn 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.

Peräsimet poistettiin ja korjattiin verstaalla. Peräsimen alalevyn alle lisättiin listat ("sukset") tukemaan Jastram-rullan alalevyä. Peräsinarven alalaakerin pesän syöpymät puhdistettiin hiekkapuhalluksella. Pronssiholkki oli pudottuaan 50 mm pyörinyt pesässä niin kauan, että pesän yläosaan oli muodostunut 50 mm korkeudelta noin 7 mm reunus. Pesän seinämää tasoitettiin ja suurennettiin hieman hiomalla. Epoksivalua varten tehtiin yläosaan kolme koloa. Molempien alalaakerien pronssiholkit olivat voimakkaasti kulu-neet 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 36⁴⁵) siten, että ylös muodostui lieri, kuvat 27a, 27b ja 7c. Alhaalla oli valun aikana vastinkappale. Pronssiholkin keskitystä varten käytettiin holkin ja epoksin läpi meneviä kuusiokoloruuveja, katso kuva 27a. SB-puolen alalaakerin ala-osassa liikevara oli runsaat 15 mm ja yläosassa noin 5 mm. Ennen asennusta alalaakeri ympäröitiin pressulla ja sen sisälle puhallettiin lämmintä ilmaa⁴⁶. Valut teki työhön valmistajan valtuuttama tekijä⁴⁷, 2.9 BB-puolen valu ja 3.9 SB-puolen valu. Lämmitystä jatkettiin, kunnes koepalan kovuusmittaus osoitti, että epoksi on kovettunut. Valut todettiin valmiiksi kovuustestein 4–5.9⁴⁸. Kun vastinkappale irrotettiin, tarkastettiin, että epoksivalun pinta oli sileä. Näin pääteltiin valun onnistuminen.

⁴⁴ Thordon on kova hartsipohjainen polymeeri, Thordon Bearings Inc. kehittämä laakerimateriaali, josta tehdään myös peräsimen laakeriholkkeja.

⁴⁵ 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".

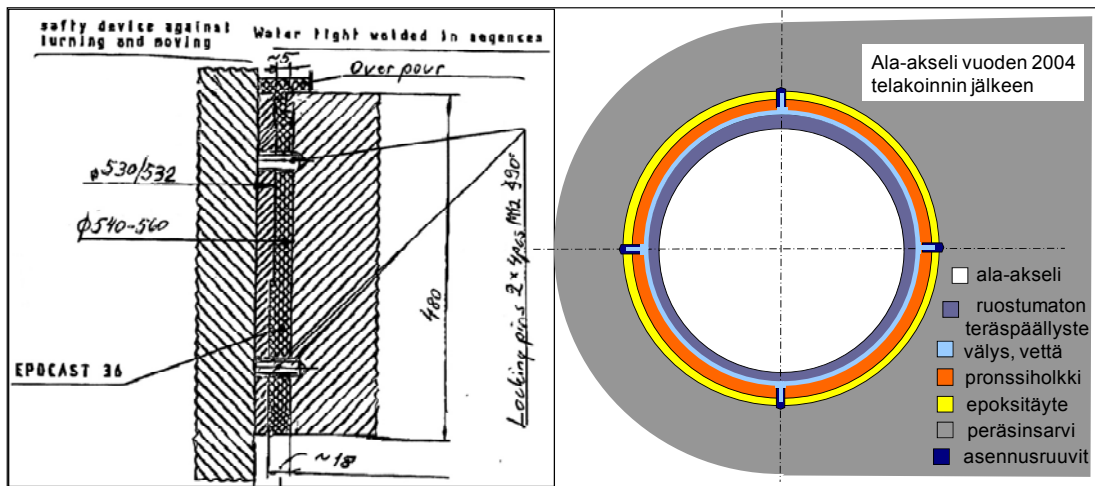
⁴⁶ Valuepoksin kuivumisen aikana sen lämpötilan tulee olla yli 13 astetta, jotta se kovettuisi. Perusaineen lämpötilan tulee olla sekoitettaessa noin 30 astetta.

⁴⁷ Epomare Oy

⁴⁸ Tulos oli 45 Barcol (BB 4.9.2004) ja 46 Barcol (SB 5.9.2004), tasapaisella, ohuella neulalla tehtävä kovuusmittaus. Valmistajan ilmoittama on 55 Barcol.

Valutyön ja kovettumisen aikana 2.–5.9 lämpötila Artukaisten asemalla⁴⁹ vaihteli välillä 14–23 astetta. Sadetta ei ollut. Tuulen nopeus oli 3–7 m/s. Luokituslaitos kirjoitti Memorandumin No 5⁵⁰, joka merkitsi sitä, että korjaus oli tarkoitettu pysyväksi ja varustamolle tiedoksi. Lisää käytetyn epoksin ominaisuuksista on VTT:n raportissa VTT-S-09524-10.

Peräsinakseliin ylälaakerien ympärykset (valukappaleen pinta) rungon ulkopuolelta tarkastettiin magneettijauheella⁵¹. Vaurioita ei havaittu, mutta uudet ylälaakerin tiivisteet asennettiin silti. Tarkastus ei ulottunut akseliin.



Kuvat 27a ja b. Epoksimassan asennuspiirustus (a, vasemmalla) ja alalaakerin poikkileikkaus (b, oikealla) vuoden 2004 telakoinnissa. Ruuvien kuusiokolot, jotka täyttyvät vedellä on piirretty näkyviin. Asennettu pronssiholkki poikkesi kuvan esittämästä, katso esim. kuva 7c. Asennuspiirustuksessa ei ole näytetty alareunan vastinkappaletta eikä ala-akselin ruostumattomasta teräksestä tehtyä päällystettä.

Valuepoksen asennuksen jälkeen välykset mitattiin ja todettiin täyttävän vaatimukset. Molempien peräsimien ruostumatonta teräslevypäällystettä korjattiin paikoin. Valmistajan specialistit huolsivat Jastram-rullat verstaalla.

Turku Repair Yard 21–25.1.07. 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. Vaurioituneet ruostumattomat te-

⁴⁹ Tiedot Ilmatieteen laitokselta 4.6.2010.

⁵⁰ "Plastic metal applied for filling of clearance between pintle bushes and rudder horns." Memorandum on määritelty luokan säännöissä seuraavasti (Part A, Ch.2, Article 2, 2.1.6): "Those defects and/or deficiencies which do not affect the maintenance of class and which may therefore be cleared at the Owner's convenience and any other information deemed noteworthy for the Society's convenience are indicated as memoranda. Memoranda are not to be regarded as recommendations." Suositus sen sijaan tarkoittaa jonkin määräjän sisällä korjattavaa puutetta. Memorandumluettelo on siten muistilista asioista, jotka tulee aika ajoin tarkastaa ja se on luokitustodistuksen liite.

⁵¹ Inspecta Oy:n tarkastuspöytäkirja 3.9.2004 magneettijauhetarkastuksesta. Pinnan laatu "valettu, esipuhdistus hiekkapuhalluksella".

räslevyt peräsimien keskilaivan puoleisilta pinnoilta uusittiin. Ulkopinnat olivat hyväksyttävissä kunnossa. Jastram-rullat irrotettiin huoltoa varten. Jastram-rullien suojalevyt uusittiin SB-puolella. Molempien peräsinsarvien kavitaatiovauriot korjattiin päällehitsaamalla. Seuraavassa parhaat tutkintalautakunnan saamista kuvista, jotka on otettu vuoden 2007 telakoinnin aikana. Niissä näkyy SB-puolen alalaakeri.

Peräsinsarvessa näyttää olevan syöpymiä, jotka korjattiin päällehitsauksella. Hitsaus on saattanut nostaa epoksin lämpötilaa. Lämpötilan tulisi pysyä alle 120 asteessa⁵².



Kuva 28a ja b SB-alalaakeri kuvattuna vuonna 2007. (Bureau Veritasin tarkastaja).



Kuva 28c. Suurennos vasemmanpuoleisesta kuvasta. Näkyvissä on ala-akselin yläpää, jonka reunassa on epoksia. Ympäristö on ruosteessa.

Remontowa, Gdansk, 30.11–18.12.09. SB-peräsinakseli oli poikki ja BB-peräsinakselissa todettiin säröjä kartio-osan yläosassa. Myös peräsimissä, peräsinsarvessa ja peräsinsarven yläpuolella löydettiin säröjä. SB-puolella alalaakerissa epoksi oli poissa kokonaan, BB-puolelta osittain. Irrotettaessa BB-puolen pronssiholkkia, osa epoksista jäi pesään kiinni, kuva 29a. Holkki jouduttiin irrottamista varten leikkaamaan kahtia. Epoksi jouduttiin paikoin irrottamaan hakkaamalla piikkivasaralla. SB-alalaakerin holkki oli pesässään löysällä ja pudonnut alas kiinni peräsimeen.

⁵² VTT:n mittausten mukaan vastaavan koevalun lujuus säilyi 230 asteeseen (kokeen maksimilämpötila) saakka.

Peräsimet irrotettiin ja niiden vauriot korjattiin verstaalla. Peräsinsarven ulkopinnalla havaittiin voimakasta syöpymistä. Syöpymät korjattiin päälle hitsaamalla, vaikka myös Belzonaa harkittiin. Ala-akselin siirtymävaraksi SB-puolen alalaakerin alaosaan todettiin noin 20 mm. Ruostumaton teräspäällyste oli vaurioitunut ja se poistettiin. Asennettiin uudet peräsinakselit ja hieman alkuperäistä paksummat alalaakerien holkit, joissa on olake sekä uudet akselien ruostumattomasta teräksestä tehdyt holkit. Peräsinlavan levytystä korjailtiin paikoin uudella levyllä ja paikoin päälle hitsaamalla. Myös peräsinkoneet irrotettiin ja niiden valmistaja huolsi ne telakan verstaalla. Jastram-rullat poistettiin ja niiden tilalle asennettiin muotoiltu teräslevy.



Kuva 29a Epoksin irrotus menossa BB-puolella (Trafín kuva 5.12.2009).

Kuvassa 29b on menossa BB-puolen alalaakerin pesän päälle hitsaus. Pesä (peräsin-sarven alaosa) oli syöpynyt molemmiin puolin niin paljon, että sen lujuus ei luokituslaitoksen sääntöjen mukaan sallinut tilanteen korjaamista vain ulkopuolisella päälle hitsauksella ja paksummalla pronssiholkilla.



Kuva 29b. Alalaakerin BB-pesän korjausta päälle hitsaamalla. Osittain on näkyvissä pesän ulkopuolista päälle hitsausta, pysty- ja vaakasuuntaan hitsattuja alueita. Kuvattu 7.12, luokituslaitoksen kuva.

Kuvassa päälle hitsaus ulkopuolelta oli jo tehty. Kuusi luokkahitsaria oli työssä ympäri vuorokauden noin viikon ajan. Työ oli erittäin vaativaa, koska se tehtiin mahdollisimman nopeasti ja samalla kappaleen lämpötilaa tuli jatkuvasti tarkkailla⁵³. Lopuksi sisäpuoli avarrettiin uuden pronssiholkin mittoihin ja ulkopuoli hiottiin sileäksi.

Varustamolla oli varastossa varalla yksi peräsinakselin aihio (se korvasi onnettomuudessa katkenneen akselin). Syynä saattaa olla alun perin asennetun akselin työstössä sattunut pieni virhe; se otettiin kuitenkin käyttöön. Vara-akseli tuotiin alukselle Turussa 24.11.2009. Alukselle toimitettiin varalle ylälaakerien pronssiholkit ja peräsinakselin ruostumattomat teräsholkit.

⁵³ Päälle hitsausta varten oli sovittu lämpötilan mittausmenettely hitsausprosessin hallintaa varten.

1.6 Laakerivälykset ja alalaakerin liikevara

1.6.1 Välykset

Alalaakeri

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 tulkinnalle. *Rakotulkillä*, ns. käärmeelellä, kuva 30, saadaan selville holkkien (ruostumaton teräs ja pronssi) välisen raon suuruus mittauskohdasta laakerin alareunassa. Välys on vastakkaisilta puolilta mitattujen rakojen summa.



Kuva 30. Taipuva rakotulkki, "käärmeeleli".⁵⁴

Toinen yleinen välysten mittaustapa on *tunkkaus tai talja*. Peräsimä työnnetään tunkilla (tai vedetään taljalla), kunnes ruostumaton teräsholkki osuu pronssiholkkiin; ts. liike loppuu. Siirtymä luetaan mittakellosta. Vastakkaisiin suuntiin mitattujen siirtymien summa on välys. Tunkkia varten hitsataan aluksen runkoon tai peräsinsarveen peräsimen viereen tuki. Tunkkausvoiman suuruus on muutama tonni.

Taulukossa 4 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. Varmoina oletetut mittaustavat on merkitty harmaalla.

Viimeisin telakointiväli oli pisin, yli 34 kk. Alun perin sen piti olla noin 30 kk, mutta sille oli pyydetty jatkoaikaa maaliskuuhun 2010, joten väliksi olisi tullut 37 kk⁵⁵.

⁵⁴ Kuva Naantalin korjaustelakan mittasarjasta

⁵⁵ Telakointi tulee tehdä kaksi kertaa 5 vuoden sisällä, väli ei saa olla yli 36 kk. Tarkemmin kohdassa 1.10.

Taulukko 4. Aluksen telakoinnit ja alalaakerien välysten mittaukset⁵⁶. Ainakin telakoinneissa vuosina 1997 ja 2007 peräsin oli käännetty sisään, eivätkä mittaustulokset ole vertailukelpoisia. 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
4.12.09	34,3	4,43	3,80	3,42	2,13	Remontowa, Gdansk	20	holkki-akseli
17.12.09		1,80	1,80	1,80	1,75	Remontowa, Gdansk		holkki-akseli

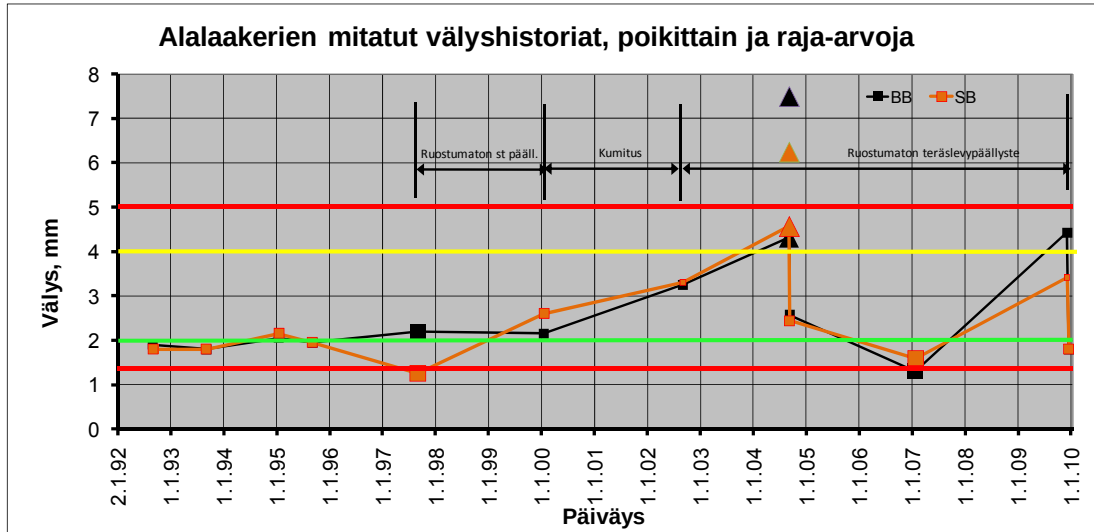
Mitatut alalaakerin välykset poikittaissuunnassa ja eräät välyksen raja-arvot on esitetty kuvassa 31. Vuonna 2004 välykset määritettiin holkin sisähalkaisijan ja ala-akselin ulkohalkaisijan erotuksena niiden ylä- ja alaosaista, joista taulukossa 4 on näytetty pienempi tulos. Kuvan viiva on vedetty pienemmän arvon kautta; myös suuremmat arvot on näytetty (kolmiot).

Luokituslaitoksen tarkastaja ei aina seuraa välysmittausta, vaan kirjaa tuloksen telakan mittausraportista. Eri aikoina tehtyjen välysten mittaustulosten vertailukelpoisuutta ei ole tutkinnassa pystytty varmistamaan.

Kuluminen on yleensä epätasaista, koska peräsinakseli ja peräsinsarvi taipuvat ja voimat ovat suurimmat sivusuunnassa. Alalaakeriin vaikuttava voima on noin 1,2 kertaa peräsinvoima välysten ollessa normaalit.

Käytännössä pronssiholkit uusitaan jos vällys ylittää selvästi 2 mm. Tällä pyritään estämään välyksen kasvu liian suureksi telakointien välillä (2–3 vuotta). Pronssiholkin vaati-man toimitusajan vuoksi uusi holkki tilataan seuraavaan telakointiin, jos välyksen on havaittu kasvaneen. Luokituslaitoksen tarkastuksen yhteydessä tulee arvioida miten välykset saattavat muuttua seuraavaan tarkastukseen mennessä. Arviointi perustuu aiempiin mittauksiin.

⁵⁶ Kaltevalla fontilla on merkitty epäluotettavat mittaukset, niistä paksulla fontilla merkityt on otettu kuvaan.



Kuva 31. Alalaakerin välysmittauksia, vastaa taulukkoa 3. Suuremmalla neliöllä on näytetty mittaukset, joissa peräsin oli käännetty sivulle. Suurimmat välysmittauks tulokset 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 EUROPAN peräsinakselin mitoilla. Myös eri päällystysten aikavälit on esitetty.

Kuvan 31 perusteella voidaan todeta, että välykset alkoivat selvemmin kasvaa vuoden 2000 jälkeen. Välyksen kasvu johtunee pääosin pronssiholkin kulumisesta, johon voivat vaikuttaa alalaakeriin kohdistuvat suuret voimat, laakerin asennon muutokset esim. pesän syöpymisen johdosta tai laakeriin päässeet kuluttavat aineet, esim. potkurivirran irrottaman pohja-aineen mukana tullut hiekka. Pitkän ajan kuluessa myös ala-akselin ruostumattomasta teräksestä valmistettu päällysholkki kuluu hieman.

Ylälaakeri

Ylälaakerin rakenteen johdosta (kuva 7a) sen välyksen mittaus rakotulkillä on vaikeaa ja tiiviste voisi vaurioitua. Ylälaakerin välykset saatetaan jättää tarkastamatta, mikäli alalaakerin välykset ovat normaalit. Kun peräsin on poistettu, välysmittaus voidaan tehdä rakotulkillä tai tunkkaamalla. Mikäli peräsin on paikallaan, tunkkausvoima kasvaa, koska myös sarven on taivuttava. Tavasta riippuen tarvittava tunkkausvoima on 6–20 tonnia.

Alkuperäisessä piirustuksessa esitetyt ylälaakerin mitat ovat: peräsinakseli, jonka päällä ruostumatonta teräspäällyste, halkaisija 430 mm ja pronssiholkin sisähalkaisija 431,8 mm. Valmistajatelakalla syyskuussa 1992 mitaamat ylälaakerin välykset poikkisuuntaan olivat BB-akselilla 1,80–1,87 mm ja SB-akselilla 1,65–1,73 mm. Myöhemmin välykset oli mitattu vain ensimmäisinä vuosina ja sen jälkeen vasta 2002, 2004 ja 2009. Välys pysyi BB-puolella noin 2 mm:ssä ja SB-puolella se kasvoi hieman yli 2 mm:iin. Vuoden 2009 telakoinnissa välyksiksi tulivat BB-puolella 1,75–2,37 mm ja SB-puolella 1,67–2,38 mm.

Vuonna 2009 todettiin myös, että ylälaakerin holkki oli kulunut alhaalla enemmän kuin ylhäällä, taulukko 5. SB-holkki oli alhaalta ohentunut sivusuunnassa 0,34 mm ja BB-

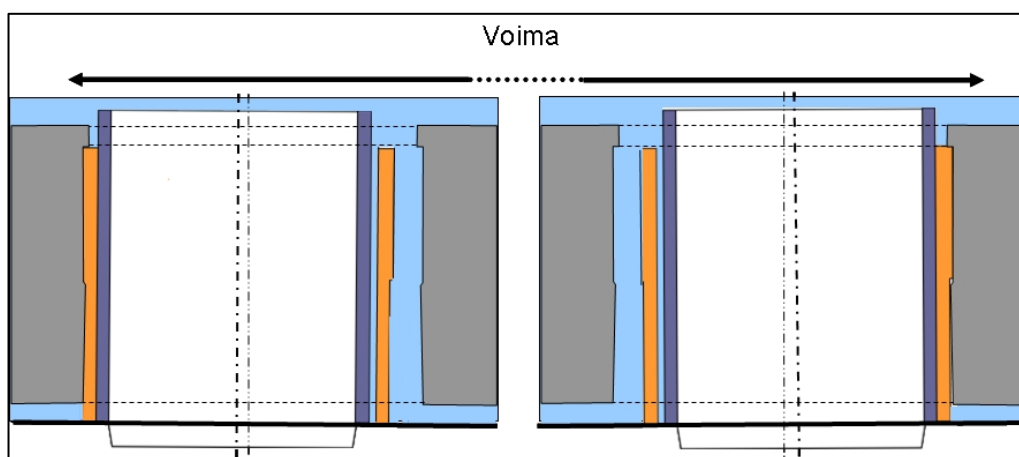
holkki 0,31 mm. Nämä holkit asennettiin kuitenkin takaisin, mutta varustamo tilasi uudet varalle.

Taulukko 5. Ylälaakerin mitat peräsimen paikalleen asennuksen jälkeen 2009. Kirjaimella H on merkitty mitat poikittain ja kirjaimella V pitkittäin. Kirjain d tarkoittaa peräsinakselin ulkohalkaisijaa, kun siinä on ruostumaton teräspäällyste. Kirjain D tarkoittaa pronssiholkin sisähalkaisijaa.

SB				BB			
Rudder stock pintle - NEW Ø d ₁		Bush of the ruder stock Ø D ₁		Rudder stock pintle - NEW Ø d ₁		Bush of the ruder stock Ø D ₁	
Ø V	Ø H	Ø V	Ø H	Ø V	Ø H	Ø V	Ø H
429,99	429,98	431,66	431,67	429,93	429,93	431,68	431,68
98	99	66	72	93	92	67	73
98	98	76	90	92	92	72	88
97	97	93	432,35	93	93	83	432,30

1.6.2 Alalaakerin liikevara

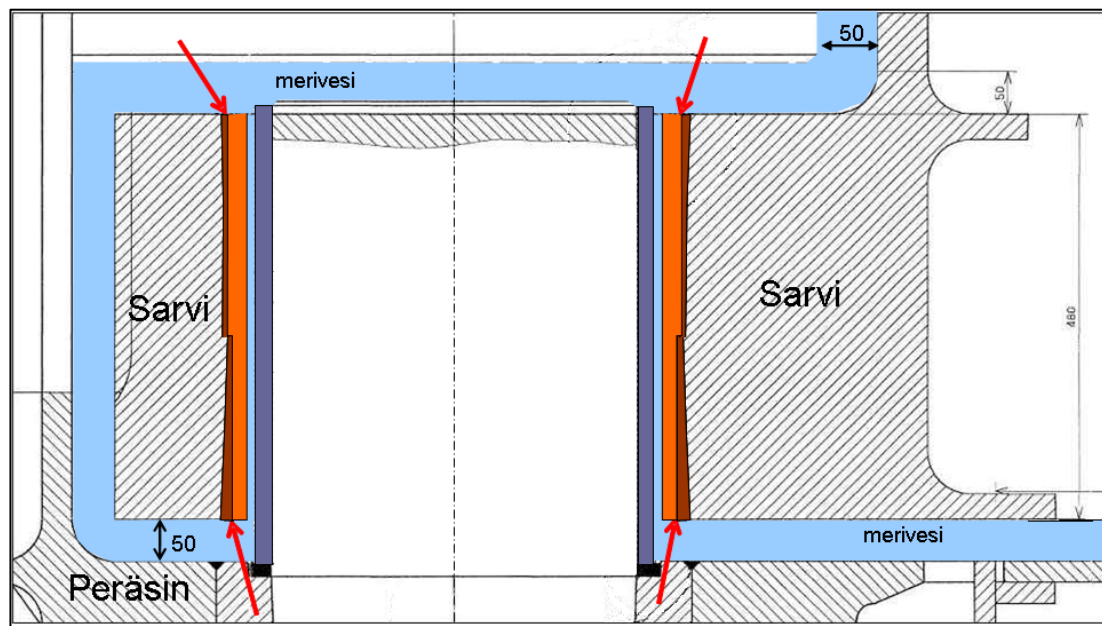
Normaalisti alalaakeri voi liikkua sivusuunnassa vain välyksen puolikkaan verran. Jos laakeripinnat ovat voimakkaasti kuluneet, välyksestä johtuva liikemahdollisuus kasvaa. Liikemahdollisuus kasvaa lisää, mikäli holkin pesä syöpyy, kuva 32a. Kuvassa syöpyminen on oletettu niin suureksi, että holkki on pudonnut. Tilanne oli tällainen aluksen tullessa telakalle vuonna 2004. Kuvassa 32b on esitetty tilanne tarkemmin alkuperäisen alalaakerin piirustuksen avulla. Jatkossa alalaakerin liikemahdollisuutta yleensä kutsutaan termillä *liikevara*. Se on erisuuruinen alalaakerin eri korkeuksilla ja eri kohdissa kehällä.



Kuva 32a. Alalaakeri katsottuna perästä. Vasemmalla peräsinakseli on taipunut vasemmalle ja oikealla oikealle. Ala-akseli ja pudonnut holkki siirtyvät ± 15 mm puolelta toiselle pesän syöpmisen johdosta. Samalla peräsin kallistuu. Pesän korkeus on 480 mm ja laakerin halkaisija 533 mm.

Ala-akseli liikkuu poikittain noin 8 kertaa sekunnissa, mikä saa veden liikkeelle välyksessä ja syöpyneessä tilassa (sekä vuoden 2004 jälkeen ruuvien kuusiokoloissa) nopeuttaen syöpymistä.

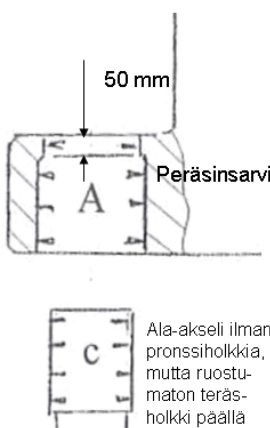
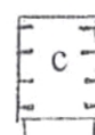
Peräsinakselin taipumisen kannalta oli SILJA EUROPA:n tapauksessa ratkaiseva merkitys *alalaakerissa tapahtuneella syöpymisellä*, joka moninkertaisti pelkästään välyksen mahdollistaman taipuman. Syöpyminen johtui galvaanisesta korroosiosta, katso kohta 1.8.3. Syöpyminen lähes pysähtyi vuoden 2004 korjauksen jälkeen.



Kuva 32b. Alalaakerin alkuperäinen rakenne ja tarvittava pesän syöpyminen ympäri pesän (ruskea), jotta alkuperäinen pronssiolkki voisi pudota. Punaiset nuolet esittävät korroosion alkukohtia.

Punaisilla nuolilla on kuvassa 32b näytetty galvaanisen korroosion todennäköiset alkukohtat. Ruskealla on näytetty arvioitu syöpymä ennen holkkien putoamista vuonna 2003–2004. Syöpymä eteni alhaalta ylös ja ylhäältä alas, minkä vuoksi pesän keskellä oli pienimmän syöpymisen alue holkin pudotessa. Syöpymän täytyi olla ympäri koko pesän suurempi kuin holkin olakkeen paksuus, jotta holkki voi pudota. Holkin pudottua myös peräsimen teräspinta sarven alapuolella alkoi kosketuskohdassa syöpyä.

Ala-akselin liikevara saadaan selville mittaamalla alalaakerin pesän aukon ja ala-akselin halkaisijat. Telakoinneissa 2004 ja 2009 tehtiin näin⁵⁷. Tulokset on näytetty kuvassa 33. (Tuloksia on myös kuvissa 34).

	BB, "ehjä"				SB, "poikki"			
	Rudder horn – housing of the blade pintle bush - Ø A				Rudder horn – housing of the blade pintle bush - Ø A			
	Fore – Aft.		P.S. – S.B.		Fore – Aft.		P.S. – S.B.	
	541	~542	543	~542	543	~545	546	~545
	553	~562	562	~564	551	~563	560	~566
		~555		~564		~555		~567
	556	~556	562	~568	551	~558	562	~573
	Pintle of the rudder blade - Ø c				Pintle of the rudder blade - Ø c			
	Fore – Aft.		P.S. – S.B.		Fore – Aft.		P.S. – S.B.	
	479,85		479,19		479,80		479,42	
	78		34		78		47	
	85		39		78		48	
	75		42		73		48	

Kuva 33. Alalaakerin pesän mitat ennen korjauksia vuosina 2004 ja 2009. Mitat vuonna 2004 on näytetty punaisella. Mittaukset vuosina 2004 ja 2009 oli tehty korkeussuunnassa eri kohdista. Ala-akselin mitat, kuvassa alhaalla, ovat vuoden 2009 telakoinnista.

Alalaakerin pesän poikkileikkaus ei ole ympyrä, se on leveämpi poikkisuunnassa. Tässä suunnassa peräsinvoimien laakeripintoihin ja siten myös pesän seinämään kohdistuva paine on suurin. Kun myös pronssiholkkien kuluminen⁵⁸ otetaan huomioon, saadaan ala-akselien liikevaroiksi⁵⁹ vuosina 2004 ja 2009 taulukoiden 4a – 4d mukaiset arvot.

Taulukko 4a. SB-alalaakerin liikevaran laskelma ennen telakointia 2004.

SB alalaakeri tultaessa telakalle 2004								
	poikittain				pitkittäin			
Paikka	pesä	akseli	holkki	liikevara	pesä	akseli	holkki	liikevara
Ylhäällä	544	479.6	23.6	8.6	541	479.9	23.7	6.85
50 mm alempana	556	479.6	23.6	14.6	550	479.9	23.7	11.35
puolivälissä	559	479.6	22.9	16.8	550	479.9	23.2	11.85
alhaalla	560	479.6	22.9	17.3	550	479.9	23.2	11.85

⁵⁷ Naantalin Korjaustelakan mittauspöytäkirjat 2004 ja REMONTOWA S.A, mittauspöytäkirjat 9503 ja 9504/2009, 6.12.2009.

⁵⁸ Laivakone Oy:n mittauspöytäkirja 2004 ja VTT:n mittaukset 2010

⁵⁹ Liikevara lasketaan taulukon sarakkeiden avulla seuraavasti: (pesä-akseli)/2-holkki.

Taulukko 4b. SB-alalaakerin liikevaran laskelma onnettomuuden jälkeen.

SB alalaakeri tultaessa telakalle 2009								
	poikittain				pitkittäin			
Paikka	pesä	akseli	holkki	liikevara	pesä	akseli	holkki	liikevara
Ylhäällä	545	479.4	23.8	9	545	479.8	23.8	8.8
50 mm alempana	565	479.4	23.8	19	560	479.8	23.8	16.3
puolivälissä	567	479.5	24.5	19.25	556	479.8	24.5	13.6
alhaalla	573	479.5	24.5	22.25	558	479.7	24.5	14.65

Taulukko 4c. BB-alalaakerin liikevaran laskelma tultaessa telakalle 2004.

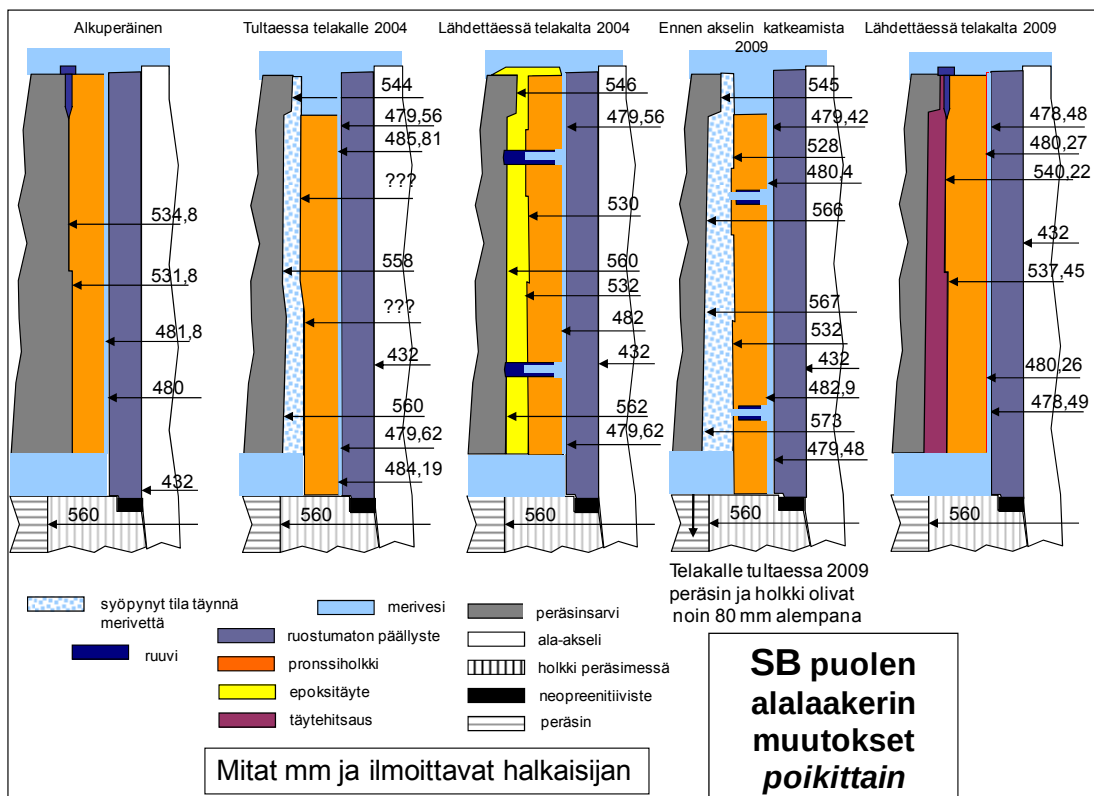
BB alalaakeri tultaessa telakalle 2004								
	poikittain				pitkittäin			
Paikka	pesä	akseli	holkki	liikevara	pesä	akseli	holkki	liikevara
Ylhäällä	541	479.4	23	7.8	540	479.9	24.1	5.95
50 mm alempana	560	479.4	23	17.3	550	479.9	24.1	10.95
puolivälissä	560	479.5	23.1	17.15	551	479.8	23.1	12.5
alhaalla	560	479.5	23.1	17.15	555	479.8	23.1	14.5

Taulukko 4d. BB-alalaakerin liikevaran laskelma onnettomuuden jälkeen.

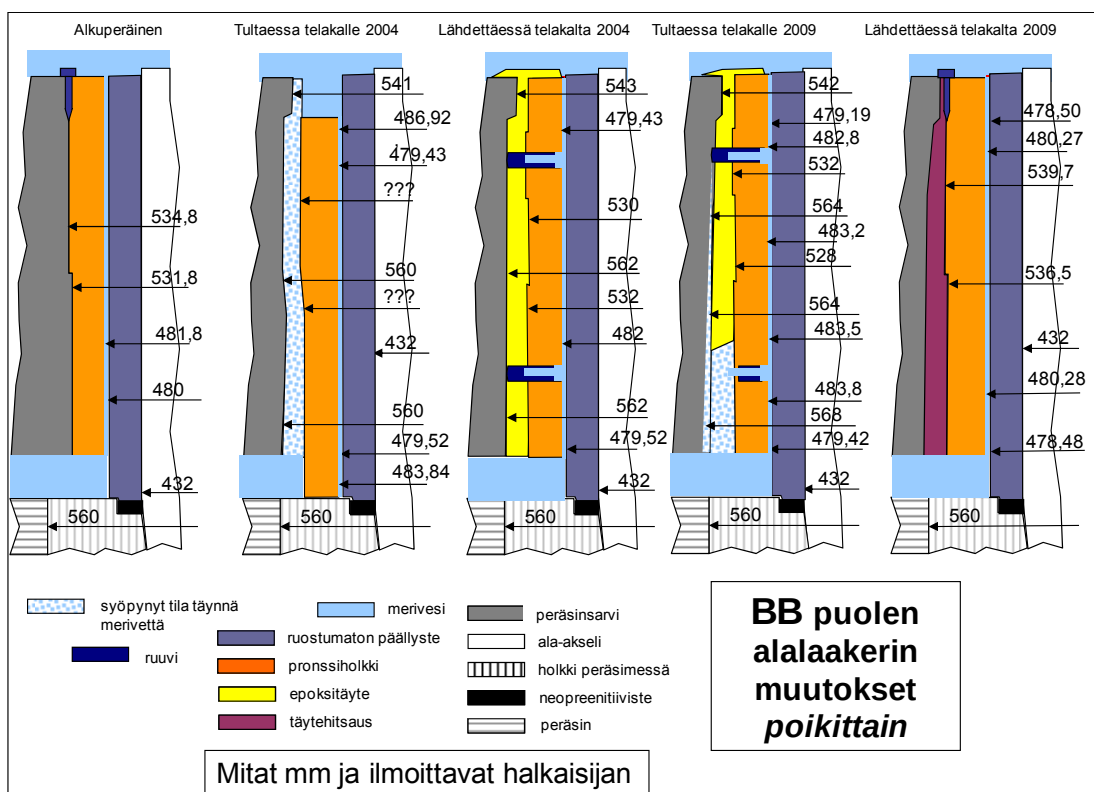
BB alalaakeri tultaessa telakalle 2009								
	poikittain				pitkittäin			
Paikka	pesä	akseli	holkki	liikevara	pesä	akseli	holkki	liikevara
Ylhäällä	542	479.2	23.7	7.7	542	479.9	23.7	7.35
50 mm alempana	564	479.2	23.7	18.7	562	479.8	23.7	17.4
puolivälissä	564	479.4	24.7	17.6	555	479.8	24.7	12.9
alhaalla	568	479.4	24.7	19.6	556	479.8	24.7	13.4

Kuvissa 34a ja b on esitetty tärkeimmät alalaakerien rakenteet eri aikoina poikittain tehtyjen mittausten perusteella. Vastaavat rakenteet pitkittäin tehtyjen mittausten perusteella ovat liitteessä 1. Kuvia laadittaessa on oletettu, että vuonna 2004 holkin kohdalle jäänyt mahdollinen pesän olake hiottiin pois ja seinämää tasoitettiin myös muualta, jolloin ainesta poistettiin todennäköisesti 1-2 mm.

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



Kuva 34a. SB-alalaakerin eräät poikittaiset mittaustulokset.



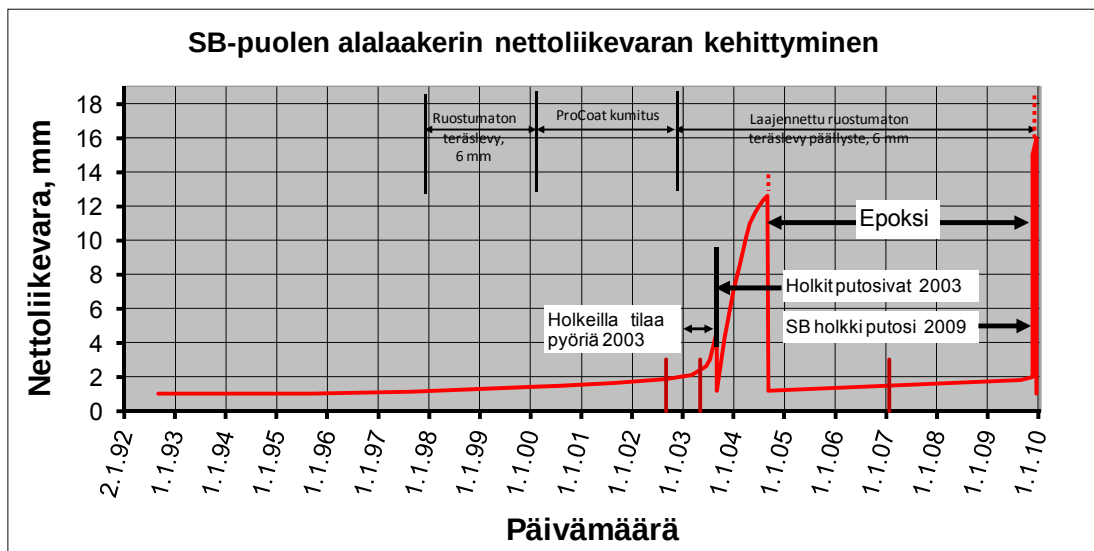
Kuva 34b. BB-alalaakerin eräät poikittaiset mittaustulokset.

BB-alalaakerissa oli valuepoksista pääosa jäljellä.

Gdanskissa tilanne palautettiin vastaamaan alkuperäistä rakennetta siten, että pronssi-holkin paksuutta kasvatettiin noin 2,5 mm⁶⁰, sen sisähalkaisijaksi työstettiin noin 480,3 mm ja ala-akselin paksuudeksi noin 478,5 mm.

Kun otetaan huomioon alalaakerin pesän muoto ja pinnan mahdolliset epätasaisuudet, tullaan käsitteeseen ”**nettoliikevara**”, jossa on likimäärin otettu huomioon holkin ulko-reunan muoto, pesän soikiomuoto ja seinämän epätasaisuus. Nettoliikevara kertoo, paljonko ala-akseli todellisuudessa voi siirtyä tiettyyn suuntaan, yleensä poikittain tai 10–15 astetta poikittaissuunnasta jompaankumpaan suuntaan (peräsinkulman verran). Se on pienempi kuin liikevara.

Yhdistämällä edellä esitetyt mittaustulokset ja arviot syöpymän etenemisestä tutkintalautakunta on päättänyt seuraavaan näkemykseen alalaakerien nettoliikevaran kehittymisestä, kuvat 35a ja 35b. Katkoviivoilla on näytetty arvioitu epävarmuusalue. 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

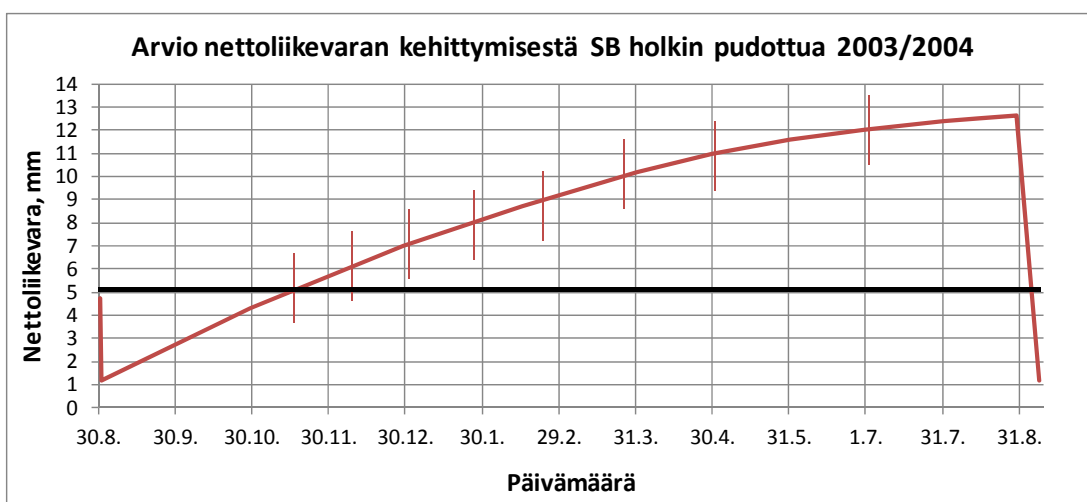


Kuva 35a. Arvio SB-alalaakerin **nettoliikevaran** kehittymisestä. Holkin pudotessa 2009 epoksia on oletettu jäävän vielä paikoilleen. Epoksin poistuttua liikevara kasvoi hyppäyksenomaisesti. Katkoviiva näyttää maksimiarvion. (BB-puolella putoaminen vuonna 2003 saattoi tapahtua noin kuukauden verran aikaisemmin. Vuonna 2009 nettoliikevara oli alle 2 mm.) Telakointiajan kohdat vuosina 2002, 2003 (välyksiä ei tarkastettu) ja 2007 (välysmittaus ei ollut vertailukelpoinen) on näytetty ruskealla pystyviivalla.

⁶⁰ Holkki tuli vahvemmaksi ja samalla vähennettiin aukon pienentämisessä tarvittavaa päälle hitsausta.

Kun holkit putosivat, nettoliikevara kuvassa 35a pieneni välyksen suuruiseksi (katso kuva 32b), koska pesän seinämässä oli holkin vastinolake. Holkit pyörivät 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.

Kuvassa 35b on myös väsymislaskelmien perusteella määritetty likimääräinen nettoliikevaran raja-arvo (noin 5 mm), jonka alapuolella vaihtojännitys on ikuisen keston⁶¹ alueella, katso kohta 1.9.8.



Kuva 35b. **Nettoliikevaran** kehittymisarvio, joka on tarkennettu kuvasta 35a. Kuvan pystyviivojen avulla on arvioitu yli 5 mm nettoliikevarojen kestot 1 mm välein. Tutkinnassa on arvioitu, että BB puolen holkki saattoi pudota hieman aiemmin.

BB-puolella liikevara oli hieman suurempi kuin SB-puolella, joten voidaan olettaa BB-puolen holkin pudonneen aiemmin.

Vuoteen 2009 mennessä edenneen muutaman millimetrin lisäsyöpymisen 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)**. BB-puolella liikevara pysyi pienenä, koska epoksi oli suurelta osin paikoillaan. Liikevaran kasvu vuodesta 2004 vuoteen 2009 oli vähäistä epoksitäytteen johdosta ja koostui telakoinnin yhteydessä 2004 tehdystä pesän hionnasta, vähäisestä syöpymisestä ja pesän kulumisesta. Lisäksi on huomattava, että uusi pronssiholkki oli hieman paksumpi.

⁶¹ 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.

1.6.3 Alalaakerin liikevara ja peräsinakselin jännitykset

Alalaakerin nettoliikevaran historialla on merkittävä vaikutus arvioitaessa väsymisilmiön kehittymistä. Vaikka peräsimen kohdistuvat peräsinvoimat voidaan liikennöintikausittain pitää samana, peräsinakselin **staattinen** jännitys vakiovoimalla kasvaa voimakkaasti nettoliikevaran kasvun myötä. Tämä jännitysten kasvu on tapahtunut kaksi kertaa, ennen vuoden 2004 telakointia hitaasti molemmissa peräsinakseleissa ja vuoden 2009 marraskuussa äkillisesti SB-peräsinakselissa. Näiden huippujen välissä jännitykset olivat muutaman vuoden normaalit.

Staattinen jännitys on puolestaan potkuriherätteistä syntyvien vaihtojännitysten keski-jännitys, katso kohta 1.9.1 ja liite 6. Tästä johtuen myös väsyttävän kuormituksen suuruus riippuu nettoliikevarasta.

Liikevaran vaikutusta peräsinakselin taivutusjännitykseen on tarkasteltu likimääräisesti⁶² peräsinen palkkimallin avulla, liite 5. Peräsinakselin kriittinen kohta on ylälaakerin alaosassa, jossa jännitys on suurin ja jossa katkeaminen tapahtui.

Kuvassa 36 on esitetty peräsinakselin taivutusjännityksen riippuvuus taivuttavasta voimasta. Sininen, paksu käyrä vastaa tilannetta, jossa peräsinakselin ja peräsinen muodostama palkki taipuu ulokepalkkina, ilman peräsinsarven antamaa tukea. Akselin myötörajan ylittyessä, tilanne muodostuu epätarkaksi, minkä vuoksi kuvassa on kaksi rajakäyrää⁶³.

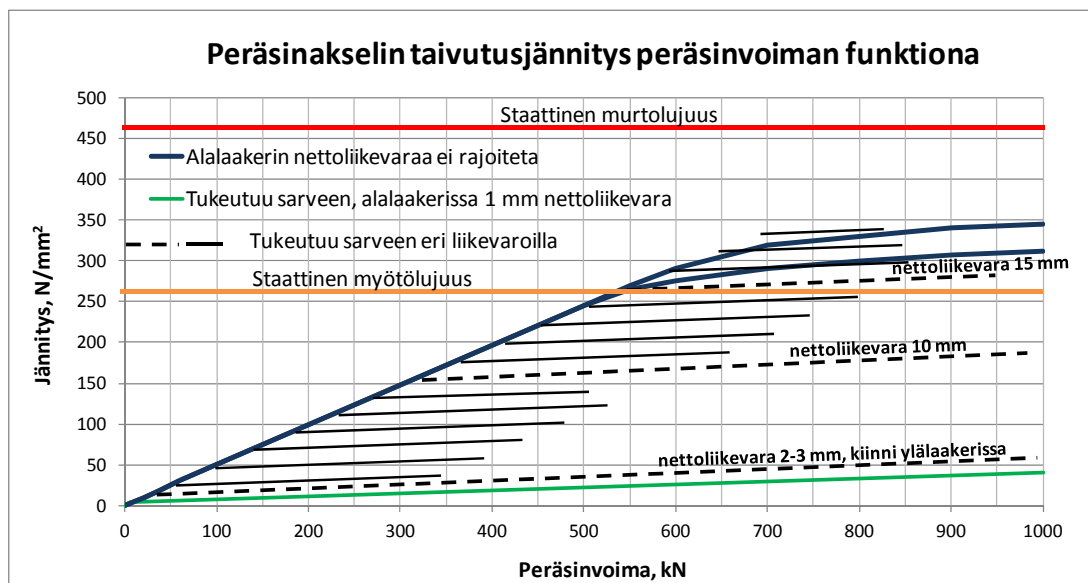
Noin 50 kN voimalla ala-akseli osuu pronssiholkkiin ja voiman kasvaessa peräsinsarvi alkaa myös kantaa kuormaa, mikäli nettoliikevara on 1 mm (vällys 2 mm), vihreä suora. Välysten pysyessä sallituissa rajoissa, sarvi kantaa pääosan kuormasta. Esimerkiksi 600 kN voimalla alalaakeri siirtyy lisää runsaan 1 mm sarven taipuman ja kiertymän johdosta. Tällöin peräsinakseli ei vielä kosketa ylälaakeria. Peräsinakselin taivutusjännitys on tuolloin noin 25 N/mm².

Jos alalaakerissa on yli noin 6 mm vällys (3 mm nettoliikevara), niin yli 50 kN voimilla peräsinakseli taipuu kiinni ylälaakeriin ja voiman kasvaessa se taipuu ulokepalkkina, joka on tuettu myös ylälaakerin alareunasta, alin katkoviiva. (Maksimi sallittu vällys on 5 mm).

Kuvaan on merkitty myös millimetrin nettoliikevaran välein kohta, jossa sarvi alkaa kantaa. Jännityksen kasvu voiman kasvaessa hidastuu sarven tullessa mukaan.

⁶² CBeam 2000 –ohjelma, <http://www.seaoc.org/software.html>.

⁶³ Peräsinä taivuttavien voimien muutoksista syntyvien peräsinakselin maksimijännitysten kesto-aika on niin lyhyt, että jännitys voi ylittää standardinmukaisessa vetokokeessa saadun myötölujuuden.



Kuva 36. *Ehjän peräsinakselin taivutusjännityksen riippuvuus peräsinvoimista erisuuruisilla 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.*

Ilman sarven kannatusta taivutusjännitys peräsinakselissa kasvaa noin 50 N/mm² peräsinvoiman 100 kN kasvua kohti. Sarven ollessa mukana kannattamassa, vastaava jännityksen kasvu on vain noin 5 N/mm². Yli 14–15 mm nettoliikevaralla akseli myötää, jos voima ylittää noin 550 kN.

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 kohti⁶⁴.

Ylälaakerin kohdalla peräsinakseliin vaikuttaa leikkausvoima, jonka synnyttämä jännitys on vähäinen silloin kun alalaakeri on kunnossa. Ylälaakeriin ei kohdistu lainkaan voimaa, koska peräsinakseli ei taivu siihen kiinni. Alalaakerin nettoliikevaran kasvaessa ylälaakeriin kohdistuva leikkausvoima kasvaa ja samoin peräsinakselin leikkausjännitys. Käytännössä suurillakin alalaakerin nettoliikevaroilla määräävänä on väännöstä ja taivutuksesta muodostuva yhdistetty jännitys, jota on laskelmissa käytetty.

⁶⁴ Vääntöjännitys peräsinakselissa vaihtelee peräsiimeen kohdistuvan virtauksen ja peräsin kääntönopeuden mukaan. Lisäksi jäissä ohjailtaessa voi syntyä suuria vääntömomenteja. Vääntömomentti on SILJA EUROPA:n peräsimellä kuljettaessa eteenpäin noin 0,4 x peräsinvoima (peräsinlavan paineakeskiö on noin 0,4 m peräsinakselin keskiöstä perään päin). Luokituslaitoksen maksimivääntömomentti mitoitusvoimasta varten on noin 600 kNm ja sitä vastaava vääntöjännitys 47 N/mm².

1.7 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.

1.7.1 Numeerinen data

SILJA EUROPA:n VDR-laitteiston tallentamasta 180 muuttujasta *valittiin* tutkinnan tarkoitukseen noin 50, jotka tulostettiin ja muokattiin jatkokäsittelyä varten. Analysoinnin ja laskennan käyttöön tarvittiin lopulta noin 20 kpl. Datan käsittelyä vaikeutti se, että tallennetut muuttujat eivät kaikissa tapauksissa olleet suoraan käyttökelpoisessa muodossa. Tarvittiin monessa tapauksessa kalibroitukertoimien määrittämistä. On mahdollista, että tässä vaiheessa on syntynyt pientä epätarkkuutta. Lisäksi lähes kaikissa vuorokauden pituisissa otoksissa oli muutaman tunnin ajan virheellistä dataa. Se korvattiin onnistuneesti tallentuneella vastaavalla datalla. Tilastollisen jatkokäsittelyn vuoksi tällä ei katsota olevan vaikutusta lopputuloksiin. Suurimmat peräsinkulmat, jotka ovat olleet selvästi virheellisiä, on joissakin tapauksissa jouduttu käsin korjaamaan.

Tutkintalautakunnan toimeksiannosta laskettiin SILJA EUROPA:n ohjailun simulointimallin avulla peräsiimeen vaikuttaneet pitkittäis- ja poikittaissuuntaiset (alukseen nähden) *voimat* käyttäen hyväksi aluksen nopeus-, peräsinkulma-, kääntymisnopeus- sekä potkurin kierrosluku- ja nousutietoja⁶⁵. Näin saadut tiedot *lajiteltiin* siten, että saatiin tilastollinen arvio erisuuruisten voimien, potkurin kierroslukujen ja aluksen nopeuden esiintymistiheyksistä.

Tietoja käytettiin seuraaviin tarkoituksiin:

- Ohjailun simulointimallilla laskettiin peräsinvoimat⁶². Voimista määritettiin peräsinakselia taivuttavan voiman suuruus ja suunta. Lasketut voimat yhdistettyinä nopeuksiin ja kierroslukuihin laadittiin yleisyystilasto, jonka pohjalta voitiin laatia peräsinakseleita rasittavien jännitysten tilasto.
- 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 reittiin⁶⁶.

⁶⁵ Simulco Oy:llä teetettiin VDR-datan perusteella tarkastelluilta kuudelta vuorokaudelta laskelmat peräsiimeen kohdistuneista voimista ja vaurioajankohdan lähellä aluksen liiketilasuureiden siirto samapaikkaisiksi sekä aluksen reittioppiros paikkatietojen perusteella.

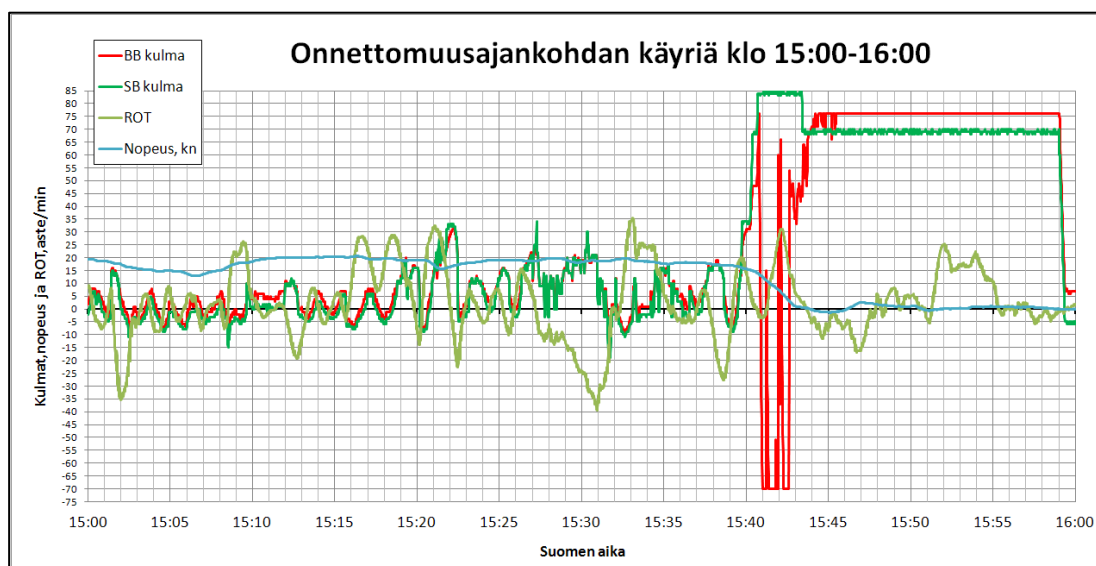
⁶⁶ Simulco Oy

Tietojen suuren määrän johdosta – tallennus oli tehty sekunnin välein – valittiin käsitte-
lyyn 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.

Näillä valinnoilla haluttiin varmistaa, että mukaan saadaan tiedot, kun peräsin oli toden-
näköisesti vielä kunnossa. Samalla tilastopohja tuli laajemmaksi ja tutkintalautakunnan
käsityksen mukaan riittäväksi.

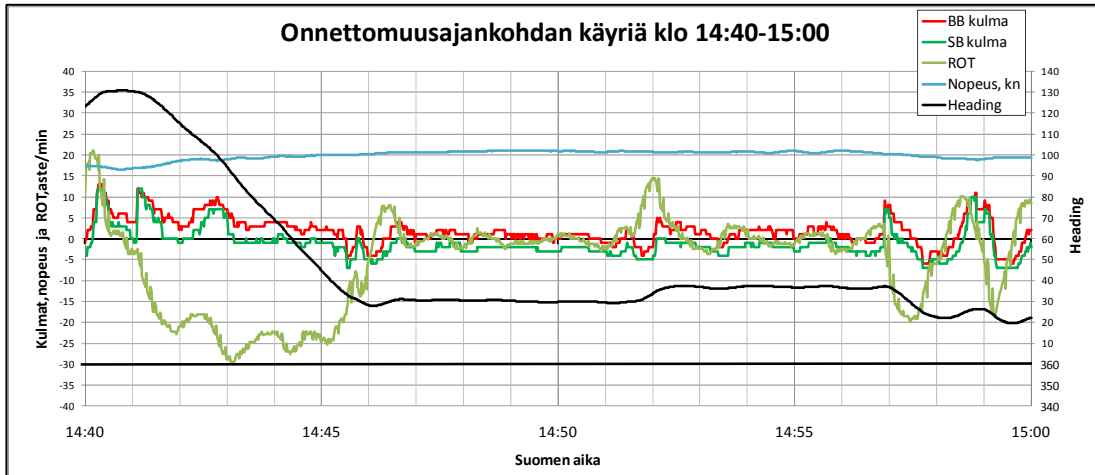
Peräsinkulmien rekisteröinnissä alkoi selvästi näkyä poikkeavaa noin klo 15:40, kuva
37a. Esimerkiksi, suurin mahdollinen peräsinkulma on 68 astetta⁶⁷. Jo klo noin 15:10,
ehkä jo klo 15:02 alkaen oli ohjailussa esiintynyt tavanomaisesta poikkeavaa, kuvat 37b
ja 37c mutta peräsinkulmien muutokset näyttivät normaaleilta. Kuitenkin muutaman ker-
ran oli jouduttu käyttämään poikkeuksellisen suuria peräsinkulmia, esim. klo 15:22,
15:27 ja 15:31.



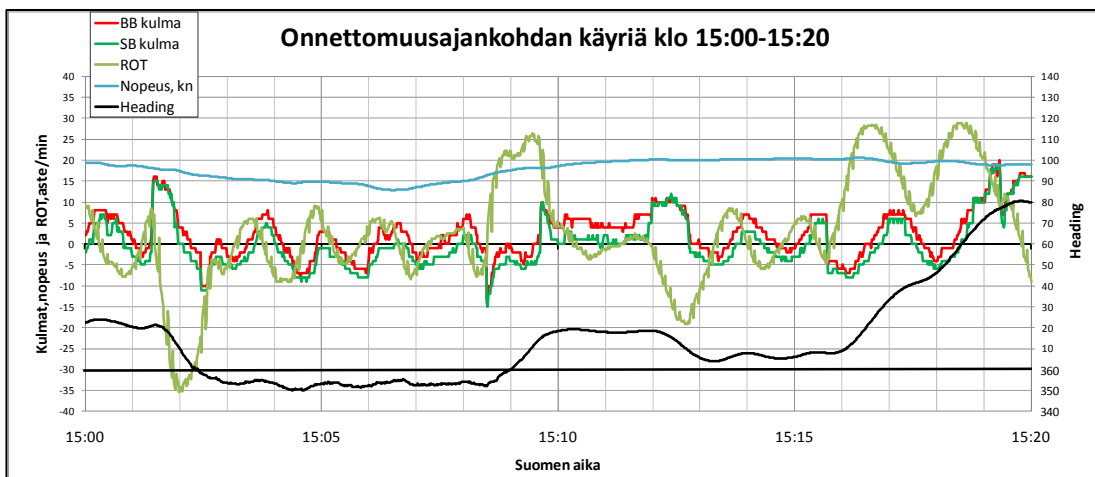
Kuva 37a. Peräsinkulmat, aluksen nopeus ja kääntymisnopeus onnettomuusmatkalla
klo 15:00–16:00 VDR-tiedoista. Noin klo 15:40 peräsinkulmien rekisteröin-
nissä ilmenee häiriötä. Kulmien rekisteröinti palautui järkeväksi noin klo
15:59. SB-peräsinkulma akselin katkeamisen jälkeen on näyttölaitteen näyt-
tämä kulma, tosiasiallinen peräsinkulma on tuntematon.

Peräsinkulma on positiivinen vasemmalle (esimerkiksi SB-peräsin on käännetty sisään-
päin). Kääntymisnopeus on positiivinen oikealle. Kuvissa 37b ja 37c ovat peräsinkulmat,
aluksen nopeus ja kääntymisnopeus sekä aluksen keulan suunta klo 14:40–15:20.

⁶⁷ Kyseessä saattaa olla kalibroinnin epätarkkuus.



Kuva 37b. Peräsinkulmat, aluksen nopeus, kääntymisnopeus (ROT, rate of turn) ja aluksen keulan suunta onnettomuusmatkalla klo 14:40–15:00.



Kuva 37c. Peräsinkulmat, aluksen nopeus, kääntymisnopeus ja aluksen keulan suunta klo 15:00–15:20. Peräsimen katkeamishetkeksi on tutkinnassa arvioitu noin klo 15:10. SB-peräsinkulma akselin katkeamisen jälkeen on näyttölaitteen näyttämä kulma, todellinen peräsinkulma on tuntematon.

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

1.7.2 Kuva- ja äänidata

Kuvatiedot 22.11.2009 tallennettiin tutkijoiden käyttöön aikaväliltä klo 15:00–15:55. Conning-tiedoista poimittiin aluksen kohtaaman tuulen arvot. Vertailtiin VDR:n rekisteröimiä kulmia conning-näytöltä poimittuihin. Todettiin, että BB-kulmat ovat molemmissa lähes samat, mutta SB-kulmat eroavat. Ero johtuu todennäköisesti VDR-tietojen purkamisessa käytetystä kalibrointikertoimesta (alkuperäiset VDR-peräsinkulmat ovat rekisteröity voltteina). Tällä eroavuudella ei katsottu olevan merkittävää vaikutusta tutkinnassa tehtyjen laskelmien tuloksiin.

Tutkanäytöllä seurattiin aluksen kulkua. Vertailun vuoksi tallennettiin kuvatietoja 31.10.2009 aikavälillä 15:08–15:48.

Tukintalautakunta kuunteli useaan otteeseen aikavälin 15:00–15:45 äänitallennetta. Tallenteen laatu oli paikoin niin huono, että kaikesta puheesta ei saatu selvää. Pystyttiin kuitenkin selvittämään pääpiirteissään miten komentosillalla vähitellen kypsyi tietoisuus siitä, että jotain on vialla ja siellä tehtiin päätös pysäyttää aluksen kulku, eikä katsottu tarpeelliseksi muokata tallennetta äänen parannusohjelmilla.

1.8 Peräsimen tutkiminen – väsymisvaurioon johtaneet tekijät

1.8.1 Metalliosat

Aluksen peräsimiä, peräsinakseleita ja peräsimen laakereita tarkasteltiin ja mitattiin alustavasti Gdanskissa. Peräsinakselit ja alalaakerien pronssiholkit lähetettiin tarkempia tutkimuksia varten VTT:lle. Kaikille näille kappaleille tehtiin lisää silmämääräisiä tarkastuksia ja mittauksia.

Peräsinakseleille tehtiin lisäksi magneettijauhetarkastus. Katkenneen peräsinakselin murtopintojen ulkopintaa tutkittiin VTT:llä stereomikroskoopilla ja akselista tehtiin metallografisia näytteitä, joita tutkittiin valomikroskoopilla. Katkenneesta akselista katkeamiskohdan ulkopuolelta todettuja säröjä avattiin ja niiden avattuja murtopintoja tutkittiin pyyhkäisyelektronimikroskoopilla (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 akselista tehtiin kaksi koesauvaa, joille tehtiin vetokokeet.

Pääosa VTT:n metalliosille tehtyjen tutkimusten tuloksista on raportissa⁶⁸, joka on taltioitu Onnettomuustutkintakeskukseen. Tähän on kerätty tärkeimmät tulokset.

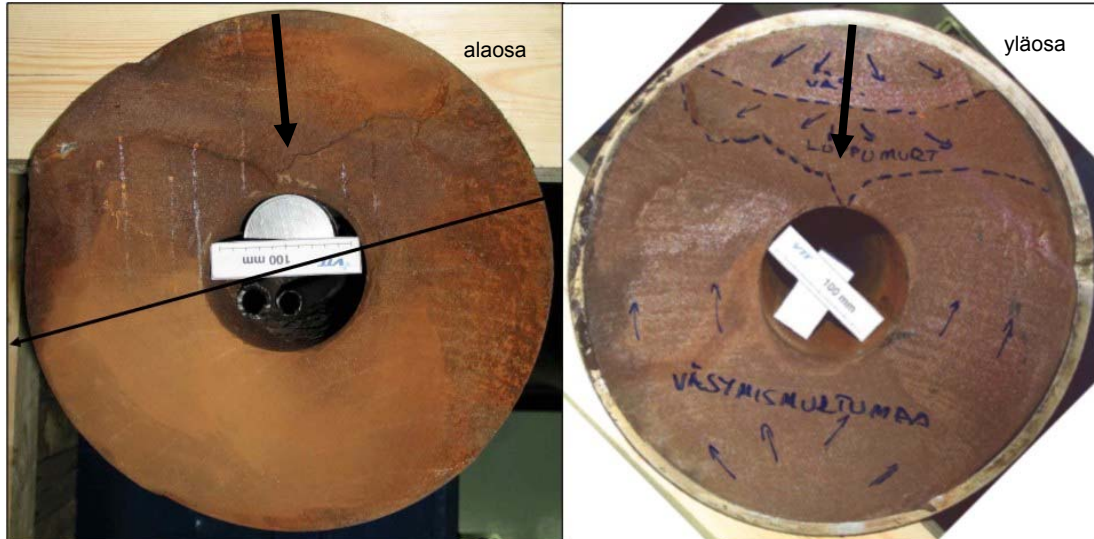
VTT, katkenneen akselin tuloksia

Murtopinnat. Tutkittaessa katkenneen akselin murtopintoja (kuva 38a), löytyi kohdasta, jossa kartio muuttuu sylinteriksi, 0,3 mm teräväkulmainen olake (kuvat 39 ja 40). Olakeella 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 ("aikarenkaat"). Murtopinnan ruostumisen vuoksi näistä ei voitu päätellä sitä, oliko särönkasvua tapahtunut jo vuoden 2004 telakointiin mennessä. Murtopinnan ulkonäöstä selvisi myös, että loppumurtuma on tapahtunut *lohkomurtumana*⁶⁹ nuolen suuntaan (kuva 38b) ja että SB-peräsin on ollut katkeamishetkellä käännettynä muutaman asteen sisäänpäin.

⁶⁸ VTT:n jo aiemmin viitattu raportti VTT-R-0222-10

⁶⁹ Lohkomurtuma on äkillinen haurasmurtuma, johon vaikuttaa lämpötila, lovet, hitsisaumat, kuormitusnopeus ja teräksen alttius lohkomurtumalle (mitataan iskutestikokeella teräksen laatuluokan määrittämiseksi). Kun murtuma on lähtenyt liikkeelle, se ei enää pysähdy ilman merkittävää olosuhteiden muutosta.

Katkeaminen tapahtui, kun pinta-alaa oli jäljellä noin 150 cm² (13 %). Lohkomurtumatyypissä loppumurtumassa on näkyvissä viistoa osuutta, mikä kertoo pienestä väännön osuudesta. Murtuma oli alkanut pieneltä alueelta. Murtopinnassa oli varsinkin ulko-reunan läheisyydessä syöpymiä.

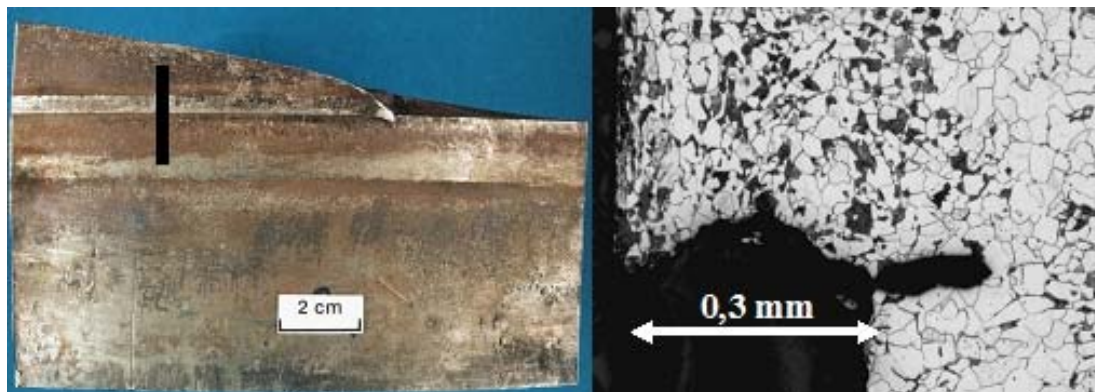


Kuva 38a. Katkenneen akselin yläosa oikealla ja alaosa vasemmalla. Yläosassa on vielä tukin päällä ruostumattomasta teräksestä tehty päällyste. Yläosaan on piirretty väsymisen ja loppumurtuman rajat. Alaosaan on merkitty suunta perään peräsimen ollessa keskellä. Puoliskot on yritetty asettaa toisiaan vastaavaan asentoon. Kuvat VTT.



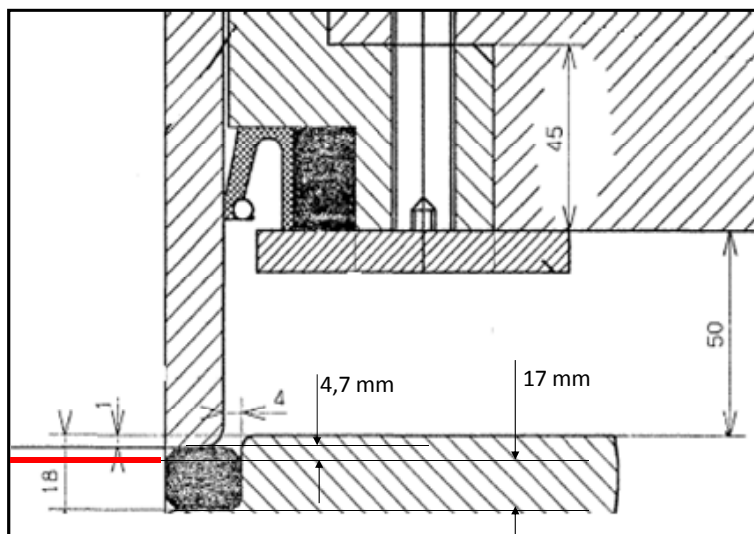
Kuva 38b. Lähikuva murtopinnasta akselin yläosassa. Kuvassa on näkyvissä harjanteet, jotka etenevät väsymisalueesta kohti akselin keskiötä. Voidaan päätellä, että tällä puolella akselia on katkeamishetkellä ollut vetojännitys. Kuva VTT.

VTT:llä otetusta katkenneen akselin pituussuuntaisen hieen kuvasta⁷⁰ näkyy koneistetun pinnan profiilia. Kuvasta tehdyn mittauksen perusteella pinnan profiilin karheus R_t (huippujen ja laaksojen välinen etäisyys) on noin 10 μm . Tätä tietoa voidaan käyttää arvioitaessa pinnan laadun vaikutusta väsymislujuuteen.



Kuva.39a. Katkenneen akselin alaosa, kohta, jossa olake näkyvissä ja hie vastaavasta kohdasta. Olakkeen pohjalla on 0,2 mm särö. Kuvat VTT.

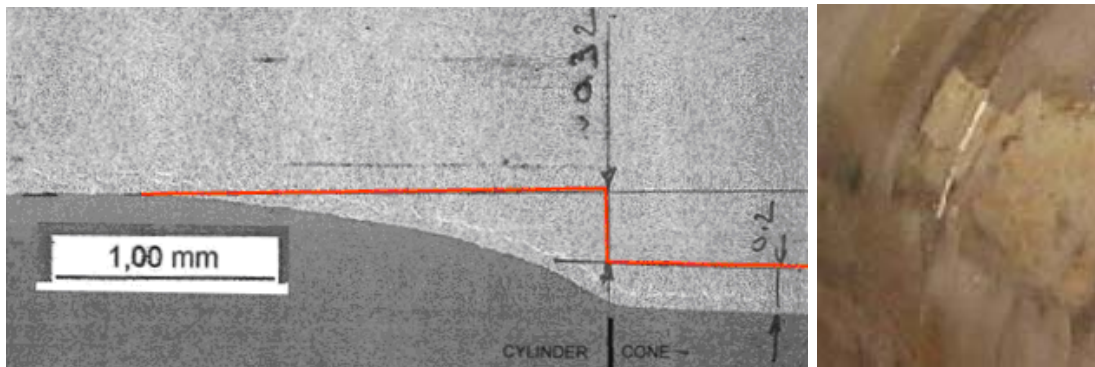
Kuvassa 39b on olakkeen tarkka sijainti VTT:n mittausten pohjalta, punainen viiva.



Kuva 39b. Olakkeen tarkka sijainti on näytetty punaisella viivalla.

BB-akselin olakekohta oli VTT:n valumuottimittauksen mukaan kuvan 40 mukainen Gdanskissa tehdyn 0,2 mm työstön jälkeen. *Alkuperäisen olakkeen muotoa ei ole pystytty selvittämään.* Ei ole poissuljettua, etteikö BB-akselissa ollut samanlaista terävää olaketta kuin katkenneessa SB-akselissa. Gdanskissa ja myöhemmin VTT:llä tehdyissä magneettijauhetarkastuksissa olakkeen kohdalta ei löydetty säröä. Vieressä varalla olleen akselin, joka sitten otettiin käyttöön, vastaava kohta.

⁷⁰ VTT:n raportin kuva 23.



Kuva 40. "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. Ei ole täysin poissuljettu, etteikö "ehjän" akselin olake olisi ollut samanlai-
nen; kummassakin korkeusero oli 0,3 mm.

Vetokokeet. Koska CK 22 N teräsmateriaalin standardi sallii lujuudelle suuret vaihtelut, teetettiin VTT:llä tarkistuksen vuoksi vetokokeet. Kummankin vetokoesauvan keskiakse-
lin etäisyys katkenneen peräsinakselin ulkopinnasta on noin 10 mm, kuva 41. Koetulos-
ten⁷¹ mukaan myötölujuus (kahden mittauksen keskiarvo) on 253,5 N/mm² ja murtolu-
juus 457,5 N/mm². Tulokset ovat hieman pienempiä kuin valmistajan tekemissä vetoko-
keissa (valmistajan ainestodistuksen mukaan kahden peräsinakselin murtolujuus on 465
ja 471 N/mm² sekä myötölujuus 274 ja 274 N/mm²). Ero johtunee siitä, että valmistaja ei



Kuva 41. Vetokoesauvojen paikat. Kuva VTT.

ollut tehnyt vetosauvoja itse akselista, vaan oletettavasti akselin päähän aineenkoetus-
kokeita varten taotusta ulokkeesta, jossa jäähtyminen
normalisointi-
hehkutuksen jälkeen on voinut olla nopeampaa kuin itse akselissa ja lujuusarvot sen seurauksena vähän korkeammat. Standardin mukaan murtolujuuden tulee olla välillä 410–520 N/mm², joten materiaali on vastannut vaatimuksia.

⁷¹ VTT:n sähköposti 15.10.2010.

VTT, peräsinakselien fretting⁷²-säröt

Gdanskin telakan laadunvalvontaosasto teki ”ehjälle” (BB-) peräsinakselille magneettijauhetarkastuksen Trafin vaatimuksesta. Akselin kartio-osasta, noin 3 cm sylinteriosan alapuolelta löytyi säröjä 145 mm levyisellä alueella. Säröt eivät hävinneet 0,2 mm työstössä, eikä akselia voitu enää ottaa käyttöön, kohta 1.2.7, kuva 25. VTT tutki katkenneen (SB-) akselin pinnan ja löysi siitä vastaavasta kartion kohdasta samantapaisia säröjä kahdesta noin 5 cm levyisestä alueesta, jotka ovat noin 200 mm etäisyydellä toisistaan. Katkenneen akselin säröt avattiin, mutta ehjän akselin säröjä ei tutkittu tarkemmin, koska varustamo ei halunnut akselia rikottavan. Lisää liitteessä 1 ja tarkemmin VTT:n raportissa VTT-R-0222-10.

Vuonna 2004 asennettujen alalaakerien tutkiminen, VTT ja lautakunta

Lisää alalaakereista tehtyjä havaintoja on esitetty liitteessä 1. Alalaakerien välysten merkitystä peräsimien toiminnalle on käsitelty kohdassa 1.6.3

Alalaakerien pesän yläreunassa oli noin 50 mm korkeudelta paksunnos, jonka paksuus oli noin 10 mm. Paksunnoksessa oli 3 kpl noin 40 mm levyistä koloa ilmeisesti epoksin valun varmistamiseksi 90 asteen välein siten, että perän puolella koloa ei ollut, kuva 29b. Paksunnos (ilman koloja ja hieman matalampana) oli jo olemassa vuoden 2004 telakoinnissa. Sen oletetaan syntyneen pudonneen pronssiholkin kulutettua pyöriessään pesään kertynyttä korroosiojätettä.

Alalaakeriholkkien paksuus vuonna 2004 asennettaessa oli 25 mm paksummalta kohdalta (muun muassa alhaalla) ja 24 mm ohuemmalta kohdalta (muun muassa ylhäällä), katso liitteen 1 kuvat 2a ja 2b. VTT:n mittausten mukaan irrotetut laakeriholkit olivat kulumineet 0,3–0,5 mm.

Alalaakeriholkkien pinta valuepoksin puolella todettiin sileäksi. 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.

SB-alalaakeri. Kuvassa 42a on SB-puolen ala-akselin yläpää, jonka päällä on alaspäin pudonnut pronssiholkki. Epoksi oli kokonaan irronnut ja pudonnut.

⁷² Frettingiksi eli kitkakulumiseksi kutsutaan kahden toisiaan vastaan puristuksissa olevan pinnan välistä pieniamplitudista syklistä liukumaliikettä. Tämä liukuma voi aiheuttaa pintojen kulumista ja vielä vakavammin väsymissärön ydintymistä (siis särön syntyminen säröttömään materiaaliin), jolloin puhutaan fretting-väsymisestä, eli suomeksi kitkaväsymisestä.



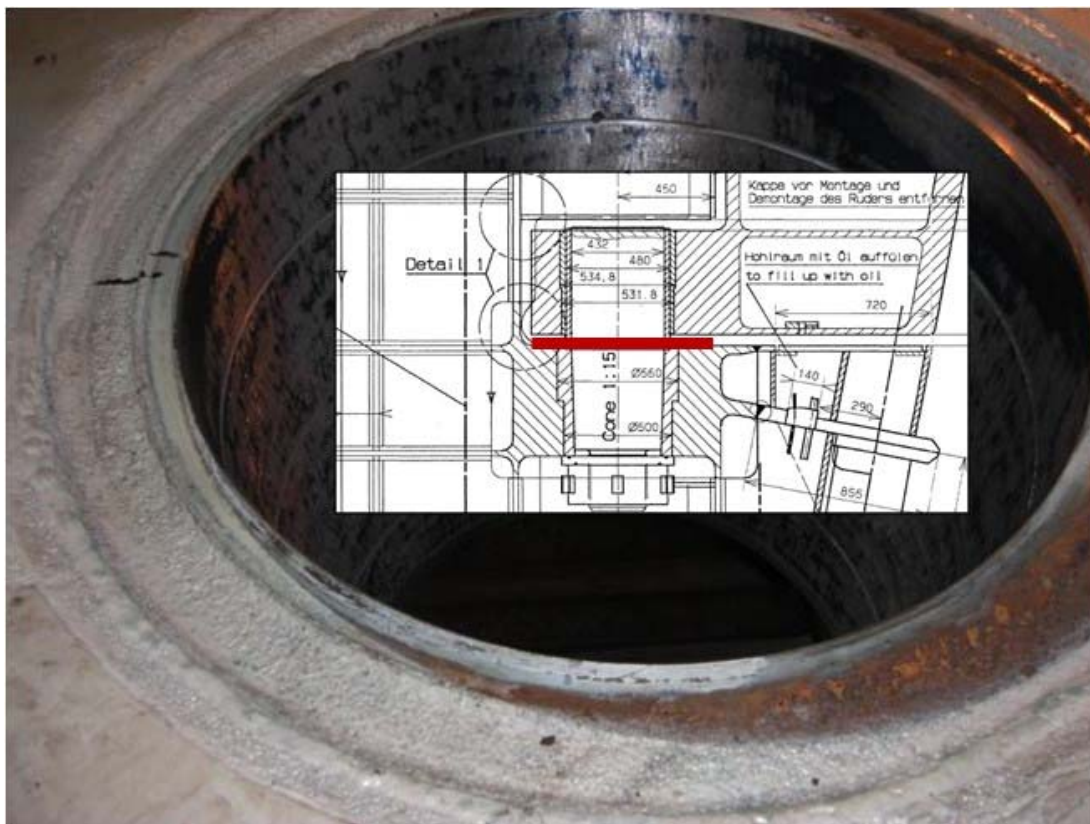
Kuva 42a. SB-ala-akselin yläpää, jonka päällä on alaspäin pudonnut pronssiholkki. Varustamon kuva peräsimen irrotuksen jälkeen 3.12.2009, peräsin oli vaaka-asennossa.

Kuvassa 42b voidaan havaita holkin alareunassa pyörimisestä johtuvia naarmuja.



Kuva 42b. SB-alalaakerin pronssiholkin alareunaa. VTT:n kuva.

Molemmat holkit olivat pudottuaan ennen vuoden 2004 telakointia kuluttaneet peräsimen alemman osan yläpintaa. Myös tässä kohdassa tapahtui peräsimen yläpinnan korroosiota teräksen ja pronssin jännite-eron johdosta. SB-holkin pudottua vuoden 2009 marraskuussa se oli pudonnut vanhoihin uriin (kuva 42c) liikkuen sivuttain ja hangaten pintaa akselin ja peräsimen taipuilla. Lisää tietoja alalaakereista on liitteessä 1.

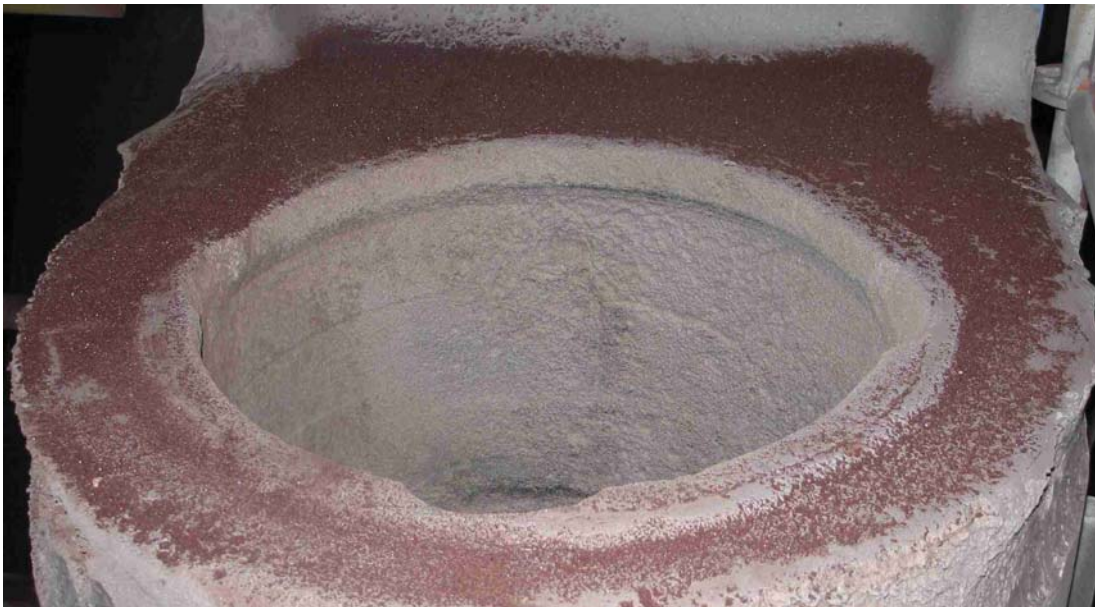


Kuva 42c. Pronssiholkin pyörimisjälkiä SB-peräsimessä, sarven alapuolella, kuvassa ruskealla merkitty taso. Bureau Veritasin kuva 12.12.2009. Pääosa jäljistä oli syntynyt ennen telakointia vuonna 2004. Vuonna 2009 holkki putosi vanhoihin uriin.

Kuvassa 43a pesän sisäpinta näyttää holkin poistamisen jälkeen syöpyneeltä ja ruosteiselta. Siinä näkyy heikosti pykällysten kohdat sekä ruuvien kulutusjälkiä. Hiekkapuhaltusta pesästä otetusta kuvasta 43b näkyy selvemmin holkin pykällyksiä ja mahdollisesti ruuvien liikkeistä syntyneitä naarmuja, mikä kertoo holkin pyörimisestä epoksin putoamisen tapahduttua. Jäljet kertovat myös sen, että peräsinvoiman on täytynyt olla hetkittäin niin suuri, että holkki on voinut osua pesään huolimatta suuresta nettoliikevarasta. Myös katkeamisen jälkeen peräsin on saattanut kääntyä virtausten voimasta.



Kuva 43a. SB-puolen alalaakerin pesä ennen puhdistusta kuvattuna 3.12.



Kuva 43b. SB-alalaakerin pesä puhdistettuna 4.12. Reunan muotoilu ja kolot ja pesän seinämän urat ovat näkyvissä.

Kuvassa 43c on holkin ulkopintaa, jossa näkyy selvästi naarmuja ja uria, jotka kertovat ruuvien palasten liikkumisesta holkin pyöriessä. Kaksi ylemmää ruuvia ovat kuluneet holkin ulkopinnan tasoon, eikä kuusiokolon reikä ole ylettynyt läpi.



Kuva 43c. SB-alalaakerin pronssiholkin ulkopintaa, kuva VTT. Näkyvissä on naarmuja ja ruuvien jäänteitä. Tarkemmin liitteessä 1.

BB-alalaakeri. BB-alalaakerissa valuepoksi oli pääosin paikoillaan. Alalaakerin alaosaan sitä oli irronnut noin 120 asteen alueelta, paikoin yli 20 cm syvyydeltä, kuvat 44.



Kuva 44a. Osittain irronnutta epoksia BB-alalaakerissa. Näkyvissä on selvästi ohuet raot toisaalta epoksin pesän, toisaalta epoksin ja pronssiholkin välissä. Kuvattu 3.12.2009.

Kuvasta mittaamalla on arvioitu epoksivalun paksuudeksi noin 18 mm (pronssiholkki on 24,7 mm).



Kuva 44b. BB-alalaakeri peräsimen poiston jälkeen kuvattuna alhaalta. Kuvassa 44c laakeri on kuvattu ylhäältä. Kuvassa näkyy epoksitäytteen tilanne: sitä on irronnut paikoin 10–20 cm syvyydeltä. Pronssiholkin paksuus on noin 24 mm, joten epoksitäytteen paksuus on kuvan perusteella 15–20 mm. Pohjana Bureau Veritasin kuva johon on lisätty osa Trafin kuvasta (epoksi).



Kuva 44c. BB-alalaakeri kuvattuna ylhäältä 3.12.2009. Näkyvissä on epoksitäytteen lieri ja asennusruuvien päitä holkin rei'issä.

Epoksitäytteen lieri laakerin yläreunassa on tehokkaasti estänyt galvaanisen korroosion etenemisen laakerin yläosassa. Kuva 44d näyttää peräsinsarven kavitoinnista johtuvaa syöpymää. Vastaavassa kohdassa SB-peräsinsarvessa oli samanlainen syöpymä. Pesän pintaa ja siinä vielä kiinni olevaa epoksia on myös kuvassa 29a.



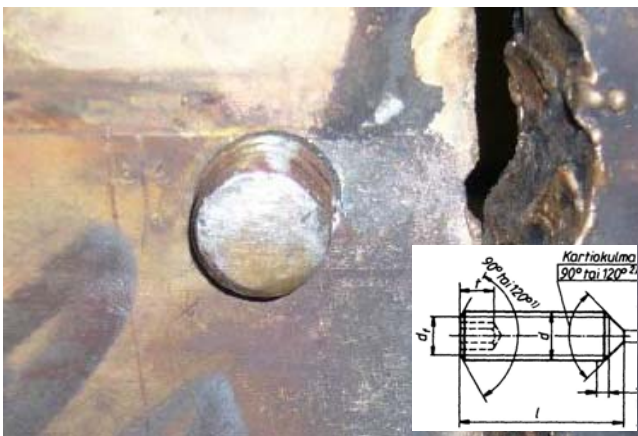
Kuva 44d. BB-puolen alalaakerin pesä pronssiholkin poiston jälkeen. Epoksin poiston jäljiltä on näkyvissä ruostetta; vesi on ollut jonkin aikaa epoksin ja pesän välissä. Ulkopinnalla on näkyvissä voimakas kavitaatiosta johtuva syöpymä. Ainesvahvuus on nuolen osoittamassa paikassa pienentynyt vaarallisen paljon. Sarvi on ulkopuolelta jo hiekkapuhallettu. Kuvattu 4.12. Vrt. kuvaan 28a.

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, kuva 44e.



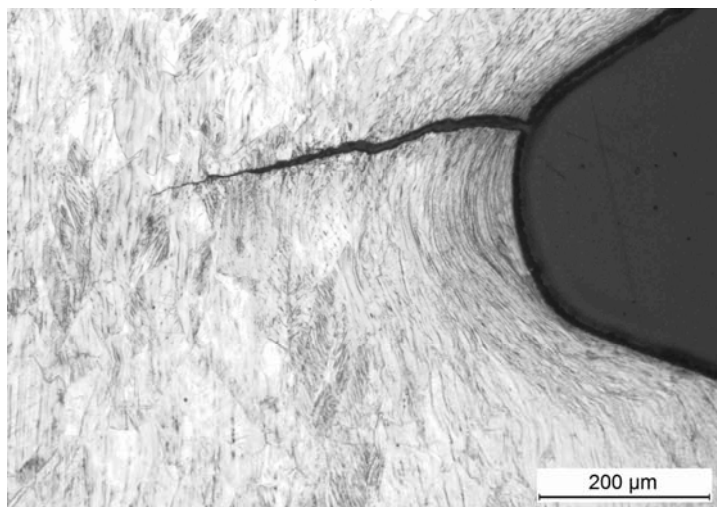
Kuva 44e. BB-alalaakerin pronssiholkin ulkopintaa, kuva VTT. Pinnassa on syvempiä naarmuja kuin SB-holkissa.

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. Käytetyn ruuvimallin kuusiokolo oli noin kaksinkertainen kuvassa 45a näkyvään verrattuna. Kuusiokolo ulottui holkin läpi ja usein selvästi epoksin puolelle (SB 6 kpl ja BB 3–5 kpl), sillä ruuvit oli ruuvattu eri syvyyksiin. Ruavin katkettua vettä pääsi holkin ja epoksin väliin myös kuusiokolon kautta. Kuvassa näkyvää ruuvia (BB-holkki) lukuun ottamatta ruuvit olivat katkenneet tai kuluneet pinnan tasoon.



Kuva 45a Alalaakerin holkin asennuksessa vuonna 2004 käytetty ruuvi. Todennäköisesti se oli ilman päätykartiota ja on ainut säilynyt BB-puolen ruuvi.

Epoksin irrotessa siihen jäänyt ruuvipala putosi. Kierteet oli tehty valssaamalla. Tutki-



tun ruuvipalan yhden kierteen pohjassa havaittiin 0,4 mm särö (kuva 45b), joka oli todennäköisesti syntynyt väsymällä⁷³. Ruuvit olivat jonkin verran kylmämuokatussa tilassa olevaa austeniittista ruostumatonta terästä. Ruuvien etäisyys holkin ylä- ja alareunasta oli noin 100 mm. Ruuveista tarkemmin liitteessä 1.

Kuva 45b. Ruuvipalasta kierteestä taipuman kohdalla löytynyt särö.

Peräsimen ja peräsinarven säröt⁷⁴

Gdanskissa tapahtuneen korjaustelakoinnin aikana havaittiin SB-peräsimessä ja BB-peräsinarven säröjä. Lisäksi BB-puolen peräsinarven liittymäkohdassa runkoon laidan levytyksessä ja sisärakenteissa löytyi säröjä, joiden korjaaminen osoittautui hankalaksi ahtaisten tilojen johdosta. Kaikki säröt avattiin, tarkastettiin magneettijauheella ja hitsattiin umpeen. Lopuksi ne tarkastettiin vielä magneettijauheella. Nämä säröt johtuvat todennäköisesti peräsimen resonanssivärähtelystä.

Muita materiaaliominaisuuksia

VTT:llä mitattiin kovuuksia. Toisiaan koskettaneiden aineiden Vickers-kovuudet ovat (VTT: n mittaus⁷⁵ ja arvio): pronssiholkki 108–109, peräsinakseli 136, ruostumatonta teräsholkki 153, ruuvi 223 ja alalaakerin pesän valuteräs (arvio) noin 140. Kovuuksia on tarvittu arvioitaessa kulumisjälkien kuten pronssiholkin naarmujen syntymistä. *Lämpölaajenemiskertoimet*: epoksi 43,8x, seostamaton teräs 12x, austeniittinen ruostumatonta teräs 17x ja kupari (pronssi) $17 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$.

1.8.2 Valuepoksen ominaisuudet

BB-puolen alalaakerin pronssiholkin irrotuksen yhteydessä saatiin talteen muutama valuepoksen palanen. Kaksi palasta toimitettiin VTT:lle tarkempaa tutkimusta varten. Lisäksi VTT sai valun tehneeltä yhtiöltä epoksia ja kovetetta koevalun tekemistä varten⁷⁶. Koepaloista saadut arvot olivat pääosin lähellä valmistajan ilmoittamia arvoja ja valua voidaan sinänsä pitää onnistuneesti tehtynä.

⁷³ VTT:n sähköposti 11.8.2010.

⁷⁴ Remontowa-telakan raportti korjauksista joulukuussa 2009.

⁷⁵ HV 5-kovuus, joka tarkoittaa, että on käytetty 5 kg painoa. VTT:n sähköposti 11.8.2010.

⁷⁶ VTT:n raportti VTT-S-09524-10

Valuepoksista tutkittiin sen koostumus, kovuus, kovettumisaste, huokoisuus, puristus- ja leikkauslujuus. Lisäksi tehtiin epoksin valajalta saadusta samanlaisesta hartsista ja kovetteesta uusi valu, jonka lujuusarvoja verrattiin aluksesta irrotettujen palojen arvoihin ja tutkittiin lämmityksen vaikutusta epoksin lujuusominaisuuksiin. Epoksitäyte oli kaksi-komponenttinen EPOCAST 36[®], valmistaja H.A Springer GmbH, Saksa.

Valmistajan ilmoittamat materiaaliomaisuudet ovat Onnettomuustutkimuskeskukseen tallioitussa ominaisuustaulukossa. Seuraavassa pääkohdat VTT:n raportista, tarkemmin itse raportissa.



Kuva 46. Tutkitut epoksin palaset. Palojen pituus n. 10 cm. Kuva VTT.

Koetulosten mukaan näytteen sekoitussuhde on ollut lähellä oikeaa. Alkuperäisen valuepoksinäytteen lasittumislämpötila (107°C) oli lähellä oikealla sekoitussuhteella valmistettua näytettä (108°C). Tuoreiden näytteiden valmistamiseen käytettiin Epocast 36 – tuotetta, joka saatiin maahantuojalta (Epomare Oy). Näytteen koostumus on epoksia ja silikaatteja. Silikaatit ovat epoksitäyteissä tyypillisiä täyteaineita. Vieraita aineita ei löydetty. Näytteessä ei esiintynyt merkittävää huokoisuutta.

Näytteen puristuslujuus on tehtyjen kokeiden mukaan 120 N/mm² ja puristuskimmomoduuli n. 5000 N/mm². Epocast 36 valmistajan mukaan puristuslujuus on 164 N/mm² ja puristuskimmomoduuli 5610 N/mm². Mitatun ja ilmoitetun puristuslujuuden eroa selittää ainakin osittain näytteestä saatujen koepalojen pieni koko. Mitattu leikkauslujuus on noin 56 N/mm², joka vastaa normaaliarvoja. Mitattu Barcol-kovuus oli 53, joka on lähellä valmistajan antamaa arvoa 55. VTT:llä valetun näytteen kovuus oli 56.

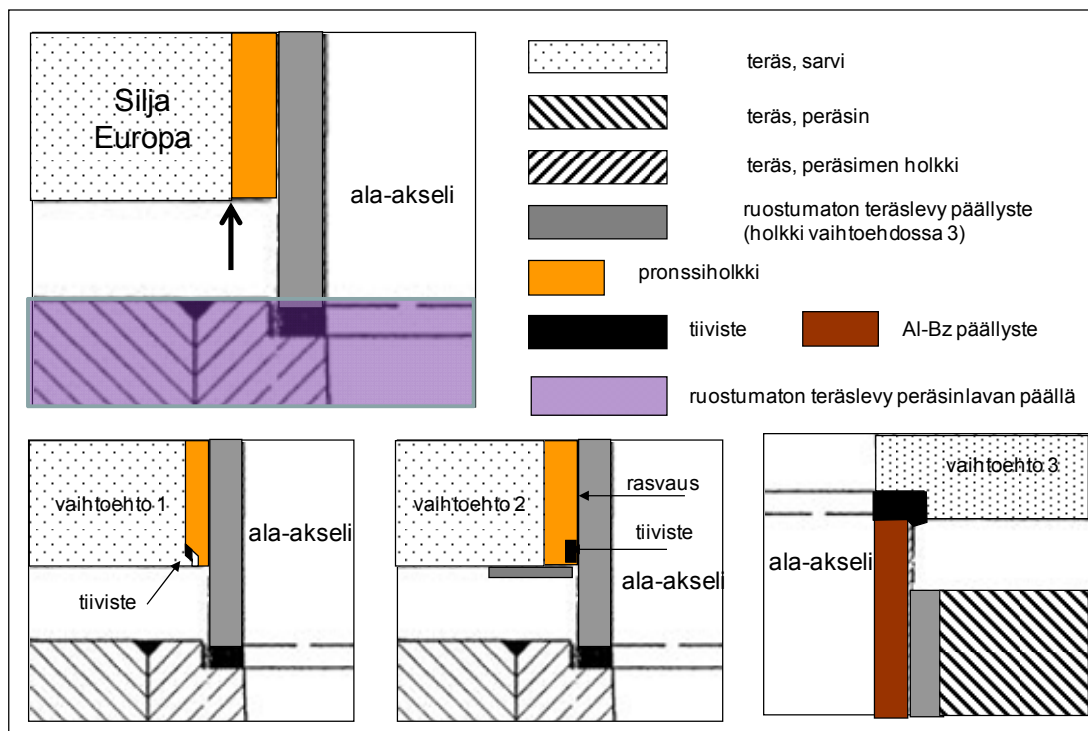
VTT:n tekemän oman valuepoksin yhteydessä ei ilmennyt erityisiä ongelmia valuominaisuuksiin liittyen.

Termovaaka-analyysin perusteella havaittiin, että merkittäviä massahäviöitä alkaa syntyä valuepoksiin noin 230°C lämpötilassa. Tällöin myös sen värin muutos on silminnähden huomattava. Termovaaka-analyysin tuloksena saatuja käyriä tulkittaessa on huomioitava lämpötilan suurehko nostonopeus, minkä vuoksi materiaalissa tapahtuvat muutokset voivat todellisuudessa alkaa hieman alemmilla lämpötilatasoilla.

Lämpötilaan 140°C kuumennettu VTT:n valuepoksi tuotti korkeammat lujuusarvot kuumentamattomiin nähden. Lujuusominaisuudet pysyivät likimain ennallaan kuumennettaessa materiaalia 190°C. Myös 230°C kuumennuksessa lujuusominaisuudet pysyivät edelleen samalla tasolla.

1.8.3 Alalaakerin korrosio

Aluksen alalaakerin rakenne on galvaanista korroosiovaaraa ajatellen epäedullinen, koska pronssi on suojaamattomana merivesi-elektrolyytissä välittömässä yhteydessä valuteräkseen, kuvat 7a, 7b ja 47. Näiden metallien välinen sähkökemiallinen jännite-ero on noin 0,4 V (liite 3). Alalaakerin pesän valuteräs alkoi ennen pitkää syöpyä galvaanisen korroosion johdosta nuolen osoittamasta kohdasta. Kuvassa on näytetty vain alalaakerin alareuna; vastaava kohta yläreunassa SILJA EUROPASSA oli suojaamatta ja vaihtoehtoissa suojattu.



Kuva 47. SILJA EUROPAN alalaakerin alareunan rakenne sekä vaihtoehtoisia, muissa aluksissa käytettyjä rakenteita. SILJA EUROPAN peräsimen päällysteen laajuus on esitetty kuvassa 24c. Vaihtoehto 1 on useimmin käytetty, mm SILJA SERENADE ja SILJA SYMPHONY.

SILJA EUROPA:n aktiivisen katodisen korroosiosuojausjärjestelmän vaikutus ei todennäköisesti sen toimittajan arvion mukaan ulottunut alalaakerin ahtaisiin rakoihin. Myöskään peräsimen sinkkianodit eivät ulottaneet vaikutustaan sinne. Kuvan 47 rakenneratkaisuissa 1 ja 2 korroosion mahdollisuus on vähäinen tiivistyksen ansiosta. Vaihtoehdossa 3 itse laakeripinta voi syöpyä, mutta syöpymän suuruus paljastuu välysmittauksissa. Tarpeen tullen syöpynyt holkki vaihdetaan. Sen sijaan SILJA EUROPA:n ratkaisussa valuteräksinen pesä syöpyy, eikä syöpymän suuruus tule normaalissa välysmittauksessa välttämättä tietoon, jollei sitä erikseen osata etsiä.

Peräsin oli kahteen otteeseen, vuosina 1997–2000 ja 2002–2009 päällystetty ruostumattomalla teräslevyllä. Päällyste oli peräsimen kummallakin puolella ulottuen hyvin lähelle alalaakeria. Se on jalompaa kuin sarven teräs, joka siten syöpyy myös ruostumattoman teräslevyn johdosta.

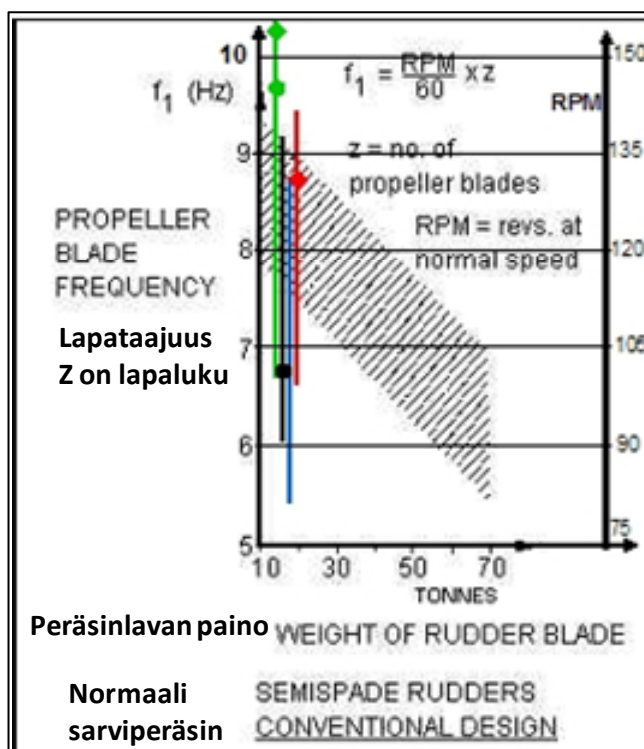
Myös pronssiholkin asennusruuvit ja pronssiholkki muodostivat galvaanisen parin. Ruuvien holkin sisällä olleet päät ovat syöpyneet. Syöpyminen myötävaikutti todennäköisesti ruuvien katkeamiseen. Korroosiota tapahtui myös peräsimen alaosan yläpinnassa, kohdassa, jossa pudonnut pronssiholkki kohtasi teräspinnan, mutta lyhyemmän aikaa.

Korroosiosta varoittaa mm. Germanischer Lloyd, kun pronssi ja ruostumaton teräs ovat yhteydessä seostamattomaan teräkseen ja edellyttää korroosiota ehkäisevien menetelmien käyttöä⁷⁷. Det Norske Veritasilla on erilliset, jo viitatuksi ohjeet. Bureau Veritasin säännöistä ei ole peräsinlaitteistoa koskevaa korroosiosuojauspykälää.

1.8.4 Peräsimen värähtely

Peräsimeen vaikuttaa ohjailusta syntyvän peräsinvoiman lisäksi potkurivirtauksen synnyttämät voimat. Näiden voimien yhteisvaikutus taivuttaa peräsimen. Ohjailun synnyttämät 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 48. Peräsin on ulokepalkki, jolla on rakenteesta johtuva ominaisvärähdysluku. Mikäli se sattuu olemaan sama tai lähellä potkurin lapataajuutta, peräsimen poikittaisliike vahvistuu. Tällöin kysymyksessä on ns. resonanssi-ilmiö. Värähtelyä on tarkemmin käsitelty liitteessä 4.

⁷⁷ GL Rules 2009, I Ship Technology, Part 1 Seagoing Ships, Section 14, E 4.5



Kuva 48. Ehjän sarviperäsimen ominaistaajuus 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.

Resonanssin johdosta peräsimen poikittaisliikkeet saattavat voimistua, mikä lisää peräsinakselin jännityksiä. Kuvassa 48⁷⁸ on näytetty

sarviperäsimen vaarallinen kierroslukualue viivoitettuna.

SILJA EUROPA:n lapataajuusalue on merkitty kuvaan punaisella. Normaali kierrosluku vaihtelee välillä 100–143 1/min. Peräsinlavan paino on noin 21 tonnia. SILJA EUROPA:n peräsimestä löydettiin vaurioita peräsinakselin laakerin alareunan kohdalla, peräsinsarven yläpuolella sekä peräsimen yläpuolella aluksen runkoon liittyvässä osassa⁷⁹. Ne viittaavat resonanssin mahdollisuuteen.

Kuvaan on lisätty kolmen muun vastaavanlaisen aluksen tiedot. Näyttää siltä, että tämän tapaisilla aluksilla ei vaarallista kierroslukualuetta pystytä kokonaan välttämään. Kuitenkin SILJA EUROPA näyttää osuvan pahimmin tälle alueelle. Resonanssi tai sen läheisyys saattaa vahvistaa peräsinlavan ja siten myös peräsinakselin potkurin pyörimisestä johtuvaa poikittaisliikettä, mikä synnyttää peräsinakseliin lapataajuudella (noin 8 kertaa sekunnissa) vaihtuvia jännityksiä ja rasittaa peräsinsarvea ja sen kiinnitystä runkoon.

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 momentin⁸⁰. TKK:n tulosten mukaan ehjän peräsimen ominaistaajuus on 6–7 Hz ja vaurioituneen 2–3 Hz. Tutkinassa on arvioitu ominaistaajuuksien suhteeksi noin 2,5. Aluksen nopeus on TKK:n las-

⁷⁸ Kuva perustuu Det Norske Veritasin vaurioraporttiin 3/93. Siinä kuvataan peräsimeen syntynyt halkeama. Se oli todennäköisesti johtunut lapataajuuden osumisesta kuvan esittämälle vaaralliselle (viivoitettu) taajuusalueelle. Sisäaluksella ei ollut tällaista vauriota; sen potkurissa oli 3 lapaa, yksi lapa vähemmän, joten lapataajuus oli pudonnut 25%.

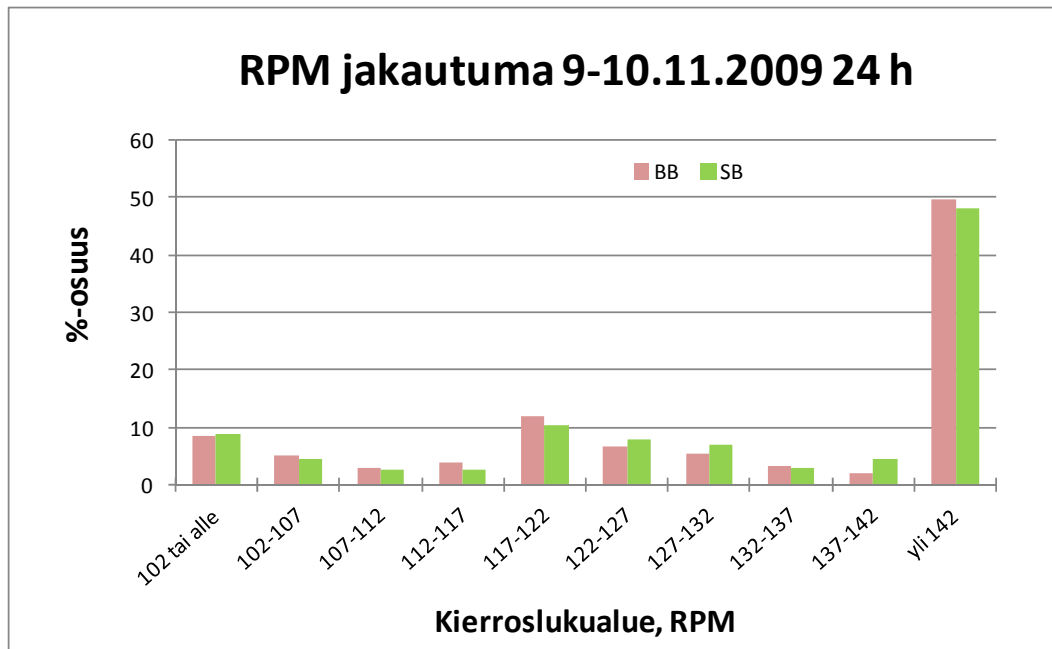
⁷⁹ Remontowa-telakan raportti korjauksista joulukuussa 2009.

⁸⁰ Syklisen voiman vaikutuspiste on alempana kuin peräsinvoiman resultantin.

kelmissä 22,7 solmua. Muilla nopeuksilla voimat voidaan muuttaa nopeuksien neliön suhteessa. Väsymislaskelmiin edellä esitetty voima ja momentti on skaalattu vastaamaan aluksen rekisteröityä nopeusjakautumaa (taulukko 5 ja kuva 53).

Resonanssin merkitys riippuu käytetyistä kierrosluvuista, siitä kuinka lähellä ollaan peräsimen ominaistajuutta. Kuvassa 49 on SILJA EUROPA:n potkurin kierroslukujen yleisyys. Noin 30 % ajasta kierrosluku näyttää olevan vaarallisella alueella 135–112,5 Hz.

Det Norske Veritasin sääntöjen lisäyksessä ”Guidance note” korostetaan tarvetta tehdä tämän tyyppiselle peräsimelle värähtelyanalyysi⁸¹. Vaarana on alalaakerin dynaamisten kuormien kasvu. Peräsimen värähtelyongelmista ja tilanteen korjaamisesta on löydetty myös muita kuvauksia⁸².



Kuva 49. Potkurin kierroslukualueiden yleisyys. Vaarallisin alue on välillä 112,5–135 1/min ehjän peräsimen tapauksessa.

1.8.5 Peräsimen kavitaatio

Telakointiraporteista on selvinnyt, että peräsimen kavitointivaurioita oli jouduttu korjaamaan jokaisen telakoinnin aikana. Kavitoinnin laajuus, joka on esitetty kuvissa 10 ja 50, on tyypillistä sarviperäsimille⁸³. Kavitoinnin voimakkuus kasvaa, kun potkuriteho potkurin pinta-alaa kohti kasvaa. Raja-arvoksi⁸⁴ on esitetty 800 kW/m², SILJA EUROPA:lla arvo on 810 kW/m², joka on selvästi suurempi kuin muissa vastaavissa aluksissa. Lisäksi peräsinakselin etäisyys potkurista on pienempi kuin muissa vastaavissa aluksissa⁸⁵. Vaurioiden korjauksen yhteydessä on jouduttu myös sarven alaosaan (kuva 44), siis alalaa-

⁸¹ Rules for Ships, January 2010 Pt.3 Ch.3 Sec.2, C105.

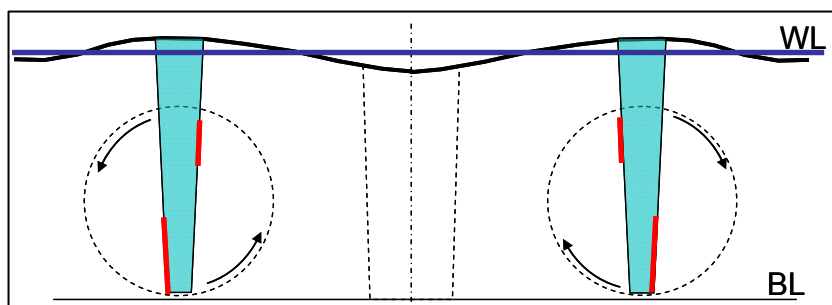
⁸² Ødegaard&Danneskiold-Samsøe, News, No 2. Autumn 1995 ja News Marine No 8 Winter 2006.

⁸³ Leena Vuorivirta, Potkurin vaikutus peräsimen kavitaatioon ja meluun, DI-työ,TKK 2008.

⁸⁴ Rudder Cavitation-osa, Proceedings of 25th ITTC (International Towing Tank Conference) – Volume II, sivu 495, Fukuoka.

⁸⁵ SILJA EUROPA 3,5 m, AMORELLA ja CINDERELLA 3,9 m, COLOR MAGIC 4,4 m.

kerin pesän ulkopuolta korjaamaan täytehitsaamalla, mikä epoksin asennuksen jälkeen oli saattanut vaurioittaa epoksia. Kavitointi on voimakasta peräsinsarven raoissa, mikä todennäköisesti edisti syöpmistä.



Kuva 50. Punaisella on näytetty kavitoinnin johdosta eniten syöpyneet kohdat. Katso myös kuva 10. Potkurien pyörimissuunta katsottuna takaapäin (suunta on ulospäin).

1.9 Peräsinakselien 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. Yhdessä vuodessa vaihtoluku on 220 miljoonaa ja kuukaudessa 18,5 miljoonaa sekä vuorokaudessa (22h) noin 633600. Näiden lisäksi myös peräsinvoiman harvemmin tapahtuvat muutokset on laskettava mukaan, kuva 51a. Vuorokaudessa peräsinvoiman merkittäviä vaihtoja on tutkinnassa tehtyjen simulointilaskelmien perusteella muutama sata kappaletta. Kuormitusvaihtelujen suuren lukumäärän vuoksi peräsinakselin ja peräsinraken-teen muidenkin osien kestävyyttä tässä vaurioitilanteessa on tarkasteltava väsymisilmiönä.

Väsymisilmiön riittävän luotettava teoreettinen hallinta on toistaiseksi hankalaa. Väsymisilmiön huomioon ottava mitoituksen samoin kuin väsymisvaurion tarkastelun on käytännössä pohjaututtava hyvin 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 monimutkaistavia tekijöitä ja lähtötietojen epätarkkuuksia. Tämä on tehnyt mahdolliseksi valita lähtötiedot siten, että SB-akseli katkesi. Saadut tulokset ovat suuntaa antavia ja esittävät erään mahdollisen väsymisprosessin kulun.

Lähtökohtana ovat seuraavat tosiasiat: SB-peräsinakseli katkesi väsymisen seurauksena, BB-akseli ei katkennut eikä siinä havaittu vastaavassa kohdassa alkavaa säröä. Molempien akselien alalaakereille oli kehittynyt luokituslaitosten vaatimuksiin nähden hietaasti moninkertainen liikevara, joka oli poistettu vuonna 2004 valuepoksitäytteellä. Onnettomuuteen mennessä vuonna 2009 SB-puolelta epoksi oli hävinnyt, ja akselin liikevara oli kasvanut äkillisesti suureksi. Väsymislaskelmien tulee olla yhteensopiva näiden lähtötietojen ja vastaavien aikarajojen kanssa.

Tämä *väsymisprosessin kaksivaiheisuus* ja vaiheiden nettoliikevaran selvä erisuuruus (ensi vaiheessa kasvu 2 mm:stä 12–13 mm:iin ja toisessa vaiheessa vakio 16–18 mm) tekee väsymislaskelman monimutkaisemmaksi. Ensimmäisessä vaiheessa jännitykset kasvoivat hitaasti keskijännityksen pysyessä alle teräksen myötörajan. Toisessa vaiheessa nettoliikevara oli niin suuri, että suurilla peräsinvoimilla akselin keskijännitykset saattoivat ajoittain ylittää myötörajan. Tällöin on jännitysväsymistarkasteluun yhdistettävä perinteinen lujuustarkastelu ja venymisväsymistarkastelu. Erityisen vaikeaa on arvioida, oliko SB-peräsinakseliin jo 2004 ehtinyt syntyä särön alku. On mahdollista, että peräsinakselin jännitykset tulivat suuren nettoliikevaran johdosta vuoden 2009 marraskuussa jossain vaiheessa niin suuriksi, että se katkesi hyvin lyhyen väsyttävän kuormituksen jälkeen.

Peräsinakselin väsymisestä johtuvan katkeamisen arviointi voidaan jakaa seuraaviin osatehtäviin: (Laskelmat ja perustelut on esitetty liitteessä 6).

1. Peräsimen 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).

1.9.1 Vaikuttavat voimat ja peräsinakselin jännitykset

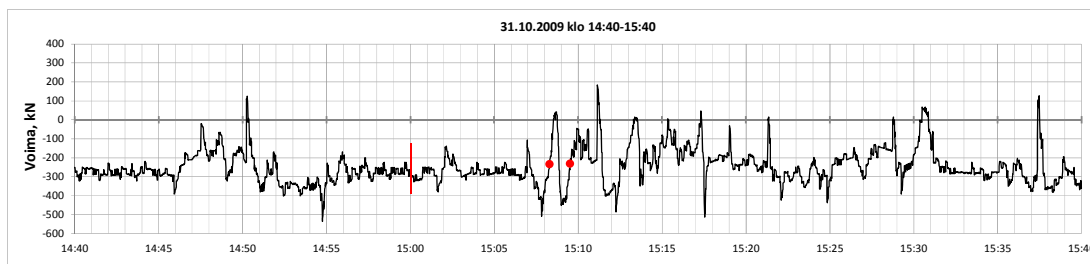
Peräsimen ja myös peräsinakseliin kohdistuvat voimat riippuvat mm. aluksen nopeudesta, peräsinkulmasta, virtauksen suunnasta, potkurin työnnöstä (kierrosluvusta ja noususta), tuulen nopeudesta ja suunnasta sekä näiden muutosnopeudesta. Lisäksi suuri merkitys on sillä, onko peräsin käännoksen suhteen sisä- vai ulkopuolella. Pääasialliset ohjailutilanteet ovat suoraan ajo, käänнос (alku, kääntyminen ja käännoksen pysäytys eli stöttaus) sekä satamamanööverit.

Jäissä ajettaessa peräsimen saattaa ajoittain kohdistua suurempia voimia kuin avoveissä.

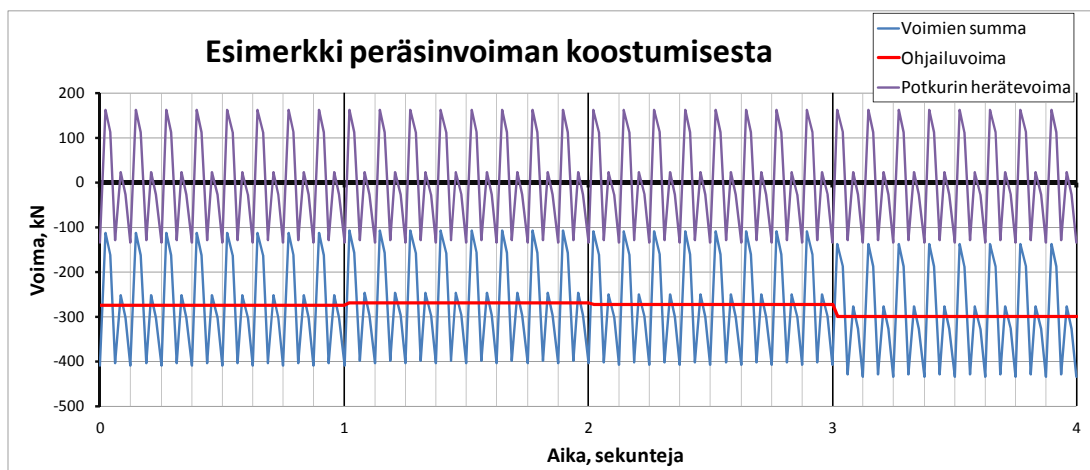
Taivuttavat voimat. Peräsimen kohdistuva taivuttava voima muodostuu kahdesta komponentista: muutaman sekunnin lähes vakiona pysyvästä ns. *stationaarisesta* peräsimen kohdistuvasta peräsinvoimasta ja potkurivirtauksen synnyttämästä aluksen nopeudesta ja potkurin kierrosluvusta riippuvasta useita kertoja sekunnista muuttuvasta, syklisestä ns. *epästationaarisesta* voimasta. Stationaarinenkin voima on muuttuva ja synnyttää ns. hitaasti muuttuvan vaihtojännityksen, kuva 51a.

Epästationaarinen voima lisää resonanssitaajuuden lähellä edestakaista peräsimen poikittaisliikettä ja peräsinakseliin kohdistuvan taivuttavan voiman vaihtelua.

Kuvassa 51a on näytetty simulointimallilla laskettu SB-peräsintä taivuttava voima tunnin ajalta 31.10.2009 onnettomuusalueen kohdalla. Kuvaan on merkitty punaisiin pistein yksi ns. hidas jakso. Kuvassa 51b on näytetty neljän sekunnin ajalta alkaen klo 15:00 (punainen viiva kuvassa 51a), miten nämä kaksi voimaa summautuvat⁸⁶ aluksen nopeuden ollessa 20,14 solmua. Tuloksena peräsinakseliin syntyy nopeasti vaihtelevia taivutusjännityksiä.



Kuva 51a. Peräsintä taivuttava voima tunnin ajalta 30.10.2009 klo 14:40–15:40.



Kuva 51b. Peräsintä rasittavan voiman periaatteellinen malli. Voima koostuu peräsimen 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.

Kuvassa 51b on käytetty niin vähän epästationaarisen voiman pisteitä, että käyrän kulmat näyttävät teräviltä. Voiman muoto on esitetty tarkemmin liitteen 4 kuvassa 3.

Alalaakerin liikevaran kasvettua tilanne tuli monimutkaisemmaksi, koska välillä alalaakeri osui pesän seinämään ja välillä staattinen ja syklinen voima eivät yhdessä saaneet alalaakeria siirtymään kiinni seinämään. Peräsimen ominaistaajuus on näissä tilanteissa erilainen. Tilannetta monimutkaistaa vielä se, että syklisen voiman johdosta alalaakeri voi välillä irrota seinämästä. Liikettä vaimensi voiteluaineena toimiva merivesi.

⁸⁶ 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.

Vääntävät voimat. Peräsinkoneen peräsinakselia kääntävä vääntömomentti muuttuu jatkuvasti ohjailutoimenpiteiden ja peräsimeen kohdistuvan stationaarisen peräsinvoiman ja epästationaarisen syklisen voiman mukana. Tämän seurauksena peräsinakseliin vaikuttaa taivutusjännityksen lisäksi samanaikaisesti nopeasti vaihteleva vääntömomentti, jonka staattinen osa on SILJA EUROPAN peräsimellä noin 0,4 kertaa⁸⁷ peräsinvoima.

Leikkausvoimat taivutuksesta johtuen ovat yleensä niin pienet, että niitä ei mitoituksessa tarvitse tarkastella.

Puristavat voimat puristusliitoksissa aiheuttavat puristusjännityksiä erityisesti kartion alueella. Jännitystila on sylinterimäinen vakiojännityksen suuntautuessa kohti kartion akselia⁸⁸. Jännitysjakautuma muuttuu kartion päättyessä akselin suoran osan alkaessa. Suora osa on ylälaakerin alueella päällystetty ruostumattomalla teräsholkilla, joka on asennettu kutistusliitoksella, jonka synnyttämä puristusjännitys on huomattavasti pienempi⁸⁹. Kriittisessä kohdassa puristusjännityksen lisäävä vaikutus keskijännitykseen on suhteellisesti suurimmillaan pienillä taivutusjännityksillä. Väsymislaskelmat on tehty sekä ilman puristusjännitystä, että sen kanssa, liite 6.

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

1.9.2 Luokituslaitosten mitoitusperusteet

Peräsinvoiman mitoitusarvo määräytyy luokituslaitosten säännöistä. Näin saadaan selville voiman yläraja. Tutkinnassa käytettiin aluksen luokittaneen Bureau Veritasin sekä Det Norske Veritasin, Germanischer Lloydin, American Bureau of Shippingin ja Lloyds Registerin peräsimen nykyisiä mitoituskaavoja. Kaavojen vaihtoehtona on laskenta lujuusopin menetelmillä. Eri luokituslaitosten kaavoista lasketut tulokset olivat lähes samat. Mitoitusvoimaksi tulee SILJA EUROPAN tapauksessa noin 1700 kN ja mitoitusvääntömomentiksi noin 600 kNm.

Peräsinkoneen nimellinen maksimimomentti on 800 kNm. Kaikissa laskelmissa on käytetty mitoitusnopeutena 22,5 solmua. Laskelmissa oletetaan, että välykset ovat noin 2 mm. Jääluokan vaatimukset vaikuttavat vain peräsimen levyn paksuuteen, joka on aluksen suunnittelussa luonnollisesti otettu huomioon.

Bureau Veritasin luokituslaskelmat 1991–1993 oli tehty vuoden 1987 säännöillä. Silloiset kaavat perustuivat peräsinpalkkiin, jota kuormittivat pistevoimat peräsimen ylä- ja alaosassa. Palkki oli jäykästi kiinnitetty ylälaakerin alareunaan ja sarvi oli joustamaton tuki.

⁸⁷ Peräsinvoiman resultantin vaikutuspisteen etäisyys peräsinakselista on noin 0,4 m.

⁸⁸ Liitoksen puristuspaineeksi ja siten peräsinakselia kartion alueella puristavaksi jännitykseksi tulee 70–100 N/mm², kun peräsimintä työnnetään ylöspäin 4,7 mm. (Perustuu asennustietoihin ja BV:n sallimiin paineisiin).

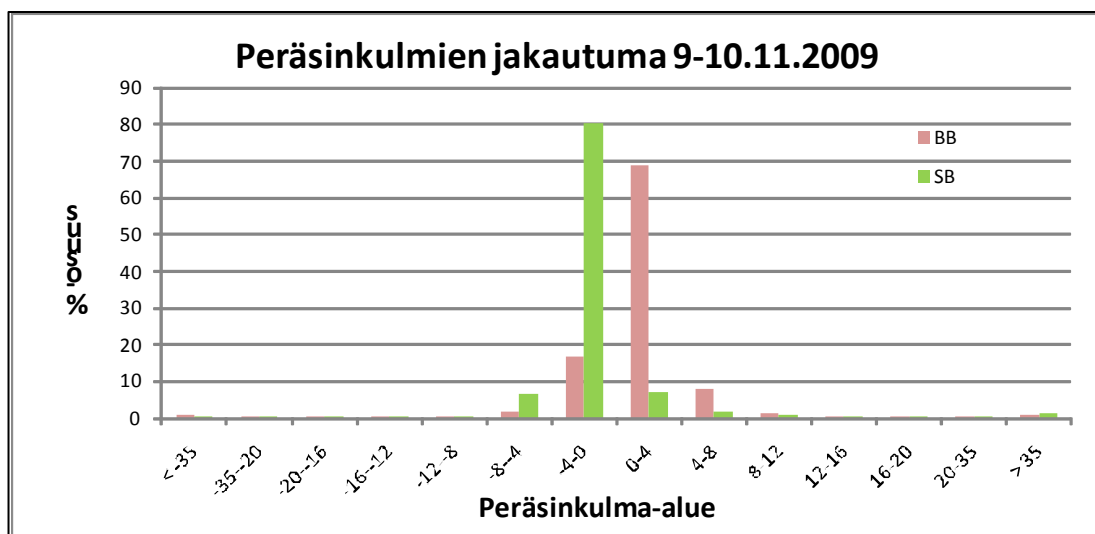
⁸⁹ Sallittu laakeripaine on 7 N/mm². (BV:n säännöt, Part B, ch 10, sec 1, Table 6). Puristuspaine on tätä suurempi, jotta päällyste ei pyörisi.

Kokonaisperäsinvoimaksi oli tuolloin saatu 1412 kN. Luokituslaitoksen tarkistuslaskelmien mukaan mitoitus oli oikein⁹⁰.

1.9.3 Peräsinvoimien suuruusluokkien arviointi

Alusta ohjailtaessa merkittävimmät peräsinvoimaan vaikuttavat tekijät ovat peräsinkulma ja aluksen nopeus. Niiden tilastolliset jakautumat on näytetty seuraavissa kuvissa. Kun tähän tietoon yhdistetään suuntaa antava staattisen peräsinvoiman riippuvuus nopeudesta ja peräsinkulmasta, saadaan käsitys käytännössä esiintyvien voimien suuruusluokista.

Peräsinkulma on se kulma mihin peräsinkone kääntyy riippumatta siitä onko peräsinakseli ehjä vai poikki. Peräsinkulma on positiivinen, kun peräsintä käännetään vasemmalle (SB-peräsintä sisäänpäin ja BB-peräsintä ulospäin). Peräsimien kääntökulma on käytännössä aluksen kulun aikana harvoin yli 25 astetta. Yleisimmät suurimmat kulmat ovat 12–15 astetta ja valtaosa kulmista on 0-5 astetta puoleen tai toiseen (kuva 52). Peräsinkulman ollessa nolla, peräsinvoima ei ole nolla johtuen potkurivirtauksesta, vanavedestä, aluksen kääntymisen vaiheesta ja peräsimien perusasennosta, joka on käännetty asteen verran sisäänpäin. SB- ja BB-peräsinkulmat ovat yleensä hieman erisuuruiset.

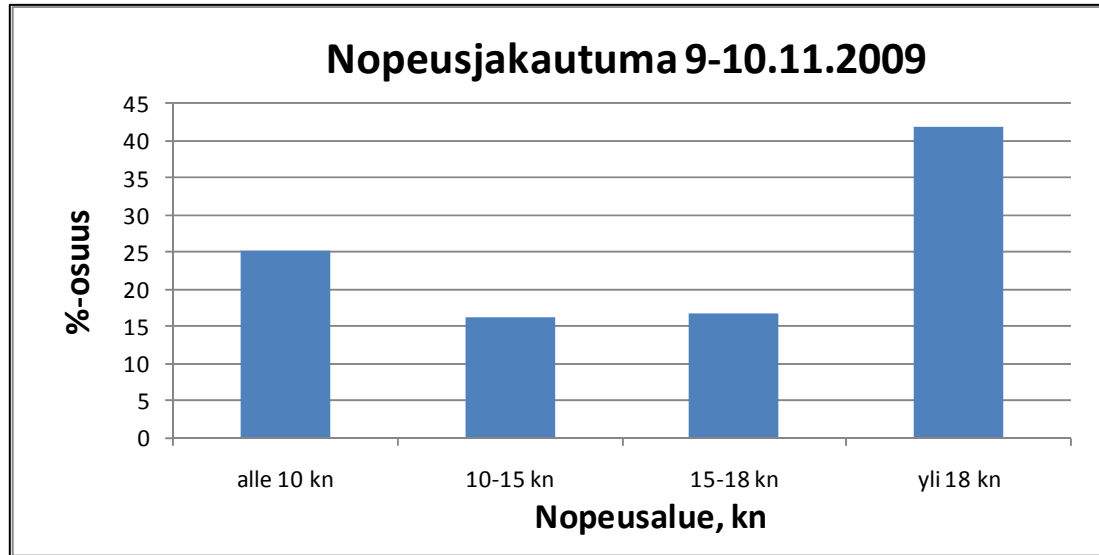


Kuva 52. Aluksen peräsinkulmien yleisyys. Kulma on positiivinen vasemmalle.

Kuvan 52 mukaan valtaosan kulkuajasta peräsinkulmat ovat alle 4 astetta (85%) tai alle 8 astetta (95%). On huomattava, että pienilläkin kulmilla voi syntyä suuria ohjailuvoimia esim. käännösten yhteydessä.

⁹⁰ Bureau Veritasin Suomen konttorin välittämä sähköposti 12.11.2010. Vuoden 1987 säännöissä voiman laskentakaava erosi nykyisestä.

Kuvassa 53 on nopeusjakautuma. Se sisältää myös satamassa oloajan, minkä vuoksi pienten nopeuksien osuus näyttää suurelta. Suurin osa kulkuajasta ajetaan yli 18 solmun nopeudella.



Kuva 53. Aluksen nopeusjakautuma.

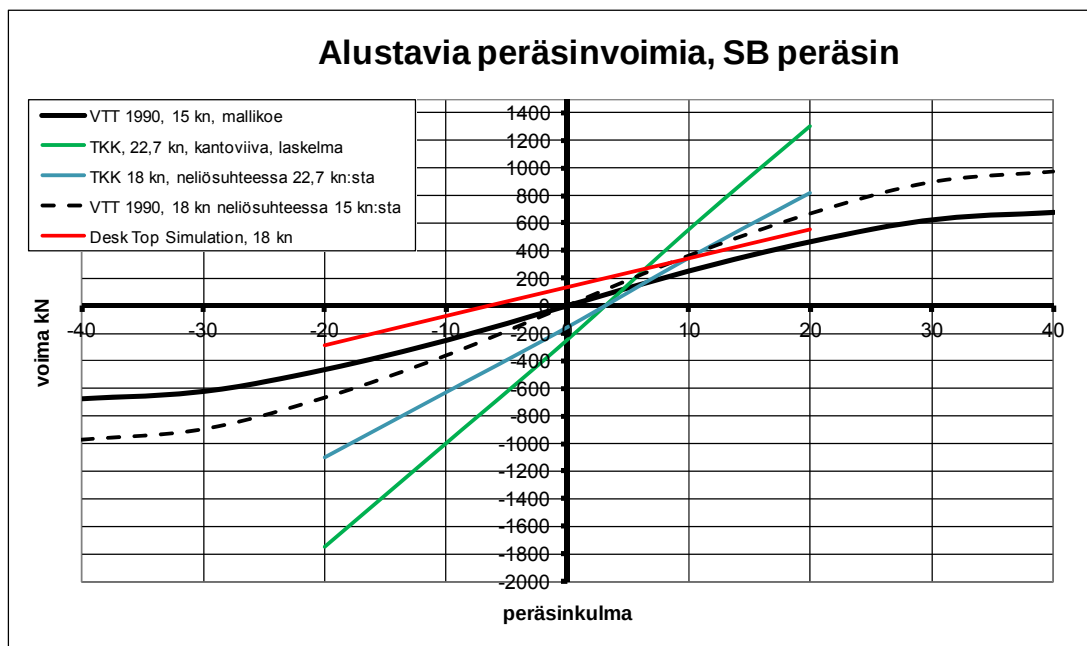
SILJA EUROPA:n peräsimen ohjailuvoimien suuruusluokka peräsinkulman ja aluksen nopeuden funktiona on arvioitu neljällä tavalla: Simulco Oy:n SILJA EUROPA:n DTS⁹¹-ohjailumallilla tehdyillä laskelmilla, VTT:n laivalaboratoriossa vuonna 1990 tehdyillä mallikokeilla⁹², TKK:n laivalaboratoriossa tehdyillä laskelmilla⁹³ sekä kirjallisuudesta löydettyillä menetelmillä⁹⁴. Esimerkkinä on näytetty VTT:n, simuloinnin (Desk Top) ja TKK:n tuloksia, kuva 54. Muut menetelmät antoivat samaa suuruusluokkaa olevia tuloksia.

⁹¹ Desk Top Simulation, yksinkertaistettu ohjailumalli, joka ottaa huomioon potkuri-peräsin vuorovaikutuksen, potkurin kuormituksen ja virtauksen peräsiiniin.

⁹² Matti Salo, Martti Heikkilä: On the modelling of hull-propeller-rudder interactions in manoeuvring of twin screw ships, MAR-SIM & ICSM 90 Tokyo, Japan, June 4-7 1990. Mittakaavakorjaus on tehty potkurien halkaisijoiden suhteella (mallikoealus 4,9m, Silja Europa 5,0m. Todennäköisesti mallikoealuksen peräsimen kokonaispinta-ala (peräsinlapa+sarvi) oli 19,7 m² ja Silja Europalla 23,6 m². Voimat on muunnettu pinta-alojen suhteessa.

⁹³ Elias Penttinen, Jerzy Matuziak: Silja Europan peräsiimeen kohdistuvien voimien arvio, syyskuu 2010. Aalto -yliopisto, Teknillinen korkeakoulu, Sovelletun mekaniikan laitos.

⁹⁴ Esimerkiksi alaviitteen 24 viitteet ja otteita kirjasta Handbuch der Werften, 1986, Manövrierfähigkeit und Steuerorgane sekä Principles of Naval Architecture, Volume III, osa Controllability, 1989.



Kuva 54. Eri lähteistä saatuja SILJA EUROPAn peräsimelle laskettuja peräsinvoimia.

Tulosten hajonta on luonnollista johtuen erilaisista menetelmistä ja lähtöoletuksista. Tavallisimmilla peräsinkulmilla, -20...+20 astetta, saadaan kohtuullinen arvio.

Muunnettaessa nopeudesta toiseen on käytetty hyväksi verrannollisuutta nopeuden neliöön. Kuvaa 54 on käytetty tutkinnan alkuvaiheessa voimien suuruusluokka-arviota varten ja arvioitaessa varsinaisten peräsinvoimalaskelmien (simulointien) luotettavuutta. Peräsinakselin väsymistarkastelussa on lähtökohdaksi otettu simulointimallilla lasketut peräsinvoimat.

1.9.4 Simuloidut staattiset voimat

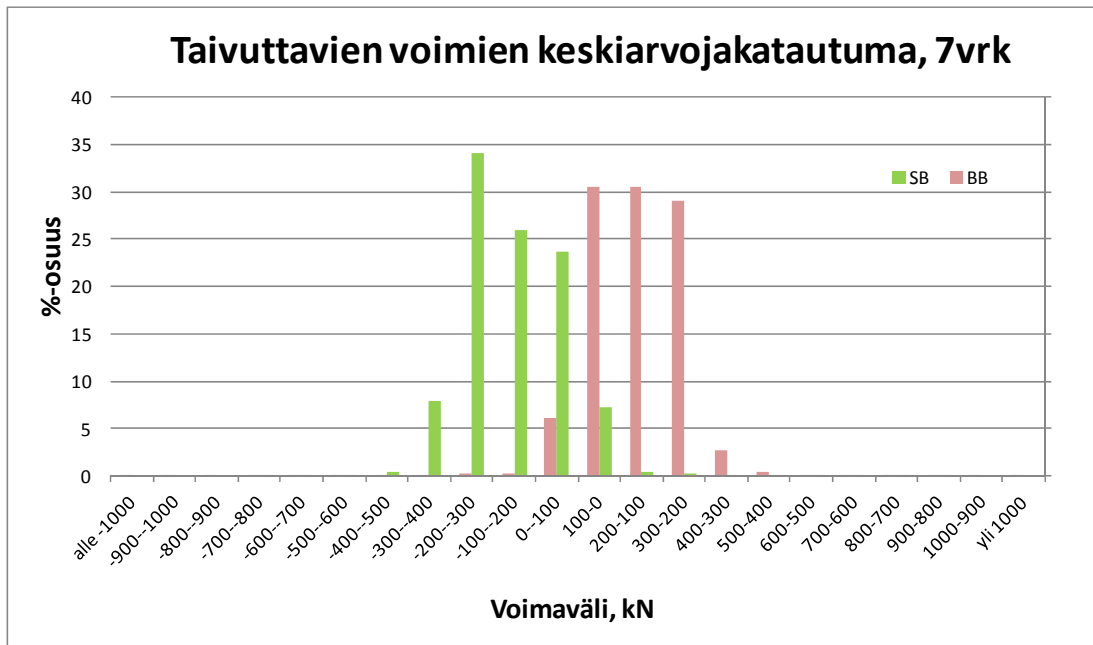
Merkittävimpien peräsinvoimiin vaikuttavien muuttujien (aluksen nopeus, peräsinkulma, aluksen kääntymisnopeus, potkurin nousu ja kierrosluku sekä tuulitiedot) pohjalta määritettiin SILJA EUROPAn ohjailun simulointimallilla SB- ja BB-peräsimistä syntyvät alukseen kohdistuvat pitkittäiset ja poikittaiset voimat VDR-tiedoista sekunnin välein⁹⁵. Näistä voimista on määritetty sekunnin välein peräsiimeen kohdistuva taivuttava staattinen peräsinvoima.

Simulointimallissa käytetyn aluksen perän muodot ja mitat, peräsin- ja potkurijärjestely sekä vanavesi vastaavat SILJA EUROPAa. Kuvassa 55 on simuloitujen peräsinvoimien 7 vrk keskiarvon jakautuma. Voima on jaettu ryhmiin 100 kN välein. SB-voiman 7 vrk keskiarvo⁹⁶ noin, -150 kN, on noin 15 % suurempi kuin BB-voiman. Sen sijaan BB-puolella maksimivoima on suurempi.

⁹⁵ Simulco Oy

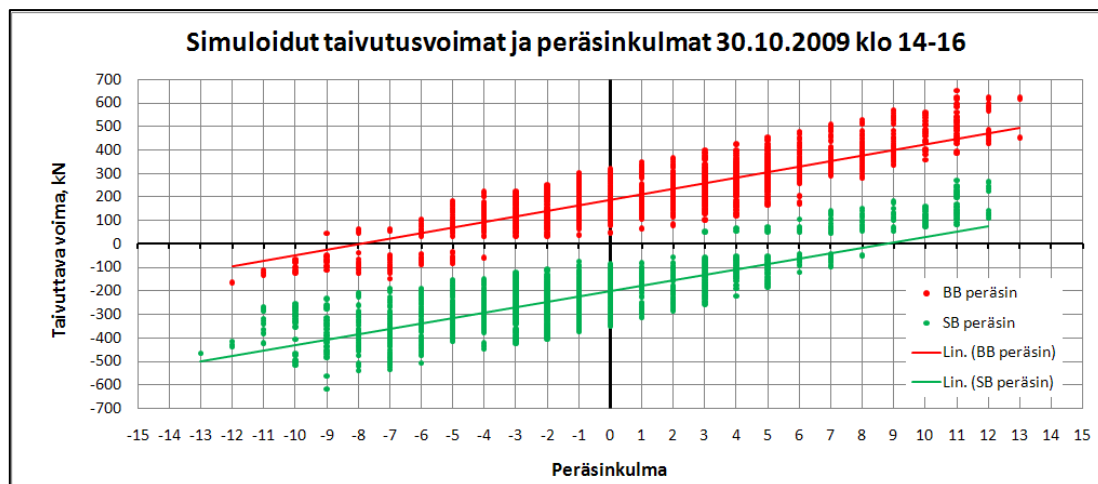
⁹⁶ Itseisarvoilla laskettu keskiarvo on noin 13 % suurempi. Tämä voi ainakin osittain johtua siitä, että SB-peräsinkulmat ovat kalibroitukertomien epätarkkuudesta johtuen hieman liian suuret.

Simulointi on tuottanut joitain yksittäisiä noin 1000 kN voimia, joita ei ole laskelmissa käytetty, koska niitä esiintyy vain BB-peräsimellä.



Kuva 55 Simuloitujen taivuttavien voimien jakautuma.

Kuvassa 56 on esitetty simuloituvat voimat ja peräsinkulmat 30.10.2009, jolloin peräsimet olivat ehjät. Nähdään, että kulmat olivat enintään noin 13 astetta.



Kuva 56 Simuloituja voimia peräsinkulman funktiona.

1.9.5 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 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 5 on esimerkki näiden kolmen muuttujan suhteen tehdystä lajittelusta. Tuloksena on tieto siitä kuinka monta tapausta vuorokauden aikana sekunnin välein simuloituista taivuttavista voima-alueista osuu eri kierroslukualueilla eri nopeusalueille. 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 ruuduilla 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 5. 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

Sykliisellä voimalla on 8⁹⁷ kertaa sekunnissa esiintyvä huippuarvo 345 kN TKK:n laskelmien pohjalta, vastaten aluksen nopeutta 22,7 solmua. Huippuarvoja on siten 691200 kpl vuorokaudessa. Taulukossa on nopeuden neliösuhteesta laskettu nopeusaluekohtainen 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 TKK:n raportin mainintaan, että voima on tuloksissa liian suuri, koska peräsin on jäykkä.

Yksityiskohtaiset laskelmat ovat liitteessä 10.

1.9.6 Voimien muunto jännityksiksi

Voimajakautuma on muunnettava jännitysjakautumaksi, jotta voidaan laskea erisuuruisten jännitysten osuus ja verrata sitä peräsinakselin väsymiskestävyyttä kuvaavaan Wöhler-käyrään, joka perustuu jännitysvaihteluihin.

⁹⁷ Potkurin kierrosluku on ollut keskimäärin 122 1/min, joten 8 Hz lapataajuus on sopiva.

Yksinkertaisin väsyttävän kuormituksen tyyppi on säännöllisesti (sinimuotoisesti) vaihteleva jännitys, jolloin jännitysamplitudi on vakio. Tämä vastaa väsytykokeiden kuormitusta, joita voidaan tehdä eri keskijännityksillä. Käytännössä kuormitus voi koostua erisuuruista jännitysheilahteluista, joiden keskiarvo voi olla vakio tai ajan mukana jonkin säännön mukaan tai satunnaisesti muuttuva. Viime mainituksessa tapauksessa eräs tapa on muuntaa jännitysvaihtelut sellaisiksi, että keskiarvo on nolla. SILJA EUROPA:n tapauksessa jännitysvaihtelut jakaantuvat nopeisiin, 8 kertaa sekunnissa tapahtuviin ja hitaasti vaihteleviin, jopa useiden kymmenien sekuntien välein muuttuviin. Kuormitus on käytännössä ollut satunnaista. Esimerkiksi kuvassa 51a punaisilla ympyröillä merkitty väli muodostaa yhden hitaan jakson.

Muunto voimista jännityksiksi tapahtuu liitteessä 6, kuvan 3 esittämällä tavalla. Vaihtuvan vääntöjännityksen osuus on pieni. Sen vähäinen vaikutus on lopullisissa laskelmissa otettu huomioon likimääräisesti.

Näiden vaiheiden kautta syntyi uusi taulukko, jossa on väsymistarkastelussa tarvittavat jännitykset taulukon 5 ruutuja vastaavissa kohdissa. Tämän jälkeen voidaan laskea valittaviin jännitysväleihin syklisistä voimista kertyvä jännitysvaihtelujen määrä. Alalaakerin ollessa kunnossa, peräsinarvi kantaa pääosan kuormituksesta ja akselin staattinen ja syklinen jännitys ovat pieniä. Tilanne oli tällainen alkuvuosina noin vuoteen 2004 asti sekä valuepoksin 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. Laskelmissa puristusjännityksen huomioon ottaminen lyhentää hieman akselin elinikää.

1.9.7 Peräsinakselin väsymislajuuden arviointi

Peräsinakselin väsymislajuuden arviointi perustuu Wöhler-käyrään. Käyrä esittää, kuinka monta kuormitusvaihdosta materiaali kestää tietyn suuruusella jännityksellä tai venytyksellä/puristuksella. Seuraavassa esitetään tiivistetysti, miten tutkinnassa käytetyt Wöhler-käyrät on laadittu. Tarkemmin aihe on esitetty liitteessä 6.

Vääntöjännityksen vaikutus on tämän tapauksen tavanomaista suuremmilla taivuttavilla keski- ja vaihtojännityksillä niin pieni, että riittää tarkastella vain väsyttäviä taivutusjännityksiä, joihin lisätään likimääräisesti vaihtuvan vääntöjännityksen osuus. SILJA EUROPA:n luokitusdokumenttien mukaan peräsinakselin materiaalin murtolujuus oli 470⁹⁸ N/mm². Teoreettinen taivutusväsymislajuus teräksellä on noin puolet aineen murtolujuudesta, ts. tässä tapauksessa 235 N/mm², kun kuormitusvaihtelujen lukumäärä on miljoona tai sitä suurempi, keskijännityksen ollessa nolla. Materiaalin (C22) ominaisuuksista johtuen akselin todelliset lujuusarvot saattoivat olla pienemmät tai suuremmat. Kuvassa 57 on periaatteellinen peräsinakselin materiaalin taivutuksen Wöhler-käyrä⁹⁹ (musta), jota on käytetty, koska todellista käyrää ei ollut tiedossa. Kuormitusvaihtelujen

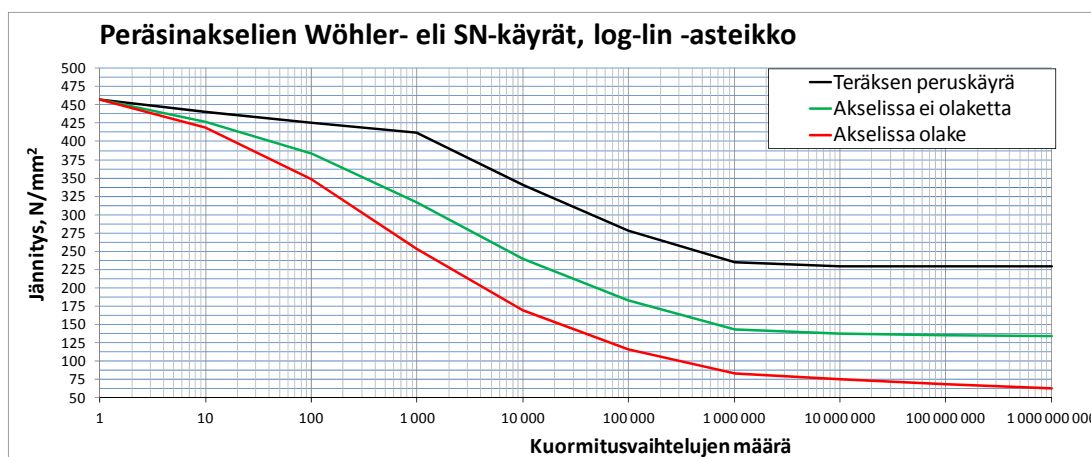
⁹⁸ VTT:n vetokokeissa murtolujuudeksi tuli 458 N/mm².

⁹⁹ Esim. Lujuusopin perusteet, s. 428. Tässä, eikä muissakaan peruskäyrissä esitetä väliä 0–1000 kuormitusvaihtelua. Tällä välillä perustaksi tulee jännityksen sijaan venymä. Käyrää kutsutaan myös SN-käyräksi.

alue 0-1000 on arvioitu erikseen kaikissa kolmessa tapauksessa. Kun asteikot ovat logaritmiset, käyrä muodostuu suorista osista.

Väsymislujuuskokeet tehdään pienillä, tietyt mittasuhteet ja kiillotetut pinnat omaavilla koesauvoilla standardoidun koemenettelyn mukaisesti. Sen vuoksi yllä esitettyjä arvoja on käytännössä pienennettävä todellisen kappaleen koon ja pinnan laadun perusteella. SILJA EUROPA:n peräsinakselille on käytettävä suuremman koon (halkaisijan) ja huomion pinnanlaadun huomioon ottavia kertoimia, mitkä johtavat taivutusväsymislujuuteen 143 N/mm^2 vaihtoluvulla miljoona (vihreä).

Mikäli rasituksen alaisessa kappaleessa on lovi, säröjä tai vastaavaa, väsymislujuus heikkenee. Loven vaikutus voidaan ottaa huomioon esimerkiksi ns. loven vaikutusluvun avulla.



Kuva 57. Teräksen väsymislujuuden peruskäyrä (musta) ja peräsinakselien arvioitdut väsymislujuuskäyrät, Wöhler- eli SN-käyrät keski-jännityksen ollessa nolla. Vaaka-asteikko on logaritminen.

Loven vaikutusluvuksi on arvioitu 1,74 ja taivutusväsymislujuudeksi 82 N/mm^2 , joka vastaa miljoonaa kuormitusvaihtelua. Kuormitusvaihtelujen ollessa tätä suurempia, Wöhler-käyrää on tapana kallistaa alaspäin. Loven vaikutuksen tarkempi arviointi vaatisi FEM (Finite Element Method)-laskentaa. BB-puolen akselin olakkeen muodosta ei ole tietoa. Sen syvyys on ollut sama kuin SB-akselin, joten BB-akselin SN käyrän arvoja rajoittavat kuvan 57 punainen (olakkeellinen akseli) ja vihreä (olakkeeton akseli tai hyvin pyörästetty olake) käyrä.

Väsyttävän kuormituksen ollessa satunnaista Wöhler-käyrä saattaa olla vielä edellä esitettyä heikompi (alempana). Tätä ei ole yritetty arvioida.

Särön päästyä alkuun ja sen kasvaessa sen etenemiseen tarvitaan yhä pienempi jännitys. Särön koko kasvaa eksponentiaalisesti ajan ja kuormituskertojen funktiona. Kun poikkipinta on pienentynyt tarpeeksi, yksi tarpeeksi suuri kuormituskerta riittää rakenteen murtamiseen. Väsymismurtuma alkaa tavallisesti rakenteen paikallisesta jännityshuipusta, jonka voi aiheuttaa reikä, olake, kierre, korroosioaurio tai materiaali-
vialti.

JA EUROPAn tapauksessa alkukohta on ollut SB-puolen peräsinakselilla olleessa 0,3 mm korkuisen terävän olakkeen alakulma.

Ikuisen keston raja. Kuten kuvasta 57 käy ilmi, teräksellä on sellainen ominaisuus, että tietyn jännitysrajan alapuolella kappale kestää käytännöllisesti katsoen rajattoman määrän jännitysvaihteluja. Tämän rajan alapuolella olevat vaihtojännitykset ovat ns. *ikuisen keston* alueella, eikä niitä yleensä¹⁰⁰ tarvitse ottaa huomioon väsymiskestävyyslaskennassa.

Normaali peräsimen staattinen mitoitus sisältää reserviä ja rakenneratkaisuilla pidetään huolta siitä, että väsyminen ei muodostu ongelmaksi. Muun muassa peräsinakselin vaihtojännitykset pysyvät huomattavasti materiaalin ikuisen keston rajan alapuolella.

1.9.8 Peräsinakselien elinikäarviointi

Tässä käytetty proseduuri on esitetty liitteessä 6. **Minerin teorian** osuudesta tässä proseduurissa käytetään nimitystä *kumulatiivinen väsymiskestävyyslaskenta*. Sen avulla selvitetään, kuinka suuren osuuden akselin eliniästä tietyn suuruinen jännitysvaihtelu kuluttaa. Erisuuruisten jännitysvaihtelujen kulutusosuudet lasketaan yhteen, ja summan tulee yleisen käytännön mukaan olla alle 1, jotta rakenne kestäisi kyseisen vaihtelevan kuormituksen.

Koska jännitykset kasvavat alalaakerin liikevaran kasvun myötä, voidaan nettoliikevaralle löytää raja-arvo, jota pienemmillä arvoilla vaihtojännitykset ovat ikuisen keston alueella. Raja-arvo osoittautui olevan 5-6 mm. Tällöin riittää tarkastella vain niitä aikavälejä, jolloin tuo raja-arvo ylittyy.

Laskentaproseduurissa on etsitty kokeilemalla sellainen muuttujien kombinaatio, että havainnot ja mittaustulokset voidaan selittää. E erityisen voimakkaasti tuloksiin vaikuttaa pienikin muutos SN-käyrässä. Myös kierrosluvusta riippuvalla herätevoiman vahvistuksella voidaan tuloksia säätää (värähtelyn vaimennuskerroin on arvioitu melko suureksi, liite 4).

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.

Normaalivälykset

Laskelmat osoittavat, että ilman syöpymistä akselit olisivat kestäneet, eikä väsyminen olisi kuluttanut elinikää, mikä oli odotettavissa.

¹⁰⁰ Mikäli aluksi esiintyy suuri määrä kuormitusvaihteluja siten, että jännitys on hieman ikuisen keston alapuolella, ikuisen keston raja nousee. Jos taas aluksi esiintyy suuria jännitysvaihteluja, jotka sitten pienenevät, ikuisen keston raja laskee. SILJA EUROPAn tapauksessa tilanne ei vastannut kumpaakaan näistä, mutta silti vihreää ja punaista suoraa on hieman kallistettu alaspäin alkaen miljoonasta jännitysvaihtelusta.

Akseli ilman olaketta, mutta alalaakeri syöpyy

Tehtyjen laskelmien mukaan peräsinakseli ei olisi vaurioitunut alalaakerin nettoliikevaran ollessa enintään 12 mm, nettoliikevaralla 16 mm akseli olisi kestänyt alle kaksi vuotta.¹⁰¹ 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 esitetystä.

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.

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

Pääosin elinikää kulutti potkurin herätevoima taajuudella noin 8 Hz. Vasta 11–12 mm nettoliikevaralla hitaat vaihtelut tulevat merkittäviksi.

Laskelma 2004–2009. Pääosan ajasta jännitykset pysyivät pieninä, eikä jäljellä olevaa elinikää kulunut, koska nettoliikevara oli 1 mm (välitys pysyi normaalina valuepoksien 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 vaihteluilla. Jännitys nousi noin 550 kN peräsinvoimalla teräksen myötörajalle. Maksimissaan jännitys saattoi nousta yli myötörajan, jännityksiin 300–350 N/mm² suurilla peräsinvoimilla, 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 välitys pysyi sallituissa rajoissa (valuepoksi oli valtaosin paikoillaan).

1.10 Arvio tutkinnassa käytetyn laskentamenettelyn luotettavuudesta

Alalaakerin syöpmisen seurauksena peräsinlavan, peräsinsarven, peräsinkoneen, laakerien ja akseleiden muodostaman rakenteen lujuustarkastelu on tutkinnassa jouduttu ulottamaan tilanteisiin, jotka ovat täysin luokitussääntöjen oletusten ulkopuolella (liite 5). Rakenteen kohtuullinen yksinkertaisuus ja tiedot nettoliikevarasta ovat tehneet mahdolli-

¹⁰¹ Nettoliikevaraa 12–16 mm ei alalaakerissa missään vaiheessa esiintynyt, koska vuoden 2004 telakoinnissa pesää hiottiin epoksivalua varten, jolloin potentiaalinen liikevara kasvoi yli 12 millimetriin. Epoksin hävitessä ja pesän lisäsyöpmisen johdosta liikevara oli onnettomuuden jälkeen telakalla yli 16 mm.

seksi tarkastella sen staattista käyttäytymistä likimääräisesti lujuusopin peruskaavoilla. Väsymislujuuden tarkastelussa on rajoitettu yksinkertaisiin perusmenetelmiin, joiden tulokset tässä tapauksessa ovat vain suuntaa antavia. Tämä on katsottu riittäväksi, koska lähtötiedot ovat epätarkkoja ja epävarmoja, eikä kyseessä ole mitoitus.

Rakenteen väsymiskestävyyden laskenta 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 seikka 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 väsytykskokeisiin, jotka on tehty ilmassa. Tässä tapauksessa peräsinakseli on ollut tiivistellä 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 johdosta. Erityisesti ensimmäisen ja toisen kertaluvun värähtelymuodon yhteisvaikutus on karkea arvio. Kolmas epävarma tekijä on peräsimen ominaistajuuden suuruus, joka perustuu TKK:n laskelmiin ja Det Norske Veritasin likimääräiseen tilastoon. Samoin herätevoiman suuruuden laskentamenetelmä sisältää yksinkertaistuksia. TKK:n loppuraportissa mainitaan useita tekijöitä, jotka heikentävät herätevoiman suuruuden ja peräsimen ominaistajuuden luotettavuutta. Lisäksi holkkien putoamisajankohdat ovat arvioita. Ennen vuoden 2004 telakointia arvion tarkkuus on todennäköisesti muutama kuukausi ja vastaavasti ennen akselin katkeamista muutama päivä.

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 väsymiskestävyyden arvioinnissa 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. Laskelmin arvioidut ajankohdat ja väsymiskestävyydlaskelmien esitetyt numeroarvot ovat mahdollisia, mutta niissä on suuri epävarmuus.

1.11 Toimintaa ohjaavat säädökset ja määräykset

Kansainvälisessä liikenteessä kulkevan suurta matkustajalauttaa koskevat hyvin monet kansainväliset ja kansalliset sopimukset ja lait. Tässä tarkastellaan vain peräsinkoneistoon ja komentositatyöskentelyyn sekä hälytystoimintaan liittyviä säädöksiä.

Peräsimen tuotanto- ja huoltoprosessit

Peräsimen suunnittelun lähtökohta on useimmiten kopiointi: käytetään telakan arkistoista vastaavanlaisen aluksen ratkaisuja. Varsinainen mitoitus tehdään luokituslaitoksen sääntöjen perusteella. SILJA EUROPA:n peräsin on suunniteltu Bureau Veritasin vuoden 1987 sääntöjen perusteella. Säännöissä ei mainita korroosiovaaraa alalaakerissa.

Peräsinakselin aihio tilataan valmistajalta, jonka toimintaa luokituslaitos valvoo. Aihio saa luokituslaitoksen tarkastuksen jälkeen hyväksymisleimat. Telakalla tai sen alihankkijalla peräsinakseli sorvataan lopullisiin mittoihin. Tässä vaiheessa on jostain syystä ainakin toiseen akseliin jäänyt olake.

Luokituslaitosten sääntöjen mukaan aluksen luokitus on uusittava viiden vuoden välein (class renewal survey). Aikaan voidaan myöntää 3 kuukauden pidennys. Tänä aikana alus on telakoitava kaksi kertaa, jolloin on tehtävä mm. peräsinlaitteiston tarkastus¹⁰². Telakointien yhteydessä on tarkastettava peräsin ja ylä- sekä alalaakerien välykset. Tarkastuksesta on tehtävä merkintä pöytäkirjaan, johon tarkastaja voi lisätä muistion (memorandum) puutteista, jotka eivät vaikuta luokkasertifikaatin voimassaoloon¹⁰³. (alaviitteiden sääntöotteet ovat Bureau Veritasin säännöistä 2010). Peräsinakselia ei irroteta tarkastettavaksi telakointien aikana. Luokituslaitoksella ei ole sääntöjä tai ohjeita peräsimen korroosiosuojauksesta eikä alalaakerin korjaustavasta, koska nämä eivät ole luokituksen piirissä¹⁰⁴.

Liikenteen turvallisuusvirasto ja Bureau Veritas ovat sopineet, että Suomen viranomaisten tarkastukset hoitaa pääosin luokituslaitos.

Varustamon laatu järjestelmät ja ohjeet

TallinkSilja-yhtiön pääkieli on englanti. Aluksilla on henkilökunnasta ja reitistä riippuen työkielenä suomi, ruotsi tai viro.

¹⁰² For ships classed with the class symbol I, there are to be two examinations of the outside of the ship's bottom and related items in each period of class of five years. In all cases, the interval between any two such examinations is not to exceed 36 months. An extension of examination of the ship's bottom of three months beyond the due date can be granted in exceptional circumstances. (Pt A, Ch 2, Sec 2, 5.4.3). Visible parts of the rudder(s), rudder pintles, rudder stock and couplings as well as the sternframe are to be examined. If considered necessary by the Surveyor, the rudder (s) is (are) to be lifted or the inspection plates removed for the examination of pintles. The clearances in the rudder bearings and the rudder lowering are to be checked and recorded. Where applicable, pressure test of the rudder may be required as deemed necessary by the Surveyor (Pt A, Ch 3, Sec 4, 2.1.5).

¹⁰³ Those defects and/or deficiencies which do not affect the maintenance of class and which may therefore be cleared at the Owner's convenience and any other information deemed noteworthy for the Society's convenience are indicated as memoranda. Memoranda are not to be regarded as recommendations (Pt A, Ch 2, Sec 2, 2.1.5).

¹⁰⁴ 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."

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 hätätilanneohjeet, mm. hätäohjaustoimenpiteet¹⁰⁵. Normaali toimintaa varten ohjeet ovat ns. vihreässä kirjassa.

Lisäksi aluksella on ns. ”kunksaps log”, johon kerätään hyväksi havaittuja menettelyjä.

SILJA EUROPALLA oli käytössä aluskohtainen BRM-menettely. Sen tarkoituksena on kehittää aluksen komentosillan henkilökunnan käyttämiä ohjailumenettelyjä varmistamaan aluksen turvallisuutta. Aluksen ohjailuun liittyvää koulutusta annetaan vuosittain 1–2 päivää BRM-moduulien¹⁰⁶ pohjalta. Kolme moduulia ajetaan simulointimallilla, jonka jälkeen analysoidaan, miten toiminnassa onnistuttiin. Moduulit voivat olla esimerkiksi vika-ketjut, tilannetietoisuus, komentosillamiehistö tiiminä, kommunikaatio, reittisuunnittelu, hätätilanteet.

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

Hälytykset

Kansainvälisessä ohjeistuksessa, kuten radio-ohjesäännössä, määritellään päällikön oikeus, mutta ei velvoitetta vaaratilanteessa lähettää pika- tai hätäsanoma. Mikäli alus on hädässä tai vaarassa joutua hätään, sen on ilmoitettava tilanteesta merilain¹⁰⁷ mukaan meripelastuksen johtokeskukselle sekä VTS-alueella alusliikennepalvelulain¹⁰⁸ mukaan VTS-keskukselle. Tämän lisäksi alus voi joutua antamaan IMO:n päätöslauselman, A.950(23)¹⁰⁹, mukaisia ilmoituksia MAS-keskukseen (Maritime Assistance Services). Turun meripelastuskeskus, MRCC Turku, toimii IMO:n päätöslauselmassa tarkoitetun Suomen MAS-yhteyspisteenä.

¹⁰⁵ ”Jos ruorikoneistoon tulee joku vika tai jos tulee Black Out toimi seuraavasti: 1) Tarkista, mitkä ruoripumput ovat toiminnassa. 2) Käännä pääruoripaneelista kytkin EMERGENCY asentoon. 3) Ohjaa NFU painonapeilla toimivaa peräsimintä. 4) Jos tämä ei toimi, siirry ohjaamaan paineakuilla. Ohjailu paineakuilla toimivilla vivuilla, jotka sijaitsevat autopilotti 1:n takana ja siivillä: 1) Irrota vipujen lukitusjärjestelmä. 2) Ohjaa peräsimiä paineakkuvivulla. 3) Muista, että peräsimiä voidaan kääntää paineakuilla yhteensä 120°.”

¹⁰⁶ 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.

¹⁰⁷ Merilaki 15.7.1994/674 6. luku 11a §: Merihädän vaara. Jos alus on vaarassa joutua merihätään, josta voi aiheutua vaaraa aluksessa oleville, päällikön on viivytyksettä ilmoitettava asiasta meripelastuslaitokselle tai meripelastuskeskukselle taikka muulle asianomaisella alueella etsintä ja pelastustointia johtavalle yksikölle.

¹⁰⁸ Alusliikennepalvelulaki 5.8.2005/623. 23 §: Merellä tapahtuvista vaaratilanteista ja onnettomuuksista ilmoittaminen. Aluksen päällikön on ilmoitettava VTS-viranomaiselle 1) kaikista aluksen turvallisuuteen vaikuttavista vaaratilanteista tai onnettomuuksista, 2) kaikista merenkulun turvallisuutta vaarantavista vaaratilanteista tai onnettomuuksista.

¹⁰⁹ IMO:n päätöslauselman A.950(23), Maritime Assistance Services (MAS), mukaiset, mm. IMO:n eri päätöksiin perustuvat, ilmoitukset eivät vaadi ihmisten pelastamista; esimerkiksi tapaukset, joissa lastia tai öljyä on joutunut mereen, alus tarvitsee muuta kuin hätätilanteen edellyttämää avustusta tai hätätilanteessa ihmisten pelastaminen on hoidettu, mutta pelastusmiehistö on aluksella.

2 ANALYYSI

2.1 Analyysin perusteet

2.1.1 Analyysin lähtökohta ja johtojat

Analyysin lähtökohta. Peräsinakselin katkeaminen on hyvin harvinainen onnettomuus erityisesti ilman ulkoista pohjakosketusta tms. Samanlaisen vaurion toistumisen estämiseksi tutkinnassa tarkasteltiin laajasti tapahtuman teknisiä taustoja. Tavoitteena on selittää akselien vaurioituminen, joka osoittautui 17 vuoden aikana kehittyneeksi kolmivaiheiseksi prosessiksi.

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 1.5.2, 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.

Analyysin johtojat on ollut esittää akselin katkeamisen aiheuttaneen väsymismurtuman kehittyminen, syyt ja myötävaikuttaneet tekijät. Tärkeä analyysin osa on ollut väsymismurtuman ajallisen kehittymisen kuvaus aluksen koko käyttöajan aikana. Murtumisprosessin ajalliset vaiheet samoin kuin analyysin osat ovat:

- 2.2 Väsymismurtumaprosessin vaihe 1 – alku ja kehittyminen,
- 2.3 Väsymismurtumaprosessin vaihe 2 – valuepoksikorjaus ja sen rikkoontuminen,
- 2.4 Väsymismurtumaprosessin vaihe 3 – peräsinakselin katkeaminen,
- 2.5 Suunnittelu-, valmistus- ja tarkastusprosessien arviointi,
- 2.6 Yhteenveto murtumisprosessista, ja
- 2.7 Laivan hallinta onnettomuusmatkalla.

SB- ja BB-peräsimet on analyysissä käsitelty rinnakkain tavoitteena selittää toisen katkeaminen toisen pysyessä ehjänä samoissa olosuhteissa. Peräsinten akselit olivat lujuustarkastelun kannalta erilaiset (1.8.1)¹¹⁰ ja niihin kehittyneet väsymismurtumat olivat onnettomuuden tapahtuessa eri kehitysvaiheissa (1.6.2)¹¹¹.

¹¹⁰ Terävä olake SB-peräsinakselissa ja (todennäköisesti) pyörästetty olake BB-peräsinakselissa.

¹¹¹ Valuepoksen poistumisen laajuus.

2.1.2 SB-akselin murtumiseen vaikuttaneet tekijät

Terävä, 0,3 mm syvyinen olake (kuva 40) SB-akselissa heikensi merkittävästi sen väsymislujuutta ja on akselin katkeamisen merkittävin syy. **Galvaaninen korroosio alalaakerissa** (kuva 47) 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.

Peräsinakselin väsymismurtuman analyysi murtumisprosessin kahdessa vaiheessa (vaiheet 1 ja 3) perustuu luvussa 1 ja tutkintaselostuksen liitteessä 5 esitettyihin staattisiin lujuuslaskelmiin ja muihin tietoihin. Näitä ovat luokituslaitosten mitoitusperusteita noudattavat ehjän peräsimen laskelmat ja alalaakerin syöpymisen jälkeisen tilanteen laskelmat, jolloin peräsin toimii huomattavasti alkuperäisen mitoitusalueen ulkopuolella¹¹². Staattisten lujuuslaskelmien tulokset on yhdistetty väsymismurtumien ajallisen kehittymisen tarkasteluun aluksen koko käyttöiän aikana väsymislujuuslaskelmilla liitteessä 6.

Peräsinakselin normaalit mitoitusperusteet - akseli-peräsinsarvi-laakerivälykset ja tarkastukset. Aluksen peräsimen koko määräytyy suunnitteluun asetettujen ohjailuvälimuutosten (ja sääntöjen minimivaatimusten) perusteella. Näin määritellyn peräsimen rakenteellinen mitoitus puolestaan tehdään joko luokituslaitosten mitoitusääntöjen perusteella tai tarkalla lujuuslaskennalla.

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

Itse asiassa välykset voivat kasvaa moninkertaisiksi ilman, että peräsinakselin jännitykset kasvavat liiaksi, mikäli sarvi on kunnossa. Luokituslaitoskin sallii välysten kasvun tiettyyn rajaan saakka. Peräsinsarven antama tuki voi vähentyä tai poistua välysten kasvun takia, esimerkiksi alalaakerin laakeriholkin rikkoontuessa tai - kuten tässä tapauksessa – alalaakerin laakeripesän syöpymisen johdosta. Vastaava tilanne syntyy, mikäli peräsinsarvi vaurioituu tai katkeaa. Tarkastuksilla pyritään valvomaan, että peräsinsarven antama tuki pysyy suunniteltuna eikä peräsin ole vaurioitunut. Välysten uskotaan usein toistuvien tarkastusten vuoksi pysyvän sallituissa rajoissa, kun holkit uusitaan tarvittaessa.

¹¹² Sarviperäsimen muuttuminen lujuuden kannalta lapioperäsimeksi.

Luokituslaitosten säännöt eivät määrittele välysmittausten tekotapaa¹¹³. 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-ilmiö ja peräsimien värähtely. Tämän tyyppisten autolauttojen peräsimen rakenne ja potkurien toiminnan kannalta edulliset potkurien kierrosluvut johtavat siihen, että lapataajuusresonanssia ei voi kokonaan välttää. Vertailulainoista (kuva 48) 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 EUROPA:n peräsimien ja peräsinsarven säröt osoittavat, että aluksen peräsimet värähtelivät ajoittain voimakkaasti. Vaikeissa resonanssin synnyttämässä ongelmassa muutetaan rakennetta siten, että peräsimen ominaistajuus muuttuu. Joskus voidaan muuttaa lapataajuutta vaihtamalla potkuri toiseen, jossa on eri lukumäärä lapoja.

SILJA EUROPA:n peräsimen värähtelyt eivät olisi muodostuneet ongelmaksi peräsinakselin kannalta, jos alalaakerin liikevara olisi pysynyt sallittujen välysten suuruisena (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 (1.8.5) saattoi nopeuttaa SILJA EUROPA:n alalaakerin syöpmistä. 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.

Kavitoinnin aiheuttama eroosio syövytti myös peräsimen pintalevytystä, varsinkin sen etuosassa, johtoreunassa. Tässä kohdassa Jastram-rullan aiheuttama epäjatkuvuuskohta synnytti paikallista eroosiota. Tilannetta oli viimeksi yritetty korjata päällystämällä kriittinen alue ruostumattomalla teräslevyllä. Se kuitenkin irtosi ajan mittaan paikoin, jolloin sen ja seostamattoman teräksen välille syntyi galvaaninen jännite-ero. Peräsinlavan seostamaton levy alkoi syöpyä myös galvaanisen korroosion johdosta. Tästä seurasi ylimääräistä työtä telakoinneissa. Lisäksi ruostumaton teräslevy irtoili siten, että osa siitä

¹¹³ 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."

oli taipuneena irti pinnasta, jolloin syntyi ylimääräistä liikevastusta. Peräsinvoimat saattoivat myös hieman kasvaa.

2.1.3 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.

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 seuraavan sivun kuvassa 58. Kuvassa punaisella katkoviivalla merkityt aiheet on analysoitu erikseen tarkemmin kohdissa 2.3.3 ja 2.7.2.

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

Kuva 58. Analyysin pääaiheet. Väsymismurtumaproessin vaiheet 1–3, eri vaiheissa tehdyt 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 2.3.3).

** laivan hallintaan vaikuttaneet seikat peräsinakselin katkettua (kohta 2.7.2).

2.2 Väsylimurtumaprosessin vaihe 1 – alku ja kehittyminen

Hidas nettoliikevaran kasvu 1993–2004. Nettoliikevara kehittyi kahdessa vaiheessa, joiden välissä oli vuonna 2004 molemmissa peräsimissä tehty alalaakerien korjaus valupoksilla. Ensimmäisessä vaiheessa liikevaran kasvu oli korroosion myötä hidasta ja korjaus tapahtui ennen kuin akselin vaurio oli edennyt katkeamiseen.

Vaihe I kesti aluksen käyttöönotosta vuonna 1993 telakointiin Naantalissa vuoden 2004 syyskuussa. Perusta ongelmalle oli luotu jo aluksen suunnittelun aikana.

2.2.1 Molempien alalaakerien korrosio

Alalaakerin pesän korrosio oli alalaakerin suuren liikevaran ja peräsinakselin jännitysten kasvun välitön syy. Vuodesta 1993 alkaen galvaaninen rakokorrosio eteni molempien alalaakerien pesissä suunnilleen samalla nopeudella (kuva 35a). Syöpymisen edettyä riittävästi, johon kului aikaa noin 10 vuotta, laakeriholkki löystyi ja pääsi pyörimään, mutta sen ja laakeripesän seinämän olakkeet estivät putoamisen (kuva 32b). Pyörimisestä aiheutui hankausta, joka poisti korroosiotuotteet laakeripesän seinämästä nopeuttaen syöpymistä. Noin puoli vuotta kului siihen, että olakkeellinen holkki saattoi pudota. BB-puolen holkki putosi todennäköisesti ensin, koska sen pesän kuluma oli suurempi.

Nettoliikevaran kasvaessa taivutusvoimat kykenivät yhä harvemmin taivuttamaan alakselin kiinni laakerinpesään; pronssiholkin hankaus osui harvemmin pesään ja korrosio eteni vastaavasti hitaammin (kuva 35a ja 36). Galvaanista korroosiota nopeuttivat hankauksen lisäksi samanaikaisesti ainakin **suuri virtausnopeus** (sijainti potkurivirrassa ja kavitaatio) yhdistyneenä alalaakerin poikittaisliikkeen (hidas ja 8 Hz) **pumppaavaan vaikutukseen**, jolloin happirikkaan veden tuonti sekä kiihdytti korroosiota että tehosti korroosiojätteen pois huuhtoutumista.

Alalaakerin materiaalikombinaatio ilman eristystä oli korroosion perussy. SILJA EUROPAn alalaakerin materiaalivalinta on tavanomainen: pronssiholkki valuteräksisessä pesässä. Muista aluksista poikkeavasti, näitä ei kuitenkaan ole eristetty kohdassa, jossa merivesi tehokkaana eletrolyytinä yhdistää ne (kuva 47). Valuteräksen ja pronssin välinen ero sähkökemiallisessa sarjassa on huomattava. Epäjalompana valuteräs alkoi syöpyä (liite 3).

Lisäksi peräsin oli aika ajoin ollut päällystetty ruostumattomalla teräslevyllä, joka normaalisti on passiivitulassa. Tällöin se aiheutti siihen kosketuksessa olevan teräksen syöpymisen ja saattoi kiihdyttää lähellä olevan laakeripesän syöpymistä.

SILJA EUROPAn rungon suojaksi asennettu aktiivinen korroosiosuojajärjestelmä ei ollut tarkoitettu ulottumaan peräsimen rakoihin. Peräsimen päälle asennetut sinkkianodit oli tarkoitettu suojaamaan peräsimen pintaa, eivätkä ne ulottaneet vaikutustaan rakoihin. Voimakas kavitaatio rikkoi peräsimen maalipintaa, mikä saattoi ylikuormittaa anodeja. Samoin ajoittain ja viimeksi ennen onnettomuutta käytetty ruostumaton teräs-

levypinnoite peräsimen päällä aiheutti pinnan korroosiota ja saattoi osaltaan heikentää suojausjärjestelmien vaikutusta.

Tehtyjen laskelmien perusteella aluksen tullessa telakalle vuonna 2004 SB-akselin eliniästä oli kulunut väsymisen johdosta noin 85 %. Väsymisvaurion eteneminen on luonteeltaan kiihtyvää. On arvioitu, että akselin elinikää oli todellisuudessa jäljellä muutama kuukausi¹¹⁴.

2.2.2 Peräsinakseliin väliset erot ja samankaltaisuudet

Molemmat alalaakerit syöpyivät ensimmäisessä vaiheessa likimain samalla tavoin, jolloin nettoliikevara kehittyi melkein samaa vauhtia. Tällöin akselien jännitystasot (esim. yhden mm suuruisen nettoliikevaran kasvua vastaava) olivat suunnilleen samat. Vaikutukset akselien väsymiskestävyyteen saattoivat kuitenkin erota huomattavasti.

Katkenneen SB-peräsinakselin materiaali todettiin vetokokeessa standardin mukaiseksi, eikä materiaalissa näytä olleen sellaista vikaa, joka olisi myötävaikuttanut akselin katkeamisessa. Sen sijaan akselissa todettiin katkeamiskohdassa terävä 0,3 mm syvyinen olake, kuva 40. Olake ulottui akselin ympäri ja oli akselia sorvattaessa jäänyt pyöristämättä. Vaikka olake oli vähäinen, sen terävyys alensi ratkaisevasti akselin väsymiskestävyyttä.

BB-puolen peräsinakselin lujuusarvoja ei varmistettu erillisellä vetokokeella; oletettavasti ne olivat suunnilleen samat kuin SB-akselin. Myös tässä akselissa oli olake, mutta sen alkuperäisestä muodosta ei ole varmuutta. Olakkeen kohdalla ei todettu säröjä, joten akselin murtuminen ei ollut alkanut. Voidaan sen vuoksi olettaa, että BB-akselin väsymislujuutta kuvaava Wöhler-käyrä on ollut esimerkiksi pyöristetystä olakkeesta johtuen parempi kuin SB-akselin. On myös mahdollista, että pienetkin erot käyttöolosuhteissa ja väsymisilmiölle luonteenomainen suuri eliniän hajonta ovat aiheuttaneet eroavuuden myös väsymismurtuman kehittymisessä eri akseleissa.

Mikäli SB-akselissa ei olisi ollut terävää olaketta, sen väsymislujuus olisi ollut yhtä hyvä kuin BB-akselilla. Nettoliikevaran pysyessä vaatimusten mukaisina akseleihin ei synny taivutuksesta johtuvia väsymisvaurioita.

2.2.3 Akselien ja peräsimien muut säröt

Murtuneessa SB-akselissa lähellä kartio-osan yläreunaa todettiin jälkiä pintojen välisestä liikkeestä sekä hiushalkeamia eli fretting-säröjä (lisätietoja on VTT:n raportissa VTT-R-0222-10, josta on otettu kuvia liitteeseen 1). Ulkonäöltään hyvin samankaltaisia säröjä todettiin jo telakoinnissa Gdanskissa 2009 BB-peräsinakselin kartiopinnalla. Säröjen syvyyttä tutkittiin vain SB-akselissa, joten pidemmälle menevää vertailua ei voitu tehdä. Keskinäisen liikkumisen jälkiä löydettiin molempien akselien kartioista ympäri koko kartion, sen yläosasta (liite 1, kuva 4-7), mutta vain muutama särö. Paikallistetut säröt katkenneessa akselissa, kuva 22c, ovat akselin sivulla, jossa peräsimeen kohdistuva voima

¹¹⁴ Vuonna 2009 valuepoxin poistuttua nettoliikevara oli kasvanut niin paljon, että jäljellä oleva väsymiselinikä kului kasvaneiden taivutusjännitysten vuoksi muutamassa päivässä (Kohta 2.4).

taivuttaa akselia sisäänpäin. Todennäköisesti peräsinakselin kiristäminen alhaalta ruuvilla sallii akselin taipuillessa kartion ja peräsimen keskinäisen liikkeen vain kartion yläosassa, kuva 7a.

BB-akselin alalaakerin valuepoksitäyte oli vuoden 2009 telakoinnissa rikkoutunut vain alaosastaan, mikä oli estänyt ala-akselin epänormaalin suuret liikkeet ja peräsinakselin taipumat. BB-akselin fretting-säröt ovat siis syntyneet akselin tavanomaisilla taipumilla tai ovat syntyneet jo ennen telakointia vuonna 2004. Todennäköisimmin molempien akselien fretting-säröt ovat syntyneet ennen vuoden 2004 telakointia sen jälkeen kun alalaakerien nettoliikevarat olivat kasvaneet yli 4 millimetriin ja akselit taipuivat ylälaakeriin tukeutuen. Vasta tällöin akselin kartiopinnan ja peräsimestä olevan valuosan aukon pinnan välille oletetaan syntyneen akselin taipumisen vuoksi riittävän suuri leikkausvoima. Valuepoksilla tehdyn korjauksen jälkeen fretting-kulumisen jatkuminen pysähtyi, koska peräsinakseli ei taipuillut epänormaalisti.

Fretting-ilmion aiheuttamat leikkausvoimat rajoittuvat kuitenkin ohueen pintakerrokseen, joten tämän ilmiön aiheuttamat väsymismurtumat voivat pysähtyä lähelle ulkopintaa. Syvimmit säröt katkenneessa SB-akselissa olivat edenneet yli 4 mm syvyyteen, mutta tästä ei voida päätellä hiushalkeamien syvyyttä BB-akselissa.

Fretting-säröjen ja SB-akselissa olleen olakkeen yhteisvaikutusta akselin väsymisprosessiin ei ole tarkasteltu.

Yleisesti ottaen, fretting -ilmiö on mahdollinen, jos alalaakerin liikevara kasvaa riittävästi. Peräsinakselin suureneva taipuilu värähtelykuormituksen pitkään jatkuessa voisi silloin suurentaa fretting-säröjä siinä määrin, että akselin katkeamismahdollisuutta (kartion alueella, peräsimen valuosan reiässä) ei voi sulkea pois. Säröjä eikä niiden kasvua kyetä havaitsemaan, jollei niitä osata etsiä kartion ollessa näkyvissä peräsimen poiston aikana. Mahdolliset säröt voitaisiin löytää tarkastamalla esillä oleva kartio magneettijauheella.

Tutkijoiden tiedossa ei ole vastaavia tapauksia, esim. onko fretting-säröjä yritetty etsiä tai havaittu vanhoissa peräsinakseleissa. Normaaliavälyksillä frettingiä ei esiinny. Luokitustilaitoksen säännöt edellyttävät välysten tarkkailua ja niiden pitämistä tietyissä rajoissa.

Peräsimissä ja peräsinsarvessa todettiin lisäksi säröjä, jotka johtuvat pääasiassa peräsimen resonanssivärähtelystä (kuva 24c). Peräsimien säröihin saattaa olla osasyynä alalaakerin ajoittain suuriksi kasvaneet nettoliikevarat, minkä johdosta myös peräsimiin kohdistui tavanomaista suuremmat jännitykset.

2.3 Väsymismurtumaprosessin vaihe 2 – valuepoksikorjaus ja sen rikkoontuminen

Vuoden 2002 telakoinnin yhteydessä mitatut välykset olivat kasvaneet niin paljon kaksi vuotta aiemmin tehdystä mittauksesta, että vuoden 2004 telakointia varten oli tilattu uudet pronssiholkkien aihiot. Peräsimien irrotus paljasti vuonna 2004 yllättävän suuren alalaakerin pesän syöpmisen. Se oli niin suuri, että pronssiholkkien aihiot osoittautuivat lii-

an ohuiksi täyttämään vielä pesän puhdistuksessa hieman lisää suurentuneen tilan, kuvat 33 ja 34.

2.3.1 Korjaustapa ja sen merkitys

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

Korjaustoimenpide muutti alalaakerin rakennetta ratkaisevasti, kuvat 27a ja b sekä 34a 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 (liite 2), että kuusiokolo ulottui holkin läpi, mikä heikensi ruuvien kestävyyttä sen kuormittuessa.

Korjauksen jälkeen oli pronssiholkin ja sitä ympäröivän teräksen välissä sähköä eristävä epoksikerros. Galvaaninen sähköinen yhteys säilyi ainakin asennusruuvien sekä myös laakeripinnan, ruostumattoman teräsholkin, akselin ja rungon kautta, joten galvaaninen korroosio saattoi jatkua. Myös ruuvien ja pronssin välille syntyi jännite-ero ruuvien alkaessa syöpyä.

Perusteellista suunnittelua ei ehditty tehdä: fax-vaihto alkoi valuepoksen 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: valuepoksen rikkoontumisesta johtuvine seurauksineen. Rakenne sisälsi erikoislaatusina osina kuusiokoloruuvit.

2.3.2 Valuepoksen rikkoontuminen

Rikkoontumisprosessin arvioitu kulku on esitetty tarkemmin liitteessä 2. Pesän seinämän galvaaninen korroosio jatkui valuepoksen asennuksen jälkeen. Pronssiholkillä ja sitä ympäröivällä teräksellä ei ollut yhteistä rajapintaa ja epoksi oli valettu kiinni molempiin pintoihin. Kesti todennäköisesti melko pitkään, ennen kuin syöpyminen epoksiin ja pesän välissä oli merkittävää. Korroosio oli mahdollinen vain alhaalta ylöspäin, koska ylhäällä oli epoksilieri.

Valuepoksen kuntoa kyettiin tarkkailemaan vain alalaakerin ala- ja yläreunasta ahtaan raon kautta. Sen sisäistä kuntoa muun muassa ruuvien kohdalla ei kyetty tutkimaan. Vuoden 2007 telakoinnissa päällisin puolin tehty tarkastus ei antanut viitteitä valuepoksen rikkoontumisesta. Välysmittaukset tehtiin tällöin peräsimien ollessa käännettyinä, eikä näin saatu vertailukelpoista tulosta. Korjausratkaisu näytti edelleen olevan kunnossa.

Valuepoksen ja pronssiholkin välinen tarttuvuus saattoi olla pieni esimerkiksi holkin pintaan jääneen työstönesteestä vuoksi. Holkkiin kohdistuva vääntävä momentti kuormitti

ruuveja. Epoksin materiaalin pieni kimmomoduli salli ruuvien taipuvan. Tämän vuoksi ruuveihin kohdistui jatkuvasti vaihteleva leikkaus- ja taivutusjännitys. Ruuvit olivat kuu-siokolomallisia (kuva 45a), ja valtaosa niistä oli ruuvattu holkkiin niin syväälle, että kolo ulottui epoksiin saakka (liite 1). Ruuvien käyttö ja mitoitus oli toiseen tarkoitukseen kuin estämään holkin pyörimistä. Epoksin välityksellä ruuvit kuormittuivat ja ne saattoivat katketa herkimmin tästä epäjatkuvuuskohdastaan. Peräsimen värähtelyllä lähellä resonanssia ja on saattanut olla niiden katkeamista nopeuttava vaikutus.

Alalaakeriholkkien pinta valuepoksin puolella todettiin sileäksi. 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 telakointin jälkeen holkin ja epoksin väliin.

Valuepoksin ja holkin väli ei syöpynyt, joten holkki ei voinut pudota ennen kuin epoksi oli riittävästi hajonnut ja irronnut tai pesän seinämä oli syöpynyt muutaman millimetrin. Sen sijaan holkki saattoi pyöriä, varsinkin sen jälkeen kun katkenneiden ruuvien läpi vettä pääsi epoksin ja holkin väliin. Holkin pyöriminen aiheutti epoksissa pientä kulumista. Ruuvien ulompi osa saattoi jäädä kiinni epoksiin, mikä todennäköisesti synnytti havaitut urat holkeissa ruuvien kohdilla. Epoksin ja pesän pinnan välinen liike saattoi estyä epoksissa vielä kiinni olevien ruuvien johdosta.

Valuepoksin alaosa alkoi pudota palasia pois. Palasissa kiinni olevat ruuvien pätkät putosivat palasten mukana. Ruuvit pysyvät pisimpään epoksin yläosassa, missä ruuvien päät naarmuttivat myös pesän seinämää. Jäljistä päätellen myös alaosassa oli ollut ruuveja kiinni epoksissa.

Valuepoksin murtumisen arvioidaan alkaneen SB-puolella. Tähän saattoivat vaikuttaa monet tekijät. BB-puolella epoksi oli pesän yläreunan kohdalla runsaan mm ohuempi, mutta sen alapuolella noin 2–3 mm paksumpi kuin SB-puolella. SB-puolella oli syöpyminen edennyt hieman BB-puolta hitaammin vuoden 2004 telakointiin mennessä ja siksi BB-holkki oli pudonnut vuonna 2003 hieman aikaisemmin. On myös mahdollista, että vuoden 2007 sarven korjaushitsauksessa SB-puolta korjattiin enemmän ja epoksi saattoi paikoin vaurioitua liiallisen lämpenemisen johdosta. Simulointilaskelmien mukaan SB-puolen peräsinvoimat olivat keskimäärin noin 13 % suuremmat. Myös satunnaiset valun ja holkkien erot saattoivat myötävaikuttaa siihen, että SB-puolella epoksin rikkoontuminen eteni nopeammin. Mikäli SB-puolella oli jo särön alku, saattoi alalaakeriin kohdistua suurempi voima (akseli taipui helpommin).

Valokuvien mukaan (kuvat 43c, 44e ja liite 1) SB-puolella on vähemmän uria sekä pronssiholkissa, että pesässä. Sen sijaan pesässä on selvästi näkyvissä holkin pykällyksiä vastaavat säännölliset kulumajäljet (kuvat 43b ja liite 1). Tämä johtunee siitä, SB-puolella valuepoksin hajoaminen oli edennyt nopeammin: epoksi ja sen mukana naarmuttavat ruuvit putosivat ja holkin taipuessa kiinni pesään siitä hankautui pehmeää ruostetta pois. BB-puolella vain holkin alaosa oli epoksia pudonnut osittain ja ruuvien palasia oli vielä kiinni epoksissa.

2.3.3 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 valuepoksen 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.

Telakoinnin siirron johdosta (syksystä 2009 kevääseen 2010) menetettiin mahdollisuus tehdä tarkastus tavanomaisen telakointivälin puitteissa ennen onnettomuutta. On mahdollista, että SB-puolelta olisi tuolloin löytynyt vastaavanlaista epoksin hajoamista kuin sitten havaittiin BB-puolella onnettomuuden jälkeen Gdanskissa. 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.

Valuepoksen 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. Tällöin valuepoksi on painovoiman synnyttämässä melko tasaisessa puristuksessa. SILJA EUROPAssa valuepoksia kuormittivat säteittäiset vaihtelevat puristusvoimat ja tangentialiset leikkausvoimat sekä ruuvien paikalliset jännityshuiput. Syöpmisen edetessä myös taivutusrasitus lisääntyi. Epoksiin kohdistui siis eri suuntiin vaikuttavia voimia ja jännityksiä tyyppillisessä käytössä esiintyvän puristuksen sijaan.

Toteutetulla tavalla käytettynä valuepoksia ei voi näistä syistä tutkijoiden käsityksen mukaan pitää pysyvänä ratkaisuna alalaakerin syöpmien korjaukseen. Tämän osoittaa tapahtunut epoksin rikkoontuminen molemmissa laakereissa ja häviäminen oikeanpuoleisesta laakerista. Pronssiholkin vaakasuorat noin 1 mm pykällykset oli mahdollisesti tehty paremman kiinnittymisen aikaansaamiseksi pronssin ja epoksin välillä. Pystysuora uritus olisi hieman parantanut tilannetta, koska holkin pyöriminen olisi vaikeutunut.

Tämän korjausratkaisun käyttö olisi edellyttänyt ottamaan huomioon laakeriholkista epoksiin kohdistuvat voimat¹¹⁵ ja valun kunnon seurantaan normaalia useammin. Tuolloin osapuolet eivät kuitenkaan osanneet määritellä muuta tarkkailuväliä kuin mikä seurasi telakoinneista. Vuonna 2007 valun alareunan kunto oli tarkastettu telakoinnin yhteydessä. Tuolloin ei havaittu viitteitä ongelmista. Epoksin sisäistä kuntoa ei voitu tuolla tavoin selvittää. Luokituslaitos oli sallinut epoksin käyttämisen korjaukseen vuonna 2004. Tästä

¹¹⁵ 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.

oli annettu erikseen "Memoranda on Class Certificate", joka tarkoitti, että korjaus oli hyväksytty pysyväksi, mutta siitä muistutettiin varustamoja ja luokitusyhtiötä.

Luokituslaitoksista ainakin Det Norske Veritas sallii ohjeissaan valuepoxsin tai vastaavien materiaalien käytön myös peräsimen alalaakerin korjauksissa ehdolla, että luokan erityisohjeita noudatetaan. Korjaus voidaan tilanteesta ja toteutustavasta riippuen katsoa pysyväksi tai tilapäiseksi.

Tutkimuslaitoksen mielestä epoksin irtoamiseen olisi ollut syytä varautua esimerkiksi putoamista estävällä rakenteella. Tällainen rakenne olisi samalla eristänyt meriveden pronssin ja teräksen galvaanisesta parista. (itse asiassa tällainen rakenne näyttää olleen ensimmäinen epoksimateriaalin toimittajan tekemä ehdotus, jossa ei myöskään ollut ruuveja¹¹⁶). Epoksia olisi voitu vahvistaa lisäämällä kuituja.

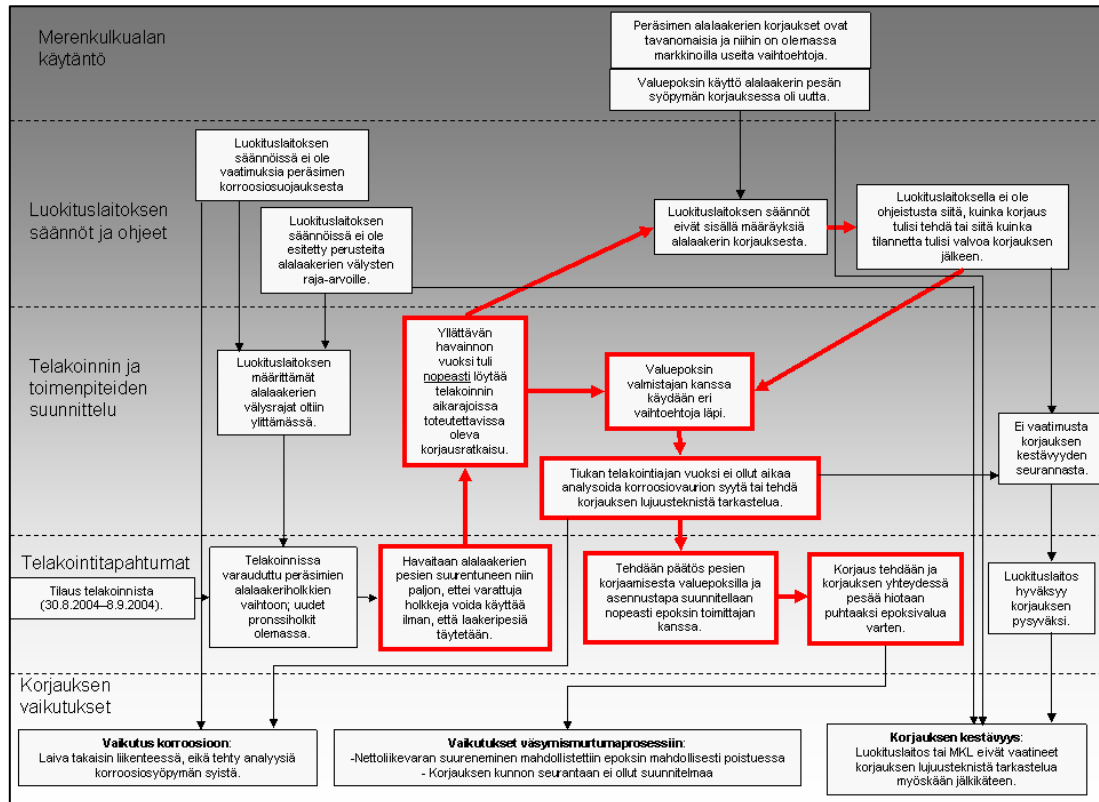
Vaihtoehtoisia ratkaisuja olisivat olleet päälle hitsauksen sijaan työstettävän ARC 10¹¹⁷, Belzonan tai Thordonin kaltaisen metallihiukkasilla ja kuiduilla vahvistetun polymeerin käyttö. Niiden käyttö olisi vaatinut aineen tyyppistä riippuen levittämisen jälkeen pesän työstön oikeisiin mittoihin ennen holkin asentamista tai laakeripesän aarpörausta. Levitetävän aineen kuivumisaika olisi saattanut olla pidempi. Vuoden 2004 telakointiaika oli liian lyhyt näiden käyttämiselle, mutta seuraavan telakoinnin ohjelmaan korjaustyön olisi voinut sisällyttää.

Valuepoxsikorjauksen 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 59 on esitetty vuoden 2004 telakoinnissa tehdyn valuepoxsikorjauksen 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.

¹¹⁶ Fax-vaihdon kopioita H.A.Springer Marinen ja Epomare Oy:n kesken.

¹¹⁷ A.W Chesterton Co tavaramerkki. Levitettävä ja sitten työstettävä. Kaksiosainen modifioitu epoksihartsi, joka sisältää metallihiukkasja kuituja.



Kuva 59. Vuoden 2004 telakoinnissa tehdyn valuepoxikorjauksen 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.

2.4 Väsymismurtumaprosessin vaihe 3 – peräsinakselin katkeaminen

Murtumisprosessin toisessa vaiheessa vaurion eteneminen keskittyi pitkään valuepoxin vähittäiseen rikkoontumiseen ja lopulta sen ja holkin putoamiseen SB-puolelta. Sen jälkeen peräsinakselin liikevara tuli äkkiä entistä suuremmaksi ja tilanne eteni nopeasti akselin katkeamiseen, kuva 35a.

Epoksin hävittyä nettoliikevara kasvoi äkillisesti muutamasta millimetristä 16–18 millimetriin. Samalla jännitykset peräsinakselissa nousivat suuremmilla peräsinvoimilla yli myötörajan. Ahvenanmaan jälkeisellä osuudella on paljon mutkia nopeuden ollessa noin 20 solmua, minkä johdosta erityisesti tällä osuudella peräsinvoimat ovat suuret. Aiemmin väsymisvaurioita jo saanut akseli ei enää kestänyt, vaan murtui.

Epoksin poistumisen loppuvaiheessa epoksipalaset ja ruuvien jäännökset saattoivat kiihlautua vaihtelevasti alalaakerin liikkeessä ja kääntyillessä. Tällöin peräsimen toiminnassa on saattanut esiintyä outoja piirteitä, jotka voisivat selittää muutamia päiviä ennen vauriota tehdyt havainnot (kohta 1.2.2 ja 1.2.3 alaviite).

SB-akselin eliniästä on arvioitu vuoden 2004 telakointiin tultaessa olleen jäljellä muutama kuukausi. Epoksin rikkoontumis- ja poistumisprosessi on ollut niin epämääräinen, että sen väsyttävää kuormitusta ei ole kyetty arvioimaan. Voidaan todeta, että epoksin poistuminen saattoi kestää useita kuukausia, jona aikana on voinut ajoittain esiintyä väsymisen kannalta epäedullisia nettoliikevaroja. Epoksin poistuttua kokonaan nettoliiketuli tuli niin suureksi, että jännitykset (ehjän akselin poikkipinnan perusteella laskettuna) ylittivät myötörajan, kuva 36. Väsymissärö saattoi kasvaa hyvin lyhyessä ajassa niin suureksi, että akseli murtui.

2.5 Suunnittelu-, valmistus- ja tarkastusprosessien arviointi

Peräsinlaitteiston tulee aluksen turvallisen kulun ylläpitämiseksi toimia häiriöttä huolto- tai tarkastusjaksojen väli, jopa useita vuosia, mikä on laitteiston **suunnittelun** lähtökoh- ta. Toteutus perustuu suunnittelijan osaamiseen ja tilaajan sekä luokituslaitoksen suunnitelman ja rakentamisen tarkastuksen onnistumiseen. Toimivuutta valvovat aluksen käytön aikana varustamo jatkuvasti ja luokituslaitos sekä viranomainen telakointien ai- kana. SILJA EUROPA:n osalta näissä kaikissa vaiheissa on todettu puutteita, joiden joh- dosta komentosillalla vahdissa olleet joutuivat täysin yllättävään tilanteeseen.

2.5.1 Alalaakerin korroosioherkkyys – piilevänä pysynyt vika

On yleisesti tunnettua, että eri metallit muodostavat galvaanisen parin merivedessä, niin myös pronssi ja seostamaton teräs, liite 3 kuva 1. Alalaakerin rakenteen suunnittelussa, suunnitelman tarkastuksessa ja hyväksynnässä ei tätä seikkaa ole otettu huomioon. To- teutettu ratkaisu on yksinkertainen ja halpa, kuva 47. Sen toimivuuden takaaminen vaa- tisi, että peräsimen kunnossapito-ohjelman tulisi sisältää kyseisen kohdan tarkkailu normaalin välysesurannan lisäksi. SILJA EUROPA:n alalaakerin pesän syöpymä saattoi edetä pitkälle, ennen kuin se havaittiin johtuen välysmittausten tavanomaisesta toteutus- tavasta.

Alalaakerin kunnossapidossa oli keskitytty tavanomaisiin välysmittauksiin. Mittaukset te- kee korjaustelakka ja varustamolle sekä luokituslaitokselle riittää yleensä mittauspöytä- kirja. Normaalirutiinilla tehdyssä mittauksessa ei otettu huomioon alalaakerin rakennetta, joka mahdollistaa galvaanisen korroosion. Kunnossapidon tulisi perustua mahdollisten vaurioiden ennalta ehkäisyyn tai viimeistään korjaamiseen ajoissa. Valuepoksin käyt- töön päätyminen yhteydessä vuonna 2004 olisi pitänyt laatia sen kunnon tarkkailulle oh- jelma. Alalaakerin korroosiovaara olisi ollut mahdollista huomata piirustuksista koska ta- hansa. Yleisellä tasolla tehty vauriosyiden läpikäynti (esim. FMEA-menetelmällä¹¹⁸) olisi tuonut esille korroosion mahdollisuuden sekä epoksin hajoamisen mahdollisuuden seu- rauksineen. Selvityksen perusteella olisi mahdollisesti asennettu peräsinarven alareu- naan epoksin putoamiselle este.

Voidaan pitää outona, että syöpymisen syyn selvittämiseen ei vuonna 2004 ryhdytty. Normaali menettely oudon vian huomaamisen jälkeen on ryhtyä selvittämään sen syytä.

¹¹⁸ Failure Mode and Effect Analysis. Menetelmä vikojen systemaattiseen etsintään, niiden vaikutusten arviointiin ja vikojen välttämiseen tarvittavien toimenpiteiden määrittämiseen. Viat ja niiden seuraukset luokitellaan yleisyyden ja vakavuuden mukaan.

Tutkinnassa ei ole saatu sellaista tietoa, että luokituslaitos tai Suomen Merenkululaitos olisivat sitä vaatineet. Ei ole myöskään saatu viitteitä siitä, että varustamo olisi ryhtynyt selvittämään syöpymisen syytä. Mahdollisesti selvitystyö olisi johtanut tarkempaan alalaakerin kunnan seurantaan. Todennäköisesti valuepoksitaytteen uskottiin korjanneen syöpymän pysyvästi, muun muassa luokituslaitos hyväksyi sen. Tällöin ei katsottu olevan enää tarvetta selvittää syöpymän syytä.

Myöskään Gdanskissa tehdyssä telakoinnissa ei korjattu korroosio-ongelman perussyytä, vaan alalaakerin korroosio jatkuu edelleen. Käytännössä rakenne on sama kuin aluksen valmistuttua vuonna 1993. Nyt tilanne on kuitenkin osapuolten tiedossa ja valvonassa, eikä syöpyminen etene nopeasti, joten vastaava onnettomuus tuskin toistuu. Tutkijat suosittelevat kuitenkin tiivisteen asentamista alalaakeriin tai vähintään esim. sinkkirenkaan lisäämistä pesän ylä- ja alareunaan.

Rakenteen materiaalit ovat rakennusajankohdan normaaleja. Syöpymisen voimakkuus on tutkinnassa todettu yllättävän suureksi ja sitä on ollut vaikea selittää. Pääsyyksi on arvioitu teräksen ja pronssin yhtymäkohtaa, jota ei ollut eristetty merivedestä. Vertailuun otetuissa suomalaisissa laivoissa reiteillä Helsinki/Turku–Tukholma tässä kohdassa on eristys. SILJA EUROPAssa tällaista eristystä ei ole. Laajempaa alalaakerirakenteiden vertailua ei ole tehty.

2.5.2 Peräsinakselin terävä olake – piilevä vika

Terävä olake peräsinakselissa on vastoin hyvää konepajakäytäntöä. Se oli jäänyt koneistuksen loppuvaiheessa pyöristämättä. Saattaa olla mahdollista, että akselin suoran osan pituus ja kartion pituus eivät täsmänneet. Kartiokkuus 1:15 merkitsee 0,3 mm olakeella 5 mm pituutta. Olaketta ei ollut havaittu missään tarkastusvaiheessa, ei akselia sorvanneessa yrityksessä, ei luokituslaitoksen ja varustamon lopputarkastuksessa tai sitten sen merkitystä ei ymmärretty. Sen jälkeen kun akseli oli asennettu paikoilleen, sitä ei ollut mahdollista havaita poistamatta akselia. Aluksen eliniän aikana peräsinakselin irrottaminen on erittäin harvinaista.

2.5.3 Telakointiväli – liian pitkä

Reittiliikenteessä kulkevat alukset pyritään telakoimaan ajankohtana, jolloin matkustajamäärät ovat minimissään. Varustamoilla on suuri paine pitää telakointiajat mahdollisimman lyhyinä. Usein tulee tarve siirtää telakointia eteenpäin, kuten tässäkin tapauksessa syyskuusta maaliskuuhun (taulukko 4 ja teksti sen yläpuolella). Jos telakoinnin aikana paljastuu yllättäviä korjaustarpeita, ne pyritään ratkaisemaan tavoilla, jotka vievät mahdollisimman vähän aikaa. Vuoden 2004 telakointi oli niin lyhyeksi suunniteltu, että alalaakerin syöpymän korjaus päälle hitsaamalla, kuten sitten tehtiin Gdanskissa 2009, ei olisi ollut mahdollista. Sen vuoksi valittiin nopein tapa, valuepoxsin asennus.

Jos telakointia ei olisi vuoden 2009 syksyllä siirretty, vaurion vaara olisi ehkä havaittu. Telakointivälit olivat yleensä olleet tavanomaiset 2–2½ vuotta. Viimeinen aiottu väli olisi ilman onnettomuutta ollut yli 3 vuotta, jota tutkijat pitivät liian pitkänä näin iäkkäälle alukselle ja jonka peräsimessä on ollut jatkuvasti kavitoitinvaurioita.

2.5.4 Peräsinakselin tarkastus

Peräsinakselia ei ole tapana tarkastaa. Sen irrottaminen pidentäisi telakointiaikaa. Käytännön tarkastustyö on aikojen kuluessa osoittanut irrottamisen tarpeettomaksi akselin tutkimista varten.

Usein peräsin poistetaan työpajassa tehtäviä korjauksia varten. Tällöin peräsinakselin alaosan kartiopinta tulee näkyviin. Sille olisi mahdollista tehdä magneettijauhetautitarkastus muun muassa fretting-säröjen varalta. Tämä olisi tehtävä ainakin silloin, kun on havaittu suuria alalaakerin välyksiä.

2.6 Yhteenveto murtumisprosessista

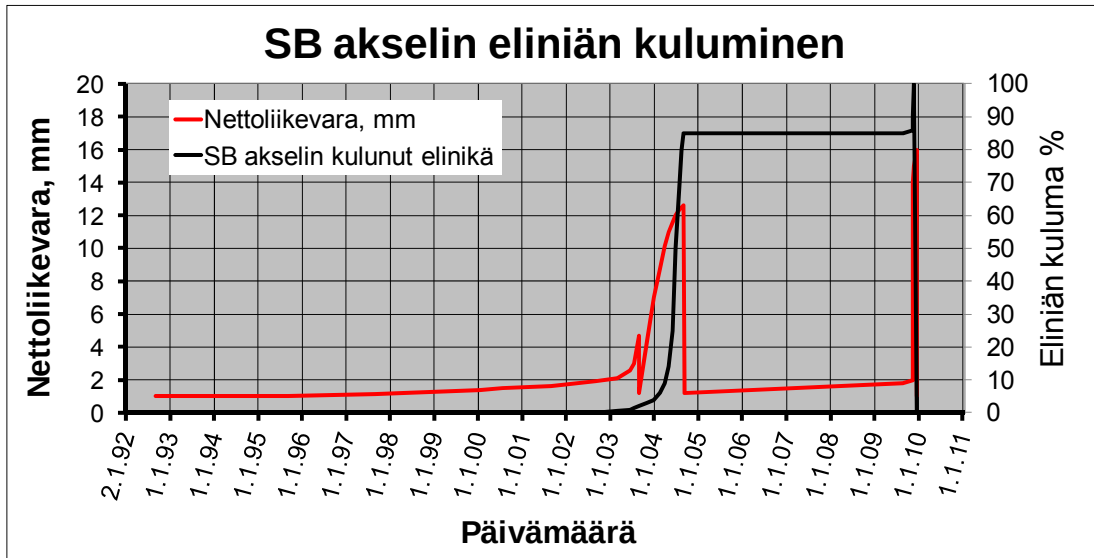
Murtumisprosessin kulkua ja sen syitä on seuraavassa tarkasteltu eri näkökulmista. Taulukossa 7 on arvioitu eri syiden merkittävyyttä SILJA EUROPA:n peräsinakselin katkeamisprosessissa syiden vaikuttaessa samanaikaisesti. On oletettu, kuten edellä on perusteltu, että BB-akselin Wöhler-käyrä oli SB-akselin käyrää parempi.

Taulukko 7. 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

Voidaan päätellä, että sarviperäsinkonstruktio on periaatteessa luotettava ja sen mitoituksessa näyttää olevan runsaasti reserviä. Liitteen 5 kuvassa 6 on näytetty, kuinka paljon mitoitusalue SILJA EUROPA:n tapauksessa ylitettiin. Taulukon 7 pohjalta peräsinakselin katkeaminen vaati kolme samanaikaista, pitkään vaikuttavaa syytä. Tapaus osoittaa myös, että suunnittelu-, valmistus- ja tarkastusprosessissa on puutteita, joiden johdosta reservi on tarpeen.

Kuvassa 60 on havainnollistettu väsymisvaurioprosessin ajallista kulkua SILJA EUROPA:n SB-akselin osalta. Merkillepantavaa on väsymisilmiölle luonteenomainen, murtuman kasvun nopeutuminen sen päästyä alkuun. Vastaavia tapauksia ajatellen tästä seuraa tarve harkita tarkkaan telakointivälien pituutta.



Kuva 60. SB-akselin liikevaran kehittyminen ja eliniän kuluminen. Eliniän kulumisen alkuhetki ja taso, jolle se pysähtyy epoksivalun jälkeen, ovat arvioita. Kuva kertoo tapahtumien perusluonteen.

Kuvassa 60 esitetyt nettoliikevaran ja eliniän kuluman luonteenomaiset kehitystrendit ovat tutkijoiden mielestä oikeita. Sen sijaan ajanhetkissä ja varsinkin eliniän kulumaa osoittavat numeroarvot ovat epävarmoja.

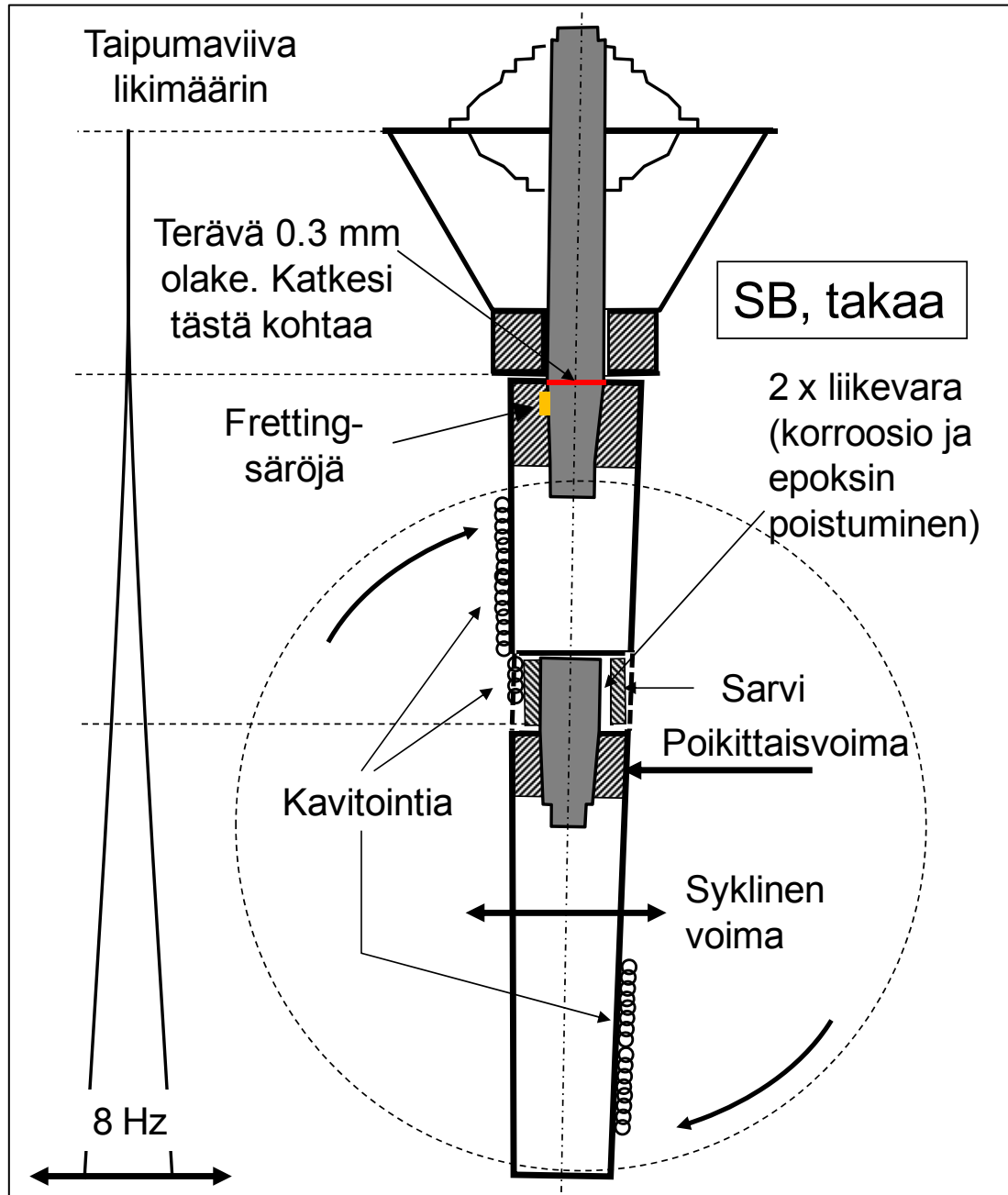
Väsymismurtumaprosessin aikahistorian virstanpylväät on esitetty taulukossa 8. Siihen on koottu tärkeimmät tapahtumat. Taulukosta näkyy, milloin BB- ja SB-akseleilla on ollut erilainen tilanne. Siinä näkyy myös koko ajan vaurioon vaikuttaneet myötävaikuttaneet tekijät ja alun perin rakenneosiin jääneet puutteet tai virheet.

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

Taulukko 8. Väsymismurtumaprosessin tapahtumia ja syitä aikajanalla.

2011	Alus on jälleen liikenteessä, alalaakerin galvaaninen korrosio jatkuu edelleen, mutta nyt tilannetta seurataan 4 kertaa vuodessa.		Peräsi- men väärä- tely oli ajoittain resonans- sissa lapataa- juuden kanssa. Peräsin kavitoi voimak- kaasti.
2010			
2009	Gdanskissa syöpymät täytettiin hitsaamalla, asennettiin paksummat holkit ja uudet peräsinakselit.		
2009	BB peräsinakseli ei katkennut. Epoksia ja muutama ruuvien palanen putosi, mutta liikevara pysyi pienenä.	SB peräsinakseli kulutti nopeasti loppuun jäljellä olleen elinikänsä ja katkesi, koska alalaakerin liikevara oli muodostunut suureksi epoksin poistuttua ja holkin pudottua.	
2008	Joitakin epoksin paloja saattoi pudota.	Epoksin ja ruuvien paloja alkoi putoilla.	
2007	Epoksi alkoi vähitellen rikkoontua ja ruuvit katkeilla. Ruuvien katkettua vesi pääsi kuusiokolon kautta epoksin ja holkin väliin. Holkin pyöriminen helpottui.		
2006	Epoksi pysyi ainakin päällisin puolin ehjänä.		
2005			
2004	Asennusruuvien kolot täyttyivät vedellä, ruuvitkin alkoivat syöpyä.		
	Syöpymä täytettiin syksyllä telakoinnin aikana epoksivalulla ja uusi holkki asennettiin. Holkkien paikallaan pitämiseksi valun aikana käytettiin kuusiokoloruuveja.		
	Molempien peräsinakselien kartion yläosassa syntyi fretting-säröjä		
	BB akselin elinikää ei kulunut.	SB akselin eliniästä saattoi terävän olakkeen johdosta kulua valtaosa ennen telakointia. Alalaakerien nettoliikevara ylitti loppuvuonna 2003 5 -6 mm rajan, minkä jälkeen peräsinakselien vaihtojännitykset nousivat niin suuriksi, että peräsinakselien elinikä alkoi lyhentyä väsymisen johdosta.	
	Holkit putosivat, ne pyörivät ja hankaus piti liikevaran kasvuopeuden suurena.		
2003	Syöpyminen eteni niin pitkälle, että holkit pääsivät pyörimään, mikä nopeutti kulumista		
2002			
2001			
2000			
1999			
1998	Alalaakerien pesän sisäseinämät syöpyivät hitaasti galvaanisen korroosion johdosta, mikä lisäsi vähitellen alalaakerien sivuttaista nettoliikevaraa.		
1997			
1996			
1995			
1994			
1993			
1992	Alalaakerin rakenne salli galvaanisen korroosion		
1991	Ainakin SB akselissa oli terävä olake		

Kuvassa 61 on kootusti peräsimen kuvan avulla näytetty oleelliset SB-akselin katkeamiseen vaikuttaneet tekijät.



Kuva 61. 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 nettoliikevara.

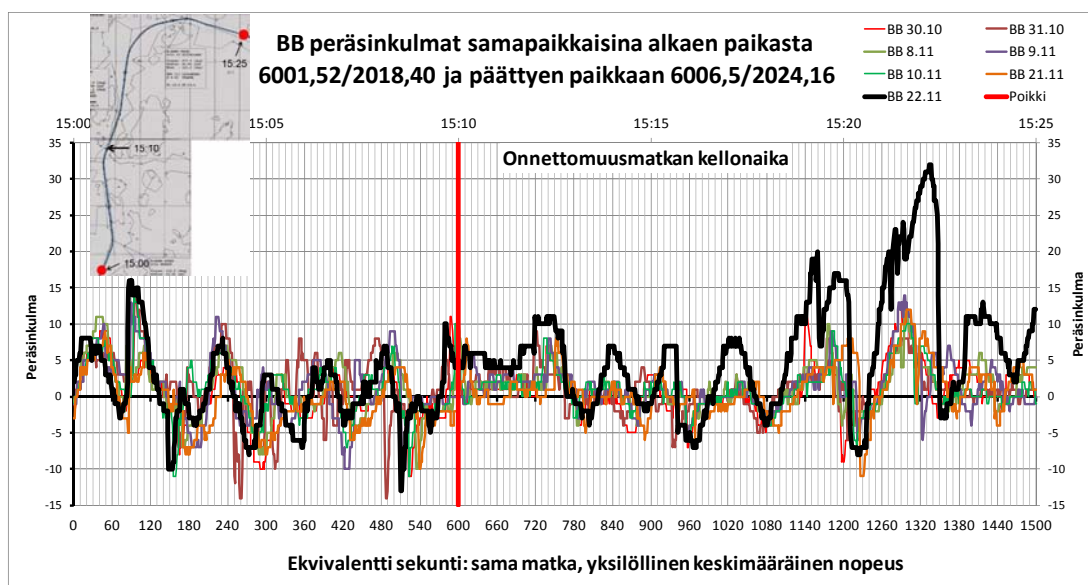
2.7 Laivan hallinta onnettomuusmatkalla

2.7.1 Akselin katkeamisen ajankohta

Tutkijat ovat arvioineet katkeamishetken ajankohdan perustuen seitsemän eri päivän samapaikkaisiksi siirrettyjen peräsinkulmien (kuvat 62a ja 62b) ja samojen päivien keulasuunnan (headingin) vertailuun (kuva 63).

Kuvassa 62a on vain ehjän peräsimen (BB) peräsinkulmat, koska SB-peräsinakselin katkeamishetkestä eteenpäin vain BB-peräsin ohjasi laivaa. Aluksen nopeus on vaihdellut eri päivinä ja sen vuoksi on peräsinkulmat siirretty VDR-tietojen avulla alkamaan samasta paikasta ja päättymään samaan paikkaan. Tämä on saatu aikaan ottamalla huomioon aluksen paikka- ja nopeustiedot¹¹⁹. Kuvassa on näytetty alku- ja päätepisteet myös reittiinpiirroksessa.

Onnettomuuspäivän peräsinkulmat alkavat olla kuvissa 62a ja 62b poikkeavia klo 15:10 jälkeen.

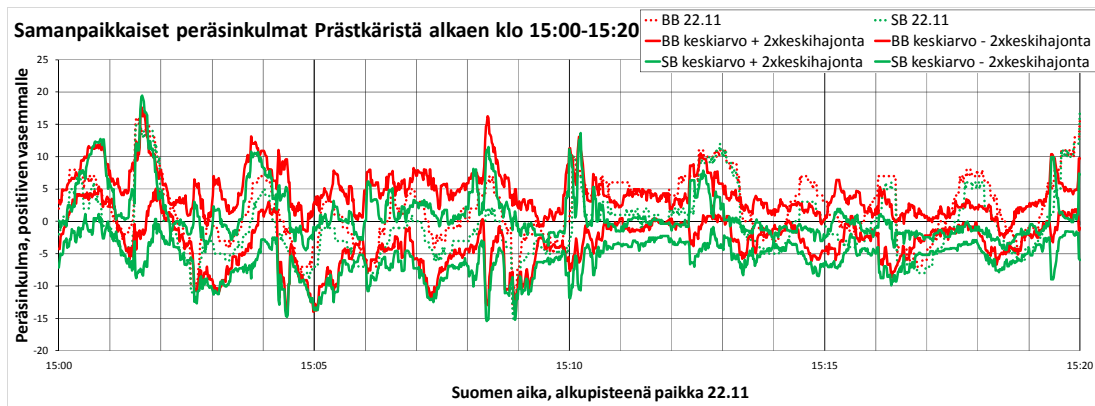


Kuva 62a. Eri päivien BB-peräsinkulmat samapaikkaisiksi muunnettuina. Onnettomuuspäivän käyrä on näytetty mustalla. Alku- ja päätepiste on näytetty punaisilla ympyröillä.

Kuvassa 62b on käytetty hyväksi pientä VDR-tilastoa, koska tallenteita oli onnettomuuspäivän lisäksi kuudelta vuorokaudelta. Vaikka aineisto oli pieni, laskettiin peräsinkulmien keskiarvo ja keskihajonta reitin osuudella, joka sisälsi peräsinakselin katkeamispaikan.

¹¹⁹ Alukset olivat alkupisteessä vaihtelevasti klo 15:00:00–15:09:37 ja päätepisteessä 15:25:00–15:34:05, onnettomuusmatkalla klo 15:00:00–15:25:00. Nopeusmuunnos on keskimääräinen.

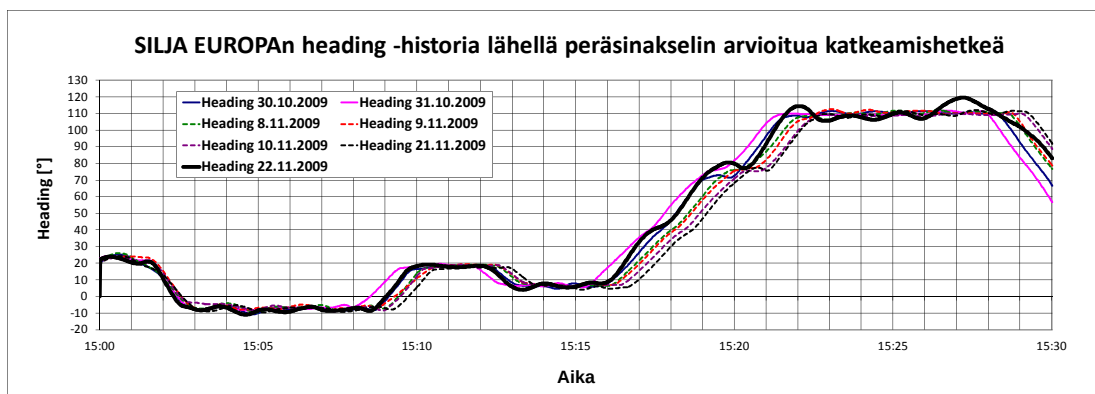
M/S SILJA EUROPA (FIN), oikeanpuoleisen peräsinakselin katkeaminen Ahvenanmaan saaristossa 22.11.2009



Kuva 62b. Peräsinkulmien vertailu. Kuuden vuorokauden keskiarvo $\pm$ 2xkeskihajonta ja onnettomuuspäivä. Kun pisteiviiva on samanvärisen ehjän viivan alueen ulkopuolella, kyseessä on mahdollinen poikkeama. Positiivinen peräsinkulma on vasemmalle. SB-peräsinkulma akselin katkeamisen jälkeen on näyttölaitteen näyttämä kulma, tosiasiallinen peräsinkulma on tuntematon.

Tilastomatematiikan perusteella yksittäisen tapauksen tulisi olla rajojen keskiarvo $\pm$ kaksi kertaa keskihajonta sisällä 95 % todennäköisyydellä. Kuvassa pitäisi pisteiviivojen pysyä ehjien vastaavan väristen viivojen määrittämien rajojen sisäpuolella. Nähdään, että noin kello 15:10 alkaen pisteiviivat käyvät ehjän viivan ulkopuolella eli ovat suurempia ja epä-todennäköisempiä kuin vertailuarvot.

Keulan suunta 22.11.2009 alkaa poiketa tavanomaisesta noin klo 15:13 ja selvemmin klo 15:17 alkaen, kuva 63. Merkittävää on muodon muuttuminen. Aikaero johtuu siitä, että eri kerroilla alus ohitti saman mutkapaikan hieman eri aikaan.



Kuva 63. Keulasuunnat (heading) eri päivinä. Onnettomuuspäivän käyrä on näytetty mustalla.

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 vastaruorilla vasemmalle, "stöttaamalla").

Näillä perusteilla tutkintalautakunta on arvioinut peräsinakselin katkeamishetkeksi noin klo 15:10.

2.7.2 Tilanteen havainnointi ja hallinta

Peräsinakselin katkeaminen on niin harvinaista, että sitä on vaikea kuvitella ohjailuvaikeuksien syyksi. Vaikka ongelmien alkulähdettä ei välttämättä saada heti selville, on tärkeää tiedostaa ohjailuvaikeuksien riskit aluksen kulkiessa mutkikkaalla ja ahtaalla saaristoväylällä, missä huonosti ohjaavalla aluksella on jatkuva riski ajautua ulos väylältä. Aluksen kulkuun liittyvät päätökset on mahdollista tehdä vain tältä pohjalta. Tämänkaltaisen 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. Tällaisesta vauriosta ei saada mitään indikaatiota komentosillalle, joten se oli havaittavissa vain aluksen muuttunutta ohjailukäyttäytymistä ja mittaristoa tarkkailemalla.

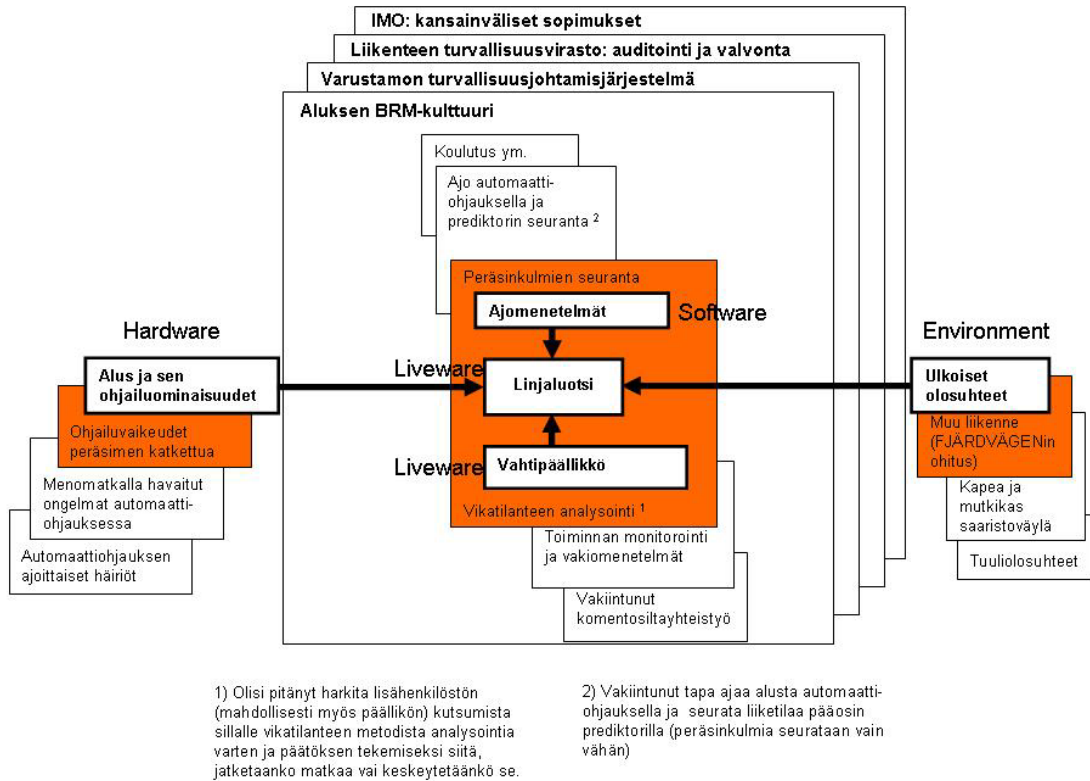
Analyysissä on pyritty vastaamaan tilanteen hallinnan kannalta oleellisiin kysymyksiin; miten vaurion vakavuus havaittiin ja olisiko se voinut tapahtua nopeammin sekä miksi aluksen ohjailu väylällä onnistui kuitenkin niin hyvin ohjailukyvyn heikennettyä.

komentosiltatoiminnan keskipisteenä ovat alusta ohjaavat linjaluotsi ja hänen kanssaan komentosiltatiimin muodostava vahtipäällikkö, jotka havaitsevat aluksen poikkeavan käyttäytymisen ensimmäisenä ja joilla on parhaat edellytykset ryhtyä analysoimaan vika-tilannetta. Heidän toimintaansa vaikutti komentosiltayhteistyön 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-ajatusmallia¹²⁰ (kuva 64), joka kuvaa komentosiltatoiminnassa aluksen ohjailun kannalta merkittäviksi katsottuja inhimillisiä ja teknisiä vuorovaikutuksia.

¹²⁰ SHELL-mallin avulla tarkastellaan ihmisen toimintaa ympäristössään ja pyritään selvittämään eri tekijöiden vaikutusta ihmisen suoritukseen. Mallin nimi tulee seuraavista kirjaimista (osa-alueista): S(oftware) tarkoittaa mm. koulutusta, ohjeita, menetelmiä ja määräyksiä. H(ardware) tarkoittaa mm. laitteita tai itse laivaa, joita ihminen käyttää. E(nvironment) tarkoittaa toimintaympäristöä. Keskellä oleva L(iveware) tarkoittaa sitä ihmistä, jonka toimintaa tarkkaillaan ja ulompi L muita ihmisiä, 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-mallin käyttöä yhtenä onnettomuustutkimintamenetelmänä sen tuoman systemaattisuuden vuoksi.

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



Kuva 64. Aluksen käsittelyyn ja päätöksentekoon vaikuttaneet seikat komentosillalla peräsinakselin katkettua kuvattuna sovelletun SHELL-mallin avulla.

Kuvassa 64 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 olosuhteisiin¹²¹

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 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 liisähavaintoja 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

¹²¹ Liveware – Hardware + Environment -vuorovaikutusten tarkastelu SHELL-mallissa

alusta yhden ison ja yhden pienen käännöksen. Niiden aikana hän totesi, ettei aluksen kääntymisen pysäyttäminen vastaruorilla onnistunut kunnolla ja alettiin epäillä peräsin-kulman näytön oikeellisuutta. Vian vakavuus alkoi selvitä.

Alus päätettiin pysäyttää kohdalle osuneeseen sopivaan väylänosaan. Ohjailuongelmien ilmaannuttua kapean ja mutkikkaan saaristoväylän ulkopuoliset vapaavesialueet tarjosi-vat vain muutaman varteenotettavan mahdollisuuden suuren matkustaja-aluksen py-säyttämiseen niin, ettei se häiritse muuta liikennettä.

Komentosiltayhteistyö ja ajomenetelmät¹²²

Ensimmäisessä käännöksessä peräsinakselin katkeamisen jälkeen linjaluotsi ja vahti-päällikkö havaitsivat poikkeavuuksia aluksen ohjailukäyttäytymisessä. Autopilotin toimin-taa sekä suuria peräsinkulmia ihmeteltiin ja niihin reagoitiin tekemällä autopilottiin pieniä kurssimuutoksia. Suurimpien peräsinkulmien (30 astetta) lukuarvoista tai ajallisesta kes-tosta ei kuitenkaan keskusteltu, vaikka ne olivat huomattavasti tavallista suuremmat. Au-topilotti käyttää normaaliolosuhteissa lyhytaikaisesti, kestoaltaan enintään noin kymme-nen sekuntia, 15–20 asteen peräsinkulmia¹²³. Nyt autopilotti käytti 25–30 asteen pe-räsinkulmia (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 normaalis-sa 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. Mi-käli 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.

Komentosillalla oli kaksi henkilöä vastaamassa navigoinnista, kun ensimmäiset viitteet ohjailuongelmista saatiin. Uuden linjaluotsin tultua komentosillalle komentosiltamiehitys vahvistui yhdellä henkilöllä jo hieman ennen vahdinvaihtoa. Vahdinvaihdossa komen-tosiltayhteistyötä tekevän ryhmän keskiössä oleva henkilö vaihtui. Vahdin jättänyt linja-luotsi jäi komentosillalle myös vahdinvaihdon jälkeen. Tämä osoittaa, että havaittuja oh-jailuongelmia pidettiin merkittävänä.

Komentosiltatiimin muututtua toimintatapa ja tilanneanalyysi kehittyivät, vaikka selkeää työnjakoa eri suureiden seuraamisesta komentosiltahenkilöstön kesken ei muodostunut. Uuden linjaluotsin alettua kysymyksen perehtyä tilanteeseen kommunikointi lisääntyi;

¹²² Liveware – Liveware + Software -vuorovaikutusten tarkastelu SHELL-mallissa

¹²³ Esimerkiksi MS ISABELLAN karilleajon yhteydessä samanmerkkinen autopilotti oli käyttänyt 34 m/s nopeudella vaikutta-neen sivutuulen kääntävän voiman tasapainottamiseksi keskimäärin 10 asteen peräsinkulmaa (tutkintaselostus B1/2001M, s. 25)

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 stöttausvaikeudet 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 heikennettyä?

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 auto-maattiohjaustapoja 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.

2.7.3 Arvio tilanteen hallinnasta

Tapahtumien kulku osoittaa, että syntynyt tekninen ongelma oli erittäin vaikea tai jopa mahdoton havaita ja tulkita oikein. Peräsinvika ei ilmentynyt suoraan siltamiehistölle vaan vaati *tilanteen kokonaisanalyysia (vastakohtana vika-analyysille)*. Tämä on vaativa tehtävä. Alus käyttäytyi epä johdonmukaisesti, 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 varten 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. Lautakunta yhtyy tähän näkemykseen.

Aluksen päällikkö sopi nopeasti hinaaja-avusta varmistamaan aluksen pääsy perille Turkuun. Aluksen ohjailumahdollisuudet selvitettiin kokeiluin 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 peräsintä vasten.
6. Syöpymä korjattiin valuepoksilla ilman selvitystä vaurion syntyyn vaikuttaneista tekijöistä. Luokituslaitos 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 luo-

vutusta 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 määräväleihin 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 laakeissa ja häviäminen oikeanpuoleisesta. Valuepoksia käytettiin laakeriholkin kiinnitykseen ottamatta huomioon kaikkia epoksimateriaaliin ja sen rajapintoihin kohdistuvia kuormia ja kuormitussuuntia. Pysyvät korjaukset valuepoksilla ovat mahdollisia vain, jos sen käytöstä on kokemusta pitkältä ajalta. Mikäli korjausratkaisun on suunniteltu kestävä 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 korroosioaurioiden 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 jatkuestaan vahingoittaa sitä. Eri aikoina tehtyät 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 väsymisvaurioproosia 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 vällyksiä, peräsinakseli ja sen vastinosat tulee tarkastaa säröjen ja syöpymien varalta. Luokituslaitoksen tulee sopiessaan varustamon kanssa telakointiajoista harkita, onko aluksen korjaushistoriassa viitteitä mahdollisesta väsymisvaurioproosista peräsin- tai muussa laitteistossa.*

OTKES suosittelee Bureau Veritakselle ja muille luokituslaitoksille, että:

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

Valuepoxsin 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 valuepoxsikorjauksen tulee olla väliaikainen. Väliaikaisuus on huomioitava päätettäessä korjauksen kunnon seurantamenetelmistä ja tarkastusväleistä. Korjauksen suunnittelussa on otettava huomioon kaikki laakeriolkista 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 syvälliseen ymmärtämiseen ja edellyttää ohjailusuureiden rekisteröimistä, esimerkiksi käännöksissä tarvittavien peräsinkulmien metodista tarkkailua ja kirjaamista. Lisäksi on tehtävä niihin perustuva arviointi tilanteen vakavuudesta ja päätös jatkotoimista, 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

Sauli Ahvenjärvi

Ville Grönvall

Olavi Huuska

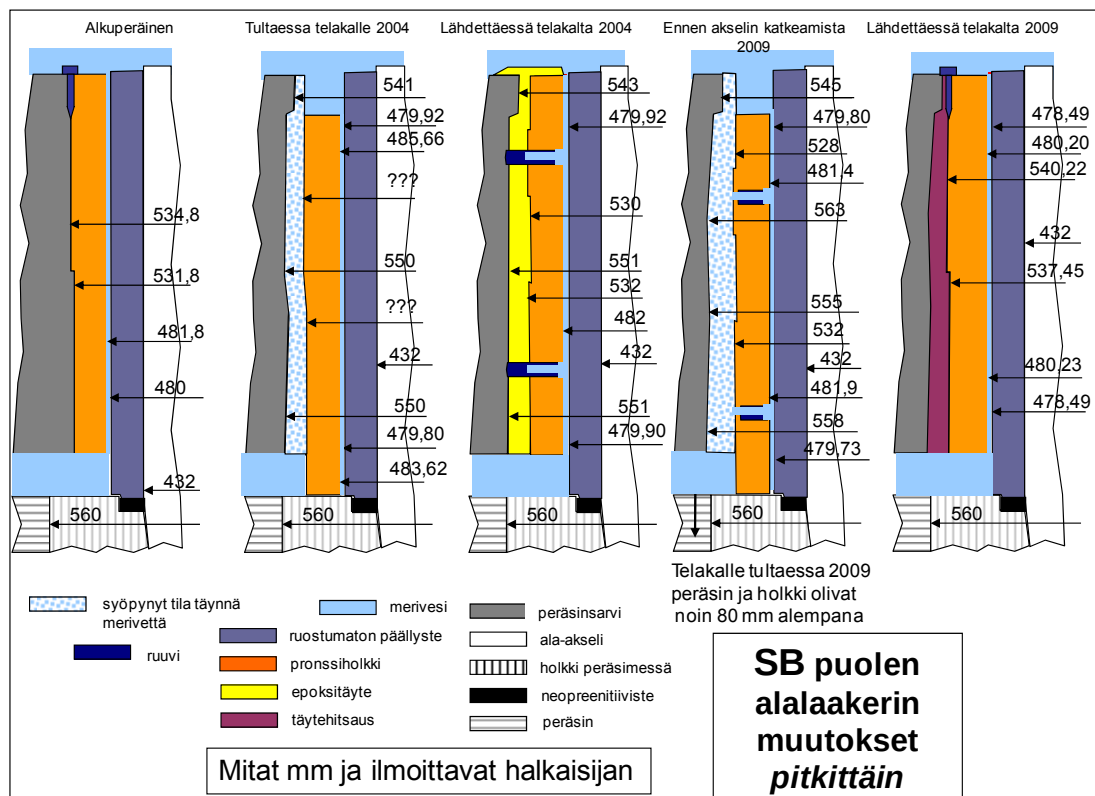
Ari Nieminen

ERILLISET RAPORTIT JA AINEISTOT, säilytetään onnettomuustutkintakeskuksessa:

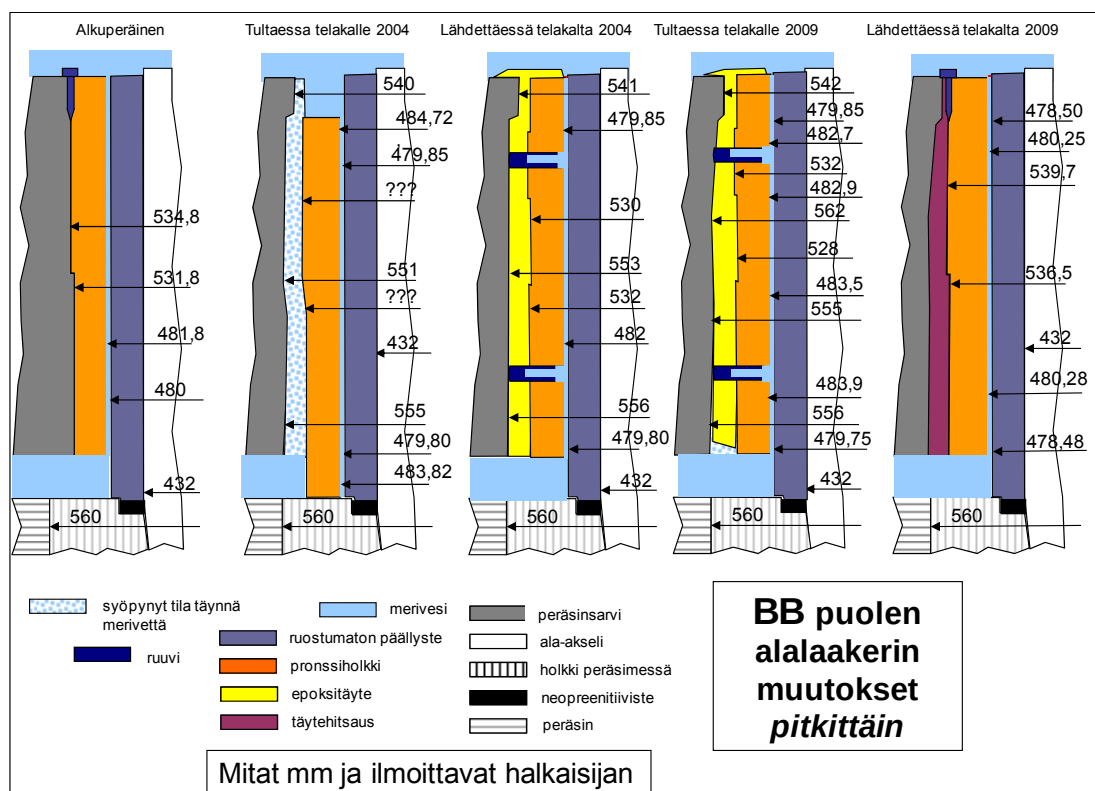
1. VTT, Peräsinakselin katkeamisen selvitys, VTT-R-02222-10
1. VTT, Valuepoxsin ominaisuuksien selvitys, VTT-S-09254-10
2. VTT, Peräsimen laakeripesän korroosionopeuden arviointia, VTT-R-08624-10
3. TKK, SILJA EUROPAn peräsimen kohdistuvien voimien arvio, Aalto-yliopiston teknillinen korkeakoulu, Sovelletun mekaniikan laitos, D-109
4. Simulco Oy:n tuottamat VDR-datan perustiedostot
5. Remontowa – telakan raportit korjauksista Gdanskissa
6. Peräsimien piirustuksia, PDF – tiedostoja ja piirustuksia, TallinkSilja ja Viking Line.
7. VDR –tiedostot, numeeriset
8. Excel-tiedostot, joista oleellimmat on mainittu vastaavissa kohdissa
9. CBeam2000-tiedostot, joista oleellimmat on mainittu vastaavissa kohdissa
10. Piirustuksia ja dokumentteja: Bureau Veritasin raportit telakoinneista ja tiedot al-
kuperäisistä peräsimen luokituslaskelmista, telakoiden vällysmittauspöytäkirjat, oh-
jeet magneettijauhetarkastukselle Gdanskissa, vuonna 2004 asennettujen alalaa-
kerien pronssiholkkien piirustukset, Epocast 36 ominaisuuksia valmistajan esit-
teestä, peräsinkoneen piirustus H-6302 ja muua aineisto, Jastram-rullan aineisto,
VDR-tallenneluettelo.
11. Runsaasti tutkijoiden, Bureau Veritasin ja Trafin tarkastajien sekä varustamon
edustajien ottamia valokuvia

LIITE 1. LISÄTIETOJA AKSELISTA JA LAAKEREISTA

Kuvissa 1a-1b on alalaakerien mittaustuloksia pitkittäin kaaviokuvien muodossa.



Kuva 1a. SB-alalaakerin eräät pitkittäiset mittaustulokset.

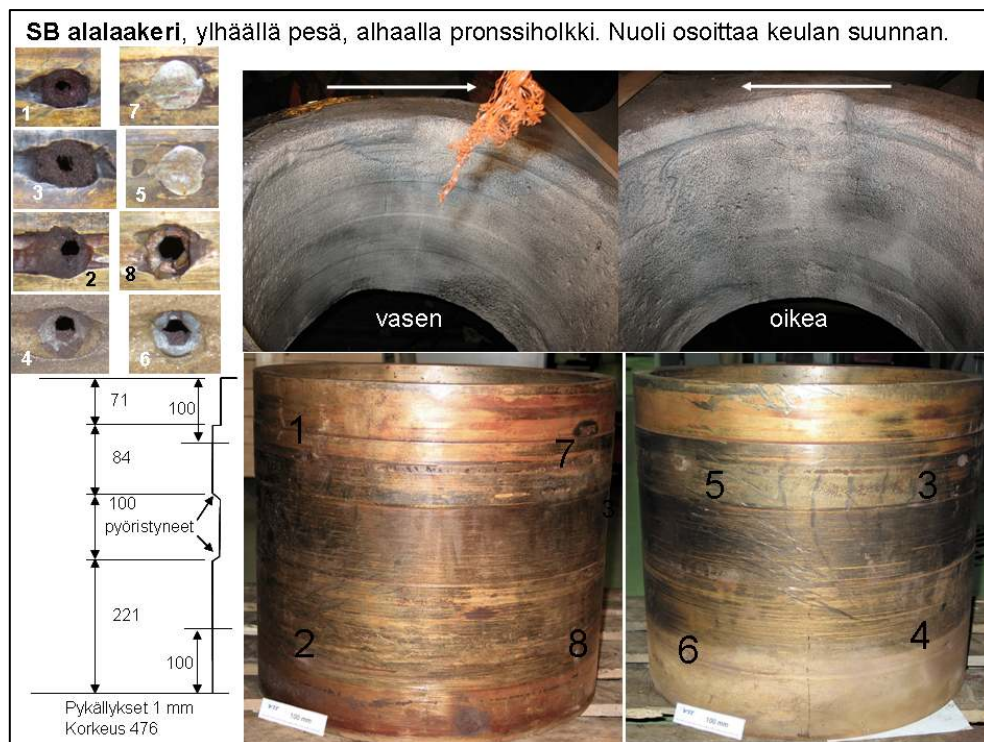


Kuva 1b. BB-alalaakerin eräät pitkittäiset mittaustulokset.

Liite 1/2(6)

Vuonna 2004 asennetun pronssiholkin seinämän paksuus oli 24–25 mm, paino noin 140 kg, liite 5.

Kuvat 2 esittävät kootusti vuonna 2004 asennetun pronssiholkin, asennettujen ruuvien jäännökset sekä alalaakerin pesän seinämän holkkien poiston jälkeen.



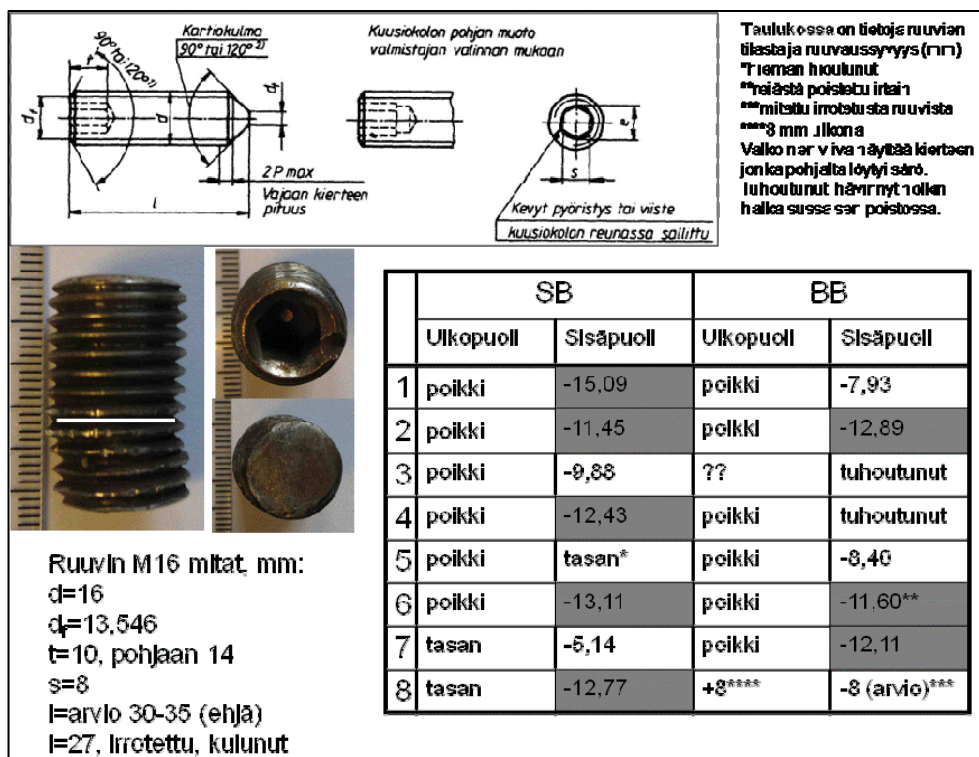
Kuva 2a. SB-alalaakeri. Pesän kuvat telakka, holkki VTT.



Kuva 2b. BB-alalaakeri. Pesän kuvat telakka, holkki VTT.

Alalaakerien ruuvit

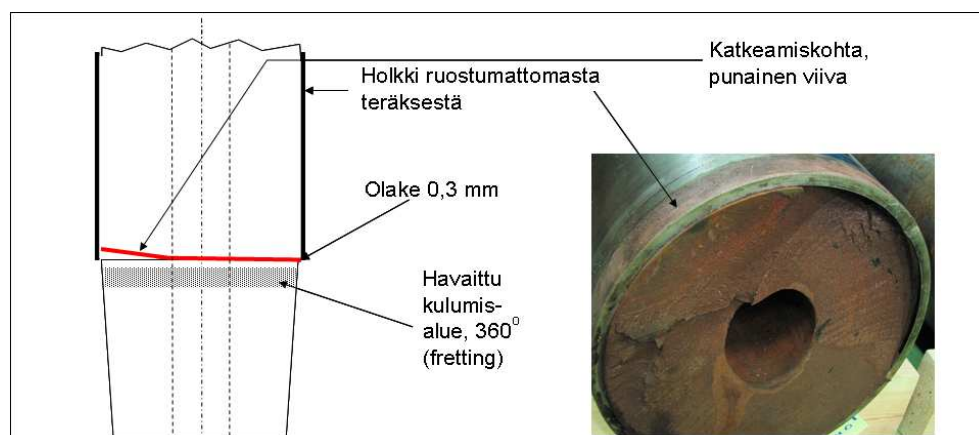
Pronssiholkeissa kiinni olevat asennusruuvit kuvattiin ja niiden paikka mitattiin. Tulokset ovat kuvassa 3. Yksi ruuvi oli irrotettavissa; mittauksen perusteella ruuvi oli M16. Holkin seinämän paksuus oli 25 mm ruuvien kohdalla. Kun ruuvi oli ruuvattu syvemmälle kuin 11 mm, sen kuusiokolo ulottui epoksin puolelle (näytetty taulukossa harmaalla). Ruuvien kuusiokolat täyttyivät vedellä. Kun ruuvi katkesi, vettä pääsi holkin ja epoksin väliin, mikä pienensi kitkaa ja holkki pääsi helpommin pyörimään.



Kuva 3. Parhaiten säilynyt ruuvi ja kaikkien ruuvien paikat.

Akselin fretting-vauriot

Kuvassa 4 on näytetty SB-akselin katkeamiskohta ja molempien akselien fretting-vaurioiden paikat. Kuvissa 5-7 on säröt näytetty tarkemmin.



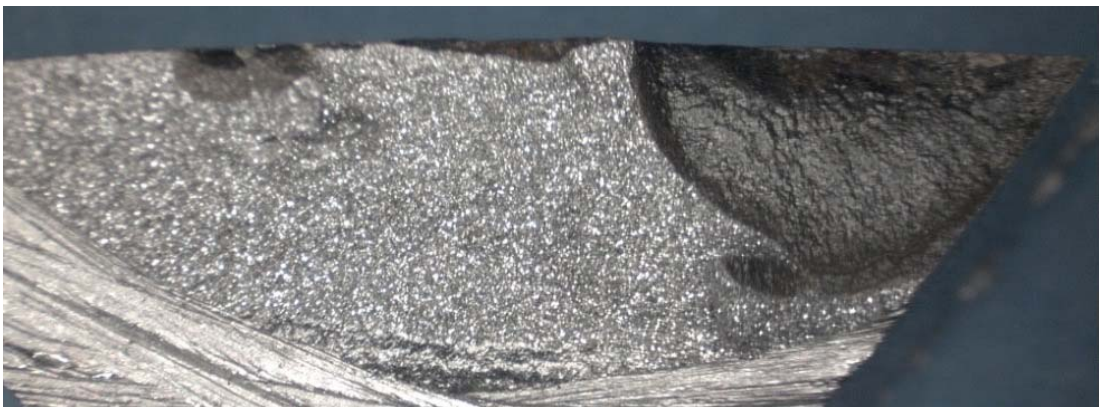
Kuva 4. Kaaviopiirros katkenneesta alueesta. Valokuva VTT.



Kuva 5. Paikat, joista leikattiin säröjen tutkimista varten palaset katkenneesta akselistasta. Kuvassa alhaalla on hyvin näkyvissä murtopintaa. Kuva VTT.



Kuva 6 Kohdan 1 säröt stereomikroskoopilla kuvattuina. Kuva VTT. Kuvassa näkyvät selvästi edestakaisen hankauksen jäljet.



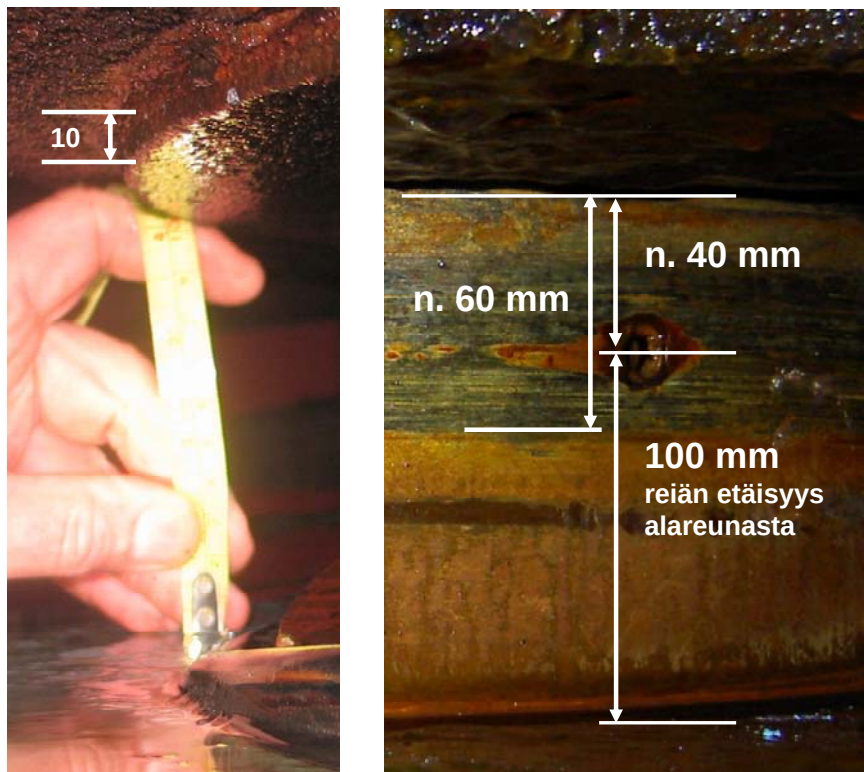
Kuva 7. Kuvan 6 säröt avattuina. On todettava, että päältäpäin on mahdotonta arvioida särön syvyyttä. Syvemmän särön syvyys on noin 4 mm. Kuva VTT.

Lyhyt selostus fretting-ilmiöstä, ote VTT:n raportista VTT-R-02222-10:

Murtuneessa akselissa lähellä kartio-osan yläreunaa todettiin säröjä, jotka mikroskooppitutkimuksissa osoittautuivat väsymyssäröiksi. Säröt sijaitsevat puristusliitoksen pinnalla lähellä liitoksen reunaa ja pinnassa havaittiin merkkejä pintojen välisestä liikkeestä. Edellä kuvatut tuntomerkit ovat tyypillisiä värähtelykulumiselle, josta käytetään tavallisesti sen englanninkielistä nimitystä fretting. Fretting-ilmiö aiheuttaa keskenään liikkuviin pintoihin kitkavoimista peräisin olevia paikallisia leikkausjännityksiä, jotka yhdessä ulkoisten (tässä tapauksessa taivutus-) jännitysten kanssa voivat aiheuttaa väsymismurtuman ydintymisen huomattavasti pienemmällä (jopa 50–70 % pienemmällä) ulkoisella jännityksellä kuin ilman fretting-ilmiötä. Säröjen sijainnin perusteella fretting-ilmiön edellyttämän vastakkain puristuneiden pintojen välisen liikkeen on tässä tapauksessa todennäköisesti aiheuttanut akselin kimmoisa taipuminen.

SB-alalaakerin holkin putoamistarkastelu 2009

Alalaakerin holkin todettiin vuoden 2009 telakoinnissa pudonneen 130–140 mm. Putoaminen oli tapahtunut kahdessa vaiheessa. Ensin syöpymisen edettyä riittävästi sen verran kuin peräsimen ja peräsinsarven alempi rako salli. Peräsinakselin katkettua holkki putosi lisää sen verran kuin peräsimen ja peräsinsarven välinen ylempi rako salli. Kuvassa 8 vasemmalla nähdään, että pudonneen peräsimen ja aluksen rungon välinen rako oli noin 115 mm, kun otetaan huomioon 10 mm paksuinen suojarengas. Piirustuksessa tämä rako oli 50 mm. Näin ollen peräsin olisi pudonnut 65 mm.

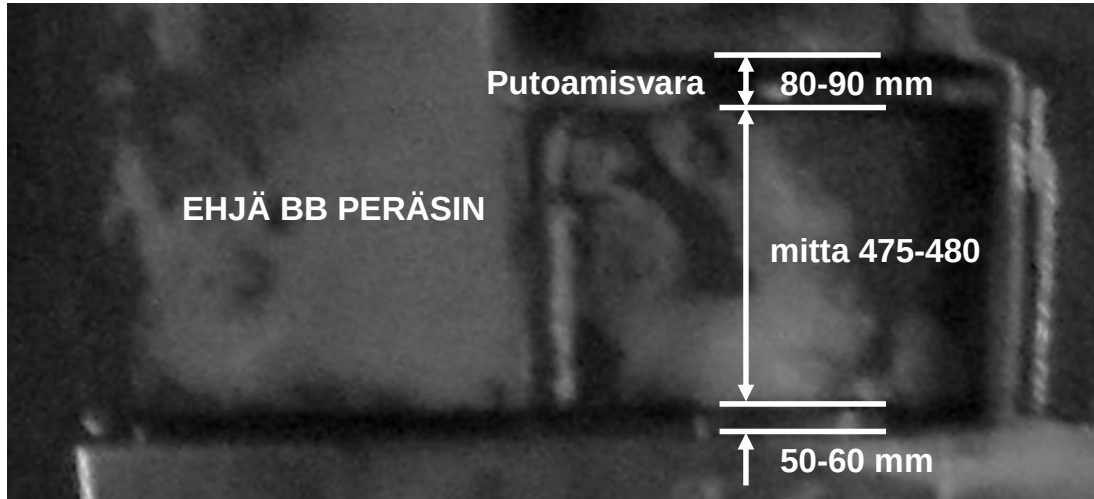


Kuva 8. Peräsimen putoaminen mitattuna ylälaakerissa, vasemmalla ja alalaakerin holkin sijainti ennen peräsimen poisnostoa telakoinnin alussa 2.12.2009. Oikeanpuoleinen kuva on Trafilta.

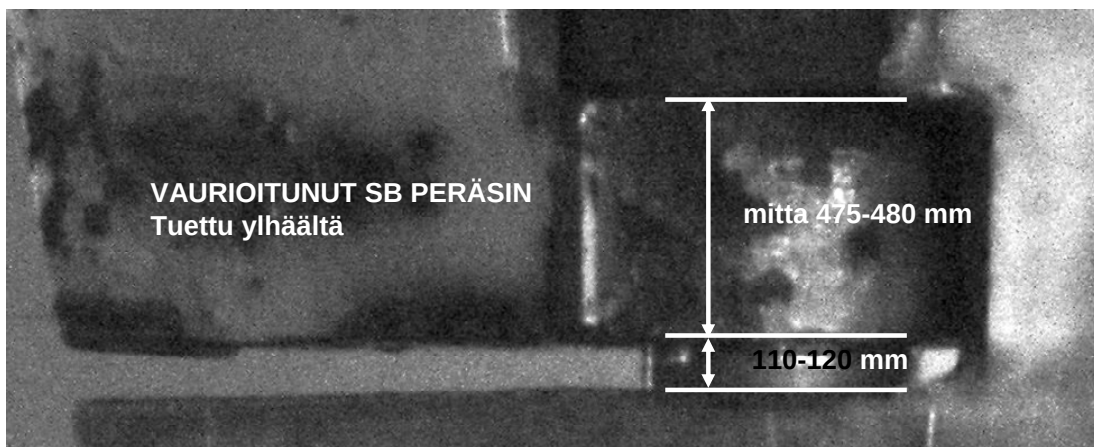
Liite 1/6(6)

Alkuperäisten piirustusten mukaan molemmat mainitut raot olivat 50 mm, joten holkki olisi voinut pudota vain 100 mm. Seuraavassa näytetään mahdollisia syitä arvioitua suuremmalle pudotukselle.

Kuvan 9a perusteella putoamisvara on riittävä. Sarven ja peräsimen raon alhaalla tulisi siten olla 115–125, mikä on kohtuullisen lähellä kuvan 8 oikealla olevia mittoja. On mahdollista, että kuvausten välillä peräsin on Gdanskiin siirtymisen aikana pudonnut hieman lisää.



Kuva 9a. Ehjän peräsimen raot sarven ylä- ja alapuolella likimääräisesti mitattuina. Kuvattu Riikassa 28.11.2009.



Kuva 9b. Vaurioitunut peräsin kuvattuna Riikassa 28.11.2009. Peräsin on pudonnut nojaamaan sarvea vasten. Alhaalla on likimääräisesti mitattuna 110-120 mm rako. Kuvat 9 ovat otteita ja muokattuja varustamon kuvista.

LIITE 2. HOLKKIEN PYÖRIMISEN TARKASTELU

Holkkien pyöräminen ennen valuepoksen asennusta 2004.

Holkkien pyörämissen jäljet ja urat peräsienien alaosien yläpinnoilla näkyvät kuvissa 1a ja 1b. Pääosa jäljistä oli syntynyt vuoden 2004 telakointiin mennessä, koska pronssi-holkki oli pudonnut 10–12 kk. Hankauksen aiheuttaman kulutuksen lisäksi vaikuttavana tekijänä oli galvaaninen korroosio, joka johtui pronssin ja teräksen potentiaalierosta. Urien syvyys ei ole tiedossa.

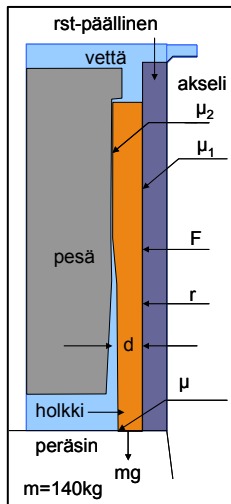
Vuonna 2009 vain SB-holkki putosi. Se oli pudonnut ennen peräsimen katkeamista mahdollisesti joitakin viikkoja. SB-holkin jäljet näyttävät ulottuvan kauemmaksi kuin BB-holkin, mikä vastaa tapahtumien kulkua.



Kuva 1a. SB-peräsimen alaosan yläpintaa ala-akselin reiän ympärillä. Bureau Veritasin kuva 12.12.2009.



Kuva 1b. BB-peräsimen alaosan yläpintaa ala-akselin reiän ympärillä. Bureau Veritasin kuva 12.12.2009.



Pudonnut holkki voi pyörähtää peräsintä käännettäessä, kun voima $F=0$ ja se on irti ainakin pesän seinämästä. Kun alalaakeriin kohdistuu voima F , pudonnut holkki voi pyörähtää, jos kääntävä momentti $=Fr\mu_1$ on suurempi kuin $F(r+d)\mu_2 - mg(r+d/2)$. Käytännössä näin on SILJA EUOPAn tapauksessa, sillä pesän ja pronssiholkin välissä on märkää ruostetta. Tämän johdosta kitkakerroin¹ μ_2 voidaan olettaa pieneksi ja selvästi pienemmäksi kuin ruostumattoman teräksen ja pronssin välinen kitkakerroin, joka on noin 0,5 (lepokitka) ja noin 0,3 (liukukitka). Kiertäminen kuluttaa ruostetta pois. Jos pesän pinta olisi kova, kyseinen kitkakerroin olisi suurempi kuin 0,5, eikä holkki kääntyisi. **Epoksin asennuksen jälkeen** tilanne oli monimutkaisempi epoksin ja ruuvien vuoksi, katso seuraavat kuvat.

Kuva 2. Holkkien pyörimisen tarkastelu ennen epoksin asennusta.

Holkkien pyöriminen epoksin asennuksen jälkeen noin 2008–2009

Valuepoksin murtumiseen ja putoamiseen paikaltaan voi olla useita eri syitä:

- Valuepoksin ja pronssiholkin välinen tarttuvuus oli heikko. Tarttuvuuden pettäessä mahdollisesti melko pian valamisen jälkeen vettä pääsi holkin ja epoksin väliin.
- Asennukseen käytetyt ruuvit olivat kuusiokolomallisia. Kuusiokolo oli niin syvä, että se ulottui läpi koko holkin ja joillakin ruuveilla epoksin puolelle. Ruuvien katkettua vettä pääsi entistä helpommin holkin ja epoksin väliin, mikä alensi kitkaa ja helpotti holkin pyörimistä.
- Epoksin puristuslujuus saattoi ylittyä pronssiholkin ja laakeripesän välisessä puristuksessa (epätodennäköinen staattisessa kuormituksessa, mutta värähtelyt lisäsivät kuormaa)
- Pronssiholkin pyörähtäminen, jolloin asennusruuvit aiheuttavat alkumurtuman. Jo yhden ruuvien katkeaminen teki mahdolliseksi veden pääsyn holkin ja epoksin väliin, mikä lisäsi ruuvien aiheuttamaa kuormitusta epoksiin.
- Laakeripesän syöpyminen valuepoksin ympäriltä paikallisesti, jolloin pesä ei enää tue epoksia.

Korjaustelakan mukaan vuonna 2004 pronssiholkki oli asennettu paikalleen ilman erityistä puhdistusta tai primeria. Holkin ja valuepoksin välinen adheesio (pitovoima) on siten alkujaankin ollut heikko, eikä todennäköisesti olisi pystynyt estämään holkin pyörimistä pesässään. Holkin pyörimistä ovat kuitenkin estäneet asennuksessa apuna käytetyt M16 kuusiokoloruuvit, mutta vain siihen saakka kun joku ruuvi katkesi. Valuepoksiin kohdistuva voima näiden ruuvien kohdalla on todennäköisesti ylittänyt epoksin murtolujuuden, varsinkin jos ruuvi pääsee taipumaan.

Mikäli laakeripesä syöpyy valuepoksin ympäriltä, ei epoksiin kohdistu enää puhdas puristusvoima kuten on ollut tarkoitus. Erityisesti jos syöpyminen on epätasaista, aiheutuu epoksiin taivutuskuormia. Valmistajan ilmoittama taivutuslujuus on 95 N/mm^2 , mikä voi paikallisesti hyvinkin ylittyä em. tilanteessa.

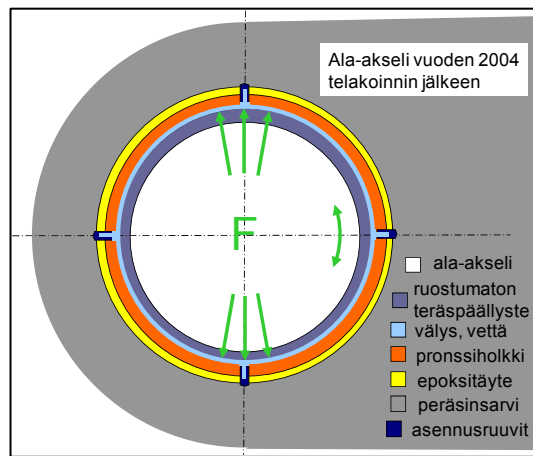
Vuoden 2007 telakoinnissa peräsinsarvien kavitaatiovaurioita korjattiin päällehitsaamalla. Jos ko. vauriot olivat lähellä laakerin pesää, olisi ollut varmistettava, ettei lämpötila epoksin rajapinnassa noussut yli 120°C , mitä voidaan yleisesti pitää epoksien suurim-

¹ Pätee tietyllä voiman suuruusvälillä. Kitkakertoimet ovat likimääräisiä, esim. Wikipedia Cu/St ja www.copper.org.

pana sallittuna hetkellisenä lämpötilana². Hitsauksen aikana saattaa myös vaikuttaa eri aineiden lämpölaajenemiskertoimien erot³.

Koottujen faktojen pohjalta on tutkintalautakunta rekonstruoinut **erään mahdollisen SB- ja BB-peräsinakseliston vaurioiden kehittymisen seuraavasti**.

Alalaakeriin kohdistuva voima F vaikuttaa useimmin käytetyillä peräsinkulmilla (± 15 astetta) poikittain. Se voi synnyttää poikittain oleviin ruuveihin vetoa/puristusta ja pitkittäin oleviin leikkausta kun pesä alkaa syöpyä. Kääntävä momentti synnyttää leikkausta ruuveihin sekä puristusta, vetoa ja leikkausta epoksiin ruuvien reiän kohdalle, kuva 3. Teräksen ja epoksin kimmomoduulien suhde on noin 35, minkä vuoksi epoksi myötää hieman ja ruuvi pääsee myös taipumaan.



Holkin 8 kuusiokoloruuvia M16 oli ruuvattu vaihtelevaan syvyyteen. Ruuveissa on epä-jatkuvuuskohta kuusiokolon johdosta. Valtaosa ruuveista oli katkenut kohdasta, jossa kuusiokolo päättyy. Katkeamisen jälkeen vesi on päässyt voiteluaineeksi holkin ja epoksin väliin. Voima F vaihtelee peräsimen kääntelyn ja potkurin herätevoiman aiheuttaman värähtelyn mukana, mikä synnyttää ruuveihin väsytysjännityksen.

Kuva 3. Alalaakeriin kohdistuvat voimat ja kääntävä momentti.

Alkutilanteessa vain pinta 1 liukui ja pinta 3 oli hyvin kiinni ennen kuin pesä oli ehtinyt merkittävästi syöpyä (pinnan numerointi näkyy kitkakertoimen alaindeksistä). Sen sijaan pinnan 2 adheesio/kitka oli saattanut jäädä pieneksi holkin työstössä siihen jääneen työstönesteeseen vuoksi. Voiman F ollessa riittävän suuri, pinnan 1 kitkan johdosta ruuveihin saattoi kohdistua niin suuri leikkaava ja taivuttava voima, että ne alkoivat katkeilla⁴.

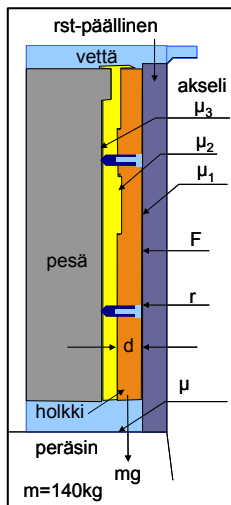
VTT:n tutkimuksissa ilmeni, että ainoassa katkeamattomassa ruuvissa oli kierteen pohjalla alkava väsymissärö. Voidaan olettaa, että ruuvit olivat heikentyneet korroosion ja väsymisen johdosta ja sitten yhdistetty jännitys oli lopulta riittänyt katkaisemaan ne. Tässä vaiheessa myös resonanssi-ilmiöllä oletetaan olleen merkittävä osuus. Joidenkin ruuvien katkeamiskohta jäi ulos holkista, ja toisten ruuvien katkeamiskohta jäi holkin si-

² VTT:n mittauksissa vastaavalla valulla lujuus säilyi 230 asteeseen asti (mittauksen maksimilämpötila).

³ EPOCAST 36[®] 43,8x10⁻⁶, teräs 12x10⁻⁶ ja pronssi (kupari) 17x10⁻⁶ astetta kohti.

⁴ Esimerkiksi, jos F on 300 kN, joka on melko yleinen voima simulointituloksissa, syntyy kitkakertoimella 0,3 90 kN vääntävä voima. Pinnassa 2 vastustava voima on ruuvien kesto leikkausta vastaan plus pinnan 2 kitka. Pinnassa 3 kiertymistä vastustava voima on ruuvien kärkien pitovoima plus pinnan 3 kitka; voidaan olettaa, että tässä pinnassa ei tapahdu liikettä. Vastustava kitkavoima pinnassa 2 esim. $90 \times 0,1 = 9$ kN. Ruuvien osalle jää siten 81 kN. Ruuvien nettopinta-ala on 0,92 cm². Epoksi myötää hieman, joten ruuveihin vaikuttaa taivutus ja leikkaus. Ruuvien leikkaus pinnassa 2: jos oletetaan jakaantuminen tasan pinta-alalle, saadaan $81000 / (8 \times 0,92) = n. 110$ N/mm². Jos otetaan huomioon se, että jännitys ei jakaannu tasaisesti, on leikkausjännitys ruuvien keskiakselilla noin 125 N/mm², joka vastaa vertailujännitystä $\sqrt{3} \times 125 = \text{noin } 215$ N/mm². Taivutusjännitykseksi saadaan noin 55 N/mm². Näin ollen leikkausvoiman aiheuttama leikkausjännitys on merkittävin. Ruuveihin syntyy myös väsymiskuormituksesta aiheutuvia säröjä. Lisäksi niihin vaikuttaa galvaaninen korroosio. Tässä on oletettu, että kaikki ruuvit kuormittuvat samalla tavalla. Myös voima voi olla selvästi suurempi kuin yllä käytetty 300 kN. On todennäköistä, että kuormitus on epätasaista, minkä vuoksi yksittäisen ruuvien jännitys voi olla huomattavasti suurempi. Jossakin vaiheessa jonkin ruuvien kestoparaja ylitettiin, minkä jälkeen seuraava ruuvi katkesi herkemmin ja prosessi jatkui kiihtyen.

sään. Niin kauan kuin pesän syöpyminen oli vähäistä, holkki pääsi kiertymään, jolloin epoksissa kiinni olevat ruuvien päät tekivät uria holkin pintaan. Myöhemmin epoksi katkesi ylhäältä heikoimmasta kohdastaan, kuva 4a.

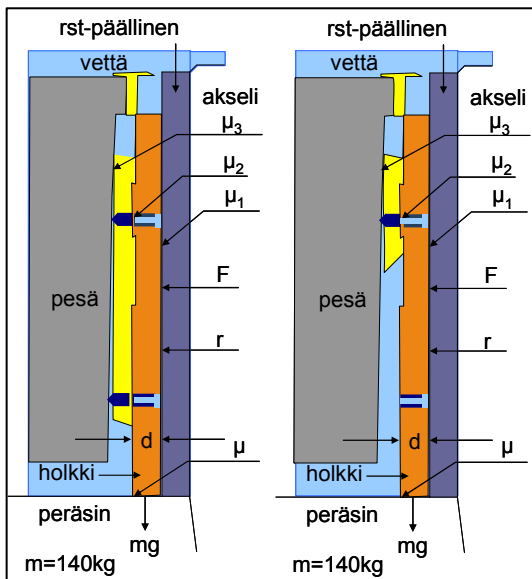


BB-alalaakerin epoksin irrotus onnistui paikoin vain terävän hakun avulla. On todennäköistä, että myös SB-puolella epoksi oli irronnut paloittain ja eriaikaisesti.

Kuva 4a. Ruuvien katkeamis- ja epoksin irtoamistarkastelua.

Pesän syöpyminen edetessä epoksiin syntyi taivutusjännitystä, mikä yhdessä jatkuvan resonanssi-värähtelyn sekä ruuvien synnyttämän paikallisen jännityksen kanssa aiheutti vähitellen halkeamia epoksiin. Ruuvien kuusiokolojen kautta vesi ja sen painevaihtelut holkin liikku-misesta johtuen myötävaikuttivat epoksin rikkoontumiseen, kuva 4b. Ensin epoksin alaosa alkoi pudota palasia. Ruuvit pysyvät pisimpään epoksin yläosassa, missä ruuvien päät naarmuttivat myös pesän seinämää. Jäljistä päätellen

myös alaosassa oli ollut ruuveja kiinni epoksissa. Peräsinakselin jännitykset olivat vielä pysyneet pieninä, koska välys oli ollut normaali, eikä nettoliikevara vielä ollut kasvanut (epoksin ollessa paikoillaan yläosassa).



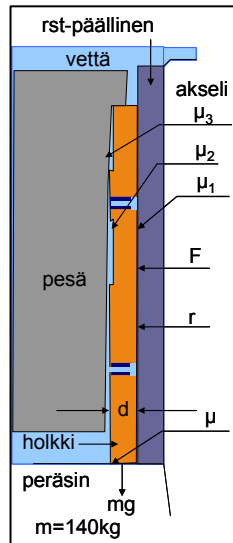
Kuva 4b. Epoksin hajoamisen tarkastelua.

Galvaaninen korrosio oli hidasta niin kauan kuin epoksi oli paikoillaan. Galvaaninen virtapiiri oli mahdollinen aluksi ruuvien kautta ja ruuvien katkettua kiertotietä. Holkin pudottua, epoksi ja ruuvit hankasivat satunnaisesti pesää ja poistivat kertynyttä ruostetta. Holkin poikittainen liike aiheutti pumppausvaikutuksen, joka nopeutti korroosiojätteen poistumista. Molemmista pinnoista 2 ja 3 oli kitkaa lisääviä kohtia: pinnassa 3 ruuvien päitä ja pinnassa 2 katkenneita ruuvien päitä. Kumpi pinta liikkui, riippui siitä, miten tiukasti jarruttava kohta sattui olemaan

kosketuksissa vastinpintaan. Epoksin hajoaminen jatkui. Valokuvien mukaan SB-puolella on vähemmän uria sekä pronssiholkissa, että pesässä.

Epoksin hävitessä SB-puolelta ja syöpyminen jatkuessa, akseli ja sen päällä oleva roste-riholkki rikkoivat epoksilierin. Näin syntyi yhtäkkiä suuri alalaakerin liikkumisvara. Jännitykset SB-puolen peräsinakselissa nousivat voimakkaasti. Pronssiholkki alkoi kuluttaa pykällyksiä vastaavia uria pesään poistamalla pehmeää korroosiojätettä. Galvaaninen korrosio hidastui, mutta ruoste poistui tehokkaasti niin kauan kuin pronssiholkki osui ajoittain pesään. Mitä suurempi liikevara, sitä suurempi voima tarvittiin taivuttamaan holkki kiinni pesään. Samalla alalaakeriin kohdistuva voima pieneni. Kun holkki ei koskettanut pesää, se pyöri peräsimen mukana, koska se nojasi siihen. SB-holkissa havait-

tiin vain vähän uria ja nekin yläosassa. Tämä voi johtua siitä, että epoksi hajosi ja putosi nopeammin kuin BB-puolella.



Tähän saattoi vaikuttaa se, että epoksi oli ohuempaa SB-puolella sekä se, että SB-peräsimen kohdistuneet peräsinvoimat olivat keskimäärin noin 13 % suuremmat.

Kuva 4c. Pudonnut SB-holkki epoksin häviämisen jälkeen.

Lisäksi syynä saattoi olla hieman heikommin onnistunut epoksin valu, laajempien korjaushitsausten aiheuttama epoksin liiallinen lämpeneminen tai puhdas satunnaisyys.

LIITE 3. ALALAAKERIN KORROOSIO MERIVEDESSÄ¹

Seostamattoman teräksen korroosio merivedessä.

Merivedessä olevan seostamattoman teräksen **yleisessä syöpymisessä** keskimääräiseksi korroosionopeudeksi on kuuden vuoden altistuksessa mitattu korroosionopeudeksi 0,07...0,1mm/vuosi. Korroosionopeuteen vaikuttavat lähinnä veden suola- ja happipitoisuus. Korroosionopeutta voivat voimakkaasti kiihdyttää paikalliset olosuhteet, veden virtaus ja *galvaaninen korroosio*. Paikallinen korroosionopeus esimerkiksi rakenteessa olevissa raoissa voi olla jopa 10-kertainen vapaan pinnan korroosionopeuteen verrattuna.

Veden virtaus (pinnalle enemmän happea) kiihdyttää korroosionopeutta siten, että muutos on pienillä nopeuksilla (alle 1,6m/s) lineaarinen, jonka jälkeen vaikutus hidastuu. Eräissä kokeissa korroosionopeuden on todettu virtausnopeudella 2m/s olleen yli nelinkertainen ja nopeudella 5m/s noin seitsenkertainen verrattuna korroosionopeuteen virtaamattomassa vedessä.

Galvaaninen korroosio voi nopeuttaa meriveden aiheuttamaa korroosiota huomattavasti verrattuna tilanteeseen, jossa galvaaninen korroosio ei vaikuta. Vaikutuksen määrä riippuu kontaktissa olevien metallien keskinäisestä erosta jännitesarjassa, kuva 1, (käytännössä alle noin 0,050-0,1 V jännite-erolla ei ole merkitystä²), elektrolyytin sähkönjohtavuudesta, pinta-alojen suhteesta (vaikutus suurin silloin, kun epäjalomman metallin pinta-ala verrattuna jalomman metallin pinta-alaan on pieni) ja metalliparin välisestä etäisyydestä. Eräiden tutkimusten mukaan seostamattoman teräksen korroosionopeus kiihtyy noin 1,5...2-kertaiseksi ollessaan kontaktissa austeniittisen ruostumattoman teräksen tai messinkien ja kuparien kanssa ja joissakin korroosiokekeissa teräksen korroosionopeus on yli kolminkertaistunut kontaktissa olevan kuparin vaikutuksesta.

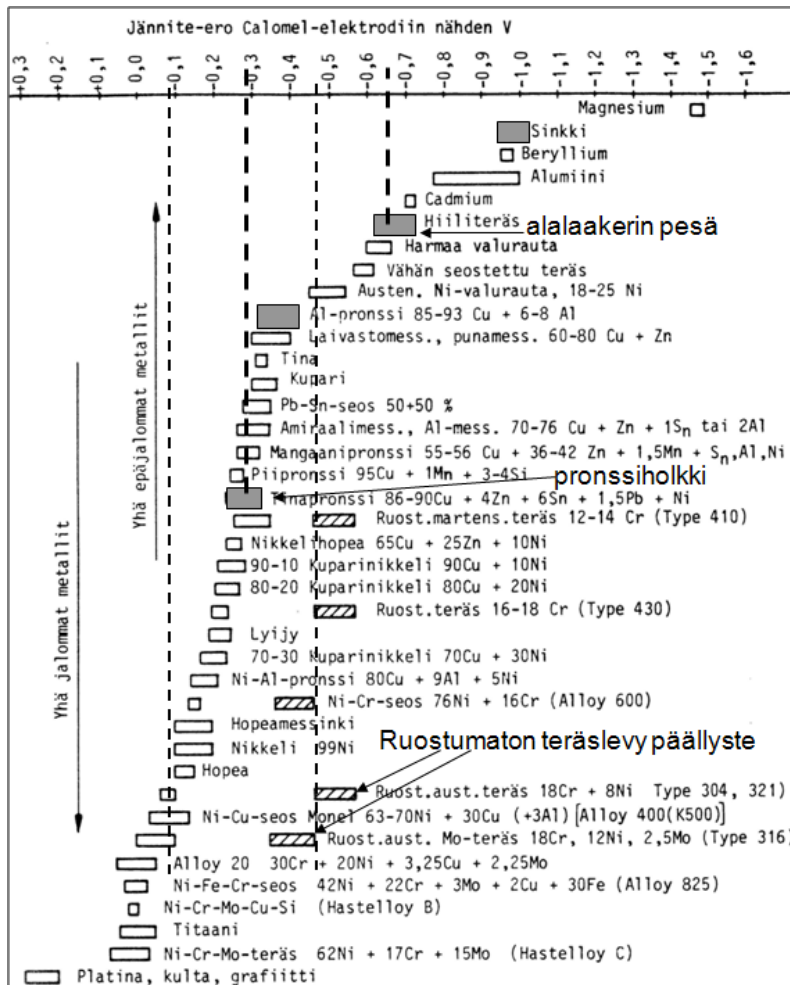
Alalaakerin korroosio SILJA EUROPAssa

Galvaanista korroosion ja holkin pyörimisen johdosta alalaakerin pesän seinämä oli vuoden 2004 telakointiin mennessä voimakkaasti syöpynyt. Syöpymän suuruus oli suurimmillaan säteissuunnassa noin 15 mm. Tilanne korjattiin siten, että pesän seinämää hiottiin ja uuden pronssiholkin ja valuteräksen välinen tila täytettiin epoksilla.

Teräksen korroosionopeutta SILJA EUROPAn alalaakerin pronssiholkkia ympäröivässä teräksessä olivat nopeuttaneet samanaikaisesti ainakin suuri virtausnopeus (sijainti potkurivirrassa) ja galvaaninen korroosio (kontaktissa olevat erilaiset metallit). Myös voimakkaan kavitaation johdosta useat peräsimen kohdat olivat syöpyneet, mikä saattoi vähentää korroosiosuojausten vaikutusta. Näiden yhteisvaikutusta ei voida tarkasti arvioida, mutta edellä esitetyn perusteella paikallinen maksimikorroosionopeus (korroosionopeus ulkopintaa vastaan kohtisuorassa suunnassa, säteissuunnassa) voi tässä tapauksessa olla jopa suuruusluokkaa 1mm/vuosi tai enemmän. Galvaanisena parina ovat olleet pronssiholkki ja sitä ympäröivä seostamaton teräs. Ruostumatonta terästä oleva holkki on ollut kontaktissa seostamatonta terästä olevan akselin kanssa ja sen johdosta passiivitilassa.

¹ VTT:n kirjallisuusselvityksen VTT-R08624-10-OTK-081110 ja korroosioikäkirjan, SKY 1988 sekä SAVCOR Consulting Oy:n yleistekstin pohjalta.

² Det Norske Veritas, Corrosion Protection of Ships, Recommended Practice, 2000. Kuva on.



Kuva 1. Metallien galvaaninen jännitesarja. Raportin metalleja muistuttavat metallit on näytetty harmaalla. Ruostumaton teräs on aktiivinen oikeanpuoleisilla laatikoilla. Meriveden virtausnopeus on 2,4–4,0 m/s, lämpötila voi olla välillä 10–27 astetta. Perustuu Korroosiokäsikirjaan, Suomen Korroosioyhdistys 1988 ja Det Norske Veritasin julkaisuun Corrosion Protection of Ships, Recommended Practice, 2000.

Alaakerissa on kolme eri metallia toisiinsa yhteydessä: valuteräs, ruostumaton teräs ja pronssi. Näistä valuteräs sijaitsee metallien sähköisessä jännitesarjassa alimpana (jännite-ero³ noin 0,4 V pronssiin nähden). Jännite-ero ruostumattoman teräksen ja pronssin sekä ruostumattoman teräksen ja valuteräksen välillä riippuu siitä onko ruostumaton teräs aktiivitilassa vai passiivisessa tilassa⁴.

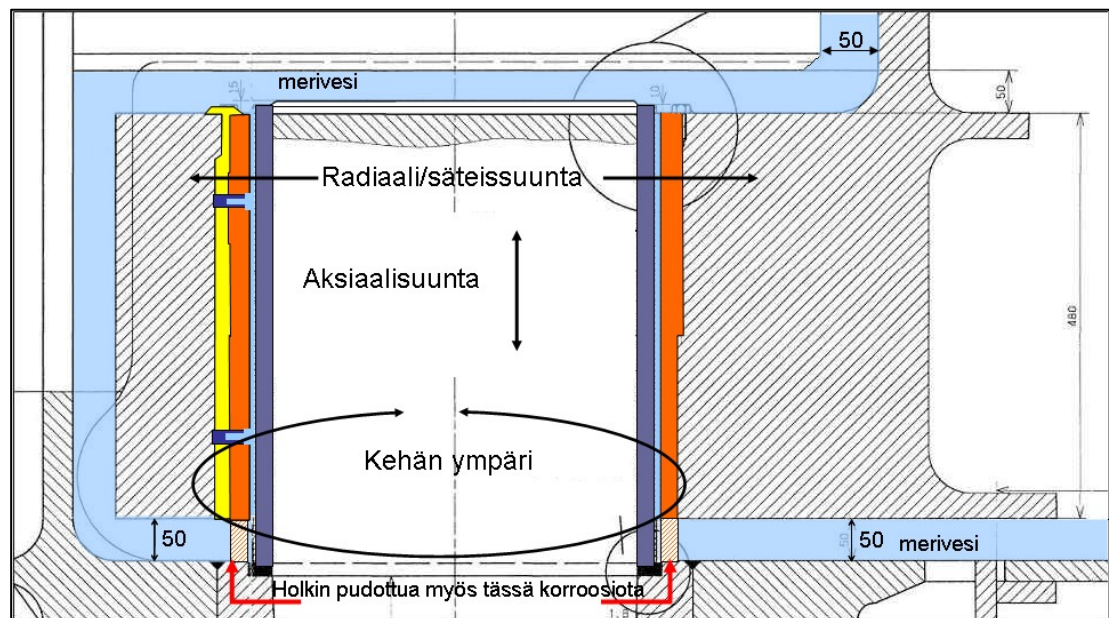
SILJA EUROPASSA käytetyn ruostumattoman teräksen laatu ei ole tiedossa, todennäköisesti se oli yllä olevan kuvan tyyppi 304 tai 316, tavallinen austeniittinen laatu. Ruostumattomien terästen korroosionkestävyys perustuu passiiviseen suojakerrokseen, joka riittävän hapen tai sopivasti hapettavan aineen vaikutuksesta korjaantuu itsestään, mikäli suojakerros vahingoittuu.

³ Ns. Calomel – elektrodi on elohopeakloridielektrodi, jota käytetään referenssielektrodina.

⁴ Ruostumattoman teräksen hyvä korroosionkestävyys johtuu kromista rikastuneesta passiivikerroksesta, oksidifilmistä, mikä muodostuu luonnollisesti teräksen pintaan. Tämä on ruostumattomien terästen pinnan tavallinen olotila ja sitä kutsutaan passiivitilaksi. Kromia tulee olla vähintään 10,5 paino % (ja enintään 1,2 % hiiltä). Edellytyksenä on, että pinta on yhteydessä happeen. Ruostumaton teräs, joka on peräsimen pinnalla saattaa olla eri tilassa kuin ruostumaton teräsholkki akselin laakeripintana.

Ruostumaton teräslevypäällyste voi olla passiivisessa tai aktiivisessa tilassa. Normaalisti se on passiivinen, mutta pienillä virtausnopeuksilla tai vähähappisessa vedessä se voi muuttua aktiiviseksi⁵. Jännite-ero voi siten vaihdella välillä 0,65 V (passiivinen)-0,15 V (aktiivinen) (kuva 1) valuteräkkeen verrattuna. Aktiivitilassa ruostumaton teräs on hieinan epäjalompi pronssiin verrattuna ja voi siten syöpyä. Passiivitilassa se saattaa aiheuttaa pronssin syöpymistä. SILJA EUOPAssa on oletettu passiivitila.

Galvaanisessa korroosiossa korroosionopeuteen vaikuttaa galvaanisen parin keskinäinen välimatka siten, että etäisyyden kasvaessa korroosionopeus pienenee. Tämän vuoksi korroosio on ollut nopeinta pronssilaakeria ympäröivässä teräksessä pronssiholkin rajapinnan välittömässä läheisyydessä. Korroosion edetessä ilmeisesti sekä ala- että yläpinnalta samanaikaisesti sekä aksiaalisessa että säteittäisessä suunnassa on lähellä ala- ja yläpintaa olevilla syöpyvillä teräspinoilla etäisyys rajapintaan ja pronssiholkiin vähitellen kasvanut, jolloin galvaanisen korroosion vaikutus on vähentynyt ja korroosionopeus on samalla hidastunut. Rajapinnalla aksiaalisesti etenevän korroosiorintaman kärjessä on veden virtausnopeus vähitellen pienentynyt, jolloin korroosionopeus myös tässä kohdassa on todennäköisesti vähitellen pienentynyt.



Kuva 2. Korroosion etenemissuunnat. Oikealla tilanne vuoteen 2004, vasemmalla vuosina 2004–2009.

Kuva 2 havainnollistaa korroosion etenemissuunnat ja näyttää alalaakerin rakenteen ennen vuotta 2004 ja sen jälkeen. Korroosionopeuteen vaikuttavien tekijöiden suuren määrän vuoksi ei paikallista korroosionopeutta aksiaalisuunnassa rajapinnalla voida arvioida. Lisäksi lienee mahdollista, että merivesi voi tunkeutua pronssiholkin ja teräksen väliseen rakoon aksiaalisesti etenevän korroosiorintaman edellä, jolloin säteittäistä korroosiota voi tapahtua jo verrattain aikaisessa vaiheessa. Tapahtuneen syöpyymisen perusteella (pintaa vastaan kohtisuoraa korroosiota oli todettu koko pronssiholkin reiän, korkeus 480mm, alueella korjauksen 2004 yhteydessä 11 vuotta käyttöönotosta) korroosion voidaan osoittaa edenneen aksiaalisuunnassa jopa kymmeniä millimetrejä vuodessa.

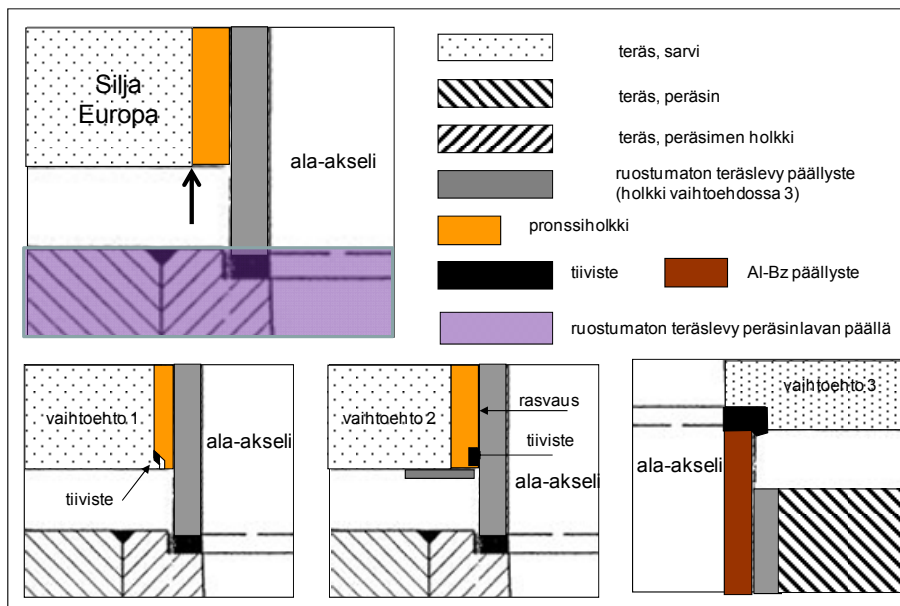
⁵ Det Norske Veritas, Recommended practice, Corrosion protection of Ships, 2000.

Vuonna 2004 epoksivalulla tehdyn korjauksen jälkeen oli pronssiholkin ja sitä ympäröivän teräksen välissä ollut sähköä eristävä kerros. Galvaaninen sähköinen yhteys on ollut ainakin asennusruuvien sekä myös laakeripinnan, ruostumattoman teräsholkin, akselin ja rungon kautta, joten galvaanisen korroosion aiheuttama kiihdyttävä vaikutus on voinut jatkua. Tällöin pronssiholkilla ja sitä ympäröivällä teräksellä ei kuitenkaan ole ollut yhteistä rajapintaa, johon korroosio olisi voinut erityisesti keskittyä. Näin ollen korroosio hidastui, koska epoksi kiinnittyi aluksi tiukasti molempiin pintoihin. Korroosio oli mahdollinen vain alhaalta ylöspäin, koska ylhäällä oli epoksilieri. Korroosio pääsi jatkumaan käytännössä heti, koska on todennäköistä, että epoksin ja pesän välissä oli hyvin pieniä hiusrakoja.

Syöpyminen voimistui sen jälkeen kun epoksiin oli syntynyt halkeamia ruuvien kohdalle. Tällöin korroosio on näissä rako-olosuhteissa voinut olla nopeaa (jopa kymmenkertainen vapaan pinnan korroosionopeuteen verrattuna) ja myös tässä tapauksessa aiheuttaa nopeaa aksiaalista korroosiota. Ruostumattoman teräslevypäällysteen läheisyys on todennäköisesti kiihdyttänyt korroosiota.

Holkin pudottua syntyi korroosiolle uusi paikka kohdassa, jossa holkki osui peräsimen alaosan yläpintaan, merkitty punaisilla nuolilla kuvassa 2. Vuoden 2004 telakointiin mennessä syöpymistä ehti tapahtua 10–12 kk, mutta vuonna 2009 vain noin vuosi tai muutamia kuukausia.

Alalaakerin rakenne on SILJA EUROPAssa poikkeuksellinen muihin vastaaviin aluksiin verrattuna. Kuvassa 3 on esitetty aluksessa käytetty rakenne ja vaihtoehtoiset, yleisesti käytössä olevat rakenteet.



Kuva 3. Alalaakerin periaatteellinen rakenne SILJA EUROPAssa ja muita yleisesti käytettyjä rakenteita. Vaihtoehto 1 mm. SILJA SERENADEssa ja SILJA SYMPHONYssa.

Nähdään, että SILJA EUROPA:n alalaakerin rakenne on galvaanista korroosiovaaraa ajatellen epäedullinen, ja että SILJA EUROPAssa rakenne ei mitenkään eristä pronssia ja valuterästä toisistaan. Korroosiosta varoittaa mm. Germanischer Lloyd, kun pronssi ja ruostumaton teräs ovat yhteydessä seostamattomaan teräkseen ja edellyttää korroosiotä ehkäisevien menetelmien käyttöä. Det Norske Veritasilla on erilliset ohjeet²⁹.

Korroosionsuojaus SILJA EUROPAssa merivedessä

Aluksessa on käytössä kolme menettelyä suojata rungon ulkopintaa ja sen osia mukaan lukien peräsintä korroosiolta: maalaus, passiivinen ja aktiivinen katodinen suojaus. Maalausta ei tarkastella tarkemmin.

Passiivinen katodinen suojaus-sinkkianodit

Tarkastellaan sinkeillä suojausta peräsimen alueella⁶. Jäissä ajossa tarvittavan suojavirran tiheyden tulee olla vähintään 60 mA/m². Yhden peräsimen suojattava pinta-ala on noin 2x20 m². Suojauksen tulee kestää vähintään 2 vuotta (17250 tuntia). Saadaan virtatarpeeksi 2,4 A ja siten 41400 Ah. Sinkkianodi luovuttaa 780 Ah/kg. Joten saadaan tarvittavaksi anodimääräksi 53 kg. Tarvitaan siis noin á 5 kg sinkkianodeja 10 kpl/peräsin. Laskelma on tehty jatkuvaa jäissä ajoa varten, joten SILJA EUROPAn peräsimissä olevat 5 kpl anodeja/peräsimen puoli vaikuttaa riittävältä.

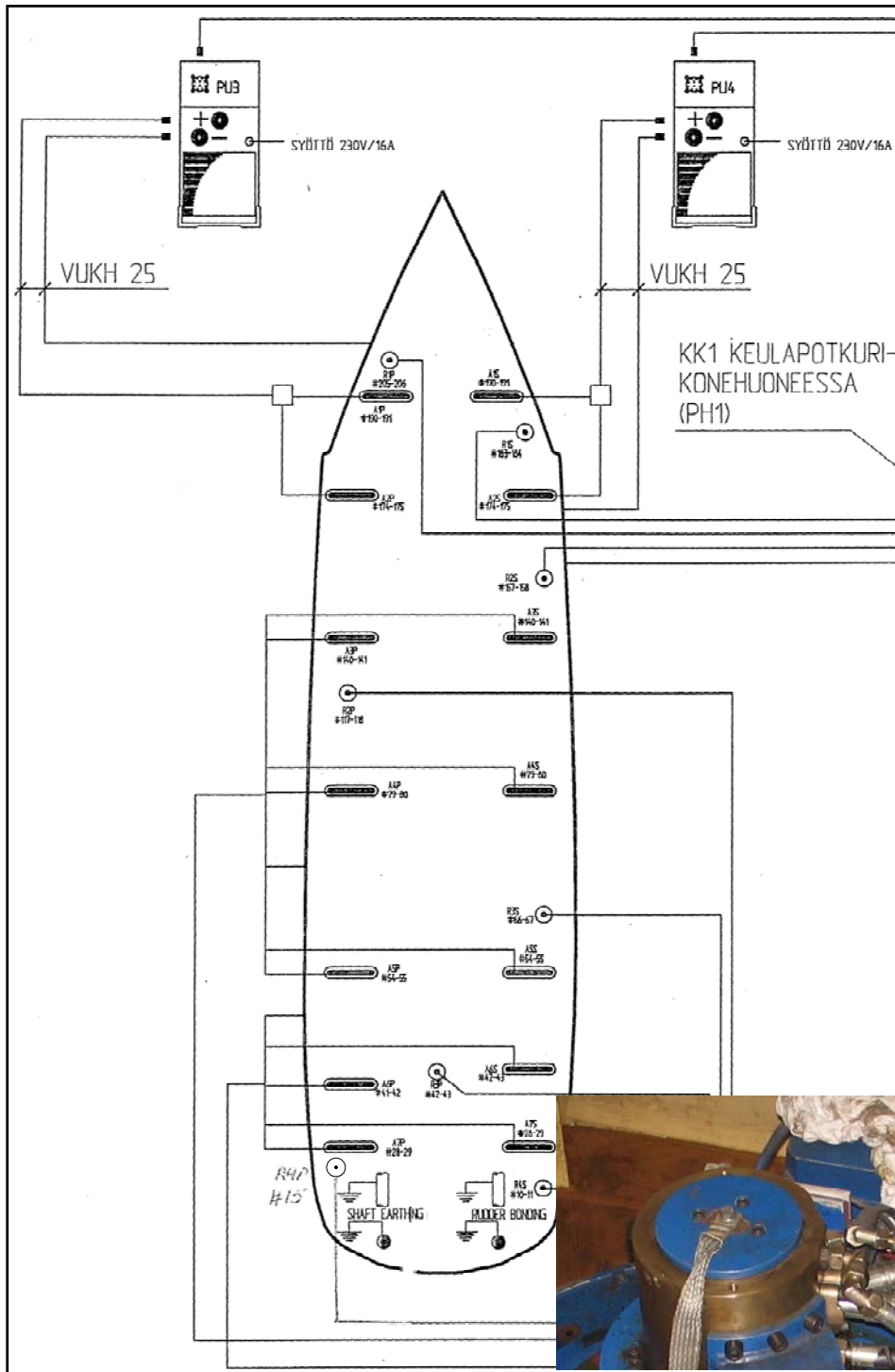
Laskelmassa on oletettu, että peräsin on maalattu. Voimakkaan kavitoinnin johdosta maalaus häviää melko laajalta alueelta alle kahdessa vuodessa. Telakointiväli on usein ollut yli 2 vuotta. Nämä seikat saattavat kumota edellä esitetyn jäihin tehdyn mitoituksen tuoman reservin.

Sinkkianodi suojaa sen lähellä olevaa pintaa, eikä suojausvaikutus ulotu peräsinkonstruktiossa oleviin rakoihin, kuten peräsinsarven ja peräsimen alaosan yläpinnan väliinseen rakoon.

Aktiivinen katodinen suojaus-SAVCORin järjestelmä

Aktiivinen, runkoa suojaava järjestelmä on SAVCOR Consulting Oy:n toimittama ja ylläpitämä. Kuvassa 4 on sen kaavio. Suojaus ei aina ollut toiminut suunnitelmien mukaisesti. Esimerkiksi vuonna 1997 havaittiin, että aluksen keulaosassa anodit eivät olleet toimineet ja seurauksena oli voimakasta korroosiota laidoituksessa molemmin puolin vesirajasta alaspäin. Tämän vuoksi anodeja lisättiin vuoden 1997 telakoinnin yhteydessä (2 kpl referenssi-anodeja ja 4 kpl titaanianodia). 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 johdosta.

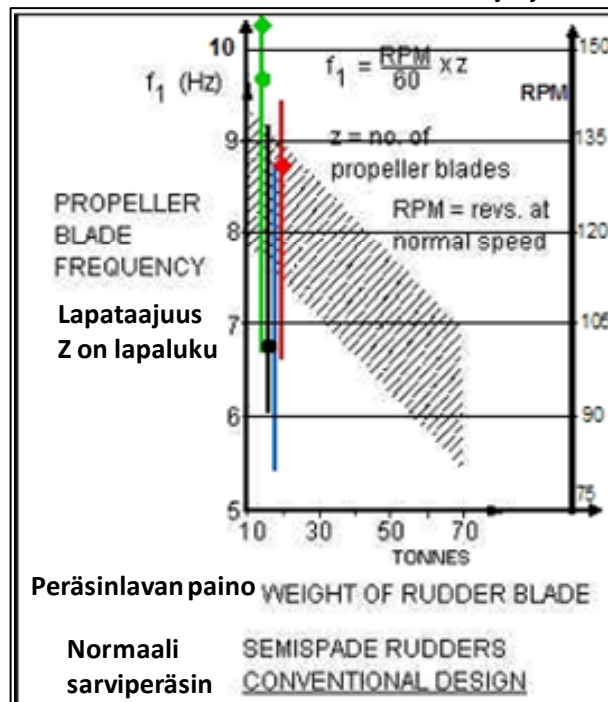
⁶ Germanisher Lloydin mukaan 2006, Chapter VI, Part 10, Section 7 Cathodic Corrosion Protection.



Kuva 4. Aluksen aktiivinen katodisuojausjärjestelmä, vuoden 1997 muutosten jälkeen. Siihen kuuluu aluksen runkoon asennetut 8 sinkillä päällystettyä titaania referenssielektrodia (ympyrät, joissa piste keskellä) ja 14 keraamisesti päällystettyä titaanianodia (pitkulaiset). Lisäksi potkuriakselit ja peräsin on maadoitettu (valokuvassa näkyy peräsimen maadoitusjohto, joka on kiinnitetty peräsinakselin yläpäähän).

LIITE 4. PERÄSIMIEN VÄRÄHTELYN ARVIOINTI

Peräsimen värähtely voi muodostua taivutusvärähtelystä tai vääntövärähtelystä. Seuraavassa tarkastellaan taivutusvärähtelyä ja siitä syntyviä taivutusjännityksiä. Peräsimen



vääntövärähtelyt on jätetty käsittelystä pois, koska niiden merkitys tässä tapauksessa on oletettu vähäiseksi.

Peräsimen värähtelymuodon, kuva 2, yleensä ensimmäisen, ominaistajuus, saattaa osua potkurin lapataajuusalueelle. Tällöin peräsimiin ja sen osiin kohdistuvat potkurista aiheutuvat sykliset voimat saattavat moninkertaistua resonanssi-ilmiön johdosta. Esimerkkinä on seuraava kuva 1¹. Vaarallinen alue on viivoitettu. SILJA EUROPA:n lapataajuusalue on merkitty kuvaan punaisella; normaali kierrosluku vaihtelee välillä 100–143 1/min, peräsinlavan paino on 21 tonnia.

Kuva 1. Ehjän sarviperäsimen ensimmäisen värähtelymuodon ominaistajuus peräsinlavan painon funktiona. SILJA EUROPA:n potkurin kierroslukuarvo on merkitty punaisella. Kuvassa on myös kolmen muun aluksen tilanne. Viivoneliö ilmoittaa potkurin kierrosluvun kun akseligeneraattori on käytössä. Ympyrät ilmoittavat yleisimmin käytetyn kierrosluvun. Vaarallinen alue on viivoitettu. Det Norske Veritasin kuvaa on muokattu.

SILJA EUROPA:n peräsimessä löydettiin vaurioita peräsinakselin laakerin alareunan kohdalla, peräsinsarven yläpuolella sekä peräsimen yläpuolella, aluksen runkoon liittyvässä osassa². Ne viittaavat resonanssin mahdollisuuteen.

Kuvaan 1 on lisätty kolmen muun vastaavanlaisen aluksen tiedot. Näyttää siltä, että tämän tapaisilla aluksilla ei vaarallista kierroslukualuetta pystytä kokonaan välttämään. Kuitenkin SILJA EUROPA näyttää osuvan pahimmin tälle alueelle. Ominaisuus pienenee alalaakerin liikevaran kasvaessa.

Det Norske Veritasin sääntöjen lisäyksessä "Guidance note" korostetaan tarvetta tehdä tämän tyyppiselle peräsimelle värähtelyanalyysi³. Vaarana on alalaakerin dynaamisten kuormien kasvu. Peräsimen värähtelyongelmista ja tilanteen korjaamisesta on löydetty myös muita kuvauksia⁴.

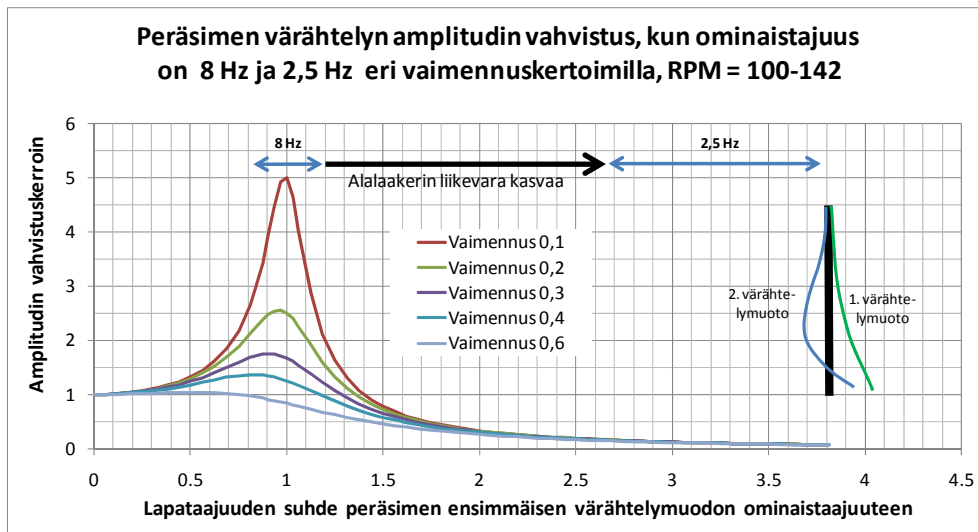
¹ Kuva perustuu Det Norske Veritasin vaurioraporttiin 3/93. Siinä kuvataan peräsimen syntynyt halkeama. Se oli todennäköisesti johtunut lapataajuuden osumisesta kuvan esittämälle vaaralliselle (viivoitettu) taajuusalueelle. Sisäaruksella ei ollut tällaista vauriota; sen potkurissa oli 3 lapaa, yksi lapa vähemmän, ja lapataajuus oli 25% alempi.

² Remontowa-telakan raportti korjauksista joulukuussa 2009.

³ Rules for Ships, January 2010 Pt.3 Ch.3 Sec.2, C105.

⁴ Ødegaard&Danneskiold-Samsøe, News, No 2. Autumn 1995 ja News Marine No 8 Winter 2006.

Tilanteen vakavuus riippuu värähtelyn vaimennuksesta ja siitä, kuinka lähellä herätetaajuus on ominaistajuutta ja kuinka kauan kierrosluku tuolloin säilyy samana. Seuraavassa kuvassa 2 on esitetty SILJA EUROPAn tilanne peräsimen ensimmäisen värähtelymuodon ominaistajuudella⁵. Vaimennuskertoimen, peräsin vedessä, on arvioitu mahdollisesti olevan 0,3-0,6. Toisen värähtelymuodon ominaistajuus on säännölliselle ulokepalkille ilmassa teoriassa 6,27 – kertainen. Jos oletetaan peräsimelle sama suhde, saadaan ehjälle peräsimelle noin 40–50 Hz ja ilman peräsinsarvea noin 13–19 Hz. Suurilla alalaakerin liikevaroilla peräsin saattaa siis olla resonanssissa toisen värähtelymuodon ominaistajuuden kanssa. Tosin tämän värähtelymuodon liike säännöllisellä ulokepalkilla ilmassa on vain 15–20-osa ensimmäisen värähtelymuodon liikkeestä.



Kuva 2. Peräsimen epästationaarisen poikittaisliikkeen vahvistus kahdella eri resonanssitaajuudella. Kuvassa on näytetty myös peräsimen ensimmäinen ja toinen värähtelymuoto. Nuolilla on näytetty potkurin kierroslukuarvo, kun resonanssitaajuus on 8 Hz ja 2,5 Hz. Toisen värähtelymuodon amplitudi on suhteessa ensimmäisen värähtelymuodon amplitudiin huomattavasti liioiteltu.

Kuvassa on näytetty ensimmäisen värähtelymuodon poikittaisliikkeen vahvistus värähtelyn eri vaimennuksilla. Nähdään, että resonanssitaajuuden pienentyessä kauemmaksi lapataajuudesta, epästationaarinen liike heikkenee vahvistuskertoimesta riippumatta. SILJA EUROPAlla resonanssitaajuuden (ensimmäinen värähtelymuoto) lähellä amplitudi todennäköisesti kasvaa 1,5-3 -kertaiseksi, vaikka tutkimuksessa ei ole kyetty selvittämään tilanteesta vaikuttavaa vaimennuskerrointa. Ilman vaimennusta (kerroin = 0) vahvistus on teoriassa ääretön.

Resonanssi alkaa vaikutta vasta potkurin pyörittyä jonkin aikaa resonanssikierroksilla. Väsymislaskelmissa on oletettu, että resonanssi on saavuttanut maksiminsa. Toisaalta on käytetty varovaista vaimennuskerrointa, 0,3-0,4.

Liikevaran ollessa suuri (ensimmäisen värähtelymuodon resonanssitaajuus 2,5-3 Hz) amplitudin vahvistus (itse asiassa heikennys) on 0,3-0,1 (lapataajuuden suhde 2,2-3,8). Tällöin herätevoiman amplitudiksi saadaan 54–18 kN. Lisäksi saattaa peräsimen toisen

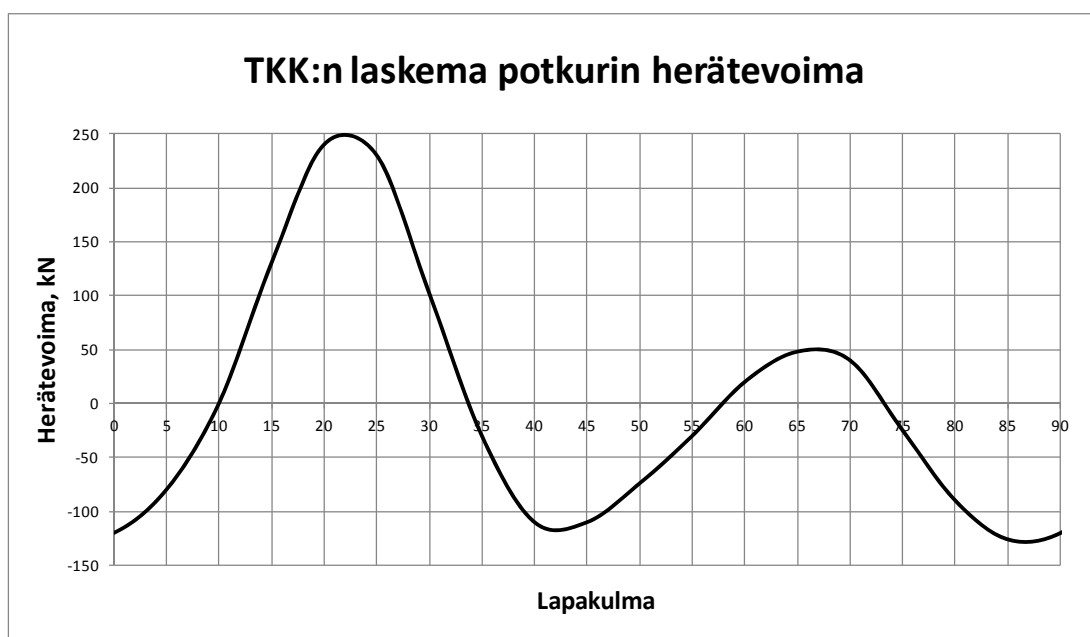
⁵ Esimerkiksi S. Graham Kelly, Schaum's Outlines, Mechanical Vibrations, McGraw-Hill 1996

värähtelymuodon resonanssitaajuus, noin 16 Hz lisätä hieman 8 Hz herätevoiman amplitudia.

Peräsimen ensimmäisen värähtelymuodon ominaistaajuus ilman vaimennusta on verrannollinen osamäärän K/m neliöjuureen, jossa K on jäykkyys (jousivakio, dimensio N/m) ja m on massa, dimensio kg^6 .

Aalto yliopiston TKK:n tulosten⁷ mukaan ehjän, peräsinsarveen tukeutuvan peräsimen ominaistaajuus on 6-7 Hz ja ilman peräsinsarven tukea (alalaakerin pesä syöpynyt) olevan peräsimen 2-3 Hz. Käytetty menetelmä sopii lapioperäsimelle, joten se on tarkempi jälkimmäisessä tapauksessa. Suuremman ominaistaajuuden suhde pienempään on 3,5-2. Peräsimen mukana liikkuva vesimassa on otettu huomioon. Käyrien muodosta kuvassa 2 nähdään myös, että vaarallinen alue ulottuu resonanssitaajuuden molemmiin puolin, koska vahvistus pysyy suurempana kuin 1.

Kuvassa 3 on näytetty TKK:n laskema herätevoima. Fourier-analyysin⁸, kuva 4, mukaan herätevoima koostuu pääasiassa komponenteista 1 ja 2 kertaa lapataajuus (8 Hz ja 16 Hz). Keskiarvon (kuvan 4 monikerta nolla) lisäksi on pienempi 24 Hz sekä vähäisiä korkeamman taajuuden komponentteja. Pääosa kokonaisherätevoimasta koostuu lapataajuudella ja kaksinkertaisella lapataajuudella vaikuttavien voimien summasta. Muut komponentit johtunevat mallinnetusta vanavedestä.



Kuva 3. SILJA EUROPAn potkurien herätevoima TKK: laskelmien mukaan.

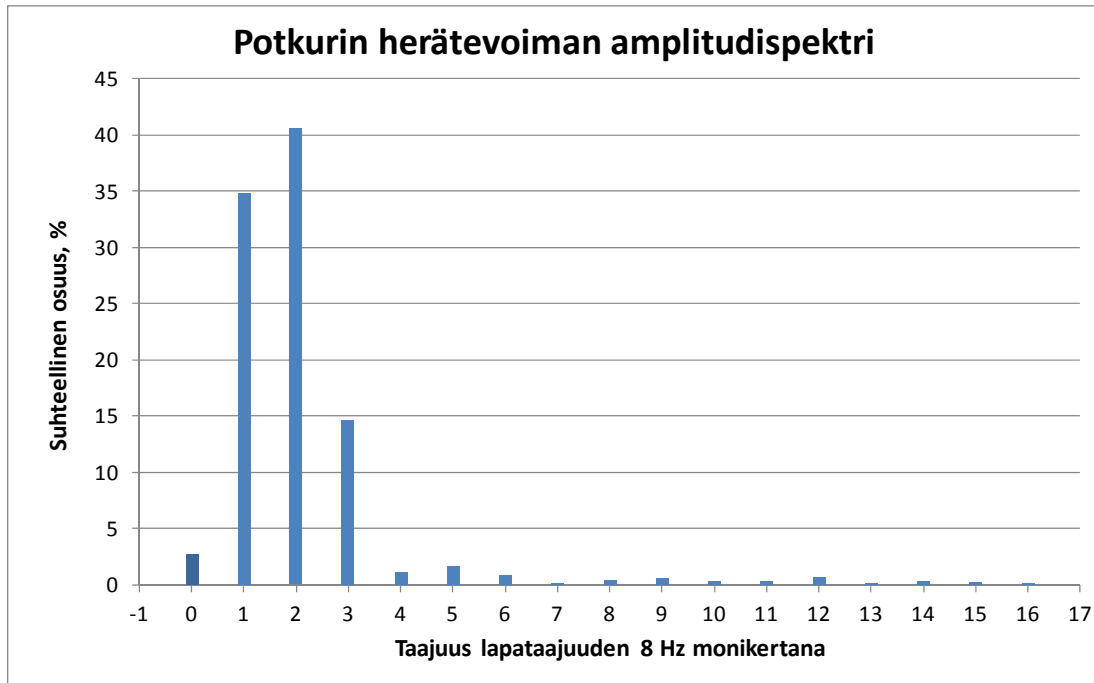
⁶ K on puolestaan kääntäen verrannollinen palkin (tässä lähinnä yhdistelmän peräsinakseli+peräsinsarvi) poikkipinnan neliömomenttiin ja suoraan verrannollinen palkin pituuden kuutioon. Kun alalaakerin liikevara on suuri, peräsinsarvi ei osallistu kuorman kantoon. Pituus ja myös tuentatapa muuttuu, koska liikevaran ollessa suuri, peräsinakseli tukeutuu ylälaakeriin. CBeam ohjelmalla laskettiin taipuma vakiokuormalla 600 kN alalaakerin kohdalla. Taipuma vaurioituneella peräsinakselilla on 14-15-kertainen. Kun otetaan huomioon, että ehjän peräsinakselin tapauksessa sarvi myös kiertyy, mikä lisää taipumaa noin 100 %, saadaan suhdeluvuksi noin 7,5. Massa kevenee sarven verran, noin 15 %. Näillä likimääräisillä oletuksilla saadaan ominaistaajuuksien suhteeksi noin 2,5. Lisäksi olisi otettava huomioon peräsinlavan mukana liikkuvan vesimassan muutos, jota ei ole yritetty arvioida.

⁷ Elias Penttinen ja Jerzy Matuziak, Silja Europan peräsimeen kohdistuvien voimien arvio, Aalto-yliopiston teknillinen korkeakoulu, Sovelletun mekaniikan laitos, D-109, lokakuu 2010.

⁸ Käytetty Excelin Fourier-muunnos-ohjelmaa 32 (2⁵) pisteellä.

Liite 4/4(5)

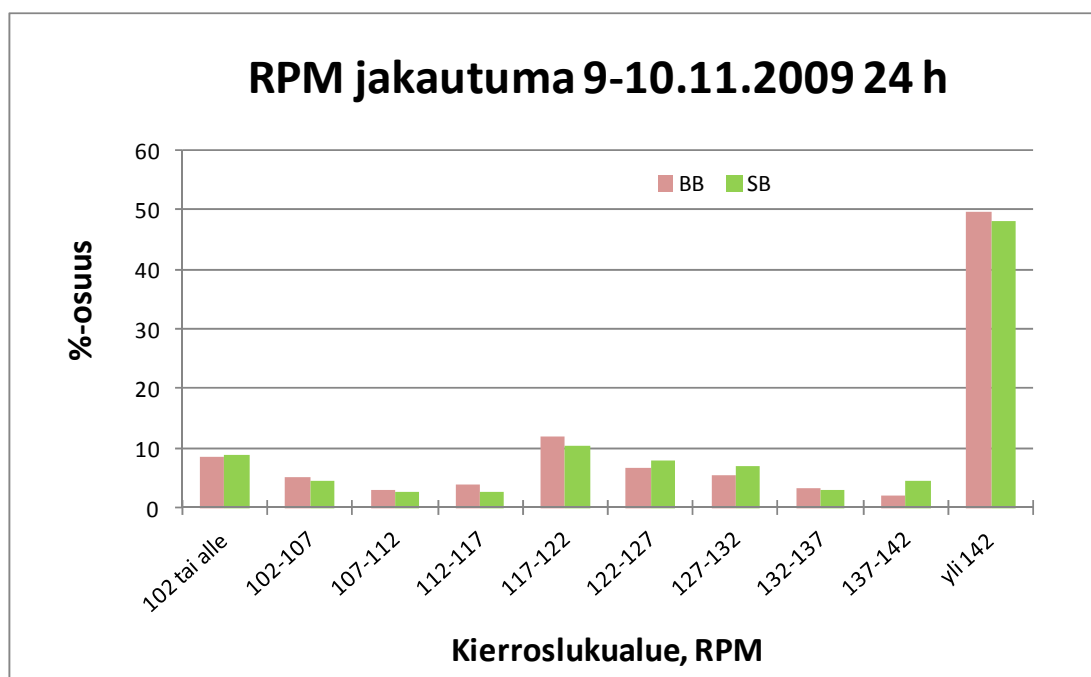
Heräte kaksinkertaisella lapataajuudella on voimakkain. Se synnyttää resonanssimahdollisuuden vaurioituneen peräsimen toisen värähtelymuodon ominaistaajuudella. Toisaalta sen amplitudi on vain noin 15-osa. Näin ollen myös vaurioituneen peräsimen värähtely voimistuu hieman.



Kuva 4. Potkurin lasketun herätevoiman amplitudispektri (Taajuuksien suhteelliset amplitudit).

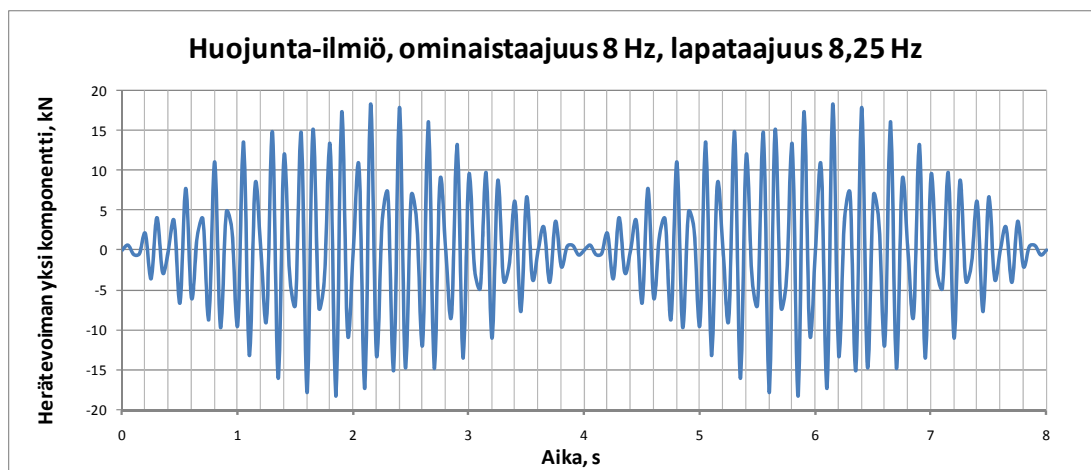
Aluksen nopeus on TKK:n laskelmissa 22,7 solmua (laskelmissa käytetty vanavesi lähes samanlaisen aluksen mallilla oli mitattu tällä nopeudella). Muilla nopeuksilla voimat voidaan muuttaa nopeuksien neliön suhteessa. Väsymislaskelmiin edellä esitetty voima ja momentti on skaalattu vastaamaan aluksen rekisteröityä nopeusjakautumaa (taulukko 5 ja kuva 53).

Kuvassa 5 on SILJA EUROPA:n potkurin kierroslukujen yleisyys. Noin 30 % ajasta kierrosluku näyttää olevan vaarallisella alueella 135–112,5 Hz.



Kuva 5. Potkurin kierroslukualueiden yleisyys. Vaarallisin alue on välillä 112,5–135 1/min ehjän peräsimen tapauksessa.

Käytännössä potkurin lapataajuus vaihtelee peräsimen resonanssitaajuuksien molemmien puolin. Tästä seuraa ns. huojunta (kuva 6), jossa poikittaisliikkeen amplitudi vuoroin voimistuu, vuoroin heikkenee⁹. Ilmiöllä on merkitystä vain, jos lapataajuus on hyvin lähellä ominaistaajuutta. SILJA EUOPAN tapauksessa tällä ilmiöllä ei katsota olevan merkitystä. Potkurit saattavat pyöriä eri kierrosluvulla, jolloin huojuntailmiö potkureiden kierrostaajuuksien välillä saattaa aiheuttaa resonanssin aluksen tai sen perän värähtelyn ominaistaajuuden kanssa¹⁰. Tätä seikka ei tutkimuksessa ole tarkasteltu.



Kuva 6 Huojunta-ilmiön periaate. Tässä sen jakson pituus on 4 s. Yhden herätevoiman komponentin suuruuden huojunta. Amplitudi pienenee voimakkaasti taajuuksien erotuksen kasvaessa, yllä on likimäärin pienennetty amplitudia noin 10-osaan.

Laskelmat ovat Excel- tiedostoissa ”Resonanssilaskelmat” ja ”Fourier-analyysi”.

⁹ Ilmiön jakso on $1/(|f-f_n|)$, jossa f_n on ominaistaajuus ja f on herätevoiman taajuus.

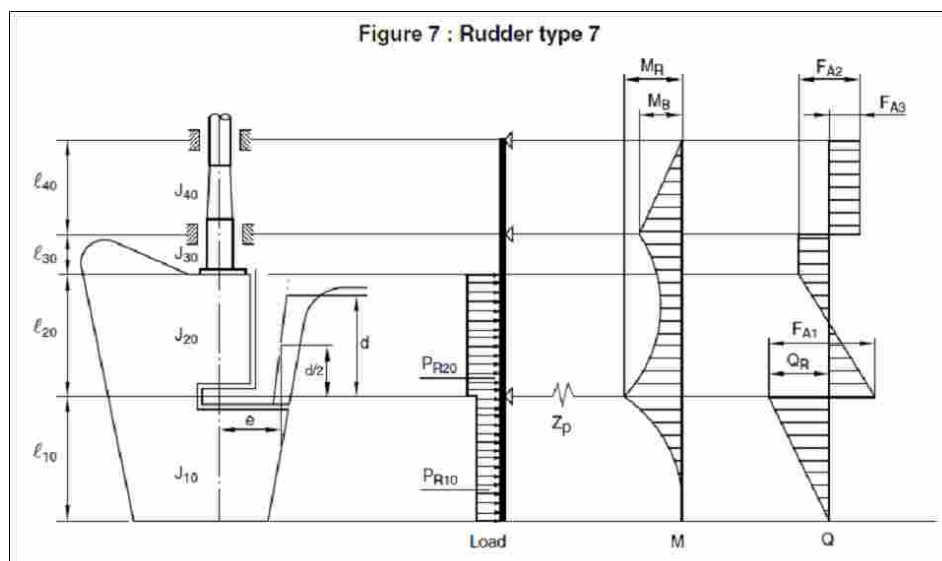
¹⁰ Esimerkiksi T.Stoye et al, Load Generation Strategy for Propeller Induced Pressure Fluctuations, 9th Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures, 2004, Lübeck-Travemünde, Germany

LIITE 5. PERÄSIMIEN STAATTISEN LUJUUDEN TARKASTELU

Tässä liitteessä esitetään staattisen lujuuden laskelmien tulokset. Ne perustuvat seuraaviin tiedostoihin: Excel ”Peräsimen luokituslaskelmia”, ”Uudet peräsinlaskut” sekä CBeam2000 kansion ”Peräsintukin lujuus” alikansiossa ”Lopulliset laskut” oleviin varsinaisiin lujuuslaskuihin.

1. Peräsinpalkki

SILJA EUROPAn peräsimen voidaan ajatella olevan pystysuora palkki, joka on tuettu peräsinkoneen, ylälaakerin ja alalaakerin kohdalla. Alalaakeria tukee peräsinsarvi, joka on joustava tuki, jousivakio Z_p . Bureau Veritasin säännöissä, josta kuva on, on peräsinakselin kiinnitys peräsinkoneeseen niveltuki-tyyppiä, mikä vastaa peräsinkoneen rakennetta.



Kuva 1. Peräsimen mittoja laskentaa varten ja kuormitus-, momentti- ja leikkausvoimapiirroksiset (Load, M ja Q). Huomaa joustava tuenta alalaakerin kohdalla (peräsinsarvi joustaa). Piirros on Bureau Veritasin nykyisistä säännöistä¹.

Tutkinnassa on käytetty nykysääntöjä ja lujuusopin kaavoja, koska kysymys ei ole mitoituksesta eikä vanhan mitoituksen oikeellisuuden arvioinnista. Mitoitusvoimaksi tulee nykysääntöjen mukaan noin 1700 kN.

BV:n luokituslaskelmat 1991–1993 oli tehty vuoden 1987 säännöillä. Silloiset kaavat perustuivat peräsinpalkkiin, jota kuormittivat pistevoimat peräsimen ylä- ja alaosassa. Palkki oli jäykästi kiinnitetty ylälaakerin alareunaan ja sarvi oli joustamaton tuki. Mitoitusvoimaksi oli saatu 1412 kN. Luokituslaitoksen tarkistuslaskelmien mukaan mitoitus oli oikein². Mitoitusperusteet eroavat niin paljon nykyisistä, että ei ole ollut syytä ryhtyä niitä vertailemaan.

Eri luokituslaitosten mitoituskaavat antavat hyvin samankaltaiset tulokset, taulukko 1. Luokituslaitosten laskentaperusteissa oletetaan, että laakereiden välykset ovat vaati-

¹ Säännöt vuodelta 2009, App.1, Criteria for Direct Calculation of Rudder Loads.

² Bureau Veritasin Suomen konttorin välittämä sähköposti 12.11.2010.

musten mukaiset, SILJA EUROPAn tapauksessa 1,4-4(5) mm. Erityisen tärkeää on pitää alalaakerin välykset oikeina. Tällöin peräsinsarvi ottaa vastaan pääosan peräsimeen kohdistuvasta voimasta, eikä peräsinakseli kuormitu suunniteltua enempää. SB-peräsinakselin katkeaminen johtui korroosion aiheuttamasta suuresta nettoliikevarasta alalaakerissa. Tämän vuoksi oleellinen osa tutkintaa on ollut selvittää alalaakerin nettoliikevaran vaikutus peräsinakselin jännitykseen. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että sarviperäsimen sarvi on osassa laskentatapauksia poistettu tai alkaa kantaa kuormaa vasta suurilla nettoliikevaroilla. Sarviperäsin on siten toiminut ajoittain lapioperäsimenä, mutta sarviperäsimeksi mitoitettuna.

Tästä on ollut seurauksena, että peräsinkoneeseen, ylälaakeriin ja alalaakeriin kohdistuneet voimat ovat olleet aivan muuta kuin mitoituksessa oli suunniteltu.

2. Luokituslaitosten mitoituserusteet

Tutkinnassa käytettiin aluksen luokittaneen Bureau Veritasin (BV) sekä Det Norske Veritasin (DNV), Germanischer Lloydin (GL), American Bureau of Shippingin (ABS) ja Lloyds Registerin (LR) peräsimen uusimpia mitoituskaavoja. Kaavojen vaihtoehtona on laskenta lujuusopin menetelmillä. Kaavojen antamat tulokset ovat taulukossa 1: peräsimen laskentakuorma, peräsinakselin ylälaakerin taivutusmomentti, vääntömomentti, jännitykset sekä tasainen kuorma peräsimen ylä- ja alaosassa.

Peräsinkoneen nimellinen maksimimomentti on 800 kNm, mutta luokituslaitosten mitoituskaavoista saadaan mitoitusmomentiksi noin 600 kNm. Kaikissa laskelmissa on käytetty mitoitusnopeutena 22,5 kn. Jääluokan vaatimukset vaikuttavat vain peräsimen lelyn paksuuteen, joka on aluksen suunnittelussa luonnollisesti otettu huomioon.

Taulukko 1. Eri luokituslaitosten mitoitusarvoja SILJA EUROPALLE.

Luokka	BV	DNV	ABS	GL	LR
Peräsinvoima, kN	1696	1696	1696	1696	1696
Vääntömomentti, laskettu M_{TR} , kNm	376	382^3			
Vääntömomentti, minimi, M_{TRMIN}	611	601		577	
P_{R20} , kN/m (kuva 1)	280	254		280	
P_{R10} , kN/m (kuva 1)	293	308		292	
Taivutusjännitys σ , N/mm ²	61,3	61,3			
Vääntöjännitys τ , N/mm ²	47,9	48,2		46,3	
Yhdistetty jännitys ⁴ σ_E , N/mm ²	103,2	103,6			

³ Laskettu DNV:n Classification Notes 32.1 1984 mukaan.

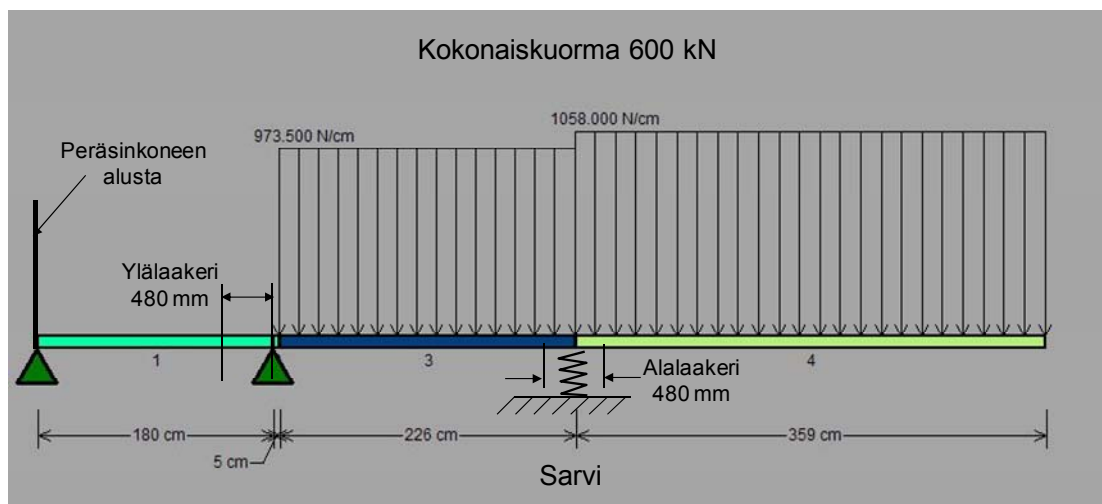
⁴ Sallittu tehollinen jännitys (BV), $\sigma_E = (\sigma_B^2 + 3\tau_T^2)^{1/2}$ on $118/k_1$ N/mm², jossa k_1 on aineskerroin. Aineskerroin määräytyy tietyllä tavalla peräsinakselin taotun teräksen myötörajan ja arvon 235 N/mm² suhteesta. SILJA EUROPAn akselin myötöraja on luokituslaskelmissa 270 N/mm² ja aineskerroin siten 0,90, joten sallittu yhdistetty jännitys on 131 N/mm². Taivutuksesta johtuva leikkausjännitys on normaalisti hyvin pieni. Lisäksi se on maksimissaan poikkileikkauksen eri kohdassa kuin vääntö- ja taivutusjännitys.

3. Tutkinnassa tehty staattisen lujuuden laskelmat

Alalaakerin akselin siirtymä on alalaakerin puolivälyksen ja mahdollisen pronssiholkin ja valuteräksen välisen syöpmän mahdollistaman liikevaran summa. Peräsinakselin jännitysten kannalta katsoen siirtymät sivusuunnassa ovat merkittävimmät, koska peräsinakulmat ovat melko pieniä. Siirtymä voi olla erilainen vasemmalle ja oikealle, jos syöpmät eri puolilla ovat erisuuruiset ja/tai akseli ei ole aivan keskellä.

Siirtymän kasvun vaikutusta peräsinakselin taivutusjännitykseen on tutkittu likimääräisesti⁵. Kuvassa 2 on laskelmissa käytetty palkkimalli, jota on muunneltu eri kuormitustilanteissa. Palkki on tutkinnassa piirtämisteknistä syistä asetettu vaakasuuntaan. Peräsinakselin kriittinen kohta on ylälaakerin alaosa, jossa jännitys on suurin.

Peräsinlavan ylä- ja alaosan kuormitus metriä kohti valitaan tarkasteltavan kokonaiskuormituksen, siis taivuttavan voiman mukaan. Kuormitusten suhde peräsinlavan ylä- ja alaosaan vastaa Bureau Veritasin sääntöjä. Kuvassa olevilla arvoilla voima on 600 kN.



Kuva 2 Peräsinlavan tarkastelussa käytetty palkkimalli. Palkin eri osat on näytetty eri väreillä, koska eri osien neliömomentti ja taivutusvastus on erilainen. Kiinnitys on niveltuki-tyyppiä vastaten luokituslaitoksen oletusta. Todellisuudessa kiinnitys on hieman jäykempi.

Väli 1 on peräsinakselin laakeriväli, väli 2 on ylälaakerin alareunasta peräsinlavan yläosaan, väli 3 peräsinlavan yläosa sekä väli 4 sen alaosa. Väli 3 ja 4 taipuvat hyvin vähän, ne pääasiassa kallistuvat akselin taipuessa. Sarvi on välissä 3. Sarven jousivakio koostuu taipumasta ja kiertymästä. Seuraavassa taulukossa 2 on näytetty laskennassa käytetyt arvot.

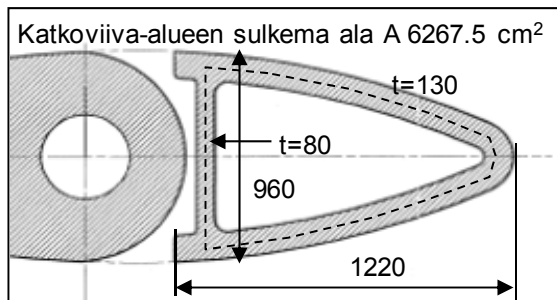
⁵ CBeam 2000 –ohjelma, <http://www.seaoc.org/software.html>.

Liite 5/4(9)

Taulukko 2. Laskelmissa käytettyjä lukuja.

	Neliömomentti, cm^4	Taivutusvastus, cm^3	Vääntö-neliömomentti, cm^4
Akseli	124646	6232	250000
Sarvi (d/2)	2600000	54000	5400000
Yläosa (3)	1720000	57500	
Alaosa (4)	2500000	62300	

Jousivakio on BV:n kaavoista laskettuna $5,235 \times 10^8 \text{ N/m}$, kuvan 3 mitoilla sarven kohdassa d/2.



Kuva 3. Sarven mitat sen puolikorkeudella (d/2).

Laskelmia on tehty seuraavissa kuormitustilanteissa.

- Määritettiin ylälaakerin vällyksen vaikutus taipumaan alalaakerin kohdalla, kuva 4.
- Alalaakerin liikevaran ollessa suuri (vastaa sarven poistoa) tutkittiin peräsinakselin taipumaa ja jännitystä peräsinvoiman funktiona, kuva 5.
- Kolmella peräsinvoimalla (600 kN, 1000 kN ja 1700 kN) laskettiin peräsinkoneeseen, ylälaakeriin ja alalaakeriin vaikuttavat peräsinvoimat alalaakerin nettoliikevaran funktiona, kun ylälaakerin vällys on 2 mm, kuva 6.
- Ylälaakerin ja alalaakerin tunkkaustilanteet laakerivällysten mittauksessa, tulokset esitetty itse raportissa, kohdassa 1.6.1.

4. Ylälaakerin vällyksen vaikutus taipumaan alalaakerissa

Alalaakerin tukiessa ilman siirtymää määritettiin palkin taipumaviivan muoto kolmella peräsinvoimalla: 600 kN, 1000 kN ja 1700 kN. Sitten taipumaviivat käännettiin kunnes ne osuivat ylälaakeriin. Näin saatiin selville, mihin saakka palkki voi taipua alalaakerin kohdalla ennen kuin ylälaakeri alkaa kannattaa, kuva 4. Saadaan selville millä taipumalla laskelmissa on tuenta muutettava.

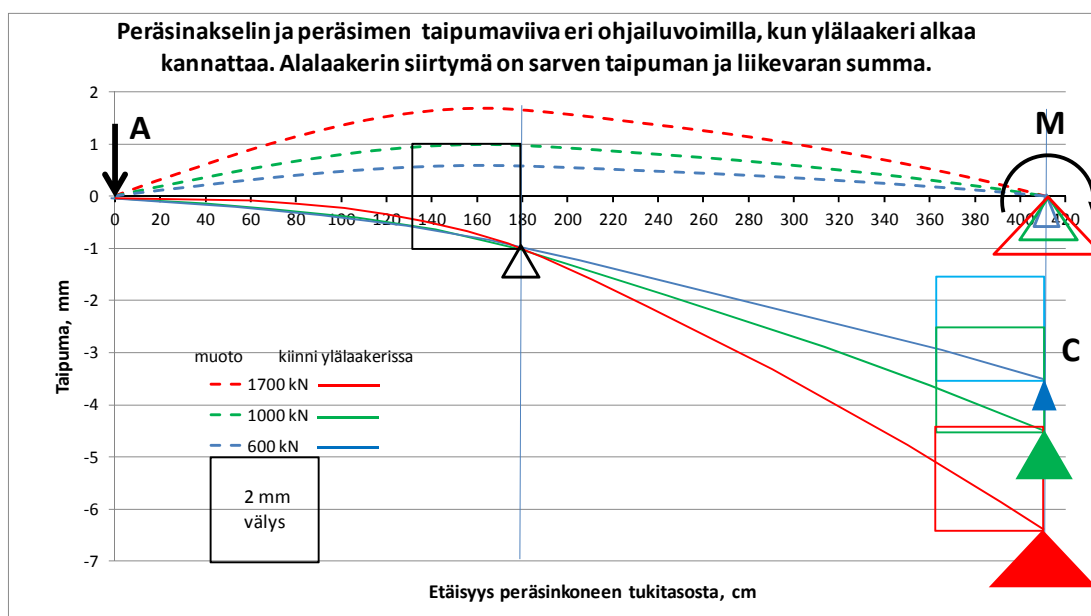
Kuvassa ylälaakerin vällys on 2 mm. Vuoden 2009 telakoinnissa todettiin, että ylälaakerin vällys oli kasvanut noin 0,6 mm, taulukko 3. Jos arvioidaan, että tämä 0,3 mm liikevaran kasvu yhdessä laakerin kiinnityksen pienen jouston kanssa olisi lisännyt ylälaakerissa siirtymän 1,5 millimetriin, palkin taipuma alalaakerin kohdalla olisi 1-2 mm enemmän.

Taulukko 3. Ylälaakerin mitat peräsimen paikalleen asennuksen jälkeen 2009. Kirjaimella H on merkitty mitat poikittain ja kirjaimella V pitkittäin. Kirjain d tarkoittaa peräsinakselin ulkohalkaisijaa, kun siinä on ruostumaton teräsholkki päällä. Kirjain D tarkoittaa pronssiholkin sisähalkaisijaa.

SB				BB			
Rudder stock pintle - NEW Ø d ₁		Bush of the ruder stock Ø D ₁		Rudder stock pintle - NEW Ø d ₁		Bush of the ruder stock Ø D ₁	
Ø V	Ø H	Ø V	Ø H	Ø V	Ø H	Ø V	Ø H
429,99	429,98	431,66	431,67	429,93	429,93	431,68	431,68
98	99	66	72	93	92	67	73
98	98	76	90	92	92	72	88
97	97	93	432,35	93	93	83	432,30

Alkuperäisessä piirustuksessa esitetyt ylälaakerin mitat ovat: peräsinakseli, jonka päällä ruostumaton teräsholkki, halkaisija 430 mm ja pronssiholkin sisähalkaisija 431,8 mm. Valmistajatelakalla syyskuussa 1992 mitaamat ylälaakerin välykset olivat BB-puolella 1,80–1,87 mm ja SB-puolella 1,65–1,73 mm. Vuoden 2009 telakoinnissa välyksiksi tulivat taulukon 3 mukaan BB-puolella 1,75–2,37 mm ja SB-puolella 1,67–2,38 mm.

Kuvassa 4 on näytetty taipumaviivan muoto ja kiinni ylälaakeriin käännetty taipumaviivat. Kuvan tilanteessa sarvi kantaa maksimaalisesti tukivoimalla C. Peräsinkoneeseen kohdistuu tukivoima A



Kuva 4. Taipumaviivan arviointi kolmella peräsinvoimalla välillä peräsinkone alalaakeri. Momentti M johtuu siitä, että peräsimen alaosan osuus peräsinvoimakuormasta, jota ei ole näytetty taivuttaa peräsinakseli-peräsinperäsinsarvi - palkkia. Todellisuudessa kuvan tilanne on käännettävä 90 astetta myötäpäivään.

Liite 5/6(9)

Taulukossa 4 on näytetty kuvan perusteella tehty arvio tarvittavasta nettoliikevarasta ja millaisista taipumaosuuksista se muodostuu eri peräsinvoimilla ennen kuin ylälaakeri alkaa myös kannattaa. Kokonaistaipuma saadaan kuvasta, sarven jousto saadaan jousivakiosta ja näiden erotuksena lasketaan tarvittava nettoliikevara. Taulukossa on myös alalaakeriin ja peräsinkoneeseen kohdistuva voima perustuen sarven jousivakioon ennen kuin ylälaakeri alkaa kannattaa (ylälaakeriin kohdistuva voima on nolla).

Taulukko 4. Nettoliikevara ja taipumat sekä alalaakeriin vaikuttava voima tilanteessa, jossa peräsinakseli on taipunut kiinni ylälaakeriin.

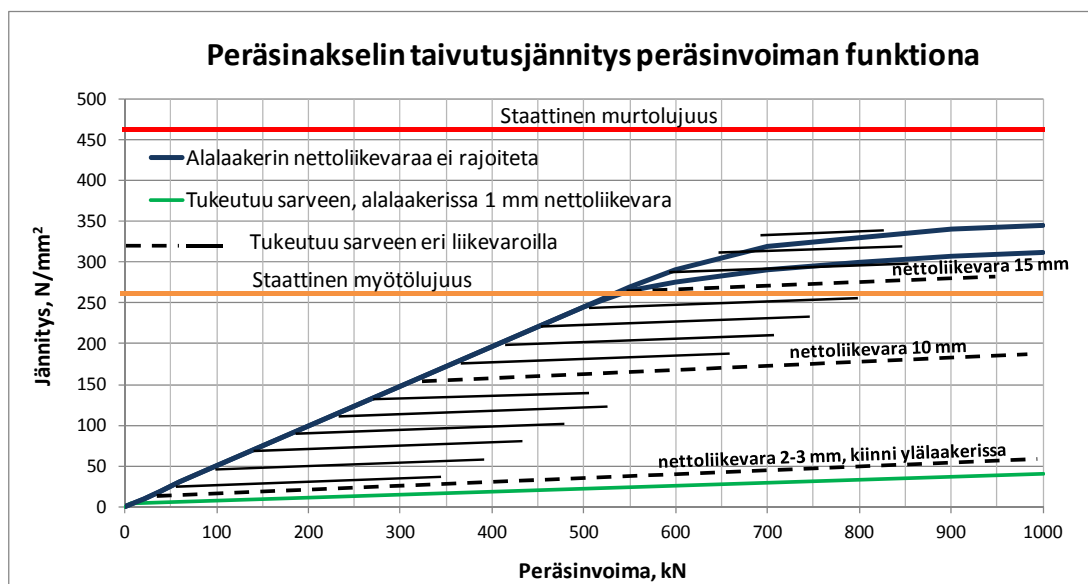
Peräsinvoima, kN	Tarvittava nettoliikevara mm	Sarven taipuma, mm	Kokonais- taipuma, mm	Voima A peräsinkoneessa, kN	Voima C alalaakerissa, kN
600 kN	2,1	1,4	3,5	-115	715
1000 kN	2,3	2,3	4,6	-191	1191
1700 kN	2,5	3,9	6,4	-325	2025

5. Alalaakerin nettoliikevaran vaikutus peräsinakselin jännityksiin

Kuvassa 5 on näytetty peräsinakselin taivutusjännityksen riippuvuus taivuttavasta voimasta (peräsinvoima). Välysten pysyessä sallituissa rajoissa, sarvi kantaa pääosan kuormasta ja taipuma plus kiertymä alalaakerissa on 1,4 mm 600 kN peräsinvoimalla, vihreä suora. Peräsinakselin taivutusjännitys on tuolloin noin 25 N/mm². Noin 50 kN voimalla peräsinakseli on taipunut (ilman sarven kannatusta) ylälaakerin alaosan kohdalla välyksen salliman määrän (1 mm). Tällöin taipuma alalaakerissa on 3,5 mm, jos alalaakerin välystä ei rajoiteta.

Kuvaan on merkitty myös millimetrin taipumavälein kohta, jossa sarvi alkaa kannattaa. Jännitys kasvaa voiman kasvaessa aluksi jyrkemmin ja sarven tullessa mukaan huomattavasti hitaammin. Akselin myötörajan ylittyessä, tilanne muodostuu epätarkaksi, minkä vuoksi kuvassa on kaksi rajakäyrää⁶.

⁶ Peräsinä taivuttavien voimien muutoksista syntyvien peräsinakselin maksimijännitysten kesto aika on niin lyhyt, että jännitys voi ylittää standardin mukaisessa vetokokeessa saadun myötölujuuden.



Kuva 5. *Ehjän peräsinakselin taivutusjännityksen riippuvuus peräsinvoimista erisuuruisilla 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.*

Ilman sarven kannatusta taivutusjännitys peräsinakselissa kasvaa noin 50 N/mm^2 peräsinvoiman 100 kN kasvua kohti. Sarven ollessa mukana kannattamassa, vastaava jännityksen kasvu on vain noin 5 N/mm^2 .

Yli 14–15 mm nettoliikevaralla akseli myötää, jos voima ylittää noin 550 kN.

Ylälaakerin kohdalla peräsinakseliin vaikuttaa myös leikkausvoima, jonka synnyttämä jännitys on vähäinen silloin kun alalaakeri on kunnossa.

Jännitykset on tarkistettava muutamasta kohdasta akselin poikkileikkauksessa. *Taivutusjännitys* on suurimmillaan akselin pinnalla taipuman (puristuman) kohdalla (reunajännitykset). Väännöstä johtuva leikkausjännitys (lyhyesti *vääntöjännitys*) on suurimmillaan akselin pinnalla, ympäri koko akselin. Sen vuoksi on taivutus- ja vääntöjännitykset yhdistettävä. Leikkausvoiman synnyttämä leikkausjännitys (lyhyesti *leikkausjännitys*) on maksimissaan akselin taivutuskeskiön kohdalla, jossa myös vääntöjännitys on suurimmillaan, mutta taivutusjännitys on nolla. Tässä kohdassa on yhdistetty jännitys muodostettava leikkaus- ja vääntöjännityksestä⁷. Käytännössä suurillakin alalaakerin liikevaroilla määräävä on väännöstä ja taivutuksesta muodostuva yhdistetty jännitys.

Puristusliitoksissa syntyy puristusjännityksiä erityisesti kartion alueella. Jännitystila on sylinterimäinen vakiojännityksen suuntautuessa kohti kartion akselia⁸. Jännitysjakautu-

⁷ Esimerkiksi harvinaisen suurella 1000 kN peräsinvoimalla, alalaakerin liikevaran ollessa suuri, saattaa ylälaakeriin vaikuttaa noin 1500 kN leikkausvoima, jonka synnyttämä leikkausjännitys on maksimissaan noin 22 N/mm^2 , kun peräsinakselissa on reikä Jastram-rullan putkia varten. Kun tähän lisätään kohtuullinen vääntöjännitys 25 N/mm^2 , saadaan yhteensä 47 N/mm^2 . Kun se kerrotaan luvulla neliöjuuri kolme, saadaan vertailujännitys 81 N/mm^2 . Tämä on selvästi alle mitoitusjännityksen, noin 130 N/mm^2 , vaikka tilanne on mitoitusoletuksen ulkopuolella.

⁸ Liitoksen puristuspaineeksi ja siten peräsinakselia kartion alueella puristavaksi jännitykseksi tulee $70\text{--}100 \text{ N/mm}^2$, kun peräsintä työnnetään ylöspäin 4,7 mm. (Perustuu asennustietoihin ja BV:n sallimiin paineisiin).

ma muuttuu kartion päättyessä akselin suoran osan alkaessa. Suora osa on ylälaakerin alueella päällystetty ruostumattomalla teräsholkilla, joka on asennettu kutistusliitoksella, jonka synnyttämä puristusjännitys on huomattavasti pienempi⁹. Kriittisessä kohdassa puristusjännityksen lisäävä vaikutus keskijännitykseen on suhteellisesti suurimmillaan pienillä taivutusjännityksillä.

Jännitysten yhdistäminen tehdään tämän liitteen alaviitteen 4 kaavalla (jossa neliöjuuren alla on mukana myös puristusjännitys) ja saadaan tulokseksi ns. yhdistetty jännitys eli vertailujännitys. Kriittisen poikkileikkauksen jännitysjakautumaa ei ole tarkemmin arvioitu. Tämän johdosta väsymislaskelmat on tehty sekä ilman puristusjännitystä, että sen kanssa.

Vääntöjännitys riippuu 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 kohti¹⁰.

6. Peräsimen toiminta mitoitusarvojen ulkopuolella

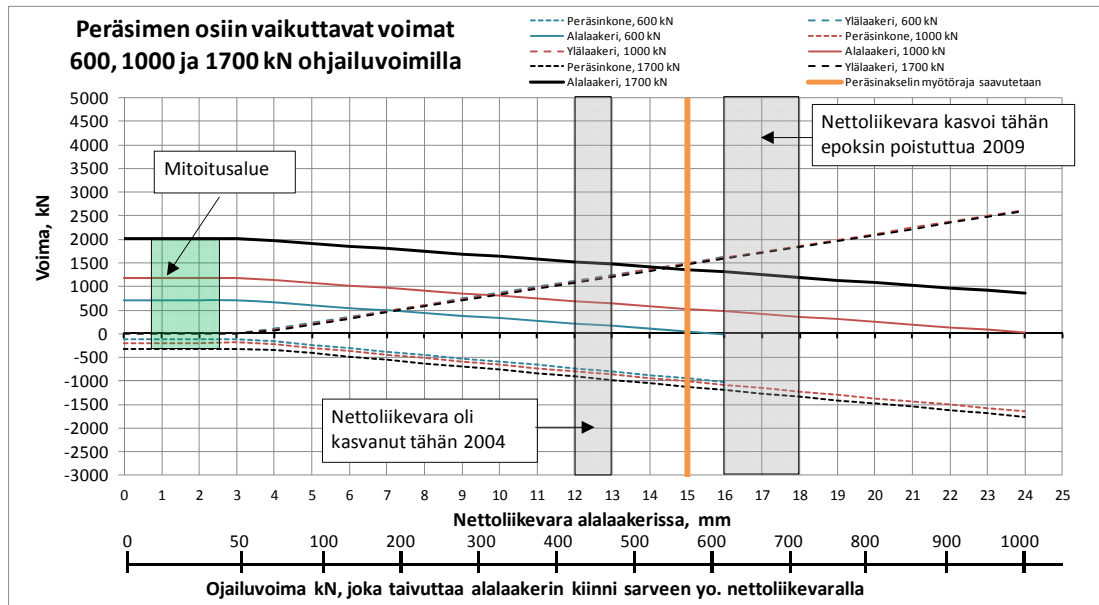
Kuvassa 6 on esitetty tulokset laskelmista, joissa peräsin toimii huomattavasti kuvaan merkityn mitoitusalueen ulkopuolella, johtuen alalaakerin suuresta nettoliikevarasta. SILJA EUROPAn tapauksessa ensimmäisessä vaiheessa alalaakerin liikevaran kasvaessa ylälaakeriin kohdistuva leikkausvoima kasvaa ja samoin peräsinakselin leikkausjännitys. Leikkausvoiman suuruus on sama kuin peräsinakseliin kohdistuva tukivoima. Ylälaakeriin ei kohdistu lainkaan voimaa niin kauan kun sarvi on kunnossa, koska peräsinakseli ei taivu siihen kiinni.

Suurilla alalaakerin nettoliikevaroilla ylälaakeriin on saattanut kohdistua huomattavan suuri voima. Tästä kertoo se, että ylälaakerin holkki oli kulunut alhaalla enemmän kuin ylhäällä, taulukko 3. SB-holkki oli alhaalta ohentunut sivusuunnassa 0,34 mm ja BB-holkki 0,31 mm. Nämä holkit asennettiin kuitenkin takaisin, mutta varustamo tilasi uudet varalle.

Käytännössä suurillakin alalaakerin liikevaroilla määräävänä on väännöstä ja taivutuksesta muodostuva yhdistetty jännitys. Kohdassa 1.9 vääntöjännitys on otettu likimäärin huomioon väsymistarkastelussa.

⁹ Sallittu laakeripaine on 7 N/mm² (BV:n säännöt, Part B, ch 10, sec 1, Table 6). Puristusaine on tätä suurempi, jotta päällyste ei pyörisi.

¹⁰ Vääntöjännitys peräsinakselissa vaihtelee peräsinakselin kohdistuvan virtauksen ja peräsimen kääntönopeuden mukaan. Lisäksi jäissä ohjailtaessa voi syntyä suuria vääntömomentteja. Vääntömomentti on SILJA EUROPAn peräsimellä kuljettaessa eteenpäin noin 0,4 x peräsinvoima (peräsinakselin paineakseli on noin 0,4m peräsinakselin keskiöstä perään päin). Luokitellun laitoksen maksimivääntömomentti mitoitusarvo varten on noin 600 kNm ja sitä vastaava vääntöjännitys 47 N/mm².



Kuva 6. Peräsimen laakerivoimat nettoliikevaran funktiona kolmella peräsinvoimalla. Kuvassa ei ole otettu huomioon tilanteen muutosta akselin myötörajan ylityksen jälkeen.

Alalaakeriin vaikuttava voima on normaalivälyksillä noin 1,2 kertaa peräsinvoima ja sen kuluminen on voimakkainta. Tällainen oli tilanne valuepoksin asennuksen jälkeen. Kun nettoliikevara kasvaa, peräsinsarvi alkaa kantaa vasta taipuman ollessa riittävän suuri. Vastaavasti alalaakeriin kohdistuva peräsinvoima pienenee.

LIITE 6. PERÄSINAKSELIEN VÄSYMISKESTÄVYYDEN TARKASTELU

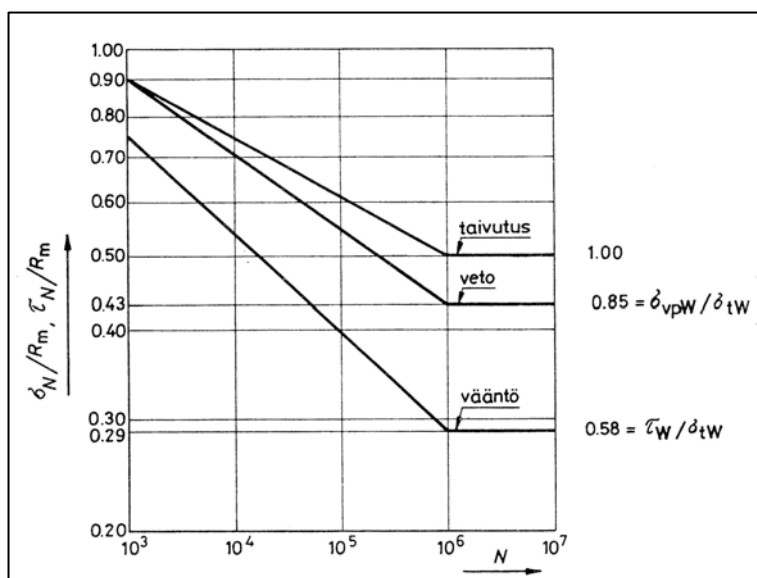
Laskelmien tiedostot ovat: Excel ”SN-käyrä”, ”Väsymislaskelmat uudet”. ”VDRyhteenve-to taulukot ja laskelmat” sisältää kaikkien päivien käsitellyt ja analysoidut VDR-tiedot, joihin perustuvat mm. nopeuksien, peräsinkulmien ja voimien tilastot.

1. METALLIN VÄSYMINEEN, WÖHLER-KÄYRÄ YLEENSÄ

Kun rakenteeseen kohdistuu suuri lukumäärä kuormituksia, joiden suuruus on vaihtuva, on rakennetta tutkittava staattisen lujuuden lisäksi myös väsymislujuuden näkökulmasta. Yksinkertaisimmillaan kuormitus voi vaihdella sinimuotoisesti, jolloin voimalla on tietty amplitudi ja tietty jakso. Väsymiskestävyydellä tarkoitetaan tässä tapauksessa kuinka monta tietyn suuruista kuormitusvaihtoa (taivutus, veto/puristus, vääntö tai niiden yhdis-telmä) rakenne kestää ennen rikkoontumista.

Yleensä tarkastellaan kuormituksen aiheuttamia jännityksiä, jolloin väsymiskestävyys il-moitetaan Wöhler-käyrän (SN-käyrän) avulla ja kyse on jännitysväsymisestä. Käyrän ar-vot ilmoitetaan usein kuormitusvaihdolle tuhat -miljardi. Alle tuhannella kuormitusvaih-dolla jännitykset nousevat yleensä niin suuriksi, että rakenne saattaa hetkellisesti myö-tää ja palautua (hystereesi), ja kyseessä on venymäväsyminen.

Kuvassa 1 on periaatteellinen teräksen Wöhler-käyrä¹, jonka pohjalta tässä tutkinnassa käytetyt käyrät on muokattu. Kun asteikot ovat logaritmiset, käyrä muodostuu suorista osista. Väsytykskoikeissa kuormitus on sinimuotoinen. Väsytykskoikeet ovat huomattavasti enemmän aikaa vieviä kuin vetokokeet. Sen vuoksi melko harvoin on käytettävissä ti-lannetta vastaava Wöhler-käyrä.



Kuva 1. Sallitut väsymislujuudet arvioituina likimääräisesti murtolujuudesta kuormi-tuskertojen funktiona. Asteikot ovat logaritmiset. R_m on aineen murtolujuus, alaindeksi w ilmoittaa ikuisen keston rajan.

¹ Esim. Lujuusopin perusteet, Pressus Oy, s. 428. Vastaa tuloksia ilmassa ja keskijännityksellä nolla.

2. PERÄSINAKSELIN VÄSYMISKESTÄVYYS-KÄYTETYT WÖHLER-KÄYRÄT

Vääntöjännityksen vaikutus on tämän tapauksen tavanomaista suuremmilla taivuttavilla keski- ja vaihtojännityksillä niin pieni, että riittää tarkastella vain väsyttäviä taivutusjännityksiä, joihin lisätään likimääräisesti vaihtuvan vääntöjännityksen osuus. SILJA EURO-PAn luokitusdokumenttien mukaan peräsinakselin materiaalin murtolujuus oli 470^2 N/mm². Teoreettinen taivutusväsymislujuus teräksellä on noin puolet aineen murtolujuudesta, ts. tässä tapauksessa 235 N/mm², kun kuormitusvaihtelujen lukumäärä on miljoona tai sitä suurempi. Materiaalin (C22) ominaisuuksista johtuen akselin todelliset lujuusarvot saattoivat olla pienemmät tai suuremmat.

Väsymislujuuskokeet tehdään pienillä, tietyt mittasuhteet ja kiillotetut pinnat omaavilla koesauvoilla standardoidun koemenettelyn mukaisesti. Sen vuoksi yllä esitettyjä arvoja on käytännössä pienennettävä todellisen kappaleen koon ja pinnan laadun perusteella. SILJA EURO-PAn peräsinakselille on käytettävä suuremman koon (halkaisijan) ja huomion pinnanlaadun (profiilin huipun ja laakson välinen etäisyys R_t noin 10 μm^3) huomioon ottavaa kerrointa⁴ 0,61 (=0,65x0,94) mikä johtaa taivutusväsymislujuuteen 143 N/mm².

Mikäli rasituksen alaisessa kappaleessa on lovi, säröjä tai vastaavaa, jännitykset niissä kohdin kasvavat. Tämä otetaan huomioon *loven muotoluvun* avulla. Muotoluvun sijaan on kuitenkin tapana käyttää *loven vaikutuslukua*. Tässä tapauksessa on valittu jälkimmäinen tapa. Lovi tai särö pienentää siis edellä laskettuja väsymislujuuden arvoja entisestään. Loven vaikutus on merkittävämpi taivutuksen kuin väännön suhteen.

Loven vaikutuksen arviointi perustuu akselin paksuuden muutoskohdassa halkaisijoiden suhteeseen ja olakkeen pyöristyssäteeseen. Tässä tapauksessa olake oli terävä (hyvin pieni pyöristyssäde, jonka arviointi on epätarkka) ja akselin paksuuksien suhde on yksi. Loven vaikutusluvuksi saadaan noin 1,74⁵ ja taivutusväsymislujuudeksi 82 N/mm². Loven vaikutuksen tarkempi arviointi vaatisi FEM-laskentaa. Jos oletetaan BB-peräsinakselissa olleen hyvin pyöristetyn loven, saadaan väsymislujuudeksi taivutuksessa noin 143 N/mm².

Nämä tulokset pätevät kuormitusvaihtojen ollessa miljoona. Suuremmilla vaihtoluvuilla on käyriä tapana kallistaa alaspäin. Pienemmillä vaihtoluvuilla pienennetään korjausten vaikutusta. Tässä tutkinnassa on menetelty seuraavasti. *Pinnan korjauskerroin* on muutoin 0,94, mutta se pienenee alkaen tuhannesta vaihtelusta kohti arvoa 1, kun vaihtoja ei ole. *Koon vaikutus kerroin* on 0,65, kun vaihtojen määrä on miljoona. Vaihtojen lisääntyessä kerroin pienenee arvoon 0,62 kun vaihtoja on miljardi. Vaihtojen vähetessä kerroin lähestyy arvoa 1, kun vaihtoja ei ole. *Loven vaikutusluku* on 1,736 kun vaihtoja on miljoona. Miljardin vaihdon kohdalla se on 2,15 ja kun vaihtoja ei ole, arvo on 1. Näin on saatu kuvassa 2 esitetyt akselien Wöhler-käyrät.

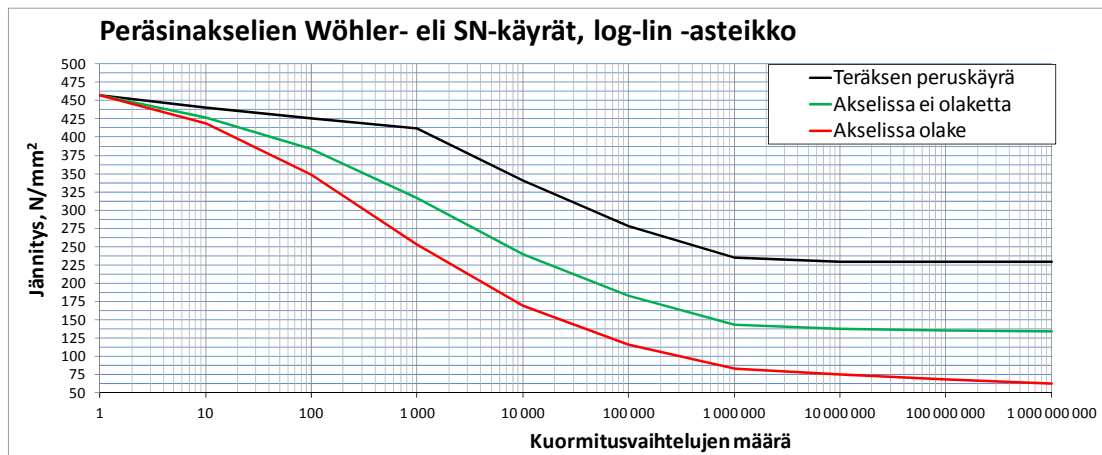
Käyrät vastaavat tapausta, jossa keskijännitys on nolla. Keskijännityksen kasvaessa käyrien arvot hieman heikkenevät. Tässä tutkinnassa ei tätä ole yritetty ottaa huomioon.

² VTT:n vetokokeissa murtolujuudeksi tuli 458 N/mm².

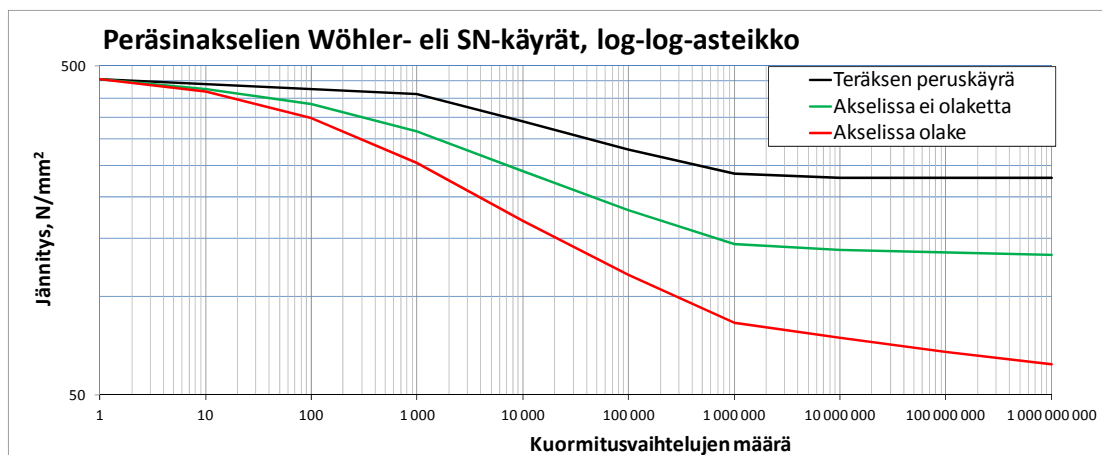
³ Mitattu VTT:n hieen suurennoskuvasta, jossa työstöpinta on näkyvissä.

⁴ FITNET FFS Procedure by Working Groups of the FITNET Thematic Network, Revision MK 8, Section 7-Fatigue Module, kuvat 7.14 ja 7.15.

⁵ FITNET, kuvat 7.11 ja 7.12. Terävän olakkeen säteeksi on arvioitu 0,05 mm, akselin osien paksuuseroksi 0,3 mm.



Kuva 2a. Peräsinakselien arvioidut väsymislujuuskäyrät, Wöhler- eli SN-käyrät. Pystyasteikko on lineaarinen, vaaka-asteikko logaritminen.



Kuva 2b. Peräsinakselien arvioidut väsymislujuuskäyrät, Wöhler- eli SN-käyrät. Molemmat asteikot ovat logaritmiset.

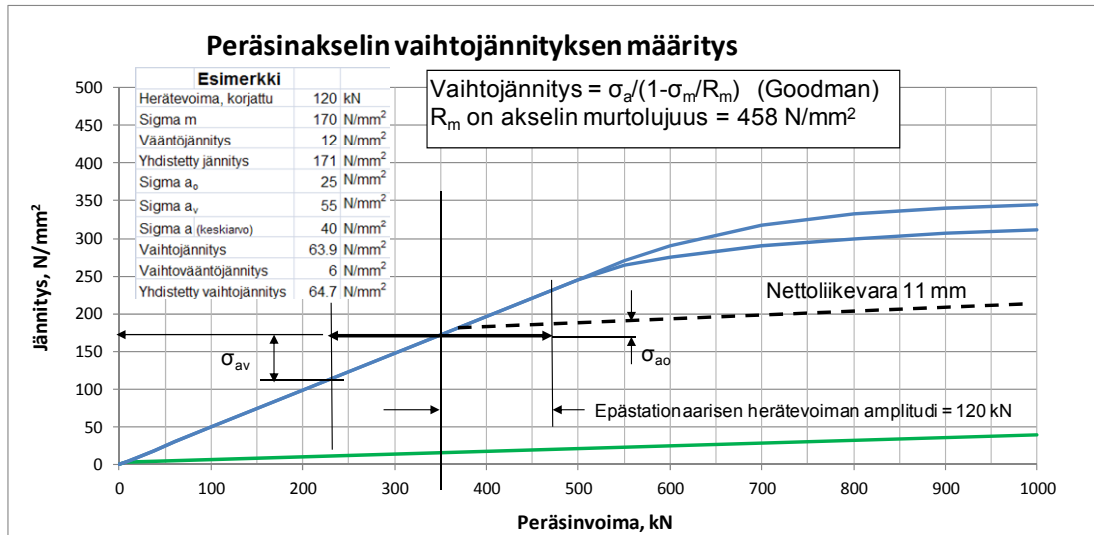
Väsymismurtumassa voidaan erottaa kolme päävaihetta: mikroskooppisten säröjen syntyminen (ydintyminen), säröjen kasvu ja yhdentyminen makroskooppisiksi säröiksi ja lopulta tapahtuva äkillinen murtuminen. Säröjen reunoihin syntyy suuria jännityshuippuja, minkä seurauksena säröt saattavat edetä. Särön päästyä alkuun ja sen kasvaessa sen etenemiseen tarvitaan yhä pienempi jännitys. Särön koko kasvaa eksponentiaalisesti ajan ja kuormituskertojen funktiona. Kun poikkipinta on pienentynyt tarpeeksi, yksi tarpeeksi suuri kuormituskerta riittää rakenteen murtamiseen. Väsymismurtuma alkaa tavallisesti rakenteen paikallisesta jännityshuipusta, jonka voi aiheuttaa reikä, olake, kierre tai materiaaliviat. SILJA EUOPAn tapauksessa alkukohta on ollut SB-puolen peräsinakselilla olleessa 0,3 mm korkuisen terävän olakkeen alakulma.

3. VÄSYMISLASKELMAN YLEISKUVAUS

Tässä käytetty menettely on katsottu riittävän tarkaksi ottaen huomioon lähtötietojen epätarkkuudet. Lähtöfaktana on tieto siitä, että SB-akseli katkesi väsymismurtuman seurauksena vasta vuonna 2009 eikä vuonna 2004, sekä että BB-akseli ei katkennut eikä siinä ollut olakkeen kohdalla säröä. Väsymiskestävyyden laskenta perustuu raportin kuviin 51. Siinä peräsimen vaikuttaa useita sekunteja kestävä lähes vakio staattinen vaikuttava voima ja lapataajuudella vaikuttava vaihtuva potkurivirtauksen herätevoima, jon-

ka amplitudi on 22.7 solmun nopeudella 180 kN ja joka synnyttää vaihtuvan potkurivirtauksen peräsinakselia taivuttavan momentin, jonka amplitudi on noin 885 kNm⁶.

Voimista päästään edelleen jännityksiin kuvan 3 esittämällä periaatteella. Peräsinakseliin syntyy peräsinvoiman johdosta keskijännitys σ_m , johon lisätään herätevoiman mahdollisesti resonanssin vahvistama vaihtojännitys σ_a . Niistä voidaan muodostaa ekvivalentti väsymislaskelmassa käytettävä nollakeskijännityksen omaava jännitysamplitudi



Kuva 3. Väsymislaskelmissa käytettävän nollakeskiarvoisen taivuttavan vaihtojännityksen määrittystapa Goodmanin kaavalla. Esimerkin luvut eivät vastaa mitään SILJA EUROPAn tilannetta. Voimaväli on esimerkissä 300–400 kN, epästationaarisen voiman amplitudiksi on esimerkissä otettu 120 kN. Vääntöjännityksen vaikutus on vähäinen.

Voimavälin keskeltä katsotaan vastaava staattinen jännitys, σ_m . Mitataan voimavälin keskeltä kumpaankin suuntaan⁷ epästationaarisen voiman suuruus (amplitudi), joka sisältää kierrosluvusta ja nopeudesta johtuvat korjaukset. Kuvan esittämällä tavalla konstruoidaan jännitykset σ_{ao} ja σ_{av} sekä lasketaan niiden keskiarvo σ_a . Se sijoitetaan Goodmanin kaavaan (kuvassa) ja saadaan vaihtojännitykseksi 63,6 N/mm².

Vääntöjännityksen vaikutus otetaan huomioon kahdessa vaiheessa. Ensin yhdistetään⁸ stationaarinen taivutus- ja vääntöjännitys (noin 12 N/mm^2), saadaan noin 171 N/mm^2 . Kuviosta saadaan keskimääräiseksi taivutusvaihtojännitykseksi 40 N/mm^2 keskijännityksen ollessa 171 N/mm^2 . Goodmanin kaavalla muunnettaessa nolla-keskiarvoiseksi vaihtojännitykseksi saadaan tulokseksi $63,9 \text{ N/mm}^2$. Kun siihen lisätään vaihtovääntöjännitys, joka on noin 5 N/mm^2 100 kN epästationaarista voimaa kohti, saadaan yhdistetyksi nolla-keskiarvoiseksi yhdistetyksi vaihtojännitykseksi $64,7 \text{ N/mm}^2$. Nähdään, että vääntöjännityksen osuus on pieni.

⁶ Tämän voiman vaikutuspiste on alempana kuin peräsinvoiman resultantin, minkä johdosta voiman suuruudeksi tulee 345 kN siirrettynä samaan kohtaan kuin peräsinvoima.

7 Suuruutena on käytetty epästationaarisen voiman maksimiarvoa, joka vaikuttaa positiiviseen suuntaan. Toiseen suuntaan voima on noin puolet. Näin on tehty laskelmien yksinkertaistamiseksi.

⁸ Taivutus ja vääntöjäännityksen yhteenlasku: stationaarinen $(170^2 + 3 \times 12^2)^{1/2} = 171,3 \text{ N/mm}^2$.

Mikäli puristusliitoksesta johtuva puristusjännitys kriittisessä kohdassa olisi 80 N/mm^2 , saataisiin kuvan 3 esimerkissä yhdistetyksi jännitykseksi⁹ $189,0 \text{ N/mm}^2$ ja vaihtojännitykseksi $68,1 \text{ N/mm}^2$ sekä yhdistetyksi vaihtojännitykseksi $68,9 \text{ N/mm}^2$, ts. 6,5 % suurempi (katso raportin kohdat 1.1.5 ja 1.9.1). Puristusjännityksen huomioon otto lyhentää hieman akselin elinikää. (Laskelmat on tehty ilman puristusjännitystä ja se mukana).

Hitaasti tapahtuvien jännitysvaihtelujen muutokset on määritetty yhden vuorokauden pituisesta sekunnin välein simuloidusta voimatiedostosta. Tiedosto jaettiin tunnin pituisiin osiin ja piirrettiin käyriksi, joista yksi on esimerkkinä raportin kuvassa 51. Käyristä määritettiin kohdissa, joissa on suuria voimavaihteluita, keskimääräinen voima ja sen amplitudi. Nämä tilastoiitiin vuorokauden ajalta ryhmiin. Vastaavalla tavalla kuin edellä määritettiin ekvivalentti nollakeskijännitys. Näin saatu lukumäärä lisättiin vastaavaan herätevoiman synnyttämään lukumäärään. Peräsinvoimien jakautuma eri voimaväleille eri liikevaroilla perustuu arvioon.

Lapataajuudella vaikuttavan herätevoiman liikkeen amplitudi vahvistuu (käytännössä usein heikkenee) resonanssi-ilmiön vahvistuksen johdosta. Harvemmin esiintyviin, hitaasti muuttuviin peräsinvoimiin ja niiden aiheuttamiin vaihtojännityksiin ei resonanssi-ilmiö vaikuta. Tämän seurauksena suurilla liikevaroilla resonanssin vaikutus on heräteamplitudia voimakkaasti pienentävä ja väsymiskuormituksen pääpaino on hitailla vaihtojännityksillä, jotka voivat tulla melko suuriksi, koska peräsinsarvi ei rajoita akselin taipumaa. Tilanne oli tällainen valuepoksin poistuttua ennen peräsinakselin katkeamista.

Vuorokautista voimajakautumaa ei tarvitse ekstrapoloida koko käyttöiälle. Reitit ovat vaihdelleet, mutta liikevaran ollessa niin suuri, että sillä on väsymisen kannalta merkitystä, on reitti ollut lähes sama kuin onnettomuustilanteessa. Muulloin peräsinakselien kuormitus on ollut väsymisrasituksen kannalta katsoen ikuisen keston alueella. Peräsinvoimalle on käytetty ryhmäjakoja 100 kN välein ja jännityksille vastaavasti 25 N/mm^2 .

Laskelmissa on etsitty kokeilemalla sellainen muuttujien kombinaatio, että havainnot ja mittaustulokset voidaan selittää. Erityisen voimakkaasti tuloksiin vaikuttaa pienikin muutos SN-käyrässä. Myös kierrosluvusta riippuvaa herätevoiman vahvistuksella voidaan tuloksia säätää. Minerin (kutsutaan myös Palmgren-Minerin menettelyksi) menettelyä on yksinkertaisuutensa vuoksi käytetty, vaikka se ei hyvin sovi tilanteessa, jossa keskijännitys muuttuu ajan mukana (1993–2004).

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

Goodmanin kaavan osuus tässä proseduurissa on pitää huolta siitä, että keskiarvoltaan eritasoiset jännitysvaihtelut saatetaan yhteismitallisiksi ennen Minerin kumulatiivista väsymislaskentaa muuntamalla *jännitysvaihtelujen keskiarvoksi nolla*.

⁹ Yhdistetty jännitys on nyt $(170^2 + 80^2 + 3 \times 12^2)^{1/2} \text{ N/mm}^2$.

4. VÄSYMISLASKELMAT

Koska jännitykset kasvavat alalaakerin liikevaran kasvun myötä, voidaan nettoliikevaralle löytää raja-arvo, jota pienemmillä arvoilla vaihtojännitykset ovat ikuisen keston alueella. Raja-arvo osoittautui olevan noin 5 mm. Tällöin riittää tarkastella vain niitä aikavälejä, jolloin tuo raja-arvo ylittyy.

Liikevaran kehittyminen ennen vuoden 2004 telakointia ja vuonna 2009 hieman ennen akselin katkeamista eroavat toisistaan ratkaisevalla tavalla: vuoteen 2004 mennessä nettoliikevara ja siten myös vaihtojännitys kasvoivat vähitellen kun taas syksyllä 2009 ne kasvoivat hyppäyksenomaisesti suuriksi. Minerin säännön soveltaminen edellyttäisi, että kuormitustaso pysyisi ajan mukana suunnilleen vakiona. Vaikka näin ei tässä tapauksessa ollut aikavälin 1993–2004 lopulla, on Minerin sääntöä silti käytetty paremman, riittävän yksinkertaisen menettelyn puutteessa.

Normaalivälykset

Peräsinsarven tuen johdosta jännitykset jäävät niin pieniksi, että molemmat akselit ovat ikuisen keston rajan alapuolella, kuvien 2 vihreä suora.

Akselissa ei olaketta, mutta alalaakerin pesä syöpyy

Ilman fretting-ilmiötä akseli kestää 12 mm nettoliikevaralla aluksen eliniän. Jos nettoliikevara on 16 mm, akseli kestää alle kaksi vuotta.

Onnettomuustilanne

Voimajakautuma on muunnettava jännitysjakautumaksi, jotta voidaan laskea erisuuruisten jännitysten osuus ja verrata sitä peräsinakselin väsymislujuutta kuvaavaan Wöhler-käyrään, joka perustuu jännitysvaihteluihin.

Näiden vaiheiden kautta syntyy uusi taulukko, jossa on väsymistarkastelussa tarvittavat jännitykset taulukon 1 ruutuja vastaavissa kohdissa. Tämän jälkeen voidaan valittaviin jännitysväleihin syklisistä voimista kertyvä jännitysvaihtelujen määrä, kohta 1.9.8. Alalaakerin ollessa kunnossa, staattinen ja syklinen jännitys ovat pieniä. Tilanne oli tällainen alkuvuosina noin vuoteen 2004 asti sekä valuepoksen asennuksen jälkeen lähes onnettomuuteen saakka.

Esimerkissä nettoliikevara on 10 mm. Menettely toistetaan kaikilla merkittävillä liikevaroilla. Vuoteen 2004 mennessä millimetrin välein nettoliikevaralla 5-12 mm, sekä syksyllä 2009 16 mm nettoliikevaralla.

Edellä on todettu, että normaalivälyksillä syntyvillä vaihtojännityksillä ei ole akselien kes-toikää alentavaa vaikutusta. Etsitään likimääräinen liikevaran raja-arvo, jolla SB-akseli pysyy ikuisen tai hyvin pitkän keston alueella. Tällöin riittää tarkastella vain niitä aikavälejä, jolloin tuo raja-arvo ylittyy, raportin kuva 35b. Liikevaran kehittyminen ennen vuoden 2004 telakointia ja hieman ennen akselin katkeamista eroavat toisistaan ratkaisevalla tavalla: Vuoteen 2004 mennessä nettoliikevara kasvoi hitaasti syöpymisen edetessä ja oli enintään 12–13 mm; sen sijaan vuonna 2009 nettoliikevara kasvoi äkillisesti 16–18 millimetriin epoksen pudottua.

Laskelma 1993–2004. Laskelman vaiheet muodostuvat alla olevista taulukoista. Esi-
merkinä on 10 mm nettoliikevara. Laskelmat ovat ilman puristusjännitystä.

Taulukko 1. Tapausten lukumäärä ryhmiteltynä voimavälien, nopeuksien ja kierroslukujen pohjalta. Sisältää myös muita perustietoja

		Ei tarvitse laskea tai ottaa huomioon, koska tapauksia ei ole ja ylin rivi tuottaa joka tapauksessa vain pienet jännitykset.																					
		300-400 irti tai ottaa kiinni välillä, joten vahvistuskertoimen äärimmäisyyksien väliltä																					
		Vahvistuskertoimet: värityksellä voima-alueella alalaakeri ei osu pesään, joten ominaistajuuks 2,5 Hz, muutoin 8 Hz																					
		0.32	0.32	0.32	0.5	1.1	1.1	1.1	0.5	0.5	0.5	1	1.5	1.5	1.5	0.2	0.2	0.2	0.5	1	1	1	
		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	11469	153	0	0	0	0	0	0	8868	682	333	131	51	35	1	3	0	0	0	0	0	0	
10-15 kn	1659	761	47	0	0	0	0	0	3045	6540	230	9	1	0	0	105	1370	253	13	2	0	0	
15-18 kn	62	196	76	0	0	0	0	0	342	3366	875	92	41	0	0	300	4890	4000	221	25	0	0	
18 kn tai yli		0	34	2	0	0	0	0	31	336	520	55	13	0	0	273	4069	26626	4029	161	5	0	
	13190	1144	125	0	0	0	0	0	12286	10924	1958	287	106	35	1	681	10329	30879	4263	188	5	0	
	14459								25597							46345							

Taulukko 2. Korjatut heräteamplitudit, kN

sigma m	24	74	123	161	166	171	176	24	74	123	161	166	171	176	24	74	123	161	166	171	176
	24	74	123	161	166	171	176	24	74	123	161	166	171	176	24	74	123	161	166	171	176
	24	74	123	161	166	171	176	24	74	123	161	166	171	176	24	74	123	161	166	171	176
	24	74	123	161	166	171	176	24	74	123	161	166	171	176	24	74	123	161	166	171	176

Taulukko 3. Keskijännitys σ_m

nopeuskertoimen	korjattu (nopeus ja kierrosluku)	heräteamplitudi, kN	korjaamaton	345 kN	0.75	korjaus, koska peräsin liikkuu voiman mukana															
0.10	8	8	8	12	27	27	27	12	12	12	25	37	37	37	5	5	5	12	25	25	25
0.33	27	27	27	42	93	93	93	42	42	42	85	127	127	127	17	17	17	42	85	85	85
0.56	46	46	46	73	160	160	160	73	73	73	145	218	218	218	29	29	29	73	145	145	145
0.74	61	61	61	95	210	210	210	95	95	95	191	286	286	286	38	38	38	95	191	191	191

Taulukko 4. Keskimääräinen vaihtojännitys σ_a

sigma a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	36	36	36	31	33	0	0	15	15	15	24	20	0	0
	31	31	31	0	0	0	0	48	48	48	55	57	0	0	19	19	19	30	31	20	0

Taulukko 5. Nollakeskisarvoinen ekvivalentti vaihtojännitys

sigma	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
ekvivalentti	4	4	4	0	0	0	0	7	7	7	13	20	0	0	3	3	3	7	13	0	0
	4	4	4	0	0	0	0	39	44	50	50	55	0	0	16	18	20	38	34	0	0
	33	37	42	0	0	0	1	51	57	66	86	92	0	0	20	23	26	47	50	35	0

Taulukko 6. Vaihtojännitysten jakaantuminen eri jännitysväleihin.

86401	11469	153	0	0	0	0	0	8868	682	333	131	51	35	1	3	0	0	0	0	0	0
kpl	1659	761	47	0	0	0	0	3045	6540	230	9	1	0	0	105	1370	253	13	2	0	0
	62	196	76	0	0	0	0	342	3366	875	92	41	0	0	300	4890	4000	221	25	0	0
	0	34	2	0	0	0	0	31	336	520	55	13	0	0	273	4069	26626	4029	161	5	0

Taulukkoon 7 on koottu laskelmien tulokset. Herätevoiman taajuus on 8 Hz. Erikseen on tilastoinnin perusteella arvioitu hitaasti muuttuvan vaihtojännityksen osuus, taulukossa sarakkeessa ”hidas”. Liikevaran pienentyessä näissä jännityksissä pienenee suurten jännitysten osuus, koska peräsinsarvi tukee useammin.

Taulukko 7. Yhteenveto väsymiskestävyyyslaskelmista 1993–2004. Alarivin värätettyjen ruutujen summa ilmoittaa SB-akselin eliniän kulumisen vuoden 2004 telakointiin mennessä.

jännitys- alue	N	liikevara 12 mm			liikevara 11 mm			liikevara 10 mm			liikevara 9 mm			liikevara 8mm			liikevara 7 mm			liikevara 6 mm			liikevara 5 mm		
		hidas	n 8 Hz	n/N ja vrk	hidas	n 8 Hz	n/N ja vrk	hidas	n 8 Hz	n/N ja vrk	hidas	n 8 Hz	n/N ja vrk	hidas	n 8 Hz	n/N ja vrk	hidas	n 8 Hz	n/N ja vrk	hidas	n 8 Hz	n/N ja vrk	hidas	n 8 Hz	n/N ja vrk
				54			58			40			33			28			25			20			20
alle 50	ääretön	83029	674176	0.000	83601	673952	0	84166	674216	0	83229	675668	0	83761	675936	0	84311	656744	0	84846	657184	0	85168	684112	0
50-75	8E+08	3000	16488	0.001	2500	14896	0.001211	2000	16448	0.000922	3000	10480	0.000556	2500	10672	0.000461	2000	31776	0.001056	1500	34024	0.000888	1200	7096	0.000207
75-100	750000	300	440	0.053	250	968	0.110277	200	544	0.03968	150	4160	0.18964	120	4600	0.176213	80	2688	0.092267	50	0	0.001333	30	0	0.0008
100-125	110000	50	104	0.076	40	1288	0.021091	30	0	0.010909	20	0	0.006	20	0	0.005091	10	0	0.002273	5	0	0.000909	3	0	0.000545
125-150	38000	20	0	0.028	10	104	0.015263	5	0	0.005263	2	0	0.001737	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
150-175	14000	2	0	0.008	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
175-200	6000	0	0	0.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
200-225	2100	0	0	0.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
225-250	1600	0	0	0.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
250-275	800	0	0	0.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
yli 275	450	0	0	0.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
yhteensä		86401	691208	0.166331	86401	691208	0.147842	86401	691208	0.056775	86401	691208	0.197933	86401	691208	0.181765	86401	691208	0.095595	86401	691208	0.003131	86401	691208	0.001553
Värätettyjen ruutujen summa ilmoittaa SB-akselin kulutetun eliniän telakointiin 2004 mennessä																									
85 prosenttia																									

Liite 6/8(9)

Vuorokaudet vastaavat kuvaa 35a. Nähdään, että näillä oletuksilla väsymiskestävyys-reservistä oli kulunut vuoden 2004 telakointiin mennessä noin 85% (vaalean punaisten ruutujen summa). Epävarmuuden (esimerkiksi holkkien putoamisajankohdat ja hitaiden voimavaihteluiden määrä) huomioon ottaen on mahdollista, että peräsinakseli olisi kes-tänyt muutaman kuukauden, noin vuoden 2004 loppuun.

BB-akselin väsymiskestävyys ei kulunut, jos oletetaan siinä olleen pyöristetty olake.

Laskelma 2004–2009. Laskelmassa on samat vaiheet kuin yllä, mutta nyt liikevara on niin suuri, että peräsimen ominaistaajuus on koko ajan 2,5 Hz. Nopea värähtely muo-dostuu heikentyneestä ensimmäisestä värähtelymuodosta ja resonoivasta toisesta vä-rähtelymuodosta. Niiden yhteisvaikutus on voimakkaasti epästationaarista liikeamplitu-dia pienentävä. Lisäksi mukana on hitaasti vaihtuvan peräsinvoiman aiheuttama ekviva-lentti nollakeskiarvoinen vaihtojännitys.

Liikevara on nyt suurimmillaan, joten suurimpien hitaista vaihteluista syntyvien jännitys-ten lukumäärä on suurempi kuin edellä 12 mm liikevaralla. Laskennan tulokset on esitet-ty taulukossa 8. Kahdessa vuorokaudessa kuluu laskelmien mukaan SB-akselin eliniäs-tä noin 10%. Laskelmien epävarmuudesta johtuen tämä suuruusluokka vastaa akselin jäljellä ollutta elinikää.

Taulukko 8. Kumulatiivinen väsymislaskelma epoksin pudottua.

jännitys	kpl/vrk		yhteensä		2 vrk
alue	8 Hz	hidas	n	N	n/N
alle 50	675504	79428	754932	ääretön	0
50-75	15160	4000	19160	8E+08	0.0000
75-100	544	1500	2044	750000	0.0055
100-125	0	800	800	110000	0.0145
125-150	0	400	400	38000	0.0211
150-175	0	200	200	14000	0.0286
175-200	0	60	60	6000	0.0200
200-225	0	10	10	2100	0.0095
225-250	0	2	2	1600	0.0025
250-275	0	0	0	800	0.0000
yli 275	0	0	0	450	0.0000
yhteensä	691208	86400	777608		0.1017

5. YHTEENVETO

Väsymiskestävyyden kriteerinä on sarakkeen n/N summa, jonka tulee yleisen käsityksen mukaan olla alle $0,5 \cdot 1^{10}$, jotta rakenne täyttäisi mitoitusvaatimukset väsymisen suhteen. Ennen vuoden 2004 telakointia oli SB-peräsinakselin väsymiskestävyyreservistä kulunut jo valtaosa, taulukko 7. Kun vuoden 2009 lopulla valuepoksi poistui, akselin rasitus kasvoi huomattavasti. Laskelmien epävarmuuden huomioon ottaen, SB-peräsinakseli saattoi katketa valuepoksin poistuttua ja holkin pudottua muutamassa vuorokaudessa.

BB-puolen akselin elinikää ei kulunut.

Minerin säännön soveltaminen edellyttää, että kuormitustaso pysyy ajan mukana suunnilleen vakiona. Näin ei tässä tapauksessa ole aikavälin 1993–2004 lopulla. Kun holkki putosi, alkoi alalaakerin liikevara kasvaa, jolloin peräsinakselin jännitystaso alkoi kasvaa, vaikka peräsinvoimien vaihtelu säilyi ennallaan. Vuonna 2009 holkin pudottua jännitystaso ei muuttunut ajan kuluessa, koska liikevara pysyi likimain muuttumattomana. SILJA EUROPA:n peräsinakselin jännitysten vaihtelu on satunnaisluonteista, mikä osaltaan vähentää Minerin säännön käytön soveltuvuutta.

Jos puristusjännitys otetaan mukaan lyhenevät edellä esitetyt eliniät hieman.

¹⁰ Eräässä Minerin satunnaisesti vaihtelevalla sinimuotoisella kuormituksella vaurio syntyi kun summa vaihteli välillä 0,7-2,2. Minerin menetelmä ei ota huomioon ikuisen kestävyysrajan alapuolella olevia jännitysvaihteluita. Voidaan olettaa, että väsymismurtuman ydintymisen jälkeen myös alle tämän rajan jäävät jännitykset pystyvät vaikuttamaan murtuman etenemiseen. Tätä puutetta kompensoi jonkin verran se, että käytettyjä SN-käyriä on jatkettu alaspäin kaltevina myös miljoonan kuormituskerran jälkeen. (Lujuusopin perusteet, s.450).

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 komentosiltilaitteisto, simulaattorissa tehdyt poikkeavien tilanteiden harjoitukset, aluksen nopeuden vaikutus ohjailuvoimalaskelmiin sekä valuepoksin käyttö peräsinlaakerikorjauksissa. Lisäksi saatiin tarkennus varustamon toteuttamista toimenpiteistä onnettomuuden jälkeen.