



Utredningsrapport

C4/2009M

M/S SILJA EUROPA (FIN), brott av styrbords roderaxel i Ålands skärgård den 22 november 2009

Denna rapport är en sammanfattning av en mer omfattande undersökningsrapport som endast är tillgänglig på finska. Förkortad rapportversion publiceras på finska, svenska och engelska.

Syftet med denna undersökningsrapport är att förbättra säkerheten och förebygga olyckor. Rapporten går inte in på det eventuella ansvaret för olyckan eller skadeståndsskyldigheten. Undersökningsrapporten bör inte användas i annat syfte än att förbättra säkerheten.

**Onnettomuustutkintakeskus
Olycksutredningscentralen
Safety Investigation Authority, Finland**

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

Adress: Sörnäs strandväg 33 C
00500 HELSINGFORS

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

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

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

Internet: www.onnettomuustutkinta.fi

Käännös / Översättning / Translation Minna Bäckman

ISBN 978-951-836-366-1 (Nid.)

ISBN 978-951-836-367-8 (PDF)

ISSN 1797-8122 (Nid.)

ISSN 2242-7724 (PDF)

ISSN-L 1797-8122

Multiprint Oy, Vanda 2012

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 Ers-tan, där en dykare konstaterade att manövreringssvårigheterna berodde på att styrbords roder-axel 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 ma-növreringssvårigheterna. 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. Fast-än 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 avvi-kande 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. utmatt-ningsbelastning till följd av böjningar. De stora korrosionsskadorna i rodertappslagrens lagerhus i bågge rodren i samband med dockningen år 2004 hade reparerats med epoxifyllning. Ett bety-dande tomt utrymme, ett tvärgående fritt utrymme, hade uppstått i rodertappslagen p.g.a. korro-sion, 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 upp-repas 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 tillverkningsskedet, samt lagerhusens långvariga galvaniska korrosion som berodde på roder-tappslagrens struktur. Redan dessa faktorer tillsammans skulle ha lett till skadan, men brytnings-processen blev betydligt snabbare p.g.a. den tredje faktorn, dvs. rodrets resonansvibrationer.

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

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

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

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

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

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

SUMMARY

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

SAMMANDRAG	I
SUMMARY	III
FÖRORD	VII
1 HÄNDELSERNA OCH UTREDNINGEN	1
1.1 Central information om fartyget	1
1.1.1 Allmänna uppgifter	1
1.1.2 Bemanning	1
1.1.3 Kommandobryggan och dess utrustning	1
1.1.4 Framdrivningsmaskineriet	2
1.1.5 Rodren och de andra styranordningarna	3
1.1.6 Korrosionsskydd	7
1.1.7 Passagerarna och lasten	8
1.2 Olycksresan	8
1.3 Skadorna på fartyget	11
1.4 Räddning och alarmering	13
1.5 Säkerhetsutredning av olyckan	14
1.5.1 Fartygets och rodrens historia	14
1.5.2 Lagerspelen och rodertappslagrets fria utrymme	17
1.5.3 Rodertappslagrets fria utrymme och spänningarna i roderaxeln	22
1.5.4 Samling och analys av VDR-data	24
1.5.5 Undersökning av rodren - de faktorer som ledde till utmattningsbrottet	24
1.5.6 Rodertappslagrets korrosion	29
1.5.7 Vibrationer i rodret	29
1.5.8 Roderkavitationen	30
1.6 Roderaxlarnas utmattningsprocess	31
1.6.1 De effektiva krafterna och spänningarna i roderaxeln	31
1.6.2 Klassifikationssällskapens dimensioneringsgrunder	33
1.6.3 Simulerade statiska krafter	33
1.6.4 Sammanslagning av statiska och cykliska krafter	33
1.6.5 Förvandling av krafter till spänningar	34
1.6.6 Beräkning av roderaxlarnas utmattningshållfasthet	35
1.6.7 Beräkning av roderaxlarnas livslängder	36
1.7 Uppskattning av reliabiliteten av den kalkyleringsmetod som användes i utredningen	37
1.8 De författningar och föreskrifter som styr verksamheten	38

2	ANALYS	41
2.1	Faktorerna som bidrog till brottet av SB-axeln	41
2.2	Analysens huvudtema.....	43
2.2.1	Reparationssättet och dess inverkan	44
2.2.2	Uppskattning av reparationssättet år 2004.....	44
2.3	En sammanställning av brottprocessen	46
2.4	Kontrollen av fartyget på olycksresan	47
2.4.1	Tidpunkten för axelns brott.....	47
2.4.2	Observering och kontroll av situationen	48
2.4.3	Uppskattning av situationskontrollen	53
3	SLUTSATSER.....	55
3.1	Iakttagelser	55
3.2	Orsakerna till händelsen	56
3.3	Andra säkerhetsiakttagelser	57
4	ÅTGÄRDER.....	59
5	SÄKERHETSREKOMMENDATIONER	61

BILAGORNA

Bilaga 1. Sammanfattning av mottagna utlåtandena



Bild 1. M/S SILJA EUROPA.

FÖRORD

M/S SILJA EUROPA var på väg från Stockholm till Åbo den 22 november 2009 då styrningen började te sig annorlunda än normalt i girar väster om Sottunga. Ca kl. 15.40 var man tvungen att börja använda nödstyrning, men inte ens det hjälpte. Man började styra fartyget med propellrar och styrpropellrar och lyckades stanna henne mellan Långholmskobben och Rönnskär i en bred farledsdel. På Delet körde man fartyget medsols på en ellipsformad bana medan man väntade på bogseringsassistans. Bogserbåten UKKO, som befälhavaren hade beställt för att hjälpa, eskorterade fartyget till Tervi ankringsplats, där en dykare konstaterade att styrbords roderaxel hade gått av. Fartyget anlände till Åbo den 23 november kl. 16.46 assisterat av bogserbåtarna UKKO och KRAFT. Fartyget fördes till Riga, där hon visade sig vara för stor för dockan. Från Riga flyttades fartyget till Gdansk, till Remontowa S.A. varvet. Fartyget återvände till trafik den 19 december 2009.

Efter att ha erhållit information om olyckan beslöt Olycksutredningscentralen inleda en undersökning och förordnade ledande utredare Martti **Heikkilä** till ordförande och till medlemmar doktor i teknik Sauli **Ahvenjärvi**, licentiat i teknik Olavi **Huuska** och övermaskinmästare Ari **Nieminen**. Diplomingenjör Ville **Grönvall** utnämndes som medlem i undersökningskommissionen den 27 september 2011. Diplomingenjör Jorma **Salonen** och diplomingenjör Markku **Hentinen** från statens tekniska forskningscentral VTT har fungerat som experter.

Brott av roderaxel är en ytterst sällsynt olycka. Då utredningen påbörjades fanns det inte tekniskt grundmaterial om likartade fall tillgängligt, vilket betydde att utredarna var tvungna att ingående sätta sig in i händelsens tekniska bakgrunder och fartygets hela brukshistoria för att förebygga motsvarande olyckor i fortsättningen. Utredningen blev mer krävande än vanligt och man var tvungen att precisera utredningsplanen flera gånger. Uppkomsten av ett fel som under sin första fas hade utvecklats långsamt i förloppet av mer än tio år var möjlig att uppskatta (extrapolera) med hjälp av en 1 månad lång registrering på fartygets färdskrivare, VDR. Utredningen av reparationstekniken med epoxi och dess sönderfall samt analysen av utmattningsprocessen som ledde till brottet av roderaxeln var en krävande helhet.

Olycksutredningscentralen har bytt information och fört diskussioner med rederiet, Trafiksäkerhetsverket (tidigare Sjöfartsverkets Sjösäkerhetsavdelningen) och klassifikationssällskapet Bureau Veritas som har klassat fartyget.

Utlåtandena beträffande rapporten. Ett slutgiltigt utkast av rapporten skickades för utlåtande den 27 augusti 2012 enligt § 28 i lag om säkerhetsutredning av olyckor och vissa andra händelser (525/2011) till Trafiksäkerhetsverket, fartygets klassifikationssällskap, rederiet och bryggteamet. Inom tidfrist kom utlåtandena från Trafiksäkerhetsverket, fartygets klassifikationssällskap och rederiet samt från en medlem i bryggteamet. Sammanfattning av utlåtandena ingår som bilaga i denna rapport. På grund av utlåtandena har man bearbetat rapporten.

Rapportens källmaterial har arkiverats i Olycksutredningscentralen.

Den förkortade rapportversionen har översatts på svenska och på engelska av Minna Bäckman.

1 HÄNDELSERNA OCH UTREDNINGEN

1.1 Central information om fartyget

Uppgifterna baserar sig på fartygsritningar, på anmälan om sjöolycka daterad den 7 december 2009 samt på intervjuer med befälet. Fartygets hemort och registreringsort är Mariehamn. Fartyget ägs av Tallink Autoexpress Ltd, Limassol, och opereras av Oy Silja Line Ab, Helsingfors. Fartygets största tillåtna passagerarantal är 3123. Fartyget har byggts på Jos. L. Meyer Werft-skeppsvarv i Papenburg, Tyskland, år 1993 och dess klassifikationssällskap är Bureau Veritas.

1.1.1 Allmänna uppgifter

Dräktighet:	Brutto: 59914 Netto: 41309
Största längd/Längd L_{pp} :	201,78 m/171,6 m
Bredd:	32,00 m
Djupgående:	6,80 m
Hastighet:	22,50 knop

1.1.2 Bemanning

Fartyget hade sammanlagt 41 personer däck- och maskinpersonal samt 245 personer servicepersonal. En styrman som vaktchef och en linjelots¹ höll vakt på bryggan. Båda hade sjökaptensbehörighet. Även styrmannen hade linjelotsbrev för farleden. Linjelotsvaktavlösningen den 22 november 2009 ägde rum kl. 15.32, då fartygets överstyrman övertog linjelotsuppgiften.

En maskinmästare med vaktmaskinmästarbehörighet fungerade som vakthavande maskinbefäl i maskinkontrollrummet. Därtill fungerade en motorman som maskinvakt.

1.1.3 Kommandobryggan och dess utrustning

Fartyget körde Åbo-Långnäs-Stockholm-Mariehamn-Åbo-rutten som hade programmerats i integrerade navigationssystemets automatiska styrsystem (autopilot). Autopiloten vänder rodren och hastigheten justeras med maskineriets kontrollspak (KaMeWa), vilkens automatik samtidigt ändrar propellrarnas varvtal och stigning. Det automatiska styrsystemet får positionsinformation från satellitnavigatören och jämför denna information med önskade rutt-uppgifter och gör inställningar enligt behov. Manuell styrning är huvudsakligen i bruk under hamnoperationerna, då också styrpropellrarna kan vara i användning. För att effektivisera manövreringen i hamnarna var en Jastram-rotor, som var installerad till rodret, i bruk.

Det finns normalt två personer på bryggan, en vaktchef och en linjelots. Deras arbetsställen ligger i bryggans framdel, bild 2. Radarn vid framdelens manöverplatser och den så kallade conning-displayen² utgör de viktigaste displayerna (se bild 8). Dessa displayer

¹ Linjelots är fartygets styrman, som har ett linjelotsbrev enligt Lotsningslagen för farleden i fråga.

² Conning Display, skärmen för fartygens centraliserade larm-, säkerhets och informationssystem är integrerad i kommandobryggssystemet. I displayen har man på ett ställe sammanställt viktig information som har med navigering och fartygskontroll att göra, bl.a. fartygets hastighet, rörelseriktning, rodervinklarna, girhastighet, vinduppgifter och vattendjup. Typiska larm in-

finns också på manöverplatserna vid bryggans sidor. Därtill finns det skärmar för t.ex. rodervinklar ovanför fönstret och i taket. På bryggan följer man främst upp radarn och särskilt dess prediktor, dvs. en prediktion av fartygets rörelser³. Enligt normal praxis finns det enbart momentan information tillgänglig på displayerna, förutom för djuplek.

Navigationsutrustning

På fartyget finns det två från varandra fristående integrerade navigationssystem av typ Atlas Nacos 25-2 Integrated Bridge System, som innefattar bl.a. följande: radar; 2 st. Atlas 9600 X-band, 2 st. Atlas 9600 S-band. Som automatstyrningsanläggningar fungerar 2 st. ATLAS TRACKPILOT.



Bild 2. Utblick över kommandobryggan, fartygets manöverplatser. Fotograferat i Åbo den 24 november 2009. De röda pilarna visar radarskärmarna (en skärm finns bakom stolen) och de gula pilarna conning-displayerna. Linjelotsen sitter i mitten (huvudstyrningsplats), vaktchefen sitter till höger (monitorerande navigerare) och befälhavarens stol finns till vänster. Den vita pilen pekar på styrkonsolen för styrmaskinens tryckackumulatorer; reglerspakarna till höger och till vänster.

1.1.4 Framdrivningsmaskineriet

Framdrivningsmaskineriet består av två Kamewa utåtroterande propellrar med justerbara blad. En propeller drivs genom en reduceringsväxel av två MAN B&W 6L58/64 dieselmotorer á 7950 kW 428 1/min. Reduceringsväxlarna driver även axelgeneratoren.

nefattar t.ex. följande: radarmålet för nära, fartyget utanför de ställda ruttgränserna, manöverlarm, fel i navigeringsljus, kompassfel, larm från maskinautomationen, osv. Larm kan kvitteras ett åt gången eller centraliserat.

³ Prediktorn av fartygets rörelsetillstånd visar fartygets dåtida position och riktning samt en prediktion av rörelse då rörelsetillståndsparmetrarna förblir oförändrade efter en kort bestämd tid (t.ex. en minut).

Propellerdiametern är 5,0 m och varvtalsområdet 100–143 1/min, med axelgeneratoren kopplad 130 1/min. Avståndet mellan centrum av propellerbladets rot och roderaxelns centrum är 3,5 meter. Bild 3a.

1.1.5 Rodren och de andra styranordningarna

Det var fartygets styrbords (SB) roderaxel som gick av, men det fanns skador också på babords (BB) roder⁴. Därför beskrivs styrutrustningen tämligen ingående.

Bilderna 3a och 3b framställer placeringen av fartygets roder. Därtill finns det på fartyget tre styrpropellrar av tunneltyp i fören och en i aktern.

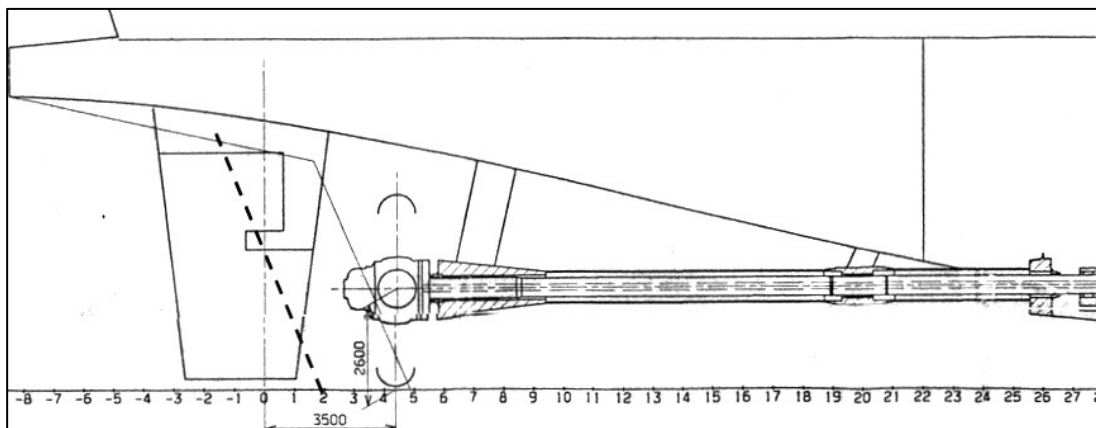


Bild 3a. SILJA EUROPAs propeller-roderarrangemang. Akterfenan förlängdes redan på sommaren 1993 (streckad linje). Uppskattningen gjord på basis av ett foto den 2 december 2009 i Gdansk.

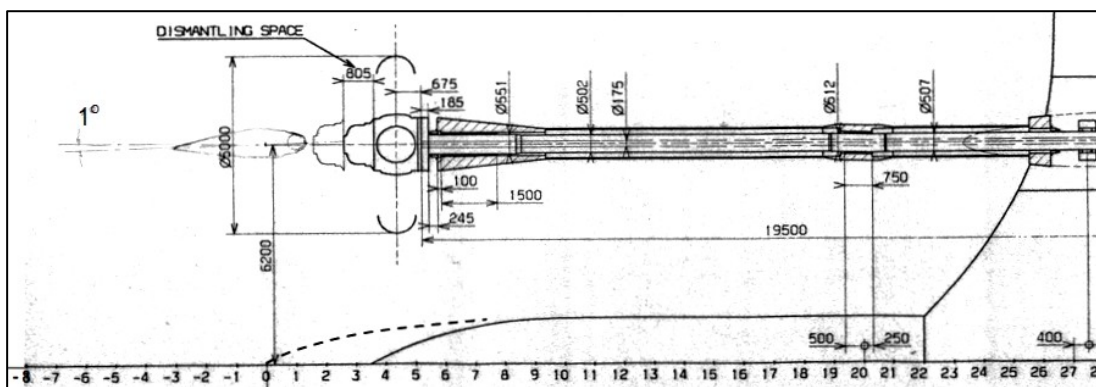


Bild 3b. SILJA EUROPAs propeller-roderarrangemang. Spantavståndet är 800 mm.

Rodren.⁵ Det finns två hornroder⁶ på fartyget, bild 4. Rodrerbladets yta är ca 20 m² och vikt⁷ ca 21 ton. Rodren är i linje bakom propellrarna vända en grad inåt, bild 3b. Efter att fartyget hade tagits i bruk år 1993, konstaterades det att det var skäl att förbättra farty-

⁴ I fortsättningen används förkortning SB-roder för styrbords roder och BB-roder för babords roder.

⁵ Ritningar till roderanläggningen erhöles från rederiet i PDF-format.

⁶ Det finns flera olika sätt att montera hornroder. Ett så kallat spadroder är den andra vanliga rodertypen, i vilken det inte finns något horn.

⁷ I roderitningarna nämns en vikt som man i utredningen har tolkat som lyftvikt vid rodrets demontering. Då är nedre axeln inkluderad i vikten, med inte de tämligen små delarna av rodrets plattbeläggning som tas bort vid demontering.

gets manöveregenskaper, ss. kurstabilitet. Före leveransen av fartyget hade rodren redan förlängts ca 30 cm och en styrpropeller hade tillsatts i fören. I augusti 1993 dockades fartyget i Nordsjö. Då tillsattes slingerkölar, akterfenan förlängdes, en styrpropeller installerades i aktern och en bogfena i fören och effekten av roderpumparna ökades.

Rodret är monterat från sin övre del till den konformade nedre delen av roderaxeln genom pressförbindning. Från sin övre del är roderaxeln monterad till rodermaskineriet med en hydraulisk koppling. Lägre ner är rodret fäst med en likadan pressförbindning till nedre axelns konformade nedre del. Övre delen av nedre axeln är lagrad till roderhornet.

Roderhornet är ett gjutstycke som fortsätter strömlinjeformat och delvis som skivstruktur ovanför rodret och förenar sig med fartygets skrov. Roderhornet går ställvis innanför skrovet (se t.ex. bild 4). Bakre delen av denna struktur bildar en s.k. iskniv som skyddar rodret då fartyget backar i is. Roderhornet tar emot huvuddelen av de böjkrakter som riktas mot rodret och sålunda också roderaxeln. P.g.a. detta hålls spänningarna i roderaxeln inom tillåtna gränser. En förutsättning för detta är att rodertappslagret är i skick, eftersom roderhornet då begränsar roderaxelns böjning så att den förblir liten.

Det finns två glidlager i SILJA EUROPAs roder: roderaxelns fettsmorda lager (övre lager), bild 5c, och nedre axelns sjövattnsmorda lager (rodertappslager) i roderhornet, bilderna 5b och 5c.

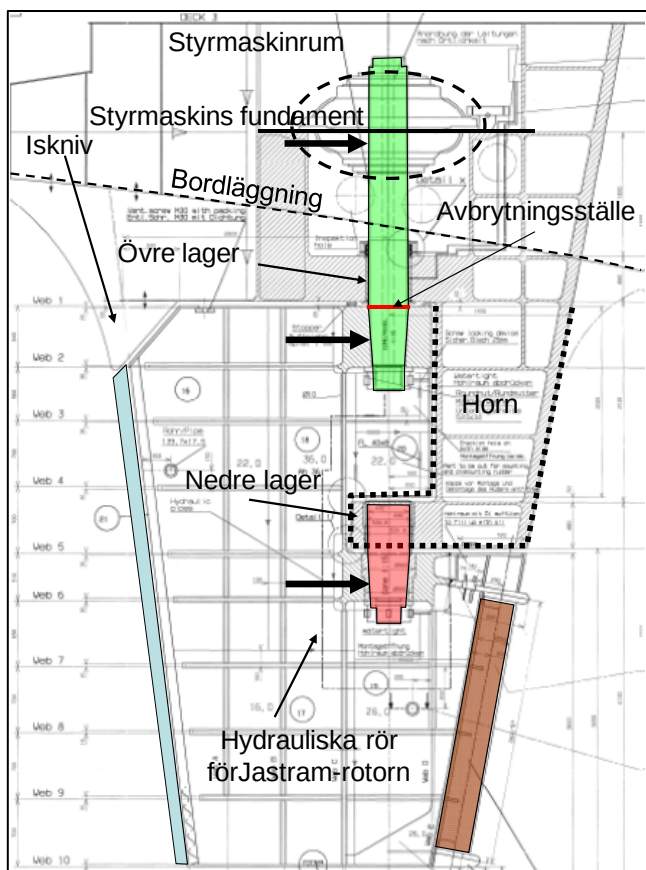


Bild 4. Rodret. Roderaxeln är indikerad med grönt, rodertappsaxeln med rött (pintle axel, rodertapp), Jastram-rotorn med brunt och rodrens förlängningsdel som tillsattes redan innan fartyget levererades är indikerade med blått. De tjocka pilarna visar pressförbindningar. Den prickade linjen visar roderhornet, som förenas med fartygets skrov via en strömlinjeformat mellanstruktur. Styrmaskinen är inringad med en streckad linje. De gjutna delarna indikeras med snedstreckning.

I framkanten av rodret, under hornet, fanns det ända till dockningen år 2009 en hydrauliskt fungerande Jastram-rotor. Rodret vrids av en rotovinge-typ styrmaskin Tenfjord SR 782, vars nominella vridmoment är 800 kNm och maximala

vinkel 2 x 68 grader. Girhastigheten 2 x 35 grader är 28 s med en pump och 14 s med två pumpar.

Bägge lagren är glidlager, i vilka lagermaterialet är brons. Som anliggningsyta fungerar i båda axlarna vid lagren en beläggning av rostfritt stål, som är fäst med pressförbindning. För att rodret skall fungera och hålla är det väsentligt att lagerspelen⁸ från början är korrekta och att de förblir inom de tillåtna gränserna under användningen.

Roderlagren. I bilden som visar övre *lagret* har spänningsbulten, anslutningarna för högtrycksolja, axelns brottpunkt samt djupgåendena märkts ut. Materialen är de samma som i rodertappslagret, bild 5b.

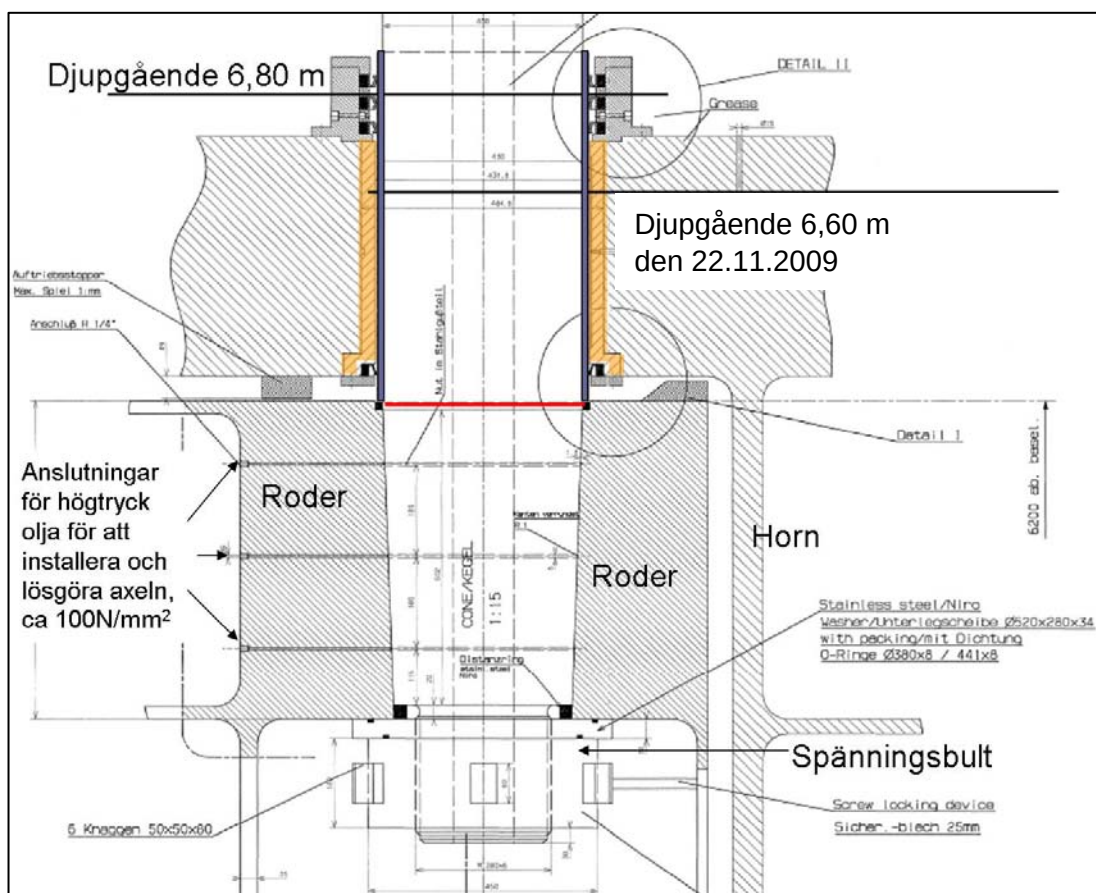


Bild 5a. Bilden föreställer rodrets övre lager. Roderaxelns konkoppling till rodret syns i bilden. Bronsbussningen är indikerad med orange färg, rostfri stålbeläggning med blågrått. Lagerspelet är 1,8 mm (431,8–430,0). Brottpunkten av SBs roderaxel är märkt ut med rött (där konen övergår till cylinder). Snedstreckningen framställer gjutna delar.

⁸ Lagerspel är skillnaden mellan lagrets inre diameter och axelns yttre diameter. Ett halvt spel är axelns möjliga fria utrymme om man antar att axelns och lagrets centrum förenas och de eventuella slitna ställen är symmetriska. Axelns fria utrymme ökar då spelet växer och ökar ännu mer om det uppstår ett tomt utrymme mellan bronsbussningen och lagerhusets stål till exempel p.g.a. korrosion.

Det finns en nedre gräns, en övre gräns och en kontrollgräns för lagerspel i klassifikationssällskapets regler. Dessa gränser beror på roderaxelns och nedre axelns diametrar. För SILJA EUROPA:s axlar är dessa gränser ca 1,4 mm, 5 mm och 4 mm. Enligt klassifikationssällskapets regler mäts spelen i samband med dockningar och bronsbussningar byts vid behov. I praktiken byts bronsbussningarna om spelet klart överskrider 2 mm. Med normala spel och vanliga roderkrafter träffar roderaxeln inte övre lagrets bronsbussning, vilket innebär att övre lagrets slitage är minimalt.

Diametern av den raka delen av *rodertappslagrets* axel är 432 mm och tjockleken av den rostfria stålbeläggningen som ligger på rodertappslagret och som är installerad med krympförband är 24 mm, se bild 5b. Axelns längd är ca 1,3 m och den väger ca 1,2 t. Tjockleken av bronsbussningens övre del var från början 26,5 mm och nedre del 25 mm. Det fanns en ansats i mitten av bussningen liksom i lagerhuset för att underlätta installationen av bussningen samt för att säkerställa att den hölls på plats. Uppifrån är bussningen säkrad mot rotering och uppstigning med sex skruvar, som dessutom var svetsade fast i den gjutna delen. Lagerhusets och bussningens höjd är 480 mm. Det är skäl att lägga märke till att gjutstålet i lagerhuset är i direkt kontakt med bronsbussningen i havsvattenomgivning (galvaniskt par).

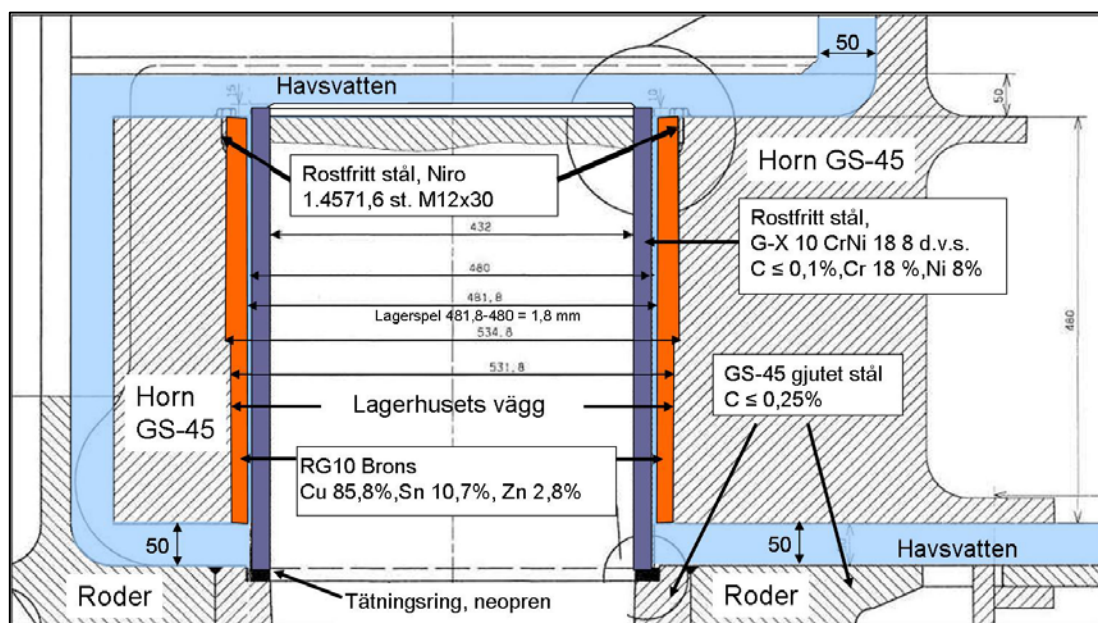


Bild 5b. En originalritning av rodertappslagret. T.ex. uppgifter om materialen har lagts till i ritningen. Bronsbussningen visas med orange färg, den rostfria stålbeläggningen med blågrått. Lagerspelet är 1,8 mm (481,8–480). Det är skäl att lägga märket till att bronsten i bussningen och gjutjärnet i hornet var i kontakt med varandra i havsvattnet utan isolering (galvaniskt par).

Korrosionsskadan i lagerhuset reparerades med gjutepoxifyllning i samband med dockningen år 2004 och samtidigt installerades nya bronsbussningar, bild 5c. För att centrera bussningarna då epoxin göts, användes insexskruvar som räckte genom bussningen ända till lagerhusets vägg. De lämnades där efter gjutningen. Denna struktur av epoxi och skruvar hade gått sönder år 2009. Det är skäl att lägga märke till att gjutstålet i lagerhuset är i direkt kontakt med bronsbussningen, nu via skruvar (galvaniskt par).

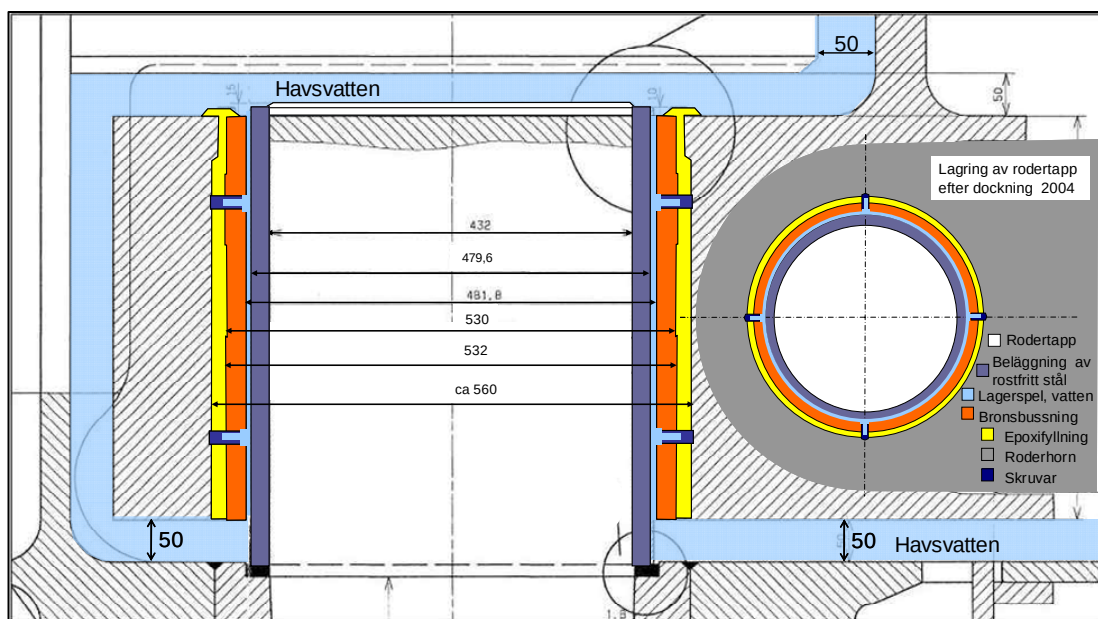


Bild 5c. Strukturen efter reparationen år 2004. Skruvar med invändiga sexkanter användes för att centrera den nya bussningen (sammanlagt 8 skruvar). Spelen återställdes till det normala. Sexkanterna fylldes med havsvatten.

Roderaxlarna

Roderaxelns längd är ca 3,5 meter och den väger ca 3,1 ton, bild 6. Roderaxeln var tillverkad av olegerat stål CK 22N, som hade smitts och normaliserats genom glödning efter gjutningen. Materialet hade klassificeringscertifikat enligt vilket materialet uppfyllde kriterierna ställda på det. Roderaxelns diameter är ca 400 mm. Axelns hållfasthetsegenskaper var normala och motsvarade fartygets isklass⁹. Tjockleken av axelns beläggning som hade monterats med krympförband var 15 mm. Mitt i axeln hade man borrarat ett hål som var 120 mm i diameter för Jastram-rotorns hydraulik. Hålet gjorde axelns hållfasthet endast en aning sämre.

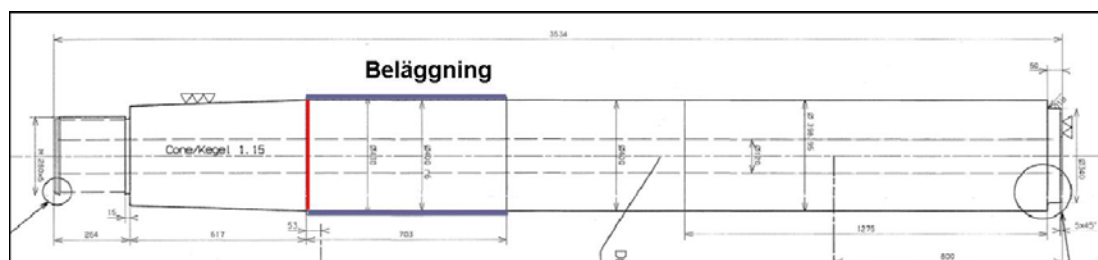


Bild 6. Roderaxeln. Beläggningen är tillverkad av rostfritt stål är visad med blågrått. Ett 120 millimeters hål i diameter har borrarats genom roderaxeln för Jastram-rotorns hydraulikrör. Stället där SB-roderaxel gick av har indikerats med rött.

1.1.6 Korrosionsskydd

Förutom målfärgen har fartyget ett aktivt och ett passivt korrosionsskydd. Zinkanoder fungerar som rodrets lokala passiva skydd (5-7 st. på var sida av rodret; antalet har va-

⁹ Fartygets hastighet var över 20 knop. Då fastställer enbart hastigheten axelns dimensionering. Brottgränsen är 470 N/mm² och sträckgränsen 270 N/mm² enligt rodrets klassifikationsritning.

rierat, likaså anodernas placering). Det aktiva systemet som skyddar skrovet har SAV-COR Consulting Oy levererat och företaget underhåller systemet. Antalet anoder ökades i samband med dockningen år 1997. Detta skydd är avsett för stora ytor, och det klarar sannolikt inte av att förebygga lokal korrosion om det på ifrågavarande stället råder gynnsamma förhållanden för galvanisk korrosion på grund av t.ex. ogynnsam materialkontakt¹⁰. Rodret hade jordats¹¹ till fartygets skrov.

1.1.7 Passagerarna och lasten

Då olyckan inträffade fanns det 1 373 passagerare och 1 133,1 ton RoRo-last ombord på fartyget. Lasten innehöll farliga ämnen.

1.2 Olycksresan¹²

Kartskissen nedan (bild 7) framställer olycksrutten nära Långnäs i Ålands skärgård då roderfelet uppstod. Man utgår ifrån att SB-axeln gick av vid den röda pilen. Den tjocka svarta pilen visar positionen där fartyget stannades och styrdes åt sidan från farleden till "en ficka".

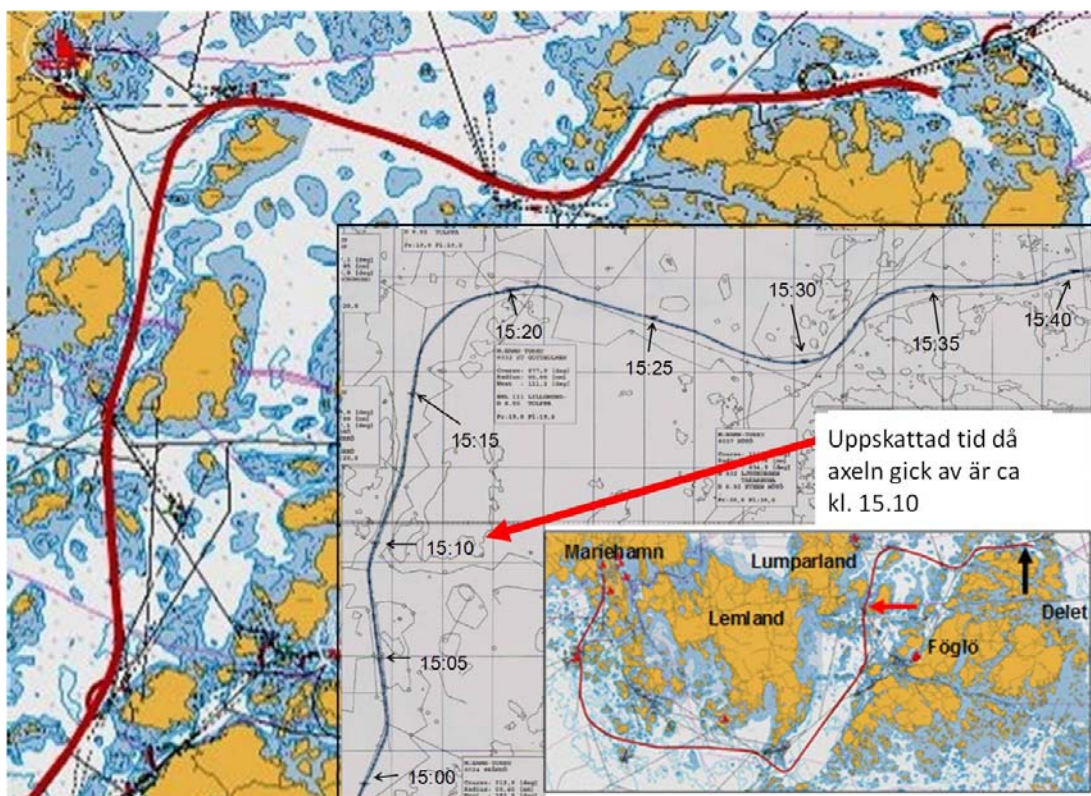


Bild 7. Olycksrutten nära Långnäs. Man antar att SB-axeln gick av i positionen som den röda pilen visar. Fartyget stannades i positionen som den tjocka svarta pilen utpekar. Farleden från Mariehamn till Delet innefattar flera krökar samt trånga och grunda delar.

¹⁰ Diskussioner med systemets tillverkare i S:t Michel den 28 april 2010.

¹¹ Ett så aktivt korrosionsskydd kan sträcka sig även till rodrens ytor.

¹² Diskussioner med befälet samt VDR-datan inklusive diskussioner på kommandobryggan. Bandningens kvalitet är delvis så undermålig att stundvis är det svårt att ta reda på allting vad man pratar på bryggan.

Händelserna under resan. Fartyget hade avgått från Stockholm den 22 november 2009 i enlighet med tidtabellen. Ett par dagar tidigare hade man lagt märke till avvikelser i manövreringen av fartyget. På fartyget bedömde man att den hårda vinden hade spelat en roll i att fartyget tidvis tog girarna för mjukt eller för tvärt. Då fartyget betedde sig på ett ovanligt sätt i en gir nära Mariehamn den 21 november tänkte man att den byiga vinden, 18 m/s, var orsaken till detta.

Fartyget var i automatstyrning den 22 november 2009 då man märkte nära Långnäs vid en gir mot styrbord efter kl. 15.15 att fartyget igen betedde sig ovanligt. Man började diskutera detta på bryggan. Enligt undersökningen genomförd i utredningen bröt roderaxeln ca klo. 15.10. Nu var då frågan om den första stora giren efter att roderaxeln hade gått av (det hade gått ca sju minuter efter brottet). Man undrade över de stora rodervinklarna samt reagerade på dem genom att göra små kursförändringar i autopiloten. Klockan 15.21.07–15.22.22 använde automatstyrningen exceptionellt stora rodervinklar (30 grader), bild 8. De noterades på bryggan men man diskuterade varken de stora rodervinklarnas numeriska värden eller deras tidsmässiga längd. Man började inte analysera fartygets avvikande manövreringsbeteende utan iakttagelserna förblev enskilda konstateranden. Diskussionen avbröts för den tid som M/S FJÄRDVÄGEN omkördes, dvs. för ca fem minuter.

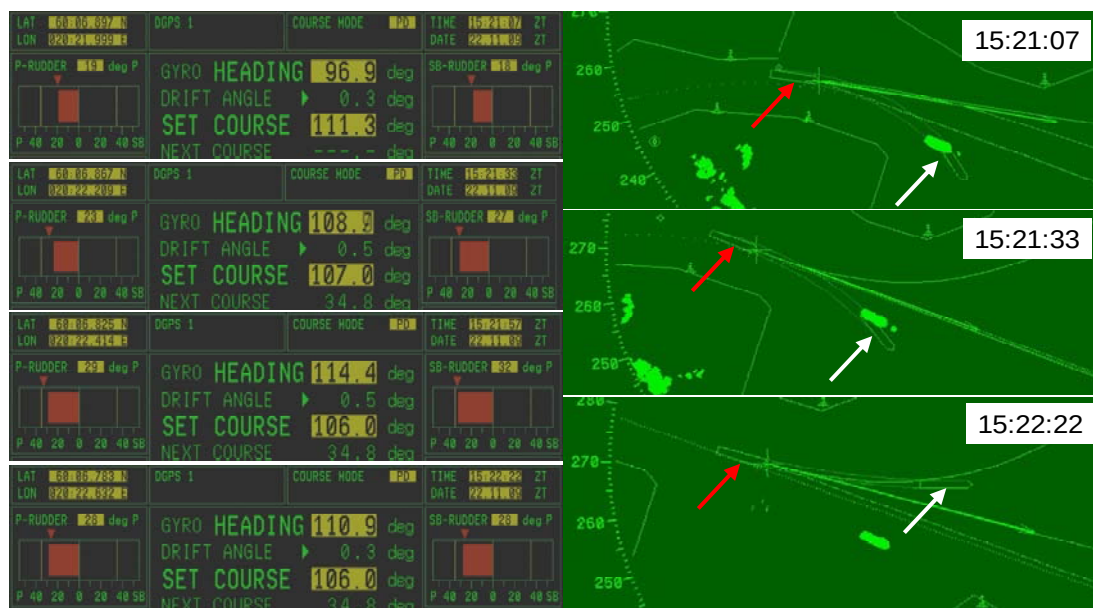


Bild 8. Stora rodervinklar som användes i stöttningen efter en gir åt styrbord kl. 15.20 (bild 7). På bilden ser man conning-displayn (till vänster) och motsvarande bilder från radarskärmen (till höger). Rodren är vända mot babord. Till vänster ser man BBs och till höger SBs rodervinkel. I radarbilderna till höger visas den plats som prediktorn visar efter en minut märkt med en vit pil och fartygets position med röd pil. Det gröna radarekot nära den vita pilen är M/S FJÄRDVÄGEN.

Omkörningen av FJÄRDVÄGEN kl. 15.25–15.29 gick i början med autopiloten. SILJA EUROPA verkade bete sig normalt då man körde rakt. Registrerade rodervinklar visar en liten avvikelse till styrbord under omkörningen. I slutskedet av omkörningen bytte man för första gången till handstyrning kl. 15.27. Rodret vändes 30 grader mot babord

för att starta närmande S-krökens första gir. Giren gick bra; emellertid var man tvungen att använda ca 20 graders babords rodervinkel nästan hela tiden under giren.

Samtidigt blev det dags för linjelotsarnas vaktbyte. Man berättade för den nye linjelotsen som kom till bryggan om manövreringsiakttagelserna, och att man hade övergått till manuell styrning under omkörningen av FJÄRDVÄGEN. Fartygets manövreringsbeteende väckte diskussion och man konstaterade att fartyget styr dåligt.

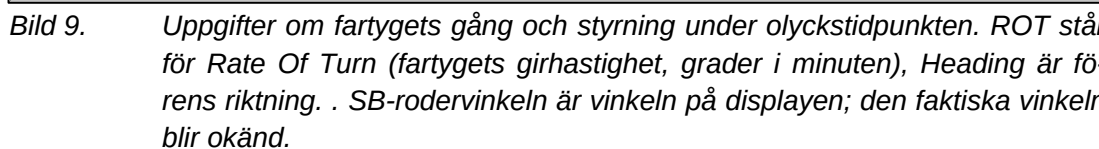
Under S-krökens raka del användes autopilot och vaktbyte blev möjlig kl. 15.32¹³. Man började nu samla ihop de iakttagelser som man tidigare hade gjort och en mer systematisk analys av situationen började. Man berättade till den nye linjelotsen att styrningen hade fungerat korrekt tills giren som började kl. 15.15. Den nye linjelotsen övergick till handstyrning strax efter att ha börjat den följande giren till styrbord. Han konstaterade kl. 15:35:22 i slutet av denna första gir som han körde att det inte var möjligt att ordentligt stanna fartygets gir genom att använda motroder (stöttning). Problemen fortsatte i den följande små giren till babord och linjelotsen misstänkte fel i displayen för rodervinklarna. I detta skede, då det hade gått ca 20 minuter efter att manövreringsproblemen upptäcktes, uttryckte man för första gången högt misstankar om att fartygets ovanliga beteende inte berodde på faktorer i omgivningen utan att felet låg i själva fartyget. Efter detta gjorde man en normal trafikanmälan till Archipelago VTS; styranordningarnas avvikande beteende hade inte gett klar orsak till att avbryta resan.

Ca kl. 15.38 märkte man att fartyget inte vände eller vände dåligt mot babord. Efter att ha gjort en liten gir med autopilot mot babord gjorde man en liten kursändring mot styrbord. Autopiloten försökte stötta giren till styrbord och tog 20–30 grader till babord, med giren pågick vidare och man övergick först till handstyrning och sedan till nödstyrning. Klockan 15:40:07 beslöt linjelotsen att styra fartyget till en farledsbreddning som låg nära förom fartyget. Han körde huvudmotorerna först tvärs över och sedan tog han full back. Befälhavaren kallades till bryggan kl. 15.40.45 och han stoppade fartyget i breddningen med hjälp av roderpropellrar. Klockan 15:44:05 underrättades Archipelago VTS om att fartyget hade tekniska problem.

Senare testade man hur styrningen fungerade och man klarade av att flytta fartyget till Delet. Där väntade man på bogseringsassistans och körde fartyget medsols i en ellipsformad rutt, utan att störa övrig trafik. Med bogserbåten anlände en dykare. Då dykaren, efter att vädret hade blivit bättre, kunde dyka, konstaterade han att styrbords roderaxel var av. Fartyget anlände till Åbo knappt ett dygn försenat.

De viktigaste variablerna då axeln gick av är sammanställda i bild 9.

¹³ Vaktbyte är omöjligt under handstyrning.



Skadorna på fartyget

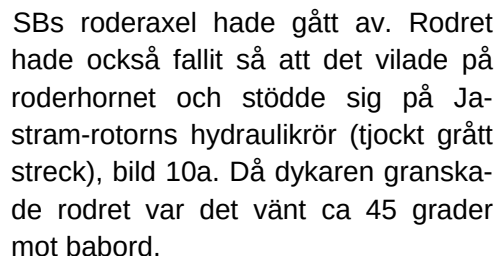


Bild 10a. SB-rodrets uppskattade läge (om rodret är midskepps) efter att roderaxeln hade gått av. Lutningen i längdriktningen var 3-4 grader. De svarta prickarna visar möjliga stödpunkter efter att roderaxeln hade gått av.

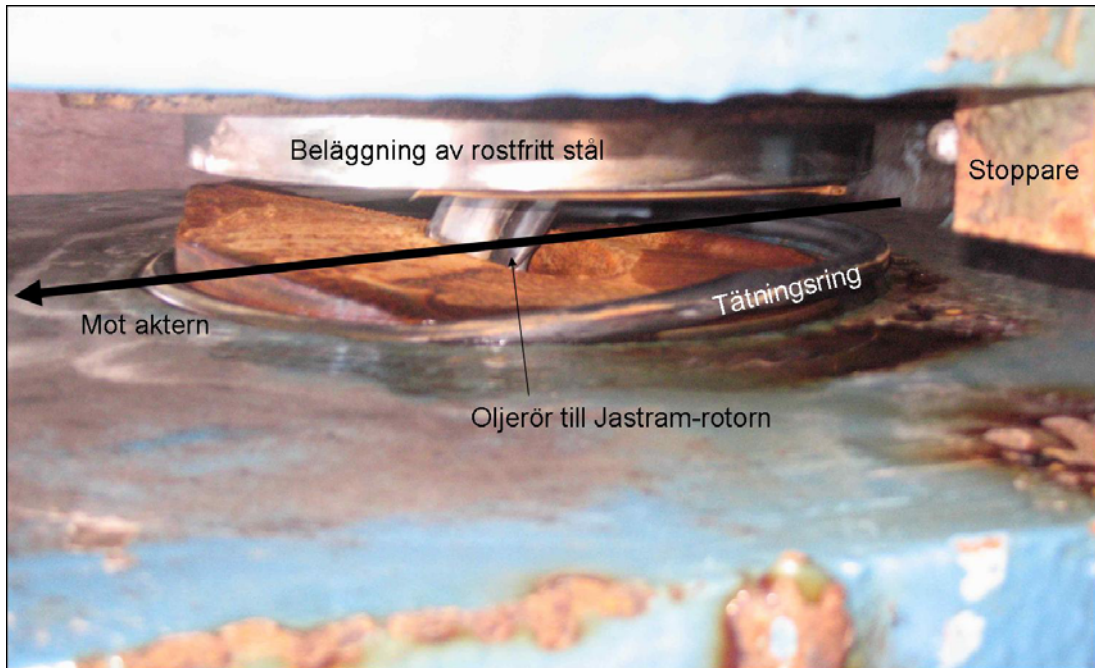


Bild 10b. SB-roderaxeln som hade gått av fotograferad i Riga den 28 november 2009. Rodret hade fallit ca 5 cm neråt och flyttat sig lite mot aktern. Rören som går till Jastram-rotorn syns mitt i bilden. Rodret är i centerläge och pilen visar mot aktern.

Epoxifyllningen som hade gjutits i reparationen år 2004 och skruvarna hade försvunnit helt från SB-sidan och delvis från BB-sidan. Bronsbussningen i SB-rodertappslager hade fallit 130–140 mm och lutade mot rodret, bild 11.

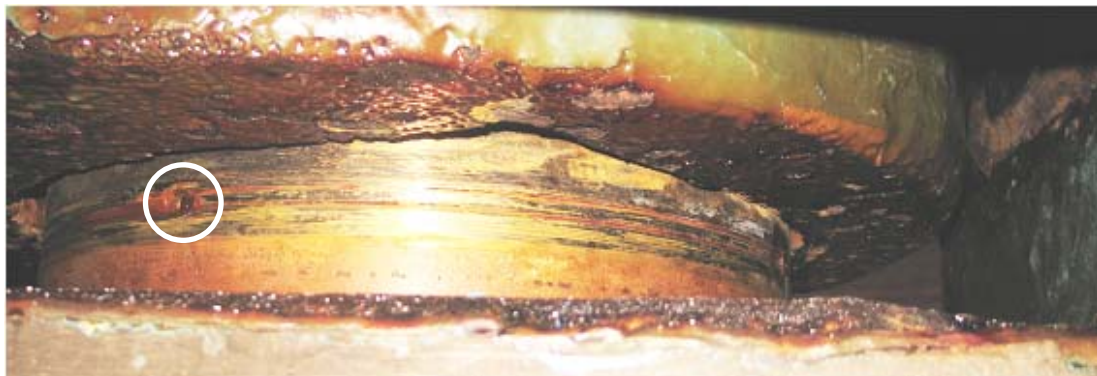


Bild 11. SB-rodertappslager fotograferat den 2 december 2009 på så sätt att hålet från vilket epoxin har försvunnit syns i bilden. Innersidan, förens riktning, är till vänster. En av bussningens installationsskruvar är märkt ut med en vit cirkel.

I bild 11 syns en av de skruvar som användes vid installationen av epoxigjutningen år 2004. Skruvens område av bussningen har blivit synlig i det skede då rodret har fallit neråt. Rodret har fallit en sträcka motsvarande den skarv som syns ovan om roderhornet. Dessutom observerades fretting-sprickor i roderaxeln, i övre delen av konen, samt flera sprickor i rodren och roderhornen. Ytorna av rodren var ställvis korroderade, bilderna 12 och 13.

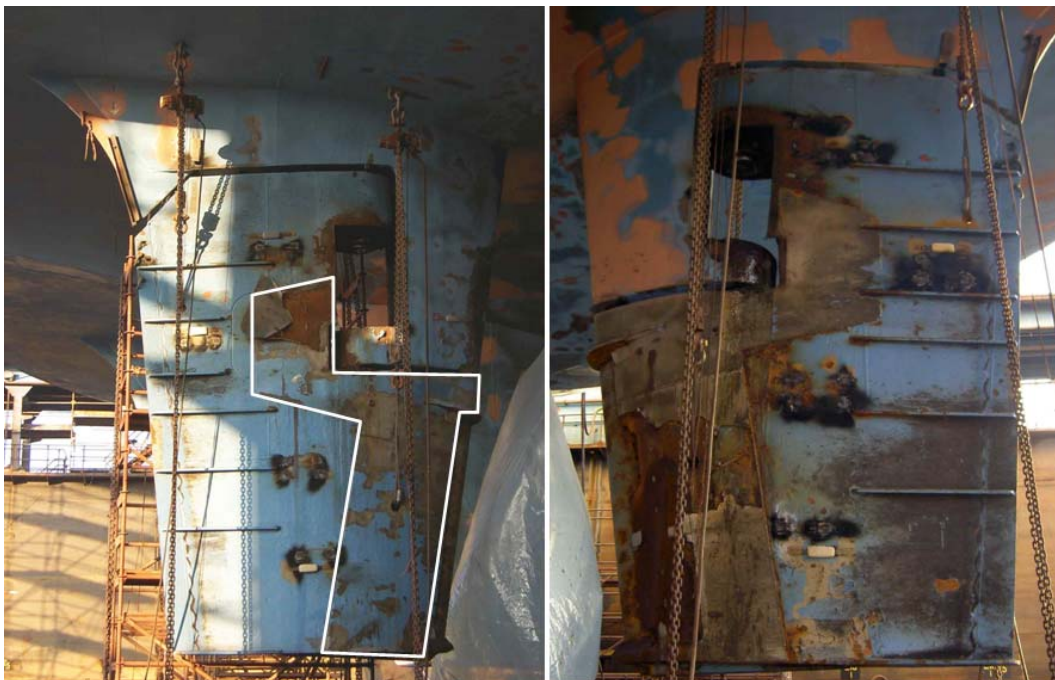


Bild 12. SB-rodret i Gdansk den 3 december. Yttersidan till vänster, insidan till höger. På området inringat med det vita strecket fanns det ett lager rostfri stålplåt på rodrens bågge ytor.

Området belagt med rostfri stålplåt är inringat med ett vitt streck i bild 12. Stålplåten fanns på alla fyra ytor. Rodrens skick hade även tidigare varit mycket liknande.

Det fanns kraftig korrosion orsakad av kavitation på ytterkanten av bågge hornens lagerhus, på mittlinjens sida. På de övre delarna var de korroderade ställena så djupa att hornets hållbarhet äventyrades.



Bild 13. Kavitationsskador på roderhornet. Till vänster BBs sida (fotograferat den 3 december) och till höger SBs sida (fotograferat av Trafiksäkerhetsverket den 4 december), bågge på insidan.

1.4 Räddning och alarmering

Inget alarm gjordes, men Archipelago VTS underrättades om situationen. En passagerare hade informerat MRCC om situationen. MRCC tog kontakt med fartyget. Befälhavaren uppskattade att situationen inte krävde andra räddningsåtgärder förutom bogseringshjälp: fartyget var manöverbart och sjödugligt. Befälhavaren såg inget behov av att börja med evakueringsåtgärder eftersom fartyget var oskadat och kunde styras. Passagerarna informerades om situationen och dess utveckling.

1.5 Säkerhetsutredning av olyckan

Skadan, *brottet av SB-roderaxeln*, som förorsakade tillbudet, ägde rum på en smal och krokig farled, som var livligt trafikerad. Det fanns sammanlagt ca 1660 personer på fartyget och också last klassad som farligt gods. Försämringen av manöverbarheten mitt i krävande girar kan leda till att fartyget driver åt sidan från farleden med stor hastighet och går på grund eller kolliderar. Det är dock skäl att komma ihåg att det ena rodret enbart är en av flera anordningar på fartyget som används för styrning.

Det är ytterst sällsynt att en roderaxel går av. Något motsvarande har inte hänt i Finland, och från klassifikationssällskapen erhöles uppgifter endast om två dylika fall¹⁴. Rodreraxeln löstages inte för inspektion i samband med dockningar¹⁵. Säkerhetsutredningen är den första av sitt slag och därför finns det varken en modell eller en färdig uppfattning om det skedda tillgänglig.

Säkerhetsutredningens innehåll blev som följer:

1. Klarläggning av fartygets historia samt åtgärderna utförda på rodren
2. Samling och analys av VDR-data
3. Undersökningarna utförda efter olyckan på rodret och dess delar
4. Utvärdering av de krafter som påverkar rodren
5. Uppskattning av roderaxelns utmattningshållbarhet
6. Uppskattning av kontroll under olyckssituationen
7. Utvärdering av rodrets tillverknings- och reparationsprocesser

Beskrivningar av dessa teman och utredningsresultaten finns i rapportens punkter 1.5.1–1.9.

1.5.1 Fartygets och rodrens historia

På basis av de uppgifter som man har erhållit om fartygets bruk kan det konstateras att styrinrättningen inte har utsatts för extra påfrestningar i form av t.ex. grundstötningar. Däremot har rodret under vintersäsongen belastats av ismassor.

Tabell 1. *Fartygets rutfördelning 1993–2004 och 2004–2009.*

Rutt	1993–2004		2004–2009	
	månader	%	månader	%
Åbo-Mariehamn-Stockholm	54	26,9	0	0
Helsingfors-Mariehamn-Stockholm	0	0	1,5	0,7
Helsingfors-Stockholm	22	10,9	0	0
Åbo-Mariehamn/Långnäs-Stockholm	36	17,9	39,5	19,7
Åbo-Mariehamn/Långnäs-Kapellskär	37,5	18,7	10,5	5,2
SAMMANLAGT	149,5	74,4	51,5	25,6

¹⁴ Det Norske Veritas, Casualty Information 2/00, korrosionen hade fastställts som orsaken till brottet. Bureau Veritas e-post den 31 maj 2011, axeln hade gått av under fartygets färd.

¹⁵ Enligt Bureau Veritas regler inspekteras bl.a. de synliga delar av roderaxeln regelmässigt. Om inspektören anser nödvändigt löstages rodret eller dess inspektionsplåtar tas bort för att granska nedre lagret. (Utlåtande av Bureau Veritas om rapportutkastet, utredningsrapportens bilaga 1). Observera att dessa paragrafer inkluderar ingenting beträffande löstagning av roderaxeln.

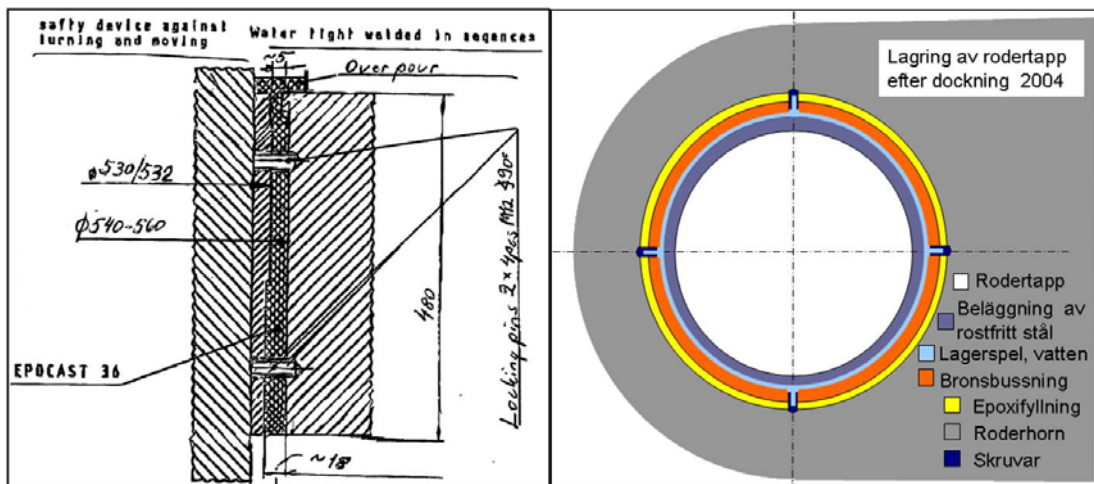
I utredningen har man kartlagt fartygets dockningar under dess 17-åriga brukshistoria samt kontroller, underhåll och reparationer utförda på roderinrättningen under dessa dockningar. De dockningar då spelen har mätts finns i tabell 2. I bild 15 har man framställt resultaten av spelmätningarna. I denna förkortade version av undersökningsrapporten framställs endast åtgärderna utförda i samband med dockningarna 2004 och 2007, eftersom den 2004 utförda reparationen av rodertappslagret spelade en avgörande roll i brottet av SB-roderaxeln och skicket av reparationen granskades år 2007. Dockningen år 2009 framställs främst med hjälp av bilder.

Turku Repair Yard 30.8–8.9.2004. Antagligen p.g.a. de ökade spelen upptäckta i dockningen år 2002 förde fartyget med sig arbetsstycken för rodertappslagrets bronsbussningar¹⁶. Bronsbussningarna av bågge rodrens rodertappslager hade fallit ca 50 mm. Alla låsskruvar från övre kanten saknades. Man konstaterade att spelen åter hade vuxit och att de överskred den gräns som klassifikationssällskapet tillät. Spelmätningen gjordes på så sätt att man mätte förslitningarna i den nedre axeln och bronsbussningen (insidan). I spelmätningen upptäckte man sannolikt inte korrosionens hela omfattning. Den fick man reda på genom att mäta öppningen av rodertappslagrets lagerhus¹⁷. Öppningen visade sig vara för stor för enbart bussningen. Öppningen var inte cirkelformig. P.g.a. den korta dockningstiden letade man efter en sådan reparationslösning som man hade tid att genomföra. Påsvetsning i lagerhuset med efterföljande arborning kom inte på fråga. Man beslöt att fylla det korroderade stället med gjutepoxi av märket Epocast, som används allmänt i monteringen av maskinerier, bilderna 14a och 14b. På reparationsvarvet hade man inte använt i ett fartyg av SILJA EUROPAs storlek detta reparationsmetod.

Planeringen av epoxigjutningen utfördes under några dagar genom att byta realiserings-skisser med fax mellan leverantören av epoximaterialet, epoxigjutningens utförare och rederiet. Samtidigt gick man diskussioner med en representant från klassifikationssällskapet. Det har inte kommit till utredarnas kännedom att reparationens hållfasthet och hållbarhet skulle ha uppskattats med hjälp av kalkyler.

¹⁶ I varvets förteckning över arbetsorder var arbetet nummer 5100: "ersättning av rodertappslagren SB/BB genom att demontera rodren".

¹⁷ Mätningen och axelns linjering utfördes av en specialist från Kvaerner Masa Yards.



Bilderna 14a och 14b. Epoximassans installationsritning (a, till vänster) och ett genomsnitt av rodertappslagret (b, till höger) vid dockningen år 2004. Skruvarnas sexkantshål, som fylls med vatten, har ritats så att de syns.

Efter att ha fallit 50 mm hade bronsbussningen roterat i lagerhuset så länge att det i övre delen av huset hade uppstått en kant på ca 7 mm, på ett 50 millimeters område. Hornets öppning utjämnades och förstörades något genom slipning. Det gjordes tre fördjupningar i överdelen för epoxigjutningen. Bronsbussningarna i bägge rodertappslagren var mycket slitna och de ersattes med nya, i vilka det i stället för 1 ansats fanns flera ansatser på ca 1 mm, se bilderna 23a och 23b. Båda ytorna av bussningarna var sannolikt lämnade så som de var efter bearbetning (krossning) och de hade inte rengjorts.

Man göt epoximassan (Epocast 36¹⁸) uppifrån i sprickan mellan bronsbussningen och lagerhuset på så sätt att det uppstod ett brätte, bilderna 14a och 14b samt 5c. Det fanns ett motstycke i nedre ändan under gjutningen. För att centrera bronsbussningen användes insexskruvar som gick genom bussningen och epoxin, se bilderna 14a och 14b.

Klassifikationssällskapet skrev ett Memorandum No. 5, vilket innebar att reparationen ansågs som permanent och var för kännedom för rederiet.

Skrovet inspekterades omkring roderaxlarnas övre lagren (ytan av gjutet) med magnetisk pulver¹⁹. Inga skador upptäcktes, men trots det installerades nya tätningar i övre lagret. Granskningen nådde inte till roderaxlarna.

Turku Repair Yard 21–25.1.2007. Spelen mättes och konstaterades uppfylla kraven, men under mätningen var rodret vänt helt in och mätresultatet är inte jämförbart. Klassifikationssällskapets inspektör granskade enligt sin utsago skicket av rodertappslagrets nedre kant. P.g.a. det trånga utrymmet omfattade granskningen 270–300 grader runt lagret. Epoxigjutningen verkade vara hel, det syntes inga sprickor och det lossade ingenting från den med kniven.

¹⁸ H.A.Springer marine + industrie service GmbH handelsnamn. Tvåkomponent. Till skillnad från motsvarande produkter som sprids ut används benämningen "gjutepoxi". Om det inte finns risk för missförstånd har man också använt kortformen "epoxi".

¹⁹ Granskningsprotokoll, Inspecta Oy den 2 september 2004 beträffande granskningen med magnetisk pulver. Ytans skick "gjuten, förensning med sandbläsning".

Remontowa, Gdansk, 30.11–18.12.2009. SB-roderaxeln hade gått av och det fanns sprickor i övre delen av BB-roderaxelns kondel. Sprickor hittades också i rodren, i roderhornet och ovanför roderhornet. Från styrbords rodertappslager var epoxin helt borta, från babords delvis. Då man tog loss babords bronsbussning blev en del av epoxin fast i lagerhuset.

Rodertappslagrens lagerhus reparerades genom att svetsa flera lager på hålet. Till sist ursvarvades insidan så att den motsvarade den nya bronsbussningens mått och utsidan slipades jämn.

1.5.2 Lagerspelen och rodertappslagrets fria utrymme

Med *lagerspel* (*spel*) menas skillnaden mellan bussningens inre diameter och axelns diameter. Rodertappslagrets fria utrymme består av ett halvt spel till vilket man tillägger det eventuella fria utrymme som sprickan mellan bussningens utsida och lagerhuset vägg tillåter. Sprickan kan uppstå t.ex. genom korrosion.

Spelmätningarna genomförs normalt då rodret är i mittläge, i längdriktning och tvärriktning på fyra ställen på nedre kanten av lagret. Mellanrummet mellan ställena är 90 grader (i längdriktningen "aft-fore" och på tvären "SB-BB"). **Spelens mätningssätt** spelar en stor roll i resultatens reliabilitet och deras analys. *Toleranstolk* används för att få reda på storleken av sprickan mellan beläggningen och bussningen (rostfritt stål och brons) vid mätpunkten på nedre kanten av lagret. Spelet är summan av de från olika sidorna mätta sprickorna.

Ett annat vanligt sätt att mäta spel är att använda domkraft eller talja. Rodret skjuts med domkraft (eller dras med talja) tills den rostfria stålbussningen träffar bronsbussningen, dvs. rörelsen tar slut. Förskjutningen avläses från en mätklocka. Summan av de från olika håll mätta förskjutningarna utgör spelet.

Rodertappslager. I tabell 2 har man framställt mätresultaten och intervallerna mellan dockningarna. Spelen för rodertappslagret har oftast mätts med toleranstolk från lagrets nederkant, men också lyft med domkraft kan ha använts. I de flesta fallen är det osäkert vilken mätmetod som har använts. Mätmetoderna framställda i tabellen är utredarnas antaganden som baserar sig på de förda diskussionerna. De mätmetoder som antas vara säkra är märkta med grått.

Tabell 2. Fartygets dockningar och mätningarna av rodertappslagrets spel²⁰. För åren 2004 och 2009 har mätresultatet visats både före och efter reparationen.

Datum	Docknings intervall, månader	Rodertapps lagerspel				Skeppsvarv	Docknings längd, dagar	Mätnings teknik
		BB-rodertapp		SB-rodertapp				
		på tvären	på längden	på tvären	på längden			
1.9.92		1.90	1.80	1.80	1.80	Meyerwerf		toleranstolk
3.9.93		1.80	1.95	1.80	1.95	Vuosaari/Kotka Shipyard	8	toleranstolk
16.1.95	16.4	2.05	1.80	2.15	1.65	Turku Repair Yard	5	domkraft/toleranst
5.9.95	7.6	1.95	1.85	1.95	1.80	Vuosaari/Kotka Shipyard	5	toleranstolk
1.9.97	23.9	2.20	2.00	1.25	1.35	Turku Repair Yard	5	toleranstolk
18.1.00	28.6	2.15	2.10	2.60	2.00	Finnyards, Rauma	11	domkraft/toleranst
4.9.02	31.5	3.25	3.40	3.30	3.20	Helsinki Repair Yard	6	toleranstolk
4.9.04	24.0	4.32	4.02	4.57	3.82	Turku Repair Yard		bussning-axel
8.9.04		2.57	2.20	2.44	2.20	Turku Repair Yard	10	bussning-axel
25.1.07	28.6	1.30	-	1.60	-	Turku Repair Yard	5	toleranstolk
4.12.09	34.3	4.43	3.80	3.42	2.13	Remontowa, Gdansk		bussning-axel
17.12.09		1.80	1.80	1.80	1.75	Remontowa, Gdansk	20	bussning-axel

De mätta spelen för rodertappslagret i längdriktning och några gränsvärden för spelet har framställts i bild 15. Det har inte varit möjligt att säkerställa jämförbarheten av resultaten av spelmätningarna utförda under olika tidpunkter. I praktiken byts bronsbussningarna om spelet klart överskrider 2 mm.

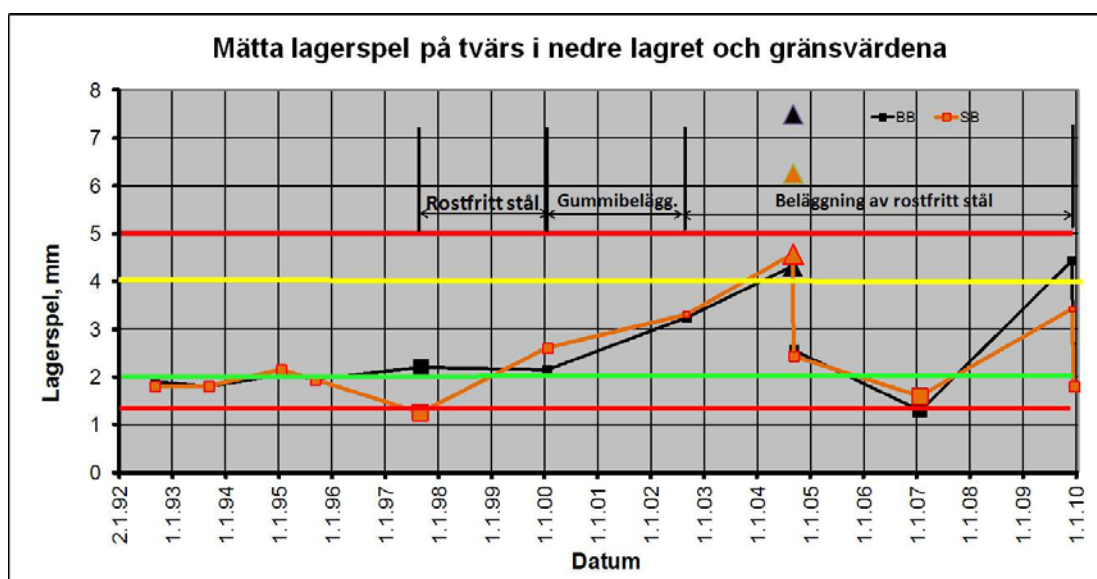


Bild 15. Spelmätningar av rodertappslagren, motsvarar tabell 2. De mätningar i vilka rodret var vänt mot sidan har indikerats med en större fyrkant. De största spelen har mätts mellan bronsbussningens inre diameter och nedre axelns diameter. Den raka gröna linjen framställer ett vanligt godtagbart spel på 2 mm, den gula linjen klassifikationssällskapets varningsgräns och den röda linjen en absolut undre och övre gräns med måtten för SILJA EUROPAs roderaxel. Tidsintervallerna för de tillagda lagren av nya material visas också.

Korrosionen i rodertappslagret spelade en avgörande roll i böjningen av roderaxeln i SILJA EUROPAs fall. Denna korrosion mångdubblade enbart den böjning som möjliggjordes av spelet. Korrosionen berodde på galvanisk korrosion. Korrosionen så gott som

²⁰ Otillförlitliga mätningar har märkts ut med kursiv, och de som har märkts med fetstil har tagits med i bilden.

upphörde efter reparationen år 2004. I bild 16 har korrosionen antagits vara så stor att bussningen har fallit. Situationen var dylik då fartyget anlände till reparationsvarvet år 2004. I fortsättningen används termen *fritt utrymme* för rodertappslagrets möjlighet att överlag röra sig. Det fria utrymmet är olika stort på rodertappslagrets olika nivåer och vid olika punkter på ringen. Rodertappslagret rör sig i tvärriktning ca 8 gånger i sekunder, vilket får vattnet att röra sig i spelet och det korroderade utrymmet (samt i sexkantshålen efter år 2004) och försnabbar korrosionen.

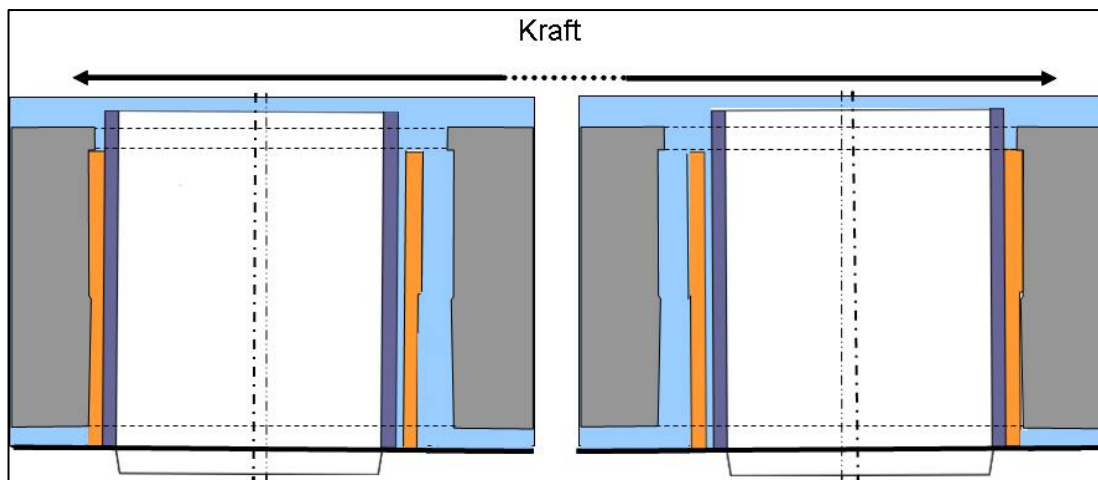


Bild 16. Rodertappslagret sett från aktern. Till vänster är roderaxeln böjd till vänster och till höger är den böjd till höger. Nedre axeln och bussningen som föll, förflyttade sig ± 15 mm från sida till sida p.g.a. lagerhusets korrosion. På samma gång lutar rodret. Lagerhusets höjd är 480 mm och lagrets diameter 533 mm.

Då man tar i beaktande den ovala formen av rodertappslagrets lagerhus tvärsnitt och de eventuella ojämnheter på ytan, kan man tala om "**tillgängligt fritt utrymme**", i vilket formen av bussningens yttre kant, lagerhusets ovala form och väggens ojämnheter har bedömts och tagits i beaktande.

Genom att kombinera mätresultaten ovan och uppskattningarna av korrosionens utbredning har undersökningen kommit fram till följande syn på utvecklingen av rodertappslagrets tillgängliga fria utrymme, bilderna 17a och 17b. De streckade linjerna har använts för att visa det uppskattade osäkerhetsområdet.

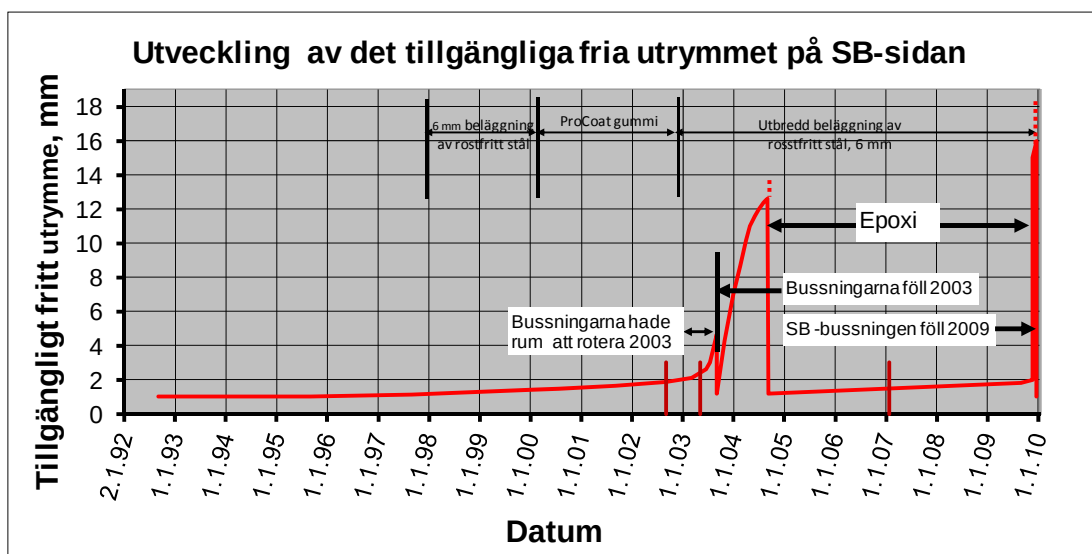


Bild 17a. En uppskattning av utvecklingen av **det tillgängliga fria utrymmet** för SBs rodertappslager. Man har antagit att då bussningen år 2009 föll blev epoxin fortfarande kvar. Efter att epoxin hade försvunnit, ökade det fria utrymmet språngartat. Den streckade linjen visar maximiuppskattningen. Dockningstidpunkterna år 2002, 2003 (spelen granskades inte) och 2007 (spelmätningen var inte jämförbar) har visats med bruna vertikala linjer.

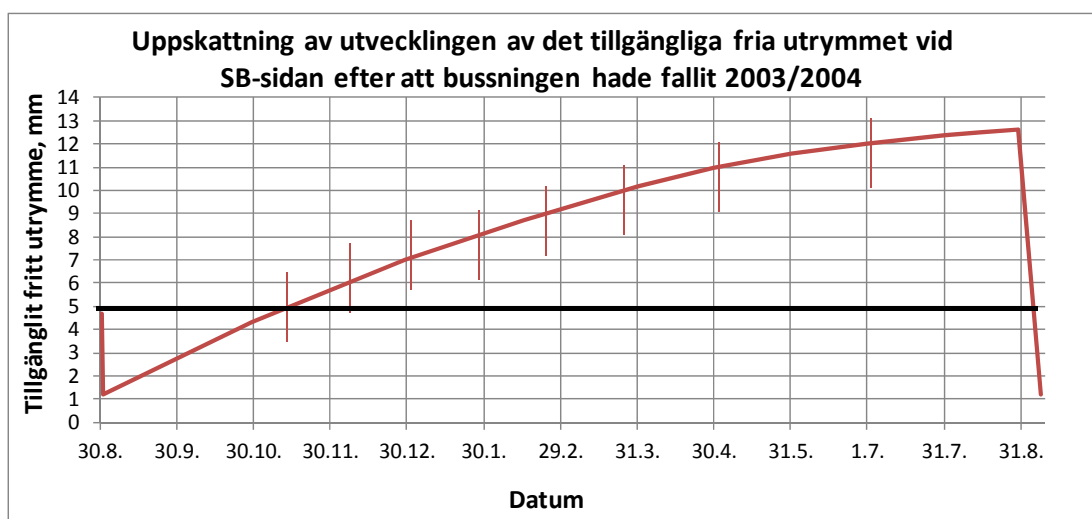


Bild 17b. En uppskattning av utvecklingen av **det tillgängliga fria utrymmet**. Uppskattningen har preciserats från bild 17a. I bilden har man med vertikala linjer visat tidsintervallen av de fria utrymmen som är över 5 mm med 1 mm mellanrum. I undersökningen har man bedömt att bussningen på BBs sida föll något tidigare.

I bild 17b finns också ett ungefärligt gränsvärde (ca 5 mm) för det tillgängliga fria utrymmet definierat på basis utmattningskalkyler. Under detta gränsvärde ligger den växlande utmattningsspänningen under utmattningsgränsen.²¹

I bild 18 har man framställt de viktigaste strukturerna av rodertappslagren vid olika tidpunkter på basis av mätningar utförda i tvärriktning.

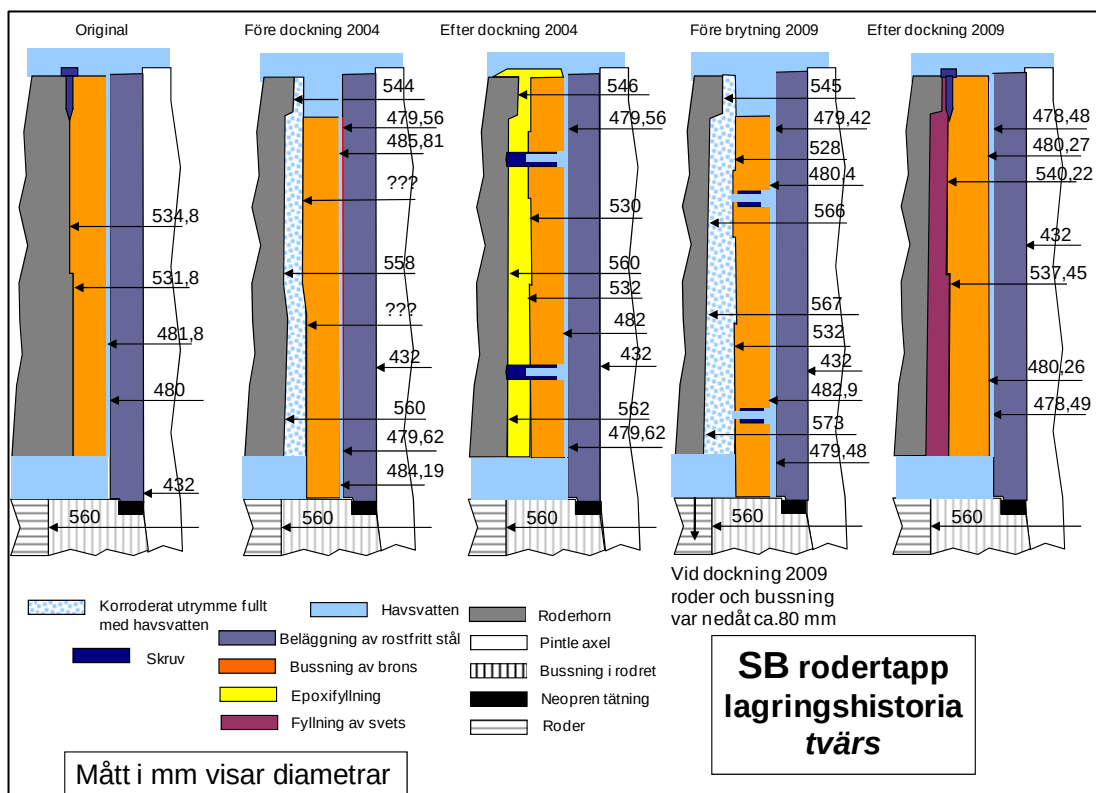


Bild 18. Vissa mätresultat i tvärriktning för SBs rodertappslager.

Vid utarbetningen av bilden har man antagit att den eventuella ansats som lämnades kvar vid bussningen slipades bort år 2004 och att väggen utjämnades även på andra ställen, då man sannolikt avlägsnade 1-2 mm material.

Kanske fram till **sommaren 2003** ökade det fria utrymmet långsamt enbart p.g.a. korrosion. Efter det kunde bussningarna rotera, till en början lite och till slut fulla varv. Rotationen förslet korrosionsrosten, vilket gjorde ökningen av det fria utrymmet betydligt snabbare. Till slut fanns det så mycket utrymme runt lagerhuset att bussningarna föll.

När bussningen föll, minskade det tillgängliga fria utrymmet (bild 17a) så att det motsvarade halva spelet, eftersom det i väggen av lagerhuset fanns en motsvarande ansats för bussningen. Bussningarna roterade fortfarande, vilket ledde till att ökningen i det fria utrymmet förblev stor. Senare blev förslitningen något långsammare. Detta berodde på att då det fria utrymmet var större var det endast de högsta roderkrafterna som förorsakade

²¹ Utmattningsgränsen betyder ett sådant empiriskt fastställt gränsvärde för den utmattande spänningen som förorsakar ett brott när man ökar antalet av cykler till ett mycket stort värde, över en miljon då det är fråga om stål. Många material, till exempel aluminium har ingen utmattningsgräns.

en så stor böjning att rodertappslagrets bussning kunde träffa lagerhusets vägg. Som störst var det tillgängliga fria utrymmet 12–13 mm.

Före år 2009 ökade korrosionen med ytterligare några millimeter och skruvarna gick av, vilket ledde till att SB-bronsbussningen föll. Det fria utrymmet förblev dock litet eftersom det antagligen ställvis fortfarande fanns gjutepoxi fast i lagerhuset. Efter att epoxin hade kommit helt loss växte det fria utrymmet **plötsligt till 16–18 mm (spelet 32–36 mm)**.

I Gdansk återställdes situationen till att motsvara den ursprungliga strukturen på så sätt att tjockleken av bronsbussningen ökades till ca 2,5 mm, dess inre diameter bearbetades till 480,3 mm och nedre axelns tjocklek till ca 478,5 mm.

1.5.3 Rodertappslagrets fria utrymme och spänningarna i roderaxeln

Det fria utrymmets inverkan på roderaxelns böjningsspänning har granskats ungefärligt med hjälp av rodrets balkmodell, bild 19. Den kritiska punkten för roderaxeln ligger i nedre delen av övre lagret, där spänningen är som störst och där bristningen ägde rum.

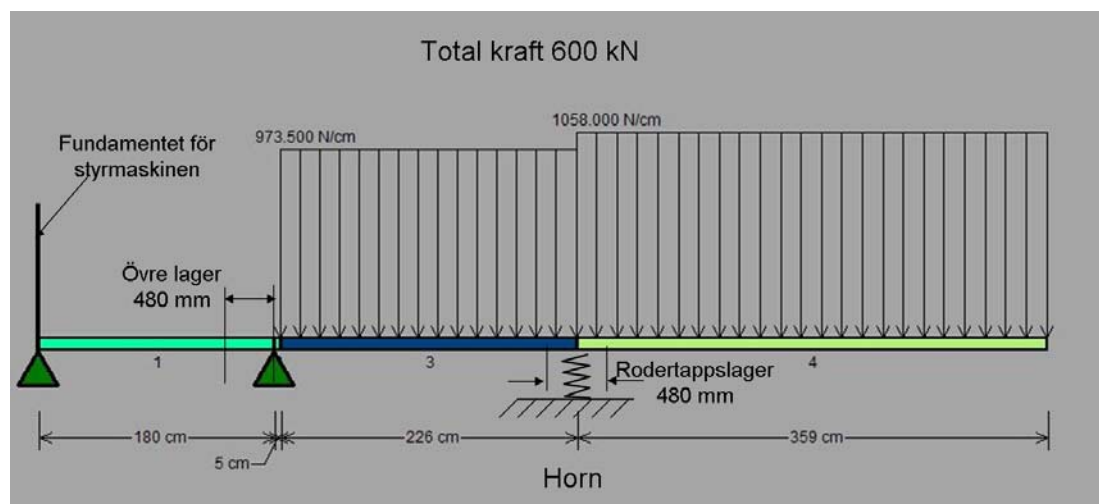


Bild 19. Balkmodellen som utnyttjades i undersökningen av rodret. De olika delarna i balken visas med olika färger eftersom de olika delarnas böjtröghetsmoment och böjmotstånd är olika. Balken är fritt upplagd och motsvarar klassifikationssällskapets antaganden. I verkligheten var monteringen något styvare.

Bild 20 framställer det beroendeförhållande som roderaxelns böjspänning har med den böjande kraften. Den blå, tjocka kurvan motsvarar en situation i vilken den balk som roderaxeln och rodret bildar böjer sig utan det stöd som roderhornet ger. Då axelns sträckgräns överskrids blir situationen oklar, och därför finns det två gränskurvor i bilden²². Den punkt där hornet börjar bära har också märkts ut i bilden med ett intervall av en millimeter tillgängligt fritt utrymme. Spänningens ökning vid ökande kraft blir långsammare då hornet börjar inverka.

²² De maximala spänningar som uppstår på roderaxeln då krafterna som böjer rodret växlar, är tidsmässigt så korta, att spänningen kan överskrida den i ett standardenligt dragprov erhållna sträckgränsen

Den dimensioneringskraft som motsvarar klassifikationssällskapets dimensioneringsformler är ca 1700 kN. I bilden har situationen framställts enbart till 1000 kN, eftersom mycket stora krafter är sällsynta undantag.

Man antar att torsionsspänningen enbart lite beror på spelen för rodertapps- och övre lagren, vilket innebär att torsionsspänningens proportionella andel minskar då böjspänningen växer. Den genomsnittliga torsionsspänningen är ca 3-5 N/mm² för 100 kN roderkraft.

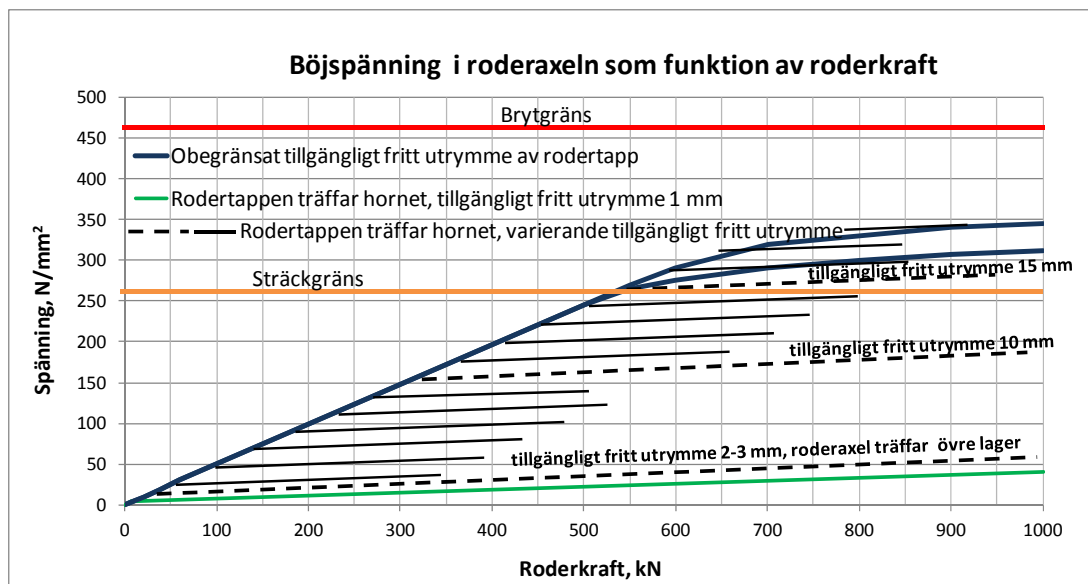


Bild 20. Förhållandet mellan **böjspänningen** av en **intakt** roderaxel och roderkrafter med olika tillgängliga fria utrymmen för rodertapps-lagret. Spänningen stiger då roderkraften stiger i enlighet med den blå, tjocka kurvan ända tills rodertapps-lagret vilar på hornet. Efter det stiger spänningen långsamt. Efter att spänningen överstiger sträckgränsen är situationen så oklar att enbart de antagna gränskurvorna har visats.

Vid övre lagret påverkas roderaxeln av en skjuvkraft. Den spänning som denna kraft skapar är liten då rodertapps-lagret är i skick. I praktiken är den kombinerade spänningen som består av torsion och böjning avgörande även med stora tillgängliga fria utrymmen. Denna spänning har använts i kalkylerna.

1.5.4 Samling och analys av VDR-data

VDR-utrustningen har registrerat data av tre olika slag. Numerisk data har registrerats med en sekunds mellanrum, bilderna från Conning-displayen med 25 sekunders mellanrum och från radarskärmen med 15 sekunders mellanrum. Diskussionerna som fördes på bryggan, diskussionerna med fartygen i närheten och med VTS har också registrerats. Dessa uppgifter har använts för följande ändamål:

- Roderkrafterna kalkylerades med hjälp av manövreringens simulationsmodell²³. På basen av dessa krafter fastlogs styrkan och riktningen av den kraft som böjde roderaxeln. De kalkylerade krafterna kombinerade med hastigheterna och varvtalen utgjorde basis för en frekvenstabell.
- Förändringar i rodervinklarna, girhastigheten och fartygets riktning jämfördes från tiden några timmar innan fartyget stannades med motsvarande information från en vecka före olyckan då axeln fortfarande kunde antas ha varit hel. På detta sätt försökte man bedöma tiden och platsen för axelns brott.
- Med hjälp av fartygets positionsinformation utreddes fartygets rutt för några timmars tid innan fartyget stannades. Rutten ritades på ett kartunderlag och resultatet jämfördes med den eftersträlvade rutten²⁴.
- Med hjälp av bild- och ljudinspelningar bedömdes bryggbesättningens verksamhet.

Tre olika tidsintervaller valdes, och med hjälp av dem skildrades fartygets hela historia:

1. Från Mariehamn till Delet den 22 november 2009 ända till kl. 21.20.
2. Från Mariehamn till Stockholm och tillbaka till Mariehamn 21–22.11.2009.
3. Några tur- och returesor Åbo-Stockholm, med ca två veckors mellanrum 29.10–1.11 och 8–11.11.2009.

Den historiska informationen som fanns i de kurvor som utarbetades på basis av VDR-datan var inte tillgänglig på kommandobryggan; displayerna visade uppgifter endast i realtid.

1.5.5 Undersökning av rodren - de faktorer som ledde till utmattningsbrottet

Roderaxlarna, rodertappslagrens bronsbussningar inklusive skruvar och epoxibitar sändes till VTT för närmare undersökningar. Huvuddelen av VTT:s undersökningsresultat gällande metalldelar finns i rapport²⁵ som är arkiverad vid Olycksutredningscentralen. En magnetpulverprovning utfördes på roderaxlarna. Yttersidan av den brutna roderaxelns brottyta undersöktes på VTT med stereomikroskop och av axeln togs metallografiska provstycken som undersöktes med ett optiskt mikroskop. De sprickor som hade upptäckts på utsidan av brottstället på den brutna axeln öppnades och sprickornas öppnade brottytor undersöktes med ett svepelektronmikroskop. Sammansättningen av materialet använt för den brutna axeln fastlogs med en optisk emissionsspektrometer. Hårdheten av axelstålet, bronsbussningarna och de installationsskruvar som användes år 2004 mättes och hårdheten av rodertappslagrets lagerhus uppskattades på Vickers-enheten.

²³ Simulco Oy

²⁴ Simulco Oy

²⁵ VTT:s rapport VTT-R-0222-10.

Det gjordes två provstavar av den brutna axeln. Provstavarna utsattes för dragprov. De viktigaste resultaten har sammanställts nedan.

Brottytorna. Då den brutna axelns brottytor undersöktes (bild 21), hittade man i den punkt där konen blir cylindrisk en skarphörnig ansats på 0,3 mm (bild 22). Det har uppskattats att ansatsen hade en betydande ansatseffekt som minskade utmattningshållfastheten. Denna punkt runt axeln följer i huvudsak väl brottytans kant. På ytorna kan man skönja *bågar som visar hur brottet framskridit*, stoppspår ("tidsringar"), som böjutmattningen har orsakat. Från brottytans utseende kunde det också härledas att det slutliga brottet har skett i form av ett *klyvbrott*²⁶ och att SB-rodret var vänt några grader inåt då det gick av.

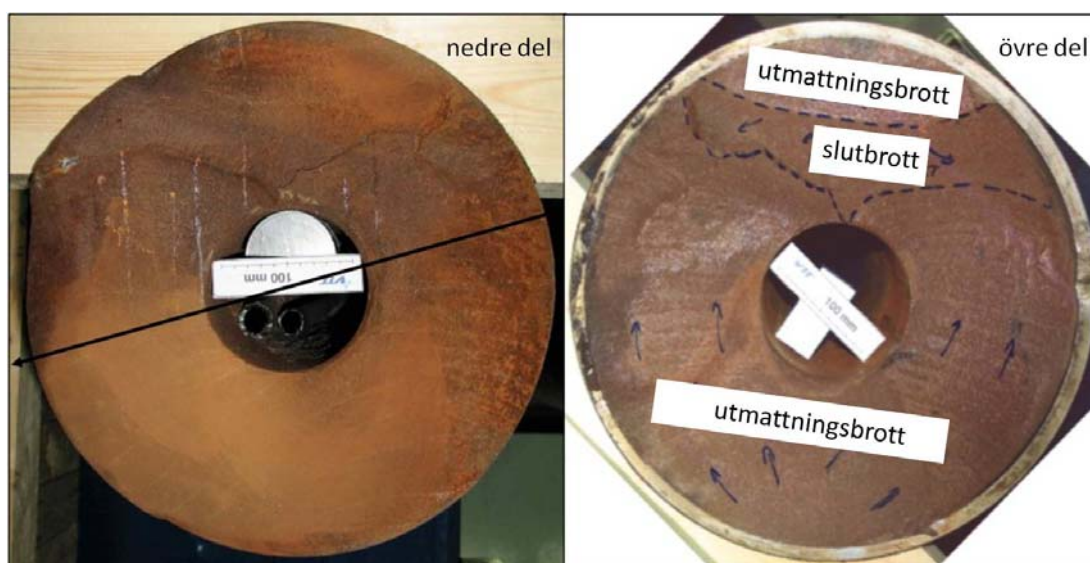


Bild 21. Den brutna axelns övre del till höger och nedre del till vänster. På den övre delen ser man den av rostfritt stål gjorda beläggningen på axeln. I övre kanten har man ritat gränserna för utmattningsbrott och det slutliga brottet. I nedre delen har man märkt ut riktningen mot aktern då rodret är midskepps. Man har försökt ställa halvorna så att ställningen motsvarar varandra. Bilderna från VTT.

Ansatspunkten på BB-axeln efter den bearbetning på 0,2 mm som gjordes i Gdansk var enligt VTT:s gjutformmätning så som kan ses i bild 22. Det har inte varit möjligt att utreda formen på den ursprungliga ansatsen. Det är inte uteslutet att det inte skulle ha funnits en likadan vass ansats i BB-axeln som det fanns i den brutna SB-axeln. Bredvid ses motsvarande punkt på en reservaxel som togs i bruk.

²⁶ Ett klyvbrott är ett plötsligt sprödbrott som påverkas av temperaturen, ansatserna, svetssömmar, belastningshastigheten och den utsatthet som stålet har för klyvbrott (mäts genom ett slagseghetsprov för att fastställa stålets kvalitetsklass). Då ett brott har börjat framskrida, stannar det inte utan en betydande förändring i förhållandena.

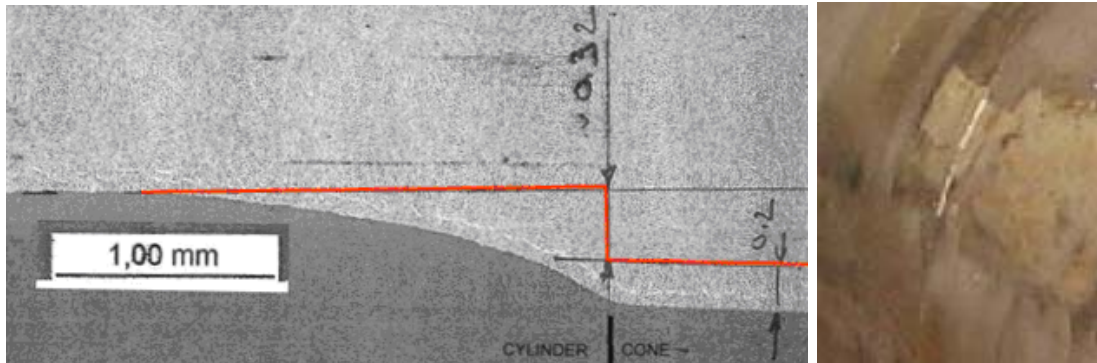


Bild 22. Till vänster profilen vid ansatsen av den "hela" (BB) roderaxeln (bearbetad från VTT:s rapport) och reservaxelns ansatspunkt till höger. 0,2 mm bearbetades bort från den "hela" axelns kon, så det är inte säkert hur ansatsens ursprungliga profil såg ut. Det röda strecket visar profilen av den brutna axeln.

Det fanns en ca 50 millimeter lång, ca 10 millimeters förtjockning i övre kanten av roder-tappslagens lagerhus. Det fanns 3 st. ca 40 mm breda fördjupningar i förtjockningen. Förtjockningen (utan fördjupningar och något tunnare) fanns där redan vid dockningen år 2004. Den antas ha uppstått då den fallna bronsbussningen genom rotation förslet det korrosionsmaterial som samlats i lagerhuset, bilderna 23a och 23b.

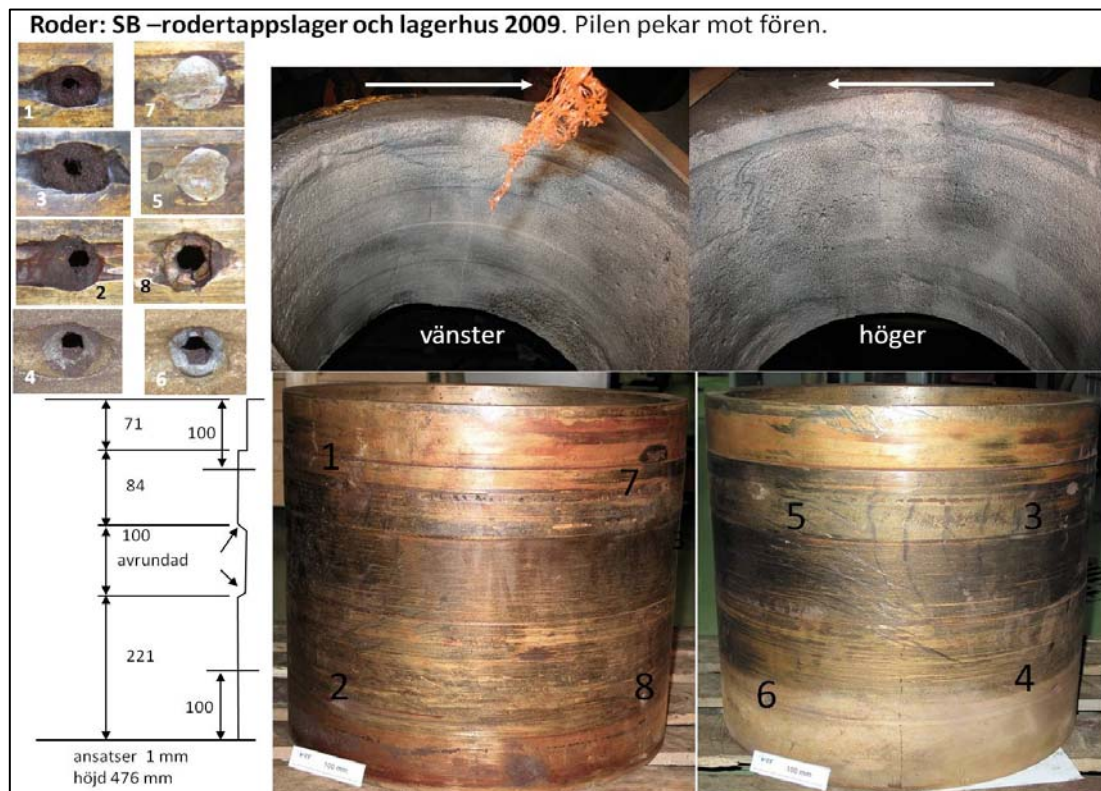


Bild 23a. SB-rodertappslager. Varvet har tagit fotografien av lagerhuset, VTT av bussningen.

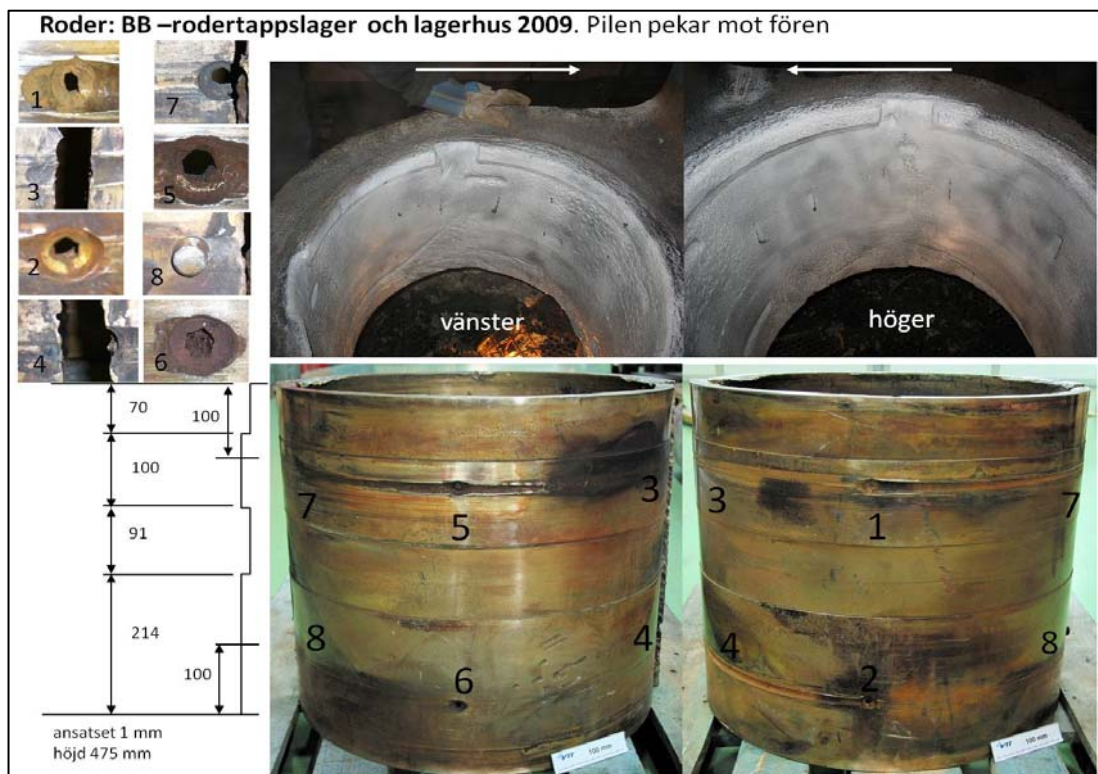


Bild 23b. BB-rodertappslager. Varvet har tagit fotografien av lagerhuset, VTT av bussningen.

I väggen av den fallna SB-bussningens lagerhus syns spår efter ansatser, vilket visar att bussningen har roterat efter att epoxin försvunnit och bussningen fallit. Det syns också spår efter skruvar i lagerhusets vägg och på bussningens yta.

I BB-rodertappslagret finns gjutepoxin huvudsakligen fortfarande på sin plats. Från rodertappslagrets nedre del hade det lossnat epoxi från ett område på 120 grader, ställvis på en djuplek på över 20 cm. Sprickorna mellan epoxin och bussningen samt mellan epoxin och lagerhuset kan ses i bild 24.



Bild 24. Epoxi som delvis har lossnat från BB-rodertappslagret. De tunna sprickorna mellan å ena sidan epoxin och lagerhuset, å andra sidan mellan epoxin och bronsbussningen syns i bilden. Fotografiet taget den 3 december 2009.

Rodertappslagrens ytor på gjutepoxins sida konstaterades vara släta förutom för de lokala repor som har nämnts ovan. Efter bearbetningen hade bussningarna centrerats med skruvar för den tid som det tog att gjuta epoxin. Bearbetningsvätskan hade inte specifikt avlägsnats vilket ledde till att adhesionen mellan epoxin och bussningen förblev svag. På grund av detta var det möjligt att det kom vatten mellan bussningen och epoxin tämligen snart efter dockningen år 2004.

Det krävdes brännskärning för att avlägsna BB-bronsbussningen fastän den hade haft rum att rotera. Tydligen stoppade skruvarna den från att falla. De bågige bussningarna har i något skede roterat, uppenbarligen mot epoxin. Det hade sannolikt blivit bitar av skruvar fast i gjutepoxin vilka hade gjort fåror i bussningen, bilderna 23a och 23b.

Skruvarna. I samband med installationen av bussningarna år 2004 hade man använt M16-insexskruvar för att hålla bussningen på det korrekta stället under epoxigjutningen. Skruvarna skar igenom bussningen och epoxin och nådde lagerhusets vägg, där man möjligen hade gjort en fördjupning för dem.

Gjutepoxins egenskaper. Man kunde säkra några bitar av gjutepoxin då BB-sida rodertappslagrets bronsbussning lösgjordes. Två bitar laverades till VTT för en mer noggrann undersökning. Därtill fick VTT epoxi och härdmedel av företaget som hade utfört gjutningen för att göra en provgjutning²⁷. De värden som erhöles från provbitarna stämde huvudsakligen väl överens med de värden som tillverkaren hade anmält och gjutningen i sig själv kan anses ha utförts på ett lyckat sätt.

²⁷ VTT:s rapport VTT-S-09524-10

1.5.6 Rodertappslagrets korrosion

Strukturen av fartygets rodertappslagret var ogynnsam med tanke på galvanisk korrosionsrisk, eftersom det fanns oskyddad brons i havsvatten-elektrolyt i direkt kontakt med gjutstål, bilderna 5a, 5b och 25.

Enbart nedre kanten av rodertappslagret har visats i bilden; den motsvarande punkten i övre kanten var oskyddad på SILJA EUROPA och skyddad i de andra alternativen.

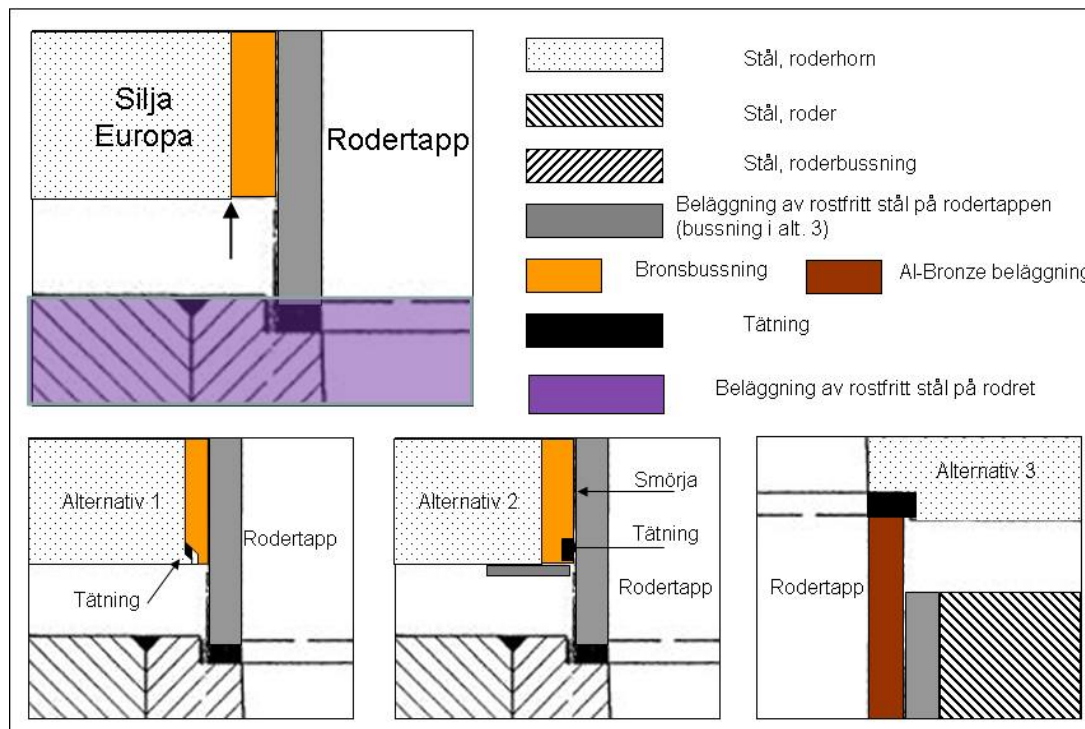


Bild 25. Strukturen av nedre kanten av SILJA EUROPAs rodertappslagret samt alternativa strukturer använda på andra fartyg. Utsträckningen av beläggningen av SILJA EUROPAs roder har visats i bild 12. Alternativ 1 är det som används mest, t.ex. SILJA SERANADE och SILJA SYMPHONY.

1.5.7 Vibrationer i rodret

Förutom den roderkraft som uppstår av manövrering påverkas rodret av de krafter som propellerströmmen genererar. Samverkan av dessa krafter böjer rodret. Roderkrafterna förändras långsamt under loppet av några sekunder. Däremot ändras de krafter som beror på propellern snabbt. Denna förändring upprepas under ett varv lika många gånger som det finns blad i propellern. Detta framställs med hjälp av bladfrequens, som beror på varvtal och antalet blad. SILJA EUROPAs bladfrequens är 6,7–9,5 Hz, bild 26. Rodret är en balk, som har ett egensvängningstal som beror på strukturen. Om talet råkar vara samma eller nära propellerns bladfrequens, stärks rodrets tvärgående rörelse p.g.a. resonans.

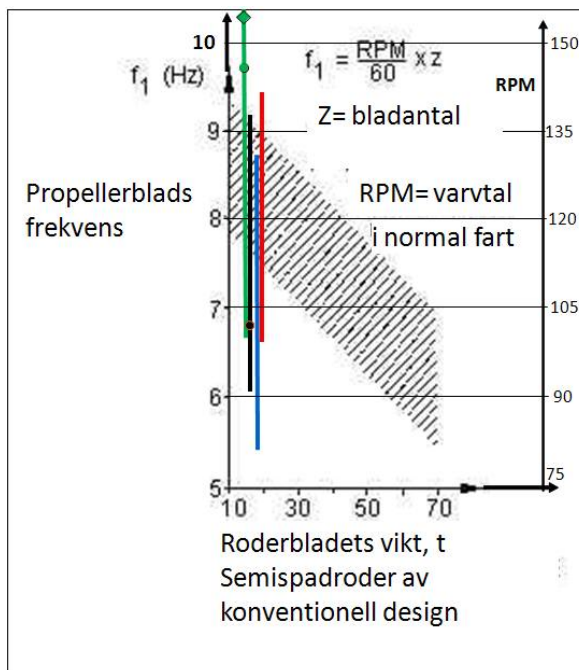


Bild 26. Egenfrekvensen av ett helt hornroder uttryckt som funktion av ett roderblads vikt. Varvtalsområdet av SILJA EUROPAS propeller är märkt med rött. Läget på tre andra fartyg anges också i bilden. Romben anger propellerns varvtal då axelgeneratoren är i användning. Cirklarna anger det varvtal som används oftast. Det farliga området är streckat. Den ursprungliga bilden av Det Norske Veritas har omarbetats.

Då rodrets tvärgående rörelse blir starkare ökas spänningarna i roderaxeln. I bild 26²⁸ har med streck markerats det varvtalsområde som är farligt för ett hornroder. SILJA EUROPAS bladfrekvensområde har marke-

rats med röd färg. Uppgifter om tre andra likadana fartyg har lagts till i bilden. Det normala varvtalet varierar mellan 100–143 1/min.

På basen av kalkylerna utförda av Tekniska högskolan vid Aalto universitetet har man kunnat göra en uppskattning på den cykliska kraft som genereras av propellarna och som böjer roderaxeln. Enligt uppskattningen är storleken av denna kraft ca 180 kN och den förorsakar ett böjande cykliskt moment²⁹ på 885 kNm. Enligt Tekniska högskolans resultat är egenfrekvensen av ett helt roder 6-7 Hz och av ett defekt roder 2-3 Hz. I utredningen har man uppskattat att förhållandet mellan egenfrekvenserna är ca 2,5. Fartygets hastighet var 22,7 knop i Tekniska högskolans kalkyler. Med andra hastigheter kan krafterna förändras i förhållande till hastigheternas kvadrat. De ovannämnda krafterna och momenten har förändrats motsvarande fartygets hastighetsstatistik (tabell 3).

Betydelsen av resonans beror på de varvtal som används, på hur nära man är rodrets egenfrekvens. Ca 30 % av tiden verkar varvtalet ligga på det farliga området 135–112,5 Hz.

1.5.8 Roderkavitationen

I dockningsrapporter har det kommit fram att kavitationsskador på rodret hade reparats under varje dockning. Omfattningen av kavitationen är typisk för hornroder. Styrkan av kavitationen ökar då propellereffekten ökar i förhållande till propellerns yta. 800 kW/m² har anförts som gränsvärde.³⁰ På SILJA EUROPA var värdet 810 kW/m².

²⁸ Bilden baserar sig på Det Norske Veritas skaderapport 3/93. I den framställs en spricka som har uppstått i rodret. Den hade sannolikt uppstått p.g.a. att bladfrekvensen sammanföll med det farliga (streckade) frekvensområdet så som bilden illustrerar. Systerfartyget har inte haft en dylik skada. Det finns tre blad i systerfartygets propeller, ett blad mindre, och därför hade bladfrekvensen minskat med 25 %.

²⁹ Den cykliska kraftens angreppspunkt är lägre ner än angreppspunkten av roderkraftens resultant.

³⁰ Rudder Cavitation-delen, Proceedings of 25th ITTC (International Towing Tank Conference) – Volume II, sida 495, Fu-kuoka.

1.6 Roderaxlarnas utmattningsprocess

Innan olyckan hade fartyget varit i trafik i nästan 17 år. Låt oss anta att det finns 350 kördagar/år och 22 körtimmar/dygn. Med dessa antaganden blir antalet växelspänningar, med frekvensen 8 Hz, $17 \times 350 \times 22 \times 3600 \times 8 = 3,8$ miljarder. Därtill finns det några hundra betydande långsamma förändringar i roderkraften enligt de simulationskalkyler som gjordes i utredningen. P.g.a. det stora antalet belastningsförändringar skall hållbarheten av roderaxeln och även av de andra delarna i roderkonstruktionen betraktas som ett utmattningsfenomen.

Ett tillräckligt pålitligt teoretiskt behärskande av utmattningsfenomenet är tillsvidare svårt. En dimensionering som tar i beaktande utmattningsfenomenet liksom undersökningen av utmattningsbrottet måste i praktiken basera sig på en förenklad teori, experimentella resultat, på tabeller och kurvdiagram. I detta fall har man använt samma förfaringssätt men i motsatt riktning: man har uppskattat den brutna delens utmattningshållbarhet.

I SILJA EUROPAs fall stöter man på flera komplicerande faktorer som har med utmattningskalkylen att göra samt på onoggrannheter i ursprungsdata. Å andra sidan, det här har gjort det möjligt att välja ursprungsdatan på så sätt att SB-axeln gick av. De erhållna resultaten är riktgivande och framställer ett möjligt förlopp av utmattningsprocessen.

Bedömningen av brottet som berodde på utmattningen av roderaxeln kan delas i följande deluppgifter:

1. Fastställandet av de krafter som påverkar rodret och sålunda roderaxeln samt av de viktigaste faktorerna som påverkar dessa krafter och deras inbördes beroendeförhållanden.
2. Fastställandet av frekvensfördelningen för krafter av olika storlekar per *dygn*. Det har antagits att det inte finns stora skillnader mellan olika dygn. Genom att duplicera dygnen får man utmattningsperioder av olika längder. Inverkan av is har beaktats skilt.
3. Förvandlingen från kraftdistributioner till spänningsdistributioner.
4. Fastställandet av roderaxelns utmattningshållfasthet (Wöhler-kurvan).
5. Kumulativa utmattningskalkyler (Miners regel).

1.6.1 De effektiva krafterna och spänningarna i roderaxeln

Böjande krafter. Den böjande kraft som riktar sig på rodret består av två komponenter: av s.k. *stationär* roderkraft som är riktad mot rodret och som förblir nästan konstant i några sekunder samt av cyklisk, s.k. *icke-stationär* kraft som genereras av propellerströmmen och som beror på fartygets hastighet och propellerns varvtal. Den icke-stationära kraften förändras flera gånger i sekunder. Även den stationära kraften är varierande och genererar en s.k. långsamt föränderlig växlande belastning, bild 27a.

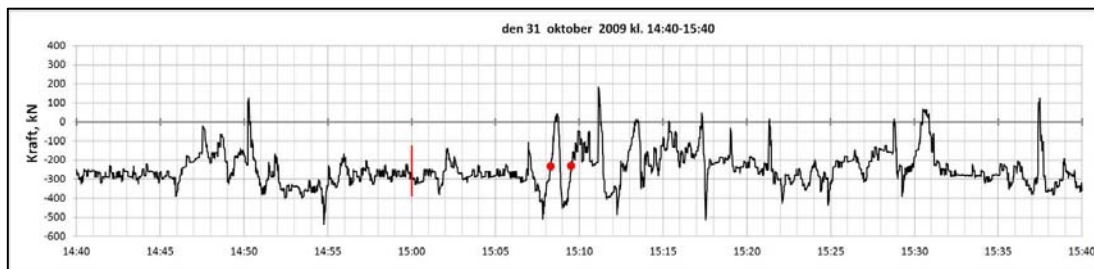


Bild 27a. Den kraft som böjer rodet: grafen visar kraften under en timmes tid kl. 14.40 – 15.40 den 30 oktober 2009.

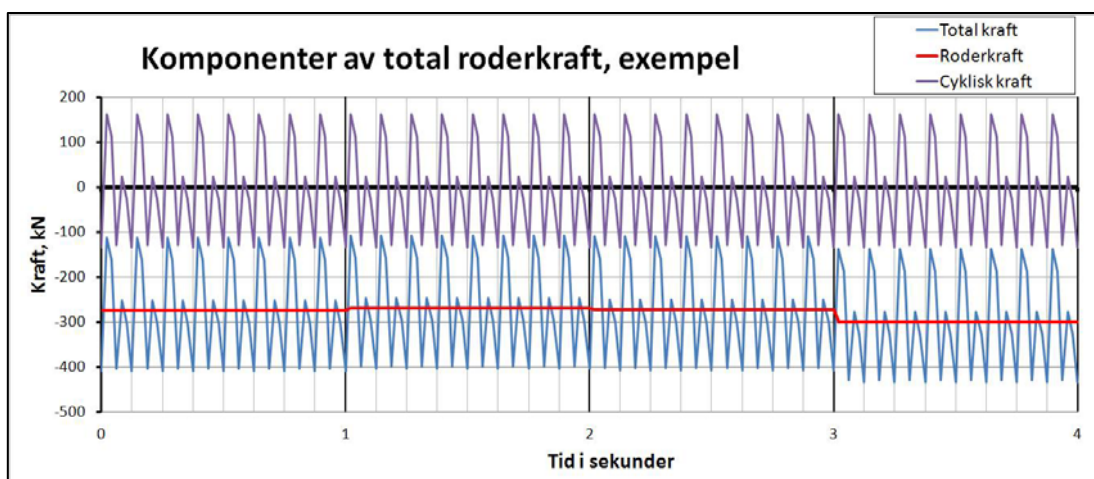


Bild 27b. En principiell modell av den kraft som belastar rodet. Kraften består av rodrets stationära roderkraft och av den icke-stationära kraft som varierar på ca 8 Hz frekvens och som beror på propellerrotation. Det minsta mellanrummet på den horisontella gradindelningen motsvarar en propellerrotation på 90 grader då varvtalet är 120 1/min. Bilden är en detalj från förra bilden och visar en period på fyra sekunder med början kl. 15.00.

En s.k. långsam period har märkts ut med röda prickar i bilden. I bild 27b har man avbildat hur dessa två krafter adderas³¹ under en period på fyra sekunder, från kl. 15.00 framåt (det röda strecket i bild 27a) då fartygets hastighet är 20,14 knop.

Då rodertappslagrets fria utrymme växte blev situationen mer invecklad eftersom rodertappslagret ibland träffade lagerhusets vägg och ibland kunde den statiska och cykliska kraften inte skjuta rodertappslagret mot väggen. Rodrets egenfrekvens är olik i dessa situationer. Situationen blir ytterligare mer komplicerad då rodertappslagret ibland kan lossa från väggen p.g.a. den cykliska kraften. Havsvattnet som fungerade som smörjmedel gjorde rörelsen mer dämpad.

Förutom böjspänningen påverkas roderaxeln samtidigt av en snabbt varierande torsionsspänning, av skjuvspänning som beror på böjningen samt av tryckspänning i kon-delen. Vid den kritiska punkten är tryckspänningens ökande inverkan på medelspänningen relativt sett störst med små böjspänningar. I utmattningskalkylerna har spän-

³¹ Den icke-stationära kraften, motsvarande Tekniska högskolans hastighet på 22,7 knop, har omvandlats (med hastighetens kvadrattförhållande) så att den motsvarar en hastighet på 20,14 knop vid ifrågakvarande ögonblick, utan andra eventuella revideringar.

ningarna summerats vid den kritiska punkten på två sätt: böjning+torsion och böjning+torsion+tryck.

Inverkan av **gång i is** har tagits i beaktande på så sätt att antalet statiska stora växlingar har ökats något jämfört med värdena hösten 2009.

1.6.2 Klassifikationssällskapens dimensioneringsgrunder

Roderkraftens märkvärde bestäms i klassifikationssällskapens regler. På så sätt får man reda på kraftens övre gräns. I SILJA EUROPA:s fall blir dimensioneringskraften ca 1700 kN och dimensioneringsvridmomentet ca 600 kNm.

Bureau Veritas klassifikationskalkyler 1991–1993 var utförda i enlighet med reglerna från år 1987. Man hade då fått en total roderkraft på 1412 kN. Enligt klassifikationssällskapets kontrollkalkyler var dimensioneringen korrekt³².

1.6.3 Simulerade statiska krafter

Formerna och måtten av aktern, roder- och propellerarrangemangen samt kölvattnet på det fartyg som användes i simulationsmodellen motsvarade SILJA EUROPA. I tabell 3 syns ett dygns fördelning av egenvärdet av de simulerade roderkrafterna indelade i kraftområden på 100 kN.

1.6.4 Sammanslagning av statiska och cykliska krafter

De simulerade statiska krafterna kan som sådana användas för fortsatt kalkylering. Där- emot måste den cykliska kraft som Tekniska högskolan kalkylerade med enbart en hastighet ändras så att den motsvarar fartygets hastighet och det hur nära det rådande varvtalet är det varvtal som motsvarar rodrets egenfrekvens. På så sätt summeras den med resonanseffekten justerade cykliska kraften med den statiska kraften.

Hastigheten har delats i fyra grupper och varvtalet i tre grupper i varje kraftområde som är 100 kN brett. Kraftområdena har valts på basis av den statiska kraftens egenvärde. Dessa gruppindelningar har ansetts vara tillräckliga och motsvara den ungefärliga naturen av nominella värden och hela kalkyleringsproceduren. På samma gång har man för- enklat kalkyleringsarbetet.

I tabell 3 finns ett exempel på en gruppindelning gjord utgående från dessa tre variabler. T.ex. på det farligaste varvtalsområdet 115–135 1/min (utmärkt med grått) finns det 41 st. fall på en sekund per dygn för kraftavståndet 400–500 kN på hastighetsområdet 15–18 knop. Sammanlagt finns det 86401 fall, vilket är lika med antalet sekunder/dygn + 1. De rutor i vilka det finns 0 fall har lämnats bort från fortsatt kalkyl. De färgade rutorna har använts för att i kalkylen visa de kraftområden på vilka rodertappslagret inte träffar lagerhusets vägg på rodrets egenvärde är 2,5 Hz. Tabellen baserar sig på data från 9-10.11.2009.

³² En e-post som Bureau Veritas Finlands kontor hade förmedlat den 12 november 2010. I regler från år 1987 var ekvationen för dimensioneringskraften annorlunda.

Tabell 3. Antalet fall per dygn grupperade utgående från tre variabler.

varvtalsområde kraftsområde kN farts- område/koeff.	mindre än 115 RPM							115-135 RPM							större än 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
under 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
över 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
Sammanlagt	13190	1144	125	0	0	0	0	12286	10924	1958	287	106	35	1	681	10329	30879	4263	188	5	0

Utgående från Tekniska högskolans kalkyler har den cykliska kraften ett maximivärde på 345 kN, ett värde som förekommer 8³³ gånger i sekunden och motsvarar fartygets hastighet på 22,7 knop. Det finns sålunda 691200 st. maximivärden per dygn. I tabellen används en hastighetsområdespecifik koefficient, kalkylerad från hastighetens kvadrattförhållande. Maximivärdet måste först multipliceras med denna koefficient. Därtill måste man ta i beaktande den koefficient som är beroende av varvtalet under två olika utrymmen i lagerhuset: rodertappslagret träffar inte lagerhuset (det tillgängliga fria utrymmet är stort, rodrets egenfrekvens 2,5-3 Hz och det tillgängliga fria utrymmet är litet (roder-tappslagret är fast i lagerhuset, rodrets egenfrekvens 8 Hz). Resultatet har minskats med 25 % på basis av Tekniska högskolans bedömning att kraften är för stor i resultaten eftersom rodet är styvt.

1.6.5 Förvandling av krafter till spänningar

Krafft fördelningen måste först omvandlas till växlande spänningsfördelning. Med hjälp av den växlande spänningsfördelningen och Wöhler-kurvan för roderaxeln kan man uppskatta roderaxelns livslängd.

Ett sätt att förvandla spänningsväxlingarna till sådana att deras medelvärde är noll. I SILJA EUROPAs fall fördelar sig spänningsväxlingarna till snabba växlingar som äger rum 8 gånger i sekunden, och till långsamt varierande växlingar, som förändras med ett mellanrum på t.o.m. flera tiotals sekunder. I praktiken har belastningen varit slumpmässig. T.ex. det mellanrum som har märkts ut med röda cirklar i bild 27a bildar en långsam period.

Förvandlingen till växlande spänning har utförts med den princip som framställs i bild 28. Först har man bestämt medeltalet av spänningsväxlingarna som uppstår av den kraft som den icke-stationära propellern genererar. Medeltalet har sedan förvandlats med Goodmans formel så att medelspänningen är noll.

³³ Rodrets varvtal har i medeltal varit 122 1/min, vilket innebär att en 8 Hz bladfrekvens är lämplig.

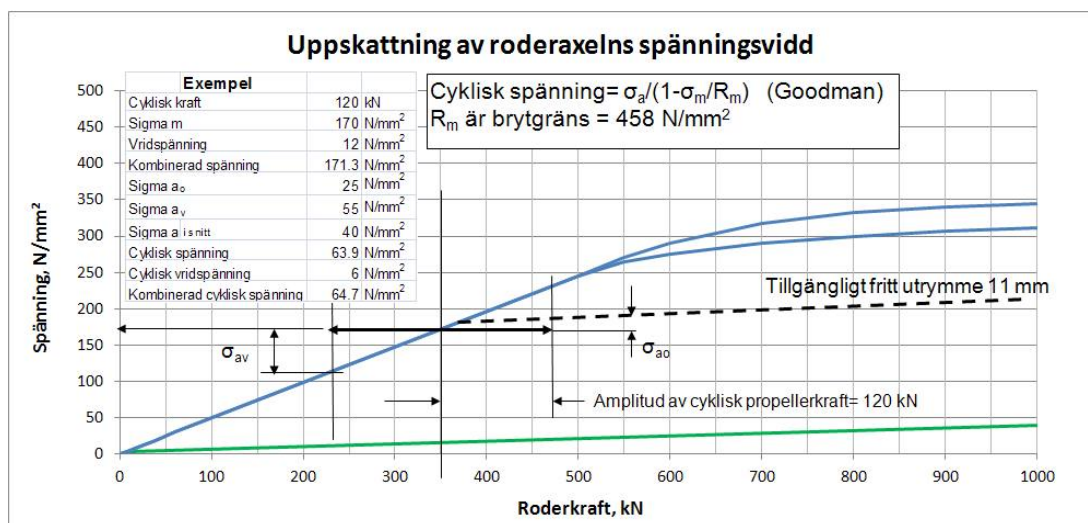


Bild 28. Sättet att bestämma den böjande växlande belastningen med medeltalet noll som används i utmattningskalkyler med hjälp av Goodmans formel utan tryckspänning. Siffrorna i exemplet motsvarar inte SILJA EUROPAs fall. Kraftintervallen i exemplet är 300–400 kN, som amplitud av den icke-stationära kraften har man i exemplet tagit 120 kN. Torsionsspänningens inverkan är liten.

Via dessa skeden genererades en ny tabell, i vilken växlande spänningarna finns på ställen som motsvarar rutorna i tabell 3. Efter det här kunde man kalkylera antalet spänningsväxlingar för varje spänningsintervall som generas av cykliska krafter i den valda spänningsintervallsnivån på 50 N/mm². Då rodertappslagret är i skick bär roderhornet största delen av belastningen och axelns statiska och cykliska spänning är liten. Situationen var dylik under de första åren, ända till år 2004, samt nästan ända till skadan efter att gjutepoxin hade installerats.

Proceduren upprepades med alla betydande fria utrymmen både utan och med tryckspänningen i konen, dvs. före år 2004 med ett fritt utrymme på 5-12 mm med 1 mm:s mellanrum samt på hösten 2009 med ett fritt utrymme på över 16 mm. Tryckspänningen förkortar axelns livslängd i en viss mån.

1.6.6 Beräkning av roderaxlarnas utmattningshållfasthet

Uppskattningen av roderaxelns utmattningshållfasthet baserar sig på Wöhler-kurvan, bild 29. Kurvan framställer hur många växlande spänningar av viss storlek (antalet över ca 1000) eller förändringar i sträckning/kompression (antalet under ca 1000) materialet håller. Roderaxelns uppskattade baskurva, med svart färg, fungerar som utgångspunkt. Normala korrigeringar har utförts till den utgående från ytans kvalitet och styckets storlek och man har kommit till den gröna kurvan. Utmattningshållfastheten blir sämre om det i det stycke som utsätts för belastning finns en ansats, springor eller motsvarande. Ansatsens inverkan kan tas i beaktande med hjälp av t.ex. det s.k. effekttalet för ansatsen. Då man tar i beaktande den inverkan som den 0,3 mm djupa vassa ansatsen i SB-axeln hade, kommer man fram till den röda kurvan.

Som kan ses i bild 29, har stål en sådan egenskap att ett stycke tål praktiskt taget ett obegränsat antal spänningsväxlingar under en viss spänningsgräns. De växlande belastningar som finns under denna s.k. utmattningsgräns behövs vanligtvis inte tas i beaktande i utmattningshållbarhetskalkyler.

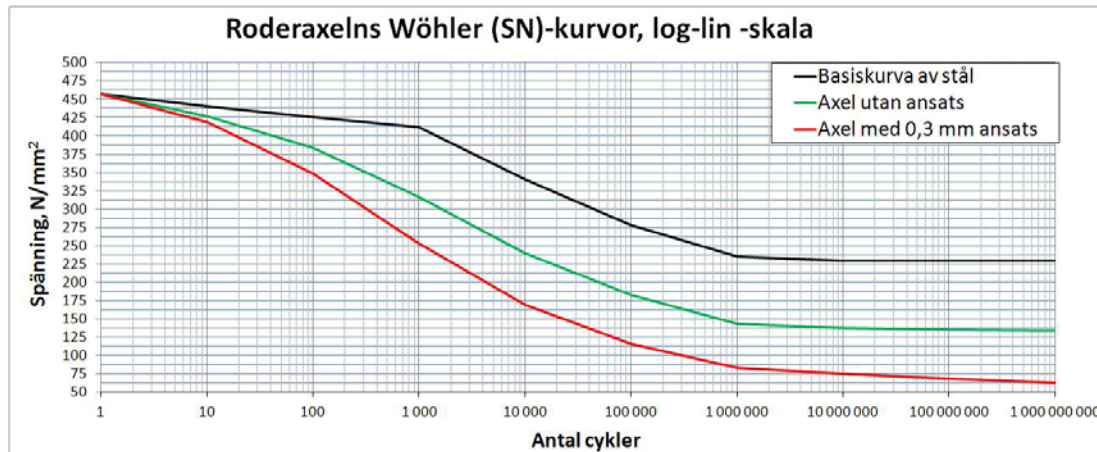


Bild 29. Baskurvan för stålets utmattningshållfasthet (svart) och roderaxlarnas uppskattade utmattningshållfasthetskurvor, Wöhler- eller SN-kurvor, då medelspänningen är noll. Den horisontala skalan är logaritmisk.

Då den utmattande belastningen är slumpmässig kan Wöhler-kurvan vara ännu svagare än vad som visas ovan. Det här har man inte försökt beräkna.

1.6.7 Beräkning av roderaxlarnas livslängder

Den roll som **Miners teori** spelar i denna procedur kallas för *kumulativ kalkyl av utmattningshållbarhet*. Med hjälp av den undersöker man hur stor andel av en axels livslängd en spänningsväxling av en viss storlek förbrukar. Förbrukningsandelarna av spänningsväxlingar av olika storlek summeras, och summan måste enligt den allmänna praxisen vara under 1 för att strukturen skall hålla ifrågavarande växlande belastning.

I kalkyleringsproceduren har man genom provning framställt en sådan kombination av variabler att observationer och mätresultaten kan förklaras. Även en liten förändring i SN-kurvan har en speciellt stark inverkan på resultaten. Resultaten kan justeras också med den förstärkningsfaktor av impuls kraften som beror på varvtalet och dämpningens kvantitet. I proceduren har man inte tagit i beaktande att utmattningshållbarheten blir något svagare då medelspänningen stiger (Wöhler-kurvan går ner). Resultaten framställda här innehåller inte inverkan av tryckspänning. Då tryckspänningen är med, blir axelns livslängd något kortare.

Normala spel. Beräkningarna visar att axlarna utan korrosion skulle ha hållit och att utmattningen inte skulle ha tärt på livslängden.

Ingen ansats i axeln, men rodertappslagret korroderar. Axeln skulle ha hållit hela sin livslängd med ett tillgängligt fritt utrymme på 12 mm, trots korrosion. Med ett tillgängligt fritt utrymme på 16 mm skulle axeln ha hållit under två år. Inverkan av Fretting-fenomenet har inte tagits i beaktande i dessa beräkningar. Fenomenet uppstår på stora

tillgängliga fria utrymmen, men det har inte varit möjligt att uppskatta dess inverkan på livslängden. Det är inte uteslutet att livslängden kan bli kortare än vad som framställts ovan.

Olyckssituationen, dvs. axel med ansats

Beräkning 1993–2004. Efter att det tillgängliga fria utrymmet hade vuxit över 5 mm började axlarnas utmattningshållbarhet minska. Före dockningen år 2004 hade största delen av SB-axelns livslängd gått, ca 85 %. Det här innebär att om situationen hade fortsatt i genomsnitt likadan som under de gångna 11 åren skulle det ha funnits ca 2 år kvar av livslängden. Om situationen hade pågått som den var de senaste två månaderna före dockningen, skulle det ha funnits knappt ett år kvar av livslängden, men p.g.a. den allt snabbare tillväxten av sprickan skulle tiden ha kunnat vara påtagligt kortare, dvs. några månader. Dessa åldersuppskattningar är enbart riktgivande. Rodrets impuls kraft på frekvens ca 8 Hz var den faktor som mest tärde på livslängden. Först vid 11–12 mm tillgängligt fritt utrymme blir de långsamma kraftväxlingarna betydande.

BB-axelns livslängd blev inte kortare, eftersom spänningarna förblev under utmattningsgränsen.

Beräkning 2004–2009. För största delen av tiden förblev spänningarna små, och den livslängd som fortfarande fanns kvar minskade inte, eftersom det tillgängliga fria utrymmet var 1 mm (spelet förblev normalt så gjutepoxin var åtminstone delvis på plats). Beräkningen innehåller samma skeden som ovan, men nu var det fria utrymmet efter att epoxin har försvunnit så stort att rodrets egenfrekvens nästan hela tiden var 2,5 Hz, då största delen var med långsamma kraftväxlingar. Spänningen steg på ca 550 kN:s roderkraft till stålets sträckgräns. I sitt maximum kunde spänningen stiga över sträckgränsen, till spänningar på 300–350 N/mm² med stora manövreringskrafter, då hornet bar en del av belastningen (om det tillgängliga fria utrymmet hade varit ca 18 mm). I så fall borde undersökning av utmattningsstörning tas med utmattningsundersökningen. Det har inte ansetts nödvändigt att göra detta, utan man konstaterar att SB-axelns kvarstående livslängd tog slut i den belastningssituation som uppstod på 1-2 dygn.

BB-axelns livslängd minskade inte eftersom spelet stannade inom tillåtna gränser (gjutepoxin var huvudsakligen på plats).

1.7 Uppskattning av reliabiliteten av den kalkyleringsmetod som användes i utredningen

Beräkningen av strukturens utmattningshållbarhet innebär en större osäkerhet än statisk dimensionering även då det finns pålitlig utgångsdata tillgänglig. I SILJA EUROPAs fall fanns det i utgångsdatan betydande faktorer som ökade osäkerheten. Å andra sidan är resultatet, brottet av roderaxeln, känt. Detta faktum har utnyttjats då värden för variablerna har valts – man har valt sådana värden att man har kommit till det önskade resultatet. Samma resultat kan nås även med andra variabelkombinationer; man har inte letat efter alternativ för den kombination som har använts i undersökningen.

En utgångspunkt för kalkylen är Wöhler (SN)-kurvan som framställer roderaxlarnas utmattningshållbarhet. De kurvor som har använts i undersökningen är ungefärliga och även små förändringar i dem innebär en stor förändring i resultatet. Därtill måste man lägga märke till att de i kalkylerna utnyttjade Wöhler-kurvorna baserar sig på utmattningsprov som har utförts i luft. I det här fallet har roderaxeln varit skyddad med packning och omringad av havsvatten, men packningen har nödvändigtvis inte varit vattentät. Därför kan havsvattnets miljöverkan ha haft en sänkande effekt på Wöhler-kurvan, dvs. axelns utmattningshållbarhet är svagare i vatten än i luft. Effekten kan dock inte beräknas.

Den andra osäkra faktorn (beräkningen av dämpningskoefficienten) utgörs av rodrets vibration och den styrka med vilken vibrationen förstärktes i resonans med roderimpulsen eller nära den. Den tredje osäkra faktorn är storleken av rodrets egenfrekvens, som baserar sig på Tekniska högskolans kalkyler och Det Norske Veritas approximativa statistik. Likaså innehåller kalkylmetoden för impuls kraftens storlek förenklingar. Därtill är tidpunkterna då bussningarna föll enbart uppskattningar.

Reliabiliteten av roderaxelns statistiska spänningar och av de simulerade manövreringskrafterna är bättre. VDR-data som har använts anses vara tillräckligt pålitlig. Uppskattningen av korrosionens utbredning baserar sig på de mätta diametrarna och på allmänna uppgifter om korrosionshastighet.

De använda kumulativa kalkylprocedurerna för utmattningshållbarheten, Goodmans formel för att fastställa ekvivalent växlande belastning med medelvärde noll och slutligen Miners regel i beräkningen av utmattningshållbarheten lämpar sig inte väl för detta fall (med sporadisk belastningsvariation, förändrande medelspänning, ibland en lång period med mycket låg spänning, ibland medelspänningar som i slutskedet överskrider sträckgränsen).

Trots dessa brister har man enligt utredarnas uppfattning lyckats finna en korrekt processbeskrivning av händelsen.

1.8 De författningar och föreskrifter som styr verksamheten

Enligt **klassifikationssällskapens regler** måste fartygets klassifikation förnyas med fem års mellanrum (class renewal survey). Under denna tid bör fartyget dockas två gånger, och t.ex. en granskning av roderinrättningen måste utföras. En anteckning om inspektionen måste inkluderas i protokollen, till vilken inspektören kan bifoga ett memorandum om de defekter som inte påverkar klassifikationscertifikatets giltighet. Roderaxeln löstages inte för en inspektion i samband med dockningar. Klassifikationssällskapet har inga regler eller anvisningar om rodrets korrosionsskydd eller rodertappslagrets reparationssätt eftersom dessa är inte klassifikationsobjekt³⁴.

Larmen. I internationella instruktioner såsom i det internationella radioreglementet definierar man befälhavarens rätt, men inte hans/hennes skyldighet, att i en farlig situation skicka ett il- eller nödmeddelande. I den finska lagstiftningen förpliktar Sjölagen och La-

³⁴ Bureau Veritas utlåtande (den 27 augusti 2012, Silja Europa <38J418>: "Corrosion protection is not a Class item. The Classification rules are not designed, intended or required to include repair methods."

gen om fartygsservice befälhavaren att meddela om en farlig situation eller olycka, men det finns ingen skyldighet att sända ett nödmeddelande.

Rederiets kvalitetssystem och anvisningar

Under incidenten hade fartyget i användning ett MPM (Marine Planned Maintenance) servicesystem, som hade ersatt det tidigare AMOS-systemet. Informationen från AMOS-systemet hade flyttats över till det nya systemet. I serviceuppgifter om rodren och roderinrättningen finns det information om de spelmätningar och byten av lager som gjordes under dockningar på reparationsvarvet. Serviceplanen innehåller inte åtgärder på roderaxeln eller nedre axeln.

Fartygets ISM-anvisningar innehåller i elektronisk form instruktioner som har med fartygets operation att göra. Den s.k. gula boken finns tillhanda på kommandobryggan. Den innehåller instruktioner för olika nödsituationer, t.ex. nödstyrningsåtgärder. För normal drift finns det anvisningar i den s.k. e gröna boken.

Fartyget hade i användning ett fartygsspecifikt BRM-förfaringssätt. Avsikten med förfaringssättet är att utveckla de manövreringsprocedurer som bryggbesättningen använder för att garantera fartygets säkerhet. Skolning relaterad till fartygsmanövrering ges 1-2 dagar årligen på basis av BRM³⁵-moduler. Tre moduler körs med en simulationsmodell och efter det analyserar man hur man lyckades. Modulerna kan innefatta t.ex. följande: felkedjor, känsla för situationen, bryggbesättningen som team, kommunikation, färdplanering och/eller nödsituationer.

Rederiet har tränat i skeppssimulatorn kontroll och analysering av varierande avvikande situationer och maskinerifel regelmässigt från slutet av 90-talet. Dessa simulationer har inkluderat även BRM-träningar.

³⁵ Den internationella STCW-konventionen 1978 jämte ändringar (Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers) innefattar en frivillig "Code B" föreskrift om vakthållning under navigering och rekommenderar att rederierna tar BRM-förfarandet, Bridge Resource Management i bruk.

2 ANALYS

Brott av en roderaxel är en mycket ovanlig olycka särskilt utan yttre orsak ss. grundstötning eller motsvarande. För att förebygga uppkomsten av ett likadant fel i framtiden har man i undersökningen ingående behandlat händelsens tekniska bakgrund. Avsikten är att förklara hur axlarna led skada, dvs. den trefasiga process som utvecklades under 17 års tid.

I den första fasen framskred utmattningsbrottprocessen så långsamt att den långt utvecklade galvaniska korrosionen av rodertappslagrets lagerhus som var orsaken till processen upptäcktes först i dockningen år 2004, 11 år efter att fartyget hade tagits i bruk. Den hårspricka som möjligen fanns i roderaxeln p.g.a. det inledande utmattningsbrottet och som senare utvecklades till ett utmattningsbrott upptäcktes inte i granskningarna år 2004 (punkt 1.5.1, Turku Repair Yard 30.8–8.9.04).

Under den andra fasen lyckades man stanna processen med gjutepoxireparation, men dess orsaker avlägsnades inte. Gjutepoxin gick sönder inom fem år. I den tredje fasen fortsatte utvecklingen av utmattningsbrottet då gjutepoxin helt hade försvunnit och SB-axeln gick av på några dagar.

2.1 Faktorerna som bidrog till brottet av SB-axeln

En vass, 0,3 mm djup ansats (bild 22) i SB-axeln gjorde dess utmattningshållfasthet betydligt svagare och är den viktigaste orsaken till axelns brott. Det är okänd, varför ansatsen i roderaxeln hade förblivit vass. **Galvanisk korrosion i rodertappslagret** (bild 25) är enligt utredarnas uppfattning den andra centrala orsaken till felet. Korrosionen ensam skulle dock inte ha räckt till att förorsaka den långt framskridna utmattningsprocessen i roderaxeln. Simultaniteten av dessa faktorer ledde till att **axelns hållbarhet var svagare än vad man antagit och dess spänningar överskred dimensioneringsvärdena i två skeden**. Dessa faktorer avviker totalt från normal skeppsbyggnadspraxis.

Rodertappslagrets materialval möjliggjorde korrosion, något som inte hade förebyggts strukturellt. Roderaxelns ansats hade av något skäl blivit vass. Dessa dolda defekter hade blivit kvar i samband med fartygets planering och byggarbete och hade inte i något skede noterats eller ansetts vara farliga. På byggnadsvarvet hade dessa defekter släppts igenom kontrollen, och varken klassifikationssällskapet eller beställarens kontroll hade fäst uppmärksamhet vid dessa detaljer. Den förstnämnda defekten förorsakade en process (ökning av det tillgängliga fria utrymmet) som ledde till att axelns statiska och utmattningsbelastning tidvis kunde överskrida vanliga värden betydligt.

Så länge som lagerspelen förblir inom tillåtna gränser stöder roderhornet rodret. De genomsnittliga spänningarna och växlande belastningarna kombinerade med torsionsspänningarna är så små att de klart underskrider den statiska dimensioneringsspänningen för roderaxelns material och den kalkylmässiga utmattningsgränsen.

Klassifikationssällskapens regler definierar inte hur spelmätningar ska utföras³⁶. Med den allmänt använda toleranstolkmätningen upptäcker man inte det inledande skedet av korrosion i rodertappslagrets lagerhus. Roderaxeln löstages inte med specificerade mellanrum för en inspektion i samband med dockningar. Granskningen skulle kräva en mer omfattande demontering av roderinrättningen än normalt, vilket skulle förlänga dockningsperioden. Fartygens dockningar utförs p.g.a. kostnaderna enligt en väldigt stram tidtabell vilket påverkar valet av reparationssätt. Dockningsintervallen förlängs ibland till det maximum som klassen tillåter, då även en långsam process kan utvecklas för långt.

Resonans-fenomenet och rodervibration. Strukturen av rodret på bilfärjor av den här typen tillsammans med det optimala varvtalsområdet för propellrarna leder till att bladfrekvensresonans inte helt kan undvikas. Av fartygen som jämfördes (bild 26) var SILJA EUROPA värst på det farliga området. Rodrets resonansvibration gjorde inverkan av ansatsen och korrosionen snabbare.

De rodervibrationer som beror på resonans belastar främst rodret och roderhornet, skador vilka man vanligtvis kan leta efter och som är lätta att reparera. Sprickorna i SILJA EUROPAs roder och roderhorn påvisar att fartygets roder tidvis vibrerade kraftigt. I svåra problem orsakade av resonans förändras strukturen på så sätt att rodrets egenfrekvens förändras. Ibland kan man ändra på bladfrekvensen genom att byta propellern till en annan propeller med ett annat antal blad.

Rodervibrationerna på SILJA EUROPA skulle inte ha blivit ett problem med hänsyn till roderaxeln om rodertappslagrets fria utrymme hade förblivit lika stort som de tillåtna spelen (maximi fritt utrymme 2,5 mm). Det mest farliga tillgängliga fria utrymmet finns mellan ca 7–10 mm. Då fria utrymmen är små hindrar vilandet mot roderhornet stora spänningar (stora böjningar) och vid stora fria utrymmen fungerar rodret huvudsakligen som ett friliggande roder då det inte uppstår resonans³⁷.

Efter att fartyget hade blivit färdigt hade det problem med kursstabiliteten. Problemen minskades under dockningen 1993. Styrningen av fartyget krävde dock fortfarande användning av små rodervinklar mer än normalt när fartyget styrdes rakt. De problem som härstammade från rodrens och propellrarnas interaktion, kavitation och vibration av rodret, förblev som de var och gav kontinuerligt upphov till små reparationer på rodret under dockningarna.

Det är möjligt att **kavitation** gjorde korrosionen av SILJA EUROPAs rodertappslager snabbare. Speciellt utsidan av rodertappslagrets lagerhus korroderade så kraftigt att man hade varit tvungen att reparera den redan i samband med tidigare dockningar genom påsvetsning. När också insidan av lagerhuset korroderade, började hållbarheten av lagerhusets struktur bli osäker.

³⁶ Bureau Veritas utlåtande (den 27 augusti 2012, Silja Europa <38J418>: "The Classification Rules are not designed, intended or required to include instruction on methods of measurements."

³⁷ I det här fallet gäller det 8 Hz impulser. De långsamma kraftväxlingarna blir ju farligare desto större det tillgängliga fria utrymmet är.

2.2 Analysens huvudtema

I utredningen har det kommit fram att man under alla tre ovannämnda skeden av utmattningsprocessen hade gjort iakttagelser med hänsyn till rodertappslagrens spel. I dockningen år 2004 upptäcktes en betydande korrosion i rodertappslagrets lagerhus. Denna korrosion reparerades med gjutepoxi och nya bussningar.

Trots att betydande korrosion i lagerhuset upptäcktes i samband med dockningen år 2004, undersöktes inte orsaken till dessa iakttagelser. Sålunda upptäckte man inte de dolda faktorer som inverkade i bakgrunden och som år 2009 ledde till att roderaxeln gick av p.g.a. utmattningsbrott. Utmattningsskadan fick utbreda sig dolt.

Analysens tillvägagångssätt har presenterats i bild 30. De teman som har märkts med en röd streckad linje har analyserats noggrannare i punkterna 2.2.2 och 2.4.2.

Utmattningsbrottsprocess, fas 1 – uppkomst och utveckling	Utmattningsbrottsprocess, fas 2 – gjutepoxireparation och dess söndervittring		Utmattningsbrottsprocess, fas 3 – brott av roderaxeln
1993–2004	Dockning 2004*	2004–2009	2009**
Observationer och åtgärder			
Observationer Lagerspelet hade tilltagit i 2002 dockning	En oväntad korrosion i rodertappslagrets lagerhus och bussningen hade fallit. Fritt utrymme 12-13 mm.	Lagerspelet inom reglers gränser år 2007.	Fartyget har manövreringssvårigheter 22.11.2009.
Åtgärder Regler samt metoder rutinmässiga och varierande. Spelmätningar i samband med dockningar.	Reparation med gjutepoxin utan att ha tid att analysera orsaker bakom korrosionsskador eller planera en permanent reparation.	2007 en annorlunda spelmätning, gjutepoxin granskades ytligt.	Avbrytande av resan. Fartyget till dockning.
Dolda faktorer			
Uppkomsten av utmattningsskadan (1993–2009)			
1. Rodertappslagrets korrosionskänsliga konstruktion <i>(rodertappslagrets galvaniska korrosion blev möjlig och förorsakade ett stort tillgängligt fritt utrymme i rodertappslaget)</i> 2. En vass 0,3 mm ansats på styrbords roderaxel <i>(SB-roderaxelns utmattningshållbarhet blev betydligt sämre)</i> 3. Roderkrafter och roderens resonansvibrationer genererade en växlande belastning <i>(p.g.a. det stora tillgängliga fria utrymmet överskred växlande belastningar klart axelns märkvärden; p.g.a. ansatsen var axeln svagare än planerat)</i>			
Utbredningen av utmattningsskadan Korrosionen i rodrets rodertappslager började långsamt. Nedre axelns tillgängliga fria utrymme växte till 12–13 mm före 2004. Utmattningsskadan började utveckla sig. En stor del av roderaxelns livslängd förbrukades före år 2004.	I och med gjutepoxireparationen stannade utbredningen av utmattningsskadan, och utbredningen av korrosionen blev betydligt långsammare.	Gjutepoxin som hade använts i reparationen började långsamt vittra sönder. Tilläggskorrosion i lagerhuset. Epoxins sönderfall blev snabbare och den smulades helt sönder.	Epoxin har totalt försvunnit och rodertappslagrets fria utrymme växt till 16–18 mm. Utmattningsbrottsprocessen fortsatte. Roderaeln gick av.

Bild 30. Analysens huvudtema. Skedena 1–3 i utmattningsbrottsprocessen, iakttagelserna gjorda under de olika skedena och åtgärderna samt de faktorer som var dolda under processens gång. Två teman som senare har analyserats noggrannare har märkts ut med streckade linjer:

- *) analysen av planeringen och utförandet av gjutepoxireparationen år 2004 samt följderna av reparationen (punkt 2.2.2) och
- **) på de faktorer som inverkade på kontrollen av fartyget efter att roderaxeln hade gått av (punkt 2.4.2).

2.2.1 Reparationssättet och dess inverkan

Dockningstiden var planerad så kort att man var tvungen att finna en snabb lösning. Av de olika alternativen valde man den som gick att utföra snabbast, dvs. användningen av EPOCAST 36-gjutepoxi; det fanns även en av klassifikationssällskapet godkänd utförare för arbetet på orten. Gjutningen hade den fördelen att man inte behövde bearbeta lagerhuset; det räckte med att man avlägsnade rosten och de värsta ojämnheterna. Med gjutning kunde man helt fylla den spricka av varierande storlek som fanns mellan bussningen och lagerhuset.

Reparationsåtgärden förändrade rodertappslagrets struktur avsevärt, bilderna 5b och 5c samt 14a och 14b. Det bildades ett epoxibrätte på övre kanten av rodertappslagret. I den nya bronsbussningen fanns det flera ansatser på ca 1 mm mot gjutepoxin. Flera skruvar skruvades så djupt i bussningen att sexkanthålen räckte genom bussningen, vilket försvagade skruvarnas hållbarhet under belastning.

Man hade inte tid att göra en grundlig planering: man började fax-växling mellan gjutepoxins leverantör, gjutaren och varvet den 31 augusti och redan den 2 september göts det ena rodertappslagret. Gjutepoxin var som en medicin, som lindrade symptomen men inte botade sjukdomen. Användningen av gjutepoxi skapade en ny sorts dold riskfaktor med följder som härstammade från det att gjutepoxin kan gå sönder. Strukturen innehöll insexskruvar som var ovanliga delar i sammanhanget.

2.2.2 Uppskattning av reparationssättet år 2004

På SILJA EUROPA återställde gjutepoxin rodertappslagrets spel till det normala, men om epoxin försvann, skulle rodertappslagrets fria utrymme växa tvärt och plötsligt. Användningen av skruvar förde med sig negativa strukturella aspekter: brons och stål var i direkt kontakt med varandra, skruvarna var svaga p.g.a. sexkantshålen, de flesta hade skruvats så djupt att då skruven hade brustit kom det in mera vatten som fungerade som smörjmedel mellan bussningen och epoxin. P.g.a. den minskade friktionen genererade skruvarna lokala spänningstoppar i epoxin. *Installationsskruvarna gjorde sönderfallet av gjutepoxin snabbare. Det skulle ha varit väsentligt att hindra bussningens rotation på något annat sätt.* Utan skruvar skulle bronsbussningen ändå ha haft rum att rotera, epoxin skulle småningom ha slitits och i något skede sannolikt börjat spricka från nedre kanten.

Man borde ha utarbetat en specifik kontrollplan för epoxin och en tidtabell för dess ersättning med en permanent lösning, t.ex. reparation av lagerhuset med påsvetsning och installation av en motsvarande bronsbussning som den ursprungliga, vilket sedan slutligen gjordes efter olyckan.

Användningen av gjutepoxi som en del av rodertappslagrets struktur i rodret i kontakt med havsvatten på ett så stort fartyg var sällsynt och vid detta reparationsvarv unikt. Gjutepoxi används allmänt inne i fartyget t.ex. i maskinrummet då maskiner monteras på sina underlag. Krafter och spänningar som verkade i olika riktningar riktades sålunda till epoxin i stället för tryck från en riktning som är typiskt i vanligt bruk. P.g.a. dessa orsaker kan gjutepoxin då den används så som i denna reparation inte anses vara en permanent lösning till att reparera korrosionsskador i rodertappslagret. Detta bevisas av epoxins brott i båda lagren och försvinnande i högra lagret.

Användningen av denna reparationslösning skulle ha förutsatt att man hade beaktat de krafter³⁸ som riktades från lagerbussningen till epoxin. Därtill borde skicket av gjutningen ha kontrollerats oftare än normalt. Man borde ha berett sig på att epoxin lossnar t.ex. genom en struktur som skulle ha hindrat lossningen.

Gjutepoxireparationens roll i utvecklingen av utmattningsbrottet. Genom reparation fick man stopp på utvecklingen av utmattningsbrottet fastän man inte var medveten om detta. Å andra sidan slipades lagerhusen några millimeter före epoxigjutningen för att avlägsna korrosionsmaterial och för att utjämna väggarna. Utan att märka möjliggjorde man på samma gång uppkomsten av ett större fritt utrymme i fall gjutepoxin försvann. På detta sätt försnabbade man utmattningsprocessens tredje fas.

Bild 31 framställer en analys av planeringen och utförandet av gjutepoxireparationen i samband med dockningen 2004 samt inverkan av denna reparation. De röda textboxarna och pilarna har använts för att framställa reparationsprocessen som var väldigt snabb, enbart ca tre dygn. Processen omfattade planeringen av reparationen mellan redieriet, reparationsvarvet, gjutepoxins leverantör och utföraren av arbetet, konsultationen med klassen samt själva utförandet av arbetet.

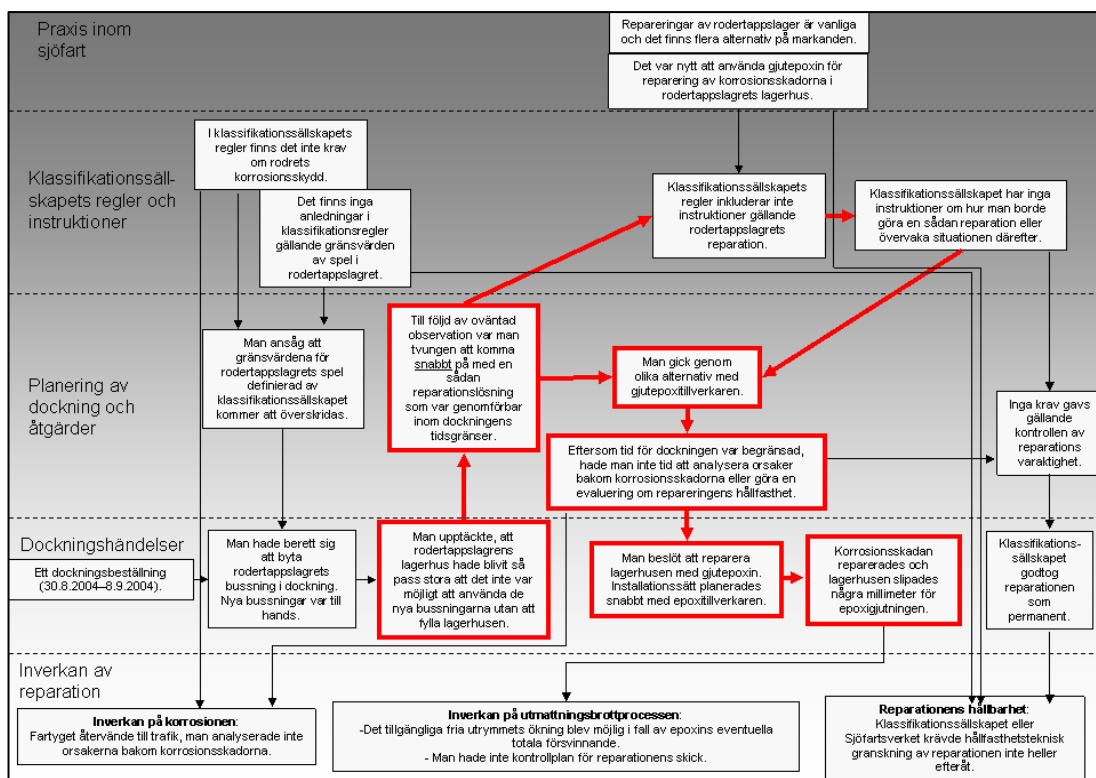


Bild 31. En analys av planeringen och utförandet av gjutepoxireparationen i samband med dockningen 2004 samt dess inverkan. De röda textboxarna och pilarna har använts för att framställa reparationsprocessen som var väldigt snabb, enbart ca tre dygn. Processen omfattade planeringen av reparationen, konsultationen med klassen samt själva utförandet av arbetet.

³⁸ En reparation som utförs med gjutepoxi borde planeras så att de skärkrafter som riktas från lagerbussningen till epoxin och deras kontroll också tas i beaktande. Klassifikationssällskapet bör utarbeta eller kräva hållfasthetsberäkningar. En tillräcklig adhesion mellan epoxin och lagerbussningen och lagerhuset borde säkerställas. Hållfasthetskraven kan då förutsätta alternativa material, så som Belzona eller motsvarande.

2.3 En sammanställning av brottprocessen

Förloppet av brottprocessen och dess orsaker har nedan granskats ur olika synvinklar. I tabell 4 har man uppskattat betydelsen av de olika orsakerna i brottprocessen av SILJA EUROPAs roderaxlar då olika faktorer har påverkat samtidigt. Man har antagit, som ovan har anförts, att BB-axelns Wöhler-kurva är bättre än SB-axelns kurva.

Tabell 4. *Inverkan av de olika faktorernas simultanitet på brottet av SB-axeln. Raden med grå färg motsvarar situationen i olycksfallet, de andra är möjliga alternativ; den översta raden motsvarar bra skeppsbyggnadspraxis.*

Korro-sion	Resonans	Ansats i BB-axeln	BB-axeln	Ansats i SB-axeln	SB-axeln
nej	ja	avrundad	Brister inte	avrundad	Brister inte
nej	ja	vass	Brister inte	vass	Brister inte
ja	ja	avrundad	Brister inte	avrundad	Brister inte
ja	ja	avrundad	Brister inte	vass	BRISTER
ja	nej	avrundad	Brister inte	vass	SENARE

Utmattningsskadans kronologiska gång i fråga om SILJA EUROPAs SB-axel har illustrerats i bild 32. Beaktansvärt är hur tillväxten av brottet blev snabbare efter att brottet hade kommit igång, vilket är typiskt för utmattningsfenomenet. Om man tänker på motsvarande fall leder detta till ett behov att noggrant överväga tidsintervallen mellan dockningarna.

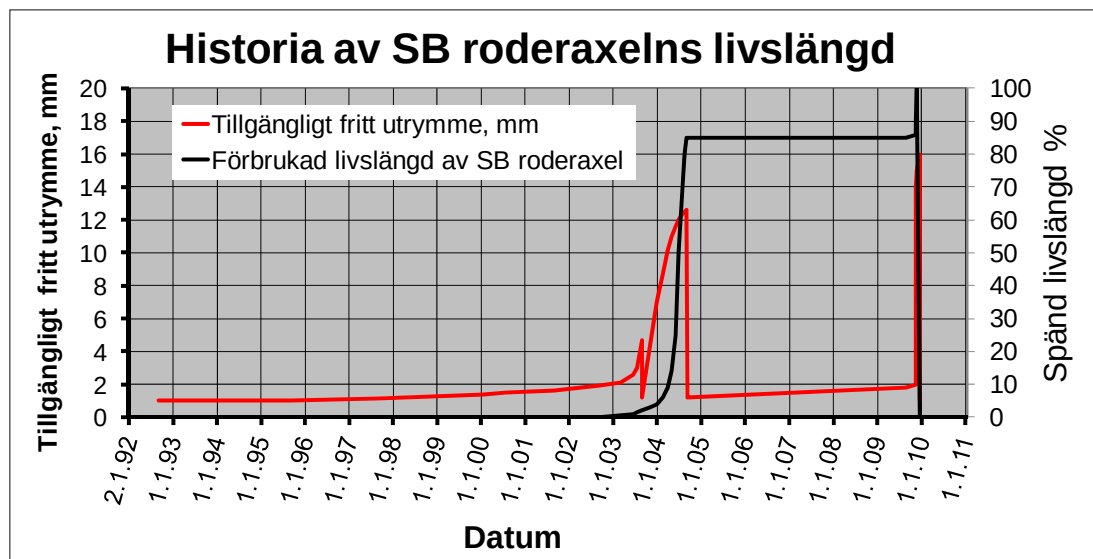


Bild 32. *Utvecklingen av SB-axelns tillgängliga fria utrymme och hur SB-axelns livslängd tog slut. Den tidpunkt då livslängden började minska och den nivå på vilken den stannade efter epoxigjutningen är uppskattningar. Bilden framställer händelsernas grundläggande karaktär.*

De i bild 32 framställda typiska utvecklingstrenderna för tillgängligt fritt utrymme och för livslängd är enligt utredarnas uppfattning korrekta. Däremot är de numeriska värdena för tidpunkter och särskilt för livslängdens utveckling osäkra.

De väsentliga faktorer som har påverkat brottet av SB-axeln har sammanställts i bild 33.

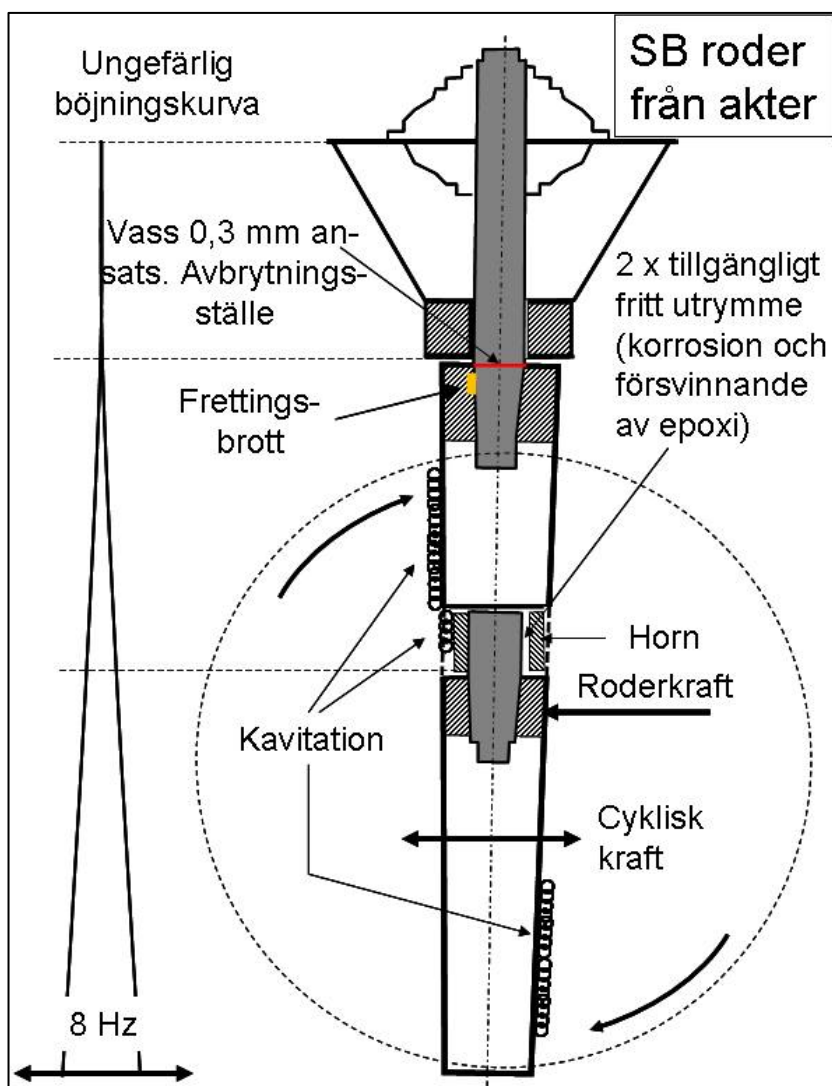


Bild 33. SB-rodret sett bakifrån. Rodrets transversa rörelse och de faktorer som påverkade brottet av SB-axeln visas i bilden. I bilden har axeln och rodret böjts mot fartygets mittlinje. Rodertappslagret är fast i väggen till roderhornets lagerhus. Då finns, på andra sidan rodertappslagret, ett öppet utrymme motsvarande 2 x det fria utrymmet.

2.4 Kontrollen av fartyget på olycksresan

2.4.1 Tidpunkten för axelns brott

Utredarna har uppskattat den tidpunkt då axeln gick av på basis av en jämförelse av roderwinkelkurvor under sju olika dagar. Kurvorna har konstruerats på så sätt att roderinklarna visas varje dag för samma position (bild 34). Därtill utnyttjades en statistisk analys av roderinklarna i bild 34 (man ritade medeltalet $\pm$ två gånger standardavvikelsen) samt uppgifter om förens riktning på ifrågavarande dag. På basen av dessa bilder börjar roderinklarna under olycksdagen avvika från vinklarna under de andra dagarna efter kl. 15.10.

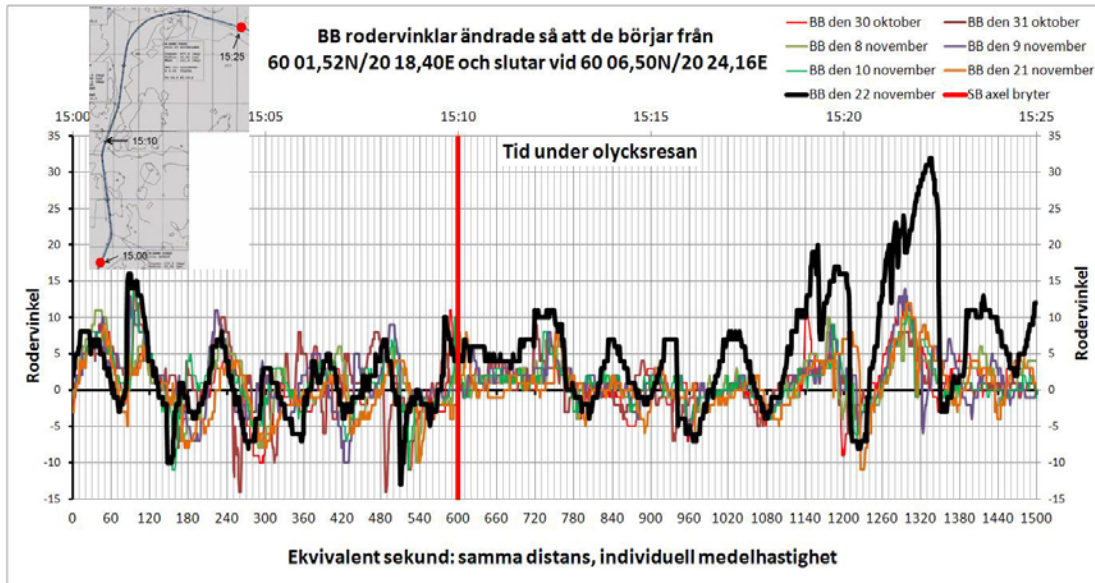


Bild 34. BB-rodervinklar från olika dagar ändrade så att de börjar från och slutar vid samma position. Kurvan för olycksdagen har visats med svart färg. Start- och slutpunkterna har i färdritningen indikerats med röda cirklar.

På basen av undersökning av roderaxelns brottyta kan det konstateras att axeln har brustit då den har varit böjd utåt (m.a.o. då rodren har varit vända till babord). Detta har varit möjligt under giren ca kl. 15.10 (då giren mot styrbord stoppades med motroder åt babord, genom att "stöta").

På basen av detta har man beräknat att roderaxeln brast ca kl. 15.10.

2.4.2 Observering och kontroll av situationen

Det är så sällsynt att en roderaxel går av, att det är svårt att föreställa sig att en sådan händelse kan vara orsaken till manövreringssvårigheterna. Fastän man inte nödvändigtvis genast får reda på den grundläggande orsaken till problemen är det viktigt att inse de risker som manövreringssvårigheterna innebär då fartyget navigerar på en krokig och smal skärgårdsfarled, där ett fartyg med styrproblem har en ständig risk att driva ut från farleden. Det är möjligt att fatta de beslut som hänför sig till fartygets passage enbart på denna basis. Kontrollen av en dylik undantagssituation kan delas upp i tre olika skeden:

1. man blir medveten om att det finns något klart avvikande i manövreringen av fartyget,
2. man vidtar behövliga åtgärder, och
3. man fastställer det egentliga felet.

Det första skedet är det viktigaste eftersom det leder till de två följande skedena. Det första skedet tog tämligen länge i det här fallet eftersom fartyget, som var utrustat med två roder, fortfarande var manöverdugligt. Manöverförmågan hade dock blivit något sämre. Man får ingen indikation om ett dylikt fel till kommandobryggan, vilket innebär att det kan märkas enbart genom att iaktta fartygets förändrade manöverbeteende och mätaruppsättningen.

I analysen har man försökt besvara de väsentligaste frågorna med hänsyn till kontrollen av situationen: när upptäckte man hur allvarigt felet var och kunde det ha skett snabbare samt varför manövreringen av fartyget på farleden ändå lyckades så väl trots att manöverförmågan hade blivit sämre?

I centrum för den operativa verksamheten på kommandobryggan står bryggteamet bestående av linjelotsen som tillsammans med vaktchefen styr fartyget. De är de första som märker fartygets avvikande beteende och de har de bästa förutsättningarna att börja analysera felet. Metoderna för bryggsamarbete (BRM-kulturen) och växelverkan också med det tekniska systemet påverkade deras verksamhet. Fartygets och dess manövreringsutrustnings kända och tillfälliga egenskaper, de använda, möjligen rutinartade körsätten, respektive de externa omständigheterna och övrig trafik inverkar på användningen av det tekniska systemet.

Utredningen av avvikelserna i fartygets manövrering och kontrollen av situationen har analyserats ur de personers perspektiv som styrde fartyget genom att använda en tillämpad SHELL-modell³⁹ (bild 35). Modellen beskriver de mänskliga interaktioner och den tekniska växelverkan som har betydelse i bryggverksamhet med hänsyn till manövreringen av fartyget.

Under den situation som analyseras byttes linjelotsen som hade styrt fartyget. Därför ändrades också det centrala målet för analysen, dvs. bryggteamet. Detta har tagits i beaktande i analysen genom att använda ett tvåfasigt betraktelsesätt.

³⁹ Med hjälp av en SHELL-modell undersöker man människans verksamhet i sin omgivning och strävar till att kartlägga de olika faktorernas inverkan på människans prestationer. Modellens namn härstammar sig från de följande bokstäverna (sektorerna): S(oftware) betyder bl.a. skolning, anvisningar, metoder och föreskrifter. H(ardware) betyder bl.a. anordningar eller själva fartyget som används av människan. E(nvironment) innebär verksamhetsmiljö. Den L(iveware) som står i mitten är den människa vars verksamhet iakttas och den L som är längre ut är de människor som den person som använder en anordning samarbetar med. Avsikten med modellen är inte att sätta in sig i en enskild sektor utan att undersöka helheten och växelverkan mellan de olika sektorerna. IMO rekommenderar att SHELL-modellen används som en olyckundersökningsmetod p.g.a. det systematiska förhållningssättet som den för med sig.

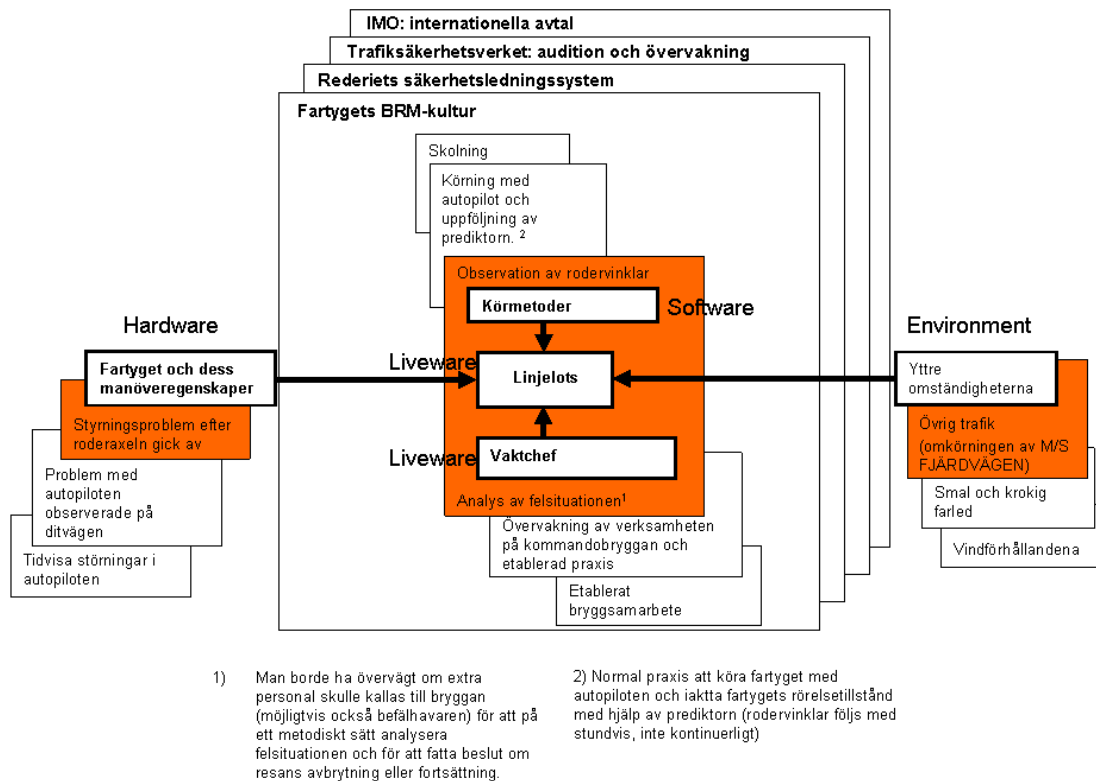


Bild 35. De faktorer på kommandobryggan som påverkade fartygets hantering och beslutsfattande efter att roderaxeln hade gått av beskrivna med hjälp av en tillämpad SHELL-modell.

De faktorer som har undersökts är framställda i bild 35: linjelotsen (liveware), vaktchefen (liveware), körmetoder (software), fartyget och dess manöveregenskaper (hardware) samt de externa förhållandena (environment). Dessutom har man i analysen tagit i beaktande olika omständigheter som har verkat bakom de olika faktorerna.

Bryggsamarbete (BRM, Bridge Resource Management) fungerar som referensram för den operativa verksamheten på kommandobryggan. Den praxis inom bryggsamarbetet som har etablerat sig på fartyget kan kallas för BRM-kultur. BRM-kulturen baserar sig på fartygets säkerhetsledningssystem som Trafiksäkerhetsverket auditerar, godkänner och övervakar. IMO:s internationella avtal fungerar som utgångspunkt. I analysen är BRM-kulturen en central bakgrundsfaktor vilket kan ses i bilden.

Hur upptäckte man att felet var allvarigt och kunde det ha skett tidigare?

**Bryggteamets reaktioner på fartygets beteende och på de yttre omständigheter-
na⁴⁰**

Linjelotsen är den centrala aktören i manövreringen av fartyget. Han/hon fungerar dock i ett bryggteam noga tillsammans med vaktchefen. De yttre omständigheterna, t.ex. farledens krökar och vind påverkar fartygets beteende och sålunda bryggteamets användning av styrutrustningen.

⁴⁰ Behandling av Liveware – Hardware + Environment – växelverkan i SHELL-modellen

När roderaxeln brast och förorsakade styrproblem, kunde man inte misstänka att någonting så allvarligt som brott av roderaxeln skulle vara orsaken till de avvikande manövreringsegenskaperna. Rodret kunde stundvis fastna i en viss vinkel och emellanåt vända i propellerströmmen. Det här kan ha gjort fartygets manövreringsbeteende icke-förutsägbart och sålunda gjort det svårare att göra pålitliga observationer av situationen. Man misstänkte att vinden bidrog till fartygets avvikande manövreringsbeteende. Speciellt girar mot styrbord vållade problem. Efter brottet kunde man utföra enbart två dylika girar, och fartyget stannades efter den senare giren. Mellan dessa två girar körde fartyget om FJÄRDVÄGEN, vilket också avbröt iakttagelserna och analysen av felsituationen.

Ingen av anordningarna på kommandobryggan slog larm under hela händelsen. Detta invercade delvis på att man till en början inte kunde misstänka fel i styranordningen som orsaken till manövreringsproblemen. Man får ingen direkt indikation på brottet av roderaxeln till kommandobryggan. Felet kunde fastställas enbart indirekt genom att iaktta fartygets rörelsetillstånd, det förändrade manövreringsbeteendet och styrstorheter. Brottet av roderaxeln kunde dock inte upptäckas klart i beteendet av fartyget som var utrustat med två roder, eftersom det söndriga rodret inte fastnade i ett extremläge. Fartyget som var utrustat med två roder hade sin manöverförmåga kvar, visserligen något försämrad. Ett fartyg utrustat med ett roder skulle ha förlorat sina styregenskaper i en motsvarande situation.

De ovanligt stora rodervinklarna och deras långa tidmässiga varaktighet var det mest framträdande tecknet på ett roderfel som kunde fås via mätaruppsättningen. Ovanligt stora rodervinklar (ca 30°) kunde ses för första gången i slutet av Stockgrunds gir, som var den första större giren efter att roderaxeln hade gått av. Man kunde iaktta onormalt stora rodervinklar vid stoppen av styrbordsgirar samt då man inledde en gir åt babord. Efter att man hade genomfört en gir var man tvungen att vänta på följande innan man igen hade möjlighet att göra iakttagelser.

Dessutom var de rodervinklar som behövdes för att styra fartyget ensidiga. Även dessa rodervinklar var tidvis tämligen stora (ca 20°). Det var emellertid mycket svårare att märka detta avvikande beteende än att märka de onormalt stora rodervinklarna. Eftersom felet inte upptäcktes omedelbart från de onormalt stora rodervinklarna, tog det tid innan man kunde göra fler iakttagelser (flera rodervinklar som var över 20° och några rodervinklar som var över 30°).

Bryggteamet ändrades och ökade med en person då linjelotsarna bytte vakt. Den nye linjelotsen underrättades om de upptäckta problemen innan han började sin vakt. Han körde en stor och en liten gir med fartyget. Under dessa girar konstaterade han att det inte var möjligt att stoppa fartygets gir ordentligt med motroder och felets allvar började gå upp för bryggteamet.

Man beslöt stanna fartyget i en passlig farledsdel i närheten. Då manövreringsproblemen började uppstå, erbjöd de fria vattenområdena utanför den smala och krokiga skärgårdsfarleden enbart några potentiella möjligheter att stanna ett stort passagerarfartyg utan att störa övrig trafik.

Bryggsamarbete och körmetoder⁴¹

I den första giren efter att roderaxeln hade gått av märkte den förste linjelotsen och vaktchefen avvikelser i fartygets manövreringsegenskaper. Man undrade över autopilotens beteende och de stora rodervinklarna samt reagerade på dem genom att göra små kursförändringar i autopiloten. Man diskuterade dock inte de största rodervinklarnas (30°) numeriska värden fastän de var betydligt större än vanligtvis. Autopiloten använder i normala förhållanden under korta perioder, som varar ca tio sekunder, 15–20 graders rodervinklar⁴². Nu använde autopiloten 25–30 graders rodervinklar (bilderna 8, 9 och 34, kl. 15.21–15.22) oavbrutet i ca en minut. De var dubbla till sin storlek och deras längd var t.o.m. fyra gånger längre än vad som förekom i normal farledskörning med den 18 knops hastighet som nu användes. Fartyget skulle normalt vända kraftigt med dessa rodervinklar och samtidigt kränga betydligt.

Man hade som normal praxis att under farledskörning följa radarbilden samt landskapet utanför. På radarn iakttar man speciellt den prediktion som syns i den, fartygets momentana och kommande position i förhållande till det farledsområde som kan användas, samt övrig trafik. Rodervinklar följs med stundvis, inte kontinuerligt. Om man på kommandobryggan inte råkar titta på displayen för rodervinkeln vid det rätta ögonblicket, märker man inte uppgiften om en rodervinkel som länge har varit stor. De anordningar som visar rodervinkeln finns i Conning-displayen, i mätaruppsättningen ovanför framfönstret och i taket.

Det fanns två personer på bryggan som hade ansvar för navigeringen då de första tecknen på manövreringsproblem uppkom. Då den nye linjelotsen kom till bryggan stärktes bryggbemanningen med en person redan något före vaktbytet. I vaktbytet ändrades den centrala personen i det team som samarbetar på bryggan. Linjelotsen som slutade sin vakt blev på kommandobryggan även efter vaktbytet. Detta visar att de upptäckta manövreringsproblemen ansågs vara betydande.

Efter att bryggteamet ändrades sättet att arbeta och situationsanalysen, fastän det inte uppstod en klar arbetsfördelning mellan bryggpersonalen med hänsyn till uppföljningen av de olika storheterna. Då den nye linjelotsen började sätta sig in i situationen genom att ställa frågor, ökade kommunikationen: det förra bryggteamet rapporterade om sina tidigare iakttagelser av fartygets avvikande beteende och den allmänna situationsbilden började bli klarare.

Eftersom den nye linjelotsen redan före han började sin vakt hade underrättats om problemen i fartygets manövrering, hade han bättre förutsättningar att inse problemets allvar. Dessutom fick han kännning om manövreringen av det defekta fartyget "från ett tomt bord". Den nye linjelotsen berättade fortlöpande om sina iakttagelser om fartygets beteende för de övriga på bryggan.

⁴¹ Behandling av Liveware – Hardware + Environment – växelverkan i SHELL-modellen.

⁴² T.ex. i samband med MS ISABELLAs grundstötning hade en autopilot av samma märke använt i medeltal 10 graders rodervinkel för att balansera den vridande kraft som den sidovind som blåste 34 m/s förorsakade.

I girarna efter vaktbytet bekräftade de stöttningsproblem som den nye linjelotsen märkte för honom att orsaken till problemen låg i själva fartyget, inte förhållandena i omgivningen, och fartyget stannades.

Om mer personal och särskilt befälhavaren hade kallats till bryggan redan tidigare, efter de första klara tecknen på att något var fel, hade detta ökat på resurserna och försnabbat upp analysen av felsituationen och beslutsprocessen att avbryta resan i redan ett tidigare skede.

Varför lyckades man så bra med att manövrera fartyget i farleden trots att manöverförmågan hade blivit sämre?

Inverkan av körsättet och skolningen på kontrollen av fartyget

Trots att det tog tid att förstå felets allvar och att man fortsatte resan med försämrad manöverförmåga, lyckades den yrkeskunniga besättningen, som hade gedigen erfarenhet av ifrågavarande farled, hålla fartyget i farleden och till slut stanna fartyget tryggt. Fartyget styrdes genom att byta automatstyrningssätt och genom att ibland använda manuell styrning för att finna det mest effektiva styrsättet och orsaken till det avvikande beteendet. Handlingarna var försiktiga och genomtänkta.

I simulatorövningar hade man fått färdigheter att styra ett fartyg som beter sig på ett avvikande sätt. Man hade också övat en sådan situation i vilken det ena rodret hade fastnat. Bägge linjelotsarna körde en stor gir med det defekta fartyget genom att använda manuell styrning. Det var en krävande uppgift.

Uppenbarligen möjliggjorde det i simulatorskolning inkörda körsättet, den normala proceduren, att under handstyrning med hjälp av prediktorn följa fartygets rörelsetillstånds snabba förändringar, att hålla fartyget med skador på styranordningarna under kontroll och i farleden. Å andra sidan stödde ifrågavarande körsätt inte iakttagandet av roder-vinklar i så stor mån som skulle ha varit fördelaktigt för iakttagelsernas skull.

2.4.3 Uppskattning av situationskontrollen

Händelseloppet visar att det var mycket svårt eller till och med omöjligt att upptäcka det tekniska problem som uppstod och att tolka det rätt. Roderfelet var inte direkt uppenbart för bryggbesättningen utan krävde *en totalanalys av situationen (i motsats till felanalys)*. Det är en krävande uppgift. Fartyget betedde sig oförutsägbart, men ingen anordning gav indikation av felets verkliga art, dvs. brott av den ena roderaxeln. Exakt ett dylikt fel hade inte heller simulerats i samband med skolning.

Då fartygets girbeteende klart avviker från det normala utan att det finns någon påfallande extern faktor eller ett tekniskt fel som man vet om, är den enda möjligheten att börja *leta efter felet på ett metodiskt sätt*. Målsättningen är att reda ut om man kan fortsätta resan på ett säkert sätt eller om fartygets gång måste avbrytas omedelbart.

I den beslutssituation som uppstod skulle det ha varit nyttigt att sätta igång *en omedelbar förstärkning av resurserna* i enlighet med god BRM-praxis. Flera yrkeskunniga navi-

gatörer och åtminstone fartygets befälhavare kunde ha kallats till bryggan. I varje fall hör en metodisk registrering av fartygets gång, speciellt observation av de rodervinklar som behövs i girar samt deras anteckning, till en effektiv BRM-verksamhet.

Effektiv kommunikation står i kärnan av BRM-förfarandet. I det här fallet innebär det att det skulle ha varit nyttigt att även före vaktbytet diskutera iakttagelserna och analysera situationen, åtgärderna och t.ex. risken att köra om ett annat fartyg då styrningen avvek från det normala. När vaktbytet i sinom tid ägde rum, satte flera personers närvaro igång en aktiv analysering av situationen och ledde till ett tämligen snabbt beslutsfattande.

Situationen som uppstod var så pass oklar att det tog tid för bryggpersonalen att samla iakttagelser innan beslutet att avbryta resan fattades. Beslutet kunde dock ha gjorts snabbare med ett mer effektivt BRM-förfarande – aktiv kommunikation för en metodisk uppföljning av situationen samt ett beslut att utnyttja alla navigatöresurser som fartyget hade tillgängliga för att analysera situationen.

Larm- och räddningsverksamhet

Det slogs inget larm. Efter att man hade stannat fartyget underrättade man Archipelago VTS om situationen i enlighet med Lagen om fartygstrafikservice. En passagerare hade informerat MRCC om situationen. MRCC tog kontakt med fartyget. Sålunda behövde befälhavaren inte göra en MAS-anmälan till MRCC. Befälhavaren uppskattade att situationen inte krävde andra räddningsåtgärder förutom bogseringshjälp, eftersom fartyget var manöverbart och helt sjödugligt. Utredarna delar denna uppfattning.

Fartygets befälhavare kom snart överens om bogseringshjälp för att säkerställa fartygets framkomst till Åbo. Möjligheterna att manövrera fartyget utreddes med hjälp av försök och fartyget flyttades från den trånga farleden till ett öppet havsområde. Där kunde man inte ankra p.g.a. vinden och man började köra en ellipsformad rutt med fartyget.

En dykare togs till fartyget för att reda ut orsaken till manövreringssvårigheterna. Han upptäckte felets omfattning.

Enligt utredarnas uppfattning utfördes den snabba beställningen av bogseringshjälp, kartläggningen av manöveregenskaperna på ett mer öppet havsområde genom att köra cirkel, fartygets körning till Åbo och kartläggningen av felets art på ett korrekt sätt utan att äventyra fartygets säkerhet.

3 SLUTSATSER

Det är ytterst sällsynt att en roderaxel går av. I detta fall var orsaken det utmattningsbrott som uppstod p.g.a. roderaxelns för stora böjning. Den för stora böjningen var möjlig p.g.a. den sällsynta korrosionen av rodertappslagrets lagerhus. Korrosionen orsakade ett stort fritt utrymme i rodertappslagret vid två olika tillfällen, före och efter gjutepoxireparationen år 2004.

3.1 Iakttagelser

1. Bristningen av SB-roderaxeln ledde till en allvarlig situation på en skärgårdsfarled.
2. Roderaxeln brast som följd av en utmattningsskada.

Uppkomsten av utmattningsskadan

3. Tre faktorer inverkade på uppkomsten av utmattningsskadan:
 - rodertappslagrets korrosionskänsliga konstruktion (rodertappslagrets galvaniska korrosion blev möjlig och förorsakade ett stort tillgängligt fritt utrymme i rodertappslagret),
 - en 0,3 mm ansats som hade lämnats på roderaxeln i bearbetningsskedet (SB-roderaxelns utmattningshållbarhet blev betydligt sämre), och
 - de roderkrafter och rodrens resonansvibrationer som genererade en växlande belastning (p.g.a. det stora tillgängliga fria utrymmet överskred växlande belastningar klart axelns märkvärden; p.g.a. ansatsen var axeln svagare än planerat).
4. Korrosionen i rodrets rodertappslager började långsamt. Nedre axelns tillgängliga fria utrymme växte till 1213 mm före 2004. Utmattningsskadan började utvecklas. En stor del av roderaxelns utmattningsslivslängd förbrukades före år 2004.
5. I dockningen år 2004 upptäcktes en överraskande korrosion i rodertappslagrets lagerhus. Rodertappslagrets bussning hade fallit mot rodret.
6. Korrosionsskadan reparerades med gjutepoxi utan att man tog reda på vilka faktorer som orsakade skadan. Klassifikationssällskapet godkände reparationen som permanent.
7. I och med gjutepoxireparationen stannade utbredningen av utmattningsskadan, och utbredningen av korrosionen blev betydligt långsammare.
8. Spelet var inom de föreskrivna gränserna i dockningen år 2007. Spelmätningen kunde dock inte jämföras med de tidigare mätningarna. Skicket av gjutepoxin kontrollerades ytligt.
9. Gjutepoxin som hade använts i reparationen började långsamt vittra sönder. Detta påverkades av tilläggskorrosion i lagerhuset, och epoxins sönderfall blev snabbare och den smulades helt sönder. Epoxin försvann totalt och rodertappslagrets fria utrymme växte till 16–18 mm. Utmattningsbrottsprocessen fortsatte.
10. Roderaxeln brast den 22 november 2009.

Fartygets kontroll

11. Bristningen av roderaxeln orsakade manövreringsproblem för fartyget. Väderleken inverkade inte på händelserna.
12. Man får ingen direkt indikation av roderaxelns brott på bryggan; det måste observeras utgående från fartygets rörelsetillstånd och styrstorheter. Bryggbesättningen vidtog dock inte direkta åtgärder för att avbryta fartygets resa.
13. Resan avbröts ca 30 minuter efter att styrsvårigheterna hade börjat. En bogserbåt kallades till platsen och resan fortsattes långsamt till Åbo.

3.2 Orsakerna till händelsen

Brottet av SB-roderaxel berodde på två strukturella fel som hade lämnats kvar i fartyget under konstruktionsskedet. Det fanns *en vass ansats* i roderaxeln och rodertappslagrets materialval och struktur möjliggjorde *galvanisk korrosion*. Nedre axelns fria utrymme växte något som följd av rodertappslagrets korrosion, vilket innebar att roderaxeln hade rum att böjas mer än planerat. Detta ledde till att spänningarna i roderaxeln växte betydligt över märkvärden. Dessutom riktades dessa spänningar till roderaxeln som p.g.a. ansatsen var svagare än planerat. Spänningarna växlade vilket ledde till utmattningen av metallen.

SB-roderaxelns brottsprocess tog sammanlagt 17 år. Processen framskred i *tre* olika faser. *Den första fasen* utgjordes av korrosion i rodertappslagrets lagerhus under 11 års tid, som följd av vilket det uppstod dolda utmattningsskador i roderaxeln. Den med gjutepoxi utförda reparationen eliminerade rodertappslagrets fria utrymme orsakat av korrosionen. *I den andra fasen* framskred processen i form av en långsam söndervittring av gjutepoxin och slutade genom att inverkan av reparationen totalt försvann och det fria utrymmet blev något större än i den första fasen. *I den tredje fasen* tog den livslängd som fanns kvar efter första fasens utmattningsprocess snabbt slut.

Det framkommer resonansvibrationer i rodret på SILJA EUROPA vilket är karakteristiskt för denna typs fartyg. Rodrets egenfrekvens infaller på de använda bladfrekvenserna av propellern. Detta gjorde axelns utmattningsprocess snabbare. Det skulle vara möjligt att undersöka hornrodrets vibrationsegenskaper i fartygens planeringsskede för att minska på resonansrisken, vilket rekommenderas av vissa klassifikationssällskap.

Bidragande faktorer

Korrosionen upptäcktes i bägge rodertappslagren i samband med dockningen år 2004 och dess omfattning var en överraskning. Dockningstiden hade planerats vara kort och det inverkade på gjutepoxins val till reparationsåtgärd, eftersom reparationen genom användning av gjutepoxi kunde utföras snabbt. Dessutom hade man erfarenhet av dess användning i andra tillämpningar. I förverkligandet såg man inte de dolda risker som hade med strukturen att göra, särskilt då klassifikationssällskapet godtog lösningen som permanent.

3.3 Andra säkerhetsiakttagelser

Planeringen och granskningen av strukturerna. Det skulle ha varit möjligt att upptäcka de strukturella fel som hade förblivit dolda i fartyget under konstruktionsskedet. Möjligheten att roderappslaget kunde korrodera kunde ha fastställts från konstruktionsritningarna på basis av sedvanlig kunskap om korrosion, eftersom man kände till materialvalen och att de metaller som var i kontakt med varandra inte hade skyddats för korrosion. Det var möjligt att göra denna iakttagelse såväl i planeringsskedet som när som helst under användningen av fartyget. Det skulle ha varit möjligt att märka också ansatsen i SB-roderaxeln i samband med klassifikationssällskapets och rederiets mottagningsinspektion före fartygets överlåtande.

Man ingrep inte i korrosionens orsak och dess möjliga konsekvenser för roderaxeln i samband med reparationerna åren 2004 och 2009, utan man bara reparerade skadorna. Roderaxen löstades inte för en inspektion med specificerade mellanrum i samband med dockningar.

Användbarheten av gjutepoxi i reparationen av roderappslaget. Om gjutepoxi används som i denna reparation kan den inte anses vara en permanent lösning i reparationen av korrosionsskadorna i roderappslaget, vilket påvisas av att gjutepoxin gick sönder i båda lagren och försvann i det högra lagret. Gjutepoxin användes i fästandet av lagerbussningen utan att ta i beaktande alla belastningar och belastningsriktningar som riktade sig på epoximaterialet och dess gränssytor. Permanenta reparationer med gjutepoxi är möjliga enbart om det finns långvarig erfarenhet av dess användning. Om man har tänkt att reparationslösningen håller en dockningsintervall i enlighet med fartygets inspektionskrav, kräver det planering av gjutepoxireparationen och uppföljning av skicket av reparationen samt en tillräckligt ofta återkommande kontroll av skicket. Dessutom måste man säkerställa tillräcklig adhesion mellan epoxin och lagerbussningen eller på något annat sätt hindra lagerbussningens rotation.

Dockningarna. Man försöker organisera tidpunkterna för dockningarna på så sätt att dockningen ställer till så lite problem som möjligt för trafikering av fartyget. Därför är dockningstiderna så korta som möjligt, vanligtvis 7–10 dygn. Den korta tiden leder till att man kanske måste utföra reparationer av oväntade fel utan tillräcklig planering.

Några dockningsintervaller hade varit så långa att den allt snabbare framskridande korrosions- och utmattningsprocessen hann orsaka skador.

Lagerspelens mätmetod med toleranstolpar eller genom användning av domkraft är rutinartat och man hade inte berett sig på att leta efter ett avvikande fritt utrymme orsakat t.ex. av lagerhusets korrosion.

Kontrollen av fartyget. Bryggbesättningen vidtog inte direkta åtgärder för att avbryta fartygets resa. Orsaken kan vara att det var svårt att tolka situationen. En mer effektiv BRM-praxis kunde dock ha gjort beslutsfattandet snabbare. Tack vare de manövreringsövningar som hade utförts tidigare bl.a. i simulator kunde bryggbesättningen dock reagera på ett säkert sätt på denna ovanliga situation.

Informeringen av sjöfartens övervaknings- och räddningsorganisationer om situationen skedde i enlighet med författningarna.

I simulatorskolning kan man öva kontrollen av fartygets rörelsetillstånd med manuell styrning för att undersöka hur fartygets beteende (ändringarna i rörelsetillståndets storheter) beror på styrparametrarna (framför allt på rodervinkeln). På så sätt kan man komma fram till argument då man överväger om fartyget ska stannas eller inte då styrningen fungerar på ett onormalt sätt.

4 ÅTGÄRDER

De olika parterna och näringens representanter har hållits uppdaterade om undersökningens viktigaste observationer. Rederiet har i samband med en presentation av undersökningens resultat, varnats om det korrosionsproblem som fortfarande finns i roder tappslagren.

Uppkomsten av eventuella korrosionsskador är nu under noggrannare övervakning. Rederiet har märkt ut rodertappslagrets lagerhus och bussning på så sätt att även en dykare kan se om bussningen har roterat. På samma gång kontrolleras spelet med en toleranstolk. Vid mätningen med toleranstolken använder dykaren en speciell domkraft som ger pålitlig resultat. Det genomförs minst fyra dylika granskningar om året utförda av en dykare eller varv. Mätningen med domkraft utförs inte vid varje dykning, men bussningen granskas alltid.

5 SÄKERHETSREKOMMENDATIONER

Då SILJA EUROPA byggdes var det sällsynt med kvalitetssystem i företagen. Nuförtiden har företagen giltiga certifierade och auditerade kvalitetssystem som t.ex. ISO 9001. De nu upptäckta bristerna i planeringen, tillverkningen och granskningen är sådana att de inte borde förekomma om verksamheten följer ett kvalitetssystem. Ett lyckat genomdrivande av ett fartygs byggprocess för att finna korrekta konstruktionslösningar, inklusive t.o.m. detaljer (såsom i detta fall konstruktion av rodertappslagrets struktur på så sätt att lagerhusets korrosions skulle ha hindrats) i den slutliga produkten, förutsätter speciellt en satsning på koordinering med hänsyn till klassifikationssällskapets, varvets och underleverantörernas verksamhet. Undersökningskommissionen har dock inte ansett det vara nödvändigt att ge säkerhetsrekommendationer med hänsyn till kvalitetskontroll, eftersom de redan existerande instruktionerna är tillräckliga i det avseendet.

Däremot bör **granskningsförfarandet av roderinrättningar** preciseras. De mätningar med vanliga metoder som görs i samband med dockningar avslöjar inte ovanligt stora korrosionsskador i rodertappslagret. För stort fritt utrymme i rodertappslagret förorsakar farligt stora spänningar i roderaxeln. Dessa spänningar kan skada roderaxeln om de är kontinuerliga. De under olika tider utförda spelmätningarna var inte jämförbara, vilket har försvårat resultatens ändamålsenliga användning.

Utmattningsfenomenet kan utvecklas till ett brott förvånansvärt snabbt efter att det har fått en början. Rederierna har en tendens att förlänga dockningsintervallerna som i vissa fall kan bli för långa med tanke på den dolda utmattningsprocessen.

Nuförtiden löstas roderaxlar inte för inspektering med specificerade mellanrum vid dockningar, liksom till t.ex. propelleraxlar.

Olycksutredningscentralen rekommenderar för Bureau Veritas och andra klassifikationssällskap att avvisningar för inspektörer skall inkludera bl.a.:

- 1. den mätmetod som har använts för att mäta spelen bör antecknas i klassifikationssällskapets besiktningsrapport. Mätmetoden bör vara sådan att den alltid ger jämförbara resultat och den bör basera sig på rodertappslagrets struktur på så sätt att alla förändringar i de olika materialens gränssytor (eventuella korrosionsskador) kan upptäckas.*
- 2. om man upprepade gånger har upptäckt ett spel på 3–4 mm skall roderaxeln och dess anslagsdelar granskas för sprickor och korrosion. Då klassifikationssällskapet kommer överens med rederiet om dockningstider, bör det överväga om det i fartygets reparationshistoria finns tecken på en utmattningsprocess i roder- eller annan anläggning.*

Olycksutredningscentralen rekommenderar för Bureau Veritas och andra klassifikationssällskap att:

- 3. klassifikationssällskapet bör överväga att komplettera sina regler beträffande roderaxelns löstagnung med specificerade mellanrum.*

Användningen av gjutepoxi som en del av rodertappslagret struktur i rodret i kontakt med havsvatten på ett så stort fartyg var sällsynt och i detta reparationsvarv unikt.

Olycksutredningscentralen rekommenderar för Bureau Veritas och andra klassifikations-sällskap att:

4. *gjutepoxireparation av en roderaxels rodertappslager bör vara en tillfällig lösning. Reparationens tillfälliga karaktär måste tas i beaktande då man besluter om de kontrollmetoder och inspektionsintervaller som används med hänsyn till reparationens skick. Alla de krafter som riktas från lagerbussningen till epoxin bör tas i beaktande då reparationen planeras.*
5. *före den tillfälliga eller permanenta reparationen av roderaxelns lager skall de orsaker som har lett till reparationsbehovet klarläggas. Dessa orsaker måste tas i beaktande då reparationen planeras.*

En uppskattning av fartygets beteende i avvikande situationer är möjlig genom effektivt BRM-förfarande som innefattar allt från arbetsfördelning till fartygskontroll och situationsanalys. Om fartygets manöversystem fungerar på ett avvikande sätt bör man utreda om fartyget kan fortsätta sin resa.

En målinriktad analys av situationen baserar sig på en ingående förståelse av fartygets grundläggande beteende och förutsätter registrering av styrstorheter, t.ex. metodisk observation och anteckning av de rodervinklar som krävs i girar. Dessutom måste man på basis av dem göra en uppskattning av situationens allvar och ett beslut om fortsatta åtgärder, bl.a. om befälhavaren och/eller extra personal skall kallas till bryggan.

Olycksutredningscentralen rekommenderar för rederiet att:

6. *simulatorskolningen utvecklas så att de utbildades beredskap av en systematisk klarläggning och analys 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 beslutet att avbryta eller fortsätta resan.*

I Helsingfors den 9.11.2012

Martti Heikkilä

Olavi Huuska

Ville Grönvall

Sauli Ahvenjärvi

Ari Nieminen

SAMMANFATTNING AV MOTTAGNA UTLÅTANDENA

Utlåtande av Säkerhetsverket

Säkerhetsverket hade ingenting att utlåta till utredningsrapportens slutgiltiga utkast.

Utlåtande av Bureau Veritas

Bureau Veritas konstaterade i sitt utlåtande att det finns inga bevis av håsprickor som möjligen fanns vid dockningen i 2004.

Dessutom Bureau Veritas understryker, refererande till sina regler (Rules for the Classification of Steel Ships, PtA, NR467, Ch3, Sec4, 2.5 (Bottom Survey), att de synliga delarna av roderaxeln inspekteras regelmässigt. Om inspektören anser nödvändigt löstages rodret och/eller inspektionsplåtar tas bort för att granska nedre lagren.

Utlåtandet noterar att korrosionsskydd inte är klassningsobjekt samt att klassifikationsregler inte är planerade, avsedda eller krävda att inkludera varken metoder för reparation av nedre lagren eller metoder för mätning av nedre lagrens spel. Dessa metoder skall bestämmas av tillverkaren eller rederiet.

I tillägg, utlåtandet kommenterar användning av gjuten epoxi som en permanent reparation.

Utlåtande av Tallink Silja

Tallink Silja ville i sitt utlåtande specificera noggrannare några detaljer i utredningsrapporten. Sådana detaljer var bl.a. styrning av fartyget och navigationsutrustning på bryggan, träning av avvikande situationer i skeppssimulatore, inverkan av fartygets hastighet på evaluering av styrningskrafter samt användning av gjuten epoxi i reparation av nedre lagren. Dessutom fick man en komplettering till åtgärder utförda efter olyckan av rederiet.