

OSA 3 ANALYYSI

SAAREMAA

KURESAARE

MUHU

VORMSI

Kürdla

Takkena

Kõ-lm (Z) 15m

Luoni

Reigi

Kõpu

V-B 15 sek

V-B 13 sek

V-B 11 sek

V-B 8 sek

V-B 7 sek

V-B 6 sek

V-B 5 sek

V-B 4 sek

V-B 3 sek

V-B 2 sek

V-B 1 sek

V-B 0 sek

V-B -1 sek

V-B -2 sek

V-B -3 sek

V-B -4 sek

V-B -5 sek

V-B -6 sek

V-B -7 sek

V-B -8 sek

V-B -9 sek

V-B -10 sek

V-B -11 sek

V-B -12 sek

V-B -13 sek

V-B -14 sek

V-B -15 sek

LUKU 12

Yleiskatsaus erillis-tutkimuksiin

12.1 Merenkäynnin visiiriin aiheuttamien kuormitusten määrittäminen mallikokeilla

12.1.1 Koeohjelma

Ruotsalaisen SSPA:n laboratorioissa tehtiin suuri määrä komission tilaamia mallikokeita. Koeohjelman ensisijaisena tarkoituksena oli määrittää aallokon isku- ja taakku-kuormituksen visioihin kohdistunut kuormitus sillä kulkunopeudella, sillä kurssilla ja niissä aallokko-olosuhteissa, jotka todennäköisesti vallitsivat silloin, kun ESTONIAN visiiri irtosi. Lisäksi testattiin eräiden muuttujien vaihtelun vaikutusta aaltokuormiin. Mallikokeiden tuloksia on lisäksi verrattu aaltokuormien tietokonesimulaatioihin jaksossa 12.2. SSPA:n täydellinen tutkimusraportti on liiteosassa (Supplement 410).

Mittakaavassa 1:35 rakennettiin ESTONIAN pienoismalli, joka varustettiin propulsio- ja kääntölaiteilla ja kääntyvillä peräsimillä. Keulavisioiri rakennettiin eri kappaleena ja se kiinnitettiin runkoon kuusikomponenttivaa'an avulla, jotta

voitaisiin mitata vaikuttavat voimat ja momentit kaikissa kuudessa vapausasteessa. Visiirin painon vaikutus poistettiin mittaustuloksista ja momentit siirrettiin visiirin saranoiden akselin keskipisteeseen.

Aaltokuormituskokeet vasta-aallokossa tehtiin hinausaltaassa ja kokeet sivuvastaisessa aallokossa merikelpoisuusaltaassa. Molemmissa koesarjoissa malli liikkui omien potkuriensa avulla. Pitkäharjainen epäsuorakulmainen aallokko muodostettiin JONSWAP-aaltospekttrin mukaisesti.

Mallikokeissa keskityttiin kuormien ääriarvojen ja tilastollisen jakauman selvittämiseen. Sen vuoksi koe toistettiin kaksissa eri olosuhteissa useita kertoja niin, että aallokon amplitudia ja periodia vaihdeltiin hieman.

Epäsuorakulmaisessa aallokossa tehdystä koesarjasta käytetyt olosuhteet on esitetty taulukossa 12.1.

Aaltospekttrin huipun periodina käytettiin kaikissa kokeissa arvoa 8,0 s lukuun ottamatta viimeistä, jossa käytetty (huippu)periodi oli 8,3 s. Viimeksi mainitun arvon oletettiin tuolloin kaikkein todennäköisimmän vastaavan niitä olosuhteita, joissa ESTONIAN keulavisioiri irtosi.

Taulukko 12.1 SSPA:n laboratorion testiohjelma.

	Kurssi aallokon suhteen	Nopeus	Merkitsevä aallonkorkeus, H_s		Mittausaika
			Nimellinen	Mitattu keulassa	
Hinausalta:					
Vasta-aallokko:	180°	10 kn	4,0 m	3,9 m	30 min
	180°	15 kn	4,0 m	3,9 m	320 min
	180°	19 kn	4,0 m	3,9 m	20 min
	180°	10 kn	5,5 m	5,1 m	60 min
	180°	15 kn	5,5 m	5,2 m	40 min
	180°	19 kn	5,5 m	5,2 m	30 min
MDL:					
Vasta-aallokko:	180°	15 kn	4,0 m	4,1 m	30 min
Sivuvastainen aallokko:	150°	10 kn	4,0 m	4,2 m	30 min
	150°	10 kn	5,5 m	5,3 m	30 min
	150°	15 kn	5,5 m	5,3 m	30 min
	150°	14,5 kn	4,3 m	4,5 m	180 min

12.1.2 Tiivistelmä

Keulan iskukuormitusten epälinearisesta ja satunnaisesta luonteesta johtuen mitattujen kuormien absoluuttiseen suuruuteen on suhtauduttava varauksella. Pienet muutokset aluksen keulan ja aaltojen suhteellisessa liikkeessä, samoin kuin aaltoprofiilissa, aiheuttivat suuria eroja kuormien arvoissa. Suurimpia kuormia ei yleensä havaittu korkeimpien yksittäisten aaltojen kohdalla, vaan aaltojen ja laivan liikkeiden pahimpien yhdistelmien yhteydessä.

Kaikkein kriittisin, eri kokeissa mitattu aaltojen aiheuttaman kuormituksen komponentti, kannen saranan ympäri avaava momentti eli Y-momentti, on esitetty kuvissa 12.1 ja 12.2 keskimääräisen ylitykseen kuluvan ajan funktiona. Pystysuunnassa vaikuttava voima, Z-voima, on esitetty samalla tavalla kuvissa 12.7 ja 12.8. Keskimääräinen ylitykseen kuluva aika tarkoittaa tässä keskimääräistä kuormitushuippujen välistä aikaa, jossa ko. kuormitushuiput ovat yhtä suuria tai suurempia kuin ilmoitettu arvo. Kuviot on piirretty ottamalla kunkin koesarjan täysmittakaavaa vastaava aika ja jakamalla se tietyn kuormitustason ylittävien huippujen lukumäärällä, joka määräytyy SSPA:n raportissa 7524 olevan Weibull-käyrän mukaan.

Esitetyt aallokon aiheuttamat kuormat eivät ota huomioon visiirin omaa painoa. Tämä vähentää pystysuoraan vaikuttavaa voimaa noin 0,6 MN ja avaavaa momenttia noin 2,9 MNm (1 MN vastaa 102 tonnin painoa).

12.1.3 Pitkät koesarjat sivuvastaisessa aallokossa

Merikelpoisuusaltaassa tehdyissä pitkissä koesarjoissa käytettiin sivuvastaista, vasemmalta tulevaa aallokkoa, jonka merkittävä aallonkorkeus (H_s) oli 4,3 m sekä aluksen nopeutena arvoa 14,5 solmua. Näiden arvojen uskottiin kokeiden suorittamisen aikaan vastaavan niitä olosuhteita, joissa ESTONIAN visiirin kiin-

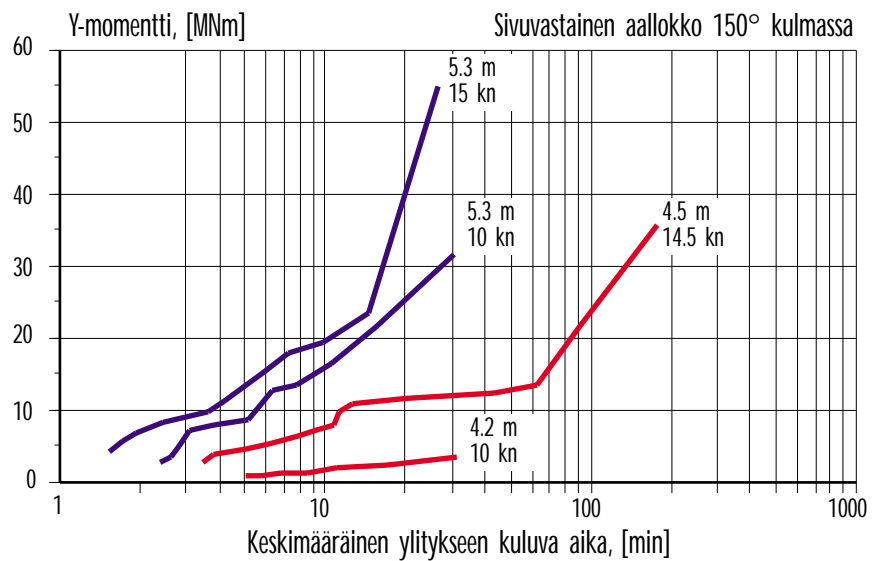
nikkeet pettivät. Tässä koesarjassa, joka vastaa täysmittakaavassa kolmen tunnin mittausaikaa, mitatut aaltojen visiiriin kohdistamien kuormien yksittäiset maksimikomponentit on esitetty taulukossa 12.2.

Kaikki maksimiarvot, Y-voimaa ja Z-momenttia lukuun ottamatta, havaittiin samanaikaisesti (mitattu Y-voima oli tässä yhteydessä 2,2 MN ja Z-momentti 3,8 MNm). Kun nämä suurimmat kuormat

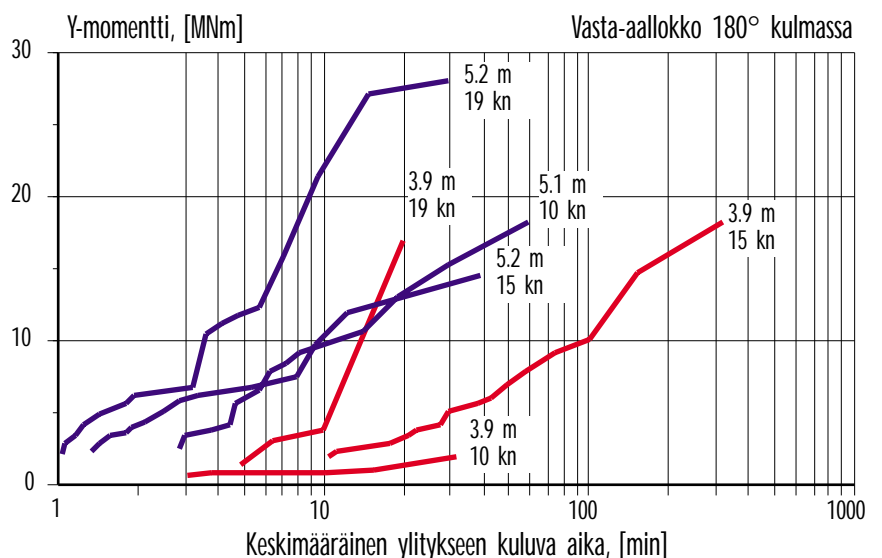
mitattiin, aallon huippuamplitudi oli 3,7 m, aallon ja keulan välinen suhteellinen liike 6,3 m ja suhteellinen nopeus 6,2 m/s.

Pitkittäisen ja pystysuoran voiman huippuarvot esiintyivät aina samanaikaisesti ja suunnilleen saman suuruisina. Kuitenkin ainoastaan harvat näistä kuormitushuipuista aiheuttivat saranan akselin suhteen positiivisen avaavan momentin, joka olisi ollut kyllin suuri ylittäääk-

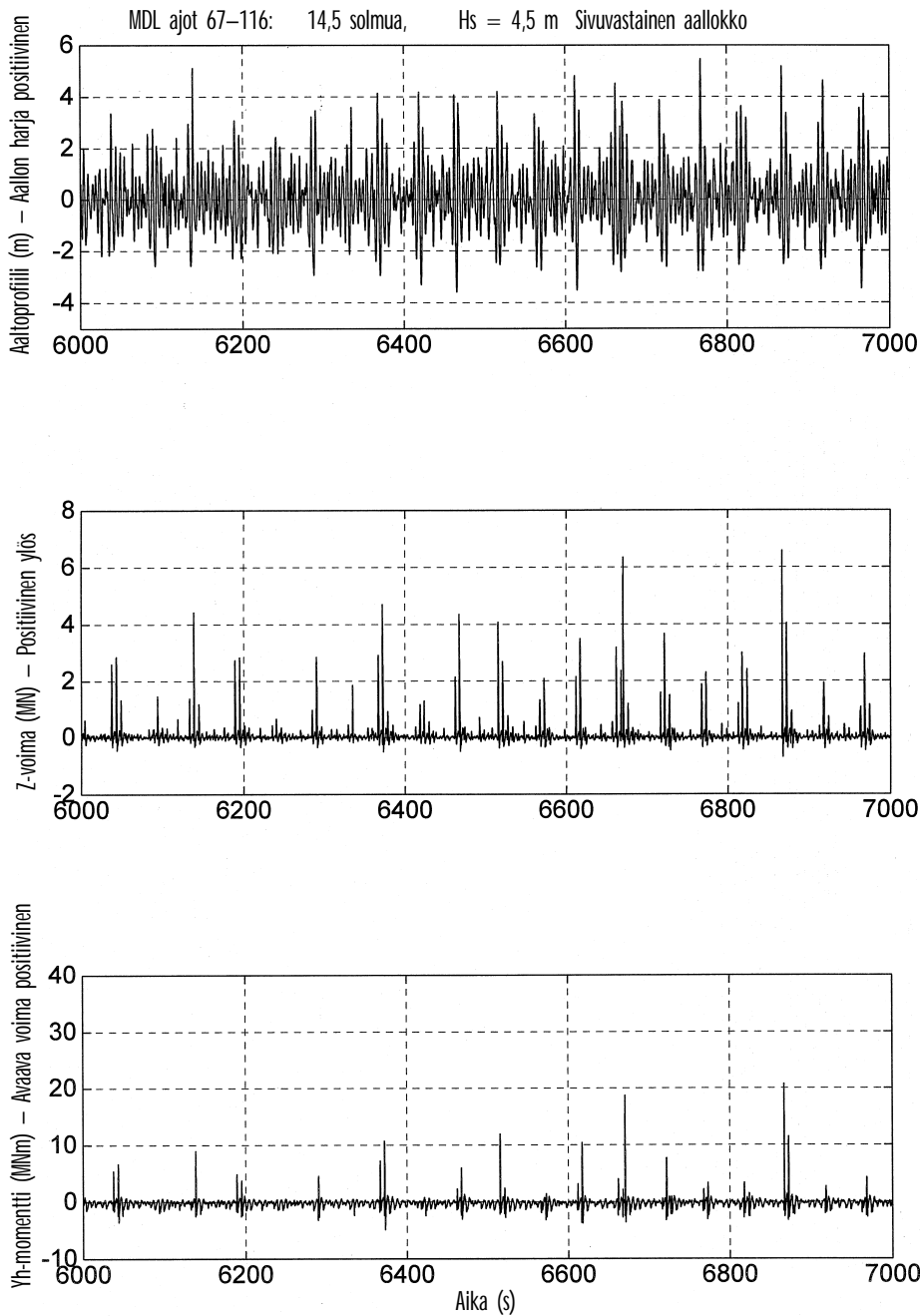
Kuva 12.1 Mitattu aaltojen aiheuttama, visiiriä avaava, pystytasossa vaikuttava momentti sivuvastaisessa aallokossa.



Kuva 12.2 Mitattu aaltojen aiheuttama, visiiriä avaava, pystytasossa vaikuttava momentti vasta-aallokossa.



Kuva 12.3 Näytteitä mallikokeissa mitatuista aikasarjoista.



Taulukko 12.2 Suurimmat aaltokuorman komponentit sivuvastaisessa aallokossa
H_s = 4,5 m

Voimat:

Pitkittäisvoima	X-voima	7,7 MN	(positiivinen perään)
Sivuvoima (Poikittainen voima)	Y-voima	2,7 MN	(positiivinen oikealle)
Pystyvoimat	Z-voima	7,4 MN	(positiivinen ylös)

Momentit visiirin sarana-akselilla:

Momentti pitkittäisakselin suhteen,	X-momentti	10,2 MNm	(positiivinen vasen puoli ylös)
Momentti poikittäisakselin suhteen,	Y-momentti	35,4 MNm	(positiivinen avaava ylöspäin)
Momentti pystyakselin suhteen,	Z-momentti	4,1 MNm	(positiivinen vasen puoli eteen)

seen visiirin painosta aiheutuvan sulkevan momentin ja vain kaksi avaavaa momenttia oli suurempia kuin 20 MNm. Useimpien kuormituskertojen aiheuttama avaavan momentin huippuarvo oli pienempi kuin noin 5 MNm.

Kuvassa 12.3 on esitetty aikasarjana mitatun aaltoprofiilin visiiriin aiheuttama pystysuora voima ja avaava momentti saranan akselin suhteen. Kuva vastaa noin 17 minuutin aikaa täysmittakaavassa.

12.1.4

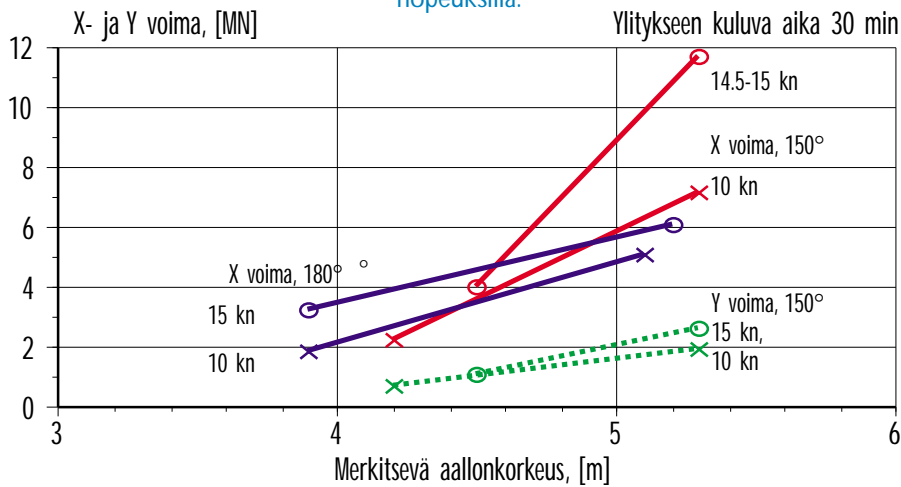
Aaltokuorman komponentit – aallonkorkeuden, kurssin ja nopeuden vaikutus

Kuvissa 12.4–12.6 ja 12.9 on esitetty yhteenveto merkitsevän aallonkorkeuden, kurssin ja nopeuden vaikutuksesta aaltojen visiirille aiheuttamiin kuormiin. Vertailussa on käytetty todennäköisimpiä maksimiarvoja, jotka esiintyvät 30 minuutin aikana. Useimmissa koesarjoissa tämä tarkoittaa sitä, että annettu arvo vastaa korkeinta yksittäistä mittaustulosta ja siksi epävarmuus eri arvojen suuruudessa on huomattava. Kuvissa samoja olosuhteita vastaavien tulosten arvot on yhdistetty suorilla viivoilla. Todelliset kuormien arvot ovat kuitenkin verrannollisia H_s:n (merkitsevä aallonkorkeus) korkeampaan potenssiin kuin ensimmäiseen, joten suoralla viivalla ekstrapolointia ja interpolointia ei pitäisi käyttää.

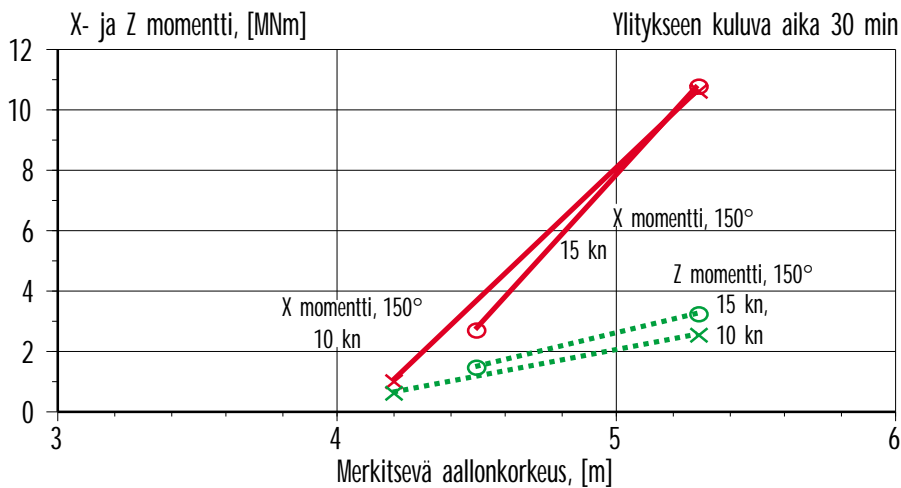
On ilmeistä, että aallonkorkeuden vaikutus on sivuvastaisessa aallokossa paljon suurempi kuin vasta-aallokossa. Tulokset viittaavat siihen, että sivuvastaisessa aallokossa merenkäyntiolosuhteilla on ”kynnys”, jonka alapuolella aallokon visiiriin kohdistama kuormitus on hyvin vähäinen. Kun nämä olosuhteet ylitetään, suurten voimien ja momenttien esiintymisen riski kasvaa nopeasti, vaikka olosuhteet aluksella liikkeiden ja kiihtyvyyksien suhteen muuten eivät muuttuisikaan merkittävästi. Kokeissa käytetyissä olosuhteissa tämä kynnys on havaittavissa silloin, kun merkitsevä aallonkorkeus on noin 4,0 m.

Aaltovoimat näyttävät olevan sivuvastaisessa aallokossa molemmilla tutki-

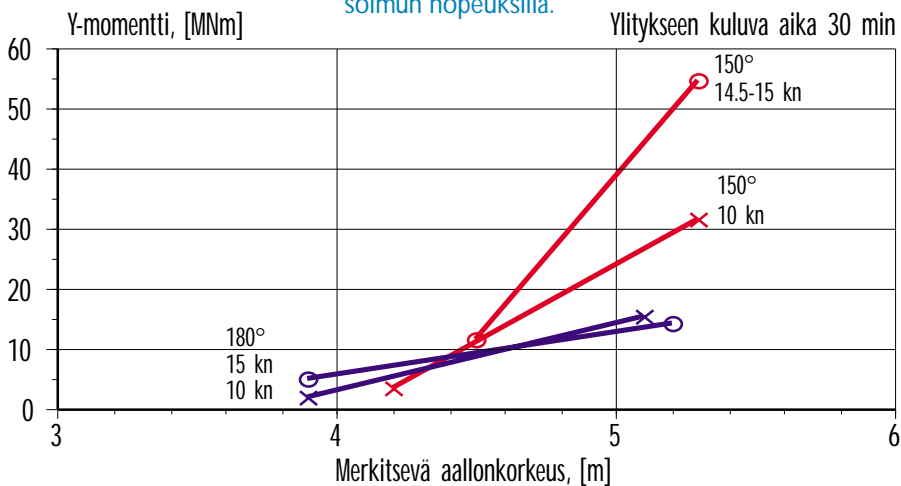
Kuva 12.4 Visiiriin vaikuttava pitkittäinen ja poikittainen aaltokuorma. Mallikoetuloksia vastaisessa ja sivuvastaisessa aallokossa 10 ja 15 solmun nopeuksilla.



Kuva 12.5 Aaltojen aiheuttama momentti visiirin pitkittäis- ja pysty akselin suhteen. Mallikoetuloksia sivuvastaisessa aallokossa 10 ja 15 solmun nopeuksilla.



Kuva 12.6 Aaltojen aiheuttama avaava momentti visiirin saranoiden kautta kulkevan akselin suhteen. Mallikoetuloksia vastaisessa ja sivuvastaisessa aallokossa 10 ja 15 solmun nopeuksilla.



tuilla aallonkorkeuksilla lähes lineaarisesti riippuvaisia nopeudesta. Nopeuden alentaminen 15 solmusta 10 solmuun vähentää siten voimia suunnilleen yhdellä kolmanneksella. Vasta-aallokossa suuremmilla aallonkorkeuksilla nopeuden vaikutus näyttää pienenevän.

12.2 Keulavisiiriin kohdistuneiden vertikaalisten aaltokuormien numeerinen simulointi

12.2.1 Johdanto

ESTONIAN keulavisiiriin kohdistuneita pystysuoria (vertikaalisia) aaltokuormia on myös simuloitu epälineaarista, numeerista menetelmää käyttäen onnettomuusmatkan aikaisten aaltokuormien ja tärkeimpien kuormitusparametrien vaikutuksen arvioimiseksi. Numeeriset ennusteet täydentävät SSPA:n mallikoeketta, sillä on ollut mahdollista simuloida paljon pidempiä ajanjaksoja kuin mitä mallikokeissa voitiin mitata.

Koska veteen painuvan rungon ympäri tapahtuva virtaus on hyvin monimutkainen ilmiö, täsmällisiä numeerisia menetelmiä virtauksen simuloimiseksi ei ole olemassa. Käytetty simulointimenetelmä perustuu tekniseen tarkastelutapaan, jolla aaltokuormien pystysuuntaiset komponentit voitiin laskea. Näin ollen kuormituksen muiden komponenttien simuloiminen ja visiirin pinnan painejakautuman laskeminen ei ole ollut mahdollista.

Numeerista menetelmää on käsitelty tarkemmin liiteosassa olevassa täydellisessä raportissa (Supplement 408). Menetelmän tarkkuuden arvioimiseksi simuloituja pystysuoria aaltokuormia on verrattu kokeissa saatuihin tuloksiin.

Simuloinnit on tehty pitkäharjaisen, epäsäännöllisen aallokon aikahistorialla, joka on muodostettu JONSWAP-aaltospektrikaavan avulla. Jokaisessa tapauk-

Taulukko 12.3 Simuloidut keulavisiiriin aallokossa vaikuttavat pystykuormat, Simulointiohjelma ja esimerkkejä tuloksista (visiirin paino vähennettynä).

Kurssi aallokon suhteen [astetta]	Nopeus [kn]	Keula-aallon korkeus [m]	H_s [m]	T_p [s]	Z-voima [MN] Keskimääräinen ylitykseen kuluva aika 30 minuuttia	Z-voima [MN] Keskimääräinen ylitykseen kuluva aika 10 tuntia
Vasta-aallokko, 180	15	1,0	4,0	8,0	2,50	3,60
180	15	1,0	4,0	8,5	2,55	3,95
180	12	0,65	4,0	8,0	2,05	3,10
180	10	0,4	4,0	8,0	1,70	2,70
180	10	0,4	5,5	8,0	4,35	7,15
180	12	0,65	5,5	8,0	4,80	7,50
180	15	1,0	5,5	8,0	5,35	8,10
180	15	1,5	5,5	8,0	6,30	9,60
Sivuvastainen aallokko, 150	15	1,0	4,0	8,0	2,95	4,20
150	15	1,0	4,5	8,0	4,00	5,60
150	15	1,5	4,0	8,0	3,45	4,80

nessa simuloitu ajanjakso oli 36 tunnin pituinen ja käsitti kuusi kuuden tunnin mittaista simulaatiota. Täydellinen simulointiohjelma on esitetty taulukossa 12.3.

12.2.2 Simulointimenetelmä

Simulointimenetelmä perustuu epälineaariseen "strip"-teoriaan, joka on käytännöllinen menetelmä simuloitaessa laivan liikkeitä ja rungon kuormitusta aallokossa. Käytetyssä menetelmässä pitkäharjaisen, epäsäännöllisen aallokon aikahistoria ja aluksen liikkeet on generoitu lineaarista superpositiomenetelmää käyttäen. Keulavisiiriä on tarkasteltu pienenä, veden painuvana kappaleena. Visiiriin vaikuttavaa pystysuoraa voimaa määritettäessä on tällöin oletettu, että aaltojen dynaaminen paine ja liike sekä nopeus ja kiihtyvyys ovat vakioita visiirin täyttämän tilan sisällä. Tämä oletus vastaa todellisuutta silloin, kun aallon pituus on huomattavasti suurempi kuin keulavisiirin mitat.

Numeerinen malli sisältää strip-teorian antamat hydrostaattiset ja hydrodynaamiset voimat sekä liikemäärätarkastelun mukaiset, epälineaariset hydrodynaamiset voimat. Visiirin veden alla olevan osan suuruuden vaihtelusta johtuvat

hydrodynaamisten voimien epälineaarisuudet on otettu huomioon tarkastelemalla kullakin aika-askeleella senhetkistä vedenpinnan tasoa. Numeeriseen malliin sisältyvät seuraavat voimakomponentit:

- Visiirin paino, jonka oletetaan olleen 0,6 MN (60 t).
- Hitausvoima, joka perustuu aluksen jäykän kappaleen kiihtyvyyteen visiirin keskipisteessä.
- Visiirin lisätyn massan ja vaimennuksen aiheuttama hydrodynaaminen voima, joka on oletettu verrannolliseksi vastaavaan pystysuoraan kiihtyvyyteen ja nopeuteen.
- Hydrostaattinen noste, joka riippuu kunakin hetkenä visiirin veden alla olevan osan tilavuudesta.
- Froude-Krylov voima, joka määritetään visiirin vedenalaisen osan yli laskettuna häiriöttömän aallon lineaarisen hydrodynaamisen paineen integraalina.
- Epälineaarinen pystysuora iskuvoima, jossa merkittävä termi on kohoilun lisätyn massan pystyliikkeen suhteen ja suhteellisen pystynopeuden neliön tulo.
- Veden alla olevan visiirin osan ympärillä tapahtuvan stationäärisen virtauksen aiheuttama voima laskettiin etukäteen

SHIPFLOW-ohjelmalla tyynessä vedessä eri keulasväreille. Kullakin aika-askeleella käytettiin sovitettua käyrän antamia arvoja.

Stationäärisen keula-aallon vaikutus huomioitiin vakiokorjauksella kasvattamalla visiirin vedenalaista osaa. Tällöin SHIPFLOW-ohjelmalla lasketun keula-aallon korkeus eri nopeuksilla lisättiin visiirin keskilinjan pystysuoraan suhteelliseen liikkeeseen.

12.2.3 Tulokset

Simulaatioiden tärkeimmät tulokset käyvät ilmi kuvista, jotka esittävät todennäköisyyksiä, joilla visiiriin kohdistuvan aaltovoiman pystykomponentti ylittää tietyt tasot. Mikäli kohdattujen aaltojen lukumäärää vastaava ylittämistodennäköisyys esitetään logaritmisella asteikolla ja pystyvoima lineaarisella asteikolla, suora viiva näyttää kuvaavan tuloksia hyvin. Ylittämistodennäköisyyden logaritmin ja visiirin pystykuormituksen väliselle lineaariselle riippuvuudelle ei ole teoreettisia perusteita. Weibull-jakautuma on usein sovitettu kuvaamaan pitkän aikavälin aallonkorkeuden ja aaltokuorman jakautumaan, mutta tässä tapauksessa ei ole tietoa siitä, miten hyvin se kuvaisi jakautuman loppupäättä. Tästä syystä suoritettiin pitkiä simulaatioita ekstrapoloinnin välttämiseksi.

Keulavisiirin aaltokuorman ja aallokon amplitudin välinen riippuvuus on hyvin epälineaarinen. Matalat aallot eivät edes ylety visiiriin. Vaikka simuloituilla aalloilla on suunnilleen yhtäsuuri aallon harjojen ja laaksojen amplitudien jakautuma, niin simuloituissa visiirikuormissa esiintyy korkeita huippuja vain silloin, kun keula vajoaa kohtaavaan aaltoon. Kun keula kohoaa vedestä, visiiriin vaikuttava voima on suunnilleen yhtäsuuri kuin visiirin paino.

Suurimpien simuloitujen aaltokuormien arvojen ylittämistodennäköisyys on noin 1/30 000, joka vastaa suunnilleen 30 000 kohdattua aaltoa koko 36 tunnin simulaation aikana. Näin ollen ylittymis-

todennäköisyydet voidaan korvata keskimääräisillä ylitymisperiodeilla käyttämällä kyseisen periodin aikana kohdattujen aaltojen lukumäärää. Vasta-aallokossa, 10 solmun nopeudella, alus kohosi noin 780 aaltoa tunnissa ja 15 solmun nopeudella 970 aaltoa tunnissa. Sivuvastaisessa aallokossa, 15 solmun nopeudella kohdattujen aaltojen lukumäärä oli 860 aaltoa tunnissa.

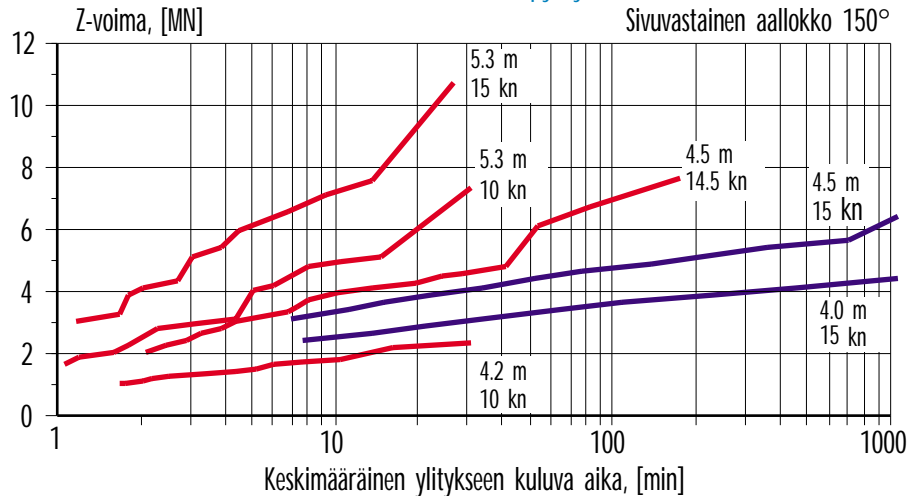
Taulukossa 12.3 on esitetty yhteenveto suoritetuista simuloinneista. Tuloksista on ilmoitettu visiiriin todennäköisin suurin kuormitus 30 minuutin ja 10 tunnin aikana. Todennäköisyys sille, että suurin 30 minuutin altistumisaikana esiintyvä kuormitus on suurempi kuin 10 tunnin altistumisaikana esiintyvä kuormitus on noin 1/20. Tulokset on esitetty samalla tavoin kuin mallikokeiden yhteydessä eli visiiriin staattinen paino on jätetty ottamatta huomioon.

Taulukko 12.3 ja kuva 12.9 osoittavat, miten suuri vaikutus aallonkorkeudella on visiiriin pystykuormitukseen. Kun merkitsevä aallonkorkeus kasvaa vasta-aallokossa 4,0 metristä 5,5 metriin, kuormitus kasvaa 10 solmun nopeudella 160% ja 15 solmun nopeudella 120%. Sivuvastaisessa aallokossa aallonkorkeuden kasvu 4,0 metristä 4,5 metriin aiheuttaa noin 35% lisäyksen visiiriin kuormituksessa.

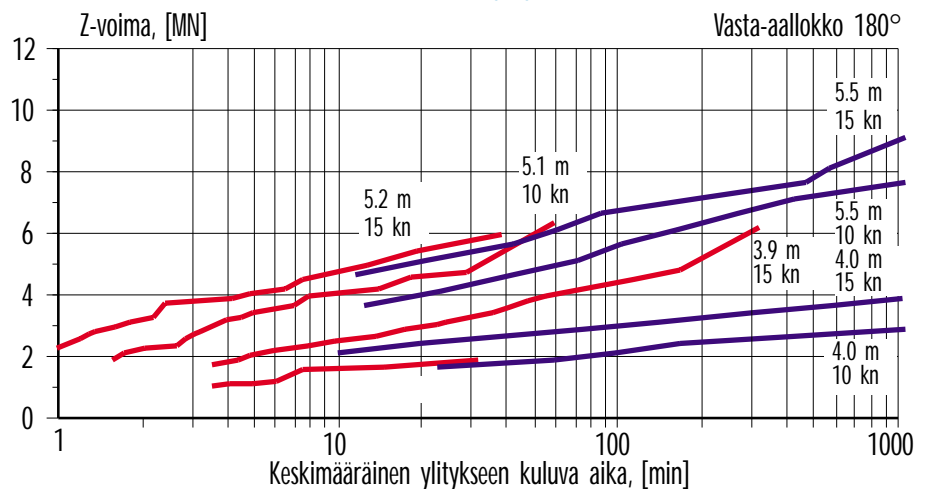
Aluksen kulkunopeuden vaikutus on suunnilleen lineaarinen matalammissa aallokoissa. Täten 15 solmun nopeudella visiiriin kuormitus on noin 50% suurempi kuin 10 solmun nopeudella vasta-aallokossa, kun $H_s = 4,0$ m. Nopeuden lisääntyessä visiiriin kuormitus kasvaa hitaammin korkeammassa kuin matalammassa aallokossa. Kun aallokon suunta muuttuu vastaisesta sivuvastaiseksi, visiiriin kuormitus kasvaa noin 15–20% merkitsevän aallonkorkeuden ollessa 4,0 m.

Stationäärisen keula-aallon vaikutus visiiriin kuormitukseen on huomattavasti pienempi kuin merkitsevän aallonkorkeuden vaikutus. Keula-aallon vaikutus on kuitenkin numeerisessa menetelmässä otettu huomioon karkeasti ja todellisuudessa sillä saattaa olla suurempi vaikutus kuormitukseen.

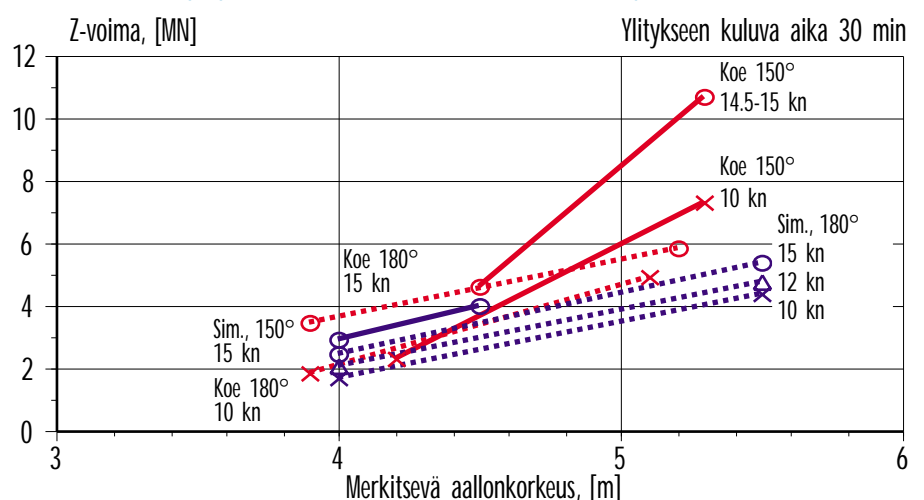
Kuva 12.7 Mallikokeissa mitattujen (punainen) ja simuloitujen (sininen), visiiriin sivuvastaisessa aallokossa vaikuttavien pystykuormien vertailu.



Kuva 12.8 Mallikokeissa mitattujen (punainen) ja simuloitujen (sininen), visiiriin vasta-aallokossa vaikuttavien pystykuormien vertailu.



Kuva 12.9 Mallikokeissa mitattujen (punainen) ja simuloitujen (sininen), visiiriin vaikuttavien pystykuormien vertailu. Aallon korkeuden ja nopeuden vaikutus.



12.2.4 Vertailu mallikokeiden tuloksiin

Laadullisesti simuloinnin tulokset vastaavat hyvin kokeellisia tuloksia. Visiirin kuormituksen kokeellisessa aikahistoriassa esiintyy samanlaisia, korkeita, ylöspäin vaikuttavia voimahuippuja kuin simuloinnin tuloksissa, ja alaspäin vaikuttavat kuormitukset ovat merkityksettömiä. Mallikokeet vahvistavat, että aallonkorkeudella on hyvin voimakas vaikutus kuormitukseen ja että visiirin kuormituksen ja aluksen nopeuden välillä vallitsee suunnilleen lineaarinen riippuvuus. Myös kokeissa visiirin kuormitus sivuvastaisessa aallokossa oli suurempi kuin vasta-aallokossa.

Simulointien ja mallikoetulosten lukuaroja on vertailtu kuvissa 12.7 ja 12.8, joissa on esitetty visiirin pystykuorman ja keskimääräisen ylityspannituksen keskinäinen riippuvuus ja kuvassa 12.9, joka kuvaa aallonkorkeuden ja nopeuden vaikutusta 30 minuutin keskimääräisellä ylityspannituksella.

Kaikissa tapauksissa simuloitujen kuormat olivat pienempiä kuin mitatut kuormat. Yleensä korrelaatio oli parempi korkeassa aallokossa kuin matalassa. Korrelaatio oli erittäin hyvä matalassa vasta-aallokossa 10 solmun nopeudella. Sivuvastaisessa, 4,5 m korkeassa aallokossa, 15 solmun nopeudella, simuloinnin tulokset vastasivat melko hyvin koetuloksia noin 40 minuutin keskimääräiseen ylityspannituksiin asti. Sen jälkeen koetulokset kasvoivat huomattavasti nopeammin kuin simuloitujen visiirin kuormat.

Numeeristen simulointimenetelmien yleisen likimääräisen luonteen ja useiden käytettyjen yksinkertaistavien oletusten lisäksi saattaa olla myös muita syitä siihen, miksi kokeellisten ja numeeristen tulosten erot kasvavat noin 30 minuuttia pitemmillä keskimääräisillä ylityspannituksilla. Kokeellisten kuormitusarvojen ääripäässä erot saattavat johtua tilastollisista syistä, sillä mallikokeet eivät luonnollisestikaan olleet kovin pitkiä.

Toinen mahdollinen syy eroihin saattaa olla aaltojen ominaisuuksissa. Simu-

loitujen aaltojen harjat ja laaksot noudattivat symmetristä Rayleigh-jakautumaa, kun taas kokeissa korkeammat aallot olivat epäsymmetrisiä ja niiden harjojen korkeudet olivat suurempia kuin laaksojen syvyydet. Eräät aallonharjojen korkeudet olivat varsin suuria merkitsevästi aallonkorkeuteen verrattuna.

Sekä mallikokeet että simulaatiot viittaavat kuitenkin siihen, että suurimmat visiirin kuormat eivät ole suurimpien aaltohuippujen aiheuttamia. Ei ole selvyyttä siitä, mitkä yksittäisten aaltojen ominaispiirteet ovat edellytyksenä suurien kuormien syntymiselle, mutta vaikuttaa siltä, että aallon harjan on oltava suhteellisen korkea ja jyrkkä. Usein suurta visiirin kuormaa edeltäneen aallon pohja on ollut hyvin tasainen. Vaikka korkeimmat aallonharjat eivät aiheuta suurimpia kuormia, koetulokset viittaavat siihen, että suurimpien havaittujen aallonharjojen korkeuksien ja suurimpien visiirin pystykuormien välillä saattaa olla jonkinlainen riippuvuus. Voidaan olettaa, että jos aallonharjojen korkeudet ovat poikkeuksellisen suuria, niin ne aallokon ominaispiirteet, jotka ovat suurien kuormien esiintymisen kannalta merkittäviä, saattavat myös olla poikkeuksellisia.

Avomerellä, syvässä vedessä mitatut aallot noudattavat yleensä Rayleigh-jakautumaa varsin hyvin. Voimakkaiden myrskyjen aikana aaltojen harjat alkavat

kuitenkin muuttua jyrkemmiksi ja aallonpohjat muuttuvat tasaisemmiksi, joten niiden jakautumat ovat poikkeavia vähemmän myrskyisiin olosuhteisiin verrattuna. Lisäksi aallokko saattaa lyhyelläkin aikavälillä sisältää muutamia hyvin korkeita yksittäisiä aaltoja.

12.3 Onnettomuusolosuhteissa visiiriin kohdistuneiden maksimivoimien arviointi

Sen jälkeen kun ESTONIA oli muuttanut kurssia käännöspisteessä, se kulki noin puolen tunnin ajan noin 14 solmun nopeudella sivuvastaisessa aallokossa ennen kuin visiirin kiinnitykset pettivät. Eri merentutkimuslaitokset ovat arvioineet merkitsevän aallonkorkeuden onnettomuuspaikalla olleen klo 01 aikaan 4,0–4,1 m. Komissio on mallikokeiden tulosten ja simulointien perusteella arvioinut, mikä oli visiiriin kohdistuneiden maksimaaliskuormien todennäköinen vaihteluväli loppuvaiheessa.

Arvion tärkeimpänä lähtökohtana on käytetty pitkää mallikoesarjaa, joka tehtiin sivuvastaisessa aallokossa 4,5 m merkitsevällä aallonkorkeudella. Kokeissa mitatuille eri kuormituskomponenteille on sovitettu Weibull-todennäköisyysjakautuma. Tämän tyyppinen jakautuma

Taulukko 12.4 Yhteenveto mallikokeessa mitattujen aaltokuormien jakaantumisesta:

Kuorman komponentti	Kumulatiivinen todennäköisyysjakautuma		Kuormitushuippujen lukumäärä 30 minuutissa n	Suurin arvo 30 minuutin aikana		
	Weibull: $F(x) = 1 - \exp(-(x/b)^k)$ parametrit: b k			Ylitys- todennäköisyys 0,95	Todennäköisin suurin arvo	Ylitys- todennäköisyys 0,05
X-voima	1,41	1,04	50	3,85	5,23	9,01
Y-voima	0,58	0,93	11	0,85	1,49	3,53
Z-voima	1,40	1,05	53	3,86	5,20	8,86
X-momentti	1,00	0,60	8	1,28	3,39	14,88
Y-momentti	5,11	0,81	11	7,97	15,04	40,71

näyttää pätevän vielä pienillä todennäköisyyden arvoilla, kuten pitkät numeeriset simulaatiot osoittavat. Näistä perusjakautumista on laskettu ääriarvojakautumat 30 minuutin altistumisajalle ja niiden perusteella on laskettu todennäköisimmät maksimikuormat ja niiden vaihteluväli 90% luotettavuusvälillä. Mallikoetulosten analyyseistä on esitetty yh-

teenvedo taulukossa 12.4. Koska 30 minuutin aikana havaittujen kuormitushuippujen lukumäärä on pieni, niin arvioidujen todennäköisimpien suurimpien kuormitushuippujen vaihteluväli on suuri. Varsinkin X- ja Y-momenteilla, joilla on merkittävästi pienempi muoto-parametri, k, kuin voimilla, ilmenee maksimiarvojen jakautumassa suurta hajon-

taa. Z-momentin hajontaa ei analysoitu yksityiskohtaisesti.

Onnettomuuden sattuessa vallinneissa olosuhteissa esiintyneet kuormat arviointiin lopuksi karkeasti pienentämällä mallikoetulosten kuormia eri merkitsevien aallonkorkeuksien, 4,5 m ja 4,0–4,1 m, eroja vastaavassa suhteessa. Voimat pienenevät 30% ja momentit 50%. Voimien pienenemismäärä on peräisin numeerisista simulaatioista (ks. taulukko 12.3 ja kuva 12.9) ja momenttien pienenemismäärä perustuu voimien ja momenttien välisen riippuvuuden analysointiin (kuva 12.10).

Komission arvio suurimmista visiiriin vaikuttaneista aaltokuormista onnettomuuden aikaisissa olosuhteissa on koottu taulukkoon 12.5. Koska mallikoeteissa käytettyjen aaltojen huiput olivat melko korkeita aallonpohjiin verrattuna, tämä arvio saattaa olla hieman liian suuri. Toisaalta, eri merentutkimuslaitosten mukaan arviointiin vallinneista aallokko-olosuhteista liittyvä epävarmuus vastaa merkitsevän aallonkorkeuden arvossa noin 0,5 m. Mikäli tämä epävarmuus otettaisiin huomioon, esitettyjen maksimiarvojen vaihteluväli kasvaisi huomattavasti.

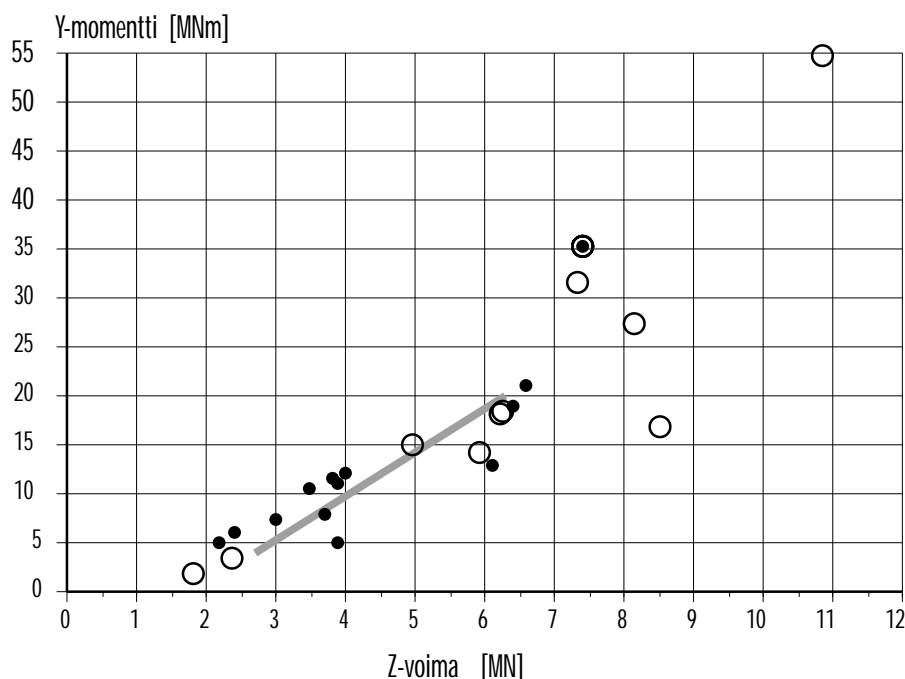
12.4 Aallokon aiheuttamien liikkeiden arviot

12.4.1 Laskentamenetelmä

ESTONIAlla vallinneen tilanteen analysoimiseksi aallokon aiheuttamien liikkeiden osalta on tehty numeerisia arvioita käyttämällä hyväksi strip-teoriaa ja lineaarista superpositioperiaatetta. Strip-teoria on perustana yleisesti tunnetulle numeeriselle menetelmälle, jonka tarkkuus on todettu useissa vertailuissa mallikokeiden ja täysmittakaavakokeiden tuloksiin. Myös nyt käsillä olevassa tapauksessa teorian antamat tulokset vastaavat hyvin koetuloksia.

Päähuomio on kiinnitetty kannelle

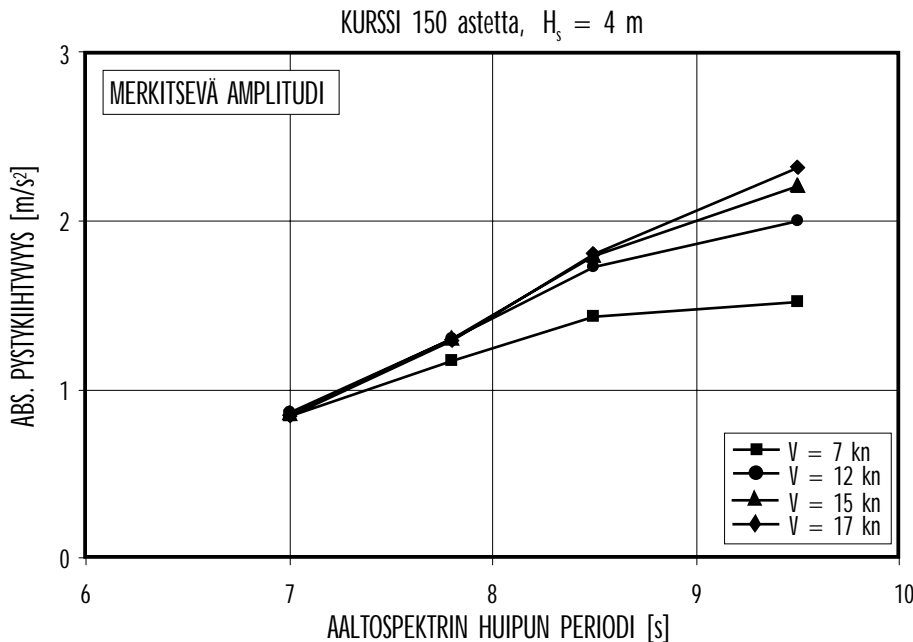
Kuva 12.10 Pystyvoimien ja avaavien momenttien välinen korrelaatio mallikoetuloksissa. Ympyrät osoittavat suurinta yksittäistä mitattua arvoa eri mittauksissa. Mustat pisteet osoittavat 13 korkeinta arvoa sivuvastaisessa aallokossa tehdyissä kokeissa, kun $H_s = 4,5$ m. Viiva osoittaa suurimmat arvioidut kuormat onnettomuuden aikana vallinneissa olosuhteissa.



Taulukko 12.5 Yhteenveto arvioiduista, onnettomuusolosuhteissa vaikuttaneista aaltokuorman komponenteista. Sivuvastainen aallokko H_s 4,0 - 4,1 m.

Kuorman komponentti	Kuorman positiivinen suunta	Suurin arvo 30 minuutin aikana Vaihteluväli 90 % todennäköisyydellä	Todennäköisin arvo
Visiiriin kohdistuvat voimat:			
X-voima (pitkittäinen)	perään	2,7–6,3 MN	3,6 MN
Y-voima (poikittäinen)	oikealle	0,6–2,5 MN	1,0 MN
Z-voima (pysty)	ylös	2,7–6,2 MN	3,6 MN
Momentit sarana-akselin suhteen:			
X-momentti	vasen puoli ylös	0,6–7,4 MNm	1,7 MNm
Y-momentti	avaava	4,0–20,0 MNm	7,5 MNm
Z-momentti	vasen puoli eteen	0,5–2,5 MNm	1,0 MNm

Kuva 12.11 Pystykiihtyvyys komentosillalla sivuvastaisessa aallokossa, $H_s = 4$ m.



tulevaan veteen, aluksen pohjaan kohdistuviin iskuihin ja matkustajien mukavuuteen, jonka kannalta määrävänä tekijänä on pystykiihtyvyys. Täydellinen raportti aaltojen aiheuttamista liikkeistä on erillisenä liitteenä (Supplement 412).

Numeeriset ennusteet tehtiin pitkäharjaiselle, epäsäännölliselle aallokolle, joka määriteltiin JONSWAP- ja ISSC-spektrien avulla. Spektrin huippuja vastaavat aallon periodit (modaaliset periodit) olivat 7,0 s, 7,8 s, 8,5 s, ja 9,5 s. Periodilla 7,8 s, joka on lähellä onnettomuuden aikaista aaltoperiodia, laskettiin aaltojen aiheuttamat liikkeet myös lyhyt- ja pitkäharjaisessa aallokossa. Käytetty merkitsevä aallonkorkeus oli aina 4,0 m, jonka arvioidaan vastaavan onnettomuuden sattuessa vallinneita olosuhteita.

Aluksen nopeuden vaikutus aaltojen aiheuttamiin liikkeisiin tutkittiin käyttäen nopeuksia 7, 12, 15 ja 17 solmua. Aluksen kurssit aaltojen suhteen olivat 180°, joka tarkoittaa vasta-aallokkoa, sekä 150° ja 120°, jotka merkitsivät sivuvastaisista aallokkoa. Aallot kohtasivat ESTONIAN hieman aluksen keulan vasemmalta puolelta.

12.4.2 Tulokset

Numeeristen laskelmien tulokset osoittavat yleisesti, että aaltojen modaalisella periodilla ja aluksen kurssilla aaltojen suhteen on suurempi vaikutus aaltojen synnyttämiin liikkeisiin kuin aluksen nopeudella tässä tarkastelluilla periodien ja kurssien arvoilla. Merkitsevä liikeamplitudi kasvaa aaltojen periodin kasvaessa ja kun aluksen kurssi aaltojen suhteen muuttuu vasta-aallokosta kohti sivuaallokkoa. Liikkeet olivat lyhyt- ja pitkäharjaisessa aallokossa suuremmat kuin pitkäharjaisessa, suuntaa 120° lukuunottamatta. Tulokset viittaavat siihen, että onnettomuusyönä aallot olivat suhteellisen lyhyitä aluksen pituuteen verrattuna ja alus liikkui lähinnä aaltojen läpi, varsinkin ennen keskisyötä.

Juuri ennen onnettomuutta keulaviisiirin pystykiihtyvyyden merkitsevä amplitudi oli 2–2,5 m/s² ja suurimmat amplitudit saattoivat olla noin 0,4 g. Tämä kiihtyvyydestä on suunnilleen puolet siitä tasosta, jolla rahtialukset muuttavat kurssia tai pienentävät nopeutta kiihty-

vyyksien pienentämiseksi ja noin kaksi kolmasosaa vastaavasta ro-ro lastialusten tasosta.

Matkustajaosaston keulapäässä pystykiihtyvyydet ylittivät hieman ennen onnettomuutta selvästi ISO:n merisairautta koskevassa standardissa (ISO 2631/3) määritellyn rajan, joka vastaa huomattavan epämukavia olosuhteita. Vastaava ISO-raja, millä tasolla 10% ihmisistä tulee merisairaaksi, on merkitsevän amplitudin avulla ilmaistuna 1,0 m/s². Noin 20% ESTONIAN keulayhtien matkustajista on saattanut olla merisairaita. Keski-laivassa pystykiihtyvyydet olivat huomattavasti ISO:n raja-arvon alapuolella ja perälaivassa ne olivat suunnilleen sen suuruisia. Ennen keskisyötä, kun aallonkorkeus oli pienempi, pystykiihtyvyydet olivat ainakin 25% pienempiä kuin juuri ennen onnettomuutta.

Nopeuden pienentäminen 15 solmusta 7 solmuun olisi pienentänyt merkitsevää pystykiihtyvyyttä suunnilleen arvosta 1,5 m/s² arvoon 1,3 m/s² matkustajaosaston keulapäässä tai komentosillalla (kuva 12.11). Jos aluksen kurssia olisi muutettu aaltojen suhteen, olisi kiihtyvyydestä alkanut merkittävästi pienentyä aallokon tullessa takaa sivulta. Huomattavasti näitä ESTONIALLE ennustettuja arvoja suurempia pystykiihtyvyyksiä on mitattu matkustaja-aluksilla kovissa myrskyissä monilla eri merialueilla, Itämeri mukaan luettuna.

Keulassa vedenpinnan taso kohosi autokannen tason yläpuolelle lähes jokaisen aallon kohtaamisen yhteydessä keulan ja vedenpinnan yhdistetyn pystyliikkeen takia. Keskimäärin yksi aalto sadasta, eli yksi aalto viiden minuutin aikana, ylsi rampin aukon yläreunan tasolle. Tästä oli vielä 2,5 m matkaa varalaidan yläreunaan. Näissä tapauksissa keulakannelle tuli roiskeita ja vettä. Eloönjääneet ovat yleisesti kertoneet, että ilmassa lensi paljon roiskeita ja vettä ja toisinaan keula painui veden alle. Keulakannelle tuli kuitenkin harvoin suuria määriä vettä ja kovia pohjaiskuja sattui harvoin. Keulan varalaitaan kohdistuvia iskuja tapahtui ilmeisesti paljon useammin kuin pohjaiskuja.

12.5 Kallistuneen aluksen hydrodynaamisten ominaisuuksien määrittäminen mallikokeilla

Kaikumittaustutkimuksissa havaittujen, meren pohjassa olevien hyllyn kappaleiden ja ohjailusimulaatioiden perusteella on todettu, että ESTONIA kääntyi onnettomuuden alkuvaiheissa vasempaan. SSPA:n merikelpoisuusaltaassa suoritettiin aaltokuormakokeiden yhteydessä sarja mallikokeita, joilla pyrittiin selvittämään, olisiko aluksen kääntyminen vasempaan voinut tapahtua spontaanisti, laivan rungon muuttuneiden hydrodynaamisten ominaisuuksien takia sen jälkeen, kun alus alkoi kallistua liikkuaan eteenpäin. Täydellinen raportti näistä koetuloksista on esitetty erillisessä liitteessä (Supplement 410).

Omilla potkureillaan liikkuvaa ESTONIAN pienoismallia ajettiin tyynessä vedessä ja vastaavasti sivuaallokossa 14,5 solmun nopeudella. Ajon aikana aluksen laidalle asetettiin erillisiä painoja, jotka aiheuttivat alukselle staattisen kallistuman välillä 9°–27°. Autopilotin ollessa päällä suoran kurssin säilyttämisessä ei ollut ongelmia, vaikka käytettiin vain pieniä peräsinkulmia. Kun peräsimet lukittiin, alus pyrki kääntymään samalle puolelle kuin se oli kallistunut. Esimerkiksi oikeanpuoleinen kallistuma aiheutti käännöksen oikealle. Aluksen käyttäytymisessä ei ollut suuria eroja, kun painot asetettiin pituussuunnassa eri paikkoihin.

Mallikokeiden perusteella voidaan päätellä, että mahdollinen käännös vasempaan kaatumisen alkuvaiheissa ei johtunut aluksen kallistuneesta asennosta muuttuneista hydrodynaamisista ominaisuuksista. Kokeet tehtiin kuitenkin ilman minkäänlaista tuulta. Ohjailusimulaatioilla on osoitettu, että peräsimen ollessa lukittuina ja nopeuden pienentyessä, viistosti edestä puhaltava tuuli saisi aluksen kääntymään kohti tuulta, mutta ei kokonaan tuulen silmän yli toiselle puolelle.

12.6 Aluksen vuodon ja uppoamisen simulointi

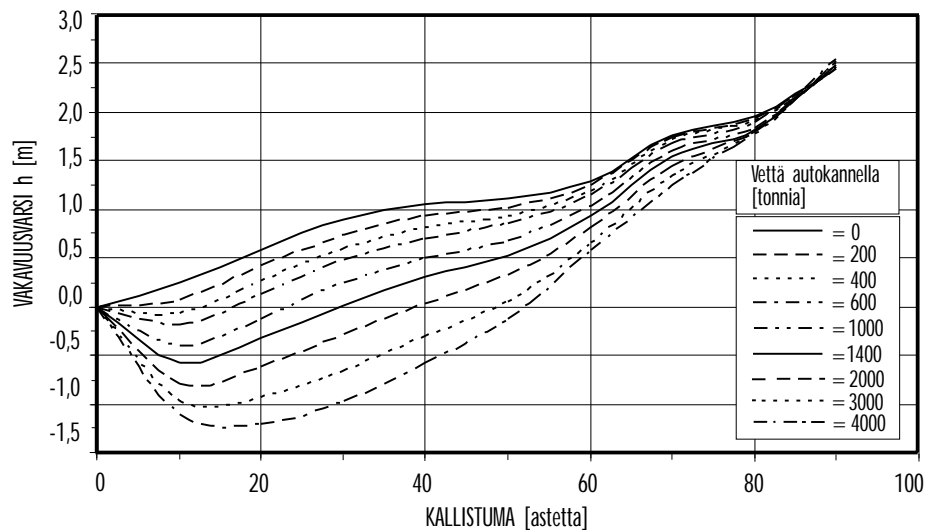
Komissio tilasi teoreettisia tutkimuksia, joilla selvitettiin ja simuloitiin ESTONIAN nopeaa täyttymistä vedellä, kaatumista ja uppoamista. Nämä selvitykset sisältävät analyysjä hydrostaattisista kelluntatilanteista ja vakavuudesta, aluksen liikkeistä aallokossa kallistuneena ja autokannelle virranneen veden määrästä kaatumisen alkuvaiheissa. Raportit ovat kokonaisuudessaan liiteosassa. Seuraa-

vassa on vain lyhyt yhteenveto tärkeimmistä tuloksista.

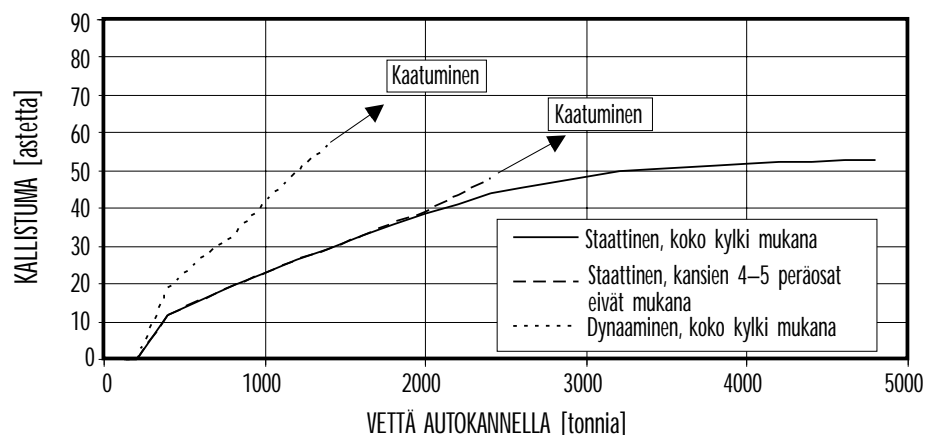
12.6.1 Kelluntatilanteet ja vakavuus vuodon aikana

Komissiolle tehtiin uusia vakavuuslaskelmia viimeisen voimassa olleen kallistuskokeen tulosten perusteella. Laskelmat vahvistavat, että ESTONIA täytti onnettomuusmatkan lastitilanteessa SOLAS 1974 sopimuksen mukaiset kahden osaston vuotovakavuusvaatimukset.

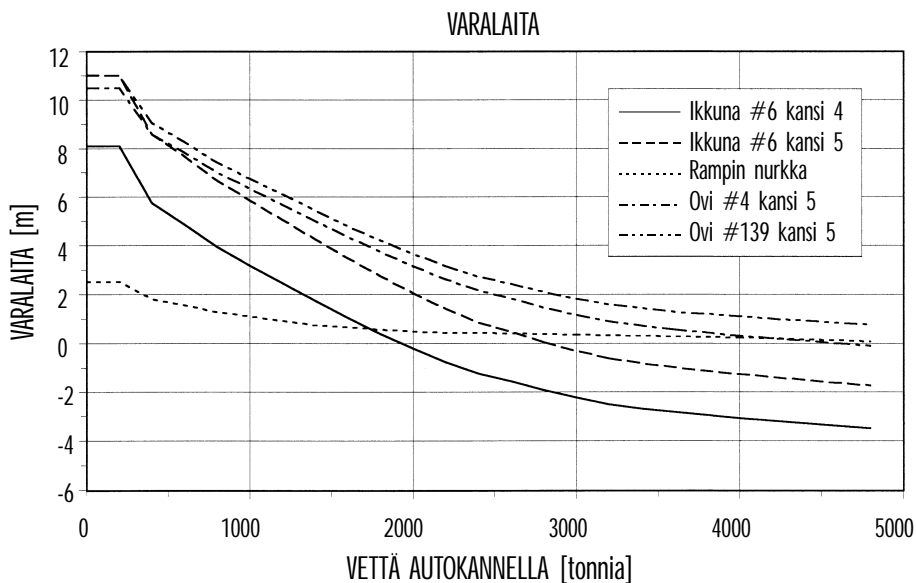
Kuva 12.12 ESTONIAN staattisia vakavuuskäyriä, kun autokannella oli eri määriä vettä. Laivan kylki oletettu ehjäksi.



Kuva 12.13 ESTONIAN kallistuma suhteessa autokannella olevaan vesimäärään.



Kuva 12.14 Varalaita ensimmäisiin mahdollisiin vuotoaukkoihin suhteessa autokannella olevaan vesimäärään. Aukot ovat sivuikkuna perässä kannella 4 ja 5, kaarella 6, keularampin oikeanpuoleinen alanurkka, peräovi kannella 5 ja etuovi kannella 5.



Vuotovakavuusmääräykset koskevat vain aluksen vesitiivistä osaa laipiokannen alapuolella, tässä tapauksessa autokannen alapuolella.

Suurella, avoimella autokannella varustetun ro-ro aluksen alkuvakavuus on erittäin herkkä autokannelle pääsevän veden suhteen. Pieni vesimäärä huonontaa vakavuutta pystysuorassa asennossa ja aiheuttaa syvän kallistuman tasapainoasemassa.

ESTONIAN staattista vakavuutta on analysoitu myös, kun autokannella oli eri määriä vettä. Kuva 12.12 esittää staattisia vakavuuskäyriä veden määrän autokannella kasvaessa 0:sta 4 000:een tonniin. Nämä käyrät pätevät, kun aluksen kylki on ehjä. Laskelmat osoittavat, että 400 tonnia vettä autokannella aiheuttaa vähän yli 10 asteen staattisen kallistuman ja 1 000 tonnia vähän yli 20 asteen kallistuman (kuva 12.13). Jyrkkä käännös 15 solmun nopeudella olisi aiheuttanut noin 3 asteen lisäkallistuman.

Vaikka kallistuma kasvoi nopeasti, pelkkä vesi autokannella ei olisi riittänyt kaatamaan alusta ja aiheuttamaan sel-

viytymismahdollisuuksien menetystä. Niin kauan kuin runko oli ehjä ja vedenpitävä autokannen ala- ja yläpuolella, autokannella oleva vesi ei oleellisesti muuttanut jäännösvakavuutta suurilla kallistuskulmilla (kuva 12.12). Kaatuminen varmistui vasta veden tunkeutuessa aluksen muihin osiin.

Kun veden määrä autokannella jatkuvasti kasvoi, olivat hydrostaattisten laskelmien mukaan ensimmäiset mahdolliset muiden osastojen vuotopisteet kannen 4 ikkunat perässä (kuva 12.14). Pian sen jälkeen olivat myös ikkunat ja peräovi kannella 5 veden alla. Vähän alle 2 000 tonnia vettä autokannella riitti painamaan ensimmäiset vuotopisteet keskimääräiselle vesiviivapintatasolle. Silloin kallistuma oli noin 35 astetta. Ramppiaukon alin nurkka oli tässä vaiheessa vielä vähän keskimääräisen vedenpinnan yläpuolella.

Niin pian kuin vesi pääsi vapaasti tunkeutumaan matkustajakansille koko jäännösvakavuus oli uhattuna ja laiva käytännössä menetetty. Ilman ehjää ylärakennetta kannen 4 yläpuolella suurin

mahdollinen kallistuskulma tasapainoasemassa olisi ollut 40 astetta ennen täydellistä kaatumista. Tämä tilanne olisi ylitetty, kun autokannella oli noin 2 000 tonnia vettä.

Vakavuuslaskelmat osoittavat, että ESTONIALla olisi ollut pieni positiivinen alkuvakavuus, jos kaksi sauna-osastoa ja seuraava osasto peräänpäin kannella 0 olisivat olleet vuodon kohteena. Vakavuus olisi ollut huonoin vuodon alkuvaiheessa ja parantunut, kun enemmän vettä olisi virrannut näihin kolmeen osastoon.

Lastin liikkumisen vaikutusta selvitettiin myös erillisissä tutkimuksissa. Ajoneuvojen jakautumasta autokannella johdettiin, että suurin mahdollinen lastin painopisteen siirtymä poikittaissuunnassa olisi voinut olla vain muutaman metrin suuruusluokkaa. Lastin kahden metrin siirtymän vaikutuksesta olisi tarvittu noin 10 % vähemmän vettä autokannella progressiivisen vuodon alkamiseen kannelle 4.

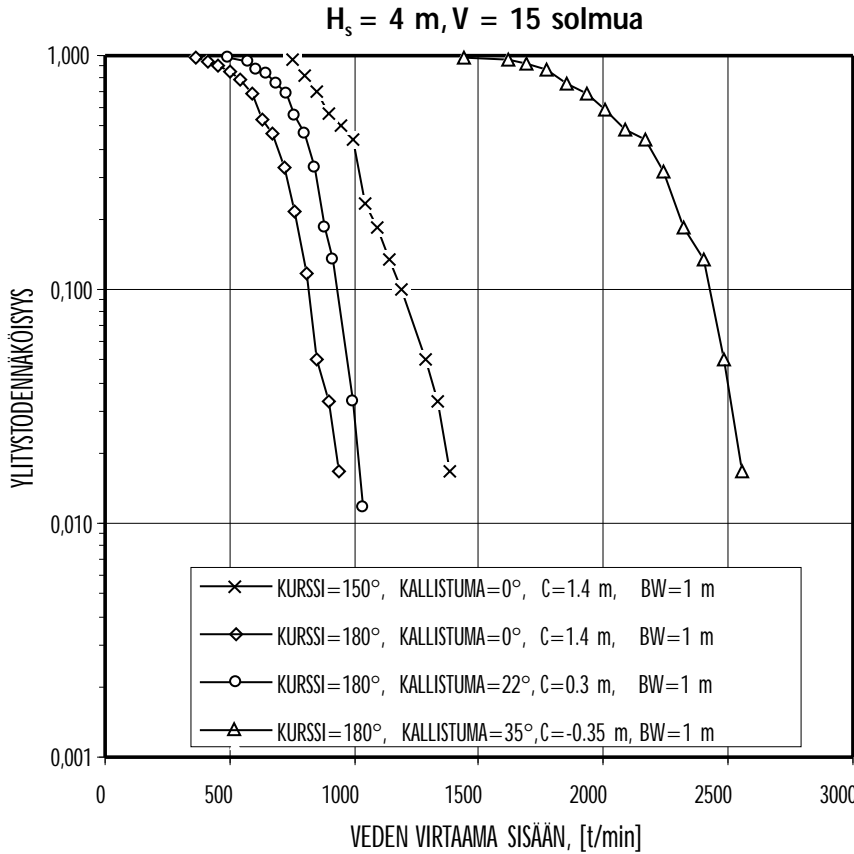
12.6.2 Veden sisäänvirtauksen simuloinnit

Veden virtausta sisään ramppiaukon kautta, kun visiiri oli pettänyt ja pudonnut, simuloitiin kahdella eri numeerisella menetelmällä. Yksi menetelmistä on samanlainen kuin aaltoiskukuormien simuloinnissa käytetty menetelmä, toisin sanoen keulan liikettä aaltojen pinnan suhteen tarkastellaan aikatasossa. Toisessa lähestymistavassa käytetään suhteellisten liikkeiden jakautumaa taajuustasossa.

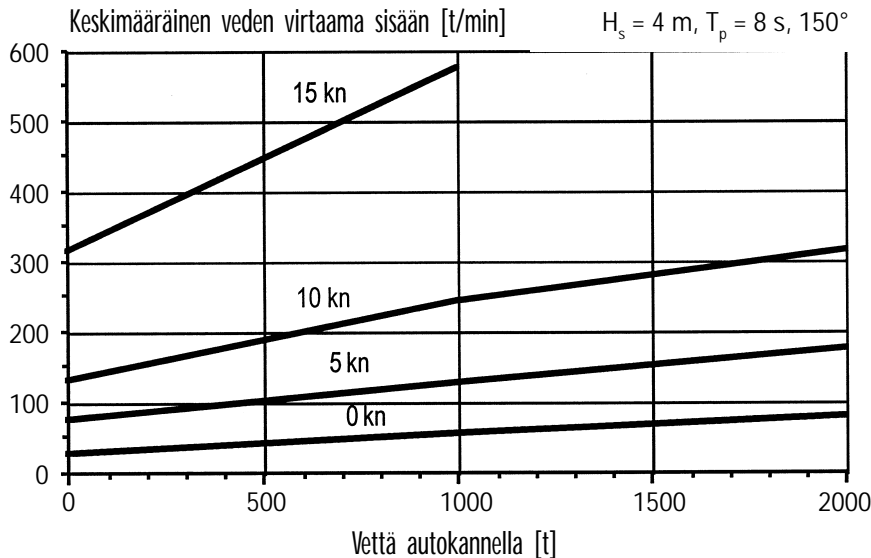
Simulointien yhteiset lähtötiedot ovat:

- Suhteellisen liikkeen kuvaaminen epä-säännöllisessä aallokossa.
- Vesipartikkeleiden suhteellisen nopeuden kuvaus laivan pitkittäisakselin suunnassa funktiona pystysuuntaisesta paikasta, aallon profilista ja laivan nopeudesta ja kurssista aallokon suunnan suhteen.
- Kellunta-asennon muutoksen huomiointi ottaminen, kun vettä kertyy sisälle.

Kuva 12.15 Autokannelle keularampin aukon läpi virtaavien eri vesimäärien ylitystodennäköisyyksiä sivuvastaisessa ja vastaisessa aallokossa 15 solmun nopeudella. Aluksen kallistuma on parametrinä. C = Varalaita rampin oikeapuoleiseen alakulmaan. BW = Keula-aallon korkeus.



Kuva 12.16 Keskimääräinen veden virtaama sisään suhteessa laivan nopeuteen ja autokannella olevan veden määrään sivuvastaisessa aallokossa.



Simuloinneista saadut tulokset ovat hyvin herkkiä pienille muutoksille alkuarvoissa. Lisäksi aaltojen ja laivan liikkeen satunnaisuudesta lyhyiden ajanjaksojen aikana johtuva luontainen epävarmuus on hyvin suuri. Sen vuoksi tuloksia ei voida käyttää erillisinä todistamaan jotain tiettyä veden sisäänvirtauksen aikataulua oikeaksi. Simulointien arvo on lähinnä siinä, että niillä voidaan todentaa, onko oletettu kaatumisen tapahtumakulku mahdollinen veden sisäänvirtausnopeuden osalta.

Onnettomuuden ensimmäisessä vaiheessa ESTONIAN oletetaan ajaneen noin 14 solmun nopeudella sivuvastaisessa aallokossa, jonka merkitsevä korkeus oli noin 4 m. Sillä hetkellä, kun ramppi oli repeytynyt kokonaan auki, oli laskelmien mukaan keskimääräinen veden virtaus sisälle autokannelle 300–600 t/min. Virtaaman suuruus riippuu siitä, mikä oletetaan varalaidaksi keulassa aluksen kulkuasennossa (kuvat 12.15 ja 12.16). Tämä merkitsee sitä, että yhden tai muutaman minuutin aikana alukselle saattoi kehittyä 20 asteen kallistuma.

Kaatumisen peräkkäisiä vaiheita käsitellään tarkemmin myöhemmin tässä raportissa, missä analysoidaan kaatumisen aikataulua ja koko tapahtumakulkua todistajalausuntojen ja simulointien tulosten perusteella. Tässä esitetään lyhyt yhteenveto tärkeimpien parametrien muutosten vaikutuksista.

Aluksen nopeudella on suuri vaikutus sisään aikayksikössä virtaavan veden määrään. Jos nopeutta pienennetään 15:sta 10:een solmuun, pienenee virtaama vastaisessa ja sivuvastaisessa aallokossa noin 50 %. Tämä vaikutus johtuu osaksi pienentyneestä sisäänvirtauksen nopeudesta ja osaksi madaltuneesta keula-aallosta.

Virtaamaan vaikuttaa myös autokannella oleva vesimäärä. Kun alus kallistuu, pienenee varalaita ramppiaukkoon ja sisäänvirtaus kiihtyy. Jossain määrin tätä vaikutusta kumoo aluksen muuttuneet liikkeet kallistuneena. Eri tutkimukset antoivat liikeominaisuuksien osalta jonkin verran erilaisia tuloksia ja tulokset poikkesivat toisistaan kallistuskulman

vaikutuksen suhteen. Kuitenkin yleisesti ottaen virtaama on 2–3 kertaa suurempi kuin alkuperäisessä pystysuorassa asennossa, kun autokannelle on tullut 1 800 tonnia vettä ja kallistuma on likimain 35 astetta.

Aallokon suunta vaikuttaa myös veden virtaukseen autokannelle. Virtaama on suurin sivuvastaisessa aallokossa suurien suhteellisen liikkeen amplitudien vuoksi. Sivuaallokossa sisälle virtaa vain hyvin vähän vettä niin kauan kuin nopeus ja kallistuskulma eivät ole kohtuuttoman suuria.

Simuloinnit viittaavat siihen, että aikaa kului progressiivisen vuodon alkamiseen kannen 4 matkustajatiloihin 5–15 min. siitä, kun virtaus ramppiaukon kautta alkoi. Aika-arviot riippuvat kuitenkin voimakkaasti siitä, mitä toimenpiteitä oletetaan tehdyn ensimmäisten kriittisten minuuttien aikana.

12.7 Visiirin kiinnikkeiden tutkimukset

12.7.1 Yleistä

Visiirin murtuneita kiinnikkeitä ja niihin liittyviä osia tutkittiin erilaisin soveltuvien menetelmin. Näihin kuuluivat talteen otettujen osien silmämääräiset tarkastelut, lujuuslaskelmat ja laboratorionkokeet. Myös sisäraluksesta, DIANA II:sta, talteen otettuja osia tutkittiin vertailun vuoksi. Tässä luvussa on lyhyt kooste liitteen asiaa koskevista raporteista. Lujuustutkimusten päätelmät esitetään luvussa 15.

Talteen otettujen osien materiaaleja tunnistettiin kemiallisen koostumuksen määrittämisen avulla ja mekaanisilla kokeilla, kuten kovuus-, veto- tai iskukokein siltä osin kuin oli tarpeen lujuus- ja iskusitkeysluokan selvittämiseksi. Venyneen ja taipuneen pohjalukon visiirin-puoleinen korvake mitattiin sen kokeen kuorman suuruuden arvioimiseksi. Mittaustuloksia vertailtiin täys- ja osittakaavamallikokeilla saatuihin voiman

Taulukko 12.6. Yhteenveto visiirin kiinnikkeiden materiaaleista sekä kokeista niiden tutkimiseksi.

Päätutkimus	Lisäkoheet	Muut	Materiaali ja muut havainnot
Pohjalukko			
Visiirin korvake	Mitat ja muoto	Kovuus HBS 10/3000	Tavallinen laivateräs Venyntyn n. 6 mm myötörajan ylittäneen kuorman vaikutuksesta
Laivan puoleisen lukitusosan kolme murtunutta kiinnityskorvakeita	Vetokokeet	Kovuus HV 10	Mikroskopia Korvakkeet: Tavallinen laivateräs Hitsit: Korkealuja teräs. Vähäistä särömuodostusta hitseissä.
Lukkotappi DIANA II:sta	Kovuus ja mitat	HBS 5/250 HRB	230–235 HBS 5/250 96–98 HRB (UTS 760–785 MPa)
Visiirin korvake DIANA II:sta	Kovuus ja mitat	Kovuus HBS 10/3000	Tavallinen laivateräs. Venyntyn kuten ESTONIAN
Visiirin takalappio	Vetokokeet ja paksuuden suuntainen vetokoe (12x12mm ² , pituus 8 mm)	Paksuus 8 mm	Tavallinen laivateräs, laminaatiolla ei alentavaa vaikutusta paksuuden suuntaiseen lujuuteen, teräs hyvälaatuista
Vaakajäykkääjä	Vetokoe	Paksuus 10 mm	Kemiallinen analyysi Tavallinen laivateräs
Pystyjäykkääjä		Paksuus 20 mm	Kemiallinen analyysi Tavallinen laivateräs
Saranat			
Reikälevyt	Vetokokeet ja iskukokeet		Tavallinen laivateräs Luokka E (T _{KV28} < -40C)
Laakerin tukiholkki	Kemiallinen analyysi		
Tukiholkin hitsi	Vetokoe 14 mm paksulle viipaleelle		Murtuma 6.4 mm leveänä leikkauksena hitsin läpi, murtovoima 0.12 MN, leikkauslujuus n. 717 MPa
Nostosylinterien kiinnikkeet			
Yläkiinnike	Kovuus		Tavallinen laivateräs
3-kannen levy	Iskukokeet	Murtuman mikroskooppitarkastelu	Luokka C (T _{KV28} < 0C) Väsymismurtumia ja kylmäaurausmurtumia
Kovuusmittaukset: HBS 10/3000 on Brinell-koe 10 mm teräskuulalla ja 3000 kg massalla. HRB on Rockwell B-kovuus ja HV on Vickers pyramidikovuus. Lujuusarvot: UTS=vetomurtolujuus, USS=leikkausmurtolujuus ja UFL=leikkausmurtovoima. Kylmäsiteiden tunnusluku T _{KV28} on lämpötila, jossa saavutetaan 28 joulen iskumurtoenergia Charpy-V menetelmällä.			

ja muodonmuutoksen keskinäisiin riippuvuuksiin. Visiirin jousto-ominaisuuksia mitattiin aaltokuormien lukoille aiheuttamien kuormien arvioinnin helpottamiseksi.

Analyttisiä ja äärellisten alkioiden mukaisia laskelmia (FEM-laskelmia) tehtiin eri kiinnikkeiden murtolujuuden arvioimiseksi ottamalla huomioon laivaan asennettujen osien materiaalit, mitat ja sijainnit. Hitsausliitokset ja niissä esiintyneet puutteet ja vauriot arvioitiin tarpeen mukaan.

Visiirin kiinnikejärjestelmän yhdistetty lujuus arvioitiin mekaniikan sääntöjen mukaisilla, voima- ja momenttita-sapainon huomioon ottavilla laskelmilla vaihtelemalla ulkoista visiiriin vaikuttavaa kuormaa. Laskelmat tehtiin käyttäen sekä oletettua kuorman jakautumista lukoille että vaihdellen eri lukkojen jäykkyyksiä ja aaltokuormakeskiön sijaintipistettä aaltovoimaresultantin vaikutusoralla.

Pohjalukon maalikerroksia tutkittiin sen likimääräisen iän arvioimiseksi.

12.7.2 Materiaalien tunnistaminen ja mikroskooppitarkastelut

Rakenteissa käytettyjä materiaaleja tunnistettiin taulukon 12.6 mukaisesti. Taulukkoon on merkitty, mitä koetta kulloinkin on käytetty sekä ilmaistaan ko-

keen tuloksen mukaiset päätelmät.

Optista ja elektronimikroskopiaa käytettiin säröilyn etsimiseksi sekä murtumalajien tunnistamiseksi. Lujuutta selvästi alentavan väsymisen jälkiä havaittiin erityisesti visiirin nostosylinterien kiinnikkeissä. Vasemmalla puolella noin puolet kannen 3 kuormaa kantavasta poikkipinnasta oli murtunut väsymällä ennen turmaa. Tällä alueella oli selviä merkkejä korjaushitsauksesta.

12.7.3 Kiinnikkeiden tutkimukset

Pohjalukon korvakkeet ja visiirin puoleinen korvake

Hylystä talteen otettujen pohjalukon korvakkeiden materiaaliominaisuuksia määritettiin niistä otettujen näytteiden avulla. Materiaali oli tavallista laivaterästä, jonka myötölujuus on noin 240 MPa ja vetomurtolujuus 410 MPa. Korvakkeiden murtumat osoittivat piirteitä, jotka ovat ominaisia hyvälaatuiselle sitkeälle teräslevylle, joka murtuu paikallisen ylikuormituksen vaikutuksesta. Joitakin haaroittuneita säröjä, jotka olivat kooltaan vähäisiä verrattuna korvakkeiden mittoihin, löydettiin läheltä korvakkeiden ja lukkoholkkien välisten pienahitsien primäärimurtumia. Nämä ovat voineet syntyä laivan normaalin käytön yhteydessä johtuen lukkoon kohdistuvista

Kuva 12.17 Pohjalukon visiirin puoleinen korvake, jonka reikään on sijoitettu lukkotapin mittainen ympyrälevy.



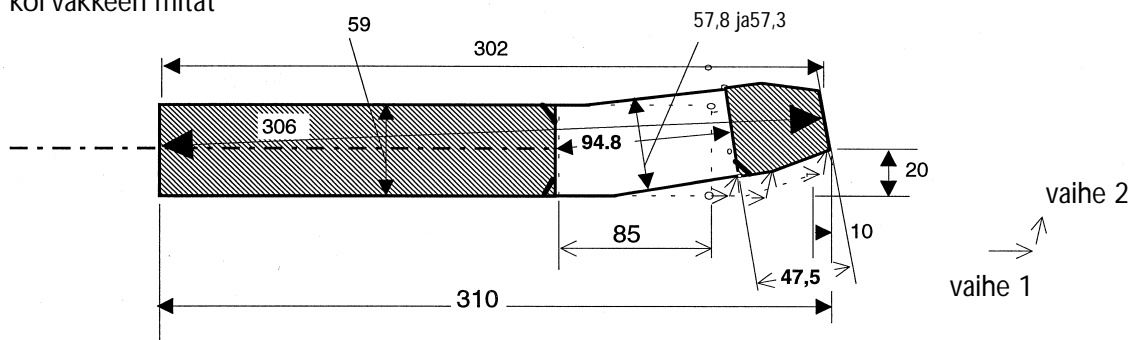
vaihtelevista kuormista tai lopulliseen murtumaan johtaneen tapahtumaketjun aikana. Näiden pienten säröjen vaikutusta pohjalukon lujuuteen on ollut mahdotonta arvioida, mutta vaikutus on luultavasti ollut vähäinen lukkomateriaalin suuren sitkeyden takia.

Lukkokiinnikkeiden murtumia tar-

Kuva 12.18 Pohjalukon visiirin puoleisen korvakkeen mitat onnettomuuden jälkeen.

POHJALUKON VISIIRIN PUOLEINEN KORVAKE

Venyneen korvakkeen mitat



Alkuperäinen muoto merkitty katkoviivalla

kasteltiin myös optisella stereomikroskoopilla ja pyyhkäisyelektronimikroskoopilla. Kaikki murtumat todettiin piirteiltään sitkeiksi ja ne olivat syntyneet paikallisen ylikuormituksen seurauksena. Merkkejä liitosvirheistä ja vajaasta tunkeumasta havaittiin korvakkeiden ja lukkoholkien välisissä pienaliitoksissa.

Korvakkeiden ja hitsien kovuudet mitattiin hitsausliitoksen lujuuden arvioimiseksi. Korvakkeen ja lukkoholkin välisen pienaliitosmateriaalin kovuus oli HV10 = 270–275, mikä vastaa hitsimateriaalin vetomurtolujuutta 865 MPa (DIN 50150). Korvakkeen kovuus oli HV10 = 128–150, mikä hyvin vastaa mitattua vetomurtolujuutta 417 MPa. Hitsimateriaali oli siten merkittävästi lujempaa kuin liitettyjen levyjen materiaali.

Kunkin murtuneen korvakkeen lujuus arvioitiin käyttäen kokeilla mitattuja materiaaliominaisuuksia ja korvakkeen murtumien mittoja.

Hitsausliitokset myötävaikuttavat merkittävästi lukkokokonaisuuden lujuuteen. Suuret vaihtelut murtuman muodossa tekivät murtuneen hitsausliitoksen mittojen määrityksen erityisen työlääksi. Yksikäsitteisin arvio pohjalukon lujuudelle saatiin analysoimalla visiirin puoleisen ehjäksi jääneen, mutta venyneen korvakkeen muodon muutos. Käyttäen saatua lujuuden arviota oli mahdollista laskemalla arvioida hitsausliitosten osuus. Laskelma osoittaa, että pienahitsin tehollinen paksuus on voinut olla noin 3 mm. Tämä vastaa havaintoa, vaikkakin murtunut hitsi oli hyvin epäsäännöllinen.

Visiirin puoleinen korvake oli taipunut ja venynyt (kuvat 12.17 ja 12.18). Kovuuden mittaaminen osoittaa, että korvakkeen materiaali on todennäköisimmin tavallista laivaterästä ja saranalevy materiaalin kaltaista. Korvakkeen taakse osoitettava eli reiällinen pää oli venynyt ja taipunut oikealle. Analysoimalla korvakkeen reiän ja kannaksen muotoa voitiin päätellä, että korvakkeen mitta ja muoto olivat olleet alunperin piirustusten mukaisia. Talteen otettaessa korvakkeen kannas oli paksuudeltaan 47,5 mm kuten piirustuksissa. Tämä viittaa siihen,

ettei korvakkeen vetävä pää ollut kulu-
nut ohuemmaksi käytössä.

Useiden täys- ja osamittakaavamaaleilla tehtyjen kokeiden tulosten ja visiirin korvakkeen vertailu osoitti, että korvake oli mitä todennäköisimmin ensin venynyt ja vasta sitten taipunut sivulle. Kokeissa havaittiin, että pysyvä ja palautumaton venymä syntyy korvakkeeseen, kun vetovoima on ylittänyt noin 0,5 MN. Havaittu noin 6 mm pysyvä venymä on voinut syntyä luokkaa 1,5 MN olevan vetävän voiman vaikutuksesta. Lisäksi havaittiin, että korvakkeen reiän eteenpäin olevalta pinnalta oli kulunut pois noin 2 mm, mikä viittaa visiirin nojaamiseen lukkoa vasten laivan käytön aikana. Tämän lisäksi korvakkeen tyvi oli ilmeisesti ollut noin 3 mm lyhyempi kuin piirustuksiin merkitty pituus olisi edellyttänyt.

Murtuneen laivanpuoleisen lukkorungon murtovoimaa arvioitiin kahdella eri menetelmällä. Toisessa käytettiin muodonmuutosenergiaperiaatetta olettamalla lukkotappi täysin jäykäksi. Toinen oli yksinkertainen lukkorungon eri osien lujuuksiin perustuva menetelmä, jossa hitsin voiman kanssa yhdensuuntaiset pinnat leikkautuvat ja kohtisuorat poikkipintojen minimiprojektiot murtuvat materiaalin vetomurtorajaa vastaavalla voimalla. Molemmissa menetelmissä tarvittiin kokeellisesti määritettyjä parametreja.

Oli mahdotonta arvioida, oliko käytön yhteydessä mahdollisesti syntynyt vaurio – esimerkiksi väsymisvaurio – alentanut pohjalukon lujuutta. Väsymis-säröjä ei löytenyt lukkorungosta, mutta säröjä on saattanut esiintyä hitseissä ennen turmaa. Jos oletetaan näin ja jos puolet hitseistä olisivat olleet murtuneet, pohjalukon lujuus olisi ollut alimmillaan luokkaa 0,8 MN, kuten Hampurin yliopistossa tehdyt kokeet osoittavat (ks. kohta 15.3). Tässä tapauksessa olisi 1,5 MN suuruinen visiirin puoleista korvakea venyttänyt voima loogisesti esiintynyt aiemmin. Tämä voima olisi pannut hitsien vaurioitumisen alkuun ja lukon alkuperäinen lujuus olisi silloin ollut suurempi kuin 1,5 MN. On myös lasket-

tu että teoreettisesti lukon lujuus ei olisi voinut ylittää arvoa 1,8 MN, mikä on visiirin puoleisen korvakkeen murtokuorma korvakkeen kärjen leikkautuessa. Tähän viittaavat Hampurin yliopistossa saadut koetulokset.

Myös DIANA II:n pohjalukon osia tutkittiin, sillä sen visiirin lukkokonstruktio oli likimain samanlainen kuin ESTONIAssa. DIANA II:sta saatiin pohjalukon visiirin puoleinen korvake ja lukkotappi. Lukkotappin materiaali oli lujempaa terästä kuin korvake. Korvake oli tavallista laivanrakennusterästä. Sen taakse päin osoitettava pää oli venähtänyt useita millimetrejä ilmeisesti ylikuorman takia samalla tavoin kuin ESTONIAssa. Korvakkeen reikä ja lukkotappi olivat kuluneet etupuolelta useita millimetrejä enemmän kuin ESTONIAssa johtuen visiirin nojaamisesta pohjalukkoon ja sitä seuranneesta hankauksesta.

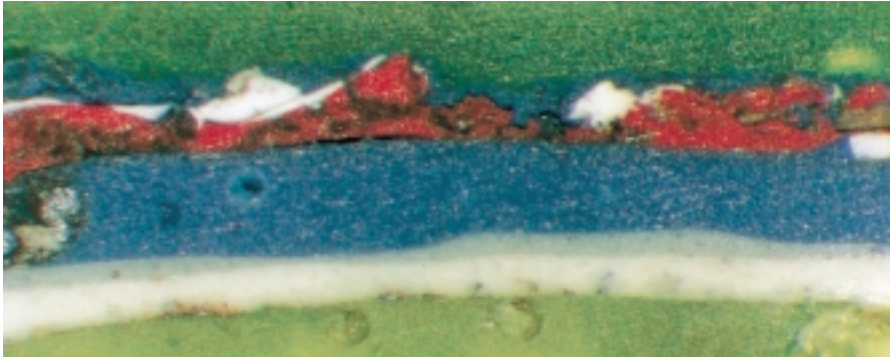
Maalikerrostumien analyysi

Maalikerrostumia otettiin analysoitaviksi pohjalukkorungon oikeanpuoleisesta korvakkeesta (kuva 12.19) sekä visiirin korvakkeesta (kuva 12.20). Maalaus koostui useista kerroksista, neljästä seitsemään lukkorungon korvakkeessa ja kahdeksasta visiirin korvakkeessa. Monet maalikerrokset olivat katkonaisia. Maalikerrosten kemialliset koostumukset indikoivat, että molemmissa korvakkeissa oli ruskea lakkakerros, jonka päällä oli harmaa alusmaali. Visiirin korvakkeessa alimpana käytettyä kellertävää alusmaalia ei löydetty lukkorungon korvakkeesta. Valkoiset ja punaiset maali-
tahrat lukkorungon korvakkeen pinnassa ja päällimmäisten maalikerrosten välissä olivat kemiallisesti samankaltaisia visiirin korvakkeen valkoisten ja punaisten maalikerrosten kanssa. Näin ollen on ilmeistä, että lukko kokonaisuudessaan oli vanha ja peräisin aluksen varhaiselta ajalta. Maalikerrostumien tutkimusten yksityiskohtaiset raportit ovat liiteosassa (Supplement 509).

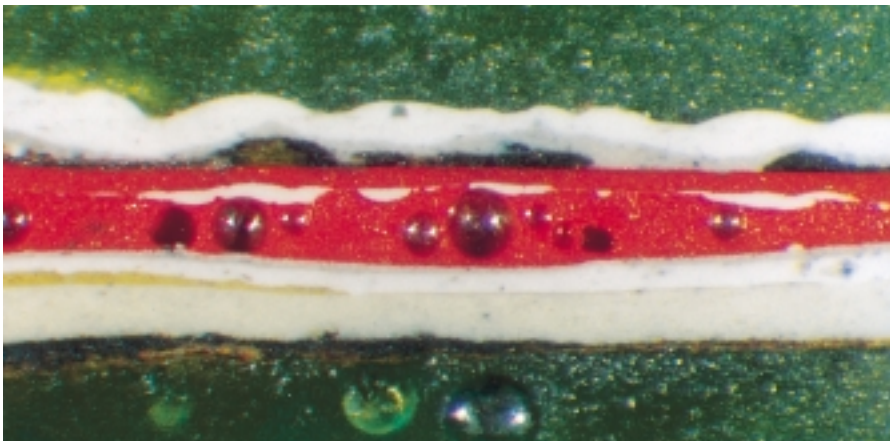
Sivulukot

Sivulukkojen visiirin puoleiset korvakkeet ovat hyllyssä kiinni lukkojen tapeis-

Kuva 12.19 Maalikerrosten poikkileikkaus pohjalukon laivanpuoleisen lukkorungon oikeanpuoleisesta korvakkeesta otetusta näytteestä.



Kuva 12.20 Maalikerrosten poikkileikkaus pohjalukon visiirinpuoleisesta lenkistä otetusta näytteestä.



Kuva 12.21 Sivulukon täysmittakaavakoe.



Kuva 12.22 Vasemmanpuoleisen sivulukkolenkin irtoamiseen liittyvä murtuma vaakajäykkäjän kohdalla.



sa. Näin ollen ainoat tutkittavissa olevat autenttiset osat olivat visiirin alueet, joista korvakkeet olivat repeytyneet irti.

Visiirin takalaipiolevy tutkittiin sivulukkukorvakkeen kiinnitysalueelta. Tutkimuksissa todettiin, että korvakkeet olivat repeytyneet vieden mukanaan osia laipiosta sekä vaakajäykkääjästä. Vaakajäykkääjälevyn murtuma oli syntynyt leikkautumalla levyn läpi, pystyjäykkääjästä oli murtunut reunan kulmaa kiinnityshitsin kohdalta ja visiirin takalaipio oli murtunut "lävistymällä". Visiirin takalaipiolevyssä oli havaittavissa jossain määrin ns. delaminointia. Takalaipiolevyn leikkausmurtumassa oli jälkiä voimakkaista hankaumista.

Sivulukkukorvakkeen asennus tutkittiin yksityiskohdittain ja sivulukkujen lujuus arvioitiin sekä täysmittakaavakokein, tietokonemallin avulla että laskennallisesti. Lukon kuormituksen suunnaksi valittiin visiirin pyörittämisestä, joko saranoidensa tai alaketunurkan ympäri, syntyvä suunta ilman sivuttaisia voimia. Näin ollen vain veto 38° visiirin takalaipioon nähden otettiin huomioon kokeissa. Muita kuormituksen suuntia arvioitiin laskennallisesti.

Neljä täysmittakaavaista osamallikoetta tehtiin erilaisilla levykenttäjäykistyksillä (kuva 12.21). Kokeissa synty-

Kuva 12.23 Oikeanpuoleisen sivulukkolenkin irtoamiseen liittyvä murtuma vaakajäykkäjän kohdalla.



neet murtumat olivat hyvin samankaltaisia autenttisten murtumien kanssa, erityisesti takalaipio- ja vaakajäykkääjämurtuman osalta. Mallin takalaipio-osan ja vaakajäykkääjäosan jäykistämällä oli merkittävä vaikutus mitattuun murtovoimaan. Koe, joka vastasi parhaiten visiirin omaa rakennetta, antoi murtovoimaksi 1,8 MN, joka muunnettuna visiirin materiaaleille ja levypaksuuksille merkitsi noin 1,6 MN murtovoimaa virheettömästi hitsatulle sivulukolle. Vetokokein selvitettiin autenttisen visiirin levyjen materiaalien lujuudet. Autenttisen vasemmanpuoleisen lukon kohdalla havaittiin takalaipion ja vaakajäykkääjän liitoksessa vajavaisuus (kuvat 12.22 ja 12.23). Tämän arvioitiin alentavan vasemmanpuoleisen lukon lujuuden 1,2 MN:iin. Oikeanpuoleinen lukko oli virheetön.

Laskelmat, joita tehtiin kokeiden rinnalla antoivat yhteneväisiä tuloksia. Numeerinen tietokonemalli äärellisten alkoiden menetelmällä (FEM) antoi autenttisten levyjen jännitys-venymäyhteyttä käyttäen sivulukon murtovoimaksi 1,6 MN. Lukon murtovoima olisi ollut alhaisempi, jos se olisi vaikuttanut visiirin takalaipion suuntaisesti, esimerkiksi mikäli visiiri olisi kuormituessaan pyrkinyt nousemaan ylös sen sijaan, että se olisi kiertynyt saranoidensa tai alaetunurkkansa ympäri.

Saranat

Saranoiden murtumat tutkittiin osittain samoin menetelmin kuin pohjalukon murtumat. Tutkitut murtumat olivat luonteeltaan sitkeitä eikä selviä merkkejä väsymisestä ollut havaittavissa. Erään näytteen murtuma ulottui hitsin läpi. Hitsin sisäpuolinen onkalo oli magnetiitin täyttämä, mikä viittaa hitaaseen korroosioon happiköyhän väliaineen vaikutuksesta. Tämä viittaa siihen, että onkalo on ollut olemassa pitkään ennen turmaa ja että siihen on päässyt kosteutta.

Myöhemmissä tutkimuksissa vahvistui myös, että saranaholkkien ja saranalevyjen välisissä hitseissä oli yleisesti juurisäröjä ja että nämä säröt olivat jossain määrin kasvaneet väsymällä. Lisäksi to-

dettiin, että saranalevyjen holkinreikien kannasten murtumat olivat alkaneet alempien kannasten sitkeillä murtumilla kannasten vetolujuuden ylittävän voiman vaikutuksesta ja edenneet ylempiin kannaksiin, joiden murtumat olivat taivutuksen seurausta. Tämä pääteltiin ylempien murtumien muodosta eli siitä, että reiän sisäpuolinen levyn paksuus oli vedon takia ohentunut ja kannaksen ulkoreuna oli puristumisen takia paksumpi kuin alunperin. Mikroskooppiset piirteet olivat sitkeitä.

Ne saranalevyjen murtumat, jotka olivat tasomaisia, edellyttivät myös levyjen iskusitkeyden mittaamista kylmäauraus- ja taivutuksen määrittämiseksi. Levymateriaalista valmistettujen iskukoesauvojen antamat tulokset osoittivat levyt erittäin sitkeiksi ja hyvälaatuisiksi eikä lujuuden alenemista kylmäaurauden vaikutuksesta voida pitää mahdollisena.

Levyn vetomurtolujuus mitattiin. Saatutulos 450–460 MPa vastaa tavallista laivanrakennusterästä.

Kaksi vetokoetta tehtiin myös saranaholkin ja levyn reiän reunan yhdistelmästä otetuilla viipaleilla liitoshitsin lujuuden mittaamiseksi. Koekappaleet valmistettiin hylystä talteen otetusta holkista, jossa oli jäljellä pala reikälevyn kannasta. Noin 14 mm pitkien pienaliitosten murtovoimaksi mitattiin 0,12 MN. Murtumat syntyivät valtaosin leikkautumalla leikkausmurtolujuuden ollessa noin 700 MPa. Näin ollen saranaholkkien kiinnityspienahitsien materiaali oli erittäin luja.

Saranan lujuus laskettiin taaksepäin ja alas noin 21° suuntautuvalla voimalla (vahva suunta) sekä alas ja eteen noin 21 astetta suuntautuvalla leikkaavalla kuormittavalla voimalla (heikoksi oletettu suunta). Saranan vahva suunta oletettiin yhteneväksi saranalevyn muotokulman puolittajaan ja heikko vastaavasti tähän nähden kohtisuoraksi.

Saranan murtovoimaksi heikossa suunnassa hitsin leikkautumisen osalta arvioitiin 4,6 MN. Tähän voidaan lisätä 2,3 MN saranalevyn leikkautumisen vaatimaa voimaa, mikäli holkin ja saranalevyn reiän välinen välys olisi pieni.

Ennen turmaa oli havaittu säröjä saranaholkkien ja saranalevyjen välisten pienaliitosten alasektoreissa, jotka raportoitiin komissiolle ja otettiin huomioon murtovoiman arvioissa. Juurisäröt, joita löydettiin liitosten etusektoreissa, ovat voineet alentaa saranoiden lujuuksia yllä esitetyistä.

Nostosylinterien kiinnikkeet

Visiirin avaamiseen käytetyillä hydraulisynterillä oli toissijainen vaikutus visiirin irtoamiseen. Niihin liittyviä materiaaleja ja murtumia tutkittiin täydentävien tietojen saamiseksi. Todettiin, että vasemmanpuoleisen hydraulisynterian alapään kiinnikkeen ja kannan 3 liitoskohdassa oli kiinnikettä huomattavasti heikentävää säröilyä. Kannan 3 lopullinen murtuma oli kylmäauraudelle ominaista lohkomurtumaa. Yhdestä nostosynterian yläkiinnikekorvakkeesta mitattiin kovuus. Mittaus osoitti, että korvake oli tavallista laivanrakennusterästä.

Kiinnikejärjestelmä

Visiirin kiinnikejärjestelmän lujuutta arvioitiin ottamalla huomioon kunkin kiinnikkeen lujuus sekä laskemalla eri malleja käyttäen aaltokuormituksen jakautuminen kiinnikkeille.

Viiden kiinnikkeen muodostama järjestelmä on staattisesti määräämätön ja reaktiovoimat riippuvat sekä visiirin omasta jäykkyydestä että kiinnikkeiden paikallisesta jäykkyydestä. Myös visiirin sovitin ja kiinnikevälkykset vaikuttavat voimien muodostumiseen. Laskentamallin laatiminen koko visiirille katsottiin siksi kannattamattomaksi. Sen sijaan laadittiin eri tavoin tasapainossa olevia laskenta-arvioita. Tulokset ovat pikemmin viitteellisiä kuin tarkkoihin johtopäätöksiin oikeuttavia.

Visiirin rakenteellinen jäykkyys mitattiin kuormittamalla sitä ylösalaisessa asennossaan, jossa sitä säilytettiin saranavarsiin tuettuna. Lisäämällä ylimääräisen paino toiseen saranavarteen ja nostamalla tunnetulla voimalla toisesta saatiin tulokseksi, että kuormituspiste siirtyy 1 MN:n suuruisella voimalla noin 25 mm. Visiiri on näin ollen keskiosaltaan sängen

joustava, kun otetaan huomioon siihen kohdistuva usean MN:n suuruinen epäkeskeinen aaltokuormitus. Visiirin kummankin sivun rakenne on laatikkomainen ja näin ollen suhteellisen jäykkä verrattuna keskiosan vääntöjoustavuuteen. Visiirin pohja, johon pohjalukon korvake on kiinnitetty, on niinkään joustava rakenneosia sivuihin verrattuna.

Statiikan sääntöjä noudattaen laadittiin kolme eri laskentajärjestelmää vaihtelevan aaltokuorman kiinnikkeille ja kautumisen arvioimiseksi. Järjestelmissä käytettiin oletusta lukkojen välisestä osuudesta vasteen suuntien ja suuruuden muodostumiseen. Yhdessä arvioissa

voimaosuuksia kiinnikkeiden ja lukkojen välillä varioitiin, toisessa vaihdeltiin kiinnikkeiden jäykkyyksiä ja kolmannessa siirreltiin aaltovoimakeskiötä aaltovoimaresultantin vaikutussuoralla sekä varioitiin pohja- ja sivulukkojen osuutta visiirin kiinnipitoon avaavaa momenttia vastaan. SSPA:ssa mitattuja aaltovoimakomponenttien suhteita käytettiin kaikissa laskelmissa kiinnikkeet murtavan kokonaisu-aaltovoiman arvioimiseksi. Tulokset viittaavat siihen, että vasemmanpuoleinen sivulukko tarvitsee murtuakseen vähiten aaltovoimaa kohdattaessa aallokko edestä vasemmalta, mutta seuraavan kiinnikkeen murtaminen vaatii

enemmän voimaa. Ei ollut mahdollista yhtä vakuuttavasti arvioida, murtuiko voiman kohottua seuraavaksi pohjalukko vai sarana, sillä erityisesti saranan lujuuden arvio oli melko epätarkka. Kiinnikkeet murtava aaltovoima on selvästi pienempi aallokon tullessa vinosti edestä kuin, jos se tulisi suoraan edestä.

Havaitut vauriot visiirissä viittaavat siihen, että vasen sarana olisi murtunut heti sivulukon jälkeen. Tällainen tapahtumien kulku olisi tehnyt mahdolliseksi visiirin kohoamisen, vasemman kohdittussakaran kolon vaurioitumisen sekä pohjalukon visiirinpuoleisen korvakkeen selvän taipumisen alaspäin.