



BMTIG

**BALTIC MARINE TECHNICAL
INVESTIGATION GROUP**

**ANALYTICAL SERIES R1–R10
THE TECHNICAL REASSESSMENT
OF THE MV ESTONIA HULL DAMAGE
2025**

Independent Marine
Forensic Analysis

Svensk sammanfattning

FÖRORD – BMTIG:s tekniska rapportserie R1–R10 (2025)

Tre decennier efter M/S Estonias förlisning har ny teknisk information – inte minst den fotogrammetriska 3D-modellen baserad på tiotusentals högupplösta bilder – förändrat förutsättningarna för att analysera skeendets slutskede. I kombination med moderna beräkningsmetoder inom strukturmekanik, hydrodynamik och geoteknik finns i dag möjligheter som inte stod till buds för tidigare utredningar.

Denna rapportserie består av tio tekniska delstudier som tillsammans utgör en oberoende och transparent analys av Estonias rörelser, skador och energiupptag från kapsejsning till slutligt bottenläge. Syftet är inte att ersätta officiella utredningar, utan att pröva om de observerade skadebilderna, vittnesuppgifterna och bottenförhållandena kan förenas till en fysikaliskt sammanhängande modell.

Metodologisk neutralitet

Rapporterna tar inte ställning till hur vatteninträngningen faktiskt började eller vilken roll visir och ramp spelade. Dessa komponenter behandlas inte som undersökningsobjekt i sig, utan används endast som tekniska randvillkor där så krävs för att analysera fartygsresponsen.

Den hydrodynamiska modelleringen bygger därför på ett enda grundantagande: att betydande mängder vatten måste ha funnits både under och på bildäck för att de observerade stabilitetsproblemen ska kunna återskapas. Detta är en konsekvens av fysiken – inte av ett antagande om orsaken.

Som pedagogiskt stöd har en animation tagits fram där visiret avsiktligt lämnas kvar på fartyget genom hela förloppet. Syftet är att undvika att illustrationer föregriper någon bestämd hypotes om när eller hur strukturella skador uppstod.

En tvåfasmodell för sjunkförloppet

Analysen pekar mot ett tvåfasigt slutskede:

1. **Fas 1:** En akterdominerad, högenergetisk bottenträff när fartyget redan kapsejsat. Detta styrks av omfattande intryckningar i aktern (däck 6–8), vilka tidigare inte analyserats i detalj men som utgör en tydlig mekanisk signatur.
2. **Fas 2:** En rotationsstyrd rörelse i mjuk bottenlera, där vraket dämpas och når sitt slutliga viloläge på styrbordssidan. Denna fas kan inte ge upphov till de penetrerande styrbordsskador som i senare utredningar tillskrivits "berg i dagen". Både fotogrammetri och Rockwaters ursprungliga bottensonderingar visar att området bestod av mjuk lera – även där hårt material senare har observerats.

Styrbordsskadorna i zon E1/E2 kräver därför ett separat, tidigare högenergetiskt skadeförlopp.

Datakällor och bevisbörda

Rapporterna bygger på fyra huvudsakliga informationskällor:

- skadegeometrin från fotogrammetri och ROV-inspektioner,
- Rockwaters bottenundersökningar från 1994,
- energiberäkningar av krafter, moment och stoppsträckor,
- samt vittnesuppgifter använda som konsistenskontroll snarare än som primär evidens.

Genom att kombinera dessa källor i en sammanhängande fysikalisk modell kan tidigare obesvarade frågor – såsom akterskadorna och styrbordshålens tidsmässiga uppkomst – analyseras med större noggrannhet.

Ett öppet och reproducerbart arbetssätt

Rapporterna använder endast standardiserade, öppet redovisade fysikaliska modeller. Alla antaganden, parametrar och beräkningar dokumenteras steg för steg, och osäkerheter testas genom Monte-Carlo-analyser. Målet är att varje resultat ska vara reproducerbart av oberoende experter.

Tillsammans utgör R1–R10 en mer fullständig och fysikaliskt förankrad bild av Estonias slutskede – en bild som tar höjd för den samlade skadegeometrin, de faktiska bottenförhållandena och den energi som krävs för att återskapa det observerade vrakläget.

Stockholm, december 2025

Baltic Marine Technical Investigation Group (BMTIG) ©

Johan Ridderstolpe – Anders Ulfvarson – Roland Karlsson

BMTIG – Författare och expertgrupp

Johan Ridderstolpe - Huvudförfattare

Tidigare chef för marinens konstruktionsavdelning, Försvarsmakten; Teknisk chef, Muskö örlogsvarv. Har professionell kompetens motsvarande civilingenjör i skepps- och maskinteknik med inriktning på system- och säkerhetsanalys. Har drivit och deltagit i tekniska utvärderingar inom marin teknik, tunga stålkonstruktioner och fartygs- och vapensystem. Har bidragit med den strukturella och ingenjörsmässiga grundanalysen i BMTIG:s rekonstruktion av Estonias skade- och rörelsessekvens.

Anders Ulfvarson – Medförfattare och granskare

Professor emeritus i marin konstruktionsteknik, Chalmers tekniska högskola. Har mångårig akademisk och industriell erfarenhet inom fartygsstrukturer, hydrodynamik och maritim säkerhet. Hans forskning har fokuserat på deformationsmekanik, skadetålighet och storskaligt strukturellt beteende—områden som är centrala i den energibaserade metod som används i BMTIG:s skademodellering.

Roland Karlsson – Medförfattare och granskare

PhD, flygkapten (pensionerad) och olycksutredare. Karlsson har omfattande erfarenhet av olycksutredningar, probabilistisk analys och metodik baserad på mänskliga faktorer. Hans bakgrund inom flygsäkerhet och olycksrekonstruktion kompletterar BMTIG:s scenariobedömning, Bayesianska utvärdering och tvärvetenskapliga kvalitetssäkring av olycksbidragande faktorer.

Henrik Olsen – Initiativtagare

Initiativtagare, projektkoordinator och researcher – BMTIG:s oberoende Estoniautredning (R1–R10). Henrik Olsen är initiativtagare till BMTIG:s oberoende tekniska analysserie om MS Estonia och har samordnat arbetet mellan svenska och estniska experter, inklusive insamling, strukturering och kvalitetssäkring av underlag. Som researcher har han bidragit med dokumentanalys, metodiskt underlag och integrering av tekniska och empiriska data. Han är även ansvarig för de animeringar som illustrerar sjunkförlopp och skadeförlopp i rapportserien.

Lars Ångström – Strateg och kommunikatör

Fd. riksdagsledamot i försvarsutskottet (mp) 1998–2006 och fd. ledamot i Krigsdelegationen. Var ansvarig för Estoniafrågan i Sveriges riksdag för (mp) 2000–2006 samt initiativtagare till riksdagens tvärpolitiska Estoniagrupp. Redaktör och ansvarig i utredningsgruppen Fokus Estonia 2020–2025. Arbetar med strategi- och kommunikationsfrågor i BMTIG.

Innehållsförteckning

FÖRORD – BMTIG:s tekniska rapportserie R1–R10 (2025)	2
BMTIG – Författare och expertgrupp	4
Rapport 1 – Skadebild och scenariebedömning	6
Rapport 2 – Sjunkscenario enligt två-fasmodellen	7
Rapport 3 – Energibehov för styrbordsskadan	8
Rapport 4 – Hydrodynamisk modell och tvåfas-sjunkförlopp	10
Rapport 5 – Granskning av TalTechs bottenkontakt-scenario	11
Rapport 6 – Kritisk analys av SSPA:s sjunkstudier 2008.....	12
Rapport 7 – Bogvisiret orsakade inte styrbordsskadorna.....	14
Rapport 8 – Slagsidans initiala utveckling.....	15
Rapport 9 – Bottenträff och rotation.....	17
Rapport 10 – Beräkningsprinciper och metodik	18

Rapport 1 – Skadebild och scenariebedömning

Syfte och utgångspunkt

Rapport 1 analyserar skadebilden på MS Estonias styrbordssida med målet att identifiera vilka tekniska scenarier som kan förklara två större hål (E1 och E2) samt ett sammanhängande 22 meter långt band av deformationer mellan dem. Arbetet är avgränsat till att enbart behandla skadeorsaken – inte sjunkförloppet – och bygger på strukturella observationer, energiberäkningar och fysikaliskt rimlighetsresonemang. Modelleringen förutsätter, i likhet med JAIC:s skadeparametrar, att vatten tränger in ovan och under skottdäck. Detta används som randvillkor för att hålla sjunkdynamiken konsistent, inte som ett ställningstagande till visirets eller rampens faktiska status. Analysen är neutral i frågan om när visiret lossnade.

1. Datagrund och observerade skador

Skadezonen dokumenterades under Kurm-expeditionen 2021 och uppvisar tre huvudkategorier av strukturell påverkan:

1. Hål E1 (däck 1): ca 4 m². Både in- och utåtböjda plåtar, avbrutna spant och öppningar in i hyttsektionen.
2. Hål E2 (maskinverkstad): liknande storlek, ca 22 m akterut. Plåtar främst utåtriktade, spant avbrutna.
3. Mellanliggande zon (22 m): minst sju separata skador – sprickor, buckling, flikning, krossad fenderkonstruktion och överlappande plåt. Mönstret indikerar ett längre kontaktförlopp snarare än punktvis påverkan.

Det sammanlagda mönstret – kombinationen av inträngande och utpressad plåt, skjuvning, brott av spant och flikande deformationer – är typiskt för en sidokollision i rörelse, inte för bottenkontakt.

2. Metodik och scenarieutvärdering

Energianalyserna bygger på den klassiska formuleringen:

$E = \frac{1}{2} m v^2$ där effektiv kollisionssmassa inkluderar hydrodynamisk tillagd massa. De studerade scenarierna sträcker sig från lågenergiska träffar av små objekt (~2–5 MJ) till högenergiska kollisioner med större fartyg (> 110–180 MJ). Fem scenarier provas systematiskt.

Endast scenario 3a – en högenergisk sidokollision med ett fartyg 3 000–7 000 ton – kan förklara hela skadebilden.

3. Strukturell konsekvensanalys

Form och riktning på deformationer:

- Inåtpressade plåtar (E1) kombineras med utåtpressade (E2).
- Spant är avbrutna och fläkts ut från skrovet.
- Plåtar överlappar varandra, vilket kräver lateralt skjuv under rörelse.

Brottmekanik:

Brottytan vid E2 uppvisar chevroner, tunn skjuvläpp, lamellrivning och hög triaxialitet. Detta är tydligt förenligt med ett snabbt sprött brott. Långsam bottenkada hade givit duktil rivning.

4. Samlad bedömning

Lågenergiska scenarier (container, mindre fartyg, visir) saknar energipotentialet för att orsaka E1/E2 och deformationerna mellan dem. Bottenkontakt kan ha bidragit till viss sekundär påverkan men är otillräcklig som primär orsak.

Endast en högenergisk sidokollision uppfyller både geometriska, mekaniska och fraktografiska krav.

5. Slutsats

Styrbordsskadan på MS Estonia har uppkommit genom en extern högenergetisk sidokollision. Ingen av de alternativa mekanismerna kan inom rimliga fysikaliska ramar producera den dokumenterade skadebilden. Bottenträff kan endast ha utgjort ett sekundärt moment.

Rapport 2 – Sjunkscenario enligt två-fasmodellen

Inledning och syfte

Rapport 2 analyserar MS Estonias slutliga sjunkförlopp och visar att fartygets rörelser och skadebilder inte kan förstås inom ramen för den traditionella JAIC-modellen. I stället presenteras en två-fasmodell där aktern träffar botten först, vilket genererar ett betydande vridmoment som styr den efterföljande rotationen. Syftet är att undersöka om denna modell bättre förklarar de dokumenterade skadorna – främst akterskadorna på babordssidan samt styrbordsskadorna E1/E2 – och om den är förenlig med vittnesuppgifter, energiberäkningar och geotekniska data.

Metodik och grundantaganden

Analysen bygger på fysikaliska beräkningar av energi, stoppsträckor, momentarmar samt rotationsdynamik. Modelleringen utgår från samma hydrodynamiska ramverk som i BMTIG:s Rapport 4. Inläckageantagandena följer JAIC:s randvillkor (vatten ovan och under bildäck) men utan att ta ställning till visirets eller rampens faktiska status.

Fas 1: Aktern träffar botten vid ca 210° rotation

Fartyget kapsejsar och sjunker aktern först. Vid däck 6–8 på babords sida finns omfattande intryckningar som entydigt indikerar en bottenkontakt. Geometrin stämmer med en träff vid cirka 210° rotationsvinkel. Energiupptaget är högt, men inte så extremt att strukturen kollapsar – typfall med stoppsträcka 0,5–1,0 m ger krafter och moment i linje med observerade skador.

Fas 2: Sekundärrotation tillbaka mot babord

Bottenträffen skapar en momentarm på cirka 40 meter mellan akterns träffpunkt och fartygets rotationscentrum. Detta ger en kontrollerad, långsammare rotation åt motsatt håll. Hydrodynamisk dämpning gör att normalhastigheterna i styrbordssidan blir låga. Dessa förhållanden kan inte skapa penetrerande skador som E1/E2.

Skadebilder och motsägelser

Akterskadorna:

- De omfattande bucklingarna och spantbrotten på babords akter däck 6–8 överensstämmer med en kraftig bottenträff.
- Geotekniska data från Rockwater (1994) visar att botten bestod av 1,4–2,3 m mjuk lera – inte hårt berg. Detta utesluter skärande bottenträffar mot styrbordssidan.

Styrbordsskadorna:

- De två stora hålen E1 och E2 samt de 22 meter långa deformationerna kan inte uppstå i Fas 2; energinivåerna är för låga, kontakten för mjuk och skrovets rörelse för långsam.
- Skademönstret kräver en separat, högenergetisk sidokollision ($\approx 140\text{--}180\text{ MJ}$), vilket ligger utanför bottenscenariot.

Geoteknik och bottenförhållanden

Rockwaters Vibrocore-data (VC-1–VC-6) visar att det inte fanns någon bergskam under vraket 1994. Senare observationer av hårt material vid styrbord är sannolikt dumpat stenmaterial från övertäckningsarbetet 1995. Detta underminerar OJK:s hypotes att styrbordsskadorna orsakats av bergkontakt.

Rotationsbromsning i mjuk lera

Den mjuka dyn kan bromsa rotationen effektivt men saknar kapacitet att orsaka hål i skrovet. Beräkningar av odränerad bärförmåga och momentupptag visar att leran kan stoppa rotationen över 10° rörelse, vilket överensstämmer med fartygets slutläge.

Vittnesmål och tidsutveckling

Rapporten integrerar centrala vittnesuppgifter:

- Vatten på däck 1 före slagsidan.
- Metalliska smällar och skrapljud midskepps.
- Observationer av en stängd ramp under det kritiska skedet.

Dessa vittnesmål är oförenliga med JAIC:s antagande om att rampen stod helt öppen och att vatteninträngningen primärt skedde via fören. Däremot är vittnesmålen förenliga med en tidig, högenergetisk skadehändelse – något som ligger utanför Rapport 2 men som behandlas i Rapport 1 och 8.

Känslighetsanalys och Monte Carlo

Parameterintervallen (hastighet, massa, added mass, stoppsträcka, kontaktarea) varierades i konservativa intervall. Resultaten visar:

- Stoppsträckan s och sjunkhastigheten v är de dominerande parametrarna.
- Vridmoment och kraftnivåer förblir inom samma ordning oavsett variationer.
- Rangordningen mellan scenarier förändras inte.

Samlad bedömning

Rapport 2 visar att MS Estonias slutliga sjunkförlopp inte kan reduceras till ett enkelt bottenkontaktsscenario. En tvåstegsprocess – där energin fördelas mellan en akterträff och en efterföljande rotation – är nödvändig för att få en fysikaliskt koherent förklaring. Detta lämnar samtidigt utrymme för att E1/E2-skadorna uppstod tidigare genom en extern högenergetisk påverkan, vilket behandlas i Rapport 1 och 3.

Slutsatser

1. MS Estonias sjunkförlopp måste ha skett i två faser: en kraftig akterträff följt av en kontrollerad sekundärrotation.
2. Akterskadorna på babords sida kan förklaras fullt ut av Fas 1.
3. Styrbordsskadorna E1/E2 kan inte ha uppkommit genom Fas-2-bottenkontakt; de kräver ett separat högenergetiskt händelseförlopp före bottenträffen.
4. Geotekniska grunddata utesluter bergkontakt vid styrbord.
5. Vittnesmål stöder att betydande skador och vatteninträngning förelåg tidigt – före kapsejsning och före fasövergången.
6. Två-fasmodellen är mer förenlig med observerade skadebilder, fysikaliska principer och dokumenterade vittnesuppgifter än de scenarier som framförts i JAIC, SHK och OJK.

Rapport 3 – Energibehov för styrbordsskadan

Syfte och utgångspunkt

Rapport 3 fastställer hur mycket mekanisk energi som krävts för att skapa den observerade styrbordsskadan på MS Estonia. Modellen avser endast energimängden i själva strukturen, inte hur energin genererades eller från vilket objekt. Syftet är att klargöra om skadorna kan förklaras av bottenträff vid sjunkning eller om de kräver ett separat, högenergetiskt scenario.

Metodik och grundantaganden

Skadeområdet uppskattas till cirka 25×4 meter (100 m^2) med en genomsnittlig intryckning på 1 meter. Den plastiskt påverkade stålvolymen beräknas till omkring $2,6 \text{ m}^3$. Modelleringen använder konservativa antaganden av stålqualität (S355/AH36), flödesspänning oflow $\approx 355 \text{ MPa}$, plastisk töjning $\epsilon_p = 0,15$ samt sprick-/slitsningsenergi $G_c = 0,10\text{--}0,30 \text{ MJ/m}^2$.

Resultat – huvudscenario

Vid 1 m intryckning och 15 % plastisk töjning erhålls:

- Plastisk deformation: ≈ 140 MJ
- Brott plåt: 0,096 MJ
- Brott spant: 0,0056 MJ
- Totalt: ≈ 140 MJ

Buckling/drag-fördelning visar att:

- Ren dragmodell ≈ 180 MJ
- Blandad drag/buckling ≈ 140 – 160 MJ
- 100 % buckling ≈ 100 MJ (teoretiskt, ej förenligt med skadebild)

Extrem- och mindre fall

- Extremfall (2 m intryckning, 20 % töjning): ≈ 187 MJ
- Mindre fall (halverad aktiv plåtvolum): ≈ 70 MJ (teoretiskt, ej förenligt med två hål + mellanliggande deformation)

Materialkänslighet

Analys av stålqualität och plåttjocklek visar att baslinjen (12 mm S355) är konservativ. Faktiskt skadeområde domineras av 17 mm plåt, vilket höjer energibehovet ytterligare. Även lägre materialkvaliteter (Grade A/B) kompenseras av tjockare plåt.

Monte Carlo analys (20 000 iterationer)

En Monte-Carlo-analys innebär att samma beräkning upprepas tusentals gånger med slumpmässig variation av osäkra parametrar. Resultatet blir en energifördelning (P5–P95) som visar hur robust modellen är och vilka värden som är mest sannolika. Följande resultat har vi fått fram i denna rapport.

- P5 ≈ 140 MJ
- P50 ≈ 160 MJ
- P95 ≈ 180 MJ

Fördelningen är smal och robust. De dominerande parametrarna är flödesspänning, plastisk töjning och deformerad volym. Buckling minskar energibehovet men räcker inte för att närma sig nivåer som kan motsvara en bottenträff.

Samlad bedömning

1. Styrbordsskadan kräver 140–180 MJ absorberad energi i struktur.
2. Bottenträff vid sjunkning kan maximalt ge cirka 31 MJ och är därför utesluten som primär orsak.
3. Lågenergiscenarier (mindre fartyg, flytande objekt) ligger två storleksordningar lägre.
4. Endast ett högenergetiskt externt händelseförlopp kan förklara skadebildens utbredning och plastiska deformation.
5. Var energin kom ifrån behandlas i Rapport 1 (skadeorsak) och 8 (momentanalys).

Slutsats

Rapport 3 visar att de energinivåer som krävs för styrbordsskadan ligger i intervallet 140–180 MJ, vilket entydigt pekar mot att skadan uppkommit av en separat extern högenergetisk påverkan – inte av bottenkontakt under sjunkningen.

Rapport 4 – Hydrodynamisk modell och tvåfas-sjunkförlopp

Syfte och utgångspunkt

Rapport 4 etablerar den hydrodynamiska modell som ligger till grund för BMTIG:s tvåfas-sjunkförlopp. Den analyserar MS Estonias rotation, sjunkhastighet, fyllnadsdynamik, momentarmar samt kraftöverföring mellan vattenmassor och skrov. Rapporten bedömer inte skadeorsaker, utan beskriver fartygsresponsen givet vissa inläckagevillkor. Målet är att förklara den snabba slagsideutvecklingen och varför aktern träffar botten först.

Modell och antaganden

Modellen förutsätter vatteninträngning både ovan och under skottdäck (bildäck), motsvarande JAIC:s randvillkor. Detta används endast för att skapa ett fysikaliskt korrekt flytläge och återskapa observerade trimsprång – inte som ett ställningstagande till visirets eller rampens status.

Vattnet betraktas som en dynamisk massa som kopplas till skrovet. Detta påverkar energiöverföringen och rotationshastigheten.

Fas 1 – Fartygets kapsejsning och rotation mot 210°

Fartyget utvecklar snabbt kraftig slagsida. Modellens trim- och rotationskurvor visar en tydlig övergång till kapsejsning, där fartyget rullar runt sin längdaxel tills rotationsvinkeln når cirka 210°. Vid detta läge uppstår en kraftig akterträff på babords sida, helt i linje med skadebilden på däck 6–8.

Beräkningar av rörelsemängd, momentarmar och hydrodynamiskt motstånd visar att:

- akterträffen är dynamiskt ofrånkomlig
- rotationen dämpas markant av bottendyn
- normalhastigheterna mot styrbordssidan är låga efter träffen

Fas 2 – Sekundärrotation tillbaka mot babord

Träffen i fas 1 skapar ett stort moment ($\approx 7\text{--}12\text{ MN}\cdot\text{m}$) som får skrovet att svänga tillbaka mot babord. Den hydrodynamiska dämpningen gör denna fas långsam.

Centrala konsekvenser:

- Styrbordssidan träffar inte botten med tillräcklig energi för att skapa hålen E1/E2.
- Lerbotten dämpar rotationen men orsakar inte penetrerande skador.
- De aktra skadorna uppkommer i fas 1, inte i fas 2.

Rockwaters Vibrocore-data visar att botten 1994 bestod av 1,4–2,3 meter mjuk lera. Hydrodynamiska simuleringar visar att denna lera:

- bromsar rotation effektivt,
- men inte kan åstadkomma inträngning i stålplåt.

Fas 2 är därför en lågenergifas – detta bekräftar att styrbordsskadan inte kan vara en följd av bottenkontakt.

Hydrodynamiska samband

Rapporten använder standardmodeller i fråga om tillförd sjunkmassa, rullmotstånd och dämpning i lera/dy.

Ett centralt samband definierar hur mycket av den totala rörelseenergin som förs in i strukturen.

Beräkningar visar att energin i fas 2 är för låg för att orsaka någon av de dokumenterade styrbordsskadorna..

Vittnesmål och tidslinje

Rapporten knyter samman följande vittnesuppgifter:

- kraftiga smällar midskepps,
- tidigt vatten på däck 1,
- ljud av metallisk friktion,
- snabb slagsida trots intakt ramp enligt flera vittnen.

Dessa vittnesmål är förenliga med att en extern inträffat innan kapsejsningen, men rapporten drar inga slutsatser om detta – den konstaterar endast att sjunkförloppet kräver två faser.

Samlad bedömning

Rapport 4 visar följande:

1. MS Estonia sjönk i två distinkta faser – kapsejsning och akterträff, följt av sekundärrotation.
2. Akterträffen förklarar de omfattande babordsskadorna på däck 6–8.
3. Normalhastigheterna mot styrbord i fas 2 är mycket låga – otillräckliga för att skapa E1/E2.
4. Ler- och dybotten fungerar som effektiv rotationsbroms men kan inte skapa penetrerande deformationer.
5. Hydrodynamiken utesluter att styrbordsskadan uppkommit vid bottenkontakt.
6. Modellen är förenlig med vittnesmål, rotationsgeometri och observerade trimsprång.

Slutsats

Rapport 4 bekräftar att sjunkförloppet inte kan ha skapat styrbordsskadan. Den hydrodynamiska modellen visar entydigt att endast akterskadorna kan härledas till bottenkontakt, medan styrbordsskadan måste ha uppkommit före sjunkningen – i ett separat, högenergetiskt händelseförlopp som behandlas i Rapport 1 och 8.

Rapport 5 – Granskning av TalTechs bottenkontakt-scenario

Syfte och utgångspunkt

Rapport 5 analyserar TalTechs numeriska modell av MS Estonias bottenkontakt och prövar om deras scenario kan förklara hela styrbordsskadan (E1–E2 inklusive mellanliggande skadezon). Fokus ligger på tre huvudfrågor: (1) om antaganden och styrda rörelser ger en fysikaliskt rimlig skadeprocess, (2) om energinivåerna kan nå de 140–180 MJ som krävs enligt Rapport 3, och (3) om TalTechs modell robust reproducerar dokumenterad skademorfologi. Rapportens slutsats är att TalTechs scenario inte uppfyller kraven för att förklara den verkliga styrbordsskadan.

Översikt över TalTechs upplägg

TalTech startar simuleringen sent i sjunkförloppet – aktern nära botten, bogen delvis ovan ytan. Rörelsen drivs med föreskrivna laster:

- $\approx 0,12$ g för att skapa rullhastighet $\approx 0,6^\circ/\text{s}$
- $0,125$ g "sidogravitation" för att driva skrovet mot slutläget
- En antagen bergskamsrygg under skrovet för att skapa lokal kontakt

Dessa laster kommer inte från mätta data utan införs för att styra modellen. Startvillkoren motsvarar inte ett fritt dynamiskt förlopp som härrör från fas 1 av sjunkningen – energikedjan är därmed bruten.

Vad simuleringarna åstadkommer

TalTechs modell kan ibland producera enstaka lokala öppningar, men inte stabilt. Resultaten varierar starkt mellan grov och fin mask, mellan olika bottenformer och mellan rullvinklar:

- Vid 133° rullning ger grov mask två öppningar – i fel läge.
- Vid fin mask uteblir ofta främre öppningen (E1).
- Vid 113° uppstår lång men icke-realistisk deformation.

Samtliga utfall är parameterkänsliga, inte fysikrobusta.

Varför modellen inte kan förklara hela styrbordsskadan

Ett verkligt skadeförlopp måste uppfylla tre nödvändiga villkor:

1. Rätt energinivå och lokal energitäthet
2. Rätt geometri och lägesprecision
3. Rätt skademorfologi (brott, töjning, spantdeformation)

TalTechs modell faller på samtliga tre.

Energi och lastlogik

Rapport 3 visar att styrbordsskadan kräver $\approx 140\text{--}180$ MJ. TalTechs rotationsenergi är däremot:

- Krot $\approx 0,56\text{--}0,60$ MJ

Det är tre storleksordningar för lågt. Den laterala kroppskraften 0,125 g kan teoretiskt utföra arbete mot glidsträcka, men denna energi:

- sprids över bottenkontaktyta
- deponeras inte lokalt vid E1/E2
- saknar koppling till skrovdeformationens energitäthet

TalTech presenterar ingen energibudget i MJ och inga energikartor längs skadelängden som visar var energi absorberas. Utan sådan redovisning går deras förklaring inte att verifiera.

Geometriskt mätstöd

Den "bergskam" som modellen bygger på är antagen – och saknar mätstöd från 1994 års bottenundersökningar. Vraket ligger i verkligheten i sidoliggnings och nedbäddat i sediment, inte mot en smal ås. Därför är kontaktgeometrin i TalTechs modell inte förenlig med verklig bottenkontakt.

Skademorfologi

Skadorna E1/E2 + skadezon motsvarar:

- snabbt energitillskott
- utfläta plåtar
- spantbrott
- höga lokala töjningshastigheter

TalTechs skadebilder (sprickor högt upp, malplacerade öppningar, stor variation mellan körningar) visar inte denna typ av högenergetisk morfologi.

Numeriska begränsningar

Rapport 5 identifierar flera metodproblem:

- Ingen konvergensstudie (mesh-känslighet för E1/E2)
- Oklar kontaktmodell i lera/sediment
- Ingen specificerad brottmodell eller triaxialitetskontroll
- Okända nivåer av hourglass-energi
- Begränsad validering mot verklig geometri

En modell som ändrar utfall vid förfining kan inte användas som skadeförklaring.

Slutsats

TalTechs bottenkontakt-scenariot kan inte reproducera den verkliga styrbordsskadan på MS Estonia. Modellens skadeutfall är beroende av antaganden, styrda laster och geometri som saknar stöd i observationer.

Energiniivåerna är flera storleksordningar för små, och ingen robust validering mot E1/E2 och skadezonen redovisas.

Rapportens samlade bedömning är att bottenkontakt inte kan ha skapat styrbordsskadan. Skadan måste därför ha uppkommit före sjunkningen genom ett separat, högenergetiskt händelseförlopp.

Rapport 6 – Kritisk analys av SSPA:s sjunkstudier 2008

Syfte och utgångspunkt

Rapport 6 granskar SSPA:s VINNOVA-studier från 2008 och bedömer deras förmåga att förklara MS Estonias dokumenterade styrbordsskador (E1/E2 och den 22 meter långa skadezonen). Arbetet fokuserar på tre centrala frågeområden: (1) avsaknad av kvantifierad sjunkhastighet, (2) avsaknad av kinetisk energibudget för bottenkontakter och (3) bristfällig falsifiering av undervattensskador på däck 0–1. Rapportens slutsats är att SSPA:s modeller inte kan användas för att utesluta att styrbordsskadan uppstod före sjunkningen.

Utgångspunkter

Genomgången baseras på SSPA:s rapportpaket (SSPA, PROTEUS3, HSVA) samt senare tekniskt och vittnesbaserat underlag (2005–2025). SSPA:s antagna inläckagevillkor används endast som randvillkor.

Fråga 1 – Sjunkhastighet

SSPA beskriver sjunkförloppet i sekvens: kapsejsning, trim och slutlig nedfärd. Men ingen vertikalhastighet (m/s) redovisas i något skede. Utan explicit hastighet kan ingen impaktenergi beräknas, vilket gör det omöjligt att avgöra om akterträffen eller slutlig nedläggning hade tillräcklig energi för att skada styrbordssidan. Detta är en grundläggande brist då energikraven för styrbordsskadan (140–180 MJ) är betydande.

Fråga 2 – Rörelseenergi och krafter

Varken SSPA:s modellförsök eller numeriska simuleringar (PROTEUS3/HSVA) innehåller kvantitativa energiberäkningar vid bottenkontakt. Ingen av rapporterna redovisar:

- kinetisk energi vid akterträff,
- normalkraftsnivåer mot botten,
- lokal energideposition längs styrbordssidan.

Fråga 3 – Undervattenskador (Deck 0–1)

SSPA betraktar scenariot "collision with other object, hull damage at deck 0/1" som mekaniskt möjligt men avfärdar det med två premisser:

1. att utrymmena på däck 0–1 skulle förbli luftfyllda i 10–15 minuter,
2. att inga vittnen skulle ha sett betydande vatten tidigt.

Nya data motsäger båda premisserna.

Kort vittnesöversikt

Senare sammanställningar (2005–2022) visar en samstämmig sekvens:

- metalliska slag/skrapljud,
- omedelbar slagsida,
- tidigt vatten på däck 1.

Återkommande beskrivningar: "water rushing in", "10–15 cm of water on the hallway floor", "water from the car deck door". Detta inkluderar volymer där skadorna E1 och E2 är belägna. SSPA:s antagande om att dessa utrymmen skulle vara torra är därför inte hållbart.

Kontrast mot SSPA:s hypotes

- SSPA förutsätter "no substantial water seen early" – vittnesmaterialet visar motsatsen.
- SSPA antar luftvolymer i verkstad/hyttsektion – skadan E2 sitter just där.
- SSPA antar att fönster först ska brista – om E1/E2 läcker först blir fönsterbrott sekundärt.

Samlad analys

SSPA:s avfärdande av undervattenskador bygger på antaganden som inte längre är förenliga med evidens. Utan sjunkhastigheter, utan energibudget och utan robust falsifiering av undervattenskador finns inget som kvantitativt stödjer hypotesen att styrbordsskadan skulle ha uppstått vid sjunkningen.

Slutsats

Rapport 6 drar följande slutsatser:

1. SSPA redovisar ingen sjunkhastighet och kan därmed inte uppskatta impaktenergi.
2. Ingen energibudget finns för någon bottenkontakt – därmed inga bevis för att bottenkontakt orsakat styrbordsskador.
3. Avfärdandet av "underwater damage" vilar på antaganden som motbevisas av senare vittnes- och skadeinformation.
4. SSPA:s slutsatser kan därför inte användas för att utesluta pre-impact-skador på styrbordssidan.
5. Moderna analyser måste i stället utgå från verifierad skadegeometri (E1/E2), energikraven (140–180 MJ) och vittnesbaserade tidsmarkörer.

Sammanfattningsvis visar Rapport 6 att SSPA:s 2008-studier ger värdefulla stabilitetsinsikter men inte ger någon hållbar mekanisk förklaring till den dokumenterade styrbordsskadan.

Rapport 7 – Bogvisiret orsakade inte styrbordsskadorna

Syfte och utgångspunkt

Rapport 7 utvärderar om bogvisiret kan ha orsakat den omfattande styrbordsskadan på MS Estonia. Analysen bygger på verifierade data för visirets massa, volym, flytbeteende, tyngdpunktsläge och strukturella öppningar, samt hydrodynamisk respons i hård sjö. Rapportens fokus är mekanisk rimlighet: kan visiret – vid fall, drift eller eventuell återkollision – uppnå den energi och geometri som krävs för att producera E1, E2 och den sammanhängande 22-metersdeformationen?

Huvudresultatet är att bogvisiret är fysiskt oförmöget att åstadkomma sådana skador. Energiunderskottet är två storleksordningar, rörelsebanan är oförenlig med skadeområdet och flytbeteendet förhindrar all kontrollerad kontakt.

Grunddata för visiret

- Vikt vid bärgning: 64 ton
- Volym: $\sim 130 \text{ m}^3$ (antaget helt slutet, ej verkligt)
- Tyngdpunkt: $\sim 7 \text{ m}$ ovan vattenytan
- Undersida: helt öppen, stora hål – snabb vatteninträngning
- Initial stabilitet: negativ

Dessa egenskaper innebär att visiret:

- 1) saknar stabilt flytläge,
- 2) kapsejsar inom sekunder,
- 3) sjunker snabbt i grov sjö,
- 4) inte kan glida längs Estonia i kontrollerad höjd eller orientering.

Energibehov kontra möjlig energi

Skadeområdet på styrbordssidan kräver enligt tidigare rapporter (R3) $\approx 140\text{--}180 \text{ MJ}$ absorberad energi. Mot detta ställs visirets maximala realistiska energi:

Maximalt scenario – fall, tumling och drift

- Max fart i vatten: $4\text{--}5 \text{ m/s}$
- Rörelseenergi vid 5 m/s : $\approx 0,8 \text{ MJ}$

Energiunderskott: cirka $200\text{--}225\times$.

Monte Carlo-analys (20 000 simuleringar)

- P5: $\approx 0,05 \text{ MJ}$
- P50: $\approx 0,35 \text{ MJ}$
- P95: $\approx 0,85 \text{ MJ}$

Sannolikheten att visiret når $140\text{--}180 \text{ MJ}$: $< 10^{-6}$.

Ingen parameterkombination kan generera energi i närheten av vad som krävs.

Geometrisk bana – omöjlig återkontakt

JAIC:s scenario innebär:

- 1) visiret lossnar framåt,
- 2) tumlar neråt och träffar bulben,
- 3) sjunker vid fören,

Visiret skulle därefter behöva "vända uppåt och bakåt" $50\text{--}70 \text{ m}$ mot styrbordssidan.

Det finns ingen hydrodynamisk mekanism som kan åstadkomma en sådan bana. Estonia rör sig dessutom framåt $15\text{--}19 \text{ knop}$, vilket gör att visiret hamnar akterut men djupt under ytan – inte vid styrbordssidan i kollisionshöjd.

Reintamms observation

Reintamm såg ett vitt objekt akterut längs babordssidan. Detta är geometriskt och tidsmässigt inkompatibelt med visirets fall, position och sjunkförlopp. Observationen kan därför inte användas som stöd för visirhypotesen.

Flytförmåga – praktiskt noll

Saltechs "air pocket"-hypotes bygger på volymer som i verkligheten inte är slutna. Bilder från visirets insida (Muskö, Södertälje) visar:

- stora hål (≈ 400 mm) i plåtarna,
- öppen struktur,
- ingen tät volym som kan hålla kvar luft.

Den verkliga flytkraften är därför försumbar och visiret sjunker snabbt.

Kärnbedömningar

- Visiret flyter inte stabilt → saknar möjlighet att orienteras mot skrovet.
- Visiret kan inte glida längs styrbordssidan → sjunker och tumlar okontrollerat.
- Visiret kan inte uppnå nödvändig energi → 0,3–0,8 MJ mot krav 180 MJ.
- Visiret kan inte nå skadeområdet → fel bana, fel höjd, fel tid.
- Vittnesobservationen stöder inte visirhypotesen → motsatt sida och rörelseriktning.

Slutsats

Bogvisiret kan inte ha orsakat styrbordsskadan. Kombinationen av:

- 1) extremt energiunderskott,
- 2) omöjlig rörelsebana,
- 3) negativ stabilitet och snabb nedsjunkning,
- 4) strukturell öppenhet som förhindrar flytkraft,
- 5) oförenlighet med vittnesdata,

gör visirhypotesen fysikaliskt utesluten. Styrbordsskadan måste därför ha uppkommit genom en annan yttre kraftkälla – en händelse som motsvarar det dokumenterade energi- och deformationsmönstret (≈ 180 MJ), vilket behandlas i Rapport 1 och 8.

Rapport 8 – Slagsidans initiala utveckling

Syfte och avgränsning

Rapport 8 behandlar endast den inledande fasen av förlisningen: från den första plötsliga styrbordslutningen, via den korta upprättningen, till den påföljande och snabbt ökande styrbordsslagsidan. Syftet är att särskilja den tidiga, indikativa fasen från de dimensionerande händelserna i den senare kapsejsningen (≈ 180 – 210°) som analyseras i R2 och R3. R8 koncentrerar sig på tre frågor:

1. Om skadezonen E1/E2 kan förklara den observerade tidiga slagsideutvecklingen.
2. Om vittneskedjan är förenlig med tidig vatteninträngning under bildäck.
3. Hur denna fas knyter samman med den efterföljande fulla rotationen och akterträffen.

Utgångspunkt: skadezonen E1/E2 som primärhändelse

Analysen bygger på den av BMTIG dokumenterade styrbordsskadan: två hål (E1 på däck 1–2, E2 på däck 0) samt ett sammanhängande intryckt skadeområde däremellan. Rapporterna R1, R3 och R8 visar att dessa skador är förenliga med en tidig, extern högenergi-kollision. Rapport 8 visar hur just denna skada logiskt förklarar den initiala lutningssekvensen.

Slagsida → upprättning → åter slagsida

Vittneskedjan är slående konsistent. Spårbara JAIC-källor (kap. 6, GGE) anger:

- **Plötsliga metalliska smällar**, följt av
- snabb **styrbordslutning 10–45°**,
- därefter **delvis upprätning mot nära 0°**,
- sedan **progressivt ökande styrbordslutning** fram till kapsejsning.

Denna sekvens är karakteristisk för en kombination av:

1. asymmetrisk, tidig vatteninträngning (E2 → maskinrumsverkstad, ev. maskinrum),
2. initial lastförskjutning och tyngdpunktsmoment,
3. därefter fri-ytor och GM-minskning via E1 på däck 1.

R8 visar att just denna kombination åstadkommer en inledande slagsida, följt av en temporär stabilisering (vattnet passerar centerlinjen) och sedan en ny våg av slagsida när fler utrymmen fylls och GM sjunker.

Volym och tyngdpunktsförskjutning

De volymer som primärt fylls vid tidig skada är:

- Maskinrumsverkstad däck 0 ($\approx 272 \text{ m}^3$)
- Maskinrum ($\approx 2105 \text{ m}^3$) via möjlig öppen dörr
- Hyttavdelning däck 1 påverkas tidigt genom E1 (teoretisk maxvolym $\approx 7000 \text{ m}^3$)

E2 fyller först ett mindre rum, men detta rum är placerat extremt långt ut på styrbord – vilket ger ett stort hävarmsskapande moment ($\Delta W \cdot y$). När vattnet därefter breder ut sig i maskinrummet minskar hävarmen tillfälligt och fartyget rätar sig – exakt det vittnen beskriver. När sedan E1-området fylls uppstår fria ytor som sänker GM, och slagsidan ökar snabbt igen.

Fysisk konsekvens: tidiga faser är **indikerande**, inte dimensionerande

Rapporten slår fast att denna tidiga fas inte kräver några stora energimängder och inte påverkar den senare kapsejsningsdynamiken i nämnvärd grad. Den dimensionerande energin ligger i fasen runt 180–210° och är analyserad i R2 och R3. Den inledande fasens roll är i stället att:

- peka på var läckaget måste ha funnits,
- förklara slagsideförloppet karakteristiska form,
- avgränsa vilka skadeområden som kan vara primära.

Konsekvens för JAIC:s modell

Rapport 8 visar varför JAIC:s hypotes – att vatten på bildäck driver den tidiga slagsidan – saknar stöd:

- JAIC kräver 1500–2000 ton vatten på däck för kapsejsning; BMTIG:s beräkningar visar att ~800 ton skulle vara tillräckligt för omedelbar rollover.
 - JAIC:s modell bygger på att fartyget “flyter på överbyggnaden” i flera minuter – något som strider mot grundläggande stabilitetsfysik.
 - Den officiella modellen saknar analys av skador under bildäck, trots att dessa nu är dokumenterade.
- Rapport 8 visar att JAIC:s tidiga förlopp är fysikaliskt osannolikt och saknar stöd i vittnesdata.

Integrering i sjunkförloppet

När vatten kommer in via E2/E1 i tidigt skede skapas en logisk kedja:

1. **Smällar** → strukturell skada
2. **E2/E1 fylls** → initial slagsida
3. **Vatten passerar centerlinjen** → delvis upprätning
4. **Fri-ytor växer** → snabb progressiv slagsida
5. **Kapsejsning ($\approx 180^\circ$)**
6. **Fortsatt rotation till $\approx 210^\circ$**
7. **Babords akter träffar botten** (däck 6–8)
8. **Sekundärrotation till slutläge**

JAIC:s förklaring kan inte reproducera steg 2–4 utan att introducera intern fiktiv flytkraft i överbyggnaden.

Slutsats

Rapport 8 visar följande:

1. Den initiala slagsidan är bäst förklarad av tidig vatteninträngning genom styrbordsskadorna E1/E2.
2. Vittneskedjan är systematiskt förenlig med just detta scenario och oförenlig med JAIC:s bildäckshypotes.
3. Den tidiga fasen är indikativ – inte energidimensionerande – men är avgörande för att identifiera skadornas ursprung och tidpunkt.
4. Modelleringen binder samman de tidiga observationerna med den senare dynamiska fasen ($\approx 210^\circ$ bottenträff).
5. JAIC:s avsaknad av analys av styrbordsskadan innebär att hela den officiella tidiga förloppshypotesen saknar mekanisk bas.
6. R8 stärker slutsatsen att styrbordsskadan är en primär händelse före sjunkningen, inte en följd av den.

Rapport 9 – Bottenträff och rotation

Syfte och fokus

Rapport 9 analyserar MS Estonias bottenträff i sjunkförloppets Fas 2 och förklarar hur fartyget – trots pågående rullning åt styrbord – slutar på styrbordssidan efter en rotationsväxling. Rapporten visar att denna rotationsväxling uppstår vid en första kontakt på babords akterhorn (däck 6–8) i mjuk silt/lera. Analysen visar även varför fas-2-kontakten inte kan ha skapat styrbordsskadorna E1/E2, som kräver ett separat högenergiskt händelseförlopp.

En separat del av rapporten (kap. 5) behandlar sediment, siltlinjer och ”beläggningshöjd” på skrovet, och visar att sådana mönster inte i sig kräver direkt bottenskräpning.

Huvudmekanism – babords akterträff (fas 2)

Fartyget når botten med kvarvarande translatorisk energi efter kapsejsningen. Vid första kontakt:

- aktern träffar mjuk silt/lera på babords sida,
- stoppträcken är kort (meterklassen),
- kvarvarande energi omvandlas till rotationsmoment som vänder rullningen,
- en sned (oblik) rotationsaxel etableras då aktern står djupt i sedimentet,
- rotationen byter riktning och fortsätter medan aktern lyfts.

Denna sekvens förklarar:

1. varför fartyget byter rullriktning,
2. varför aktern lyfts och skorstenen ”gräver sig ner”,
3. varför fartyget glider några grader söderut ($2\text{--}5^\circ$ bottenlutning),
4. hur sediment pressats in i akterrampens ramverk (nedtryckning → återresning → ”skopning”).

Simulerad och stiliserad bildsekvens (kap. 1.1–1.2) visar detta förlopp i sex steg: babords träff → rotation → uppresning → akterlyft → dämpning → slutläge.

Energiomvandling och dämpning i sediment

Den kvarvarande rörelseenergin E_k dissiperas huvudsakligen genom:

- resistiv plastisk deformation i bottensedimentet,
- squeeze-film-effekter i vattenlagret mellan skrov och botten.

Förenklad energibalans:

$$E_k \approx F_{med} \cdot s$$

$$E_{rot} = \alpha \cdot E_k$$

Restenergin driver rotationsväxlingen. Mjuk silt/lera ger lång kontakttid och begränsar toppreaktionerna – en stabil mekanism för omkastning.

Viktigt: Fas-2-kontakten skapar global deformation men kan inte skapa penetrerande hål.

Jämförelse med tidigare analyser (JAIC, SHK/OJK, SSPA/HSVA, TaiTech, EL21)

Rapport 9 visar att tidigare modeller saknar en kausal mekanism för rotationsväxlingen:

- JAIC: analyserar översvämning men inte mekanisk bottenträff.
- HSVA/SSPA: fokuserade på sjunksekvensen, analyserade inte akterstödet eller rotationens omkastning.
- TalTech (2023): korrekt slutläge, men saknar upplösning för den initiala sneda akterträffen och skiljer inte på lokal och global deformation.
- SU EL21: beskriver bottenstruktur men drar inga mekaniska slutsatser.

Endast babordshörn-scenariot uppfyller kriterierna för rotation, slutläge och sedimentspår.

Alternativscenarier (kap. 3)

A) Första kontakt på styrbord

→ leder naturligt mot babordsslutläge; styrbordsslutläge kräver en energimässigt osannolik ”dubbelvändning”.

B) Nära plan akterträff ($\approx 180^\circ$ stern-down)

→ en omkastning är möjlig, men inte robust; kräver gynnsamma asymmetrier (bottenlutning + kantkontakt).

Bedömning: Babordshörn-träff är den mest robusta och mekaniskt rimliga förklaringen.

Sediment, siltlinjer och ”belägningsnivåer” (kap. 5)

Rapport 9 klargör att sediment på skrovet – särskilt i aktern, ankarklyset och fenfacket – inte nödvändigtvis innebär kontakt eller friktion mot botten. Tre processer kan skapa liknande mönster:

1. Bottennära nepheloidlager (BBL) – meterhögt grumligt lager som belägger ytor under sin övre nivå.
2. Densitets-/slamflöden kopplade till 1996 års geotextil och dumpmassor – kan avsätta material flera meter upp.
3. Långsam bakgrundssedimentation i läfickor – mm–cm/år över tre decennier.

Slutsatsen är att siltlinjer inte är determinativa – de är indicier som måste värderas mot alternativa förklaringar.

Samlad slutsats

1. Babords akterträff i mjuk silt/lera är den mest robusta mekanismen för rotationens omkastning och slutläge på styrbord.
2. Sediment i akterrampen förklaras av nedtryckning följt av återresning – inte av styrbordskontakt.
3. Fas-2-kontakten kan inte skapa styrbordsskadorna E1/E2; energin är för låg och kontaktgeometrin fel.
4. Tidigare modeller (JAIC, HSVA/SSPA, TalTech) saknar en kausal fas-2-förklaring.
5. Siltlinjer på skrovet måste värderas som indicier – inte som bevis på direkt bottenskräpning.
6. Rapport 9 bekräftar att styrbordsskadan uppkom före fas-2-kontakt och måste ha ett separat, högenergetiskt ursprung ($\approx 140\text{--}180$ MJ).

Rapport 10 – Beräkningsprinciper och metodik

Syfte och funktion

Rapport 10 är den sammanhållande metodrapporten i BMTIG-serien och utgör den tekniska ryggraden bakom analyserna i R1–R9. Där de tidigare rapporterna behandlar specifika händelser – skrovskador, energiberäkningar, stabilitet, bottenträff och dynamiska sekvenser – beskriver R10 hur varje beräkning faktiskt har genomförts: vilka ekvationer som används, vilka antaganden som gjorts och hur osäkerheter har hanterats. Dokumentet är avsett att ge full transparens och möjliggöra reproduktion av resultaten med standardverktyg.

Grundläggande ansats

Alla analyser bygger på klassiska fysikaliska lagar och en konsekvent energi- och kraftbalans. Samtliga samband löses i SI-systemet och följer tre huvudsteg:

- 1) Fastställ geometri, materialdata och randvillkor.
- 2) Beräkna relevanta delenergies (mekaniska, hydrodynamiska, termiska).
- 3) Jämför med observerade deformationer, skademönster eller dynamiska förlopp.

Denna struktur gör det möjligt att spåra varje slutsats i rapportserien tillbaka till ett tydligt matematiskt och tekniskt underlag.

Hydrostatik, deformation och kollisionssdynamik

R10 sammanställer följande centrala samband:

Arkimedes princip och stabilitetsmoment, Tryck och djup, Plastisk deformation i stål, Kombination av drag och buckling, Rörelseenergi vid kollision, Genomsnittlig stopphållfasthet.

Dessa samband används för att analysera skador (R1, R3, R6–R7), tidiga slagsideförlopp (R8) och dynamiken vid bottenträff (R9). R10 visar att alla ingående delmodeller följer samma konsekventa fysik. Ett typiskt exempel är Estonias styrbordsskada (R1–R3): ca 140–180 MJ krävs för 1 m plastisk intryckning i 25–30 mm stål. Detta härleds direkt ur de generella deformationsekvationerna i R10.

Tryck, vågkrafter och flödesdynamik

För analyserna av tidiga slagsidor (R8) används Dynamiskt tryck p , Resultterande kraft F och Våglast $p_{\max}$. Dessa samband visar varför små vattenmängder under bildäck kan påverka stabiliteten snabbt och varför JAIC:s modell med ”flytande överbyggnad” är fysikaliskt orimlig.

Osäkerhetsanalys och Monte Carlo

R10 beskriver projektets systematiska hantering av osäkerheter genom Monte Carlo-simuleringar. Varje parameter ges en sannolikhetsfördelning och modellen körs tusentals gånger (typiskt 20 000 iterationer). Resultaten redovisas med:

- percentiler (P5, P50, P95)
- känslighetskoefficienter (Pearson ρ)
- tornadodiagram

Metoden används främst i R3 och R7 för att visa robustheten i de beräknade energikraven och i bedömningen av bogvisirets omöjlighet att orsaka styrbordsskadan.

Reproducerbarhet och öppen data

En central poäng i R10 är att alla resultat i R1–R9 kan verifieras med vanliga hjälpmedel – Excel, kalkylator eller öppen kod. Monte-Carlo-data kan redovisas i CSV-format och publiceras öppet. Detta uppfyller BMTIG:s krav på spårbarhet och vetenskaplig granskning.

Kärnslutsatser

1. R10 visar att alla analyser i R1–R9 bygger på en konsekvent och fysisk grundmodell med energi- och kraftbalans som kärna.
 2. Deformationsekvationerna ger direkta, kvantitativa krav på energiupptag – vilket förklarar varför styrbordsskadan kräver ett separat högenergiskt förlopp.
 3. Kollisionssdynamik och stoppsträckeformler visar att bogvisirets energi är två storleksordningar för låg.
 4. Hydrodynamiska samband förklarar varför tidiga slagsidor inte kan skapa de dokumenterade skadorna och varför JAIC:s modell saknar mekanisk bas.
 5. Monte-Carlo-metodiken ger reproducerbara, statistiskt robusta resultat och visar att slutsatserna inte beror på snäva antaganden.
 6. R10 fungerar som ett metodologiskt referensverk som gör alla delar av utredningen verifierbara för framtida forskare och myndigheter.
- Sammanfattningsvis är Rapport 10 inte en analys av en enskild händelse, utan den tekniska ram som gör hela rapportserien vetenskapligt hållbar, transparent och reproducerbar.