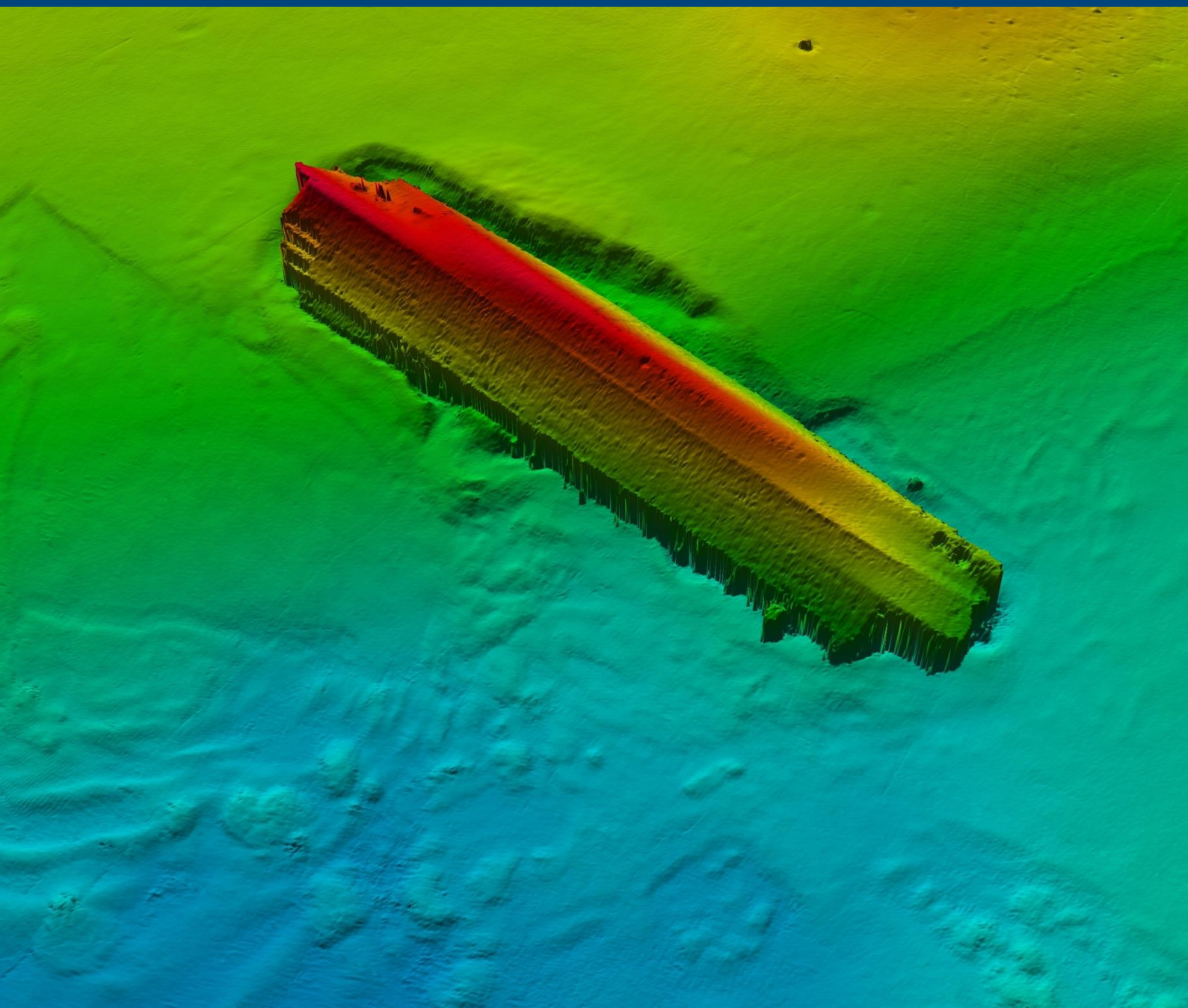


EL21-Estonia

Aruanne parvlaeva Estonia vraki asukoha uuringu kohta uurimislaeva Electra kasutades

Martin Jakobsson, Christian Stranne, Rickard Fornander, Matt O'Regan, Anton Wagner ja *EL21-Estonia* Shipboard Party

Stockholm 2021



Meddelanden
från
Stockholms universitets
institution för geologiska
vetenskaper

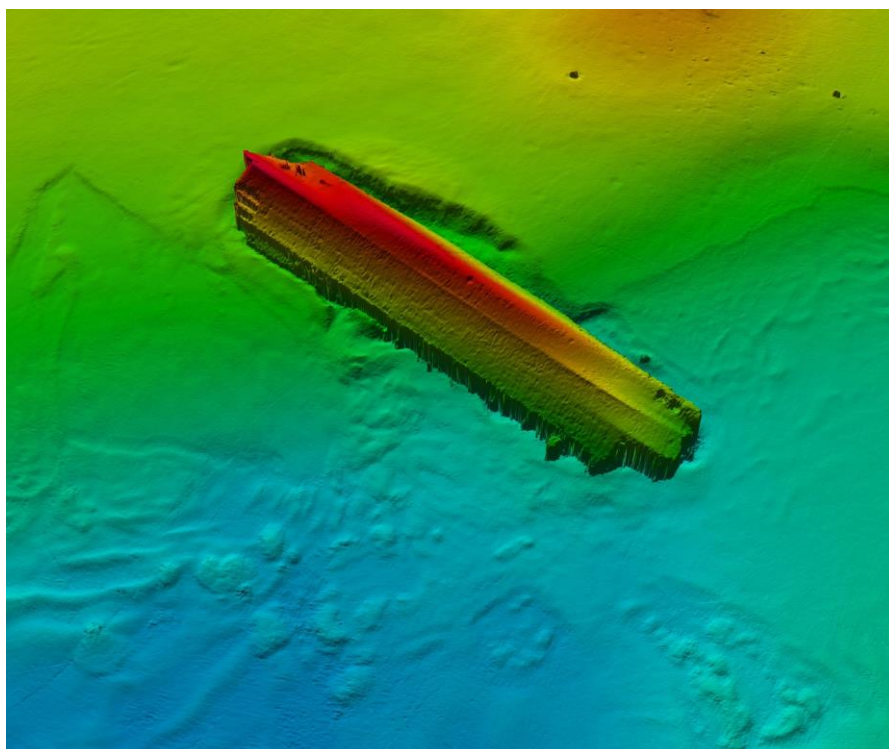
Nr 383

EL21-Estonia

Aruanne uurimislaevaga Electra läbi viidud parvlaeva Estonia vraki asukoha
uuringu kohta

8.–15. juuli 2021

Martin Jakobsson, Christian Stranne, Rickard Fornander, Matt O'Regan, Anton
Wagner ja *EL21-Estonia* Ship Board Party



Sisukord

Sissejuhatus	7
Taust	10
Ekspeditsioonis osalejad ja tegevuskava	11
EL21-Eesti uuringu planeerimine	12
Meetodid	15
Uurimislaev Electra: seadmete ülevaade	15
Merepõhja ja veesamba kaardistamine akustiliste meetoditega	16
Positsioon, kurss ja asend	16
Paljukiireline kajalood	16
Merepõhja profileerimine	18
Külgvaatesonar	18
Vahemise veekihi sonar	18
Akustiline Doppler-voolukiiruse profileerija (ADCP)	18
Vee omadused (helikiirus, temperatuur, soolsus)	18
Akustilise sünkroonimise seade	19
Setete proovivõtt, põhja analüüs ja ankurdamine	19
Kolbpuur / gravitatsiooniline pinnasepuur põhjaproovide võtmiseks	19
Haaratsiga proovivõtja	21
Jaamade nimetamine	21
Põhja filmimine	22
Ankurdatud ADCP	22
Järeltöötlus ja tõlgendamine	22
Paljukiireline batümeetria	22
Paljukiirelise kajaloodi tagasihajumine	24
Merepõhja profileerija	24
Pildindamine külgvaatesonariga	24
Setete paksuse mudel	25
Vahemise veekihi sonar	26
Akustiline Doppler-voolukiiruse profileerija (ADCP)	26
Juhtivus, temperatuur, sügavus (CTD)	26
Mitme anduriga puursüdamike logimine (MSCL)	26
Koonuspenetratsioon	28
Massikadu põletamisel (LOI)	28
Tera suurus	29
Ankurdatud ADCP	29
Tulemused ja tõlgendamine	30
Merepõhja ja veesamba kaardistamine akustiliste meetoditega	30
Paljukiireline batümeetria	30
Paljukiirelise kajaloodi tagasihajumine	38
Merepõhja profileerimine	42
Külgvaatesonar	48

Vahemise veekihi sonar	54
ADCP	55
Vee omadused (helikiirus, temperatuur, soolsus)	57
Setete proovivõtt, põhja analüüs ja ankurdamine	61
Põhjaproovivõtt kolbpuuriga	61
Haaratsiga proovivõtjaga võetud proovid	65
Põhjauuring	65
Ankurdatud ADCP	71
Parvlaeva <i>Estonia</i> mõõtmine	80
Mõõdetud kreenimine tasase põhja alusel	82
Mõõdetud kreenimine vasakpardal	83
Mõõdetud diferent	83
Setete paksuse koostamine	90
Sisestusandmed ja ebamäärasus	90
Setete jaotumine	91
Järeldused	93
Merepõhja geoloogia	93
Nähtavad aluspõhjakiivid ja setete paksus	93
Parvlaev <i>Estonia</i> kreenimine ja diferent	93
Okeanograafilised tingimused	93
Viited	95

(Eraldi PDF-failid)

Lisa 1: ekspeditsiooni igapäevased märkmed

Lisa 2: batümeetria lehviksonariga ja tagasihajumine Lisa 3: Lisa 3:

Merepõhja profileerimine

Lisa 4: Külgvaatesonar

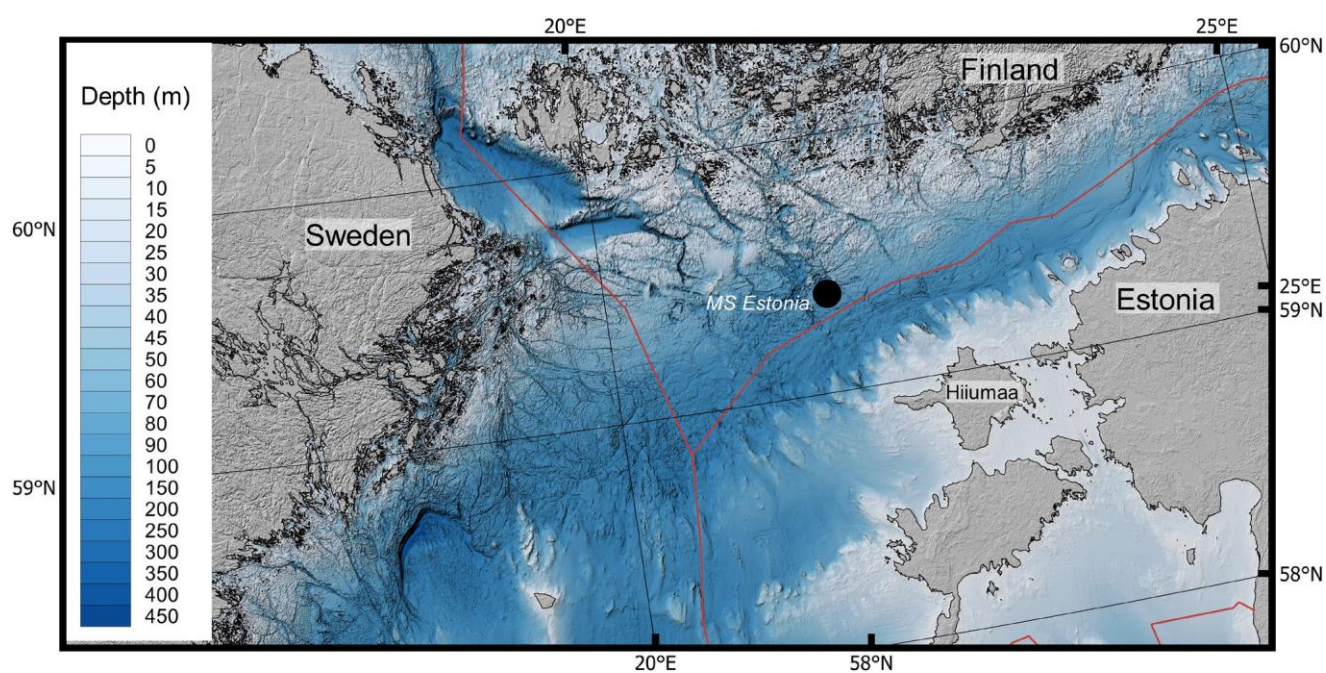
Lisa 5: vahemise veekihi sonar ja ADCP Lisa 6: CTD

Lisa 7: setete põhjaproovivõtt Lisa 8:

setete paksus

Tänuõnad

Täname uurimislaeva *Electra* ja EVA-316 kapteneid ja meeskondi suurepärase meeskonnatöö eest uuringute käigus ning Stockholmi ülikooli Läänemere Keskust projektile antud praktilise ja tõhusa haldusalase toe eest. Rootsi Õnnetusjuhtumite Uurimise Amet ja Eesti OhutusjuurdLuse Keskus pakkusid projekti jooksul olulisi taustateadmisi ja tagasisidet, mille eest oleme tänulikud. Täname Rootsi Geoloogiateenistust ja Rootsi Geotehnilist Instituuti kasulike teadmiste eest. Rootsi Veeteede Amet andis meile kiirelt külgvaatesonari pärast meie oma purunemist. Täname Alasdair Skeltoni nõuannete eest kivimipaljandi võimaliku koostise kohta. Täname ka Rootsi ja Eesti ellujäänuid, kes ootavad endiselt kannatlikult meie tulemuste ettekandeid, ehkki meie aruanne ei suuda anda täpseid vastuseid selle kohta, mis täpselt parvlaeva *Estonia* uppumisel juhtus ja miks.



Joonis 11. Läänemere keskosa batümeetiline kaart, mis viitab parvlaeva Estonia vraki asukohale. Batümeetria allikas on EMODnet (EMODnet Bathymetry Consortium, 2018).

Sissejuhatus

Parvlaev Estonia uppus 28. septembril 1994 halbades ilmastikutingimustes Läänemerel umbes 53 km Hiiumaast loodes (joonis 11). Stockholmi Ülikool uuris 8.–15. juulil 2021 parvlaev Estonia vraki hukupaika uurimislaevaga Electra (fotod I1 ja I2). Uuringu tellisid Eesti Ohutusjuurdلuse Keskus (OJK) ja Rootsi Õnnetusjuhtumite Uurimise Amet (SHK). Uuringu ülesannete hulka kuulusid parvlaeva Estonia praeguse asukoha kaardistamine merepõhjas, samuti vraki asukoha merepõhja topograafia (batümeetria) ja geoloogia, et luua alusandmestik õnnetuse edasiseks hindamiseks ning täiendavate uuringute (sealhulgas fotogrammeetria) ettevalmistamiseks.

Ekspeditsiooni planeerimine, sealhulgas konkreetset tüüpi uuringute kindlaksmääramine, toimus 2021. aasta kevadel korraldatud kohtumiste käigus. Kohtumisi juhatas OJK ning neist võtsid osa asjaomaste Eesti, Soome ja Rootsi valitsusasutuste ja teadusasutuste esindajad.

Käesolevas aruandes kirjeldatakse EL21-Estonia ekspeditsiooni käigus kasutatud akustilisi kaardistamis- ja proovivõtumeetodeid ning esitatakse tulemused kaartide, graafikute ja arvutiga koostatud 3D visuaalsete kujutistena. Kõiki töötlemata andmeid jagati uuringu käigus pidevalt SHK ja OJK-ga. Töödeldud andmete näiteid kuvatakse ja kirjeldatakse aruande jaotises „Tulemused ja tõlgendamine“ ning lisades on esitatud suurema eraldusvõimega kaardid ja tabelid. Aruandes sisalduvad saadud andmetel põhinevad geoloogilised tõlgendused. Geoloogiliste tõlgenduste toetamiseks on lisatud mõned pildid, mis on saadud Eesti sukeldusfirma Tuukritööde OÜ allveerobotiga tehtud parvlaeva Estonia kere videotest. Allveeroboti tulemused on esitatud eraldi aruandes, mille koostas Tuukritööde OÜ (2021).

Kokkuvõtvalt uuriti parvlaeva Estonia vraki ümber umbes 2500×1800 m suurust maa-ala, kasutades mitmekiirelist batümeetrilist kajaloodi, merepõhja profileerijat, vahemise veekihi jaotatud kiirtega kajaloodi ning pukseeritavat külgvaatesonarit. Lisaks teostas Eesti Geoloogiateenistus uurimislaeva Electra pukseeritava *boomer*-süsteemi abil seisimilise reflekttsiooni profiilid. 6 m pikkuse kolbpuuriga võeti kolm settepuursüdamikku ja merepõhja koppeliproovli abil võeti põhja pinnaproovid. Jaamades määrati CTD (juhtivus, temperatuur, sügavus) instrumendiga soolasisaldus, vee temperatuur ja hapniku kontsentratsiooniprofiilid. Uurimislaevale Electra paigaldatud akustilise Doppler-voolukiiruse profileerijaga (ADCP, *Acoustic Doppler Current Profiler*) tehtud jooksvaid mõõtmisi viidi läbi piki vahemise veekihi kajaloodi vaatlusliine. Täiendava info saamiseks paigaldati ADCP uuringu ajaks ka merepõhjale umbes 300 m laevavrakist kirdesse.

Uurimislaeva Electra toetas Eesti jäämurdja EVA-316, millelt tehti parvlaevast Estonia suure eraldusvõimega akustilisi kujutisi, kasutades Mesotechi skannimissonarit, mis paigutati kindlatesse kohtadesse merepõhjal ja laevavrakil. Skannimissonari tulemused on esitatud eraldi Abbotti aruandes (2021). Igapäevased ekspeditsiooni märkmed on esitatud lisas 1.



Foto 11. Aerofoto parvlaeva Estonia vraki uurimises osalenud kolmest laevast. Üleval: Subsurveyor VLT089, mida kasutatakse ROV (allveeroboti) kasutamiseks; keskel: 58 m pikkune Eesti jäälõhkuja EVA-316, mida kasutati varustuslaevana ja mida Abbott Acoustics kasutas platvormina parvlaeva Estonia akustiliseks pildinduseks skannimissonari abil; all: Stockholmi ülikooli 24 m pikkune uurimislav Electra, mis tegeles geofüüsikalise kaardistamise, geoloogilise põhjaproovivõtu ja okeanograafilise tööga. Foto: Madis Veltman, Postimees



Foto 12. Stockholmi Ülikooli uurimislaev Electra. Foto: OJK avalik arhiiv



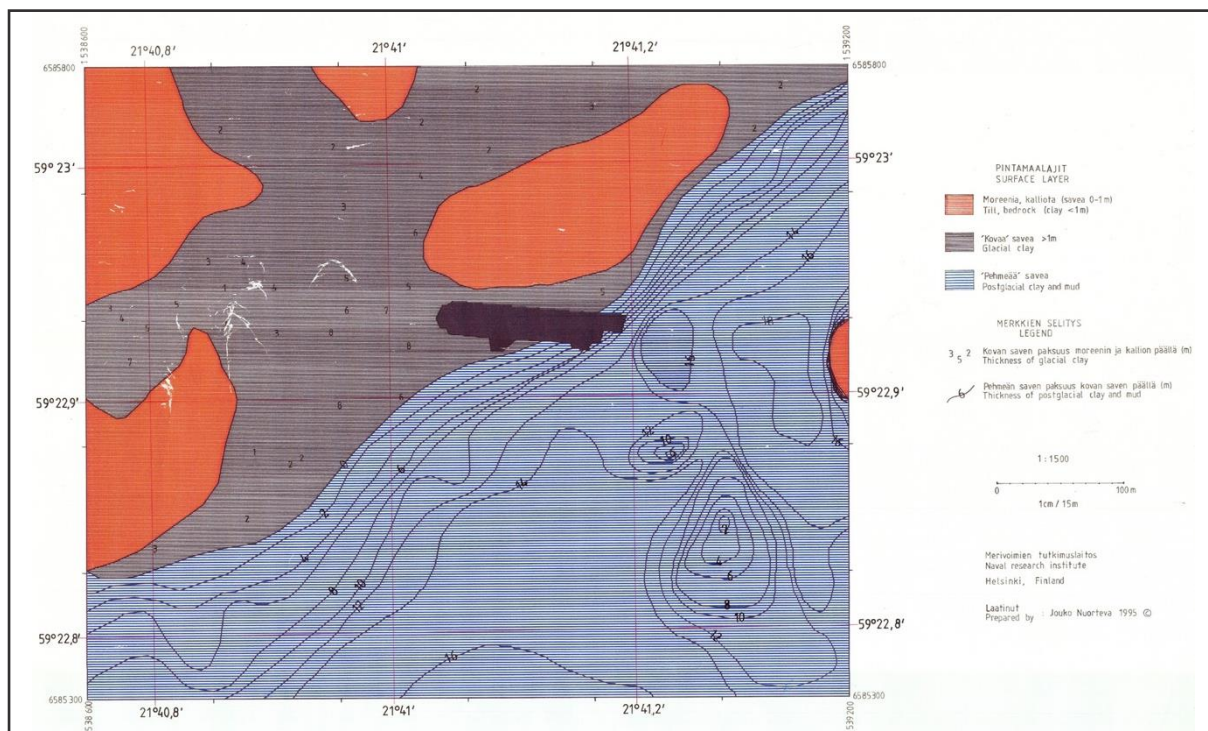
Foto 13. Eesti jäämurdja EVA-316. Foto: Martin Jakobsson

Taust

Esitame väga lühikese kokkuvõtte varasematest parvlaeva Estonia läheduses tehtud merepõhja geoloogia uuringutest. Eesmärk on anda üldine ülevaade teabest, mis oli kättesaadav enne meie uuringuid, ning seega jäeti paljud üksikasjad kõrvale. Parvlaeva Estonia vrakk paikneb kaldus merepõhjal umbes 75 kuni 85 m sügavusel Soome majandusvööndis (joonis 11). Pärast 1994. aasta 28. septembri traagilist õnnetust tellis Rootsi Mereteede Amet ettevõtetelt Rockwater A/S, Stavanger ja Smit Tak Rotterdam esialgse uuringu eesmärgiga saada lisateavet, mis aitaks langetada edasisi otsuseid, mh selle osas, kas vrakk tuleks päästa või asukohas kinni katta. Esimesed uuringud viidi läbi 1.–4. detsembril ning need hõlmasid vraki ülevaatust sukeldujate ja allveerobotiga ning mõningaid esialgseid geoloogilisi uuringuid 4 km² suurusel alal parvlaeva Estonia ümbruses (Rockwater A/S ja Smit Tak, 1994). Rockwater A/S viis läbi täiendava uuringu 1995. aasta mais, mis hõlmas vraki asukohas tehtud merepõhja geotehnilisi uuringuid. Otsustati parvlaev Estonia asukohas kinni katta, mitte vrakki päästa. Rudebeck ja Kennedy (2021) on avaldanud kokkuvõtte vraki asukoha varasematest uuringutest saadud geotehnilise teabe kohta.

Rockwater A/S koostas esialgsete kajaloodiga tehtud uuringute põhjal 500 × 500 m ala kohta detailse batümeetrilise kontuurikaardi, mille keskmes on vrakk. Nende kajaloodi uuringuliinid viidi lõpule väiksemate vahedega 150 × 200 m suurusel sisemises ruudus. Rockwater A/S uurimine hõlmas setete pinnaproovide võttu, põhjaproovivõttu ja koonuspenetratsiooni testi abil sondeerimist poorides veesurve mõõtmisega (cPTU). Nad kaardistasid parvlaevast Estonia lõunasse jääval alal pehmet savi, kus setted olid osaliselt merepõhja kajaloodi profiilides lünki põhjustanud. CPTu sondeerimine vraki ümbruses paljastas merepõhjas 20 m sügavusel tihke liiva ja kruusa, välja arvatud kagus asuvas alas, kus sondeerimine katkestati enne kõvemate substraatideni jõudmist. Parvlaevast Estonia põhjas jõuti tihkema geoloogilise kihini madalamal merepõhja sügavusel (umbes 2,5 m). Helsingis asuv mereuuringute instituut koostas 1995. aastal 1:5000 skaalaga geoloogilise kaardi, millel on esitatud ka tõlgendatud setete paksus (joonis 12) (Nuorteva, 1995). Kaardilt nähtub, et parvlaeva Estonia vrakk asub liustikujärgse ja liustikulise savi piiril. Liustikujärgne savi on tavaliselt väga pehme ja hilisemalt ladustunud savil on suur orgaaniline sisaldus, mis viitab biogeensele gaasi tootmisele, sobides hästi olemasolevate kirjeldustega. Geoloogiline kaart kujutab alasid, kus merepõhjal on moreen ja aluspõhjakiivid, sealhulgas vrakist otse põhja pool (joonis 12). Lisaks avaldas Helsingis asuv mereuuringute instituut 1995. aastal 1:10000 skaalaga kaardi, mis hõlmab vraki ümbruses suuremat ala.

Parvlaeva Estonia puudutava tööga alustati 1996. aasta märtsis, kui merepõhjale paigaldati mööda nõore rasket kivimaterjali, mis järgis sügavuse kontuure, ning parvlaevast Estonia lõuna poole asetati geotekstiile. Nn sundlābistusnõõride eesmärk oli stabiliseerida vrakist lõunas kaardistatud pehmet savi, lābistades kihti, kuni jõuti stabiilsemate geoloogiliste kihtideni. Ka geotekstiilide eesmärk oli merepõhja stabiliseerida. 1996. aasta juunis valati seejärel stabiliseeritud alale liiv. Selle töö jooksul tuvastati 21. juulil 1996 merepõhja igapäevaste kajaloodiga uurimiste käigus merepõhja deformatsioonid. Selgus, et pehmes savis olid toimunud merealused lihked. Pärast katseid merepõhja materjali lisamisega täiendavalt stabiliseerida katkestati parvlaeva Estonia katmine 1996. aasta juuli lõpus. Madalmaade rakendusliku geoteaduse instituut TNO viis 1997. aastal läbi seismilise refleksiooni mõõdistamise eesmärgiga saada merepõhja geoloogia kohta lisateavet, et jätkata parvlaeva Estonia katmisega (Mesdag, 1997).



Joonis I2. Geoloogiakaart, mille koostas 1995. aastal Helsingi mereuuringute instituut.

Ekspeditsioonis osalejad ja tegevuskava

Uurimislaeva Electra pardal olnud EL21-Estonia ekspeditsiooni meeskond on loetletud tabelis I1, nagu ka kaldal olnud töötajad, kes tegelesid andmete järeltöötlemisega. Pardal töötati 24 tundi ööpäevas, mis viitab vahetustega tööle. Kogu ekspeditsiooni vältel koosnes teaduslik personal neljast isikust. Nemad käitsid 12-tunnistes vahetustes kõiki uuringuseadmeid, samal ajal kui meeskond töötas 6-tunnise vahiteenistuse graafiku alusel.

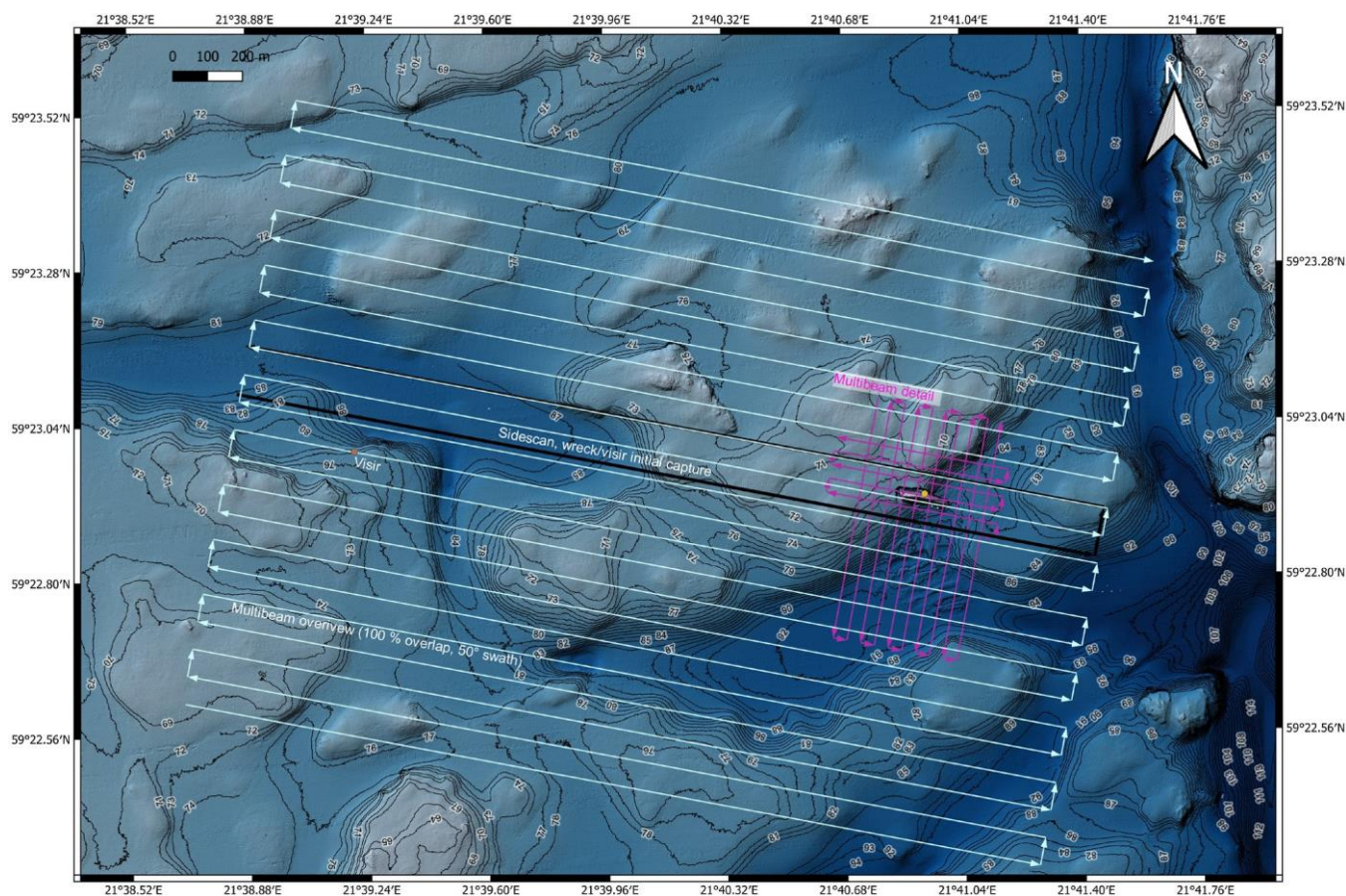
Tabel I1. EL21-Estonia ekspeditsioonis osalenud.

Nimi	Peamine roll	Organisatsioon
Teaduslik meeskond		
Björn Eriksson	Uuringutehnik (teadustöötajad)	Stockholmi ülikooli geoloogiateaduste osakond
Rickard Fornander	Uuringutehnik (teadustöötajad)	Ricfor AB
Martin Jakobsson	Juhtiv teadlane	Stockholmi ülikooli geoloogiateaduste osakond
Christian Stranne	Teadlane	Stockholmi ülikooli geoloogiateaduste osakond
Sten Suuroja	Teadlane (käitis boomer-süsteemi ühe päeva jooksul)	Eesti Geoloogiateenistus
Meeskond		
Albin Knochenhauer	Kipper	Rootsi Veeteede Amet
Eva Lindell	Tehnik	Läänemere keskus, Stockholmi ülikool
Mattias Murphy	Kapten/tehnik	Läänemere keskus, Stockholmi ülikool
Thomas Strömsnäs	Kapten	Läänemere keskus, Stockholmi ülikool
Carl-Magnus Wiltén	Kapten/tehnik	Läänemere keskus, Stockholmi ülikool
Kaldameeskond		
Matt O'Regan	Teadlane	Stockholmi ülikooli geoloogiateaduste osakond
Anton Wagner	Tehnik	Stockholmi ülikooli geoloogiateaduste osakond

EL21-Estonia uuringu planeerimine

Ekspeditsiooni planeerimisel tuli eraldada aega kõigile erinevatele geoloogilise uuringu meetoditele ja geoloogilisele põhjaproovivõtule, võttes arvesse erinevaid parameetreid. Näiteks optimaalne laeva kiirus, leides kompromissi andmete resolutsiooni ja uuringu aja vahel, iga kohaldatava kaardistamismeetodi andmete katvus ning asjaolu, et mõnede sonarisüsteemide paralleelseks kasutamiseks on vaja kajaloodide ajad sünkroonida, mis vähendab nende pingide kiirust ja seega resolutsiooni raja pikisuunal. Seetõttu otsustati kasutada paljukiirelist kajaloodi, merepõhja profileerijat ja vahemise veeikihi kajaloodi eraldi, kuna need häirivad üksteist akustiliselt, kui nende aega ei sünkroonita. Nii saavutati suurim võimalik resolutsioon.

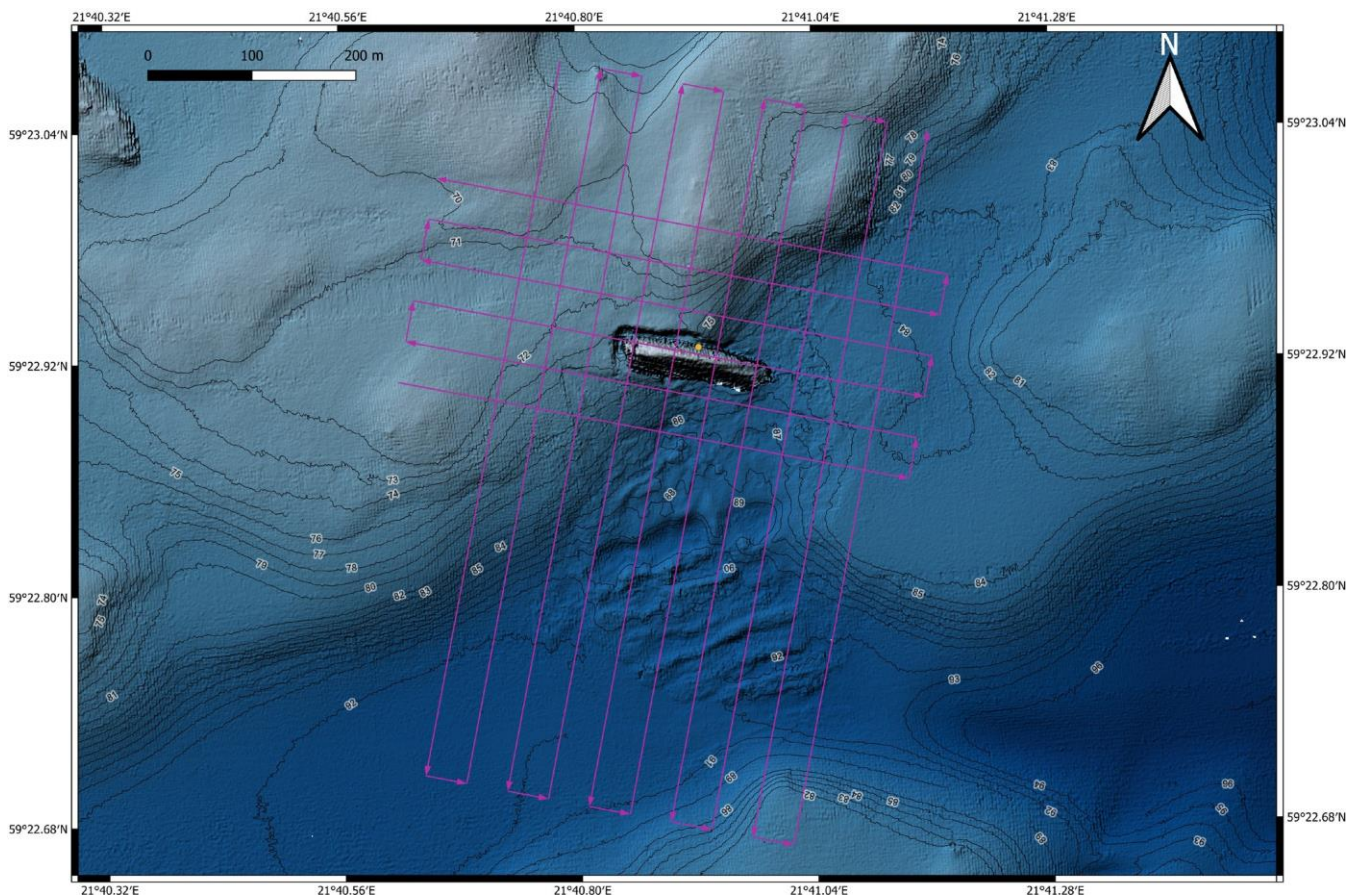
Esimene ülevaateuuring paljukiirelise kajaloodiga planeeriti 100% kattuvate loogudega ja $50^\circ \times 50^\circ$ loogu nurgaga (joonis I3). Järgnevalt meetodite all kirjeldatud EM2040 paljukiirelise kajaloodi võimekus on $70^\circ \times 70^\circ$. Loogu laiuse vähendamisel $50^\circ \times 50^\circ$ suureneb saavutatud batümeetria resolutsioon raja põikisuunal.



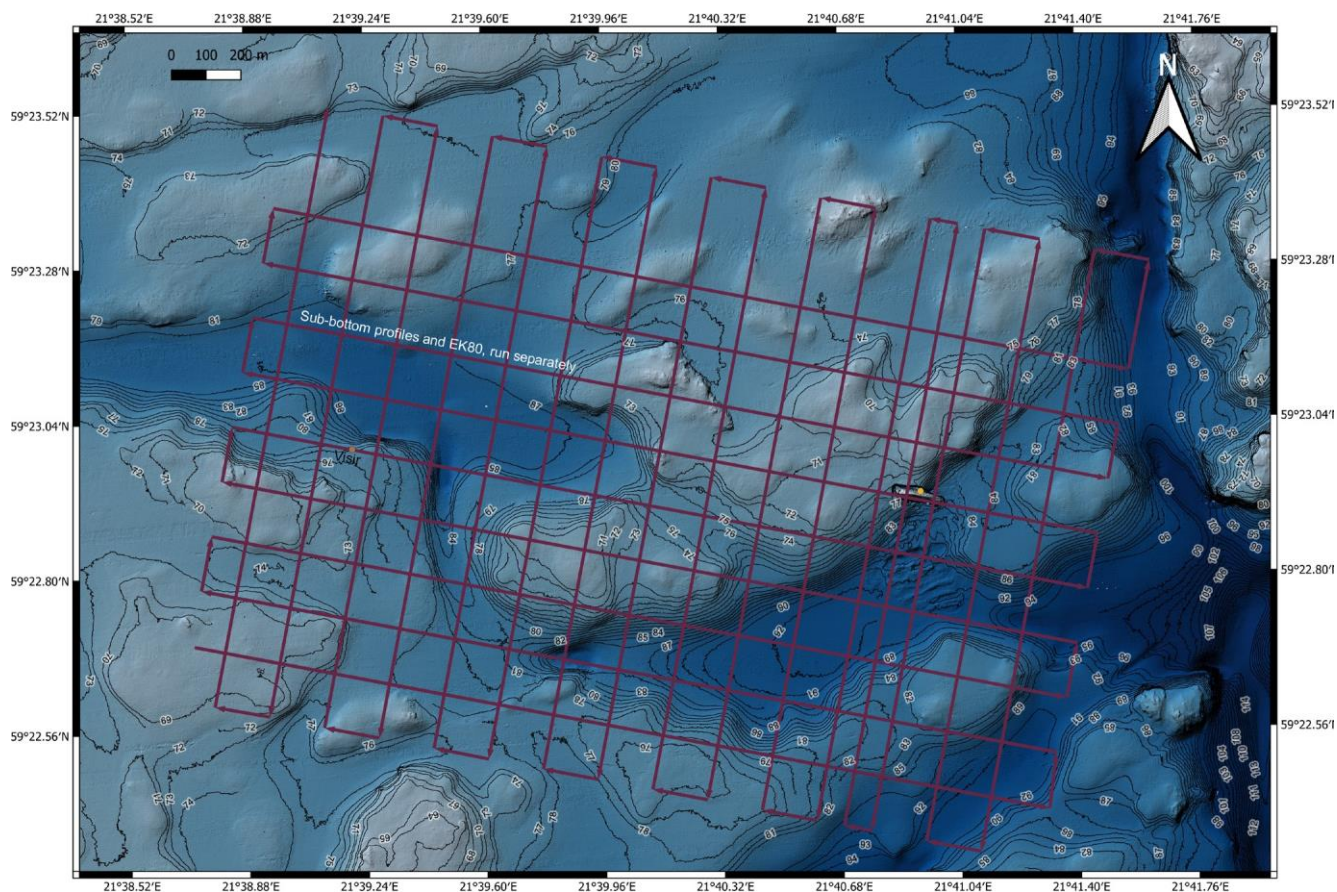
Joonis I3. Planeeritud paljukiirelise kajaloodiga tehtud ülevaatlilikud (helesinised jooned) ja üksikasjalikud (lillad) uuringud. Parvlaeva Estonia asukohale viitab kollane täpp ning see on ka nähtav 2006. aastal Soome paljukiirelise kajaloodiga koostatud batümeetrial, mille koostas Soome transpordi- ja kommunikatsiooniamet kavandamise eesmärgil. Kaks kavandatud külgaatesonari uuringuliini on näidatud musta värviga. Neid kahte liini peeti absoluutselt minimaalseks, et katta vrakki ja kohta, kust leiti võõrvisiir. Teist külgaatesonari liini on keeruline näha, kuna see jääb paljukiirelise kajaloodi raja taha.

Uuringule kulub aga rohkem aega, kuna selle jaoks on vaja, et lähimad uuringuliinid kataksid looge 100%, mis tähendab, et paljukiirelise kajaloodiga kaardistatakse merepõhja kaks korda. Valitud parameetrite tulemus oli umbes 80 m uuringuliinide vahel, võttes arvesse uuringuala veesügavust, mis saadi Soome transpordi- ja kommunikatsiooniameti (TRAFICOM) paljukiirelise kajaloodiga 2006. aastal tehtud uuringust (joonis 13). Meie esimese paljukiirelise kajaloodiga tehtud ülevaateuuringu eesmärk oli koostada alast uus ajakohane batümeetiline kaart, mis võimaldaks asetada kõik teised kogutavad andmed kõrge resolutsiooniga ruumilisse konteksti. Lisaks oli plaan koguda batümeetria abil teavet tagasihajumise kohta. Tagasihajumisega mõõdetakse merepõhjast vastu kajava akustilise signaali hulka ning see annab geoloogilist teavet põhja tüübi kohta. Lisaks kavandati vrakile keskenduvat üksikasjalikku paljukiirelise kajaloodiga tehtavat uuringut, millel on suurem loogude kattuvuse aste ja veel kitsam loog, et saavutada maksimaalset resolutsiooni (joonised 13 ja 14).

Merepõhja profiile kavandati piki iga teist paljukiirelise kajaloodi uuringuliini, st 160 m liinide vahega. Lisaks sellele sisaldas uuringukava sama suure vahega (160 m) põikiliine (joonis 15). Tänu piisavale hulgale ristuvatele profiilidele hõlbustab merepõhja profiilide tavaruudustik merepõhja geoloogia tõlgendamist. Piki merepõhja profiiliuuringu liine plaaniti hankida vahemise veekihi jaotatud kiirtega sonariprofiilid koos ADCP andmetega, kuid teisel ajal. Tabelis I2 on toodud kõik kavandatud uuringud ja nende eeldatav aeg.



Joonis 14. Kavandatud üksikasjalik paljukiirelise kajaloodiga tehtav uuring.



Joonis 15. Kavandatud merepõhja profiilid. Piki samu uuringuliine kavatseti kasutada vahemise veekihi jaotatud kiirtega sonarit koos ADCPga.

Tabel 12. Ülevaade kavandatud tegevusest ja umbkaudne ajajaotus, millesse on arvestatud piisav paindlikkus halvast ilmast põhjustatud tegevuse peatusteks. Üks päev võrdub 24 tunniga.

Tegevus	Päev
Ülevaatliskalvikiirelise kajaloodi uuring, 100% kattuvus, loogu nurk ($2 \times 50^\circ$)	1. päev
Üksikasjalik kalvikiirelise kajaloodi uuring	1. päev
6 CTDD uuringualas, 3 alguses ja 3 lõpus	1. päev
Merepõhja profileerimine, iga teine kalvikiirelise kajaloodi liin + põikiliinid (liinide vahe 160 m)	2. päev
Vahemise veekihi profileerimine (EK80), vrakki ümbritsevale alale keskendunud ruudustik. ADCP (600 kHz) käivitatakse samaaegselt	2. päev
CTD profiil, jaamadega ruudustik	2. päev
Külgvaatesonari uuring, min 2 vraki asukoha läbimist (nurga optimeerimiseks on tõenäoliselt vaja veel mitut)	3. päev
Külgvaatesonari uuring, katta kogu kalvikiirelise kajaloodi ala 50% kattuvusega, vahekaugus 133 m, 50% kattuvus	3. päev
Põhja skaneerimine, M3 langetatud raamidelt (laevalt EVA-316)	4. päev
Põhja skaneerimine, M3 langetatud raamidelt (laevalt EVA-316)	5. päev
Põhja skaneerimine, M3 langetatud raamidelt (laevalt EVA-316)	6. päev
Põhjaproovivõtt	7. päev
Põhjaproovivõtt	8. päev

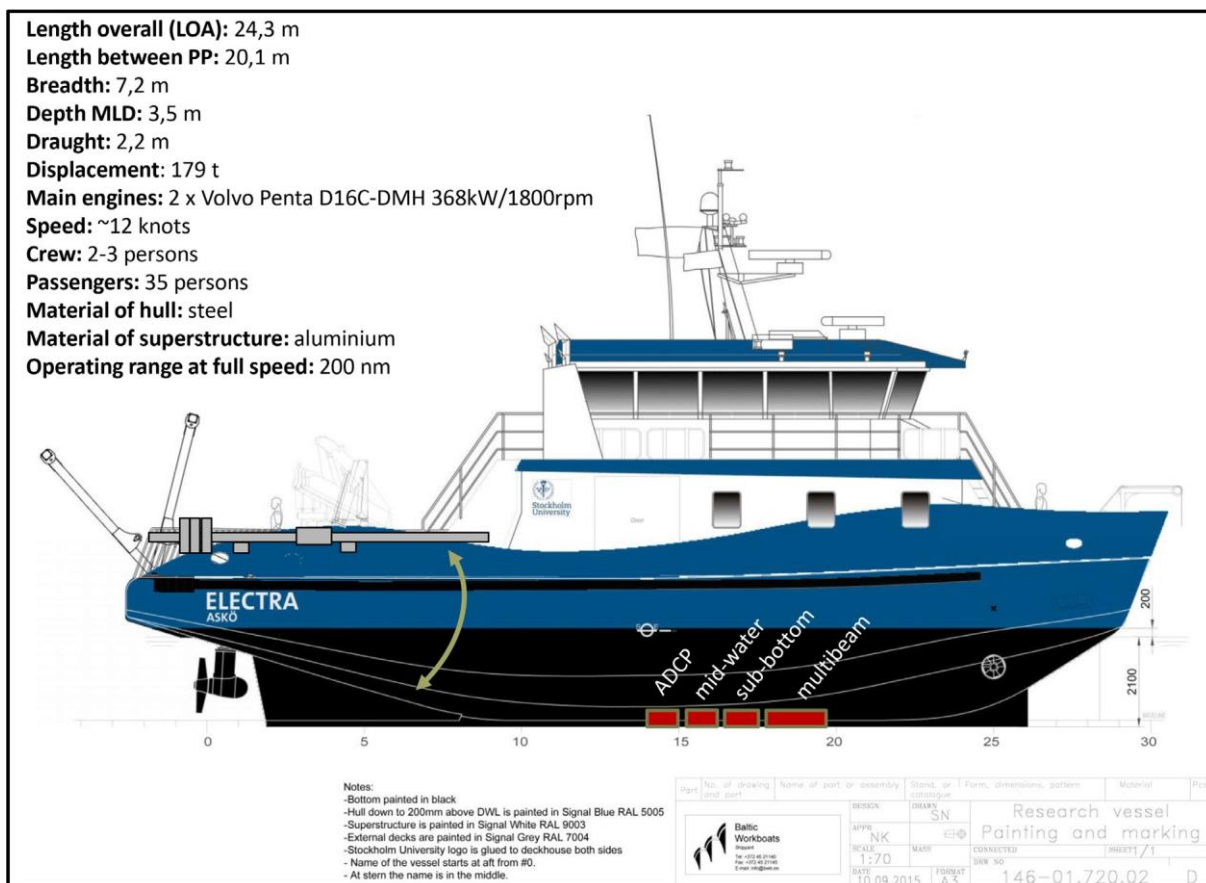
Meetodid

Kõik aruande meetodite ning tulemuste ja tõlgenduste jaotises sisalduvad kaardid on Mercatori universaalse põikprojektsiooni tsoonis 34. Valimi asukohtade ja vaatluste geograafilised koordinaadid on viitega rahvusvahelise geodeetiliste koordinaatide süsteemile 84.

Uurimislaev Electra seadmete ülevaade

Uurimislaeva Electra kerele on alaliselt paigaldatud paljukiireline kajalood, merepõhja profileerija, vahemise veekihi sonar ja ADCP. Nende süsteemide edastavad ja vastuvõtavad akustiliste muundurite read on paigaldatud selleks otstarbeks ettenähtud kiilile (joonis M1). Akustiliste kaardistamissüsteemide toimingud tehakse spetsiaalsest juhtimisruumist (foto M1).

24,3 m pikkusel ja 7,2 m laiusel laeval on 31 m² suurune labor. Selle labori ahtris on spetsiaalne ala, kust saab käivitada CTD ja muud seadmed laeva küljel oleva ava kaudu. Põhjaproove ja muid proove võetakse peamiselt ahtri tekilt, kasutades spetsiaalseid vintse ja põhjaproovivõtu veeskamisseadmeid. Uurimislaeval on dünaamiline positsioneerimine, mis võimaldab asukohta säilitada. Tabelis M1 on esitatud kokkuvõtte paigaldatud akustilise kaardistamise seadmetest, liikumisandurist/navigatsioonisüsteemist ja geoloogiliste proovide võtmise seadmetest, mida kasutatakse ekspeditsiooni EL21-Estonia käigus. Tabelis M1 loetletud üksikuid süsteeme kirjeldatakse täpsemalt allpool.



Joonis M1. Uurimislaeva Electra tehniline kirjeldus. Selleks otstarbeks kujundatud kiilile paigaldatud muundureid kujutatakse punaste kastidena, mis pole esitatud õiges mastaabis, kuid need paigaldatakse suhtes üksteisega, nagu joonisel näidatud.

Tabel M1. Uurimislaeva Electra akustilise kaardistamise seadmete ja liikumisanduri/navigatsioonisüsteemi tehnilised kirjeldused ning muud ekspeditsiooni EL21-Estonia käigus kasutatud seadmed.

Paljukiireline kajalood: Kongsberg EM2040, 0,4° × 0,7°, 200–400 kHz (max sügavus 600 m)
RTK GPS: Kongsberg/Seatech Seapath 330+ (positsiooni täpsus xy ±1 cm + 1 ppm RMS, z ±2 cm + 1 ppm RMS, kursi täpsus 0,05°)
Liikumisandur: Kongsberg/Seadex MRU5+ (laine/samm/pööre)
Merepõhja profileerija: Kongsberg Topas PS40, 24ch, parameetriline (35–45 kHz / 1–10 kHz)
Vahemise veekihi jaotatud kiirtega sonar: Kongsberg EK80, 70 kHz / 200 kHz
Külgvaatesonar: Klein 5000 V2, 455 kHz
Akustiline Doppler-voolukiiruse profileerija (ADCP): Teledyne Workhorse Mariner, 600 kHz
SVP (heli kiirus/rõhk): Valeport (paigaldatud kerele)
SVP (heli levimiskiiruse andur): Valeport MiniSVS
CTD: Seabird 911+, sealhulgas juhtivus, temperatuur, rõhk, lahustunud hapnik, hägusus, fluorestsents (klorofüll A) ja PAR-andurid
GoPro kaamera, mis on paigaldatud CTD-le ja veekindlale korpusele, kahe eraldi valgusallikaga.
Kolbpuur põhjaproovide võtmiseks, 6 m pikk lastitud 473 kg tinaraskusega
Haaratsiga proovivõtja

Merepõhja ja veesamba kaardistamine akustiliste meetoditega

Positsioon, kurss ja asend

Kõik kaardistamise süsteemid saavad asendi, kursi ja positsioonid süsteemilt Kongsberg Seapath 330+, sealhulgas MRU5+ liikumise ja võrdlusseadmelt ning kahelt uurimislaeva Electra masti paigaldatud GPS/GLONASS antennilt. Süsteem on kaheageduslik (L1/L2 riba) ja võimeline kasutama RTK korrektsioone, mis on saadud Interneti kaudu ekspeditsiooni käigus, kasutades avatud lähtekoodiga tarkvara Lefebure NTRIP Client (<http://lefebure.com/software/ntripclient>). Korrektsioone saadi algselt Eesti teenuseosutajalt, kuid hiljem hakati neid hankima Soome riiklikult maamõõduametilt, kuna see pakkus meie uuringukoha jaoks stabiilsemat lahendust. Korrektsioonid saadi RTCM 3 protokolliga kaudu. Püsivate korrektsioonide saamisel teatas Seapath 330+ süsteem üldiselt täpsustest sentimeetri vahemikus. RTCMi andmed salvestati täiendava järeltöötuse jaoks.

Paljukiireline kajalood

Uurimislaeval Electra on kerele paigaldatud Kongsberg EM2040 0,4° 0,7°, 200–400 kHz, paljukiireline kajalood. Edastuse muunduri rea suurus on (P × L) 727 × 142 mm ning see on paigaldatud laeva suhtes pikisuunas, samas kui vastuvõtu muunduri rida on 407 × 142 mm ja see on paigaldatud laeva suhtes põikisuunas. Selle tulemusel on edastava ja vastuvõtva kiire laiused vastavalt 0,4° ja 0,7°. Maksimaalne kasutatav loogu laius üle raja on 70° × 70°, mis tähendab, et paljukiireline kajalood suudab tekitada loogu, mis ulatub mõlemal poolel nadiirist 70° kaugusele. Paljukiirelist kajaloodi kasutatakse Kongsbergi Seafloori operatsioonisüsteemi (SIS) versiooniga 4.3.2 (väljalase 31, DBVersion 30.0). Ekspeditsiooni käigus saadi nii batümeetria kui veesamba andmed. Suurema ala ülevaateuuring viidi läbi plaanipäraselt, kasutades 400 kHz režiimis 50° × 50° loogu laiust. Vrahi üksikasjalike uuringute jaoks varieeriti loogude laiust, et tekitada maksimaalset kaja kõigis kere osades: enamiku vrahi osade jaoks kasutati kitsast 25° × 25° loogu laiust, samas kui mõnedel liinidel avati loogud maksimumini 70° × 70°, et jõuda merepõhjas kaldpinnal toetuvate vrahi osadeni. Paljukiireline süsteem seati vrahi uuringu jaoks suure tihedusega võrdnurksesse režiimi ja ülevaateuuringu jaoks suure tihedusega võrdkauguse režiimi.

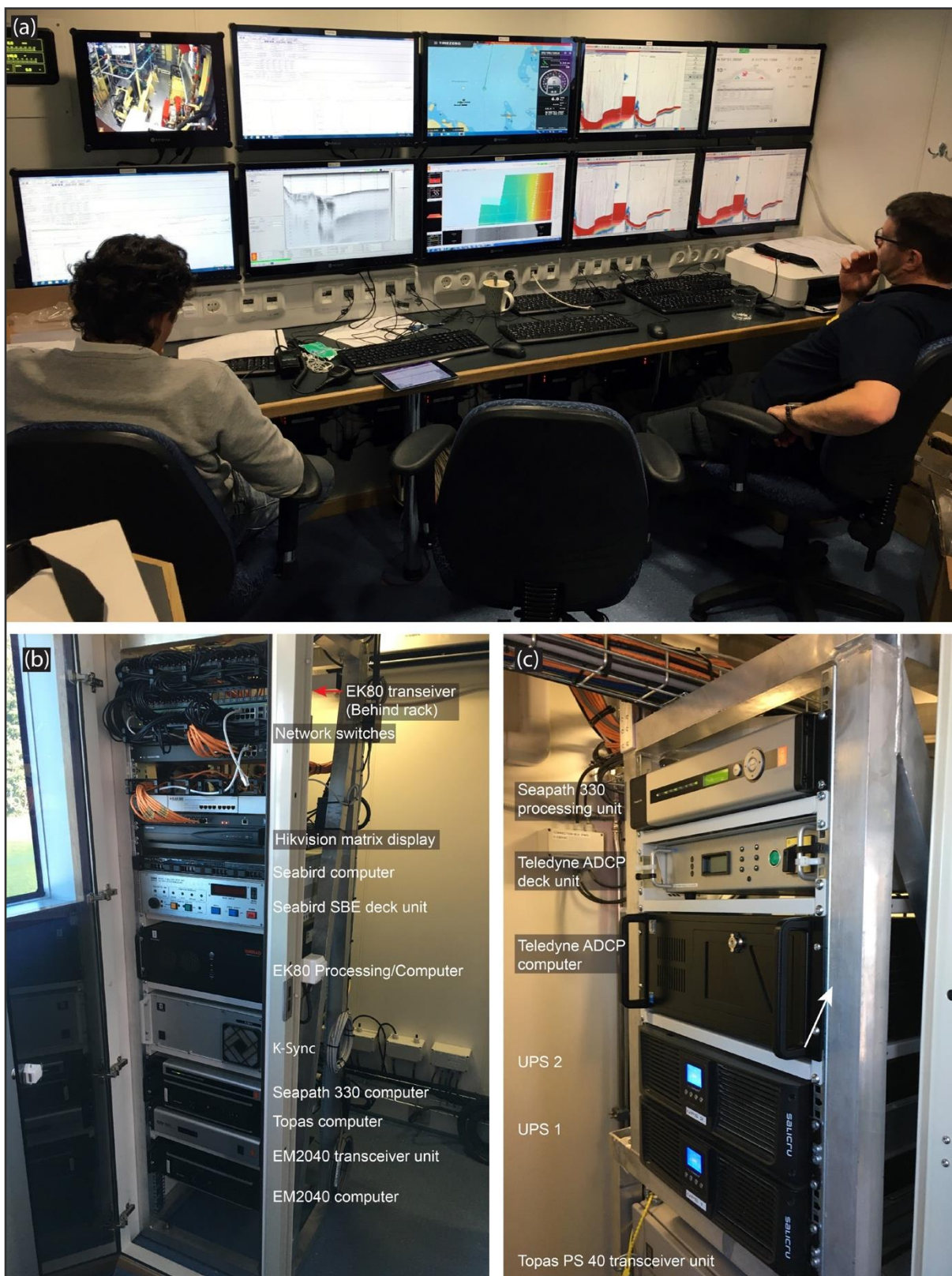


Foto M1. Uurimislaeva Electra uuringuruum, kust juhitakse kõiki akustilisi kaardistamissüsteeme. (a) Arvutiekraanid on paigaldatud juhtruumi ahtris seinale ja ühendatud maatriksi kuvamise süsteemiga, mis võimaldab lülitada kõigi sonareid juhtivate arvutiite, Seapathi navigatsiooni/asendi süsteemi ja CTD vahel. Maatriksi kuvamise süsteem on laiendatud ka sillale, võimaldades sillal sonarisüsteeme juhtida ja kuvada. (b, c) Kõik sonarsüsteemidesse, Seapathi navigatsioonisüsteemidesse ja CTDsse kuuluvad seadmed on paigaldatud spetsiaalselt disainitud riiulitele, mis paiknevad uuringuruumi jahutatud suletud osas. (Fotod: Martin Jakobsson, taaskasutatud varasematest uurimislaeva Electra reisiaruannetest).

Merepõhja profileerimine

Uurimislaevale Electra on paigaldatud Kongsberg Topas PS40 24 kanaliga merepõhja profileerija. Edastus- ja vastuvõtumuundurid asuvad paljukiirelisest kajaloodist ahtri suunas. Edastusmuunduri mõõtmed on ($P \times L$) 830×540 mm ja vastuvõtumuunduril 340×180 mm. Topas PS40 on parameetiline kajalood, mis tekitab madala sagedusega (sekundaarseid) akustilisi impulsse vahemikus 1–10 kHz kahe kõrgsagedusliku (primaarse) impulsi mittelineaarsel koostoimel vahemikus 35–45 kHz. PS40 on võimeline tekitama 6 kHz impulsi jaoks > 204 dB tasemega allika. Pehmete setete korral võidakse merepõhja läbistada üle 50 m. EL21-Estonia ekspeditsiooni ajal kasutati 4–10 kHz 1 ms pikkust tirelimpulsijada. Süsteem seati maksimaalsele pingikiirusele.

Külgvaatesonar

Vahetult enne EL21-Estonia ekspeditsiooni andis Rootsi mereteede amet ekspeditsioonile 455 kHz töösagedusega seadme Klein 5000 V2, kuna ekspeditsioonielsete seadmete katsete käigus ilmnisid Stockholmi ülikooli seadmel Klein 3000 tehnilised probleemid. Seadmel 5000 V2 on looguga sonari variant, mida kasutuseks antud järelveetaval sonarialusel ei kasutatud.

Uurimislaeval Electra ei ole sonari vintsi, mille seadistusega saaks seadet Klein 5000 V2 kasutada. Sel põhjusel pidime vedama 70 kg ja 194 cm pikkuseid järelveetavaid sonarialuseid peamise põhjaproovivõtu vintsi ja eraldi sonarikaabliga (fotod M6).

Vahemise veekihi sonar

Uurimislaevale Electra on paigaldatud Simrad EK80 lairiba-sonarsüsteem. Kahe jaotatud kiirtega muunduri abil koguti lairiba-akustilisi andmeid veesamba kohta. Muundur Simrad ES70C ja muundur Simrad ES200-7C, mõlemad 7° ringjoonelise kiirtega. Kõiki süsteemi parameetreid (st edastusvõimsus, signaali režiim, impulsi pikkus) hoiti andmete kogumise ajal konstantsena. Süsteemi kasutati pidevalt ning kaks muundurit pingisid üheaegselt lairiba režiimis vastavalt sagedusvahemikus 45–90 kHz ja 160–260 kHz. ES70C muunduri jaoks seadistati ülekandevõimsuseks 750 W ja impulsi pikkuseks 4 ms ning ES200-7C muunduri puhul seadistati ülekandevõimsuseks 150 W ja impulsi pikkuseks 8 ms. Kaks muundurit asuvad Topase edastavatest ja vastuvõtvatest seadmetest ahtri suunas. EK80 kasutatakse Kongsbergi tarkvara versiooniga 1.8.3.

Akustiline Doppler-voolukiiruse profileerija (ADCP)

ADCP on hüdroakustiline instrument, mis mõõdab veesambas horisontaalseid ja vertikaalseid ookeani hoovuse komponente. Teledyne RDI akustiline Doppler-voolukiiruse profileerijal (ADCP) on 600 kHz andur, mis on paigaldatud kõigist süsteemidest kõige kaugemale ahtri suunas. Mudel on Workhorse Mariner ning tootja määratletud maksimaalne vahemik on 50 m. ADCP-d kasutati 3,3 Hz pingikiirusega, paralleelselt vahemise veekihi EK80 tööga ning 2 m sügavusega konteinerid ulatusid umbes 6,5 meetrist 85,5 meetri sügavuseni.

Vee omadused (helikiirus, temperatuur, soolsus)

Uurimislaeva Electra teadusliku standardvarustuse hulka kuulub Seabird 911+ CTD (juhtivus, temperatuur, sügavus) proovivõtusüsteem. CTD on varustatud 12 Niskini pudeliga (igaüks 5-liitrine). Lisaks juhtivuse, temperatuuri ja rõhu (sügavuse) anduritele on paigaldatud andurid, millega mõõta lahustunud hapnikku, hägusust, CDOMi (surnud orgaanilise aine süsinikuvärv) ja ChA (klorofüll A) andmeid. Andmed logiti spetsiaalse Seabirdi tarkvara Seasave versiooniga 7.26.7.121.

Valerport MiniSVS on paigaldatud spetsiaalsesse torusse, mis kulgeb läbi kere ning selle avaus asub paljukiirelise kajaloodi muundurite lähedal, et pidevalt helikiirust salvestada. Paljukiirelisse varustusse kuulub ka Valeport MiniSVP (helikiirus, rõhk) heli levimiskiiruse profileerija, et salvestada helikiiruse profiile diskreetsetes jaamades.

Akustilise sünkroonimise seade

EM2040 paljukiireline kajalood, Topase merepõhja profileerija ja EK80 vahemise veekihi jaotatud kiirtega sonari saab kõik omavahel sünkroonida läbi Kongsberg K-Synci seadme kaudu. See tähendab, et neid kolme akustilist süsteemi saab kasutada paralleelselt ilma akustiliste häireteta, mis võiksid vastasel juhul andmete kvaliteeti märkimisväärselt rikkuda. Eelkõige häirib Topase merepõhja profileerija seadet EK80 ja teatud määral ka seadet EM2040. Kõigi süsteemide sünkroonimine K-Synci kaudu ei luba ühelgi süsteemil kasutada režiimi, kus samal ajal saadetakse vette rohkem kui üks ping. Seetõttu ei kasutatud EL21-Estonia ekspeditsioonil seadet K-Sync ning uuringuid seadmetega EM2040, Topas ja EK80 tehti maksimaalse kvaliteedi saavutamiseks eraldi. Seadmeid EK80 ja ADCP kasutati korraga, kuna need ei häiri teineteist.

Setete proovivõtt, põhja analüüs ja ankurdamine

Kolbpuur / gravitatsiooniline pinnasepuur põhjaproovide võtmiseks

Uurimislaev Electra on varustatud suure läbimõõduga kolbpuuriga ja spetsiaalse kolbpuuri juhtimissüsteemiga parempardal (joonis M1, fotod M2a–c). Kolbpuuri saab ka kasutada gravitatsioonirežiimis ilma kolbita. Kolbpuuri peal kasutatakse 68 või 45 kg tinaraskuseid. Kolbpuuri peale saab lastida kuni 563 kg raskuse. Kolbpuuri sisenevad setted püütakse kinni PVC-vooderdisega, mis on 6 m pikk ning välimise/sisemise läbimõõduga 110/98,5 mm. Kolbpuuri käivitusraskus koosneb väikesest 1 m pikkusest gravitatsioonilisest pinnasepuurist, mis kasutab läbipaistvaid polükarbonaadist vooderdisi välimise/sisemise läbimõõduga 88/80 mm. Standardne kolbpuuri vabastuslaba on konstrueeritud selliselt, et käivitusraskusel olevad raskused peaksid moodustama 1/10 peamisel kolbpuuri peal olevatest tinaraskusest. Puuri torud koosnevad 3 m pikkustest sektsioonidest ning uurimislaeval Electra saab kasutada maksimaalselt kahte toru, st kuni 6 m pinnasepuuri. EL21-Electra ekspeditsioonil töötas pinnasepuur kolbpuuri režiimis kahe 3 m pikkuse toruga ja puuri peal olid 473 kg raskused (foto M2b).

EL21-Estonia-PC01	
RV Electra 2021 Estonia cruise	
Sampling type + station number	
GR	Grabber
PC	Piston corer
CAMERA	Camera observation
SVP	Sound Velocity Profile
CTD	Conductivity Temperature Depth profile
ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler mooring

Puursüdamikud lõigati 1,5 m pikkusteks sektsioonideks ning neid hoiustati teki ahtriosas külmikus (foto M2a). Saadud puursüdamike ja kõigi teiste jaamade nimetamisviisi kujutatakse joonisel M2.

Pinnasepuuri käivitamiseks A-raami kaudu (foto M2c) kasutatakse hüdraulilist vintsi InterOcean (mudel 1003120HLW), mis on varustatud 600 m ja 11,43 mm läbimõõduga trossiga (Rochester A302799). Trossi maksimaalne töökoormus on 1818 kg ja selle purunemistugevus on 7273 kg.

Joonis M2: jaama nimetamisviis.

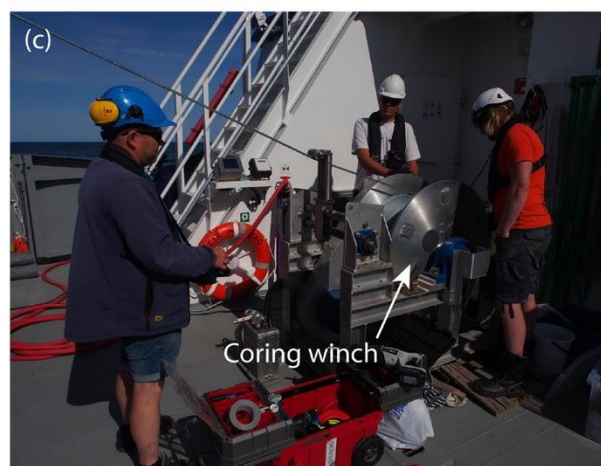
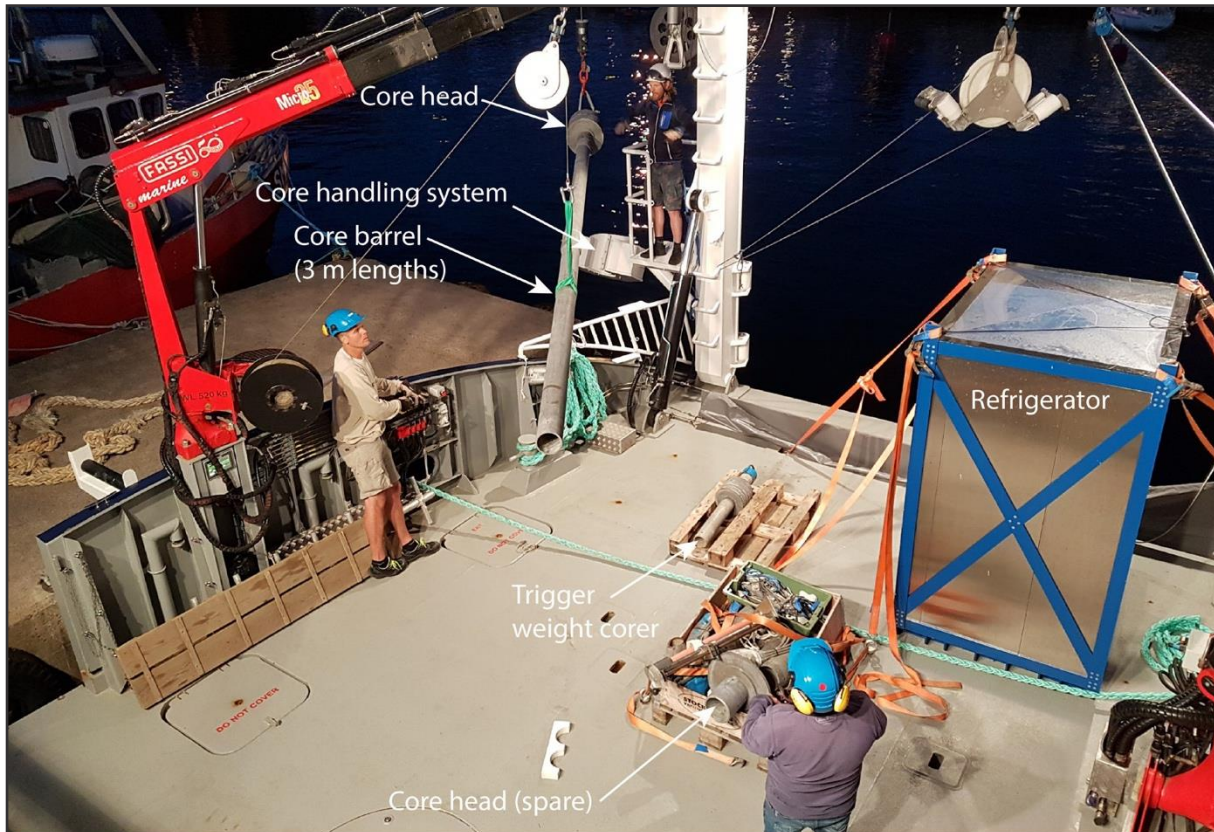


Foto M2. Uurimislaeva Electra põhjaproovivõtu süsteem. (a) Pinnasepuuril on parempardal käivitamissüsteem. Teki ahtriosas on kaasaskantav külmik puursüdämike hoiustamiseks. (b) 473 kg tinaraskustega lastitud pinnasepuuri pea. (c) Põhjaproovivõtu vints (InterOcean, mudel 10031-20HLW, hüdrauliline), varustatud 600 m ja 11,43 mm läbimõõduga trossiga (Rochester A302799). (d) Pinnasepuuri käitlemise süsteem. Fotod: Martin Jakobsson (a ja c on taaskasutatud varasematest reisiaruannetest).
Fotod: Martin Jakobsson

Haaratsiga proovivõtja

Kasutatud haaratsiga proovivõtjale viidatakse kui van Veeni tüüpi proovivõtjale (foto M3), mis on saanud nime Hollandi inseneri Johan van Veeni järgi, kes selle seadme 1933. aastal leiutas. See võtab häiritud pinnaselt setteproove, sulgedes kaks haaratsit, kui proovivõtja tabab merepõhja. Haaratsid kühveldavad setted kokku.

Jaamade nimetamine

Proovide ja mõõtmisjaamade nimetamisel järgiti viisi, kus reisi nimi eelneb konkreetse kasutatud seadme lühendile, millele omakorda järgneb seerianumber. Ka saadud settepuursüdamike ja haaratsiga kogutud proovide nimetamisel järgiti seda skeemi. Tabelis M2 on loetletud lühendid ja illustreeritud nimetamisviisi toimimist. Jaamade lühinimesid on kasutatud aruande kaartidel.

Tabel M2. Proovide ja mõõtejaamade nimetamisviis

Ekspeditsioon	Seade ja lühend	Jaama 01 täisnimi	Lühinimi
EL21-Estonia	Juhtivus, temperatuur, sügavus (CTD)	EL21-Estonia-CTD01	CTD01
EL21-Estonia	Heli levimiskiiruse profileerija (SVP)	EL21-Estonia-SVP01	SVP01
EL21-Estonia	Kolbpuur (PC)	EL21-Estonia-PC01	PC01
EL21-Estonia	Haaratsiga proovivõtja (GR)	EL21-Estonia-GR01	GR01
EL21-Estonia	GoPro kaamera (CAMERA)	EL21-Estonia-CAMERA01	CAMERA01
EL21-Estonia	Akustilise Doppler-voolukiiruse profileerija ankurdamine (ADCP)	EL21-Estonia-ADCP01	ADCP01



Foto M3. Van Veeni haaratsiga proovivõtja, mida kasutati häiritud pinnaselt setteproovide võtmiseks põhja kiireks iseloomustamiseks. Foto: Martin Jakobsson



Foto M4. GoPro Hero 7+ kaamera ja valgusti on pandud veekindlatesse korpustesse ja paigaldatud CTD-karusselli raamile. Põhja analüüse tehti kas piki CTD-jäljendeid või karusselli merepõhjale langetamisega. Foto: Martin Jakobsson

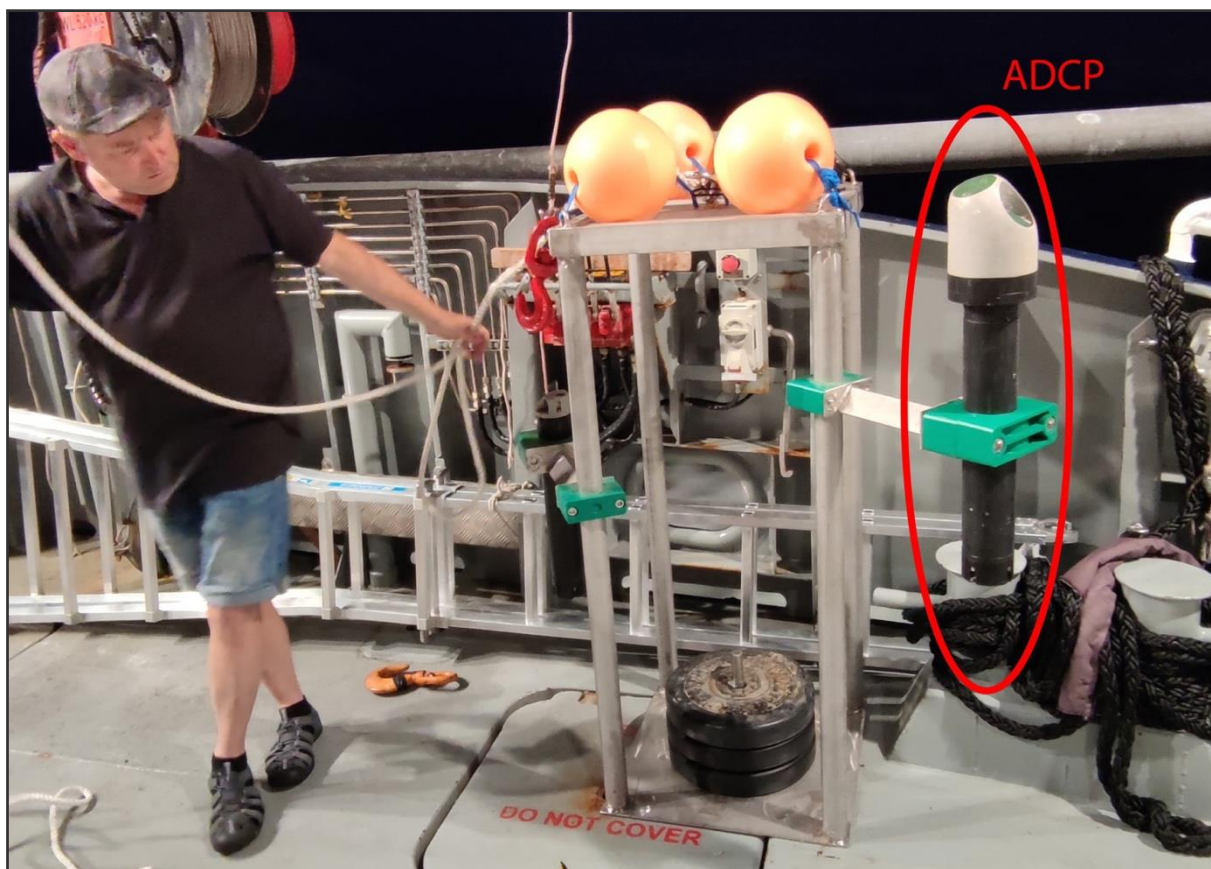


Foto M5. Ankurdatud ADCP raam (ümbrisetud punase ringiga). Foto: Christian Stranne

Põhja filmimine

Põhja analüüse tehti kas piki CTD jäljendeid või eraldi. Seadistus koosnes veealuses korpuses kaamerast GoPro Hero 7+ (USA Company Group B; mudel ScoutPro H3), mis on veekindel kuni sügavuseni 2750 m, ja veealusest valgustist, mille korpus on veekindel sügavuseni 1250 m (USA Company Group B; mudel Nautilux veealune videovalgusti ja korpus GPH-1250). GoPro kaamera paigaldati CTD-karussellile koos veealuse valgustiga (foto M4).

Ankurdatud ADCP

9. juulil kell 18.30 ankurdati põhjale paigaldatud ülespoole suunatud ADCP. ADCP (Nortek Aquadoppi 400 kHz profileerija) kogus uuringu käigus andmeid pidevalt kuni selle eemaldamiseni 14. juulil kell 07.30 pärast kõigi teiste uuringute ja proovivõttude lõpule viimist. Seadistust on kujutatud fotol M5. Põhja sügavus ankrukohas oli 82 m ja ankrus asend oli 53°23.010'N / 21°41.260'E. Profiili intervalliks seati 10 minutit. Iga profiil oli keskmiselt üle 10 impulsipurske (üks igal minutil) ning iga impulsipurse koosnes 2 pingist. Andmed salvestati 34 kahemeetrisesse salve, mis katsid umbes 15–80 m sügavusvahemikku.

Järeltöötlus ja tõlgendamine

Paljukiireline batümeetria

Paljukiirelise batümeetria andmed töödeldi tarkvaraga QPS Qimera (versioon 2.4.1) kolmes peamises etapis: 1) heli levimiskiiruse korrigeerimine, 2) vertikaal-aluspunkti reguleerimine, kasutades RTK GPSi kõrgusi, et saada võrdlussügavusi vertikaal-aluspunkti RH2000 jaoks, kasutades geoidi eraldamise mudelit SWEN17_RH2000, ja 3) võõrväärtuste eemaldamine.

Terrateci tarkvara TerraPos kasutati koos toorandmetega seadmelt Seapath 320+, et saada RTK korrektsioonidest maksimaalset kasu. Liikumisandurist salvestatud toorfailidega esinenud probleemide tõttu toimus see üksnes parvlaeva Estonia kohal tehtud üksikasjaliku uuringu puhul.



Üksikasjaliku uuringu jaoks koostati uurimislaeva Electra trajektoor tarkvaraga TerraPos navigatsiooni toorfailide järeltöötluse ja seejärel tasandamise teel. Kuna paljukiirelise kajaloodi andmeid koguti võrdlemise lühikese aja jooksul, oli tasandatud kõvera tulemuseks väärtus, mis oli pidevalt 19,40 meetrit GRS80 ellipsoidist kõrgem. RH2000 ja GRS80 vaheline eraldusväärtus on 18,97 m (saadud SWEN17_RH2000 geoidi mudelist) ning uurimislaeva Electra raskuskese (CoG) on seega $19,40 - 18,97 = 0,43$ meetrit RH2000 mudelist kõrgemal. Lisades veepiiri väärtuse $-0,47$ (veepiir on madalam kui CoG), leitakse, et veetase on uuringu ajal 0,04 m madalam kui RH2000. Seega, kuna ülevaateuuringu ajal ei saanud salvestatud toorandmete probleemide tõttu mudelit SWEN17_RH2000 otseselt kasutada, rakendati Qimeras 4 cm staatilist nihet, mis tähendab, et kõik sügavused on viitega mudelile RH2000.

Foto M6. Külgvaatesonar, mida veetakse peamisel põhjaproovivõtu vintsi trossil ja eraldi signaaltrossiga. Foto: Martin Jakobsson

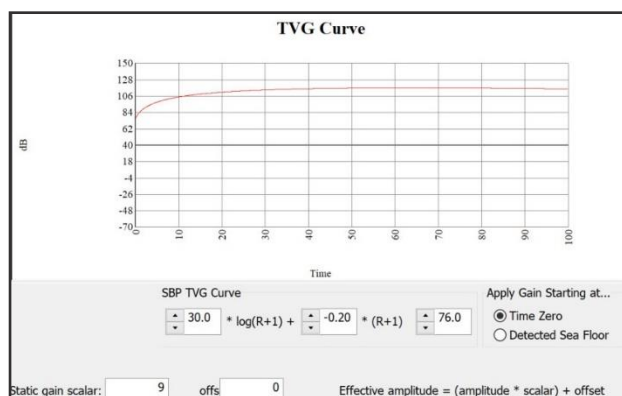
Kolmandas etapis läbivad paljukiirelise kajaloodi andmed iteratiivse analüüsi ja korrigeerivad mõõtmised, tagamaks, et kõik tuvastatud võõrväärtused on märgitud tagasilükatuks. See hõlmab nii käsitsi redigeerimist kui ka statistiliste automatiseeritud algoritmide kasutamist, nagu CUBE-filtreerimine (Calder ja Mayer, 2003), millele järgneb filtreeritud ala käsitsi kontrollimine, tagamaks, et CUBE ei märgiks võõrväärtusteks liiga paljusid sügavuse andmepunkte. Kõikidel juhtudel on „tagasilükatud” andmed lihtsalt märgitud desaktiveerituks, kuid andmeid tegelikult ei kustutatud.

12. juuli üksikasjalikus uuringus, kui ilmaolud olid head ja uurimislaev Electra sai aeglaselt liikuda, koostati lõpuks ruudustik, mille ruudu suurus oli $0,25 \times 0,25$ m, samas kui ülevaatlikus uuringus oli ruudu suurus $1,5 \times 1,5$ m. Suure resolutsiooniga $0,25 \times 0,25$ m ruudustiku analüüsimisel tuleks võtta arvesse, et $0,4^\circ$ kiire teoreetiline jalajälg on 80 m veesügavusel 56 m läbimõõduga, mis viitab teataval määral ülevõendamisele ning sellele, et väiksemaid kui 56 cm objekte tõenäoliselt ei tuvastata.

Paljukiirelise kajaloodi tagasihajumine

Paljukiirelise kajaloodi tagasihajumist järeltöödeldi tarkvaraga QPS FMGT (versioon 7.9.6). Kogu ala jaoks loodi mosaiik resolutsiooniga $0,25 \times 0,25$ m, samas kui üksikasjalik uuring vraki kohal võimaldas suuremat resolutsiooni, kuni $0,15 \times 0,15$ m. Tagasihajumise väärtuste statistika koondati 2×2 m ja 4×4 m plokkidesse. Kogu alale teostati nurgavahemiku analüüs (*angular range analysis, ARA*).

Merepõhja profileerija



Joonis M3. Ajas varieeruva võimenduse (*Time Varied Gain, TVG*) funktsioon, mida rakendati SonarWizis merepõhja profiilidele, nagu neid on kujutatud käesolevas aruandes.

Seadmega Topas PS40 kogutud merepõhja profileerimise andmed logiti Kongsbergi töötlemata kujul raw-vormingus (.raw) ja teisendati Topase andmekogumistarkvara abil SEG-Y-vormingusse, et need oleksid standardses järeltöötlustarkvaras loetavad. SEG-Y-failid imporditi järeltöötamise ja tõlgendamise tarkvarasse SonarWiz (versioon 7.07.07). Ehkki tõlgendamise käigus rakendati erinevat tüüpi võimendusi, on käesolevas aruandes esitatud Topase merepõhja profiilidele rakendatud TVG-d alates nullhetkest piki joonisel M3 näidatud funktsiooni koos kahe raja virnastamisega.

Pärast võimenduse seadistust digiteeriti merepõhi igas profiilis. See võimaldas kõigi profiilide jaoks vertikaal-aluspunkti täiendavalt reguleerida nii, et digiteeritud merepõhi oleks kooskõlas paljukiirelise batümeetriaga.

Pildindamine külgvaatesonariga

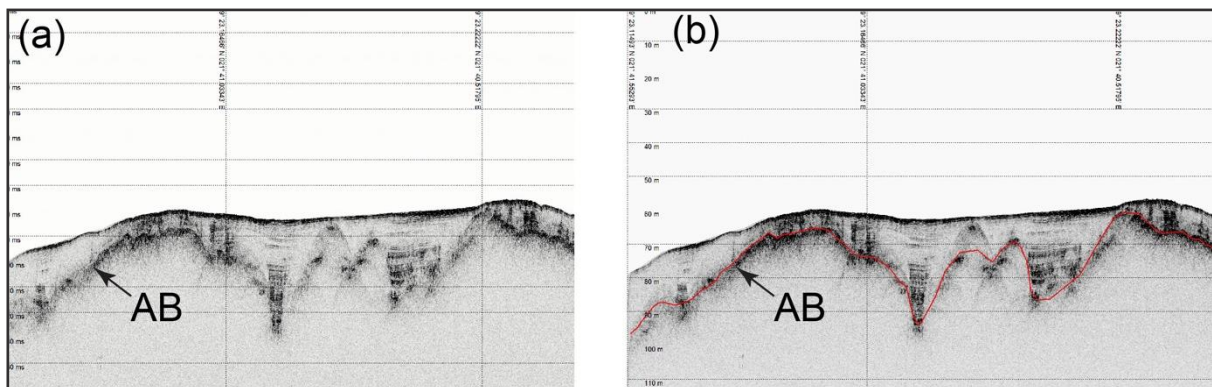
Tarkvara SonarWiz (versioon 7.07.07) kasutati külgvaatesonari andmete järeltöötamiseks eesmärgiga koostada kvaliteetne mosaiik, mis koos kõigi teiste geofüüsikaliste kaardistamisandmetega hõlbustaks merepõhja geoloogia tõlgendamist ning merepõhjal võimalike huvipakkuvate objektide tuvastamist. Uuringu käigus kasutatud Kleini andmekogumistarkvara SonarPro suudab kogutud andmeid salvestada nii enda SDF-vormingus kui ka laialdaselt kasutatavas XTF-vormingus. Selgus, et Sonarwizil tekkis probleem SDF-failide importimisega tarkvaravea (SonarWizi isiklik suhtlus) tõttu. Sel põhjusel kasutati XTF-faile. Järeltöötlus koosnes võimenduse seadistustest ja põhja jälgimisest, et kaldenurga vahemikku korrigeerida.

Pildindamine külgvaatesonariga ilma järelveetava sonarialuse veealuse positsioneerimiseta võib põhjustada suures osas positsiooniga seotud ebamäärasust, kuna laeva süsteemide edastatud positsioonidel tuleb arvestada ka trossi asendi ja järelveetava sonarialuse sügavusega. Positsioneerimise kinnitamiseks kasutati paljukiirelise batümeetria silmapaistvaid iseärasusi (peamiselt kivipaljandeid), mida oli võimalik tuvastada ka külgvaatesonari piltidel. Mõnedel juhtudel liigutati külgvaatesonari salvestusi paari meetri võrra horisontaalselt, et need oleksid täpselt vastavuses paljukiirelise batümeetriaga.

Setete paksuse mudel

Siin tähendab akustiline kelder (AB) kõige sügavat ühtset peegeldust, mida täheldati merepõhja profiilides (joonis M4). AB digiteeriti kõigis profiilides ning tõlgendati, et see vastaks üldiselt kas aluspõhjajakivimite või moreeni pinnale. Tõlgenduse kohaselt on võimalik hinnata pealmiste pehmemate setete paksust (joonis M4). Merepõhja profileerijaga salvestatud edasi-tagasi liikumisaeg teisendati sügavuseks meetrites SonarWiziga, kasutades 1600 ms^{-1} heli levimiskiirust. Tõlgendatud AB peegeldi absoluutsügavused ning arvutatud setete paksused koos merepõhja profiilidega eksporditi SonarWizist XYZ-punktidenä ASCII lamefailidesse.

ABd ja setete paksust esindavad ruudustikud loodi rakendusega QGIS (QGIS Development Team, 2018), kasutades Grassi pistikprogrammi v.surf.rst (versioon 7.8.5), mis rakendab punktide vahel interpolatsiooni, kasutades pingega splaini (*spline in tension*) algoritmi (Mitasova jt, 2005). Pinna üle- ja alakatmise vältimiseks kasutati kõrget 150 suurust pinget. Ruudustiku koostamist toetasid külgvaatesonari piltidelt ja paljukiirelise kajaloodi tagasihajumise andmetest tõlgendatud digiteeritud aluspõhjajakivimite paljandid (joonis M5). Lisaks tehti Eesti sukeldusettevõtte Tuukritööde OÜ allveerobotiga läbiviidud analüüside käigus järeldused piiravate punktide kohta paikades, kus nähti aluspõhjajakivimeid. Tuleb märkida, et allveerobot ei olnud varustatud veealuse positsioneerimissüsteemiga, mis tähendab, et esineb suurel määral ebamäärasust selle osas, kus täpselt aluspõhjajakivimeid parvlaeva Estonia kerest põhja poole leiti. AB pinna ja setete paksuse ruudustikud koostati aga $10 \times 10 \text{ m}$ ruudu suurusega ning neid tuleb tõlgendada üldiste mudelitena, milles esineb ebatäpsust. Suurimad ebatäpsused tulenevad tõenäoliselt merepõhja profiilide AB tõlgendustest ja asjaolust, et merepõhja profiilid on üksteisest umbes 150 m kaugusel, mis viitab pingega splaini funktsiooni kasutamisel suurele punktidevahelisele interpolatsioonile.



Joonis M4. Merepõhja profiil, mis illustreerib akustilise keldri (AB) tuvastamist. Siin tõlgendatakse akustilist keldrit kui kõige sügavat ühtset tuvastatud peegeldit. (a) Profiil ilma tõlgendamiseta. (b) Profiil koos AB tõlgendamisega, millele viitab punane joon. Eeldatakse, et AB peal oleva stratigraafia moodustavad üldiselt pehmed setted, mida on võimalik läbistada kasutatud 4–10 kHz 1 ms pikkuse trelimpulsijadaga. Selles AB kohal olevas profiilis on näha tüüpilist kihelist struktuuri (tõenäoliselt liustikulise savi kihid).

Samuti tuleb märkida, et vrakk moonutab seda ületavaid merepõhja profile, mistõttu ei olnud võimalik vraki all ABd täpselt kindlaks määrata.

Vahemise veekihi sonar

Kõiki EK80 andmeid töödeldi tarkvaraga MATLAB 2021b, kasutades mitmeid Kongsberg Maritime'i sisemisi skripte (L. Anderson, isiklik suhtlus). Akustilise veesamba andmetele rakendati vastendatud filter, kasutades idealiseeritud signaali koopiat. Kõigi andmete puhul arvutati muunduri esikülje põhjal vahemik, kasutades ajaliselt lähima CTD profiili keskmist harmoonilise heli kiirust. Vahemiku andmed teisendati sügavuseks, arvestades staatilist laeva süvist.

Akustiline Doppler-voolukiiruse profileerija (ADCP)

Kõiki laevaparda ADCPst saadud andmeid töödeldi tarkvaraga MATLAB 2021b, kasutades Saksamaalt Leibnizi Läänemere uuringuinstituudilt saadud skriptide paketti (V. Morholz, isiklik suhtlus). Varasematest uuringutest on teada, et ADCP on paigaldatud väikese kaldenurga all laeva vööri ahtriosa teljele ning seega rakendati paigalduse joonduse nihet $-5,477^\circ$. Andmeid koguti aja jooksul keskmiselt 10-sekundiliste kimpudena. Uuringu ajal keskmise voolukiiruse ja suuna mõistmiseks leiti andmete keskmine kolmes võrdse pikkusega sektsioonis iga uuringuliini kohal kahe erineva sügavuse intervalliga: pinnast 45 m sügavuseni ja sügavuste vahemikus 45–55 m.

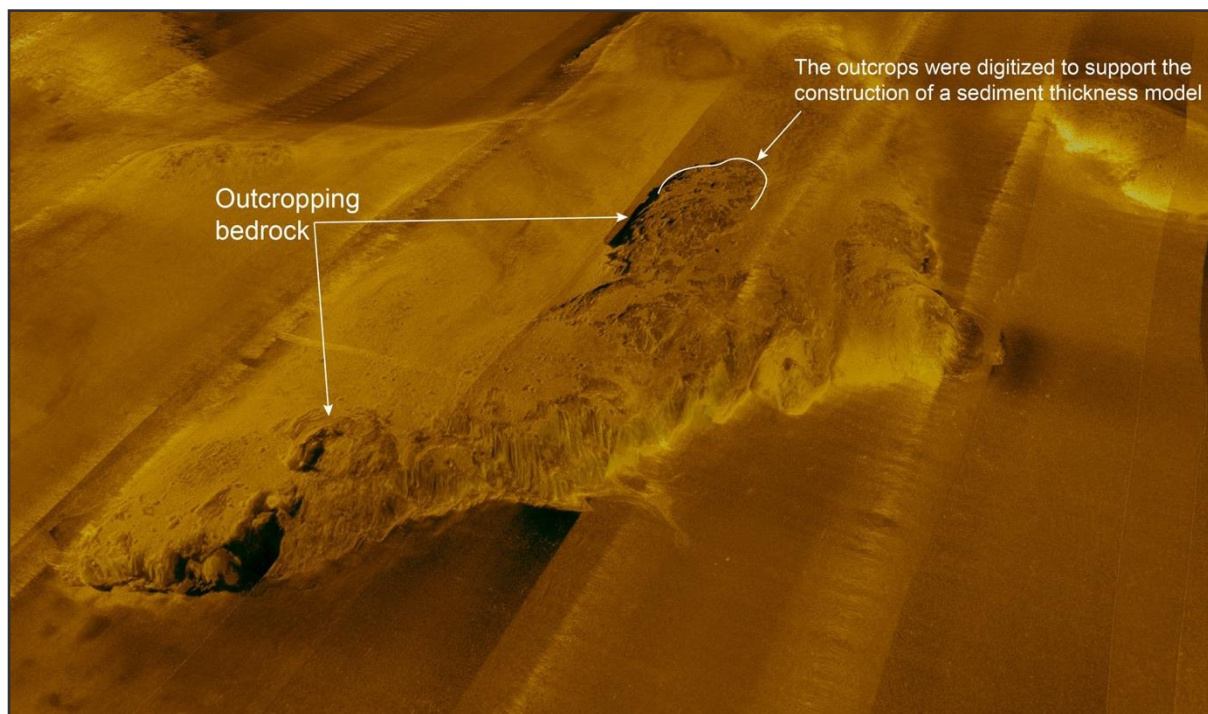
Juhtivus, temperatuur, sügavus (CTD)

CTD andmeid töödeldi Sea Birdi andmetöötlustarkvaraga (SBE Data Processing Win32_ V7.26.2) ja kimbustati 0,1 dbar vertikaalseteks keskmisteks. Kimbustatud andmete põhjal teisendati soolsusprofiilid absoluutseks soolsuseks rahvusvahelise merevee termodünaamilise võrrandi põhjal (IOC, SCOR ja IAPSO, 2010), kasutades MATLABi GibbsSeaWater (GSW) Oceanographic Toolboxit (<http://www.teos-10.org>). Seejärel arvutati rõhu, temperatuuri ja absoluutse soolsuse profiilide põhjal sügavusvektorid. Käesolevas aruandes on esitatud CTD profiili andmed individuaalsete jaamade, aga ka keskmiste profiilide kohta (± 1 standardhälve), kus andmed interpoleeriti kõigepealt üldisele 1 cm sügavusele ruudustikule.

Mitme anduriga puursüdamike logimine (MSCL)

Avamata settepuursüdamikud logiti Stockholmi ülikooli geoloogiateaduste osakonna setete (järve ja mere) laboratooriumis (Slamlab) Geoteki mitme anduriga puursüdamike logijat kasutades (MSCL). Avamata puursüdamike MSCLi seadistus viitab, et andurid on horisontaalsuunas. Gammakiirgusest tuletatud puistetiheduse, pikilaine kiiruse (p-laine) ja magnetilise sustseptiilsuse mõõtarvud saadi 1 cm puursüdamiku resolutsiooniga.

Gammakiirguse sumbumust mõõdeti ^{137}Cs allikaga, millel oli 5 mm kollimaator ja 10 s loendusae. Enne logimist kasutati süsteemi kalibreerimisel töödeldud alumiiniumi tükki, mis oli paigaldatud puursüdamiku vooderdise osasse. Kalibreerimistükil on neli erinevat alumiiniumi paksust läbimõõduga 2, 3, 4 ja 4,45 cm. Kalibreerimistükk täideti destilleeritud veega ja jäeti toatemperatuurile soojenema ($\approx 20^\circ\text{C}$), enne kui see asetati MSCL-rajal ^{137}Cs allika ja detektori vahele. 30 sekundi jooksul logiti iga alumiiniumi/vee sektsiooni läbinud gammakiirte arv. Alumiiniumi/vee segu teadaoleva puistetiheduse igas kalibreerimisetapis sobitati lineaarselt mõõdetud loenduste arvu sekundis logaritmiga, pakkudes kalibreerimisfunktsiooni, et määrata sette puistetihedus sekundis mõõdetud gammakiirte arvu põhjal.



Joonis M5. Külgvaatesonari mosaiik paljukiirelise batümeetria peale laotatult. Külgvaatesonariga pildindamisel tuvastati selgelt aluspõhjakiivimi paljand ja see digiteeriti, et piirata alas ruudustikuga kaetud setete paksuse koostamist.

MSCLil on automatiseeritud vedruga pingestatud veeremuundurite paar, mida kasutatakse esitatud akustilise impulsi setteid läbiva pikilaine (p-laine) kiiruse mõõtmiseks. Logitakse aeg, mis p-lainel kulub settepuursüdamiku läbimiseks. Kuna mõõdetakse muundurite vahekaugust, saab kiiruse arvutada pärast kalibreerimist, võttes arvesse elektroonikalülituse põhjustatud viivitusi ja seda, et p-laine peab läbima puursüdamiku PVC-vooderdise. Kalibreerimiseks mõõdeti liikumise aega läbi puursüdamiku vooderdise, mis täideti teadaoleva temperatuuriga destilleeritud veega. Arvutatakse teoreetiline liikumisaeg läbi puursüdamiku vooderdises oleva destilleeritud vee ning seda võrreldakse logitud kogu liikumisaajaga, et määrata kindlaks PVC-vooderdise ja elektroonikalülituste põhjustatud viivitused.

MSCLil on 125 mm Bartingtoni silmusandur magnetilise sustseptiilsuse mõõtmiseks. Rakendati 1 s pikkust andmekogumisaega. Integreeritud sustseptiilsuse signaal koguti risti üle kogu puursüdamiku diameetri (110 mm) ja piki efektiivset anduri pikkust (üldiselt 4–6 cm). Magnetilise sustseptiilsuse mõõtarve ei korrigeeritud massi või mahu osas.



Joonis M6. Koonuspenetratsiooni seadistus, kujutatud enne koonuse vabastamist setetes.

Koonuspenetratsioon

Kolme koonuspenetratsiooni mõõtmise, mis saadi ~ 15 cm intervallidega lõhestatud puursüdamikelt, keskmise põhjal arvutati kuivendamata nihketugevus. Teadaoleva massi ja nurgaga koonus asetati täpselt sette pinnale ja lukustati paika (koonuse tipu nurk/mass: 30°/128,95 g, 60°/58,21 g või 108,21 g) (joonis M6). Koonus vabastati, et see saaks setet läbistada, ja lukustati seejärel uuesti paika 5±1 s pärast seda, kui koonus settesse püsima jäi. Pärast läbistamissügavuse salvestamist eemaldati koonus settest ja puhastati enne protseduuri kordamist. Kui läbistus oli suurem kui 20 mm, valiti kas kergem mass või nürim koonus. Kui läbistus oli väiksem kui 5 mm, kasutati raskemat või teravamast koonust. Kuivendamata nihketugevus arvutati koonuse massi (m), koonuse tipunurga ja läbistussügavuse (i) põhjal:

$$S_u = c \cdot g \cdot \frac{m}{i^2} \quad \text{Equation M1.}$$

kus c on koonuse tipu nurgast sõltuv konstant ($c = 0,8$ 30° korral, $c = 0,27$ 60° korral) ja g on raskusjõu kiirendus (9,82 m s⁻²) (ISO/TS 17892-6, 2004).

Massikadu põletamisel (LOI)

Orgaanilise süsiniku kogust (TOC) analüüsiti eelkõige selleks, et mõista, kas terasuuruse jaoks mõõdetavaid proove on enne osakeste suuruse analüsaatori (PSA) kasutamist vaja eeltöödelda. TOC mõõtmisel kasutati massikadu põletamisel (LOI) Proove kuivatati, kaaluti, põletati ja seejärel kaaluti uuesti, et hinnata, kui palju orgaanilist ainet oli ära põletatud (Bendor ja Banin, 1989). Proovide taseme ühtlasena hoidmiseks erinevate mõõtetüüpide vahel (nt koonuspenetratsiooni mõõtmised) võeti puursüdamiku proove iga 15 cm järel, mille tulemusel saadi kokku 39 proovi. Mõlemad EL21-Estonia-PC01 puursüdamiku sektsioonid jäeti LOI protsessist välja, kuna nende liivasisaldus oli PSA jaoks liiga suur. Nende sektsioonide tera suuruse väljaselgitamiseks kasutati sõelumist.

Kõik TOC suhtes analüüsitud proovid pandi kuivatamiseks ahju 105 °C juures (üle öö või vähemalt > 4 h). Pärast kuivamist kaaluti proovid enne seda, kui need pandi ahju, mille kuumust tõsteti kahe tunni jooksul järk-järgult temperatuurini 550 °C, ja hoiti seejärel kaheksa tundi sel temperatuuril. Kaheksa tunni pärast vähendati temperatuuri tasemeni 105 °C, kus neid säilitati järgmise päevani, mil proovid ahjust välja võeti ja uuesti kaaluti. TOC määratakse, jagades põletatud massi (M_b) proovide kuivmassiga (M_d):

$$TOC (\%) = 1 - \frac{M_b}{M_d} \cdot 100 \quad \text{Equation M2.}$$

Tera suurus

Tera suuruse analüüsid kasutati kahte meetodit: 1) laserdifraktsioon, 2) sõelumine. Setetes, mille osakesed olid < 1 mm, kasutati Malvern Panalyticali Mastersizer 3000 osakeste suuruse analüsaatorit (PSA). Seade kasutab tera suuruse vahemiku hindamiseks laserdifraktsiooni. LOI mõõtmised näitasid, et EL21-Estonia-PC02 puursüdamik sisaldas $> 2\text{--}5\%$ orgaanilist ainet, mis on Mastersizeriga usaldusväärse tulemuse saavutamiseks liiga suur, sest see põhjustab osakeste liitmist. Seega töödeldi selle puursüdamiku proove 30% kontsentratsiooniga vesinikperoksiidiga (H_2O_2) enne seadme Mastersizer 3000 PSA kasutamist. Väikesed proovid (< 3 g) pandi $10\text{--}15$ ml vette ja segati setete osakeste eraldamiseks. Seejärel lisati 21 ml H_2O_2 , 5 ml esimesed kolm korda, kusjuures iga lisamise vahele jäeti $1,5$ h. Kuna reaktsioon oli endiselt nähtav, pandi katseklaasid kuuma vette ($\geq 50^\circ\text{C}$), kuhu lisati veel 3 ml H_2O_2 . Seda korrati seni, kuni nähtavaid reaktsioone ei esinenud. Proovide puhastamiseks ja ülejäänud H_2O_2 eemaldamiseks enne järgnevat PSA analüüsi pandi katseklaasid kümneks minutiks tsentrifuugi (VWR mudel Mega Star 1.6) kiirusega 4000 pöört minutis (p/min). Seejärel sai selge lahuse eemaldada, kuna setted olid kogunenud katseklaasi põhja. Proovidele lisati deioniseeritud vett, mida loksutati setete segamiseks enne uuesti tsentrifuugi panemist. Seda protsessi korrati kolm korda, tagamaks, et setted on puhtad ja vabad H_2O_2 -st (proove, mis olid pärast seda protseduuri endiselt hägused, tsentrifuugiti uuesti, kuni lahus jäi selgeks). Kui lahus oli selge, kurnati ülejäänud vesi ära ja asendati uue deioniseeritud veega, seega oli proovi kogumaht 10 ml. Setet segati jõuliselt pipeti ja segistiga (Heidolphi mudel REAX top), imeti pipetti ja tühjendati PSAsse, kuni hägusus oli vahemikus $5\text{--}15\%$. Dispergeeriva ainega lisati 3 ml 10% kontsentratsiooniga naatriummetafosfaati ja pärast seda oli PSA kasutusvalmis. Usaldusväärse tulemuse tagamiseks mõõdeti iga proovi kaks korda. Puursüdamikku EL21-Electra-PC03, mis sisaldas $< 2\%$ orgaanilist ainet, sai analüüsida ilma ettevalmistuseta, kuid ülejäänud protseduur oli sama, mis EL21-Estonia-PC02 PSA puhul.

Puursüdamik EL21-Estonia-PC01 sisaldas peamiselt liiva, mille suuruseks hinnati visuaalselt > 1 mm. Seda puursüdamikku sõeluti. Igast sektsioonist võeti kolm proovi (pealt, keskelt, põhjast) ja pandi ahju. Pärast kuivamist sõeluti proove 10 minuti jooksul sõelavahemikus 4 mm kuni $63\ \mu\text{m}$ (4 mm, 2 mm, 1 mm, $500\ \mu\text{m}$, $250\ \mu\text{m}$, $125\ \mu\text{m}$ ja $63\ \mu\text{m}$) ning suuruste fraktsioonide arvutamiseks jagati igasse sõela järelejäänud materjal kuiva proovi kogumassiga.

Ankurdatud ADCP

Toorandmed teisendati ASCII-vorminguks tarkvaraga Nortek Aquadopp Profiler v1.35. Asjaomased aegread, mille jooksul ADCP põhjast pingis, määrati kindlaks lisaanduri andmete, sealhulgas suuna, keerise, rõhu ja temperatuuri põhjal.

Tulemused ja tõlgendamine

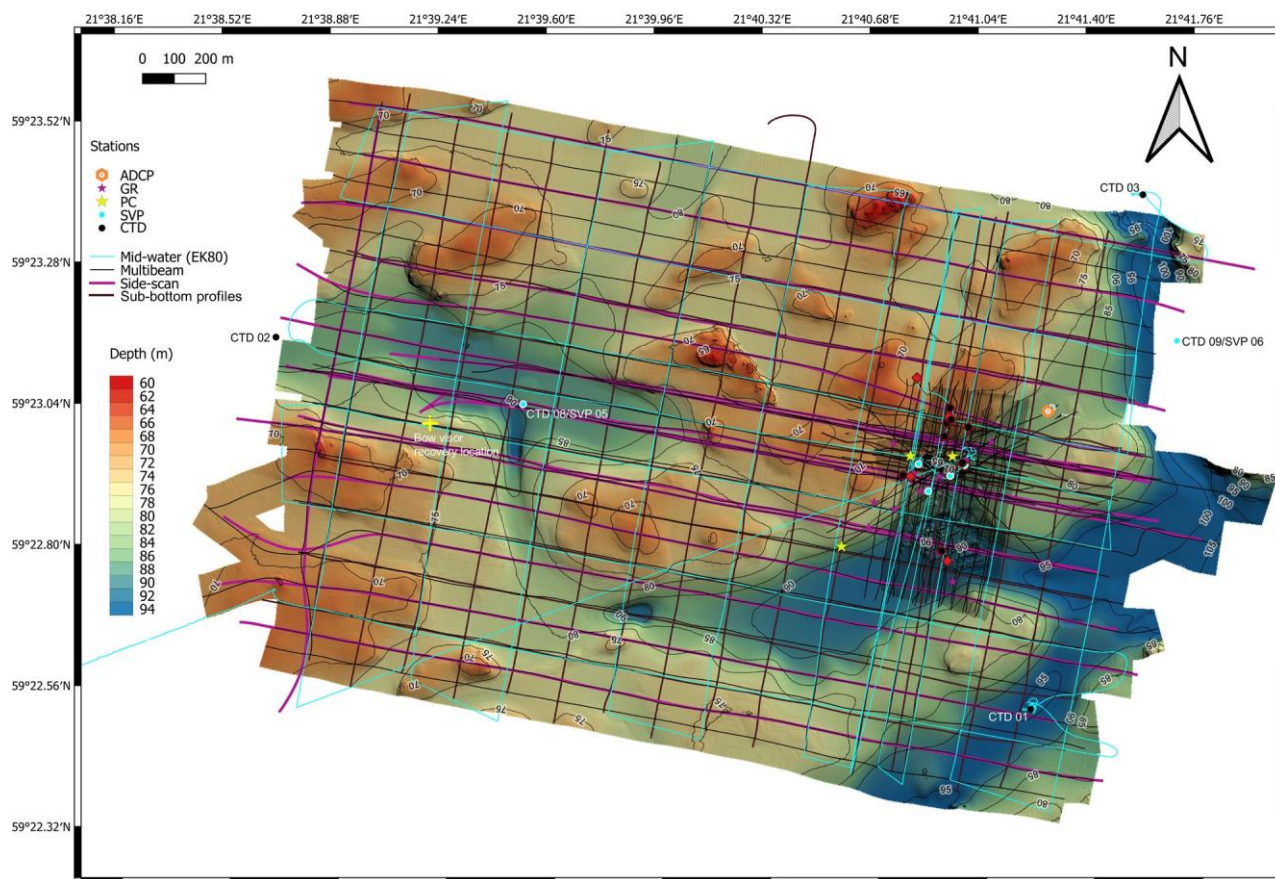
Merepõhja ja veesamba kaardistamine akustiliste meetoditega

Paljukiireline batümeetria

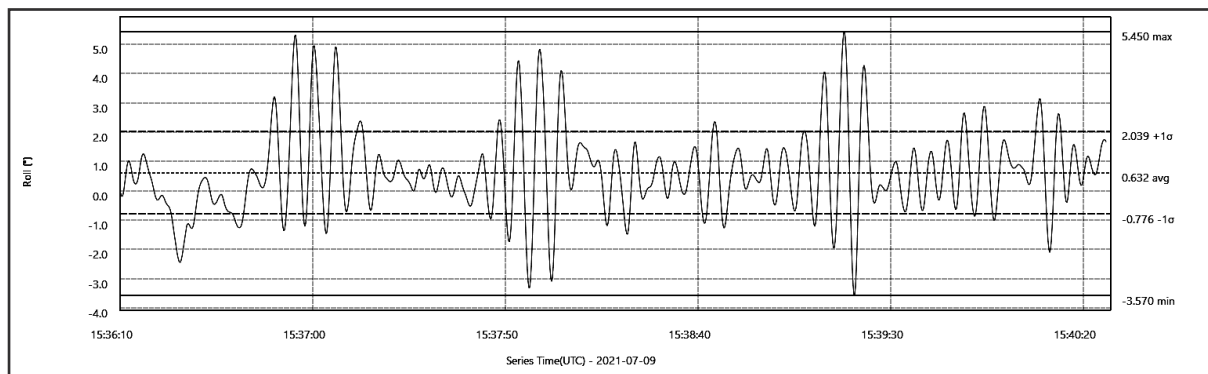
Paljukiirelise kaardistamise võib jagada uuringuks, mille eesmärk oli anda vrakki ümbritsevast alast üldine batümeetiline ülevaade, ja uuringuteks, millega taheti saavutada maksimaalne resolutsioon vrakist ja selle lähiümbrusest (joonis MB1). Esimene üksikasjalik uuring algas 9. juulil, kuid see katkestati halbade ilmastikutingimuste tõttu, kus lainekõrgus kiirelt suurenes, mis põhjustas laeva ebastabiilset liikumist ning kere ja laeva all mulle, vähendades kogutud andmete kvaliteeti (joonis MB2). Lisaks takistasid lained ja tugev tuul uurimislaeva Electra piisavalt aeglase vaatluskiiruse (< 2 sõlme) säilitamist, mis on vajalik kõrge resolutsiooni nõuetele vastava piisava arvu sügavuse mõõtmiste tegemiseks merepõhjas. Pärast selle uuringu katkestamist viidi uurimislaev Electra Hangõ sadamasse (vt lisa 1: ekspeditsiooni igapäevased märkmed). Ülevaatlik uuring viidi läbi 12. juulil koos allpool kirjeldatud külgvaate sonari tööga. Loogu laiuseks seati plaanide kohaselt $50^\circ \times 50^\circ$ ja uuringuliinid kulgesid 100% kattuvate loogudega. Töödeldud andmed, mille ruudustiku ruudu suurus on $1,5 \times 1,5$ m, katavad $5,3 \text{ km}^2$ pindala (joonis MB1). Vraki teise üksikasjaliku uuringuga alustati kohe pärast ülevaatlikku uuringut 12. juulil heade ilmastikutingimuste ja vaikse merega. See uuring viidi edukalt lõpule 13. juulil. Loogu laiust vähendati $25^\circ \times 25^\circ$ peale, et suurendada resolutsiooni raja põikisuunal ja uurimislaeva Electra liigutati edasi mööda uuringuliine võimalikult aeglaselt (aeg-ajalt kuni 1 sõlme), et saavutada raja pikisuunal maksimaalset resolutsiooni. Parvlaeva Estonia külgedelt sügavuse andmete saamiseks lisati paar liini maksimaalse looguga $70^\circ \times 70^\circ$, kuna vrakk on osaliselt akustilises varjus kreenimise ja süvendi tõttu, mis on tekkinud merepõhja selle põhja- ja lääneküljele. Süvendit kirjeldatakse üksikasjalikult allpool. Lisaks viidi lõpule liinid diagonaalselt üle vraki, et läheneda sellele teiste nurkade alt maksimaalse andmetega kaetavuse saavutamiseks (joonis MB1). Kogutud andmed sai kanda ruudustikule resolutsiooniga $0,25 \times 0,25$ m, ehkki ruudustikus esines väikseid tühimikke, mille sai katta ümbritsevate ruutude interpoleerimisega. Üksikasjalikul $0,25 \times 0,25$ m ruudustikul on vraki asukohas 75 ja 85 m sügavusel väiksem ruudu suurus kui individuaalsete kiirte jalajälg ning seda tuleb üksikasjade tõlgendamisel arvesse võtta (vt nendel sügavustel saavutatavate jalajälgede meetodid). Üksikasjaliku uuringu lõplik ruudustik katab $0,25 \text{ km}^2$ pindala (joonis MB3). Suuremate mõõtmetega ja kõrgema eraldusvõimega uuringute kaardid on esitatud lisa 2.

Kaardistatud ala iseloomustab laineline merepõhja maastik batümeetriliste kõrgendikega, mis on enamasti madalamad kui 70 m ning mida lahutavad orud, mis on sügavamad kui 90 m (joonis MB1). Kaguosas on kaks silmapaistvat orgu suunaga edelast kirdesse ja üks lääneosas, mis kulgeb idast läände. Sügavaim kaardistatud asukoht on kirdes, kus merepõhi ulatub > 105 m sügavuseni.

Merepõhja morfoloogia parvlaeva Estonia ümbruses on küllaltki iseloomulik Läänemere aladele, kus aluspõhjajakivimid koosnevad tardkivimitest. Neis alades on aluspõhjajakivimite peal moreeni laigud. Selle moreeni ladestas Skandinaavia jääkilp, mis täitis täielikult Läänemere valgala viimase jäätumise maksimumi ajal umbes 19 000 – 26 000 aastat tagasi (Andrén jt, 2011) ning voolas seega üle aluspõhjajakivimite. Jääkilp taandus parvlaeva Estonia asukohast umbes 12 000 aastat tagasi (Hughes jt, 2016). Jääkilbi taandumisel settis aluspõhjajakivimitele/moreenile liustikuline savi. Seda savi iseloomustab kihiline välimus, kuna peenemad terad ladestusid talvel ja jämedamad suvel, kui toimus rohkem sulamist ja erosiooni. Jääkilbi taandumisel tekkiv savisetete iga-aastane rütm, mille tulemuseks on kihid, avastati enam kui 100 aastat tagasi (De Geer, 1912). Kui Skandinaavia jääkilp Läänemere valgalalt kadus, täitisid orud ja ladestusalad jätkuvalt saviga, kuid sellel puudub kihiline välimus.



Joonis MB1. Jaamad ja lõpuleviidud uuringuliinid koos erinevate akustiliste kaardistamissüsteemidega. ADCP andmed hangiti koos seadmega EK80 vahemise veeikihi akustika kogumisega ja paljukiireline kajalood töötas ülevaatlikus uuringus paralleelselt külvaatesonariga. Sellel kaardil on näidatud ainult nende jaamade sildid, mis jäävad üksikasjalikust kaardist välja. Joonisel MB3 on näidatud ülejäänud jaamade sildid. ADCP = akustilise Doppler-voolukiiruse profileerija ankrukoht; GR = haaratsiga proovivõtja; PC = kolbpuur; SVP = heli levimiskiiruse profileerija; CTD = juhtivus, temperatuur, sügavus. Selle kaardi suurem versioon on esitatud lisas 2.



Joonis MB2. Uurimislaeva Electra rullumine, mis jäädvustati paljukiirelise süsteemi liikumisanduriga vraki esimese üksikasjaliku uuringu käigus, mis katkestati halbade ilmastikutingimuste tõttu 9. juulil. Uurimislaev Electra on varustatud gürostabilisaatoriga, mis vähendab märkimisväärselt laeva liikumist. Güroskoop on rullumise vähendamiseks kõige tõhusam.

Sellele savile viidatakse tavaliselt kui liustikujärgsele savile, mille ülemistes kihtides on suur orgaaniline sisaldus, viies biogeense gaasi tootmiseni. Varasemalt parvlaeva Estonia ümbritsevast alast koostatud geoloogilised kaardid kujutavad seda klassikalist Läänemere merepõhja geoloogiat (joonis I2). Geoloogiliste kihtide ebaühtlane jaotumine tuleneb merepõhja hoovuste ja merepõhja dünaamika mõjust, nagu massikaotamine, mis viitab näiteks sellele, et aluspõhja kivimid võivad olla paljastatud, kui neil ei ole moreeni või liustikulise savi kihti.

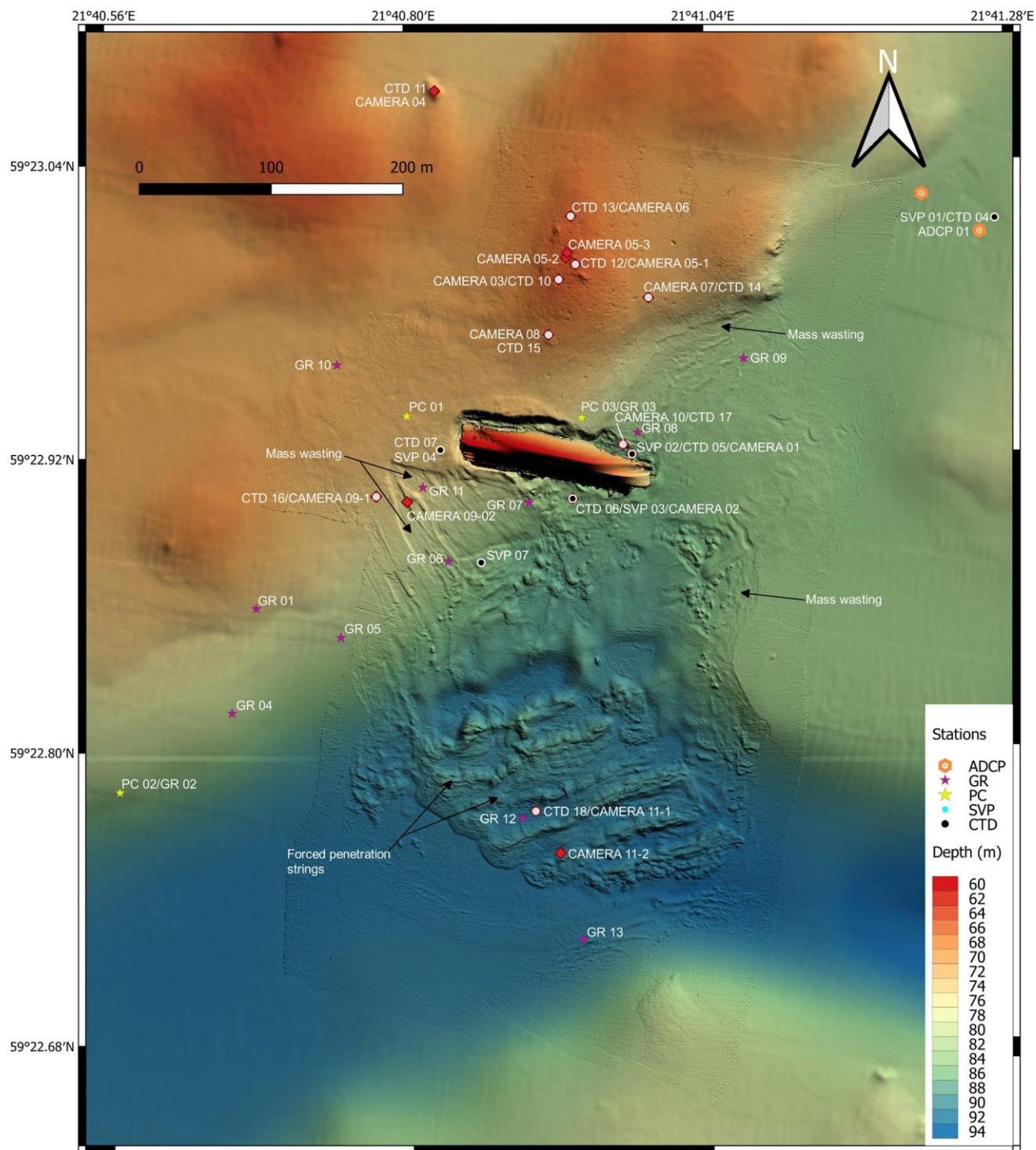
Üksikasjaliku batümeetria põhjal koostatud kallakukaart näitab, et parvlaev Estonia toetub merepõhjale, mis on üldiselt umbes 5–10° nurga all kagu suunas (joonis MB4). See vastab varasematele üldisematele batümeetrilistele uuringutele, milles leiti, et parvlaeva Estonia asukoha kaldenurk on vahemikus 7–10°. 75–80 m sügavusintervall kujutab kõige järsemat merepõhja. Alates vraki keskosast põhjaküljel ja kulgedes kirde suunas, on see sügavusintervall järsem kui 10° (joonis MB4).

Vrakk ise on enamjaolt üksikasjaliku paljukiirelise kajaloodi uuringu käigus hästi pildindatud (joonis MB5). Erandid on vraki ahtriosa ning laevakere ja merepõhja kokkupuuteala põhjaküljel (joonis MB5). See tuleneb neis alades vraki servas moodustunud sügavast süvendist, mis põhjustas akustilise varju, st paljukiirelise kajaloodi kiired blokeeritakse ning need ei jõua laevakere ja merepõhja kokkupuutealani. Süvend on selgelt nähtav nii batümeetrial kui ka kallakukaartidel (joonised MB5–MB6). See kulgeb mööda vraki ahtrit, olles umbes 6 m lai ja 4 m sügav. Süvend laieneb kuni > 8 meetrini ja süveneb mööda põhjapoolset külge umbes 7 meetrini (joonis MB5). Kui liikuda mööda süvendit umbes 55 m kaugusele ahtrist, muutub süvendi põhi madalamaks ja sein ei ole nii järsk (joonis MB5). Parvlaeva Estonia kõige madalam osa on vasakparda põhi, mis on ahtrist kõige kaugemal, tõustes umbes 57 m sügavusele (joonis MB5). Paljukiirelisel batümeetrial on näha mitu piklikku märki, millest kolm on nähtavad laevakerel, kaks neist selgelt ja üks veidi ähmasemalt (joonis MB6). Need sarnanevad lohistatud objektist põhjustatud kraapimisjälgedega, näiteks kui ankrut veetakse mööda merepõhja. Üksikasjalikul paljukiirelisel batümeetrial on võimalik eristada ka auke vööripõtkuris (joonis MB6).

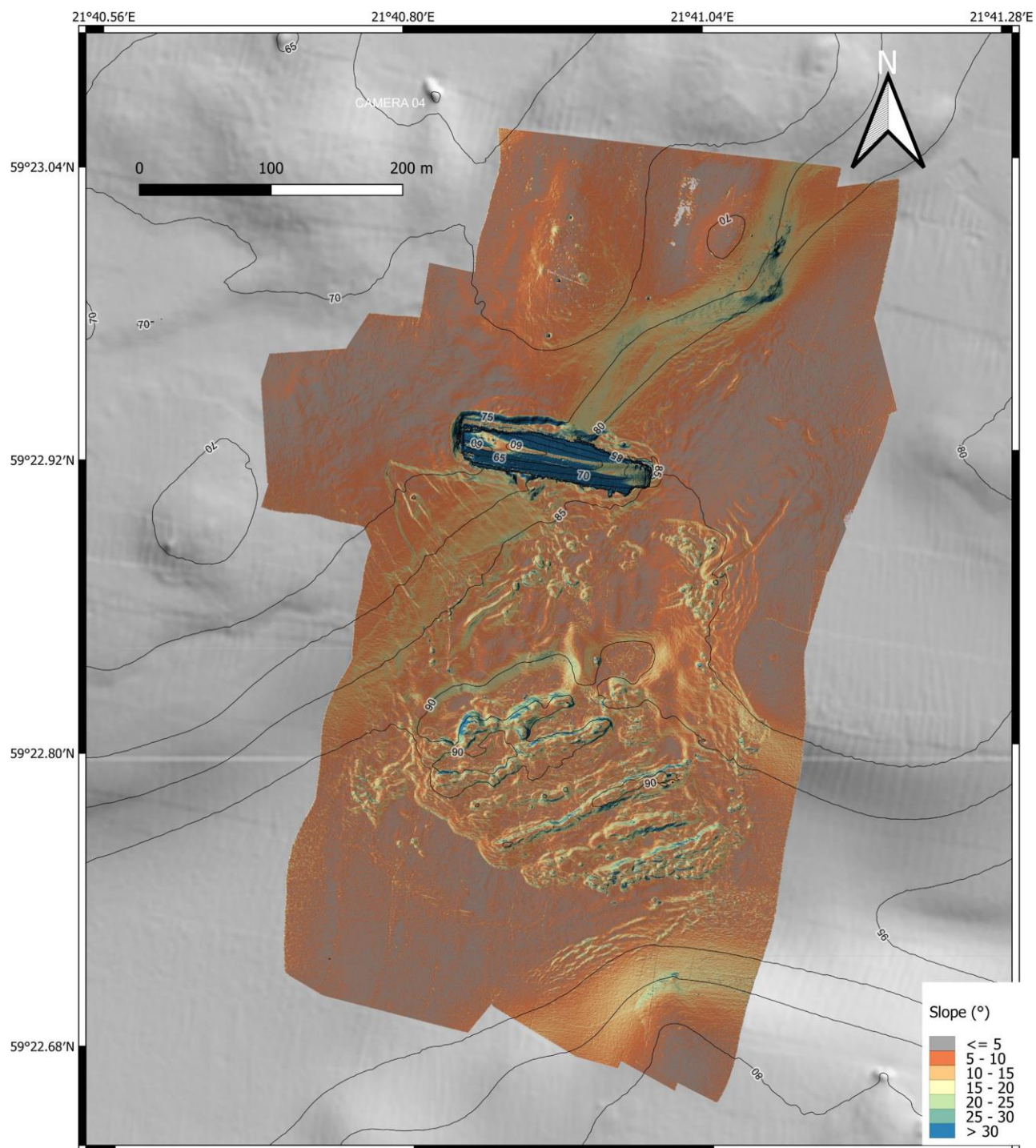
Rootsi geotehniline instituut (SGI) on teinud kokkuvõtte varasematest uuringutest saadud geotehnilistest andmetest (Rudebeck ja Kennedy, 2021). Nad järeldasid avaldatud aruannetest, et vrakist ida, lääne ja lõuna pool on toimunud vähemalt neli massikaotamise sündmust. Arvatakse, et esimese lihke põhjustas parvlaeva Estonia kokkupuude merepõhjaga. Selle tagajärjel andsid järele setted, mis asuvad parvlaeva Estonia kokkupuutekohast lõunas. Kaks lihet, mis katavad 800 m² ala merepõhjal, tekkisid liiva valamisel merepõhjale eesmärgiga tugevdada kaetava ala ida- ja lääneosa. Lõpetuseks arvatakse, et neljas lihe esines vrakist lõunas pärast täitmise peatamist.

Meie üksikasjalikust paljukiirelise kajaloodiga tehtud uuringust ilmnes mitu selget märki merepõhja massikaotamisest (joonis MB6). Nähtavaid massikaotamise märke on aga keeruline varasemalt teatatud sündmustega täpselt seostada. Parvlaevast idas on näha umbes 150 m pikkune lihke nõlvak, millele vastav massikaotuse materjal on kuhjunud kallaku alaosasse põikisuunalistesse väikestesse seljakutesse. See lihe toimus piki kaldus merepõhja kõige järsemat osa veesügavusel umbes 75–80 m (joonis MB7b). Umbes samas veesügavuse vahemikus kaardistati parvlaevast Estonia läänes 230 m pikkune lihke nõlvak. Liikunud setted asuvad kallaku alaosas, kus nad moodustavad joonelisust lisaks sellele, et on kuhjunud nõlva põhja külgsuunalistesse seljakutesse. Ülemise lihke nõlvaku kuju näib vastavat merepõhjale pandud geotekstiili servale, mis viitab, et nõlvakust alla geotekstiili peale vajus merre valatud liiv (joonis MB8). Vrakist umbes 100 m kagus algab lihke nõlvak, mis jätkub lõuna suunas umbes 170 m.

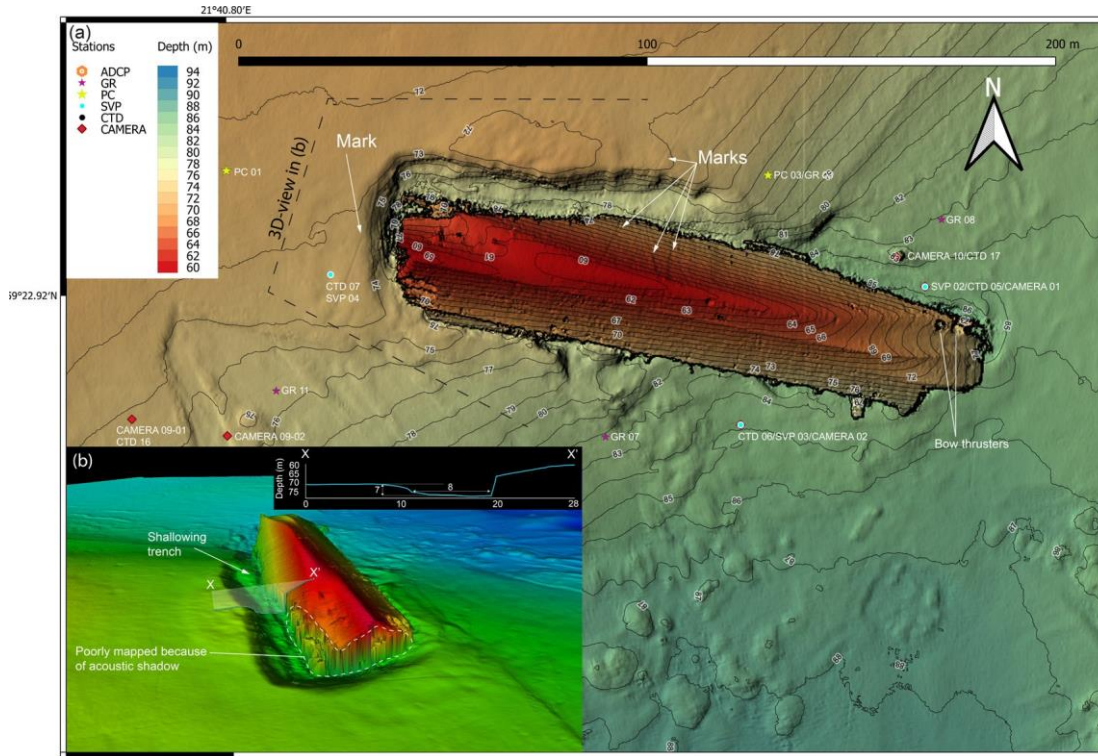
Nõlvaku all on märke ka massikaotatud materjalist. Lõpetuseks kaardistati parvlaevast Estonia umbes 300 m lõunas põikisuunaliste seljakute rodu, mis on tõenäoliselt moodustunud massikaotamisest. Nende seljakute kohal ei ole aga märke lihke nõlvakust.



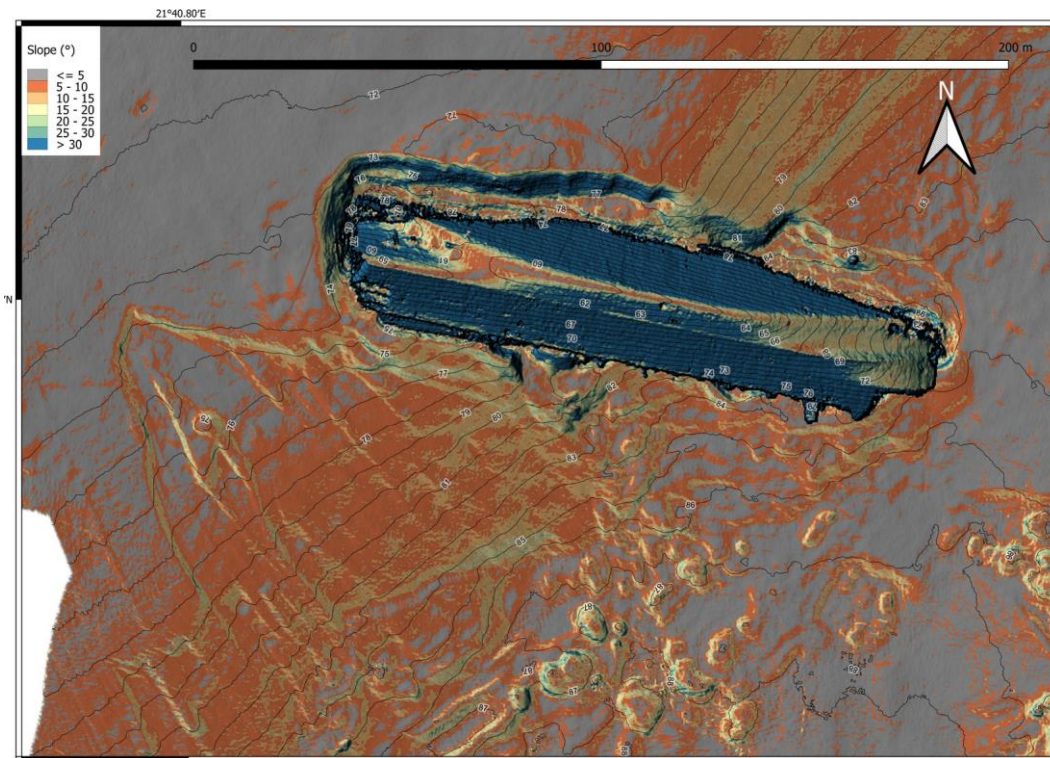
Joonis MB3. Kõrge resolutsiooniga ruudustikku kasutades koostatud batümeetiline kaart (ruudu suurus: 0,25 × 0,25 m), tuginedes 13. juulil lõpetatud üksikasjalikule paljukiirelise kajaloodiga uuringule. Saadud jaamad on näidatud kaardil. Kui jaamas kasutati rohkem kui ühte seadet, siis sümbolid kattuvad. Sellistel juhtudel viitavad sümbolite kõrval olevad sildid lõpuleviidud proovivõtule. Batümeetrial on selgelt nähtavad sundlābistussnõõrid ja massikaotuse märgid. Morfoloogiat kujutatakse täpsemalt koos tõlgendustega joonisel MB7. Selle kaardi suurem versioon on esitatud lisa 2.



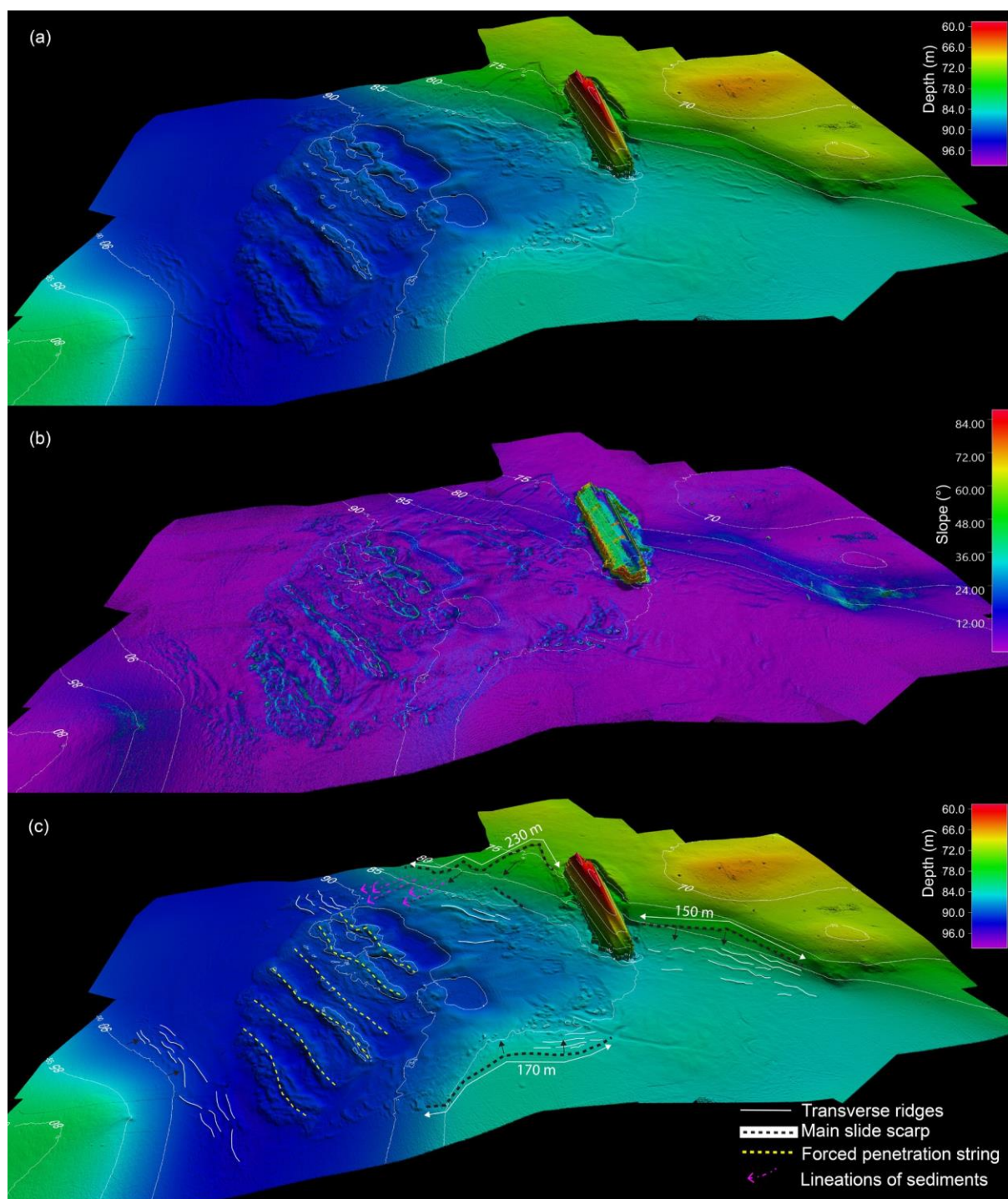
Joonis MB4. Kõrge resolutsiooniga ruudustikku kasutades koostatud kallaku kaart (ruudu suurus: $0,25 \times 0,25$ m), tuginedes üksikasjalikule paljukiirelise kajaloodiga uuringule. Selle kaardi suurem versioon on esitatud lisas 2.



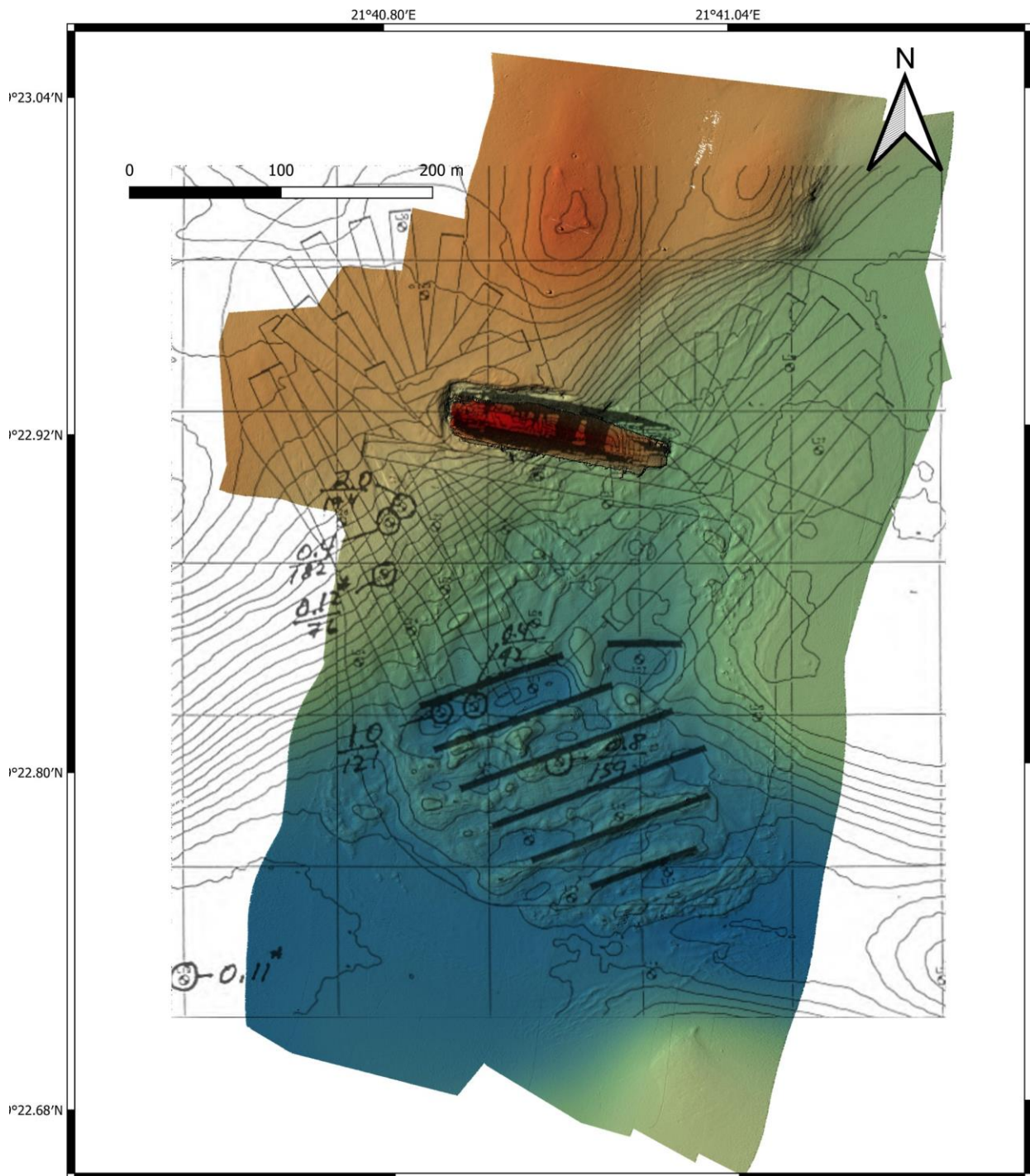
Joonis MB5. Parvlaeva Estonia vrakki kujutatakse üksikasjaliku paljukiirelise kõrge resolutsiooniga ruudustikuga (ruudu suurus: $0,25 \times 0,25$ m). (b) kujutab 3D-vaadet ahtri suunas. See vaade näitab selgelt vraki ääres moodustunud süvikut. Vraki kõige kehvemini kaardistatud osa on märgitud katkendliku joonega. Selle kaardi suurem versioon on esitatud lisa 2.



Joonis MB6. Kõrge resolutsiooniga ruudustikku kasutades koostatud kallaku kaart (ruudu suurus: $0,25 \times 0,25$ m), tuginedes üksikasjalikule paljukiirelise kajaloodiga uuringule. Selle kaardi suurem versioon on esitatud lisa 2.



Joonis MB7. 3D-vaated põhinevad üksikasjalikul uuringul ja on koostatud ruudustikul, mille ruudu suurus on $0,25 \times 0,25$ m. (a) Batümeetria. (b) Batümeetriast saadud kalle. c) Merepõhja morfoloogia tõlgendus. Selle illustratsiooni suurem versioon on esitatud lisas 2.

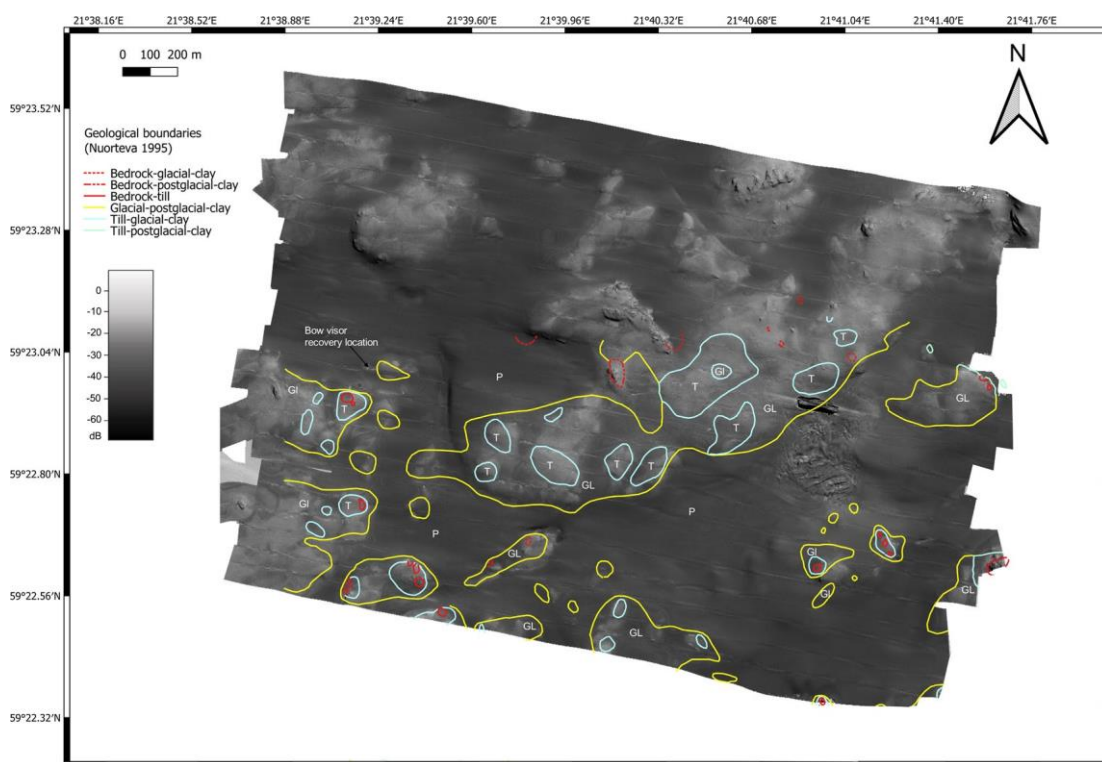


Joonis MB8. Delft Geotechnicsi (1996-09-19) kaart, mis kujutab sundlâbistusnôõride, geotekstiilide ja setete nâidiste asukohti, mille geotehnilisi parameetreid on môtõdetud paljukiirelise batümeetria pealekantud kihi pealt. See nâitab selgelt, et sundlâbistusnôõride joonis sobitub merepôhja morfoloogiaga. Geotekstiili lâäneosa, mis asub piki vraki lõunakülge, nâib vastavat batümeetrias nâhtavale lihke nõlvakule.

Paljukiirelise kajaloodi tagasihajumine

Paljukiirelise kajaloodi tagasihajumine annab teavet merepõhja omaduste kohta ning ühte ala saab võrrelda teisega, kui tagasihajumist radiomeetriliselt ja geomeetriliselt õigesti korrekteeritakse (Fonseca ja Calder, 2005). Projektis kasutatud tarkvara tööriist (QPS FMGT) rakendab paljukiirelise süsteemiga EM2040 kogutud tagasihajumise andmetele vastavad korrektsioonid. Pärast vajalikku töötlemist annavad tagasihajumise väärtused ülevaate setete tüübist ja omadustest, nagu karedus ja impedants (Lurton jt, 2018). Üldiselt esineb korrelatsioon kõrgete tagasihajumise väärtuste ja kõva merepõhja vahel.

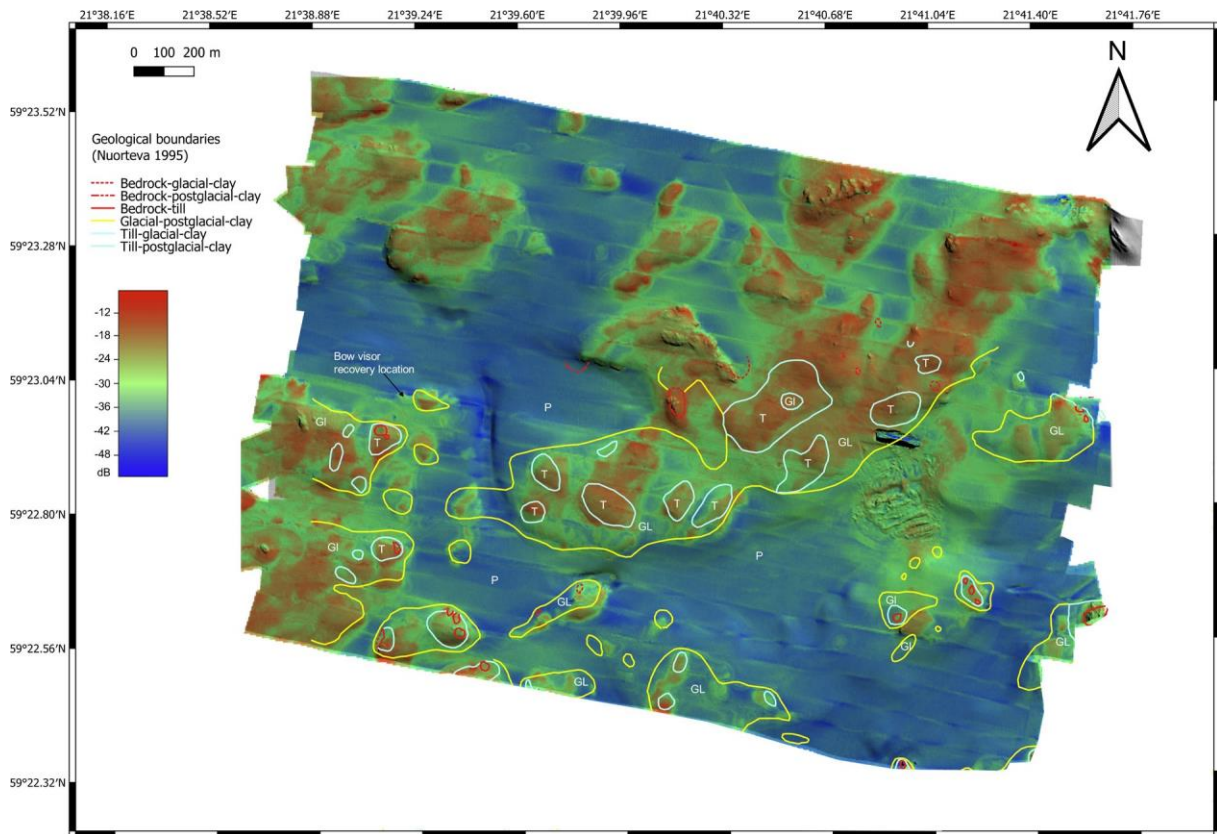
Kogu ala jaoks loodi tagasihajumise mosaiik resolutsiooniga $0,25 \times 0,25$ m (joonis MB9). Samas tuleb taas märkida, et uuringuala veesügavused ületavad 60 m, mille tagajärjel on paljukiirelise kajaloodi jalajäljed $> 0,4$ m, seega ei saa eeldada, et on võimalik tuvastada objekte, mis on $0,25 \times 0,25$ m suurusel (vt eelmist arutelu). Batümeetrilisi kõrgendikke seostatakse üldiselt kõrgete tagasihajumise väärtustega, samas kui sügavamad alad viitavad madalamatele väärtustele (joonis MB9). Nuorteva (1995) koostatud geoloogilise kaardi piiride ühitamisel nähtub, et tagasihajumise muster vastab üldjoontes mõnede täheldatud geoloogilistele piiridele, ehkki on selge, et tagasihajumise mosaiik pakub palju nüansirohkemat vaadet tänu täielikule ruumilisele katvusele. Vähestel andmetel põhinev geoloogiline kaart annab palju üldisema ülevaate ja detailid jäetakse kõrvale. Parvlaev Estonia toetub liustikujärgse ja liustikulise savi piirile, millele viitab harilikult selge üleminek madalamatelt kõrgematele tagasihajumise väärtustele (joonis MB9). See on veelgi paremini nähtav tagasihajumise mosaiigil, kus ruudustiku 4×4 m ruutude jaoks on arvutatud keskmised väärtused (joonis MB10). Enamik geoloogilisel kaardil moreeni või aluspõhja kivimina kujutatud alasid langevad kokku tagasihajumisega, ehkki mõned näivad asuvat nihkega.



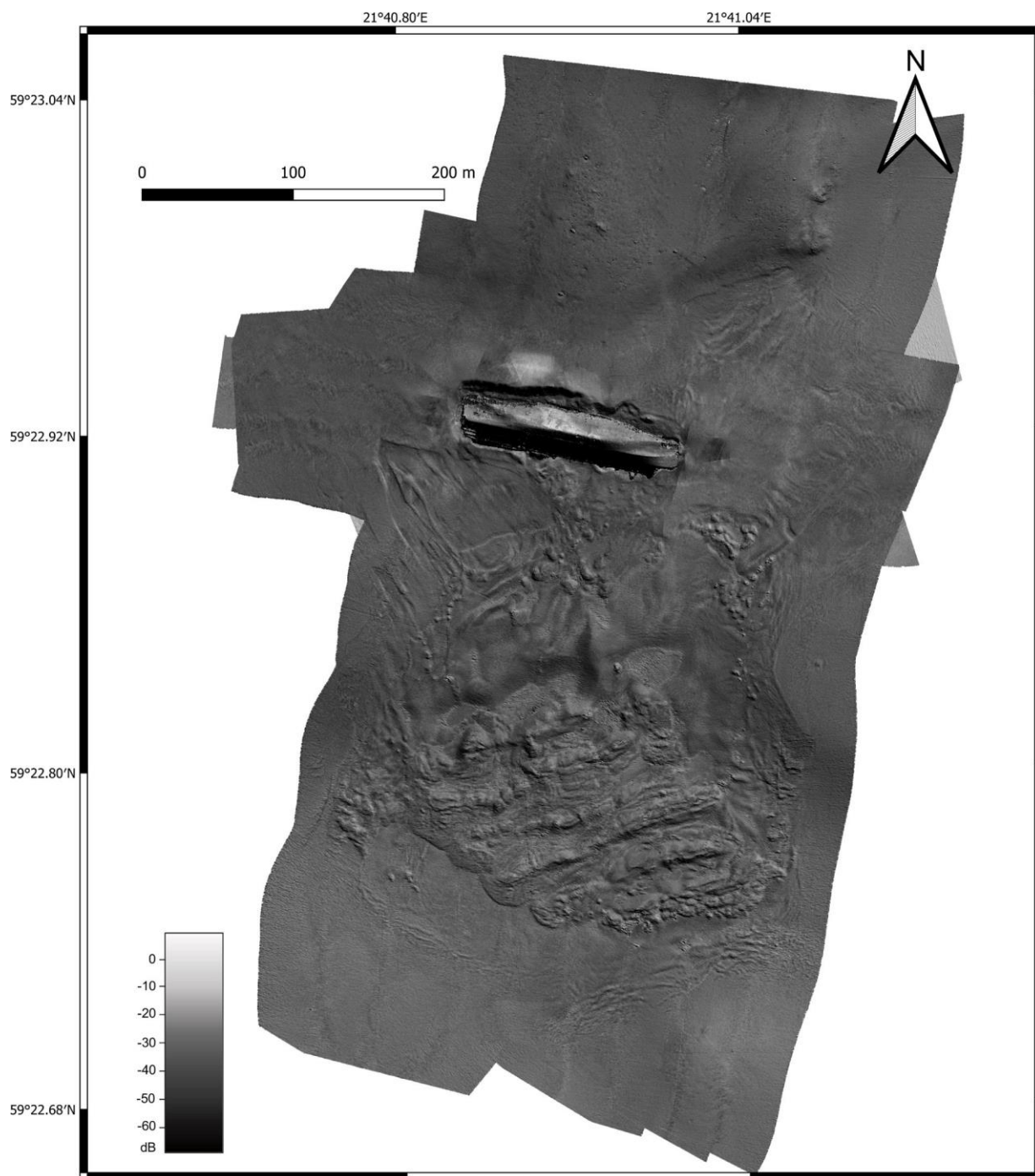
Joonis MB9. Tagasihajumise mosaiik loodud ruudustiku ruudu suurusega $0,25 \times 0,25$ m, kasutades ülevaatliku uuringu paljukiirelise kajaloodi andmeid. Nuorteva (1995) koostatud kaardi geoloogilised piirid on tuletatud. Tähed viitavad geoloogilisel kaardil näidatud merepõhja setetele: P = liustikujärgne savi; GL = liustikuline savi; T = moreen. Nuorteva (1995) kaardil on punasega märgitud aluspõhjajakivimite alad. Batümeetriat kasutatakse varjustuse tekitamiseks kirdest, et saada paremat aimu maastikust. Selle puudus on aga kujutise tumendamine kõrgele väljaulatuvate objektide taga, näiteks piki parvlaeva Estonia lõunakülge. Selle kaardi suurem versioon on esitatud lisa 2.

Teatud määral võis see olla tingitud geoloogilise kaardi vales registreerimisest, mis ilmneb parvlaeva Estonia asukoha võrdlemisel. Samas ei ole nihked mõnedes suundades süsteemsed, mis viitab pigem probleemidele proovide ja geofüüsikaliste andmete positsioneerimisega, mida kasutati geoloogilise kaardi alusena.

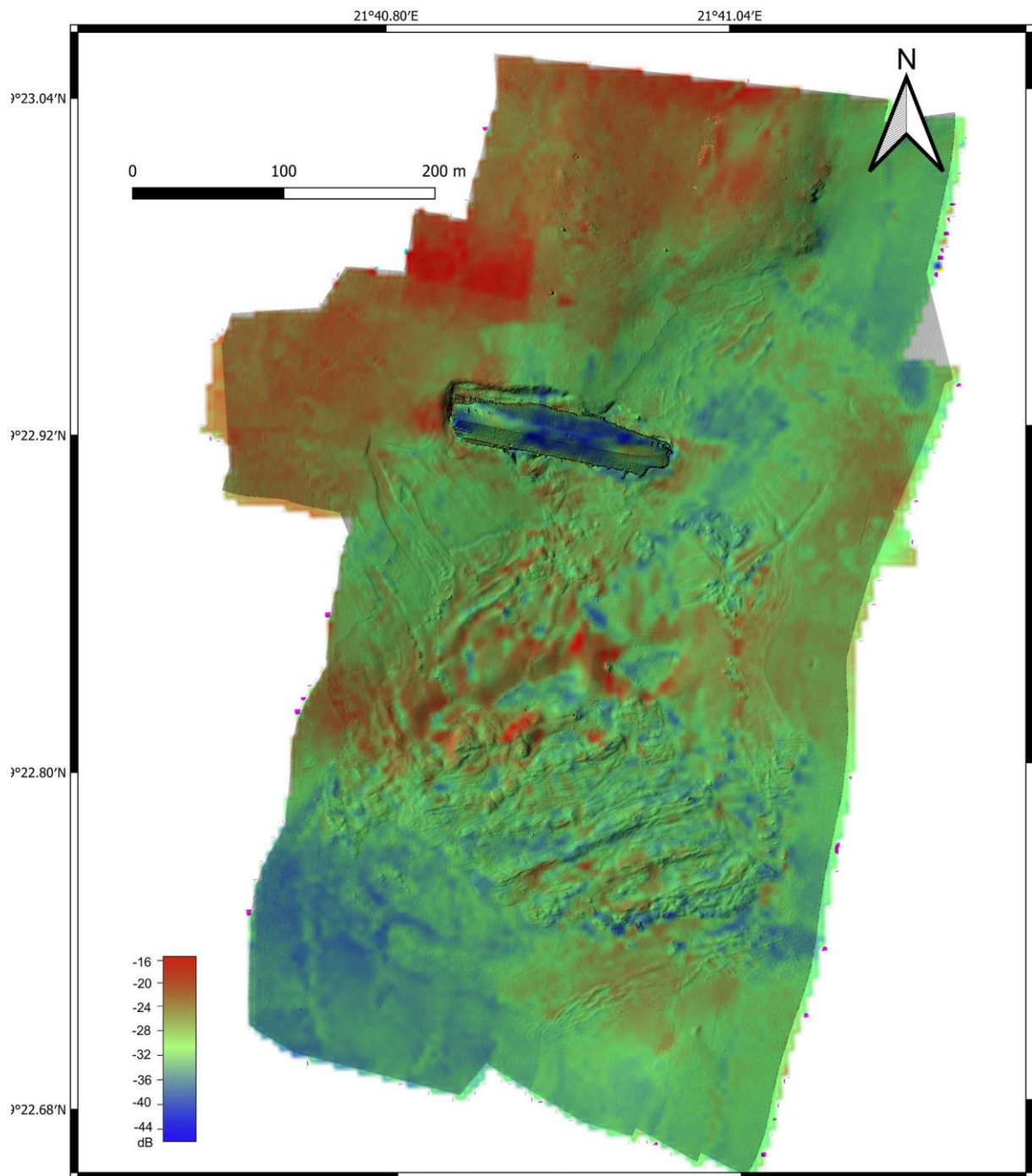
Üksikasjaliku uuringuga saadi parvlaeva Estonia läheduses kõrgeima kvaliteediga tagasihajumise andmeid (joonis MB11). Selles piirkonnas on võimalik võrrelda setete pinnaproove ja kaameraga tehtud vaatlusi tagasihajumisega ning seeläbi kalibreerida geoloogilist tõlgendust. Seda tehakse järgnevalt eraldi jaotises, kus kirjeldatakse proove ja kaameraga tehtud vaatlusi. Käesolevas jaotises joonistel MB11 ja MB12 esitatud kahel kaardil ei ole ületrükitud lisateavet, et vältida liigsete üksikasjade esitamist (vt suuremad kaardid lisades). Üksikasjalik tagasihajumine annab lisateavet massikaotamise kohta, mida käsitleti merepõhja morfoloogia ja joonisel MB7 kujutatud paljukiirelise batümeetria kontekstis. Setete deformatsiooni tunnused on natuke selgemini nähtavad sundlääbistuspõõsdest edelas, mida ümbritsevad lihked ja väiksemad massikaotamise märgid. Lisaks toob tagasihajumine esile, et parvlaevast Estonia läände kulgev suur lihe on teiste lihetega võrreldes oma olemuselt teistsugune. Võib väita, et selle lihe ainulaadne välimus viitab võimalusele, et see koosneb täielikult vette kallatud liivast, mis libises geotekstiili ülaosast kallakut mööda alla. Parvlaevast Estonia põhja jäävat ala iseloomustavad mitmed merepõhjal ülespoole ulatuvad eritunnused, mida analüüsitakse täpsemalt allpool koos kaameraga tehtud vaatlustega, mis olid neist mitmele suunatud.



Joonis MB10. Tagasihajumise mosaiik näitab keskmist tagasihajumist 4×4 m ruudustiku ruutudes. Joonisel MB9 on esitatud geoloogiliste piiride kirjeldus. Batümeetriat kasutatakse varjustuse tekitamiseks kirdest, et saada paremat aimu maastikust. Selle puudus on aga kujutise tumendamine kõrgele väljaulatuvate objektide taga, näiteks piki parvlaeva Estonia lõunakülge. Selle kaardi suurem versioon on esitatud lisas 2.



Joonis MB11. Tagasihajumise mosaiik, mis on koostatud $0,25 \times 0,25$ m suuruste ruudustiku ruutudega. Batümeetriat kasutatakse varjustuse tekitamiseks kirdest, et saada paremat aimu maastikust. Selle kaardi suurem versioon on esitatud lisas 2.

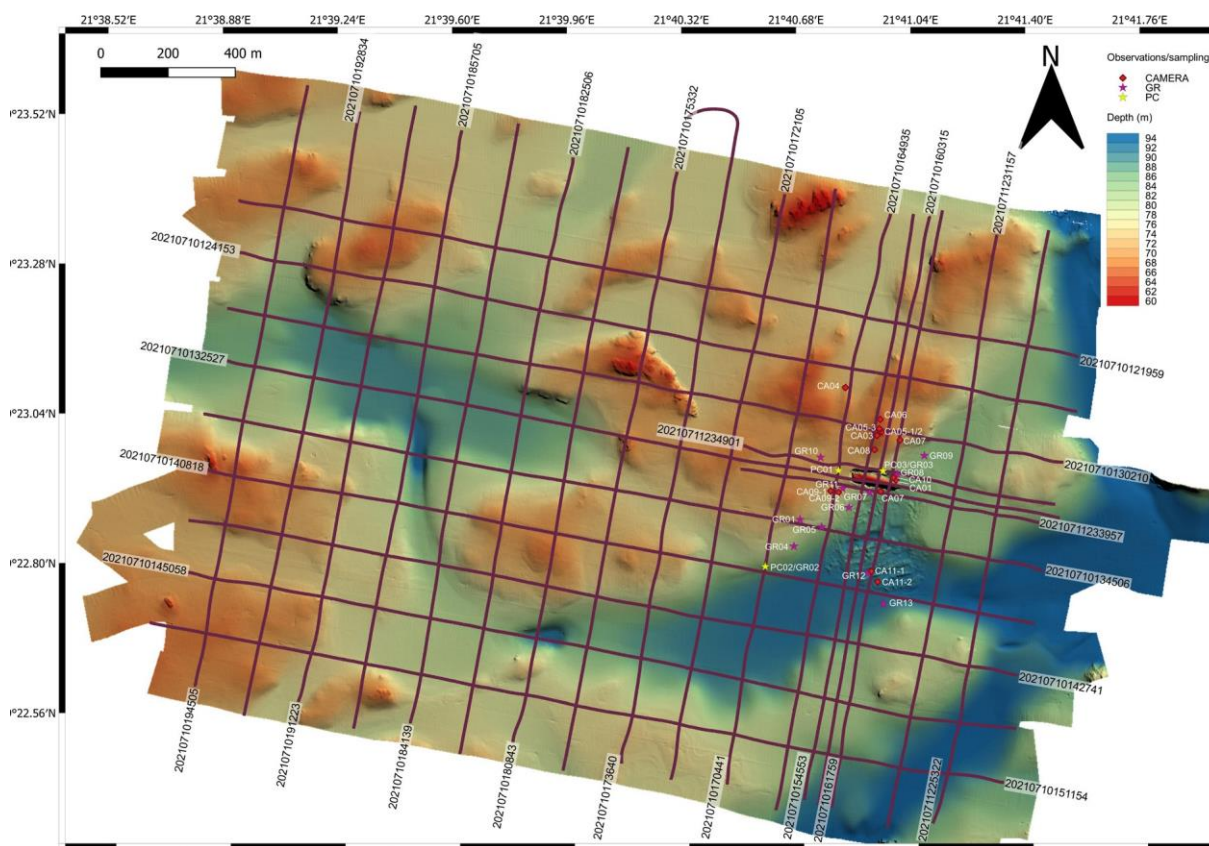


Joonis MB12. Tagasihajumise mosaiik näitab keskmist tagasihajumist, mis arvutati 2×2 m ruudustiku ruutudes. Batümeetriat kasutatakse varjustuse tekitamiseks kirstest, et saada paremat aimu maastikust. Selle kaardi suurem versioon on esitatud lisas 2.

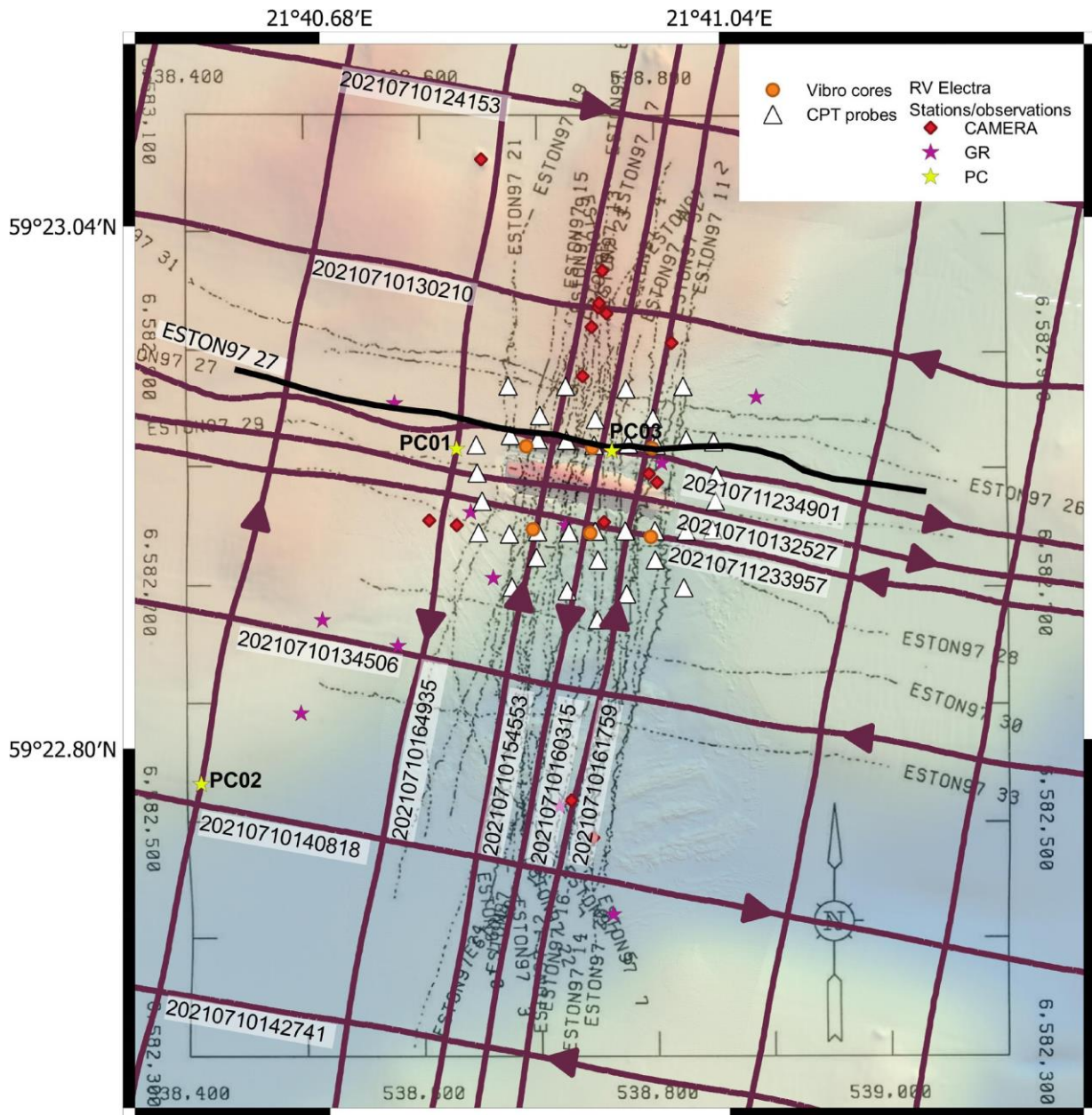
Merepõhja profileerimine

Merepõhja profiilide andmed hangiti 10. juulil 2021 umbes 160 m vahega nii ida-lääne kui põhja-lõuna suunal, et moodustada uuringuala katvat korrapäraselt ruudustikku tihedamate 25–40 m vahedega vraki kohal (joonis SB1). Merepõhja profiilid annavad akustilise ülevaate setete stratigraafiast akustilise keldri (AB) kohal, mis koosneb tõenäoliselt kas moreenist või aluspõhjakiivimite, mida pole võimalik kindlalt akustiliselt eristada. See uuring on keskendunud AB tuvastamisele, et koostada setete paksus, mida saab kasutada hindamiseks, kui stabiilne parvlaev Estonia merepõhjal on. Aluspõhja kivimite lähedus merepõhjale oli samuti üks põhiküsimusi, millele selles eeluuringus vastuseid otsiti. Kõik saadud merepõhja profiilid on esitatud lisas 3, nii AB tõlgendusega kui ilma. Vertikaalset skaalat kujutatakse edasi-tagasi liikumisaja jaoks millisekundites tõlgendamata profiilide korral ja meetrites allpool veepinda tõlgendatud profiilide korral. Millisekundite teisendamiseks sügavusse kasutati heli levimiskiirust 1450 m/s, et sügavusskaala oleks paljukiirelisele batümeetriale nii lähedane kui võimalik. Selles jaotises esitatakse ja analüüsitakse lühidalt stratigraafiat. Merepõhja teemat käsitletakse uuesti allpool, kui esitatakse ja analüüsitakse koostatud setete paksuse mudelit.

Merepõhja uuringu viis läbi Madalmaade rakendusliku geoteaduse instituut TNO 1997. aastal (Mesdag, 1997). Kasutati Edgetechi tirelimpulsijadaga sonarit koos SB-408 järelveetava sonarialusega, et edastada 1–6 kHz 40 ms pikkust impulssi. Halb ilm takistas nende uuringut, muutes tirelimpulsijadaga sonari vedamise mööda soovitud uuringuline keeruliseks ja tuletades püstõotsumise artefakte. Kokku viidi lõpule 26 uuringuliini põhja-lõuna suunal ja 7 uuringuliini ida-lääne suunal (joonis SB2). Kõik lõuna-põhja suuna profiilid ristusid parvlaeva Estonia kerega peale ühe, samas kui ristuti vaid ühe ida-lääne suuna uuringuliiniga. Mesdagi (1997) aruandes järeldatakse, et vraki lähedal saab usaldusväärselt kaardistada moreenpinda. Nende üldine setete järjestuse tõlgendus viitab sellele, et osaliselt kihiline muda ja savi toetuvad liustikulisele moreenile, mis koosneb üldiselt peeneteralisest liivast, savist, kruusast ja munakividest.



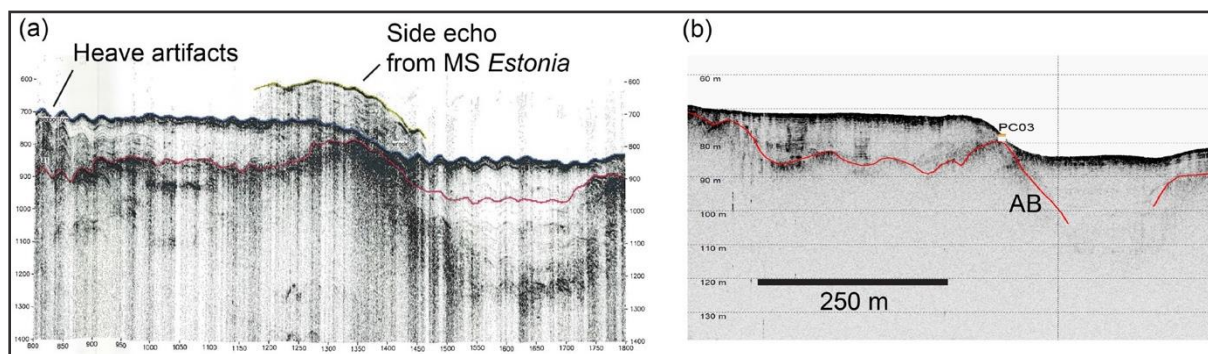
Joonis SB1. Merepõhja profiilid kaardistati 10. juulil 2021 EL21-Estonia uuringu käigus uurimislaevaga Electra. Selle kaardi suurem versioon on esitatud lisas 3.



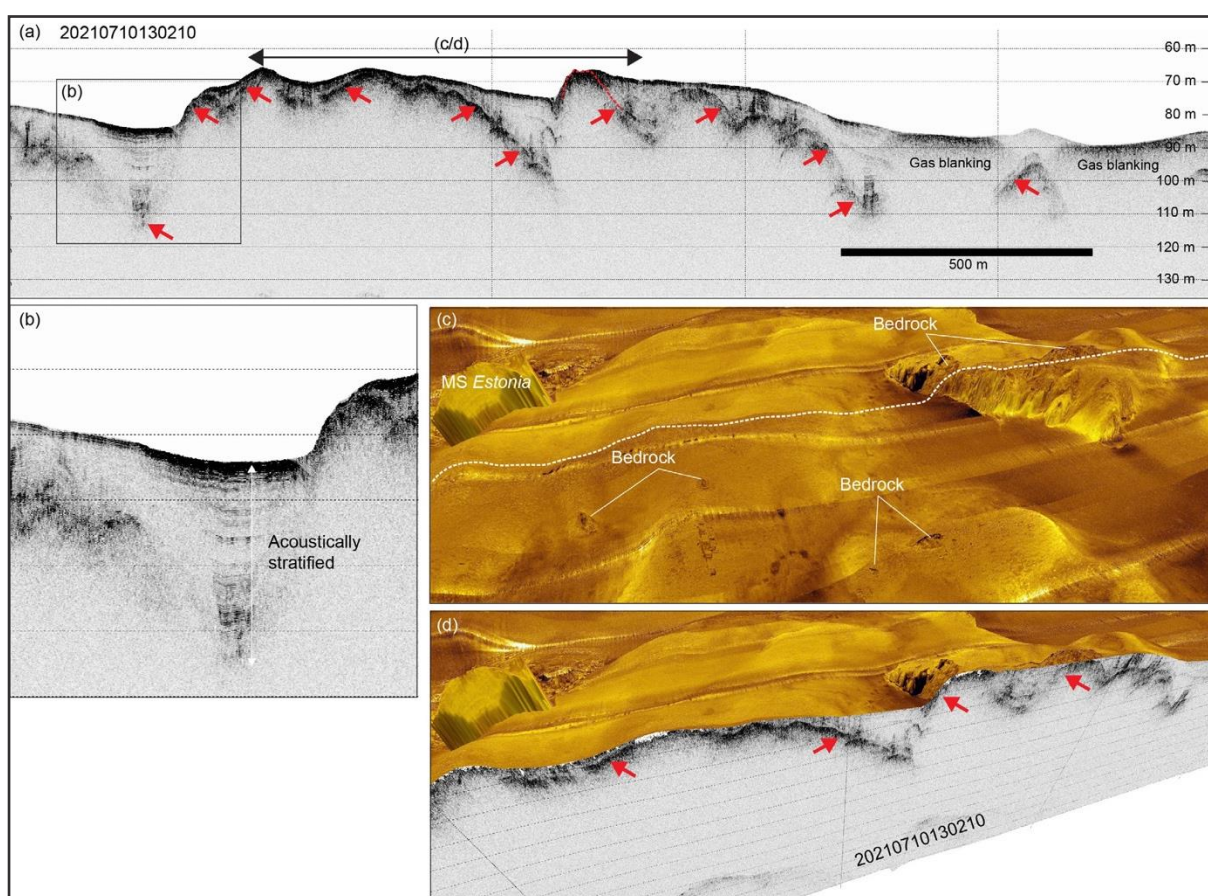
Joonis SB2. Kaart Mesdagi (1997) aruandest „Seismic survey at Estonia site“ („Seismiline uuring Estonia asukohas“) (1997), milles on toodud välja Madalmaade rakendusliku geoteaduse instituudi TNO 1997. aastal kaardistatud merepõhja profiilid. Kaart on tehtud poolläbipaistvaks ja kantud selle töö käigus saadud paljukiirelise batümeetria peale, et näidata parvlaeva Estonia asukohta. Uurimislaevaga Electra tehtud välitööl saadud merepõhja profiilidele viidatakse pruunide joontega ning lisaks on toodud välja kolbpuuride ja gravitatsiooniliste pinnasepuuride ning kaamera vaatluspaikade asukohad. Lisaks on näidatud Delfi Geotechnicsi 1996. aasta uuringute vibropuuride ja CPT (koonuspenetratsiooni testi) sondide asukohad.

Märgiti kihilise struktuuriga savi kohalolu ning leiti, et see võis ladestuda moreenile hilisjäajal. Merepõhjas tõlgendatud moreenpinda võrreldi (ja vajadusel kohandati) Delft Geotechnicsi 1996. aastal tehtud koonuspenetratsiooni testi (CPT) sondide tulemustega. Mesdagi (1997) tõlgendatud „moreenpind” vastab kahtlemata meie määratletud AB-le (joonis SB3). Kuna meie uuring hõlmab aga palju suuremat ala, oleme suutnud jälgida ABd mõnes profiilis kuni merepõhjani, kust leidsime külgvaatesonari ja tagasihajumise kujutistelt aluspõhjakevite paljandeid (joonis SB4). See kinnitab, et me ei saa kindlalt eristada, kas AB peegeldub aluspõhjakevite või aluspõhjakevite olemalt moreenilt. Leiame oma profiilidelt akustiliselt kihistunud elemente, mis viitavad suure tõenäosusega kihistunud liustikulisele savile (joonis SB4). On leitud, et selles piirkonnas täidab madalamaid ladestusalasid liustikujärgne savi, mille kõige ülemistes osades on suur orgaanilise aine sisaldus, ning Mesdag (1997) viitab neid elemente kujutatavates profiilides lukustunud gaasile. Lisaks leidsime lukustunud gaasi mitmes profiilis piki sügavamaid ladestusalasid, mis on täidetud pehmemate setetega (joonis SB4). Lukustunud gaas ei võimalda mõnedes meie profiilides ABd välja selgitada ning seega ka neis alades setete paksust lõplikult hinnata. Neis kohtades, kus seda esineb, on setete paksus harilikult üsna suur, > 20 m, mis on vastavuses Mesdagi (1997) leidudega parvlaevast Estonia lõunas asuva ladestusala kohta.

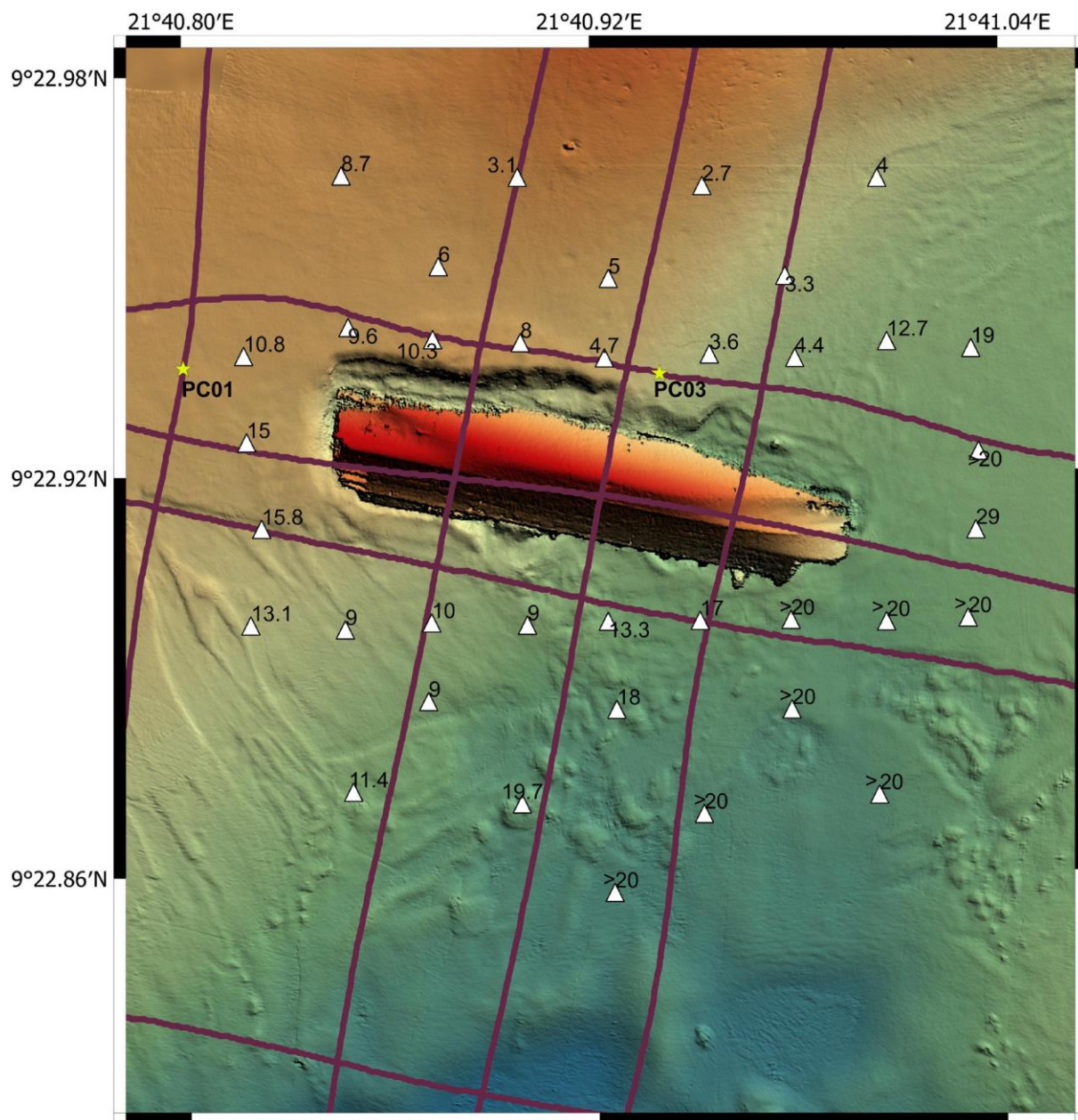
On tõstatatud küsimus, kas parvlaeva Estonia keskosa all merepõhjas esineb aluspõhjakevite või moreeni paljandeid või kas need on merepõhjale lähedal. Delft Geotechnicsi 1996. aasta uuringus leiti vraki keskosast põhjas minimaalne setete paksus tahke moreeni kohal. Kaks nende CPT-sondi, mis paiknesid vrakist ligikaudu 18 ja 25 m põhja pool, mõõtsid setete paksuseks vastavalt 4,7 ja 3,6 m (joonis SB5). Meie leitud merepõhja profiilid parvlaeva Estonia läheduses on nende tulemustega kooskõlas, ehkki vrakile lähemal asuvad profiilide osad viitavad, et AB võib olla merepõhjale veelgi lähemal või moodustada paljandi (joonis SB6). Üldist hinnangut, et vrakk toetub kõvale pinnale, toetavad meie merepõhja profiilid. Otse kere all olevat geoloogiat on aga keeruline määratleda, kuna kere ise häirib akustilisi salvestisi. EL21-Estonia ekspeditsiooni käigus tehtud allveeroboti uuringud suudavad aga anda lisateavet selle kohta, kas aluspõhjakevite või moreen ulatuvad pinnale piki kere keskosa põhjasektsiooni, ja neid kirjeldatakse allpool.



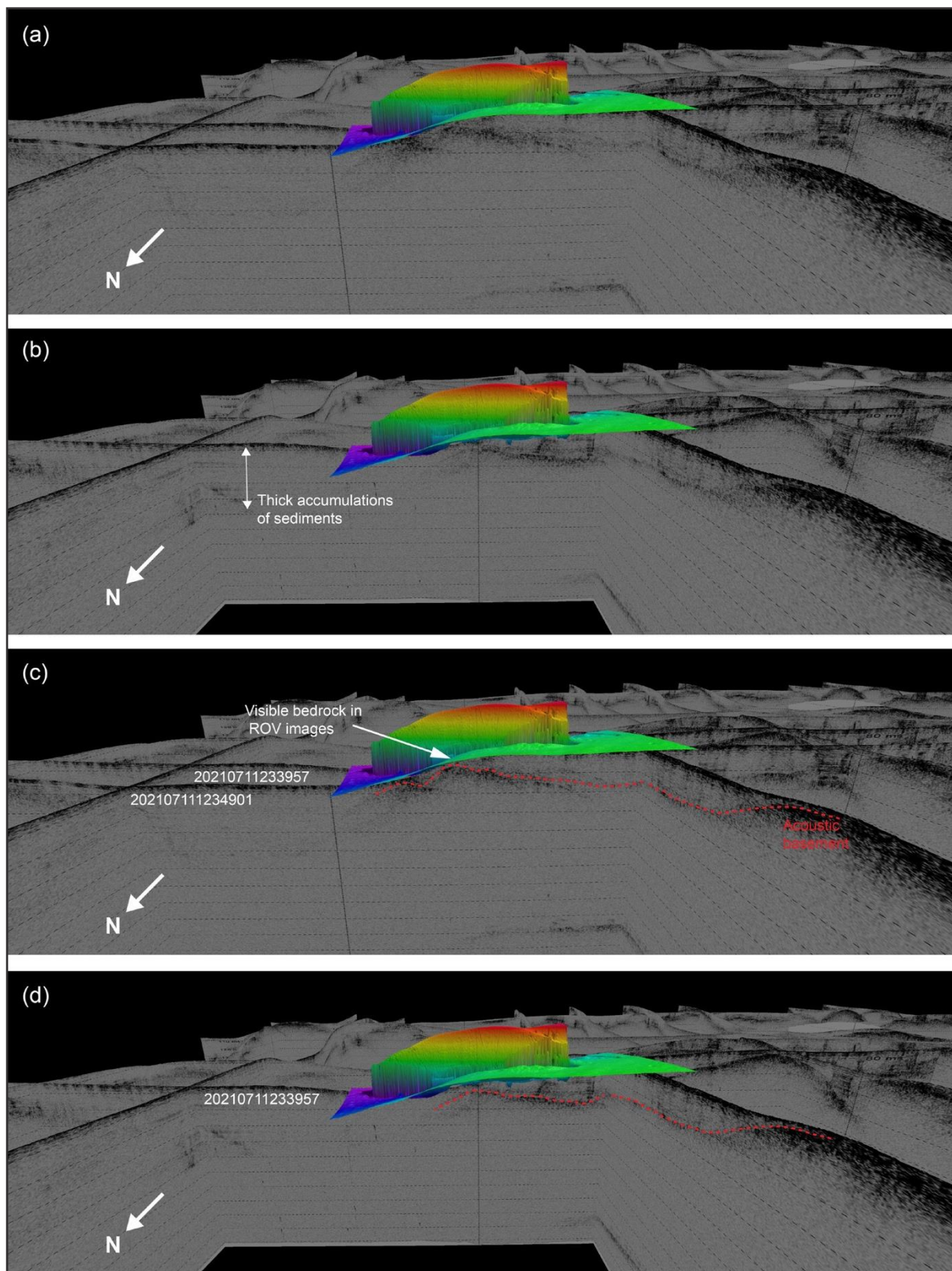
Joonis SB3. Merepõhja profiil ESTON97 27, mille kaardistas Madalmaade rakendusliku geoteaduse instituut TNO 1997. aastal (a). See profiil kulgeb mööda 20210711234901 (b) rada, umbes 0–25 m nihkega põhja poole. Profiili asukohad on näidatud joonisel SB2. Mesdagi (1997) järeldatud moreenpinna tõlgendusele on viidatud asukohas (a) punase joonega, samas kui meie akustilise keldri tõlgendusele on viidatud asukohas (b).



Joonis SB4. a) Merepõhja profiil 20210710130210 kujutab akustiliselt kihistunud setteid, mis koosnevad tõlgenduste kohaselt kihilisest liustikulisest savist ja kõige pealmises osas kihilisest liustikujärgsest jütja savist, lukustunud gaasi ning akustilise keldri (AB, punased nooled) tõlgendust. b) Suurendatud osa akustiliselt kihistunud setetega. (c/d) Pildindamine külgsuunas profiili 20210710130210 sektsiooni kohal, kus asuvad merepõhjal paljandid. Seda teavet kasutati meie AB tõlgenduses. Asukohas (d) on pildindamine külgsuunas lõigatud piki profiili 20210710130210.



Joonis SB5. CPT-sondideist tuletatud setete paksused, mille koostas Delft Geotechnics aastal 1996.

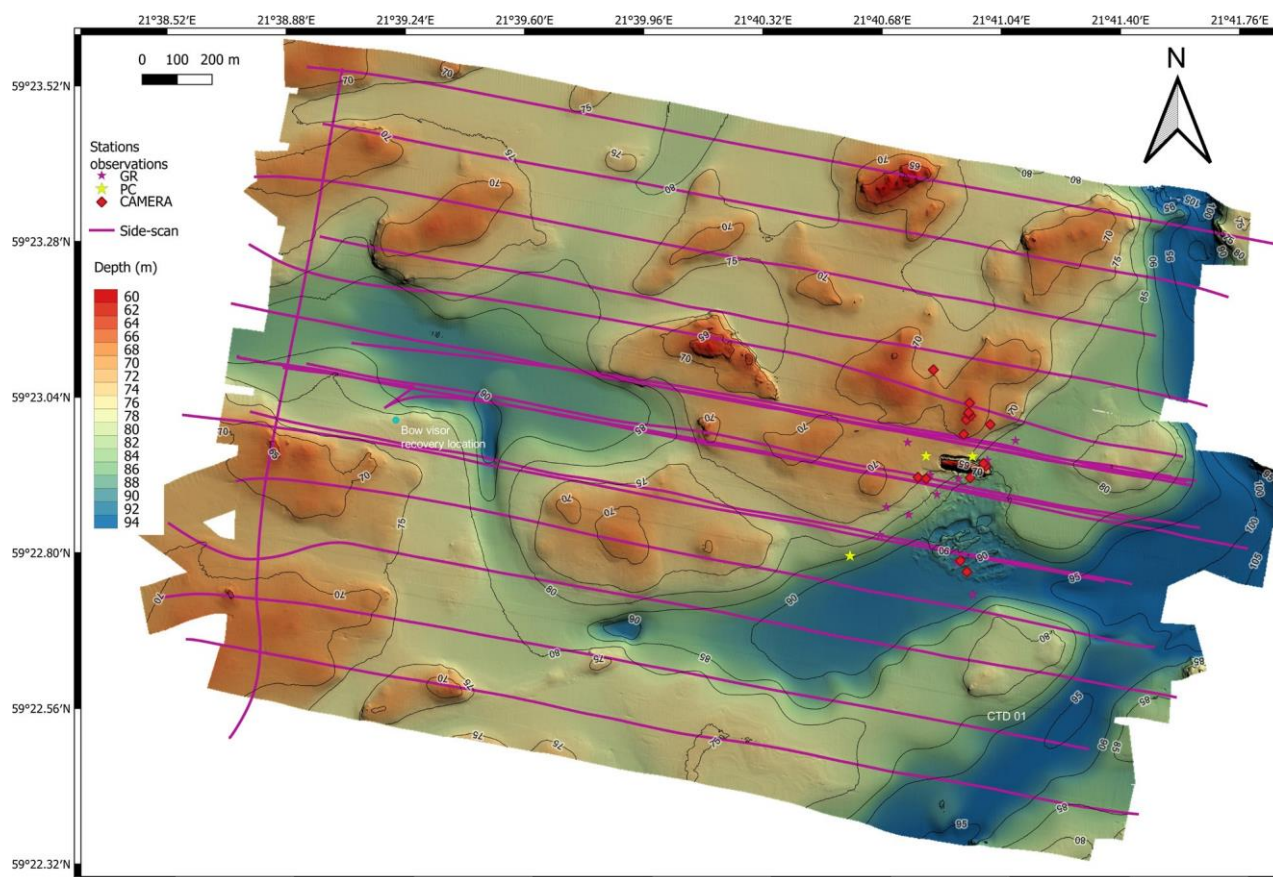


Joonis SB6. Uurimislaevaga Electra koostatud merepõhja profiili 3D-visualiseerimine parvlaev Estonia lähedal, mida näidatakse selle õiges asukohas paljukiirelise batümeetriaga. Vrakist põhjapoolse kõige lähedasemal profiilil 20210710130210 on näha, et AB on merepõhja lähedal või moodustab isegi paljandi.

Külgvaatesonar

Selles jaotises esitatakse ülevaade külgvaatesonari tulemustest, keskendudes üldisele merepõhja geoloogiale ehk setete koostisele ja aluspõhjajakivimitele. Külgvaatesonari kirjetest tuvastatud objekte, mida uuriti kaameraga, kirjeldatakse täpsemalt jaotises „Setete proovivõtt, põhja analüüs ja ankurdamine“.

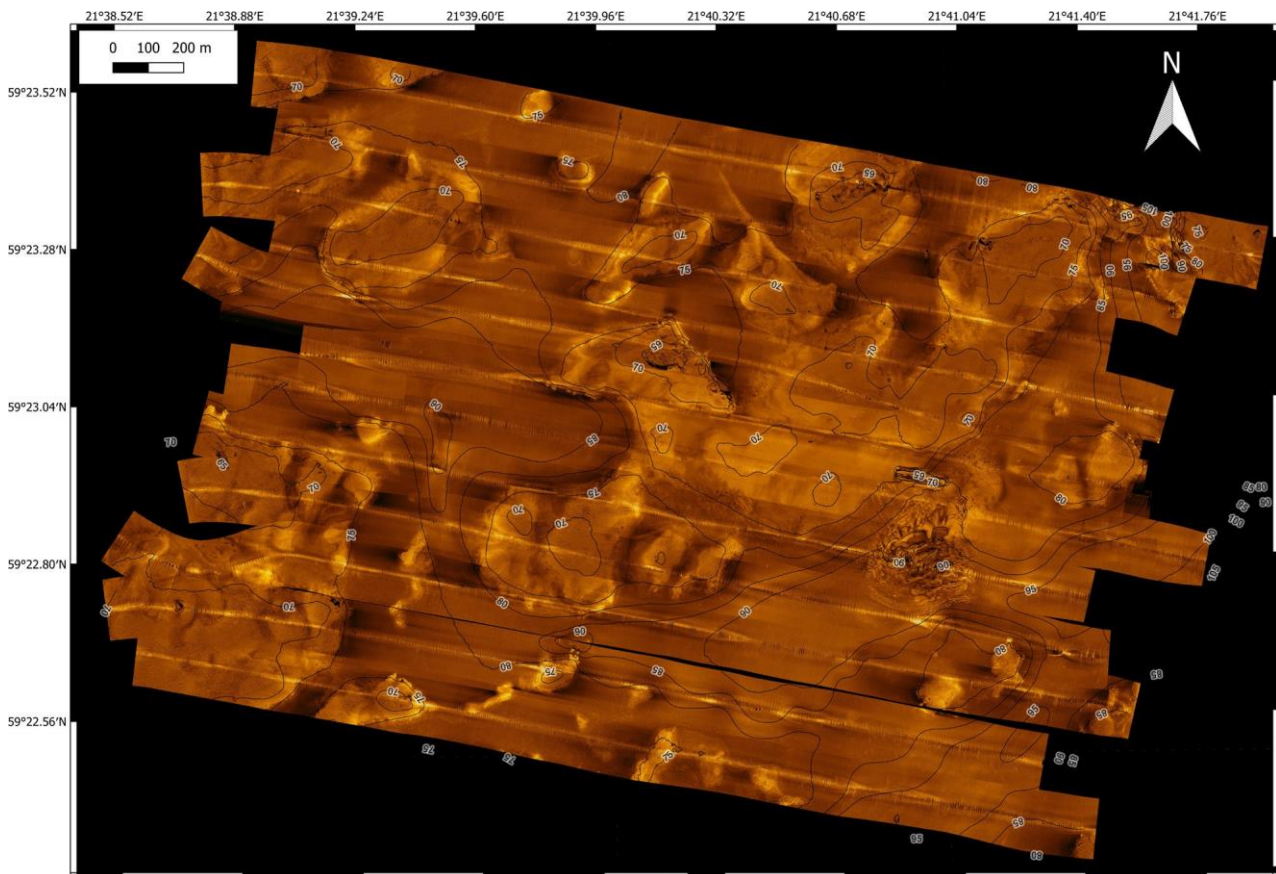
Külgvaatesonari uuringul esines takistusi, kuna järelveetavat sonarialust ei saanud sujuvalt tõsta ega langetada, et säilitada optimaalset püksiirkõrgust merepõhja kohal, st umbes 10–20% ühe kanali horisontaalsest vahemikust. Kuna meie koguvahemikuks määrati 2100 m (100 m katvus kummalgi küljel), peaks järelveetava sonarialuse kõrgus merepõhjast olema umbes 10–20 m. Seda ei suudetud vintimisprobleemide tõttu alati säilitada. Selle asemel, et järelveetavat sonarialust vintsiga tõsta ja langetada, pidime muutma selle kõrgust laeva kiiruse muutmisega; järelveetav sonarialus läheb aeglasemal kiirusel sügavamale ja vastupidi. Kogu uuringuala kaardistati ida-lääne suunaliste külgvaatesonari uuringuliinidega, mille vahekaugus oli umbes 160 m (joonis SS1). Läänepoolses uuringualas kulges üks uuringuliin lõuna-põhja suunal. Esimestes uuringuliinides esines probleem parempoordi kanalis hea fookuse säilitamisel, mis viitab sellele, et joonisel SS2 kujutatud 20 × 20 cm piksliga kogu mosaiigi loomiseks kasutati ainult nende uuringuliinide vasaku parda kanalit. Lisaks koostati kõrgema resolutsiooniga 10 × 10 cm mosaiik üksikasjalikumate kaartide jaoks.



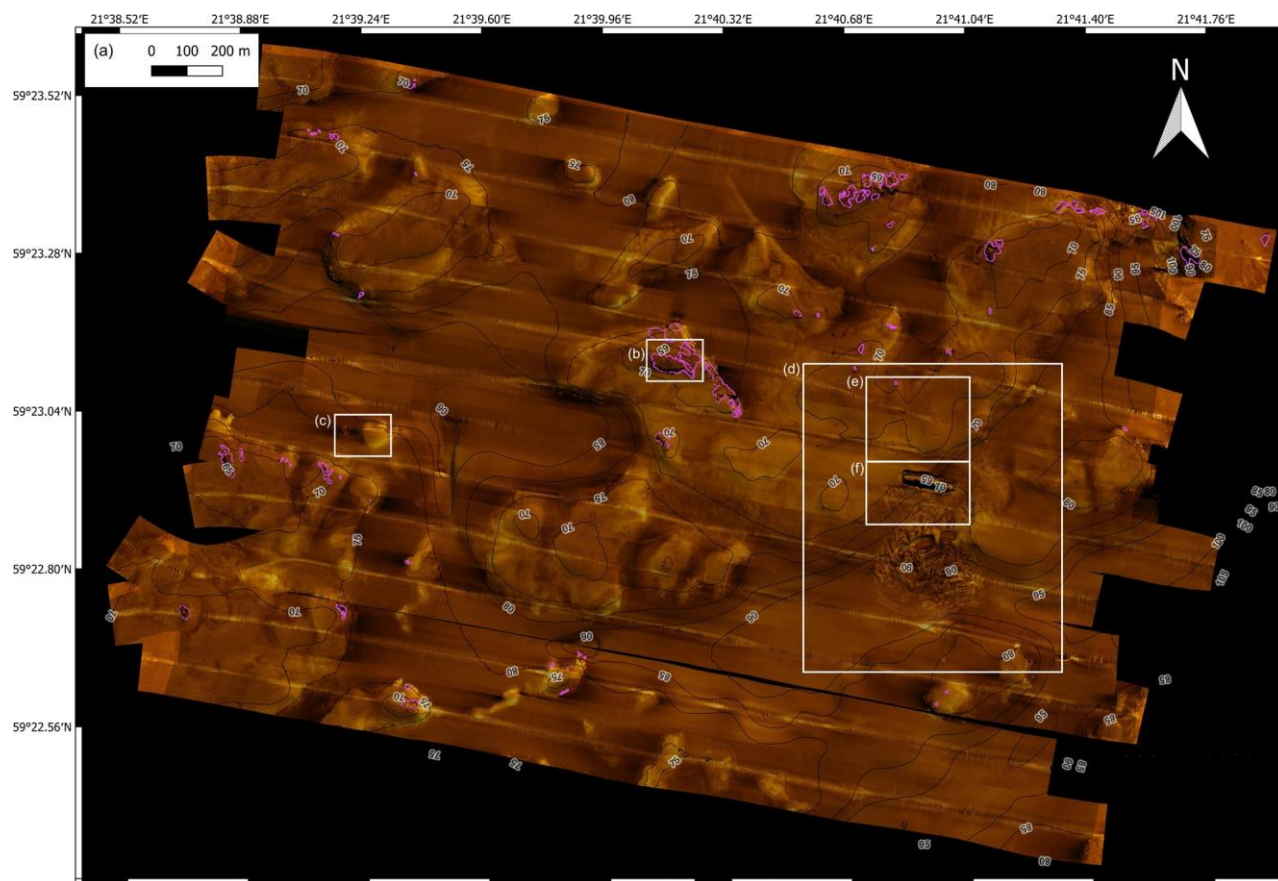
Joonis SS1. Külgvaatesonari uuringu raja liinid. Mitmed kulgesid üle parvlaeva Estonia. Selle kaardi suurem versioon on esitatud lisan 4.

Täheledatakse üldist mustrit, kus batümeetrilistel kõrgendikel on suur peegeldamisvõime ja sügavamatel aladel väiksem peegeldamisvõime (joonis SS2), st sarnane tulemus sellega, mis leiti tagasihajumise andmetes. Mitmes asukohas tuvastati alad, kus merepõhjas esineb aluspõhjajavimite paljandeid (joonised SS3 ja SS4). Need alad digiteeriti, et neid kasutada koos AB tõlgendamise ja merepõhja profiilides selleks, et koostada allpool eraldi jaotises kirjeldatud ruudustikuga kaetud setete paksuse mudel. Külgvaatesonariga pildindamisest on näha ka rahne ja muid objekte, mida käsitletakse täpsemalt kaamera vaatlusi kirjeldavas jaotises. Selle koha lähedal, kust JAICi lõpparuande kohaselt leiti parvlaeva Estonia vöörivisiir, on suure peegeldamisvõimega ala, kus merepõhja geoloogia moodustab suure tõenäosusega moreeni ja kus võib esineda rahne (joonis SS5). Külgvaatesonari kujutistel ei ole merepõhjal selgelt näha vöörivisiiri jäljendit. Eeldatakse, et teavitatud koordinaadid viitavad süsteemile WGS84. Vöörivisiiri asukoha koordinaatidest teavitas ka Soome merevägi Soome KKJ daatumis. Need koordinaadid teisendati siin süsteemi WGS84 ja neid kujutatakse kaardil joonisel SS5. Siin on külgvaatesonari kujutisel näha detaile, mis võib olla vöörivisiiri jäljend merepõhjal.

Parvlaeva Estonia vrakki ületati mitu korda nii parem- kui vasakparda poolelt veidi erinevate järeleveetava sonarialuse tasemetega. Parvlaev Estonia ulatub merepõhjust kuni 16 m kõrgusele välja, mis muutis vraki pildindamise külgvaatesonariga keeruliseks. Ükski külgvaatesonariga tehtud vraki kujutis ei ole täiesti selge, peamiselt ohtra külgekaja tõttu, ehkki on võimalik eristada mõningaid detaile, nagu rõdud ja mõned akenderead (joonis SS6).



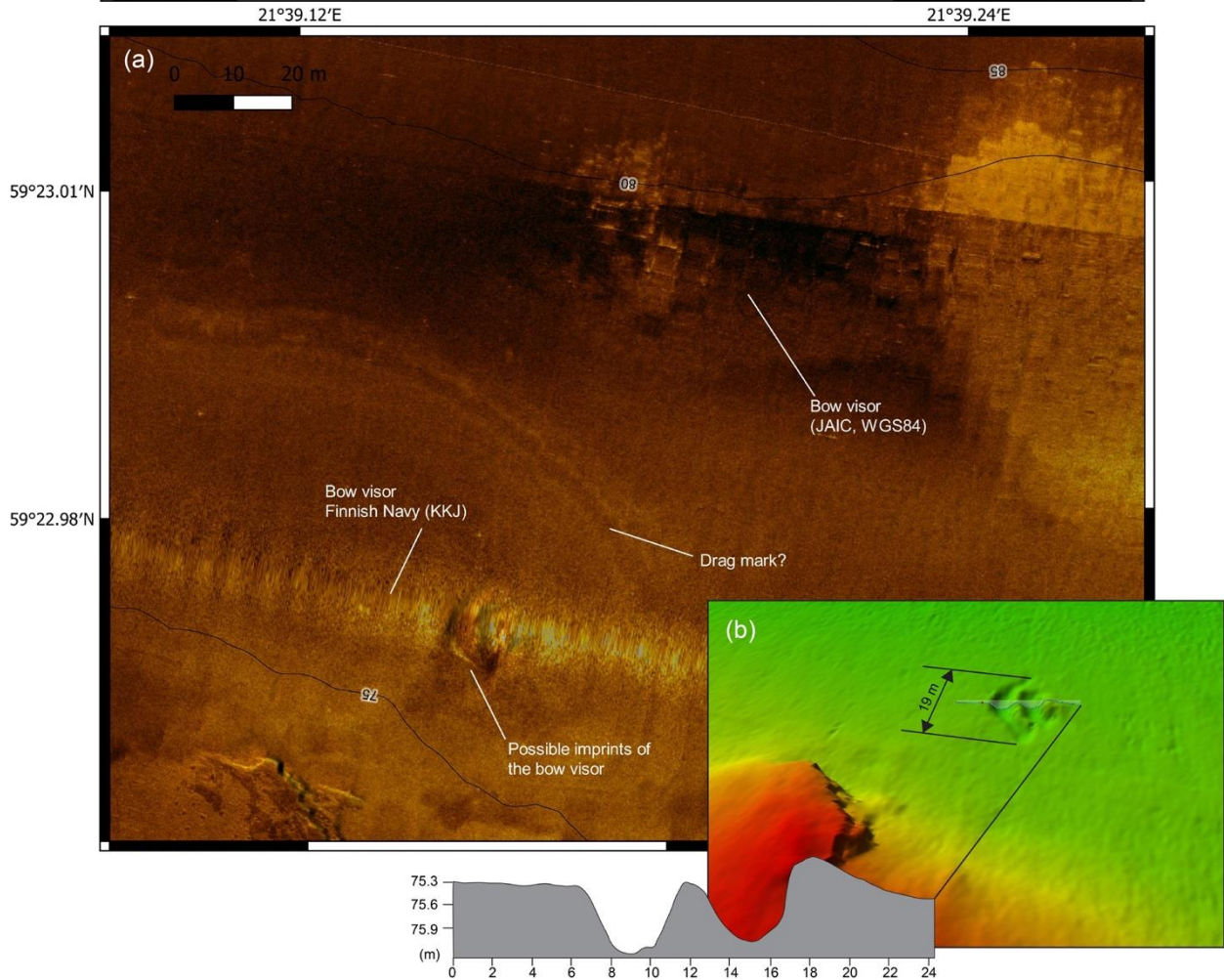
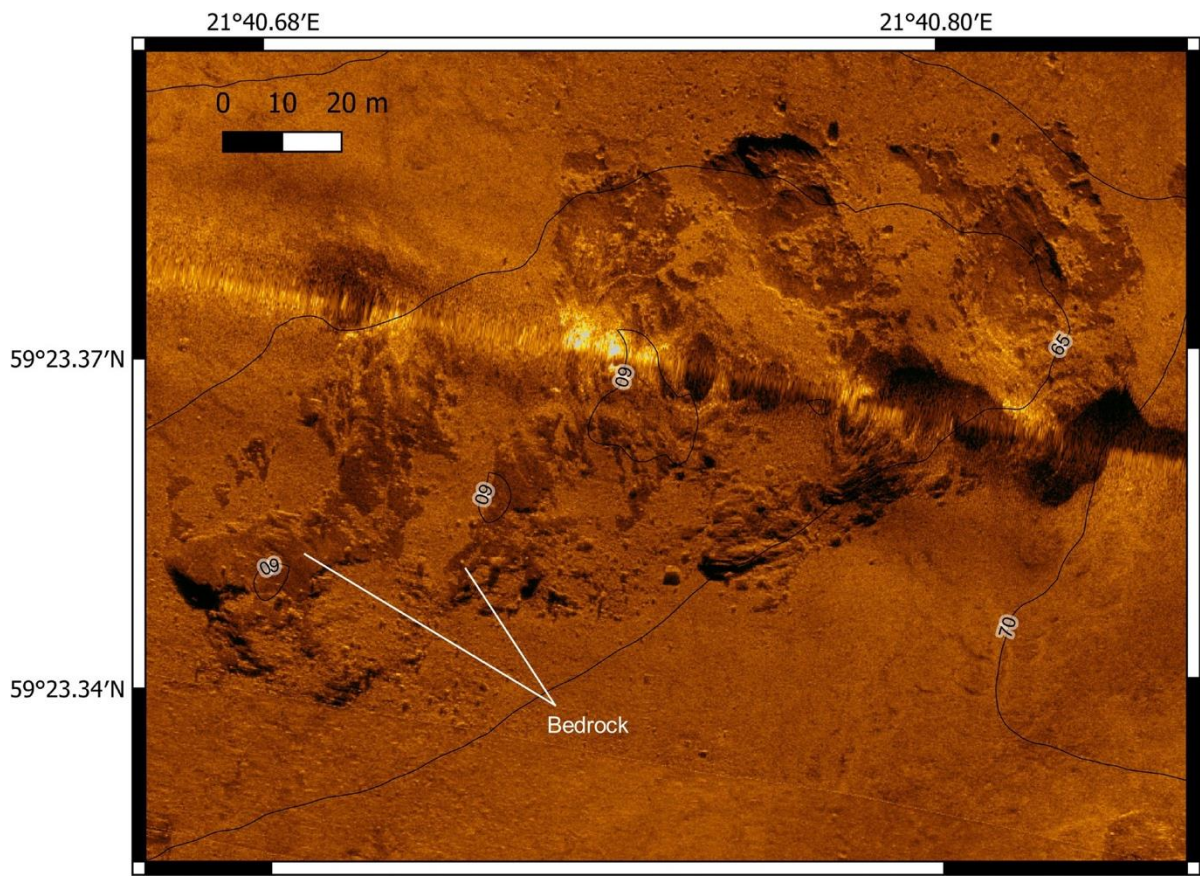
Joonis SS2. Külgvaatesonari mosaiik, mis koostati pikslisuurusega 20 × 20 cm. Selle kaardi suurem versioon on esitatud lisas 4.

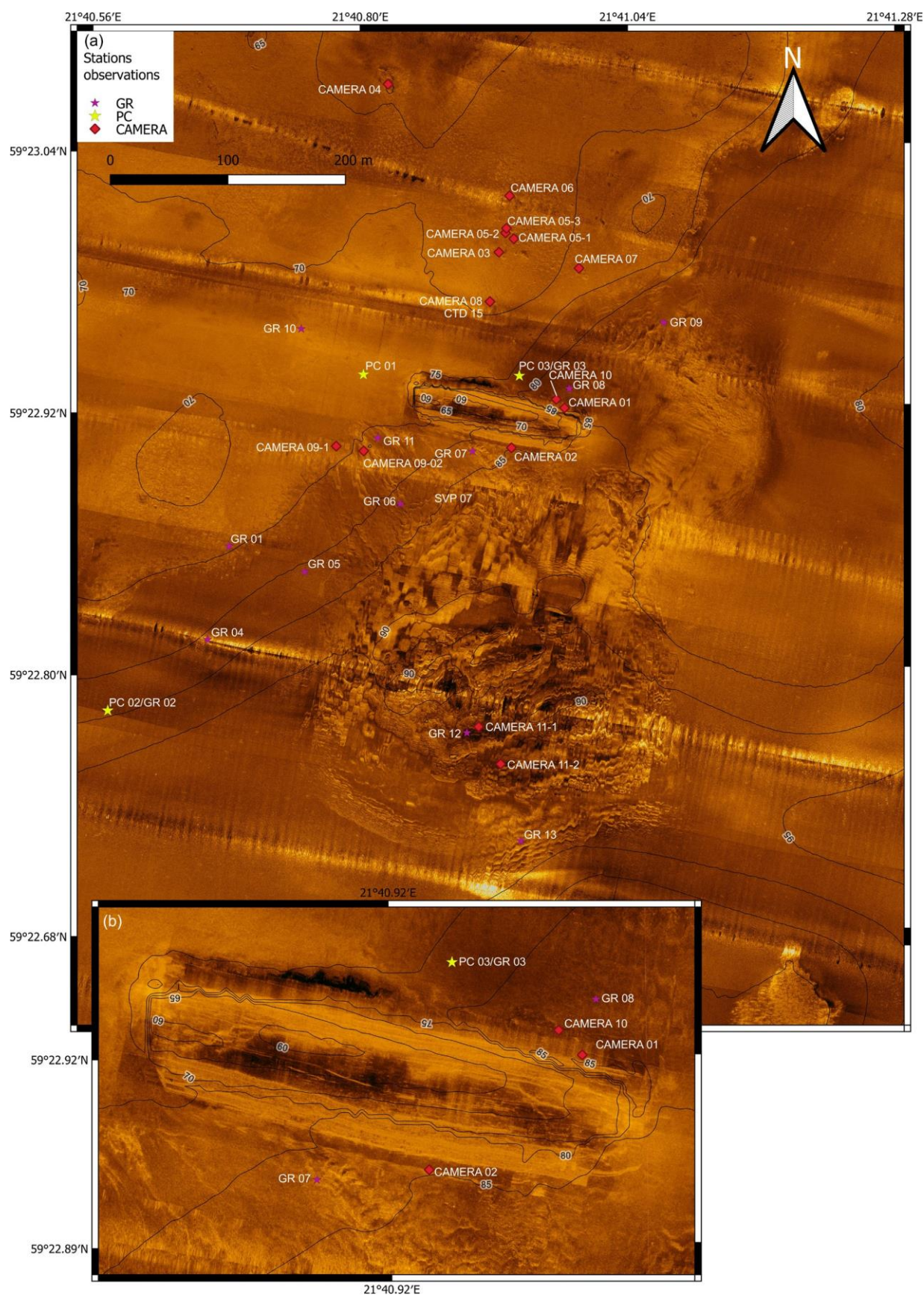


Joonis SS3. (a) Sama külvaatesonari mosaiik, mida kujutati joonisel SS2, kuid tehtud poolläbipaistvaks, et paljukiirelise batümeetria vari oleks läbikumav sügavusest aimu andmiseks. Merepõhja aluspõhjajakivimid on toodud välja lillade täppidega. (b) Ala, kus merepõhjal on aluspõhjajakivimid, on näidatud üksikasjalikul kaardil joonisel SS4. (c) Visiiri leiukoha üksikasjalik kaart on näidatud joonisel SS5. (d) Vraki asukoha üksikasjalik kaart on näidatud joonisel SS6. (e ja f) Jaotises „Setete proovivõtt, põhja analüüs ja ankurdamine” esitatud kaartide ulatus. Selle kaardi suurem versioon on esitatud lisas 4.

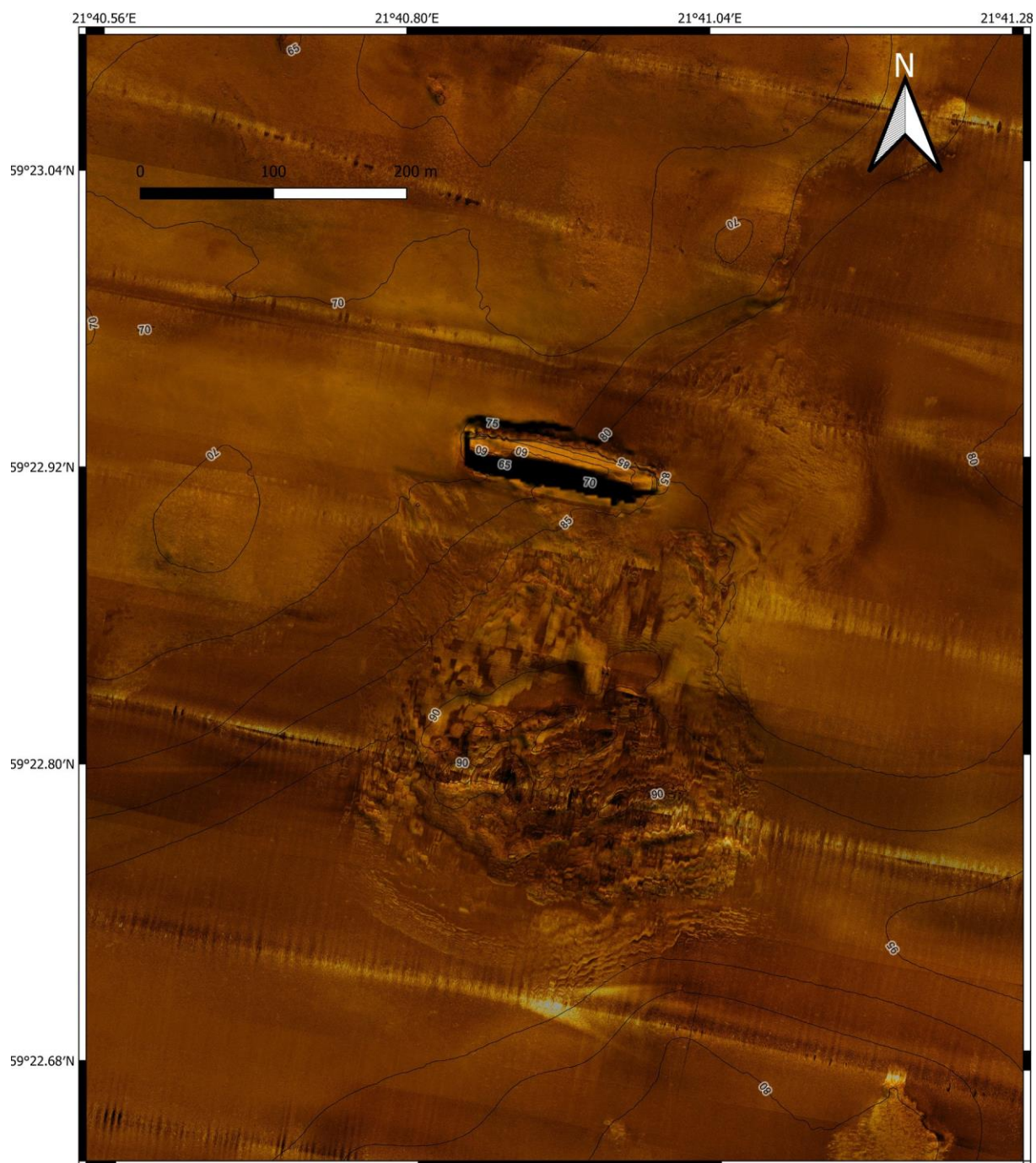
Üleval paremal: joonis SS4. Külvaatesonari mosaiik alast, kus merepõhjal on aluspõhjajakivimid. Kaardi asukoht on näidatud joonisel SS3. Selle kaardi suurem versioon on esitatud lisas 4.

All paremal: joonis SS5. (a) Külvaatesonari mosaiik alast, kust JAICi lõpparuande kohaselt leiti vöörisiir (asukohale on viidatud WGS84 süsteemi datumiga), ja Soome mereväe esitatud asukoht Soome KKJ datumis, mis on siin teisendatud WGS84 süsteemi. Soome asukoht on lähedal merepõhja detailile, mis võib moodustada vöörisiiri jäljendi. Kaardi asukoht on näidatud joonisel SS3. (b) Vöörisiiri võimaliku jäljendi paljukiireline batümeetria. Selle kaardi suurem versioon on esitatud lisas 4.





Joonis SS6. (a) Vraki asukoha külgvaatesonari mosaiik. Mõnedel liinidel on järeleveetava sonarialuse artefakte näha triipudena. b) Parvlaeva Estonia lähivaade.

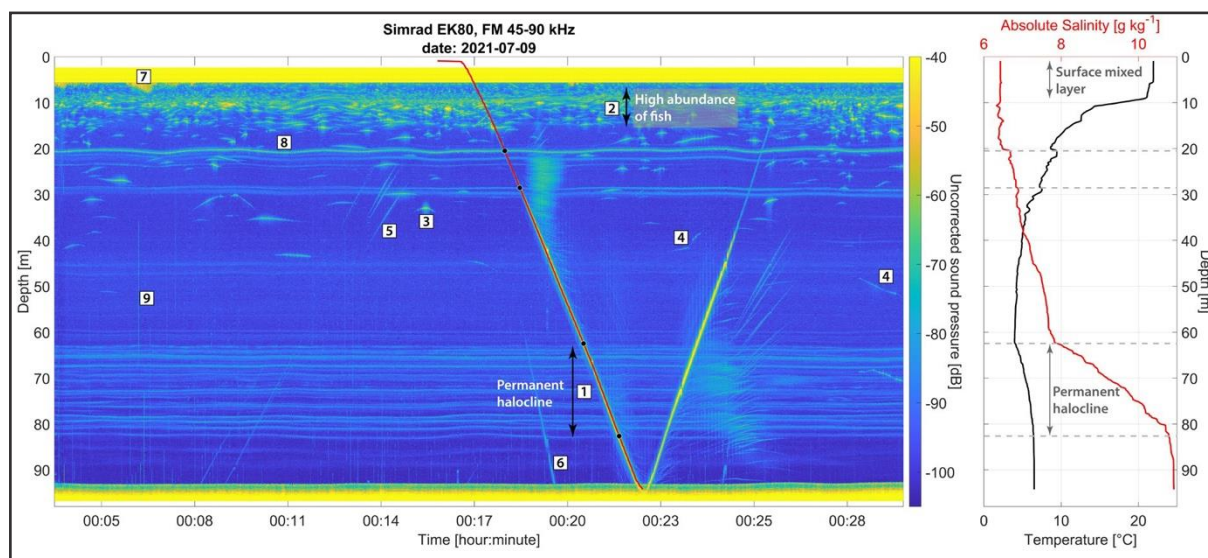


Joonis SS7. Vraki külgvaatesonari mosaiik on tehtud pooleldi läbipaistvaks, et saada aimu sügavusest selle all oleva paljukiirelise batümeetria varjude põhjal.

Vahemise veekihi sonar

Simrad EK80 faile (.raw vorming) parsiti ja töödeldi tarkvaraga MATLAB 2021b, kasutades erinevaid Kongsberg Maritime'i antud skripte (L. Anderson, isiklik suhtlus), ja neid korrigeeriti vahemiku jaoks, kasutades (ajaliselt) lähimat CTD profiili. EK80 andmetes nähtavad detailid hõlmavad tõusvaid gaasimulle, kalu ja kalakogumeid (joonis MW1a). Akustilistes andmetes on tuvastatav ka termohaliinne kihindumine, mida on näha diskreetsete horisontidena umbes 20 ja 30 m sügavusel (võrrelda musti täppe joonisel MW1a ja musti katkendjooni joonisel MW1b). Umbes 60 kuni 80 m sügavusel (joonis MW1b) asuvat alalist halokliini (Reissmann jt, 2009) on akustilistes andmetes näha vöödilise horisontaalse detailina (joonis MW1a). Termohaliinset kihistumist on varem lairiba kajaloodidega täheldatud Põhja-Jäärmeres (Stranne jt, 2017) ja Läänemeres (Weidner jt, 2020).

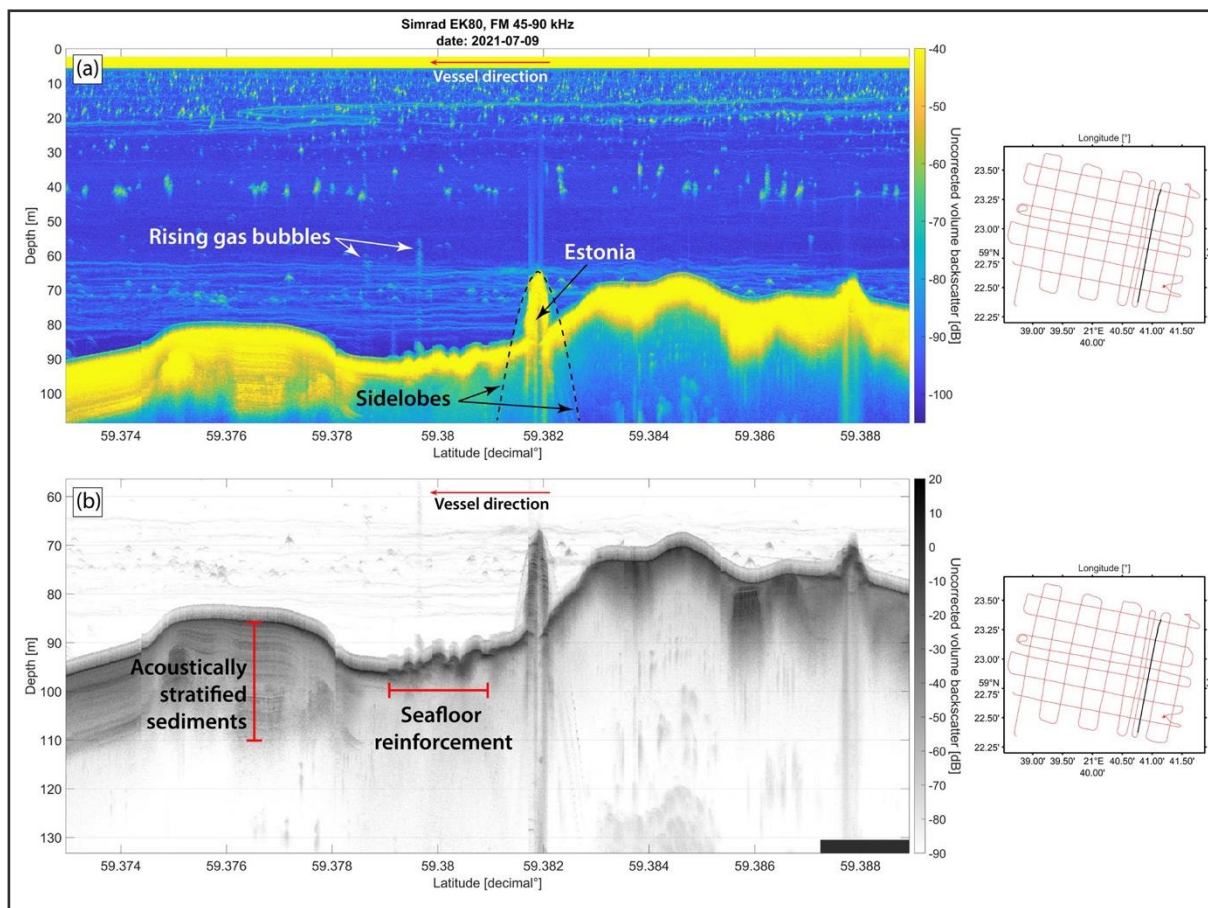
Lisas 5 on esitatud EK80 andmed kolmes paneelis iga uuringuprofiili jaoks (kokku 18 profiili). Kahes paneelis on esitatud ES70C muunduri andmed (45–90 kHz), millest üks keskendub veesambale ja teine merepõhja läbistamisele. Kolmas paneel kujutab ES200-7C muunduri andmeid (160–260 kHz), keskendudes veesambale (kuna nendel sagedustel läbistamine sisuliselt puudub). Uuringu näidisprofiili on kujutatud joonisel MW2. Pange tähele, et kõik EK80 andmed on näidatud korrigeerimata tagasihajumise mahuga, mis tähendab, et nende andmete põhjal pole suuruse määramine võimalik (nt turbulentne segunemine, gaasimullide suuruse jagunemine jne).



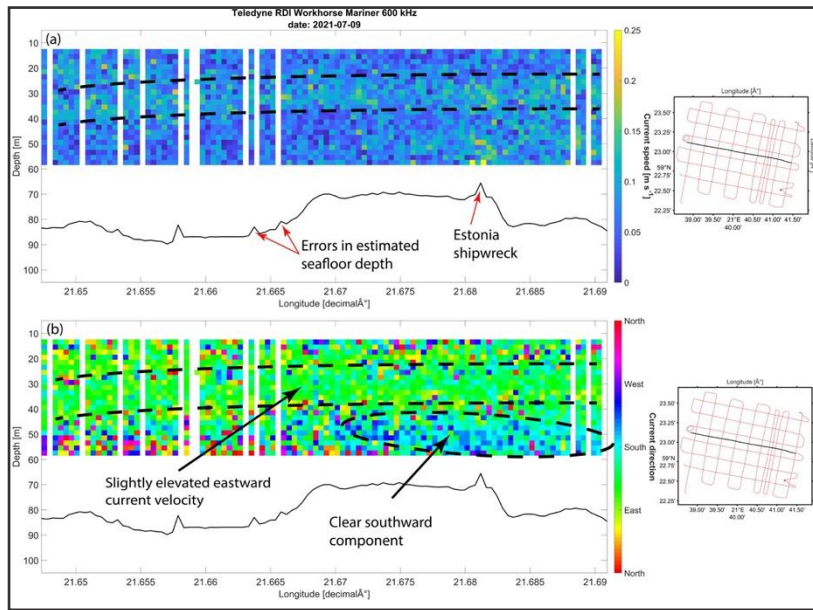
Joonis MW1. Lairiba EK80 andmed ES70C muundurilt (45–90 kHz) ja sellega ühtiv CTD profiil. a) EK80 ehhogrammsalvestis, mis näitab korrigeerimata helitugevuse tagasihajumist sügavuse ja aja jooksul, kuna Electra oli CTD-jaamas (positsiooni hoiti DPga). Suur V-kujuline ehhogrammsalvestise iseärasus on CTD rosett, mis läheb alla põhja ja siis tagasi üles merepinnale. Punane joon näitab CTD sügavuse ja CTD aja vahelist sõltuvust ning sobivus kahe andmekogumiku vahel kinnitab, et sügavuse korrigeerimised (mõlemas andmekogumis) ja ajatemplid on täpsed. b) Näidatakse CTD-jaama 1 absoluutset soolsust ja in-situ temperatuuri sügavusprofiile. Horisontaalsete katkendjoonte sügavused vastavad mustadele punktidele asukohas (a) ja kajaloodi andmetes esineb näiteid termohaliinset kihistumisest (st soolsuse ja/või temperatuuri variatsioonid). Asukohas (a) nummerdatud valged lahtirid kujutavad veesamba akustiliste andmete täiendavaid iseärasusi: 1 viitab sügavusintervallile, mille horisontaalsed vöödilised iseärasused langevad kokku alalise halokliiniga, 2 näitab umbes 15 m sügavusel asuvat piirkonda, kus leidub külluslikult kalu (ja tõenäoliselt muid organisme), 3 on näide ühest paigal seisvast kalast, 4 (kaks näidet) näitavad liikuvaid kalu, 5 näitab merepõhjust tõusvat gaasimulli, 6 näitab CTD roseti „topelt peegeldust“ (akustiline artefakt), 7 näitab laeva sõukruvi põhjustatud turbulentsi ja/või müra (sageli esinevad siis, kui laev on DP-l), 8 näitab sisemisi laineid, mis levivad mööda kihistumislindest, 9 näitab tundmatutest allikatest pärit müra (potentsiaalselt seoses sõukruviga).

Akustiline Doppler-voolukiiruse profileerija (ADCP)

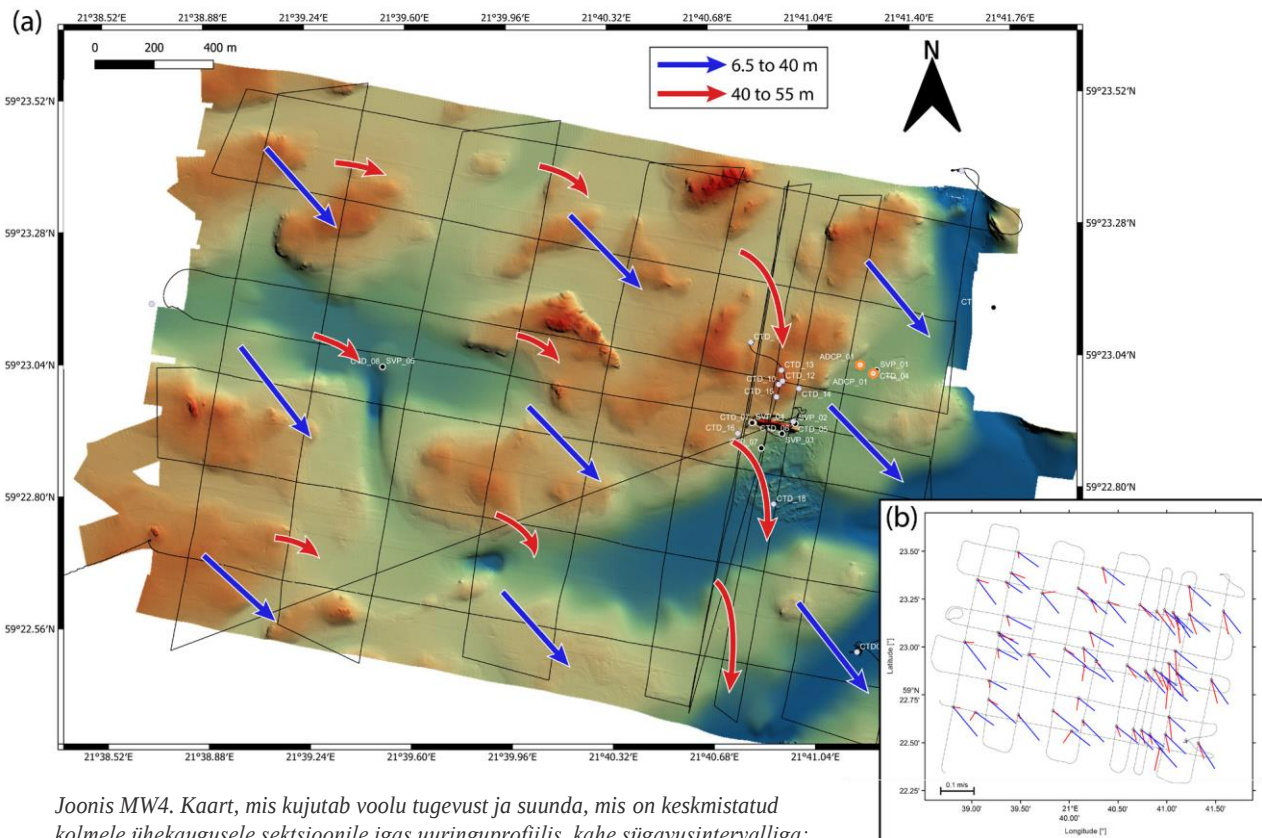
Paralleelselt vahemise veekihi sonariuuringuga viidi läbi laevaparda ADCP uuring (joonis MB1). Joonisel MW3 näidatakse transekti näidist ja kõik transektid on esitatud lisa 5. Andmed keskmistati kahe sügavusintervalli (pind -40 m ja 40–55 m) ning iga transekti kolme võrdse osa kohta, et hinnata uuringu ajal üldist voolukiirust uuringualas (joonis MW4b ja lisa 5, lk 58). Hinnangulised voolukiirused (joonis MW4a) põhinevad nendel keskmistel. Pinnakiirused uuringualas olid ADCP uuringu jooksul üldiselt tagasihoidlikud. 20–40 m sügavusel on näha riba, millel on kergelt suurenenud idasuunaline kiirus ja transekti idaosas on sügavusel 40–60 m selge lõunasuunaline kiiruse komponent (joonised MW3 ja MW4).



Joonis MW2. EK80 ehhogrammsalvestise näide. a) Ehhogrammsalvestis risti üle parvlaeva Estonia, mille töötlemisel on keskendutud veesamba iseärasustele. Nähtavad iseärasused hõlmavad alalist halokliini (vt joonis MW1), kalu ja kalakogumeid ning tõusvaid gaasimulle. Lisaks on märgistatud parvlaeva Estonia vrakk ja sellega seotud külghõlmad (järsust topograafiast või objektidest põhjustatud akustilised artefaktid). b) Ehhogrammsalvestis, milles keskendutakse põhja ja merepõhja iseärasustele. Nähtavad iseärasused on parvlaev Estonia, akustiliselt kihistunud setted ja vrakist lõuna pool tehnik merepõhja tugevdus. Laeva suunda on näidatud horisontaalse punase noolena. Kõik EK80 uuringu profiilid (sh 160–260 kHz muunduri andmed) on esitatud lisa 5.



Joonis MW3. Laevaparda ADCP transekt parvlaeva Estonia vraki kohal. a) Voolukiirus pikkuskraadi ja sügavuse funktsioonina. b) Voolusuund pikkuskraadi ja sügavuse funktsioonina. 600 kHz laevaparda ADCP töötlus on tavaliselt umbes 50 m. Käesoleval joonisel ja lisas 5 rakendatakse Electra süvist (2,3 m) ja andmeid kärbitakse 60 m sügavusel, et mitte näidata ADCP töötlusest väljajäävaid mitteusaldusväärseid andmeid.



Joonis MW4. Kaart, mis kujutab voolu tugevust ja suunda, mis on keskmistatud kolmele ühekaugusele sektsioonile igas uuringuprofilis, kahe sügavusintervalliga: 6,5–40 m ja 40–55 m. a) tõlgendatud voolusuundad punktis b) näidatud arvutatud keskmiste voolusuundade põhjal. Uuringu ajal oli 6,5–40 m (sinine) sügavusintervallis vool kagusuunaline kiirusega $\sim 0,1$ m/s. 40–55 m sügavusintervallis (punane) oli vool üldiselt nõrk ja suunaga uuringuala lääneosas itta ning see intensiivistus ja pöördus uuringuala idaosas lõunasse-kagusse. Paneel (b) on esitatud ka suuremana lisas 5.

Vee omadused (helikiirus, temperatuur, soolsus)

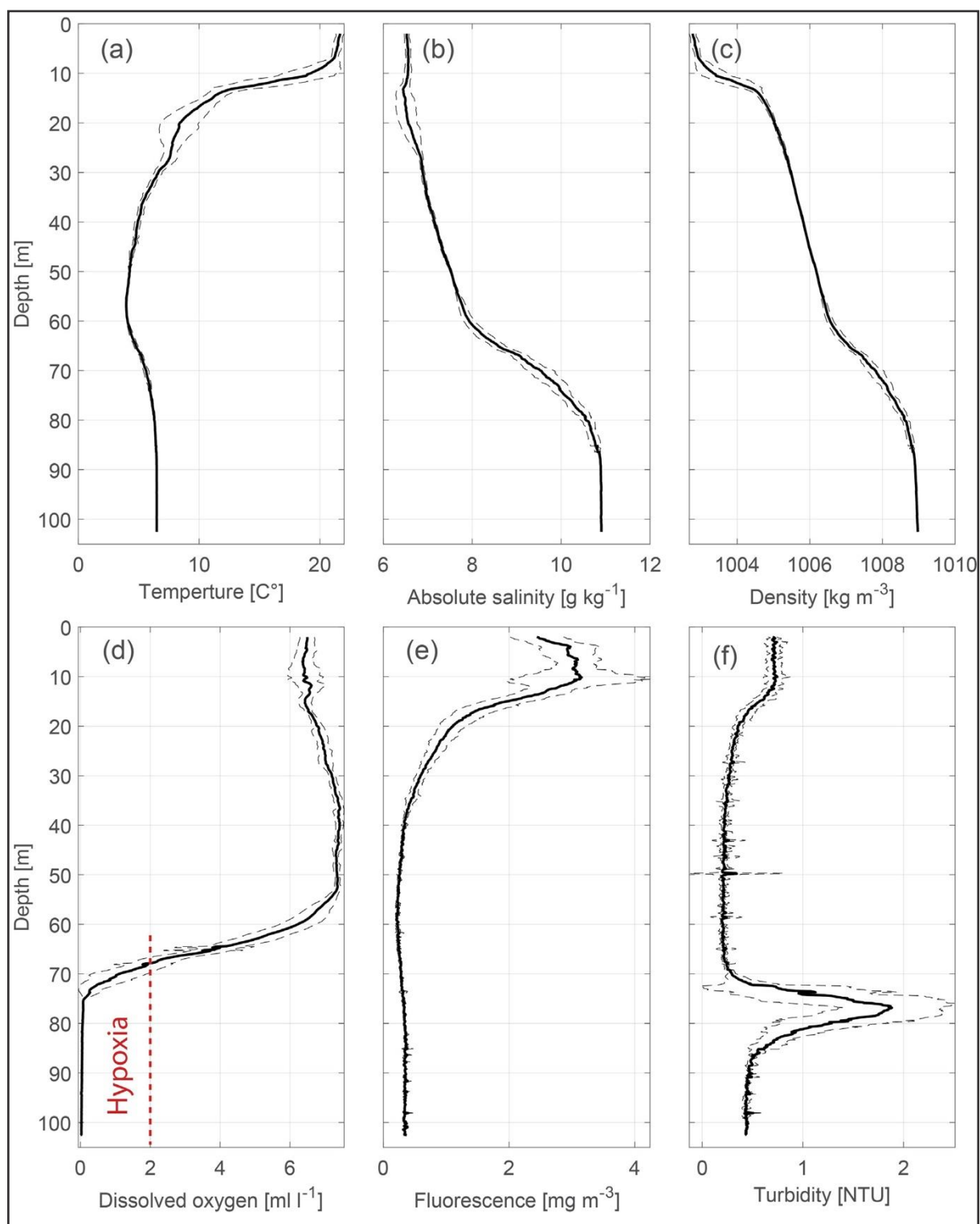
CTD andmed koosnevad vertikaalsetest temperatuuriprofiilidest, absoluutsest soolsusest, tihedusest (tuletatud absoluutsest soolsusest, temperatuurist ja rõhust), lahustunud hapnikust, fluorestsentsist ja hägususest. Kõigist CTD jaamadest saadud andmed on toodud lisas 6 lk 2–19. Joonisel WP1 on näidatud kõikide jaamade keskmistatud CTD-profiili andmed ja vastav $\pm$ üks standardhälve. Tiheduse kihistumist vaadates (joonis WP1c) saab eristada kolme veemassi: pindmine segunenud kiht (pind ~ 10 m), pidevalt kihistunud pinnavesi (15–60 m) ja hästi segunenud põhjavesi (umbes 85 m kuni põhjani). Pinna- ja põhjavesi on eraldatud halokliiniga (umbes 60 kuni 80 m, joonis WP1b). See halokliin on Läänemere keskosas alaliselt kohal (Reissmann jt, 2009), kuid selle sügavus ja vertikaalne ulatus võivad nt tõusvatest/langevatest hoovudest, tormidest ja külma hooaja konveksioonist tulenevalt varieeruda.

Lahustunud hapniku kontsentratsioon langeb alalisest halokliinist allpool ja alla 75 m järsult, tingimused on enam-vähem hapnikuvabad. Weidner jt (2020) näitasid, et Lääne-Gotlandi vesikonnas langes alalise halokliini sügavus kokku üleminekuga hapnikuga tingimustelt hapnikuvabadele tingimustele ning et hapnikuvaba ala sügavus, mis on levinud määratluste kohaselt see, kus lahustunud hapniku kontsentratsioon langeb alla 2 ml/l, võib umbes kahe päeva jooksul muutuda ~ 14 m võrra. Samamoodi langevad käesolevas andmekogumis halokliin ja oksükliin kokku ning sügavus, mille juures hapnikuvaegus algab, langes uuringu esimese viie päeva jooksul umbes 5 m võrra (joonis WP2).

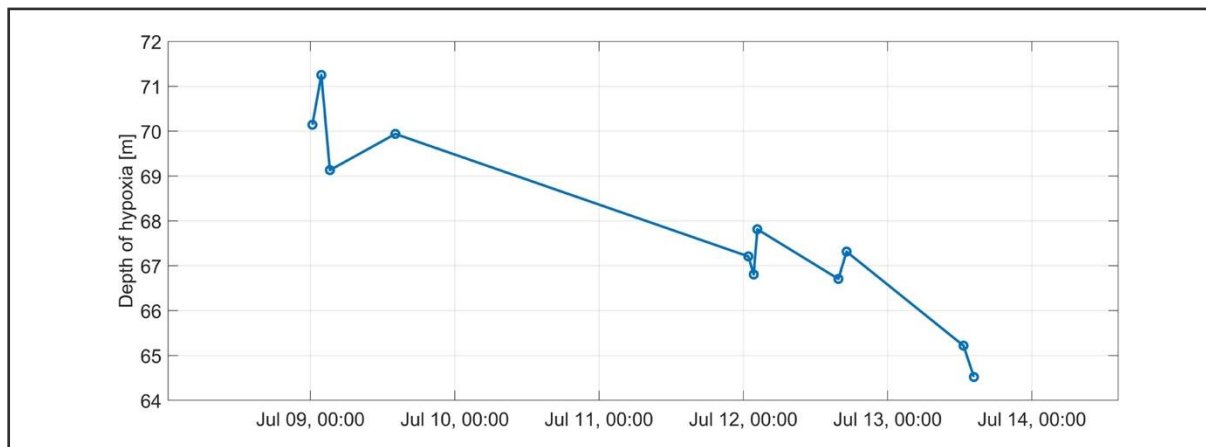
Fluorestsentsi kasutatakse klorofüll A kontsentratsiooni ja veesamba fütoplanktoni hulga asemikuna. Asjaolu, et fluorestsents oli kõrgeim pinna lähedal ja väheneb segunenud kihi all, kus päikesevalgus on väga nõrk, näib seega olevat kooskõlas ootuspäraste tulemustega (joonis WP1e).

Hägusus annab suhtelise mõõte veesamba osakeste koguste kohta (joonis WP1f). Hägusus on pindmises segunenud kihis veidi suurem, mis on tõenäoliselt seotud kõrgema fluorestsentsiga (ja oletatavasti suuremate planktoni kontsentratsioonidega). Madalaim hägusus leidub pinnavees, segunenud kihi all. Hägususe suurenemine alalise halokliini alaosas võib olla seotud osakeste põhja vajumise kiiruse vähenemisega tiheduse suurenedes. Oluline panus hägususe maksimumi võib tuleneda ka ankurdatud ADCP andmetest (joonis AM2) nähtuvatest tugevatest põhjavooludest sügavusvahemikus 70–80 m koos nendega seotud setete resuspendeerimisega, mis moodustab hägusa veekihi (Yurkovskis, 2005).

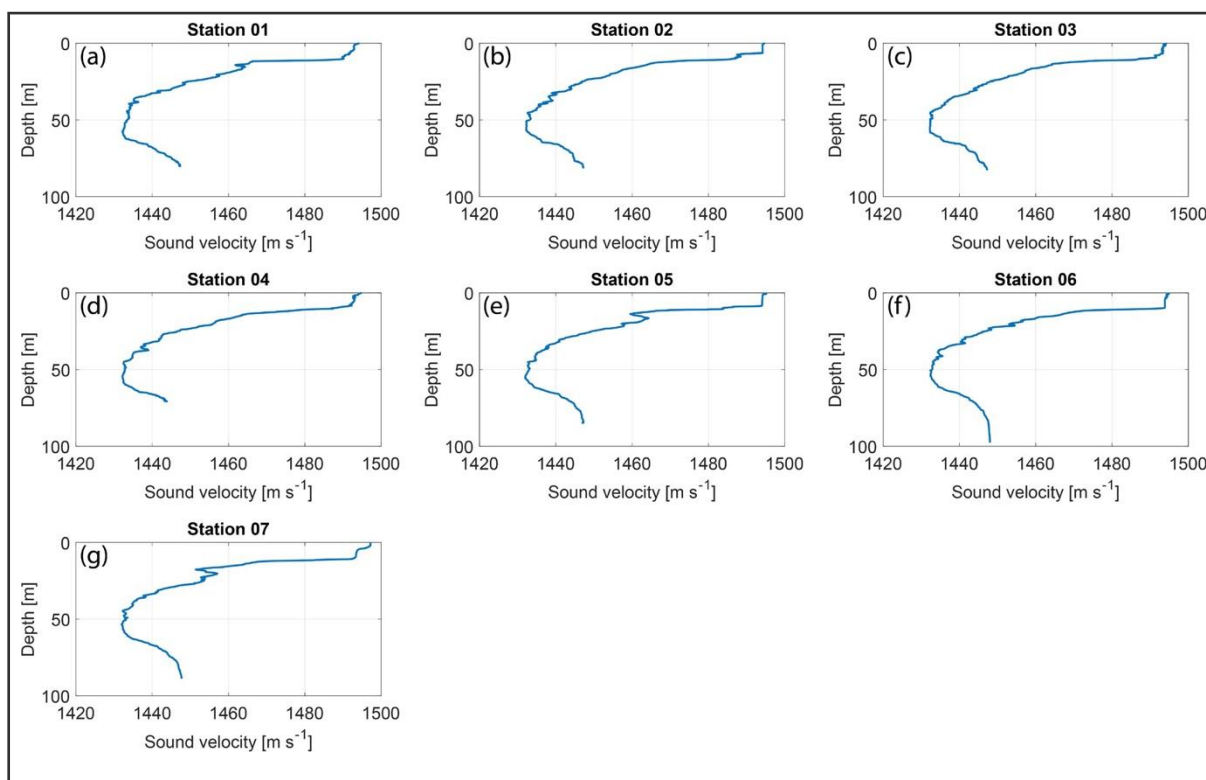
CTD rosetile kinnitatud Valeport MiniSVP heli levimiskiiruse profileerijaga koguti kokku 7 heli levimiskiiruse profiili. Individuaalsed profiilid on näidatud joonisel WP3 eeldusel, et rõhk (dbar) on võrdne sügavusega allpool merepinda (järjekorras esineb paari meetri suurune viga).



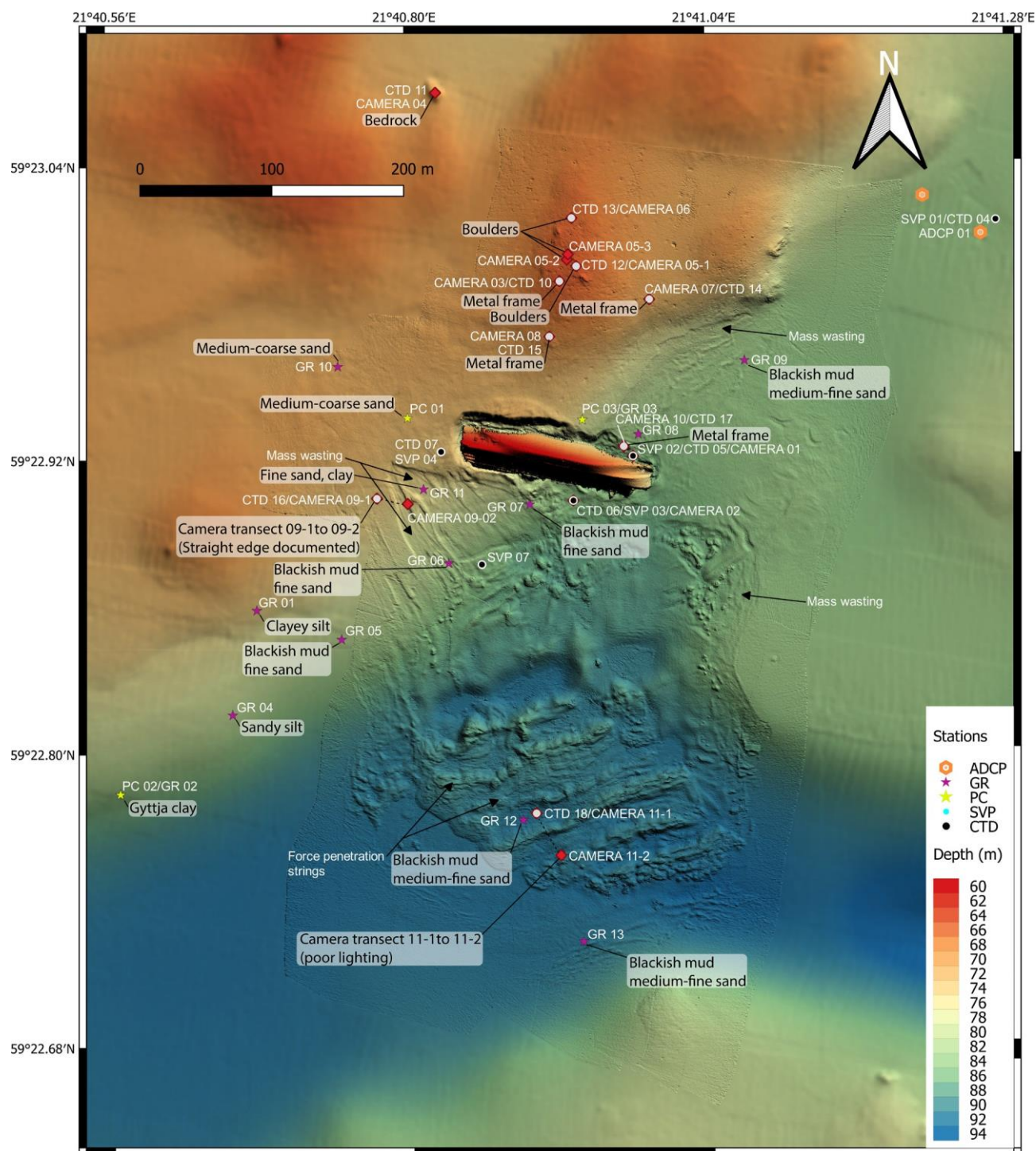
Joonis WP1. Keskmised CTD profiilid. Kujutatakse keskmise a) temperatuuri, b) absoluutse soolsuse, c) tiheduse, d) lahustunud hapniku kontsentratsiooni, e) fluoretsentsi ja f) hägususe ning sügavuse (pidev must) vahelist sõltuvust ja vastavat $\pm$ üks standardhälvet (mustad katkendjooned).



Joonis WP2. Läänemere keskosas esinevad alalise halokliini all sageli hüpoüksilised tingimused, mida määratakse lahustunud hapniku kontsentratsioonina $< 2 \text{ ml/l}$. Siin on esitatud veesügavuse, mille juures algab hüpoüksia, ja aja vaheline sõltuvus. Andmed hõlmavad esimest 13 CTD-jaama ja arvestatakse ainult hüpoüksilisse tsooni ulatuvaid CTD-profile (kokku 11 jaama).



Joonis WP3. SVP jaamade 1–7 heli levimiskiirused (vastavalt a–g paneelid).



Joonis SB11. Puursüdamike asukohad, haaratsiga võetud proovid, kaamera vaatlused ja ADCP ankrukoht (sümbol jaama nimega selle kõrval on tegelik ADCP ankrukoht, samas kui teine sümbol näitab poi asukohta). Kaardil on toodud ka kokkuvõtte CTD-karussellile paigaldatud GoPro kaamera kõigi põhjavaatluste tulemustest ja haaratsiga võetud proovide visuaalsetest vaatlustest.

Setete proovivõtt, põhja analüüs ja ankurdamine

Põhjaproovivõtt kolbpuuriga

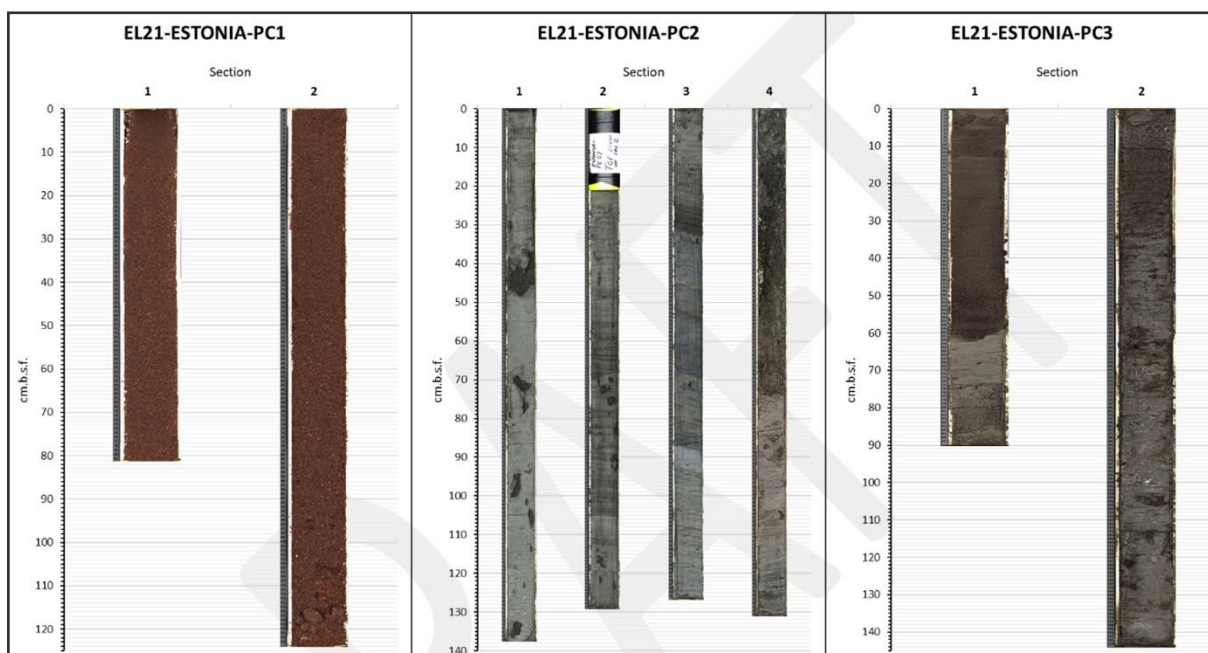
Parvlaeva Estonia ümbritsevast alast saadi kolm puursüdamikku eesmärgiga koguda geofüüsikalise kaardistamise geoloogilise tõlgenduse kohta kohapealset teavet. Puursüdamike asukohad on näidatud kaardil joonisel SBI1. Puursüdamike asukohad, veesügavused ja pikkused on võetud kokku tabelis SBI1. Puursüdamike analüüside tulemused on esitatud alljärgnevalt settepuursüdamike litoloogia lühikokkuvõtteks. Põhjalikumad puursüdamike kirjeldused on antud lisas 7.

Litoloogia

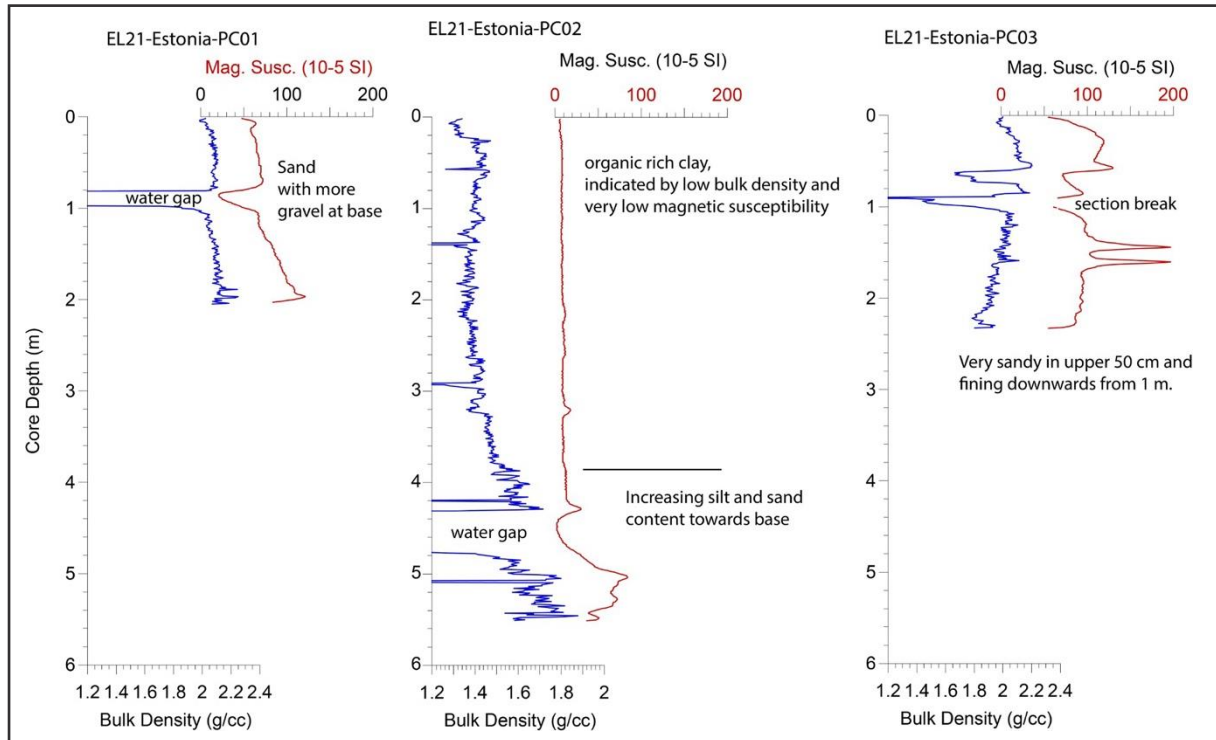
205 cm pikkune puursüdamik EL21-Estonia-PC01 (edaspidi kasutatakse iga puursüdamiku kohta järelliidet), mille eesmärk oli koguda setteid vrakist lääne pool, et saada aimu katkestatud kattetööde käigus merre valatud liiva koostisest ja paksusest. Puursüdamikuga koguti hästi sorteeritud tumepunast (*dusky red*, kasutatud on Munselli värvide nomenklatuuri) keskmise jämedusega liiva, mille jämedus suurenes järk-järgult puursüdamiku põhja suunas (joonis SBI2). Puursüdamiku põhjast leiti mõned väiksed kivid. Puursüdamikuga PC02 koguti 472 cm setteid, mille saab jaotada kolmeks litoloogiliseks üksuseks (joonis SBI2). Pealne 382 cm paksune üksus koosneb peenest rohekashallist jütja savist, millel on tumerohekad või mustad kihid. See üksus läheb üle 33 cm paksuseks mudasemaks heledaks oliivhalliks saviks, millel on korrapärased 0,5 cm paksused hallid saviribad. Pannakse ette, et see üksus koosneb liustikulisest savist ja oleme seega jõudnud liustikulise järjestuseni.

Tabel SBI1. EL21-Estonia ekspeditsiooni käigus kogutud puursüdamikud. Lisateave puursüdamike kohta on esitatud lisas 7.

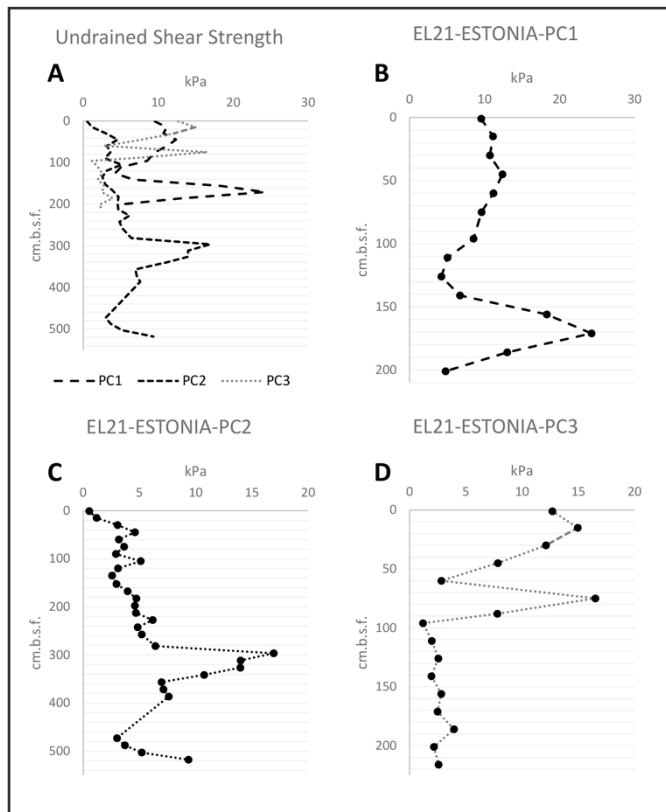
Puursüdamik	Pikkus (cm)	Asukoht (laiuskraad, pikkuskraad)	Veesügavus (m)
EL21-Estonia-PC01	205	59.38227°N, 21.67999°E	71
EL21-Estonia-PC02	472	59.37972°N, 21.67612°E	82
EL21-Estonia-PC03	234	59.38225°N, 21.68233°E	77



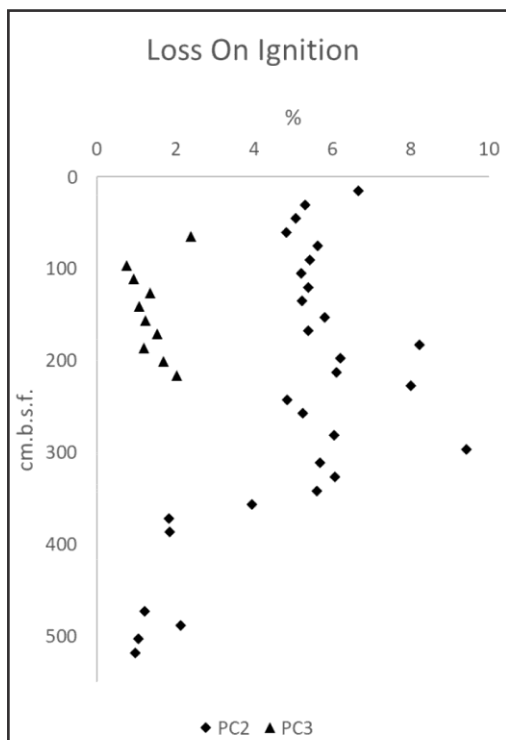
Joonis SBI2. Pildid lõhustatud settepuursüdamike sektsioonidest. Kõrgema eraldusvõimega pildid on esitatud lisas 7.



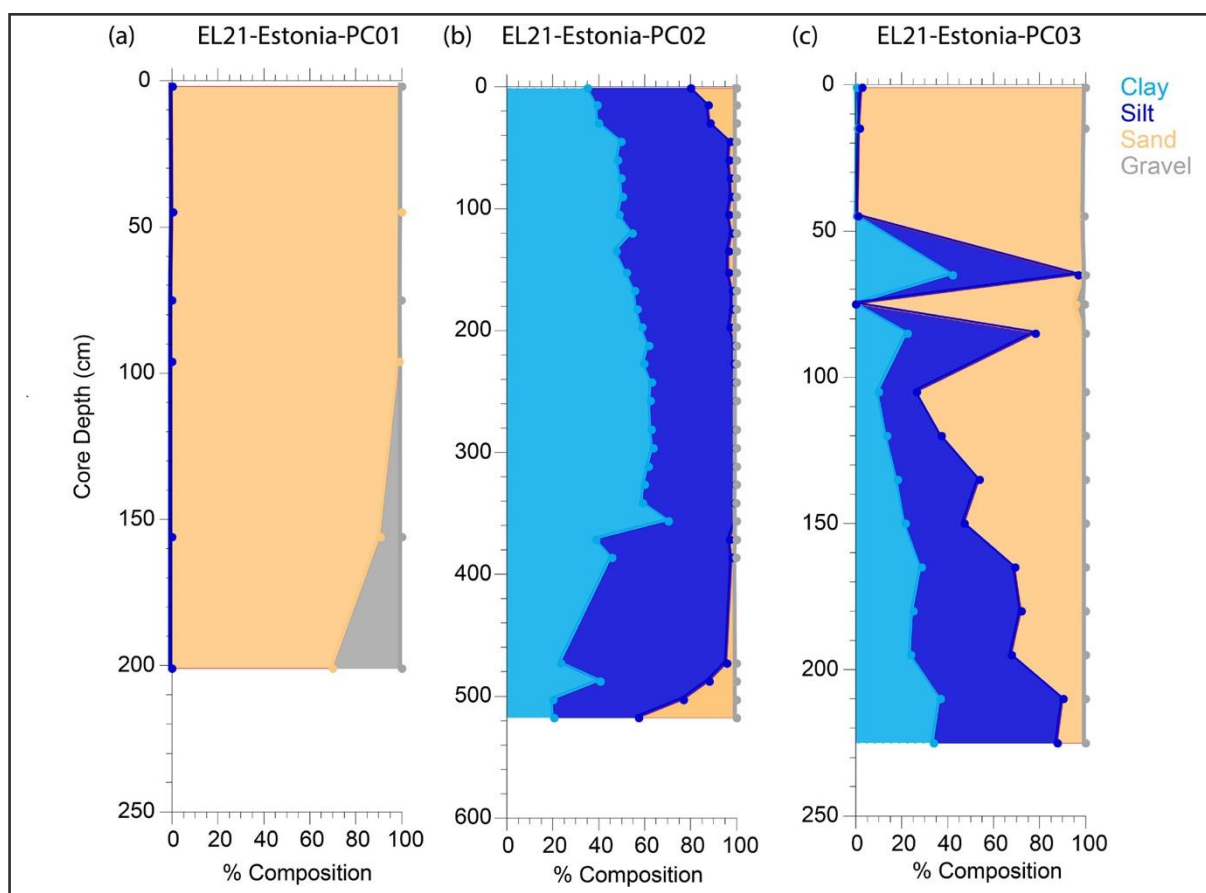
Joonis SBI3. Kolme kogutud puursüdamiku logitud magnetiline sustseptiilsus ja puistetihedus.



Joonis SBI4. Kõigi kolme reisi ajal kogutud puursüdamiku kuivendamata nihketugevus, proovid on võetud üksteisest 15 cm kauguselt puursüdamiku põhja poolt. A) näitab kõigi puursüdamike kuivendamata nihketugevuse võrdlust. B), C) ja D) näitavad eraldi puursüdamike nihketugevusi (pange tähele puursüdamike erinevaid sügavuste ulatusi).



Joonis SBI5. Massikadu põletamisel tulemused, mis viitavad sette süsinikusisaldusele. Proovid võeti 15 cm vahedega puursüdamiku allosast.



Joonis SBI6. Terasuuruste osakeste muutus koos sügavusega puursüdamikest PC01, PC02 ja PC03. (a) Sõelatud terasuurus puursüdamikust PC01. (b) Mõõdetud terasuurus puursüdamikust PC02, kasutades PSAd pärast orgaanilise aine eemaldamist. (c) Kombineeritud terasuurus sõelast ja PSAd (orgaanilist ainet eemaldamata) puursüdamikust PC03. Setted liigitatakse järgmiselt: kruus ($> 2,00$ mm), liiv (1 mm – 63 μ m), muda (63 – $3,9$ μ m) ja savi ($< 3,9$ μ m), Wentworthi (1922) järgi.

Tabel SBI2. CTD-karussellile paigaldatud GoPro kaameraga uuritud kõigi paikade kirjeldused. Kontrollitud paikade asukohad on näidatud joonisel SBI1 kaardil ja hetktõmmised on toodud joonisel SBI7-11. (WGS84 koordinaadid).

Vaatlusandmed	Veesügavus	Asukoht (laiuskraad, pikkuskraad)	Kirjeldus
CAMERA 01	85 m	59.38200°N, 21.68300°E	Paik asub parvlaeva Estonia kirdeküljel, ~ 4 m kaugusel laevakerest. Tugev valgustus mõjutab pildikvaliteeti. Lähivõtte põhjasetetest, mis mustjas-roheka värvuse põhjal sisaldavad tõenäoliselt orgaanilist ainet.
CAMERA 02	85 m	59.38170°N, 21.68220°E	Paik asub parvlaevast Estonia ~ 12 m lõunas. Näha on ainult merepõhja setteid, tõenäoliselt liiva.
CAMERA 03	66 m	59.38319°N, 21.68204°E	Parvlaeva Estonia kerest ~ 116 m kaugusel põhjas asuv metallraam. Paistab, nagu raamile on kinnitatud trossid. On tuvastatud, et raam kuulub Sonardyne'i muunduritele (mudel Compatt, edastab sagedusalas 19–36 kHz), mis paigaldati merepõhjale parvlaeva Estonia katmise ajal.
CAMERA 04	70 m	59.38449°N, 21.68041°E	Nähtavad aluspõhjakiivid mõnede väikeste lahtiste kividega. Paik asub parvlaevast Estonia 260 m loodes.
CAMERA 05-1 CAMERA 05-2 CAMERA 05-3	65 m 66 m 66 m	59.38330°N, 21.68227°E 59.38334°N, 21.68214°E 59.38338°N, 21.68216°E	Need kolm paika kokku moodustavad kaamera transekti, mis algab ~ 130 m ja lõpeb ~ 137 m parvlaevast Estonia põhja pool. CAMERA 05–1 ja 05–3 asend on seotud paljukiirelises batümeetrias selgelt nähtavate väljaulatuvate objektidega, samas kui CAMERA 05–2 asub pealtnäha tasasel merepõhjal. Piki transekti on nähtavad rahnud ja munakivid.
CAMERA 06	66 m	59.38362°N, 21.68221°E	Paik asub parvlaevast Estonia 165 m põhjas. Filmis on näha rahn.
CAMERA 07	69 m (objekti ülemine osa)	59.38307°N, 21.68324°E	Parvlaeva Estonia kerest ~ 120 m kaugusel põhjas-kirdes asuv metallraam. Paistab, nagu raamile on kinnitatud trossid. Nähtav korrosioon. Raam on sama või sarnast tüüpi kui see, mis tuvastati CAMERA 03ga.
CAMERA 08	69 m	59.38282°N, 21.68190°E	Sama või sarnast tüüpi metallraam kui see, mis tuvastati CAMERA 03 ja 07ga. Korrosioon on nähtav ka sellel raamil, mis asub parvlaeva Estonia laevakerest ~ 73 m põhja pool.
CAMERA 09-1 CAMERA 09-2	74 m 75 m	59.38173°N, 21.67958°E 59.38169°N, 21.67999°E	Transekt algab ~ 72 m parvlaevast Estonia edelas ja jätkub ~ 22 m ida suunas. See transekt asub paljukiirelises batümeetrias nähtavate lihe detailide kohal. Halb nähtavus. Näha on sirge piklik objekt. Objekti laadi ei ole olnud võimalik kindlaks teha.
CAMERA 10	82 m	59.38207°N, 21.68288°E	Asub parvlaeva Estonia kirdeküljel, ~ 9 m kaugusel laevakerest. See asukoht on seotud paljukiirelisel batümeetrial nähtava väikese väljaulatuva objektiga. Objekt on metallraam.
CAMERA 11	92 m 91 m	59.37957°N, 21.68167°E 59.37929°N, 21.68199°E	Transekt, mis ületab sundlābistusunõore, algab ~ 248 m ja jätkub kagu suunas ~ 37 m. Nähtav on võimalik terav plokk, kuid video on väga tume ja merepõhja pole enamasti võimalik eristada.

Veevahe eraldas puursüdamiku kõige alumist ja viimast üksust, mis koosnes jätkuvatest savikihtidest, kus oli suurem mudasisaldus ja mille värvus vaheldus tumeda rohekashalli ja oliivhalli vahel. Viimane puursüdamik, PC03, võeti umbes 15 m parvlaeva Estonia keskosast 15 m põhja poolt eesmärgiga sondeerida setete sügavust ja tüüpi. Puursüdamikuga koguti 234 cm setteid, enne kui see tabas kõva substraati, mis kahjustas puuri lõikurit (foto SBI1). Selle puursüdamiku pealmised 56 cm koosnesid tumepunasest hästi sorteeritud liivast, mis valati tõenäoliselt katmistööde ajal selles paigas merepõhjale. Koostis on väga sarnane puursüdamikuga PC01, ehkki veidi jämedam. Sellele järgneb 10 cm paksune hallikaspruun saviüksus, millele omakorda järgneb veel 21 cm tumepunast liiva. PC01 ülejäänud 147 cm sisaldab hallikaspruuni, osaliselt segunenud, erineva liivasisaldusega savi. See alumine üksus võib olla savine moreen.

Setete omaduste mõõtmine

Joonisel SBI3 kujutati kolme puursüdamiku puistetiheiduse ja magnetilise sustseptiilsuse mõõtmist koos märkustega tulemuste kohta. Lisaks logimisele viidi lõhestatud puursüdamikega läbi kuivendamata nihketugevuse diskreetsed mõõtmised (joonis SBI4), millele järgnes näidiste kogu orgaanilise aine sisalduse analüüs, mõõtes massikadu põletamisel (joonis SBI5) ja tera suurust (joonis SBI6). Ehkki nende mõõtmiste tulemusi siin täpsemalt ei käsitleta, panustavad need parvlaeva Estonia piirkonna setete omadusi koondavasse olemasolevasse andmebaasi.

Haaratsiga proovivõtjaga võetud proovid

Kokku võeti haaratsiga proovivõtjaga 13 proovi, et saada kiirelt teavet pinnasetete koostise kohta, mida saaks kasutada paljukiirelise kajaloodi tagasihajumise andmete ja külgvaatesonariga pildindamise geoloogilise tõlgendamise toetamiseks. Tulemused on näidatud kaardil joonisel SBI1.

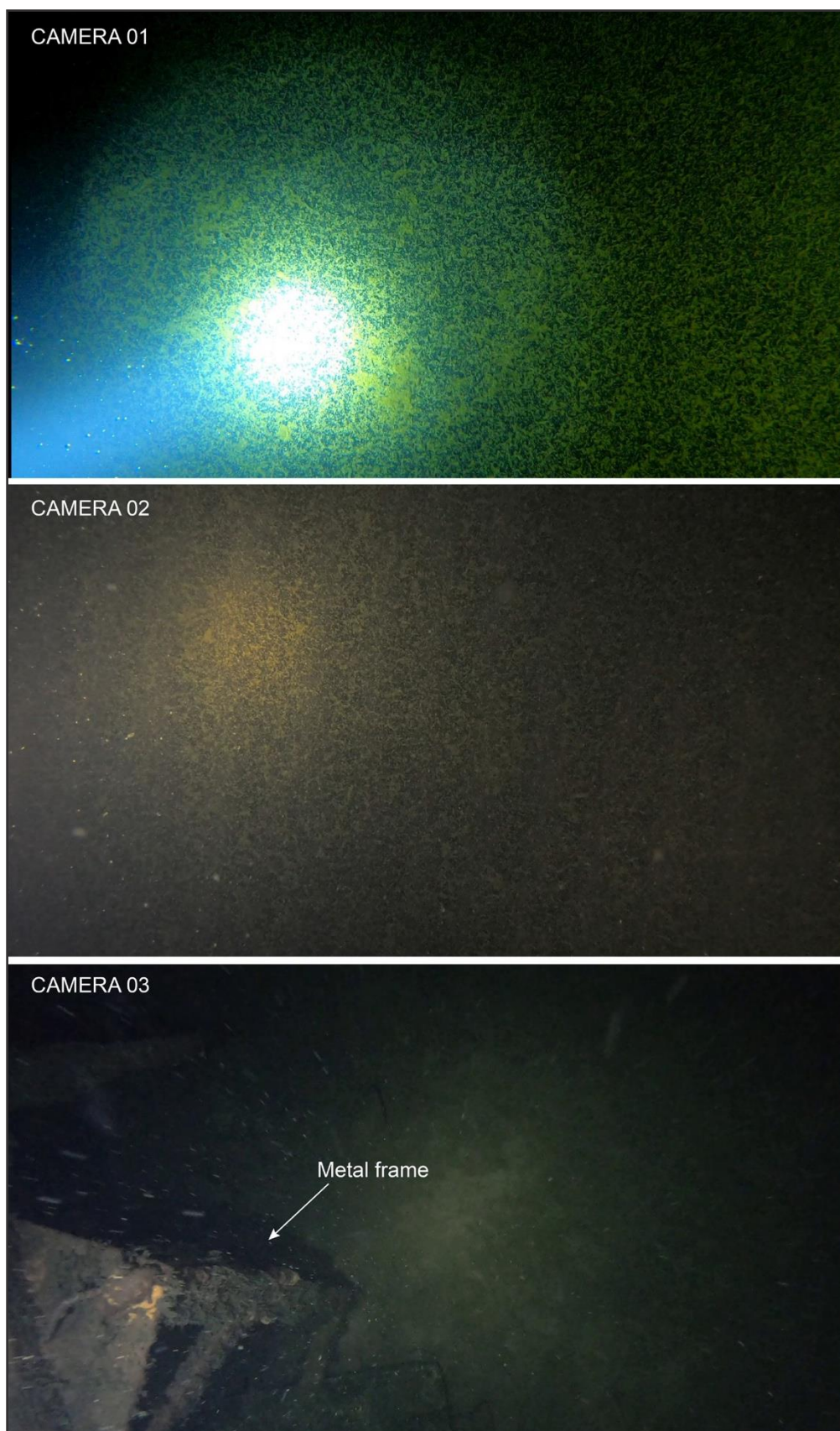
Põhjauuring

CTD-karussellile paigaldatud GoProga tehtud põhjauuringute paigad määrati kindlaks merepõhja kaardistamise põhjal. Mõnedel juhtudel oli kontrolli aluseks paljukiirelise batümeetriaga tuvastatud väljaulatuv objekt, teistel juhtudel langetati kaamerat, et vaadelda merepõhja lähemalt konkreetse huvipakkuvas alas.

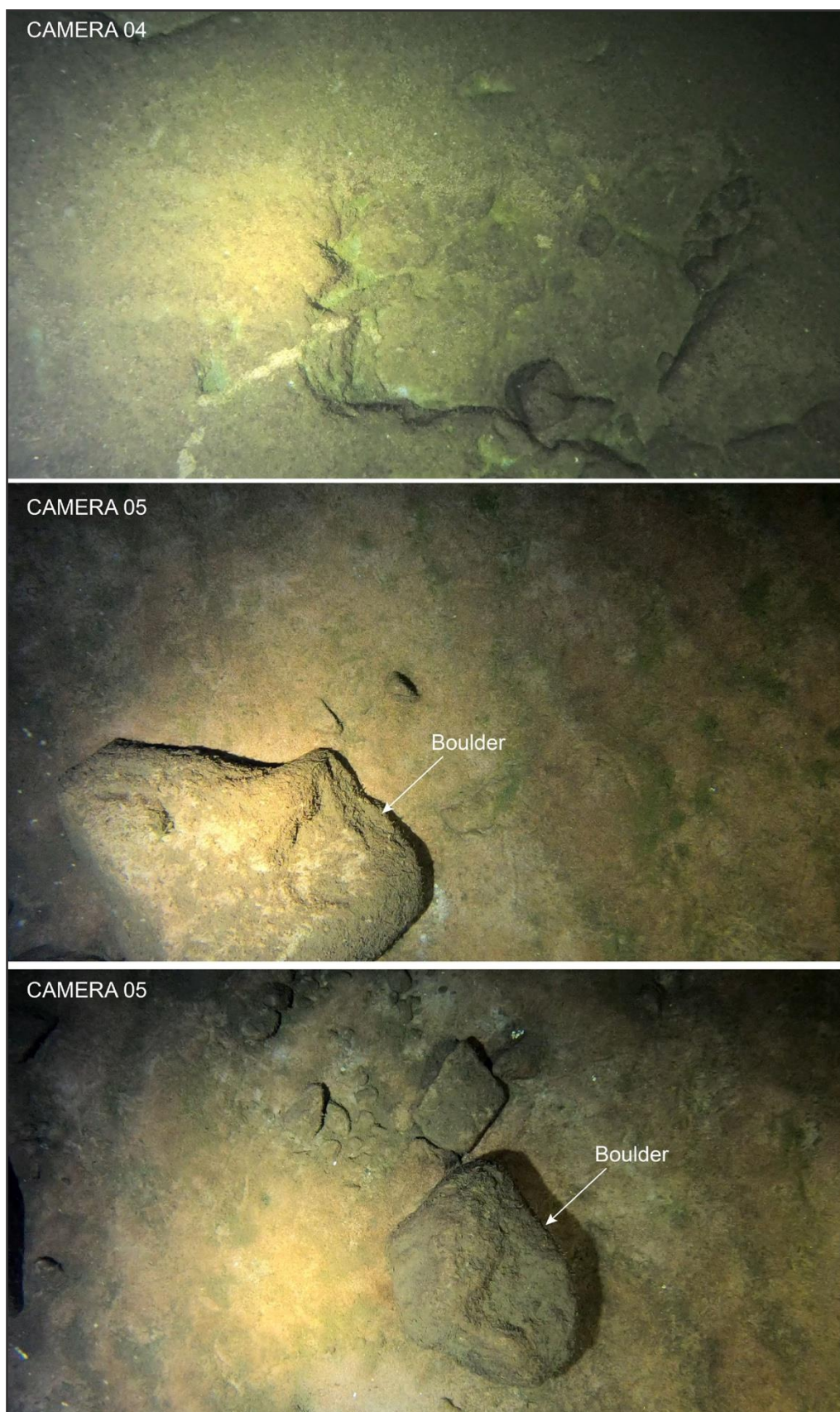
Viimase näited on kohad, kus esinesid lihked, ning sundlābistusnōōridega ristumiskohad. Tabel SBI2 võtab kokku meie tõlgendused igast paigast saadud filmi kohta, joonis SBI1 näitab nende asukohti kaardil ja joonised SBI7–11 sisaldavad pilte igast paigast. Hetktōmmised ei anna kunagi korralikult edasi algseid filme, mis on alati selgemad ja paljastavad rohkem üksikasju.

Allveeroboti vaatlused viis 14.–15. juulil 2021 läbi sukeldumissetevōte Tuukritōōde OÜ ja neid käsitletakse eraldi (Tuukritōōde OÜ, 2021). Siin on esitatud nende tehtud allveeroboti filmide hetktōmmised, kuna need annavad teavet merepõhja geoloogia kohta, iseāranis paigus, kus piki parvlaeva Estonia keret on aluspōhjakivimite paljand. Allveerobotil puudus veealune navigatsioonisüsteem. Allveeroboti filmide geoloogilisi asukohti saab seega üksnes umbkaudselt tuletada, tuvastades vraki osi.

Foto SBI1. Kahjustatud puursūdamiku lõikur pärast eemaldamist PC03.



Joonis SB17. Paikade hetktõmmised CAMERA 01, 02 ja 03.



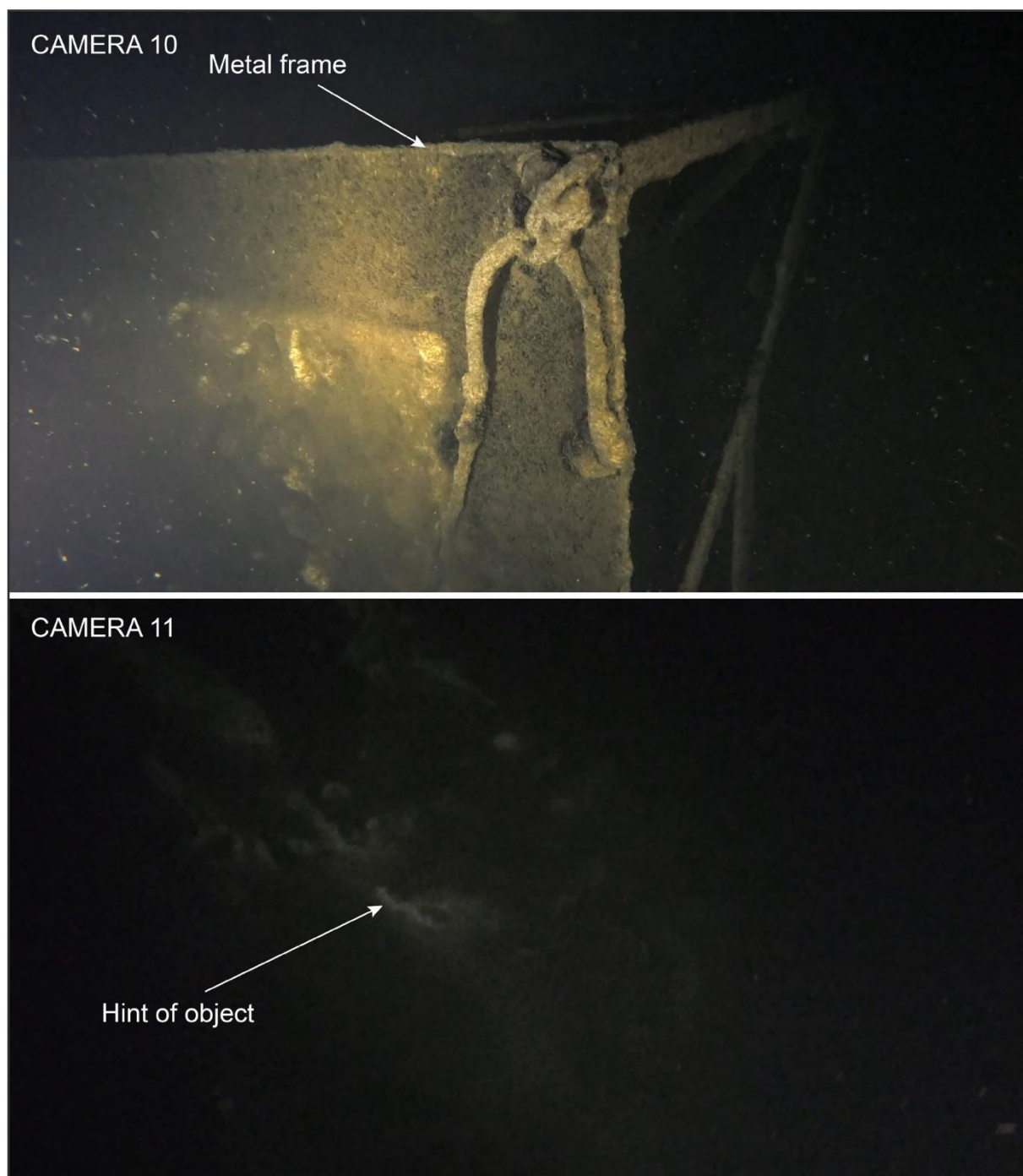
Joonis SBI8. Paikade hetktõmmised CAMERA 04 ja 05.



Joonis SBI9. Paikade hetktõmmised CAMERA 06 ja 07.



Joonis SBI10. Paikade hetktõmmised CAMERA 08 ja 09.



Joonis SB111. Paikade hetktõmmised CAMERA 10 ja 11.

Tuukritööde OÜ (2021) aruanne sisaldab märkmeid nähtavate aluspõhjajakivimite kohta piki kere merepõhjaga kokkupuutuvat paremparda külge:

esimene sukeldus, lk 5: „1.05.08: Liiguti mööda merepõhja ning vaadeldi purustatud kohta roosa graniidi nurga vastas, mis oli kogu uuringu lähtekoht.“

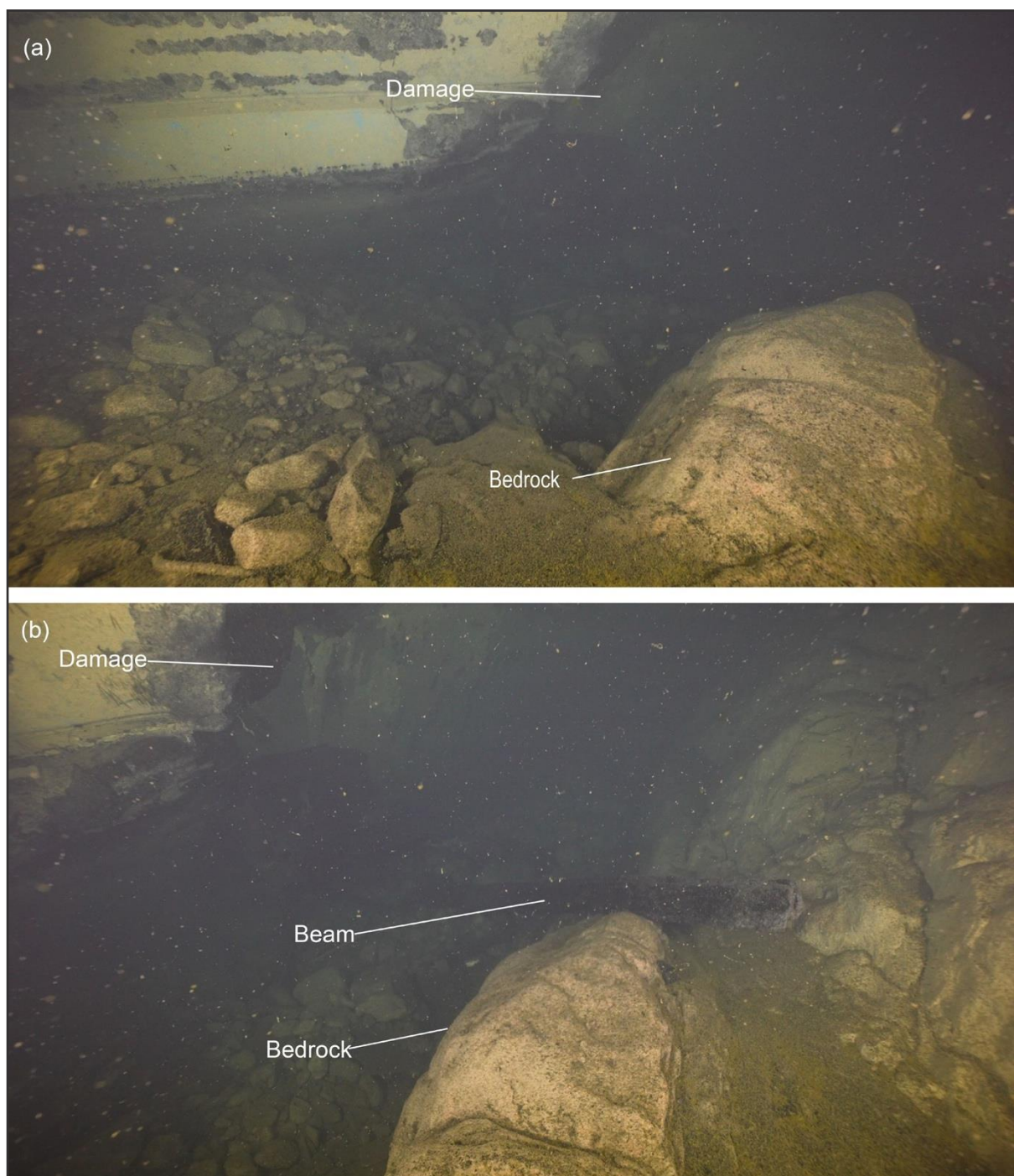
Teine sukeldus, lk 6: „16.27 Allveerobot liigub ahtri suunas ja jõuab 18.00 teise suure kahjustuseni graniitkivimi kohal.“

Ülaltoodud märkused viitavad kahele suuremale kahjustatud alale, mida vaadeldi parvlaeva Estonia kere, millest ahtrile lähemal asuvat filmiti ja näidati esimest korda Henrik Evertssoni Discovery+ dokumentaalfilmis. Kahjustus asub umbes 89 m vraki ahtrist ja aluspõhjajakivimid on selle kõrval allveeroboti filmis selgelt nähtavad (joonis SBI12). Tekstuuri ja paralleelsete lõhede põhjal paistab visuaalse vaatluse põhjal olevat tegu graniidi või süeniidiga (Alasdair Skelton, Stockholmi ülikool, isiklik kommentaar). Teine kahjustatud ala asub umbes 20 m kaugemal ahtri suunas, kus on näha suurt auku kere (joonis SBI13). Kere toetub siin aluspõhjajakivimitele, mis näivad olevat sama koostisega kui need, mis on teise kahjustatud ala juures. Lisaks vaadeldi aluspõhjajakivimeid parvlaeva Estonia kere kahe suure kahjustatud ala vahel. Neis kohtades, kus aluspõhjajakivimid on kere lähedal, näivad need olevat põhjustanud mõlke (joonis SBI14a). Lõpetuseks näitavad allveeroboti filmid, et aluspõhjajakivimite paljand ulatub aukudevahelisest alast veidi kaugemale, ehkki selle pikkust on keeruline täpselt tuletada, kuna allveerobotil pole positsioonisüsteemi ja puuduvad selgelt nähtavad viited (joonis SBI14b).

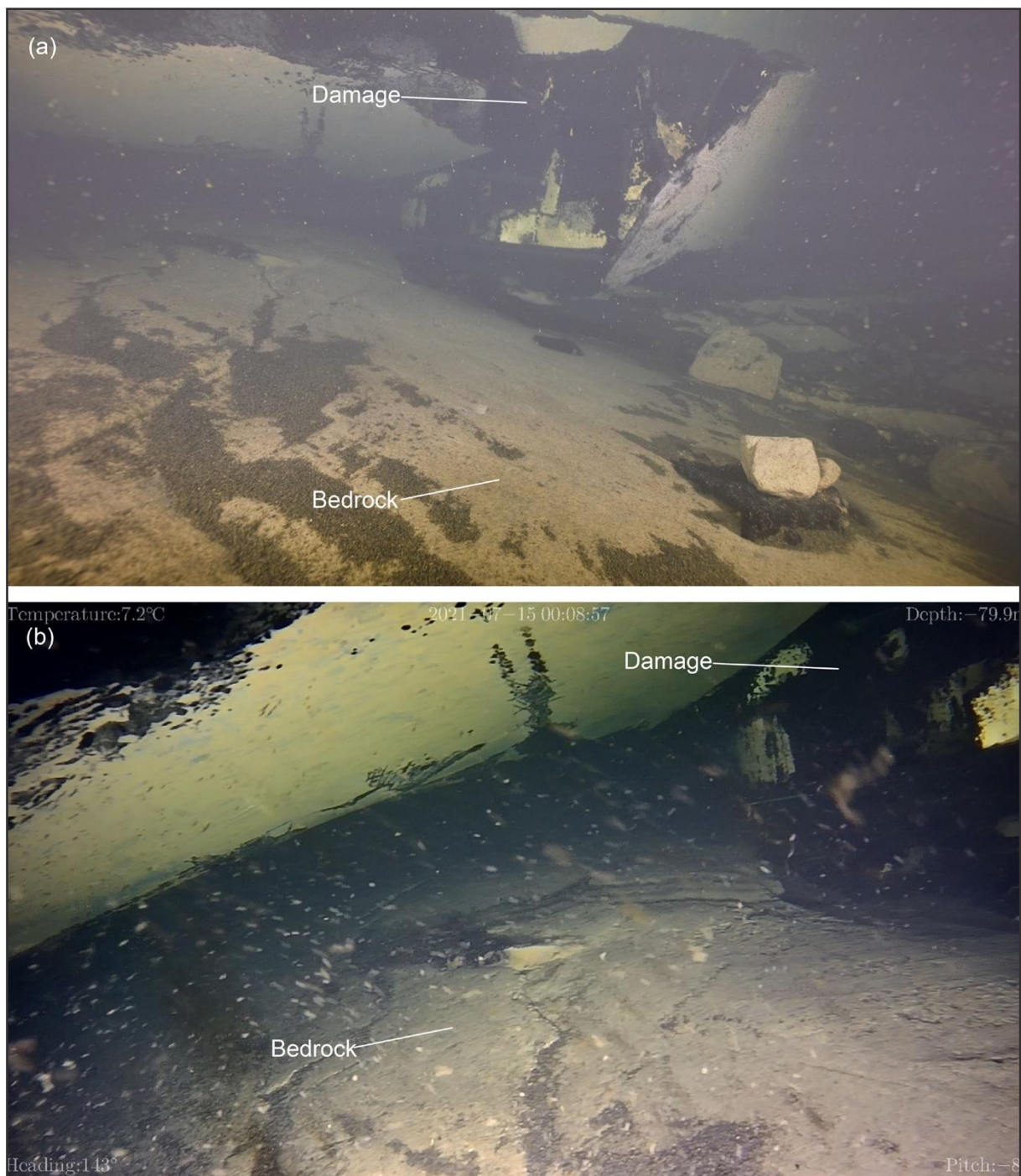
Paljukiirelises batümeetrias on selgelt näha parvlaevast Estonia põhjas asuvad kolm metallraami, millel on akustilised muundurid, võimaldades mõõta nende asukohti üksteise suhtes (joonis SBI1). Raamid on paigutatud selliselt, et need moodustavad täisnurkse kolmnurga, mille kahe kaateti pikkused on vastavalt umbes 43 ja 69 m. Neljas metallraam ei ole paigutatud täpselt 90° nurga alla 69 m pikkusest „alusjoonest“, mille moodustavad kaks kerest kõige kaugemat raami (joonis SBI15). Nihe on siiski vaid paar kraadi. Võib väita, et neljas metallraam CAMERA 10 vaateväljas, mis asub 112 m kaugusel CAMERA 07st, on sama tüüpi kui teised kolm, st ka sellel on muundur. Meie filmidelt ei ole seda aga võimalik kindlaks määrata, kuna sellest on nähtav vaid väike osa. Käsitletud objektid on nähtavad ka külgvaatesonari ja tagasihajumise kujutistel (joonised SBI16–18).

Ankurdatud ADCP

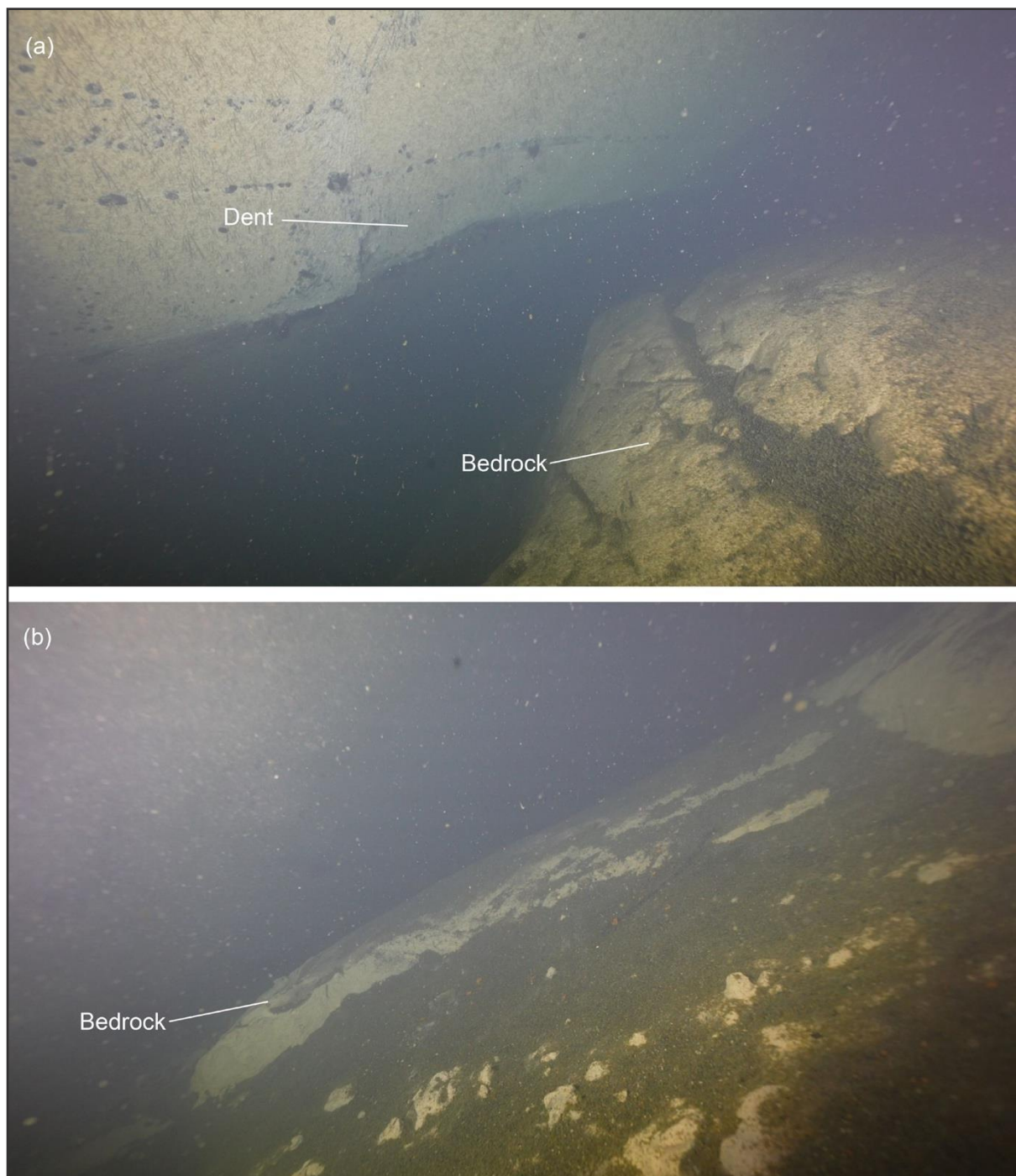
9. juulil paigaldati merepõhjale 82 m sügavusele ülespoole suunatud 400 kHz ADCP asukohta 53°23.015'N /21°41.272'E ning see eemaldati 14. juulil. Aegrida hõlmab umbes viit päeva ja sügavusvahemikku 80 m kuni umbes 15 m (joonised SBI19 ja 20). Umbes 70 m sügavusel on vool nii suuna kui ka kiiruse poolest väga varieeruv (joonis SBI19), kusjuures suur varieeruvuse komponent langeb kokku inertsiaalse perioodiga (umbes 14 tundi nendel laiuskraadidel, joonis SBI21). Sellised tuule juhitud peaaegu inertsiaalsed liikumised annavad sageli olulise panuse Läänemere keskosa spektritesse (Holtermann jt, 2014). Põhja lähedal, 80–70 m sügavusel liikus kagu-loode suunal edasi-tagasi tugev põhjavool (joonis SBI20). Selle põhjavoolu suund ei lange kokku kohaliku batümeetriaga, mis võib viidata ADCP kompassi kalibreerimise probleemile. Kui need põhjavoolud on püsivad, võivad need avaldada märkimisväärset mõju setete liikumisele parvlaeva Estonia läheduses ning potentsiaalselt isegi mõjutada laeva ennast. Selles osas järeltuste tegemiseks on vaja rohkem andmeid (eelkõige pikemaajad aegridu) ja täiendavat analüüsi.



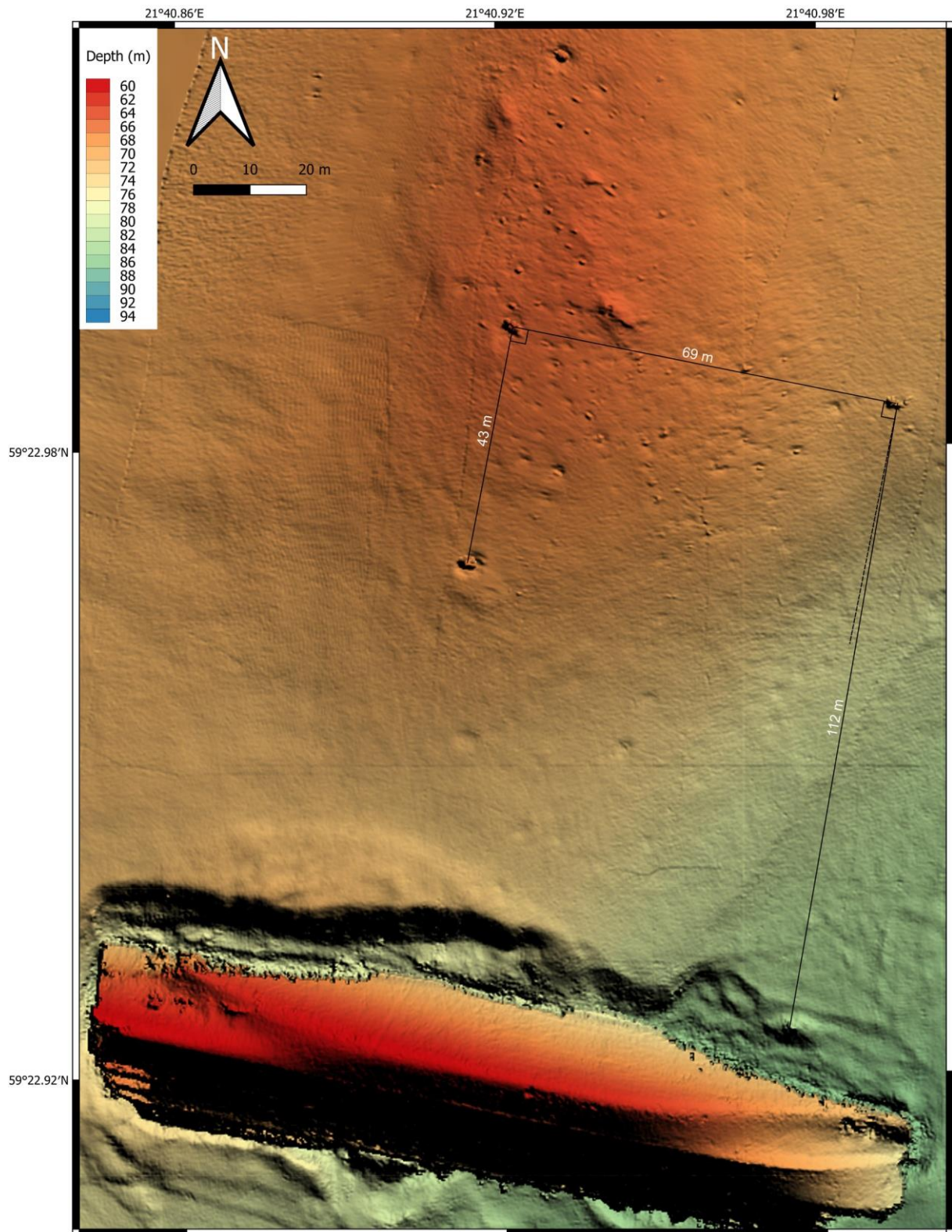
Joonis SBI12. (a, b) Aluspõhjajakivimite paljand parvlaeva Estonia kere kahjustuse kõrval, mida esmakordselt vaadeldi Henrik Evertssoni Discovery+ dokumentaalfilmis. (a) Laevakere august on välja kukkunud tala. Aluspõhjajakivimite tekstuuri ja paralleelse lõhede visuaalse vaatluse põhjal paistab see koosnevat graniidist või süeniidist (Alasdair Skelton, isiklik suhtlus).



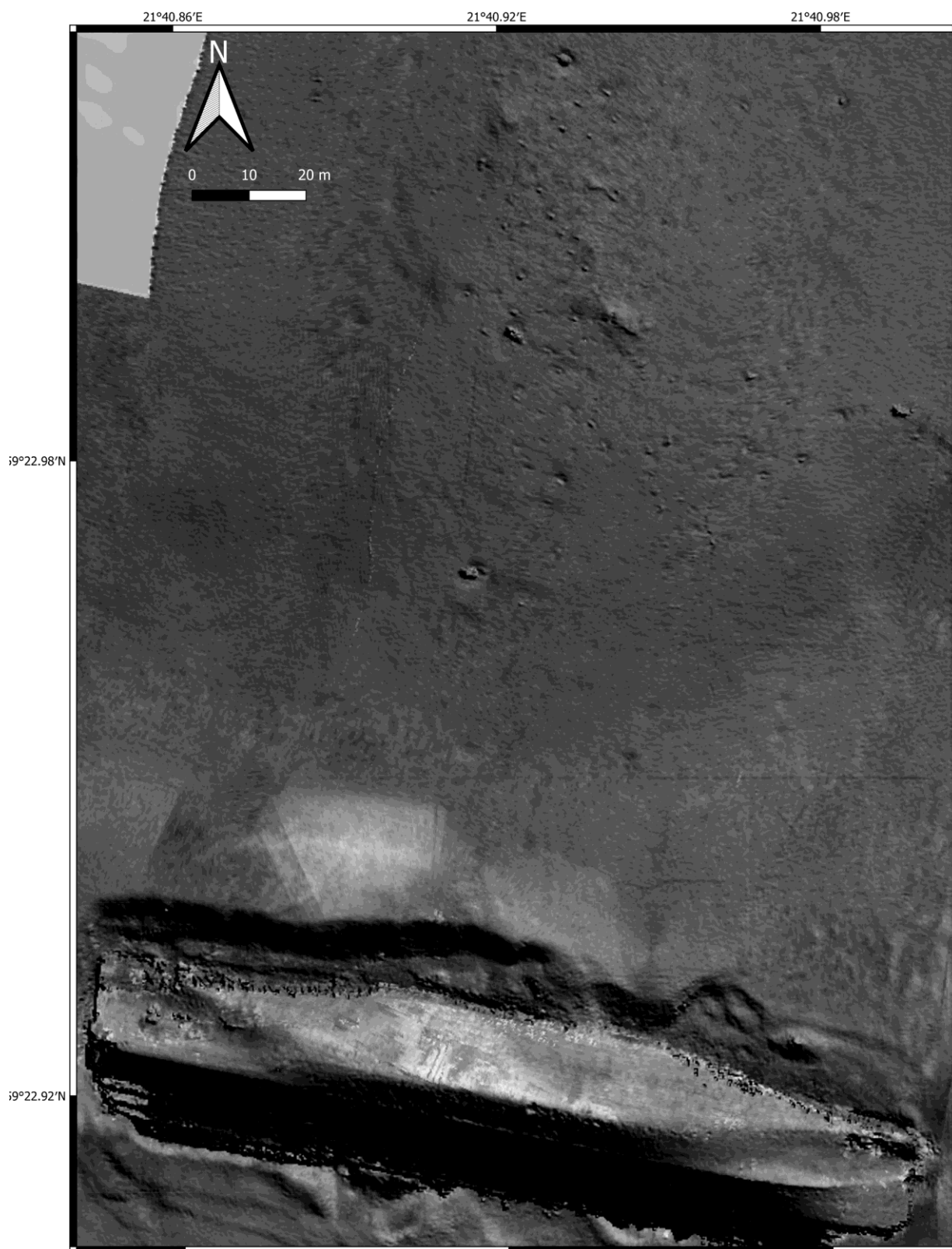
Joonis SBI13. Aluspõhjakeskmes parvlaeva Estonia kere all, kus asub teine suur kahjustus umbes 20 m joonisel SBI12 kujutatust kaugemal ahtri suunas. Kohta (a) filmis esimest korda Tuukritööde OÜ, kasutades oma allveerobotit Seaeye Falcon, samas kui (b) jäädvustati nende väiksema allveerobotiga.



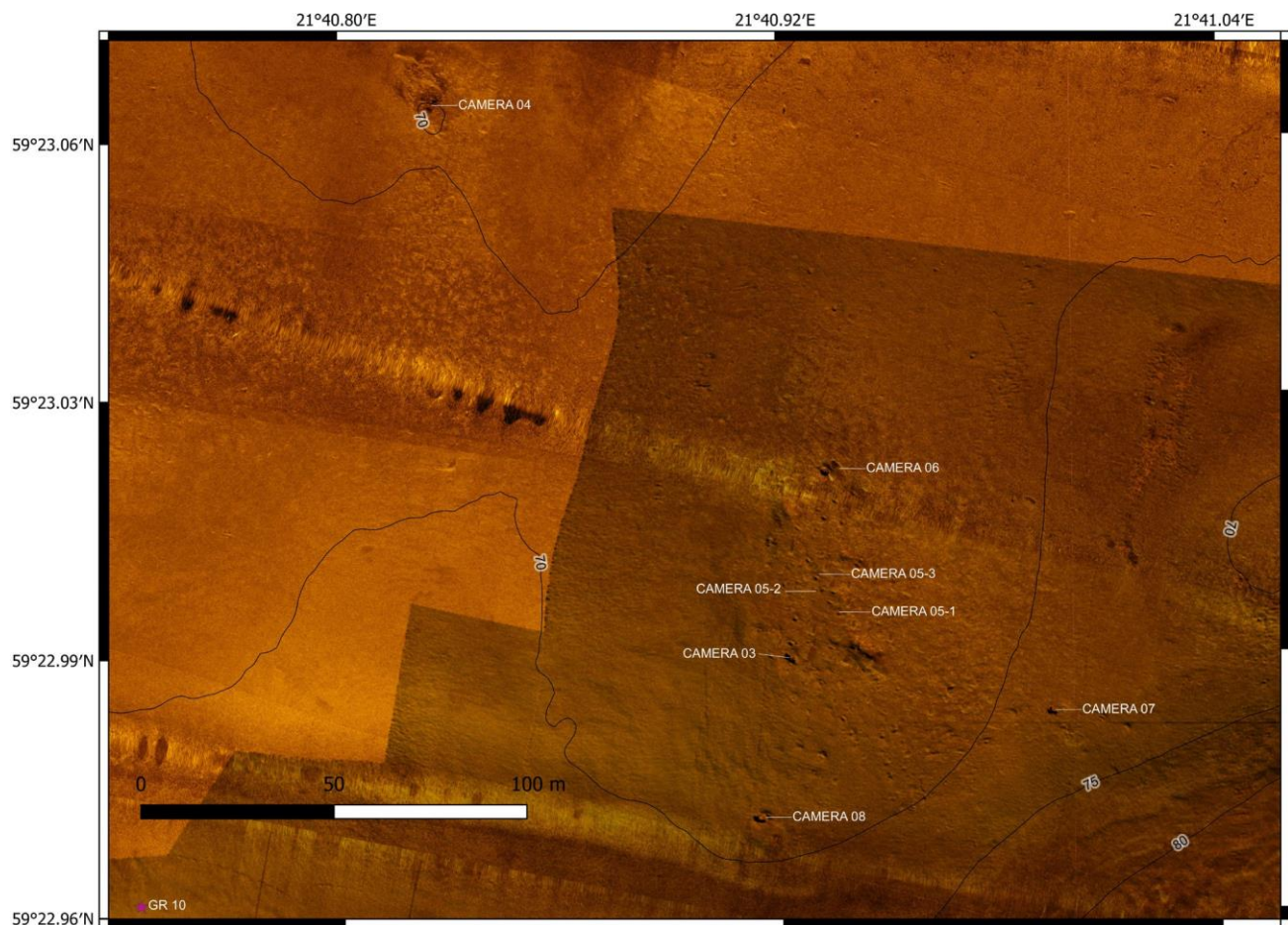
Joonis SBI14. (a) Parvlaeva Estonia kere lähedal asuvad aluspõhjajakivimid joonistel SBI12 ja 13 esitatud kahe suure augu vahel. On näha mõlgid kerel. (b) Aluspõhjajakivimid jätkuvad ahtri suunas tagumise augu asukoha juurest.



Joonis SBI15. Kaart, mis kujutab tuvastatud metallraamide asukohti.



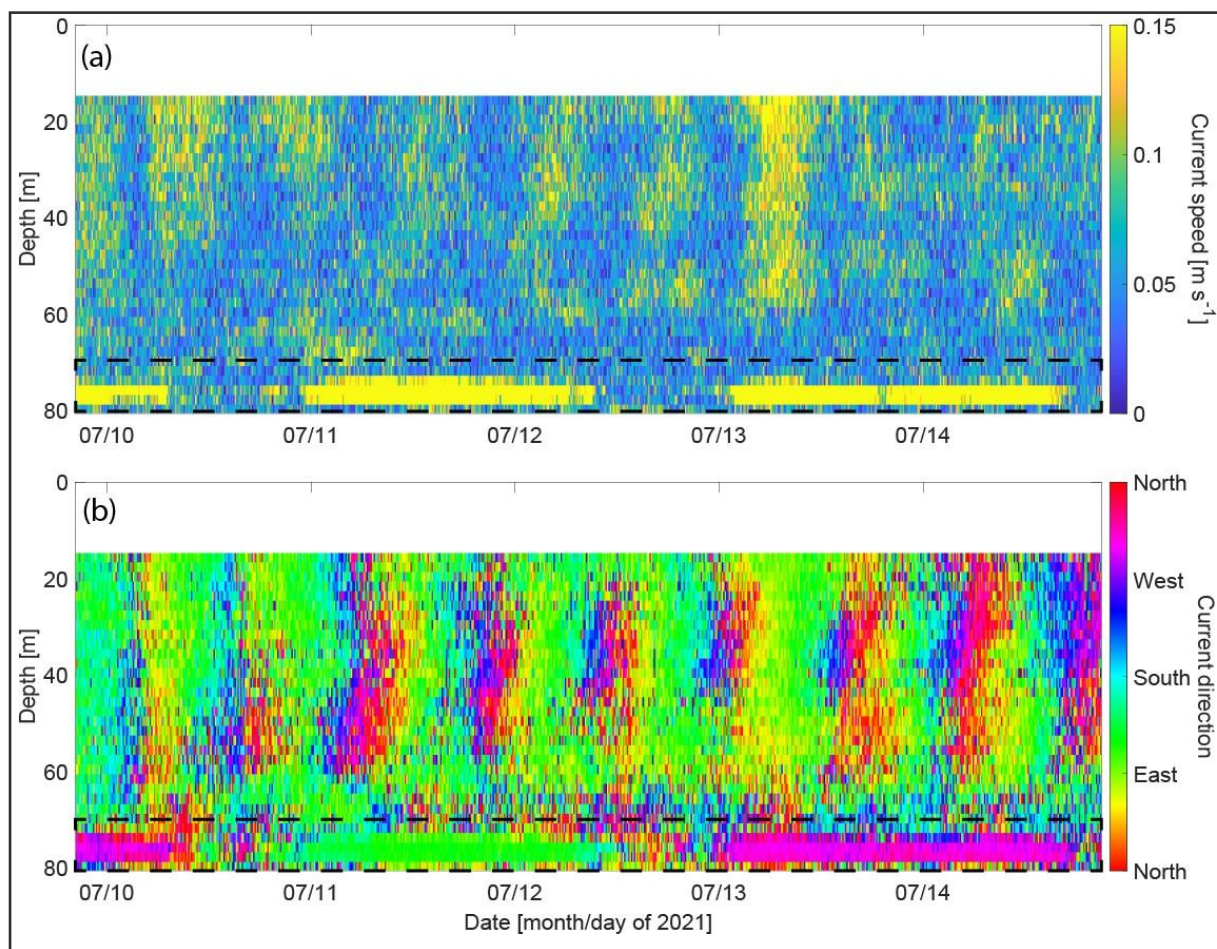
Joonis SBI16. Sama ala, mida näidatakse joonisel SBI16, kuid tagasihajumise kujutise ja paljukiirelise batümeetria varjudega.



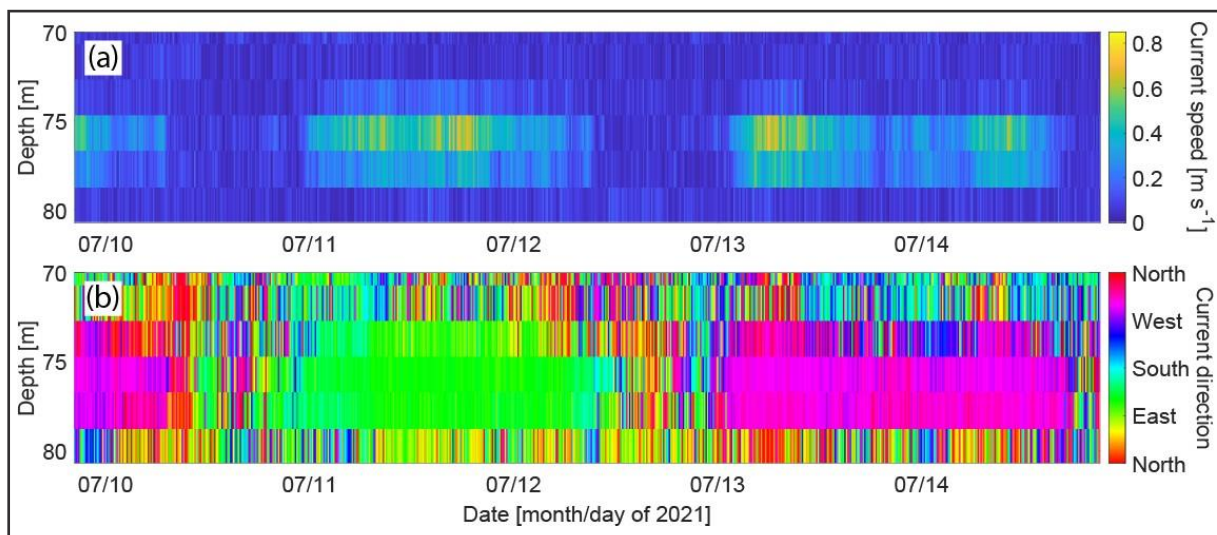
Joonis SBI17. Parvlaevast Estonia põhja pool asuva ala külgsaatesonari mosaiik näitab asukohti, kus tehti põhjavaatlusi GoPro kaameraga.



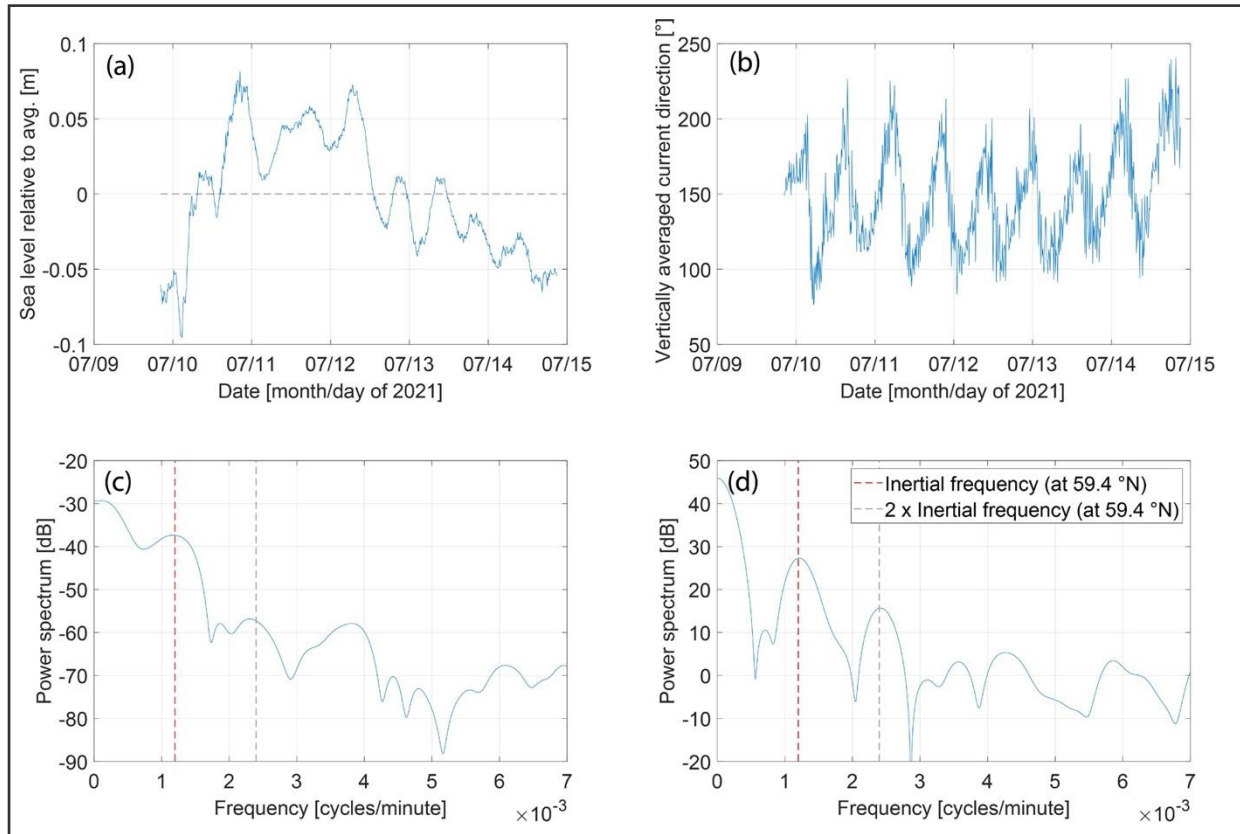
Joonis SBI18. Tagasihajumise kujutise 3D-vaade paljukiirelise batümeetria kohal alas, kus parvlaevast Estonia põhja pool asuvad metallraamid.



Joonis SBI19. Voolukiirused ankrukohas. Voolukiirus (a) ja suund (b) on episoodilised, kusjuures domineeriv sagedus langeb kokku inertsiaalse sagedusega (joonis SBI21).



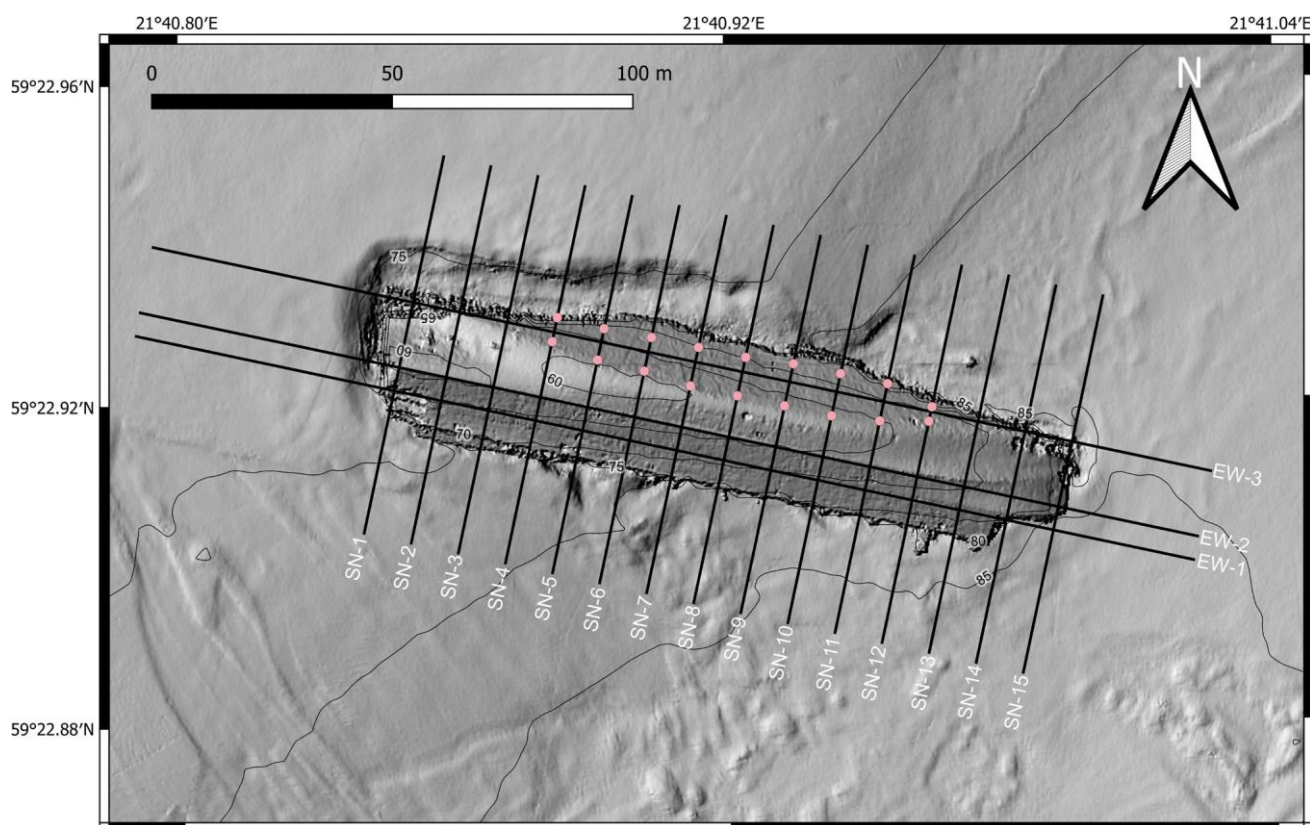
Joonis SBI20. Sama mis joonisel SB19, kuid suunitud 80 m kuni põhja sügavuse intervallini. Voolukiirus (a) ja suund (b) on episoodilised. Need põhjavoolud vaheldusid vaatlusperioodi jooksul loode- ja kagusuunaliste vahel, kusjuures kiirus oli mõnikord peaaegu 1 m/s.



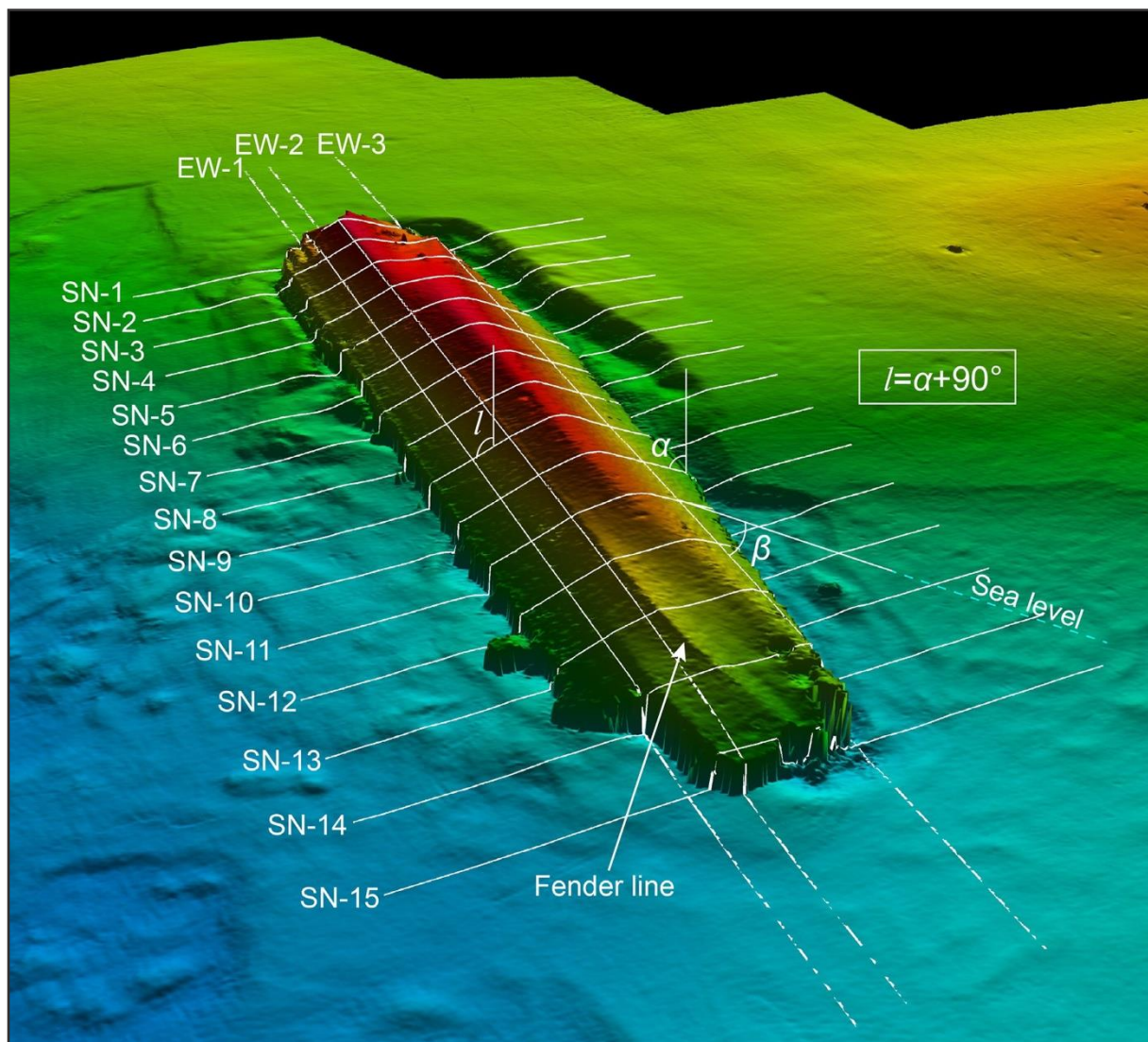
Joonis SBI21. Ankurdatud ADCP andmete aegrida ja võimsuse spekter. a) Merepinna erinevused võrrelduna keskmisega, tuletatud rõhuandurist. b) Vertikaalselt keskmistatud voolusuund. c) Merepinna aegrea võimsuse spekter (a). d) Vertikaalselt keskmistatud voolusuuna võimsuse spekter (b). Merepinna ja voolusuuna kõikumised langevad suurel määral kokku inertsiaalse sagedusega selle laiuskraadil (umbes 14 tunni pikkuse perioodiga) ja selle põhivõnkesagedusega.

Parvlaeva Estonia mõõtmine

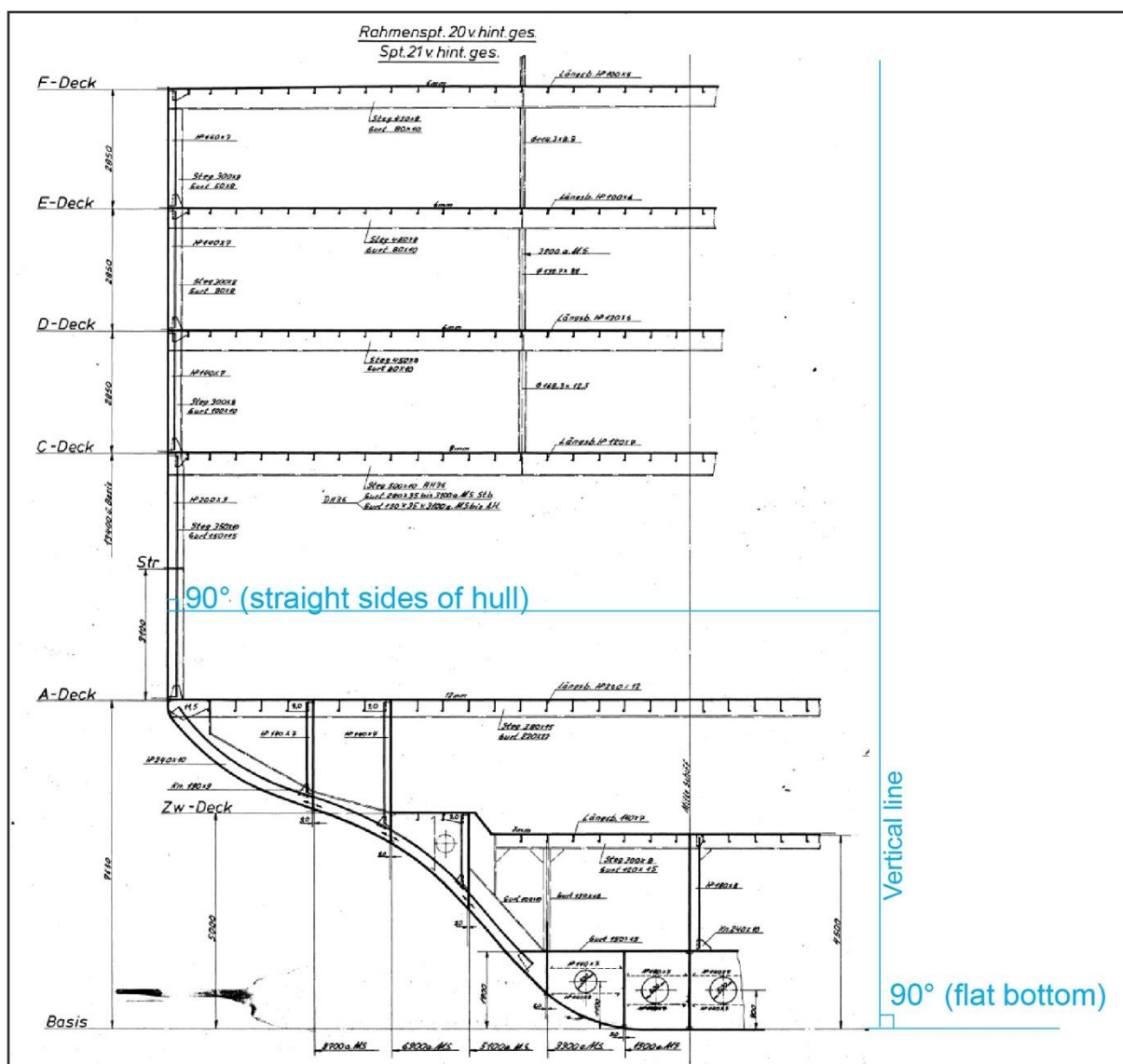
Parvlaeva Estonia merepõhja asukoha mõõtmised viidi läbi piki sügavusprofile, mis kulgesid üle kere lõuna-põhja ja ida-lääne suunal (joonis ME1). Nende profiilide sügavuse väärtused võeti üksikasjalikult $0,25 \times 0,25$ m ruudustikult, mida kasutati mõõtmiste alusena (joonis ME2). Profiile kasutati ka selleks, et analüüsida, kas on võimalik tuvastada kere deformatsioone. Mõõtmisi hõlbustab parvlaev Estonia, millel on jooniste kohaselt lameda põhjaga kere ja püstloodis sirged küljed (joonis ME3). Neid eeldusi kasutati aruandes tuletatud väärtuste alusena. SN (lõuna-põhja) profiilid paigutati risti vendri liiniga, mis on üksikasjalikul paljukiirelisel batümeetrial selgelt nähtav (joonis ME2).



Joonis ME1. Üksikasjaliku paljukiirelise uuringu põhjal koostatud $0,25 \times 0,25$ m ruudustikku kasutades rekonstrueeritud sügavusprofiilide asukoht. Leiti, et profiilide SN-4 kuni SN-12 roosade punktide vahelised lõigud paiknesid vraki lamedal põhjal ja sobivad seega kreenimise arvutamiseks. Vraki kreenimise hindamiseks kasutati ka lamedat vasakparrast kujutavate profiilide SN-4 kuni SN-12 lõike. Profiile EW-1 kuni EW-3 kasutati parvlaeva Estonia diferendi (laeva kalle pikuti suunas) arvutamiseks merepinna suhtes.



Joonis ME2. 3D-vaade, mis põhineb $0,25 \times 0,25$ m mitmekihilisel ruudustikul, mis näitab saadud profiile ja kuidas arvutatakse parvlaeva Estonia kreenimist kui $\alpha + 90^\circ$ ja vraki diferenti β piki selle pikkust merepinna suhtes. Kreenimist hinnati ka vraki lameda vasakparda põhjal.



Joonis ME3. Parvlaeva Estonia joonise osa, autor Jos. L. Meyer Papenburg (Ems). Originaaljoonised on kuupäevaga 13.06.1980. Sinised jooned on tuletatud näitamaks, et laeva põhi on tasane ning küljed on vertikaalsed ja seega põhjaga risti. Seda eeldust on kasutatud käesolevas aruandes alusena, et mõõta parvlaeva Estonia praegust kreenimist ja seda, kas paljukiirelise batümeetrilise uuringu põhjal on võimalik leida kere deformatsioone.

Mõõdetud kreenimine tasase põhja alusel

Profiilid SN-4 kuni SN-12, mis kujutavad kere põhja lamedat osa ja sobivad seega kreenimise mõõtmiseks (joonised ME4 ja ME5). Iga profiili tasased põhjaosad tuvastati ja märgiti punktidega joonisel M1. Koostati kõikide sügavusväärtuste lineaarne regressioon piki iga lamedat sektsiooni ning selle regressiooni nõlva sr-i kasutati parvlaeva Estonia kreenimise 1 hindamiseks, mis võrdub regressioonijoone ja vertikaaljoone vahelise nurgaga α (vt joonised M3 ja M4) pluss 90°, kuna laev on kreenis üle 90°:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{1}{s_r} \right)$$

Equation ME1.

$$l = \alpha + 90$$

Equation ME2.

Tabelis ME1 esitatakse iga profiili arvutatud kreenimine ja tabel ME2 sisaldab iga saadud jaotise regressioonide statistikat. Keskmistatud ($n = 9$) kreenimine on $133,7^\circ \pm 0,4^\circ$ (kuna regressioonijoonete kalle on negatiivne, on arvutatud kreenimine negatiivne, kuid on siin esitatud positiivsena). Piki profiile mõõdetud kreenimise vahel ei ole ilmseid süstemaatilisi erinevusi, st tasase põhja mõõtmiste põhjal ei ole kere moondunud.

Mõõdetud kreenimine vasakpardal

Kreenimist saab mõõta ka laeva külgede kaldenurga põhjal, kasutades samu profiile SN-4 kuni SN-12. See tähendab, et l on saadud laeva külgede jäädvustamiseks kasutatud paljukiirelise batümeetria kalde põhjal (joonis ME2), kasutades:

$$l = \tan^{-1}(s_r) + 90 \quad \text{Equation ME3.}$$

Parvlaeva Estonia tasase vasakparda keskmistatud kreenimine on hinnanguliselt $132,6^\circ \pm 0,4^\circ$, st umbes üks kraad vähem kui põhjast mõõdetult (tabel ME1). Lisaks viitavad lameda vasakparda põhjal hinnatud kreenimise väärtused väikesele suundumusele madalamate väärtuste poole kere vööri suunas, samas kui lameda põhja mõõtetulemused on pigem muutumatud (joonis ME5). See võib viidata sellele, et vraki külg on merepõhjaga kokkupuute tõttu või aja jooksul deformeerunud. Kuna paljukiirelise batümeetria ebakindlus on juhusliku iseloomuga, näivad täheldatud hinnangulise kreenimise suundumused olevat tõesed, ehkki need on väga väikesed.

Mõõdetud diferent

Parvlaeva Estonia kere diferent β merepõhjal on siin määratletud kui nurk EW (ida-lääne) profiilide ja merepinna vahel (joonis ME2). Lisaks arvutati diferent tuletatud regressioonide kallakut kasutades, siin iga EW profiili jaoks, mis on SN-4 ja SN-12 tasaste sektsioonide vahel (joonis ME7). Kasutati järgmist võrrandit:

$$\beta = 90 + \tan^{-1}\left(\frac{1}{s_r}\right) \quad \text{Equation ME4.}$$

Arvutatud diferent on esitatud tabelis ME1 ja keskmine on $4,5^\circ \pm 0,3$. Regressioonianalüüsides ei tuvastatud selget laeva pikisuunalist deformatsiooni.

Tabel ME1: Parvlaeva Estonia arvutatud kreenimine, tuginedes profiilidele SN-4 kuni SN-12, mis on näidatud joonistel ME4 ja ME5, ning kere diferent merepinna suhtes, tuginedes profiilidele EW-1 kuni EW-3, mis on näidatud joonisel ME7. Kõik väärtused tuletatakse lineaarsete regressioonide kaudu (vt teksti). Kõigi lameda põhja analüüsitud profiilide keskmine kreenimine on $\sim 133,7^\circ \pm 0,4$, vasakpardal $\sim 132,6^\circ \pm 0,4$ ja keskmine diferent merepinna suhtes on $\sim 4,5^\circ \pm 0,3$.

NS (põhja-lõuna) profiilid	Kreenimine (°) (põhja alusel)	Kreenimine (°) (vasakparda alusel)	EW (ida-lääne) profiilid	Diferent (°)
SN-4	133,9	132,9	EW-1	4,3
SN-5	133,9	132,5	EW-2	4,8
SN-6	133,5	133,1	EW-3	4,3
SN-7	134,0	132,6		$\sim 4,5^\circ \pm 0,3$
SN-8	134,0	132,9		
SN-9	132,9	132,5		
SN-10	133,7	132,7		
SN-11	133,7	132,2		
SN-12	133,9	132,0		
	$\sim 133,7^\circ \pm 0,4$	$\sim 132,6^\circ \pm 0,4$		

Tabel ME2: joonistel ME4, ME5 ja ME6 kujutatud parvlaeva Estonia lameda põhja profiilide sektsioonide lineaarsete regressioonide statistika.

Lineaarne vaste – SN-4 Võrrand $Y = -1,0384594 * X - 13,408731$ Kasutatavate andmepunktide arv = 20 Keskmine $X = 49,456869$ Keskmine $Y = -64,767679$ Ruutude jääksumma = 0,0203342 Ruutude regressioonisumma = 46,848097 Kindlaksmääramiskoeffitsient, $R^2 = 0,9995661$ Korrelatsioonikordaja, $R = 0,9997830$ Keskmise ruudu jääkväärtus, $\sigma^2 = 0,0011297$ P-väärtus = vähem kui 0,0001 Sirglõigu standardviga (A) = +/- 0,2523133 Kalde standardviga (B) = +/-0,0050994	Lineaarne vaste – SN-5 Võrrand $Y = -1,0394226 * X - 14,076551$ Kasutatavate andmepunktide arv = 27 Keskmine $X = 48,562300$ Keskmine $Y = -64,553302$ Ruutude jääksumma = 0,0325383 Ruutude regressioonisumma = 115,60842 Kindlaksmääramiskoeffitsient, $R^2 = 0,9997186$ Korrelatsioonikordaja, $R = 0,9998593$ Keskmise ruudu jääkväärtus, $\sigma^2 = 0,0013015$ P-väärtus = vähem kui 0,0001 Sirglõigu standardviga (A) = +/- 0,1695074 Kalde standardviga (B) = +/-0,0034876	Lineaarne vaste – SN-6 Võrrand $Y = -1,0533388 * X - 13,998944$ Kasutatavate andmepunktide arv = 27 Keskmine $X = 48,562300$ Keskmine $Y = -65,151497$ Ruutude jääksumma = 0,0581615 Ruutude regressioonisumma = 118,72477 Kindlaksmääramiskoeffitsient, $R^2 = 0,9995104$ Korrelatsioonikordaja, $R = 0,9997552$ Keskmise ruudu jääkväärtus, $\sigma^2 = 0,0023265$ P-väärtus = vähem kui 0,0001 Sirglõigu standardviga (A) = +/- 0,2266257 Kalde standardviga (B) = +/- 0,0046628
Lineaarne vaste – SN-7 Võrrand $Y = -1,0345762 * X - 15,685150$ Kasutatavate andmepunktide arv = 31 Keskmine $X = 48,051118$ Keskmine $Y = -65,397695$ Ruutude jääksumma = 0,0784940 Ruutude regressioonisumma = 173,40754 Kindlaksmääramiskoeffitsient, $R^2 = 0,9995475$ Korrelatsioonikordaja, $R = 0,9997737$ Keskmise ruudu jääkväärtus, $\sigma^2 = 0,0027067$ P-väärtus = vähem kui 0,0001 Sirglõigu standardviga (A) = +/- 0,1966266 Kalde standardviga (B) = +/-0,0040874	Lineaarne vaste – SN-8 Võrrand $Y = -1,0353893 * X - 16,546756$ Kasutatavate andmepunktide arv = 31 Keskmine $X = 48,051118$ Keskmine $Y = -66,298371$ Ruutude jääksumma = 0,0608659 Ruutude regressioonisumma = 173,68021 Kindlaksmääramiskoeffitsient, $R^2 = 0,9996497$ Korrelatsioonikordaja, $R = 0,9998248$ Keskmise ruudu jääkväärtus, $\sigma^2 = 0,0020988$ P-väärtus = vähem kui 0,0001 Sirglõigu standardviga (A) = +/- 0,1731455 Kalde standardviga (B) = +/-0,0035993	Lineaarne vaste – SN-9 Võrrand $Y = -1,0755599 * X - 15,296027$ Kasutatavate andmepunktide arv = 35 Keskmine $X = 48,562300$ Keskmine $Y = -67,527692$ Ruutude jääksumma = 0,2346259 Ruutude regressioonisumma = 269,79181 Kindlaksmääramiskoeffitsient, $R^2 = 0,9991311$ Korrelatsioonikordaja, $R = 0,9995655$ Keskmise ruudu jääkväärtus, $\sigma^2 = 0,0071099$ P-väärtus = vähem kui 0,0001 Sirglõigu standardviga (A) = +/- 0,2685117 Kalde standardviga (B) = +/- 0,0055214
Lineaarne vaste – SN-10 Võrrand $Y = -1,0446940 * X - 17,374200$ Kasutatavate andmepunktide arv = 35 Keskmine $X = 48,562300$ Keskmine $Y = -68,106945$ Ruutude jääksumma = 0,0674911 Ruutude regressioonisumma = 254,52927 Kindlaksmääramiskoeffitsient, $R^2 = 0,9997349$ Korrelatsioonikordaja, $R = 0,9998674$ Keskmise ruudu jääkväärtus, $\sigma^2 = 0,0020452$ P-väärtus = vähem kui 0,0001 Sirglõigu standardviga (A) = +/- 0,1440119 Kalde standardviga (B) = +/-0,0029613	Lineaarne vaste – SN-11 Võrrand $Y = -1,0482579 * X - 17,986628$ Kasutatavate andmepunktide arv = 31 Keskmine $X = 49,073482$ Keskmine $Y = -69,428295$ Ruutude jääksumma = 0,0632319 Ruutude regressioonisumma = 178,02430 Kindlaksmääramiskoeffitsient, $R^2 = 0,9996449$ Korrelatsioonikordaja, $R = 0,9998224$ Keskmise ruudu jääkväärtus, $\sigma^2 = 0,0021804$ P-väärtus = vähem kui 0,0001 Sirglõigu standardviga (A) = +/- 0,1802251 Kalde standardviga (B) = +/-0,0036686	Lineaarne vaste – SN-12 Võrrand $Y = -1,0379066 * X - 19,290451$ Kasutatavate andmepunktide arv = 12 Keskmine $X = 48,434505$ Keskmine $Y = -69,560945$ Ruutude jääksumma = 0,0065375 Ruutude regressioonisumma = 10,063381 Kindlaksmääramiskoeffitsient, $R^2 = 0,9993508$ Korrelatsioonikordaja, $R = 0,9996753$ Keskmise ruudu jääkväärtus, $\sigma^2 = 0,0006537$ P-väärtus = vähem kui 0,0001 Sirglõigu standardviga (A) = +/- 0,4052458 Kalde standardviga (B) = +/- 0,0083655

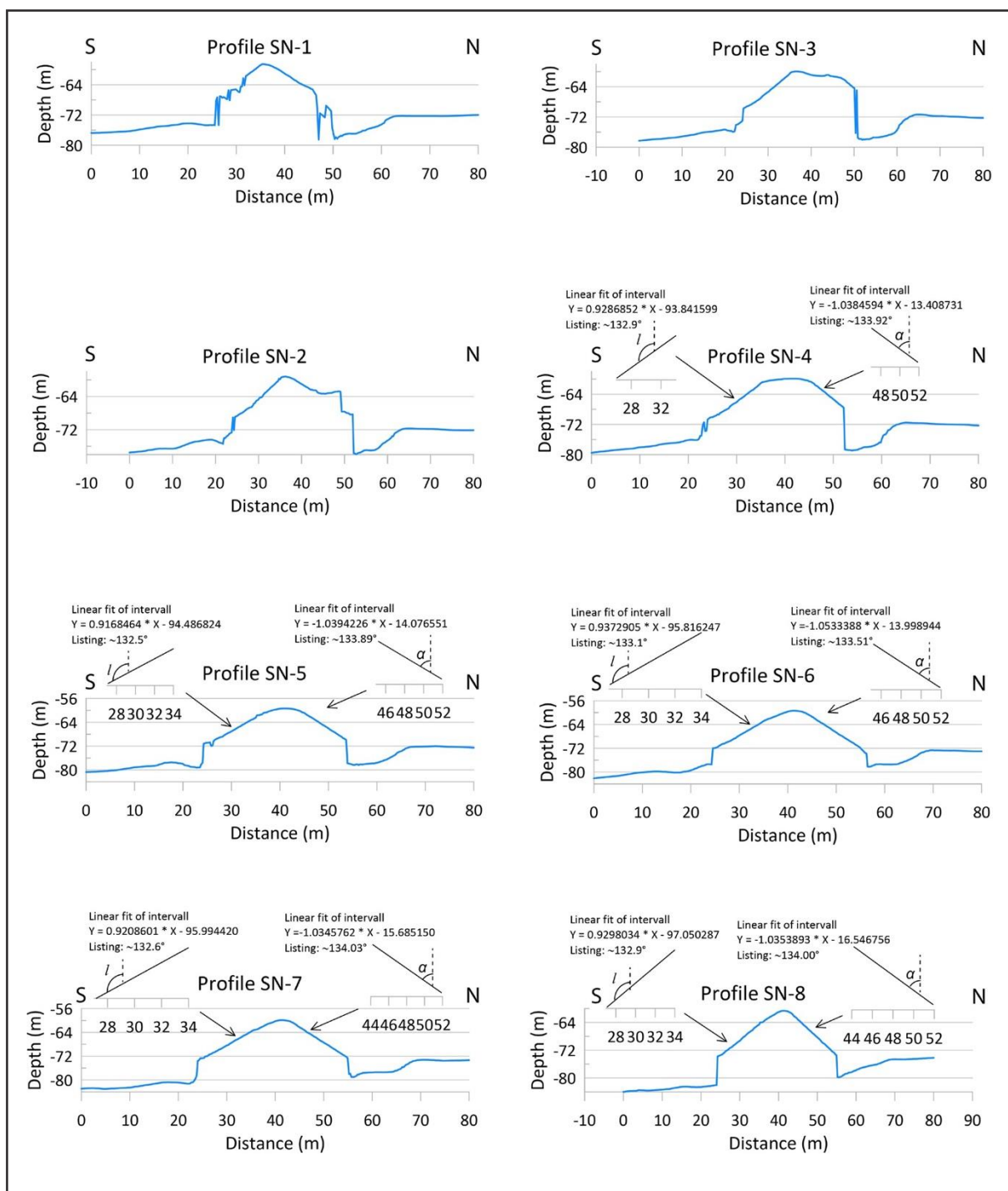
Lineaarne vaste – EW-1 (sektsoon SN04 ja SN-12 vahel) Võrrand $Y = -0,0790927 * X - 59,227097$ Kasutatavate andmepunktide arv = 333 Keskmine $X = 122,52119$ Keskmine $Y = -68,917624$ Ruutude jääksumma = 3,5250899 Ruutude regressioonisumma = 1259,4220 Kindlaksmääramiskoeffitsient, $R^2 = 0,9972088$ Korrelatsioonikordaja, $R = 0,9986034$ Keskmise ruudu jääkväärtus, $\sigma^2 = 0,0106498$ P-väärtus = vähem kui 0,0001 Sirglõigu standardviga (A) = +/- 0,0287413 Kalde standardviga (B) = +/- 0,0002300	Lineaarne vaste – EW-2 (sektsoon SN-4 ja SN-12 vahel) Võrrand $Y = -0,0833237 * X - 53,921184$ Kasutatavate andmepunktide arv = 333 Keskmine $X = 122,52119$ Keskmine $Y = -64,130109$ Ruutude jääksumma = 7,1783122 Ruutude regressioonisumma = 1397,7724 Kindlaksmääramiskoeffitsient, $R^2 = 0,9948907$ Korrelatsioonikordaja, $R = 0,9974421$ Keskmise ruudu jääkväärtus, $\sigma^2 = 0,0216867$ P-väärtus = vähem kui 0,0001 Sirglõigu standardviga (A) = +/- 0,0410141 Kalde standardviga (B) = +/- 0,0003282	Lineaarne vaste – EW-3 (sektsoon SN-4 ja SN-12 vahel) Võrrand $Y = -0,0753374 * X - 57,821785$ Kasutatavate andmepunktide arv = 313 Keskmine $X = 125,07904$ Keskmine $Y = 67,244914$ Ruutude jääksumma = 6,1744052 Ruutude regressioonisumma = 948,89877 Kindlaksmääramiskoeffitsient, $R^2 = 0,9935351$ Korrelatsioonikordaja, $R = 0,9967623$ Keskmise ruudu jääkväärtus, $\sigma^2 = 0,0198534$ P-väärtus = vähem kui 0,0001 Sirglõigu standardviga (A) = +/- 0,0438321 Kalde standardviga (B) = +/- 0,0003446
--	--	---

Tabel ME3: Joonistel ME4 ja ME5 kujutatud parvlaeva Estonia vasakparda profiilide sektsioonide lineaarsete regressioonide statistika.

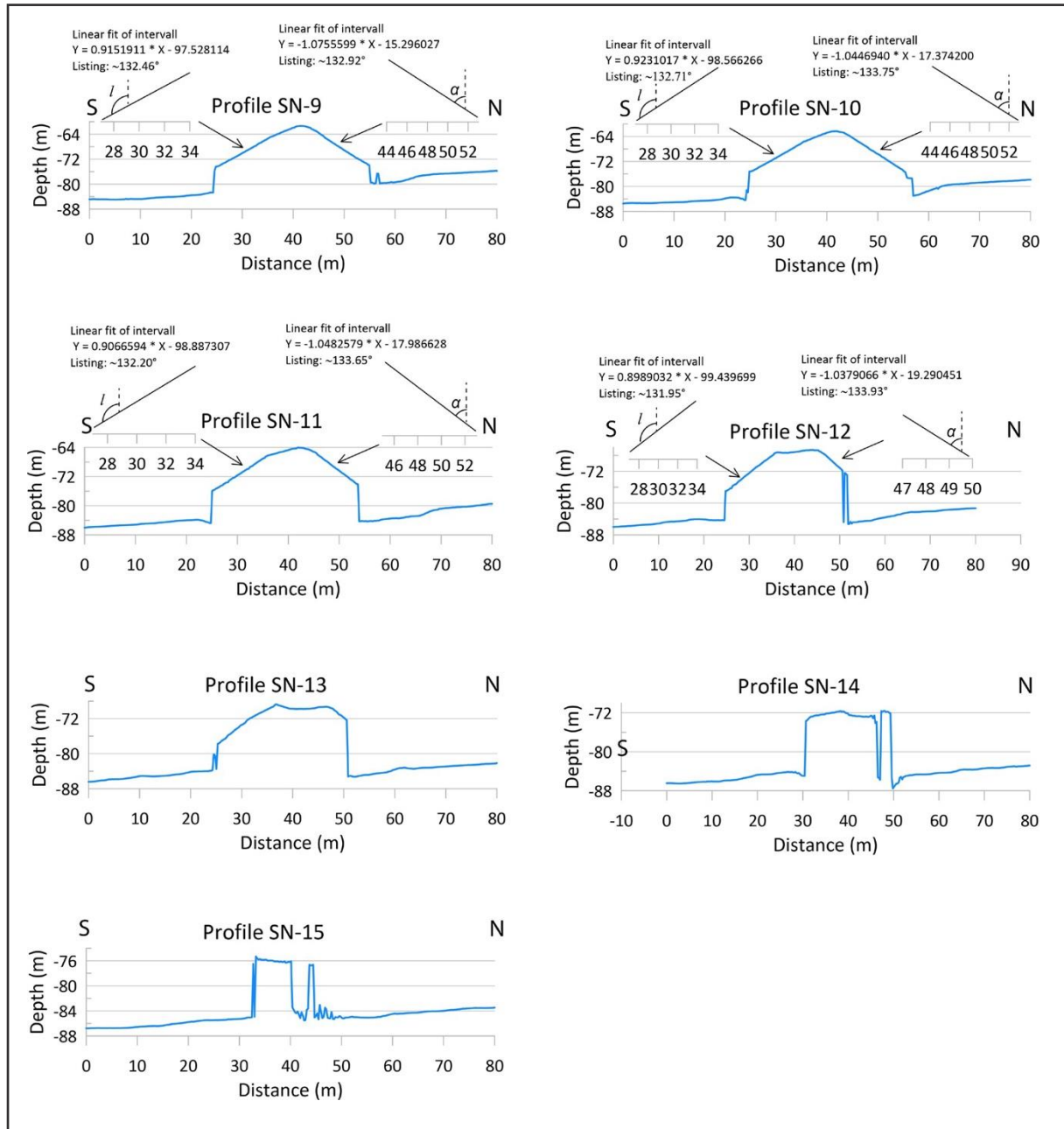
Lineaarne vaste – SN-4 (vasakparras) Võrrand $Y = 0,9286852 * X - 93,841599$ Kasutatavate andmepunktide arv = 32 Keskmine $X = 30,031949$ Keskmine $Y = -65,951372$ Ruutude jääksumma = 0,3226939 Ruutude regressioonisumma = 153,69960 Kindlaksmääramiskoeffitsient, $R^2 = 0,9979049$ Korrelatsioonikordaja, $R = 0,9989519$ Keskmise ruudu jääkväärtus, $\sigma^2 = 0,0107565$ P-väärtus = vähem kui 0,0001 Sirglõigu standardviga (A) = +/- 0,2340384 Kalde standardviga (B) = +/- 0,0077690	Lineaarne vaste – SN-5 (vasakparras) Võrrand $Y = 0,9168464 * X - 94,486824$ Kasutatavate andmepunktide arv = 28 Keskmine $X = 30,543131$ Keskmine $Y = -66,483466$ Ruutude jääksumma = 0,1480381 Ruutude regressioonisumma = 100,32819 Kindlaksmääramiskoeffitsient, $R^2 = 0,9985266$ Korrelatsioonikordaja, $R = 0,9992630$ Keskmise ruudu jääkväärtus, $\sigma^2 = 0,0056938$ P-väärtus = vähem kui 0,0001 Sirglõigu standardviga (A) = +/- 0,2114407 Kalde standardviga (B) = +/- 0,0069069	Lineaarne vaste – SN-6 (vasakparras) Võrrand $Y = -0,9372905 * X - 95,816247$ Kasutatavate andmepunktide arv = 28 Keskmine $X = 30,543131$ Keskmine $Y = -67,188460$ Ruutude jääksumma = 0,1283941 Ruutude regressioonisumma = 104,85238 Kindlaksmääramiskoeffitsient, $R^2 = 0,9987770$ Korrelatsioonikordaja, $R = 0,9993883$ Keskmise ruudu jääkväärtus, $\sigma^2 = 0,0049382$ P-väärtus = vähem kui 0,0001 Sirglõigu standardviga (A) = +/- 0,1969130 Kalde standardviga (B) = +/- 0,0064324
---	---	--

(Jätkub järgmisel lehel)

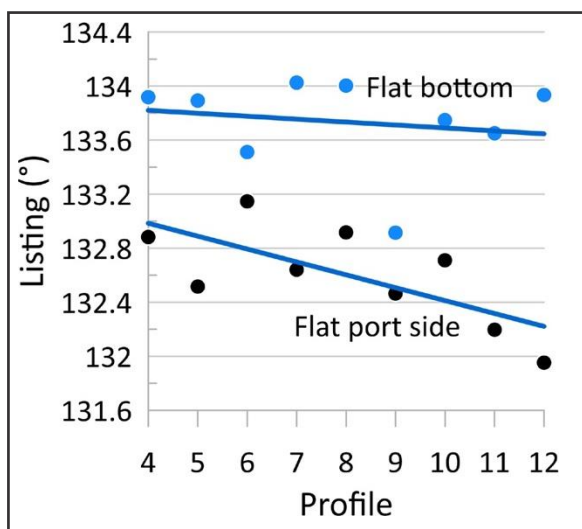
Lineaarne vaste – SN-7 (vasakparras) Võrrand $Y = 0,9208601 * X - 95,994420$ Kasutatavate andmepunktide arv = 28 Keskmine $X = 30,543131$ Keskmine $Y = -67,868470$ Ruutude jääksumma = 0,0841199 Ruutude regressioonisumma = 101,20854 Kindlaksmääramiskoeffitsient, $R^2 = 0,9991695$ Korrelatsioonikordaja, $R = 0,9995847$ Keskmise ruudu jääkväärtus, $\sigma\text{-hat}^2 = 0,0032354$ P-väärtus = vähem kui 0,0001 Sirglõigu standardviga (A) = +/- 0,1593864 Kalde standardviga (B) = +/- 0,0052065	Lineaarne vaste – SN-8 (vasakparras) Võrrand $Y = 0,9298034 * X - 97,050287$ Kasutatavate andmepunktide arv = 28 Keskmine $X = 30,543131$ Keskmine $Y = -68,651181$ Ruutude jääksumma = 0,1435297 Ruutude regressioonisumma = 103,18393 Kindlaksmääramiskoeffitsient, $R^2 = 0,9986109$ Korrelatsioonikordaja, $R = 0,9993052$ Keskmise ruudu jääkväärtus, $\sigma\text{-hat}^2 = 0,0055204$ P-väärtus = vähem kui 0,0001 Sirglõigu standardviga (A) = +/- 0,2081962 Kalde standardviga (B) = +/- 0,0068009	Lineaarne vaste – SN-9 (vasakparras) Võrrand $Y = 0,9151911 * X - 97,528114$ Kasutatavate andmepunktide arv = 28 Keskmine $X = 30,543131$ Keskmine $Y = -69,575311$ Ruutude jääksumma = 0,0528969 Ruutude regressioonisumma = 99,966265 Kindlaksmääramiskoeffitsient, $R^2 = 0,9994711$ Korrelatsioonikordaja, $R = 0,9997355$ Keskmise ruudu jääkväärtus, $\sigma\text{-hat}^2 = 0,0020345$ P-väärtus = vähem kui 0,0001 Sirglõigu standardviga (A) = +/- 0,1263912 Kalde standardviga (B) = +/- 0,0041287
Lineaarne vaste – SN-10 (vasakparras) Võrrand $Y = 0,9231017 * X - 98,566266$ Kasutatavate andmepunktide arv = 28 Keskmine $X = 30,543131$ Keskmine $Y = -70,371851$ Ruutude jääksumma = 0,0225468 Ruutude regressioonisumma = 101,70187 Kindlaksmääramiskoeffitsient, $R^2 = 0,9997784$ Korrelatsioonikordaja, $R = 0,9998892$ Keskmise ruudu jääkväärtus, $\sigma\text{-hat}^2 = 0,0008672$ P-väärtus = vähem kui 0,0001 Sirglõigu standardviga (A) = +/- 0,0825172 Kalde standardviga (B) = +/- 0,0026955	Lineaarne vaste – SN-11 (vasakparras) Võrrand $Y = 0,9066594 * X - 98,887307$ Kasutatavate andmepunktide arv = 28 Keskmine $X = 30,543131$ Keskmine $Y = -71,195090$ Ruutude jääksumma = 0,1564133 Ruutude regressioonisumma = 98,111110 Kindlaksmääramiskoeffitsient, $R^2 = 0,9984083$ Korrelatsioonikordaja, $R = 0,9992038$ Keskmise ruudu jääkväärtus, $\sigma\text{-hat}^2 = 0,0060159$ P-väärtus = vähem kui 0,0001 Sirglõigu standardviga (A) = +/- 0,2173395 Kalde standardviga (B) = +/- 0,0070996	Lineaarne vaste – SN-12 (vasakparras) Võrrand $Y = 0,8989032 * X - 99,439699$ Kasutatavate andmepunktide arv = 28 Keskmine $X = 30,543131$ Keskmine $Y = -71,984382$ Ruutude jääksumma = 0,1083557 Ruutude regressioonisumma = 96,439661 Kindlaksmääramiskoeffitsient, $R^2 = 0,9988777$ Korrelatsioonikordaja, $R = 0,9994387$ Keskmise ruudu jääkväärtus, $\sigma\text{-hat}^2 = 0,0041675$ P-väärtus = vähem kui 0,0001 Sirglõigu standardviga (A) = +/- 0,1808955 Kalde standardviga (B) = +/- 0,0059091



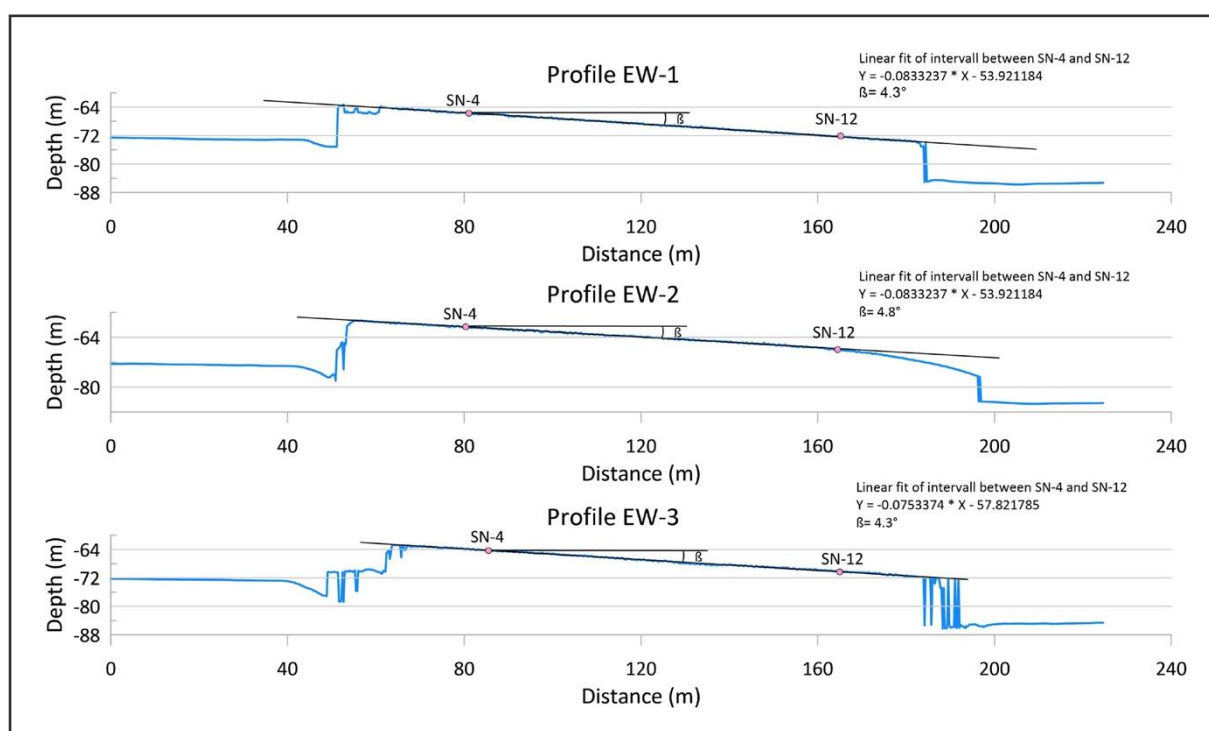
Joonis ME4. Sügavusprofiilid SN-1 kuni SN-8 risti üle parvlaeva Estonia kere suunaga lõunast põhja. Sügavuste väärtused piki neid profile saadi $0,25 \times 0,25$ m ruudustikust üksikasjaliku paljukiirelise kajaloodi uuringu põhjal. Profiilide asukohad on toodud joonistel ME1 ja ME2. Regressiooniliine, mis tuletati põhja lamade sektsioonide kohalt, kasutati praeguse kreenimise l arvutamiseks (vt lähenemisviisi selgitav tekst), mis on määratletud kui näidatud nurk α pluss 90° . Lisaks arvutati kreenimine lamada vasakparda põhjal, mis eeldati olevat põhjaga risti.



Joonis ME5. Sügavusprofiilid SN-9 kuni SN-15. Selgituse saamiseks vt joonise M4 pealkirja.



Joonis ME6. Hinnangulise kreenimise võrdlus piki profile SN-4 kuni SN-12, tuginedes lameda põhja (sinised täpid) ja lameda vasakparda (mustad täpid) mõõtmistulemustele.

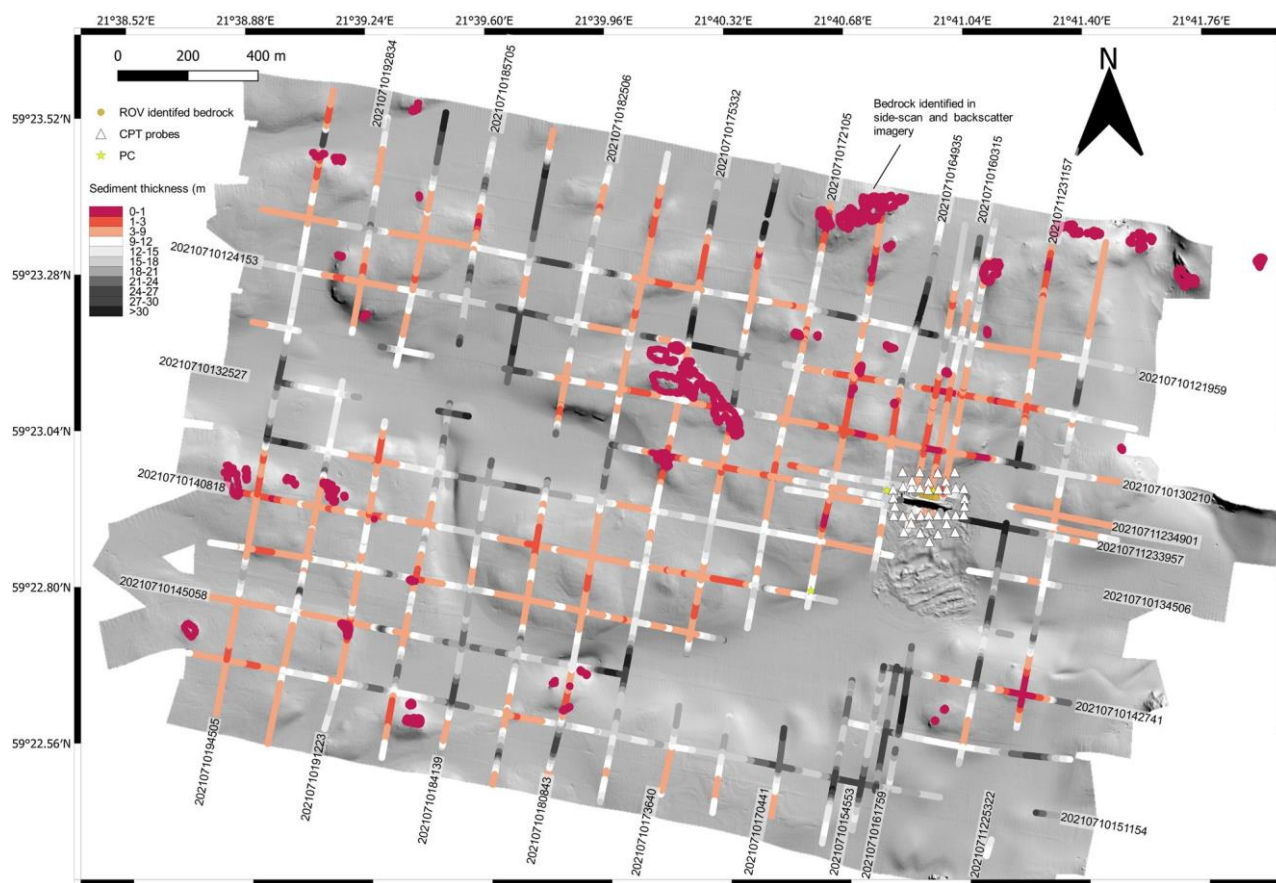


Joonis ME7. Sügavusprofiilid EW-1 kuni EW-3, mis on saadud piki parvlaeva Estonia kere. Profiilide asukohad on näidatud joonistel M1 ja M2. Diferenti β määratletakse kui nurka kere ja merepinna vahel. Ristuvate profiilide SN-4 ja SN-12 vahelisi regressioonianalüüse on kasutatud β arvutamiseks (üksikasjade nägemiseks vt teksti).

Setete paksuse koostamine

Sisestusandmed ja ebamäärasus

Setete paksuse andmed koosnevad kõigi merepõhja profiilide digiteeritud akustilisest keldrist (AB), külgvaatesonari ja tagasihajumise kujutistelt tuvastatud merepõhja aluspõhjajavimite asukohtadest, 1996. aastal Delft Geotechnicsi tehtud CPT-sondeerimisest, settepuursüdamikest ning uuringu käigus allveerobotiga tehtud video kaudu tuvastatud merepõhja aluspõhjajavimite piki parvlaeva Estonia põhjakülge (joonis ST1). Käesolevas aruandes on kirjeldatud nii kõiki neid andmed kui ruudustikule rakendatud meetodeid, mille eesmärk oli saavutada ühtne pind. Koostatud setete paksuse mudelis antakse ülevaade aluspõhjajavimitele või moreenpinnale ladestunud lahtiste setete kogupaksusest (joonis ST2). Mudeliga on seotud ebamäärasused, mida tuleb arvesse võtta. Rakendatud heli levimiskiiruseks, mida kasutati tuvastatud AB peal oleva üksuse paksuse teisendamiseks edasi-tagasi liikumisaegast meetritesse, määrati 1600 ms^{-1} . See on üks ebamäärasuse allikas, kuna heli levimiskiirus varieerub, kuid tõenäoliselt mitte palju rohkem kui $\pm 5\%$ pehmes setetes, mida on võimalik läbistada meie merepõhja profileerijaga. Teine ebamäärasuse allikas on ruudustik ise, mis on paigutatud pinnale kõigi andmepunktide kaudu, kasutades minimaalset pingega kõveruse splinei algoritmi (vt meetodid). See tähendab, et andmepunktide vahel on palju interpoleerimist.

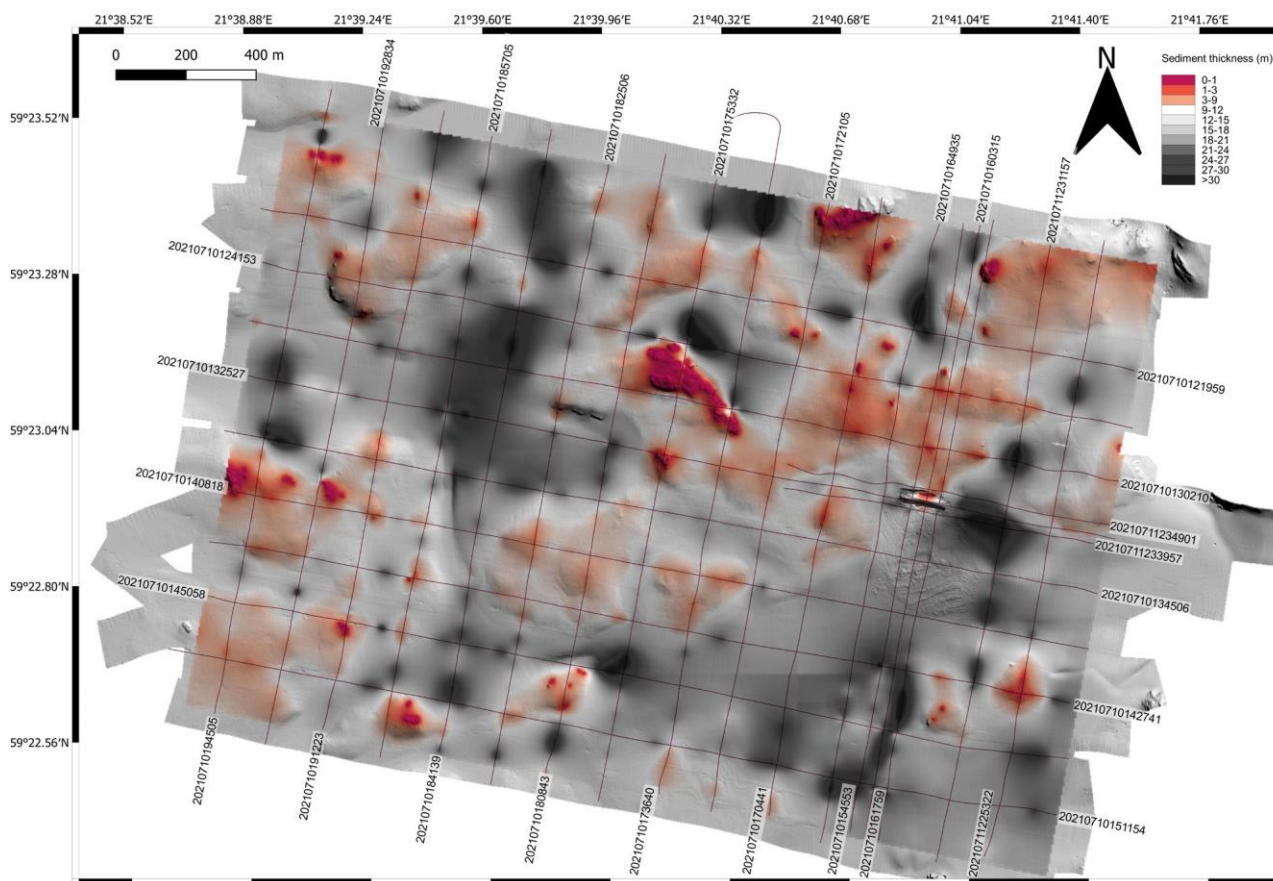


Joonis ST1. Setete paksuse andmed, mida kasutatakse joonisel ST2 kujutatud ruudustikuga kaetud setete paksuse mudeli koostamiseks. Värviliste täppidega tähistatud setete väärtusteta merepõhja profiilide sektsioonid on kohad, kus AB tuvastamine polnud võimalik, tõenäoliselt lukustunud gaasi tõttu. Need alad langevad kokku sügavamate ladestusaladega, kus setete paksus on eeldatavasti suur.

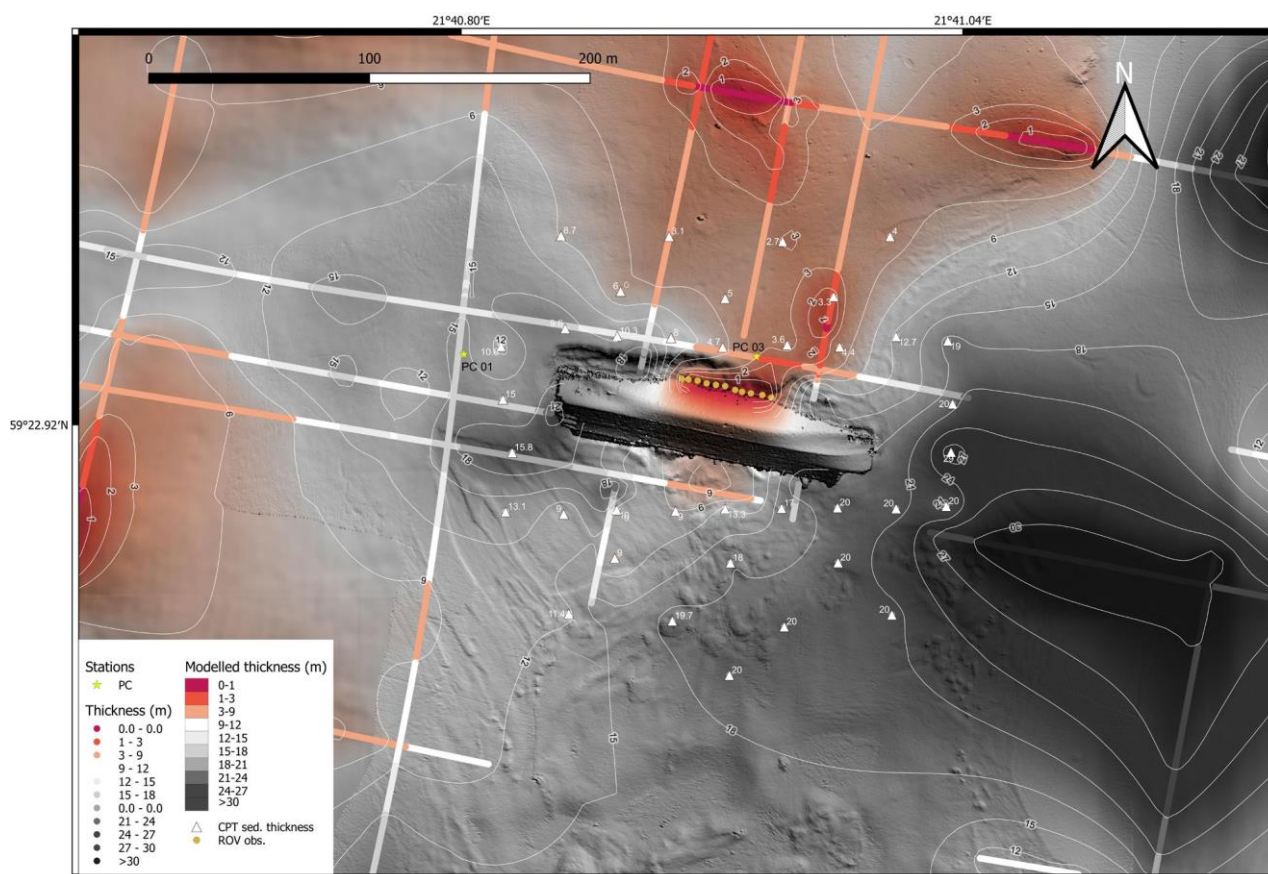
Nagu varasemalt selgitati, esineb ebamäärasus ka AB tuvastamise osas, eelkõige vraki läheduses.

Setete jaotumine

Kaardil ST2 esitatud setete paksuse ülevaade viitab üldisele mustrile, kus batümeetrilistel kõrgendikel on moodustunud aluspõhjajakivimite paljandid või õhuke pehme setete kiht ning nendevahelistesse sügavamatesse alangutesse on kogunenud paksem setete kiht. Mudel viitab sellele, et parvlaeva Estonia keskosa toetub aluspõhjajakivimitele, kuigi mudelil puuduvad andmed selle kohta, mis on otse kere all (joonis ST3). Vrakist lõunas ja kagus muutuvad setete kogumikud kiirelt paksemaks kui 20 m, mis on peamiselt tuletatud varasematest Delft Geotechnicsi CPT-sondi uuringutest, kuna merepõhja profiilidega ei saanud lukustunud gaasi tõttu ABd tuvastada. Tuleb märkida, et enamik sonde selles parvlaevast Estonia kagusse jäävas alas mõõtsid setete kihi paksuseks > 20 m, kuid setete paksuse ruudustiku mudelis kasutati paksust 20 m. See tähendab, et selles alas esitab mudel minimaalse setete paksuse.



Joonis ST2. Setete paksuse kaart uuringualas. Sügavusest aimu saamiseks on paljukiirelises batümeetrias rakendatud kõrgendike varjustust. Batümeetrilistel kõrgendikel on levinud aluspõhjajakivimite paljandid (tumedam punane), samas kui nendevahelistesse ladesaladesse on kogunenud rohkem setteid (tumedamad värvid).



Joonis ST3. Setete paksus parvlaeva Estonia piirkonnas. Näidatud on mudeldatud setete paksusel põhinevaid samapaksusjoone kontuure. Need on parvlaeva Estonia kohal kärbitud, kuna selle kere alt on saadud toetavaid andmeid.

Järeldused

Merepõhja ja aluspõhja geoloogia

Geofüüsikalise kaardistamise tulemused ühtivad üldjoontes Soome Mereväe Uurimisinstituudi varem avaldatud merepõhjasetete kaartidega (Nuorteva, 1995), kuid annavad üksikasjalikuma ülevaate aluspõhjakehade paljanditest ja eri tüüpi setete vahelistest piiridest ning täiendavat teavet gravitatsioonilise edasikande ja merepõhja morfoloogia kohta.

- Merepõhja massikaotamist on kaardistatud nii parvlaeva Estonia kirde- kui edelaküljel ning sundlābistussnõõride paigaldamise alast lõunas ja idas.
- Parvlaevast Estonia läänes olev 230 m pikkuse lihe nõlvak vastab Delft Geotechnicsi kaardi (19.09.1996) kohaselt merepõhjale paigutatud geotekstiili servale, mis viitab sellele, et siia valatud liiv libises nõlvakust alla geotekstiili peale.
- Parvlaeva Estonia kere põhjapoolses küljes oleva kahe suure augu kõrval, mis asuvad ahtrist vastavalt 69 ja 89 m kaugusel, tuvastati aluskorrektsiooni paljand. Kivimi tekstuuri ja nähtavate paralleelsete lõhede visuaalse vaatluse põhjal paistab olevat tegemist tardkivimiga, tõenäoliselt graniidi või süeniidiga. Kahe suure augu vahel, kus kere paikneb kivimipaljandile lähemal, on laeva kere näha mõlke.
- Geofüüsikalisel kaardistamisel põhinev setete paksuse mudel, 1996. aastal Delft Geotechnicsi tehtud CPT sondeerimine, settepuursüdamikud ja parvlaeva Estonia põhjaküljel tuvastatud aluspõhjakehade paljand viitavad, et kere keskosa all on aluspõhjakehade seljak.
- Suur (> 20 m) setete paksus esineb uuringualal üldiselt sügavamates batümeetrilistes alangutes, mis jäävad moreeni ja aluspõhjakehade paljandite ning õhema settekihiga kõrgendike vahele.
- Vrakist kagus on varasemates uuringutes leitud kokku > 20 m setete paksuses.
- Setete paksuse mudel toetab varasemaid arvamusi, et parvlaeva Estonia keskosa toetub tihkele merepõhjale, kuid võõriosas pakuvad pehmed setted sellele halba tuge.

Parvlaeva Estonia asend merepõhjas

Selles aruandes esitatud mõõtmisandmed parvlaeva Estonia kohta põhinevad lehviksonariga tehtud batümeetril ning nende puhul eeldatakse olemasolevate jooniste alusel, et laevakere põhjal on lame osa ja ristiasetsevad sirged küljed.

- Vraki põhja lameda osa üheksas profiilis tehtud mõõtmiste keskmiste väärtuste järgi lebab parvlaev Estonia merepõhjas paremparda poole $\sim 133,7^\circ \pm 0,4^\circ$ võrra kreenis.
- Kreenimise mõõtmine lamedal vasakparral üheksas profiilis annab keskmiseks tulemuseks $\sim 132,6^\circ \pm 0,4^\circ$, st ligikaudu üks kraad vähem kui lamedalt põhjalt mõõdetuna. Neis profiilides esineb väike suundumus, mille kohaselt võõri suunas kreenimise väärtused alanevad.
- Kasutades lamedat vasakparrast alusena ning võttes arvesse väikest ühekraadist suundumust, mille kohaselt on võõri suunas kreenimine madalam, võib arvata, et kere on järk-järgult deformeerunud selliselt, et küljed surutakse vraki merepõhjale toetuva raskuse survele ülespoole.
- Parvlaev Estonia asetseb selliselt, et laeva vendriliini sirge osa paikneb $\sim 102^\circ$ joonel, st võõriga ida-kagu suunas, ja laeva trimm merepinna suhtes on $\sim 4,5^\circ \pm 0,3^\circ$. Sellest trimmist võib olla tingitud vraki vasakparras täheldatud deformatsiooni järk-järguline suurenemine võõri suunas.
- Selle töö käigus mõõdetud kreenimist võib võrrelda ettevõtete Rockwater A/S ja Smit Tak allveeroboti uuringute käigus saadud hinnangulise 120° kreenimisega. Kuigi esialgse kreenimise täpsust ei ole olnud võimalik kontrollida, tundub tõenäoline, et vrakk on aja jooksul asendit muutnud.

- Parvlaeva Estonia ahtri ja põhjakaare pool on merepõhjasetetes tekkinud ulatuslik süvend. See süvend on ligikaudu 6–8 m lai ja 4–7 m sügav. Tõenäoliselt tekkis see laeva kokkupõrkel merepõhjaga, kuid selle kaju on tõenäoliselt aja jooksul parvlaeva Estonia kreeni suurenedes muutunud.

Merepõhjas olevad objektid

Geofüüsikalise kaardistamise andmetes nähtud objektide tuvastamiseks korraldati kaameravaatlused.

- Nende käigus leiti parvlaevast Estonia põhja pool kolm metallraami, mis moodustavad täisnurkse kolmnurga ja mille külge kuulusid katmistööde ajal akustilised transponderid. Samuti leiti parvlaeva Estonia lähedusest neljas raam, mis võib olla sama tüüpi.
- Külgvaatesonari piltidel ja lehviksonari batümeetria kaartidel on merepõhjas varasemates aruannetes kirjeldatud pealekorjepunktide lähedal näha midagi, mille näol on tõenäoliselt tegemist vöörivisiiri jäljega.

Okeanograafilised tingimused

Hoovused (laeva peal ja merepõhjas tehtud mõõtmised)

- Parvlaeva Estonia vraki asukohas tehtud veesambauuringu ajal olid hoovused 6,5 kuni 55 m sügavusel üldiselt nõrgad (valdavalt $< 0,1$ m/s).
- Hoovusi veesambas mõõdeti merepõhja ankurdatud seadme abil ühes kohas viie päeva jooksul. Kuigi ankurdatud seadme puhul esineb märke kompassinihke kohta, on umbes 70–80 m sügavusel kogutud andmetes näha tugevaid põhjahoovusi, mille kiirus küündib kohati 1 m/s. Nende põhjahoovuste sügavusvahemik ühtib hüdroloogilistes andmetes nähtud olulise hāgususekasvu omaga, mis viitab põhjahoovustest tingitud resuspensioonile ja setete liikumisele.
- Kuigi domineerivate voolumustrite kohta kindlate järelduste tegemiseks on vaja koguda pikemaajavahemikke hōlmavaid lisaandmeid ja teha lisaanalüüse, tuleb parvlaeva Estonia stabiilsuse hindamisel praeguses asukohas võtta arvesse tugevaid põhjavoolusid.

Hüdroloogilised vaatlused

- Halokliin esineb umbes 60–80 m sügavusel.
- Piir hapnikuga ja hapnikuvabade tingimuste vahel veesambas langes kokku halokliiniga, kusjuures hapnikuvabad tingimused olid uuringu käigus ülekaalus rohkem kui ~ 75 m sügavusel.
- Seega puutus parvlaev Estonia uuringuperioodi vältel kokku hapnikuvaba veega. Halokliini sügavus (ja seega ka oksükliini sügavus) võib aja jooksul siiski oluliselt varieeruda ning hapnikutingimused võivad suurte Läänemere sissevoolude tulemusel kiirelt muutuda.
- Parvlaeva Estonia vasakparda ahtriosa on kõige madalam, tõustes osaliselt umbes 57 m sügavusele, mis tähendab, et see osa ulatub hapnikuga vööndisse. Seega puutub vrakk korrosiooni osas kokku erinevate tingimustega.

Viited

- Abbott, B. (2021). “A Preliminary Assessment of the MS Estonia Shipwreck using the MS 1000 Scanning Sonar”. Abbott Underwater Acoustics LCC).
- Andrén, T., Björck, S., Andrén, E., Conley, D., Zillén, L., and Anjar, J. (2011). “The Development of the Baltic Sea Basin During the Last 130 ka,” in *The Baltic Sea Basin*, eds. J. Harff, S. Björck & P. Hoth. (Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg), 75–97.
- BenDor, E., and Banin, A. (1989). Determination of organic matter content in aridzone soils using a simple “loss on ignition” method. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 20, 1675–1695.
- Calder, B.R., and Mayer, L.A. (2003). Automatic processing of high-rate, high-density multibeam echosounder data. *Geochemistry Geophysics Geosystems* 4, 1–22.
- De Geer, G. (1912). “A geochronology of the last 12000 years”, in: *The 11th International Geological Congress in Stockholm 1910*. (Stockholm).
- Fonseca, L., and Calder, B.R. (Year). “Geocoder: An Efficient Backscatter Map Constructor”, in: *U.S. Hydrographic Conference (US HYDRO): The Hydrographic Society of America*.
- Holtermann, P.L., Burchard, H., Gräwe, U., Klingbeil, K., and Umlauf, L. (2014). Deep-water dynamics and boundary mixing in a nontidal stratified basin: A modeling study of the Baltic Sea. 119, 1465–1487.
- Hughes, A.L.C., Gyllencreutz, R., Lohne, Ø.S., Mangerud, J., and Svendsen, J.I. (2016). The last Eurasian ice sheets – a chronological database and time-slice reconstruction, DATED-1. *Boreas* 45, 1–45.
- Iso/Ts 17892-6 (2004). “Geotechnical investigations and testing – Laboratory testing of soil.”, in: *ISO/TS 17892-6 10.*).
- Lurton, X., Eleftherakis, D., and Augustin, J.-M. (2018). Analysis of seafloor backscatter strength dependence on the survey azimuth using multibeam echosounder data. *Marine Geophysical Research* 39, 183–203.
- Mesdag, C.S. (1997). “Seismic Survey at *Estonia* Site”. (Haarlem, The Netherlands: Netherlands Institute of Applied Geoscience TNO).
- Mitasova, H., Mitas, L., and Harmon, R.S. (2005). Simultaneous spline approximation and topographic analysis for lidar elevation data in open-source GIS. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 2, 375–379.
- Mohrholz, V. (2018). Major Baltic Inflow Statistics – Revised. 5.
- Nuorteva, J. (1995). *M/S Estonia: Merenpohjan Kerrostumat* (Sea Floor Deposits). 1:5000. Merivoimien tutkimustaitos, Helsinki, Finland.

Qgis Development Team (2018). “QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project”. 3.4.1-Madeira ed.).

Reissmann, J.H., Burchard, H., Feistel, R., Hagen, E., Lass, H.U., Mohrholz, V., Nausch, G., Umlauf, L., and Wiczorek, G. (2009). Vertical mixing in the Baltic Sea and consequences for eutrophication – A review. *Progress in Oceanography* 82, 47–80.

Rockwater A/S, and Smit Tak (1994). “Condition survey of ferry “*Estonia*”: Survey Report”. Rockwater A/S).

Rudebeck, D., and Kennedy, H. (2021). “Fartyget M/S *Estonia*: Genomgång av getekniskt underlag”. (Linköping, Sverige: Statens geotekniska institut).

Stranne, C., Mayer, L.A., Weber, T.C., Ruddick, B.R., Jakobsson, M., Jerram, K., Weidner, E., Nilsson, J., and Gårdfeldt, K. (2017). Acoustic Mapping of Thermohaline Staircases in the Arctic Ocean. *Scientific Reports* 7, 15192.

Tuukritööde OÜ (2021). “Summary of underwater robot survey of passenger ferry *Estonia* 14–15.07.2021”. (Tallin, *Estonia*: Tuukritööde OÜ).

Weidner, E., Stranne, C., Sundberg, J.H., Weber, T.C., Mayer, L., and Jakobsson, M. (2020). Tracking the spatiotemporal variability of the oxic–anoxic interface in the Baltic Sea with broadband acoustics. *ICES Journal of Marine Science* 77, 2814–2824.

Yurkovskis, A. (2005). Seasonal benthic nepheloid layer in the Gulf of Riga, Baltic Sea: Sources, structure and geochemical interactions. *Continental Shelf Research* 25, 2182–2195.

**MEDDELANDEN från STOCKHOLMS UNIVERSITETS
INSTITUTION för GEOLOGISKA VETENSKAPER No 383**

Rapportserie

ISBN print: 978-91-89107-20-5

ISBN pdf: 978-91-89107-21-2

- No 372. HANSMAN, R.J. Cryptic orogeny : uplift of the Al Hajar mountains at an alleged passive margin. Stockholm 2018.
- No 373. KIELMAN, R. Assessing the reliability of detrital zircon in early-earth provenance studies. Stockholm 2018.
- No 374. THIESSEN, F.K. The evolution of lunar breccias : U-Pb geochronology of Ca-phosphates and zircon using secondary ion mass spectrometry. Stockholm 2018.
- No 375. HIRST, C. Iron in the Lena river basin, NE Russia : insights from microscopy, spectroscopy and isotope analysis. Stockholm 2018.
- No 376. BENDER, H. Assembly of the Caledonian Orogenic Wedge, Jämtland, Sweden. Stockholm 2019.
- No 377. REGHELLIN, D. Eastern equatorial Pacific bulk sediment properties and paleoceanography since the late Neogene. Stockholm 2019.
- No 378. SJÖBERG, S. Microbially mediated manganese oxides enriched in yttrium and rare earth elements in the Ytterby mine, Sweden. Stockholm 2019.
- No 379. JANSEN, J. Carbon trace gas dynamics in subarctic lakes. Stockholm 2020.
- No 380. TOLLEFSEN, E. Experimental, petrological and geochemical investigations of ikaite ($\text{CaCO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) formation in marine environments. Stockholm 2020.
- No 381. GDANIEC, S. ^{231}Pa , ^{230}Th and ^{232}Th as tracers of deep water circulation and particle transport. Insights from the Mediterranean Sea and the Arctic Ocean. Stockholm 2020.
- No 382. SJÖSTRÖM, J. Mid-Holocene mineral dust deposition in raised bogs in southern Sweden. Processes and links. Stockholm 2021.

Formerly/1990–2021: MEDDELANDEN från STOCKHOLMS UNIVERSITETS
INSTITUTION för Geologi och Geokemi (ISSN 1101-1599)

Department of Geological Sciences

Stockholms universitet SE-106 91 Stockholm www.geo.su.se

