

## TIIVISTELMÄRAPORTTI (SUMMARY REPORT)

### Jääpeitteen synnyttämät akustiset ilmiöt

Mikko Lensu  
Ilmatieteen laitos

#### Tiivistelmä:

Jääpeite vaikuttaa äänten kulkeutumiseen meressä sekä synnyttää itse ääniä. Jäälähtöiset äänet johtuvat joko lämpöjännityksistä tai jääpeitteen ajelehtimisesta ja muodonmuutoksesta. Jääakustiikka pyrkii selvittämään äänten kulkeutumista sekä kartoittamaan jään synnyttämän äänitaustan. Akustisia menetelmiä voidaan myös käyttää jääpeitteen tapahtumien havainnointiin. Projektissa pyrittiin samanaikaista jää- ja akustista aineistoa vertaamalla tunnistamaan jäälähtöisiksi epäiltyjen ääni-ilmiöiden alkuperä. Tässä käytettiin Mäkiluodon tutkan valvontavideota sekä saman alueen akustista valvonta-aineistoa. Vertailu ei tuottanut lopullisia tuloksia mutta toimii esitutkimuksena vastaaville tuleville hankkeille. Tätä tukemaan tehtiin myös muuhun tutka-aineistoon perustuvaa tutkimusta ääni-ilmiöiden kannalta merkittävistä jääkentän ilmiöistä, sekä kartoitettiin jääakustiikan tutkimuksen puolivuosisataisen historian aikana tehty tutkimus ja sen käyttämät menetelmät.

#### 1. Johdanto

Jääpeite vaikuttaa meressä havaittaviin akustisiin ilmiöihin kahdella tavalla: se vaikuttaa äänten kulkeutumiseen ja synnyttää (emittoi) itse ääniä. Ääni voi edetä yhtenäisessä jäässä 3-4 km/s, ja jääpeite vaikuttaa vedessä etenevään ääneen sitä heijastamalla ja sirottamalla. Jääpeite voi synnyttää ääniä joko jäissä kulkevien laivojen jäävuorovaikutuksen kautta, tai sitten jääpeitteen omien prosessien seurauksena. Jään omat akustiset lähteet liittyvät lämpöjännityksiin tai jääkentän dynaamisiin prosesseihin. Yleisesti tunnettu lämpöjännitysemissio on kiintojään pitkien halkeamien synnyn yhteydessä kuuluva vongahdus. Muut jääkentän emissiot on helpompi havaita vedenalaisella kuuntelulla.

Dynaamisia prosesseja esiintyy ajojääkentässä joka koostuu erillisistä lautoista ja voi liikkua tuulen, virtausten ja aallokon ajamana. Ajavat voimat synnyttävät jääkentässä lisäksi jännityksiä, jolloin jääkenttä voi olla myös liikkumaton. Jos paikallinen jännitys kasvaa tarpeeksi suureksi, jää antaa periksi ja pirstoutuu. Tällöin se voi myös ahtautua, jolloin syntyy päällekkäin ajautunutta jäätä ja ahtojäävalleja ja jään keskipaksuus kasvaa.

Jään dynamiikkaan liittyvät akustiset emissiot voivat siis johtua: 1. Jääkentän jännityksistä. 2. Jääkentän liikkumisesta: lauttojen ajelehtimisestä, törmäilystä ja hiertämisestä, jääkentän leikkaussiirroksista. 3. Pirstoutumisesta: lauttojen halkeilusta, jään murskautumisesta. 4. Ahtautumisesta: päällekkäin ajautumisesta, jäävallien kasautumisesta.

Motivaatiot jään synnyttämien ääni-ilmiöiden tutkimukseen ovat kolmenlaiset. Halutaan selvittää miten jääpeite vaikuttaa äänen kulkeutumiseen jotta voidaan tehdä tarkempia päätelmiä äänilähteen sijainnista. Toisaalta halutaan selvittää minkälainen äänitausta jääpeitteestä lähtee, jotta akustista aineistoa voidaan oikein tulkita ja halutut kohteet erottaa. Kolmas tutkimuslinja pyrkii tekemään päätelmiä jääpeitteen tapahtumista akustisen aineiston avulla. Tällöin usein keskitytään siihen, millaisia ääni-ilmiöitä tiettyihin tapahtumiin kuten halkeaman tai jäävallin syntyyn liittyy.

Jääakustiikkaa on tutkittu systemaattisesti 50-luvulta alkaen. Alkuaikoina tutkimus keskittyi äänen kulkeutumiseen ja äänitaustaan ja lähti kuuntelutoiminnan tarpeista. 90-luvulla nousi esiin tutkimuslinja, joka pyrki käyttämään akustisia aineistoja geofysikaalisen jäätutkimuksen apuna. Kummassakin tapauksessa tutkimusintensiivisyys väheni yleisten tulosten saavuttamisen jälkeen, mikä johtuu lähinnä merijään paksuusvaihtelun kaottisuudesta ja prosessien satunnaisuudesta. Ongelmana on ollut puute aika- ja paikka-

resoluutioltaan riittävästä jääpeitettä kuvaavasta aineistosta. Havaittuja akustisia ilmiöitä ei ole kyetty yhdistämään yksikäsitteisesti jääpeitteen energettisiin tapahtumiin, vaan tulokset ovat jääneet yleisen spektri- ja korrelaatioanalyysin tasolle tai ne ovat kuvanneet vain yksittäisiä ilmiöitä seismoakustisten laitteistojen läheisyydessä. Systemaattinen näkemys jääpeitteen vaikutuksesta meriakustiikkaan on toistaiseksi muotoutumatta.

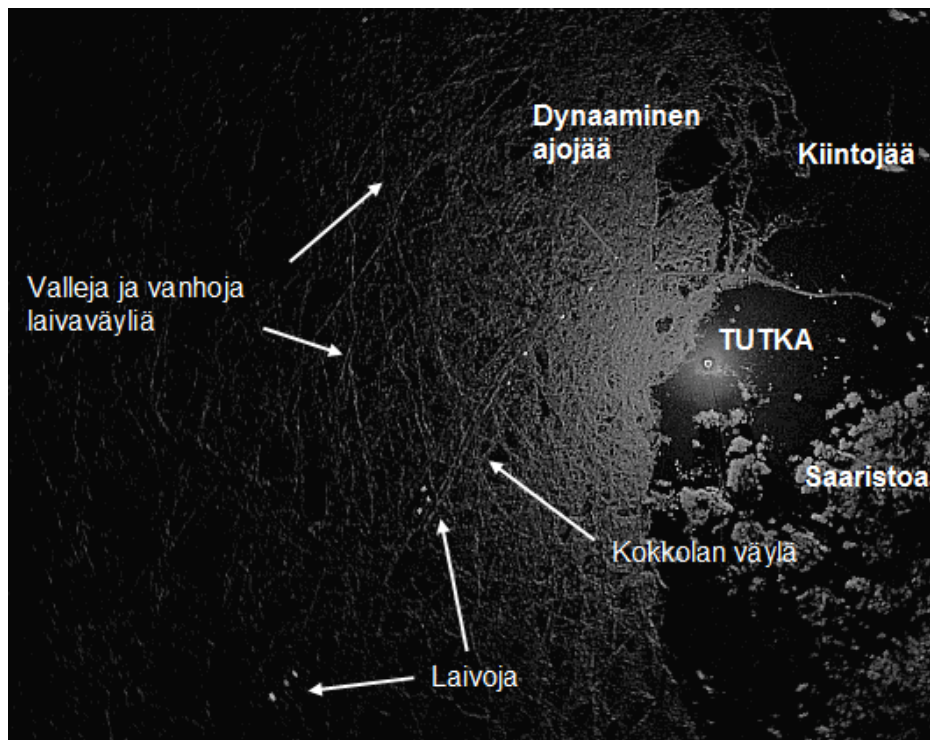
## 2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

Tutkimuksessa pyrittiin yhdistämään tarkkaa havaintoaineistoa jääpeitteen liikkeistä ja muodonmuutoksesta Merivoimien samanaikaiseen kuunteluaineistoon. Tavoitteena oli seurata miten jääkentän dynaaminen intensiteetti vaikuttaa äänitaustaan, yhdistää aineistosta havaittavia jääkentän ilmiöitä ääni-ilmiöihin, sekä etsiä akustisessa aineistoissa havaituille tulkinnallisesti ongelmallisille ääni-ilmiöille vastineita jääkentän tapahtumista. Havaintotoiminnan kohdealueena oli Porkkalan edusta.

Aineiston analyysin lisäksi pyrittiin tutkimaan, voidaanko jääkentän emissioita lähestyä teoreettisesti. Jääkentän muodonmuutosta kuvaaviin yhtälöihin voidaan liittää energian hävikkiä kuvaava funktio, ja hävikin kokonaisintensiteetti oletettavasti korreloi akustisen intensiteetin kanssa. Kentän dissipaatio toisaalta koostuu suuresta määrästä yksittäisiä tapahtumia, esimerkiksi vallinmuodostustapahtumia. Toisaalta liikkumaton jääkenttä voi olla tuulen puristuksen alainen, jolloin muodonmuutoksen dissipaatio on nolla mutta elastisen jännityksen aiheuttaman säröilyn ja pienen mittakaavan deformaation aiheuttamat akustiset emissiot voivat olla huomattavia. Mahdollisena sovelluksena haluttiin selvittää, voisiko akustiikkaa käyttää liikkumattoman, puristuksen alaisen jääkentän jännitystilän määrittämiseen. Tällä olisi merkitystä meriliikenteen avuksi toimitettavan jääinformaation tarkentamisessa.

## 3. Aineisto ja menetelmät

Keskeisenä aineistona oli tarkoitus käyttää Mäkiluodon merivalvontatutkan kuvasarjaa. Ilmatieteen laitos käyttää rannikkotutkia jääpeitteen liikkeiden seurantaan Hailuodossa, Tankarissa ja Utössä. Tämä tapahtuu asentamalla tutkan yhteyteen erillinen serveri, joka kaappaa tutkavideon ja muodostaa ja tallentaa tutkankuvan antennin joka kierroksella (noin 20 kuvaa minuutissa). Tämä tapahtuu jäähavainnointiin sopivilla parametreilla eikä häiritse tutkan normaalia toimintaa mitenkään. Muodostetun kuvan koko on ollut 40x40 km ja resoluutio 30 m, tarkempi resoluutio mahdollinen kuvan kokoa pienentämällä. Tutkan muokattua kuvasarjaa toimitetaan jäänmurtotoiminnan avuksi. Siitä voidaan myös analysoida tarkkaan liikekenttää tracking-algoritmeilla ja seurata yksittäisiä tapahtumia kuten vallinmuodostusta. Alla näyte Tankarin rannikkotutkan kuvasta.



Toisena jääinformaation lähteenä käytettiin Ilmatieteen laitoksen jääennustemallin reanalysoituja ajoja. Nämä kuvaavat jääkentän liike- ja muodonmuutosyhtälöiden pohjalta mallinnettua jääkentän liikettä ja paksuuskasvua yhden merimailin tarkkuudella ja antavat kvantitatiivisen arvion jääkentän jännitystilalle ja energiahävikille.

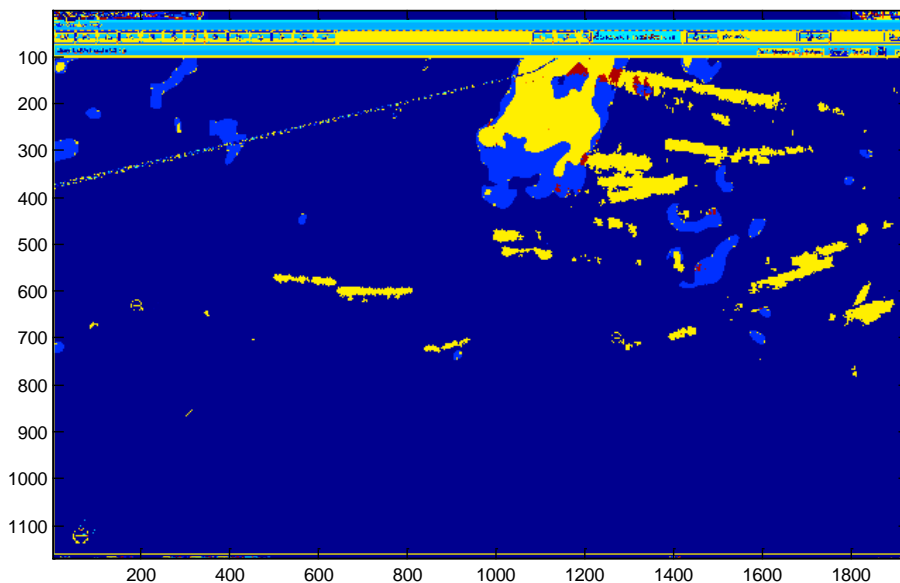
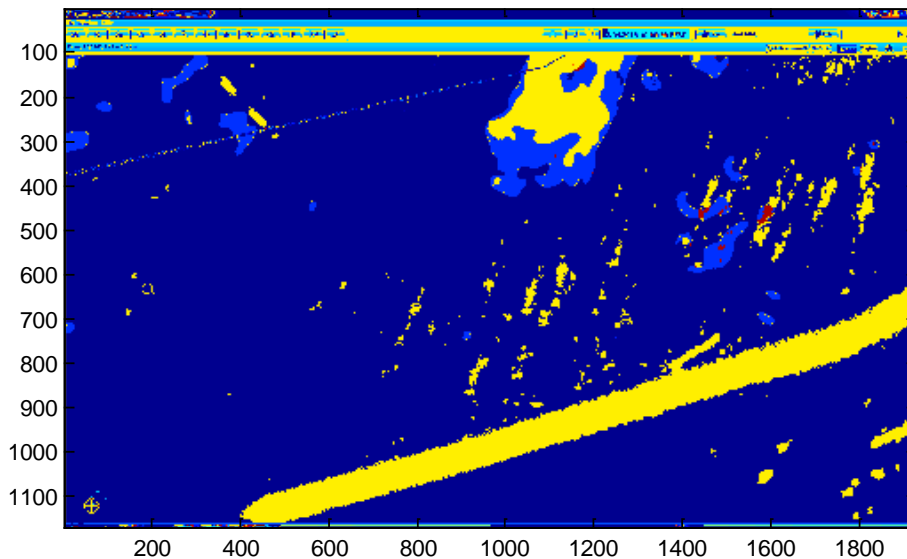
Mäkiluodon tutkan aineistoa ei saatu valitettavasti käyttöön projektivuoden aikana. Tämä johtui osin siitä, että projekti lähti liikkeelle varasijalta myöhässä alun perin suunnitellusta aikataulusta, osin tutkan instrumentointiin liittyvistä hallinnollisista kysymyksistä. Merivoimilta saatiin muutamia tunnin mittaisia Mäkiluodon tutkan videoleikkeitä maaliskuun lopulta ja huhtikuun alusta, sekä muutama näyte samanaikaisesta äänijäljestä suuntadiagrammeineen. Havaintoikkuna on alla olevassa kuvassa. Mäkiluodon aineistossa näkyy liikkeenseuranta-algoritmien kohteiden sijainnit. Algoritmin herkkyyden vuoksi myös jäälauttojen liike erottuu, mistä voitiin melko hyvin päätellä jään liikesuunta ja nopeus sekä jään reunan asema. Myös laivaliikenteen peräaaltojen eteneminen jääkentässä saattaa erottua. Jääkentän lauttamosaiikin, raijien ja vallien geometria kuvista ei näy, erotuksena aiotulle serveriaineistolle.



Analysoidut äänileikkeet ovat jaksoilta, jolloin on esiintynyt jäälähtöisiksi epäiltyjä ääniliymiöitä. Näihin liittyy mittauskulma- ja kulmanopeusdiagrammi, mutta äänilähteen etäisyyttä tai paikkaa ei ole tiedossa. Kyseiset ilmiöt ovat toistensa kaltaisia, melko säännöllisesti muutaman minuutin välein toistuvia ja niiden lähteen kulmanopeus on ollut hyvin suuri, vastaten maksimissaan noin 100 km tuntinopeutta laivojen liikennöintialueella. Lähteet ovat siis ilmeisesti melko lähellä seuranta-antennia.

#### 4. Tulokset ja pohdinta

Merivoimilta saadun aineiston laatu ja paikannustarkkuus eivät salli havaittujen ilmiöiden lopullista selvittämistä. Aineisto on päiviltä, jolloin kohdealueelle on muodostunut avoimen veden alueisiin 5-10 paksuista uutta jäätä. Kyseinen jäätyyppi on Merivoimien mukaan ollut erityisen aktiivista akustisesti. Laivaliikenteen peräaallot rikkovat tällaisen jääpeitteen alueella lautoiksi, minkä jälkeen rikkonainen jääpeite hajaantuu tai ajelehtii helposti tuulen viemänä. Tämä prosessi voidaan hyvin analysoida Mäkiluodon valvontavideoista. Esimerkkejä analyysistä on kahdessa alla olevassa kuvassa. Ensimmäisessä näkyy autolautta Gabriellan reitti ja sen peräaallon eteneminen jääkentässä. Aaltojälki liittyy jään rikkoutumiseen ja jakson pituus on 45 minuuttia. Jälkimmäisessä kuvassa, joka on noin 9 tunnin kuluttua, nähdään ajelehtivan rikkoutuneen jääkentän lauttojen kulku-uria tunnin aikana. Valvontavideon seuranta-algoritmia voidaan siis käyttää jossain määrin jään liikkeen analysointiin, mutta jääpeitteen rakenne ja jäätyypit eivät selviä alun perin tarkoitettulla tavalla.



Analysoitujen jään liikekenttien perusteella ei ääninäytteiden tunnistamattomien akustisten ilmiöiden lähdettä pystytä paikallistamaan. On toki mahdollista että ilmiö sijoittuu tarkastellun valvontakuvan ulkopuolelle ja voi olla myös vastakkaisella puolella seuranta-antennia. Ilmiön alkuperä on kuitenkin todennäköisesti jäälähtöinen koska muut syyt voidaan sulkea pois. Ilmiö esiintyy taajaan ja säännönmukaisena tiettyjen jaksojen aikana, joiden välillä ilmiö voi olla poissa pitkään. Säännönmukaisuus viittaa lähteen olevan kaikissa jakson tapauksissa sama.

Todennäköisin syy on laivaliikenteen peräaaltojen kohtaaminen kiintojään tai vanhemman, paksumman jään reunan kanssa, jolloin aaltojen energia dissipoituu reunaan tyypillisesti seurailevan päällekkäin ajautuneiden lauttojen vyöhykkeeseen. Aaltorintaman kohdatessa reunan viistosti etenee dissipaation huippuintensiteetin paikka reunaan myöten nopeudella joka voi ylittää aaltorintaman nopeuden. Teräsjään elastiset ominaisuudet edesauttavat akustisen emission syntymistä. Rikkonaisessa jääpeitteessä eteneville aal-

loille on tyypillistä energian siirtyminen pitkiin aaltoihin, joiden vaimeneminen on hyvin hidasta. Laivojen kulkusuunnan, jäätyyppien reunojen aseman ja aallon etenemisnopeuden analyysi tukee ehdotettua selitysmallia. Syy paikallistamisen vaikeudelle lieneekin se, että seuranta-algoritmi suodattaa pois aaltorintamien liikkeen ja ne näkyvät vain edellä olevan kuvan kaltaisissa erikoistapauksissa. Analyysi jää indikatiiviseksi tarkemman aineiston puutteessa, mutta tarjoaa hyvän lähtökohdan ilmiön selvittämiseksi kohdistetummin havainnoin.

Merivoimilta saatujen aineistojen yksityiskohtainen analyysi toimitetaan Merivoimien tutkimuslaitoksen käyttöön. Koska varsinaisen analyysin tulokset jäivät aineiston puutteessa melko vähäisiksi tavoitteisin nähden, tehtiin lisäksi kinemaattisia ja dynaamisia analyysejä käyttäen Tankarin tutkakuvan arkistoituja aineistoja sekä jäämallituloksia. Kehitettiin lisäksi algoritmeja jään liikekenttien määrittämiseen ja kohteiden seurantaan. Nämä tukevat tehtyjä kysymyksenasetteluja ja antavat työkaluja jatkotutkimukselle. Lisäksi tehtiin laajahko katsaus jääakustiikassa tehtyihin tutkimuksiin.

## 5. Loppupäätelmät

Varsinaisia akustisen seurantaan ja meren äänimaailman tulkintaan suoraan sovellettavia tuloksia ei saatu yhdistetyn tutka- ja akustisen aineiston puuttuessa. Kyseessä on lähinnä jatkotutkimukselle pohjaa luova esitutkimus. On luultavaa, että asetettuun ongelmaan havaittujen ääni-ilmiöiden alkuperästä olisi pystytty vastaamaan mikäli Mäkiluodon tutkan instrumentointi olisi toteutunut suunnitellusti. Tutkimus kuitenkin saattoi vauhtiin ilmatieteen laitoksella jääakustisen tutkimuksen, jolle projektivuoden aikana kaavailtiin jatkoa monissa eri yhteyksissä.

Jääpeitteen vaikutukselle meren akustiikkaan, sekä äänen synnyttäjänä että kuljettajana, on kysyntää myös yleisen melumallinnuksen piirissä varsinkin laivaliikennettä koskien. Lisäksi laivojen jäissä synnyttämä melu on myös laivatutkimuksen kannalta tärkeä tutkimuskohde, joka liittyy läheisesti laivojen jäävastukseen, jääkuormiin ja käyttömukavuuteen. Olemassa olevat akustisen seurannan laitteistot ovat käyttökelpoisia yleisen melutaustan ja laivalähtöisten äänien selvittämiseksi. Sekä yleisten jääpeitteeseen kohdistuvien tutkimusasettelujen että tässä projektissa analysoidujen kysymysten kannalta Merivoimien seurantalaitteistot eivät välttämättä ole optimaalisia siksikin, että paikannusta ei joko voida tehdä tai tämä on strategista tietoa. Aineistoa tulisi hankkia lisäksi käyttämällä pohjaan asennettuja, yllä olevaa jääpeitettä seuraavia hydrofoneja, mieluiten niin että samaan asennukseen kuuluu myös jääpeitteen paksuutta ja liikettä mittaava laite.

Tutkimusta on tarkoitus viedä eteenpäin seuraavasti:

1. Mäkiluodon tutkaserveri saataneen asennettua talveksi 2014, jolloin alkuperäisen suunnitelman mukaiset äänimaailman ja jääpeitteen ilmiöiden vertailut alueella ovat mahdollisia. Tässä voidaan hyödyntää projektissa tehtyä esitutkimusta ja menetelmäkehitystä. Oleellista on saada kerättyä koko talven kattavia havaintosarjoja, jolloin mitä tahansa myöhemmässä analyysissä havaittua ääni-ilmiötä voidaan verrata jäätapahtumiin ja usean vuoden arkistoituja aineistoja voidaan käydä läpi tulevissa projekteissa. Olisi hyvä, jos tulevaisuudessa seuranta voitaisiin täydentää pelkästään jääpeitteen emissioiden seurantaan tarkoitettulla hydrofoni- ja jäänpaksuusmittauslaitteistolla.
2. Severeiden edelleen kehittämiseksi on olemassa jatkorahoitus, jolla kehitetään uusia rasterointialgoritmeja. Nämä pyrkivät muun muassa jäissä etenevien aaltojen parametrien määrittämiseen. Pysytään myös rasteroimaan kuvia monella eri algoritmilla

---

samanaikaisesti. Kehitystyössä voidaan ottaa huomioon ääniseurannan tarpeet, varsinkin aallokon eteneminen rikkonaisessa jääpeitteessä.

3. Uusin tutkaserveri on asennettu Utöön. Saarelle ollaan pystyttämässä erittäin monipuolista meren ja ilmakehän observatoriota. Meren suolaisuus- ja lämpötilaprofiilien, aaltoparametrien sekä meri-ilmakehäräjapinnan reaaliaikainen seuranta on mahdollista. Saaren luona on puolustusvoimien hydrofoneja. Ainoa huono puoli on, että jääpeitettä on alueella vain ankarina talvina.
4. Itämerellä on käynnistynyt BIAS-hanke, jonka taustalla on EU:n päätös merimelun kartoittamisesta: tarkoitus on asentaa noin 40 hydrofoniasemaa Itämerelle. Konsortion partnerit Itämeren rannikkovaltioista. Suomesta mukana SYKE. IL ei ole mukana, mutta yhteistyöstä on alustavasti sovittu. Ensi askelena on hydrofonin asentaminen Tankarin tutkan kuva-alueeseen tammikuussa 2014. Samassa asennuksessa on mukana jään paksuutta ja meren virtauksia mittaavat laitteet, mahdollisesti mitataan myös jääpeitteen jännitystilaa. Tämä työ tulee hyödyttämään myös Merivoimien analyysitarpeita.
5. Laivojen meluemissiot ovat keskeinen tutkimuskohde merimelun vähentämisen kannalta. IL on mukana ANTLOAD-hankkeessa, jossa seurataan Etelä-Afrikan jäänmurtajan SA Agulhasin jäissäkulkua Etelämantereen vesillä. Alus on instrumentoitu jääkuormia varten ja matkojen aikana mitataan jään paksuutta, tärinää ja melua. Mikäli samanlaisia hankkeita toteutetaan Itämerellä, mikä on oletettavaa EU:n meludirektiivin vuoksi, luodaan myös mahdollisuus verrata laivakohtaisesti mitattua ja mallinnettua ääniemissiota Merivoimien kuunteluaineistoon, jolloin saadaan tietoa jääpeitteen vaikutuksesta äänen kulkeutumiseen.

## **6. Tutkimuksen tuottamat tieteelliset julkaisut ja muut mahdolliset raportit**

Tutkimuksen pohjalta on kirjoitettu raportti, joka sisältää aineiston yksityiskohtaisen analyysin ja sen pohjalta tehdyt päätelmät, selostukset tehdystä kehitystyöstä, teoreettisen mallin jääpeitteen akustisille emissioille, sekä katsauksen aiempaan tutkimukseen. Raportin julkaisufoorumi on edelleen avoin. Raportista pyritään jalostamaan 1 artikkeli tieteelliseen julkaisuun (tn. Boreal Environment Research) ja 1 kongressiartikkeli.