

MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

**SYVYYTETTÄVÄ HERÄTEMIINA –
SUKELLUSVENEENTORJUNNAN UUSI ULOTTUVUUS**

Pro gradu -tutkielma

Yliluutnantti
Markus Halme

Sotatieteiden maisterikurssi 7
Merisotalinja

Huhtikuu 2018

MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

Kurssi Sotatieteiden maisterikurssi 7	Linja Merisotalinja
Tekijä Yliluutnantti Markus Halme	
Tutkielman nimi SYVYYTETTÄVÄ HERÄTEMIINA – SUKELLUSVENEENTORJUNNAN UUSI ULOTTUVUUS	
Oppiaine johon työ liittyy Sotatekniikka	Säilytyspaikka MPKK:n kurssikirjasto
Aika Huhtikuu 2018	Tekstisivuja 65, Liitesivuja 4
TIIVISTELMÄ <p>Yksi meripuolustuksen tärkeimmistä tehtävistä on merimiinoittaminen, joka on olennainen osa alueellisen koskemattomuuden ja meriyhteyksien turvaamista. Tärkeä osa merimiinoittamista on sukellusveneentorjunta, jonka tavoitteena on sukellusveneiden toimintavapauden rajoittaminen. Tutkielman tutkimustehtävänä oli selvittää, tuottaisiko uudenlainen, välivee-teen syvyytettävä herätemiina lisäarvoa, uuden ulottuvuuden, sukellusveneentorjuntaan.</p> <p>Tutkielman teoriaosuudessa tarkasteltiin kirjallisuusselvityksen menetelmin syvyytettävän herätemiinan sekä Itämeren sukellusveneiden ominaisuuksia. Ominaisuuksia tutkittiin tarkoituksellisen vastakkainasettelun kautta: miten syvyytettävä herätemiina ja sukellusvene havaitsevat toisensa?</p> <p>Tutkielman tutkimusosuudessa laadittiin ensimmäiseksi matemaattinen malli vedenalaisesta syvänteestä. Seuraavaksi rakennettiin matemaattiseen malliin perustuva, Monte Carlo -menetelmää soveltava simulaatio sukellusveneentorjuntamiinoitteiden estearvon laskemiseksi.</p> <p>Tutkimustuloksina saatiin kvantitatiivinen aineisto, jota analysoitiin tilastollisin menetelmin. Tutkimustulokset esitetään kahdessa erilaisessa skenaariossa tutkimustulosten luotettavuuden verifioimiseksi sekä simulaattorin ominaisuuksien havainnollistamiseksi.</p> <p>Matemaattisen analyysin perusteella tutkimuksen johtopäätöksenä voidaan todeta, että syvyytettävän herätemiinan käytöllä on saavutettavissa lisäarvoa sukellusveneentorjunnassa.</p>	
AVAINSANAT merimiina, herätemiina, simulaatio, mallinnus, sukellusveneentorjunta	

SYVYYTETTÄVÄ HERÄTEMIINA – SUKELLUSVENEENTORJUNNAN UUSI ULOTTUVUUS

Sisältö

1.	JOHDANTO	1
1.1.	Tutkimusaihe ja -tehtävä	2
1.2.	Tutkimuskysymykset ja -rajaukset	4
1.3.	Tutkimuksen lähtökohdat	4
1.4.	Tutkimuksen tausta ja tutkimustilanne	8
1.5.	Tutkimusmenetelmät	10
1.6.	Tutkimuksen viitekehys ja tärkeimmät lähteet	15
2.	SYVYYTETTÄVÄ HERÄTEMIINA	17
2.1.	Toimintaperiaate	17
2.2.	Herätteet	17
2.3.	Räjähdevaikutus	22
3.	ITÄMEREN SUKELLUSVENEET	24
3.1.	Saksan merivoimat	28
3.2.	Ruotsin merivoimat	30
3.3.	Puolan merivoimat	32
3.4.	Venäjän Itämeren laivasto	33
4.	MIINAANAJON SIMULOINTI	36
4.1.	Monte Carlo -menetelmä	36
4.2.	Simulaation rakentuminen	37
4.3.	Matemaattinen malli	45
4.4.	Muutettavat parametrit	47
5.	SIMULAATIOTULOSTEN ANALYSOINTI	50
5.1.	Skenaario 1	51
5.2.	Skenaario 2	58
6.	JOHTOPÄÄTÖKSET	63

SYVYYTETTÄVÄ HERÄTEMIINA – SUKELLUSVENEENTORJUNNAN UUSI ULOTTUVUUS

1. JOHDANTO

Merivoimien tehtävät Suomen sotilaalliseksi puolustamiseksi ovat alueellisen koskemattomuuden valvonta ja turvaaminen, meriyhteyksien turvaaminen sekä merellisten hyökkäysten torjunta. Merimiinoittaminen on yksi meripuolustuksen tärkeimpiä osa-alueita, sillä merimiinoittamisella pystytään vastaamaan kaikkiin edellä mainittuihin tehtäviin. Oikea-aikaisella merimiinoittamisella on myös mahdollista hyökkäystä ennaltaehkäisevä vaikutus. Merimiinoituksen strateginen merkitys korostuu juuri sen ennakkoon käytettävyyden perusteella. [20, s. 9]

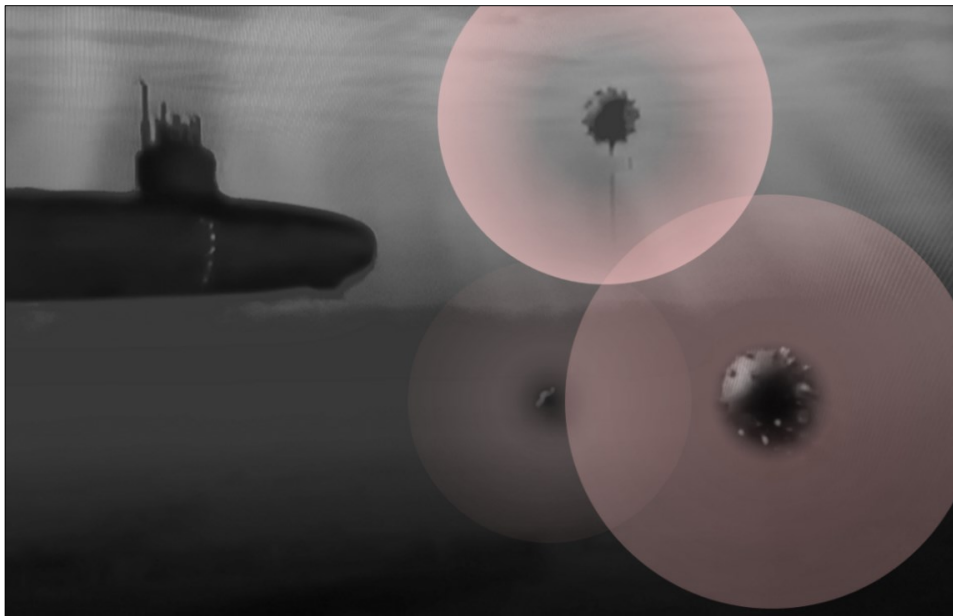
Merimiinoitus on historiassa todettu tehokkaaksi sekä kustannustehokkaaksi pintatorjunnan muodoksi ja sotilaalliseksi pelotteeksi. Miinasodankäynnin osalta merimiinat säilyttävät tulevaisuudessakin asemansa ja merkityksensä merenhallinnassa sekä puolustuksellisia että hyökkäyksellisiä aseina. Merimiinat mahdollistavat heikomman osapuolen, valtion tai ei-valtiollisen toimijan, haastaa vahvempi osapuoli kustannustehokkaasti ja samalla rajoittaa tämän toimintavapautta ja siten kiistää merenherruus. [33, s. 4]

Nykyaikaisen merisodankäynnin näkymättömin ja siten vaarallisin osapuoli on sukellusvene. Sukellusveneestä tekee erityisen vaarallisen sen kyky toimia niin pinta-, satelliitti- kuin lentotiedustelun ulottumattomissa, joka antaa sille yliveraisen yllätyksellisyyden edun. Sukellusvene pystyy lähes kaikkiin merisodankäynnin tehtäviin suuria joukkojen kuljetuksia lukuun ottamatta. Erityisen hyvin sukellusvene soveltuu tiedusteluun, miinoitukseen ja ennen kaikkea sukellusveneiden torjuntaan, jossa se on yliverainen. Suomi joutui 1947 solmitun Pariisin rauhansopimuksen nojalla luopumaan sukellusveneistään, eikä niitä ole sen jälkeen hankittu. Suomen aluevesillä sukellusveneentorjunnassa on siten jouduttu turvautumaan muihin keinoihin.

1.1. Tutkimusaihe ja -tehtävä

Yhtenä tällaisena sukellusveneentorjunnan keinona tässä tutkielmassa tarkastellaan sukellusveneentorjuntamiinoitteita. Sukellusveneentorjuntamiinoitteiden, samoin kuin muunlaistenkin merimiinoitteiden, teho perustuu niiden ennalta ehkäisevään vaikutukseen, sillä niiden käytöllä voidaan merkittävästi rajoittaa sukellusveneiden toimintavapautta [13; 37].

Tutkielman tutkimusaiheena on syvyytettävä herätemiina. Syvyytettävä herätemiinan on Merisotakoulun tutkimuskeskuksen kehitystyön alla oleva, uuden tyyppinen herätemiina, jollaista Suomella ei ole aiemmin ollut käytössä. Tällä hetkellä Suomen käytössä olevat herätemiinat ovat niin sanottuja pohjamiinoja, jotka lasketaan suoraan merenpohjaan. Syvyytettävän herätemiinan toimintaideana onkin parantaa sukellusveneentorjuntakykyä ulottamalla se myös uudelle alueelle, väliveteen, jonne nykyisin käytössä olevat kosketusmiinat eivätkä herätepohjamiinat kykene tehokkaasti vaikuttamaan. Kuvasta 1 käy ilmi syvyytettävän herätemiinan toimintaidea, eli miten syvyytettävä herätemiina tarjoaa mahdollisuuden viedä ympäristöstään anomalioita eli poikkeavuuksia aistivat herätesensorit sekä räjähdysainevaikutus fyysisesti lähemmäs sukellusvenettä.



Kuva 1: Syvyytettävän herätemiinan toimintaidea

Sukellusvene on toimintaperiaatteensa ja -ympäristönsä vuoksi suunniteltu ja rakennettu synnyttämään mahdollisimman pieniä herätteitä sekä kestäämään suuria hydrostaattisia paineita. Viemällä sensorit sekä räjähdysaine lähemmäs sukellusvenettä sen havaitsemisen kynnyksensä mataltuu, ja samalla tuhoavan tai vaurioittavan räjähdysvaikutuksen onnistumisen todennäköisyys kasvaa etäisyyden pienentyessä. Syvyytettävän herätemiinan ominaisuuksiin ja toimintaperiaatteeseen palataan tarkemmin luvussa 2.

Nykyisin käytössä olevat miinatyyppit ovat täysin soveltuvia sukellusveneentorjuntamiinoitteissa käytettäviksi, mutta ne eivät ole erityisesti sukellusveneentorjuntaan suunniteltuja merimiinoja. Tutkielman varsinaisena tutkimustehtävänä onkin tutkia sukellusveneentorjuntaan erityisesti suunnitellun syvyytettävän herätemiinan käyttöä uudenlaisena osana sukellusveneentorjunnan kokonaisuutta. Tutkielman tavoitteena on selvittää, parantaisiko syvyytettävä herätemiina sukellusveneentorjuntamiinoitteiden estearvoa, ja toisiko sen käyttäminen siten parannusta sukellusveneentorjunnan keinovalikoimaan.

Tutkimustehtävän täyttämiseksi tutkielma on jaettu kahteen osuuteen: teoria- sekä tutkimusosuuteen. Teoriaosuuden tavoitteena on luoda ensin tutkijalle ja sittemmin lukijalle ymmärrys herätemiinasta sekä sukellusveneestä - etenkin toistensa vastapuolina. Teoriaosuudessa tutkimuskohteina ovat syvyytettävä herätemiina ja sen ominaisuudet, herätemiinatekniikka sekä Itämeren sukellusveneiden toimintaympäristö ja ominaisuudet. Teoriaosuudessa tarkastellaan syvyytettävää herätemiinaa sekä sukellusveneitä tarkoituksellisen vastakkainasettelun näkökulmasta. Tärkeimpien käsitteiden ymmärtämiseksi niiden määritelmät on koottu liitteeseen 1.

Teoriaosuuden pohjalta lukijalle muodostuu käsitys syvyytettävän herätemiinan toimintaperiaatteesta, sukellusveneiden herätteistä johtuvista vaatimuksista sekä miinan räjähdevaikutuksesta. Teoriaosuuden tavoitteena on myös, että lukija ymmärtää perustelut varsinaisessa tutkimusosuudessa tehdyille valinnoille, yksinkertaistuksille sekä simuloinnissa käytetyille parametriarvoille.

Tutkimusosuuden tavoitteena on osoittaa tieteellisten tutkimusmenetelmien hallinta. Tutkimusmenetelmiä soveltamalla tutkimustyötä varten rakennetaan syvyytettävän herätemiinan estearvoa laskeva ohjelma, jonka toiminta verifioidaan ja dokumentoidaan luotettavasti. Syvyytettävän herätemiinan vaikutusta sukellusveneentorjuntamiinoitteiden estearvoon eri tavoin tutkitaan käytettäessä syvyytettävää herätemiinaa ainoana miinatyyppinä sekä yhdessä nykyisten heräte- ja kosketusmiinojen kanssa. Simulaatio-osuuden lopputuotteena on luotettavia ja toistettavissa olevia tutkimustuloksia, joita analysoimalla tutkija pystyy täyttämään varsinaisen tutkimustehtävän ja johtamaan perusteltuja ja loogisia johtopäätöksiä tutkimustuloksista.

1.2. Tutkimuskysymykset ja -rajaukset

Tutkielman varsinaiseen päätutkimuskysymykseen vastataan matemaattisen tarkastelun avulla. Päätutkimuskysymys on:

- Tuoko syvyytettävä herätemiina lisäarvoa sukellusveneentorjuntaan?

Tutkielman apukysymykset ovat:

- Mikä on syvyytettävä herätemiina ja miten se havaitsee sukellusveneeseen?
- Millaisia ovat Itämeren alueen sukellusveneet ja miten ne koettavat havaita ja välttää syvyytettävän herätemiinan?
- Miten sukellusveneentorjuntamiinoitteen miinaanajon todennäköisyys voidaan laskea simuloimalla?

Tutkimusasetelma on maantieteellisesti rajattu koskemaan vain Itämeren aluetta. Puolustusvoimien ensimmäinen päätehtävä on Suomen sotilaallinen puolustaminen [14], johon syvyytettävää herätemiinaa on suunniteltu käytettäväksi. Suomella ei ole ollut intressejä suunnitella herätemiinoja muualle kuin Itämeren mataliin rannikkovesiin, eikä tähän ole tulevaisuudessakaan nähtävissä muutosta. Maantieteellinen rajausta ulottuu samalla myös sukellusveneisiin, joista tarkastellaan vain Itämeren rantavaltioiden operatiivisessa käytössä olevia sukellusveneitä.

Sukellusveneentorjuntamiinoitteiden estearvon tutkimisen osalta tutkielma on rajattu koskemaan vain sen ensimmäisen osa-alueen, miinaanajon todennäköisyyden, arviointia. Estearvon muut osatekijät, miinan räjähdewaikutus, miinoitteen raivauksen kesto sekä miinojen toimintavarmuus, olisivat myös mielenkiintoisia tutkimusaiheita, mutta niiden käsittely julkisessa tutkielmassa ei ole mahdollista. Niiden tutkiminen on siis jätettävä turvallisuusluokituksestaan korkeammaksi jatkotutkimusaiheeksi.

1.3. Tutkimuksen lähtökohdat

Tutkimustyö alkoi Maanpuolustuskorkeakoululle tyypilliseen tapaan: tutkija valikoi pitkästä listasta mahdollisia tutkimusaiheita otsikon, joka herätti vähiten vastustusta ja ehkä hieman mielenkiintoakin tutkittavaa aihetta kohtaan. Tutkimusaiheen selvittyä alkoi perehtyminen aihealueeseen sekä erityisesti tieteellisen tutkimuksen tekoon.

Tieteen ja tieteellisyyden määritelmien ymmärtäminen ovat Maanpuolustuskorkeakoulusta valmistumisen kannalta perusedellytyksiä, sillä ”on täysin mahdoton ajatus, että upseerikoulutus ja sotatieteiden tutkimus voisi olla tieteellistä, jos ei edes tiedetä, mitä tieteellisyys on tai jos jokainen saa määritellä sen omien mieltymystensä mukaisesti” [29, s. 15]. Tiede on toisaalta luontoa, ihmistä ja yhteiskuntaa koskevien tietojen systemaattinen kokonaisuus ja toisaalta edellä mainitun kaltaisten tietojen tarkoituksellista ja järjestelmällistä tavoittelua [27, s. 13]. Tieteellisyyttä puolestaan voidaan lähestyä monesta eri näkökulmasta, joista yksiselitteisimpiä on tutkimuksen kriteerien määrittäminen. Ronkainen, Pehkonen, Lindblom-Yläne & Paavilainen [34, s. 135] listaavat tutkimuksen pätevyyden kriteereiksi sen arvioitavuuden, seurattavuuden, uskottavuuden, vakuuttavuuden, perusteltavuuden, luotettavuuden ja vahvistettavuuden. Niiniluoto [28, s. 24–29] puolestaan luettelee tieteenkäsitykseen erottamattomasti liittyviksi piirteiksi objektiivisuuden, kriittisyyden, autonomisuuden ja edistyvyyden. Hirsjärvi, Remes & Sajavaara [6, s. 21] nostavat esiin tieteellistä toimintaa ohjaavat neljä imperatiivia, joita ovat universaalisuus, yhteisöllisyys, puolueettomuus sekä järjestelmällisen epäilyn periaate.

Tieteenfilosofiaan perehtymisen ja tieteellisyyden käsityksen muodostamisen jälkeen tutkimuksen teon edellytykset ja vaatimukset olivat selkeät. Lopulta työn lähtökohdiksi valikoitui upseerikoulutuksen tieteellisyyden arvioinnissa käytettävät [29, s. 7], yhdysvaltalaisen filosofi Charles Sanders Peircen (1839–1914) laatimat kriteerit. Peirce tunnetaan nykyään lähinnä filosofina ja loogikkona, mutta omana aikanaan hänet tunnettiin lähinnä luonnontieteilijänä. [45]

Peircen kriteerit ovat [27, s. 81–84]:

1. kriittisyys
2. objektiivisuus
3. itseäänkorjaavuus
4. julkisuus
5. toistettavuus

Kriteerien valikoituminen tutkimustyön lähtökohdiksi johtuu niiden tutkimustyön ja -työskentelyn tieteellisyyden varmistavasta luonteesta: jos tutkimustyö noudattaa yllä mainittuja kriteereitä, ei tutkimustyön tieteellisyyttä voida kiistää [29, s. 7]. Kriteerit soveltuvat myös simulatiotutkimukseen erinomaisesti, sillä kvantitatiivisen tutkimusaineiston analysoinnin tulee olla kriteerit täyttävää. Kriteerien noudattaminen varmistaa samalla, että tutkimustyö täyttää Ronkainen et al. [34, s. 135] esittämät pätevän tutkimuksen edellytykset sekä Niiniluodon [28, s. 24–29] tieteenkäsityksen piirteet. Kriteerit ovat myös ymmärrettävät ja yksiselitteiset.

Tieteen kriittisyys näkyy asetelmassa, jossa mitkään auktoriteetit eivät voi vaatia tieteessä itselleen pysyvää asemaa, vaan kaikki tieteissä esitetyt oletukset ja väitteet voivat tulla hylätyiksi julkisesti esitetyn todistusaineiston perusteella [28, s. 27]. Tutkielmassa kriittisyys korostuu etenkin tutkimusosuudessa, jossa joudutaan simulaation ominaisuuksista johtuen tinkimään reaali maailman ja simulaatiomaailman yhdenmukaisuudesta. Simulaattorin toiminnallisuuksia joudutaan tarkastelemaan kriittisesti ja hylkäämään osa halutuista ominaisuuksista, jottei tutkimustyö keskity liian tarkkojen yksityiskohtien käsittelemiseen. Tehtyjä valintoja, oletuksia sekä väitteitä tarkastellaan kriittisesti ja päätökset perustellaan.

Tiede on objektiivista siinä määrin, kuin sen tulosten sisältö vastaa kohteen ominaisuuksia, eivätkä tutkijan henkilökohtaiset mieltymykset, toiveet, uskomukset tai ennako-odotukset vaikuta tutkimustuloksiin [28, s. 24] Objektiivisuus on tekniikan tutkimuksessa tärkeä ja tutkielmassa suhteellisen helposti noudatettavissa oleva kriteeri. Tutkielman objektiivisuus varmistetaan turvautumalla tiedonhankinnassa luotettaviin lähteisiin sekä varmistamaan löydetty tieto, mikäli mahdollista. Löydettyä tietoa käytetään sellaisenaan matemaattisessa tutkimusosuudessa, eivätkä tutkimustulokset muokkaudu tutkijan henkilökohtaisten vaikuttimien mukaan.

Kriittisyys ja objektiivisuus ovat kuitenkin merkityksettömiä, jos ne eivät johda toiminnan kehittämiseen [29, s. 12]. Toiminnan kehittämiseen tähdätään tieteen itseäänkorjaavuudella. Tieteen itseäänkorjaavuus merkitsi Peircelle erityisesti sitä, että tieteessä pystytään eliminoimaan virheitä: tieteellisesti toteutetuissa testeissä tai tutkimuksissa on erittäin todennäköistä, että virheellinen hypoteesi, ehdotettu selitys ilmiölle, hylätään. Tieteen edistyminen ja itseäänkorjaavuus tarkoittavat siis sitä, että virheelliset hypoteesit ja teoriat korvaantuvat uusilla, vähemmän virheellisillä tai tosilla tuloksilla. [28, s. 28]

Tutkielmassa kriteerin noudattamista lähimmäksi päästään rakennettaessa tutkimusosuuden simulaattoria. Ohjelman kehitystyössä jouduttiin hylkäämään useassa osiohjelmassa eri toteutustapoja yhteensopivuusongelmien tai väärin tuloksien vuoksi. Tutkielmassa tieteen itsensäkorjaavuutta pyritään edistämään dokumentoimalla tutkimustyö kattavasti, jotta tutkimusta voitaisiin käyttää pohjana aihealueen jatkotutkimukselle - tai vaihtoehtoisesti tutkimustulosten kumoamiseksi.

Tieteessä pätee julkisuusperiaate, jonka mukaan tieteen tuloksiksi voidaan hyväksyä vasta tieteellisessä yhteisössä käydyn kriittisen keskustelun tulokset [28, s. 25]. Tutkielman julkisuus ei tarkoita ainoastaan turvallisuusluokituksestaan julkista tutkimustyötä, vaikka asia usein Maanpuolustuskorkeakoulussa näin ymmärretäänkin. Tutkimustyön julkisuus tarkoittaa myös asioiden esittämistä niin selkeästi ja yksinkertaisesti, että tutkimusaiheeseen vihkiytymätönkin lukija ymmärtää tutkimustehtävän, tutkimustulokset ja niiden välissä kaikki toimenpiteet, joiden perusteella päädytään tutkimuksen johtopäätöksiin. [29, s. 10]

Tutkielman julkisuuteen haasteen tuo tutkittavan aihealueen omalaatuisuus. Tutkimustyötä tehtäessä julkisuusongelmaan suhtautumisen ohjenuorana on pidetty Immo Huhtisen Herätemiinatekniikka-kirjan alkusanoissaan toteamaa linjausta: kaikki herätemiinoiniin liittyvät asiat ovat eri maiden laivastojen erikoistietoa ja tarkoin varjeltuja salaisuuksia, mutta herätteidien hyväksikäytön perusteet ovat yksittäisistä sovellutuksista riippumatta aina yleistä fysiikkaa [7, s. 1].

Työn julkisuuspyrkimyksen vuoksi syvyytettävästä herätemiinasta, ankkuroiduista kosketusmiinoista, herätepohjamiinoista sekä sukellusveneestä luodaan kirjallisuusselvityksen perusteella generiset mallit. Yksinkertaistetut mallit eivät tiedon turvallisuusluokituksen vaatimuksesta ja simulaatiolle tyypilliseen tapaan vastaa suoritusarvoiltaan täysin reaali maailman kappaleita. Yksinkertaistuksesta huolimatta luodut mallit kuitenkin mahdollistavat syvyytettävän herätemiinan mahdollisesti tuoman lisäarvon tutkimisen ja samalla mahdollistavat julkisuusperiaatteen toteutumisen.

Työn turvallisuusluokituksen pitämiseen julkisena on myös toinen hyvä syy: Peircen viides kriteeri eli tutkimuksen toistettavuus. Tutkimuksen toistettavuus on tieteen keskiössä [23, s. 1], sillä tieteessä tulos, joka on saatu kerran, mutta jota ei ole saatu toistettua, ei ole minkään arvoinen [29, s. 10]. Tutkimusosuuden dokumentointi ja siten tutkimuksen toistettavuus ovat olleet tutkimustyötä raportoidessa etusijalla. Tutkimusmenetelmien käyttö on pyritty selittämään ymmärrettävästi, yksiselitteisesti sekä riittävän yksityiskohtaisesti, jotta samoilla lähtötiedoilla varustettu tutkija päätyisi samansuuntaisiin tutkimustuloksiin.

1.4. Tutkimuksen tausta ja tutkimustilanne

Merivoimien vedenalainen sodankäynti käsittää useiden eri aselajien toiminnallisuuksia. Merivoimilla on pitkä perinne näiden aselajien suorituskykyjen käytössä ja kehittämisessä, eikä muilla puolustushaaroilla ole kykyä tai tarvetta operointiin pinnan alle. Siten vedenalaista sodankäyntiä ei toteuteta nykytilanteessa muilla kuin Merivoimien tai merellisten yhteistoimintaosapuolien suorituskyvyillä. Vedenalainen sodankäynti on Merivoimien erikoisosaamisalue ja siten yksi sen keskeisimmistä vastuualueista Puolustusvoimien kokonaisoperaatioissa. [38, s. 1]

Vedenalaisen sodankäynnin kokonaisuuden jäsentämiseksi käsite on jaettu neljään toiminnalliseen osa-alueeseen, joista ensimmäinen on toimintaympäristön analysointi ja mallintaminen. Toinen osa-alue on vedenalainen tiedustelu, valvonta ja maalittaminen, kolmas vedenalainen vaikuttaminen ja neljäs vedenalainen suojautuminen. Ensimmäinen osa-alue eli toimintaympäristön analysointi ja mallintaminen tuottaa muiden osa-alueiden tarvitseman evästyksen, sekä suunnittelun ja operatiivisen toiminnan edellytykset muodostavan ymmärryksen vedenalaisesta toimintaympäristöstä. Toimintaympäristön analysointi ja mallintaminen on keskeinen osa kaikkien meripuolustuksen suorituskykyjen käyttöä. Vedenalainen toimintaympäristötietoisuus ja toimintaympäristön mallintaminen muodostavat perustan vedenalaisten suorituskykyjen käytölle. [38, s. 5 – 6]

Tutkielma yrittää omalta osaltaan vastata vedenalaisen toimintaympäristön analysoinnin ja mallintamisen tutkimustarpeeseen ja on siten osa laajempaa kokonaisuutta, vedenalaisen sodankäynnin tutkimushanketta. Tutkimushankkeella on tarkoitus tukea mm. hankittavan torpedoaseen taktista käyttöönottoa sekä tukea sukellusveneentorjunnan kokonaisehittämisestä. Tutkimustyöllä on tarkoitus tukea myös Merimiinoitus 2020 -nimistä hanketta [11].

Tutkimuksen varsinainen tilaaja on Merisotakoulun tutkimuskeskus, joka on tutkinut syvyytettävää herätemiinaa lähinnä sen teknisten vaatimusten ja ominaisuuksien näkökulmasta. Tilaajan alkuperäinen tarkoitus oli tuottaa tilatun tutkimustyön tuloksina operatiivis-taktiset käyttöperiaatteet uudentalaiselle herätemiinalle. Tutkimustyön edessä teknisten tutkimusmenetelmien hallinta sekä syvyytettävän herätemiinan tuoman lisäarvon tutkiminen koettiin kuitenkin tärkeämmäksi kuin operatiivis-taktisten käyttöperiaatteiden määrittäminen. Lisäarvon tutkiminen todettiin paremmaksi keinoksi osoittaa syvyytettävän herätemiinan käytettävyyden kuin kehitettävän merimiinan taktisen käytön suunnittelu.

Tutkielman aihe löytyi Merivoimien Maanpuolustuskorkeakoululle esittämästä listasta pro gradu -tutkielmien aiheiksi. Tutkimusaihe myös kiinnosti tutkijaa, sillä sotilasura merivoimissa on tähän saakka kulunut merimiinoittamisen ja erilaisten merimiinamallien parissa toimiessa, mutta syvempi tekninen ymmärrys herätemiinoista on jäänyt puuttumaan. Tutkimustyön ohessa oli myös mahdollisuus syventyä herätemiinatekniikkaan sekä miinan että herätteiden toimintaperiaatteisiin, jotta ymmärrys herätemiinojen käytettävyydestä erilaisissa tilanteissa kasvaisi ja siten palvelisi tutkijaa myös tulevaisuudessa.

Suorituskyky sinällään on yksi tutkituimmista aihepiireistä puolustusvoimissa, mutta Merivoimien eri suorituskykyjä on Maanpuolustuskorkeakoulussa tutkittu vähemmän eikä merimiinojen suorituskykyä lainkaan. Merisotakoulun tutkimuskeskus on tutkinut yleisemmin herätemiinojen suorituskykyä. Esimerkiksi työn 2. ohjaaja, TkT, dos Ari Poikonen [31], on kuvannut kaikki sota-aluksen vedenalaiset herätteet sekä esittänyt vedenalaisiin herätteisiin liittyvät operatiiviset uhkamallit – ja samalla selventänyt herätemiinoissa käytettäviä erilaisia herätteitä sekä erilaisten herätemiinojen toimintaperiaatteita.

Merimiina 2020 -hankkeeseen liittyen Merisotakoulun tutkimuskeskus on tehnyt tutkimusta myös syvyytettävän herätemiinan osalta. Uudenlaisia herätteitä ja herätekoneistoja on tutkittu jo pidemmän aikaa, ja vuonna 2017 on järjestetty räjäytyskokeita yhteistyössä puolustusvoimien tutkimuslaitoksen kanssa.

Merivoimien esikunta on lisäksi tilannut Puolustusvoimien tutkimuslaitokselta miinatekniikan tutkimuksen, jossa on osana syvyytettävän herätemiinan kehitystyötä tarkoituksena tutkia vedenalaista räjähdystä. Tutkimuksen kohteena on erityisesti vedenalaisen räjähdysyhteydessä tapahtuva ”jet pulse” -ilmiön esiintyminen ja sen vaikutus kohteessa. [40]

Tutkimuksen aihepiiriin liittyy läheisesti Konsta Teittisen yleisesikuntaupseerikurssin diplomityö ”Merellisen taistelutilan mallinnus”, jonka päämääränä oli laatia mallikuvaus merellisen taistelutilan mallista. Työn teoriaosuudessa on tutkittu mallintamisen ja simuloinnin teoriaa sekä yhtenä osa-alueena myös miinasodankäynnin vaikutuksen mallintamista. Teittinen on diplomityössään pohtinut myös merimiinojen mallintamista, joita hän listaa yhteensä kuusi erilaista tapaa [41, s. 41].

Eri mallintamistapojen heikkoudet ja vahvuudet on tuotu selkeästi esille, mutta diplomityön keskittyessä puolustushaaratason taistelujen mallintamiseen, pysyy mallien abstraktiotaso hyvin korkealla. Työssä on tarkoitus mallintaa useita miinoitteita samanaikaisesti, joten yksittäisten miinoitteiden toimivuutta tutkittaessa ”menetetään koko taktis-operatiivisen tason tarkastelemissa vaadittava yleispätevyys.” [41, s. 40–43] Työssä ei siis mallinneta tai simuloita yksittäisiä miinoitteita, mutta diplomityö tarjoaa useita eri vaihtoehtoja miinoitteiden mallintamiseen.

1.5. Tutkimusmenetelmät

Tekniikan tutkimusmenetelmien monimuotoisuutta ja haastavuutta kuvataan osuvasti professori Jorma Jormakan ja ye-eversti Esa Lappalaisen toimittaman Tekniset Tutkimusmenetelmät Maanpuolustuskorkeakoulussa -kirjan johdannossa, jossa todetaan: ”Tekniikan tutkimusten tarkoituksena on useimmiten kehittää uusi tai aiempaa parempi laite tai menetelmä, eikä tarkoituksena useinkaan ole kehittää uutta tietoa. Tekniset tutkimukset liittyvätkin tuotekehitykseen, jolloin *’itse tutkimus voi olla hyvinkin korkeatasoista, mutta harvoin tieteellistä’*, kuten TkT Arto Karila Helsingin Yliopiston Tietojenkäsittelytieteen laitoksen luennolla 3.3.2004 ilmaisi.” [16, s. 3] Kirja toimii hyvänä sotatekniikan tutkimuksen lähtökohtana, sillä se esittelee lukijaystävällisesti esimerkkien avulla tekniikan tutkimuksessa käytettäviä eri tutkimusmenetelmiä.

Kirja on toiminut ajatusten lähteenä myös tässä tutkielmassa, sillä tutkimustyössä on hyödynnetty eri osissa eri tutkimusmenetelmiä valiten kulloinkin tilanteeseen sopivin menetelmä. Vaikka tutkimusmenetelmiä on käytetty useampia, tutkielma voidaan kuitenkin jakaa tutkimusmenetelmien perusteella kahteen selkeään osioon: kirjallisuusselvitykseen sekä matemaattiseen osioon, joka koostuu matemaattisesta mallinnuksesta, simuloinnista sekä matemaattisesta analysoinnista. Jako noudattaa kappaleessa 1.1 esitettyä jakoa teoria- ja tutkimusosuuksiin.

Kirjallisuusselvitys

Kirjallisuusosuus voidaan tekniikan opinnäytetöissä nähdä välttämättömänä esivaiheena kokeelliselle tai soveltavalle tutkimukselle. Usein kirjallisuusosuuden tuloksena tutkimuksen kysymyksenasettelu selventyy, tutkimus kyetään rajaamaan tarkemmin tutkittavan ilmiön mukaan ja kokeellisen osuuden toteuttamiselle saadaan parametrit ja kriteerit arviointia varten. Oikein toteutettu kirjallisuustutkimus tuottaa tekijälleen faktatietoa, tutkimusaineistoa, käsitelmäritelmiä, malleja oman työn asetelmaksi ja etenkin asiantuntemusta tutkittavalta alalta. Tekniikan tutkimuksessa kirjallisuusselvitys onkin tyypillisesti luettava esitys työn kannalta olennaisesta asiasta. [44, s. 42]

Tutkielmassa käytetään kirjallisuusselvitystä tutkimusmenetelmänä tekniikan tutkimukselle tyypillisesti: aikaisemmin tuotettua tietoa etsitään, analysoidaan ja käytetään oman tutkimuksen pohjana. Aikaisempaan tutkittuun tietoon perehtyminen auttaa tutkijaa tutkimusongelman ymmärtämisessä. Aiemmin tutkittua tietoa osataan myös hyödyntää tutkimuksen teossa sekä välttää saman asian tutkimista uudelleen. Samalla tutkija osoittaa omaavansa riittävästi tietoa aiheen tutkimiseksi. [44, s. 42 – 43]

Toteuttamalla kirjallisuusselvitys tutkielmassa on tarkoitus muodostaa kattava, systemaattisesti muodostettu teoriaosuus perustaksi tutkimuksen matemaattiselle tutkimusosuudelle. Matemaattisen tutkimusosuuden toteuttaminen edellyttää pinnallista käsitystä syvempää ymmärrystä koko tutkimusalueesta ja tutkittavista ilmiöistä, sillä luotettavasti toimivien matemaattisen mallin ja simulaattorin rakentaminen vaatii sekä syy - seuraus -suhteiden ymmärrystä että perusteltavissa olevia yksinkertaistuksia. Yksinkertaistukset mahdollistavat myös tutkimustulosten verifioinnin ja reliabiliteetin eli toistettavuuden, jotka ovat tutkimustulosten luotettavuuden edellytyksiä [44, s. 45].

Ongelmaksi muodostuu aiemmin tuotetun tiedon etsintä, sillä tutkimuksen aihepiiri ei ole julkista. Sukellusvenetekniikka on valtioiden suurimpia sotateknisiä salaisuuksia, ja vastavuoroisesti miinatekniikan alalla tutkimuksissa saavutetut läpimurrot tarkoittaisivat etulyöntiasemaa vihollisiin verrattuna. Vähäsiinkin julkaistuihin tietoihin tuleekin siten suhtautua hyvin kriittisesti, sillä on todennäköisempää, että julkaistulla tiedolla on jokin muu tarkoitusperä kuin tieteen edistyvyyden tai itsensä korjaavuuden edistäminen.

Matemaattinen analyysi

”Ongelmien moninaisuuden vuoksi on jokseenkin mahdotonta esittää matemaattista analyysiä reseptinomaisena tutkimusmenetelmänä” [17, s. 62], mutta sen hyödyt ovat silti kiistattomat. Matemaattinen analyysi mahdollistaa ongelmien tarkastelun luonnon perustotuuksien pohjalta. Matemaattisella analyysillä voidaan kustannustehokkaasti ja usein sangen nopeasti osoittaa, onko tutkittavaan ongelmaan etsittävä ratkaisu ylipäätään mahdollinen.

Matemaattisen analyysin heikkoudeksi voidaan todeta, että yleensä analyysissa voidaan ottaa huomioon vain muutamia tutkittavaan tilanteeseen vaikuttavia muuttujia ja parametreja. Jos muuttujat kuitenkin ovat olennaisia, analyysin tulos antaa oikeaa tietoa. Matemaattisen analyysin tulos saattaa absoluuttisena lukuna olla virheellinen, mutta se saattaa silti osoittaa oikeanlaisista parametririippuvuutta: jos jotain parametria muutetaan tiettyyn suuntaan, niin lopputuloksen muutossuunta saattaa olla ennustettavissa. [17, s. 61]

Matemaattisen analysoinnin kustannustehokkuutta kuvaa hyvin toisen maailmansodan aikainen esimerkki englantilaisten sukellusvenetorjunnan ongelmanratkaisusta: ”Matemaattis-fysi-kaalinen tarkastelu osoitti, että syvyysspommin teho on suurin, kun se räjähtää 30 m syvyydessä. Toisen maailmansodan alkupuolella englantilaiset olivat säätäneet pomminsa laukeamaan tässä syvyydessä. Sukellusveneitä vastaan tehtyjen ilmahyökkäysten tulokset osoittautuivat erittäin huonoiksi: vain noin 0,1 %:lla pudotetuista pommeista voitiin todeta maalivaikutusta. Hyökkäytilanteen matemaattinen tarkastelu osoitti, että parempaa ei voinut olla odotettavissakaan. Pommin pudotusta edelsi veneestä tehty pintahavainto. Noin 90 %:ssa hyökkäyksistä pommi pudotettiin veneen ollessa pinnassa tai sen oltua sukelluksissa alle yhden minuutin. Toisaalta veneen sukellusnopeuden pystysuora komponentti oli enintään 0,6 m/s, joten veneet eivät olleet ehtineet pommien laukaisusyvyteen räjähdysketkellä. Toisaalta, jos pommi pudotettaisiin vasta yli minuutin kuluttua siitä, kun vene sukelsi, sillä oli mahdollisuus hakeutua melko suu- ralle alueelle, joten osumistodennäköisyys muodostui erittäin pieneksi. Kun otetaan huomioon sukellusveneen nopeus, mittasuhteet ja pommin vaikutusetaisyys, voidaan arvioida, että toden- näköisyys saada vaikuttava osuma pintahavainnon ja veneen sukeltamisen jälkeen oli $< \frac{1}{500}$, mikä suuruusluokaltaan sopi hyvin havaitun vaikutustodennäköisyyden $\frac{1}{1000}$ kanssa. Analyysi osoitti, että optimaalisin laukaisusyvyys oli 6 m ja pommi tuli pudottaa nopeasti havaitsemisen jälkeen. Analyysin mukaiset säädöt ja taktiset ohjeet otettiin käyttöön. Seurauksena oli sukellusvenetorjunnan tehon dramaattinen kasvaminen. Vastustaja otaksui tehon lisäyksen syyksi uuden ja tehokkaamman pommin käytön.” [17, s. 62–63]

Tutkielmassa matemaattisen analyysi korostuu syvyytettävän herätemiinan vaikutusalueen, käytettävän syvyysalueen muodon sekä sukellusveneen parametrien laatimisessa. Yksinkertaistettujen parametrien perusteella voidaan vetää johtopäätökset syvyytettävän herätemiinan mahdollisesti tarjoamasta lisäarvosta sukellusvenetorjunnassa. Myös simulaattorin tutkimustulosten verifiointi ja analysointi perustuvat matemaattisen analyysiin.

Simulointi ja mallinnus

Sotaoperaatioissa hyödynnetyt laitteet ja niiden tarvitsemat resurssit kasvattavat operaatioista koituvia kustannuksia merkittävästi. Sotatarvikkeiden hintakehitys on viime vuosikymmeninä ollut huimaa. Hintakehitykseen ei ole nähtävissä helpotusta, vaikka siviiliteknologiat ovatkin viime vuosina ajaneet kehityksessään ohi sotilasteknologiasta. Siviiliteknologia harvoin sopii sotilaskäyttöön ilman jonkin asteisia modifikaatioita, ja sotilasmarkkinoiden ollessa pienet verrattuna siviilimarkkinoihin eivät teknologioita kehittälevät yritykset ole laajalti innostuneet kehittämään teknologioitaan sotilaskäyttöön soveltuviksi. Kasvaviin kustannusongelmiin simulointi tarjoaa hyvän ratkaisun, sillä simulaatioiden sekä simulaattorien avulla osia harjoituksista voidaan mallintaa tietokoneella. Simuloinnin ansiosta resursseja kuluu vähemmän logistiikkaan sekä materiaaliin, ja siten kustannuksia saadaan madallettua merkittävästi; esimerkiksi yhden meritorjuntaohjuslaukauksen hinnalla voidaan rakentaa useita simulaattoreita, joilla itse ampu-matapahtumaa voidaan yhtä lailla harjoitella.

Mallinnusta ja simulointia tutkimusmenetelminä on Maanpuolustuskorkeakoulun tutkimus-töissä käytetty suhteessa muihin tekniikan tutkimusmenetelmiin hyvin vähän [15, s. 215]. Si-mulointi vaatii tutkijalta yleensä jonkin ohjelmointikielen hallintaa, jotta mallinnus ja simu-lointi voidaan tehdä riittävällä luotettavuudella. Simulaatio on kuitenkin hyvin yleinen tutki-musmenetelmä useilla eri tieteenaloilla, joten tutkimusmenetelmää itsessään on myös tutkittu ja kehitetty paljon.

Yksi tunnistettu simulaatiotutkimusten kehityksen tarve on niiden raportointi. Tutkielmassa noudatetaan Monks, Currie, Onggo, Robinson, Kunc & Taylorin artikkelissaan *Strengthening the reporting of empirical simulation studies: Introducing the STRESS guidelines* kehittämiä periaatteita simulaatiotutkimusten raportoinnin parantamiseksi. Artikkelin on julkaistu maaliskuussa 2018 Journal of Simulation -lehdessä, joka täyttää Julkaisufoorumin perustason kriteerit eli julkaisulla on mm. asiantuntijoista koostuva toimituskunta ja tieteelliset artikkelit käyvät läpi koko käsikirjoitukseen kohdistuvan vertaisarvioinnin [10].

Monks et al. [23, s. 1] korostavat erityisesti tutkimustulosten toistettavuuden (*reproducibility of*) merkitystä tieteessä. Yleisesti ottaen tutkijat julkaisevat simulaatiomalleja ja -metodeja kehittäkseen tieteenalojaan, jakeakseen tietoaan ja siten välttääkseen ”pyörän keksimistä uudelleen”. Ongelmaksi muodostuu, että usein malleja rakentaa ja ylläpitää yhden tai muutaman ihmisen joukko, joka tietää ja ymmärtää mallin toiminnan, mutta mallin dokumentaatio ja raportointi ovat puutteellisia. Puutteellisuus ilmenee esimerkiksi silloin, kun malli pitäisi tuottaa uudelleen tai sen toimintaa parantaa eri ihmisten toimesta. Huonosti raportoituja simulaatiotutkimuksia ei voida uudelleen tuottaa, niiden toimintaa ei pystytä verifioimaan eikä niitä siten pystytä laajentamaan tai hyödyntämään jatkotutkimuksessa.

Artikkelissa esitetään raportoinnin kuusi pääperiaatetta, jotka on esitetty taulukossa 1. Periaatteita noudattamalla tutkijoiden on helpompi suunnitella tutkimuksensa siten, että se on dokumentoitavissa riittävän tarkasti.

Taulukko 1: Simulaatiotutkimuksen raportoinnin kuusi pääperiaatetta [23, s. 6]

1.	Määrittele tutkimustehtävä ja mallin tarkoitus.
2.	Kuvaile riittävän yksityiskohtaisesti mallin koeajojen tulokset ja simulaatioajojen tutkimustulokset niiden toistamiseksi.
3.	Varmista, että simulaatiomallin kuvaukset ovat ohjelmisto- ja laitteistoriippumattomat (<i>software and hardware independent</i>).
4.	Sisällytä simulaatiodata ja parametriarvot verifikaatiota varten. Jos tutkimusdata ei ole julkista, tulisi hypoteettinen testidata sisällyttää.
5.	Dokumentoi ohjelmisto- ja laitteistokohtainen toteutus.
6.	Visualisoi mallin logiikka tai algoritmit selkeäksi graafiseksi esitykseksi.

Artikkelin tarkoituksena on yrittää standardisoida simulaatiotutkimusten raportointia. Artikkeliki käsittelee simulaatiotutkimusten julkaisemisen syitä perustellakseen simulaatiomallien ja tutkimustulosten toistettavuuden merkitystä tieteen harjoittamisessa. Seuraavaksi artikkelissa yritetään toistaa simulaatiomalleja niiden raportoinnin puutteellisuuden ja vaikeuden havainnollistamiseksi. STRESS-ohjeet muodostetaan ongelmakohtien löytämisen jälkeen synteesisinä käytössä olevista eri raportointi-, suunnittelu- ja kehitysohjeista sekä hyviksi koetuista alan tutkimusraporteista. Lopputuotoksena esitellään tutkijoiden kehittämä *checklist*, tarkastuslista, jonka tarkoituksena on toimia tutkijoiden apuna simulaatiotutkimusten suunnittelussa, toteuttamisessa sekä raportoinnissa.

1.6. Tutkimuksen viitekehys ja tärkeimmät lähteet

Tutkimuksen viitekehys muodostuu tutkittavaa ilmiötä koskevasta aikaisemmasta tieteellisestä keskustelusta, josta muodostuu se tapa, jolla ilmiötä lähestytään [34, s. 59]. Koska tutkielmassa kyse on tuotekehitykseen verrattavissa olevasta, aikaisemmin tutkimattomasta aihealueesta, ei ilmiön ympärille ole varsinaisesti syntynyt tieteellistä keskustelua. Tutkimuksen viitekehys muodostuu ST Jukka Anteroisen kirjoittaman Merimiinoitusoppaan ympärille. Merimiinoitusopas käsittelee merivoimien miina-asetta ja sen käyttöä, merimiinoittamista. Opas on tarkoitettu käytettäväksi oppikirjana sotakouluissa palkatulle henkilöstölle, varusmiesjohtajille sekä kertausharjoituksissa reservin johtajille. Opas toimii lisäksi operatiivisen suunnittelun sekä miinoittajan päällikön ja merimiinoittamisen johtohenkilöstön käsikirjana. [20, s. 9]

Merimiinoitusopas käsittelee merimiinoittamisen perusteita, merimiina-asejärjestelmää, merimiinoitustoimintaa yleisesti sekä miinoitusoperaation toteuttamista, sitä tukevaa toimintaa ja operaation raportointia. Opas määrittelee merimiinoittamisen kannalta tärkeimmät käsitteet ymmärryksen yhtenäistämiseksi. Tutkielman kannalta olennaisin käsite on estearvo, jonka määritelmää sovelletaan myös tutkielman viitekehyyksensä.



Kuva 2: Miinoitteen estearvon muodostuminen [20, s. 32 mukailen]

Tutkielmassa selvitetään syvyytettävän herätemiinan tuomaa muutosta sukellusveneentorjuntamiinoitteiden estearvoon. Miinoitteen estearvo on laskennallinen lukuarvo, joka kuvaa miinoitteen laskennallista miinaanajon todennäköisyyttä. Estearvo määrittää, onko miinoite häiritsevä, $P(A) < 0,5$, vai torjuva, $P(A) \geq 0,5$. Miinaanajon todennäköisyyteen vaikuttavat miinoitteen suhteellinen tiheys, miinojen syvyytys ja asetusarvot, aluksen leveys, aluksen herätteet sekä miinan räjähdysvaikutussäde. [20, s. 32]

Merimiinoitusoppaan lisäksi tutkielman kannalta tärkeitä lähteitä on useita. Syvyytettävään herätemiinaan liittyen Merisotakoulun tutkimuskeskuksen tutkimusraportit avaavat hyvin vedenalaisen sodankäynnin ulottuvuuksia. Aiheisiin liian yksityiskohtaisesti menemättä ne ulottuvat sukellusveneentorjunnasta sonar-järjestelmiin. Tutkimusraporteista suurin osa löytyy Puolustusvoimien asianhallintajärjestelmästä Merivoimien lähiarkistosta hakusanalla ”tutkimusraportti”.

Tutkielman teoriaosuuden tärkein lähde herätemiinatekniikan osalta on Immo Huhtisen kirjoittama Herätemiinatekniikka. Kirja pyrkii muodostamaan helposti omaksuttavassa muodossa selkeän kokonaiskuvan herätemiinatekniikan mahdollisuuksista sekä rajoituksista. Kirjassa käsitellään eri herätteitä, niiden havaitsemista ja mittaamista, alusten suojautumista herätemiinoilta sekä lisäksi herätemiinojen raivausta, etsintää ja tuhoamista. Kirjoittajan tavoitteet ovat ylevät, sillä kirja on tarkoitettu oppikirjaksi teknillisille erikoiskursseille ja samalla upseereille ilman teknillistä koulutusta. Kirja on tietysti mahdollista lukea ilman teknillistä ymmärrystä, mutta suositeltavaa se ei ole. Kirja tarjoaa lukijaystävällisesti iästään huolimatta perustietoa herätemiinatekniikasta ja vedenalaisesta toimintaympäristöstä yleensäkin.

Tutkielman tutkimusosuuden tärkeimpiä lähteitä ovat puolestaan Matti Lehtisen kirjoittama Pieni simulointikirja – simuloinnin alkeita taulukkolaskennan avulla. Kirja yhdistettynä Sotatekniikan laitoksen tutkimusmenetelmäopintoihin tarjosi riittävän pohjan tutkimusosuuden toteuttamiseksi ja tulosten analysoimiseksi. Myös aiemmin mainittu Esa Lappalaisen ja Jorma Jormakan toimittama Tekniset tutkimusmenetelmät Maanpuolustuskorkeakoulussa -kokoelmateos on syytä mainita uudelleen, sillä ajatusmaailman avartamisen lisäksi se tarjosi teoriapohjaa erityisesti tutkimusmenetelmien käyttöön.

2. SYVYYTETTÄVÄ HERÄTEMIINA

Syvyytettävän herätemiinan ominaisuuksista tutkielman kannalta tärkeintä on syvyytettävän herätemiinan kyky havaita sukellusvene. Havaitseminen puolestaan perustuu sukellusveneiden synnyttämien herätteiden luotettavaan mittaamiseen. Vasta kun sukellusvene on luotettavasti havaittu, voidaan siihen kohdistaa räjähdewaikutus riittävän läheltä vaikutuksen aiheuttamiseksi. Luvussa pureudutaan syvällisemmin edellä mainittuihin ominaisuuksiin, mutta niiden edellytys on kuitenkin ensin saada syvyytettävä herätemiina halutulle syvyydelle.

2.1. Toimintaperiaate

Syvyytettävä herätemiina on paikalleen ankkuroitu herätemiina, jonka herätekoneisto ja vaikutuksen aiheuttava räjähdysainekuorma on syvytetty jollekin halutulle syvyydelle joko mekaanisesti tai hydrostaattisen syvytyksen avulla. Ankkuroitu herätemiina koostuu kahdesta osasta. Miinan ankkuriosan tarkoituksena on syvyttää miina oikealle syvyydelle ja pitää miina paikallaan teräsvaijerin avulla. Miinan kohon tehtävänä on nosteen ansiosta pyrkiä kohti pintaa ja samalla tuoda räjähdysaine sekä eri herätesensorit halutulle syvyydelle.

Hydrostaattisyvytytys on vedenpaineeseen perustuva ankkuroidun miinan syvytysmenetelmä. Menetelmä perustuu hydrostaattisen paineen vaihteluun. Miinassa oleva anturi tunnistaa hydrostaattisen paineen perusteella, milloin miina on sille halutussa syvyydessä ja lukitsee miinan oikealle syvyydelle. Luotisyvytytys on ankkuroidun miinan ankkurissa olevaan, tietyn pituiseen syvytinköyteen ja luotipainoon perustuva miinan syvytysmenetelmä. [20, s. 62]. Menetelmässä miinan ankkuriketju on sijoitettu ankkurin sisään, ja koho irtoaa ankkurista, kun miina lasketaan veteen. Ankkurista irtoaa samalla syvytinluoti, joka vajoaa halutun syvyyden verran ankkurin edellä kohti pohjaa. Kun syvytinluoti osuu pohjaan, ankkurin sisällä koneisto lukitsee ankkuriketjun niin, ettei se pääse enää juoksemaan, ankkuri rupeaa vetämään koho mukanaan kohti pohjaa. Lopulta kun ankkuri on pohjassa, on koho halutulla syvyydellä. Myös kosketusmiinoissa miinojen syvytytys toimii pääosin samalla periaatteella.

2.2. Herätteet

Syvyytettävän herätemiinan haluttu toiminta perustuu sukellusveneiden havaitsemiseen vedessä. Kuten sanottua, miina on tehokas vain, jos se räjähtää lähellä sukellusvenettä, joten sen tarvitsee luotettavasti erottaa sukellusvene muista mahdollisista herätteiden aiheuttajista. Luotettavuuden varmistamiseksi herätemiinat vaativat usein useamman samanaikaisen, riittävän suuren eri herätteen räjähtääkseen. Useamman eri herätelajin vaatiminen parantaa herätemiinan raivauksenkestoa ja estää sitä räjähtämästä väärin herätteisiin.

Herätemiinakontekstissa heräte on määritelty seuraavasti: Heräte on fyysikaalinen tapahtuma, jolla tarkoitetaan aluksen tai jonkin muun laitteen ympärilleen synnyttämää häiriötilaa. Häiriötila on mitattavissa ja sitä voidaan käyttää pohjaan lasketun tai väliveteen syvyytetyn herätemiinan laukaisemiseen siten, että alus ei varsinaisesti kosketa miinaan. [7, s. 1]

Akustinen heräte

Akustisella herätteellä, ääniherätteellä, tarkoitetaan kokonaisuudessaan vedessä liikkuvasta aluksesta lähtevää melua. Konevoimalla liikkuvan aluksen ääniherätteet voidaan luokitella syntytapansa perusteella kolmeen luokkaan: koneistomeluun, runkomeluun sekä propulsiomeluun. Luokista ensimmäinen ja kolmas ovat hallitsevia ja siten merkittävimmät herätteen kannalta. [7]

Fysikaalisesti tarkasteltuna akustinen heräte eli vesiääni on vesimolekyylien mekaanista, veden kimmoisuudesta johtuvaa aaltoliikettä [7; 31]. Akustinen heräte on mekaanista aaltoliikettä, jonka taajuuskaista ulottuu infraäänialueelta ($f < 20$ Hz) ultraäänialueelle ($f > 15$ kHz) [31].

Koneistomelu syntyy aluksen pää- ja apukoneiden, pumppujen sekä muiden mekaanisten laitteiden synnyttämänä. Lisäksi voimansiirtolaitteisto, joilla nimensä mukaisesti pääkoneiden tuottama voima siirretään propulsiolaitteille, aiheuttavat melua. Pääosa koneistomelusta johtuu veteen aluksen rungon kautta. Koneistomelu on aluksissa väistämätön heräte, mutta sen välitymistä veteen ja siten havaittavuutta voidaan pienentää merkittävästi. Tehokkain tapa vähentää koneistomelua on asentaa koneisto ja voimansiirtolaitteisto joustavien pidikkeiden avulla aluksen runkoon. [7, s. 36; 31] Toinen vaihtoehto on valita yhä yleisempi dieselsähköinen voimansiirto, jossa voimansiirto ei enää tapahdu suurta potkuriakselia pyörittämällä, vaan sähkögeneraattorien tuottama sähkövirta syötetään sähkömoottoreille. Tekniikka on käytössä etenkin sukellusveneissä, joiden akustista herätettä on pyritty minimoimaan kaikin mahdollisin tavoin.

Runkomelu aiheutuu aluksen rungon epätasaisuuksien synnyttämistä veden virtaukseen liittyvistä pyörteistä, joita synnyttävät erityisesti rungon epäjatkuuskohdat eli ulokkeet, portaat, läpivientiaukot jne. Melua aiheuttavan epätasaisuuden arvo voidaan laskea kaavalla [7, s. 37]:

$$h \text{ (mm)} = 1,5 / u ,$$

jossa u = aluksen nopeus solmuina.

Täysin meluttoman pinnan on siis oltava erittäin tasainen, sillä jo 0,3 mm:n kohouma riittää 5 solmun nopeudella synnyttämään melua, ja nopeuden noustessa pienempikin kohouma riittää melun synnyttämiseen. On kuitenkin huomattava, että hydrodynaamista alkuperää oleva runkomelu peittyy yleensä koneistomelun ja propulsiomelun alle. [7, s. 37]

Propulsiomelu on aluksen propulsiokoneistosta, joka on suoraan kosketuksissa veteen, syntyvää melua. Propulsiomelun aste riippuu voimakkaasti käytössä olevasta järjestelmästä, nopeudesta ja tehosta. Propulsiomelu on yleisesti ottaen merkittävin akustisen herätteen aiheuttaja, sillä alimpia taajuuksia lukuun ottamatta propulsiomelu ylittää normaalisti voimakkuudeltaan koneistomelun. [7, s. 37] Propulsiomelusta merkittävin tutkielman kannalta on potkuripropulsio, sillä se on Itämeren alueen kaikissa sukellusveneissä käytettävä propulsiomenetelmä, ja sukellusveneissä suurin akustisen herätteen aiheuttaja.

Kaikista herätteistä suurin kantama on veteen syntyvällä mekaanisella aaltoliikkeellä eli vedenalaisella äänellä. Edullisissa vesiääniolosuhteissa eli tasalämpöisessä vedessä voidaan rahtilaiivan kokoinen pinta-alus kuulla usean kymmenen kilometrin etäisyydeltä. [31, s. 1] Akustisen herätteen havaitsemine tapahtuu väliveteen syvyytetyssä miinassa hydrofoneilla.

Magneettinen heräte

Magneettisella herätteellä tarkoitetaan aluksen aiheuttamaa vähäistä muutosta havaintopaikalla vaikuttavaan maapallon magneettikenttään. Syntyvä häiriö riippuu aluksen rakennusmateriaaleista, koosta, lastista, kulkusuunnasta yms. tekijöistä. Oleellinen ero akustiseen ja paineherätteeseen on se, että magneettisen herätteen voimakkuus on riippumaton aluksen nopeudesta. [7, s. 1]

Syntymekanisminsa perusteella magneettinen heräte voidaan jakaa tyypiltään neljään eri ryhmään: pysyvään eli permanenttiin, indusoituneeseen, sähkölaitteiden ja kaapeleiden aiheuttamaan sekä pyörrevirtojen aiheuttamaan herätteeseen. Pysyvä heräte riippuu aluksen magneettisten teräsmassojen määrästä, muodosta, keskinäisestä sijainnista sekä niiden magnetoitumisasteesta, kun taas indusoitunut jännite riippuu kappaleen asennosta maan magneettikenttään nähden [7, s. 46–47]. Sähkölaitteiden ja kaapeleiden aiheuttama magneettinen heräte koostuu aluksen generaattoreiden, moottorien, sähköisen voimansiirron sekä apulaitteiden synnyttämistä herätteistä. Pyörrevirtaherätteet ovat puolestaan merkitystä ainoastaan alumiinirunkoisilla aluksilla. [7, s. 50–51]

Herätemiinojen magneettiset sensorit mittaavat sekä staattista magneettikenttää että alusten rakenteisiin indusoituneiden pyörrevirtojen aiheuttamia muutoksia magneettikentässä. Sensorit havaitsevat ylikulkevien alusten aiheuttamat magneettikentän muutokset ja räjähtävät, kun magneettinen heräte ylittää tietyn kynnyksarvon tai sen muoto täyttää laukaisukriteerit. [12, s. 90–91]

Pinta-aluksissa yleisimmin käytetty magneettisen herätteen minimoimistapa on demagnetointi, mutta sukellusveneiden kohdalla magneettinen heräte pyritään minimoimaan rakentamalla ne antimagneettisista aineista. Sukellusveneiden magneettiseen havaittavuuteen vaikuttaa eniten niiden runkomateriaali. Useiden venäläisten sukellusvenetyyppien rungot on rakennettu antimagneettisesta titaanista, ja myös uudemmat saksalaiset sukellusveneet rakennetaan antimagneettisesta teräksestä. [12, s. 91]

Paineheräte

Vedessä liikkuva pinta-alus, sukellusvene tai mikä tahansa kiinteä kappale syrjäyttää aina omaa massaansa vastaavan tilavuuden verran vettä. Paineheräte aiheutuu uppoumarunkoisen aluksen tai sukellusveneiden kulkiessaan syrjäyttämän vesimassan virtauksista. Heräte syntyy, kun aluksen rungon alla vesimassa puristuu ahtaampaan tilaan ja liikkuu sen vuoksi osittain aluksen kulkusuuntaan ja osittain sivuille päin. Virtaus näkyy vähäisenä vedenpaineen muutoksena, joka vastaa ainoastaan muutaman senttimetrin korkuisen vesipatsaan painetta [7, s. 1-32]. Muutokselle on ominaista, että veden halki kulkevan aluksen keulan edessä on lyhytaikainen ylipainevaihe, ja aluksen alapuolella ja jonkin matkaa sen kulkusuunnan sivulla alipaine. Paineherätteen voimakkuus on riippuvainen erityisesti aluksen nopeudesta sekä koosta. [7, s. 1-2] Paineherätteen voimakkuuteen ja siten havaittavuuteen vaikuttavat myös aluksen muoto, kulkusyvyys, vesiviivan pituus sekä painesensorin syvyys. Paineheräte vaihtelee alusluokkakohtaisesti, mutta paineenvaihtelun havaitseminen on silti mahdollista jopa syvissä vesissä. [1, s. 10].

Kaava painekentän tehon laskemiseksi löytyy Herätemiinatekniikka-kirjan luvun 1 sivulta 55 [7, s. 1-55]. Tutkimusraportti, jossa kaava on johdettu, on syntynyt Merivoimien esikunnan toimeksiannosta ja on siten Merivoimien esikunnan omaisuutta. Kaavasta voidaan kuitenkin todeta, että paineherätteen suuruus on suhteessa aluksen nopeuden neliöön, eli nopeuden puolittaminen pudottaa paineherätteen neljäsosaan. Kaavan avulla laskettujen tyypillisten paineherätteiden kuvaajasta kirjan samalla sivulla voidaan todeta sukellusveneeseen painekentän tehon 8 solmun nopeudella 70 metrin syvyydessä vastaavan ohjusveneeseen kokoisen taistelualuksen paineherätettä samalla nopeudella 40 metrin syvyydessä. Mikäli sukellusveneeseen nopeus putoaa vielä puoleen, laskee painekentän teho neljännesosaan, jolloin havaintoetäisyydeksi saadaan vähintään 10 metriä. Tuloksen pohjalta on perusteltua olettaa painesensorien havaitsevan sukellusveneeseen paineherätteen syvyytettävän herätemiinan tuhoavan etäisyyden sisällä.

Paineherätteen vahvuus on sen jäljittelemättömyys. Herätemiinojen raivaus perustuu yleisesti herätteiden jäljittelemiseen eli herätemiinan ”huijaamiseen”. Veden halki liikkuvan aluksen paineherätettä ei voida jäljitellä ilman veden halki liikkuvaa alusta tai saman kokoista kiinteää kappaletta.

UEP-heräte

Kaikki alukset aiheuttavat ympärilleen sähkökenttiä, joiden tasavirtakomponenteista käytetään lyhennyksiä UEP (Underwater Electronic Potential) tai SE (Static Electric field). Sähkökentät syntyvät aluksen rungon ja propulsiojärjestelmän välisistä korroosiovirroista. Herätteen aiheuttaa käytännössä eri metalleista valmistettujen osien välille muodostuva potentiaaliero eli jännite. Potentiaaliero johtuu meriveden suolapitoisuudesta johtuvista galvaanisista virroista [7, s. 1-4]. Korroosivirtojen aiheuttamista magneettikentistä käytetään nimeä CRM (Corrosion Related Magnetic field). [12, s. 91]

UEP-heräte on herätemiinoissa suhteellisen uusi herätelaji, eikä sen kaikkia ominaisuuksia vielä tunneta. Herätelajista tekee mielenkiintoisen useampi ominaisuus: UEP-herätteen arvo vaihtelee potkuriakselin pyörimisen tahdissa [7, s. 1-4]., joten se on magneettisen herätteen tavoin luokiteltavissa hyvinkin yksilökohtaiseksi herätteeksi [1, s. 10]. UEP-heräte on myös väistämätön, jollei aluksen runkoa rakenneta samasta materiaalista kuin kaikkia veteen koskettavia metallisia elementtejä. UEP-herätettä ei siis voida välttää ja sen minimointikin on hankalaa, joten sen hyödyntäminen herätemiinatekniikassa on herkullista. Sukellusveneentorjuntaan UEP-heräte tuo tällöin lisämahdollisuuksia havaita muuten minimaalisia herätteitä synnyttävä vedenalainen kappale.

2.3. Räjähdevaikutus

Miinan räjähdysvaikutukseen maalissa vaikuttavat miinan latauksen koko ja laatu, veden syvyys, miinan etäisyys aluksesta, pohjanlaatu ja aluksen räjähdyskesto. Kosketusmiinat räjähtävät aluksen vedenalaisessa osassa, ja räjähdysenergia purkautuu yleensä aluksen runkoon. Herätepohjamiinat räjähtävät kauempana aluksen rungosta. Niiden räjähdysvaikutus koostuu suorasta shokki-iskusta ja sitä seuraavasta kaasukuplasta. Normaalin pohjamiinan tehokas räjähdysvaikutus alusta vastaan ulottuu 50 – 70 metrin etäisyydelle. Kauempanakin tapahtuva miinan räjähdys aiheuttaa suurella todennäköisyydellä eriaisteisia vaurioita alukseen. [20]

Vedenalaisessa räjähdyksessä vapautuvasta kemiallisesta energiasta sitoutuu noin puolet ns. isku- eli shokkiaaltoon ja puolet kaasukuplan muodostamiseen. Räjähdyksessä vapautuvat kaasut muodostavat nopeasti laajenevan mutta jäähtyessään äkillisesti kasaan painuvan kaasukuplan. Kuplan luhistuessa syntyy seuraava painehuippu, joka aiheuttaa puolestaan seuraavan kuplan jne. Yleensä vain ensimmäisellä kuplapulssilla on merkitystä, sillä toisen pulssin teho on vain n. 4 % ensimmäisestä. Lähellä pintaa kuplapulssin energia purkautuu vedenpinnan rikkoutuessa, jolloin vajaa puolet kokonaisenergiasta on käytettävissä kohteen tuhoamiseen. [7, s. 3-19]

Syvyytettävän herätemiinan kannalta olennaista on räjähdysainemäärän suhde tuhoamisetäisyyteen. Vedenalaisen räjähdyspaineimpulssin huippuarvo on likimain suoraan verrannollinen räjähdysainemäärän kuutiojuureen ja kääntäen verrannollinen etäisyyteen. Toisin sanoen saman tuho vaikutuksen synnyttämiseen 10 % kauemmas vaaditaan 30 % enemmän räjähdysainetta ja kaksinkertaiselle matkalle jo 8-kertainen lataus. [7, s. 3-19] Suhdeluku puhuu osaltaan syvyytettävän herätemiinan puolesta, sillä etäisyyden puolittaminen viemällä räjähdysainemäärä lähemmäs tuhottavaa kohdetta vaatii enää n. 13 % alkuperäisestä räjähdysainemäärästä. Syvyytettävällä herätemiinalla olisi siis mahdollista saada aikaan sama vaikutus murto-osalla tavallisen pohjamiinan räjähdysainemäärästä.

Räjähtänen miinan vaikutuksesta aluksen rakenteisiin, ohjailtavuuteen ja käytettävyyteen saa hyvän kuvan Yhdysvaltojen laivaston julkaisemasta raportista, joka käsittelee kesä- ja elokuussa 2017 tapahtuneita kahta Arleigh Burke -luokan hävittäjän ja kauppa-aluksen yhteentörmäystä. Vaikka raportti koskeekin pinta-aluksia, se antaa hyvän kuvan miinaräjähdysaiheuttamista toimenpiteistä, toimintakyvyn muutoksista sekä vahinkojen laajuudesta.

Raportti kertoo tapahtumasarjat, jotka johtivat 154-metrinen sota-alusten ja vielä suurempien kauppa-alusten vältettävissä olleisiin yhteentörmäyksiin, joissa kuoli yhteensä 17 Yhdysvaltain laivaston merisotilasta.

Tutkielman kannalta raportin tekee mielenkiintoiseksi yhteentörmäyksissä syntyneet vauriot alusten runkoon. USS Fitzgeraldin oikeaan kylkeen vesirajan alapuolelle syntyi n. 4×5 -metrinen reikä [3, s. 9], ja USS John S. McCainin vasempaan kylkeen vesirajaan syntyi läpimitaltaan n. 8,5-metrinen pyöreä reikä [3, s. 48]. Molemmat reiät syntyivät törmäyksen aluksen keulabulbista, joka on vedenalainen, pisaranmuotoinen keulan paksunnos veden vastuksen pienentämiseksi. Reikien kokoja voidaan hyvin kuvitella vastaavan kosketusmiinan aiheuttamaa vahinkoa aluksen vedenalaiselle rungolle. Myös syvyytettävän herätemiinan aiheuttama räjähdysvaikutus alukseen on verrattavissa raportissa kuvattuihin, sillä ne aiheuttavat samankaltaisia toimenpiteitä vahingoittuneessa aluksessa.

Törmäysten seurauksena alusten vedenalaiset osat, joihin törmäys oli kohdistunut, rupesivat välittömästi täyttymään vedellä. USS Fitzgeraldin merisotilaat kertoivat majoitustilojensa, jotka olivat juuri törmäyskohdan kohdalla, täyttyneen vedestä 30 – 60 sekunnissa. [3, s. 14]. Kaikki seitsemän kuollutta merisotilasta löytyivät myöhemmin samasta majoitustilasta [3, s. 20]. Myös USS John S. McCainin törmäyksessä majoitustiloista pelastautuneet kertoivat, että vesi nousi sekunneissa rinnan korkeudelle ja osasto täyttyi alle minuutissa. Myös tässä tapauksessa kaikki 10 kuollutta merisotilasta löytyivät myöhemmin samasta majoitustilasta. [3, s. 52]

Alukset pysyivät pinnalla sota-aluksille tyypillisen tiheän osastoinnin ansiosta. Osastoinnin tarkoituksena on rajoittaa vahinkoja, kuten tulipaloja tai vuototilanteita. Alukset kärsivät rungon osien täytyttyä vedellä pysyvistä kallistumisista, joka vaikeutti alusten ohjailua. Alukset kokivat osittaisia sähkönmenetyksiä ja joutuivat keskittämään miehistöressurssinsa suojapalvelut toimii vahinkojen rajoittamiseksi ja korjaamiseksi. [3] Alusten taistelukykyyn voidaan väittää olleen vähintäänkin alentunut.

3. ITÄMEREN SUKELLUSVENEET

Itämeri on matala ja suppea merialue, jonka Tanskan salmet erottavat Pohjanmerestä. Itämeren maantieteelle ovat tyypillisiä liikennettä ohjaavat kapeikkoalueet, joiden sulkemisella voidaan rajoittaa vastustajan toimintaa tai häiritä kauppameriliikennettä. Kapeikkoalueita ovat mm. Tanskan salmet, Märketin kapeikko Ahvenanmaan ja Ruotsin välissä, Porkkalan–Naissaaren-kapeikko ja Merenkurkku. Itämeri jakaantuu eri merialueisiin, joista tutkielmassa keskitytään lähinnä Suomenlahteen. Suomenlahti on sukellusveneille otollisempaa toiminta-aluetta kuin muut Suomen merialueet. Otollisen alueesta tekevät sen syvyysolosuhteet sekä Suomen suurimpien satamien sijainti Suomenlahden rannalla. [13, s. 48]

Suomenlahdelle tyypillisiä piirteitä ovat matalat vedensyvyyydet, merialueen kapeus, saaristoinen pohjoisrannikko sekä vähäsaarinen ja avoin etelärannikko. Suomenlahden syvyys vaihtelee yleensä 20 - 50 metrin välillä. Suomenlahden suulta Hangon tasalta työntyy yhtenäinen yli 50 metrin syvyinen alue Suursaaren itäpuolelle aina Lavansaaren tasalle asti. Suomen sisäisille aluevesille keskisyvänteeltä johtaa sukellusveneiden toiminnan mahdollistavia, meriväylien suuntaisia syviä uria erityisesti Porvoon, Helsingin, Porkkalan ja Hangon alueilla. [13, s. 48] Alueisiin palataan tarkemmin Taulukko 4:. Rannikon suuntaisten urien puuttumisesta johtuen siirtyminen itä-länsi-suunnassa ei ole mahdollista sukellusveneille.

Sukellusveneille Itämeri on yleisesti valtameriympäristöstä poikkeava toimintaympäristö. Itämeren lyhyet siirtymisetäisyydet mahdollistavat pitkät toiminta-ajat operaatioalueella myös ilman ydinkäyttöisiä sukellusveneitä. Sukellusveneet pystyvät sukeltamaan pohjaan lähes kaikkialla Itämeren alueella ja suojautumaan siten etsijöiltään paremmin kuin valtamerillä. Itämeren pohjoisen sijainnin takia vuodenaikojen vaihtelu aiheuttaa voimakkaita muutoksia veden lämpötilaan ja sen jakautumaan. Meriveden syvyyslämpötilajakautuma suosii sukellusveneiden toimintaa ja vaikeuttaa vedenalaista valvontaa erityisesti kesällä, jolloin meriveden lämpötilaerot ovat suuria. Itämeren syvyysuhteet luovat myös hyvät edellytykset sukellusveneiden käytölle miinoitustehtävissä. Alue soveltuu siis hyvin nimenomaisesti Itämeren olosuhteisiin suunnitelluille sukellusveneille. Lopputuloksena on pienempiä, diesel-sähköisiä sukellusveneitä, joiden ei tarvitse pystyä sukeltamaan niin syvälle kuin avomerikäyttöön suunniteltujen sukellusveneiden.

Ennen Itämeren alueen sukellusveneiden tarkempaa tarkastelua on kuitenkin hyvä ymmärtää muutamia, kaikkia sukellusveneitä koskevia yleispiirteitä.

Tehtävät

Sukellusveneitä käytetään pintalaivaston toiminnan tukemiseen, tiedusteluun ja erikoisjoukkojen tukemiseen. Sukellusveneiden tehtävät ovat valvonta ja tiedustelu, pinta-alustorjunta torpedohyökkäyksin, miinoittaminen, sukellusveneentorjunta sekä erikoisjoukkojen kuljetus. Valvontatehtävissä sukellusvenettä voidaan käyttää meritilannekuvan muodostamiseen sekä ilma- ja pintayksiköiden maaliosoitukseen, kun taas tiedustelutehtävissä sukellusvene voi passiivisin sensorein seurata esimerkiksi pinta-alusten ryhmitysten muutoksia aluksen nimen tarkkuudella ja pinta-alusten toiminta-alueita tai viestiliikennettä. Pinta-alustorjunnassa sukellusvene voi käyttää joko torpedohyökkäyksiä tai merimiinoittamista. Torpedohyökkäys voidaan suorittaa pelkkien passiivisten sonarien antaman maalitiedon perusteella, ja merimiinoitus joko torpedoputkista laukaistavilla tai ulkopuolisissa telineistä laskettavilla miinoilla. Sukellusvene voi lisäksi kuljettaa noin ryhmän verran erikoisjoukkoja. [37, s. 17–19]

Rakenne

Sukellusveneiden rakenteen suunnitteluun vaikuttaa useita erityisiä haasteita verrattuna tavanomaisempaan laivanrakennukseen. Sukellusvenettä tulee kyetä ohjaamaan veden alla mutta myös veden pinnalla. Sukellusveneet ovat sukelluksissa epävakaita, sillä sukeltaminen syvemmälle aiheuttaa runkoon suuremman hydrostaattisen paineen ja siten sen kasaan painumista, ja samalla sukellusveneeseen nostevoima pienenee. Sukellusveneeseen koneiston on myös kyettävä toimimaan pitkiä aikoja ilman ulkoilmaa. [42, s. 409; 32, s. 668]

Sukellusveneiden suunnittelu onkin tasapainottelua suorituskyvyn ja koon välillä. Kokoon vaikuttaa ennen kaikkea sukellusveneeseen runko. Sukellusveneeseen rungon tulisi olla mahdollisimman pieni, jotta sukellusvene olisi ketterä liikkeissään ja samalla mahdollisimman pieni maali. Tavallisesti sukellusveneessä on kaksi runkoa, joista ulompi on muotorunko ja sisempi painerunko. Muotorungon tehtävä on olla hydrodynaaminen, suojata mastoja ja periskooppeja, vaimentaa ja suunnata aktiivisten sonarien kaiut pois päin tulosuunnastaan (häivetekniikka) sekä vaimentaa sukellusveneeseen koneistojen ja laitteistojen ulkopuolelle aiheuttamaa koneistomelua. Painerungon ja muotorungon välissä ovat painolasti- ja trimmitankit, joilla ohjataan sukellusveneeseen sukeltamista, pintaan nousua sekä asentoa sukelluksissa. Kaikki elintärkeät toiminnot ja laitteet on sijoitettu painerungon sisään. [37, s. 19–20]

Kaikumittaimet

Tilannekuvansa luomiseen sukellusvene käyttää kaikumittain- eli sonar-järjestelmiään. Sonar-järjestelmien tarkoitus on havaita, tunnistaa ja luokitella vedenalaisia maaleja. Maalien tyyppi voi vaihdella yksittäisestä sukeltajasta tai torpedosta isoon sukellusveneeseen. [30], s. 1] Pääsääntöisesti sukellusvene käyttää passiivisia aistimiaan pitääkseen oman toimintansa salassa [37, s. 20].

Kaikumittaimet ovat sukellusveneeseen silmät veden alla, joten niitä on moneen eri tarkoitukseen. Sukellusveneeseen omien herätteiden aiheuttamien häiriöiden minimoimiseksi sonarit on yleensä eristetty rungosta. Toinen vaihtoehto on pitää sonaria kokonaan aluksen ulkopuolella, kuten TAS-järjestelmän tapauksessa. TAS-järjestelmä on käytännössä hinattava hydrofonikaapeli, jonka tarkoitus on mahdollistaa ennen kaikkea sukellusveneeseen havainnointi sen perän suuntaan. Perän suunta on sukellusveneeseen haavoittuvin suunta, sillä mikään runkoon kiinteästi asennettu sonar ei kuule sukellusveneeseen omien potkuriäänien läpi.

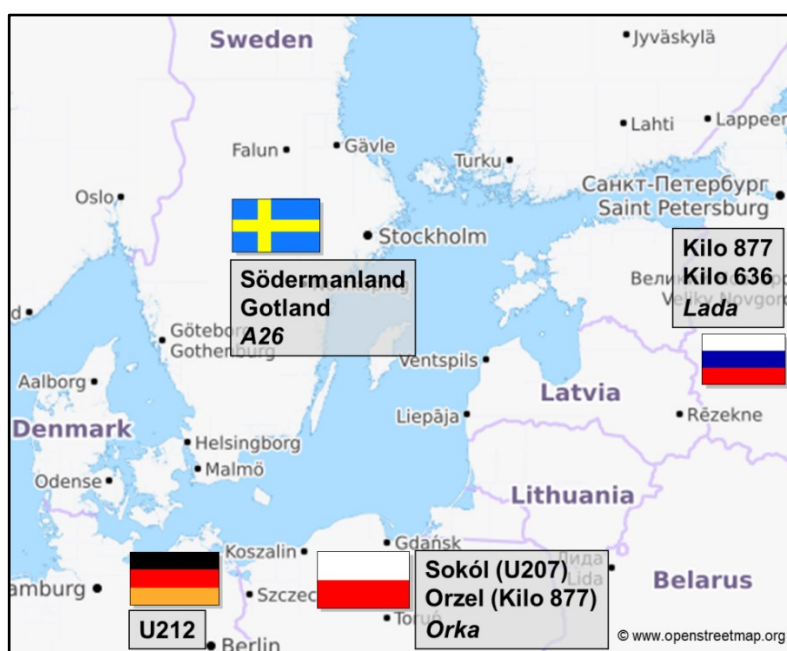
Sonar-järjestelmien havaintoetäisyydet riippuvat voimakkaasti meriympäristön eri ominaisuuksista. Merkittävimmät akustisten järjestelmien havaintoetäisyyksiin vaikuttavat tekijät ovat meriveden lämpötilan kerrostuneisuus sekä meren suolapitoisuus. Mitä suolaisempi merivesi ja mitä suurempi taajuus, sitä suurempi on meriveden kemiallinen absorptio, joka pienentää sonarin havaintoetäisyyksiä. [30, s. 2] Tutkielman kannalta olennaisimman eli miinanväistösonarin toimintaan tekijät eivät kuitenkaan vaikuta, sillä sen toiminta ei ole yhtä havaintoetäisyydestä riippuvaa kuin sukellusveneeseen muiden sonarien.

Miinanväistösonarin (Mine & Obstacle Avoidance Sonar, MOAS) tarkoitus on nimensä mukaisesti havainnoida aluksen keulan edessä olevia kiinteitä esteitä. Sonar on suunniteltu erityisesti ankkuroitujen miinojen havaitsemiseen. Sonarista voidaan valita sen lähettämän ääni-impulssin taajuuteen ja lähtökulmaan, jolloin sitä on mahdollista käyttää myös matalissa vesissä liikuttaessa pohjan tuntumassa. Samalla sen lähettämä teho voidaan suunnata tarkasti ja siten pitää pienenä ja vaikeasti havaittavana. [21] Koska sonarin havaintoetäisyyden kantama ei ole määräävä tekijä, voidaan miinanväistösonareissa käyttää erottelukyvyltään senttimetriluokan aallonpituuksia. [30, s. 4] Kuvaavaa miinanväistösonareiden ominaisuuksille on NATO:n lempinimi venäläiselle Kilo-luokan MG-519 -miinanväistösonarille: Mouse Roar.

Sonaria voidaan käyttää myös merenpohjan 3D-kartoitukseen. Toimintaideana on tällöin verrata vanhempaa tietoa merenpohjasta vanhempaan tietoon, jolloin niiden väliset eroavaisuudet huomataan helposti. Merenpohjaan lasketut herätemiinat erottuvat vanhasta tiedosta, jolloin ne voidaan havaita entistä paremmin. Samalla saadaan myös tieto aluksen sijainnista merenpohjan suhteen. Miinanväistösonaria käytetään lisäksi sukellusveneeseen pintaan noustessa varmistamaan, ettei pinnalla ole aluksia tai muita esteitä, ja nousu on siten turvallista. [21]

Tutkielman tarkoituksena ei ole kohdistaa sukellusveneentorjuntaa mitään tiettyä valtiota vastaan, vaan analysoida syvyytettävän herätemiinan käyttömahdollisuuksia yleisesti sukellusveneitä vastaan. Tarkoitusta palvelee parhaiten niin sanottu sukellusveneeseen geneerinen malli, joka on tarkoituksenmukaisinta muodostaa yhdistelemällä Itämerellä käytössä olevien rannikkosukellusveneiden ominaisuuksia siten, että lopputuloksena on hypoteettinen sukellusveneeseen malli. Tätä mallia käytetään myöhemmin matemaattisessa mallinnuksessa sekä simuloinnissa.

Itämeren rantavaltiosta sukellusveneitä on Puolalla, Ruotsilla, Saksalla ja Venäjällä. Vanhimmat sukellusveneistä on rakennettu 1960-luvulla ja uusimmat 2000-luvulla. Kuvassa 3 on esitetty eri sukellusveneluokat, jotka Itämeren alueella ovat käytössä tai *tulossa käyttöön*. Tutkimustyön kannalta kauaskantoisinta on tarkastella uusimpia sukellusveneitä, jotka todennäköisesti ovat operatiivisessa käytössä pisimpään ja vastaavat parhaiten tulevaisuudessa käyttöön tulevia sukellusveneluokkia. Uusin ja modernein Itämeren sukellusveneistä on saksalainen sukellusvene Tyyppi 212A, jonka ominaisuuksiin ja järjestelmiin perehdytään muita sukellusveneluokkia tarkemmin.



Kuva 3: Itämeren sukellusvenevaltiot ja -luokat

3.1. Saksan merivoimat

Saksan merivoimien vahvuuteen kuuluu yhteensä kuusi monitoimisukellusvenettä (*SSK, Sub Surface Killer*), jotka kaikki kuuluvat 1. Laivueeseen. Sukellusveneiden kotitukikohta sijaitsee Eckernfördessä Pohjois-Saksassa, Itämeren rannikolla. Tyypin 212A sukellusveneistä ensimmäinen, U-31, vastaanotettiin 19. lokakuuta 2005, ja vuoden 2007 toukokuuhun mennessä Saksan merivoimilla oli käytössään yhteensä neljä alusta. Vuotta aiemmin syyskuussa 2016 Saksa oli tilannut kaksi uutta, hieman modifioitua Tyypin 212A sukellusvenettä. Viimeisin tämän hetkisistä 212A-tyypin sukellusveneistä, U-36, on luovutettu merivoimille 10. lokakuuta 2016. [43]

Tyypin 212A sukellusveneeseen on suunnitellut nykyään saksalaiseen ThyssenKrupp Marine Systems -konserniin kuuluva insinööritoimisto IKL. Alukset ovat kaksirunkoisia sukellusveneitä, ja ne perustuvat 1960-luvulla valmistettuun tyypin 209 sukellusveneeseen. Tyypin 212 ensimmäisen vaatimusmäärittelyn laati 1990-luvulla Saksan merivoimat, joka halusi Itämeren olosuhteisiin sopivan sekä diesel-sähköllä että ilmasta riippumattomalla koneistolla (*AIP, Air Independent Propulsion*) varustetun sukellusveneeseen. Tilauslupa neljälle ensimmäiselle sukellusveneelle saatiin jo heinäkuussa 1994, mutta rakentaminen alkoi vasta neljä vuotta myöhemmin. Syynä viivästymiseen oli hankkeeseen mukaan tullut Italian merivoimat, joka halusi syvempiin ja lämpimämpiin Välimeren olosuhteisiin soveltuvan aluksen. Molempien tarpeiden yhdistämisestä syntyi uusi vaatimusmäärittely sekä tyyppitunnus 212A. Olosuhdevaatimusten erilaisuuden lopputuloksena syntyi ensimmäinen operatiiviseen käyttöön hyväksytty AIP-kykyinen sukellusvene, joka pystyy toimimaan sukelluksissa sekä syvällä avomerellä että jopa vain 17 metriä syvissä rannikkovesissä. [43; 35, s. 188]

Aluksen suunnittelussa on kiinnitetty erityistä huomiota energiatalouteen ja hiljaisuuteen. Sukellusveneeseen pääkone on Motoren und Turbinen Unionin (MTU) valmistama 16V 396 -dieselmoottori, joka tuottaa yhteensä 2150 kW tehon. Apuvoimalaitteena toimiva AIP-koneisto saa tehonsa yhdeksästä Siemensin kehittämästä polymeerielektrolyyttisestä membraanipolttokennosta, joista jokainen tuottaa 30 – 50 kW tehon. Molempien tehtävänä on tuottaa sähkötehoa Siemensin valmistamalle FR6439-tahtimoottorille, joka tuottaa aluksen propulsiovoiman pyörittämällä potkuria. Teho riittää hitaaseen ajoon (< 5 sol) ja sukelluksissa pysymiseen jopa 21 vuorokauden ajaksi. Polttokennojen polttoaineenaan käyttämä vety on varastoitu aluksen sisemmän painerungon ulkopuolella sijaitseviin säiliöihin, jotka voidaan tarpeen vaatiessa pakolaukaista irti rungosta. [35, s. 188–189]

Sukellusveneille tyypillisesti suunnittelussa on myös panostettu erityisesti herätteiden minimoimiseen. Magneettisen herätteen pienentämiseksi sukellusveneeseen painerunko on tehty antimagneettisesta teräksestä, ja kaikki rungon sisällä olevat metalliosat ovat myös antimagneettisia. Akustisen herätteen minimoimiseksi aluksen koneet ja apulaitteet on sijoitettu muovisille asennusalustoille irti rungosta. Sukellusveneeseen seitsemänlapainen potkuri on suunniteltu erityisesti hiljaista kulkua varten, joka akustisen herätteen lisäksi minimoi aluksesta synnyttämää paineherätettä. [35, s. 188–189]

Tyypin 212A sukellusveneitä on tilattu useissa eri erissä, mistä johtuen ne ovat myös aluksina hieman erilaisia keskenään. Ensimmäisen valmistuserän neljässä sukellusveneessä on saksalaisen Atlas Elektronikin integroitu DBQS-40-kaikumittainjärjestelmä. DBQS on nimensä mukaisesti järjestelmä, sillä se koostuu useasta eri kaikumittaimesta eli sonarista. Kaikumittainjärjestelmän osajärjestelmiä ovat DSQS-21DG -keulasonar, AN5039A1-sieppaussonar, FAS-3-etsintäsonar, MOA 3070 -miinanväistösonar, hinattava TAS 83 -matalataajuussonar ja passiivinen PRS 3-15 -etäisyydenmittaussonar. [2]

Teknisen kehityksen, tehtävien monipuolistumisen sekä operatiivisten vaatimusten muutoksien vuoksi 212A-tyypin toiseen valmistuserään tehtiin useita parannuksia. Ulospäin näkyvin muutos oli uudempien sukellusveneiden pidentyminen 1,2 metrillä uusien järjestelmien vaatiman tilan vuoksi. Aluksien kaikumittainjärjestelmä korvattiin Atlas Elektronikin täysin digitaalisella CSU-90-138-järjestelmällä, ja samalla osa kaikumittaimista päivitettiin. Alusten taistelunjohtojärjestelmä uusittiin, mutta julkiset lähteet kertovat ristiriitaista tietoa uudesta järjestelmästä [vrt.43; 35, s. 191] Aluksen molemmat periskoopit vaihdettiin: toinen korvattiin Carl Zeiss SERO 400 -periskoopilla ja toinen optisella OMS 100 -kameramastolla.

Toisen valmistuserän sukellusveneitä valmistettaessa erityisesti alusten viestiyhteyksiä parannettiin ja monipuolistettiin. Aluksiin lisättiin SHF-taajuuden (*Super High Frequency*, 3–30 GHz) satelliittiyhteydet mahdollistava uusi masto ja Link 16 -tietovuojärjestelmän toiminnallisuudet.

Tyypillä 212A on ollut omat vaikeutensa. Loppuvuodesta 2017 yksikään sukellusveneistä ei ollut käytettävissä huoltojen viivästymisistä, koeajoista sekä yhdelle alukselle sattuneesta onnettomuudesta johtuen [5]. Sukellusvenetyypin voidaan kuitenkin todeta olleen menestyksekkäs, sillä helmikuussa 2017 Saksa ilmoitti sopineensa yhdessä Norjan kanssa kuuden uuden Tyypin 212A sukellusveneen hankinnasta [43]. Lisäksi tyypin 212A vientimuunnos, joka on hieman kookkaampi ja rakennettu tavallisesta teräksestä, on käytössä Etelä-Korealla, Kreikalla ja Portugalilla. Saksan ja Norjan yhteystilauksesta menee neljä sukellusvenettä Norjalle ja Saksalle kaksi, jolloin Saksan merivoimien sukellusvenelaivue olisi alun perin suunnitellussa koossaan. Sopimuksen allekirjoituksen odotetaan tapahtuvan vuoden 2019 aikana, ja palveluskäyttöön sukellusveneet tulisivat 2020-luvun loppupuolella. [5; 8, s. 293] Myös kolmanteen valmistuserään on perusteltua odottaa uudenlaisia teknisiä toteutuksia sekä parannuksia vanhoihin järjestelmiin.

3.2. Ruotsin merivoimat

Ruotsin merivoimien vahvuuteen kuuluu yhteensä neljä hyökkäyssukellusvenettä, joista yksi on Södermanland-luokan ja kolme Gotland-luokan sukellusveneitä. Sukellusveneet kuuluvat Ensimmäiseen sukellusvenelaivueeseen (Första ubåtsflottiljen), jonka tukikohta sijaitsee Ölandin saaren eteläkärjen tasalla Ruotsin itärannikolla. Laivueeseen kuuluvat myös sukellusveneen pelastusalukset sekä signaalitiedustelualukset. [39]

Södermanland-luokan veneet on osin rakennettu ja koottu Kockumsin telakalla Malmössä 1980-luvun lopulla. Alun perin alusluokan nimeksi tuli Västergötland-luokka. Aluksia rakennettiin yhteensä neljä, joista ensimmäisenä operatiiviseen käyttöön saatiin Västergötland (1987) ja seuraavina Hälsingland (1988), Södermanland (1989) ja Östergötland (1990). Alukset suunniteltiin sukellusveneille monenlaisiin tehtäviin, kuten pintamaalien ja sukellusveneiden torjuntaan, miinalaskuun, valvontaan ja erikoisjoukkojen kuljettamiseen. [35, s. 160]

Ruotsi poisti kaksi vanhinta alusta palveluskäytöstä ennenaikaisesti puolustusmäärärahojen leikkausten vuoksi. Alukset myytiin Singaporeen vuonna 2005. Luovutusta edeltävässä peruskorjauksessa aluksiin vaihdettiin AIP-koneisto, ja alukset sopeutettiin toimimaan suolapitoisemmissa vesissä. Samaan aikaan jäljelle jääneille Södermandlandille ja Östergötlandille tehtiin elinkaaripäivitys, jossa aluksiin asennettiin myös ilmasta riippumaton Stirling Mk 3 -koneisto. Koneiston asentamisen takia aluksen runkoa piti jatkaa yhteensä 12 metrillä. Palveluskäyttöön kaksi uudelleen Södermanland-luokaksi nimettyä sukellusvenettä palasivat 2004 ja 2005. [35, s. 162]

Tutkielman kannalta olennaisempia tarkasteltavia ovat kolme Gotland-luokan sukellusvenettä Gotland, Uppland ja Halland. Sukellusveneet on rakennettu myös Kockumsin telakalla Malmössä. Alukset on luovutettu merivoimille vuosina 1996–1997. Alukset ovat 60,4 metriä pitkiä ja 6,2 metriä leveitä. Aluksen ilmoitettu syväys on 5,6 metriä ja uppouma 1625 tonnia sukelluksissa. [8, s. 796]

Alukset ovat diesel-stirling-sähköisiä sukellusveneitä. Aluksissa on kaksi Kockumsin valmistamaa Stirling AIP -moottoria. Stirling-moottorin etuja ovat sen hiljaisuus sekä ilmasta riippumattomuus, sillä energiantuotto ei perustu palamisprosessiin. Alukset on lisäksi varustettu kahdella MTU 1V 396 -dieselmoottorilla, jotka tuottavat yhteensä 2,7 MW:n tehon. Aluksissa on neljä halkaisijaltaan 533 mm:n torpedoputkea ja kaksi 400 mm:n torpedoputkea, joista molemmista voidaan laukaista pinta-aluksia tai sukellusveneitä vastaan suunnattuja torpedoja.. [8, s. 796]

Aluksen sonar-järjestelmä on Atlas Elektronikin valmistama CSU 90-2, johon kuuluvat runkoasenteiset keula-, sivu- ja sieppaussonarit, passiivinen etsintä- ja hyökkäyssonar sekä Kongsbergin valmistama SA9510S-miinanväistösonar. Aluksissa on lisäksi ruotsalaisvalmisteinen Saabin SESUB 960B -taistelunjohtojärjestelmä, joten alusluokan kotimaisuusaste on kiitettävällä tasolla. [8, s. 796]

Aluksista kaksi ensimmäistä on parhaillaan elinkaaripäivityksessä, jonka arvioidaan päättyvän Gotlandin osalta 2019 ja Upplandin osalta 2020. Hallandia ei ole vielä päivitetty, vaan se on pidetty operatiivisessa käytössä kahden muun ollessa telakalla. [8, s. 796]

Ruotsin merivoimien seuraavana sukellusveneluokkana on A26-luokan työnimellä kulkeva sukellusvene, joka on Gotland-luokasta paranneltu versio. Aluksien tilaus varmistui ja rakentaminen alkoi vuonna 2015, ja merivoimien odotetaan ottavan ne vastaan vuosina 2022 - 2024. [8, s. 797]

3.3. Puolan merivoimat

Puolan laivaston vahvuuteen kuuluu yhteensä neljä sukellusvenettä, joista kolme on Sokól-luokan sukellusveneitä ja yksi Kilo-luokan (Projekti 887E) sukellusvene. Kaikki sukellusveneet kuuluvat kolmanteen lippueamiraali Boleslaw Romanowskin laivueeseen (3rd Commodore Boleslaw Romanowski Flotilla), ja sukellusveneiden tukikohta sijaitsee Gdyniassa. Sukellusveneet ovat Itämeren sukellusveneistä vanhimpia: Sokól-luokan veneet on rakennettu Saksassa vuosina 1964 – 1967 alun perin Norjan laivastolle. Kilo-luokan alus ORP Orzel puolestaan on valmistunut 1985 Nižni Novgorodin telakalla, linnuntietä 900 kilometrin päässä Pietarista ja Itämerestä. [8, s. 646]

Puolassa Sokól-luokan nimen saaneilla sukellusveneillä on takanaan pitkä palvelushistoria. Tyyppi 207 -nimellä Saksassa rakennetut alukset palvelivat Norjan laivastosta vuoteen 2001 saakka Kobben-luokan nimellä. Alukset on modernisoitu vuosina 1989 – 1992 Bergenissä, Norjassa. Alukset siirtyivät Puolalle 2002 – 2004. Siirtoon kuului myös miehistön koulutusta Norjassa sekä viides alus, jota hyödynnettiin varaosina sekä koulutuslavettina. [8]

Sokól-luokan sukellusvene on diesel-sähköinen hyökkäyssukellusvene. Se on varustettu kahdeksalla 533-millisellä torpedoputkella, jotka sijaitsevat aluksen keulassa. Aluksen taistelunjohtojärjestelmä on norjalaisen Kongsbergin valmistama MSI-T0U TCFS, Alusluokan veneet ovat ulkomitoiltaan pienimpiä Itämeren sukellusveneistä. Ne ovat 47,4 metriä pitkiä, leveydeltään 4,6 metriä ja syväykseltään 4,3 metriä. Aluksen maksiminopeudet ovat sukelluksissa 18 ja pintakulussa 12 solmua, toimintamatka on 5000 merimailia (9260 km) [8, s. 646]

Puolan merivoimien sukellusveneiden operatiivinen käytettävyys ei ole parhaalla mahdollisella tasolla. Puolan merivoimat on jo poistanut operatiivisesta käytöstä yhden Sokól-luokan sukellusvene, ja loputkin tullaan poistamaan operatiivisesta käytöstä lähivuosina [25]. Kilo-luokan sukellusvene on ollut telakoituna helmikuusta 2017 Gdyniassa. Sukellusvene on telakointi on kärsinyt useista eri takaiskuista, sillä se on vahingoittunut merikokeissa sekä mm. syttynyt palamaan syyskuussa 2017. Puolan laivasto ei ole ilmoittanut, aiotaanko 32-vuotiasta, Puolan laivaston uusinta sukellusvenettä enää korjata. [26]

Puola on 2014 alkuvuodesta aloittanut uuden Orka-nimisen sukellusvenehankkeen, joka on edennyt tarjouskilpailuvaiheeseen. Sukellusvenehankkeella on tarkoitus korvata kolme vielä operatiivisessa käytössä olevaan Sokól-luokan sukellusvenettä. Tarjouskilpailussa on jäljellä enää kolme eurooppalaista valmistajaa, jotka ovat ranskalainen Naval Group, saksalainen Thyssen Krupp Marine Systems sekä ruotsalainen Saab. Ranskalaisten tarjoama vaihtoehto on Scorpène-luokan hyökkäyssukellusvene, joita on käytössä Chilellä, Malesialla sekä Intialla – lisäksi Brasilia on tilannut sukellusveneitä yhteensä neljä kappaletta. Thyssen Krupp tarjoaa puolalaisille Tyypin 214 -sukellusvenettä, joka on Tyypin 212 vientiin tarkoitettu versio. Saab puolestaan tarjoaa A26-luokan sukellusvenettä, jollaisia myös Ruotsi on tilannut kaksi Södermanland-luokan korvaajaksi. [24; 8, s. 646]

3.4. Venäjän Itämeren laivasto

Venäjän Itämeren laivastoon kuuluu yhteensä kaksi Kilo-luokan sukellusvenettä, nimeltään Vyborg ja Dimitrov. Alukset ovat molemmat rakennettu osana Projekti 877:ää, samoin kuin Puolan laivaston Kilo-luokan sukellusvene. Molempien maiden alukset ovat ulkoisilta mitoiltaan, syväykseltään, nopeudeltaan, koneistoltaan, torpedoputkiltaan, sonar-järjestelmiltään ja jopa asejärjestelmältään sekä ilmatorjuntaohjusmalliltaan identtisiä. Ainoat ilmoitetut erot ovat miehistön määrässä, josta voidaan päätellä venäläisten olevan tehokkaampia sukellusvenesotilaita kuin puolalaisten. [vrt. 8, s. 645 ja 8, s. 688] Laivastoon kuuluu julkisten lähteiden mukaan myös yksi Lada-luokan sukellusvene [4], mutta alusluokka ei vastannut sille asetettuihin vaatimuksiin eikä luokan rakentamista enää jatkettu. Lada-luokka jätetään siten tarkastelun ulkopuolelle.

Kilo-luokan sukellusveneet muodostuvat käytännössä useasta eri alaluokasta. Tärkeimmät alaluokista ovat Projekti 877 -nimellä tunnetut, pääosin 1980-luvulla valmistuneet vanhemmat alukset, sekä Projekti 636 -nimellä tunnetut, pääosin 1990- ja 2010-luvuilla valmistuneet parannellut versiot vanhasta Kilosta. Ulkomittoiltaan myös Kilo 1 ja Kilo 2 -luokkina tunnetut sukellusveneet eivät juurikaan eroa, mutta ymmärrettävästi 30 vuoden tekninen kehitys näkyy erityisesti vanhimpien ja uusimpien Kilojen välillä. [8, s. 688]

Puolan ja Venäjän Kilo-luokan sukellusveneet ovat kaikki vanhempaa saapumiserää, joita rakennettiin Venäjälle yhteensä 18 kappaletta. Alukset ovat ulkomitoiltaan 72,6 metriä pitkiä, 9,9 metriä leveitä ja 6,5 metriä syväykseltään. Alukset ovat kooltaan Itämeren suurimpia rannikkosukellusveneitä. Aluksen koko näkyy sen erityisesti sen aseistuksessa. Sukellusveneissä on yhteensä kuusi halkaisijaltaan 533 mm:n torpedoputkea sekä kahdeksan SA-N-5-ilmatorjuntaohjusta. Aluksiin saadaan mahtumaan myös 24 merimiinaa torpedojen tilalle. Aluksilla on myös ison painerunkonsa ansiosta suuri maksimisukellussyvyys, 240 metriä. [8, s. 688]

Sukellusveneluokan toimintamatka veden alla on yli 400 merimailia eli 740 kilometriä. Sukellusveneellä päästäisiin siis tukikohdastaan Gdyniasta, Itämeren etelärannikolta, aina Helsingin edustalle asti sukelluksissa. Alukset on varustettu kahdella 2DL-42M-dieselmoottorilla, kahdella dieselgeneraattorilla, kahdella apukoneella sekä hiljaiseen ajoon tarkoitettulla sähkömoottorilla. [8, s. 688]

Aluksen sonar-järjestelmä on MGK-400 sisältäen mm. passiivisen ja aktiivisen etsintä- ja hyökkäyssonarin ja jo aiemmin mainitun Mouse Roar -miinanetsintäsonarin. Sonar-järjestelmä on huomattavasti vaatimattomampi kuin 212A-tyypissä tai Gotland-luokassa. Yhteinen asehallintajärjestelmä on venäläisvalmisteinen Murena MVU-110, josta puolalaiset ovat kuitenkin tehneet oman versionsa. [8, s. 645, 688]

Itämeren keskimääräinen sukellusvene

Yhteenvetona Itämeren alueen sukellusveneistä voidaan niiden todeta olevan suunniteltu sukellusveneille tyypillisiin tehtäviin, joissa menestymiseksi salassa pysyminen on ehdoton edellytys. Sukellusveneille tyypillisesti herätteiden minimointiin on pyritty jo suunnittelu- ja rakennusvaiheessa. Alusten sonar-järjestelmät mahdollistavat turvallisen navigoinnin, miinojen väistön sekä vaikuttamisen sukellusveneitä ja pinta-aluksia vastaan alusten asejärjestelmillä. Kilo-luokalla jopa ilma-aluksia vastaan toimiminen on mahdollista. Diesel-sähköisten ja AIP-koneistojen ansiosta sukellusveneiden toiminta-ajat pinnan alla mahdollistavat Itämeren olosuhteissa siirtymisen operaatioalueelle, siellä pysymisen sekä aikanaan poistumisen.

Itämeren alueen sukellusveneiden tärkeimmät vertailtavissa olevat ominaisuudet on koottu taulukkoon 2, jonka tietoja hyödynnetään myöhemmin tutkielman tutkimusosuudessa. Taulukon sukellusveneluokat on valittu maittain operatiivisen käytettävyyden perusteella eli vanhimmat, poistumassa olevat tai jo osittain käytöstä poistuneet sukellusveneluokat eivät ole mukana vertailussa.

Taulukko 2: Itämeren keskimääräisen sukellusveneen ominaisuudet [37; 8]

Veneluokka	Kilo 877(E)	Gotland	U-212	Keskiarvo
Pituus [m]	72,6	60,4	57,1	63,4
Leveys [m]	9,9	6,2	7,0	7,7
Korkeus [m]	16,0	12,0	14,0	14,0
Uppouma [tn]	3231	1625	1859	2238
Nopeus pinnalla [sol]	10	10	12	11
Sukelluksissa [sol]	17	20	20	19
Torpedoputkia [kpl]	6	4+2	6	6
Miehistö	60	32	27	40
Toimintasyvyys [m]	≥ 40	≥ 35	≥ 35	≥ 37
Maksimisyvyys [m]	240	240	700	-
Toiminta-aika [vrk]	11	14	21	-

Taulukossa alusluokat ovat ikäjärjestyksessä vanhimman ollessa vasemmalla. Alusluokkien ulkoisten mittojen suhteen taulukosta ei ole pääteltävissä mitään trendiä, mutta miehistön laskeva määrä sekä kasvava toiminta-aika käyvät taulukosta selvästi ilmi. Miehistö on kallista ylläpitää, mukavuudenhaluista ja häiritsee tehtävän suorittamista. Miehistön määrä ei voi loputtomiin laskea, mutta kehittyneempien järjestelmien ansiosta sitä voidaan supistaa. Toiminta-ajan kasvu puolestaan johtuu teknologisesta kehityksestä, joka mahdollistaa uusien tekniikoiden hyödyntämisen myös sukellusveneissä.

4. MIINAANAJON SIMULOINTI

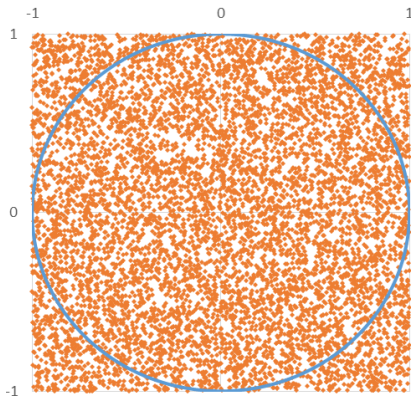
Tutkielman varsinaisen tutkimusosuuden tarkoituksena on aluksi osoittaa, millaisin menetelmin ja minkälaisen päättelyketjun lopputuotoksena varsinaisiin tutkimustuloksiin on päädytty. Simulointiluvun tarkoituksena on myös avata simulointimenetelmää riittävän tarkasti tutkimustulosten toistamiseksi.

4.1. Monte Carlo -menetelmä

Tutkielman simulaatiomenetelmänä käytetään niin sanottua Monte Carlo -menetelmää. Monte Carlo -menetelmällä tarkoitetaan haluttujen arvojen estimointia satunnaisotannan tai simuloinnin keinoin [22, s. 252]. Monte Carlo -menetelmällä tapahtuvan simuloinnin tarkoituksena on saada tietoa simuloidun ilmiön lopputuloksen tilastollisesta jakaumasta. Jokainen yksittäinen simulointikerta tuottaa tuloksen, joka on joko muotoa "onnistui" tai "epäonnistui". Jos tutkimustulokset ovat tilastollisesti luotettavat, antaa simulaattori oikeansuuntaisia tuloksia.

Monte Carlo -menetelmässä jokaisen simulointikerran tulos voidaan taulukkolaskentasimulaatiossa myös toteuttaa yhdellä rivillä, jolloin on yksinkertaisinta muodostaa lopputulokselle omat sarakkeensa. Näihin sarakkeisiin generoidaan 1 sen mukaan, tapahtuuko haluttu lopputulos, tai 0, mikäli näin ei tapahdu. Sarakkeiden summa kertoo suoraan positiivisten lopputulosten määrän ja siten tutkitun todennäköisyyden. [18, s. 10] Tutkielmassa Monte Carlo -menetelmän satunnaisuuden perusidea hyödynnetään sukellusveneiden koordinaattien määrittämisessä sekä alkuperäisen tarkoituksensa mukaisesti simulaatiotulosten tilastollisen jakauman määrittämiseksi.

Monte Carlo -menetelmän toimintaperiaatetta kuvaa hyvin useissa oppikirjoissa [esim. 22, s. 253; 18, s. 11; 16, s. 65] kerrottu esimerkki piin likiarvon simuloimisesta. Esimerkissä, joka on esitetty kuvassa 4, lasketaan piin lukuarvoa. Laskeminen tapahtuu arpomalla 2×2 -kokoisen neliön sisään pisteitä, joille arvotaan x- ja y-koordinaatit satunnaislukugeneraattorin avulla. Neliön sisään on sijoitettu myös ympyrä, jonka yhtälö on $x^2 + y^2 = 1$ eli sen säde on 1.



Kuva 4: Piin lukuarvon laskeminen Monte Carlo -menetelmällä

Puhtaasti geometrisen tarkastelun perusteella todennäköisyydeksi sille, että sattumanvaraisesti valittu piste osuu ympyrän sisään, saadaan:

$$P_y = \frac{A_y}{A_n} = \frac{\pi \times 1^2}{2 \times 2} = \frac{\pi}{4}, \text{ jossa}$$

A_y = ympyrän pinta-ala,

A_n = neliön pinta-ala

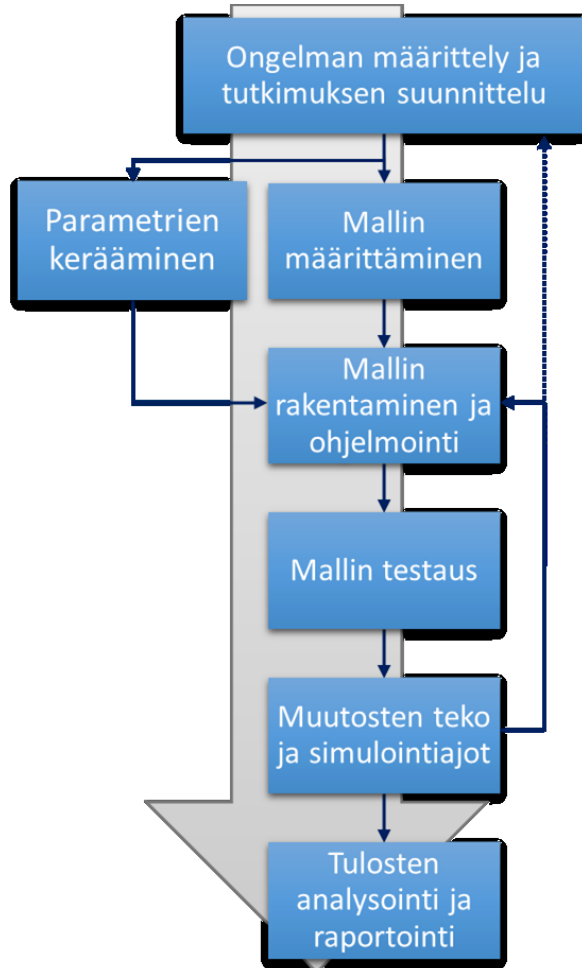
Monte Carlo -menetelmän avulla saatava piin arvo ratkeaa laskemalla, kuinka moni sattumanvaraisesti arvotuista pisteistä täyttää ehdon $x^2 + y^2 < 1$ eli osuu ympyrän sisälle. Laskemalla ehdon täyttävien pisteiden osuus kaikista pisteistä ja kertomalla osuus neljällä saadaan piille simuloitu arvo.

Simulaatiokierroksien tuloksia tarkastellessa voidaan todeta, että tuloksissa on hajontaa. Simuloitu arvo ei vastaa piin tarkkaa arvoa, eikä piin arvoa voidakaan saavuttaa, sillä pii on irrationaalinen numero. On siis tyytyminen approksimaatioon, likiarvoon, jonka tarkkuus riippuu puhtaasti simulaatiokertojen määrästä. Vaikkei tarkkaa arvoa voidakaan saavuttaa, Monte Carlo -menetelmä antaa kuitenkin ekologisesti oikean suuntaisia tuloksia piin likiarvosta. [22, s. 254]

4.2. Simulaation rakentuminen

Tutkielman tutkimusosuudessa hyödynnettävä simulaatio on rakennettu noudattaen Jyri Lempiäisen *Taistelun ja logistiikan simulointi* -teoksessa esitettyjä simulointiprojektin vaiheita. Teos ei ole yleispätevä simulointioppikirja, mutta sotilaallisiin simulointeihin se sopii lähtökohdaksi. Teoksen pääpaino ei ole simulointitekniikkaan syventymisessä vaan taistelun simuloinnissa. Teos käsittelee lisäksi simulointia yleisellä tasolla, simuloinnin termejä ja osa-alueita sekä simulointiprojektin toteuttamista.

Simulointiprojektin vaatii asiantuntemusta mallinnettavasta aiheesta, käytettävästä ohjelmasta, ohjelmointikielestä, tilastomatematiikasta jne. Riippumatta siitä, analysoidaanko logistiikkaa, taisteluja tai eri järjestelmiä, voidaan tutkimuksellinen simulaatioprojekti jakaa seitsemään vaiheeseen [19, s. 23], jotka on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5: Simulointiprojektin vaiheet [19, s. 24 mukaillen]

Ongelman määrittely ja tutkimuksen suunnittelu

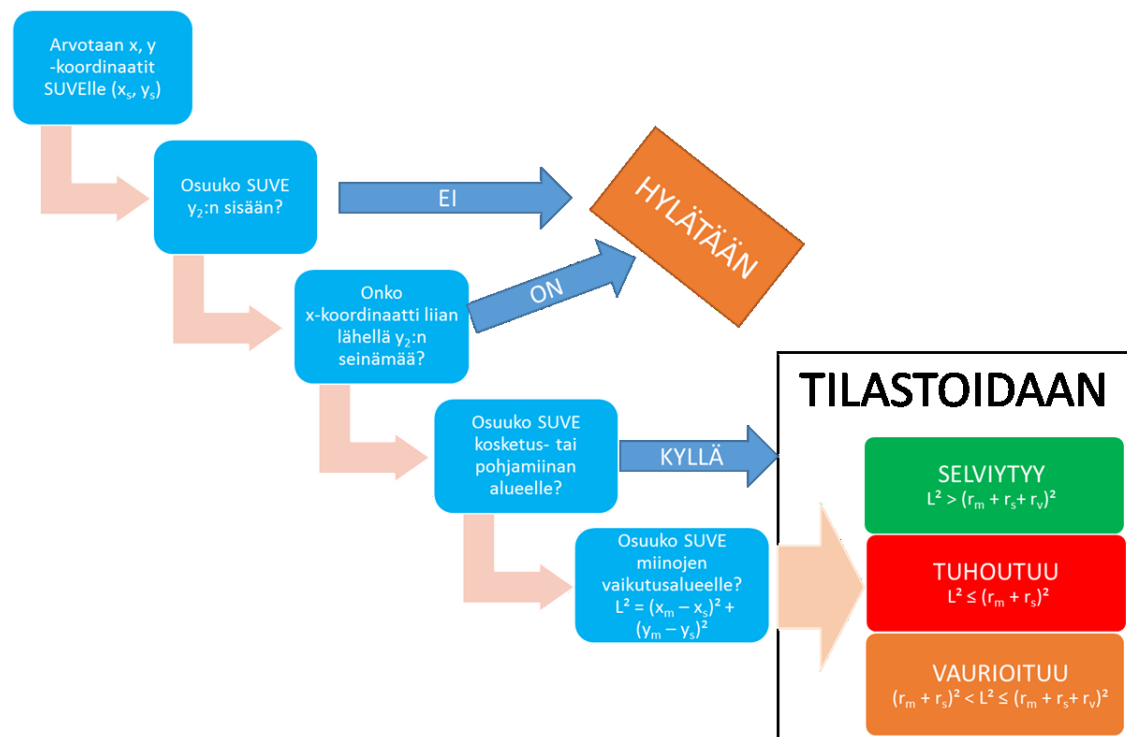
Ennen simulointiprojektin aloittamista tulee tutkittava ongelma määritellä ja rajata, sillä epämääräisesti rajatusta tai määritellystä ongelmasta ei yleensä saada haluttuja tuloksia nopeasti, vaan riskinä on projektin venyminen. Alussa tulee myös päättää, millä menetelmällä ongelmaa lähdetään ratkaisemaan ja mitä mittareita tulosten vertailussa käytetään. Projektin alussa kannattaa määritellä enemmän liikaa mittareita kuin liian vähän, sillä niiden lisääminen projektin kuluessa aiheuttaa viivästyksiä ja kustannuksia. [19, s. 24]

Tutkielmassa tutkimuksen suunnittelu ja ongelman määrittely eivät menneet oppikirjan mukaisesti, sillä alkuperäisessä tutkimussuunnitelmassa syvyytettävän herätemiinan käytettävyyttä oli tarkoitus tutkia merenpohjan laatutietojen geometrisen tarkastelun perusteella. Tarkoituksena ei alun perin ollut simuloida mitään, mutta paikkatietoaineiston turvallisuusluokituksen takia tutkimusnäkökulmasta luovuttiin. Yhteistyössä tutkimuksen ohjaajien kanssa päädyttiin ratkaisuun, jossa syvyytettävän herätemiinan käytettävyyttä lähestyttäisiin tutkimusaiheena simulaation ja matemaattisen tarkastelun avulla.

Simuloinnin valinta tutkimusmenetelmäksi vaati tutkimusongelman määrittelyyn paneutumista. Ongelmasta piti muodostaa sellainen, että siihen voitaisiin simulaation avulla löytää tuloksia ja samalla se vastaisi työn tilaajan tutkimustarpeeseen. Ongelma määritettiin uudeksi tutkimuskysymykseksi: tuoko syvyytettävä herätemiina lisäarvoa sukellusveneentorjuntaan? Myös alatutkimuskysymykset tuli määrittää uutta tutkimuskysymystä tukeviksi ja tutkimusmenetelmälle sopiviksi. Jo alusta oli selvää, että tulosten vertailussa mittareina käytettäisiin matemaattisen mallin geometrian vertailua simulaatiotuloksiin. Monte Carlo -menetelmän mukaisesti tulosten tulisi olla myös tilastollisesti merkitseviä.

Mallin määrittäminen

Simulaatioprojektin seuraavana vaiheena on mallin tarkempi määrittely, joka toteutetaan esimerkiksi vuokaavion avulla. Tarkoituksena on määrittää jokainen mahdollinen tilanne simulaatiossa käsitteellisen mallin avulla ennen varsinaisen simulointimallin rakentamista. [19, s. 24–25] Vuokaavion tarkoituksena on hahmottaa laatijalle, mihin eri tiloihin tutkittava parametri voi päätyä, ja kulkeeko suunniteltu simulaatio oikeaan suuntaan kohti haluttuja lopputuloksia vai tuottaako se irrelevanttia tietoa tutkittavan aiheen sivusta. Tutkijalle vuokaavio toimii siis omien ajatusten testialustana, mutta muille se toimii yhtenä keinona varmistua simulaatiotutkimusten toistettavuudesta [23, s. 6]. Tutkimuksessa käytetyn simulaattorin vuokaavio on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6: Simulaation vuokaavio

Simulaatioissa mallinnettavista prosesseista ei yleensä pyritä tekemään liian identtisiä reaalisen prosessin tai maailman kanssa, sillä ne menettävät silloin suuren osan hyödyistään. Mallin tarkkuuden kasvaessa lisääntyvät tekemiseen kuluva aika ja kustannukset, eivätkä liian tarkasta mallista saavutetut hyödyt kompensoi kulutettuja resursseja. Kaikissa malleissa on myös tiettyä systemaattista epävarmuutta, sillä niiden parametreissa on aina tiettyä epävarmuutta. Parametrien epätarkkuus johtuu olettamuksista ja yksinkertaistuksista, joita reaali maailmaa mallinnettaessa joudutaan tekemään laskentatehon säilyttämiseksi. Mallien epävarmuutta ei siten kannata edes yrittää pienentää alle parametrien epätarkkuuden. [19, s. 25]

Tutkimusmenetelmäksi valikoitunut stokastinen Monte Carlo -simulaatio perustuu sattumanvaraisuuteen, joten mallin määrittämisen tärkeimpiä vaiheita oli määrittellä kriteerit hyväksytyille ja hylätyille satunnaisluvuille. Yksinkertaisen matemaattisen mallin luomiseen oli syynä myös simulaattorien tuottamien tulosten myöhempi verifiointi.

Tutkielman mallissa lähettiin liikkeelle puhtaasti matemaattisesta tarkastelusta, jossa tarkastellaan vedenalaisen syvänteen geometriaa kaksiulotteisesti. Kaksiulotteisuuden valinta perustuu sukellusveneen pieneen pinta-alaan, miinoitteen miinanajon todennäköisyyden laskentaan miinalinja kerrallaan, merimiinoitustaktiikkaan sekä tutkijan rajallisiin ohjelmointikykyihin.

Ensimmäinen perusteista on kaksiulotteisuuden yksinkertaisuus tilanteessa, jossa vedenalaista syvänteessä on syvyytettäviä herätemiinoja. Tällöin sukellusvene aiheuttaa pienimmän mahdollisen pinta-alan sekä herätteen, jos se etenee tason suhteen kohtisuoraan läpi syvänteestä – samoin kuin neula olisi helpoin ja huomaamattomin työntää paperin lävitse terävä pää edellä eikä poikittain. Pienimmän pinta-alan periaate ei myöskään vääristä tutkimustuloksia ylöspäin ja siten anna liian optimistista kuvaa syvyytettävän herätemiinan lisäarvosta.

Toinen peruste on tarkastelujen yhteenlaskettavuus miinoitteen estearvon laskemiseksi. Miinoitteen estearvo voidaan laskea, jos sen eri miinalinjojen miinaanajon todennäköisyydet tunnetaan. Estearvon laskemiseen palataan tarkemmin simulaatiotuloksia analysoitaessa.

Kolmas perusteista on miinoitustoiminnan toimintatapa, jossa miinat usein lasketaan miinalinjoina. Toimintatavan perusteet puolestaan ovat sen toimintavarmuudessa: Laskemalla miinat suoraan linjaan optisten sijoittajien varassa, esimerkiksi kahden optisesti havaittavissa olevan väylälinjan tai muun kiinteän kappaleen välille, voidaan koko miinanlaskun ajan varmistua aluksen sijainnista optisesti. Optinen paikanmäärittäminen ei ole altis tutka- tai GPS-häirinnälle, jotka saattaisivat johtaa miinojen laskemiseen väärään paikkaan.

Neljäs peruste tuskin kaipaa sen enempää selitystä.

Parametrien kerääminen

Samanaikaisesti mallin määrittämisen kanssa tulee kerätä mallin tarvitsemia parametreja. Parametreja voidaan hankkia esimerkiksi testaamalla simuloitavaa laitetta kenttä- tai laboratoriokohteissa, etsimällä parametreja julkisista lähteistä tai kysyä tietoja valmistajilta tai asiantuntijoilta. Yleensä kaikkia parametreja ei voida tarkasti määrittää, vaan simulaatioissa joudutaan turvautumaan valmistajien tietoihin tai asiantuntija-arvioihin. Kuitenkin mallin rakentamisen kannalta on tärkeää saada edes suuntaa antavat parametrit, jotta mallin toimivuutta päästään edes joiltain osin testaamaan. [19, s. 25]

Parametrien kerääminen syvyytettävän herätemiinan osalta alkoi perehtymällä Merisotakoulun tutkimuskeskuksen tekemään koetoimintaan ja epävirallisilla asiantuntijahaastatteluilta miinan toimintaperiaatteiden ymmärtämiseksi. Koko tutkimuksen teoriaosuus hyödytti parametrien määrän hahmottamista ja arvojen arvioimista. Koska tutkielman tarkoituksena ei ollut suunnitella tietynlaisia sukellusvenemiinoitteita erityisesti valittuihin syvänteisiin, päätettiin mahdollisimman moni parametreista pitää arvoltaan käyttäjän muutettavana.

Syvyytettävä herätemiina on suunniteltu ensisijaisesti sukellusveneitä vastaan, joten sukellusveneiden parametrien tutkiminen osoittautui tärkeäksi tutkimuskohteeksi myös uhkan ymmärtämisen kannalta. Sukellusveneiden vaihtelevat ulkomitat voitiin siten ottaa huomioon seuraavassa vaiheessa eli simulaattorin rakentamisessa.

Mallin rakentaminen ja ohjelmointi

Kun malli on määritelty, voi itse simulointimallin rakentaminen alkaa. Mitä tarkemmin ongelma ja simulointimalli on määritelty, sitä nopeampaa ja selkeämpää on simulointimallin rakentaminen. Mallin rakentaminen kannattaa toteuttaa osamalli kerrallaan osamallin oikeanlaisen toiminnan testaamiseksi. Lopullinen simulointimalli koostuu useasta osamallista, joiden kaikkien tulee toimia oikealla tavalla sekä itsenäisesti että yhdessä muiden kanssa lopputuloksen oikeellisuuden varmistamiseksi. [19, s. 25–26]

Simulaatio-ohjelman voi kirjoittaa itse yleiskäyttöisellä ohjelmointikielellä, mutta usein järkevää käyttää jotain valmista työkalua [9, s. 65]. Vaikka käytettäisiinkin valmista simulointiohjelmaa, niin mallin rakentaminen sisältää lähes aina ohjelmointia [19, s. 25]. Toinen mahdollinen vaihtoehto on toteuttaa simulointi taulukkolaskentaohjelmalla ilman erityisiä ohjelmointitaitoja. Taulukkolaskentasimulointi antaa yksinkertaisuudestaan huolimatta tuntumaa simuloitavien ilmiöiden olennaisiin piirteisiin ja on todella läpinäkyvää, koska välitulokset ovat kaikki näkyvissä. [18, s. 5]

Simulaatio-ohjelmia, jotka olisivat soveltuneet tutkimuksen tekoon kovinkaan hyvin, ei löytynyt valmiina. Simulaatiomallin määrittelyn ja parametrien keräämisen yhteydessä kävi kuitenkin selväksi, että tutkimuksen teossa tarvittava simulaattori olisi mahdollista rakentaa itse. Vaihtoehdoksi valikoitui taulukkolaskentaohjelman pohjalle laadittava simulaattori sen toistettavuuden, helpon käytettävyyden sekä yksinkertaisen toteutettavuuden perusteella.

Simulaatioprojektin viitekehyksessä simulaation mallin rakentaminen sujui yrityksen, erehdyksen ja oivaltamisen kautta simulaatioprojektin vaiheita noudattaen. Osamalli kerrallaan simulaattori yhdistyi kokonaisuudeksi, jonka pienienkin osien muuttaminen aiheutti kerrannaisvaikutuksia muissa osamalleissa. Osittain puutteellisen ja epätarkan mallin määrittämisen takia muutettavissa olevien parametrien lisääminen jälkikäteen osoittautui aikaa vieväksi.

Parametrien keräämisen puolestaan todettiin onnistuneen, sillä osamallien toimivuuden arviointi ja testaus eivät olisi onnistunut ilman riittävän tarkkoja parametreja. Matemaattisen mallin rakentamisessa oleellista olivat myös parametreista tehdyt yksinkertaistukset, sillä ”tutkijan olisi kyettävä perustelemaan tekemänsä yksinkertaistukset ja hänen olisi voitava arvioida niiden aiheuttaman virheen suuruusluokkaa ja merkitystä” [17, s. 62]. Ilman tehtyjä yksinkertaistuksia simulaatiomallin rakentaminen olisi ollut huomattavasti haastavampaa.

Mallin testaus

Mallin testaus voi alkaa, kun simulointimalli on saatu valmiiksi ja lopulliset parametrit on syötetty. Testauksen tavoitteena on selvittää, antaako malli luotettavia ja loogisia tuloksia. Yleisin käytetty tapa on pyytää ulkopuolisen asiantuntijan arviota mallin toimivuudesta, mutta tuloksia voidaan myös verrata vastaavien tutkimusten tuloksiin tai kenttä- tai laboratoriokokeista saattuihin tietoihin. Yksi tapa arvioida simulointimallin tuloksia on myös verrata niitä olemassa oleviin tai tuotettuihin matemaattisiin malleihin. Mikäli määrittely on tehty epäselvästi, asiantuntijoiden parametrit tai oletetut laskukaavat ovat epätarkkoja tai alustavat tulokset ovat yksinkertaisesti liian epätarkkoja, voidaan simulointiprojekti pahimmassa tapauksessa joutua keskeyttämään. Simulointimallia saatetaan myös joutua muokkaamaan tai parametreja tarkentamaan. Mikäli malli todetaan toimivaksi ja tulokset luotettavaksi, voidaan projektia jatkaa. [19, s. 25–26]

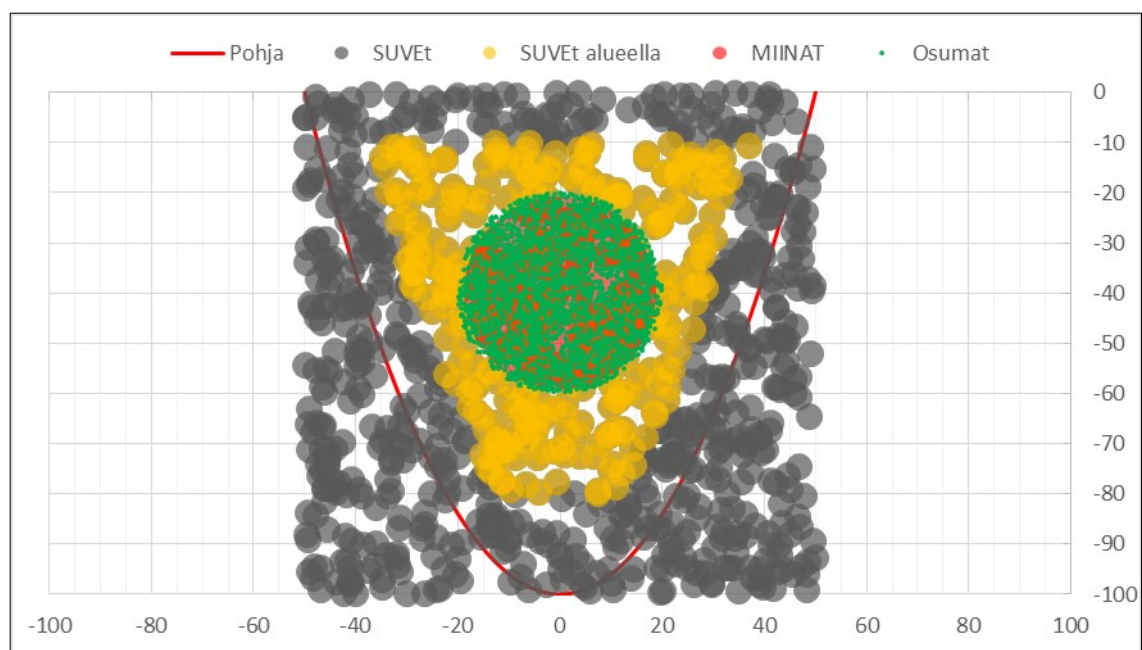
Tutkielman simulointiprojektissa mallin testausta suoritettiin useassa eri vaiheessa ja kaikkien eri osamallin kohdalla. Alustavissa testauksissa simulointimalli todettiin idealtaan ja logiikaltaan toimivaksi ja tutkimustyöhön soveltuvaksi. Osamallien osalta jouduttiin tekemään useita tarkennuksia niiden toimintaan ja ratkaisemaan alustavien tulosten ristiriitaisuuksia. Esimerkiksi pelkkien hyväksyttävän alueen sisälle sijoittuvien sattumanvaraisten pisteiden täytyi täyttää lopulta neljä eri matemaattista ehtoa, sillä ensimmäisissä testauksissa tulokset eivät olleet riittävän tarkat. Testauksen perusteella malli laski alun perin mukaan tarkasteltaviksi liikaa pisteitä, joka vääristi tuloksia.

Simulaatiomallin testaamisen suunnittelu ja toteuttaminen vaati myös muutoksia alkuperäiseen malliin. Malli vaikutti toimivan loogisesti ja oikein, mutta tulosten verifiointi ei voinut perustua pelkkään silmämääräiseen toteamiseen niiden oikeanlaisuudesta. Mallin testauksessa päädyttiinkin lopulta matemaattisen mallin ja simulaattorin tuloksien välillä geometriseen vertailuun. Vertailtavat tulokset olivat testausvaiheessa osittain samat kuin tutkielmassa: miinan tuhoavan alueen pinta-alan suhdetta syvänteen muotoa kuvaavaan yhtälön pinta-alaan verrattiin simulaatiotuloksiin. Useiden korjaus – testaus -iteraatioiden jälkeen testituloksien vertailut lopulta osoittivat, että simuloidusta tilanteesta laaditun matemaattisen mallin tuottamat tulokset vastasivat simulaatio-ohjelman antamia tuloksia riittävällä tarkkuudella. Tutkimustulosten verifiointia käsitellään tarkemmin seuraavassa luvussa.

Muutosten teko malliin ja simulointiajojen teko

Lähes aina simulointiprojektissa joudutaan tekemään muutoksia ensimmäiseen simulaatiomalliin. Pienten vikojen tai toimintavirheiden korjaaminen ei välttämättä vaadi koko testausvaiheen toistamista, mutta mikäli muutokset ovat isoja, on mallin toiminta syytä testata uudelleen. [19, s. 26–27]

Kuten aiemmin todettua, myös tutkimuksen simulointimalliin jouduttiin tekemään useampia muutoksia ja korjauksia testausvaiheen jälkeen. Muutosten teossa hyödynnettiin myös visuaalista esittämistä muutosten havainnollistamiseksi sekä toteamiseksi. Tulosten visuaalinen esitys on esitetty kuvassa 7 yhdellä miinalla ja $\frac{1}{20}$:lla todellisista pisteistä.



Kuva 7: Simulaattorin visuaalinen esitys

Simulointiajoja vaaditaan yleensä vähintään kaksi vertailtavuuden vuoksi. Kahden keskenään erilaisen mallin vertailulla on helpompi huomata poikkeavuudet ja erikoistilanteet, jotka saattavat tuottaa virheellisiä simulointituloksia tietyissä tapauksissa. [19, s. 26–27]

Simulointiajojen vertailtavuus ratkaistiin simulaatiossa taulukkolaskentaohjelma Microsoft Excelin Entä jos? -analyysityökalun avulla. Työkalu käytännössä laskee uudelleen simulaatioajon halutun monta kertaa. Simulaattorin tapauksessa päädyttiin ratkaisuun, jossa yksi simulaatio ajo laskee sattumanvaraiset paikat 20000 sukellusveneelle. Laskenta toistetaan 64 kertaa. Yhteensä simulaatiokierroksella lasketaan siis 1280000 sukellusveneelle simulaation vuokaavion mukaisesti, osuuko sukellusvene ensinnäkin hyväksytylle alueelle ja toisekseen syvyytettävään heräteemiinaan. Jokaisen simulointikierroksen tulokset tilastoidaan, ja tutkimustulokset kerätään 64 simulaatioajon tuloksista.

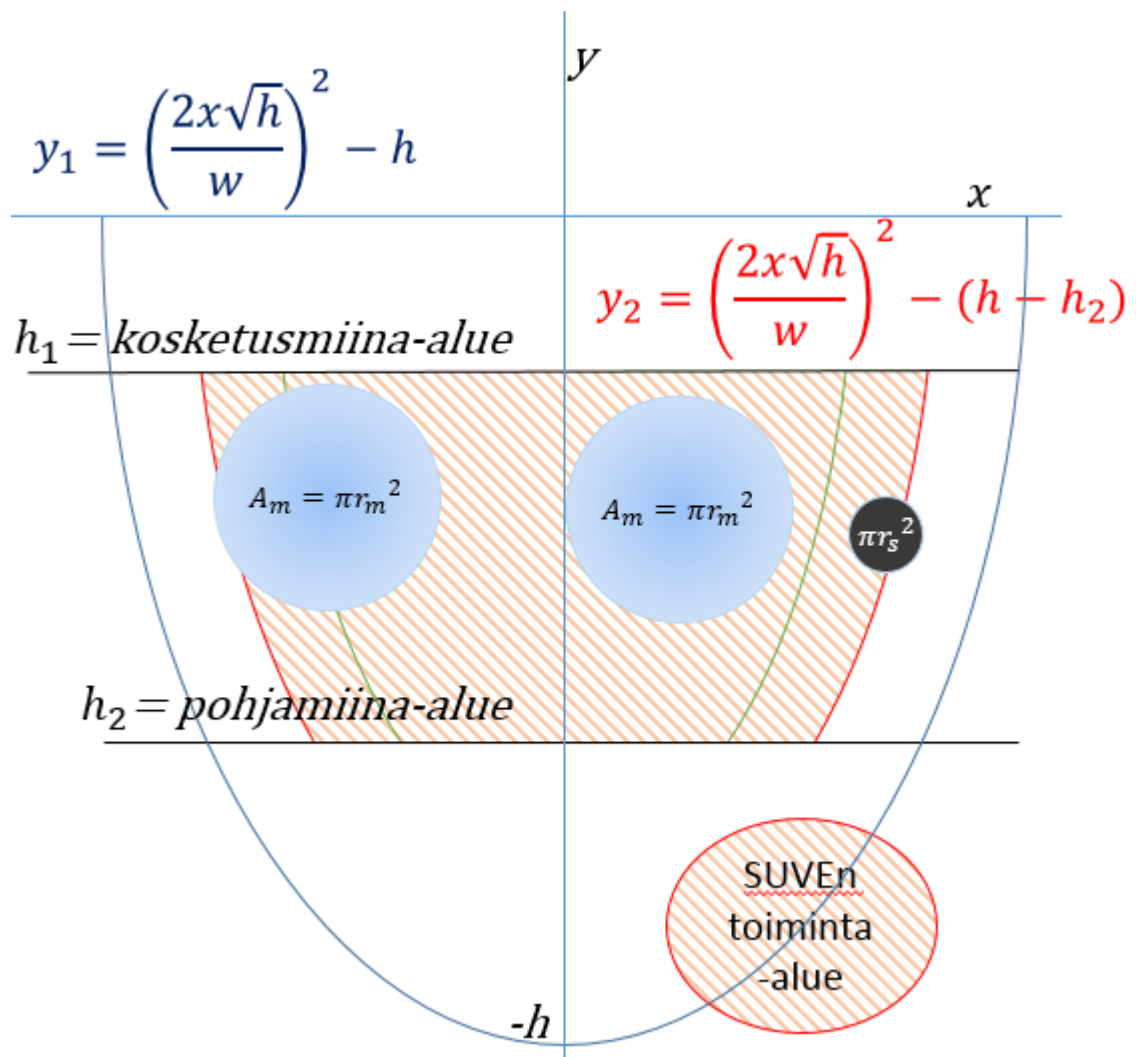
Tulosten analysointi ja raportointi

Simulointiajojen jälkeen on vuorossa tulosten analysointi, raportointi sekä simulointimallin dokumentointi. Tulosten tarkastelussa tulee kiinnittää huomiota paitsi itse arvoihin, myös niiden hajontaan ja luottamusväleihin. Tulosten tulkinta tulisi tehdä yhdessä tilaajan kanssa, sillä tilaaja ymmärtää mallinnettavasta prosessista yleensä simuloijaa enemmän. Tällöin myös tulokset saadaan raportoitua kolmansienkin osapuolten ymmärtämällä tavalla. [19, s. 27]

Simulointitulosten analysointi ja raportointi suoritettiin tutkielman kuudennen luvun muodossa, jossa arvioidaan myös tulosten tilastollisia ominaisuuksia ja luotettavuutta. Simulointimallin dokumentointi huomioitiin jo mallin suunnitteluvaiheessa, ja tutkielman yhtenä kantavana ajatuksena läpi työn on ollut huolehtia simulointimallin toistettavuudesta. Tutkielman luonteen johdosta tuloksien raportoinnissa keskityttiin eri parametrien vaikutuksen arviontiin. Tutkimustulosten tulkinta jää siten tilaajalle, jolla on tarkemmat parametrit ja yksityiskohtaisemmat tiedot mallinnusta varten.

4.3. Matemaattinen malli

Simulointia varten tutkimustyön alkuvaiheessa määriteltiin puhtaasti matemaattinen malli vedenalaisesta syvänteestä. Matemaattisen mallin ideana oli mahdollistaa simulaatiotulosten verifiointi sekä helpottaa ymmärtämään eri parametrien vaikutusta toisiinsa taulukkolaskenta-simuloinnin rakentamisvaiheessa.



Kuva 8: Matemaattisen mallin rakenne

Kuvassa 8 on esitetty matemaattisen mallin rakenne, joka koostuu useasta eri osasta:

- pohjan muodon muodostavasta funktiosta (y_1)
- veden syvyydestä (h)
- syvänteen leveydestä (w)
- läpi kuljettavan alueen pinta-alasta
- syvyytettävän herätemiinan vaikutusalasta (πr_m^2)
- sukellusveneen pinta-alasta (πr_s^2)
- sukellusveneelle mahdollisesta alueesta, jota rajaavat kosketus- ja herätepohjamiinoiden aiheuttamat ylä- ja alarajat (h_1, h_2) sekä pohjan laskennallisesta muodosta (y_1) irrallaan oleva funktio (y_2)

Matemaattiseen mallissa päädyttiin pohjanmuodon funktioon $y_1 = \left(\frac{2x\sqrt{d}}{w}\right)^2 - h$, sillä myös syvänteen leveydestä haluttiin tehdä muutettavissa oleva parametri. Muutos vaati korjauskertoimen $\frac{2\sqrt{d}}{w}$ funktioon, jotta x :n arvoilla $\frac{w}{2}$ saataisiin funktion arvoksi 0 ja siten syvänteen leveydeksi w .

4.4. Muutettavat parametrit

Mikäli mahdollista, tutkittavan ongelman ratkaiseminen puhtaasti matemaattisin menetelmin on tutkimustavoista ekonomisimpia. Jos matemaattisen analyysin pohjana ovat perustellut ja luotettavat faktat, ovat myös tutkimustulokset mahdollisimman luotettavia. Useimmiten menestyksenkäs matemaattinen analysointi onnistuu vain tekemällä yksinkertaistuksia. Tässä tutkielmassa monimutkaisten geometristen muotojen sijasta tarkastellaan niitä mallintavia yksinkertaisempia muotoja, lasketut todennäköisyydet perustuvat tilastojen asemasta simulaation perusteella saatuihin arvioihin ja niitä käsitellään toisistaan riippumattomina, vaikka ne eivät sitä todellisuudessa ole. Myöskään kaikkia lopputulokseen vaikuttavia muuttujia ei oteta huomioon, ja parametrit saadaan perusteltujen yksinkertaistuksien avulla. Tästä johtuen tulosten varmuus pienenee, mutta niiden merkitys ei silti katoa. [17, s. 62]

Tutkielman matemaattinen malli on rakennettu ottamaan huomioon syvyytettävän herätemiinan toiminnan kannalta olennaiset, yksinkertaistetut parametrit, joita voidaan myöhemmin simuloitaessa muuttaa. Toiminnollisuudella pyritään vastaamaan tarkasteltavan pohjan muodon, veden syvyyden, sukellusveneiden koon, syvyytettävän herätemiinojen vaikutussäteiden ja lukumäärän sekä kosketus- tai herätemiinojen parametrien muutostarpeeseen käytettäessä simulaatiota myöhemmin reaali maailman mallinnuksessa. Jokainen muutettava parametri mahdollistaa myös sen vaikutuksen arvioinnin.

Syvänteen leveys

Matemaattisessa mallissa meren pohjan matemaattinen muoto on yksinkertaistettu funktioon $y_1 = \left(\frac{2x\sqrt{h}}{w}\right)^2 - h$. Funktion tarkoituksena on luoda vedenalaisen kanjonin mittasuhteista matemaattisesti määritettävissä olevia. Funktion muotoa on mahdollista muokata muuttamalla syvänteen leveyttä sekä veden syvyyttä.

Funktion tarkoitus on lisäksi mahdollistaa läpikuljettavan alueen pinta-alan laskeminen pinta-alaintegraalin avulla sekä mahdollistaa simulaattorissa sukellusveneiden toiminta-alueen rajaaminen matemaattisesti syvyys- ja leveys suunnassa.

Veden syvyys

Veden syvyys (h) kuvaa syvänteen pohjan sijaintia y -akselilla. Samalla se on taso, jolle pohjaan laskeutuvat herätemiinat sijoittuvat. Veden syvyys muodostaa sukellusveneeseen toiminta-alueen määrittämisen perusteet, sillä se vaikuttaa alueen lopulliseen kokoon funktioiden y_1 sekä y_2 kautta sekä sukellusveneiden toiminta-alueen alarajan h_2 arvoon y -akselilla.

Syvyytettävän herätemiinan säteet

Syvyytettävän herätemiinan vaikutusalue lasketaan ympyrän pinta-alan kaavalla, jossa säteenä on syvyytettävän herätemiinan tuhoava säde. Sädetä käytetään myös yhtenä osana laskukaavaa, jossa määritetään Pythagoraan lauseen avulla, osuuko sukellusvene miinan tuhoavalle vaikutusalueelle vai ei. Tuhoavan alueen lisäksi simulaatiossa lasketaan syvyytettävälle herätemiinalle sukellusvenettä vaurioittava alue.

Sukellusveneeseen koko

Simulaattorin kannalta sukellusveneeseen koko on hyvin oleellinen parametri. Parametrin arvoa käytetään osana em. laskukaavaa laskemaan, osuuko sukellusvene jonkun herätemiinan tuhoavalle vaikutusalueelle, vaurioittavalle vaikutusalueelle vai selviääkö sukellusvene vaurioitta.

Taulukko 2:een on koostettu Itämeren keskimääräisen sukellusveneeseen ominaisuudet. Simulaattorissa niistä huomioidaan sukellusveneeseen ulkoiset mitat, joiden perusteella muodostetaan generinen malli Itämeren alueen sukellusveneestä, jota vastaan syvyytettävän herätemiinan on tarkoitus toimia. Kuten taulukosta käy ilmi, keskimääräinen sukellusvene on ulkoisilta mitoiltaan 63,4 metriä pitkä, leveimmältä kohdaltaan 7,7 metriä leveä sekä 13,7 metriä korkea. Simulaattoria varten sukellusveneeseen ulkoisia mittoja, kuten tornia tai muita ulokkeita, on kuitenkin yksinkertaistettu simuloinnin mahdollistamiseksi. Yksinkertaistaminen perustuu sukellusveneeseen herätekehtien sekä fyysisten ulkomittojen alkuperäisten mittasuhteiden esittämiseen matemaattisesti yksinkertaisemmassa muodossa.

Ellipsi on simulaattorin tapauksessa huomattavasti tavallista ympyrää vaikeammin tarkasteltava muoto, sillä ellipsin ja miinan vaikutusalueen päällekkäisyyksien tarkastelu vaatisi käytännössä joka ikisen ellipsin muotoisen sukellusveneeseen ”ulkoreunan” x - ja y -koordinaattipisteiden laskemista. Paljon yksinkertaisempaa ja laskennallisesti tehokkaampaa on tarkastella kahden ympyrän keskipisteiden välistä etäisyyttä, sillä niiden välinen etäisyys voidaan laskea Pythagoraan lauseella. Kun kateetteina käytetään koordinaattipisteiden x - ja y -akselien arvojen erotusta, voidaan pisteiden välinen etäisyys laskea suorakulmaisen kolmion hypotenuusana.

Yksinkertaistus ympyrän muotoon tapahtuu siten, että aluksi sukellusvenettä tarkastellaan ellipsinä, jonka mitat vastaavat sukellusveneeseen ulkoisia mittoja. Ellipsin arvoilla lasketusta pinta-alasta ratkaistaan ympyrämuotoiselle sukellusveneeseen yksinkertaistukselle säde, jota simulaattorissa käytetään kuvaamaan sukellusveneeseen kokoa.

Yksinkertaistaminen tapahtuu siten, että ratkaistaan ellipsin pinta-alaa vastaavalle ympyrälle säde. Ellipsin pinta-ala lasketaan kaavalla $A = \pi \times ab$, missä a ja b ovat ellipsin puoliakseleita. Tällöin ratkaistavaksi yhtälöksi muodostuu $\pi r^2 = \pi \times ab$, josta saadaan säteelle arvo $r = \sqrt{ab}$. Lopputuloksena tarkasteltavan sukellusveneeseen pinta-ala syvänteessä on lähtöarvoihin verrattuna muuttumaton, mutta samalla pinta-ala on simulaattorin kannalta huomattavasti helpommin hyödynnettävässä matemaattisessa muodossa.

5. SIMULAATIOTULOSTEN ANALYSOINTI

Simulaattoreiden käyttö perustuu niiden kustannustehokkuuteen, käytön helppouteen ja muunneltavuuteen, mutta niiden antamien tulosten käytettävyys voi perustua ainoastaan totuudenmukaisiin tuloksiin. Parhaimmillaankin simulaattori antaa vain oikean suuntaisia tuloksia, sillä kaikkia reaali maailman muuttujia ei simulaattoreihin voida sisällyttää niiden monimutkaisuuden ja ennakoimattomuuden takia. ”Jos tuloksia ei ole selitetty esimerkiksi osoittamalla matemaattisella analyysillä, että laskemalla saadaan samanlaisia arvoja, niin on suuri riski siitä, että simulaatio-ohjelma on toiminut väärin” [9, s. 64].

Kun simuloidaan epävarmoja asioita, liikutaan aina todennäköisyyslaskennan piirissä. Simuloinnin tarkoituksena on luoda konkretiaa abstraktiin todennäköisyyskäsitteeseen ja auttaa sen ymmärtämistä. Monte Carlo -simulointiin liittyy oleellisesti simuloinnin tulosten tilastollisen merkitsevyyden ja luotettavuuden arviointia, jotta simulaation tulosten oikeellisuudesta voidaan varmistua. [18, s. 5] Tutkimuksessa tuotettuja simulaatiotuloksia tutkitaan eri matemaattisen analyysin keinoin, sillä ”vertailu matemaattiseen mallin ja simulaatiotuloksen välillä on ehkä ainoa menetelmä vakuuttua ja vakuuttaa muut siitä, että simulaatiotulokset ovat oikeita” [9, s. 74].

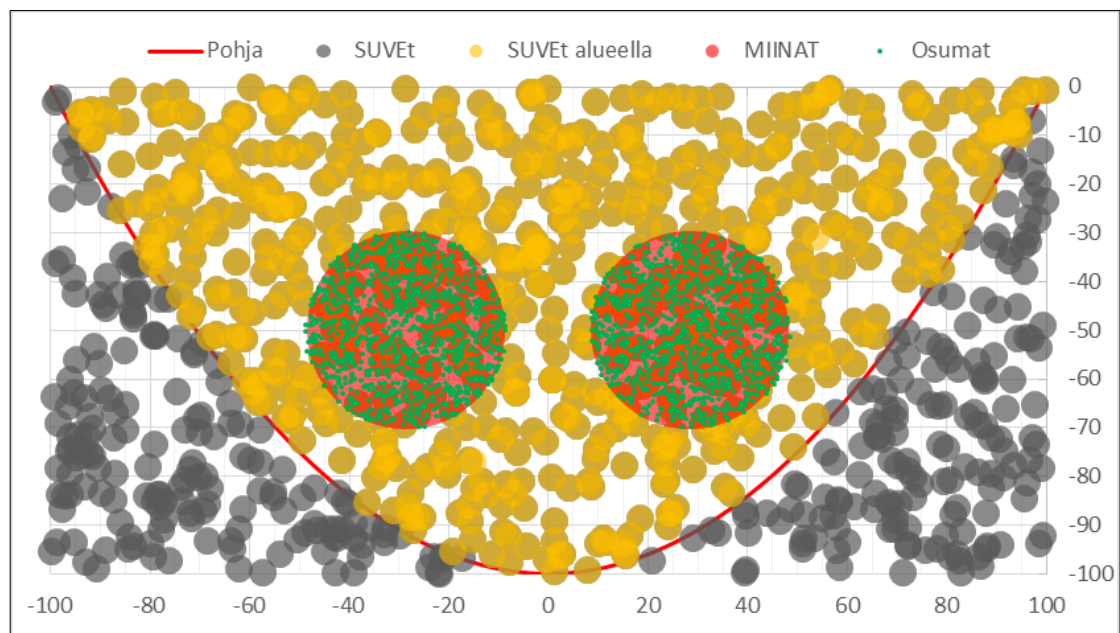
Kuten aiemmin todettua, tieteellisen tutkimuksen perusedellytyksenä etenkin luonnontieteissä voidaan pitää tutkimustulosten toistettavuutta. Monks et al. [23, s. 6] toteavat simulaatiotutkimusten tutkimustulosten raportointia koskevassa tutkimuksessaan, että rakennettua mallia ei voida rakentaa uudelleen luotettavasti ilman yksityiskohtaista testidatan raportointia. Raportoinnin tulisi sisältää ainakin testissä käytetyt parametriarvot, tiedon lähtödatan alkuperästä ja erilaiset skenaariokokeilut, tiedot datan mahdollisesta esikäsittelystä sekä simuloitaessa tehdyt oletukset.

Tutkimustulokset esitetään kahdessa erilaisessa skenaariossa, joiden tarkoituksena on havainnollistaa tutkimustuloksia. Ensimmäisessä skenaarion tarkoituksena on aluksi mahdollistaa simulaatiotulosten tilastollisen luotettavuuden arviointi, jotta simulaattorin oikeanlaisesta toiminnasta ja siten tutkimustulosten oikeellisuudesta voidaan varmistua. Luotettavuuden osoittamisen jälkeen skenaarion tarkoituksena on arvioida eri parametrien vaikutusta estearvoon sekä tuottaa edellisessä kappaleessa luetellut tiedot tutkimustulosten toistettavuuden takaamiseksi. Toisen skenaarion tarkoituksena on puolestaan osoittaa simulaattorin käytettävyys reaali maailman mallintamisessa ja miinaanajon todennäköisyyden laskemisessa.

5.1. Skenaario 1

Skenaarion 1 tarkoituksena on toimia simulaattorin toiminnan verifiointityökaluna. Verifiointimenetelmänä käytetään matemaattista analyysia, jossa keskitytään simulaatiotulosten ja matemaattisen mallin geometrisen tarkastelun väliseen vertailuun - eli antaako simulaattori sellaisia tuloksia kuin sen kuuluisikin antaa? Tulosten raportoinnissa noudatetaan Monks et al. [23, s. 6] simulaatiotutkimusten raportointiperiaatteita, jotka oli lueteltu 0. Tarkoituksena on raportointiperiaatteiden mukaisesti pyrkiä kuvailemaan mallin koeajojen tulokset ja simulaatioajojen tutkimustulokset riittävän yksinkertaisesti niiden toistamiseksi.

Skenaarion lähtöasetelmaksi on valittu tilanne, jossa tarkastellaan y-akselin suhteen symmetristä vedenalaista syvännettä. Syvänteen leveydeksi on valittu 200 m veden pinnalla (y-akselin nollakohdat $x=-100$ ja $x=100$) ja syvimmän kohdan syvyydeksi 100 m ($f(0) = -100$). Kuvassa 9 on skenaarion graafinen esitys. Simulaatiotuloksia esittävässä kuvassa tulee huomioida, että kuvaaja piirtää sukellusveneille arvottuja koordinaattipisteitä ensimmäiset 1000 kappaletta, mutta osumat miinoihin kuvaaja piirtää jokaisesta 20000 arvotusta pisteestä.



Kuva 9: Skenaario 1:n lähtöasetelma

Vertailun mahdollistamiseksi taulukossa 4 on esitetty skenaarion 1 tunnusluvut, jotka on koottu liitteessä 2 esitetyistä simulaattorin antamista tuloksista. Liitteessä 2 on esitetty myös skenaarion lähtöarvot. Taulukon Hyväksytyt-sarake kertoo pohjanmuodon kuvion sisällä olevien sukellusveneiden koordinaattipisteiden määrän, Hylätty-sarake puolestaan ulos jääneet. Tuho1-sarake kertoo ensimmäiseen miinaan osuneiden sukellusveneiden määrän, ja Tuho1%-sarake laskee niiden prosenttiosuuden. Tuho2-sarakkeet toimivat samalla tavalla, ja Tuho yht -sarake laskee tuhoutumisprosentit yhteen.

Taulukko 3: Skenaarion 1 lähtöasetelman tunnusluvut

Hyväksytyt	Hylätty	Tuho1	Tuho1%	Tuho2	Tuho2%	Tuho yht	
13321,8	6678,2	1283,1	0,0963	1282,4	0,09626	0,19258	KESKIARVO
65,4	65,4	35,0527	0,0027	32,4676	0,00232	0,00344	KESKIHAJONTA
16,3	16,3	8,7559	0,0007	8,1102	0,00058	0,00084	LUOTTAMUSVÄLI
13305	6661,8	1274,38	0,0956	1274,26	0,09568	0,19174	LV:N ALARAJA
13338	6694,5	1291,90	0,0970	1290,49	0,09684	0,19342	LV:N YLÄRAJA
13179	6541,0	1208,00	0,0912	1213,00	0,09066	0,18487	MINIMI
13459	6821,0	1357,00	0,1021	1352,00	0,10076	0,20185	MAKSIMI
13314	6686,5	1276,50	0,0960	1281,50	0,09641	0,19238	MEDIAANI

Tunnuslukuista on huomattava, että ne on laskettu vain yhden simulaatiokierroksen tuloksista. Tunnusluvut vaihtuvat jokaisella simulaatiokierroksella simulaattorin sattumanvaraisuudesta johtuen, mutta empiria on osoittanut niiden muutoksien olevan hyvin pieniä. Kuten itse simulaattori, myös tunnusluvut antavat vain indikaation oikeansuuntaisista tutkimustuloksista.

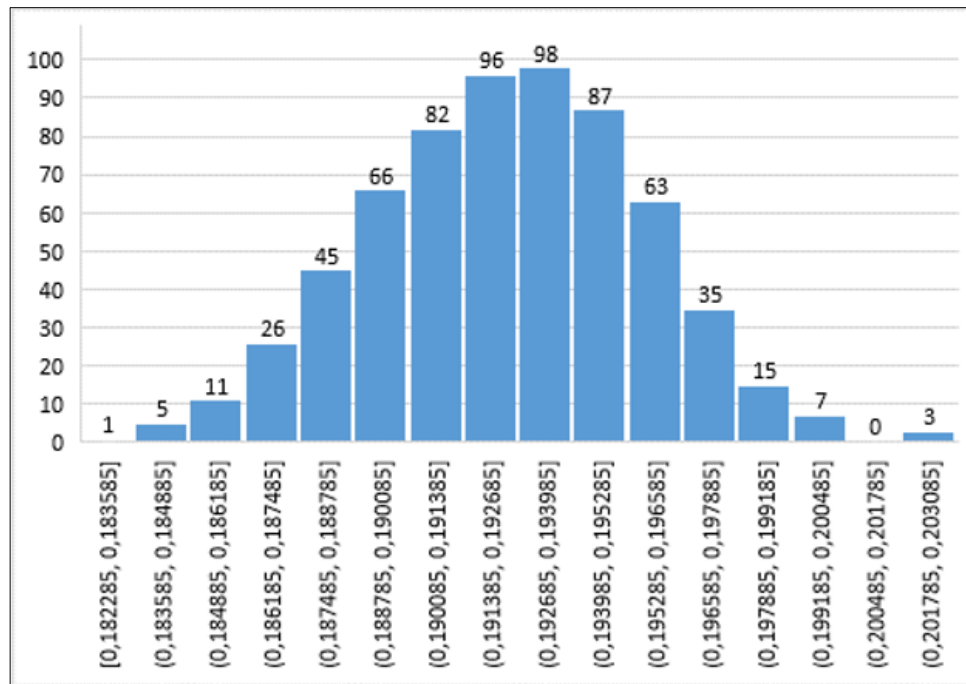
Tutkimustulosten ensimmäinen tilastollisen luotettavuuden arviointi suoritetaan simulaattorin arpomien koordinaattipisteiden sattumanvaraisuudesta, sillä ”mikään tietokoneen tai laskulaitteen ohjelmoidusti tuottama ei ole aidosti satunnaista” [18, s. 8]. Kuvassa 9 esitetyn simulaation lähtöasetelman geometrinen tarkastelu osoittaa, että pohjanmuodon kuvaajan pinta-alan suhteen koko suorakulmion pinta-alaan pitäisi vastata keltaisella kuvattujen, alueen sisäpuolella olevien sukellusveneiden suhdetta kaikkiin sukellusveneisiin. Jos sattumanvaraisesti sukellusveneille arvotut koordinaattipisteet jakautuvat samassa suhteessa kuin geometriset muodot simulaattorin lähtöasetelmassa, voidaan simulaattorin sattumanvaraisuuden todeta olevan aidosti riittävä.

Ensimmäinen vaihe tarkastelussa on määrittää kuvion pinta-ala. Jos kuvion funktio tunnetaan, kuvion pinta-ala voidaan laskea määrättyllä integraalilla. Pinta-ala saadaan integroimalla pohjanmuodon kuvaajan funktio $f(y_1) = \left(\frac{2x\sqrt{h}}{w}\right)^2 - h$. Koska kyseessä on y-akselin suhteen symmetrinen funktio, voidaan pinta-ala laskea kertomalla toisen puoliskon pinta-ala kahdella, joka helpottaa lopullisen pinta-alaintegraalin arvon laskemista. Pinta-alan laskemiseksi vaadituksi määrättyksi integraaliksi saadaan sieventämisen jälkeen $F(y_1) = 2 \int_0^{\frac{w}{2}} \frac{4hx^3}{3w^2} - hx$, johon sijoittamalla skenaarion 1 lähtötiedot saadaan kuvaajan pinta-alaksi -13333,3 neliometriä. Pinta-ala on negatiivinen, koska kuvaaja on kokonaisuudessaan x-akselin alapuolella, ja voidaan muuntaa sellaisenaan positiiviseksi lukuarvoksi. Suorakulmion pinta-alaksi lähtötiedoista saadaan $100 \times 200 = 20000$ neliometriä, ja täten pinta-alojen suhdeluvuksi 0,6666.

Alueen sisäpuolelle arvottujen sukellusveneiden suhdeluvuksi taulukosta 4 saadaan puolestaan $13321,8 / 20000 = 0,6661$ ja liitteen 2 lähtötiedoista 95 %:n luottamusväliksi 0,6653 – 0,6669. Simuloidun suhdeluvun ”virhemarginaaliksi” eli luottamusvälin pituuden puolikkaaksi saadaan tällöin 0,082 %:a. Simulaatiotulosten analysoinnin perusteella geometrinen suhdeluku osuu simulaattorin arpomien paikkojen luottamusvälille. Toisin sanoen simulaattori arpoo sukellusveneiden koordinaatit koko alueelle riittävän sattumanvaraisesti, jotta simulaattorin tuottamien tulosten sattumanvaraisuuteen voidaan luottaa. Samalla voidaan simulaattorin toiminta hyväksytyjen sukellusveneiden lukumäärän määrittämiseksi todeta toimivaksi.

Seuraava tutkimustulosten tilastollisen luotettavuuden arviointi tapahtuu vertaamalla tuhoutuneiden sukellusveneiden prosentuaalista määrää miinojen peittämään osuuteen koko syvänteestä pinta-alasta. Miinojen tuhoavana etäisyytenä on käytetty 15 metriä ja sukellusveneeseen säteenä Itämeren keskimääräisen sukellusveneeseen leveyden ja korkeuden muodostamasta ellipsistä pelkistetyn ympyrän sädettä, jolle saadaan arvo 5,19134.

Tuhoamisprosenttien tarkastelu aloitetaan luokittelemalla 10 simulaatiokierroksen tulokset, yhteensä 640 kappaletta. Luokitellusta aineistosta tuotetaan histogrammi, joka on esitetty kuvassa 10. Histogrammin avulla voidaan tarkastella aineiston tiheysjakamaa, eli miten tuhoamisprosentit jakautuvat. Aineiston kasvaessa ja luokkavälien pienentyessä histogrammi lähestyy aineiston tiheysfunktion käyrää, mutta jo 640 kappaleen histogrammista voidaan päätellä aineiston olevan normaalijakautunut. Aineiston analysoinnissa voidaan siis käyttää normaalijakamaa koskevia lauseita. Koska koko aineisto on muodostunut yhtä aidon sattumanvaraisuuden pohjalta kuin tuhoamisprosenttien aineisto, voidaan oletus normaalijakautuneisuudesta yleistää koko aineistoon.



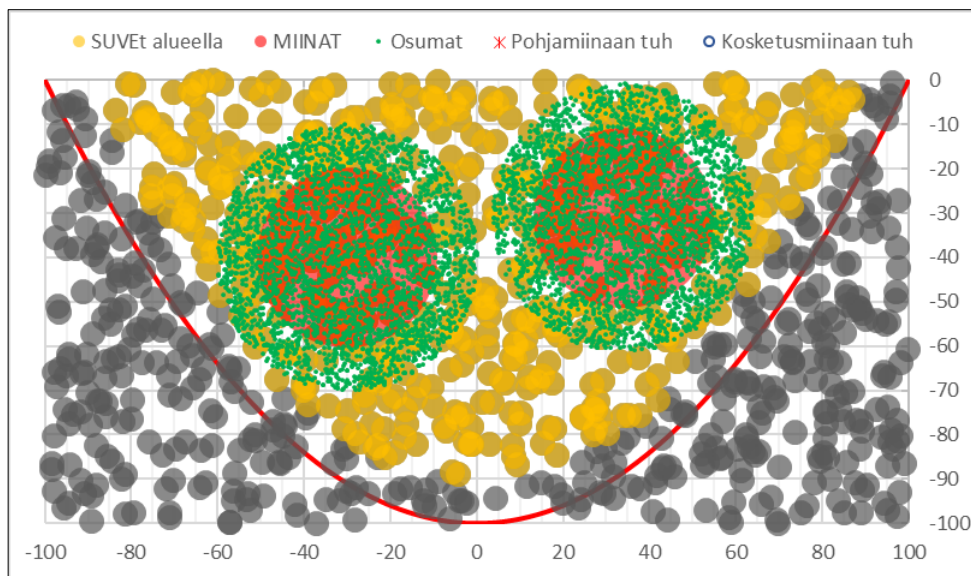
Kuva 10: Tuhoamisprosenttien histogrammi

Varsinaisessa geometrisessa tarkastelussa lasketaan miinojen pinta-ala laskemalla ympyrän pinta-ala käyttämällä säteen arvona sukellusveneeseen säteen ja tuhoavan säteen summaa $r=5,19134+15$ luvussa 4.4 esitetyn yksinkertaistuksen perusteella. Kahden miinan yhteenlasketuksi pinta-alaksi saadaan 2561,6 neliometriä, joka vastaa 19,21 %:a syvänteen pinta-alasta. Vertaamalla suhdelukua Tuho yht -sarakeen tunnuslukuihin, voidaan geometrisen suhdeluvun todeta sijoittuvan luottamusvälin sisälle ja olevan hyvin lähellä aineiston mediaania 19,238 %. Simulaattorin tuhotuiksi laskemien sukellusveneiden osuus vastaa siis geometrisen tarkastelun perusteella odotettua arvoa, ja simulaattori voidaan myös tuhoamisprosentin laskemisen osalta osoittaa toimivaksi.

Parametrien vaikutus

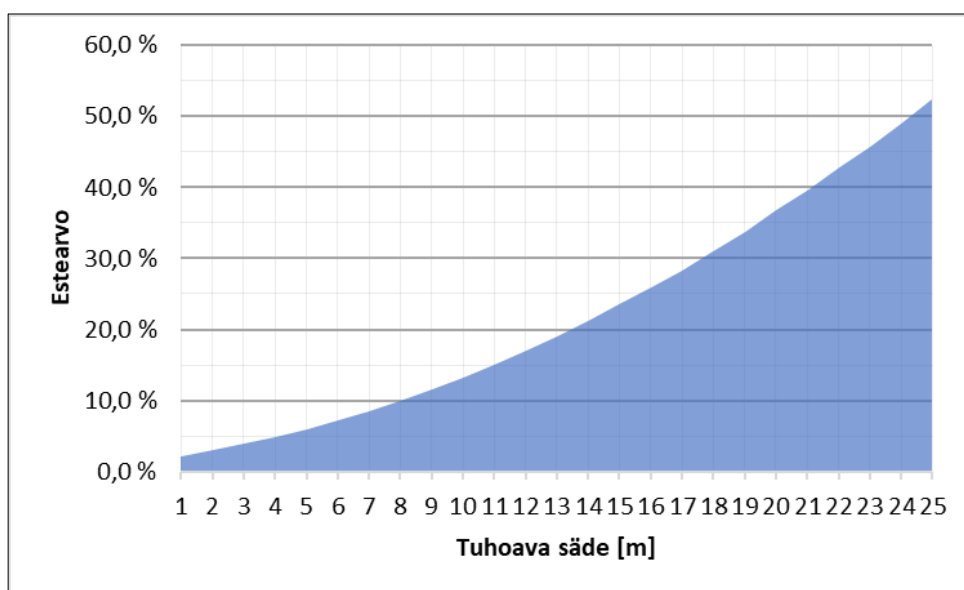
Yksi tärkeimpiä syitä tehdä simulointeja on parametrien muutosten vaikutuksen arviointi [18, s. 6], joka on myös toiminut simulaattorin rakennusperiaatteena. Kun simulaattorin tuottamat tulokset on ensin osoitettu riittävän luotettaviksi ja oikeansuuntaisiksi, voidaan simulaattoria hyödyntää arvioimaan parametrien merkitystä miinoitteen estearvossa.

Ensimmäisenä tarkastellaan miinan tuhoavan säteen vaikutusta estearvoon. Tarkastelun lähtöarvoina käytetään korkeus- ja leveysetäisyyttä 10 m pohjasta ilman kosketus- tai pohjamiinoja. Kuvassa 11 näkyy tuhoavan säteen vaikutustarkastelun lähtöasetelma, jossa tuhoavaksi säteeksi on määritetty 25 metriä. Kuvasta näkyy myös, kuinka liian lähellä syvänteen seinämää olevat sukellusveneet eivät kuulu tarkasteluun.



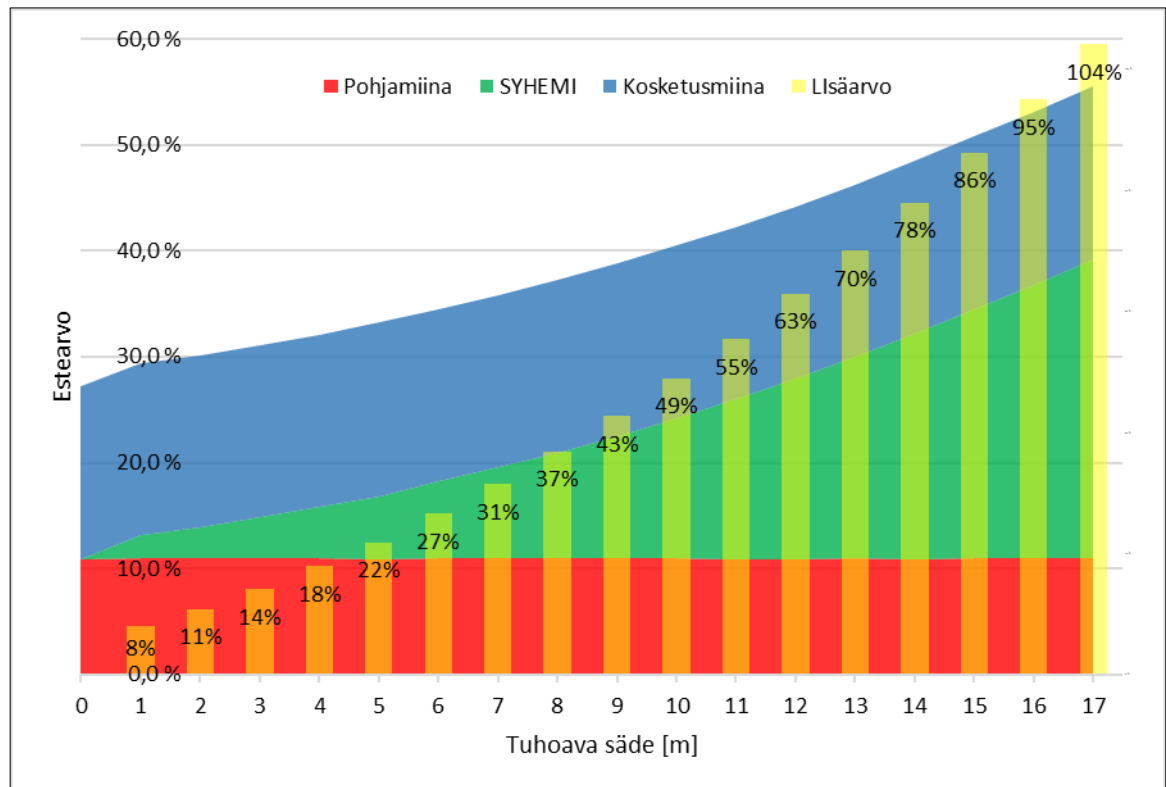
Kuva 11: Tuhoavan säteen vaikutus estearvoon -tarkastelu, $r=25\text{m}$

Tarkastelu suoritettiin laskemalla tuhoutuneiden sukellusveneiden prosenttiosuus kaikista hyväksytyille alueelle arvoituista sukellusveneistä. Tarkastelun tulokset on koottu kuvaan 12.



Kuva 12: Tuhoavan säteen vaikutus estearvoon

Kuva osoittaa oikeaksi matemaattisen oletuksen, että miinan tuhoavan säteellä on eksponentiaalinen vaikutus estearvoon. Matemaattinen oletus perustuu ympyrän pinta-alan kaavaan $A = \pi r^2$. Kuvasta nähdään, että tarkasteltavassa syvänteessä 25 metrin tuhoavalla säteellä päästäisiin pelkällä syvyytettävällä herätemiinalla yli 50 %:n ja 16 metrin säteellä yli 25 %:n tuhoamistodennäköisyyksiin. 25 %:n tuhoamistodennäköisyys on merkittävä raja-arvo, sillä se saavutettaessa päästään kahdella miinalinjalla miinoitteen tuhoavaan estearvoon eli $\geq 50\%$:iin. Kolmella lasketulla miinalinjalla sama raja-arvo on tuhoavalle säteelle 12 metriä.



Kuva 14: Eri miinatyyppien osuus estearvosta

Kuvasta nähdään, että ilman syvyytettävää herätemiinaa ($r=0$) jää kokonaisestearvo alle 30 %:iin. Kun tuhoavaa etäisyyttä kasvatetaan, jo 10 metrin kohdalla tuo syvyytettävä herätemiina melkein 50 %:n lisäyksen estearvoon, ja 15 metrin tuhoava etäisyys nostaa kokonaisestearvon yli 50 %:iin eli miinoitteen voidaan todeta olevan tuhoava. 17 metrin tuhoavalla etäisyydellä syvyytettävä herätemiina tuo yli 100 %:n lisäyksen estearvoon eli muodostaa yli puolet kokonaisestearvosta. Kuvaa tulkitessa tulee myös muistaa, että mikäli pohjamiinan tuhoamisetäisyys pienenee tai kosketusmiinoja ei lasketa, nousee syvyytettävän herätemiinan tuoma lisäys kokonaisestearvoon tarkastelussa laskettua suuremmaksi. On myös huomioitava, että kosketusmiinojen osalta simulaattori laskee kaikki riittävän lähellä pintaa kulkevat sukellusveneet tuhotuiksi, vaikka todellisuudessa kosketusmiinoja laskettaisiin vain tietyin välimatkoin. Myös edellä mainittu simulaattorin ominaisuus vaikuttaa korottavasti syvyytettävän herätemiinan tuottamaan lisäarvoon. Ominaisuutta voidaan vastavuoroisesti käyttää hyväksi estearvon laskemisessa silloin, kun sukellusvene oletetaan olevan sukelluksissa eikä pintakulussa.

Kuvaa voidaan käyttää arvioimaan syvyytettävän herätemiinan tuomaa lisäarvoa sukellusveneentorjuntaan. Arvioinnin perustaksi tarvitaan jet pulse -ilmiön esiintymisen ja voimakkuuden alustavat tutkimustulokset, joiden perusteella tuhoavalle etäisyydelle voidaan määrittää tarkka parametriarvo. Tarkalla arvolla voidaan simulaattorilla laskea entistä tarkemmin syvyytettävän herätemiinan optimaalisia syvyytyksiä sekä käytettävää määrää.

5.2. Skenaario 2

Tutkimusosuuden tulosten analysoinnissa käytetty toinen skenaario on rakennettu erilaiseksi kuin ensimmäinen useasta eri syystä. Toisessa skenaariossa on tarkoitus esitellä lisää simulaattoriin rakennettuja ominaisuuksia sekä demonstroida simulaattorin toiminnallisuuksia yksityiskohtaisemmin. Skenaarion tarkoituksena on esitellä, miten simulaattoria voitaisiin hyödyntää sukellusveneentorjuntamiinoitteiden operatiivisessa suunnittelussa.

Skenaarion alkuasetelma pohjautuu ensimmäisestä skenaariosta poiketen reaali maailmaan. Skenaarion pohjanmuotoa varten Suomen aluevesiltä on etsitty useita sukellusveneiden toiminnan kannalta edullisia alueita, joilta olisi mahdollista häiritä vihollisen - tässä tapauksessa siis Suomen merivoimien - toimintaa. Alueiden etsiminen on tapahtunut julkisista merikartoista hyödyntäen ArcGIS Desktop -ohjelmaa.

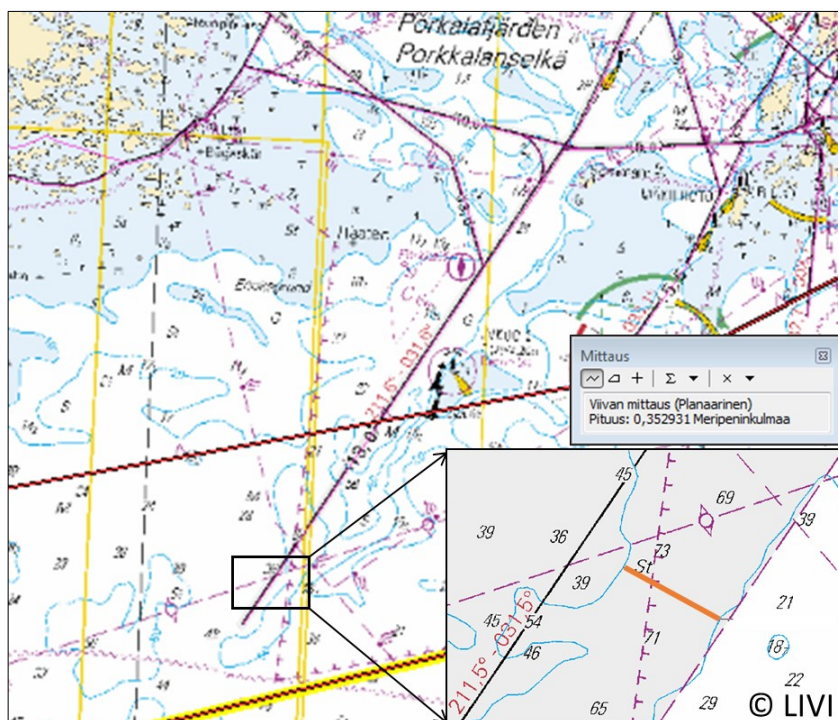
ArcGIS Desktop -ohjelma on paikkatiedon käsittelyyn, muokkaamiseen, analysointiin ja jakamiseen suunniteltu tietokoneohjelma, jossa voidaan yhdistellä eri paikkatietotuotteita yhdeksi näkymäksi. Alueiden etsinnässä käytettiin Liikenneviraston toimittamaa julkista merikartta-aineistoa sekä Merisotakoulun tutkimuskeskuksen tuottamaa merenpohjan syvyysaineistoa. Aineistot yhdistettiin visuaalisesti päällekkäin, jolloin sukellusveneelle edulliset toiminta-alueet erottuivat merikartta-aineistosta.

Karttatiedustelun perusteella Suomen aluevesiltä sukellusveneiden toiminnan kannalta edullisia syvänteitä löytyy mm. Hankoniemellä sijaitsevien Hangon ja Koverharin syväsatamiin vievien väylin ulkopäästä, entisten sotilassaarien Örön ja Utön eteläpuolelta sekä usealta eri alueelta Ahvenanmerellä. Alueiden käytön estäminen sukellusveneiltä lisäisi vastapuolen toimintamahdollisuuksia pienentämällä pinnanalaisen uhkan todennäköisyyttä ja vaikutuskykyä. Alueiden tarkemmat paikat ja koordinaatit on listattu taulukossa 4.

Taulukko 4: Syvänteiden sijainnit idästä länteen

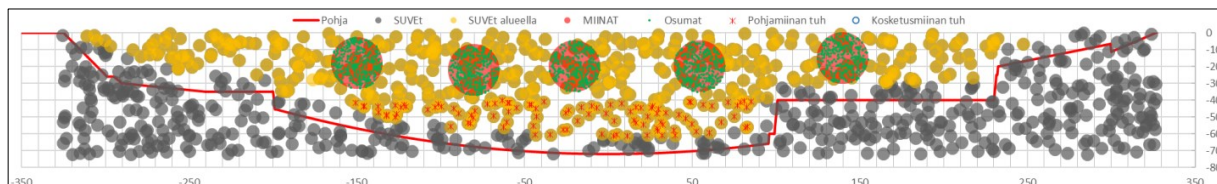
Paikka	Koordinaatit	
Koverharin väylä	023° 13' 30" E	59° 42' 25" N
	023° 12' 59" E	59° 43' 17" N
Hangan väylä	023° 07' 37" E	59° 42' 34" N
Örön eteläpuoli	022° 18' 52" E	59° 43' 39" N
Utön väylä	021° 22' 28" E	59° 44' 55" N
Kökarin syväne	021° 01' 48" E	59° 45' 21" N
	020° 58' 16" E	59° 45' 24" N
Halderin TSS-alue	020° 28' 31" E	59° 43' 06" N

Skenaarion maantieteellisen sijainnin valitsemisessa päädyttiin operatiiviseen lähtökohtaan. Suomen merivoimilla on taistelualuskalustolleen kaksi tukikohtaa, joista toinen sijaitsee Turun Pansiossa, Saaristomerен syövereissä, ja on sukellusveneille tavoittamaton paikka. Toinen tukikohta puolestaan sijaitsee Upinniemessä, Kirkkonummella, 30 meripeninkulmaa (n. 55 km) Helsingistä länteen. Upinniemi on alle 20 meripeninkulman päässä Suomen aluevesirajasta ja siten hyvin lähellä Suomenlahden keskisyvännettä. Skenaariossa tarkasteltavaksi alueeksi valikoitui Kantvikin satamaan ja Upinniemen sotasatamaan Suomenlahdelta johtava, syvyydeltään 13 metrin laivaväylä. Väylän merkitys on tärkeä, sillä se mahdollistaa merikuljetukset Helsingin länsipuoliseen syväsatamaan sekä sota-aluksille nopean siirtymisen ulos saaristosta. Veden-syvyys ei rajoita sukellusveneen toimintaa alueella, vaan mahdollistaa esimerkiksi sukellusve-neestä tapahtuvan miinoittamisen Porkkalanselälle asti [36, s. 49].



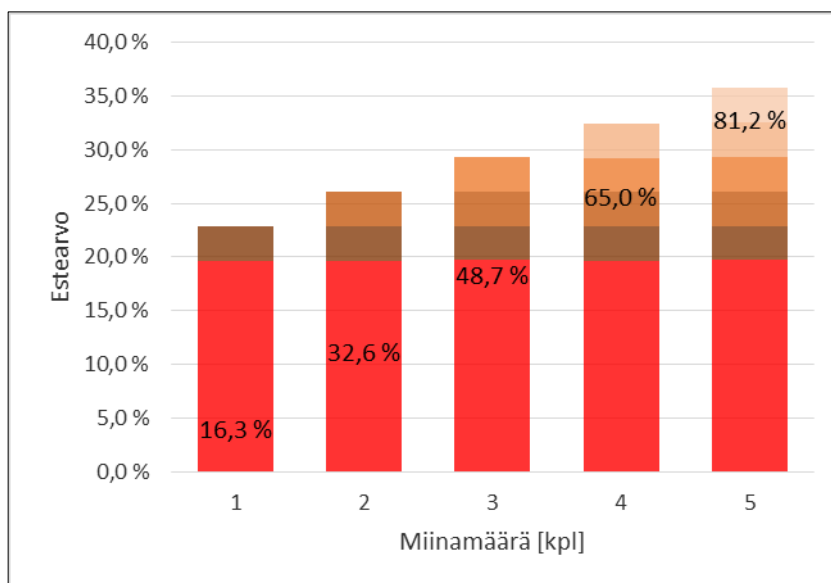
Kuva 15: Skenaario 2:ssa tarkasteltavan alueen sijainti

Alueelta löytyy vedenalainen syväne, jonka sulkeminen rajoittaisi sukellusveneen toimintamahdollisuuksia olennaisesti. Syvänteen sijainti merimaastossa on esitetty kuvassa 15. Syväne sijaitsee pisteessä 024° 05' 27" itäistä pituutta (E), 59° 47' 59" pohjoista leveyttä (N), ja on 0,353 meripeninkulmaa eli 653 metriä leveä sekä merikartan perusteella 72 metriä syvä. Syväne on mallinnettu simulaattoriin leveys- ja syvyysmittakaavaltaan todellisuutta vastaavaksi. Simulaattorin lähtöasetelma on esitetty kuvassa 16.



Kuva 16: Skenaario 2:n lähtöasetelma

Kuvasta nähdään, kuinka simulaattorin logiikka toimii myös tilanteessa, jossa syvänteen muoto ei ole symmetrinen tai noudata mitään määriteltävissä olevaa funktiota. Simulaattori hylkää edelleen liian lähellä seinämää olevat sukellusveneen arvot riittävän tarkasti, jotta simulaatiotuloksia voidaan pitää luotettavina. Tarkastelussa kosketusmiinat on jätetty huomioimatta edellisessä skenaariossa esitettyjen huomioiden perusteella. Muuten pohjamiinan ja kosketusmiinojen tuhoamisprosentit lasketaan samalla tavoin kuin edellisessä skenaariossa. Skenaarion tulokset on koottu kuvaan 17. Kuvan tulkinnassa on otettava huomioon, että pohjamiinanajon todennäköisyys on tulkinnanvarainen. Kuvassa esitetyt tulokset perustuvat oletamaan, että leveässä syvänteessä on useampi pohjamiina. Useammalla miinalla on saavutettavissa syvänteen alaosan peittävä vaikutusalue, jolla yksistään saavutetaan lähes 20 %:n estearvo.



Kuva 17: Miinamäärän vaikutus estearvoon

Kuvasta nähdään syvyytettävän herätemiinan määrän kumulatiivinen vaikutus estearvoon. Kuvassa on esitetty pystyakselilla kokonaisestearvo ja vaaka-akselilla syvyytettävien herätemiinojen kappalemäärä. Kappalemäärän kasvaessa jokaisen yksittäisen miinan estearvo lisätään kokonaisestearvoa kuvaavaan palkkiin. Kuvassa on lisäksi prosenttilukuna syvyytettävän herätemiinan kokonaisestearvoon tuottama lisäys, joka on laskettu prosenttiosuutena miinoitteen estearvosta ilman syvyytettäviä herätemiinoja samoin kuin edellisessä skenaariossa.

Kuvasta nähdään, että poikkipinta-alaltaan suuressa syvänteessä yhden syvyytettävän herätemiinan vaikutus jää pieneksi: keskiarvo tuloksissa on n. 3,2 %. Käytettäessä useampaa miinaa syvänteessä, voidaan torjuva estearvo kuitenkin saavuttaa useammalla miinalinjalla. Useammasta miinalinjasta koostuvan miinoitteen miinaanajon todennäköisyys voidaan laskea yksittäisten miinalinjojen miinaanajon todennäköisyyksistä. Miinoitteen miinaanajon todennäköisyys P voidaan laskea kaavalla [20, s. 68]:

$$P_{miinaanajo} = 1 - (1 - P_1)(1 - P_2) \dots (1 - P_n),$$

jossa P_n on yksittäisen miinalinjan miinaanajon todennäköisyys.

Kaava perustuu ajatukseen, jossa on helpompaa laskea todennäköisyys sille, että miinoitteeseen ajava alus selviytyy miinoitteen läpi kuin eri tuhoutumisvaihtoehtojen summa. Ensin lasketaan todennäköisyys miinoitteeseen ajavan aluksen selviämiseksi: ”sukellusvene selviytyy ensimmäisestä miinalinjasta ja selviytyy toisesta ja selviytyy kolmannesta” jne. Selviytymisen vastakohta on miinaan ajaminen, jolloin todennäköisyys miinaan ajamiselle saadaan selviytymisen komplementtitapahtumana $1 - P_{selviytyy}$.

Taulukossa 5 on esitetty simulaattorin laskemat miinaanajon todennäköisyydet eri määrälle syvyytettäviä herätemiinoja ja miinalinjoja. Arvot ovat samat kuin edellisessä kuvassa, jossa esitettiin miinamäärän vaikutus miinaanajon todennäköisyyteen. Taulukossa on kaksi vaihtoehtoa: todennäköisyys pohjamiinan kanssa sekä ilman sitä. Oletusarvoisesti jokaisessa miinalinjassa on yksi pohjamiina.

Taulukko 5: Skenaario 2:n miinaanajon todennäköisyydet

Miinamäärä	POHJAMIINA + SYHEMI			PELKKÄ SYHEMI			
	1	2	3	1	2	3	4
1	22,9 %	40,6 %	54,2 %	3,2 %	6,3 %	9,3 %	12,2 %
2	26,0 %	45,3 %	59,5 %	6,4 %	12,4 %	18,0 %	23,2 %
3	29,3 %	50,0 %	64,6 %	9,6 %	18,3 %	26,1 %	33,2 %
4	32,4 %	54,3 %	69,2 %	12,8 %	23,9 %	33,6 %	42,1 %
5	35,7 %	58,7 %	73,4 %	16,0 %	29,5 %	40,8 %	50,2 %

Taulukosta nähdään, että estearvoltaan torjuva sukellusveneentorjuntamiinoite saadaan aikaan, mikäli pohjamiinan lisäksi miinoitteessa käytetään vähintään kolmea syvyytettävää herätemiinaa kahdessa miinalinjassa tai yhtä miinaa kolmessa linjassa. Vaihtoehdoista ensimmäinen vaatii vähemmän pohjamiinoja sekä miinalinjoja, kun taas jälkimmäisessä tarvitaan vähemmän syvyytettäviä herätemiinoja. Pelkkiä syvyytettäviä herätemiinoja sisältäviä miinalinjoja pitää puolestaan laskea neljä kappaletta viidellä miinalla, jotta estearvosta saadaan torjuva.

Pelkillä syvyytettävillä herätemiinoilla on siis mahdollista saavuttaa miinoitteelle torjuva estearvo. Myös kokonaan ilman syvyytettäviä herätemiinoja miinoitteesta saadaan laskennallisesti torjuva neljällä pohjamiinoista koostuvalla miinalinjalla. Simulaattorin laskentatavasta johtuen pohjamiinan laskennallinen miinaanajon todennäköisyys ei kuitenkaan ole yhtä tarkka kuin syvyytettävien herätemiinojen, joten on oletettavaa, että pohjamiinoja tarvittaisiin enemmän. Tällöin myöskään riittävän lähellä pintaa tai pinnalla kulkevat alukset eivät pohjamiinoin hin ajaisi.

Miinaanajon todennäköisyyden laskemisella on paljon hyödynnettävyyksiä. Simulaattorin avulla voidaan laskea, montako miinaa torjuvaan sukellusveneentorjuntamiinoitteeseen tarvitaan. Simulaattori mahdollistaa myös eri miinamallien vertailun. Simulaattorilla voidaan tarkastella yksittäistä syvännettä yhtenä mallina tai laskea tarkempi estearvo muuttamalla pohjanmuotoa ja laskemalla siten eri miinalinjoille tarkat miinaanajon todennäköisyydet.

Skenaario 1:n tarkastelun yhteydessä suoritettujen simulaatiotulosten luotettavuuden arvioinnin jälkeen voidaan todeta simulaattorin laskevan käyttäjälleen riittävän tarkasti miinalinjan miinaanajon todennäköisyyden. Molempien skenaarioiden simulaatiotulosten analysoinnin jälkeen simulaattorin voidaan taasen todeta olevan hyödyllinen työkalu miinoittamisen suunnittelussa, sillä se tarjoaa suunnittelijalle tiedon suunniteltavien miinamallin määrästä ja laadusta estearvoltaan torjuvan miinoitteen suunnittelemiseksi.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkielman varsinaisena tutkimustehtävänä oli tutkia syvyytettävän herätemiinan käyttöä sukellusveneentorjunnassa. Tutkielman tavoitteena oli selvittää, parantaisiko sukellusveneentorjuntaan suunniteltu syvyytettävä herätemiina sukellusveneentorjuntamiinoitteiden estearvoa ja toisiko sen käyttäminen siten parannusta sukellusveneentorjunnan keinovalikoimaan. Vastaus tutkimustehtävään rakennettiin teoriaosuuden ja tutkimusosuuden perusteella. Teoriaosuudessa tutkittiin syvyytettävää herätemiinaa sekä sukellusvenettä toistensa vastapuolina, ja tutkimusosuudessa simuloitiin niiden laskennallista vaikutusta toisiinsa. Johtopäätösluvun tarkoituksena on summata tutkimuksenteon aikana esiin nousseita huomioita, sillä ”sotatekninen tutkimus tavoittelee aina viime kädessä taistelun ja sodan voittamista, ja sotataitoa palvelevan matemaattisen analyysin tuloksistakin pitäisi voida lukea tähän tarkoitukseen tähtäviä johtopäätöksiä” [17, s. 62].

Syvyytettävän herätemiinan tuoma mahdollisuus viedä herätesensorit sekä räjähdysainevaikutus fyysisesti lähemmäs sukellusvenettä ovat ominaisuuksia, jotka mahdollistavat sukellusveneentorjunnan ulottamisen entistä suuremmalle alueelle entistä tehokkaammin. Simulaatiotulosten analysointi osoittaa, että syvyytettävän herätemiinan käyttämisellä on laskennallisesti saavutettavissa lisäarvoa sukellusveneentorjunnassa. Syvyytettävän herätemiinan käyttö yksinään mahdollistaa estearvoltaan torjuvien sukellusveneentorjuntamiinoitteiden muodostamisen, mutta paras estearvo saadaan yhdistelemällä eri miinatyyppisiä. Erityisesti pohjamiinan kanssa oikealle syvyydelle syvytettyt herätemiinat luovat estearvoltaan torjuvia miinoitteita jo muutamalla miinalinjalla. Eri miinatyyppien yhdistäminen parantaa sukellusveneentorjuntamiinoitteiden estearvoa myös vaikeuttamalla miinoitteiden raivaamista.

Sukellusveneentorjuntamiinoitteen estearvon kasvattamisessa merkittävin parametri on syvyytettävän herätemiinan tuhoava etäisyys. Etäisyyden kasvu riippuu jet pulse -ilmiön ominaisuuksista, jotka ovat vielä tutkimuksen kohteena. Kun tutkimus valmistuu, tämän tutkielman tutkimustuloksena tuotettu taulukko Kuva 14: toimii arviointityökaluna sille, saavutetaanko syvyytettävällä herätemiinalla kustannustehokkaasti lisäarvoa sukellusveneentorjunnassa. Kustannustehokkuuden laskeminen vaatii tarkempien parametriarvojen selvittämistä jatkotutkimuksella, mutta jo nyt voidaan todeta syvyytettävän herätemiinan tuovan yli 50 %:n lisäyksen kokonaisestearvoon kohtuullisella 11 metrin tuhoavalla etäisyydellä. Tällöin voidaan määrittää syvyytettävien herätemiinojen kustannustehokkuuden raja-arvo, eli milloin syvyytettävä herätemiina muuttuu tehokkaimmaksi vaihtoehdoksi sukellusveneentorjunnassa.

Syvyytettävän herätemiinan kehitystyöstä ja hankintakustannuksia ei voida suoraan kustannus-tehokkuusarvioissa laskea kuluiksi, sillä syvyytettävällä herätemiinalla korvattavissa olevat pohjaherätemiinat ovat käytettävissä merimiinoitukseen muissa kohteissa. Kustannuksia toisivat lisääntyneen mallimäärän vaatima huolto- ja logistiikkaketju, lisääntynyt herätesensorien määrä sekä miinojen varastointi. Lisäsäästöjä puolestaan toisi miinakohtaisesti tarvittavan räjähdysaineen pienempi määrä. Kevyemmät sukellusveneentorjuntamiinat mahdollistaisivat myös ohjusveneiden käyttämisen tehokkaampien sukellusveneentorjuntamiinoitteiden laske-
misessa.

Jet pulse -ilmiön tarkastelussa on huomioitava, että tuhoamisetäisyyttä ei voida loputtomiin kasvattaa lisäämällä räjähdysaineen määrää miinassa. Räjähdysainetta ei voida lisätä määrättömästi, sillä yhä voimakkaampi räjähdys lisää myös räjähtävän miinan ympäristöönsä aiheuttamaa ääni- ja paineherätettä. Syvyytettävän herätemiinan puolesta puhuu myös luvussa 2.3 osoitettu vaadittavan räjähdysainemäärän merkittävä lasku räjähdysetaisyyden pienentyessä. Räjähdysainetta lisättäessä vaarana on, että voimakas räjähdys saattaa vahingoittaa miinoitteen muiden herätemiinojen sensoreita tehden sensoreista ja siten myös miinoista toimimattomia. Seurauksena olisi miinoitteen estearovon pieneneminen, joten optimaalisen tasapainon löytäminen räjähdysainemäärän ja tuhoamisetäisyyden kesken on tärkeää – ja siten olennainen jatko-tutkimusaihe.

Syvyytettävää herätemiinaa voitaisiin sukellusveneiden lisäksi käyttää tehokkaasti myös pinta-
aluksia vastaan. Erityisesti miinanraivaajien käyttämisestä syvyytettävä herätemiina tekisi nykyistä huomattavasti vaikeampaa, sillä miinan syvyytettävyyden mahdollistaa perinteisen kosketusmiinaraivainkaluston väistämisen. Syvyytettävyyden ansiosta miina saadaan riittävän syvälle vedenpinnasta raivauskaluston ulottumattomiin, ja herätemiinoille ominainen ylikulkulas-kuriomaisuus tekisi raivaamisesta entistä haasteellisempaa. Samalla räjähdysetaisyys voitaisiin kuitenkin pitää riittävän pienenä, jotta räjähdysvaikutus kohteeseen säilyisi tehokkaana. Miina olisi samalla tehokas myös alaspäin, pohjaa kohti, sukellusveneitä vastaan, joten miina-
tyyppi sopisi erityisesti 30 – 60 metriä syvien syvänteiden tai kapeikkojen sulkemiseen kaikilta alustyypeiltä.

Syvänteiden sulkemisessa on otettava huomioon syvytettävän herätemiinan optimaalinen käyttöperiaate. Miina toimii pinta-alkusia vastaan parhaiten aina n. 15 metrin syvyydessä, jolloin räjähdysenergia ei purkautu ilmaan veden pinnan rikkoutuessa, vaan räjähdysenergia suuntautuu pinta-alkukseen. 15 metrin syvyydessä syvytettävän herätemiinan voidaan samoin perustein olettaa olevan tehokas myös 15 metrin päässä alapuolella kulkevaa sukellusvenettä vastaan. Sukellusveneiden korkeus huomioiden veden syvyys voisi tällöin olla maksimissaan n. 60 metriä. Tätä syvemmissä vedessä syvytettävällä herätemiinalla ei enää voida sulkea koko syväntä. Miinaa ei siis tule syvyttää suoraan syvänteen puoliväliin, vaan sen tarkempi syvyitys on n. 1/3 veden syvyydestä.

Luvusta kolme voidaan todeta, että kaikissa Itämeren sukellusveneissä on miinanväistösonar (*MOAS, Mine and Obstacle Avoidance Sonar*). Vasta-aseajattelun perusteella syvytettävän herätemiinan havaittavuudesta tulee tehdä mahdollisimman hankalaa sukellusveneiden näkökulmasta, jotta sen tarjoama lisäarvo saataisiin täysimittaisesti hyödynnettyä. Täysmetallinen miina on kaikumittaimelle helpoimpia maaleja välivedessä, joten miinan pinnoittamista akustisen vaimennuksen tarjoamalla materiaalilla tulee harkita. Myös miinan muodon suunnittelulla voidaan vaikuttaa kaikumittaimen äänen takaisinheijastumiseen ja siten vaikeuttaa miinan havaittavuutta.

Miinanväistösonarien tarkasta taajuudesta ei julkisista lähteistä löydy tietoa. Kaikumittainjärjestelmät ovat kuitenkin erilaisia, joten spesifiä taajuutta vastaan suojaus ei olisi muutenkaan kannattavaa. Kustannustehokkain ja vaikuttavuudeltaan paras ratkaisu saattaisi olla sukellusveneistä kopioitu idea metallikuoren päällystämistä kumilla tai muulla ääntä absorboivalla materiaalilla miinasta takaisin heijastuvan äänentason minimoimiseksi.

Kuten Vedenalaisen sodankäynnin konsepti -tutkimuksen loppuraportissa todetaan, merimiinojen muodostamalla uhkalla voidaan myös kiistää vastustajan merenherruus ja rajoittaa käytävissä olevia toiminta-alueita – riippumatta siitä, onko miinoja todellisuudessa laskettu vai ei. [38, s. 31] Ajatusta voidaan jatkojalostaa myös syvytettävän herätemiinan osalta. Mikäli syvytettävästä herätemiinasta ei saada sukellusveneiden miinanväistösonareilta havaitsematta jäävää kohdetta, tarvitaanko syvytettäviä herätemiinoja sukellusveneentorjunnassa lainkaan? Riittäisivätkö nykyiset kosketusmiinat, syvytettynä väliveteen, käännettävään tietylle toiminta-alueelle pyrkivän sukellusveneiden pelkällä olemassaolollaan? Tutkijan asiantuntemuksen ja kokemuksen puute sukellusveneiden päälliköimisestä ei mahdollista suoraa vastausta kysymykseen, mutta vihjeen vastauksesta tarjoaa vanha merenkulkijoiden sanonta: ”Hyvä kapteeni selviää tilanteista, joihin parempi kapteeni ei koskaan joudu”.

LÄHTEET

- [1] Been, R., Hughes, D.T., Vermeij, A. *Heterogeneous underwater networks for ASW: technology and techniques*. Glasgow: Undersea Defence Technology Europe, 2008. 20 s.
- [2] CSU 90 (DBQS-40). C4ISR & Mission Systems: Maritime. Posted 12-May-2017. [viitattu 29.3.2018]. Saatavissa: <https://janes.ihs.com/Janes/Display/juws0177-jc4im>
- [3] Department of The Navy. *Collision Report for USS Fitzgerald and USS John S. McCain Collisions*. Washington, DC: Office of the Chief of Naval Operations. 71 s. [viitattu 3.4.2018] Saatavissa: <http://s3.amazonaws.com/CHINFO/USS+Fitzgerald+and+USS+John+S+McCain+Collision+Reports.pdf>
- [4] Flot.com. *Б-585 "Санкт-Петербург"*. [viitattu 15.3.2018]. Saatavissa: <https://flot.com/nowadays/strength/submarines/spb/>
- [5] Germany - Navy. Jane's World Navies. Posted 07-Mar-2018. [viitattu 8.3.2018]. Saatavissa: <https://janes.ihs.com/Janes/Display/jwna0060-weur>
- [6] Hirsjärvi, S., Remes, P. & Sajavaara, P. *Tutki ja kirjoita*. 15.–16. painos. Helsinki: Kirjayhtymä, 2010. 464 s. ISBN 978-951-31-4836-2
- [7] Huhtinen, I. *Heräteiimatekniikka*. 1. painos. Turku: Silmu-tuotanto, 1992. 422 s.
- [8] *IHS Jane's Fighting Ships, 2016-2017*, London: IHS, 2016. ISBN 978 0 7106 3185 5
- [9] Jormakka, J. *Simulointi tutkimusmenetelmänä*. Kirjassa: Lappalainen, E., Jormakka, J. (toim.). Tekniset tutkimusmenetelmät Maanpuolustuskorkeakoulussa. Verkkopainos. Helsinki: Maanpuolustuskorkeakoulu, Tekniikan laitos, 2004. 154 s. ISSN 1795-3294.
- [10] Julkaisufoorumin luokitteluperusteet. Julkaisufoorumi. [viitattu 29.3.2018] Saatavissa: <http://www.julkaisufoorumi.fi/fi/arvioinnit/luokitteluperusteet>
- [11] Kangaste, M. Vedenalainen sodankäynti. Turku 22.11.2016, Merivoimien esikunta. Esitysmateriaali. Merivoimien hankeseminaari. 62 s.
- [12] Kari, M., Hakala, A., Pääkkönen, E. & Pitkänen, M. (toim.). *Sotatekninen arvio ja ennuste 2025, Osa 1*. Ylöjärvi: Puolustusvoimien Teknillinen Tutkimuslaitos, 2008. 563 s. ISBN 978-951-25-1889-0.
- [13] Kenttäohjesääntö 3.2 Merioperaatiot (KO 3.2). Helsinki: Pääesikunta, 2015.
- [14] L 11.5.2007/551. Laki puolustusvoimista. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2007/20070551>

- [15] Lappalainen, E., Jormakka, J. *Katsaus tekniikan tutkimusmenetelmiin Maanpuolustuskorkeakoulussa*. Tiede ja ase, 2003. Nro 61, s. 202–232. ISSN 0358-8882.
Saatavissa: <https://journal.fi/ta/article/view/47874/13749>
- [16] Lappalainen, E., Jormakka, J. *Tekniset tutkimusmenetelmät Maanpuolustuskorkeakoulussa*. Verkkopainos. Helsinki: Maanpuolustuskorkeakoulu, Tekniikan laitos, 2004. 154 s. ISBN 951-25-1540-7.
- [17] Lehtinen, M. *Matemaattinen analyysi sotatekniikan tutkimusmenetelmänä*. Kirjassa: Lappalainen, E., Jormakka, J. (toim.). *Tekniset tutkimusmenetelmät Maanpuolustuskorkeakoulussa*. Verkkopainos. Helsinki: Maanpuolustuskorkeakoulu, Tekniikan laitos, 2004. 154 s. ISSN 1795-3294.
- [18] Lehtinen, M. *Pieni Simulointikirja: Simuloinnin Alkeita Taulukkolaskennan Avulla*. Helsinki: Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan laitos, 2004. 30 s. ISBN 951-25-1555-5.
- [19] Lempiäinen, J. *Taistelun ja logistiikan simulointi*. Ylöjärvi: Puolustusvoimien Teknillinen Tutkimuslaitos, 2005. 40 s. ISBN 951-25-1606-3
- [20] Merimiinoitusopas. Tampere: Merivoimien esikunta, 2017.
- [21] Mine & Obstacle Avoidance Sonar. Thales Group. [viitattu 10.4.2018] Saatavissa: <https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/defence/moas-mine-obstacle-avoidance-sonar>
- [22] Mitzenmacher, M., Upfal, E. *Probability and Computing*. Cambridge: The Press Syndicate of The University of Cambridge, 2005. 352 s. ISBN 0 521 83540 2
- [23] Monks, T., Currie, C. S. M., Onggo, B. S., Robinson, S., Kunc, M. & Taylor, S. J. E. *Strengthening the reporting of empirical simulation studies: Introducing the STRESS guidelines*. Journal of Simulation. 2018. [viitattu 29.3.2018].
Saatavissa: <https://doi.org/10.1080/17477778.2018.1442155>
- [24] Naval Today. *Three bidders in play for Poland's Orka submarine program*. [viitattu 24.3.2018] Saatavissa: <https://navaltoday.com/2018/01/04/three-bidders-in-play-for-polands-orka-submarine-program/>
- [25] Naval Today. *Poland decommissions first Kobben-class submarine ORP Kondor*. [viitattu 24.3.2018] Saatavissa: <https://navaltoday.com/2017/12/20/poland-decommissions-first-kobben-class-submarine-orp-kondor/>

- [26] Naval Today. *Poland's sole Kilo submarine catches fire in dock*. [viitattu 24.3.2018]
Saataavissa: <https://navaltoday.com/2017/10/31/polands-sole-kilo-submarine-catches-fire-in-dock/>
- [27] Niiniluoto, I. *Johdatus tieteenfilosofiaan*. 3. painos. Helsinki: Otava, 1980. 314 s.
ISBN: 951-1-14831-1.
- [28] Niiniluoto, I. *Tiede, filosofia ja maailmankatsomus*. 1. painos. Helsinki: Otava, 1984.
358 s. ISBN: 951-1-08016-4.
- [29] Pantsar, L. *Upseerikoulutuksen tieteellisyydestä*. Kirjassa: Lappalainen, E., Jormakka, J. (toim.). *Tekniset tutkimusmenetelmät Maanpuolustuskorkeakoulussa*. Verkkopainos. Helsinki: Maanpuolustuskorkeakoulu, Tekniikan laitos, 2004. 154 s. ISSN 1795-3294.
- [30] Poikonen, A. *Merivoimien sonar -järjestelmien valinnan teknisiä perusteita: Laivue 2000 MLU, Laivue 2020*. Merisotakoulun tutkimusraportti no 41/2017. 21 s.
- [31] Poikonen, A. *Taistelualuksen vedenalainen omasuoja: Akustisen herätteen vaatimustason asettaminen*. Merisotakoulun tutkimusraportti no 40/2016. 42 s.
- [32] Rawson K.J., Tupper E.C. *Basic Ship Theory Volume 2*. 3rd edition. Harlow, England: Longman Scientific & Technical, 1984. 701 s. ISBN 0-582-30527-6
- [33] Raunu, M. ja Palokangas, M. *Länsimainen merisodan kuva 2035*. Puolustusvoimien tutkimuslaitos. Tutkimuskatsaus 05 – 2015.
- [34] Ronkainen, S., Pehkonen, L., Lindblom-Yläne, S. & Paavilainen, E. *Tutkimuksen voimasanat*. 1. painos. Helsinki: WSOYpro, 2011. 198 s. ISBN 978-951-0-31610-8.
- [35] Ross, D. & Kakko, T. (suom.) *Maailman parhaat sukellusveneet kautta aikojen*. Helsinki: Minerva, 2017. 224 s. ISBN 978-952-312-436-3
- [36] Ruokolainen, M. *Venäjän Itämeren laivaston merimiinoituskyvyn kehitysnäkymät ja taktiset käyttöperiaatteet*. Pro gradu -tutkielma. Helsinki, 2017. Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotataidon laitos. 71 s.
- [37] *Sukellusveneentorjuntaopas*. Vammala: Puolustusvoimien Koulutuksen Kehittämiskeskus, 2001. 119 s. PUMA 7610-448-7255
- [38] Suominen, T. *Vedenalaisen sodankäynnin konsepti -tutkimus*. Merisotakoulun tutkimusraportti 2/2017. 59 s.
- [39] Sweden - Navy. Jane's World Navies. Posted 21-Mar-2018. [viitattu 11.4.2018].
Saataavissa: <https://janes.ihs.com/Janes/Display/jwna0144-jwna>

- [40] *Syvytetettävän herätemiinan (SYHEMI) kehitystyö*. Turku 1.12.2016, Merivoimien esikunta. Tutkimustyötilaus. DM8790.
- [41] Teittinen, K. *Merellisen taistelutilan mallinnus*. Diplomityö. Helsinki, 2015. Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan laitos. 87 s.
- [42] Tupper, E.C. *Introduction to naval architecture*. Fifth Edition. Oxford: Elsevier Ltd, 2013. 476 s. ISBN 978-0-08-098237-3.
- [43] Type 212A [verkkajulkaisu]. IHS Jane's Fighting Ships. London: IHS. Posted 15-Feb-2017 [viitattu 27.3.2018]. Saatavissa: http://janes.ihs.com/Janes/Display/jfs_4100-jfs
- [44] Valkola, E. *Kirjallisuustutkimus tutkimusmenetelmänä*. Kirjassa: Lappalainen, E., Jorimakka, J. (toim.). Tekniset tutkimusmenetelmät Maanpuolustuskorkeakoulussa. Verkko-painos. Helsinki: Maanpuolustuskorkeakoulu, Tekniikan laitos, 2004. 154 s. ISSN 1795-3294.
- [45] Wikipedia contributors. *Charles Sanders Peirce* [Internet-artikkeli]. Wikipedia, The Free Encyclopedia. [viitattu 10.4.2018]. Saatavissa: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Charles_Sanders_Peirce&oldid=830132967/

LIITELUETTELO

LIITE 1: Tärkeimmät käsitteet ja määritelmät

LIITE 2: Skenaario 1:n simulaatiotulokset, tunnusluvut ja lähtöarvot

Merimiina on veden pinnalle, määrätylle syvyydelle tai pohjaan laskettu räjähtävä laite, jonka tarkoituksena on vaurioittaa tai upottaa aluksia vaikuttamalla niiden vedenalaiseen runkoon. Pelkällä olemassaolollaan merimiinoilla voidaan ehkäistä määrätyn merialueen käyttö. Merimiina on yleiskäsite sekä kosketus- että herätemiinoille. [20], s. 62]

Herätemiina on aluksen ympäristöönsä aiheuttamasta poikkeamasta eli herätteestä tai usean herätteen yhdistelmästä laukeava merimiina, jonka laukeaminen ei edellytä fyysisistä kosketusta aluksen ja miinan välillä. Herätemiina sijaitsee yleensä välivedessä ankkuroituna, syvytettyinä herätemiinanä, tai merenpohjassa pohjamiinana. [20], s. 60]

Kosketusmiina on aluksen fyysisestä kosketuksesta laukeava miina. Kosketuksen indikoiminen ja siten miinan räjähtäminen perustuu yleisimmin miinan sarveen, erilliseen kosketuspuikkoon tai antenniin koskettamiseen. Myös koskettaminen miinan kohoon voi laukaista miinan. [20], s. 61]

Simulointi on termi, jolla tarkoitetaan jäljittelyä, mallintamista sekä asioiden ratkaisemista virtuaalisessa ympäristössä. [19], s. 4]

Sukellusveneentorjunta (*SUTO, anti-submarine warfare, ASW*) koostuu sukellusveneen etsinnästä, havaitsemisesta ja paikantamisesta sekä torjuntatoimenpiteistä. Sukellusveneentorjunnan tavoitteena on sukellusveneen toiminnan estäminen tai sukellusveneen tuhoaminen. [37], s. 10]

Sukellusveneentorjuntamiinoite on merimiinoite, joka on suunniteltu erityisesti sukellusveneitä vastaan. Miinoitteen tehtävänä on estää sukellusveneiden pääsy oman toiminnan kannalta tärkeille alueille. [20], s. 66]

Miinoitteen estearvo kuvaa miinoitteen kokonaistehokkuutta. Miinoitteen estearvo koostuu kuvassa 1 esitetyistä osatekijöistä: miinaanajon todennäköisyydestä, miinan räjähdevaikutuksesta maalialuksessa, miinoitteen raivauksen kestosta sekä miinan toimintavarmuudesta. [20], s. 59]

Vedenalaisella sodankäynnillä tarkoitetaan Merivoimien aselajien ja muiden merellisten viranomaisten suorituskyvyistä koostuvaa kokonaisuutta. Kokonaisuudella mahdollistetaan vedenalaisen taistelutilan alueellinen hallinta, kiistetään viholliselta taistelutilan herruus, turvataan omien joukkojen toimintaedellytykset vedenalaista uhkaa vastaan sekä kiistetään vihollisen vedenalaisten aseiden ja järjestelmien käyttö. [38], s. 54]

X't	Y't	Hylätty	SUVEa	VAURIO	TUHO	TUHO%	TUH/VAU	VAURIO	TUHO	TUHO%	TUH/VAU	TUHOYHT	T/V YHT
13345	20000	6655	13345	711	1357	0,1017	0,1550	690	1295	0,0970	0,1487	0,1987	0,3037
13304	20000	6696	13304	755	1326	0,0997	0,1564	707	1281	0,0963	0,1494	0,1960	0,3058
13243	20000	6757	13243	719	1255	0,0948	0,1491	723	1277	0,0964	0,1510	0,1912	0,3001
13329	20000	6671	13329	688	1317	0,0988	0,1504	701	1313	0,0985	0,1511	0,1973	0,3015
13258	20000	6742	13258	773	1286	0,0970	0,1553	681	1273	0,0960	0,1474	0,1930	0,3027
13245	20000	6755	13245	686	1224	0,0924	0,1442	752	1282	0,0968	0,1536	0,1892	0,2978
13417	20000	6583	13417	697	1268	0,0945	0,1465	753	1297	0,0967	0,1528	0,1912	0,2992
13446	20000	6554	13446	733	1305	0,0971	0,1516	741	1331	0,0990	0,1541	0,1960	0,3057
13332	20000	6668	13332	695	1283	0,0962	0,1484	714	1320	0,0990	0,1526	0,1952	0,3009
13418	20000	6582	13418	723	1230	0,0917	0,1456	714	1314	0,0979	0,1511	0,1896	0,2967
13313	20000	6687	13313	751	1252	0,0940	0,1505	721	1293	0,0971	0,1513	0,1912	0,3017
13292	20000	6708	13292	735	1356	0,1020	0,1573	716	1327	0,0998	0,1537	0,2019	0,3110
13390	20000	6610	13390	770	1322	0,0987	0,1562	676	1236	0,0923	0,1428	0,1910	0,2990
13275	20000	6725	13275	761	1274	0,0960	0,1533	699	1235	0,0930	0,1457	0,1890	0,2990
13283	20000	6717	13283	690	1290	0,0971	0,1491	701	1303	0,0981	0,1509	0,1952	0,2999
13305	20000	6695	13305	701	1321	0,0993	0,1520	675	1268	0,0953	0,1460	0,1946	0,2980
13399	20000	6601	13399	709	1259	0,0940	0,1469	734	1308	0,0976	0,1524	0,1916	0,2993
13380	20000	6620	13380	701	1303	0,0974	0,1498	692	1213	0,0907	0,1424	0,1880	0,2922
13356	20000	6644	13356	655	1257	0,0941	0,1432	697	1296	0,0970	0,1492	0,1912	0,2924
13286	20000	6714	13286	679	1303	0,0981	0,1492	692	1254	0,0944	0,1465	0,1925	0,2956
13375	20000	6625	13375	749	1275	0,0953	0,1513	724	1297	0,0970	0,1511	0,1923	0,3024
13357	20000	6643	13357	711	1339	0,1002	0,1535	705	1287	0,0964	0,1491	0,1966	0,3026
13372	20000	6628	13372	722	1270	0,0950	0,1490	719	1328	0,0993	0,1531	0,1943	0,3020
13213	20000	6787	13213	682	1308	0,0990	0,1506	694	1269	0,0960	0,1486	0,1950	0,2992
13391	20000	6609	13391	740	1311	0,0979	0,1532	730	1253	0,0936	0,1481	0,1915	0,3012
13299	20000	6701	13299	739	1317	0,0990	0,1546	734	1234	0,0928	0,1480	0,1918	0,3026
13279	20000	6721	13279	738	1244	0,0937	0,1493	694	1250	0,0941	0,1464	0,1878	0,2957
13328	20000	6672	13328	719	1273	0,0955	0,1495	716	1258	0,0944	0,1481	0,1899	0,2976
13254	20000	6746	13254	728	1259	0,0950	0,1499	668	1246	0,0940	0,1444	0,1890	0,2943
13230	20000	6770	13230	725	1227	0,0927	0,1475	685	1277	0,0965	0,1483	0,1893	0,2958
13320	20000	6680	13320	693	1292	0,0970	0,1490	714	1284	0,0964	0,1500	0,1934	0,2990
13314	20000	6686	13314	626	1270	0,0954	0,1424	692	1330	0,0999	0,1519	0,1953	0,2943

13313	20000	6687	13313	719	1313	0,0986	0,1526	697	1286	0,0966	0,1490	0,1952	0,3016
13311	20000	6689	13311	700	1328	0,0998	0,1524	704	1256	0,0944	0,1472	0,1941	0,2996
13179	20000	6821	13179	682	1343	0,1019	0,1537	677	1232	0,0935	0,1449	0,1954	0,2985
13268	20000	6732	13268	687	1278	0,0963	0,1481	699	1294	0,0975	0,1502	0,1938	0,2983
13399	20000	6601	13399	719	1231	0,0919	0,1455	703	1343	0,1002	0,1527	0,1921	0,2982
13397	20000	6603	13397	696	1248	0,0932	0,1451	761	1249	0,0932	0,1500	0,1864	0,2951
13240	20000	6760	13240	716	1263	0,0954	0,1495	690	1247	0,0942	0,1463	0,1896	0,2958
13360	20000	6640	13360	708	1277	0,0956	0,1486	745	1322	0,0990	0,1547	0,1945	0,3033
13406	20000	6594	13406	730	1268	0,0946	0,1490	721	1326	0,0989	0,1527	0,1935	0,3017
13333	20000	6667	13333	701	1275	0,0956	0,1482	712	1274	0,0956	0,1490	0,1912	0,2972
13355	20000	6645	13355	664	1277	0,0956	0,1453	679	1277	0,0956	0,1465	0,1912	0,2918
13459	20000	6541	13459	679	1315	0,0977	0,1482	744	1320	0,0981	0,1534	0,1958	0,3015
13288	20000	6712	13288	674	1275	0,0960	0,1467	690	1277	0,0961	0,1480	0,1921	0,2947
13418	20000	6582	13418	709	1274	0,0949	0,1478	728	1352	0,1008	0,1550	0,1957	0,3028
13332	20000	6668	13332	734	1312	0,0984	0,1535	727	1331	0,0998	0,1544	0,1982	0,3078
13254	20000	6746	13254	705	1276	0,0963	0,1495	706	1319	0,0995	0,1528	0,1958	0,3022
13302	20000	6698	13302	666	1299	0,0977	0,1477	711	1297	0,0975	0,1510	0,1952	0,2987
13218	20000	6782	13218	690	1350	0,1021	0,1543	693	1269	0,0960	0,1484	0,1981	0,3028
13249	20000	6751	13249	735	1231	0,0929	0,1484	688	1248	0,0942	0,1461	0,1871	0,2945
13342	20000	6658	13342	742	1289	0,0966	0,1522	731	1289	0,0966	0,1514	0,1932	0,3036
13233	20000	6767	13233	721	1242	0,0939	0,1483	703	1298	0,0981	0,1512	0,1919	0,2996
13393	20000	6607	13393	759	1242	0,0927	0,1494	714	1234	0,0921	0,1454	0,1849	0,2949
13268	20000	6732	13268	700	1323	0,0997	0,1525	705	1273	0,0959	0,1491	0,1957	0,3016
13296	20000	6704	13296	757	1298	0,0976	0,1546	732	1310	0,0985	0,1536	0,1961	0,3081
13248	20000	6752	13248	689	1208	0,0912	0,1432	716	1272	0,0960	0,1501	0,1872	0,2933
13251	20000	6749	13251	726	1266	0,0955	0,1503	713	1236	0,0933	0,1471	0,1888	0,2974
13380	20000	6620	13380	731	1303	0,0974	0,1520	740	1281	0,0957	0,1510	0,1931	0,3031
13260	20000	6740	13260	733	1325	0,0999	0,1552	674	1252	0,0944	0,1452	0,1943	0,3005
13288	20000	6712	13288	676	1231	0,0926	0,1435	697	1289	0,0970	0,1495	0,1896	0,2930
13371	20000	6629	13371	793	1265	0,0946	0,1539	690	1265	0,0946	0,1462	0,1892	0,3001
13416	20000	6584	13416	725	1271	0,0947	0,1488	717	1222	0,0911	0,1445	0,1858	0,2933
13421	20000	6579	13421	692	1252	0,0933	0,1448	706	1303	0,0971	0,1497	0,1904	0,2945

13321,8	20000,0	6678,2	13321,8	713,5	1283,1	0,0963	0,1499	708,9	1282,4	0,09626	0,14947	0,19258	0,29935	KESKIARVO
65,4	-	65,4	65,4	30,8112	35,0527	0,0027	0,0036	21,2079	32,4676	0,00232	0,00307	0,00344	0,00411	KESKIHAJONTA
16,3	-	16,3	16,3	7,6964	8,7559	0,0007	0,0009	5,2976	8,1102	0,00058	0,00077	0,00086	0,00103	LUOTTAMUSVÄLI 5%
13305	-	6661,8	13305	705,77	1274,38	0,0956	0,1490	703,56	1274,26	0,09568	0,14870	0,19172	0,29832	LUOTT.V. ALARAJA
13338	-	6694,5	13338	721,17	1291,90	0,0970	0,1508	714,16	1290,49	0,09684	0,15023	0,19344	0,30037	LUOTT.V. YLÄRAJA
13179	20000,0	6541,0	13179	626,00	1208,00	0,0912	0,1424	668,00	1213,00	0,09066	0,14238	0,18487	0,29180	MINIMI
13459	20000,0	6821,0	13459	793,00	1357,00	0,1021	0,1573	761,00	1352,00	0,10076	0,15502	0,20185	0,31101	MAKSIMI
13314	20000,0	6686,5	13314	713,50	1276,50	0,0960	0,1494	706,00	1281,50	0,09641	0,14944	0,19238	0,29926	MEDIAANI

LÄHTÖARVOT

ETÄISYYS POHJASTA		SYVÄNTEEN		SYHEMI		SUVE	MIINOJEN VAIKUTUSALUE	
pysty	sivuttais	syvyys	leveys	r-tuhoava	r-vaurio	säde (r)	kosketus-	pohja-
0	0	100	200	15	5	5,191339	0	100