

TIIVISTELMÄRAPORTTI

Vastakkainasettelullinen riskianalyysi asejärjestelmien vaikuttavuusarvioinnissa

Ahti Salo, Aalto Yliopisto, ahti.salo@aalto.fi, +358-50-383 0636
Juho Roponen, Aalto Yliopisto

Vaikuttavuusarviointia tarvitaan asejärjestelmien strategisten hankintapäätösten valmistelussa sekä taktisten ja operatiivisten toimenpiteiden suunnittelussa. Usein näitä järjestelmiä ja toimintatapoja ei voida kuitenkaan testata todellisessa toimintaympäristössä, koska kehitys ja hankinnat tapahtuvat rauhan aikana usein jopa vuosia ennen käyttöönottoa. Tästä syystä päätösvaihtoehtoja punnitessa on tarpeen turvautua erilaisiin mallinnusmenetelmiin vaikutusten arvioimiseksi. Vastakkainasettelullinen riskianalyysi mahdollistaa myös vastapuolen päätöksenteon huomioimisen matemaattisessa mallinnuksessa.

Erityisesti, olemme tässä tutkimuksessa keskittyneet spatiaaliseen päätöksentekoon sekä toiminnan sijoittamiseen että siirtymäreittien näkökulmasta. Olemme myös soveltaneet menetelmiä todentuntuiseen esimerkkitarkasteluun, jossa merivoimien alus pyrkii suorittamaan ammus- ja polttoainetäydennyksen alueella toimivalta viholliselta turvassa. Kehitetyt menetelmät soveltuvat myös muihin toimintaympäristöihin.

1. Johdanto

Vaikuttavuusarviointia tarvitaan asejärjestelmien strategisten hankintapäätösten valmistelussa sekä taktisten ja operatiivisten toimenpiteiden suunnittelussa. Asevaikutusten riittävän tarkka mallintaminen ei ole pelkästään tekninen ongelma, koska iso osa järjestelmien tehosta tulee hyvistä käyttöperiaatteista ja kohdetta koskevasta tiedosta. Lisäksi asejärjestelmät usein tulevat käyttöön vasta vuosia hankinta-päätösten jälkeen, jolloin niiden toimintaympäristö poikkeaa nykyisestä, koska myös vastapuoli on ehtinyt kehittää omia järjestelmiään ja toimintaansa. Siksi on ensiarvoisen tärkeää, että tulevaisuuden taistelukenttää mallinnettaessa pystytään ottamaan huomioon myös ihmisen tai muun älykkään toimijan rooli osana järjestelmien käyttöä. Tällaisia epävarmuuksia ei voida käsitellä arvioimalla päätösvaihtoehtoja perinteisen skenaarioanalyysin keinoin (Bunn ja Salo, 1993), sillä vastapuolen päätöksiin voidaan reagoida vaiheistetusti ajan edetessä. Kysymyksessä on ajan kuluessa muuttuva peliteoreettinen asetelma.

Vastakkainasettelullinen riskianalyysi (ARA, adversarial risk analysis) (Rios Insua et al., 2009; Roponen ja Salo, 2015) tarjoaa peliteoriaan pohjautuvan lähestymistavan vastapuolen toimintaan liittyvien epävarmuuksien käsittelemiseksi. Tyypillisesti vastakkainasettelullisissa riskianalyyseissä

1. tunnistetaan ja kuvataan omat ja vastapuolen tavoitteet;
2. yhdistellään tietoa eri lähteistä (ml. simulointimallit, asiantuntija-arviot) ja muodostetaan näistä perusteltu tilannekuva;
3. tehdään peliteoreettinen tarkastelu, joka syventää vastapuolen käyttäytymisestä koskevaa ymmärrystä.

Tutkimuskenttänä vastakkainasettelullinen riskianalyysi on verraten uusi. Sitä voidaan so-

veltaa eri yhteyksissä (ml. strategiset hankintapäätökset sekä taktiset ja operatiiviset päätökset). Sillä on potentiaalia varsinkin taistelumallinnuksen yhteydessä, jossa vastapuolen tavoitteet, tilannekuva ja resurssit osaltaan määrittävät, mitä vastapuoli luultavimmin tekee.

2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

Tutkimuksen tavoitteena oli tuottaa perusteltu arvio siitä, miltä osin ja missä määrin vastakkainasettelullinen riskianalyysi on puolustusvoimien kannalta varteenotettava lähestymistapa asejärjestelmien vaikuttavuusarvioinnin tukena. Tämä arvio sisältää itsessään käyttökelpoista tietoa ja varmistaa osaltaan, että vastakkainasettelullista riskianalyysiä kehitetään ja hyödynnetään sille otollisissa sovelluskohteissa. Lisäksi tavoitteena oli tuoda vastakkainasettelullista riskianalyysiä Puolustusvoimien tietoisuuteen.

Tieteellisestä näkökulmasta tutkimuksen tavoitteena oli tuottaa menetelmiä ja työvälineitä, joiden pohjalta puolustusvoimien taistelumalleja ja niiden käyttöä voidaan kehittää tuomalla niihin peliteoriaan, robustiin päätösanalyysiin ja stokastiseen optimointiin perustuvia toiminnallisuuksia. Kehitystyö toteutetaan siten, että nämä toiminnallisuudet ovat taistelumallien lisäksi myös asiantuntija-arviointiprosessien kautta toteutettavissa (ks. Kangaspunta ja Salo, 2014).

Uusina menetelmällisinä tulokulmina lähdettiin käsittelemään erityisesti aikaan ja paikkaan liittyviä epävarmuuksia realistisessa analyysikohteessa. Tavoitteena oli löytää robusteja (kaikilla vaihtoehdoilla oletuksilla verrattain hyviä) päätösvaihtoehtoja joukkojen liikkeelle ja sijoittelulle tilanteissa, joissa vastustajan toiminnasta on saatavilla vain vähän tietoa. Tämä valikoitui tutkimuksen painopisteeksi juuri analysoitavan tilanteen haasteellisuuden vuoksi. Päätösvaihtoehtojen vertailu asiantuntijaprosessilla muuttuu lähes mahdottomaksi, kun vaihtoehtojen erojen hahmottaminen on vaikeaa.

Tutkimuksessa on tehty myös todentuntuinen esimerkkitarcastelu, jonka tavoitteena oli arvioida menetelmän käytettävyyttä monimutkaisiin käytännön ongelmiin. Esimerkkitarcastelun aiheeksi valittiin Meritaistelukeskuksen toivomuksesta ja yhteisymmärryksessä tutkimuksen seurantaryhmän kanssa saaristossa tapahtuvan alustäydennyksen suojaaminen miehittämättömillä ilma-aluksilla (UAV, unmanned aerial vehicle) tapahtuvalta tiedustelulta ja meritorjuntaohjuksien aiheuttamalta uhalta.

3. Aineisto ja menetelmät

Vastakkainasettelullinen riskianalyysi (ARA) on tutkimuskenttä, joka yhdistää riskianalyysiä, päätösanalyysiä ja peliteoriaa. Se tuottaa menetelmiä, jotka mahdollistavat riskien kartoittamisen ja riskienhallintatoimenpiteiden valinnan tilanteissa, joissa useampi omia tavoitteitaan ajava toimija tekee päätöksiä. Eri osapuolten päätökset vaikuttavat kaikkien osapuolten lopputuloksiin (Banks et al., 2015). ARAlla on etuja muihin vaihtoehtoihin menetelmiin verrattuna, koska perinteinen riski-analyysi ei huomioi vihamielistä toimintaa. Klassisessa peliteoriassa tehdään yleensä vahvoja oletuksia jaetusta tiedosta ratkaisujen löytämiseksi. Päätösanalyysi yksinään ei tarjoa keinoja vastustajan toiminnan arviointiin (Keeney, 2007). ARAlla ei ole samoja rajoituksia kuin niillä yksittäisillä menetelmillä, joihin se tukeutuu.

Tässä tutkimuksessa olemme keskittyneet aika- ja paikkaepätietoisuudesta syntyviin ongelmiin, mikä on ARAssa aikaisemmin ollut vähemmällä huomiolla. Erityisesti, olemme keskittyneet aikakriittisten kohteiden suojan parantamiseen älykkäällä sijainnin- ja reitinvalinnalla. Lisäksi olemme kehittäneet työkaluja, joilla voidaan mallintaa laivojen liikettä ja niihin kohdistuvaa tiedustelu-uhkaa ympäristössä, jossa niiden liike on rajoitettu, kuten saaristossa. Osiot 3.1 ja 3.2 käsittelevät kehitettyjä teoreettisia malleja ja osiossa 4 on kuvattu mallien soveltaminen todentuntuiseen esimerkkitarcasteluun.

3.1 Aikakriittisten kohteiden suojaaminen sijainnin valinnalla

Aikakriittiset kohteet (eng. Time Critical Target) ovat kohteita jotka ovat haavoittuvia tai joihin voidaan vaikuttaa ainoastaan rajatussa aikaikkunassa. Kohde on kyettävä löytämään, paikantamaan, tunnistamaan ja eliminoimaan verrattain lyhyessä ajassa. Aikarajoite korostaa voimakkaasti kohteen löytämisen ja paikantamisen merkitystä tappoketjun onnistumisessa, koska niihin kuluu eniten aikaa. Näin ollen aikakriittisten kohteiden piilotaminen viholliselta on erittäin tehokas keino turvallisuuden lisäämiseksi.

Keskitymme tässä yhteydessä tarkastelemaan aikakriittistä kohdetta, jonka sijainti voidaan valita tietyissä rajoissa suhteellisen vapaasti. Sijainnin valinnalla voidaan ennen kaikkea vaikuttaa vihollisen kykyyn löytää ja paikantaa kohde sekä vaikuttaa siihen. Luonnollisesti sijainnilla on myös merkittävä vaikutus kohteen kykyyn suorittaa tehtäväänsä sekä ylläpitää tilannetietoisuutta ja suojata itseään, mutta tarkastelun yleisluontoisuuden vuoksi sivuutamme ne tässä yhteydessä. Ne on kuitenkin syytä ottaa huomioon käytännön soveluksissa.

Karkeasti jaoteltuna kohteen tuhoutumistodennäköisyys p_k on siis jaettavissa kahteen tekijään

$$p_k = p_f \cdot p_t, \quad (1)$$

joista p_f kuvaa kohteen löytymistodennäköisyyttä ja p_t sen tuhoutumistodennäköisyyttä, kun se on löydetty ja paikannettu. Parhaan sijainnin valinta voidaan ajatella optimointitehtävänä, jossa p_k minimoidaan kohteen mahdollisten sijoituspaikkojen tai -alueen yli.

Löydetyn kohteen tuhoutumistodennäköisyyden minimoiminen sijainnin funktiona on yleensä verrattain suoraviivaista (joskin usein teknisesti haastavaa). Automatisoitu simulointi- tai muu laskentatyökalu voi ottaa syötteenä relevantin tiedon tarkasteltavasta alueesta digitaalisina karttoina ja laskea, miten vaikeaa vihollisen on vaikuttaa eri kohteisiin. Yksinkertainen esimerkki löytyy osiosta 4. Vihollisen päätöksenteon huomioiminenkaan ei tällaisessa laskennassa ole erityisen vaikeaa, koska vihollisen voidaan olettaa valitsevan tarkoituksenmukaisin asejärjestelmä kohdesijainti huomioon ottaen.

Vaikeasti paikannettavan sijainnin löytäminen sen sijaan on huomattavasti haastavampaa, koska niin paljon riippuu vihollisen toiminnasta. Jos vihollinen tietää tai pystyy ennustamaan riittävän tarkasti, mistä kohdetta kannattaa etsiä, on sen löytäminen kohdetiedustelulla vain ajan kysymys, vaikka se olisi kuinka suojaisessa sijainnissa. Tarvitaan siis paras vaikeasti ennustettava sijainti. Tämä vaatimus tarkoittaa, että mikään optimointimalli, joka tuottaa vain yhden oikean sijainnin ei voi olla toimiva, vaan mallin on tuotettava satunnainen sijoituspaikka. Olemme käsitelleet asiaa laajemmin projektin vuoden 2018 tiivistelmäraportissa (Salo & Roponen, 2018). Kun mahdolliset sijoituspaikat ovat riittävän hajautettuja maantieteellisesti, tulee kaikkien mahdollisuuksien läpikäymisestä kohdetiedustelulla mahdotonta ottaen huomioon rajatun aikaikkunan. Lyhyt aikaikkuna auttaa myös satelliitti- ja muuta laajalla alalle soveltuvaa tiedustelua vastaan, koska yleensä näillä ei pystytä tuottamaan jatkuvaa valvontakykyä ainakaan kokoaikaisesti.

3.2 Liikkeen suojaaminen reittivalinnalla

Liikkuvat kohteet jakavat monia yhtäläisyyksiä paikallaan olevien aikakriittisten kohteiden kanssa. Marsilla olevat joukot ovat usein haavoittuvampia, koska ne eivät kykene nauttimaan valmistellun puolustuksen ja linnoitusten tarjoamista eduista, ja ovat näin ollen otollisia kohteita vihollisen vaikuttamiselle. Turvallisuutta kuitenkin lisää se, että liikkuvan kohteen tarkka paikantaminen on usein haastavaa.

Samaan tapaan kuin paikallaan olevien kohteiden sijaintivaihtoehtojen myös siirtymäreittien suojaisuuden arvioiminen on suoraviivaista automatisoida. Laskennassa voidaan huomioida sekä kohteen havainnoinnin vaikeus että vihollisen kyky vaikuttaa eri sijainteihin

reitillä. Suomesta saatavilla olevat laajat elektroniset kartta-aineistot tukevat tehtävää. Laskenta-algoritmi voi käydä läpi kaikki käytettävissä olevat kulkuväylät ja laskea suojaisuuden niiden eri osille. Maalla liikuttaessa tieosuudet muodostavat usein luontevan jaon kulkuväylien osille, ja merellä ja ilmassa voidaan muodostaa tiheä verkko kuvaamaan käytettävissä olevia kulkureittejä.

Liikkuvan kohteen tuhoutumistodennäköisyys reitillä voidaan laskea reitin eri osien i perusteella.

$$p_k = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_{k,i}), \quad (2)$$

missä $p_{k,i}$ ovat tuhoutumistodennäköisyydet reitin eri osilla ehdolla, että kohde ei ole tuhoutunut ennen sitä. Turvallisimman reitin etsiminen voidaan ratkaista siis optimointiongelmana minimoimalla kokonaisriskiä valitun reitin yli. Tämä on mahdollista tehdä tehokkaasti muuntamalla kaava (2) logaritmiseen muotoon

$$\log(1 - p_k) = \log\left(\prod_{i=1}^n (1 - p_{k,i})\right) = \sum_{i=1}^n \log(1 - p_{k,i}), \quad (3)$$

Missä $\log(1 - p_k)$ on logaritmi kohteen kokonaisselviämistodennäköisyydestä. Koska tuhoutumistodennäköisyys on mahdollista esittää summana reitin eri osille helposti laskettavissa olevista tekijöistä, voidaan reitin etsintään käyttää samanlaisia hakualgoritmeja kuin lyhimmän tai nopeimman reitin etsintään. Nämä algoritmit toimivat pääsääntöisesti graafeissa, joissa solmujen välisten kaarien kustannuksina toimivat etäisyydet tai kulkuajat, mutta me voimme asettaa kustannuksiksi c_i selviämistodennäköisyyksien logaritmit

$$c_i = -\log(1 - p_{k,i}). \quad (4)$$

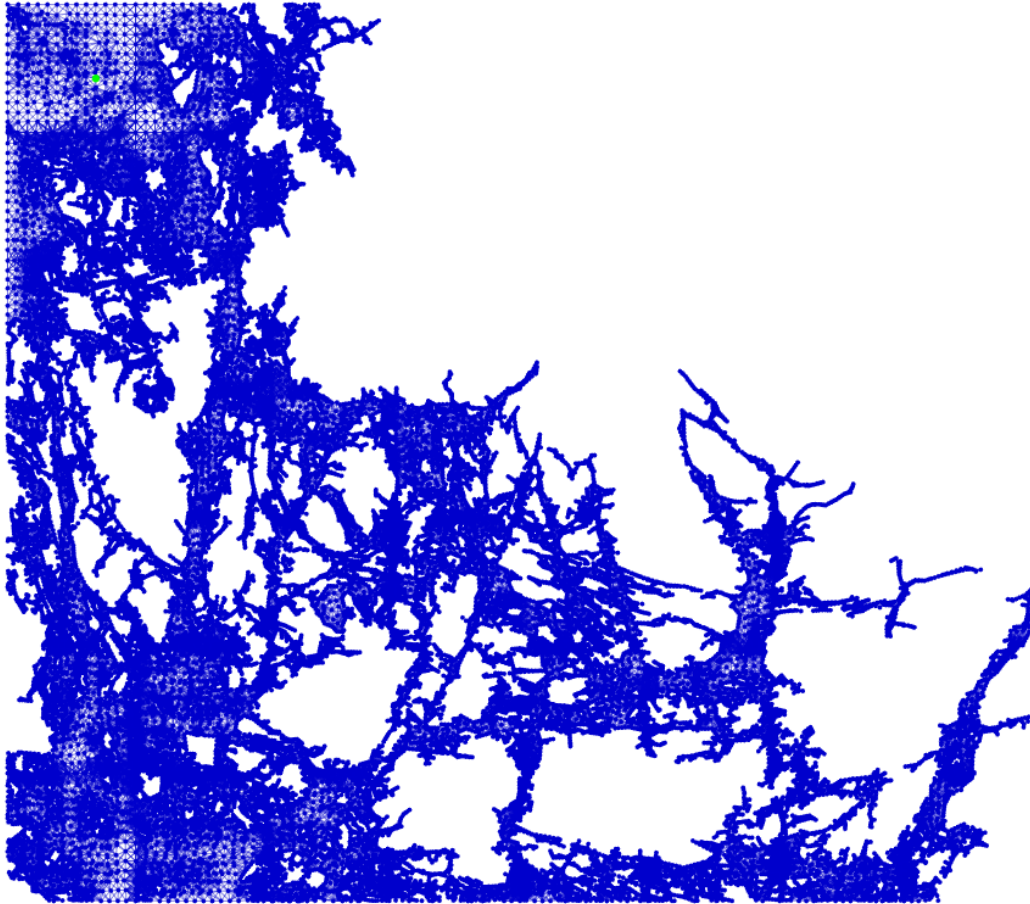
Logaritmin eteen lisätään miinusmerkki, koska me haluamme maksimoida selviämistodennäköisyyttä emmekä minimoida, kuten esimerkiksi matkojen kanssa usein tehdään. Tämä myös tekee kaarien painoista positiivisia, koska logaritmi luvusta välillä $]0,1[$ on aina negatiivinen.

4. Tulokset ja pohdinta

Kehitettyä menetelmää testattiin soveltamalla sitä todentuntuiseen esimerkkiin, jossa merivoimien alusta suojataan vihollisen tiedustelulta ja meritorjuntaohjuksilta. Esimerkissä yksi alus lähtee operaatioalueelta saariston suojaan hakemaan ammustäydennyksiä. Siellä alus kohtaa huoltoalueen, ja ne ankkuroituvan rinnakkain täydennyksen ajaksi. Aluksien ei ole mahdollista liikkua, joten ne ovat erityisen alttiita vihollisen asejärjestelmille, mikäli ne löydetään. Saaristo kuitenkin suojaa aluksia pinta-tutkilta ja valtaosalta muista sensoreista. Suurin uhka aluksille muodostuu ilmasta käsin tapahtuvasta tiedustelusta ja erityisesti miehittämättömistä ilma-aluksista. Tarkastelussa keskityttiin selvittämään, miten huoltotäydennys saadaan suoritettua siten, että alusten tuhoutumistodennäköisyys on mahdollisimman pieni.

4.1 Alustäydennyksen sijainnin valinta

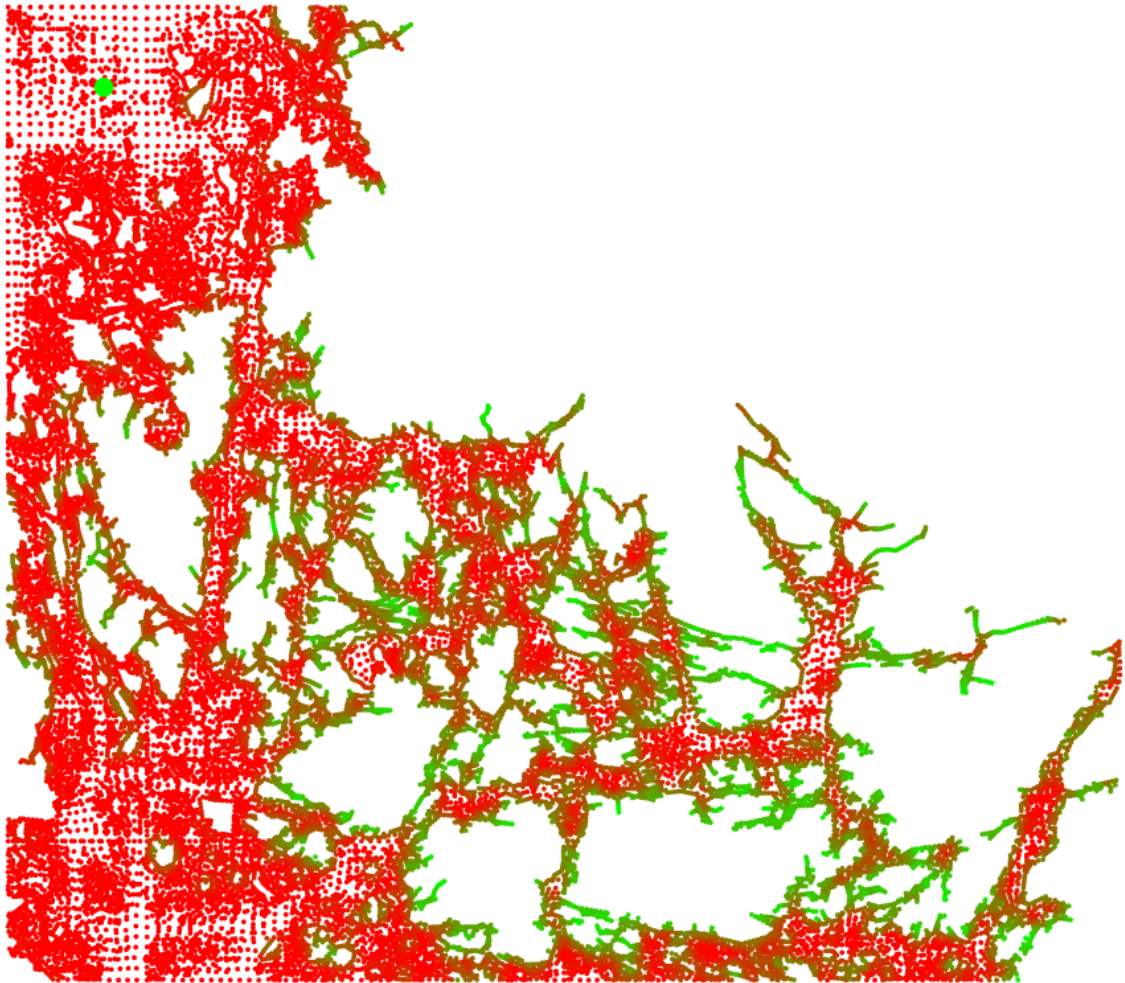
Koska täydennyksen koko toimintasuunnitelman optimoiminen kerralla on laskennallisesti käytännössä mahdotonta, jaoimme ongelman kahteen osaan, joista ensimmäinen on täydennyspaikan sijainnin valinta ja toinen kulkureitin valinta. Täydennyspaikka valitaan ensin, koska aluksiin kohdistuu huomattavasti suurempi riski täydennyksen aikana kuin täydennyspaikalle siirryttäessä. Kuvassa 1 on esitetty vuonna 2018 kehitetyllä kulkukelpoisuusgraafityökalulla luotu graafi, joka kattaa 96km x 96km kokoisen alueen Turusta länteen. Liikkumiseen vaadittava syvyys on graafissa asetettu viiteen metriin ja siitä on myös poistettu alueet, joita ei voida saavuttaa ylittämättä matalampia vesialueita tai maata. Kuvassa myös näkyy täydennyksiä hakemaan lähtevän aluksen lähtöpaikka.



Kuva 1: Kulkukelpoisuusgraafi toiminta-alueesta. Aluksen lähtöpiste luoteessa on merkitty vihreällä. Kuvattu alue kattaa 96km x 96km saaristomerta Turun länsipuolella.

Täydennystä varten ankkuroitu alus on juuri osiossa 3.1 kuvailun kaltainen aikakriittinen kohde, joten täydennyspaikan valinnassa on otettava huomioon, kuinka vaikeaa paikka on löytää sekä kuinka vaikea aluksiin on vaikuttaa niiden ollessa ankkurissa täydennyspaikalla. Saaristomeri, kuten merialueet yleensä, ei tarjoa kovinkaan hyvää suojaa ilmasta käsin tapahtuvaa tiedustelua vastaan, koska alueen maasto ja puusto ei ole korkea. Maaston vaikutus tiedusteluun oletettiin siis mitättömän pieneksi. Maastolla on sen sijaan varsin suuri vaikutus aluksille suurimman uhan muodostavaa asejärjestelmää – meritorjuntaohjuksia – vastaan. Modernit nopeat meritorjuntaohjukset lentävät lähellä meren pintaa välttääkseen tutkassa näkymistä, joten saarten pinnanmuodot ja puusto vaikuttavat niiden käytettävyyteen merkittävästi. Erityisesti ylisoonisen lähestymisen aikana ohjusten kääntösäde on myös verrattain suuri, joten ne tarvitsevat avoimen suorahkon reitin lähestyessään alusta.

Tutkiaksemme kuinka hyvin eri alueet ovat suojassa meritorjuntaohjuksilta laskimme jokaiselle kuvan 1 graafin solmulle, kuinka suuri osa sijaintia ympäröivistä kulumista sisältää maastoa, joka estää ohjuksen lähestymisen. Tämä laskettiin ottamalla kilometrin säteinen ympyrä pisteen ympäriltä ja tarkistamalla, missä suunnissa ympyrän sisällä on vähintään 10m korkea maastoa tai puustoa. Lähtötietoina käytettiin maanmittauslaitoksen maastokarttoja sekä luonnonvarakeskus Luken metsäkartta-aineistoa. Kuvassa 2 näkyy eri karttasolmuille lasketut suojaisuudet. Vihreät pisteet ovat suojaisimpia ja punaiset vähiten suojaisia. Laskennan yksityiskohdat on dokumentoitu Johannes Mäkisen kandidaatintyössä.



Kuva 2: Toiminta-alueen kulkukelpoisuusgraafin solmut väritettynä maaston tarjoaman suojan mukaan.

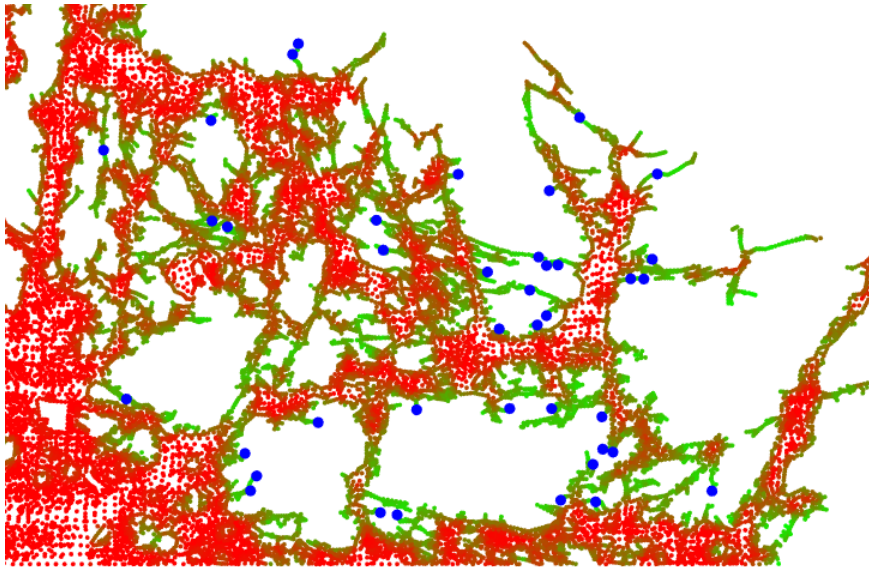
Koska alukselle koituvan kokonaisriskin arviointi vaatii sekä löytymistodennäköisyyden että tuhoamistodennäköisyyden kun kohde on löydetty, tarvitsimme arvion todennäköisyydestä, jolla meritorjuntaohjus pystyy upottamaan aluksen ympäröivä maasto huomioiden. Koska tämän laajuisessa tutkimuksessa ei ollut mahdollista ryhtyä mallintamaan ohjusten toimintaa yksityiskohtaisesti, arvioitiin tuhoamistodennäköisyyttä yksinkertaisesti kaavalla

$$p_t = k(1 - s^2), \quad (5)$$

missä s on suojattujen suuntien osuus kaikista suunnista 1km säteellä ja k ohjuksen osuistodennäköisyys ideaaliolosuhteissa.

Kuten osiossa 3.1 todetaan, riippuu aikakriittisen kohteen, eli tässä tapauksessa merivoimien aluksen, tuhoutumistodennäköisyys myös siitä, kuinka todennäköisesti vihollinen onnistuu paikantamaan alustäydennyksen sen ollessa käynnissä. Tehokkain keino täydennyksen paikantamisen vaikeuttamiseksi on tehdä täydennyspaikasta mahdoton ennustaa, ja tämä onnistuu vain valitsemalla paikka satunnaisesti riittävän monen vaihtoehdon joukosta. Jotta valitut paikkavaihtoehdot maksimoivat kokonaisturvallisuuden, valitsimme ne parhaiten suojassa olevien solmujen joukosta siten, että eri paikkojen väliin jäi vähintään 1km, kuten kuvasta 3 näkyy. Kuvassa on vain yksi esimerkki mahdollisesta täydennyspaikkavaihtoehtojen joukosta. Paikkojen valintaan on mahdollista käyttää monenlaisia kriteereitä, esimerkiksi rajoittaa ne tietylle maantieteelliselle alueelle operaation vaatimusten mukaisesti. Paikkavaihtoehtojen luominen voitaisiin tehdä myös käyttäen kaksivaiheista

optimointia siten, että etsitään vaihtoehtojoukko joka maksimoi kokonaisturvallisuuden huomioiden sekä paikan suojaisuuden että löytymistodennäköisyyden. Näin ei kuitenkaan tässä tutkimuksessa tehty, koska se vaatisi tarkkaa tietoa vihollisen tiedustelusuorituskyvystä sekä -taktiikasta. Lisäksi saavutettavat hyödyt jäävät usein vähäisiksi, jos täydennystehtävän reunaehdot rajoittavat soveltuvia paikkoja merkittävästi.



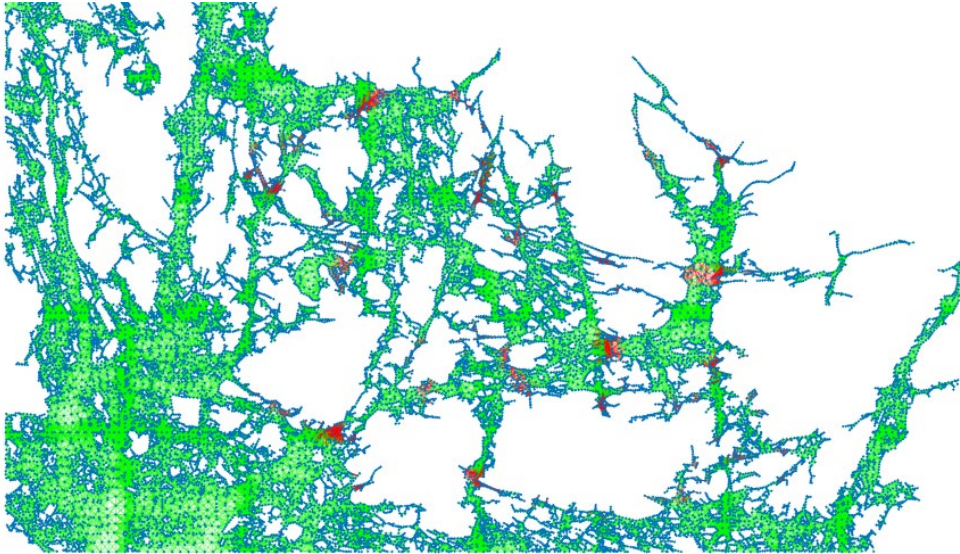
Kuva 3: Rajatulta alueelta valitut suojaisimmat täydennyspaikkavaihtoehdot.

4.2 Reitinvalinta

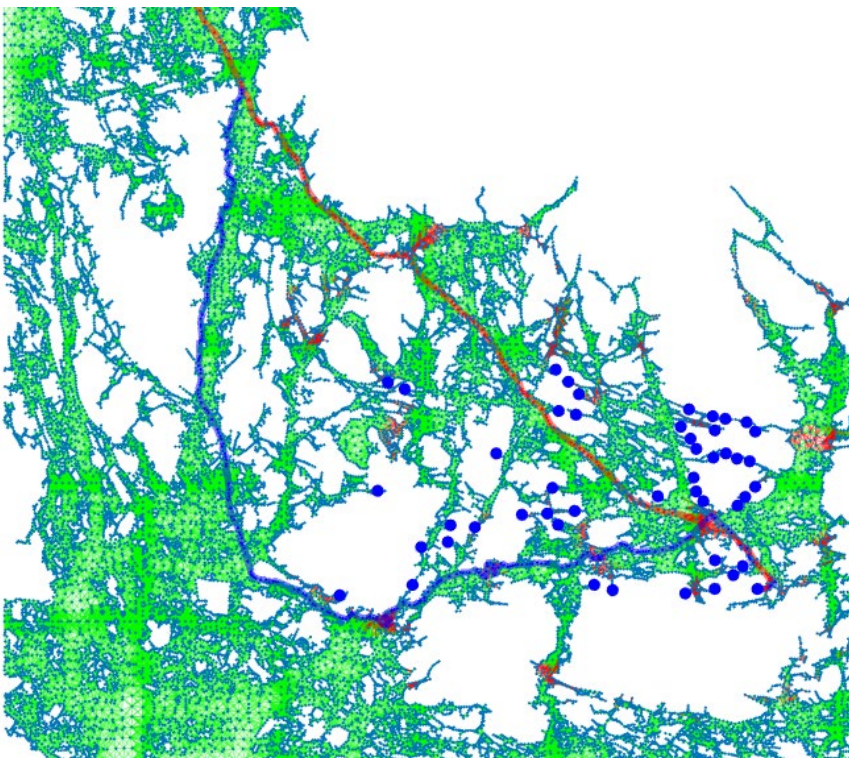
Alustäydennyksen turvallisen suorittamisen kannalta on tärkeää myös huolehtia, että alus pystyy siirtymään valitulle täydennyspaikalle mahdollisimman turvallisesti. Käytimme turvallisimman reitin etsintään osiossa 3.2 kuvattua menetelmää. Muodostimme siis ensin arvion eri reitin osille muodostuvasta tiedustelu-uhasta sekä vihollisen kyvystä vaikuttaa alukseen meritorjuntaohjuksilla toiminta-alueella.

Ennustimme vihollisen tiedustelu-uhkaa etsimällä viholliselle parhaan mahdollisen tiedustelutaktiikan varsinaisen alustäydennyksen löytämiseksi. Näin tehtiin siitä syystä, että alusten paikantamisen ja tuhoamisen ennakoitiin olevan merkittävästi helpompaa niiden ollessa ankkurissa täydennyksen aikana kuin niiden ollessa liikkeessä matkalla täydennyspaikalle. Liikkuvan kohteen löytäminen saaristosta näin laajalta operaatioalueelta on lähes mahdotonta ilman valtavia tiedusteluresursseja, ja liikkeessä olevaan alukseen on merkittävästi vaikeampaa osua ohjuksella koska maalittaminen on vaikeampaa ja alus pystyy tekemään väistöliikkeitä. Laskennan tulokset myös tukivat näitä ennakko-oletuksia.

Kuten kuvasta 4 näkyy, liikkeessä aluksiin kohdistuu suurin uhka hyvien täydennyspaikkojen läheisyydessä, koska siellä vihollisen tiedustelulennokkien oletetaan toimivan. Uhka laskettiin olettamalla UAV:iden havaitsevan aluksen, mikäli se saapuu sensorikantamalle UAV:n lentäessä ohi. Havaitulle alukselle laskettiin sitten meritorjuntaohjuksen aiheuttama tuhoutumistodennäköisyys samaan tapaan kuin paikallaan olevalle alustäydennykselle osiossa 4.1. Erotuksena kuitenkin oletettiin, että ohjuksen on lähestyttävä vihollisen suunnasta eli lännen ja pohjoisen välistä, jolloin myös maaston suojaisuus arvioitiin ainoastaan siltä sektorilta. Näin tehtiin, koska liikkuvaan kohteeseen osuminen on niin paljon haastavampaa, että ohjuksella ei ole samalla tavoin varaa valita lähestymissuuntaansa kuin paikallaan olevaan maaliin.



Kuva 4: Kulkukelpoisuusgraafi väritettynä liikkuvaan alukseen kohdistuvan uhan mukaan.



Kuva 5: Kaksi eri painotuksilla laskettua reittiä oikeassa alakulmassa olevalle täydennyspaikalle.

Kun alukseen kohdistuvat riskit eri puolilla operaatioaluetta tunnetaan, voidaan aluksille laskea erilaisia siirtymäreittejä osiossa 3.2 kuvatuin menetelmin. Itse reitinhakuun voidaan käyttää mitä tahansa yleisesti käytössä olevaa reitinhakumenetelmää. Itse käytimme Dijkstran algoritmia, koska se mahdollistaa turvallisimman reitin laskemisen kaikille täydennyspisteille yhtä aikaa. Kuvassa 5 näkyvä sininen reitti on voimakkaasti turvallisuutta

painottava reitti kun taas punainen reitti on lyhin mahdollinen. Turvallisempi reitti on noin 1,5 kertaa pidempi ja hitaampi, mutta aluksen tuhoutumistodennäköisyys lyhimmillä reitillä on 20-kertainen. Koska reitin turvallisuus on esitetty graafin kaarien painoina, niitä voidaan käyttää yhdessä kulkuaikojen tai -matkojen kanssa sekä nopeutta että turvallisuutta painottavien reittien etsintään kulloisenkin operatiivisen tarpeen mukaisesti. Voitaisiin esimerkiksi etsiä turvallisimman mahdollisen reittiä, jonka kulkemiseen ei kulu yli 2 tuntia. Reiteille on luonnollisesti myös asettaa lisärajoituksia esimerkiksi tunnettujen miinoitteiden tai esteiden kiertämiseksi.

5. Loppupäätelmät

Olemme esitelleet laskentamenetelmiä aikakriittisten sekä liikkuvien kohteiden suojaamiseksi. Menetelmät ovat sovellettavissa moniin operatiivisessa suunnittelussa esiin nouseviin päätösongelmiin, koska ne eivät ole sidottuja toimintaympäristöön tai tiettyihin järjestelmiin. Esitetty versio laskentamallista mahdollistaa kohteen kokonaisturvallisuuden optimoimisen huomioiden sekä kohteen löytymisen että tuhoamisen vaikeuttamiseen käytettävissä olevat keinot.

Soveltaessamme kehitettyjä menetelmiä todentuntuiseen esimerkkiin, jossa pyritään suojaamaan Merivoimien alus täydennystehtävän aikana, olemme myös kehittäneet useita laskennallisia työkaluja, joille voidaan löytää käyttöä myös tulevaisuudessa. Tänä vuonna kehitimme työkalun, joka pystyy automaattisesti laskemaan maaston tarjoaman suojan eri merialueilla käyttäen julkisesti saatavilla olevaa kartta-aineistoa. Työkalu on myös yhteensopiva vuonna 2018 kulkukelpoisuusgraafien tuottamiseen kehittämämme työkalun kanssa.

Vuosi 2019 oli tutkimushankkeen viimeinen vuosi, ja olemme varsin tyytyväisiä saavutettuihin tuloksiin. Koko kolmivuotisen tutkimushankkeen aikana olemme onnistuneet kehittämään uusia tapoja mallintaa ja optimoida vihollistoiminnasta aiheutuvia riskejä ottaen huomioon myös vastapuolen päätöksenteon. Uusina tieteellisinä tulokulmina meillä on ollut vuosien varrella vihollisen toiminnan analysointi epätäydellisen preferenssi- ja suorituskykyinformaation pohjalta sekä aikaan ja paikkaan liittyvien epävarmuuksien tuominen osaksi vastakkainasettelullista riskianalyysiä. Olemme löytäneet uutta tietoa ja menetelmiä näiden ongelmien ratkaisuun, ja tieteellisten julkaisujen kirjoittaminen niistä jatkuu edelleen.

6. Tutkimuksen tuottamat tieteelliset julkaisut ja muut mahdolliset raportit

Tutkimuksesta kirjoitetut julkaisut ovat vielä revisioprosessissa, joten niillä ei ole julkaisutunnistietoja. Julkaisut tulevat osaksi Juho Roposen väitöskirjaa.

Tuloksia on myös esitelty kansainvälisissä konferensseissa, viimeisimpänä *Advances in Decision Analysis* -konferenssissa kesäkuussa 2019 Milanossa.

Tutkimuksen tuloksia esiteltiin Puolustusvoimien tutkimushenkilökunnalle 2.5.2019 järjestetyillä Taistelukeskuspäivillä.

7. Lähteet

Banks, D.L., Aliaga, J.M.R. and Insua, D.R., 2015. *Adversarial risk analysis*. CRC Press.

Bunn, D.W, Salo, A. (1993). Forecasting with scenarios. *European Journal of Operational*



Research, 68, 291-303.

Kangaspunta, J., Salo, A. (2014). Expert judgments in the cost-effectiveness analysis of resource allocations: A case study in military planning, *OR Spectrum*, 36(1), 161-185.

Keeney, R.L., 2007. Modeling Values for Anti-Terrorism Analysis. *Risk Analysis*, 27(3), pp.585-596.

Rios Insua, D., Rios, J., Banks, D. (2009). Adversarial risk analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 104(486), pp.841-854.

Roponen, J., Salo, A. (2015). Adversarial Risk Analysis for Enhancing Combat Simulation Models. *Journal of Military Studies*, 6(2).

Salo, A., Roponen, J. (2018). Vastakkainasettelullinen riskianalyysi asejärjestelmien vaikuttavuusarvioinnissa. *MATINE tiivistelmäraportti*.