

Mat-2.4177 Operaatiotutkimuksen projektityöseminaari

Puolustusvoimien Teknillinen Tutkimuslaitos

24.4.2009

Panssarien taistelun optimointi

Loppuraportti

Ryhmä 2:

Ville Airo

Niki Kotilainen

Lauri Potka

Perttu Punakallio

Heikki Puustinen

Juha Tolva

Elina Valtonen (projektipäällikkö)

Sisällysluettelo

1	Johdanto	1
1.1	Puolustusvoimien Teknillinen Tutkimuslaitos	1
1.2	Panssarivaunut maasodankäynnissä	2
2	Kirjallisuuskatsaus	2
2.1	Lappi, Kaasinen ja Yildirim	3
2.2	Jaakola: Asevaikutus ja suomalainen maasto komppanian taistelun mallintamisessa	3
2.3	Puolustusvoimat: Jalkaväen tulen vaikutuksesta	4
2.4	Kangas: Taistelun stokastinen mallinnus	5
2.5	Muu kirjallisuus	5
3	Panssarien taistelun optimointimalli	5
3.1	Mallin yleiset periaatteet	6
3.1.1	Panssarivaunun mallintaminen	6
3.1.2	Parametrit	7
3.1.3	Taistelumallin toiminta	8
3.2	Taistelumallin kriittiset funktiot	9
3.2.1	Osumis- ja näkemistodennäköisyysfunktiot	9
3.2.2	Yhteiset parametrit	9
3.2.3	Osumistodennäköisyyden parametrit	12
3.2.4	Näkemistodennäköisyyden parametrit	12
3.2.5	Esimerkki tilan vaikutuksesta todennäköisyyksiin	13
3.2.6	Liikkumisnopeudet	13
3.3	Taistelumallin implementaatio	14
3.3.1	Ohjelman toiminta yleisellä tasolla	14
3.3.2	Ohjelman toiminta funktiotasolla	15
3.3.3	Taisteluohjelman visualisointi	20
4	Optimointi	22

4.1	Optimointitehtävän kohdefunktio	22
4.2	Optimointialgoritmi.....	23
4.2.1	Optimointialgoritmin valinta	23
4.2.2	Geneettiset algoritmit.....	24
4.3	Geneettisen algoritmin implementointi.....	26
4.4	Optimoinnin tulokset	26
4.4.1	Lähtötilanteet	26
4.4.2	Optimistrategia lähtötilanteelle "lentokenttä".....	29
4.4.3	Optimistrategia lähtötilanteelle "tiheä kumpuileva metsä"	32
4.5	Tulosten arviointi.....	35
4.5.1	Omien vaurioiden hinta	35
4.5.2	Käytetyt ammuksset.....	37
4.5.3	Käytetty aika	37
4.5.4	Vihollisen tuhotut vaunut	37
4.5.5	Korrelaatiot tulosten välillä.....	37
5	Johtopäätökset	38
6	Parannusehdotuksia ja aiheita jatkotutkimukseen	39
7	Viitteet	40

1 Johdanto

Projektin aiheena on panssarivaunujen taistelun optimointi. Työn on asettanut Puolustusvoimien Teknillinen Tutkimuslaitos (PvTT). Projektin puitteissa luotava ohjelma sekä siihen liittyvä dokumentaatio ovat julkisia.

Työn motivaationa on Puolustusvoimien jatkuva tarve kehittää valmiuttaan kriisitilanteissa ja kehittää teknologista osaamista. PvTT:n tehtävä on tuottaa puolustusvoimien tarvitsemaa tutkimusta maanpuolustuksen tueksi. Taistelusimulaattoreita on käytössä maailmanlaajuisesti ja myös aiheen tieteellinen tutkimus on varsin aktiivista. Usein julkisessa tutkimuksessa ei kuitenkaan paljasteta mallien kriittisiä parametreja tai käsitellä taistelumallien toimintaa riittävällä tarkkuudella, jolloin oma korkeatasoinen tutkimustoiminta on tarpeen. Myös tätä työtä varten tekemämme kirjallisuuskatsauksen pohjalta havaitsimme, että erityisesti panssarivaunujen taistelua koskevaa tutkimusaineistoa on saatavilla varsin rajoitetusti.

Tarkastelemme työssämme panssarivaunujen hyökkäystaistelua kun vastassa on vihollisen panssarivaunujoukko. Hyökkäävän joukon tavoite on maastonkohta vihollisen ryhmytyksen edessä. Työssä mallinnetaan panssarivaunujen välistä taistelua ja optimoidaan hyökkääjän toimintaa eri hyökkäysstrategioiden osalta. Monitavoitteellinen optimointi tehdään ajan ja omien tappioiden suhteen, rajoitteena että joukko pääsee tavoitteeseensa. Tuloksena syntyy tehokkaita strategioita panssarivaunujen taisteluun erilaisissa maasto-olosuhteissa. Nämä optimoinnin tulokset ovat työssämme keskeisiä taistelumallin toimivuuden ja tehokkuuden arvioimiseksi.

Työn päätavoite ei kuitenkaan ole itsessään kehittää ja arvioida tehokkaita hyökkäysstrategioita, vaan luoda ohjelma jonka avulla näitä strategioita voidaan optimoida erilaisille taisteluolosuhteille sekä muille alkutiedoille. Työn tuloksena syntyvä simulaatiomalli luodaan Matlabilla ja luotava sovellus liitetään PvTT:n olemassa olevaan taistelun optimointi-ohjelmistoon. Ohjelmointikielen valinnalle ei ollut aiheenasettajan puolelta merkittäviä rajoituksia, joskin syyt Matlabin valitsemiseen olivat ilmeisiä: tarvitsimme helppokäyttöisen ja selkeän ohjelmarajapinnan ja myös aikaisempaa PvTT:n kehitystyötä oli tehty Matlabilla [3].

Seuraavassa taustoitamme aihepiiriä sekä aiheenasettajan Puolustusvoimien Teknillisen Tutkimuslaitoksen että työssä keskeisen taisteluvälineistön, panssarivaunujen, osalta.

1.1 Puolustusvoimien Teknillinen Tutkimuslaitos

Puolustusvoimien Teknillinen Tutkimuslaitos (PvTT) tuottaa tutkimuspalveluja puolustusvoimien ja maanpuolustuksen kehittämiseksi ja päätöksenteon tueksi. PvTT suorittaa tutkimusta elektroniikan ja informaatiotekniikan, suojan sekä asetekniikan osa-alueilta. Tutkimusta suoritetaan aihealueilla joilla puolustusvoimien oma tutkimustyö on välttämätöntä tai joilla ei ole osaamista muissa kansallisissa tutkimuslaitoksissa. [2]

Laitos toteuttaa itse tai hankkii muista tutkimuslaitoksista puolustushallinnon esikuntien ja joukkojen tilaamat työt. Toimeksiannot liittyvät uhkaan ja asejärjestelmien kehittämiseen, vertailuun, vastaanottoon ja varastointiin sekä kulumiseen ja vaurioihin. PvTT tuottaa maanpuolustuksen ylimmälle johdolle johtamisessa ja kehittämisessä tarvittavat kehittämisarviot ja -ennusteet. Laitos toimii yhteistyössä muiden tutkimuslaitosten ja korkeakoulujen kanssa, antaa opetusta sotilasopetuslaitoksissa ja kertoo tutkimustoiminnastaan julkaisusarjassaan. [2]

Työn tilaajat työskentelevät PvTT:n Elektroniikka- ja Informaatiotekniikkaosastolla, joka tuottaa elektroniikan ja informaatiotekniikan tutkimus- ja kehityspalveluja puolustusvoimille erityisesti kriisiajan tarpeisiin. Osasto tutkii alansa sotilassovelluksien ratkaisumalleja, rakenteita, algoritmeja sekä kehittää simulointimalleja sekä toiminnallisia demonstraattoreita tai prototyyppejä mahdollista tuotteistamista varten. [2]

1.2 Panssarivaunut maasodankäynnissä

Panssarivaunuksi nimitetään panssaroitua, tela-alustaista ajoneuvoa. Panssarivaunut jaetaan useampaan tyyppiin kuten taistelu- tai kuljetuspanssarivaunuihin. Taistelupanssarivaunut ovat maavoimien raskaimmin panssaroitua ja aseistettua kalustoa. [7] Tässä työssä keskitytään taistelupanssarivaunujen toimintaan taistelutilanteessa.

Ensimmäisten panssarivaunujen ilmestyessä sodankäyntiin ensimmäisessä maailmansodassa vaunut saivat liikkua melko vapaasti, sillä niiden torjuntaan soveltuvia aseita ei ollut. Tuosta asti panssarivaunun ja sen torjuntaan käytettävien järjestelmien kehittäminen on muodostanut merkittävän osan koko maasodankäynnin kehittymistä. [1]

Nykyaikaisessa taistelupanssarivaunun pääominaisuuksia ovat tulivoima, liikkuvuus ja suoja. Parhaimmillaan ne ovat laajoilla kovapohjaisilla aukeilla, missä niitä voidaan käyttää muodostelmina. Panssarivaunuissa on monenlaista varustusta. Kriittinen tekijä on vaunusta näkeminen: miehistö käyttää tähtäämiseen tai tähystämiseen kuvanmuodostukseltaan optisia tai sähköoptisia laitteita. Laitteet ovat kaukoputkia, kiikareita periskoppeja, heijastustähtäimiä tai kameran ja monitorin muodostamia laitteistoja. Laitteistoon kuuluu myös vaunun uutuudesta riippuen työkaluja etäisyyden määrittämiseen sekä vakain, joka pitää pääseen vakaana ja samaan suuntaan suunnattuna vaunun liikkeestä huolimatta. [1][7]

Panssarivaunujen muotoiluun on panostettu paljon. Viime vuosina 40-60 tonnin massa on katsottu sopivaksi kompromissiksi suojan ja liikkuvuuden välillä. Keskeistä vaunun muotoilun kannalta on myös vaatimus pitää vaunun profiili mahdollisimman matalana. Taistelupanssarivaunun suurin nopeus tiellä on yleensä 60-70 ja maastossa 35-40 kilometriä tunnissa. Toimintamatka täysillä vaunuilla on 400-700 kilometriä. [1]

Vaunujen pääseen kaliiperiksi on länsimaissa vakiintunut 120 millimetriä ja Venäjällä 125 mm. Tehokas ampumaetäisyys on laitteiden ansiosta jopa pimeällä useita kilometrejä ja panssarinläpäisy nykyaikaisimmilla ammuksilla useita kymmeniä senttimetrejä. Pääseen lisäksi vaunujen tyyppillisen aseistukseen kuuluvat konekivääri ja ilmatorjuntakonekivääri. [1]

Panssarivaunujoukkueeseen kuuluu kolme panssarivaunua ja komppaniaan kuuluu puolestaan kolme joukkuetta. Tekstissä puhutaan *panssarivaunujoukosta* silloin kun ei haluta puhua täsmällisestä määrästä vaunuja, vaan viitataan siihen että niitä on vähintään yksi.

2 Kirjallisuuskatsaus

Työtä varten käsittelemämme lähdekirjallisuus ja aikaisempi tutkimus keskittyvät laajalti yleiseen taistelun mallintamiseen ja yleensä pelkästään jalkaväen osalta. Lähestymistapoja on erilaisia: sekä stokastisuuteen ja simulaatioon perustuvia tutkimuksia että deterministisen mallin kehittämiseen tähtäviä tutkimuksia. Erityisesti panssarivaunujen välistä taistelua ei lähdekirjallisuudessa ole mallinnettu. Tästä huolimatta aikaisemmasta tutkimuksesta löytyy merkittävästi hyödynnettävää tietoa.

Panssarivaunujen ja jalkaväen taistelun mallinnuksessa on paljon yhtymäkohtia, esimerkiksi maaston ja muiden olosuhteiden vaikutukset näkemiseen ja osumiseen ovat pitkälti samat samoilla laitteilla varustetuille panssareille tai yksittäisille sotilaille. Merkittävimpiä eroja ovat panssarivaunujen ominaisuudet kuten nopeus, kestävyys ja tuliaseen teho sekä kokonaisuudessaan taistelun tempo, joka on panssareilla paljon nopeampi.

Seuraavassa on esitelty aiheen kannalta oleellista kirjallisuutta.

2.1 Lappi, Kaasinen ja Yildirim

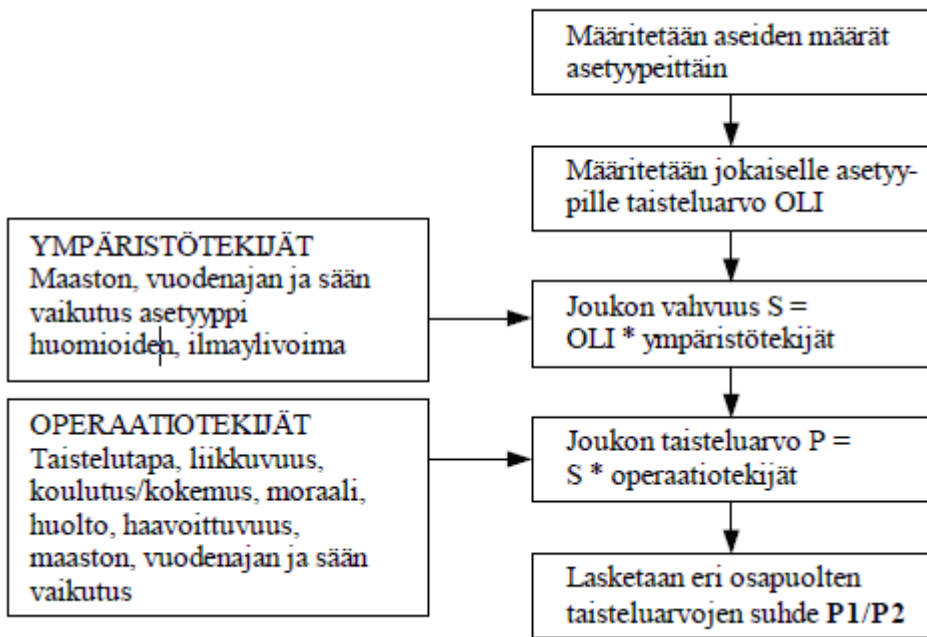
Optimoinnin ja mallinnuksen osalta työssämme on eniten hyödynnetty Lapin ja Kaasisen konferenssijulkaisua [3]. Tässä tutkimuspaperissa käsitellään geneettisen algoritmin optimointitekniikkaa jalkaväen taistelun yhteydessä. Lappi ja Kaasinen esittelevät tilat ja tilasiirrot yksittäiselle taistelijalle, jotka on voitu soveltaa lähes suoraan omaan malliimme panssarivaunun tiloiksi. Myös strategioiden esittämisen muoto on saatu Lapin ja Kaasisen työstä. He esittävät strategiat ja optimointitulokset muodossa *ehto-tilasiirto-laajuus*: ”jos tilassa a on enemmän/vähemmän kuin y vaunua, siirretään tilasta b tilaan c x vaunua”. Samaa ideaa voidaan soveltaa tässä työssä.

Yildirim esittelee laajassa väitöskirjassaan Extending the State-of-the-Art for the COMAN/ATCAL Methodology [5] tarkasti tiettyyn ohjelmistoon liittyvää panssarien taistelun mallinnusta. Meille tässä työssä mielenkiintoisia kohtia ovat käytetyt todennäköisyysfunktiot. Väitöskirjassa esiteltyä eksponentiaalista todennäköisyysfunktiota havainnointiin sovelletaan myös meidän malliimme. Työssä käsitellään niin ikään tunnetuimpien amerikkalaisten ja venäläisten vaunujen eroja parametrien suhteen. Näiden hyödyntäminen tulisi meidän mallissamme ottaa huomioon tarkemmin siinä vaiheessa, kun erot eri joukkojen välillä sallitaan. Toistaiseksi mallimme olettaa hyökkääjän ja vihollisen vaunut ja muut ominaisuudet identtisiksi.

2.2 Jaakola: Asevaikutus ja suomalainen maasto komppanian taistelun mallintamisessa

Keijo Jaakolan diplomityössä ”Asevaikutus ja suomalainen maasto komppanian taistelun mallintamisessa” luodaan taistelun kulkua kuvaava deterministinen taistelumalli myöhemmin kehitettävän demonstraattorin ohjelmointia varten. [7] Jaakolan diplomityössä määritetään taistelun laskentaperiaatteet suuntaa-antavilla parametreilla ja annetaan ehdotuksia taistelumallin kehittämisestä. Työssä käsitellään myös eri aseiden mallintamista, muun muassa panssarivaunuja, joiden osalta olemme sopivilta osin hyödyntäneet Jaakolan ehdottamia parametreja taistelun kuvaamiseen.

Taistelua mallinnetaan joukkueiden vahvuuksien perusteella laskemalla taisteluarvot QJM:n avulla (Kaavio 2.2-1 Quantified Judgement Model) ja vertaamalla sen jälkeen joukkojen taisteluarvojen suhteita keskenään. Tämä malli tarvitsee toimiakseen useita kymmeniä eri muuttujia; Jaakola käytti 73 muuttujaa. Jaakolan simuloinnin tulokset osoittivat että subjektiivisesti arvioitavat parametrit, johtajuus, koulutustaso, moraali ja logistiikka, vaikuttavat tulokseen merkittävästi.



Kaavio 2.2-1 Quantified Judgement Model

Koska QJM on tarkoitettu vähintään prikaatin kokoisten joukkojen taistelun lopputuloksen arviointiin, on Jaakolan työn sovellettavuus tämän työn osalta pääasiassa asetyyppien parametrien määrittelyssä eikä itse QJM-mallissa. Jaakolan diplomityössä on myös simuloitu rakennettua taistelumallia, mutta sen tulokset eivät ole sovellettavissa tähän työhön eri tavoitteidensa vuoksi. Edellä mainittujen asetyyppien parametrien määrittelyssä hyödyllisiä ovat kuitenkin taistelupanssarivaunun osumistodennäköisyyttä kuvaavat tiedot. Niiden avulla pystytään jatkossa määrittelemään mallin taistelupanssarivaunujen osumistodennäköisyys etäisyyden funktiona.

Jaakolan työtä on käytetty pohjana kappaleessa 3.2 *Taistelumallin kriittiset funktiot* määritellyn osumisfunktion luonnissa.

2.3 Puolustusvoimat: Jalkaväen tulen vaikutuksesta

Puolustusvoimien pääesikunnan kirja "Jalkaväen tulen vaikutuksesta" vuodelta 1954 käsittelee eri aseiden ja joukkojen tulen tehoa. [6] Erilaisia tulen tehon mittareita ovat osumaprosentti etäisyyden suhteen, tulen läpäisykyky, tappioiden määrä, osumia ajan suhteen, tehokas ampumaetäisyys sekä osumatarkkuus maalin nopeuden suhteen. Tulen tehoa tutkitaan pienikaliiperisten aseiden, raskaan laakatulen, ilmatorjuntatulen, kranaatinheitinten tulen, panssaritorjuntatulen ja jalkaväen muun tulen (esim. käsikranaatit, kasapanokset, liekinheitimet, savutukset ja miinoitteet) vaikutusten osalta.

Jalkaväen tulen tehojen arviointi on pääosin merkityksetöntä taistelupanssarivaunujen taistelun simuloinnissa. Hyödyllisenä tietona voidaan pitää panssaritorjuntatykin tehoa taistelupanssarivaunua vastaan, sillä työssämme taistelun perusasetelma on se, jossa hyökkääjää vastassa on paikallaan oleva vastustajan panssarivaunujoukkue (kolme panssarivaunua). Kirjassa havaitaan, että 700-1000 metrin etäisyydestä paikallaan olevaan kohteeseen osutaan

odotusarvoisesti kerran kun ammutaan kolme laukausta. Pidämme tätä ohjenuorana määrittellessämme osumistodennäköisyyksiä taistelupanssarivaunuille (kappale 3.2).

On huomionarvoista, että kirja on kirjoitettu vuonna 1954, jonka jälkeen sotatutkimus ja varustetason kehitys ovat edenneet monen vuosikymmenen ajan. Tämän vuoksi on mahdollista että osumatarkkuudet ovat parantuneet ja muuttuneet tykkien ja muun kaluston kehittyttyä tai niitä osataan nykyisin mallintaa paremmin. Pidämme teosta kuitenkin merkittävänä lähteenä osumisen mallintamisessa myös aiheenasettajan kehotuksesta.

2.4 Kangas: Taistelun stokastinen mallinnus

Kangas esittää diplomityössään Taistelun stokastinen mallinnus [4] varsin laajan katsauksen matemaattisiin malleihin sotataistelujen yhteydessä. Erityisenä käsittelyn kohteena ovat Lanchesterin yhtälöt, jotka ovat yleisesti käytetty differentiaaliyhtälömalli kuvaamaan taistelua analyttisesti. Malleja, joita Kangas esittelee, käytetään erityisesti jalkaväen taistelun mallintamiseen, jossa suuret joukot voidaan mallintaa tietyllä vahvuudella.

Kangas käsittelee työssään myös murtumispisteen ja väijytyspisteen käsitteitä sekä karttapohjalla taistelun mallinnusta. Nämä ovat jatkokehityskelpoisia ajatuksia myös panssarivaunujen taistelun yhteydessä ja voisivat tulevaisuudessa olla tärkeitä lisäominaisuuksia mallimme. Tällä hetkellä mallimme ei esimerkiksi hae optimireittiä maastokartan avulla, vaan liike on suoraviivaista etenemistä ilman sivuttaisliikettä. Kangaskin toteaa, että reittioptimoinnin lisääminen vaatii mallilta paljon.

2.5 Muu kirjallisuus

Rakentamamme malli sivuaa osittain myös tietokonepelien kehitystä. Mallinnushaaste on samankaltainen kuin taistelu- ja toimintapeleissä. Tietokonepelien kehityksestä ei kuitenkaan ole olemassa kovin paljon kirjallisuutta, eikä etenäkään akateemista. Kuitenkin teoksessa *10 Fingers of Death: Algorithms for Combat Killing* [8] käsitellään muutamia taistelun mallintamiseen liittyviä algoritmeja. Tässä teoksessa on erityisesti käsitelty todennäköisyysjakamaa eri vaurioille osuman tullessa, jota olemme hyödyntäneet omassa työssämme.

Geneettisiin algoritmeihin liittyvää kirjallisuutta käsittelemme tarkemmin neljännessä kappaleessa.

3 Panssarien taistelun optimointimalli

Seuraavassa selvennetään työn puitteissa kehitetyn panssarivaunumallin toimintaa. Käymme läpi taistelumallin yleisen tason rakennusperiaatteet sekä siihen kuuluvat matemaattiset määritelmät. Esittelemme myös implementaatiomme simulaatiomallista. Mallin toiminnan optimointia ja tuloksia käsitellään kappaleessa neljä.

Panssarivaunujen taistelumalli on kehitetty vastaamaan aiheenasettajan vaatimuksia, joita on täsmennetty projektin kuluessa muutaman tapaamisen puitteissa. Kirjallisuuden perusteella on kyetty arvioimaan mallille tärkeitä parametreja ja funktioita. Niiltä osin kuin funktioita ja parametreja on jouduttu kehittämään vapaammin, kyseiset päättelyt on käyty läpi aiheenasettajan kanssa.

3.1 Mallin yleiset periaatteet

Projektin tavoitteena on tuottaa simulaatiomalli, joka laskee panssarivaunujen välisessä taistelussa hyökkävälle osapuolelle toimintakykyisten vaunujen optimaaliset hyökkäysstrategiat eri maasto-olosuhteissa. Hyökkäysstrategia muodostuu vaunujen tietyssä järjestyksessä suorittamista käskyistä, jotka siirtävät vaunun tai joukon vaunuja tilasta toiseen ajan ja taistelun edetessä. (Sekä tiloja että mallin muuta toimintaa on kuvattu tarkemmin seuraavassa kappaleessa). Tehtävää varten rakennetaan ohjelma, jonka avulla panssarien välistä taistelua voidaan mallintaa.

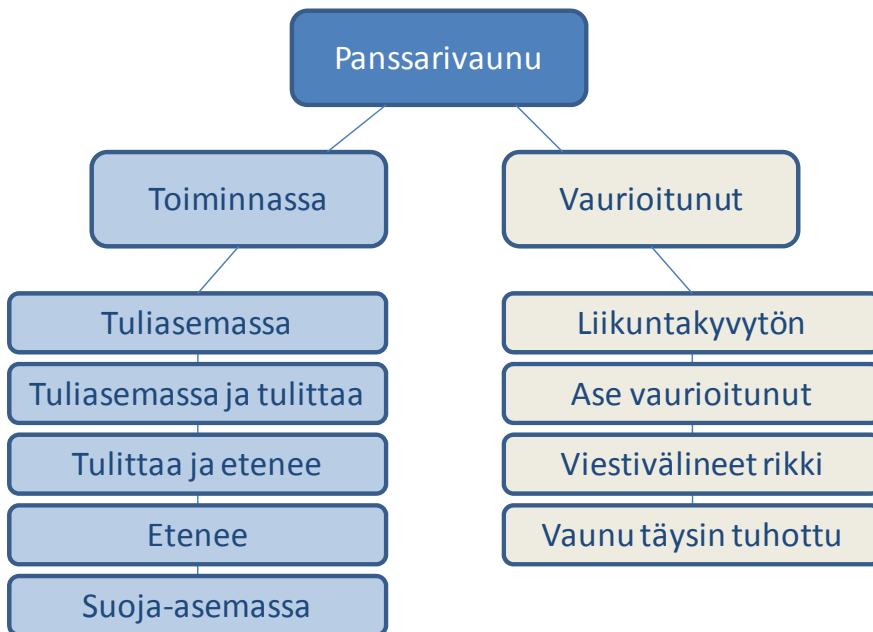
Ohjelma on taistelumalli (*myöhemmin käytetty myös termiä simulaatiomalli*), joka ottaa syötteekseen hyökkääjää ja vihollista koskevia tietoja sekä maasto-olosuhteita kuvaavia parametreja: vaunujen/joukkueiden määrät, maaston muoto ja puuston tiheys. Malli kuljettaa hyökkääjälle annetun strategian mukaisesti suoritettavan taistelun määritellyyn päätökseensä. Taistelu päättyy kun annettu aikaraja ylittyy, hyökkääjä saavuttaa maastonkohta-tavoitteensa tai kun hyökkäävä osapuoli tuhoutuu tyystin. Vastustajan tuhoutuminen ei pysäytä simulaatiota, sillä hyökkääjän tavoite ei ole vihollisen tuhoutuminen vaan strategisen maastonkohdan haltuunotto. Tavoite on saavutettu, kun annettu määrä vaunuja (meidän esimerkissämme kolme) on saavuttanut tavoitteellisen maastonkohdan.

Taistelumalli koostuu niin sanotusta perusmallista, joka suorittaa taistelun hyökkääjän ja vihollisen välillä annetuilla parametreilla ja hyökkäysstrategialla. Perusmallia voidaan ajaa useita kertoja peräkkäin esimerkiksi eri hyökkäysstrategioille tai eri maasto-olosuhteissa. Taistelumalliin kuuluu niin ikään strategiageneraattori, joka luo suoritettavia strategioita satunnaisesti tai säännönmukaisesti –esimerkiksi optimoinnin yhteydessä geneettisillä algoritmeilla. Perusmallin toimintaa voidaan testata eri strategioilla ja eri olosuhteissa.

Taistelumalli luo ja tallentaa dataa, jonka avulla voidaan löytää tehokkaita hyökkäysstrategioita kussakin taisteluolosuhteessa. Tallennetun tiedon avulla voidaan arvioida ja sittemmin myös optimoida strategioiden tehokkuutta. Seuraavassa käydään yksityiskohtaisemmin läpi taistelumallin toimintaa.

3.1.1 Panssarivaunun mallintaminen

Joukkue tai laajempi ryhmä on kokoelma vaunuja, joilla on yksittäiset tilat ja kuntomuuttajat. Tilat ja kuntomuuttajat (ja vauriot) mallinnetaan vaunutasolla ja yksittäisen vaunun mahdollisia tiloja ovat: etenee, tulittaa ja etenee, tuliasemassa, tuliasemassa ja tulittaa sekä suoja-asemassa. Tämän työn puitteissa ja yksinkertaistamatta ongelmaa liikaa käsittelemme sekä hyökkääjän että vastustajan panssarivaunuja identtisinä, jolloin kummankin puolen (vauriottomat) ominaisuudet ovat samat. Kaavio 3.1-1 Panssarivaunun toiminta- ja vauriotilat listaa panssarivaunun mahdolliset tilat sekä vauriot.



Kaavio 3.1-1 Panssarivaunun toiminta- ja vauriotilat

Tilajakauma määrittää toimintakykyisten vaunujen toiminnan tilat. Vaunujen kärsimät vauriot kuvataan *kuntomuuttujilla*, jotka vähentävät vaunujen toimintamahdollisuuksia. Yksittäinen vaunu voi olla ehjä tai osittain tai kokonaan vaurioitunut (aseen, liikkumisen, kommunikaation ja näiden kombinaatioiden osalta). Vaurioita kärsitään osumassa annettujen todennäköisyyksien mukaan. Vaurioitumisesta ja ampumisen vaikutuksesta kerrotaan tarkemmin kappaleessa 3.2 *Taistelumallin kriittiset funktiot*. Vauriot heikentävät vaunun toimintakykyä vakioitujen määrien verran. Kaikista vaurioista sakotetaan saman verran paitsi "catastrophic kill" – vauriosta (vaunu täysin tuhottu), josta tulee 10-kertainen sakko. Vaurion hinta otetaan huomioon optimoinnin yhteydessä hyökkäävän osapuolen hyvyysfunktiossa. Myös ampumisen kustannus otetaan huomioon laskemalla ammuksia ja lisäämällä niille sakko.

3.1.2 Parametrit

Mallin *parametreja* ovat yleisesti sellaiset ohjelman aikaiset vakiot, jotka eivät muutu mallin ajon aikana. Parametrit alustetaan ohjelman alussa esimerkiksi ulkoisilla tiedoilla (kuten linkki maastokarttaan). Maastokartoilla kuvataan maasto-olosuhteita. Käytännössä maasto parametrisoidaan ja otetaan syötteenä mallissa käytettäviin funktioihin: esim. metsä ja epätasainen maasto vaikuttavat näkemiseen ja tuhoamistehoon heikentävästi.

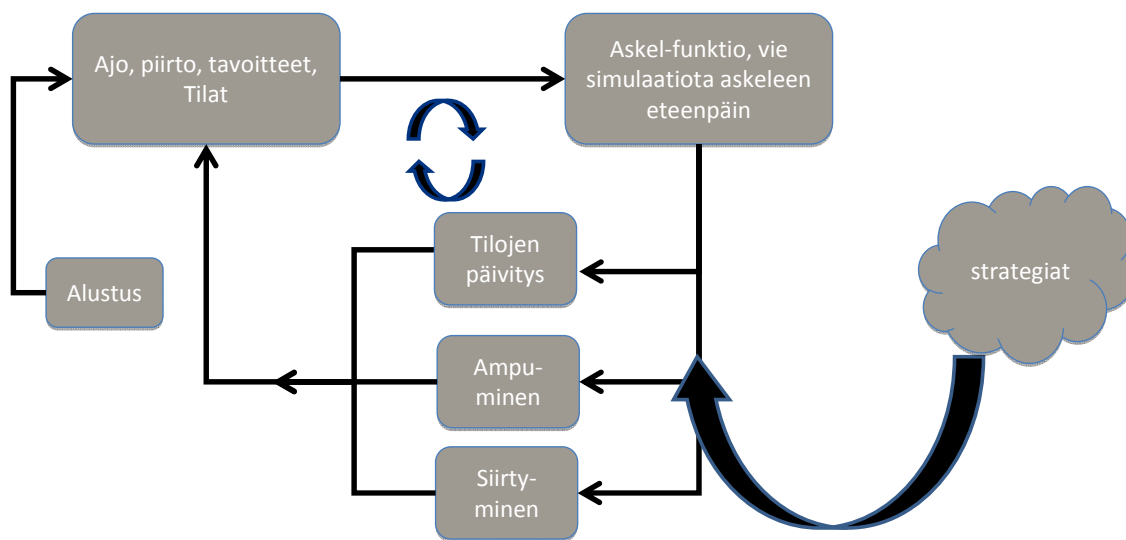
Maastoparametrien lisäksi tärkeitä alustettavia parametreja ovat eri funktioiden *vaikutuskertoimet*, kuten asevaikutuksen vaimeneminen sekä vaunujen ominaisuudet kuten nopeus ja osumistarkkuus. Näiden parametrien arvot ovat luottamuksellista tietoa eikä työryhmällämme ole pääsyä tähän informaatioon. Projektin ajaksi valitsimme parametrien arvot mahdollisimman totuudenmukaisiksi eri lähteiden avulla.

Mallin tärkeimmän toiminnallisuuden osalta on parametrit määritelty tarkemmin kappaleessa 3.2 *Taistelumallin kriittiset funktiot*. Kun ohjelma liitetään PvTT:n laajempaan ohjelmakokonaisuuteen, oletetaan että nämä parametrit määritetään ulkoisesti paremman tiedon pohjalta.

3.1.3 Taistelumallin toiminta

Taistelumalli pyörittää yhden taistelun kerrallaan päätökseen saakka. Taistelu päättyy kun annettu aikaraja saavutetaan, hyökkääjä saavuttaa tavoitekohdan maastossa tai kun hyökkääjä on tuhoutunut. Taistelun aikana hyökkääjä vastaanottaa tietyn ajan välein hyökkäyskäskyjä (implementaatiossamme minuutin välein), jotka määrittävät hyökkäävän joukon eri osat siirtymään eri toimintatiloihin. Käskyissä ei oteta kantaa siihen, missä joukkueessa vaunut ovat, vaan ne arvotaan satunnaisesti kaikista joukkueista.

Kaavio 3.1-2 Taistelumallin toimintakaavio selvittää mallin toimintaa. Alustuksen jälkeen taistelua pyöritetään askel kerrallaan eteenpäin tilasiirtymien, ampumisen sekä liikkumisen osalta annetun käskyn mukaisesti. Yksittäisessä panssarivaunulle tai panssarivaunujoukolle annetussa strategiassa on yhtä monta aika-askelta kuin ajolle on määritetty aika-askelia. Joka kahdeksas aika-askel sisältää aktiivisen käskyn ja muuna aikana toteutetaan aikaisempaa käskyä, kuten esimerkiksi ammutaan. Strategian suoritus jää kesken, jos hyökkäävä panssarivaunuryhmä tuhoutuu tai tavoite saavutetaan ennen kuin lopullinen aikaraja T on saavutettu.



Kaavio 3.1-2 Taistelumallin toimintakaavio

Käsky voi määrätä vaunun tai joukon vaunuja siirtymään tilasta toiseen (esimerkiksi suoja-asemasta tuliasemaan) tiettyjen ehtojen mukaisesti. Tilasiirtymistä ja näihin liittyvistä ehdoista kerrotaan lisää mallin implementaation (kappaleen 3.3) yhteydessä.

Mallin toiminnan kannalta kriittisiä funktioita ovat osumis- ja näkemisfunktiot, jotka ovat todennäköisyysfunktioita. Osumisfunktion avulla määritellään joukkueen todennäköisyys osua kohteeseensa aika-askelen aikana. Yhden aika-askelen aikana jokainen vaunu ampuu korkeintaan kerran (jos on ampumistilassa). Näkemisfunktion avulla määritetään todennäköisyys havaita vihollinen.

Osumis- ja näkemistodennäköisyyksiin vaikuttavat maastoparametrit (esim. etäisyys ja puusto vaimentavasti) sekä omat ja vihollisen tilat (liikkuva vaunu on helpompi havaita, tuliasemassa oleva vaunu osuu todennäköisemmin kuin samanaikaisesti etenevä ja ampuva). Molemmat funktiot ovat muodoltaan eksponentiaalisia ja saavat parametrit potenssinsa negatiivisina (mitä pienempi, sitä parempi) kertoimina. Joukkueiden sijainnit määritetään pistemäisinä (kaikilla joukkueen vaunuilla identtinen sijainti) ja kaikilla ryhmän vaunuilla on sama näkemisfunktio. Näkeminen

tapahtuu siis kertoimella, joka vastaa joukkueen siinä tilanteessa parhaan näkökyvyn omaavan vaunun näkemistä. Esimerkiksi jos kaksi vaunua on suoja-asemassa ja yksi tuliasemassa, koko joukkue näkee tuliasemassa olevaa vaunua vastaavalla näkökyvyllä. Näitä taistelumallin toiminnan kannalta oleellisia funktioita on eritelty seuraavassa kappaleessa.

3.2 Taistelumallin kriittiset funktiot

Tässä kappaleessa määritellään taistelumallin tärkeimmät funktiot (osuminen ja näkeminen) sekä näiden funktioiden parametrit. Määritämme myös liikkumisnopeudet eri maasto-olosuhteissa. Funktioiden muotoa ja kriittisiä parametreja on pyritty arvioimaan kirjallisuuden avulla (kts. Kappale 2). Muun muassa osumisfunktion mallintamiseen on olemassa hyvää aikaisempaa tutkimusta ([6] ja [7]), joskin näkemisfunktio ja sen parametrit on jouduttu kehittämään vapaammin, pitkälti kuitenkin osumisfunktion pohjalta.

3.2.1 Osumis- ja näkemistodennäköisyysfunktiot

Näkemistodennäköisyysfunktio määrittelee, millä todennäköisyydellä vihollisvaunu havaitaan ja osumistodennäköisyysfunktion avulla määritellään vaunun todennäköisyys osua *havaittuun* kohteeseensa aika-askelen aikana. Kirjallisuuden perusteella tiedetään, että näitä todennäköisyyksiä, p_0 , voidaan mallintaa eksponentiaalisesti etäisyyden suhteen [5].

$$p_0 = e^{-x}$$

Kuitenkin todennäköisyyksiin vaikuttaa etäisyyden lisäksi muita tekijöitä. Mallin käytettävyyden pohjalta valitsimme seuraavat vaikuttavat parametrit:

- Maaston muoto (β)
- Metsän määrä (α)
- Etäisyys kohteeseen (x)
- Oman tila (O)
- Vihollisen tila (V)

Nämä parametrit vaikuttavat osumis- ja näkemistodennäköisyyksiin kukin eri tavalla. Kirjan ”Jalkaväen tulen vaikutuksesta” perusteella maaston muotoa voidaan mallintaa kertoimena potenssifunktiolle. Täten maaston muoto mallinnetaan vakiokertoimena ja muut parametrit eksponenttifunktion potenssin muuttujina seuraavasti:

$$p_0 = \beta * e^{(-\alpha * \frac{x}{1000} * O * V)}$$

Funktion parametreja selitetään seuraavassa kappaleessa tarkemmin.

3.2.2 Yhteiset parametrit

Funktion muuttujien arvot on osaltaan otettu suoraan kirjallisuudesta ja osa estimoitu omatoimisesti. Arvot saattavat olla hiukan virheellisiä, mutta tuottavat realistisia arvoja mallin toimivuuden kannalta. Täysin tarkkojen arvojen tutkiminen on turhaa, sillä toimeksiantajalla on käytössään omat arvot parametreille, mutta niiden salaisen luokituksen johdosta teimme omat estimaatit. Käytimme mallissa seuraavia estimaatteja parametreille:

Maaston muodon parametri, β , on luokiteltu kolmeen eri kategoriaan: tasainen, kumpuileva ja epätasainen. Maaston ollessa tasainen, maaston muodon parametri β saa arvon 1. Kumpuilevan maaston osalta parametri β saa arvon 0,9. Tämä perustuu karkeaan estimaattiin siitä, että kumpuileva maasto heikentää osumista 10 %. Estimaatti pohjautuu seuraavaan ajatukseen: jos vihollinen on havaittu, on mahdollista, että vihollinen on esimerkiksi maastossa alempana. Tällöin se estää vaunun ampumisen, sillä vaunun tykkitorni ei voi välttämättä kallistua tarpeeksi. Samoin vaunun kallistuminen heikentää myös näkemistodennäköisyyttä. Epätasaisen maaston osalta parametri β saa arvon 0,6.

Metsän määrän parametri on, α , on myös luokiteltu kolmeen eri kategoriaan: ei metsää, harva ja tiheä. Metsä parametrin α arvo lasketaan seuraavalla kaavalla [6]:

$$\alpha = \frac{\ln(2)}{\text{Osumistodennäköisyyden puoliintumismatka (kilometreissä)}}$$

Taistelupanssarivaunun osumistodennäköisyyden puoliintumismatka on metsättömälle maastolle n. 500 metriä [7]. Tämän tiedon perusteella harvan metsän osumistodennäköisyyden puoliintumismatka estimoitii n. 250 metriksi. Toimeksiantajan mukaan tiheä metsän osumistodennäköisyyden puolittavana matkana voidaan nyrkkisääntönä pitää 50 metriä. Näkemistodennäköisyyksien arvioitiin puolittuvan samalla tavalla osumistodennäköisyyden kanssa.

Etäisyys kohteeseen -muuttuja, x , saadaan suoraan mallista. Näkemisen osalta tästä etäisyydestä on vähennettävä "close combat" -etäisyys, joka kertoo millä etäisyydellä näkeminen on "varmaa". Ampumisen osalta tätä ei vähennetä, sillä osuminen riippuu etäisyydestä myös lähitaisteluetäisyyden sisällä. Tasaiselle metsättömälle maastolle lähitaisteluetäisyys on noin 250 metriä [7]. Vastaavasti tasaiselle harvalle metsämaastolle close combat -etäisyys on n.100 metriä. Tämä arvio perustui ajatukseen metsän vaikutuksesta "varmaan näkemiseen". Kolmantena maastotyyppinä on tasainen metsämaasto, jonka close combat -etäisyydeksi estimoitii 50 metriä. Muissa tapauksissa (mikäli maasto on kumpuilevaa tai epätasaisista) lähitaisteluetäisyys saadaan estimoitua kertomalla edellisiä kolmea tapausta maaston muodon parametrilla β . Taulukko 3.2-1 Alustusparametrit eri maastotyypeille kertoo edellisten parametrien arvot eri "maastotyypeille".

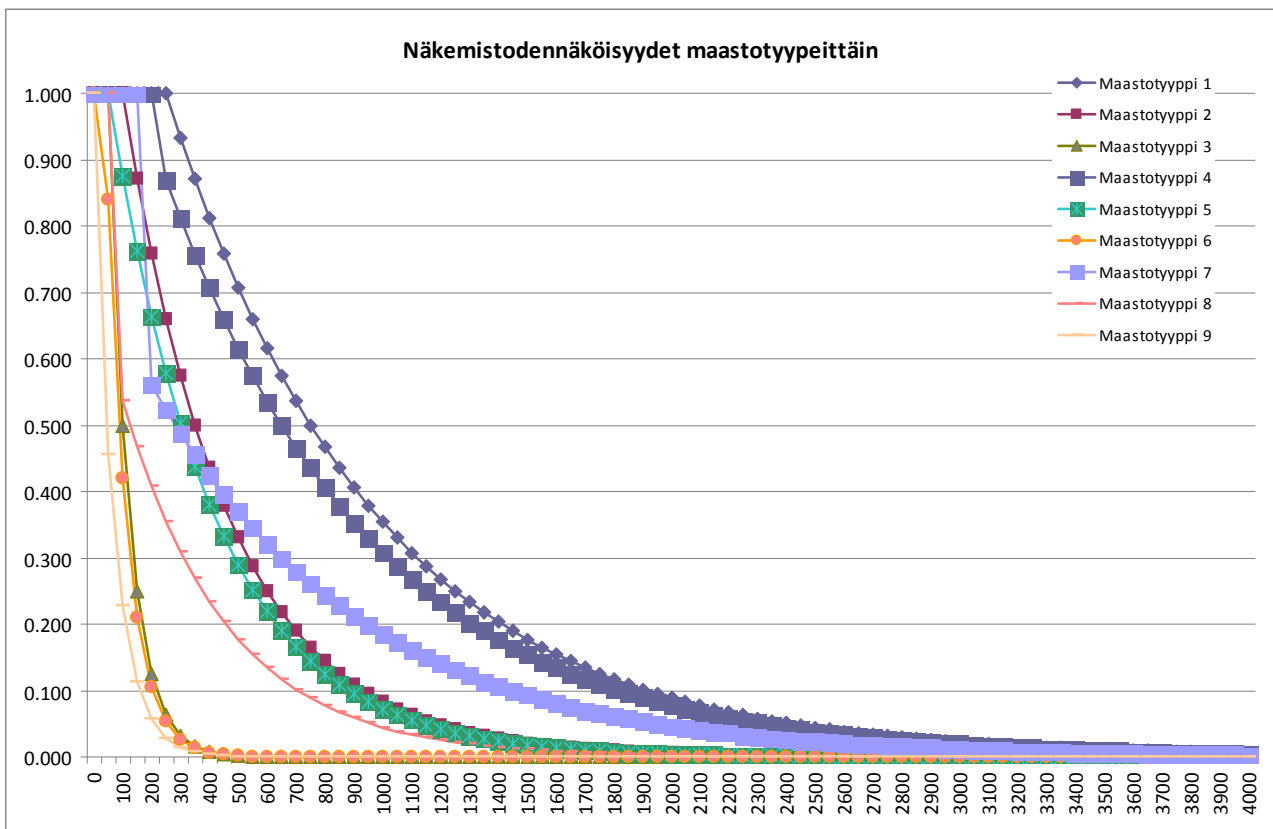
Omallalla tilalla tarkoitetaan sitä vaunun tilaa, jossa kulloinkin ollaan (esim. tulittaa ja etenee). Oma tila vaikuttaa osumistodennäköisyysfunktion potenssiin vaikutuskertoimena, joka saa positiivisia arvoja yhdestä eteenpäin. Mitä suurempi arvo on, sitä pienempi on myös todennäköisyys osua ja nähdä.

Vihollisen tilalla tarkoitetaan sitä vihollisvaunun tilaa (esim. tuliasemassa), jossa vihollinen on. Vihollisen tila vaikuttaa todennäköisyysfunktioihin potenssiin vaikutuskertoimena, joka saa positiivisia arvoja yhdestä eteenpäin. Mitä suurempi arvo on, sitä pienempi on myös todennäköisyys osua ja nähdä.

			ALUSTUSPARAMETRIT ERI MAASTOTYYPEILLE			
Maaston tyyppi	Maaston muoto	Metsä?	Beta (muodon vaimennus)	Alpha (metsän vaimennus)	Closecombat etäisyys	Osumistodennäköisyyden puoliintumismatka
1	Tasainen	ei ole	1.00	1.00	250	500
2	Tasainen	harva	1.00	2.77	100	250
3	Tasainen	tiheä	1.00	13.86	50	50
4	Kumpuinen	ei ole	0.90	1.39	225	500
5	Kumpuinen	harva	0.90	2.77	90	250
6	Kumpuinen	tiheä	0.90	13.86	45	50
7	Epätasainen	ei ole	0.60	1.39	150	500
8	Epätasainen	harva	0.60	2.77	60	250
9	Epätasainen	tiheä	0.60	13.86	30	50

Taulukko 3.2-1 Alustusparametrit eri maastotyypeille

Taulukon perusteella voidaan laskea näkemis- ja osumistodennäköisyydet eri etäisyyksille eri maastotyypeissä. Tuloksena saadaan Kuvaaja 3.2-1, jossa on tehty oletus että oman ja vihollisen tilan vaikutusta ei ole (parametrit O ja V saavat arvon 1) ja että maasto on homogeeninen. Epätasaisessa ja tiheämetsäisessä maastossa osumis- ja näkemistodennäköisyydet laskevat erittäin nopeasti etäisyyden suhteen.



Kuvaaja 3.2-1 Näkemistodennäköisyydet maastotyypeittäin

3.2.3 Osumistodennäköisyyden parametrit

Oman tilan vaikutuksen parametri, O, määräytyy sen mukaan missä tilassa vaunu on. Perustilanteena käytetään tilaa *tulittaa tuliasemasta*. Tässä tilassa oman tilan parametri O saa arvon 1. Mikäli vaunu on tilassa *tulittaa ja etenee* parametri O saa arvon 1,25. Tämä arvio perustuu siihen, että vaikka taistelupanssarivaunun tykissä ovat vakaimet, ne eivät pysty täydellisesti poistamaan etenemisen vaikutusta osumistodennäköisyyteen. Arvon edes summittaisesta oikeellisuudesta ei voida julkisen tiedon perusteella olla varmoja.

Vihollisen tilan vaikutuksen parametri, V, määräytyy sen mukaan missä tilassa vihollisen vaunu on. Perustilanteena käytetään tilaa *etenee ja tulittaa*. Tässä tilassa vihollisen tilan parametri V saa arvon 1. Mikäli vaunu on tilassa *etenee* parametri V saa arvon 1,1. Tämä arvio perustuu siihen, että vihollisen tilalla on pienempi vaikutus oman vaunun osumiseen kuin omalla tilalla. Mikäli vihollinen on tilassa *tulittaa tuliasemasta* se saa arvon 1,1. Vastaavasti, jos vihollinen on pelkästään tuliasemassa, eikä ammu, on siihen hiukan vaikeampi osua ja tällöin V on 1,2. Erikoistapauksena voidaan ajatella tilannetta jossa vihollinen on suoja-asemassa. Tällöin, mikäli vihollinen on havaittu, on siihen erittäin helppo osua. Tällöin V:n arvo on 0,75. Taulukko 3.2-2 tiivistää oman ja vihollisen tilan parametrien arvot eri tiloille.

Tila	ALUSTUSPARAMETRIT OMAN JA VIHOLLISEN TILAN VAIKUTUKSESTA OSUMISFUNKTIOON				
	Tulittaa tuliasemasta	Tuliasemassa	Tulittaa&etenee	Etenee	Suoja-asemassa
Oma tila (O)	1	-	1.25	-	-
Vihollisen tila (V)	1.1	1.2	1	1.1	0.75

Taulukko 3.2-2 Alustusparametrit oman ja vihollisen tilan vaikutuksista osumisfunktioon

3.2.4 Näkemistodennäköisyyden parametrit

Oman tilan vaikutuksen perustilanteeksi valittiin tila, jossa ollaan tuliasemassa. Tässä tilassa vaunu näkee parhaiten ja siten tila saa arvon 1. Yhtä hyvin vaunu näkee myös tilassa, jossa se tulittaa tuliasemasta ja myös tämä tila saa arvon 1. Näkemiskyky on liikkuvalla vaunulla heikompaa kuin paikallaan pysyvällä vaunulla. Tiloille, joissa edetään tai tulitetaan ja edetään, annettiin kertoimeksi 1,25 ja tämä siis heikentää näkemistodennäköisyyttä. Suoja-asemassa ei voida nähdä melkein ollenkaan ja tämä tila sai kertoimen 10.

Vihollisen tilan vaikutuksen perustilanteeksi valittiin tuliasema ja tilan arvoksi annettiin 1. Kun vihollinen tulittaa tuliasemasta, se on helpompi havaita ja siksi se saa arvon 0,75. Kun vaunu tulittaa ja etenee, se on erittäin helppo huomata myös kaukaa ja siksi tämä tila saa arvon 0,5. Pelkkää etenemistä ei ole yhtä helppo huomata kuin etenemistä ja tulittamista, joten se tila saa arvon 0,75. Suoja-asemassa olevaa vaunua on erittäin hankala huomata, joten se saa arvon 5.

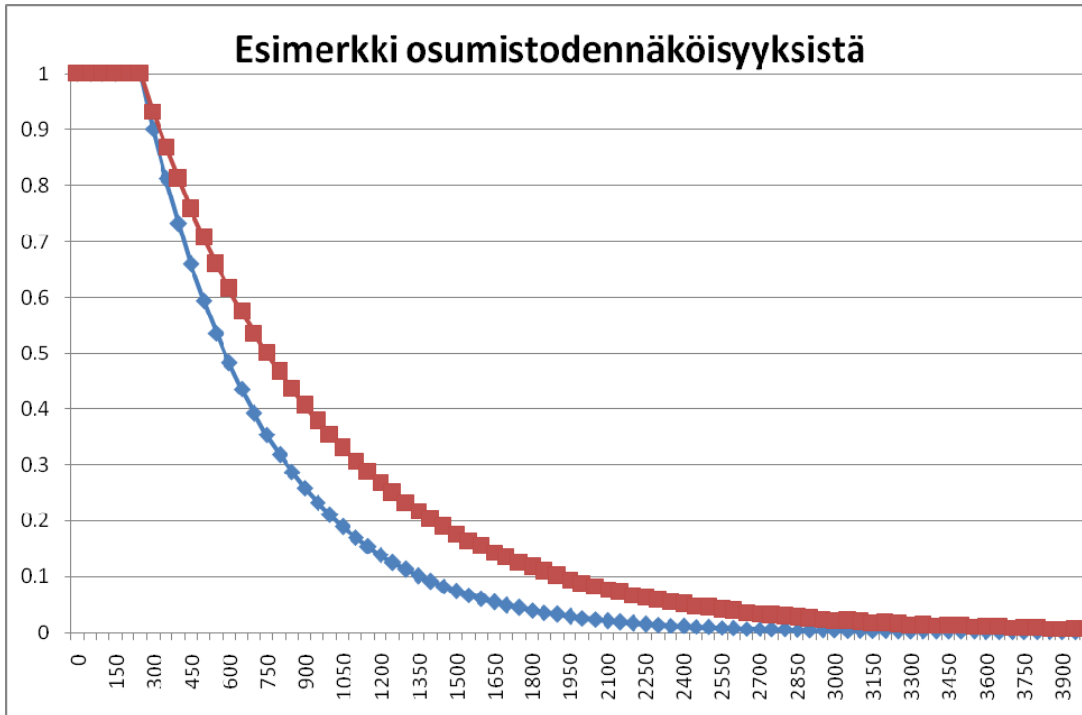
Näkemisfunktion parametrit löytyvät taulukosta 3.2-3.

Tila	ALUSTUSPARAMETRIT OMAN JA VIHOLLISEN TILAN VAIKUTUKSESTA NÄKEMISEEN				
	Tulittaa tuliasemasta	Tuliasemassa	Tulittaa&etenee	Etenee	Suoja-asemassa
Oma tila (O)	1	1	1.25	1.25	10
Vihollisen tila (V)	0.75	1	0.5	0.75	5

Taulukko 3.2-3 Alustusparametrit oman ja vihollisen tilan vaikutuksista näkemisfunktioon

3.2.5 Esimerkki tilan vaikutuksesta todennäköisyyksiin

Kuvaaja 3.2-2 havainnollistaa tilojen vaikutusta osumistodennäköisyyksiin. Punaisessa käyrässä tulitetaan itse tuliasehasta samalla kun vihollinen tulittaa ja etenee. Sininen käyrä puolestaan kertoo osumistodennäköisyydet tiloille, jossa itse tulitetaan ja edetään ja vihollinen on tuliasemassa. Huomataan, että punaisessa käyrässä osumistodennäköisyydet ovat paljon suurempia kuin sinisessä käyrässä. Tämä on myös intuition mukaista.



Kuvaaja 3.2-2 Osumistodennäköisyydet esimerkkituloille

3.2.6 Liikkumisnopeudet

Yksittäisen vaunun liikkumisnopeuteen vaikuttaa eniten maasto. Maastosta valitaan muuttuviksi asioiksi maaston tasaisuus ja metsän tiheys. Vaunun nopeuksista eri maastoissa jouduttiin jälleen tekemään valistuneita arvioita, sillä tarkkaa dataa ei ollut käytettävissä. Toimeksiantajalla kuitenkin on tästäkin aiheesta turvaluokiteltua materiaalia ja oikeat luvut voi syöttää malliin myöhemmin. Nopeudeksi tasaisessa maastossa, jossa ei ole metsää, valittiin 60 km/h [1] ja muut nopeudet arvioitiin pienevän taulukon 3.2-4 mukaisesti.

Nopeus (km/h)	tasainen	kumpuileva	epätasainen
ei metsää	60	48	30
harva metsä	48	30	18
tiheä metsä	30	18	12

Taulukko 3.2-4 Nopeudet maaston funktiona

Useammasta vaunusta koostuva joukkue liikkuu mallissa painotetun keskiarvon mukaisesti. Vaikka joukkueessa yksi vaunu olisikin paikallaan, mallissa koko joukkue liikkuu eteenpäin, jos muut vaunut liikkuvat. Koko yksikön nopeus

saadaan siis laskemalla: $V = \frac{x_e V_e + x_{et} V_{et}}{x_e + x_{et}}$

Tässä kaavassa x_e kuvaa etenevien vaunujen osuutta kaikista vaunuista ja x_{et} paikallaan olevien vaunujen osuutta. Vastaavasti v kuvaa nopeutta samoilla alaindeksillä. Koska liikkumattomien vaunujen nopeus on 0, kaava supistuu muotoon:

$$v = x_e v_e$$

Jos esimerkiksi siis neljästä vaunusta kaksi liikkuu eteenpäin tasaisella metsättömällä maastolla, yksikön nopeudeksi tulee 30 km/h. Liikkuminen on mallinnettu joukkueetasolla aiheenasettajan toiveesta pitää joukkueen sijainti pistemäisenä. Tällöin kaikkien joukkueeseen kuuluvien panssarien tulee keskimäärin sijaita samassa maastopisteessä. Muut ominaisuudet (tilat) mallinnetaan kuitenkin vaunutasolla.

3.3 Taistelumallin implementaatio

Tässä kappaleessa selvennämme simulaatiomallin käytännön implementaatiota. Työ on toteutettu Matlabilla ja seuraavassa on avattu ohjelman arkkitehtuuria sekä tietorakenteiden että tarkemman toiminnallisuuden osalta. Kun tässä yhteydessä puhumme funktioista, viittaamme ennen muuta Matlabin *funktioihin* (tiedostoihin) emmekä aikaisemmin tässä raportissa mainittuihin teoreettisen mallin todennäköisyysfunktioihin.

3.3.1 Ohjelman toiminta yleisellä tasolla

Alustus-tiedostoon määritetään mallin parametrit (vaunujen lukumäärä, maastoparametrit jne.). Tämä tiedosto on kriittinen rajapinta PvTT:n olemassa olevaan ohjelmistoon. Ajotiedosto pyörittää simulaatiota ja pitää kirjaa ajasta ja maastotavoitteen täyttymisestä: onko maksimiaika tai määrätty maastonkohta jo saavutettu tai onko ryhmä tuhoutunut. Näissä tapauksissa suoritus (yksittäinen simulaatio) päättyy.

Strategiat generoidaan tietyin ehdoin (esim. jos tilassa x on vähemmän kuin n vaunua siirretään tilaan z m kappaletta vaunuja). Erillisillä päivitä- ja askel-funktiolla suoritetaan kunkin aika-askeleen ehdolliset tilasiirrot saadun komennon mukaisesti niiltä osin kuin komento on mahdollista suorittaa vaurioiden ja/tai näkemisen perusteella. Esim. voidaanko liikkua ja voidaanko ampua (nähdäänkö vihollinen). Kun vaunujen tilat on päivitetty, suoritetaan ampumisfunktio (ehdollisesti) ja päivitetään vauriot. Ampuminen tapahtuu kummankin osapuolen osalta samanaikaisesti ja vahingot päivitetään vasta, kun kaikki ovat ampuneet. Viimeiseksi päivitetään aika-askeleen aikana siirtymiset liikefunktion perusteella ottaen huomioon ryhmän vauriot ampumisen jäljiltä. Tämän jälkeen siirrytään ajassa eteenpäin.

Optimointia varten aika-askelten ja tilojen historia tallennetaan, ja ohjelman ajofunktiota kutsutaan geneettisten algoritmien ohjaustiedostosta.

	alustaa	kutsuu	muokkaa
alustus.m	parametrit, sjoukkueet, kjoukkueet	-	-
ajo.m	tsjoukkueet, kjoukkueet	askel	tsjoukkueet, kjoukkueet

Taulukko 3.3-1 Ajotiedostot

	input	output	kutsuu	muokkaa
generoi_strategiat.m	joukkueiden lkm, maxt	strategiat	-	-
askel.m	sjoukkueet, kjoukkueet, kasky, parametrit	sjoukkueet, kjoukkueet	paivitatilat, tulitus, liike, nakyyvyys	-
paivitatilat.m	joukkueet, kasky, parametrit	joukkueet	-	joukkueet (vaunut)
liike.m	joukkue, parametrit	joukkue	-	joukkue (sijainti)
tulitus.m	ampujajoukkueet, kohdejoukkueet, parametrit	ampujajoukkueet, kohdejoukkueet	-	ampujajoukkueet, kohdejoukkueet
nakyyvyys.m	katsojajoukkueet, kohdejoukkueet, parametrit	katsojajoukkueet	-	katsojajoukkueet
etaisyys.m	joukkueet (kaksi joukkuetta joiden etaisyys lasketaan)	etaisyys	-	-

Taulukko 3.3-2 Funktiot taulukkomuodossa

Selitystä taulukoihin:

parametrit: funktioiden parametrit esim. nopeudet, maaston ominaisuudet

sjoukkueet: hyökkäävän (sinisen) osapuolen joukkueet struct-tietorakenteena.

kjoukkueet: vastustajan (keltaisen) joukkueet struct-tietorakenteena.

tsjoukkueet: hyökkäävien (sinisten) joukkueiden tilat kaikilla aika-askeleilla

tkjoukkueet: vastustajan (keltaisten) joukkueiden tilat kaikilla aika-askeleilla

maxt: aika-askeleiden enimmäismäärä

strategiat: maxt kertaa 6 matriisi, jossa joka 8. rivillä käsky

kasky: kertoo ehdon, jonka täytyessä siirretään vaunuja tiloista toisiin

3.3.2 Ohjelman toiminta funktiotasolla

Seuraavassa on selitetty lyhyesti oleellisten Matlab-tiedostojen ("m-funktioiden") toiminta.

3.3.2.1 alustus.m

Tässä tiedostossa alustetaan kaikki parametrit. Niitä ovat esim. joukkueiden lukumäärä, nopeudet ja näkemiseen vaikuttavat kertoimet. Alustuksessa määritellään myös tavoitteet sekä maksimiaika. Samalla alustetaan joukkueiden

tietorakenteet (struct), jossa sijainnit, vaunujen tilat ym. sijaitsevat. Samalla alustetaan tallennustietorakenteet, joihin jokainen aika-askel tallennetaan.

3.3.2.2 ajo.m

Ajo-tiedosto nimensä mukaisesti ajaa simulaatiota kutsumalla askel-funktiota aika-askeleittain. Jokaisella aika-askeleella tallennetaan simulaation tilanne tallennustietorakenteisiin. Aika-askeleen lopuksi tarkistetaan aina, onko jokin lopetusehdoista (tavoite saavutettu, aika loppu, hyökkääjän vaunut tuhoutuneet) täyttynyt. Kun simulaatio on loppunut, lasketaan vielä vaurioiden määrät painotettuna sekä aika ja vihollisen täydelliset tuhoutumiset (catastrophic kill) tulos-muuttujaan.

3.3.2.3 ajo_piirolla, ajo_strategialla, ajo_jakaumalla

Nämä ovat muuten identtisiä ajo.m:n kanssa, mutta nimiensä mukaisesti ajon lisäksi suoritetaan nimessä oleva toiminto. Normaalisissa ajo.m:ssä ei generoida strategiaa, sillä se tulee geneettisten algoritmien strategiageneraattorista.

3.3.2.4 askel.m

Funktio ottaa sisäänsä joukkueiden tietorakenteet, strategian t-aika-askelleta vastaavan käskyn sekä parametrit. Ensin funktio päivittää omien joukkueiden vaunujen tilat. Tämän jälkeen kutsutaan ampumisfunktiota kummallekin joukkueelle ja päivitetään vauriot ampumisfunktiolta saatujen tietorakenteiden mukaisesti. Sitten päivitetään siirtymiset kutsumalla liike-funktiota kummallekin joukkueelle. Ampumiset ja vauriot päivitetään ensin eli liikkua voi vain, jos tästä selviää ehjänä.

3.3.2.5 generoi_strategiat.m

Strategia koostuu käskyistä, jotka riippuvat panssarivaunujen määrästä sekä näiden alkuperäisestä ja tavoitteellisesta tilasta. Matemaattisesti:

tila (1-5)

ehto (< tai >)

vaunujen lkm ($1 - \text{vaunujen lkm} * \text{joukkueiden lkm}$)

lähtötila (1-5)

tulotila (1-5)

vaunujen lkm ($1 - \text{vaunujen lkm} * \text{joukkueiden lkm}$)

Esimerkkikäsky: ”Jos tilassa x on enemmän tai vähemmän kuin n vaunua, siirretään tilasta y tilaan z m kpl vaunua”.

Strategiasta muodostetaan yhtä pitkä sarja kuin aika-askeleiden enimmäislukumääräksi on määrätty ajo.m:ssä. Yhden aika-askeleen pituudeksi on määrätty aika, jossa ehditään ampua yksi laukaus. Kahdeksan aika-askelta vastaa noin

minuutin pituutta, jolloin minuutin aikana ehditään siis ampua enintään kahdeksan laukausta. Käskyjä annetaan strategiassa kahdeksan aika-askeleen välein. Käskyjä ei ajeta tätä useammin, sillä aiheenasettajan kanssa käytyjen keskustelujen perusteella minuutti on sopiva (tai minimi) aikaväli käskyille. Tätä tiuhempaa tahtia tulevia käskyjä ei ole realistista suorittaa.

Käskyn luomisessa on kaksi ehtoa, joissa tehdään rajoitteet: suoja-asemasta ei voi siirtyä kuin tuliasematilaan ja samasta tilasta ei siirrytä samaan tilaan. Jälkimmäisen rajoituksen syy on se, että muuten käsky on turha.

Tätä ei kutsuta enää muualla, kuin ajo_strategialla.m:ssä. Tämä johtuu siitä, että itse optimoinnissa gainteger.m hoitaa generoinnin itse. Rajoituksia siirtymisille ei silloin huomioida, mutta ne poistunevat optimoinnin seurauksena, jos ne eivät ole hyviä.

3.3.2.6 paivitatilat.m

Tämä funktio ottaa sisään joukkueen tietorakenteen ja aika-askelta vastaavan käskyn. Idea on yksinkertaisesti tarkistaa täyttykö käskyn ehto, laskea ehdon mukaisessa lähtötilassa olevien vaunujen lukumäärä ja arpoa niistä ehdon mukaiset (m kpl) vaunua siirtymään käskyn määräämään lopputilaan z. Samalla tarkistetaan, että vaunu voi vaurioidensa tai tilansa (suoja-asemasta voi siirtyä vain tuliasemaan) perusteella siirtyä käskettyyn tilaan ja että ammuksia on riittävästi (enemmän kuin nolla), jotta ampumistilaan voidaan siirtyä. Lisäksi tarkistetaan, onko vaunu kulkenut tietyn ennalta asetetun maksimimatkan yli. Jos maksimimatka on saavutettu, vaunu ei siirry enää liikkumista sisältävään tilaan. Vaunujen liikkumista rajoitetaan, etteivät ne kulje liian kauas tavoitteellisen maastonkohdan yli. Tavoite katsotaan suoritetuksi vasta kun tietty määrä vaunuja (tässä kolme) on saavuttanut tavoitteellisen maastonkohdan.

3.3.2.7 liike.m

Tässä funktiossa katsotaan aluksi kuinka monta vaunua joukkueessa on. Sen jälkeen päivitetään joukkueen koordinaatteja matkan s verran siten, että $s = \text{nopeus} * \text{aika} * (\text{liikkuvat vaunut/vaunujen lkm})$. Nopeus suhteutetaan liikkeessä olevien vaunujen perusteella maksiminopeuteen, joka on annettu alkuparametreissa. Etenemisnopeus lasketaan siis seuraavasti:

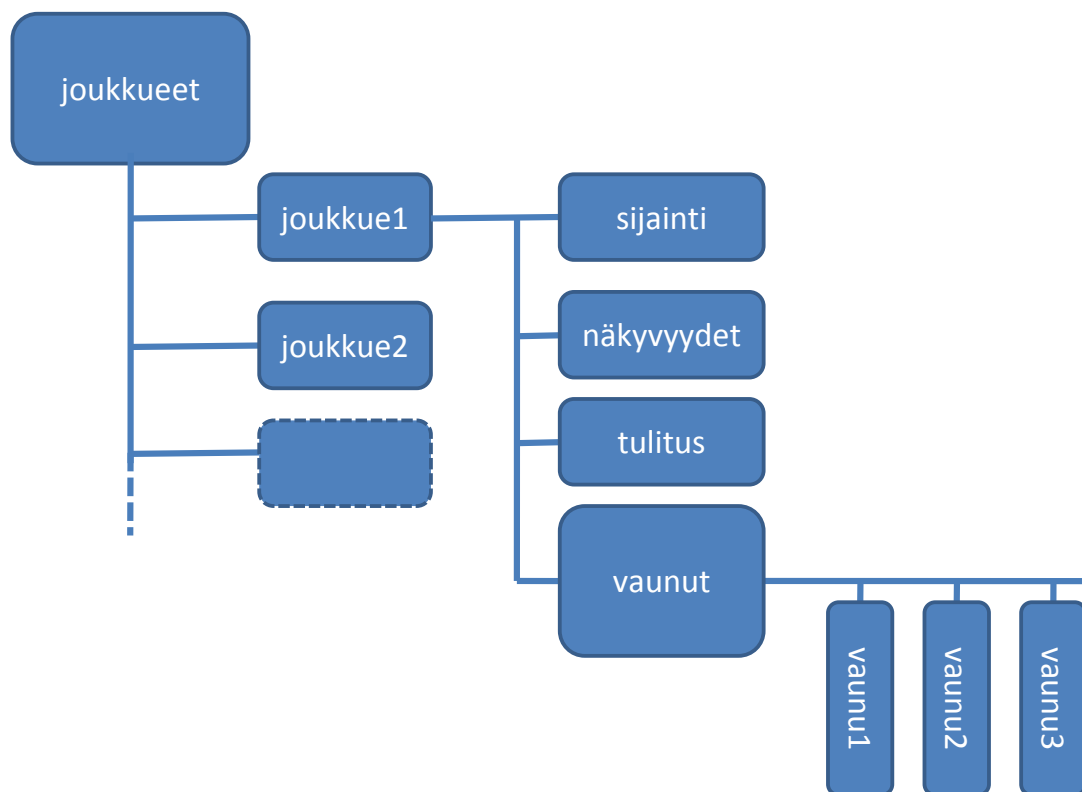
$$v = x_e v_e$$

Jossa x kuvastaa etenevien vaunujen osuutta ja v vaunujen maksiminopeutta.

3.3.2.8 tulitus.m

Tulitus-funktio ottaa sisäänsä kaikki joukkueet sekä parametrit. Tämän jälkeen katsotaan kuka ampuu ja ketä. Funktiiossa käydään kaikki ampujajoukkueiden vaunut läpi ja tarkistetaan vaunujen osalta onko ammuksia jäljellä. Jos ei ole, siirrytään ampumattomaan tilaan ja jos on, niin jatketaan funktiota.

Seuraavaksi määritetään ampujavaunun tilaa vastaava kerroin, määritetään joukkue, jota ammutaan näkyvyyden perusteella, sekä suoritetaan itse ampuminen. Ampumisen kohteeksi osuva vaunu valitaan kohdejoukkueesta satunnaisesti, kuitenkin siten, ettei jo täysin tuhottua vaunua ammuta turhaan. Tämän jälkeen määritetään kohdevaunun tilaa vastaava kerroin ja suoritetaan itse ampuminen ja päivitetään vauriot sekä mahdolliset vaurioista seuraavat tilamuutokset.



Kaavio 3.3-1 Taistelumallin tietorakennekaavio

Kun kaikki ampujavaunu on käyty läpi, palautetaan kohdejoukkueiden vauriot.

3.3.2.9 näkyvyys.m

Funktio ottaa sisäänsä tähystävät joukkueet ja kohdejoukkueet ja määrittää jokaiselle tähystävälle joukkueelle parhaiten nähdyn kohdejoukkueen. Joukkueiden näkökyky on sama kuin "parhaimmassa" tilassa olevien vaunujen näkökyky. Vastaavasti vastustajajoukkueen näkemiseksi tulemista vastaava kerroin on sen parhaiten näkyvää vaunua vastaava kerroin.

Näkemiselle on implementoitu muisti pitkälti oman päättelyn perusteella, sillä aiheesta löytyi hyvin vähän julkista tietoa: Jos joukkue on nähnyt jonkun aikaisemmalla kierroksella, niin sama kohde nähdään seuraavalla kierroksella myös 90 % todennäköisyydellä. Tämä todennäköisyysarvo on itse arvioitu ja sen voi käyttäjä asettaa alkuparametreissa, jos parempaa tietoa on saatavilla. Jos ketään ei näkynyt aikaisemmalla kierroksella, käytetään näkemisfunktiota jälleen määrittämään nähdäänkö joku joukkue vai ei.

Jos ollaan lähitaisteluetäisyydellä (close combat), niin vastassa oleva joukkue nähdään varmasti. Muisti ei vaikuta lähitaisteluetäisyydellä.

3.3.2.10 etaisyys.m

Tämä funktio yksinkertaisesti palauttaa kahden funktiolle annetun joukkueen väliset etäisyyden.

3.3.2.11 funktio.m

Ottaa sisään strategian, hyvyysfunktion kertoimet ja maksimiajan. Tämä funktio määrittää gainteger:ltä tulevan strategian hyvyyden. Koska gainteger:ssa strategia on vektori, pitää se muuttaa matriisiksi, jotta ajo-tiedostot osaavat sitä käyttää. Samalla asetetaan väliin ”tyhjiä” käskyjä, jotta käskyjen välit olisivat sovittu 8 aika-askelta. Hyvyys määritetään siten, että ajetaan simulaatiota strategialla n kertaa ja otetaan tuloksista keskiarvot. Tulosten laskemiseen käytetään gainteger:n antamia kertoimia.

3.3.2.12 gainteger.m

gaintegeri.m:n toteutus on tehty Mathworxin internetsivuilta löytyneen esimerkin pohjalta. [10]

Määrittää aluksi hyvyysfunktiossa käytettävien ajan ja vaurioiden kerrointen arvot ajamalla 500 satunnaista strategiaa läpi. Kerrointen määrittämisestä on selitetty tarkemmin kappaleessa 4.1.

Tämän jälkeen määritetään funktio.m hyvyysfunktioksi ja määritetään muuttujien lukumäärä ($\max t/8*6$), joka on kokonaisaika jaettuna kahdeksalla (käskyjä ainoastaan joka 8. aika-askeleella) ja kerrottuna kuudella, koska jokaisessa käskyssä on kuusi elementtiä. Tämän jälkeen määritetään ylä- ja alarajat strategian elementeille. Toimenpide on melkein sama kuin mikä aikaisemmin generoi_strategiat:ssa. Lopuksi Matlabin ga-funktio pyörittää algoritmia eteenpäin.

Kun optimistrategia on löytynyt ehtojen perusteella, funktio palauttaa sen ja sitä vastaavan tulokset.

3.3.2.13 optimointi.m

Optimointi.m ajaa gainteger.m – tiedoston ja laskee siltä saadun optimistrategian perusteella vaunujen tilajakauman. Jakauman lasku on toteutettu siten, että simulaatiota ajetaan esim. 1000 kertaa ja lopullinen tilajakauma lasketaan ajokerroista saatujen jakaumien keskiarvona.

3.3.2.14 testaus.m

Kun optimointi on suoritettu, voidaan saatua optimistrategiaa visualisoida tällä tiedostolla. Tiedosto muokkaa gainteger.m:n antaman optimistrategian ajo-tiedostojen käyttämään muotoon. Kaavio 3.3-1 Taistelumallin tietorakennekaavio avaa ohjelman tietorakennehierarkiaa selventämällä joukkueet-tietorakenteen kokoonpanoa. ”Joukkueet” on kokoelma joukkueita, jotka kukin koostuvat kolmesta vaunusta. Joukkueetasolla mallinnetaan sijainti, näkyvyys sekä tulitus. Vaunutasolla puolestaan mallinnetaan tilat sekä vauriot.

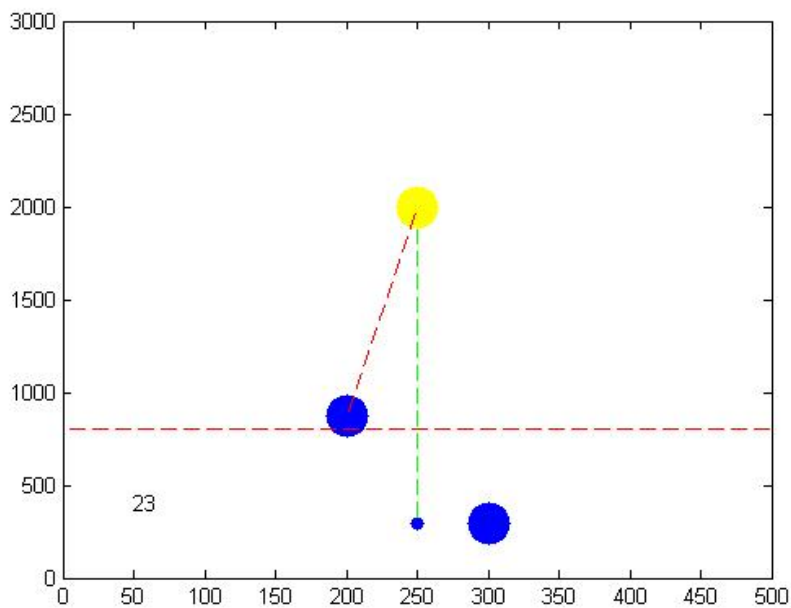
Kaavio 3.3-2 Taistelumallin luokkahierarkia puolestaan avaa Matlab-tiedostojen (/funktioiden) luokka- ja suoritushierarkiaa.



Kaavio 3.3-2 Taistelumallin luokkahierarkia

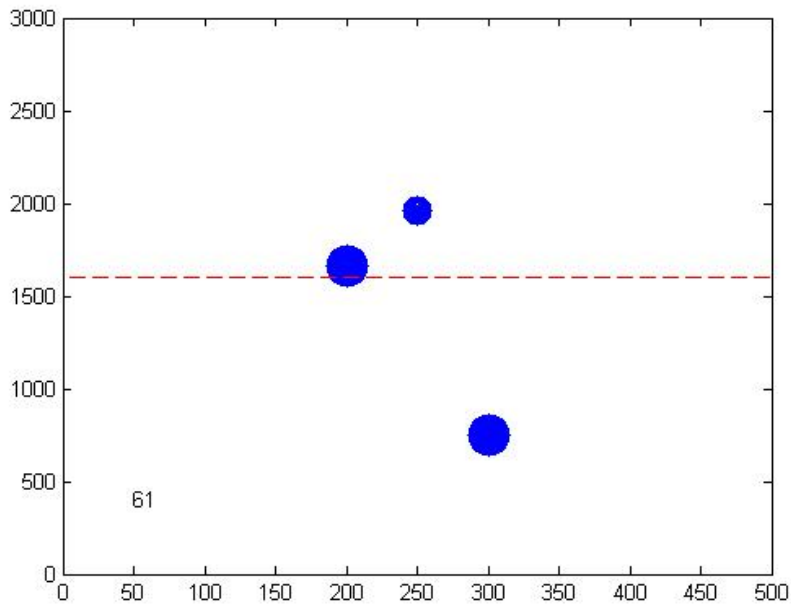
3.3.3 Taisteluohjelman visualisointi

Kuvissa 3.3-1,2 ja 3 on esitetty ohjelman piirtoa. Alkutilanteessa taistelukentällä on kolme hyökkääjän joukkuetta ja yksi vastustajan joukkue. Keltainen pallo kuvaa vastustajan joukkuetta, siinä missä siniset pallot kuvaavat hyökkääjää. Pallon koko korreloi joukkueen vahvuuden kanssa. Mitä pienempi pallo, sitä enemmän joukkuetta on tuhottu. Jos palloa ei näy lainkaan, koko joukkue on täysin toimintakyvytön (catastrophic kill). Punainen poikittainen katkoviiva

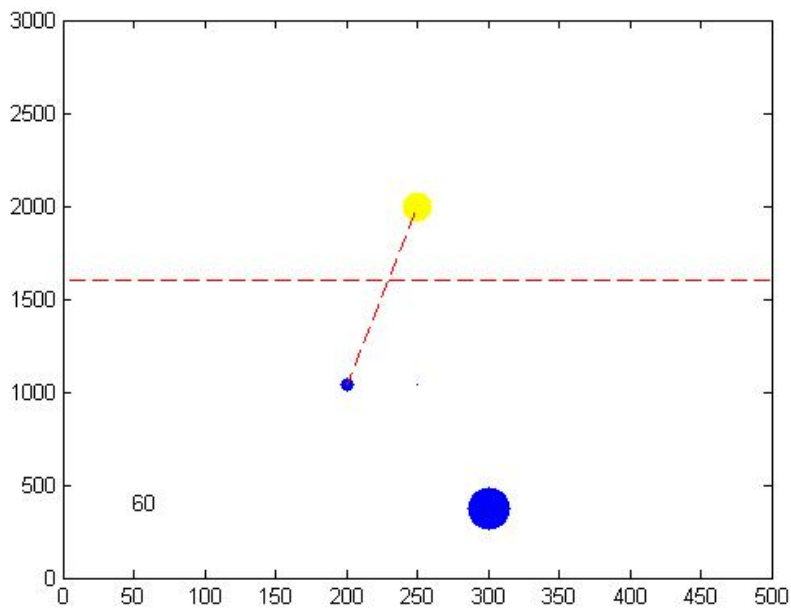


Kuva 3.3-1 Esimerkki taistelusta 1 (Ylempi pallo vihollisen joukkue, alemmat hyökkääjän)

kuva hyökkävän joukkueen tavoitteellista maastonkohtaa. Pallosta toiseen juoksevat katkoviivat kuvaavat ampumista, vihreä hyökkävän joukkueen ja punainen vastustajan. Numero vasemmassa alanurkassa kuvaa aikaa.



Kuva 3.3-2 Esimerkki taistelusta 2 (Vihollinen kukistettu)



Kuva 3.3-3 Esimerkki taistelusta 3 (Ylempi pallo vihollisen joukkue, alemmat hyökkäjän)

4 Optimointi

Taistelumallin toimintaa optimoidaan monitavoitteisesti. Monitavoiteoptimointia varten luodaan kohdefunktio, jonka arvo on tarkoitus minimoida optimaalisen taistelustrategian löytämiseksi annetuille parametreille. Kohdefunktiossa huomioidaan sekä taisteluun kulunut aika että hyökkäävän joukkueen kärsimät tappiot. Tavoitteen saavuttaminen otetaan mukaan yhtälöön binäärisen sakon muodossa – tavoitteellinen maastonkohta joko saavutetaan tai ei. Seuraavassa erittelemme tavoitteen saavuttamiseksi luotua kohdefunktiota, valittua optimointialgoritmia sekä sen implementointia.

4.1 Optimointitehtävän kohdefunktio

Mallissa optimoitava kohdefunktio määritetään ajan ja vaurioiden mukaan. Tavoitteen saavuttaminen huomioidaan kohdefunktioon liitetyn sakkofunktion avulla. Vaurioiden määrittämiseksi kehitetään kaava, joka laskee kaikkien vaurioiden lukumäärän yhteen kuitenkin painottaen täyttä tuhoutumista (catastrophic kill) kertoimella 10. Koska optimoitavia asioita on mallissa enemmän kuin yksi, on kohdefunktion määrittämiseksi löydettävä suhde ajan ja vaurioiden välille. Tilanteesta riippuen tämä suhde saattaa vaihdella merkittävästikin. Esimerkiksi lentokentällä (maastotyyppi 1) taisteltaessa aikaa kuluu todella vähän, kun taas vauriot ovat erittäin suuret, ja sitä vastoin huonokulkuisessa maastossa aikaa saattaa kulua paljon ennen kuin edes nähdään vihollista. Näin ollen yksikäsitteistä jokaiseen tilanteeseen sopivaa kohdefunktiota ei voida määrittää. Jotta strategioita voidaan vertailla keskenään, on kohdefunktio kuitenkin oltava olemassa. Ongelman ratkaisuksi ohjelma alustaa kohdefunktion jokaista optimointitehtävää varten eri painotuksilla.

Kohdefunktion alustamista varten ajetaan aluksi 500 satunnaisella strategialla toteutettua ajoa. Näistä ajoista lasketaan keskiarvoaika ja keskimääräiset vauriot. Keskiarvoja käytetään keskiarvotuloksen määrittämiseksi kohdefunktiolle. Tulos normeerataan siten, että kohdefunktion keskiarvotulos on 100. Keskiarvojen lisäksi lasketaan ajalle ja vaurioille myös keskihajonnat. Keskihajontoja hyödynnetään vaihtosuhteen löytämiseksi ajan ja vaurioiden välille. Keskihajonnat siis normeerataan samalla tavoin kuin keskiarvot alla olevan esimerkin mukaisesti

	Keskiarvo(ka)	Normeerattu ka.	Keskihajonta(sd)	Normeerattu sd.
Aika(t)	150	50	30	25
Vauriot(v)	40	50	15	25

Taulukko 4.1-1 Esimerkki kohdefunktion alustamisesta

Taulukon avulla saadaan muodostettua kohdefunktio:

$$Funktio.m = 100 + 25 \frac{(t - t_{ka})}{t_{sd}} + 25 \frac{(v - v_{ka})}{v_{sd}}$$

Kohdefunktiota minimoimalla löydetään optimaalinen strategia hyökkäykselle. Funktio kasvaa ja pienenee lineaarisesti ajan tai vaurioiden muuttuessa. Näiden muuttujien lisäksi on kuitenkin otettava huomioon myös tavoitteen saavuttaminen. Hyökkäykselle voidaan siis asettaa tavoiteaika, jonka aikana olisi edettävä ohjelman alussa määritetty matka tavoitteelliseen maastonkohtaan. Tavoitteen lisääminen kohdefunktioon onnistuu parhaiten

funktioon lisättävän sakkofunktion (sakko) avulla. Sakkofunktio saa normaalisti arvokseen nolla, mutta jos tavoitetta ei saavuteta, se saa arvokseen alkuparametreissa määritetyn sakon (esimerkiksi 10). Näin kohdefunktio saadaan kirjoitettua seuraavasti:

$$Funktio.m = 100 + 25 \frac{(t - t_{ka})}{t_{sd}} + 25 \frac{(v - v_{ka})}{v_{sd}} + sakko$$

Edellä esitetty kohdefunktio reagoi ajassa ja vaurioissa tapahtuneisiin muutoksiin oikeassa suhteessa. Funktio ei kuitenkaan huomioi, että ohjelman käyttäjää ei välttämättä kiinnostaa lainkaan vauriot, tai ajan merkitys saattaa olla alhainen, kunhan vaurioilta vältytään. Jotta käyttäjän preferenssit saataisiin mukaan malliin, annetaan käyttäjälle mahdollisuus painottaa joko vaurioiden tai ajan merkitystä. Normaalitilassa sekä ajan että vaurioiden painokerroin on 1. Kohdefunktioon painokertoimet huomioidaan seuraavasti:

$$Funktio.m = 100 + \frac{t_{painokr.}}{t_{painokr.} + v_{painokr.}} * 50 * \frac{(t - t_{ka})}{t_{sd}} + \frac{v_{painokr.}}{t_{painokr.} + v_{painokr.}} * 50 * \frac{(v - v_{ka})}{v_{sd}} + sakko$$

Tässä vaiheessa tulee varmasti mieleen, että miksi ei samalla kysytä käyttäjältä, kuinka paljon aikaa on hyökkäyksessä voitettava, jotta ollaan valmiita menettämään yksi panssarivaunu. Ongelmaksi tässä muodostuisi vaikeus määrittää tarkkaa suhdetta, kun ei ole mitään tietoa optimoitavan hyökkäyksen keston ja mahdollisten vaurioiden suuruusluokista.

4.2 Optimointialgoritmi

Seuraavassa erittelemme optimointialgoritmin valintaan johtaneita päätelmiä ja selostamme valittua tekniikkaa (geneettiset algoritmit) laajemmin. Mallin varsin merkittävän satunnaisuuden ja moniulotteisuuden vuoksi päädyimme stokastiseen (approksimoivaan) optimointitapaan analyttisen keinon asemesta. Jo alunpitäen tehtävän kompleksisuus tiedostettiin ja mallia lähdettiin kehittämään nimenomaisesti simulaatiomallina.

4.2.1 Optimointialgoritmin valinta

Yleisesti ottaen stokastisen mallin optimointiin voi käyttää suoraviivaista brute force –tekniikkaa (ajaa lukematon määrä simulaatioita ja saatujen tulosten avulla valita parhaat strategiat) tai johonkin algoritmiin perustuvaa optimointitekniikkaa. Optimointikeinoja voi nopeuttaa tekemällä erilaisia koesuunnitteluun pohjautuvia järjestelyjä simulaation systematisoimiseksi.

Tässä mallissa brute force –tyyppinen optimointi ja kaikkien mahdollisuuksien läpikäynti todettiin jo alkuun liian hankalaksi ja tehottomaksi tehtäväksi. Arvioidessamme tilannetta tulimme siihen tulokseen, että vaihtoehtojen paljous tekee tekniikasta täysin käyttökelvottoman. Vaihtoehtoja eri strategioille on:

$$(5 * 2 * 9 * vaunujenLkm) * 5 * 4 * 9)^{käskyjenLkm}$$

eli

lähtötilojen määrä *kertaa* ehto(pienempi tai suurempi) *kertaa* vaunujen lkm *kertaa* lähtötila *kertaa* tulotila *kertaa* vaunujen lkm *potenssiin* käskyjen lukumäärä.

Nykyisessä implementaatiossamme käskyjä on 20 joten potenssi on 20.

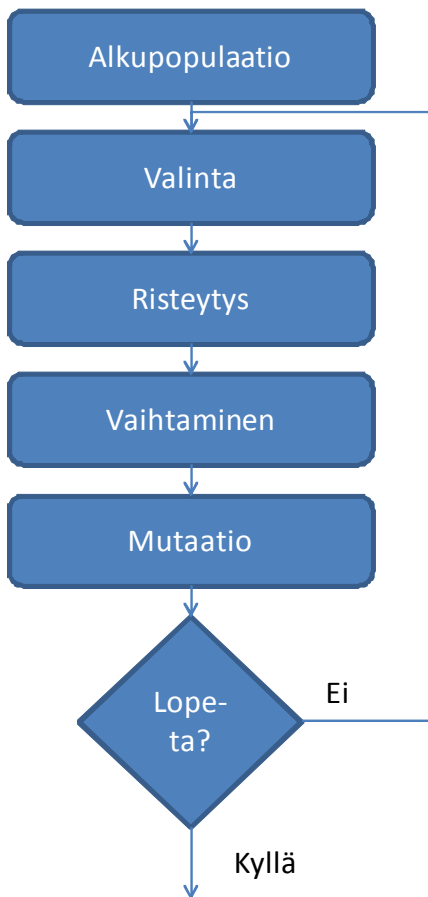
Aika-askeleiden vähentäminen vähentää vaihtoehtoja rajusti, mutta totesimme, että simulaatioiden määrää on järkevämpi vähentää jollain algoritmilla, edes yksinkertaisella sellaisella. Tällöin sama aika-askelmäärä voidaan säilyttää.

Vaikka geneettinen algoritmi ei ehkä ole kaikista yksinkertaisin, päädyimme implementoimaan sen malliimme kirjallisuuskatsauksen (mm. [3]), aiheenasettajan sekä kurssihenkilökunnan kanssa käytyjen keskustelujen perusteella. Kirjallisuuden avulla saimme myös tarvittavat tiedot sen soveltamiseksi tarkoituksiimme. Implementoimme geneettisen algoritmin malliin käyttäen Matlabin geneettisten algoritmien työkalupakkia.

4.2.2 Geneettiset algoritmit

Geneettisistä algoritmeista on olemassa dokumentaatiota varsin monissa lähteissä. Hyödyllisimmäksi meidän työmme kannalta osoittautui Marjike Keetin manuaali [9].

Geneettisillä algoritmeilla saadaan laajat ja ennalta ratkeamattomilta näyttävät ongelmat näyttämään ratkaistavilta. Tämä on lähtötilanne myös meidän mallissamme yllä mainitun vaihtoehtojen suuren määrän perusteella. Geneettiset algoritmit antavat tulokseksi parhaita ratkaisuja yksikäsitteisen optimin asemesta – tämä on järkevää myös meidän mallimme osalta, sillä on hyvin vaikea antaa yhtä tarkkaa optimistrategiaa kullekin taistelulle. Voidaan siis todeta, että taistelussa samaan tai lähes samaan tulokseen voidaan päästä monilla hieman erilaisilla strategioilla ja jossain tapauksissa hyvinkin erilaisilla strategioilla. Tämä johtuu siitä, että taistelussa satunnaisuudella on suuri osa.



Kuva 4.2-1 Geneettisen algoritmin implementointi (mukailtu Keetiltä, 2002)

Kuvassa 4.2-1 on esitetty geneettisen algoritmin toimintaperiaate. Geneettisen algoritmin implementointi alkaa alkupopulaatiosta, jonka koko säilyy koko algoritmin suorituksen ajan. Algoritmi alkaa tämän alustuksen jälkeen muokata populaation yksilöitä. Alkupopulaatiosta valitaan ensiksi parhaat tapaukset jatkamaan seuraavalle sukupolvelle (valinta). Tämä jälkeen parhaista alkioista yhdistellään lisää yksilöitä seuraavaan populaatioon (risteytys). Tämän jälkeen suoritetaan vaihtaminen, jossa muutetaan kahden yksilön arvoja päittäin. Lopuksi tehdään vielä mutaatioita tietyille yksilöille, jolloin yksilön arvoja muutetaan tietyiltä osin täysin satunnaisesti. Lopuksi tarkistetaan onko hyvyysfunktion antama arvo parhaalle yksilölle tarpeeksi hyvä ja joko palataan jälleen alkuun tai lopetetaan algoritmi.

Kaikkien näiden edellä esitettyjen toimien tarkoituksena on saada kohdefunktio konvergoitumaan nopeasti siten, että populaation kohdefunktion keskiarvo lähenisi populaation yksittäisten jäsenten kohdefunktion minimiä. Mutaatioilla ja vaihtamisilla erityisesti koetetaan saada aikaan se, että malli lähenee globaalia minimiä eikä lokaalia minimiä. Kun keskiarvo saadaan tarpeeksi lähelle yksittäisten yksilöiden minimiä, voidaan algoritmin ajo lopettaa.

Käytännössä implementoitaessa geneettisiä algoritmeja tietokoneohjelmistojen avulla tulee käyttäjän antaa ohjelmalle kohdefunktio ja implementointi voi alkaa sillä. Ohjelmistoissa on usein sisään rakennettuna jotkin valmiit parametrit algoritmin suorittamiselle, kuten kuinka suuri osa parhaista valitaan jatkoon, miten risteytys tapahtuu,

kuinka paljon suoritetaan vaihtamista ja mutaatiota. Nämä eivät aina tietenkään ole optimaaliset parametrit, joten syvällisempi mallin implementointi vaatii myös näiden parametrien asettamista ja säätämistä.

Implementaatiossamme Matlabin ga-funktion parametreja ei ole muutettu kuin alkupopulaation koon ja joidenkin laskentaan liittyvien aikarajoitusten osalta.

4.3 Geneettisen algoritmin implementointi

Optimoitavassa mallissa geneettisen algoritmin populaatio muodostuu joukosta vektoreita. Jokainen vektori on 20 käskyn sarja, ja jokainen käsky pitää sisällään 6 komponenttia käsittävän tilansiirtoehdon. Koska yhden aika-askeleen pituus on suhteellisen lyhyt (n. 7,5 sekuntia), ei ole järkevää antaa jokaisella aika-askeleella uutta erilaista käskyä. Kahden käskyn välissä on siis aika-askeleita samalla käskyllä suoritettuina. Tämä on optimoinnin kannalta hyvä ratkaisu, sillä näin yhden strategiayksilön koko pienenee huomattavasti ja siten keventää algoritmin toimintaa.

Runsaan satunnaisuuden vuoksi yhdellä strategialla voidaan saavuttaa monenlaisia kohdefunktion tuloksia. Näin ollen yhdellä strategialla suoritetaan aina monta ajoa, joista lasketaan keskiarvo. Geneettinen algoritmi vertaa kunkin strategian muodostamia keskiarvotuloksia keskenään ja suorittaa valinnat, risteytykset ja mutaatiot.

Geneettisen algoritmin käyttöönotossa hyödynnettiin The Mathworks –sivuston ohjeita [10], ja myös mallin parametrit valittiin sivuston viitearvojen mukaan. Populaation kooksi valittiin 100. Yleensä geneettisissä algoritmeissa pyritään populaation kooksi valitsemaan yhtä suuri arvo kuin yhden yksilön koko on. Suoraan seuraavaan sukupolveen 10 prosenttia edellisestä sukupolvesta. Parhaat jälkeläiset määritetään vektoreiden kohdefunktiosta saamien keskiarvotulosten mukaan. Risteytyksien tuloksena syntyy mallin seuraavaan sukupolveen 80 % jälkeläisistä ilman sitä 10 prosenttia, joka siirtyy suoraan seuraavaan sukupolveen. Loput jälkeläiset synnytetään mutaatioiden avulla.

4.4 Optimoinnin tulokset

Seuraavassa esitellään optimoinnin tuloksia. Simulaatioiden ajaminen on verrattain raskasta ja aikaa vievää, joten strategioiden optimointi suoritetaan ainoastaan kahdelle lähtötilanteelle yhdeksän mahdollisen asemesta. Näiden optimointien tavoite on osoittaa, että simulaatiomalli tuottaa järkeviä tuloksia ja strategiaoptimointi toimii annetulla lähtötiedolla. Tulokset itsessään ovat ainoastaan marginaalisesti mielenkiintoisia paremman, puolustusvoimien hallussa olevan, tiedon puuttuessa tärkeimpien parametrien osalta. Nyt aiheenasettajalla on mahdollisuus liittää luottamukselliset parametrit simulaatiomalliin ja ajaa simulaatioita sekä optimointeja halutuille alustustiedoille kuten erilaisille maastokartoille.

4.4.1 Lähtötilanteet

Rakennettuun simulointimalliin voidaan syöttää alustustiedoston avulla kymmenille eri muuttujille arvoja, joista tulee ääretön määrä erilaisia ”lähtötilanteita”. Mahdollisia muuttujia ovat mm. maasto, kentän koko, vaunujen määrä, etäisyydet, pisin mahdollinen etenemismatka jne. Yhden alkutilanteen optimoinnissa menee aikaan noin kuusi tuntia.

Alustettavia muuttujia on paljon eikä työmme puitteissa ole tarkoituksenmukaista pyrkiä löytämään optimistrategiaa kaikille mahdollisille lähtötilanteille. Sen vuoksi valitsemme optimointiin kaksi erilaista lähtötilannetta, joiden avulla havainnollistetaan optimointia ja sen toimivuutta. Lähtötilanteiden halutaan olevan hyvin erilaisia, jotta nähdään, miten malli toimii erilaisilla lähtötilanteilla. Lähtötilanteet eroavat toisistaan seuraavalla tavalla (Taulukko 4.4-1):

	tavoite-et.	et. viholliseen	omien vaunujen et. toisistaan	maaston muoto	metsä
Lentokenttä (maasto 1)	1600	2000	50	tasainen	ei ole
Tiheä kumpuileva metsä (maasto 6)	800	600	25	kumpuinen	tiheä

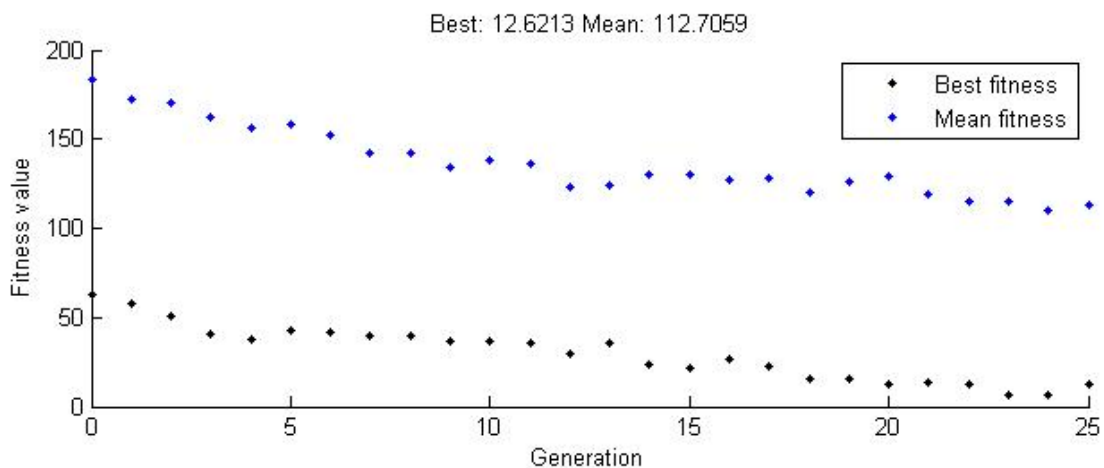
Taulukko 4.4-1 Alkualustukset optimoinnille

- **"Lentokenttä"**. Tämä lähtötilanne vastaa maastotyyppiä 1, jossa ei ole puustoa ja jossa maasto on hyvin tasaista. Hyvän näkyvyyden, osumistarkkuuden ja etenemisnopeuden takia tavoite asetettiin 1600 metrin päähän ja vihollinen 2000 metrin päähän. Tavoite-etäisyyttä ei valittu vihollisen tasalle, sillä hyvän näkyvyyden vuoksi vihollinen oli jo 1600m kohdalla monesti tuhottu. Omien vaunujen etäisyyksiksi toisistaan valittiin 50 metriä.
- **Tiheä kumpuileva metsä**. Nimensä mukaisesti tässä maastotyyppissä on tiheä metsä ja maasto on kumpuilevaa. Tiheän metsän ja kumpuilevan maaston vuoksi näkyvyys ja osumistarkkuus ovat erittäin heikkoja. Myös vaunun etenemisnopeus tässä maastossa on hidas. Koska alustuksessa aika-askelten määrä pidettiin samana, vihollinen tuotiin 600m päähän, jotta saataisiin optimoinnin kannalta järkeviä tuloksia. Tavoite-etäisyys asetettiin 800m päähän. Huonon näkyvyyden ja haastavan maaston vuoksi vaunut tuotiin 25 metrin etäisyydelle toisistaan.

Edellä mainituille kahdelle lähtötilanteelle muodostetaan optimistrategiat geneettisen algoritmin avulla. Geneettisen algoritmin avulla ajetaan sadan eri strategian kokoinen populaatio, joista jokainen simuloidaan 100 kertaa. Parhaat valitaan kappaleessa 4.2.1 esitellyn mukaisesti jatkoon seuraavaan sukupolveen. Algoritmi päätetään 25. sukupolven kohdalla.

4.4.1.1 Optimointi "lentokenttä"-maastossa

"Lentokenttä"-maaston osalta geneettisen algoritmin iterointi tuottaa seuraavanlaisen optimointiprosessin (Kuvaaja 4.4-1)



Kuvaaja 4.4-1 Strategioiden tuottamat kohdefunktioiden arvot sukupolvittain (lentokenttä)

Kuvaajassa on kohdefunktion pisteet eri sukupolvien osalta. Kuvan ylemmät pisteet edustavat kunkin populaation kaikkien 100 strategian simulointien pistekeskisarvoa. Alemmat pisteet edustavat parhaan strategian simulointien pistekeskisarvoja.

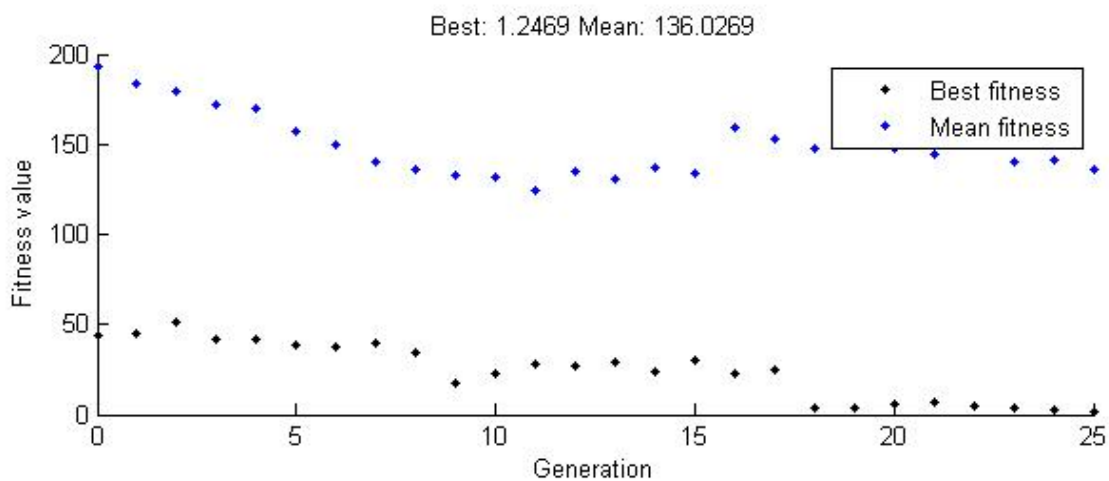
Kuvaajasta nähdään, että geneettinen algoritmi luo sukupolvesta toiselle jatkuvasti parempia tuloksia pieniä poikkeamia lukuun ottamatta. Lisäksi kaikkien strategioiden keskiarvo lähestyy parhaan strategian pistekeskisarvoa. Kuitenkin erot parhaan ja muiden välillä pysyvät loppuun asti melko suurina, mikä kertoo siitä, ettei geneettinen algoritmi konvergoitu kovin tehokkaasti kohti optimia. Tuloksen parantamiseksi sukupolvien määrä voitaisiin lisätä, mutta jo 25:llä sukupolvella simulointi kestää yli kuusi tuntia.

Toisen ongelman luo viimeisen sukupolven parhaan strategian huonontuminen suhteessa kierrokseen 24. Täten lopputulokseksi ei saada simuloinnin parasta strategiaa. Toisaalta ei voida varmuudella tietää, onko kierroksen 25 paras strategia sama kuin kierroksen 24. Mallissa on merkittävä määrä satunnaisuutta, mikä vääristää tuloksia ja vaikeuttaa johtopäätösten vetämistä yksittäisten strategioiden osalta. Virhettä voidaan pienentää lisäämällä jokaisen strategian ajojen määrää, mikä puolestaan kasvattaa simuloinnin pituutta merkittävästi.

Yhteenvedona lähtötilanteesta ”lentokenttä” voidaan sanoa, että optimoinnin tulos on alhaisellakin määrällä sukupolvia satunnaisstrategiaa huomattavasti parempi. Lopullisen strategian kohdefunktion pistekeskisarvo on noin 10 kun taas kierroksen 0 koko populaation strategioiden pistekeskisarvo on noin 180.

4.4.1.2 Optimointi ”tiheä kumpuileva metsä” –maastossa

”Tiheä kumpuileva metsä” –maastolle geneettisen algoritmin iterointi tuottaa kuvaajan 4.4-2 kaltaisen optimointiprosessin.



Kuvaaja 4.4-2 Strategioiden tuottamat kohdefunktioiden arvot sukupolvittain (tiheä metsä ja kumpuileva maasto)

Kuvaajasta nähdään, että ”tiheän kumpuilevan metsän” lähtötilanteessa optimointi ei parane niin suoraviivaisesti kuin lähtötilanteessa ”lentokenttä”. Tämä johtuu tiheän metsän luomasta suuremmasta stokastisuuden määrästä osumisen ja näkemisen suhteen.

Ensimmäisen kymmenen sukupolven aikana kaikkien strategioiden simulointien pistekeskisarvo konvergoituu suoraviivaisesti kohti parhaan strategian pisteitä. Valitettavasti sen jälkeen kaikkien strategioiden pistekeskisarvo lopettaa konvergoitumisensa ja alkaa heittelehtiä vakiotasolla (noin 150 pistettä).

Parhaan strategian pistekeskisarvon osalta pisteet liikkuvat melko tasaisesti, lukuun ottamatta muutamaa hyppäystä (sukupolvet 9 ja 18). Merkittävä parannus tapahtuu 18. sukupolven kohdalla, jonka jälkeen parhaan strategian pisteet pysyvät melko samoina. Kierroksen 18 jälkeen kyseessä saattaa olla yksi ja sama strategia, sillä tulokset eivät heittelehti juurikaan.

Yhteenvetona lähtötilanteesta ”tiheä kumpuileva metsä” voidaan sanoa, että parhaan strategian tulos on hyvä ja selvästi satunnaisstrategiaa parempi. Parhaan strategian pistekeskisarvo on lähellä nollaa, kun ensimmäisen kierroksen koko populaation strategioiden pistekeskisarvo on noin 200. Valitettavasti koko populaation strategioiden pistekeskisarvo ei konvergoitu, mikä kielii siitä, ettei geneettinen algoritmi osaa yleistää optimistrategiaa koko populaatioon.

4.4.2 Optimistrategia lähtötilanteelle ”lentokenttä”

Matlabin geneettisen algoritmin luoma optimistrategia lähtötilanteelle ”lentokenttä” nähdään taulukossa 4.4-2.

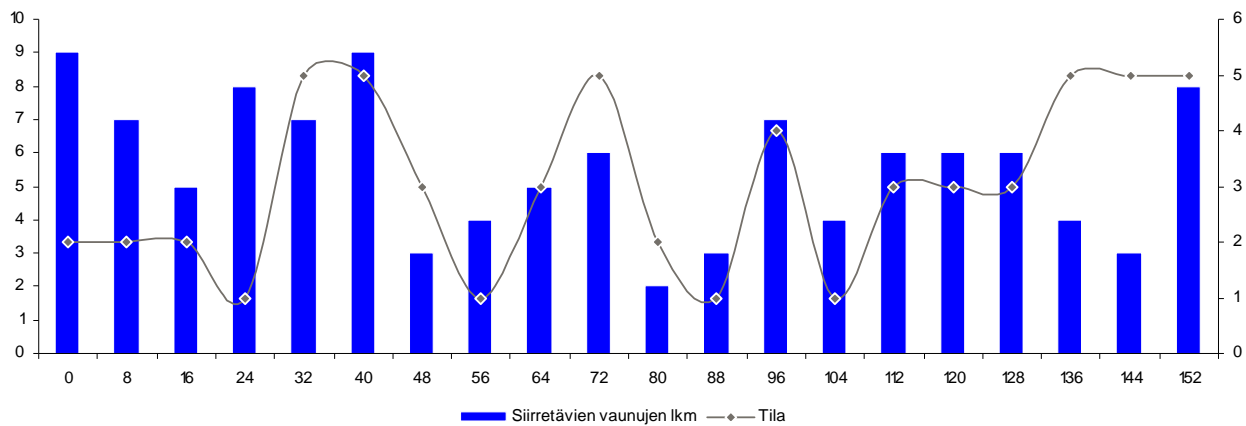
Taulukkoa luetaan seuraavasti (vrt. kappale 3.3.2.5):

- Ensimmäinen sarake kertoo tilan jota tutkitaan
 - o 1 = etenee -tila
 - o 2 = etenee ja tulittaa -tila
 - o 3 = tulittaa tulasemasta -tila
 - o 4 = tulasemassa / valmiustila -tila
 - o 5 = suoja-asemassa -tila
- Toinen sarake kuvaa ehdon (0 tarkoittaa *pienempi* kuin ja 1 *suurempi kuin*)
- Kolmas sarake kertoo ehtoon liittyvän vaunujen lukumäärän
- Neljäs sarake kertoo mistä tilasta vaunuja siirretään
- Viides sarake kertoo mihin tilaan kyseiset vaunut siirretään
- Kuudes sarake kertoo kuinka monta vaunua kyseiseen tilaan siirretään.

Esimerkkikäsky taulukon toisesta rivistä: ”Jos tilassa 2 on vähemmän kuin 2 vaunua, siirretään tilasta 1 tilaan 2 seitsemän vaunua.” Taulukkoa lukiessa nähdään että lopussa (ajanhetket 104-144) siirretään paljon vaunuja tilaan 3, eli tilaan tulittaa tulasemasta. Optimistrategian voi lukea myös kuvaajasta 4.4-3.

Optimistrategia maastotyyppi 1 - Lentokenttä						
Aika	Tila	Ehto (< tai >)	Vaunujen lkm	Lähtötila	Tulotila	Siirretävien vaunujen lkm
0	2		0	2	4	1
8	2		0	2	1	2
16	2		1	1	3	3
24	1		0	5	4	2
32	5		0	9	1	2
40	5		0	1	1	4
48	3		0	0	2	3
56	1		0	8	2	3
64	3		0	0	3	2
72	5		1	6	3	1
80	2		1	3	3	2
88	1		0	5	1	1
96	4		0	9	4	4
104	1		1	8	4	3
112	3		1	4	5	3
120	3		1	4	4	3
128	3		1	4	1	3
136	5		0	4	4	3
144	5		0	8	2	3
152	5		0	2	5	4

Taulukko 4.4-2 Optimistrategia lähtötilanteelle "lentokenttä"



Kuvaaja 4.4-3 Lentokenttä-maaston optimistrategia: tilat ja vaunujen lukumäärät ajan suhteen

Koska taistelu on stokastinen (näkemisen, osumisen ja vaurioiden osalta), täytyy käskyjen olla edellä mainitussa ehtolause-muodossa. Tämän vuoksi pelkästään edellisen taulukon perusteella ei voida tietää miten strategia käytännössä etenee. Varsinainen optimistrategia kuvataankin toimeksiantajan toivomuksesta tilajakaumana, joka kertoo kuinka suuren osan ajasta missäkin tilassa ollaan. Tämä tilajakauma lasketaan ajamalla 1000 simulointia edellisellä optimistrategialla ja laskemalla keskiarvot siitä, kuinka kauan missäkin tilassa ollaan oltu.

Lähtötilanteelle "lentokenttä" optimistrategian tilajakauma on seuraava:

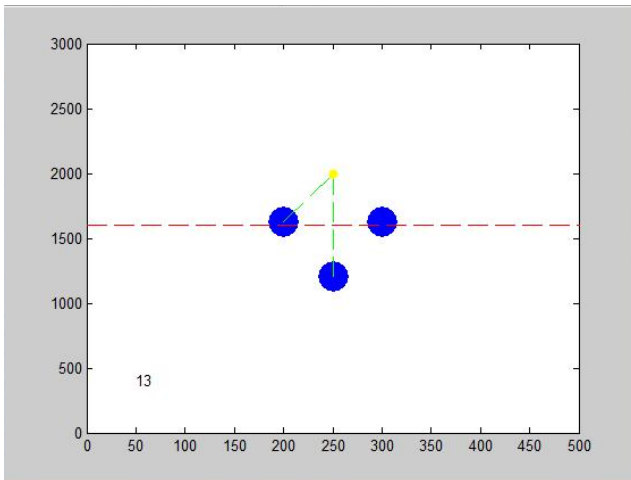
[0.6599 0.2129 0.0075 0.1172 0.0]

Tilajakaumaa luetaan siten että "etenee" -tilassa oltaisiin noin 66 % ajasta, "etenee ja tulittaa" -tilassa noin 21 % ajasta, "tulittaa tuliasemasta" -tilassa noin 1% ajasta ja "valmius" -tilassa noin 12 % ajasta. Suoja-asema-tilassa ei oltaisi ollenkaan. Käytännön kannalta tämä tarkoittaa sitä, että lentokenttä-maastossa kannattaa ajaa melkein 90 % ajasta kohti tavoitetta, osittain samalla tulittaen. Tämä takaa tavoitteen nopean saavuttamisen.

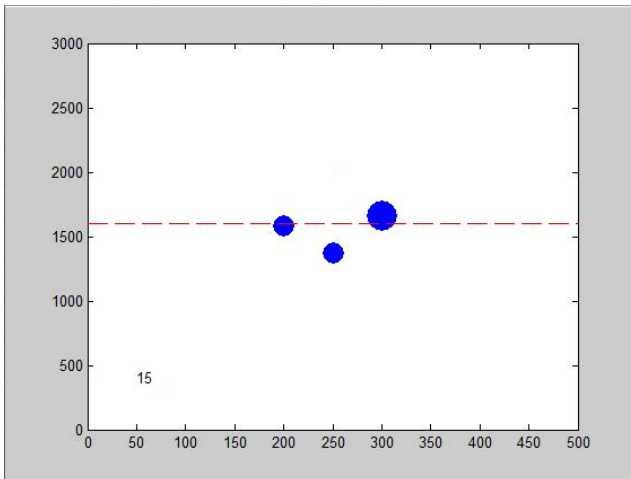
Lisäksi koska maasto on avointa ja tasaista, osumistarkkuus on hyvä etenemisestä huolimatta. Ei kannata jäädä paikalleen ampumaan, sillä se hidastaa tavoitteeseen pääsemistä, eikä merkittävästi kasvata osumatarkkuutta. Päinvastoin nopea eteneminen ja tästä johtuva etäisyyden pieneneminen parantaa osumista suhteessa enemmän kuin pelkkään ampumiseen keskittyminen.

Ampumistiloissa ollaan noin 22 % ajasta (sekä "tulittaa ja etenee" että "tulittaa tuliasemasta" -tiloissa), joka on suhteellisen suuri osuus. Tämä selittyy sillä että avoimessa maastossa jatkuvasti edettäessä tavoitteeseen päästään niin nopeasti, että pienikin absoluuttinen ampumisen määrä kasvattaa ampumisen suhteellista osuutta merkittävästi.

Seuraavassa on esimerkkejä todennäköisimmistä lopputulemista lähtötilanne lentokentälle (Kuva 4.4-1 ja Kuva 4.4-2).



Kuva 4.4-1 Esimerkki todennäköisestä lopputulemasta (lentokenttä), ylin pallo vihollisen joukkue, muut hyökkääjän



Kuva 4.4-2 Esimerkki todennäköisestä lopputulemasta (lentokenttä), vihollinen kukistettu

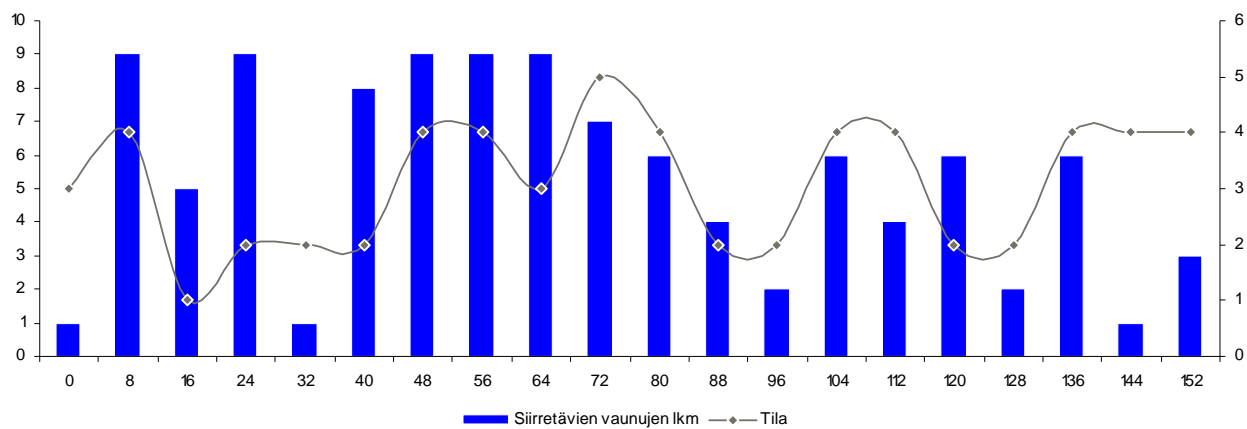
Keskimmäinen joukkue jää suuressa osassa strategioita hieman jälkeen. Tämä johtuu siitä, että keskimmäinen joukkue huomaa vihollisen todennäköisimmin ensimmäisenä lyhyemmän etäisyyden vuoksi ja alkaa tulittaa vihollista, jolloin vauhti hidastuu. Muut joukkueet liikkuvat tällöin nopeammin ja niiden vauhti hidastuu vasta, kun he ovat samalla etäisyydellä vihollisesta kuin keskimmäinen. Joukkueet ikään kuin ”piirittävät” vihollisen joukkueen siten, että kaikilla on sama etäisyys ja siten myös sama osumistarkkuus.

4.4.3 Optimistrategia lähtötilanteelle ”tiheä kumpuileva metsä”

Toiselle lähtötilanteelle ”Tiheä kumpuileva metsä” geneettisen algoritmin luoma optimistrategia on Taulukko 4.4-3 Optimistrategia lähtötilanteelle ”tiheä kumpuileva metsä” sekä Kuvaajan 4.4-4 mukainen. Taulukosta nähdään että tällä kertaa lopussa (aikavälillä 64-152) siirretään useita vaunuja tilaan 4, joka vastaa tuliasemaa (valmiustilaa).

Optimistrategia maastotyyppi 6 - Tiheä kumpuilva metsä						
Aika	Tila	Ehto (< tai >)	Vaunujen lkm	Lähtötila	Tulotila	Siirretävien vaunujen lkm
0	3		0	3	3	1
8	4		1	5	4	1
16	1		1	4	4	2
24	2		0	7	1	2
32	2		0	6	4	2
40	2		1	0	1	2
48	4		0	4	1	3
56	4		0	5	4	5
64	3		1	5	2	4
72	5		1	8	1	1
80	4		1	5	2	4
88	2		0	2	2	4
96	2		0	2	1	2
104	4		0	5	3	4
112	4		1	9	5	2
120	2		1	5	2	4
128	2		1	1	4	2
136	4		1	7	4	4
144	4		1	8	4	4
152	4		0	8	3	4

Taulukko 4.4-3 Optimistrategia lähtötilanteelle ”tiheä kumpuilva metsä”



Kuvaaja 4.4-4 Kumpuilvan metsämaaston optimistrategia: tilat ja vaunujen lukumäärät ajan suhteen

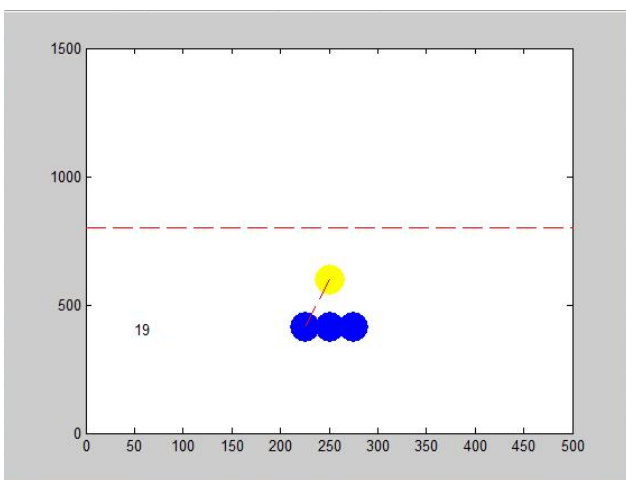
Optimistrategian pohjalta ajatun 1000 simulaation perusteella ”tiheän kumpuilvan metsän” optimitilajakauma on seuraava:

[0.5294 0.1373 0.0035 0.2997 0.0023]

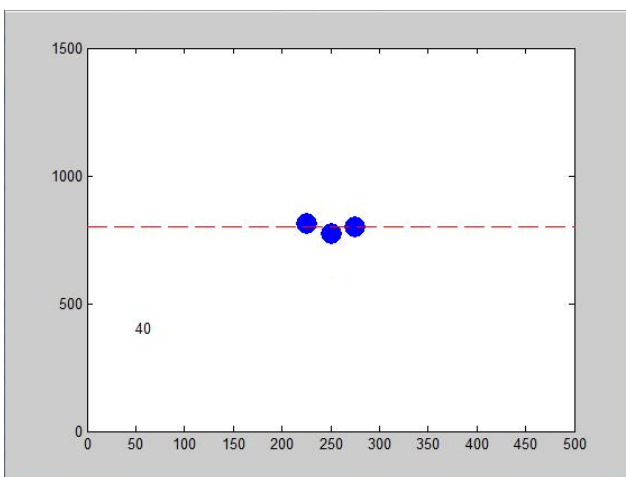
Tilajakauman perusteella nähdään, että "etenee" -tilassa ollaan noin 53 % ajasta, "etenee ja tulittaa" -tilassa noin 14 % ajasta, "tulittaa tuliasemasta" -tilassa 0 % ajasta ja "tuliasemassa" -tilassa noin 30 % ajasta. Suoja-asema-tilassa ei olla käytännössä lainkaan. Verrattuna lähtötilanteeseen "lentokenttä", tässä lähtötilassa edetään merkittävästi vähemmän (vain noin 65 % ajasta). Tämä selittyy osittain siitä, että huonomman näkemiskyvyn takia pyritään olemaan enemmän valmiustilassa (eli tuliasemassa), mikä parantaa vihollisen havaitsemiskykyä ja siten myös osumistodennäköisyyttä.

Lisäksi verrattuna lähtötilanteeseen "lentokenttä", tässä lähtötilanteessa ollaan ampumistiloissa (sekä "tulittaa ja etenee" että "tulittaa tuliasemasta" -tiloissa) huomattavasti pienempi osa ajasta (yhteensä vain noin 14 % ajasta). Ajan suhteen pienempi tulittamisen määrä selittyy sillä, että tiheässä metsämaastossa vihollista ei havaita yhtä aikaisin. Vihollinen havaitaan vasta hyvin lähellä, jolloin liikkumiseen ja valmiustilassa (tuliasemasta) olemiseen on käytetty suhteessa suurempi osa ajasta.

Seuraavassa on esimerkkikuvia tiheän kumpuilevan maaston toteutumista. Kuva 4.4-3 on ote käynnissä olevasta simulaatiosta ja Kuva 4.4-4 on loppuun saakka ajettu simulaatio.



Kuva 4.4-3 Käynnissä oleva simulaatio (Tiheä kumpuileva metsä, ylempi pallo vihollisen joukkue, muut hyökkääjän)



Kuva 4.4-4 Valmis simulaatio (Tiheä kumpuileva metsä, vihollinen kukistettu)

Tässä maastotyyppissä vaunut pysyttelevät hyvin pitkälti rinnakkain, mutta keskimmäisen vaunun taakse jääminen näkyy myös tässä maastotyyppissä. Simulaation visualisointi kuitenkin osoittaa, että tällä kertaa on kannattavampaa edetä hiukan hitaammin ja että joukkueiden väliset erot eivät saa kasvaa kovin suuriksi, sillä tällöin ylivoiman vaikutus heikkenee tiheässä metsässä. Tämä puolestaan kasvattaa tappioita.

4.5 Tulosten arviointi

Mallin stokastisuuden vuoksi optimaalisilla strategioilla voidaan päätyä lukemattomiin erilaisiin lopputuloksiin. Molemmille optimistrategioille tehtiin 100 koeajoa ja saatiin seuraavanlaiset tulokset:

TULOKSET		Omien vaurioiden hinta	Käytetyt ammuks	Käytetty aika	Vihollisen tuhotut vaunut
Lentokenttä	Keskiarvo (n=50)	25,36	29,74	17,58	2,08
	Keskiarvo (n=100)	26,74	30,11	17,7	2
	Keskihajonta (n=100)	19,46	10,12	5,78	0,96
	Minimi (n=100)	0	8	14	0
	Maksimi (n=100)	90	56	58	3
	1. kvartaali	13	24	14	1
	mediaani	22,5	29,5	16,5	2
	3.kvartaali	34,25	35,25	19	3
Tiheä kumpuileva metsä	Keskiarvo (n=50)	32,26	21,62	34,54	2,46
	Keskiarvo (n=100)	30,23	21,11	33,54	2,41
	Keskihajonta (n=100)	17,81	11,34	4,41	0,87
	Minimi (n=100)	3,00	4,00	31,00	0,00
	Maksimi (n=100)	90,00	49,00	50,00	3,00
	1. kvartaali	20,00	11,00	31,00	2,00
	mediaani	25,50	19,00	31,00	3,00
	3.kvartaali	35,00	29,00	34,00	3,00

Taulukko 4.5-1 Optimistrategioiden tulokset

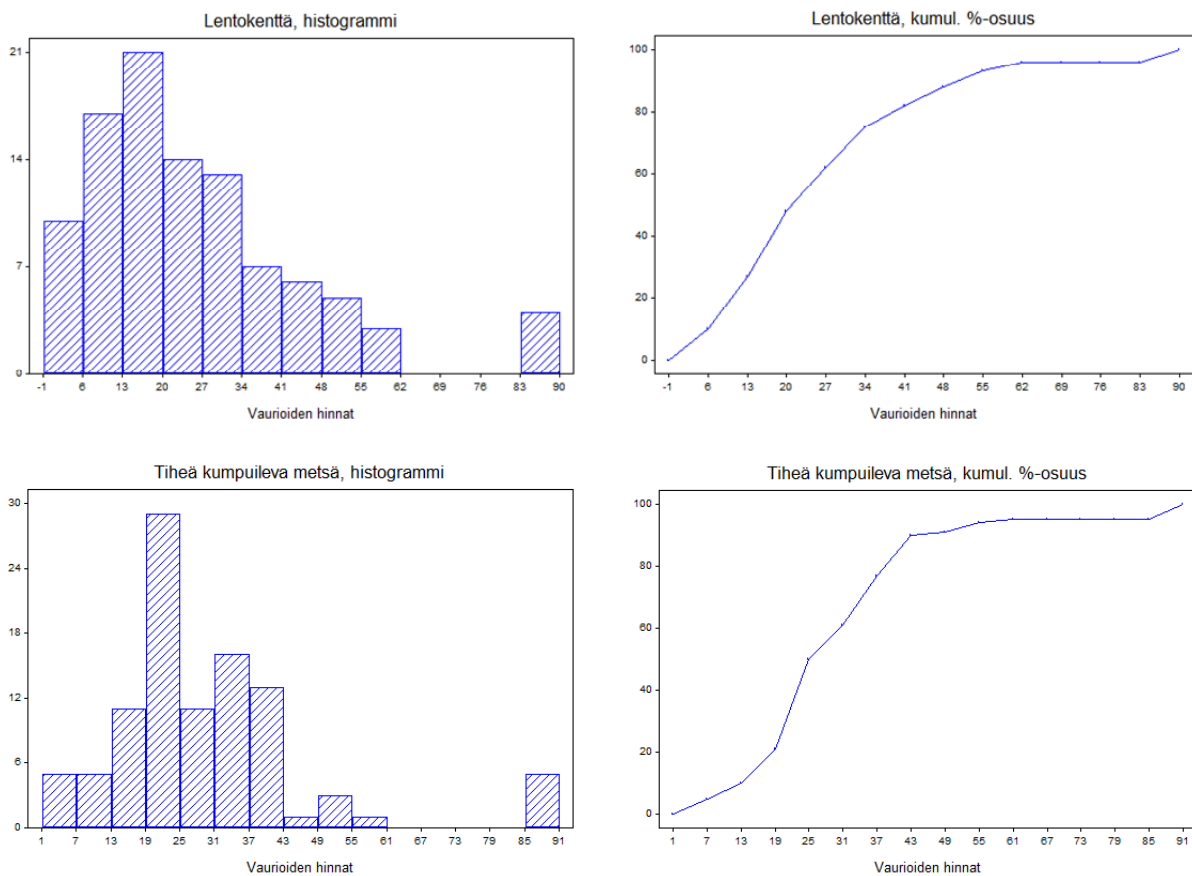
Tuloksista havaitaan, että kaikilla mitattavilla suureilla on kohtuullisen suuri keskihajonta. Suuri keskihajonta johtuu mallin stokastisuudesta. Suuren keskihajonnan vuoksi yhden strategian yksittäisen ajon lopputulosta ei pystytä tarkasti ennustamaan, mutta erilaisille lopputuloksille pystytään silti mallin tulosten perusteella antamaan todennäköisyyksiä.

Toinen merkittävä huomio on tulosten keskiarvon vakaus. 50 ajon ja 100 ajon keskiarvot eivät poikkea toisistaan merkittävästi. Tämä kertoo siitä, että vaikka mallissa on stokastisuutta, mallin strategioiden tulokset ovat odotusarvoltaan ennustettavissa ja siis mallin tulosten pohjalta voidaan antaa ohjeita yksiköiden toiminnalle erilaisissa tilanteissa.

4.5.1 Omien vaurioiden hinta

Omien vaurioiden hinta on taisteluissa erittäin merkittävä tekijä, sillä jos taistelusta on odotettavissa liian suuret kustannukset, siihen ei kannata lähteä. Lentokentällä omien vaurioiden keskiarvoksi saatiin 26,74 ja keskihajonta oli 19,46. Tiheällä kumpuilevalla metsällä keskiarvo oli 30,23 ja keskihajonta 17,81. Tiheällä kumpuilevalla metsällä kustannukset ovat hieman suuremmat kuin lentokentällä, mikä johtuu ylivoiman pienemmästä vaikutuksesta tiheässä metsässä. Tämä on järkevä tulos, sillä "lentokenttä" -maastossa tulta pystytään käyttämään tehokkaammin.

Molemmissa lähtötilanteissa keskihajonta on keskiarvoon nähden erittäin suuri. Tämä kertoo siitä, että kustannusten ennustettavuus on huono. Kuvassa 4.5-1 on esitetty histogrammit ja kumulatiiviset prosenttiosuudet molemmille lähtötilanteille.



Kuva 4.5-1 Kustannusten histogrammit ja kumulatiiviset %-osuudet

Lentokentän tulosten histogrammi on huomattavasti tasaisemmin jakautunut kuin tiheän metsän. Tiheällä kumpuilevalla metsällä on selkeästi havaittavissa yksi huippu, jonka korkeus on melkein 30. Lentokentän histogrammi on sen sijaan tasaisempi ja sen suurimman huipun korkeus on vain 21. Tämä kertoo siitä, että lentokentällä lopputuloksena olevia kustannuksia on huomattavasti hankalampi ennustaa, ja niihin liittyy enemmän todennäköisyyttä. Näin suuri ero histogrammeissa johtuu siitä, että lentokentän tavoite-etäisyys on jo ennen vihollista, kun taas tiheän kumpuilevan metsän tavoite-etäisyys on vihollisen jälkeen ja pakottaa joukot ns. close combat -taisteluun.

Molemmissa histogrammeissa on havaittavissa yksi palkki aivan oikeimmaisessa reunassa, joka liittyy tilanteeseen, jossa kaikki vaunut ovat tuhoutuneet. Tämän palkin ja pisteen 60 tienoilla olevan palkin välillä on tyhjää. Tämä selittyy sillä, että tilanteessa, jossa hyökkääjällä on jäljellä ainoastaan 3 vaunua tai alle (ylivoima menetetty), peli on erittäin suurella varmuudella hävitty. Mallissa on myös ehto, joka määrää että tavoitteen täyttymiseen vaaditaan vähintään kolmen vaunun ylittävän tavoitelinjan maastossa, jolloin alle kolmella vaunulla tavoitteen täytyminen on

mahdotonta. Näin hyökkääjän vaunuille jää tavoitteen täyttymistä ”odotellessa” myös enemmän aikaa vaurioitua ja tuhoutua.

Kumulatiivinen prosentuaalinen osuus kuvastaa kumulatiivista todennäköisyyttä. Lentokentällä kumulatiivinen todennäköisyys on kohtuullisen tasainen ja kuvaaja melkein koko matkalta konkaavi. Tiheällä kumpuilevalla metsällä alussa on selkeä konveksoiva osa, joka kertoo vahvasta huipukkuudesta todennäköisyysjakaumassa. Alussa lentokentällä on suurempi todennäköisyys saada pieniä arvoja kustannuksiksi, mutta lopussa todennäköisyydet kääntyvät toisinpäin. Esimerkiksi todennäköisyys saada kustannukseksi 43 tai pienempi on lentokentällä 0,83, mutta tiheässä kumpuilevassa metsässä sille on jo parempi todennäköisyys 0,92.

Johtopäätöksenä voidaan todeta, että tiheässä kumpuilevassa metsässä taistelu johtaa suhteellisen varmasti hyökkääjälle keskinkertaisiin kustannuksiin. Lentokentällä puolestaan selvittää taistelusta joko kohtuullisen suurin tai kohtuullisen pienin kustannuksin – hajonta on merkittävästi suurempaa kuin kumpuilevassa metsämaastossa.

4.5.2 Käytetyt ammuksot

Lentokentällä ammuksia käytettiin keskimäärin 30,11 ammusta ja keskihajonta oli 10,12. Tiheässä kumpuilevassa metsässä keskiarvo oli 21,11 ja keskihajonta 11,34. Lentokentällä siis käytettiin huomattavasti enemmän ammuksia kuin tiheässä metsässä. Tiheässä metsässä on paljon pienempi todennäköisyys nähdä vihollista kuin lentokentällä, jolloin päädytään harvemmin ampumistilaan. Lisäksi tiheässä metsässä päädytään todennäköisemmin ”close combat” -etäisyydelle, jolloin osumistodennäköisyys on niin suuri, ettei ammuksia tarvita monta.

Tiheän kumpuilevan metsän huomattavasti suurempi keskihajonta suhteessa keskiarvoon johtuu jälleen mallin stokastisuudesta. Tiheässä metsässä on vaikeampi nähdä (ja siis ampua), joten käytettyjen ammusten määrän vaihtelu on huomattavasti suurempi.

4.5.3 Käytetty aika

Lentokentällä aikaa tavoitteen saavuttamiseen käytettiin keskimäärin 17,7 askelta keskihajonnalla 5,78, kun taas tiheässä kumpuilevassa metsässä käytettiin keskimäärin 33,53 askelta keskihajonnalla 4,41. Lentokentällä tavoitteen saavuttamiseen kului noin puolet siitä ajasta, mitä tiheässä kumpuilevassa metsässä. Lentokenttä on tasaista maastoa, ja etenemisnopeudet ovat siinä suuria, joten on täysin loogista, että tavoite saavutetaan lentokentällä nopeammin. Lisäksi optimistrategiassa edettiin suhteessa suurempi osa ajasta kuin tiheässä metsässä.

Käytetyssä ajassa on selkeästi pienimmät keskihajonnat, joten tavoitteen saavuttamiseksi tarvittava aika on varmemmin ennustettavissa.

4.5.4 Vihollisen tuhotut vaunut

Lentokentällä vihollisen kolmesta vaunusta saatiin keskihajonnalla 0,96 tuhatta keskimäärin kaksi. Tiheässä kumpuilevassa metsässä vaunuja saatiin tuhatta keskimäärin 2,41 keskihajonnalla 0,87. Lentokentällä saatiin tuhatta vähemmän vaunuja, koska tavoite-etäisyys asetettiin 1600 metriin, vaikka vihollinen sijaitsee 2000 metrin etäisyydellä. Toisaalta ”tiheän kumpuilevan metsän” -tapauksessakaan ei aina tuhota kaikkia vaunuja, sillä näkeminen ja osuminen ovat vaikeampaa.

4.5.5 Korrelaatiot tulosten välillä

Tutkitaan vielä korrelaatioita eri tulosten välillä (Taulukko 4.5-2 Strategioiden tulosten korrelaatiot).

Korrelaatiot		Omien vaurioiden hinta	Käytetyt ammuks	Käytetty aika	Vihollisen tuhotut vaunut
Lentokenttä	Omien vaurioiden hinta	1.00			
	Käytetyt ammuks	0.09	1.00		
	Käytetty aika	0.78	0.06	1.00	
	Vihollisen tuhotut vaunut	-0.22	-0.12	-0.23	1.00
Tiheä kumpuileva metsä	Omien vaurioiden hinta	1.00			
	Käytetyt ammuks	0.10	1.00		
	Käytetty aika	0.73	0.13	1.00	
	Vihollisen tuhotut vaunut	-0.29	-0.59	-0.01	1.00

Taulukko 4.5-2 Strategioiden tulosten korrelaatiot

Huomataan, että molemmissa tapauksissa omien vaurioiden hinnalla ja käytetyllä ajalla on vahva positiivinen korrelaatio. On ilmeistä, että mitä enemmän vietetään aikaa vihollisen tulen alla, sitä enemmän tulee tappioita.

Toisaalta mitä hitaammin edetään, sitä paremmin ehditään suojaamaan omaa etenemistä ja siten päästä tavoitteeseen pienemmillä tappioilla. Tätä epäjohdonmukaisuutta pitäisi tutkia jakamalla käytetty aika pienempiin osiin ja luoda regressiomalleja syy-seuraus-suhteiden löytämiseksi, mutta se ei kuulu tämän tutkimuksen laajuuteen.

Huomionarvoista on myös suhteellisen vahva negatiivinen korrelaatio käytettyjen ammusten ja tuhottujen vaunujen välillä, kun ollaan tiheässä kumpuilevassa metsässä. Tätä korrelaatiota ei ole olemassa lentokentällä. Tämä ero johtuu luultavasti siitä, että lentokentän tavoite-etäisyys on lähempänä kuin vihollinen.

5 Johtopäätökset

Simulaatiomalli vastaa aiheenasettajan kanssa määriteltyihin tavoitteisiin. Mallin avulla pystytään simuloimaan panssarivaunujen välistä taistelua eri maasto-olosuhteissa ja eri vahvuksille hyökkääjän sekä vastustajan joukoille. Hyökkääjän taistelustrategioita voidaan varioida, ja malliin on implementoitu geneettisten algoritmien sovellus, jonka avulla strategioita voidaan paitsi generoida, myös optimoida. Optimoinnin avulla saatavat esimerkkitulokset tehokkaista hyökkäysstrategioista valitulle kahdelle eri esimerkkimaastolle ovat intuition mukaisia.

Sekä puuttomassa ja tasaisessa että tiheässä ja epätasaisessa metsämaastossa on tehokas strategia sellainen, jossa aletaan ampua vasta kun vastustaja nähdään hyvin. Tasaisessa ja metsättömässä lentokenttä-maastossa tähän tilanteeseen päästään huomattavasti nopeammin kuin alhaisen näkyvyyden maastossa. Keskimäärin lentokenttä-maastossa ajatun strategian aikana ammutaan merkittävästi enemmän kuin kumpuilevassa metsämaastossa. Tiheässä ja epätasaisen maaston metsässä päästään näköyhteyteen ja siten ampumaetäisyydelle vasta huomattavasti myöhemmin. Tiheässä metsässä menetetään myös heikon näkyvyyden ja siitä johtuvan rajoittuneen ampumiskyvyn vuoksi ylivoima helpommin, jos etäisyydet kasvavat. Tehokas strategia tässä maastossa onkin sellainen, jossa hyökkääjän joukkueet kulkevat lähellä toisiaan.

Avoimessa maastossa joukkueiden väliset etäisyydet voivat kasvaa suuremmiksi, eikä ylivoimaa menetä. Tavoite pyritään saavuttamaan mahdollisimman nopeasti etenemällä vauhdilla alusta saakka. Tiheässä ja epätasaisessa

maastossa edetään suhteellisesti pienempi osa ajasta. Aikaa käytetään enemmän tarkkailuun ja joukkueiden väliset etäisyydet kannattaa pitää pieninä, jottei ylivoimaa menetetä.

Mallissa on merkittävästi stokastisuutta, mikä haittaa osaltaan simulaatioiden avulla tehtäviä johtopäätöksiä. Ajoja tai geneettisten algoritmien yhteydessä sukupolvia tarvittaisiin huomattavasti enemmän jotta päästään mahdollisesti tarkempiin tuloksiin. Omien ajojemme perusteella pystymme kuitenkin toteamaan, että mallimme toimii ja aiheenasettajalla on siten mahdollisuus liittää se omaan laajempaan ohjelmistoonsa taistelustrategioiden arvioimiseksi. Työmme kannalta optimoinnin antamat tulokset ovat toissijaisia, sillä käytettävissämme olevat lähtötiedot eivät ole täydellisiä. Täten työlle asettamamme tavoite täyttyy.

6 Parannusehdotuksia ja aiheita jatkotutkimukseen

Seuraavassa käsittelemme muutaman parannusehdotuksen nykyiseen malliin sellaisenaan sekä mahdollisia laajennusajatuksia.

Optimoiteja ajaessa havaitsimme puutteen käskyjen muotoon ja suorittamiseen liittyen. Käskyjä mallinnetaan seuraavan muotoisilla ehtolauseilla: "Jos tilassa 2 on vähemmän kuin 2 vaunua, siirretään tilasta 1 tilaan 2 seitsemän vaunua." Tällöin käskyssä siirretään jostain tilasta johonkin toiseen tilaan vaunuja x kappaletta. Aina ei välttämättä ole tehokasta siirtää kaikkia vaunuja tavoitteelliseen tilaan samasta lähtötilasta, vaan strategia voisi siirtää osan vaunuista jostain tilasta ja toisen toisesta.

Toinen parannusajatus liittyy herkkyysanalyysiin, jota emme ehtineet ajamaan. Simulaatioiden ajamisen hitauden vuoksi (esimerkiksi optimoinnin kesto kuudesta kahdeksaan tuntiin), emme pystyneet tekemään herkkyysanalyysiä optimistrategioille. Tulosten luotettavuuden kannalta olisi kuitenkin ollut hyödyllistä ajaa sama ajo uudestaan vähintään kerran ja katsoa päädytäänkö samaan optimistrategiaan. Lisäksi olisi ollut hyvä tehdä herkkyysanalyysiä muuttamalla populaatioiden ja sukupolvien määriä ja selvittää, mikä näistä parantaisi tulosta eniten.

Aihe tarjoaa niin ikään useita polkuja jatkotutkimukselle tässä työssä käsittelemämme laajuuden ulkopuolella. Muun muassa maastoon liittyen on mallille kaksi ilmeistä laajentamisuutta: sekä maaston epähomogeenisuuden huomioon ottaminen että vaunujen maastossa liikkussa reitin variointi ja optimointi.

Tässä työssä on vastustaja oletettu täysin tunnetuksi: vastustajan tila, vahvuus (vaunujen määrä) ja ominaisuudet ovat olleet täysin tiedossa. Jos tietämystä vastustajasta lähdetään keventämään ja mahdollisesti myös vastustajan strategiaa optimoimaan, taistelusta tulee entistä mielenkiintoisempi ja realistisempi.

Tässä mallissa ei myöskään oteta suoraan huomioon sitä, että vaurioituneet vaunut voidaan ajan kuluessa korjata ja siten kuntomuuttuja palauttaa jopa täysin toimintakykyisen vaunun tasolle. Vaurioituneiden vaunujen toimintaa ei myöskään tällä hetkellä optimoida: esimerkiksi vaunun menettäessä liikuntakykynsä voisi sääntönä olla että tämä vaunu siirtyy automaattisesti tuliasemaan.

7 Viitteet

- [1] Puolustusvoimat, Panssaroidut ajoneuvot. <http://www.mil.fi/maavoimat/kalustoesittely/index.dsp?level=60> (luettu 14.4.2009)
- [2] Puolustusvoimat, Puolustusvoimien Teknillinen Tutkimuslaitos. <http://www.mil.fi/laitokset/pvtt/esittely.dsp> (luettu 14.4.2009)
- [3] Lappi, E. ja J. Kaasinen. Optimal tactics parameters for Sandis combat simulation code by using genetic algorithms. Eurogen 2007, Jyväskylä, kesäkuu 2007.
- [4] Kangas, L. Taistelun stokastinen mallinnus. Diplomityö, Systeemianalyysin laboratorio, TKK, 2005.
- [5] Yildirim, U. Z. Extending the State-of-the-Art for the COMAN/ATCAL Methodology. Master's Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, CA, 1999.
- [6] Pääesikunta, Jalkaväen tulen vaikutuksesta. N:o 260/jvts to/5 a 3. Helsinki, 1954.
- [7] Jaakola, Keijo. Asevaikutus ja suomalainen maasto komppanian taistelun mallintamisessa. Diplomityö, Systeemianalyysin laboratorio, TKK, 2004
- [8] Smith, R ja Stoner, D. 10 Fingers of Death: Algorithms for Combat Killing. Game Programming Gems 4. http://www.modelbenders.com/papers/Fingers_Of_Death.pdf (luettu 14.4.2009)
- [9] Keet, Marijke. Genetic Algorithms – An overview , 2002. <http://www.meteck.org/gaover.html> (Luettu 14.4.2009)
- [10] <http://www.mathworks.ch/support/solutions/data/1-10PDHC.html?product=GD&solution=1-10PDHC> (16.4.2009)