

Aalto-yliopisto
Perustieteiden korkeakoulu
Teknillisen fysiikan ja matematiikan tutkinto-ohjelma

Simulointimalli mellakkapoliisin resurssien kohdentamiseen

kandidaatintyö
8. tammikuuta 2013

Eero Rantala

Työn saa tallentaa ja julkistaa Aalto-yliopiston avoimilla verkkosivuilla.
Muilta osin kaikki oikeudet pidätetään.



AALTO-YLIOPISTO PERUSTIETEIDEN KORKEAKOULU PL 11000, 00076 Aalto http://www.aalto.fi	KANDIDAATINTYÖN TIIVISTELMÄ	
Tekijä:	Eero Rantala	
Työn nimi:	Simulointimalli mellakkapoliisin resurssien kohdentamiseen	
Tutkinto-ohjelma:	Teknillisen fysiikan ja matematiikan tutkinto-ohjelma	
Pääaine: Systeemitieteet	Pääaineen koodi: F3010	
Vastuupettaja:	Prof. Raimo P. Hämäläinen	
Ohjaaja:	TkT Kai Virtanen	
Tiivistelmä: <p>Tässä työssä tarkastellaan resurssien kohdentamistehtävää mellakkapoliisin näkökulmasta ja rakennetaan tehtävän ratkaisemiseksi simulointimalli. Poliisin tavoitteena on torjua mellakoita ohjaamalla partioita asemista eri kohteisiin ja ylläpitämällä kohteissa mellakoiden torjuntavoimaa korvaamalla kohteessa olevat partiot uusilla partioilla. Mellakkapoliisin resurssien kohdentamistehtävä on tulkittavissa yhtäältä resurssien allokointitehtäväksi ja toisaalta aikatauluttamistehtäväksi.</p> <p>Mellakkapoliisi haluaa ylläpitää mahdollisimman hyvää kykyä torjua mellakkajoukot, kun nämä lähtevät etenemään kokoontumispisteeltään tai mellakkapoliisi haluaa ylläpitää jatkuvaa suojausta ennalta tiedossa olevissa kohteissa. Kumpaankin mellakkapoliisin tehtävään esitetään työssä ratkaisu.</p> <p>Mellakantorjuntatasatarkastelu kertoo milloin ja missä mellakkapoliisin partiot kohtaavat mellakoitsijat. Aikataulutarkastelu kertoo kuinka hyvin mellakkakohteessa onnistutaan saavuttamaan voimavaatimus ja miten partioita tulee aikatauluttaa huollon ja toimintakohteen välillä. Annetulla ryhmityksellä voidaan toteuttaa myös maantieteellinen voiman riittävyystarkastelu, joka perustuu aikataulutarkasteluun. Saadut tulokset voidaan ilmaista kolmen erilaisen mittarin avulla.</p> <p>Työssä esitellään esimerkkিতarkastelu ja muutamia mitä jos -tarkasteluja. Nämä osoittavat, että työssä kehitetty heuristiikka on nopea ja riittävän hyvä ratkaisutapa mellakkapoliisin resurssien kohdentamistehtävän ratkaisemiseen.</p>		
Päivämäärä: 8. tammikuuta 2013	Sivumäärä: 37	Kieli: Suomi
Avainsanat: Aikataulutus, Heuristiikka, Simulointi		

Sisältö

1	Johdanto	1
2	Kohdentamistehtävän lähtötiedot	4
2.1	Asema	6
2.2	Poliisipartio	6
2.3	Toimintakohde	7
2.4	Mellakkajoukko	7
3	Tarkastelut	8
3.1	Mellakantorjuntatasa	8
3.2	Aikataulu	9
3.3	Voiman riittävyys	9
4	Ratkaisumenettelyt	11
4.1	Mellakantorjuntatasa	11
4.2	Aikataulu	15
4.3	Voiman riittävyys	20
5	Esimerkkitarkastelut	20
5.1	Mellakantorjuntatasa	23
5.2	Aikataulu	23
5.3	Voiman riittävyys	27
5.4	Mitä jos -tarkastelut	30
5.4.1	Valmiuksien vaikutus mellakantorjuntatasaan	30
5.4.2	Huolto- ja polttoaineresurssien vaikutus aikatauluun	30
5.5	Tarkastelujen laskennallinen vaativuus	34
6	Yhteenveto	35
	Viitteet	37

1 Johdanto

Tässä työssä tarkastellaan resurssien kohdentamistehtävää mellakkapoliisin näkökulmasta. Poliisin tavoitteena on torjua mellakoita ohjaamalla partioita asemista eri kohteisiin ja ylläpitämällä kohteissa mellakoiden torjuntavoimaa korvaamalla kohteessa olevat partiot uusilla partioilla. Poliisilla tulee olla myös kyky arvioida kokoontumispisteeltään etenemään lähtevien mellakkajoukkojen uhkaa. Toisaalta poliisilla tulee olla kokonaiskuva siitä, mihin voimaa kyetään keskittämään ja kuinka laajalle mellakkajoukot ehtivät edetä, ennen kuin mellakkapoliisin partioilla on mahdollisuus torjua heidät. Lisäksi on oleellista tietää, että miten poliisijoukon valmiusviiveet asemissa vaikuttavat mellakan torjuntakykyyn.

Mellakkapoliisilla oletetaan olevan tässä työssä kahden tyyppisiä tavoitteita. Yhtäältä mellakkapoliisi haluaa ylläpitää mahdollisimman hyvää kykyä torjua mellakkajoukot, kun nämä lähtevät etenemään kokoontumispisteeltään. Toisaalta mellakkapoliisilla voi olla ennalta tiedossa kohteita, joissa tarvitaan jatkuva suoja, tai mellakkakohteita voi ilmaantua yllättäen, jolloin poliisin pitää keskittää alueelle jatkuvaa torjuntavoimaa.

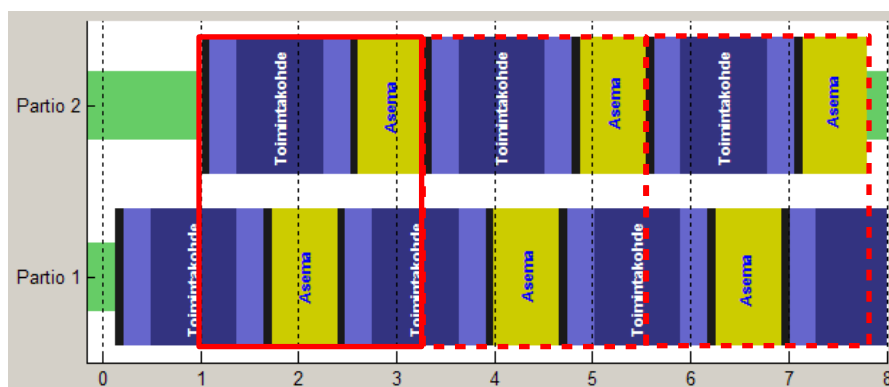
Mellakkapoliisin resurssien kohdentamistehtävä on tulkittavissa yhtäältä resurssien allokointitehtäväksi ja toisaalta aikatauluttamistehtäväksi. Resurssien allokointitehtävällä [2, s. 6] tarkoitetaan kokonaislukutehtävää, jossa on monta resurssirajoitetta ja päätösmuuttujaa, mutta ei aikariippuvuutta. Tehtävässä pyritään optimoimaan kohdefunktiota tai löytämään käypä ratkaisu, joka täyttää kaikki rajoitusehdot. Esimerkiksi sairaaloilla on henkilöstötarpeita, jotka muuttuvat päivittäin. Jos sairaalalle luodaan työvuorolista yhdelle päivälle on kyseessä resurssien allokointitehtävä, jossa henkilöstöresurssija allokoidaan tarvittaviin työtehtäviin. Aikataulutamisella tarkoitetaan resurssien allokointia, jossa resurssit ovat ajan funktiona toisistaan riippuvaisia. Esimerkiksi, jos sairaala haluaa luoda työvuorolistan kuukaudeksi eteenpäin, kyseessä on aikatauluttamistehtävä [3, s. 207-209]. Sama lääkäri ei voi hoitaa useaa peräkkäistä vuoroa, koska peräkkäisten päivien työvuorot ovat toisistaan riippuvaisia.

Yleisiä algoritmeja aikataulutustehtävän ratkaisemiseen on käsitelty laajasti Bruckerin kirjassa [4]. Sotilastehtäviin soveltuvia algoritmeja on käsitelty laajasti Jaiswalin kirjassa [5]. Nämä ongelmat ja niiden ratkaisut ovat sovellettavissa myös mellakkapoliisin resurssien kohdentamistehtävässä.

Monissa lentotehtävissä on samoja piirteitä kuin mellakkapoliisin resurssien kohdentamisessa. Sotilaslentokoneiden optimaalista lento- ja huoltoaikatauluja on ratkottu sekalukuoptimoinnilla [9] ja heuristiikalla [7], mutta kum-

massakin viitteessä tarkastellaan pitkän aikavälin huolto- ja käyttösuunnitelmia, eikä yksittäiseen tehtävään liittyvää aikataulua. Siviili-ilmailun puolella on tutkittu optimaalisia lentoaikatauluja [6], jossa lentokalusto ja lentoreitit sovitetaan mahdollisimman hyvin yhteen oletettujen matkustajavirtojen kanssa. Tässä viitteessä esiintyy muun muassa käsite minimikäntöaika, joka kertoo kuinka pian koneen laskeuduttua sama kone voi nousta jälleen ilmaan. Minimikäntöaika on suoraan sovellettavissa mellakkapoliisin tehtävään.

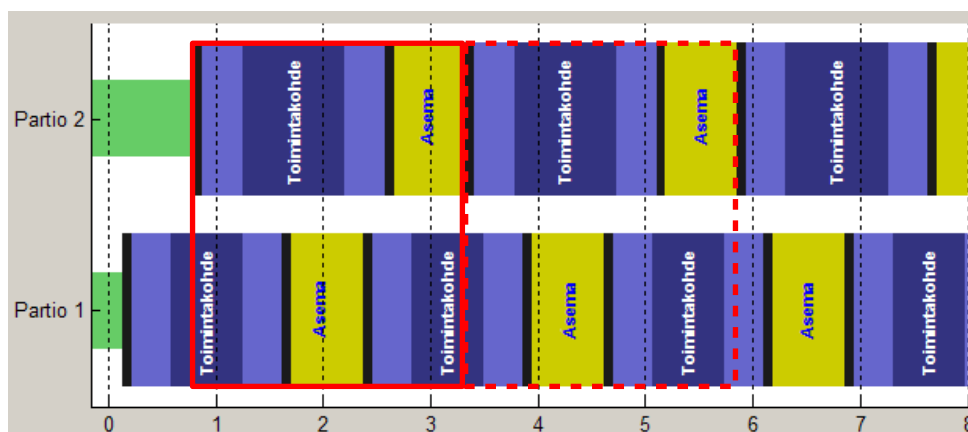
Siviili-ilmailun aikataulutustehtäviä ei voida sellaisenaan hyödyntää mellakkapoliisin resurssien kohdentamisessa, koska siviili-ilmailussa lentoaikataulun määräävä tekijä on potentiaalinen kysyntä, eikä kohdennettavan resurssin jatkuva oleskelu kohteessa, kuten mellakkapoliisin tehtävässä. Mellakkaongelmia on ratkottu geneettisillä algoritmeilla [1], mutta tässä tarkastelussa ei ole huomioitu mellakkapoliisin tarvetta tukeutua aseisiin.



Kuva 1: Kahden partion aikataulu. Punaisella kiinteällä viivalla on esitetty aikataulun osa, joka on monistettu kahdesti. Monistetut aikataulun osat ovat esitetty katkoviivoituksella.

Tässä työssä käsiteltävää mellakkapoliisin resurssien kohdentamistehtävää on tarkasteltu viitteessä [8], jossa on etsitty tehtävälle syklisiä ratkaisuja. Syklinen ratkaisu tarkoittaa aikataulua, jossa tietyn ajan kuluttua jokin aikataulun osa monistuu. Välttämätön edellytys monistumiselle on, että aikataulusa ilmenee äärellisessä ajassa kaksi täsmälleen samanlaista tilaa. Tällainen tila voi olla esimerkiksi, että kaikki partiot ovat huollettuina ja lähtövalmiina määrättyissä aseissa. Oletuksena on, että samoista lähtökohdista seuraa sama lopputulema. Kuvassa 1 on esitetty syklinen tilanne, jossa kahta partiota käytetään toimintakohteessa, jossa on yhden partion jatkuva voimavaatimus. Kiinteällä viivalla on esitetty aikataulun osa, jossa alku- ja loppuhetki ovat identtiset. Tämä aikataulun osa toistuu kahdesti, joka on kuvassa

esitetty katkoviivoituksella. Syklinen ratkaisu on helppo rikkoa käyttämällä ei-kokonaislukuparametreja, kuten kuvassa 2.



Kuva 2: Kahden partion aikataulu. Punaisella kiinteällä viivalla on esitetty aikataulun osa, joka ei monistu. Katkoviivoituksella on esitetty vastaava aika kuin kiinteällä viivalla. Partio 1 on eri tilanteessa ensimmäisen ja toisen ajanjakson jälkeen, joten aikataulu ei ole monistuva.

Tässä työssä rakennetaan simulointimalli mellakkapoliisipartioiden resursien kohdentamistehtävän ratkaisemiseen. Simulointimalli tuottaa ratkaisun niin syklisessä kuin ei-syklisessä tapauksessa. Jälkimmäiset ovat käytännössä huomattavasti yleisempiä. Mallissa on poliisin asemia, joissa on rajallinen huoltokyky. Poliisipartiot toteuttavat mellakantorjuntatehtäviä toimintakohteissa ja tukeutuvat asemiin. Toimintakohteen ja aseman välille oletetaan esteetön suoraviivainen siirtyminen. Simulointimalli ohjelmoidaan Matlab-alustalla [10]. Työssä esitellään mellakkapoliisiin kolme erilaista tarkastelua, jotka vastaavat kysymyksiin:

1. Minkälaisella aikataululla poliisipartioita pystytään tehokkaasti allokoimaan?
2. Kuinka laajalle mellakoitsijat ehtivät etenemään ennen kuin poliisilla on mahdollisuus torjua heidät?
3. Minne ja kuinka paljon voimaa kyetään keskittämään annetulla ryhmityksellä?

Työssä esitetään näiden tarkasteluiden laskennalliset toteuttamiset.

2 Kohdentamistehtävän lähtötiedot

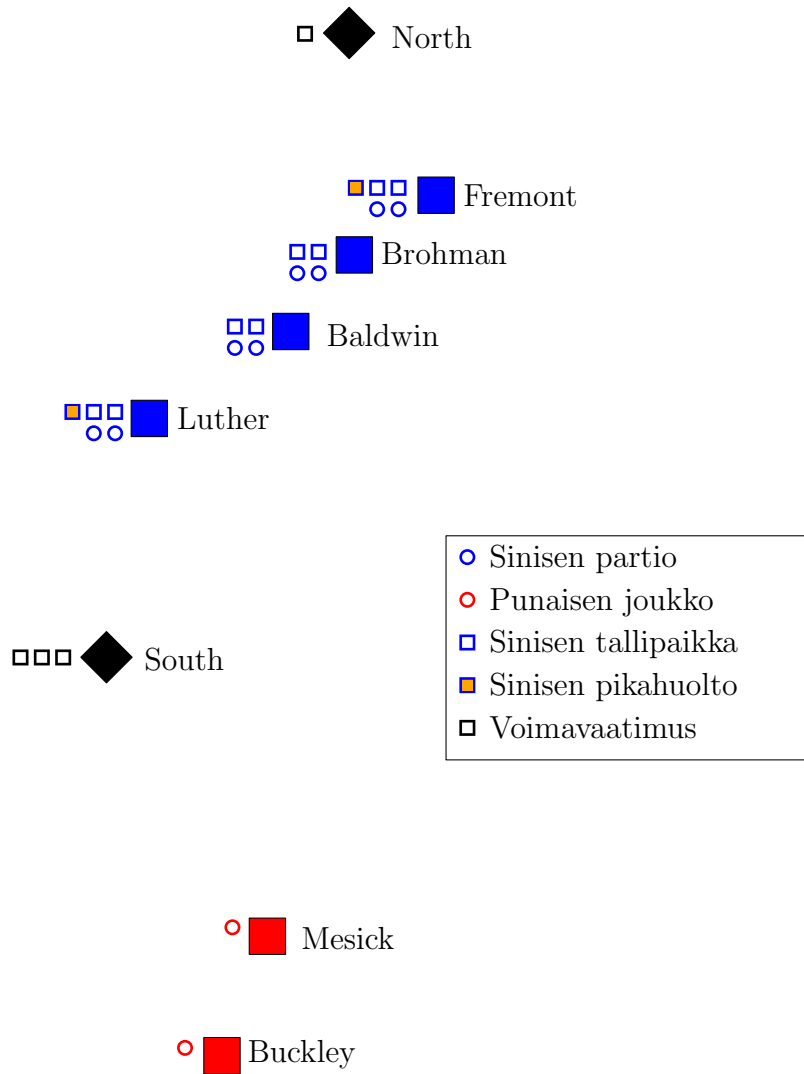
Kohdentamistehtävän esimerkkitehtävän lähtötiedot esitellään taulukossa 1 ja kuvassa 3. Näitä lähtötietoja tullaan käyttämään läpi koko työn. Sinisen asemat ja osastot ovat poliisijoukkoja, joiden toimintaa halutaan tutkia. Punainen viittaa mellakoitsijoihin.

Jokaisessa sinisen asemassa on tallipaikkoja, jotka on merkitty kuvaan 3 pienillä sinireunaisilla neliöillä. Sinireunainen neliö, jossa on oranssi sisus, on pikahuoltoapaikka, jossa partio huolletaan puolet nopeammin kuin normaalisissa huollossa. Pikahuollon rajoitteena on se, että partio ei voi käydä kahdesti peräkkäin pikahuollossa. Sinisen partiot on esitetty kuvassa 3 pienillä sinireunaisilla ympyröillä ja ne on asetettu lähtötallipaikkojensa alle. Toimintakohteet ovat paikkoja, joissa mellakoita torjutaan tai joita suojataan ja

Taulukko 1: Esimerkkitehtävän alkuparametrit.

Asemat					
Nimi	Sijainti	Tallipaikat			
Fremont	x: 355,4 y: 254,2	2xNORM AS, 1xPIKA			
Luther	x: 182,3 y: 32,5	2xNORM AS, 1xPIKA			
Brohman	x: 308,9 y: 189,5	2xNORM			
Baldwin	x: 249,5 y: 141,4	2xNORM			
Tallipaikat					
	Kääntöaika	Aseet			
NORM	42	ei			
NORM AS	42	kyllä			
PIKA	21	ei			
Poliisipartiot					
Polttoaine	Aseet	Nopeus	Kulutus	Nimet ja lähtöviiveet	
120	2	590	90	FRE 0, FRE 2, LUT 0, LUT 2, BRO 0, BRO 2, BAL 0, BAL 2	
Toimintakohteet					
Nimi	Sijainti	VV ¹	MOA ²	PA kul. ³	Ase kul. ⁴
North	x: 479,7 y: 185,1	1	20	80	0
South	x: 0 y: 0	3	20	120	1
Punaisen joukot					
Nopeus	Toiminta-aika	Lähtöviive	Nimet		
590	70	0	MES, BUC		

¹Voimavaatimus ²Minimioleskeluaika ³Polttoaineen kulutus ⁴Aseiden kulutus



Kuva 3: Esimerkkitehtävän lähtötiedot.

ne on merkitty kuvaan 3 mustalla vinoneliöllä. Jokaiseen toimintakohteeseen vaaditaan tietty määrä poliisipartioita ja tämä määrä on kohteen voimavaatimus. Voimavaatimus on merkitty kunkin toimintakohteen viereen pienillä mustareunaisilla neliöillä. Punaisen joukot on merkitty punaisilla ympyröillä asemiansa viereen. Punaisen asemissa ei mallinneta huoltoresursseja. Taulukossa 1 esiintyvät parametrit kuvataan tarkemmin seuraavissa kappaleissa.

2.1 Asema

Asemat ovat kiinteitä paikkoja, joista poliisipartiot lähtevät liikkeelle ja joihin partiot palaavat jokaisen toimintakohteessa vierailun päätteeksi. Aseman ominaisuudet ovat sijainti ja tallipaikat. Sijainti määrittää aseman koordinaatit kaksiulotteisessa tasossa. Tallipaikat ovat aseman sisällä yksiköitä, joissa partioita huolletaan ja joissa partiot voivat odottaa seuraavaan tehtävään lähtöä. Yhdelle tallipaikalle mahtuu kerrallaan yksi partio. Tallipaikoilla partio saa polttoainetäydennyksen ja mahdollisen asetäydennyksen. Esimerkin mukaisessa tilanteessa taulukossa 1 on asetäydennyskyky merkitty tunnuksella AS.

Jokaisella tallipaikalla on oma kääntöaikansa, joka ilmaisee kuinka kauan huoltotoimissa kokonaisuudessaan kestää ja kuinka pian partio on jälleen lähtövalmis uuteen tehtävään. Pikahuollossa suoritetaan ainoastaan polttoainetäydennys, kun normaalihuollossa suoritetaan polttoainetäydennyksen lisäksi muita huolto- ja tarkistustoimenpiteitä. Pikahuollon kääntöaika on puolet normaalihuollon kääntöajasta. Partio ei voi käydä kahdesti peräkkäin pikahuollossa, vaan jokaisen pikahuollon jälkeen on seuraavaksi palattava normaalihuoltoon. Tehtävässä ei huomioida polttoaineen tai aseiden loppumista tallipaikoilta, vaan kulutuksia ainoastaan seurataan.

2.2 Poliisipartio

Partio on mellakkapoliisin perusyksikkö, joka koostuu pienestä poliisiryhmästä ja näiden kalustosta. Partiota ei missään vaiheessa eroteta yksittäisiin osiinsa, eikä partion sisäiseen toimintaan oteta kantaa. Partio on ensimmäiseen tehtävään lähtiessään yhdellä aseman tallipaikalla, josta partio pääsee liikkeelle lähtöviiveen jälkeen. Lähtöviive vaikuttaa partion lähtövalmiuteen vain alkutilanteessa, kun partiot lähtevät ensimmäiseen mellakantorjuntatehtäväänsä. Kohteesta palatessaan partio ei välttämättä palaa takaisin samaan asemaan ja samalle tallipaikalle, josta lähti liikkeelle.

Polttoaineen määrä on partion yhteenlaskettu polttoaineen kantokapasiteetti ja polttoaine täydennetään täyteen kapasiteettiin jokaisen huollon yhteydes-

sä. Partiolla on tietty määrä aseita mukanaan, joita kuluu toimintakohteessa. Esimerkkitehtävässä North-toimintakohde ei kuluta yhtään asetta ja South-toimintakohde kuluttaa yhden aseisen. Aseet täydennetään jokaisella tallipaikalla, jolle on määritetty asetäydennyskyky. Mikäli partion aseiden määrä laskee alle yhden, hakeutuu partio tallipaikalle, josta on aseita saatavilla.

Partiolla on vakionopeus, jolla partio siirtyy asemasta toimintakohteeseen. Siirtymän aikana partio kuluttaa polttoainetta vakiomäärän aikayksikössä. Toimintakohteessa polttoaineen kulutus riippuu toimintakohteen tyypistä.

2.3 Toimintakohde

Toimintakohteen oleellimmat parametrit ovat sijainti ja voimavaatimus. Sijainti määrittää toimintakohteen koordinaatit kaksiulotteisessa tasossa ja voimavaatimus määrää partioiden lukumäärän, joka vaaditaan olevan toimintakohteessa jatkuvasti paikalla.

Minimioleskeluaika on aika, jonka partion tulee vähintään viettää toimintakohteessa. Tulkinta minimioleskeluajalle on, että tämä on pienin aika, josta voidaan katsoa olevan oleellista hyötyä tehtävän toteuttamisen kannalta. Mikäli partio ei kykene olemaan minimioleskeluaikaa toimintakohteessa, sitä ei sinne lähetetä.

Toimintakohteen aktivoitumisaika on ajanhetki, jolloin kohteessa tulee olla ensimmäisen kerran voimavaatimusta vastaavat partiot. Toimintakohteen sanotaan tällöin aktivoituneen. Aktivoitumisaika voidaan tulkita varoitusajaksi, joka annetaan partioille valmistautumiseen. Deaktivoitumisaika on ajanhetki, jolloin kohteessa ei enää vaadita partioita. Toimintakohteen sanotaan tällöin deaktivoituneen. Polttoaineen kulutus on toimintakohteessa olevan partion polttoaineen kulutus aikayksikköä kohti. Toimintakohde kuluttaa aseiden kulutuksen mukaisen määrän aseita partiolta.

2.4 Mellakkajoukko

Mellakkajoukot, eli punaiset, ovat toimijoita, joiden käyttäytymistä ei tunneta tarkasti, mutta joista voidaan tehdä seuraavia oletuksia. Punaisella on joukkoja, jotka lähtevät asemistaan liikkeelle oman lähtöviiveensä jälkeen ja etenevät asemasta suoraviivaisesti eteenpäin vakionopeudella. Punaisen toimintaresurseja, kuten mahdollista polttoaineen kulutusta ei oteta huomioon, vaan punaiset pystyvät etenemään toiminta-ajan määräämissä puitteissa eteenpäin.

3 Tarkastelut

Kohdentamistehtävä voidaan ratkaista kolmen eri tarkastelun avulla. Mellakantorjuntatasatarkastelussa ratkaistaan mellakantorjuntatasa, eli leikkausviiva, jossa siniset ja punaiset kohtaavat, kun molemmat lähtevät etenemään asemistaan. Aikataulutarkastelussa ratkaistaan resurssien allokointi annettuihin toimintakohteisiin. Aikataulutarkastelu tuottaa yksityiskohtaisen aikataulun, josta käy ilmi missä kunkin partio tietyllä ajanhetkellä tulee olla. Voiman riittävyystarkastelussa ratkaistaan maantieteelliset alueet, joilla annetun tyyppinen toimintakohde kyetään ylläpitämään.

Tarkasteluväli on maksimiaika, johon asti partioita osoitetaan toimintakohteisiin. Mikäli jollekin toimintakohteelle ei ole määritetty deaktivoitumisaikaa, niin laskenta keskeytetään kun tarkasteluajanväli saavutetaan. Muussa tapauksessa laskentaa jatketaan kunnes kaikki toimintakohteet ovat deaktivoituneet.

3.1 Mellakantorjuntatasa

Mellakantorjuntatasatarkastelussa ratkaistaan, missä kohdassa sinisen partiot kohtaavat punaisen joukot ensi kertaa. Mellakantorjuntatasa piirtyy kartalle siihen kohtaan, jossa mellakkapoliisipartioiden ja punaisen joukkojen on mahdollista kohdata ensimmäistä kertaa, kun kumpikin on edennyt asemistaan suoraviivaisesti mellakantorjuntatasalle. Mellakantorjuntataseen muodostuminen voidaan hahmottaa visuaalisesti seuraavalla tavalla. Asemista lähtee laajenemaan kantama-alueeksi kutsuttu ympyrä, joka kertoo minne kaikialle partio tai joukko voi ehtiä kyseisessä ajassa. Kun sinisen ja punaisen kantama-alueet osuvat ensi kertaa toistensa reunoihin, alkaa tähän leikkauspisteeseen muodostua mellakantorjuntatasaa. Kun kantama-alueet laajentuvat, piirtyy lisää mellakantorjuntatasaa alueiden leikkauspisteeseen.

Mellakantorjuntataseen muodostuminen on havainnollistettu kuvassa 4, jossa on asetettu päällekkäin neljä tilannekuvaa eri ajanhetkiltä. Kuvassa punaisen joukko lähtee nollahetkellä liikkeelle ja sinisen partio viisi minuuttia myöhemmin. Lisäksi punaisen joukon etenemisvauhti on sinistä suurempi, jotta mellakantorjuntataseen kaareva luonne korostuisi paremmin. Huomaa, että mellakantorjuntatasa kulkee ympyröiden leikkauspisteiden kautta. Erikoistapauksessa, jossa sinisen partion ja punaisen joukon etenemisnopeus on täsmälleen sama ja lähtöaika asemasta on täsmälleen sama, muodostuu mellakantorjuntatasasta suora viiva, joka on ortogonaalinen asemien yhdistävän janan suhteen. Mellakantorjuntatasoja voidaan laskea ensimmäisenä kohtaa-

vien sinisen partion ja punaisen joukon lisäksi myös tilanteille, joissa on mahdollista enintään kahden sinisen partion tai punaisen joukon kohdata.

3.2 Aikataulu

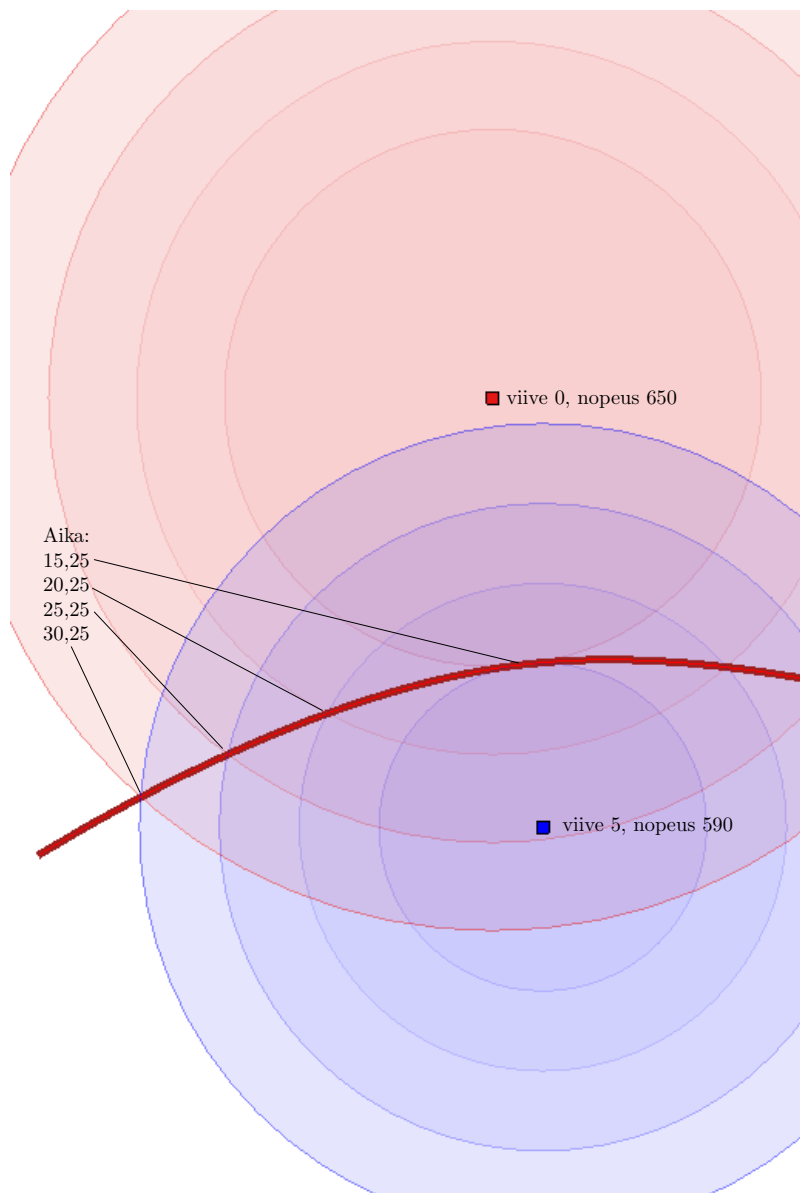
Aikataulutarkastelun tavoitteena on löytää mahdollisimman hyvä aikataulu, jonka mukaisesti toimintakohteisiin osoitetaan sinisen partioita. Aikataulun hyvyys määritellään siten, että toimintakohteen voimavaatimus on täytetty mahdollisimman suuren osan ajasta. Täydellisessä aikataulussa kaikkien toimintakohteiden voimavaatimukset ovat täyttyneet tarkasteluvälillä.

Aikataulu määrää yksityiskohtaisesti paikan, jossa kunkin partion on kulloinkin oltava tietyllä ajanhetkellä. Ratkaisusta käy ilmi mihin toimintakohteeseen partion on mentävä ja mihin asemaan ja mille tallipaikalle partio palaa. Aikataulu antaa myös tarkat ajanhetket milloin partion on lähdettävä asemasta, kuinka kauan partio voi olla toimintakohteessa, mihin aikaan partio saapuu huoltoon ja milloin partio on lähtövalmis seuraavaan toimintakohteeseen. Lisäksi ratkaisusta käy ilmi partion polttoaineen ja aseiden määrä kullakin hetkellä.

Koska partiot kykenevät olemaan toimintakohteessa suhteellisen lyhyitä aikoja kerrallaan, joudutaan partioita kierrättämään runsaasti toimintakohteiden ja asemien välillä. Mikä partio toimintakohteeseen osoitetaan ja minne partion kannattaa mennä huoltoon on voimakkaasti riippuvainen aikaisemmasta aikataulusta, eli muiden partioiden toiminnasta. Kun partio joutuu poistumaan toimintakohteesta ja suuntaamaan huoltoon, tulisi kyseiselle toimintakohteelle saada korvaava partio samanaikaisesti, kun edellinen partio poistuu. Kun partio saapuu huoltoon, se varaa tallipaikan itselleen ja poissulkee kyseisen tallipaikan käytön muilta partioilta. Resurssit eivät aina riitä ja toimintakohteen voimavaatimukseen ei kyetä vastaamaan. Toimintakohteeseen ei aina saada partioita ajoissa, jolloin kohteeseen jää riittämätön määrä partioita. Aikataulu on sitä huonompi mitä useammin voimavaatimukseen ei kyetä vastaamaan. Kaikkein huonoin on tilanne, jossa yhtäältä on vajetta ja toisaalta valmiudessa odottavia partioita.

3.3 Voiman riittävyys

Voiman riittävyystarkastelussa ratkaistaan sinisen näkökulmasta, kuinka paljon voimaa kullekin maantieteelliselle alueelle pystytään keskittämään. Aikataulutarkastelu on voiman riittävyystarkastelun osatehtävä. Voiman riittävyystarkastelun ratkaisuna saadaan kuvapisteistö, jonka värit kertovat va-



Kuva 4: Mellakantorjuntatasa esitetty punaisella viivalla. Kuvassa on päällekkäin neljä kantama-alueen kuvaa eri ajanhetkiltä, jotka on osoitettu viivalla. Punaisen ja sinisen kantama-alueiden reunapistet samalla ajanhetkellä muodostavat mellakantorjuntatasan.

litun mittarin mukaan kuinka hyvin toimintakohteen voimavaatimukseen on kyetty vastaamaan.

Voiman riittävyttä kuvataan kolmella erilaisella mittarilla. Yhtäjaksoisen voiman toteutuminen kertoo aikayksiköissä kuinka pitkään toimintakohteessa on kyetty ylläpitämään vaadittu määrä partioita toimintakohteen aktivoitumisajasta alkaen. Yhtäjaksoisen voiman toteutuminen katkeaa kun ensimmäisen kerran toimintakohteeseen ei kyetä osoittamaan uutta partiota poistuvan partion tilalle. Yhtäjaksoisen voiman toteutuminen on nolla, jos toimintakohteeseen ei kyetä osoittamaan tarvittavaa osastomäärää heti kun toimintakohteeseen aktivoituu.

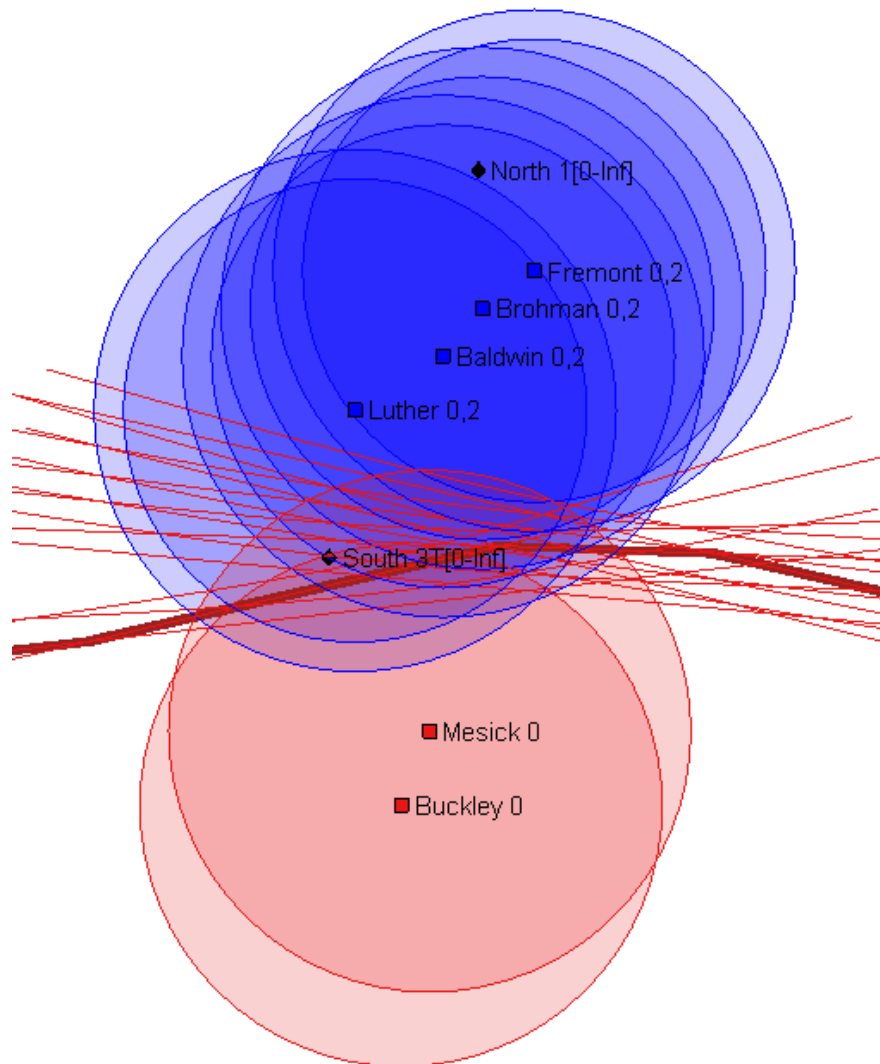
Täyden voiman toteutuminen kertoo prosentuaalisesti kuinka suuren osan ajasta toimintakohteessa on kyetty ylläpitämään vaadittu määrä partioita. Täyden voiman toteutumisessa lasketaan yhteen kaikki ajanhetket, jolloin on täysimääräisesti vastattu voimavaatimukseen. Täyden voiman laskenta ei siis katkea ensimmäiseen vajeeseen, mutta jättää kaikki ei-täydet voimavaatimuksen ajanhetket huomioimatta. Keskimääräisen voiman toteutuminen on keskiarvo toteutuneesta voimasta toimintakohteen aktivoitumisen ja deaktivoitumisen välillä. Tällä mittarilla otetaan huomioon vajeiden suuruus kullakin ajanhetkellä.

4 Ratkaisumenettelyt

Mellakkapoliisin resurssien kohdentamistehtävä ratkaistaan käyttämällä Matlabilla rakennettua simulointimallia. Toteutettu simulointimalli on deterministinen, koska samoilla lähtötiedoilla saadaan aina yksikäsitteinen tulos. Simuloinnissa ei ole satunnaisuutta missään vaiheessa. Tehtävän parametrien syöttämisen helpottamiseksi simulointimallia käytetään graafisen käyttöliittymän kautta. Graafisen käyttöliittymän avulla esitetään myös kaikki tulokset.

4.1 Mellakantorjuntatasa

Mellakantorjuntatasa laskenta-algoritmi alkaa kaikkien sinisten partioiden ja punaisten joukkojen kohtaustasojen laskennalla. Kohtaustasa on sama kuin mellakantorjuntatasa tilanteessa, jossa kummallakin osapuolella on vain yksi partio tai joukko. Kaikkien sinisten ja punaisten pareittaisista yhdistelmistä muodostuu kohtaustasaverkko. Mellakantorjuntatasa on aina tämän kohtaustasaverkon osajoukko. Kuvassa 5 on esitetty esimerkkitehtävän mel-



Kuva 5: Paksu viiva on esimerkkitehtävän mellakantorjuntatasa ja ohuet viivat ovat kohtaustasoista muodostunut verkko.

lakantorjuntatasa ja kohtaustasat. Erään kohtaustasan yksittäisen pisteen laskenta on esitetty kuvassa 6. O_s on sinisen lähtöaseman sijainti ja vastaavasti B on punaisen lähtöaseman sijainti. Sinisen nopeus aikayksikön t suhteen on v_s ja punaisen nopeus on v_p .

Kohtaustasa lasketaan diskretoimalla sinisen partion lähtösuunnat \vec{S} puolilympyrältä $\pi/2$ radiaania vektorin $O_s\vec{B}$ molemmin puolin tasavälein. Lähtösuunnat kattavat yhteensä kulman π . Tässä työssä on käytetty 53 lähtösuunnan diskreetointia. Kullekin lähtösuunnalle lasketaan piste C , johon sinisen partio ja punaisen joukko ehtivät samalla ajanhetkellä. Punaisen lähtösuunta ei ole ennalta tiedossa vaan se määräytyy pisteen C perusteella implisiittisesti. Sinisen ja punaisen lähtösuunnat skaalataan vastaamaan matkaa, jonka sininen ja punainen kulkevat aikayksikössä. Skaalattuja vektoreita merkitään \vec{S}_t siniselle ja \vec{BC}_t punaiselle.

Sinisen ja punaisen lähtöviiveet tulee ottaa huomioon laskennassa. Sinisen alkuperäistä lähtöpistettä O_s siirretään taaksepäin vektorin \vec{S} suunnassa sinisen nopeuden v_s kertaa sinisen lähtöviiveen määräämän matkan verran. Näin sinisen sijainti on nyt pisteessä H_s . Seuraavaksi huomioidaan punaisen lähtöviive siirtämällä sinisen lähtöpistettä eteenpäin vektorin \vec{S} suunnassa sinisen nopeuden v_s kertaa punaisen lähtöviiveen määräämän matkan verran. Näin sinisen sijainti on nyt pisteessä A ja punaisen sijainti on alkuperäisessä lähtöpisteessään B .

Sininen etenee ajassa t matkan $t \cdot \vec{S}_t$, jolloin sininen on pisteessä $A + t \cdot \vec{S}_t$. Nyt on löydettävä ajan t funktiona määräytyvä piste $C = A + t^* \cdot \vec{S}_t$, johon sininen ja punainen saapuvat molemmat ajanhetkellä t^* .

Punainen kulkee asemastaan kohtaustasalle matkan $\vec{BC} = C - B$. Punaisen matkaan kuluttama aika lasketaan jakamalla matka nopeudella

$$t^* = \frac{|\vec{BC}|}{v_p} = \frac{\sqrt{(\vec{BC})^\top \cdot \vec{BC}}}{v_p},$$

eli

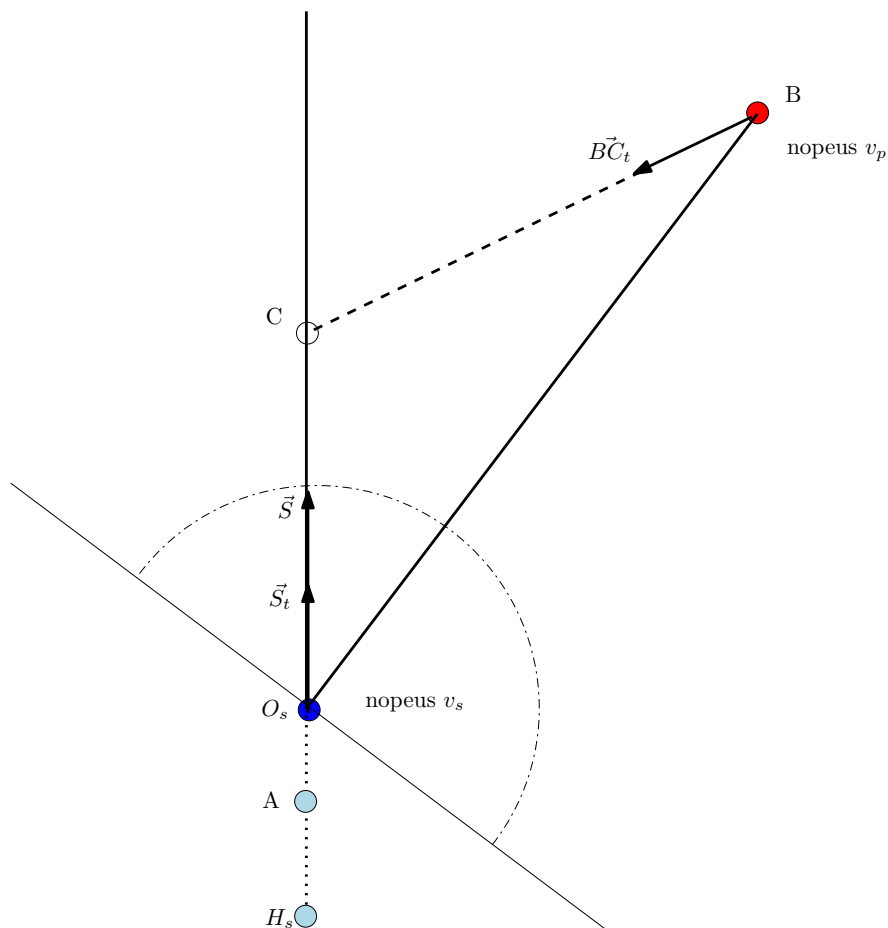
$$(t^*)^2 v_p^2 = (\vec{BC})^\top \cdot \vec{BC}.$$

Sijoitetaan pisteen C yhtälö yllä olevaan kaavaan

$$(t^*)^2 v_p^2 = (A + t^* \cdot \vec{S}_t - B)^\top \cdot (A + t^* \cdot \vec{S}_t - B).$$

Merkitään vektoreiden alkioita $A = (e, f)$, $B = (k, l)$ ja $\vec{S}_t = (q, r)$, jolloin saadaan vektorilaskut purettua skalaarioperaatioiksi. Tällöin saadaan

$$(t^*)^2 v_p^2 = (e + t^* q - k)^2 + (f + t^* r - l)^2$$



Kuva 6: Kohtaustasan yksittäisen pisteen laskenta. O_s on sinisen ja B punaisen lähtöaseman sijainti. v_s on sinisen ja v_p punaisen nopeus aikayksikön t suhteen. \vec{S} on eräs diskretoitu suunta $\pi/2$ radiaania vektorin $O_s\vec{B}$ molemmin puolin. \vec{S}_t on matka, jonka sininen kulkee aikayksikössä. H_s on laskennallinen piste, johon sininen siirretään pisteestä O_s matkan $-\vec{S}_t$ kertaa lähtöviive verran ja josta sininen etenee pisteeseen A matkan \vec{S}_t kertaa punaisen lähtöviive. Punaista ei siirretä. Punainen ja sininen kohtaavat pisteessä C , joka tulee ratkaista. $B\vec{C}_t$ on matka, jonka punainen etenee aikayksikössä.

, ja edelleen

$$(t^*)^2 v_p^2 = e^2 + (t^*)^2 q^2 + k^2 + 2(et^*q - ek - t^*qk) + f^2 + (t^*)^2 r^2 + l^2 + 2(ft^*r - fl - t^*rl)$$

, eli

$$(t^*)^2 \underbrace{(v_p^2 - q^2 - r^2)}_a + t^* \underbrace{2(qk + rl - eq - fr)}_b + \underbrace{(2ek + 2fl - e^2 - k^2 - f^2 - l^2)}_c = 0.$$

Ajanhetki t^* ratkeaa toisen asteen yhtälön ratkaisukaavalla

$$t^* = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (1)$$

, tai erikoistapauksessa, jossa sinisen ja punaisen nopeudet ovat täsmälleen samat $t^* = -c/b$.

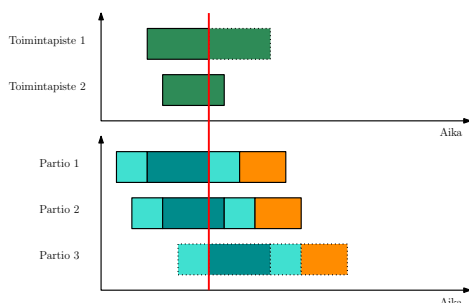
Ajanhetken t^* mukaan saadaan piste $C = A + t^* \cdot \vec{S}_t$ laskettua, joka on yksi kohtaustasan muodostavista pisteistä. Laskenta toistetaan jokaiselle diskretoidulle suunnalle puoliympyrältä, jolloin pisteistä saadaan muodostettua yksi kohtaustasa. Kohtaustasa määrätään jokaiselle parille sinisen partioita ja punaisen joukkoja.

Kun kaikki kohtaustasat on laskettu, määrätään kaikkien kohtaustasojen leikkauspisteet. Leikkauspisteet ovat oleellisia mellakantorjuntatasan muodostamisessa, sillä mellakantorjuntatasaa koostuu kohtaustasojen segmenteistä ja nämä segmentit liittyvät toisiinsa leikkauspisteessä.

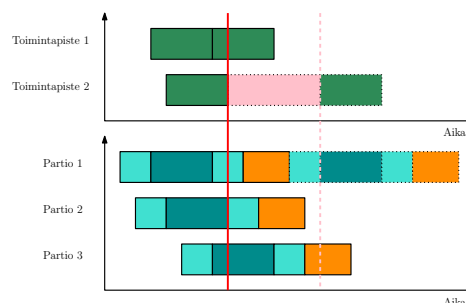
Mellakantorjuntatasan muodostaminen lähtee liikkeelle ensimmäisestä ajanhetkestä, jolloin sininen ja punainen voivat kohdata. Tämä piste otetaan lähtöpisteeksi ja lähdetään kulkemaan pitkin kohtaustasan pisteitä, kunnes vastaan tulee ensimmäinen kohtaustasojen leikkauspiste. Leikkauspisteessä tarkastellaan minkä kohtaustasan segmentillä mellakantorjuntatasaa jatketaan. Kohtaustasan segmentti valitaan sen mukaan, mikä täyttää mellakantorjuntatasan vaatimuksen ja joka on ajallisessa järjestyksessä aikaisin. Kun mellakantorjuntatasaa saavuttaa jonkin kohtaustasan ääripisteen, toistetaan algoritmi alkuperäisestä lähtöpisteestä toiseen suuntaan.

4.2 Aikataulu

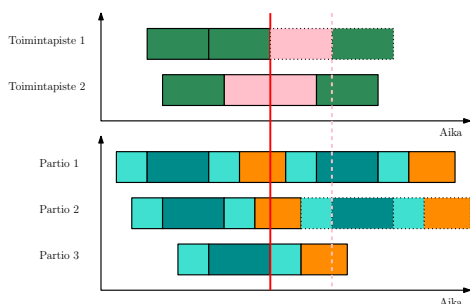
Aikataulutarkastelu ratkaistaan myooppisella ja deterministisellä heuristii-kalla. Heuristiiikka on myooppinen, koska siinä ei huomioida kokonaisuutta vaan tyydytään tarkastelemaan vain yhtä partion allokaatiota kerrallaan. Yksi partion allokaatio alkaa ja päättyy siihen, kun partio on valmiudessa ase-



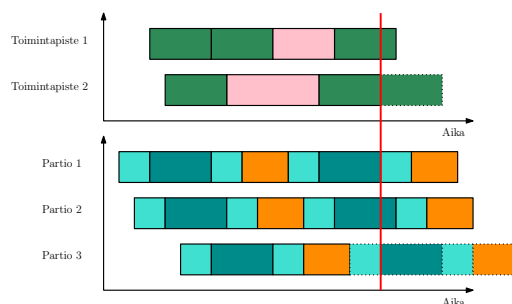
(a) Vajetta on tulossa ensin toimintapisteessä 1. Partio 3 ehtii ajoissa toimintapisteeseen.



(b) Vajetta on tulossa ensin toimintapisteessä 2. Mikään partio ei ehdi ajoissa toimintapisteeseen. Valitaan partio 1, joka ehtii aikaisimmin. Toimintapisteeseen jää pysyvästi vajetta, jota ei enää yritetä täyttää.



(c) Vajetta on tulossa ensin toimintapisteessä 1. Toimintapiste 2:n vaje on jo realisoitunut, joten sitä ei huomioida. Mikään partio ei ehdi toimintapisteeseen ajoissa. Valitaan partio 2, joka ehtii aikaisimmin.



(d) Vajetta on tulossa ensin toimintapisteessä 2. Partio 3 ehtii toimintapisteeseen ajoissa.

Kuva 7: Punainen kiinteä viiva kuvaa ensimmäisen vajeen ajanhetkeä, jonka mukaisesti algoritmi etenee ajallisesti. Syaani kuvaa partion siirtymistä ja tumma syaani kuvaa partion oleskelua toimintakohteessa. Oranssi kuvaa partion huoltoa. Vihreä on täytetty voima ja vaaleanpunainen on toimintapisteeseen syntynyttä vajetta.

massa. Muut allokaation vaiheet ovat siirtyminen toimintakohteeseen, oleskelu toimintakohteessa, siirtyminen asemaan ja huolto asemassa. Heuristiikka on deterministinen, koska samoilla lähtötiedoilla syntyy aina sama tulos.

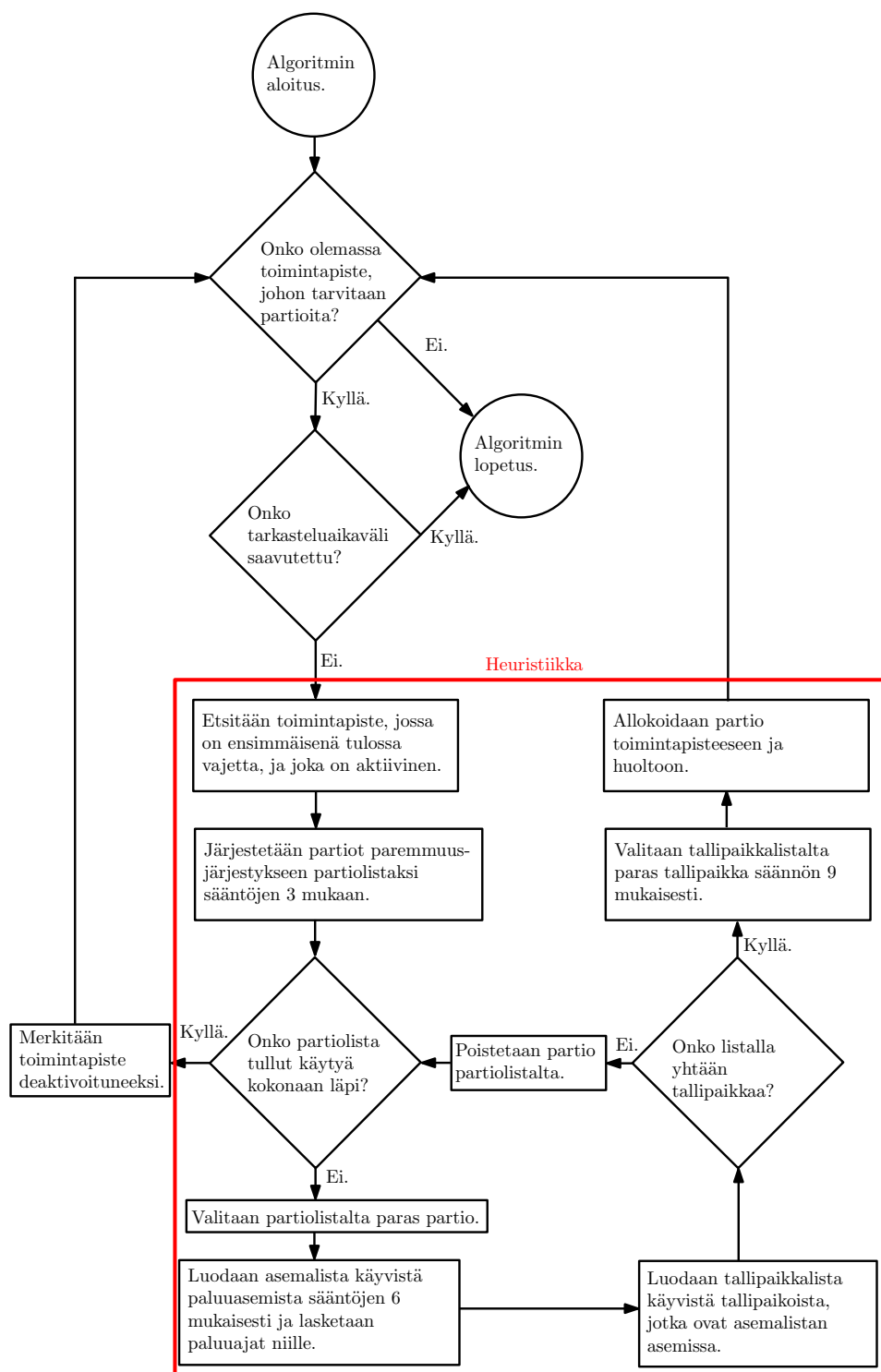
Heuristiikka tukeutuu sääntöihin, jotka pyrkivät yksittäisen partion allokaatiolla jatkamaan yhtäjaksoisen voiman täyttymistä kohdealueella mahdollisimman pitkään. Toimintakohteeseen osoitetaan partio, joka kykenee olemaan pisimmän ajan toimintakohteessa eli joka pidentää eniten kohteessa saavutettua yhtäjaksoista voimaa. Partion kohdealueella oleskeluajan maksimointi johtaa sivutuotteena resurssien tehokkaaseen käyttöön, muun muassa minimoimalla siirtymiseen kuluva polttoainetta. Käytännössä heuristiikka käyttää tukeutumiseen lähintä asemaa ja pikahuoltoa niin usein kuin mahdollista.

Laskennan helpottamiseksi toimintakohde, jossa on suurempi kuin yhden partion voimavaatimus, monistetaan niin moneksi yhden partion toimintakohteeksi kuin on toimintakohteen voimavaatimus. Tällaista mahdollisesti monistamalla syntynyttä yhden partion voimavaatimuksella olevaa toimintakohdetta kutsutaan toimintapisteksi.

Toimintapiste, johon seuraavaksi partio allokoidaan valitaan sen mukaan, mistä on aikaisimmalla ajanhetkellä poistumassa partio. Kuvassa 7 on esitetty aikataulun ratkaisualgoritmin eteneminen ajallisesti. Kiinteä punainen viiva osoittaa ajanhetken, jolloin on ensimmäisenä tarve allokoida partio. Tämä ajanhetki on ei-vähenevä. Kuvissa 7(b) ja 7(c) toimintapisteeseen ei saada uutta partiota täsmälleen samaan aikaan, kun edellinen partio sieltä poistuu. Tällöin toimintapisteeseen syntyy vajetta. Toimintapisteeseen syntyvä vaje minimoidaan osoittamalla sinne partio, joka ensimmäisenä ehtii paikalle.

Kuvassa 8 on esitetty aikataulun ratkaisualgoritmi kokonaisuudessaan. Heuristiikka, joka osoittaa mellakkapoliisin partion toimintapisteeseen koostuu karkeasti neljästä eri vaiheesta:

- Valitaan toimintakohde, johon tarvitaan korvaava partio.
- Valitaan partio, joka lähetetään toimintakohteeseen.
- Partio toteuttaa tehtävää toimintakohteessa, kunnes polttoainerajoite pakottaa partion poistumaan toimintakohteesta.
- Partio siirtyy toimintakohteesta asemaan. Paluuasema voi olla mikä tahansa asema, jossa sillä hetkellä on vapaa tallipaikka.



Kuva 8: Aikataulun ratkaisualgoritmi, jossa heuristiikka on korostettu punaisella reunuksella.

Heuristiikka on seuraavanlainen:

1. Etsitään toimintapiste, jossa aikaisimmin on tulossa vajetta. Tämän määrää aika, jolloin toimintapisteestä on edellinen partio poistumassa.
2. Lasketaan jokaiselle partiolle aika, jolloin kyseinen partio aikaisintaan pääsee toimintapisteeseen.
3. Järjestetään partiot paremmuusjärjestykseen seuraavien sääntöjen mukaisesti:
 - (a) Pienin erotus uuden partion toimintapisteeseen saapumisajan ja edellisen partion poistumisajan välillä. Parhaimmillaan erotus on nolla, kun uusi osasto saapuu toimintapisteeseen täsmälleen silloin kun edellinen osasto sieltä poistuu.
 - (b) Pienin etäisyys partion lähtöaseman ja toimintapisteen välillä.
 - (c) Pienin tallipaikan kääntöaika, josta partio on lähdössä.
4. Valitaan paremmuusjärjestyksen mukaisesti paras partio tai seuraavaksi paras, jos partion valintaan on jouduttu palaamaan.
5. Järjestetään käyvät paluuasemat paremmuusjärjestykseen siten, että lähin asema tulee ensimmäiseksi. Paluuasema on käypä, jos partion polttoaine riittää toimintakohteessa minimioleskeluajan jälkeen paluuseen ko. asemaan. Jos partion aseet loppuvat toimintakohteessa, niin paluuasemassa on myös lisäksi oltava saatavilla asetäydennystä.
6. Lasketaan jokaiselle edellisessä kohdassa 5 järjestetyille asemalle paluu-aika, jolloin partio on asemaan tulossa. Paluu-aika määräytyy partion polttoaineen loppumisen mukaan.
7. Määrätään kohdassa 5 järjestettyjen asemien käyvät tallipaikat. Tallipaikka on käypä, jos se on vapaa ajanhetkellä, jolloin partio saapuu asemaan. Tallipaikalla on oltava asetäydennyskyky, jos partio tarvitsee asetäydennystä. Tallipaikka ei saa olla pikahuolto- paikka jos partio on edellisessä huollossa ollut pikahuolto- paikalla.
8. Jos käypiä tallipaikkoja ei löytynyt lainkaan, ei partiota voida määrätä tehtävään. Tällöin palataan kohtaan 3 ja järjestyksessä seuraavaksi parhaaseen partioon.
9. Valitaan kohdassa 7 määrätyistä paluutallipaikoista se, joka sijaitsee lähimpänä toimintakohtetta ja jossa on lyhin kääntöaika.

4.3 Voiman riittävyys

Voiman riittävyystarkastelussa tarkasteltava maantieteellinen alue jaetaan koordinaattien suhteen tasaväliseen hilaan, jonka jokaisessa hilapisteessä ratkaistaan aikataulutarkastelu olettaen, että toiminta-alue olisi kyseisessä hilapisteessä. Kuvassa 9 alue on jaettu 5 kertaa 7 pisteistöön, jotka on kuvattu sinisillä viivoilla. Yksi kuvapikseli on korostettu mustalla reunuksella. Viivojen leikkauspisteissä sijaitsee laskentapisteet, joihin kuvapikselit keskittyvät.

Voiman riittävyttä mitataan kolmella eri mittarilla, jotka on esitetty kuvassa 10.

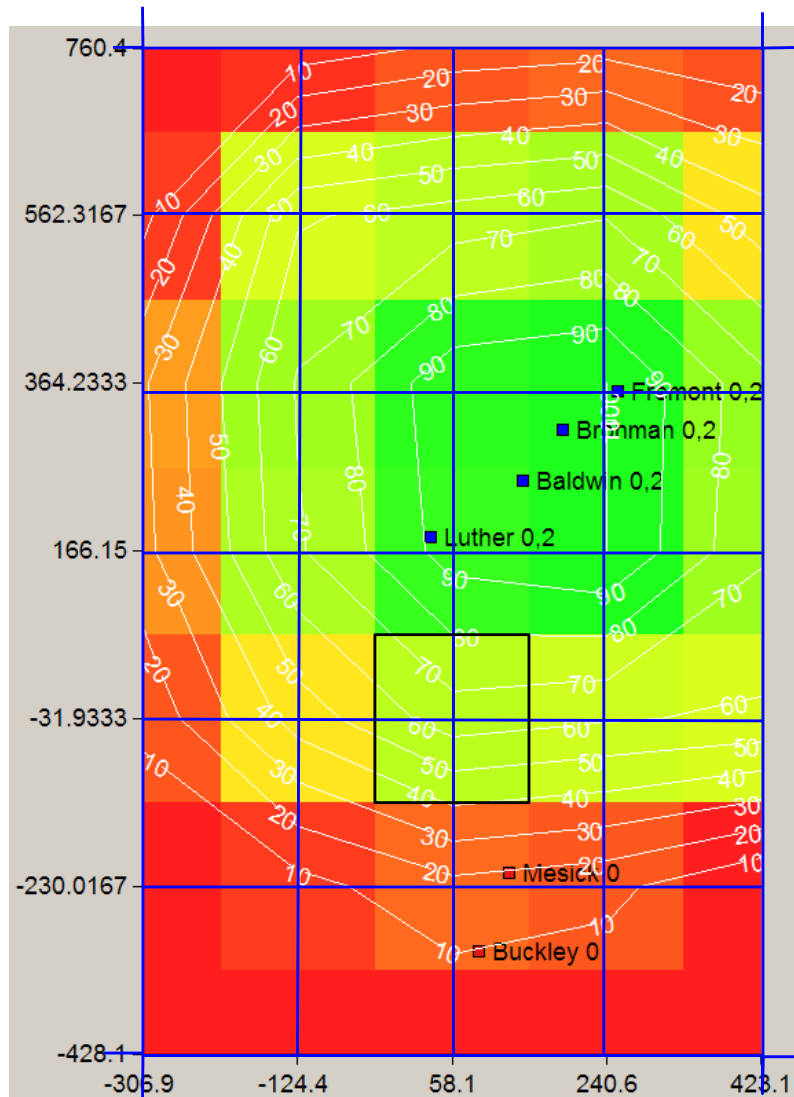
Yhtäjaksoinen voima ilmaisee kuinka pitkään täyttä voimaa pystytään ylläpitämään suhteessa vaadittuun aikaan. Laskenta ulottuu aktivoitumisajasta siihen hetkeen, jolloin toimintakohteessa syntyy ensimmäisen kerran vajetta. Kuvassa 10 yhtäjaksoista voimaa on ylläpidetty 55,8 minuuttia täydestä 180:stä.

Täysi voima ilmaisee prosentuaalisesti kuinka suuren osan ajasta toimintakohteessa on ollut täysi voima. Ensimmäisen vajeen jälkeen lasketaan vielä seuraavat hetket summaan, jolloin toimintakohteessa on täysi vaadittu voima. Kuvassa 10 täyttä voimaa on ylläpidetty $(55,8 + 29,5 + 10,0) \cdot 100/180 = 52,9\%$ 180 minuutista.

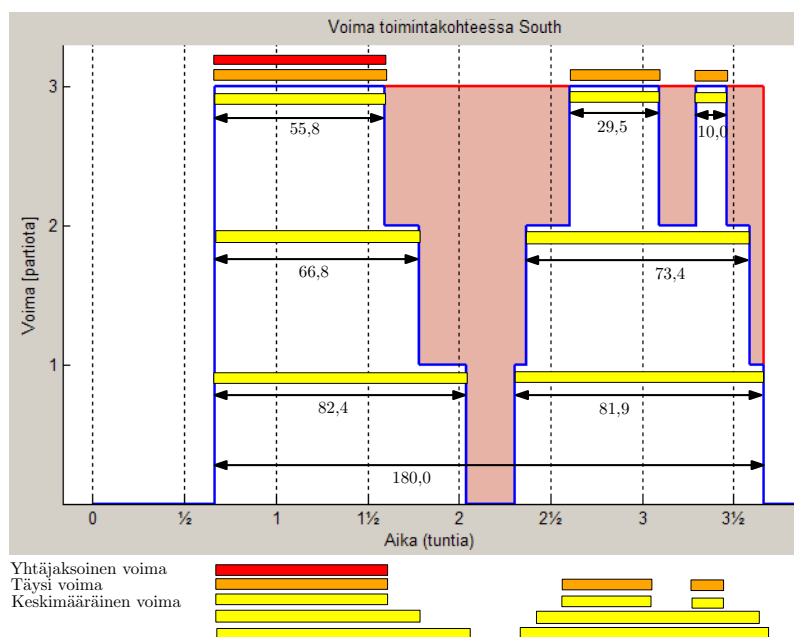
Keskimääräinen voima lasketaan summaamalla jokaisen saavutetun vähimmäisvoimatason kokonaiskesto ja jakamalla summa tehtävän kokonaiskestolla. Kuvassa 10 on toimintakohteessa vähintään yksi partio ajan $82,4 + 81,9 = 164,3$, vähintään kaksi partiota ajan $66,8 + 73,4 = 140,2$ ja vähintään kolme partiota ajan $55,8 + 29,5 + 10,0 = 95,3$. Summaamalla vähimmäisvoimatasot yhteen ja jakamalla toimintakohteen aktiivisuusajalla 180 minuuttia saadaan tulos $(164,3 + 140,2 + 95,3)/180 = 2,22$ partiota.

5 Esimerkkitarkastelut

Esimerkkitarkasteluissa käytetään kuvan 3 mukaisia lähtötietoja. Käytössä on neljä sinisen asemaa, kaksi sinisen toimintakohdetta ja kaksi punaisen asemaa. Fremontissa ja Lutherissa on kussakin kolme tallipaikkaa, joista kaksi on normaalin huollon tallipaikkoja ja niissä on myös asetäydennys. Huoltoaika on 42 minuuttia. Kolmas tallipaikka on pikahuoltoipaikka ilman aseistusta. Pikahuollon kesto on 21 minuuttia. Brohmanissa ja Baldwinissa on kussakin



Kuva 9: Voiman riittävyystarkastelun laskentahila on esitetty sinisellä viivoituksella. Yksittäinen kuvapikseli on korostettu mustalla reunuksella. Kuvaan piirtyy myös tasa-arvokäyriä, jotka arvioidaan laskentapisteiden perusteella.



Kuva 10: Voiman riittävyyden mittarit.

kaksi tallipaikkaa ilman aseistamiskykyä ja pikahuoltokykä. Huoltoaika on 42 minuuttia.

Tilanteessa on kahdeksan kappaletta partioita, joista kaksi kussakin asemassa. Partiot ovat muuten identtiset, mutta kussakin asemassa toisella partiolla on lähtöviiveä nolla ja toisella kaksi minuuttia. Kaikilla partioilla on sama määrä polttoainetta, sama nopeus ja sama kulutus siirtymässä. Aseita partioilla on kullakin kaksi.

Toimintakohteita on kaksi. North-toimintakohteessa on voimavaatimuksena yksi partio, minimioleskeluaikana 20 minuuttia ja polttoaineen kulutuksena 80 yksikköä tunnissa. Toimintakohde on heti aktiivinen ja deaktivoitumista ei ole määritetty äärellisenä. North-toimintakohde ei kuluta yhtään aseita partiolta. South-toimintakohde on haastavampi, sillä sille on määritetty kolmen partion jatkuva voimavaatimus ja siellä partiolta kuluu yksi ase. Minimioleskeluaika on 20 minuuttia ja toimintakohde on heti aktiivisena, eikä sille ole määrätty äärellistä deaktivoitumisaikaa. Pohjoisessa toimintakohteessa on myös suurempi polttoaineen kulutus, 120 yksikköä tunnissa.

Punaisella on kaksi asemaa. Kummassakin asemassa on yksi joukko, jonka nopeus on sinisen partioita hieman suurempi. Lähtöviive punaisen joukolla on nolla.

5.1 Mellakantorjuntatasa

Kuvassa 11 on esitetty esimerkkilähtötietoja vastaavan mellakantorjuntatasa-tarkastelun tulos. Kuvassa on esitettynä ensimmäisten partioiden muodostama mellakantorjuntatasa. Mellakantorjuntatasa muodostuu odotusten mukaisesti noin puoleenväliin osapuolten asemista.

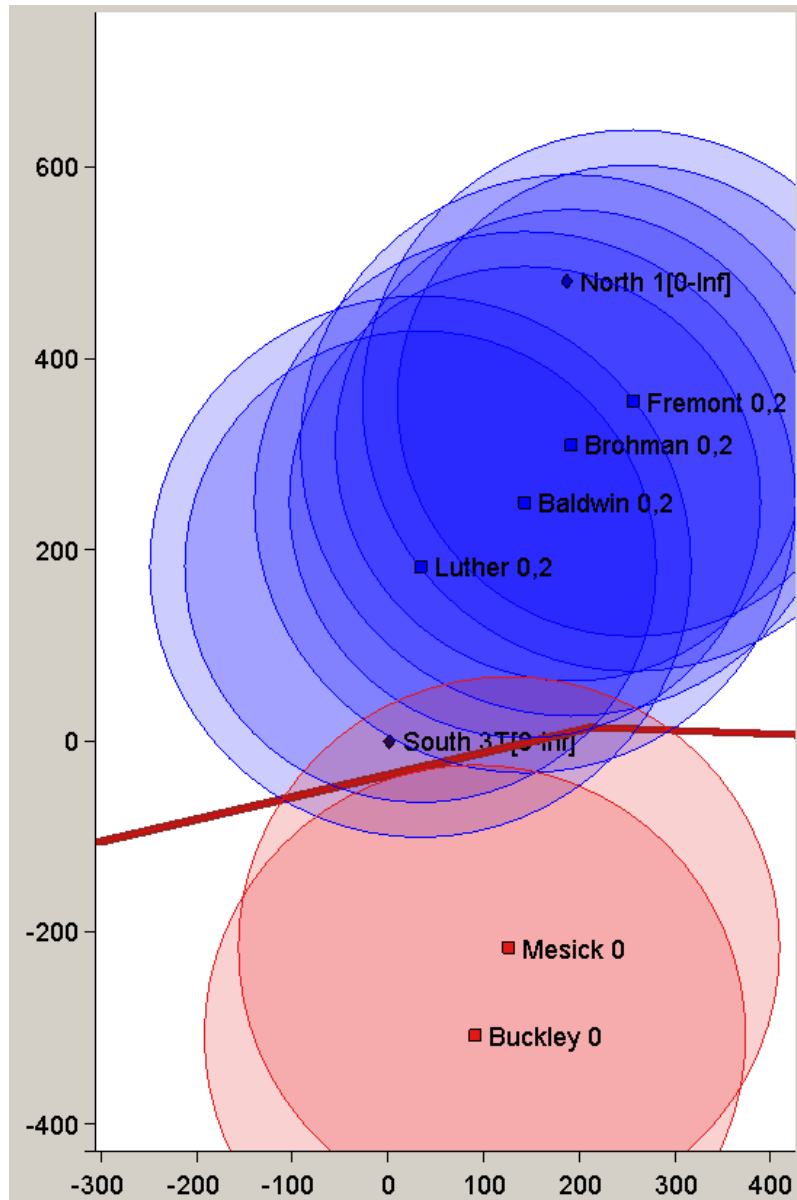
5.2 Aikataulu

Kuvissa 12 - 15 on esitetty aikataulutarkastelun tulokset. Kuvassa 12 on punaisella viivalla esitetty kuinka paljon voimaa toimintakohteessa tulisi olla ja sinisellä viivalla on toteutunut voima. Punaisen ja sinisen väliset erot on korostettu vaaleanpunaisella. Molemmat toimintakohteet ovat aktiivisena heti hetkellä nolla. Tällöin partiot ovat vielä asemissaan ja on selvä, ettei ne voi olla toimintakohteessa nolla-ajassa. Molempiin toimintakohteisiin saapuu partioita niin pian kuin mahdollista ja voimavaatimus saadaan tyydytettyä.

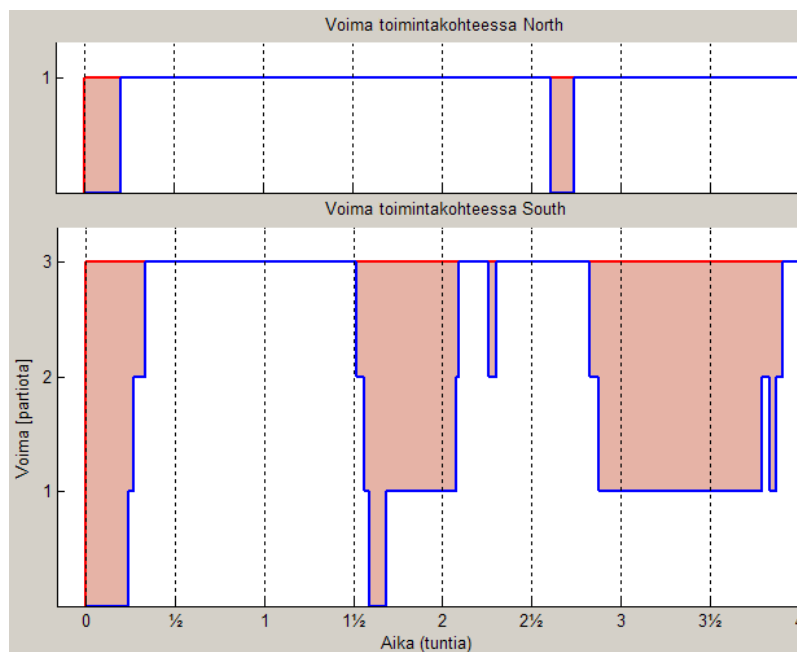
Kuvasta 15 nähdään tilanne yksityiskohtaisemmin, eli partioittain tarkasteltuna. Kun ensimmäiset partiot joutuvat palaamaan asemaan, onnistutaan niille saamaan ajallaan korvaavat partiot ja voimavaatimus kyetään täyttämään. Ensimmäiset partiot poistuvat toimintakohteesta samaan aikaan, kun toiset partiot saapuvat sinne. Ensimmäiset partiot lähtevät kohti asemia ja huoltoa. Siirtymä- ja huoltoajat ovat niin pitkiä, että partioilla on huolto vielä kesken, kun toimintakohteessa tarvittaisiin korvaavia partioita. Näin partiot joutuvat poistumaan toimintakohteesta ilman, että niille saadaan korvaavia partioita, joten toimintakohteeseen syntyy vajetta voimavaatimuksessa. Vaje nähdään kuvassa 12 ajanhetkellä 1,5 tuntia North- ja 2,5 tuntia South-toimintakohteessa. Korvaavat partiot saapuvat toimintakohteeseen myöhässä, heti kun vapautuvat huollosta.

Kuvasta 13 nähdään yleiskuva, miten asemia on käytetty tukeutumiseen. Sama tilanne on esitetty yksityiskohtaisemmin kuvassa 14, josta nähdään tallipaikan tarkkuudella, mitä aseman sisällä tapahtuu. Vihreä kuvaa valmiustilaa, jossa partio odottaa lähtöä, keltainen normaalia huoltoa ja oranssi pikahuoltoa.

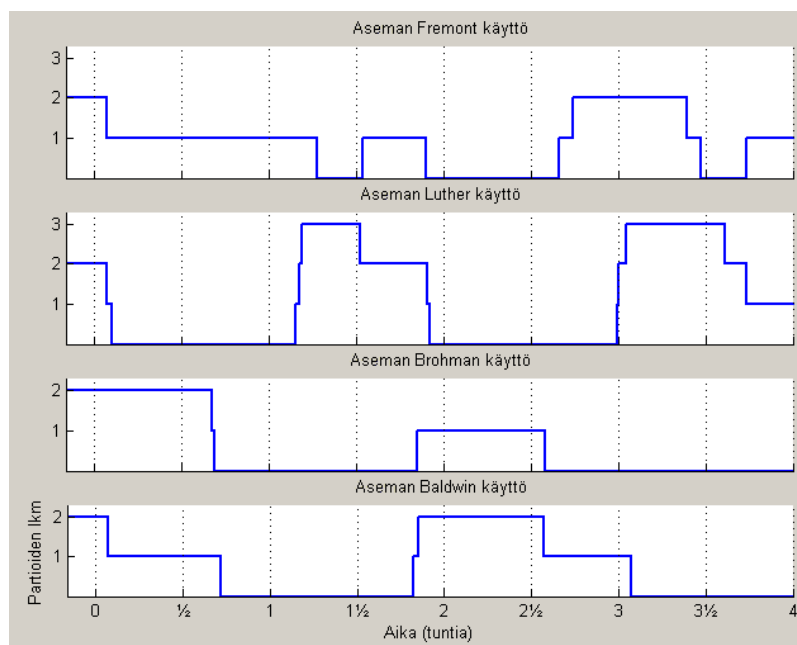
Kaikenkaikkiaan kuvien 12 ja 15 perusteella voidaan todeta, että vaikka voimavaatimuksessa on vajeita, heuristinen ratkaisu on tässä tilanteessa varsin tyydyttävä. Partioilla ei ole ylimääräisiä odotusaikoja, koska partiot siirtyvät lähes poikkeuksetta suoraan huollosta toimintakohteeseen. Vajeet johtuvat resurssien niukkuudesta.



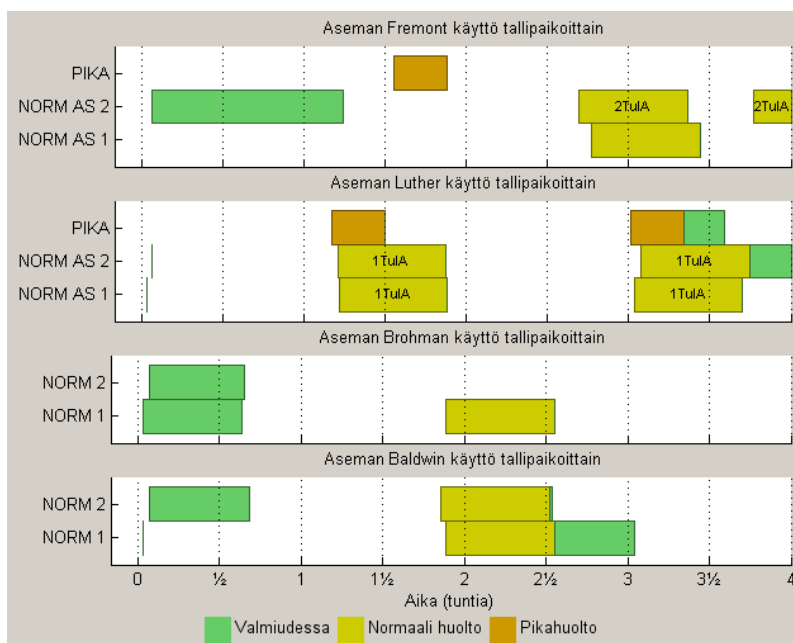
Kuva 11: Mellakantorjuntatasatarkastelu.



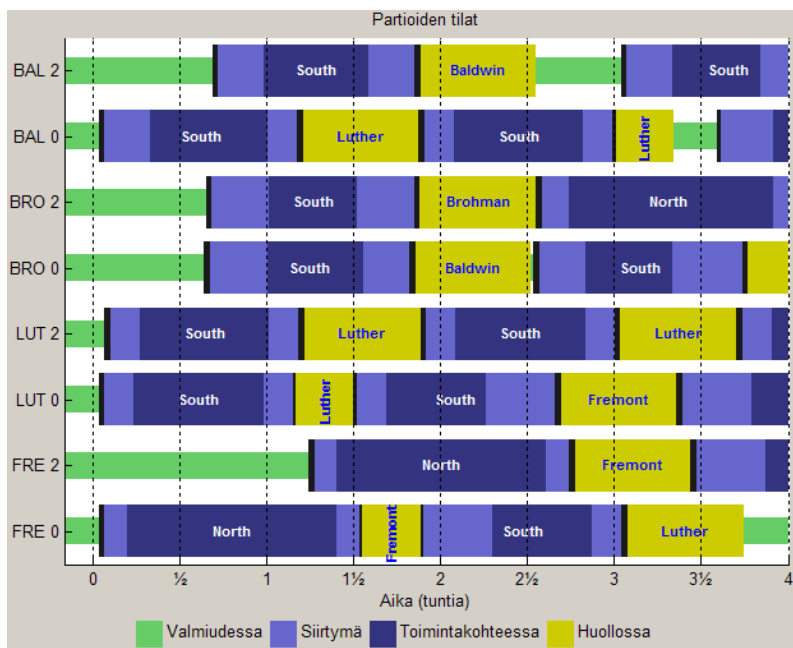
Kuva 12: Voima toimintakohteissa.



Kuva 13: Asemien käyttö.



Kuva 14: Asemien käyttö tallipaikoittain.



Kuva 15: Partioiden tilat.

5.3 Voiman riittävyys

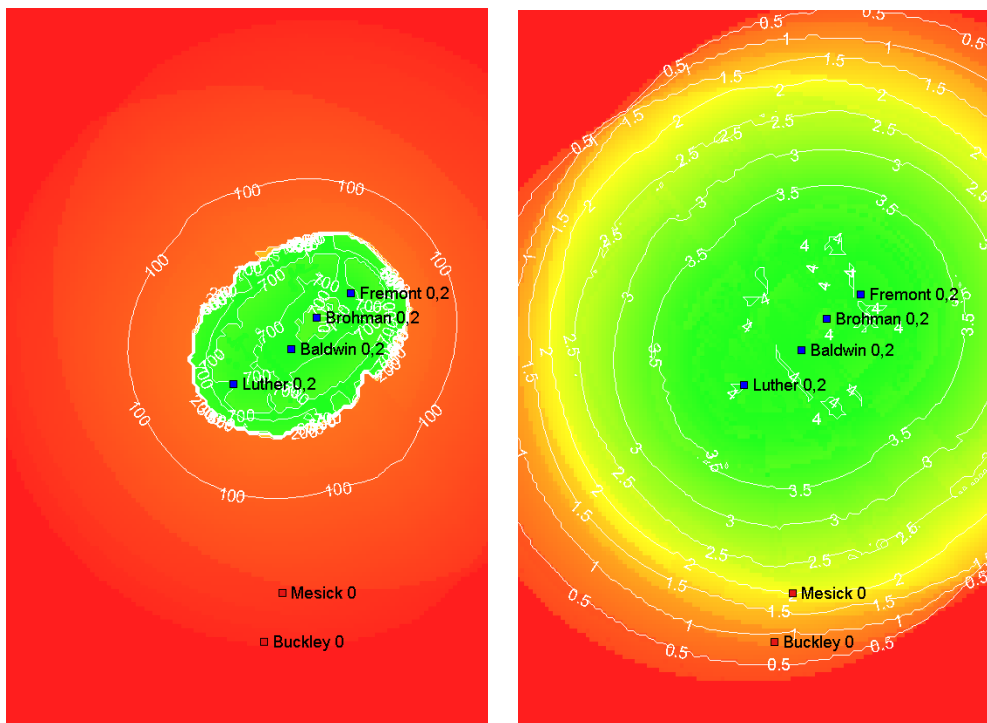
Voiman riittävyystarkastelu on ratkaistu toimintakohteelle, jolla on neljän partion voimavaatimus, 20 minuutin minimioleskeluaika, 80 yksikön polttoaineen kulutus, ei asekulutusta ja joka on aktiivisena ajanhetken 60 minuutista 780 minuuttiin. Toimintakohteen tiedot on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2: Voiman riittävyystarkastelun parametrit.

Voimavaatimus	4	partiota
Aktivoitumisaika	60	min
Deaktivoitumisaika	780	min
Minimioleskeluaika	20	min
PA kulutus	80	yks.
Asekulutus	0	

Yhtäjaksoisen voiman -mittarin tulos on esitetty kuvassa 16(a). Asemien lähiympäristössä kyetään ylläpitämään voimaa lähes koko vaadittu aika, joka näkyy kartalla vihreällä. Kauempana asemista tulos heikkenee oranssista punaiseksi. Punaisella alueella ei saavuteta täyttä voimaa alusta alkaen, joten yhtäjaksoinen voima katkeaa välittömästi. Oranssilla alueella saavutetaan alussa täysi voima, mutta korvaavat partiot eivät ehdi ajoissa toimintakohteeseen, jolloin yhtäjaksoinen voima katkeaa lyhyen ajan jälkeen. Kun toimintakohteeseen on tarpeeksi kaukana asemista, partiot eivät enää täytä minimioleskeluajan vaatimusta ja toimintakohteeseen ei saada yhtään partiota.

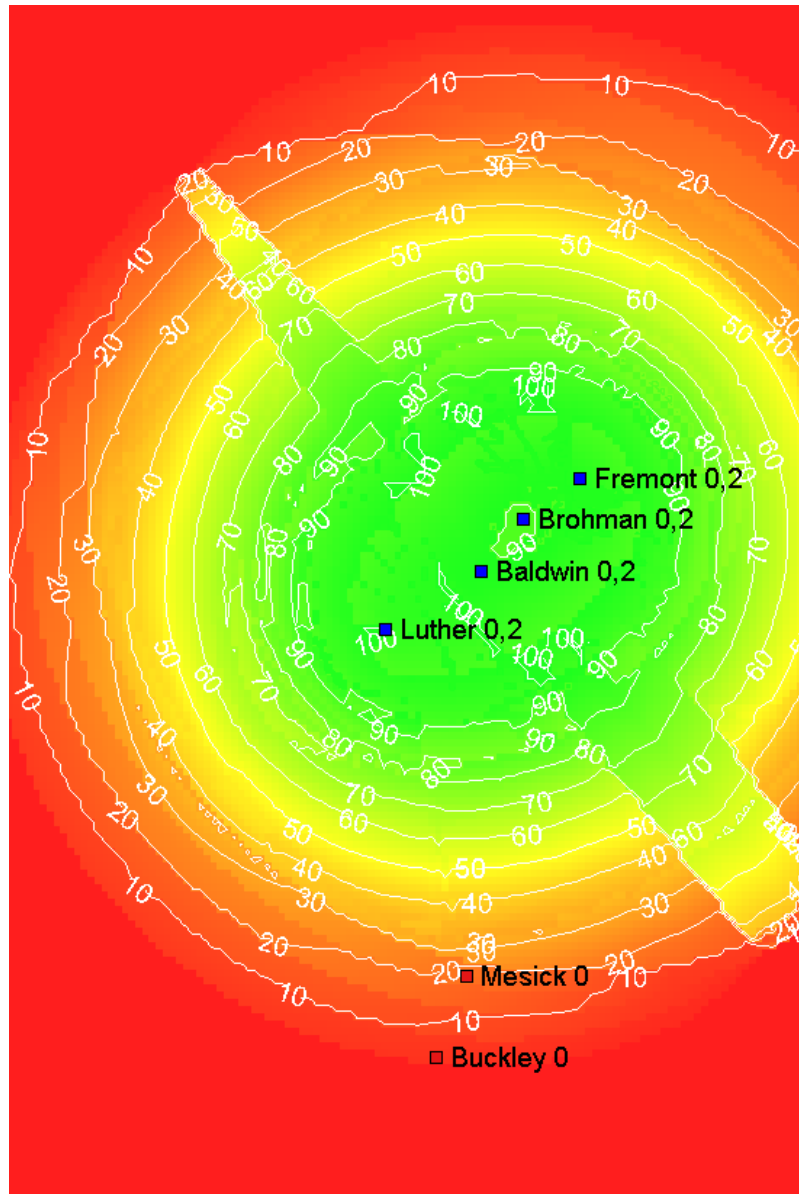
Täyden voiman -mittarin tulos on esitetty kuvassa 17. Tästä kuvasta havaitaan vaiheittaista siirtymää täydestä voiman riittävydestä voiman riittämättömyyteen. Kuvassa on nähtävissä kiilamainen alue, jolla on kyetty saavuttamaan täysi voima paremmin kuin lähiympäristössä. Kiilamaisesta alueesta on ensinnä huomattava, että se kulkee asemalinjan suhteen suoraan kulmaisesti, eli kiilan alueella on suunnilleen yhtä pitkä matka Lutherin ja Fremontin asemiin ja etäisyys Brohmanin ja Baldwinin asemiin on myös karkeasti sama. Kiilan alueella kaikki partiot kykenevät olemaan saman ajan toimintakohteessa ja siirtymäajat aseman ja toimintakohteen välillä ovat myös samat. Tästä seuraa, että partiot saapuvat samalla hetkellä toimintakohteeseen ja poistuvat toimintakohteesta samalla hetkellä. Partiot ovat myös samaan aikaan lähtövalmiina seuraavaan toimintakohteeseen. Toimintakohteessa saavutettu voima ei näin ollen jakaudu tasaisesti vaan keskittyy lyhyille ajanjaksoille, jolloin kohteessa on saavutettu täysi voima. Ilmiö nähdään tar-



(a) Yhtäjaksoinen voima.

(b) Keskimääräinen voima.

Kuva 16: Voiman riittävyys



Kuva 17: Voiman riittävyys - täysi voima.

kastelemalla kiilan alueelta yksittäisiä laskentapisteitä aikataulutarkastelun avulla.

Keskiarvoisen voiman -mittarin tulos on esitetty kuvassa 16(b). Erityisesti on huomattava, että kiilamaista kuviota ei ole enää havaittavissa. Saavutettu voima on jakautunut epätasaisesti, mutta absoluuttisesti voimaa ei ole saavutettu yhtään enempää kuin muualla lähiympäristössä. Keskiarvoinen voima onnistuu huomioimaan sen mikä jää täyden voiman mittarilta huomioimatta, eli voima on vain keskittynyt tietyille ajanhetkille. On intuition mukaista, että saavutettu keskiarvoinen voima alenee, kun siirrytään etäämmälle asemista.

5.4 Mitä jos -tarkastelut

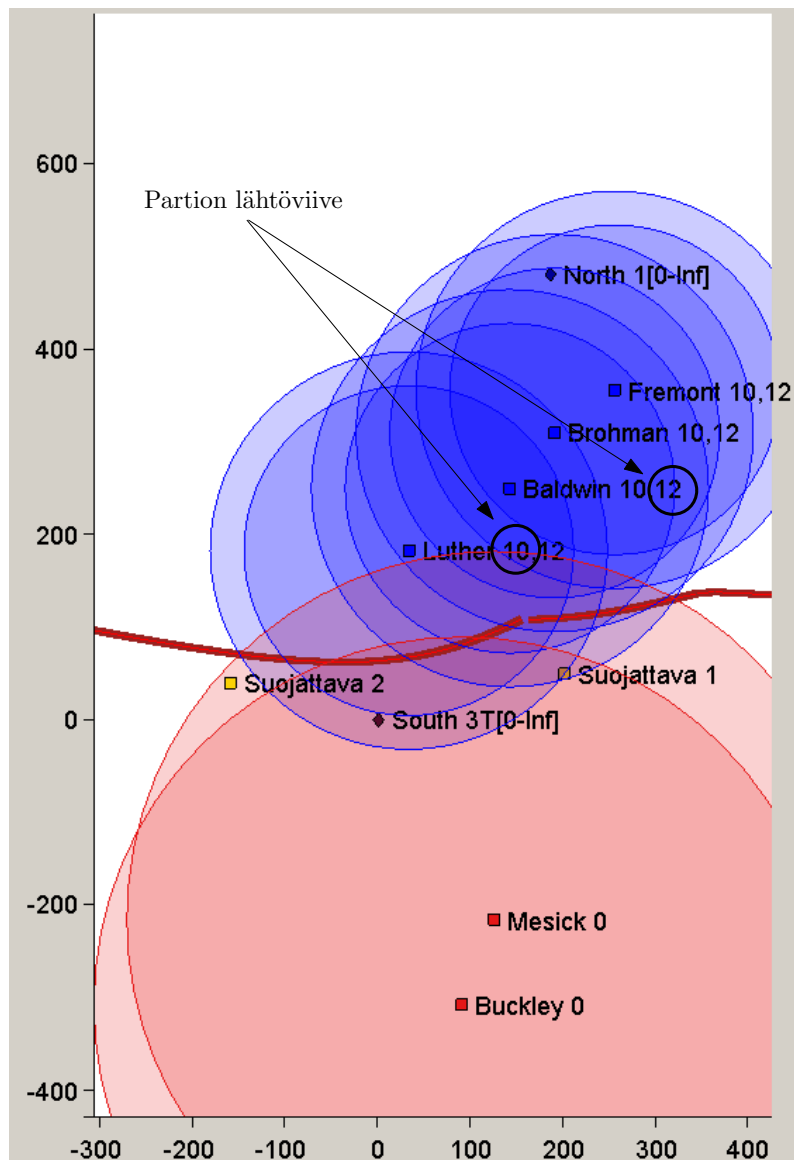
5.4.1 Valmiuksien vaikutus mellakantorjuntatasaan

Kuvassa 18 on esitetty mellakantorjuntatasa tilanteessa, jossa sinisen lähtöviiveet ovat kymmenen minuuttia suuremmat kuin esimerkkilähtötilanteessa. Kartalle on lisätty kaksi suojattavaa kohdetta, jotka on merkitty kuvassa 18 keltaisilla merkeillä. Suojattavat kohteet ovat paikkoja, joihin strategisista syistä sinisen on ehdittävä ennen punaista, eli suojattavien kohteiden tulee olla sinisen puolella mellakantorjuntatasaa. Suojattavat kohteet jäävät kuvassa 18 punaisten puolelle mellakantorjuntatasaa.

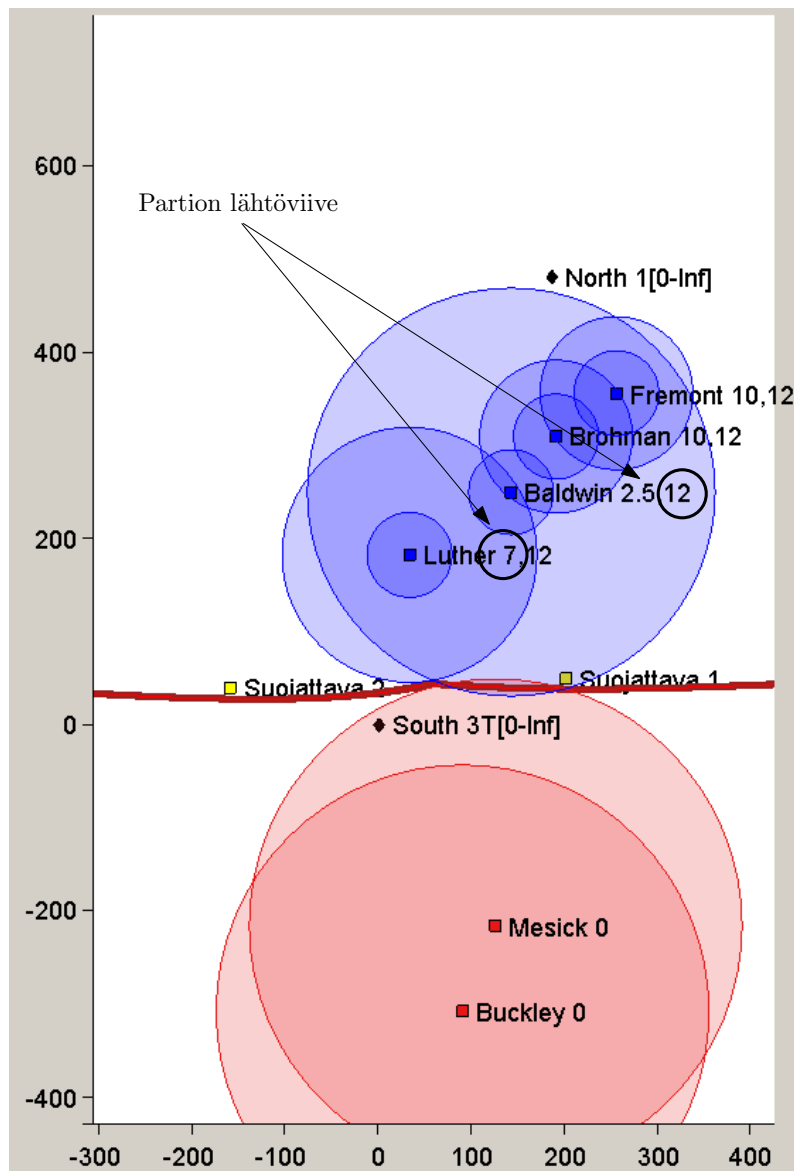
Muuttamalla sinisten lähtöviiveitä sopivasti saadaan mellakantorjuntatasa siirtymään siten, että suojattavat kohteet sijoittuvat sinisen puolelle mellakantorjuntatasaa. Kuvassa 19 on esitetty tilanne, jossa mellakantorjuntatasa on saatu siirrettyä edellä mainitulla tavalla tyydyttävästi. Lutherin ensimmäisen osaston lähtöviivettä pienennettiin kymmenestä minuutista seitsemään minuuttiin ja Baldwinin ensimmäisen osaston lähtöviivettä pienennettiin kymmenestä minuutista kahteen ja puoleen minuuttiin.

5.4.2 Huolto- ja polttoaineresurssien vaikutus aikatauluun

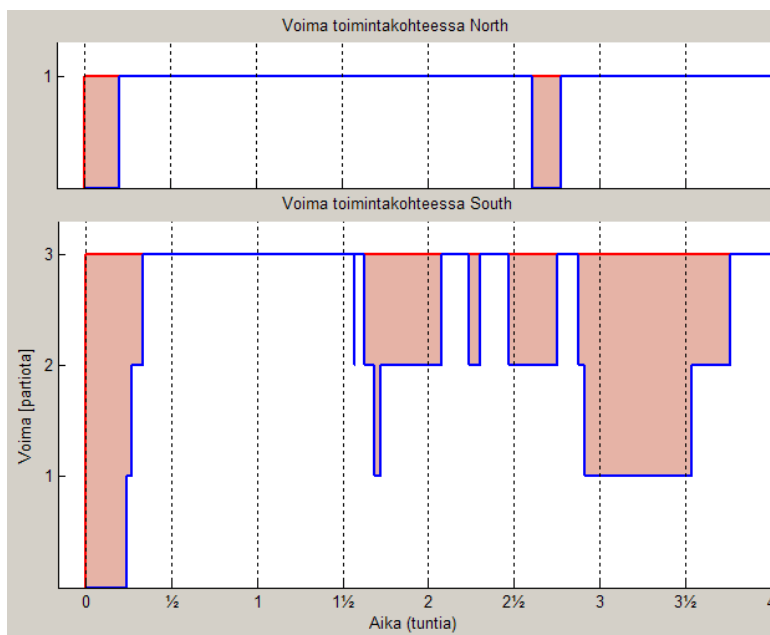
Kuvassa 12 on esitetty aikataulutarkastelun tulos esimerkkilähtötilanteelle. Tässä tilanteessa on huomattavaa voimavajetta toimintakohteessa. Tätä vajetta halutaan paikata lisäresursseilla. Tarkastellaan ensin ylimääräisen aseman lisäämistä kartalle. Lisätään uusi asema, jossa on yksi pikahuoltoapaikka, mutta ei asetäydennystä. Kuvassa 20 on esitetty aikataulutarkastelun tulos tällaisen vara-aseman ollessa käytössä. Vertaamalla kuvia 12 ja 20 havaitaan, että $1\frac{1}{2}$ ja 2 tunnin välissä on täydellinen vaje saatu paikattua ja kyseisellä vä-



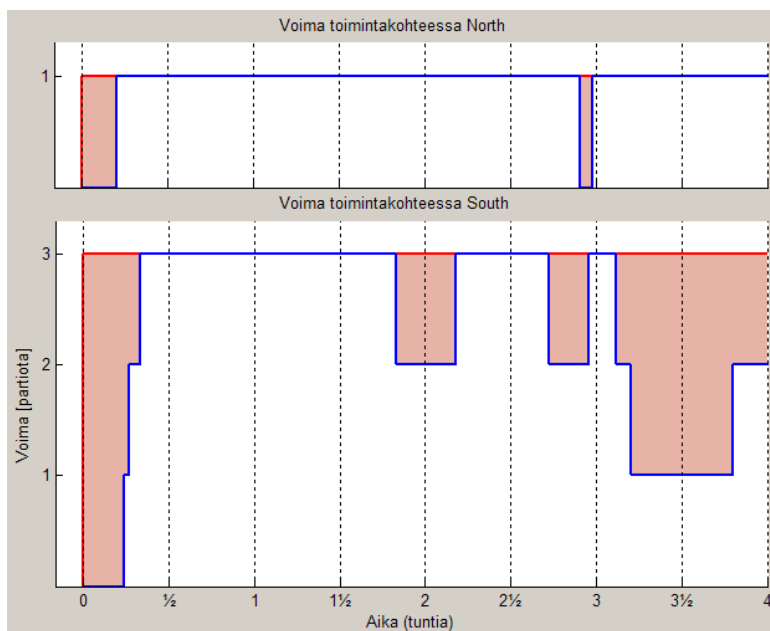
Kuva 18: Suojattavat kohteet, mellakantorjuntasa sekä sinisten ja punaisten kantama-alueet ajanhetkellä 21:45 minuuttia. Valmiudet on ilmoitettu minuutteina jokaiselle partiolle aseman nimen perässä. Sinisen valmiudet ovat normaalit, eli asemassa ei ole tehty erityisjärjestelyjä ja valmiuksia pystytään ylläpitämään pitkään.



Kuva 19: Suojattavat kohteet, mellakantorjuntasa sekä sinisten ja punaisen kantama-alueet ajanhetkellä 14:30 minuuttia. Valmiudet on ilmoitettu minuutteina jokaiselle partiolle aseman nimen perässä. Baldwinissa ja Lutherissa on kummassakin yksi partio kohotetussa valmiudessa. Kohotettu valmius aiheuttaa partioille rasiitetta, jota ei ole huomioitu simulointimallissa.



Kuva 20: Voima toimintakohteissa, kun vara-asema on käytössä.



Kuva 21: Voima toimintakohteissa, kun vara-asema on käytössä ja partiolla on 10% enemmän polttoainetta verrattuna kuvan 20 tilanteeseen.

lillä pystytään ylläpitämään lyhyttä poikkeusta lukuun ottamatta vähintään kahden partion voima.

Mikäli vara-aseman lisäksi halutaan edelleen parantaa voimavaatimuksen täyttymistä toimintakohteessa, voidaan partioiden polttoainekapasiteettia kasvattaa. Kuvassa 21 on esitetty aikataulutarkastelun tulos, kun partiolla on käytössä kymmenen prosenttia enemmän polttoainetta. Vertaamalla kuvia 20 ja 21 havaitaan, että $1\frac{1}{2}$ ja $3\frac{1}{4}$ tunnin välissä toimintakohteessa on kaiken aikaa vähintään kaksi partiota. Kuvassa 20 ja $3\frac{1}{2}$ tunnin välillä esiintyvä suuri kuoppa on siirtynyt kuvassa 21 noin neljänneštunnilla myöhemmäksi. Kuopan jälkeisestä tilanteesta ei voi tehdä johtopäätöksiä puutteellisen horisontin takia.

5.5 Tarkastelujen laskennallinen vaativuus

Esimerkkilähtötilanteelle aikataulutarkastelun suoritus aika, eli laskentaan ja tulosten esittämiseen kuuluva aika, on alle kaksi sekuntia. Jos esimerkkilähtötilanteessa tarkasteluajanväliä pidennetään neljästä tunnista 48 tuntiin, niin suoritus aika on noin 5 sekuntia. Jos tarkasteluajanväli pidennetään 400 tuntiin, niin suoritus aika kasvaa 52 sekuntiin.

Aikataulutarkastelussa käytännössä ainut selittävä tekijä suoritusajalle on kuinka monta tehtävää partiot suorittavat yhteensä toimintakohteissa. Partioiden tehtävien lukumäärään puolestaan vaikuttaa suoraan tarkasteluajanvälin pituus. Pidemmässä ajassa partiot ehtivät suorittaa enemmän tehtäviä. Partioiden ja/tai asemien lisääminen ilman, että voimavaatimuksia kasvatetaan ei havaittavasti vaikuta aikataulutarkastelun suoritus aikaan. Voimavaatimusten kasvattaminen, ja samalla käytettävissä olevien partioiden lisääminen siten, että voimavaatimukset ovat realistisesti täytettävissä, kasvattaa partioiden suorittamien tehtävien kokonaismäärää ja täten kasvattaa aikataulutarkastelun suoritus aikaa. Varsinainen laskenta, eli heuristiikan ajaminen, vie vain noin kymmenesosan kokonaissuoritusajasta. Merkittävin osa suoritusajasta kuuluu heuristiikan tuottaman raakadatan jalostamiseen esityskelpoiseksi.

Mellakantorjuntatasatarkastelun suoritus aika esimerkkilähtötilanteelle on 9 sekuntia. Sinisellä on 8 partiota ja punaisella kaksi mellakajoukkoa. Jos punaisen joukkojen lukumäärä kaksinkertaistetaan neljään, niin mellakantorjuntatasatarkastelun suoritus aika on 30 sekuntia. Jos punaisen joukkojen lukumäärä kolminkertaistetaan kahdesta kuuteen, niin suoritus aika kasvaa 64 sekuntiin. Jos punaisen joukkojen lukumäärä edelleen kolminkertaistetaan kuudesta 18:aan, niin suoritus aika kasvaa 613 sekuntiin. Kolminkertaistami-

sen seurauksena laskenta-aika on 9,6-kertaistunut. Suoritus aika siis kasvaa karkeasti suhteessa sinisen partioiden ja punaisen joukkojen lukumäärien tuloon neliöön. Sinisellä on aluksi 8 pariota ja punaisella 6 joukkoa, $8 \cdot 6 = 48$. Punaisen joukkojen lukumäärä kasvatetaan 18 joukkoon, $8 \cdot 18 = 144$. Tulojen neliöiden suhde $144^2/48^2$ on yhdeksän, jolloin suoritusajan odotetaan noin yhdeksänkertaistuvan.

Mellakantorjuntatasatarkastelun suoritus aikaan vaikuttava tekijä on kohtaustasojen lukumäärä, mikä on täsmälleen sama kuin sinisen partioiden ja punaisen joukkojen lukumäärien tulo. Mellakantorjuntatasan laskennassa joudutaan laskemaan jokaisen kohtaustasan leikkauspisteet jokaisen toisen kohtaustasan kanssa, jolloin laskutehtävien lukumäärä kasvaa eksponentiaalisesti kohtaustasojen lukumäärän lisääntyessä. Mellakantorjuntatasatarkastelun suoritus aikaan ei vaikuta asemien sijainnit tai partioiden tai joukkojen ominaisuudet.

Voiman riittävyystarkastelussa suoritus aika on suorassa suhteessa hilapisteiden määrään ja aikataulutarkastelun heuristiikan laskenta-aikaan. Esimerkikilähtötilanteelle harvalla 5 kertaa 7 hilalla suoritus aika on 4,9 sekuntia. 30 kertaa 42 hilalla suoritus aika on 102 sekuntia. Kuvissa 16(a), 16(b) ja 17 on käytetty 120 kertaa 168 hilaa, jonka suoritus aika on 1602 sekuntia (26 minuuttia 42 sekuntia).

6 Yhteenveto

Tässä työssä tarkasteltiin mellakkapoliisin resurssien kohdentamistehtävää. Poliisin tavoitteena on torjua mellakoita ohjaamalla partioita asemista eri kohteisiin ja ylläpitämällä kohteissa mellakoiden torjuntavoimaa korvaamalla kohteessa olevat partiot uusilla partioilla. Työssä esiteltiin simulointimalli, jolla voidaan ratkaista mellakkapoliisin resurssien kohdentamistehtävä.

Mellakkapoliisi haluaa ylläpitää mahdollisimman hyvää kykyä torjua mellakkajoukot, kun nämä lähtevät etenemään kokoontumispisteeltään. Tähän tehtävään esiteltiin työssä ratkaisu mellakantorjuntatasatarkastelun avulla. Mellakantorjuntatasa kertoo milloin ja missä sininen ja punainen kohtaavat. Mellakantorjuntatasa saatiin ratkaistua diskretoimalla suunnat, joita pitkin sinisen partiot etenevät ja laskemalla deterministisesti milloin sininen kohtaa punaisen kullakin suunnalla.

Mellakkapoliisi haluaa ylläpitää jatkuvaa suojausta ennalta tiedossa olevissa kohteissa. Tähän tehtävään esiteltiin työssä ratkaisu aikataulutarkastelun avulla. Aikataulutarkastelussa partioita osoitetaan toimintakohteisiin heuris-

tiikan avulla, joka pyrkii jatkamaan yhtäjaksoisen voiman kestoja mahdollisimman pitkään jokaisella toimintakohteeseen lähetetyllä partiolla.

Annetulla ryhmityksellä voidaan suorittaa myös maantieteellinen voiman riittävyystarkastelu. Tässä työssä voiman riittävyystarkasteluun esiteltiin ratkaisutapa, kun halutaan tietää minne ja kuinka paljon voimaa kyetään keskittämään. Voiman riittävyystarkastelu perustuu aikataulutarkasteluun, joka toteutetaan erikseen kussakin maantieteellisessä hilapisteessä. Voiman riittävyys ilmaistiin työssä kolmen eri mittarin avulla, joiden arvot esitettiin kartalla värein.

Simulointimallilla voidaan toteuttaa myös erilaisia mitä jos -tarkasteluja. Työssä tarkasteltiin valmiuksien vaikutusta mellakantorjuntatasaan. Partioiden valmiuksia muuttamalla saatiin mellakantorjuntatasa sijoittumaan siten, että suojattavat kohteet jäivät sinisen puolelle mellakantorjuntatasaa. Huolto- ja polttoaineresurssien vaikutuksia aikatauluun tutkittiin lisäämällä mellakkapoliisille ylimääräinen asema ja aseman lisäksi vielä partioiden polttoainekapasiteettia kasvatettiin. Näin saatiin ylläpidettyä toimintakohteessa enemmän partioita.

Tässä työssä kehitettyä simulointimallia mellakkapoliisin resurssien kohdentamiseen on mahdollista jatkokehittää. Mitä jos -tarkasteluja pystytään automatisoimaan, jolloin simulointimalli tuottaisi esimerkiksi optimaalisen ryhmityksen partioille. Aikataulutarkasteluun voidaan kehittää lukuisia erilaisia ratkaisuheuristiikkoja, jotka esimerkiksi ottaisivat huomioon useamman kuin yhden partion allokation kerrallaan. Voiman riittävyystarkastelussa voisi olla mukana kiinteitä toimintakohteita, joihin resurssit ensisijaisesti ohjataan ja kartalle piirtyvä voiman riittävyys perustuisi tältä kiinteältä toimintakohteelta ylijääneille resursseille. Simulointimalliin voidaan lisätä erityisiä kulkukieltoalueita, joiden läpi partiot eivät saa kulkea ja jotka partion on kierrettävä. Tällaiset kulkukieltoalueet ja erityisesti useat kulkukieltoalueet kerralla edellyttäisivät mellakantorjuntatasatarkastelussa verkko-optimointiin perustuvaa laskentaa.

Viitteet

- [1] J. Schubert, R. Suzié: *Decision Support for Crowd Control: Using Genetic Algorithms with Simulation to Learn Control Strategies*, Military Communications Conference, 2007.
- [2] L. A. Wolsey: *Integer Programming*, Wiley-Interscience, 1998.
- [3] M. L. Pinedo: *Planning and Scheduling in Manufacturing and Services*, 2nd ed., Springer, 2009.
- [4] P. Brucker: *Scheduling Algorithms*, 4th ed., Springer, 2004.
- [5] N. K. Jaiswal: *Military Operations Research: Quantitative Decision Making*, Kluwer Academic Publishers, 1997.
- [6] R. Gopalan, K. T. Talluri: *Mathematical models in airline schedule planning: A survey*, Annals of Operations Research, Volume 76(1998), p. 155-185.
- [7] G. Kozanidis, A. Gavranis, G. Liberopoulos: *Heuristics for Maximizing Fleet Availability Subject to Flight & Maintenance Requirements*, International Conference on Applications of Advanced Technologies in Transportation, 2008.
- [8] J. Kokkala: *Optimal Allocation of Defensive Fighter Force*, Aalto-yliopisto, Systemianalyysin laboratorio, diplomityö 2010.
- [9] G. Konzadinis, A. Gavranis, E. Kostarelou: *Mixed Integer Least Squares Optimization for Flight and Maintenance Planning of Mission Aircraft*, Naval Research Logistics, Volume 59(2012), p. 212-229.
- [10] The MathWorks, Inc.: *Matlab R2010b*, 2010