

# Mat-2.4177 Operaatiotutkimuksen projektityöseminaari

---

11.05.2010

## Lääkintähelikopterikaluston mallintaminen

### Loppuraportti

Toimeksiantaja: HEMS-hallinnointiyksikköhanke

Yhteyshenkilö: Jyri Örrö

Projektityöryhmä: Tero Tyrväinen 69956V

Ilmari Kuikka 58634A

Osmo Salomaa 58584J

# Sisällysluettelo

1	Johdanto .....	3
2	Aineisto .....	4
3	Lääkärihelikopterin tehtävän kulku.....	5
3.1	Tehtävän suoritusprosessi .....	5
3.2	Mallissa käytetyt parametrit .....	7
4	Optimointimallin rakenne .....	8
5	Tehtävän monitavoitteinen luonne .....	8
6	Hakualgoritmi .....	9
6.1	Hakualgoritmin toteutus .....	9
6.2	Huomioita hakualgoritmin toiminnasta .....	10
7	Simulaatio .....	11
7.1	Tarvittava data.....	11
7.2	Seuraavien tapahtuma-aikojen laskenta .....	11
7.3	Simulaation kulku .....	11
8	Suoritusarvojen mallinnus.....	13
8.1	Taustaa .....	13
8.2	Painot .....	13
8.3	Polttoaine .....	14
8.4	Laskenta .....	14
9	Tulokset .....	16
9.1	Tulosten herkkyys satunnaisuudelle.....	17
9.2	Nykytilanne .....	18
9.3	Tukikohta-kombinaatioiden tarkastelu.....	19
9.4	Suoritusarvojen vertailua.....	24
9.5	Tukikohtien määrä .....	30
10	Johtopäätökset .....	33
10.1	Tukikohtien sijoittelu .....	33
10.2	Helikopterit .....	33
11	Tulosten luotettavuuden tarkastelu .....	34
11.1	Datan epäluotettavuus .....	34
11.2	Tulosten kalibrointi .....	34
11.3	Maanpäälliset lääkäriambulanssit.....	34
12	Viitteet .....	35

# 1 Johdanto

Tämä loppuraportti esittelee tutkimusta, joka on tehty Teknillisen korkeakoulun Projektityöseminaari-kurssin yhteydessä. Toimeksiantajana projektissa toimi HEMS-Hallinnointiyksikkö hanke. Projektissa mallinnettiin Suomen lääkäri- ja lääkintähelikopteritoimintaa.

Lääkäri- ja lääkintähelikopteritoiminta (HEMS, Helicopter Emergency Medical Service) on tähän saakka ollut Suomessa paikallisten tukiyhdistysten järjestämää. Rahoitus on suurimmaksi osaksi saatu Raha-automaattiyhdistykseltä, ja lääkäriyövoima tukikohdan alueen sairaanhoitopiireitä. Yksiköiden sijoituspaikat ovat perustuneet lähinnä tukiyhdistysten intresseihin sijoituspaikoista, eikä systemaattista analyysiä sijoituspaikoista ole tehty.

Joulukuussa 2009 käynnistyneen HEMS-Hallinnointiyksikkö hankkeen tavoitteena on luoda maahan organisaatio, joka vastaa keskitetysti HEMS-toiminnan organisoimisesta. Hankkeessa ovat mukana maamme viisi yliopistollista keskussairaala (Helsinki, Turku, Tampere, Kuopio sekä Oulu) ja sen rahoittaa Sosiaali- ja terveystieteiden ministeriö. Hanketta hallinnoi Pohjois-Savon sairaanhoitopiiri (Kuopio).

HEMS-Hallinnointiyksikkö hankkeen tavoitteisiin kuuluu helikoptereiden sijoituspaikkojen uudelleenarviointi ja sopivan helikopterikaluston määrittäminen. Tässä raportissa esitetty simulaatio tehtiin tukemaan sekä tukikohtien sijoitukseen että helikopterimallin valintaan liittyvää päätöksentekoa. Kun helikopterimallinnusta käytetään kilpailutuksen yhteydessä, on oltava tarjoajan vastuulla toimittaa käyttökelpoinen data simuloitavaksi. Huolimatta tässä käytetyn lähdemateriaalin mahdollisesta epätarkkuudesta, simulaation on todettu toimivan ja on siten onnistunut.

Simulaatiossa mallinnetaan pelkästään lääkärihelikoptereiden toimintaa Suomessa. Aiheeseen kiinteästi liittyvien ambulanssien toiminta on rajattu mallista ulos, jottei mallista tulisi liian monimutkainen tämän projektin puitteissa kehitettäväksi. Ambulanssitoiminnan mallinnus on sinänsä hyvin samantyylinen ongelma, ja sitä voitaisiin lähestyä melko samalla tavalla, kuin lääkintähelikopteritoimintaa on tässä projektissa lähestytty. Laskennan puolesta ambulanssitoiminnan mallinnus olisi raskaampi tehtävä.

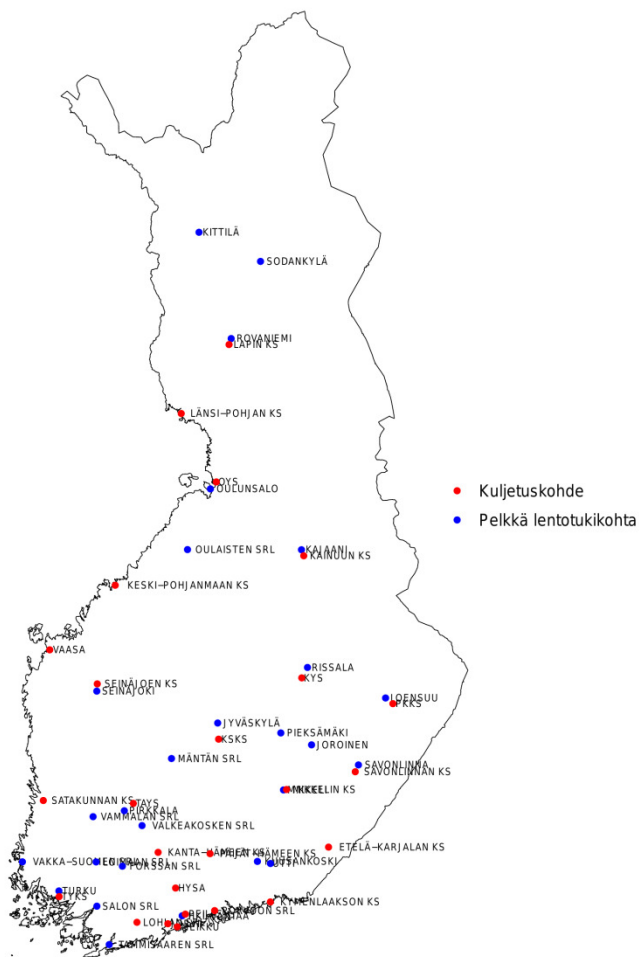
Raportissa kerrotaan ensin millaista aineisto projektissa käytettiin. Sen jälkeen käydään hieman läpi lääkärihelikoptereiden toimintaa. Projektissa käytetty optimointimenetelmä jakautuu kolmeen osaan: hakualgoritmiin, simulaatioon ja helikoptereiden suoritusarvojen mallinnukseen. Tulosten tarkastelulle annetaan raportissa merkittävä paino. Lopuksi käydään läpi johtopäätökset ja tarkastellaan tulosten luotettavuutta.

## 2 Aineisto

HEMS hallinnointiyksikkö hanke on toimittanut projektia varten valmiina Suomen maa-alan käsittävän aineiston sekä potentiaalisten tukikohtien ja sairaaloiden sijainnit.

Suomen maa-ala on jaettu simulaatiota varten hilaan, joka sisältää noin 20000 20 km<sup>2</sup> -kokoista kuusikulmaista solua. Kullekin näistä soluista on laskettu valmiiksi tehtävätodennäköisyyden odotusarvot (tehtävää vuodessa) erikseen päivä- ja yöajoille. Tehtävätodennäköisyydet on laskettu regressiomallilla, jossa selittävinä tekijöinä ovat solun asukasmäärä, sukupuoli- ja ikäjakauma sekä solun tiestön yhteenlaskettu pituus tieluokittain. Näiden lisäksi hilaan on laskettu helikopterien suorituskykyyn vaikuttavat solun korkeus merenpinnasta, lämpötilan keskiarvo ja keskihajonta kuukausittain sekä ilmanpaineen keskiarvo ja keskihajonta kuukausittain.

Potentiaalisia tukikohtia on määritelty 52 kappaletta. Nämä ovat esitetty kuvassa 1. Osa näistä sijaitsee sairaaloiden yhteydessä ja osa lentokentillä. Sairaaloista on tiedossa erikseen mitkä sairaalat ovat läpi vuorokauden valmiudessa ja kykenevät ottamaan vastaan helikopterilla tuotavia potilaita.



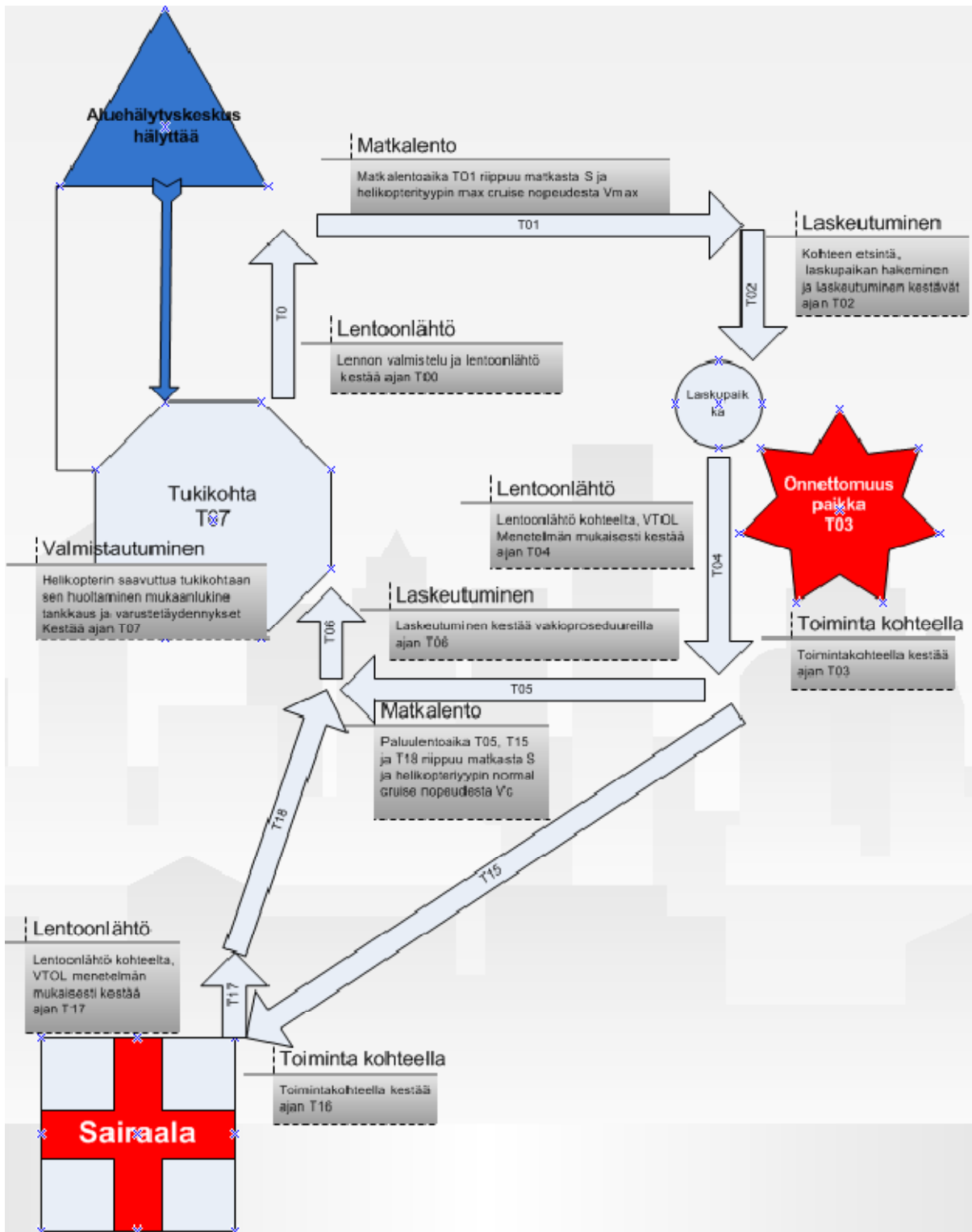
Kuva 1: Potentiaaliset tukikohtat, joista punaisella ne, joiden yhteydessä on sairaala, johon voidaan kuljettaa potilaita

## 3 Lääkärihelikopterin tehtävän kulku

### 3.1 Tehtävän suoritusprosessi

Kun lääkärihelikopterille tulee hälytys, ensimmäisenä on mietittävä, voiko helikopteri suorittaa kyseistä tehtävää. Tehtävä joudutaan jättämään suorittamatta, jos helikopteri on suorittamassa toista tehtävää, sää on liian huono tai kohde on niin kaukana, ettei helikopterin kantama riitä. Jos helikopteri pystyy suorittamaan tehtävän, suoritusprosessi etenee seuraavasti:

1. Hälytys
2. Lähtöön valmistautuminen ja lentoonlähtö
3. Lento kohteelle
4. Kohteen etsintä ja laskeutuminen
5. Potilaan hoito kohteessa
6. Potilaan mahdollinen kuljetus sairaalaan
  - a. Lentoonlähtö
  - b. Lento sairaalaan
  - c. Potilaan hoito sairaalassa
7. Lentoonlähtö
8. Paluulento tukikohtaan
9. Laskeutuminen tukikohtaan
10. Tankkaus ja varusteiden täydennys seuraavaa tehtävää varten tukikohdassa tukikohdassa



Kuva 2: Prosessikaavio tehtävän kulusta

## 3.2 Mallissa käytetyt parametrit

Tehtävän suorittamiseen liittyy monia parametreja, kuten lähtöön kuluva aika ja toiminta-aika potilaan luona. Todellisuudessa näissä luvuissa esiintyy vaihtelua eri tehtävien välillä, mutta projektissa tehdyissä laskennoissa ne oletettiin vakioiksi. Malliin liittyvinä parametreina käytettiin seuraavanlaisia arvoja:

- Lentoonlähtöön kuluva aika (riippumatta lähdetäänkö tukikohdasta vai potilaan luota): 7 minuuttia
- Laskeutumiseen kuluva aika (riippumatta siitä, mihin laskeudutaan): 3 minuuttia
- Potilaan luona kuluva aika: 20 minuuttia
- Todennäköisyys, että potilas joudutaan kuljettamaan sairaalaan: 40 %
- Tankkaus ja varusteiden täydennys: 15 minuuttia
- Sairaalassa kuluva aika: 15 minuuttia

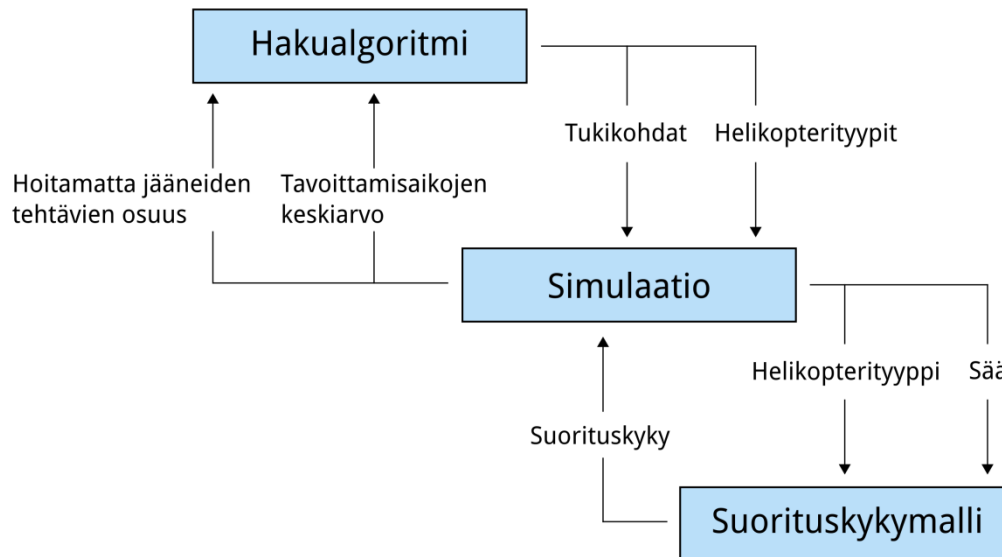
Lisäksi mallissa on parametreja, jotka liittyvät siihen, miten lääkintätehtävä suoritetaan vai suoritetaanko ollenkaan:

- Yläraja saavuttamisajalle: 45 minuuttia
- Alaraja saavuttamisajalle: 15 minuuttia
- Säde, jota lähempää sairaalaa tehtävät suoritetaan ambulanssilla: 10 km

Jos saavuttamisaika lasketaan ylärajaa suuremmaksi, tehtävää ei suoriteta. Jos saavuttamisaika lasketaan alarajaa pienemmäksi, lääkäri lähetetään kohteelle ambulanssilla. Tällöin lääkäri on poissa 60 minuuttia ja saavuttamisaika on 10 minuuttia.

## 4 Optimointimallin rakenne

Optimointimalli koostuu kolmesta komponentista: hakualgoritmista, simulaatiosta ja suorituskykymallista. Rakenne on esitetty kuvassa 3. Hakualgoritmi käy läpi tukikohtien ja helikopterityyppien mahdollisia yhdistelmiä ja suorittaa simulaation joka iteraatiolla. Simulaatio generoi satunnaisia tehtäviä ja säätiloja ja käyttää apunaan suorituskykymallia laskemaan kulloisenkin helikopterityypin kantaman ja nopeuden kulloisessakin säätilassa.



Kuva 3: Optimointimallin rakenne sekä sen kolmen eri komponentin välillä siirtyvä informaatio

Simulaation tuloksena saadaan ratkaisun hyvyttä kuvaavat tavoittamisaikojen keskiarvo ja suorittamatta jääneiden tehtävien osuus, jotka ohjaavat hakualgoritmien etenemistä mahdollisten ratkaisujen avaruudessa.

## 5 Tehtävän monitavoitteinen luonne

Lääkintähelikopteriratkaisun hyvyttä oli määritelty kuvattavan tavoittamisaikojen jakaumalla, joka kertoo kuinka kauan kestää hälytyshetkestä siihen kun lääkäri on potilaan luona ja suorittamatta jääneiden tehtävien osuudella, joka kertoo kuinka suuri osuus kaikista helikoptereille tarkoitetuista tehtävistä jää helikoptereilta suorittamatta (ottamatta kantaa meneekö hälytyspaikalle tällöin maayksikkö ja milloin). Tavoittamisaikojen koko jakaumalla on periaatteessa merkitystä, mutta siitä valittiin tarkasteltavaksi vain keskiarvo, jotta saatiin yksi luku, jonka perusteella hakualgoritmi voi verrata ratkaisujen keskinäistä hyvyttä.

Tavoitteena oli löytää näiden tavoitteiden suhteen pareto-optimaalisten ratkaisujen joukko, eli joukko jossa yksikään ratkaisu ei ole molempien tavoitteiden suhteen muita huonompi. Asettamalla nämä pareto-optimaaliset ratkaisut kahden tavoitteen muodostamaan avaruuteen voitiin esittää näiden kahden tavoitteen välinen valintatilanne, joka on sekä ensihoidollinen valinta, joka riippuu siitä mitä potilaille tavoittamisajan kasvaessa käytännössä tapahtuu, että poliittinen valinta siitä kuinka kattavaa palvelua halutaan tarjota.



## 6 Hakualgoritmi

### 6.1 Hakualgoritmin toteutus

Tukikohtien ja helikopterityyppien yhdistelmiä läpikäyvä hakualgoritmi on toteutettu geneettisillä algoritmeilla, joilla katsottiin helpoksi toteuttaa tehtävän vaatima monitavoiteoptimointi. Geneettisillä algoritmeilla yhtä ratkaisua kutsutaan yksilöksi ja niitä käsitellään joukkona, jota kutsutaan populaatioksi. Kullakin iteraatiokierroksella, joita kutsutaan sukupolviksi, evaluoidaan yksilöiden hyvyys ja valitaan uuden sukupolven yksilöt sekä suoraan edellisestä sukupolvesta että operaattoreilla yhdistelemällä edellisen sukupolven yksilöitä. Näin toivotaan, että hyviä ratkaisuja yhdistelemällä voidaan muodostaa edelleen parempia ratkaisuja. Tarkemman kuvauksen geneettisistä algoritmeista voi lukea esimerkiksi Goldbergin perusteoksesta [1].

Geneettiseksi koodaukseksi valittiin kaksi vektoria, joista toisessa ratkaisussa mukana olevien tukikohtien numerot (1–52) ja toisessa näissä tukikohdissa olevien helikopterien tyyppinumerot (1–8). Tällöin helikopterien määrä lukitaan etukäteen ja eri helikopterimäärien ratkaisut haetaan erikseen. Valittu koodaus ei noudata perinteistä alhaisen kardinaliteetin binäärikoodausta, mutta johtaa yksinkertaisempaan esitystapaan ja ennen kaikkea yksinkertaisempaan operaattorien toteutukseen, kun jokainen validin ratkaisun yhden alkion muutos johtaa edelleen validiin ratkaisuun.

Hitaan simulaatiolaskennan rajoittamiseksi toteutettiin erillinen funktio, joka laskee yhden ratkaisun helikopterien kantama-alueella asuvan väestömäärän. Uusia ratkaisuja luodessa tarkistettiin tämä väestöllinen kattavuus ja vaadittiin että se ylittää asetetun rajan, jotta ratkaisu hyväksytään mukaan. Sekä väestöllisen kattavuuden laskevalle funktiolle, että simulaatiofunktiolle ylläpidettiin välimuistia, jotta hakualgoritmin törmätessä uudestaan jo läpikäytyyn ratkaisuun, ei sille tarvinnut enää uudestaan suorittaa hidasta laskentaa.

Hakualgoritmin rakenne oli seuraava.

1. Generoi satunnainen alkupopulaatio
2. Evaluoi yksilöiden hyvyys
3. Valitse parhaita yksilöitä edellisestä sukupolvesta uudelleenvalinnalla
4. Risteytä uudelleenvalittuja yksilöitä keskenään
5. Tee satunnaismuutoksia mutaatiolla
6. Poimi yksilöt uuteen sukupolveen
7. Palaa kohtaan 2, mikäli läpikäytyjen sukupolvien määrä alle asetetun rajan

Monitavoitteinen uudelleenvalinta toteutettiin Fonsecan ja Flemingin [2] esittämän pohjalta laskemalla kullekin yksilölle niiden populaation muiden yksilöiden määrä jotka dominoivat tarkasteltavaa yksilöä eli ovat parempia molempien tavoitteiden suhteen. Näin saadut huonousluvut käännettiin hyvyysluvuiksi kaavalla

$$g_i = \max(\mathbf{b}) - b_i + 1,$$

missä  $g_i$  on yksilön  $i$  hyvyys,  $\mathbf{b}$  kaikkien huonouslukujen vektori ja  $b_i$  yksilön  $i$  huonous. Tämän jälkeen uudelleenvalintatodennäköisyydet laskettiin tavalliseen tapaan hyvyysarvojen suhteen lineaarisesti.

Risteytys toteutettiin tavalliseen tapaan vaihtamalla kahden yksilön tukikohta- ja helikopterityyppivektorien päät keskenään satunnaisen katkaisukohdan suhteen. Mutaatio toteutettiin tavalliseen tapaan satunnaisina yhden alkion muutoksina, sillä erolla, että mutaatiota sovellettiin myös niihin risteytettyihin yksilöihin, jotka

eivät olleet väestöllisen kattavuuden suhteen riittäviä. Näitä risteytettyjä yksilöitä mutatoitiin kunnes niiden väestöllinen kattavuus ylitti vaaditun rajan.

Uuteen sukupolveen valittiin mukaan sekä kaikki koko haun aikana vastaan tulleet pareto-optimaaliset yksilöt (kukin vain kerran) että kiinteä määrä operaattoreilla muodostettuja uusia yksilöitä. Tämä käytännössä tarkoitti, että pareto-optimaalisten yksilöiden määrän kasvaessa myös populaation koko kasvoi joka sukupolven myötä ja siten huonojen yksilöiden mahdollisuus pärjätä uudelleevalinnassa koko ajan heikkeni.

## 6.2 Huomioita hakualgoritmin toiminnasta

Hakualgoritmin toiminnan kannalta olennaisin kysymys oli miten hyvin geneettisten algoritmien perusidea, että hyviä ratkaisuja yhdistämällä voidaan muodostaa vielä parempia ratkaisuja, toteutuu. Havaittiin, että haun löydettyä melko hyvän ratkaisun, haku helposti juuttui kyseiseen tilaan, koska risteytyksellä tai mutaatiolla muodostettujen uusien ratkaisujen kattavuuteen jäi helposti aukko siihen kohtaan mistä tukikohta siirrettiin jonnekin muualle. Periaatteessa paras ratkaisu havaittuun ongelmaan olisi ollut tuottaa tätä tehtävä varten suunniteltuja operaattoreita risteytyksen tilalle, jotka ottaisivat tämän asian huomioon. Näitä olisi voinut olla esimerkiksi jonkinlaiset kierto- ja venytysoperaattorit, jotka olisivat muokanneet koko ratkaisua yhtenä joukkona. Tämän työn laajuuden huomioonottaen päädyimme kuitenkin seuraaviin toimenpiteisiin tavallisten geneettisten operaattorien puitteissa.

1. Pareto-optimaalisen uudelleevalinnan toteuttaminen dominoivien yksilöiden määrän mukaan valittiin osaltaan siksi, että tällöin hyvyysarvojen suhteen ei erityisesti haun alkuvaiheessa esiinny suuria eroja ja myös huonoilla yksilöillä on riittävän hyvät mahdollisuudet selviytyä seuraavaan sukupolven. Tällöin risteytyksellä ja mutaatiolla tuotetut uudet yksilöt voivat toimia eräänlaisina siirtymätiloina jolloin alkuperäistä paremmat yksilöt saattavat seurata vasta sukupolven tai kahden viiveellä.
2. Väestöllisen kattavuuden alaraja pidettiin melko alhaisena, arvossa 2 miljoonaa, jotta edellä mainitut lievästi huonot siirtymätilat olisivat mahdollisia.
3. Mutaatiotodennäköisyys pidettiin riittävän korkealla, arvossa 0.05, jonka lisäksi myös väestöllisesti huonosti kattavia yksilöitä mutatoitiin. Näin pyrittiin osaltaan pääsemään pois lokaaleista optimeista.

## 7 Simulaatio

Simulaatio simuloi Suomen lääkärihelikopteritoimintaa vuoden pituisen ajanjakson verran. Helikoptereiden saamat tehtävät käydään simulaatiossa läpi yksi kerrallaan aikajärjestyksessä. Simulaatio on Matlab-funktio, joka ottaa parametreikseen tukikohdat sekä helikoptereiden tyypit ja konfiguraatiot ja palauttaa suorittamattomien tehtävien määrän, saavuttamisaikojen keskiarvon ja tulosmatriisin, jossa suoritettut ja suorittamattomat tehtävät on esitetty soluittain.

### 7.1 Tarvittava data

Simulaatiota varten tarvitaan solujen koordinaatit, korkeudet, keskilämpötilat, lämpötilojen keskihajonnat, keskipaineet, paineiden keskihajonnat, vuosittaisten tehtävämäärien odotusarvot. Lisäksi tarvitaan sairaaloiden koordinaatit, sekä tieto siitä, mihin sairaaloista voidaan kuljettaa potilaita helikopterilla.

Säädata on jaettu aamulle, päivälle ja yölle. Kunakin näinä aikana lämpötila ja paine noudattavat omanlaista normaalijakumaansa. Säätietojen aikaleima oli UTC-ajassa, joten jako aamun, päivän ja yön välillä on tehty seuraavasti (suluissa vastaava aika Suomen normaaliajassa):

- aamu: klo 4:00 – 12.00 (6:00 - 14:00)
- ilta: klo 12:00 – 20:00 (14:00 – 22:00)
- yö: klo 20:00 – 4:00 (22:00 – 6:00)

### 7.2 Seuraavien tapahtuma-aikojen laskenta

Ennen varsinaista simulaatio-osuutta kullekin solulle arvotaan seuraavan tehtävän ajankohta. Odotusarvodata on jaettu erikseen päivä- ja yöodotusarvoihin. Tämä johtuu siitä, että päivisin tapahtumatiheys on suurempi kuin yöllä. Näin ollen päiväajoille ja yöajoille arvotaan molemmille erikseen omat seuraavien tehtävien ajankohdat, jotka saadaan eksponenttijakaumasta. Eksponenttijakauman parametri on seuraavan tapahtuma-ajan odotusarvo, joka saadaan jakamalla vuoden pituus tehtävien määrän odotusarvolla. Eksponenttijakaumasta saadut luvut täytyy tietysti myös muuntaa oikeiksi kellonajoiksi.

Jako päivän ja yön välillä on tehtävien odotusarvodatan yhteydessä tehty seuraavasti:

- yö: klo 22:00 – 8:00
- päivä: klo 8:00 – 22:00

### 7.3 Simulaation kulku

Simulaatio alustetaan asettamalla aika nolnaan. Ajan yksikkönä käytetään minuuttia. Nollahetkeksi valitaan klo 22, koska se on yön alkuhetki (tehtävien odotusarvodatan yhteydessä) ja tällä tavoin muunnokset on helpompi laskea. Simulaatiossa tammikuun oletetaan alkavan nollahetkellä ja kuukaudet vaihtuvat 30,41 vuorokauden välein ( $365/12$ ). Malli ei siis tässä suhteessa vastaa täysin todellisuutta, mutta asian vaikutus tuloksiin on mitätön. Simulaatiota ajetaan, kunnes aika ylittää vuoden. Ensimmäisenä tutkitaan, missä solussa tapahtuu seuraava tehtävä. Tämä tapahtuu etsimällä seuraavien tapahtuma-aikojen minimi. Solu otetaan muistiin ja aika päivitetään tapahtumahetkeen. Muistiin merkitään myös, onko kyseessä yö- vai päivätehtävä.

Seuraavaksi selvitetään, mikä tukikohta on lähimpänä. Lasketaan tukikohtien etäisyydet solusta ja etsitään minimi. Lähimmän tukikohdan helikopteri ei kuitenkaan välttämättä ole käytettävissä. Helikopterin käytettävissä olo tutkitaan tarkastamalla, onko aika ylittänyt ajan, jolloin helikopteri on seuraavan kerran

käytettävissä. Jos lähimmän tukikohdan helikopteri ei ole käytettävissä, etsitään toiseksi lähin tukikohta, ja jos senkään helikopteri ei ole käytettävissä, kolmanneksi lähin jne. Jos mikään helikopteri ei ole käytettävissä, solun ja tukikohdan välinen etäisyys asetetaan äärettömäksi.

Lämpötilalle ja paineelle kussakin solussa on annettu keskilämpötilat ja keskihajonnat erikseen aamulle, päivälle ja yölle kuukausittain. Tehtävän tapahtumishetkellä solulle arvotaan lämpötila ja paine normaalijakaumasta. Tätä varten täytyy selvittää kellonaika ja kuukausi. Näitä säätietoja käytetään helikopterin suorituskyvyn laskennassa.

Seuraavaksi simulaatio kutsuu suorituskykymallia antaen parametreiksi tehtävään käytettävän helikopterin tyyppiin, konfiguraation, lämpötilan, paineen ja korkeuden solussa. Suorituskykymalli laskee helikopterille nopeuden ja kantaman. Lentoaika saadaan jakamalla tukikohdan etäisyys soluun helikopterin nopeudella. Saavuttamisaika on lentoonlähtöön kuluvan ajan, lentoajan ja etsintään ja laskeutumiseen käytettävän ajan summa. Jos saavuttamisaika on suurempi kuin annettu yläraja, tehtävä jää suorittamatta, mikä kirjataan muistiin. Jos mikään helikopteri ei ollut käytettävissä tehtävää varten, ”solun ja tukikohdan väliseksi etäisyydeksi” jäi luku ääretön. Näin saavuttamisajan ylärajoite huomioi tehtävän suorittamattomaksi myös silloin, kun mikään helikopteri ei ole käytettävissä. Jos saavuttamisaika on pienempi kuin annettu alaraja, tehtävä suoritetaan autolla. Tällöin tehtävä kirjataan suoritetuksi ja helikopterin oletetaan olevan poissa käytöstä tietyn vakioajan, joka lääkäriellä kestää hoitoreissulla. Myös saavuttamisajat kirjataan muistiin. Autolla suoritettujen tehtävien tapauksessa saavuttamisajaksi kirjataan annettu vakio.

Jos laskettu saavuttamisaika ei ole liian suuri tai pieni, tarkastellaan vielä, onko solu niin lähellä sairaalaa, että potilas voidaan kuljettaa sairaalaan merkittävästi nopeammin ambulanssilla, kuin että lääkärihelikopteri toisi lääkäriin paikalle. Lasketaan sairaaloiden etäisyydet solusta ja etsitään niistä pienin. Jos etäisyys lähimpään sairaalaan on pienempi kuin annettu alaraja, tehtävä jää hoidettavaksi pelkästään ambulanssilla. Tällöin tehtävää ei lasketa suoritetuksi eikä suorittamattomaksi, koska suorittamisvastuu on muulla taholla.

Jos solu ei ole lähellä sairaalaa, helikopteri suorittaa tehtävän, mikä kirjataan muistiin, kuten myös saavuttamisaika. Tietyissä osassa tehtävistä potilas joudutaan viemään sairaalaan. Generoidaan satunnaisluku nollan ja ykkösen väliltä. Jos tämä luku on annettua todennäköisyysvakiota pienempi, potilas joudutaan viemään sairaalaan. Sairaalaan vienti ei kuitenkaan ole mahdollista, jos helikopterin kantama ei riitä. Tätä tarkastelua varten lasketaan sairaalan etäisyys tukikohdasta, jolloin saadaan laskettua kokonaislentomatka. Jos kantama riittää, paluuaikaan tulee lentämiseen kuluvan ajan lisäksi kaksi lentoonlähtöä ja laskeutumista, sekä sairaalassa kuluva-aika. Jos kantama ei riitä, potilasta ei voida kuljettaa sairaalaan, mikä merkitään tulosmatriisiin. Tällöin helikopterin paluu tapahtuu suoraa reittiä takaisin tukikohtaan. Tehtävän suorittamiseen kestävä kokonaisaika on saavuttamisaika, potilaan hoitoon kuluva aika ja paluuaika yhteenlaskettuna. Kun tähän lisätään aika, jonka helikopterin valmistelu uutta tehtävää varten kestää, voidaan laskea aika, jolloin helikopteri on seuraavan kerran käytettävissä.

Lopuksi on vielä arvottava solulle seuraavan tehtävän ajankohta joko yölle tai päivälle riippuen siitä, kumpana edellä suoritettu tehtävä tapahtui. Tämä tapahtuu samalla tavalla eksponenttifunktion ja aikamuunnoksen avulla kuin alustuksessa.

Kun silmukka on suoritettu niin monta kertaa, että vuosi on kulunut, lasketaan vielä suorittamattomien tehtävien prosentuaalinen osuus kaikista tehtävistä ja saavuttamisaikojen keskiarvo.

## 8 Suoritusarvojen mallinnus

### 8.1 Taustaa

Tutkimuksen lähtökohdaksi valittiin helikopterin kyky suoriutua kategoria A mukaisesta VTOL (Vertical Take-Off and Landing) – menetelmästä[3], jossa helikopterien pitää pystyä suorittamaan nousu ja laskeutuminen pystysuoraan toisen moottorin rikkoutumisesta/tehon menetyksestä huolimatta. Kategoria A rajoittaa mahdolliset helikopterityypit kaksimoottorisiin. Tämän lisäksi vaatimuksien täyttäminen voi vaatia helikopterien lentoonlätöpainojen rajoittamista.

Vaatus on lähtöisin matkustajaliikenteelle määritetyistä turvallisuusnormeista. Lääkäri- ja lääkintähelikopteritoiminnan voidaan katsoa olevan vielä kriittisempää, koska matkustajan statuksella oleva hoitohenkilöstö käytännössä päättää toisen matkustajan (potilas) kyytiin ottamisesta. Näin ollen potilas voidaan saattaa helikopterin matkustajaksi ilman hänen omaa suostumustaan. Suomen ilmailuviranomainen on toistaiseksi edellyttänyt aiemmin mainittua suorituskykyä sekä tilapäisillä HEMS operointipaikoilla että sairaaloiden helikopterikentillä. HEMS operointipaikoilla käytettävät lentoonläh- ja laskeutumisprofiilit ovat poikkeuksetta hitaita ja jyrkkiä, joka korostuu etenkin yöllä toimittaessa, on kysymys matkustajien turvallisuudesta; sekä hoitohenkilöstön työturvallisuudesta että potilasturvallisuudesta. Koska palvelua tarjotaan 7/24 eikä tehtäväpaikka ole ennakolta tiedossa, on perusteltua edellyttää toiminnalta korkeaa turvallisuustasoa.

Helikoptereiden käsikirjoista löytyy taulukoita, joista voidaan määrittää sen hetkinen maksimi lentoonlätöpaino, jolla suoritusarvovaatimukset täyttyvät. Maksimipainot riippuvat ulkoisten olosuhteiden osalta pääsääntöisesti kahdesta määräävästä arvosta, lentopaikan ilmanpaineesta ja lämpötilasta. Ohuemmassa ilmassa roottorin aikaansaama nostovoima heikkenee ja korkeammassa lämpötilassa moottorin maksimiteho laskee. Kun olosuhteet ovat suotuisia ja ulkoisten olosuhteiden osalta suoritusarvot eivät rajoita lentoonlätömassaa, tulee vastaan jokin muu rakenteellinen rajoitus, jonka perusteella helikopterin lentoonlätömassa on rajoitettu.

### 8.2 Painot

Helikopterin valmistuessa tehtaalta, sen painoa kutsutaan tyhjämassaksi (Empty weight). Kun tähän lisätään tehtävässä tarvittava varustus, eli lääkärihelikopteritoiminnassa tarvittavat varusteet, kuten parit, lääkärien istuimet ja lääkintähappijärjestelmät saadaan perustyhjämassa (Basic Empty Weight). Seuraavaksi massaan lisätään lentäjien, lentoavustajan, lääkärin ja potilaan painot. Saadaan kuivaoperointimassa (Dry Operating Mass). Helikopteri on siis kuormattu valmiiksi toimintaa varten, enää tarvitsee lisätä tarvittava polttoaine, jolloin saadaan operointimassa (Operating Mass).

Perusoletus on, että helikopterin miehistöön kuuluvat: kaksi ohjaamomiehistön jäsentä (lentäjä ja lentoavustaja tai kaksi lentäjää) ja lääkäri. Miehistönjäsenen painona voidaan käyttää viranomaisen hyväksymää standardipainoa 86 kg. Matkustajan, eli tässä tapauksessa potilaan laskennallisena painona käytetään 100kg. Toinen tutkittava vaihtoehto eroaa perusmallista sillä, että hoitohenkilöstöä on yhden sijasta kaksi. Kolmas vaihtoehto on painavin ja siinä otetaan huomioon mahdollisuus kahden potilaan kuljettamiseen. Eri miehistön kokoonpanoja kutsutaan tässä dokumentissa konfiguraatioiksi.

Taulukko 1: Helikopterin miehistön mahdolliset kokoonpanot

Konfiguraatio	Miehistöä	Potilaita	Massa
1	3	1	$3 \cdot 86\text{kg} + 100\text{kg} = 338\text{kg}$
2	4	1	$4 \cdot 86\text{kg} + 100\text{kg} = 444\text{kg}$
3	4	2	$4 \cdot 86\text{kg} + 2 \cdot 100\text{kg} = 544\text{kg}$

### 8.3 Polttoaine

Helikopterien polttoainemääriä käsitellään painomitoissa. Näin painolaskelmien teko helpottuu. Säiliöissä olevaa polttoainetta mitataan kiloissa ja polttoaineen kulutusta kilogrammoina tunnissa. Jotta polttoaineen riittävyys saadaan varmistettua, on kaikkien ilma-alusten minimipolttoainemääristä tarkat määräykset. HEMS- toiminnassa olevat helikopterit noudattavat JAR-OPS 3 sääntöjä. Sääntöjen mukaan lennolle vaadittava minimipolttoainemäärä on: rullaus (ml. käynnistys) polttoaine, reitin lentämiseen kuuluva reittipolttoaine, reittivarapolttoaine, jonka on oltava vähintään 10 % reittipolttoaineesta sekä loppuvarapolttoaine, jota on oltava vähintään 30min lentoaikaa varten. Mittarilentotoiminnassa vaaditaan lisäksi myös polttoaine suunnitellulle varakentälle lentämistä varten. Näin ollen, jos polttoainemäärä ja kulutus tunnetaan, voidaan pisin tehtävässä käytettävä lentoaika määrittää:

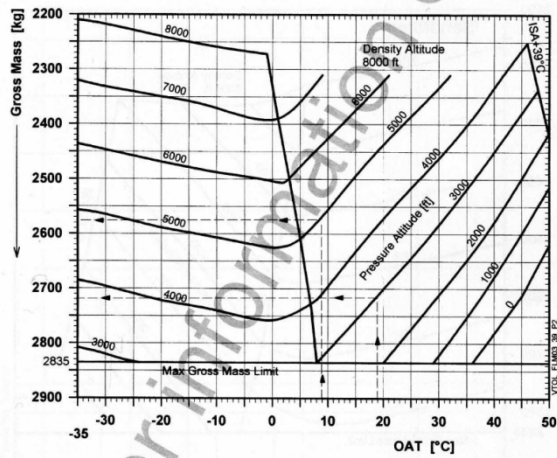
$$\text{lentoaika} = \frac{\text{polttoaineen määrä}}{\text{polttoaineen kulutus} \cdot 1.1} - 30 \text{ min} \quad (1)$$

Suoritusarvotarkastelulla on tarkoitus selvittää pystyykö helikopteri suorittamaan sillä määrätyn lentotehtävän. Kuivaoperointimassa on vakio ja sääolosuhteet sekä sitä vastaava valmistajatehtaan määrittämä maksimilentopaino määrittävät maksimi lentoonlähtöpainon. Näiden erotuksena saadaan mahdollisen mukaan saatavan polttoaineen määrä kilogrammoina. Laskennallisesti tehtävän suoritettavuus selvitetään laskemalla kuinka pitkälle helikopteri pystyisi lentämään suurimmalla mukaan saatavalla polttoainemäärällä. Tämä saadaan lasketuksi vähentämällä olosuhteiden mukaisten suoritusarvojen rajoittamasta maksimi lentoonlähtöpainosta helikopterin kuivaoperointimassa. Käytettävissä oleva lentoaika saadaan laskettua kaavalla (1) ja kun helikopterin lentonopeus tunnetaan, saadaan selvitettyä, riittääkö helikopterin kantama tehtäväpaikalle ja takaisin, sekä maksimi toimintamatkä tukikohdasta operointialueelle.

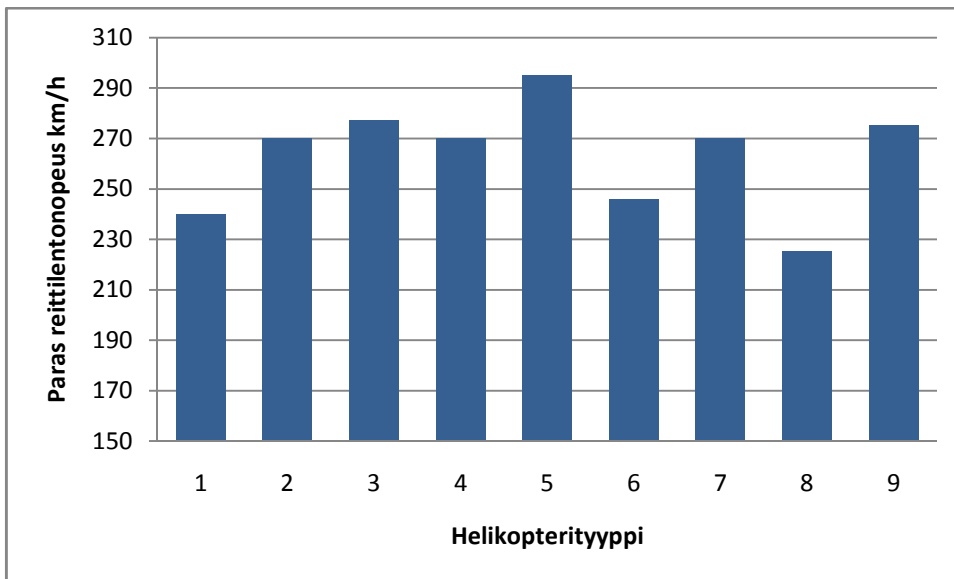
### 8.4 Laskenta

Helikoptereiden suoritusarvodataa ei ollut saatavilla valmiiksi matemaattisessa muodossa, joten ne piti määrittää suoritusarvokäyrästä. Käytännössä tämä toteutettiin katsomalla käyrästä riittävä määrä lämpötila painekorkeus pareja ja niitä vastaavia maksimi lentoonlähtömassoja. Näihin pisteisiin sovitettiin paloittain lineaarinen tai neliöllinen funktio, jolla pystyy suoraan selvittämään helikopterin suorituskyvyn eri olosuhteissa. Suorituskyvyn ja maksimilentomatkojen laskemiseksi tarvittiin myös muuta dataa. Helikoptereiden perustyhjämassat, polttoainekulutukset, reittilentonopeudet ja maksimi polttoainekuormat saatiin kaikista tutkittavista helikopterityypeistä. Reittilentonopeudet ja polttoaineenkulutukset riippuvat todellisuudessa olosuhteista, mutta koska erot ovat muutaman prosentin luokkaa ja vaikutus kaikilla tyypeillä on samansuuntainen, on ne voitu arvioida vakioiksi.

**MAXIMUM TAKEOFF AND LANDING GROSS MASS, CATEGORY A (VTOL)**  
 1 X PRATT & WHITNEY PW 206 B2  
 (CAT A-MODE ACTIVATED BELOW 55 KIAS)



Kuva 4: Esimerkki helikopterin suoritusarvokäyrästä, CAT A VTOL

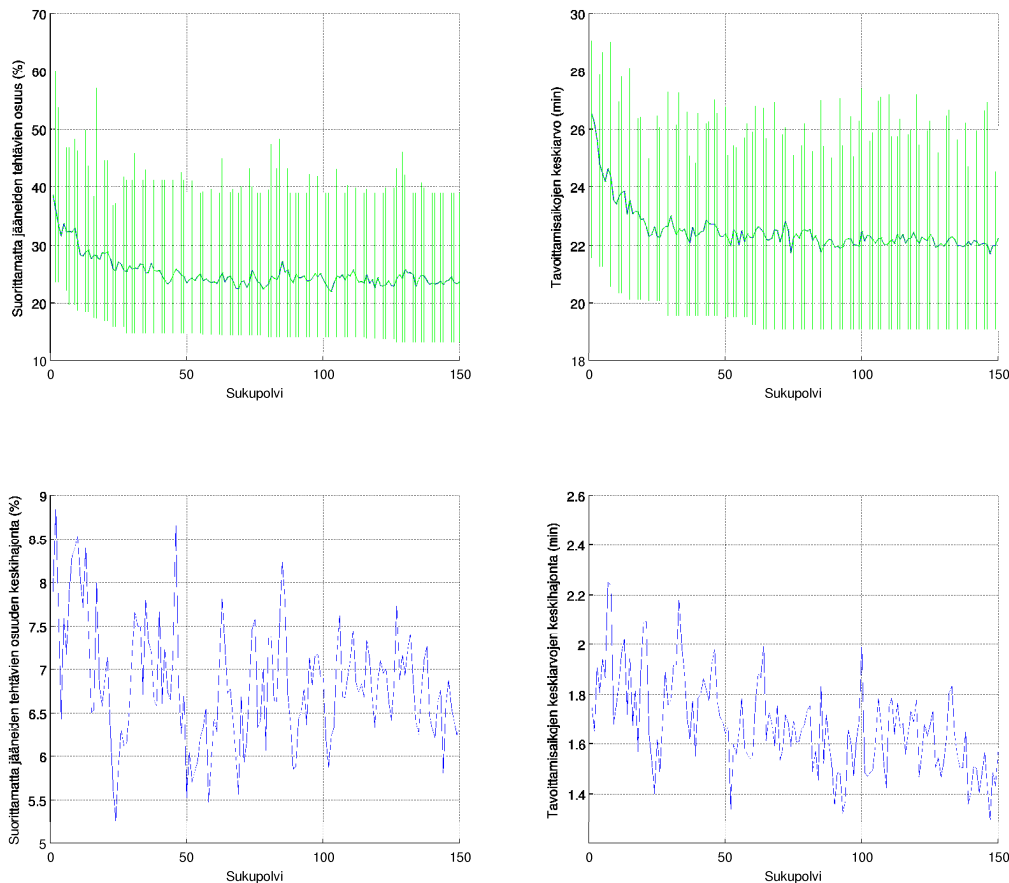


Kuva 5: helikoptertyyppien parhaat reittilentonopeudet

## 9 Tulokset

Lopullisissa laskennoissa käytettiin hakualgoritmin populaation minimikokona pääosin arvoa 30 ja sukupolvien määränä pääosin arvoa 150. Laskenta suoritettiin rinnakkaislaskentana Teknillisen korkeakoulun päärakennuksen luokan U122 tietokoneilla, joissa oli Intel Core 2 Quad Q9400 @ 2.66 GHz prosessorit. Yksi simulaatio näillä koneilla kesti noin 3.5 sekuntia ja yksi kokonainen hakuajo noin neljä tuntia. Yksi hakuajo kävi läpi noin 3000–4000 eri tukikohta- ja helikopterityyppien yhdistelmää.

Hakualgoritmin eteneminen on esitetty kuvassa 7. Kuvasta näkyy erikseen ratkaisut kummankin tavoitteen suhteen, joten se ei kuvaa hakualgoritmin etenemistä kompromissiratkaisujen osalta, mutta niidenkin voidaan olettaa etenevän jotakuinkin samaa tahtia. Nähdään, että sukupolven 50–100 vaiheilla haku on jo melkein vakiintunut ja vain pieniä parannuksia tapahtuu sen jälkeen. Hyvyyssarvojen keskihajonta löydettyjen pareto-optimaalisten ratkaisujen kasvaessa hieman laskee, mutta pysyy kuitenkin melko korkeana, kuten tarkoituksena, jotta juuttuminen lokaaleihin optimeihin vältettäisiin.



Kuva 6: Hakualgoritmin eteneminen tavoitteiden suhteen sukupolven funktiona. Ylemmissä kuvissa vihreillä pystyviivoilla populaation hyvyyssarvojen vaihteluväli ja sinisellä viivalla näiden keskiarvo. Alemmissä kuvissa hyvyyssarvojen keskihajonta.

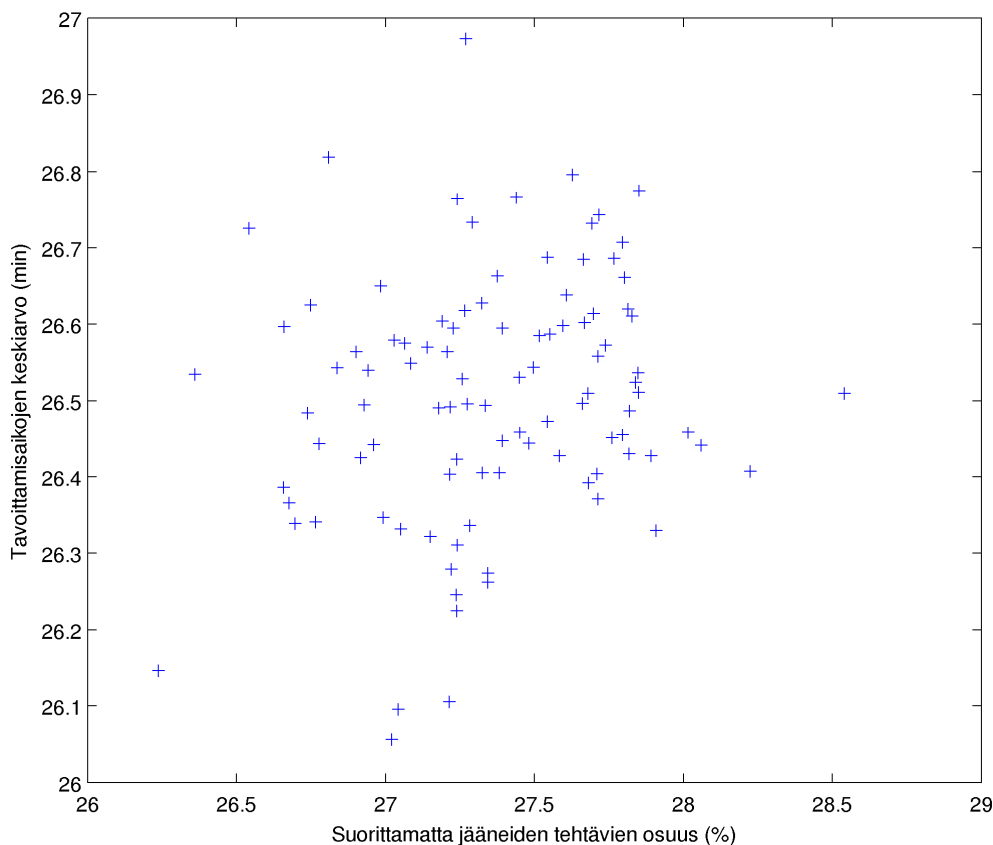


## 9.1 Tulosten herkkyys satunnaisuudelle

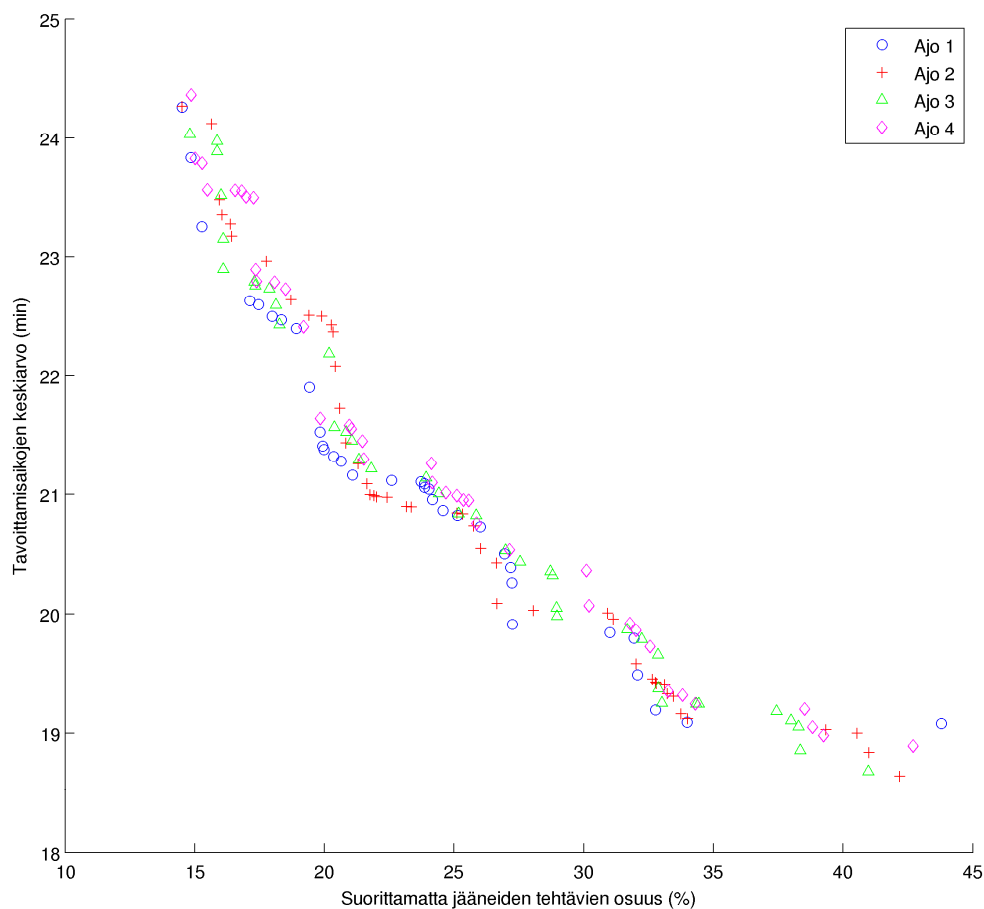
Sekä yksittäinen simulaatio että hakualgoritmi olivat luonteeltaan stokastisia ja jokaisen ajokerran tulos siten hieman erilainen. Suuresta laskenta-ajasta johtuen ei ollut mahdollista tehdä useita toistoja, joista olisi ottanut keskiarvot lopulliseksi tulokseksi, vaan tyydyimme tutkimaan satunnaisuuden vaikutusta tulosten hajontaan ja vaikutusta johtopäätöksiin.

Kuussa 8 ja 9 on esitetty useiden eri simulaatioiden ja hakuajojen tulosten hajonta. Simulaation hajontaa voidaan verrata esimerkiksi hakualgoritmin hajontakuvaan ja todeta, että sillä on jotain vaikutusta yksittäisten samankaltaisten ratkaisujen välisen paremmuuden suhteen, mutta tarkastelemalla jäljemmin esitettäviä vertailukuvaajia voidaan todeta, että suurempiin periaatteellisiin johtopäätöksiin sillä ei ole vaikutusta. Tavoitteena ei ole ollut löytää yhtä parasta ratkaisua, vaan tutkia mitä yhteistä parhailla ratkaisuilla on ja näihin johtopäätöksiin simulaation hajonnalla on vähäinen vaikutus.

Hakualgoritmin hajonta on hyvin vähäinen. Pareto-optimaalisten ratkaisujen joukkojen hienoiset erot saattavat johtua suurelta osin simulaation hajonnasta. Eri ajoilla hakualgoritmi on löytänyt hieman vaihtelevalla tiheydellä ratkaisuja paretopinnalta, mutta kummankin tavoitteen ääriarvot ovat eri ajoilla hyvin lähellä toisiaan ja pistejoukon muoto on hyvin samanlainen.



Kuva 7: Sadan eri nykytilanteen simulaation tulokset tavoitemittarien avaruudessa

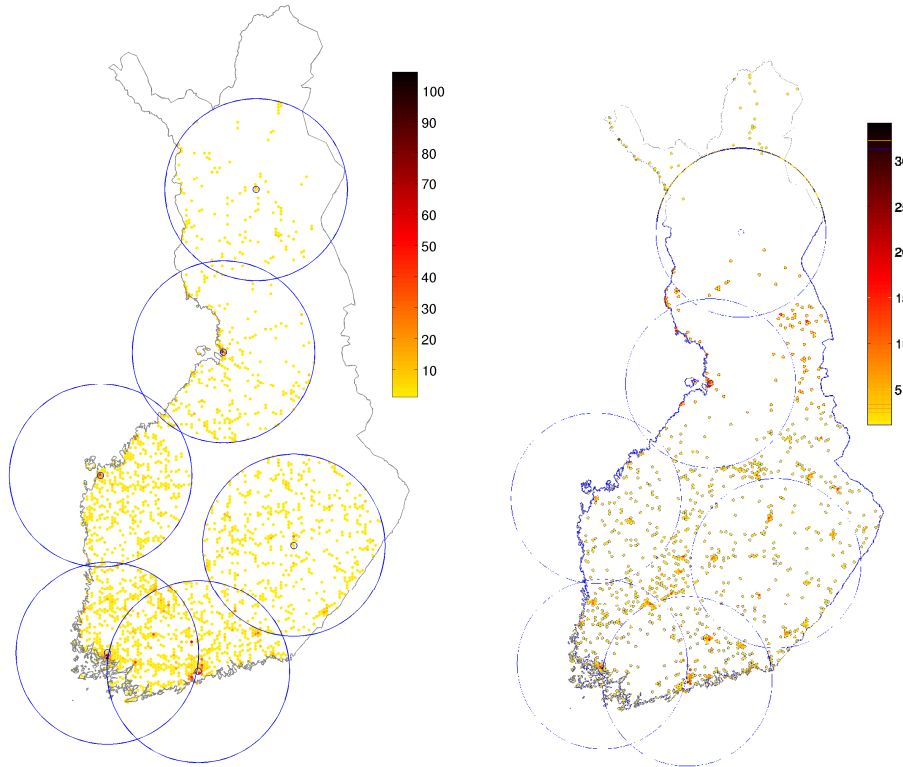


Kuva 8: Neljän samoilla parametreilla tehdyn eri hakuajon pareto-optimaalisten ratkaisujen joukot

## 9.2 Nykytilanne

Nykyisin tukikohtia on kuusi ja ne sijaitsevat Helsinki-Vantaalla, Joroisissa, Vaasassa, Turussa, Oulussa ja Sodankylässä. Kuvassa 10 on esitetty nykytilanteen tukikohtilla ja helikopterityypeillä simuloitujen suoritettujen ja suorittamattomien tehtävien maantieteellinen jakautuminen. Tehtävien osalta mielenkiintoista on tarkastella suorittamattomien tehtävien sijaintia ja sitä kuinka suuri osa niistä johtuu sijainnista helikopterien kantama-alueiden ulkopuolella ja kuinka suuri osa päällekkäistehtävistä tiheään asutuilla alueilla helikopterien kantama-alueiden sisäpuolella. Näin voidaan arvioida tulisiko palvelutasoa parantaakseen parantaa alueellista kattavuutta vai sijoittaa tukikohtia tiheämmin tiheään asutuille alueille, tai helikopterityyppien kannalta, kannattaisiko käyttää helikoptereita joilla voidaan lentää kauas vai helikoptereita, joilla voidaan lentää nopeasti lähelle.

Kuvista nähdään että suorittamattomia tehtäviä on erityisen paljon kantama-alueiden välissä Keski-Suomessa sekä kantama-alueiden sisällä Pääkaupunkiseudun, Lahden, Turun ja Tampereen alueilla. Suorittamattomista tehtävistä yhteensä 68 % sijaitsee kantama-alueiden sisällä ja 32 % ulkopuolella.

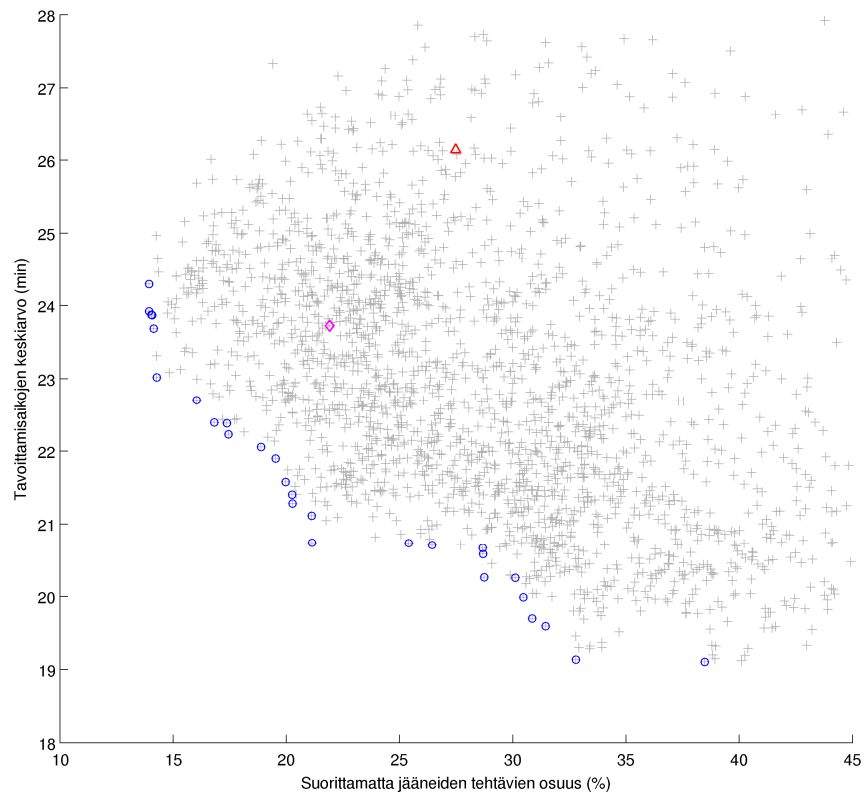


Kuva 9: Suoritettujen (vasemmalla) ja suorittamatta jääneiden (oikealla) tehtävien simuloitu maantieteellinen jakautuminen nykytilanteessa (kappaletta vuodessa per hilan solu)

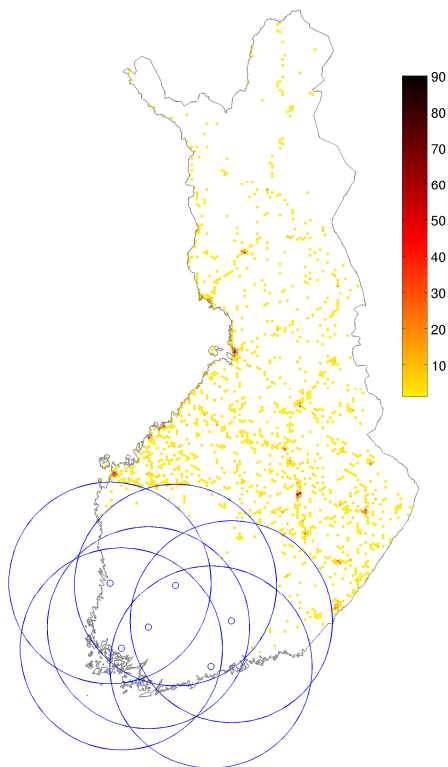
### 9.3 Tukikohta-kombinaatioiden tarkastelu

Hankkeen yksi tavoite on selvittää, mihin päin Suomea helikopteritukikohdat kannattaa sijoittaa. Tarkastellaan, mitä tukikohtia simulaatiossa saatiin pareto-optimaalisiin kombinaatioihin tulla, kun tukikohtien määräksi asetetaan kuusi ja käytetään konfiguraatiota 1. Nämä valinnat tehdään siksi, että nykyään Suomessa on käytössä kuusi tukikohtaa ja konfiguraatio on useimpien helikoptereiden kohdalla 1, mutta sama tarkastelu voitaisiin yhtä hyvin tehdä muillakin tukikohta määrillä ja konfiguraatioilla. Tässä tarkastelussa ei keskitytä siihen, mitä helikopterityyppejä tukikohtiin tulee, joten otetaan rajoitukseksi, että helikopterityyppi on jokaisessa tukikohdassa sama.

Simulaatiosta saatu pareto-optimaalinen pinta on esitetty kuvassa 11.

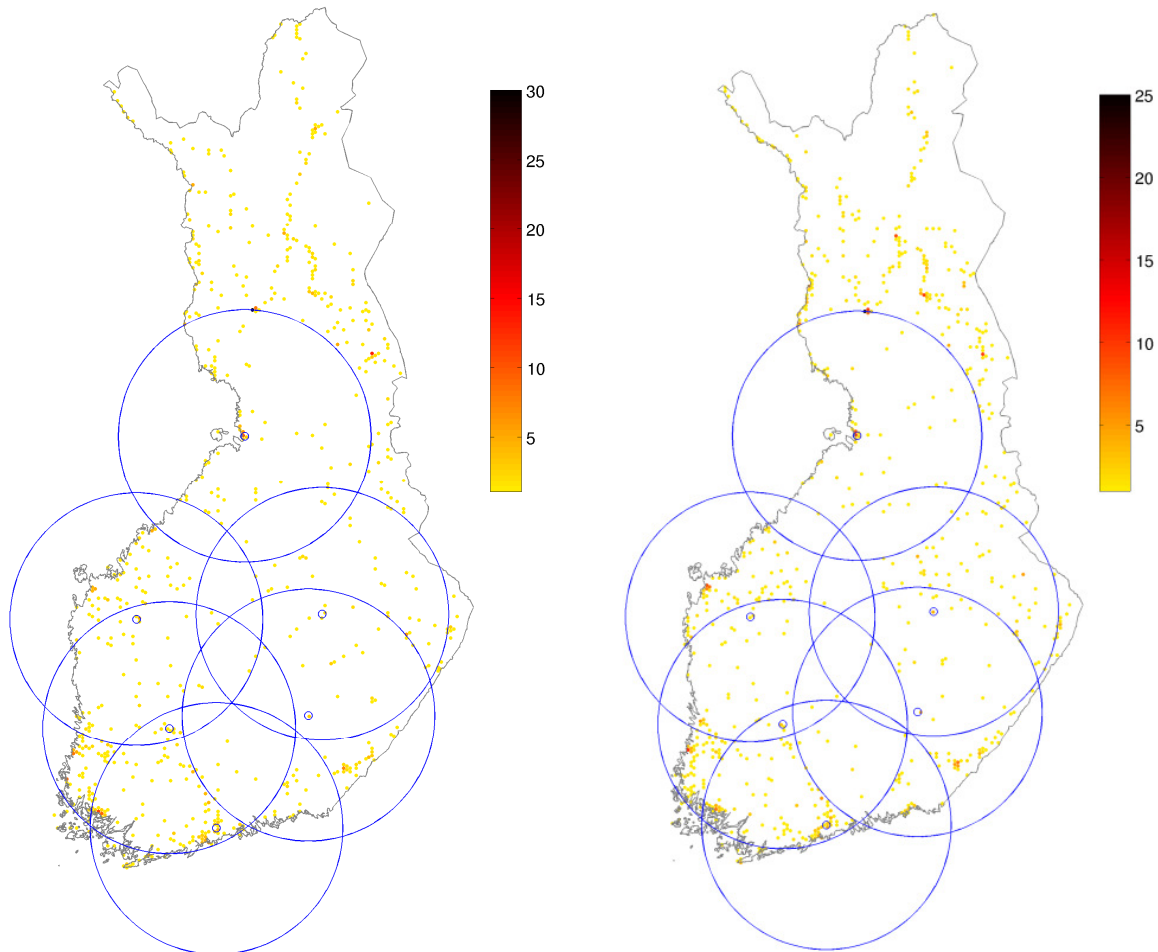


Kuva 10: Pareto-pinta (6 tukikohtaa; konfiguraatio 1; jokaisessa tukikohdassa sama helikopteri), violetti timantti kuvaa kombinaatiota yliopistolliset sairaalat + Sodankylä, kolmio kuvaa nykytilannetta

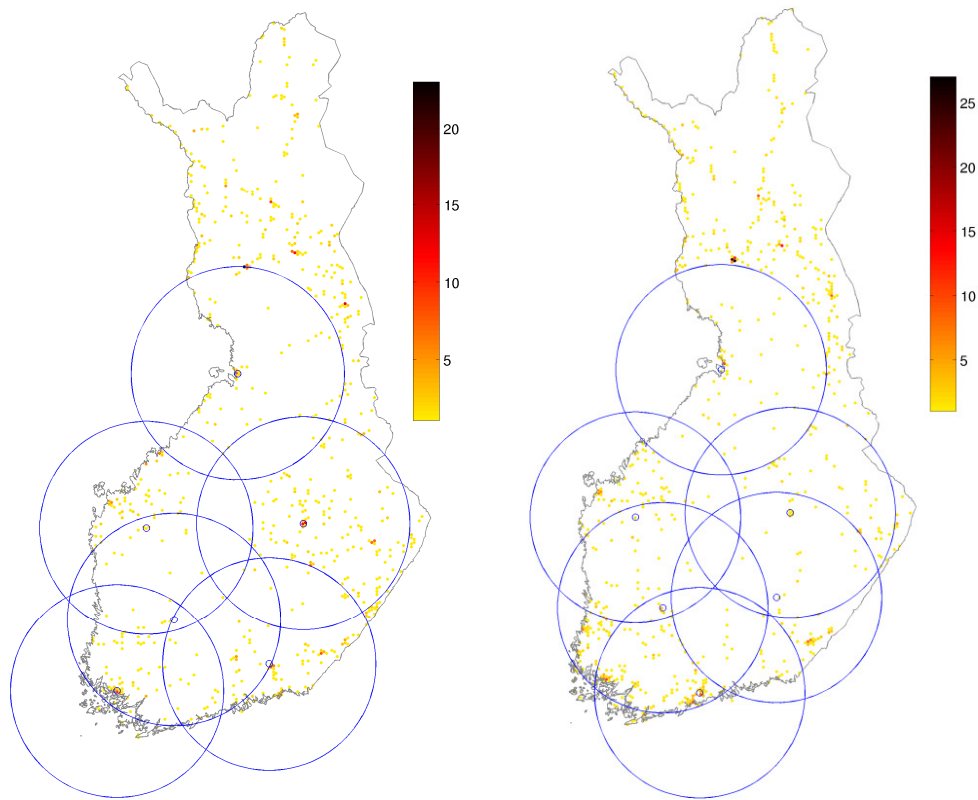


Kuva 11: Paras kombinaatio tavoittamisaikojen suhteen

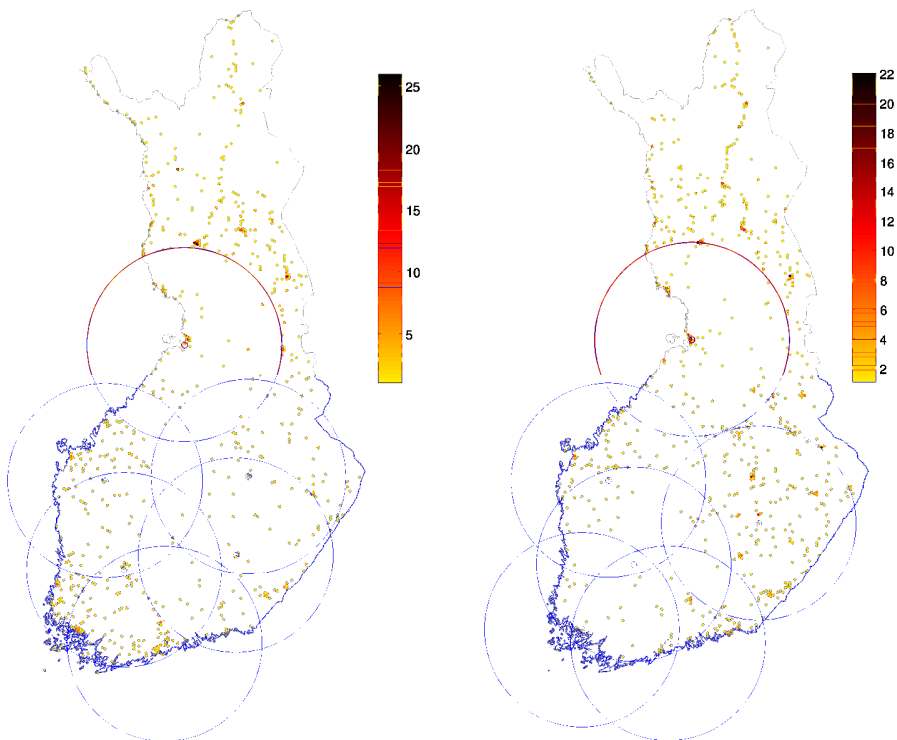
Kuvasta 12 nähdään, etteivät ne ratkaisut, joissa tavoittamisajat ovat pienimpiä ole toteuttamiskelpoisia. Näin ollen voidaan vetää johtopäätös, että kiinnostavat pareto-optimaaliset ratkaisut ovat niitä, joissa suorittamatta jääneiden tehtävien osuus on pieni. Tarkastellaan, millaisia ovat ne pareto-optimaaliset ratkaisut, joille suorittamatta jääneiden tehtävien osuus on alle 15 prosenttia (Kuvat 13-15).



Kuva 12 Tukikotien sijainnit kartalla pareto-ratkaisuissa 1 ja 2 (6 tukikohtaa; konfiguraatio 1; jokaisessa tukikohtassa sama helikopteri)



Kuva 13 Tukikotien sijainnit kartalla pareto-ratkaisuissa 3 ja 4 (6 tukikohtaa; konfiguraatio 3; jokaisessa tukikohdassa sama helikopteri)



Kuva 14 Tukikotien sijainnit kartalla pareto-ratkaisuissa 5 ja 6 (6 tukikohtaa; konfiguraatio 1; jokaisessa tukikohdassa sama helikopteri)

Kuvissa 13-15 esitetyissä pareto-optimaalisissa tukikohta-kombinaatioissa on havaittavissa tiettyjä yhtäläisyyksiä. Taulukossa 2 on esitetty, mitä tukikohtia toteuttamiskelpoisista pareto-optimaalisista ratkaisuista löytyy. Tarkastellaan niitä pareto-ratkaisuja, joissa suorittamattomien tehtävien osuus on alle 18 prosenttia.

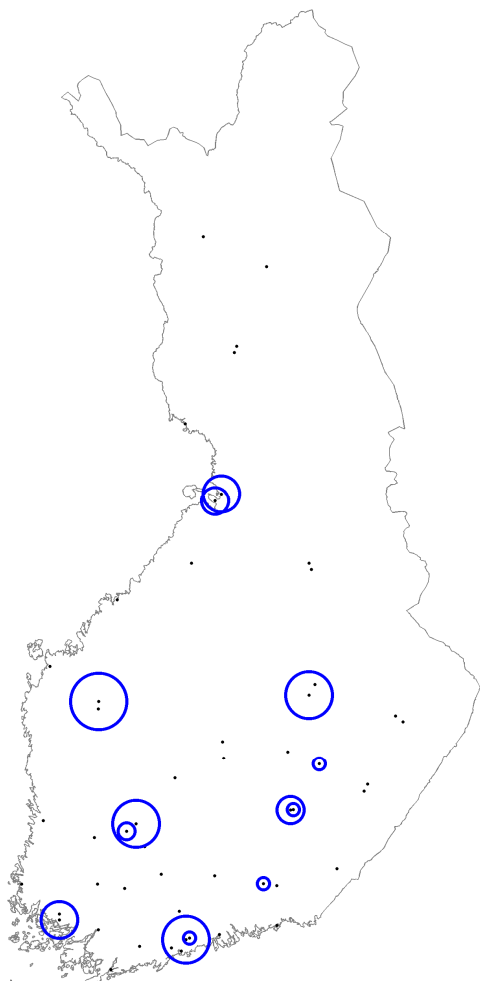
**Taulukko 2: Tukikohdat Pareto-ratkaisuissa (6 tukikohtaa; konfiguraatio 1; jokaisessa tukikohdassa sama helikopteri)**

Pareto-ratkaisu	Tukikohdat					
1.	TAYS	KYS	Mikkelin KS	Peijas	OYS	Seinäjoen KS
2.	TAYS	KYS	OYS	Mikkeli	HKI-Vantaa	Seinäjoen KS
3.	TAYS	KYS	Kuusankoski	TYKS	OYS	Seinäjoen KS
4.	TAYS	KYS	Oulunsalo	Mikkeli	HKI-Vantaa	Seinäjoen KS
5.	Pirkkala	KYS	Oulunsalo	Mikkeli	HKI-Vantaa	Seinäjoen KS
6.	TAYS	HKI-Vantaa	Joroinen	TYKS	OYS	Seinäjoen KS
7.	TAYS	HKI-Vantaa	TYKS	KYS	OYS	Seinäjoen KS
8.	Pirkkala	HKI-Vantaa	TYKS	KYS	OYS	Seinäjoen KS
9.	TAYS	KYS	Oulunsalo	TYKS	HKI-Vantaa	Seinäjoen KS
10.	TAYS	Mikkeli	Oulunsalo	TYKS	HKI-Vantaa	Seinäjoen KS

Tutkitaan myös, kuinka monta kertaa kukin potentiaalinen tukikohta esiintyy näissä pareto-optimaalisissa kombinaatioissa (Taulukko 3).

**Taulukko 3: Tukikohtien esiintymismäärät pareto-ratkaisuissa (6 tukikohtaa; konfiguraatio 1; jokaisessa tukikohdassa sama helikopteri)**

Tukikohta	Esiintymismäärä pareto-ratkaisuissa
<b>TYKS</b>	6
<b>KYS</b>	8
<b>OYS</b>	6
<b>TAYS</b>	8
<b>Peijas</b>	1
<b>Pirkkala</b>	2
<b>Oulunsalo</b>	4
<b>HKI-Vantaa</b>	8
<b>Joroinen</b>	1
<b>Kuusankoski</b>	1
<b>Seinäjoen KS</b>	10
<b>Mikkelin KS</b>	1
<b>Mikkeli</b>	4



Kuva 15: Tukikohtien esiintyminen toteuttamiskelpoisissa pareto-optimaalisissa ratkaisuisa. Ympyrän säde kuvaa tukikohtan esiintymisosuutta.

Nähdään, että Seinäjoen Keskussairaala on mukana kaikissa kiinnostavissa pareto-ratkaisuissa, joten se on vahva ehdokas yhdeksi helikopteritukikohtaksi. Kuopion Yliopistollinen Sairaala (KYS), Tampereen Yliopistollinen Sairaala (TAYS) ja Helsinki-Vantaan lentokenttä esiintyvät myös suurimmassa osassa ratkaisuja. Oulun kahdesta mahdollisesta tukikohtapaikasta toinen on aina kussakin ratkaisussa mukana. Turkuunkin (TYKS) tulisi tukikohta yli puolissa ratkaisuisa ja Mikkeliin puolissa. Näiden tukikohtavaihtoehtojen lisäksi mukana on myös harvemmin esiintyviä tukikohtapaikkoja. Oulua pohjoisemmaksi näissä ratkaisuisa ei kuitenkaan tukikohtaa tulisi.

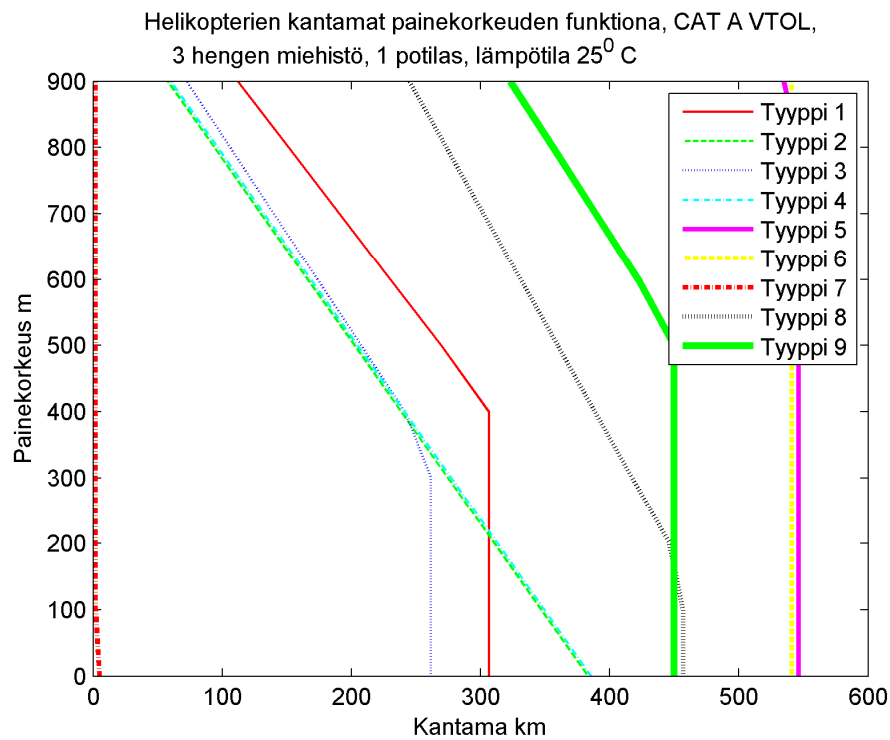
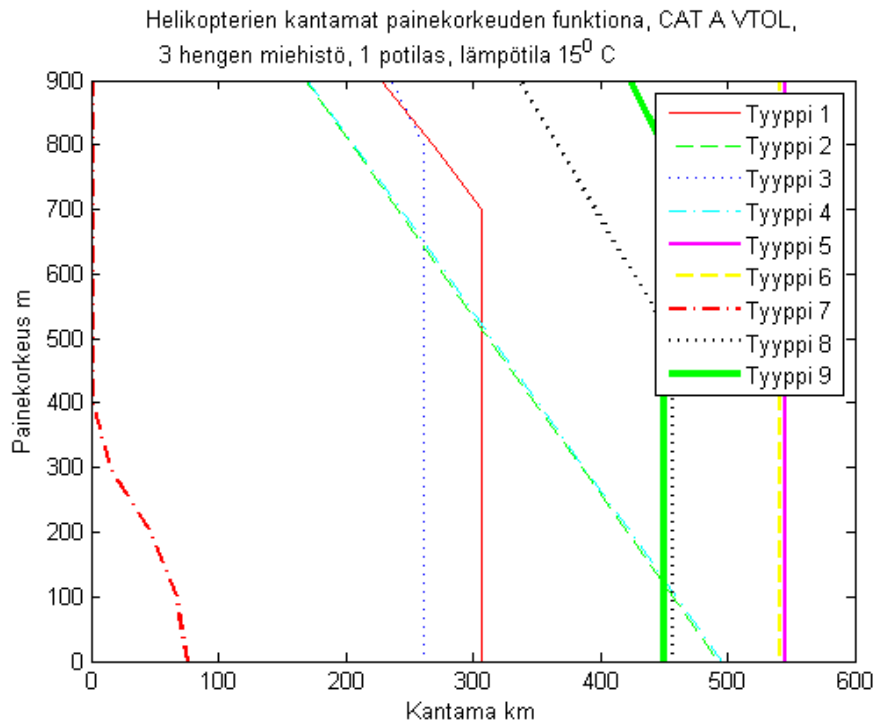
#### 9.4 Suoritusarvojen vertailua

Helikopterien saavuttavuutta voidaan tutkia selvittämällä niiden suoritusarvojen rajoittamaa lentomatkaa olosuhteiden funktiona. Kuvaajista havaitaan, että tyyppi 7 ei toteuta CAT A VTOL vaatimuksia HEMS miehistöllä ja varustuksella, sillä sen maksimi kantama korkeudesta riippumatta on 0 km. Sen sijaan tyyppi 5 käytettävissä oleva lentomatka ei HEMS toiminnassa käytettävillä kuormilla ole lainkaan riippuvainen olosuhteista.

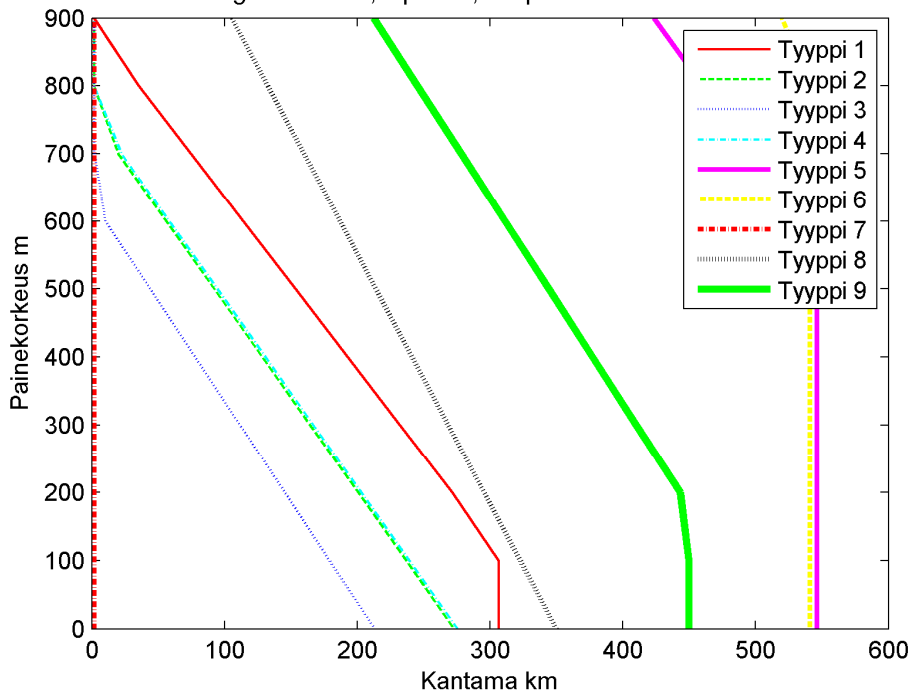
Tehtäviä simuloitaessa liikkeellelähtöaika ja kohteen etsimisaika huomioon ottaen on suurin mahdollinen lentoaika 35 min. Näin ollen nopein helikopteri, eli tyyppi 5 pystyy aikarajoitteen vuoksi suorittamaan



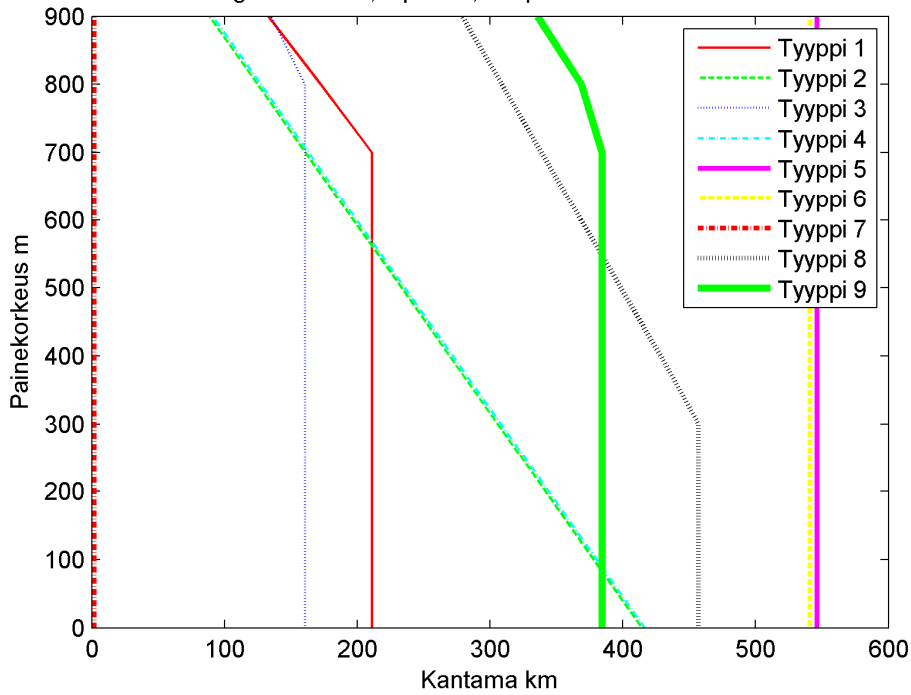
tehtäviä, joihin vaadittava kantama on 1h10min kertaa lentonopeus 295 km/h eli 344km. Siispä havaitaan, että kunhan kyseessä ei ole ääriolosuhteet, helikopterien suoritusarvot eivät juuri rajoita maksimikantamaa.



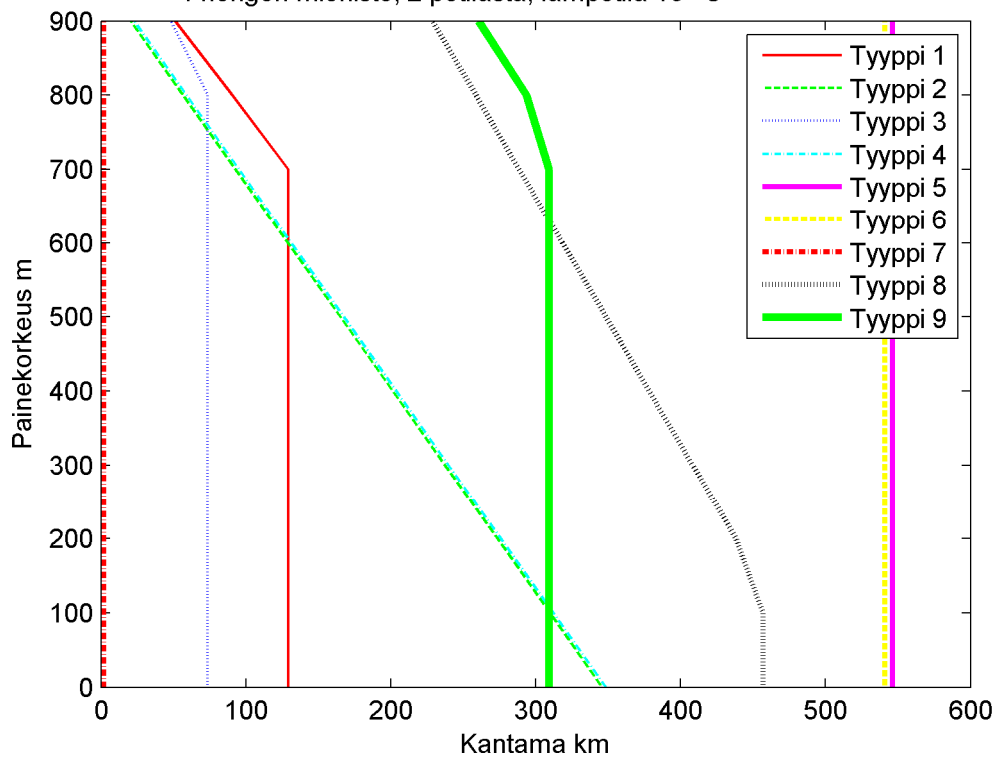
Helikopterien kantamat painekorkeuden funktiona, CAT A VTOL,  
3 hengen miehistö, 1 potilas, lämpötila 35<sup>0</sup> C



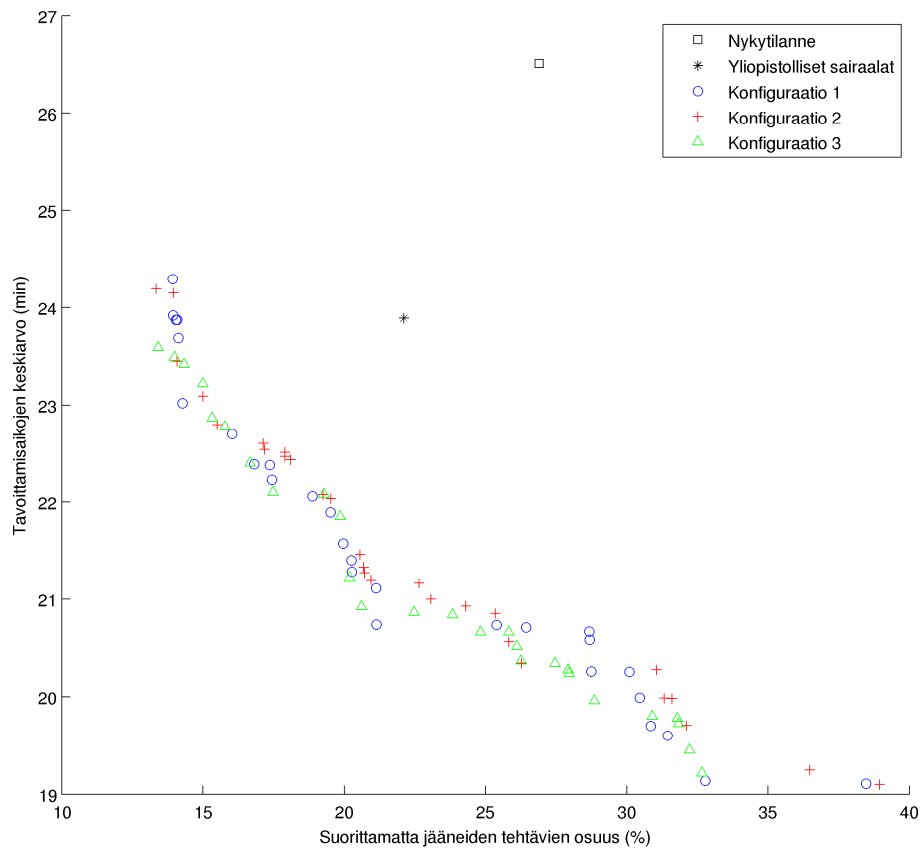
Helikopterien kantamat painekorkeuden funktiona, CAT A VTOL,  
4 hengen miehistö, 1 potilas, lämpötila 15<sup>0</sup> C



Helikopterien kantamat painekorkeuden funktiona, CAT A VTOL,  
4 hengen miehistö, 2 potilasta, lämpötila 15<sup>0</sup> C

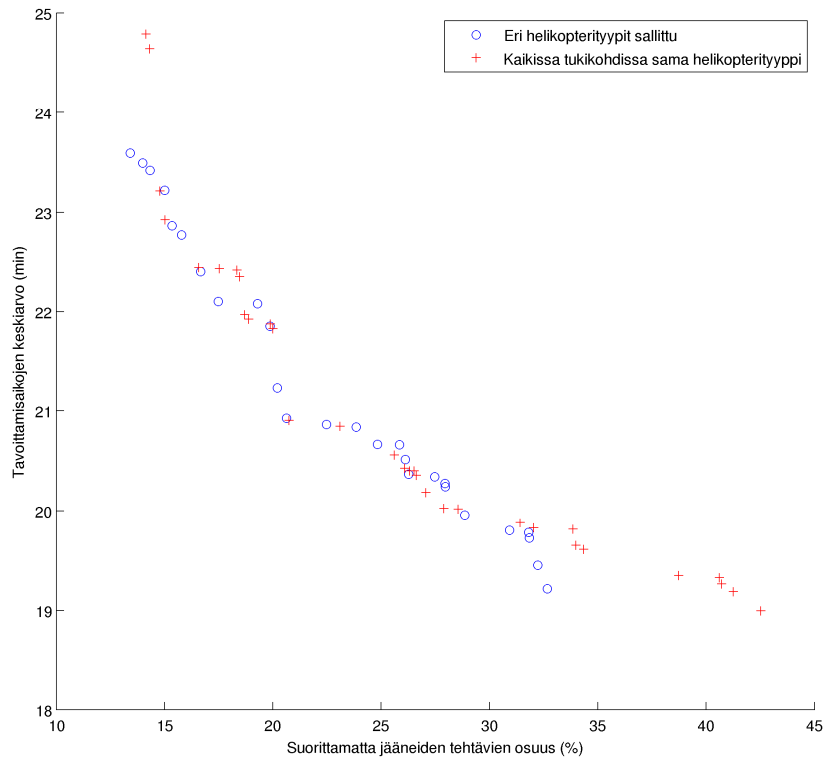


Kuva 16: Helikoptereiden kantamat eri olosuhteissa ja konfiguraatioissa



Kuva 17: Eri konfiguraatioiden vertailua

Kuvasta 18 todetaan aikaisempi havainto siitä, että hyvillä helikoptereilla helikoptereiden eri konfiguraatiot eivät vaikuta lopputulokseen.

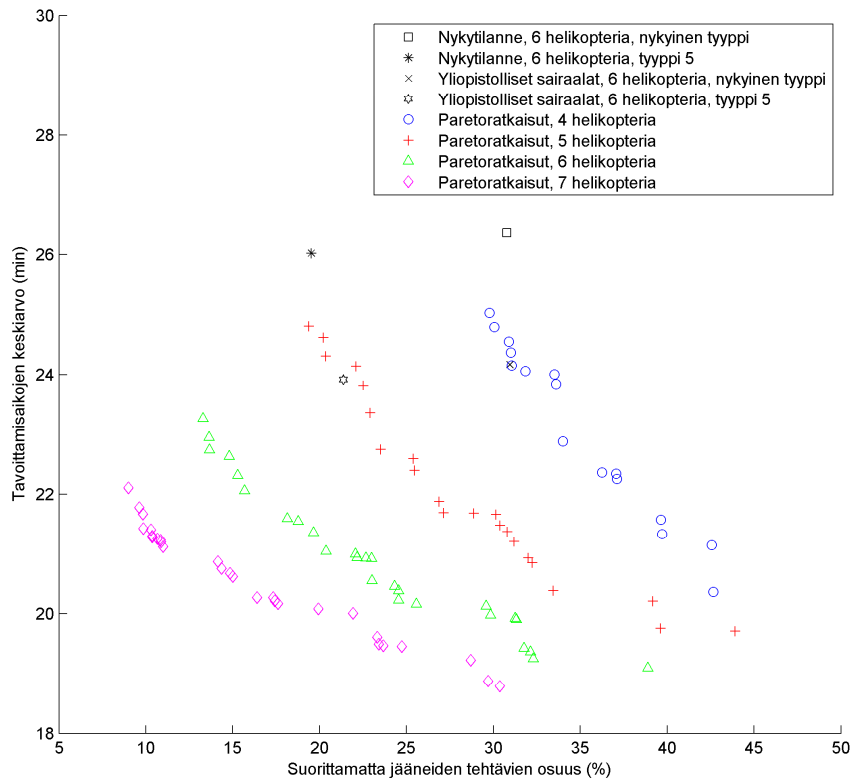


Kuva 18: Pareto-ratkaisut, kun eri helikopterityypit sallitaan ja kun ei sallita

Optimoinnin tuloksina saaduista pareto-optimaalisten tukikohtien ja helikopterien joukoista havaittiin, että lähes kaikissa helikopterityyppi oli tyyppi 5. Lähdetietoja tarkastelemalla huomattiin, että tyyppin 5 nopeus on suurin. Nopeudella on suuri merkitys, sillä suurempi nopeus mahdollistaa suuremman alueen kattamisen 45 minuutin aikana, jossa ajassa potilas on tavoitettava ja toisaalta suurempi lentonopeus lyhentää keskimääräisessä tehtävässä kuluvaa aikaa. Tutkiaksemme mikä on muiden kopterien keskinäinen paremmuus, ajettiin optimointi uudestaan siten, että tyyppi 5 ei ollut vaihtoehtona. Tästä seurasi, että seuravaksi nopein tyyppi 3 esiintyi kaikissa paitsi yhdessä paretoratkaisussa.

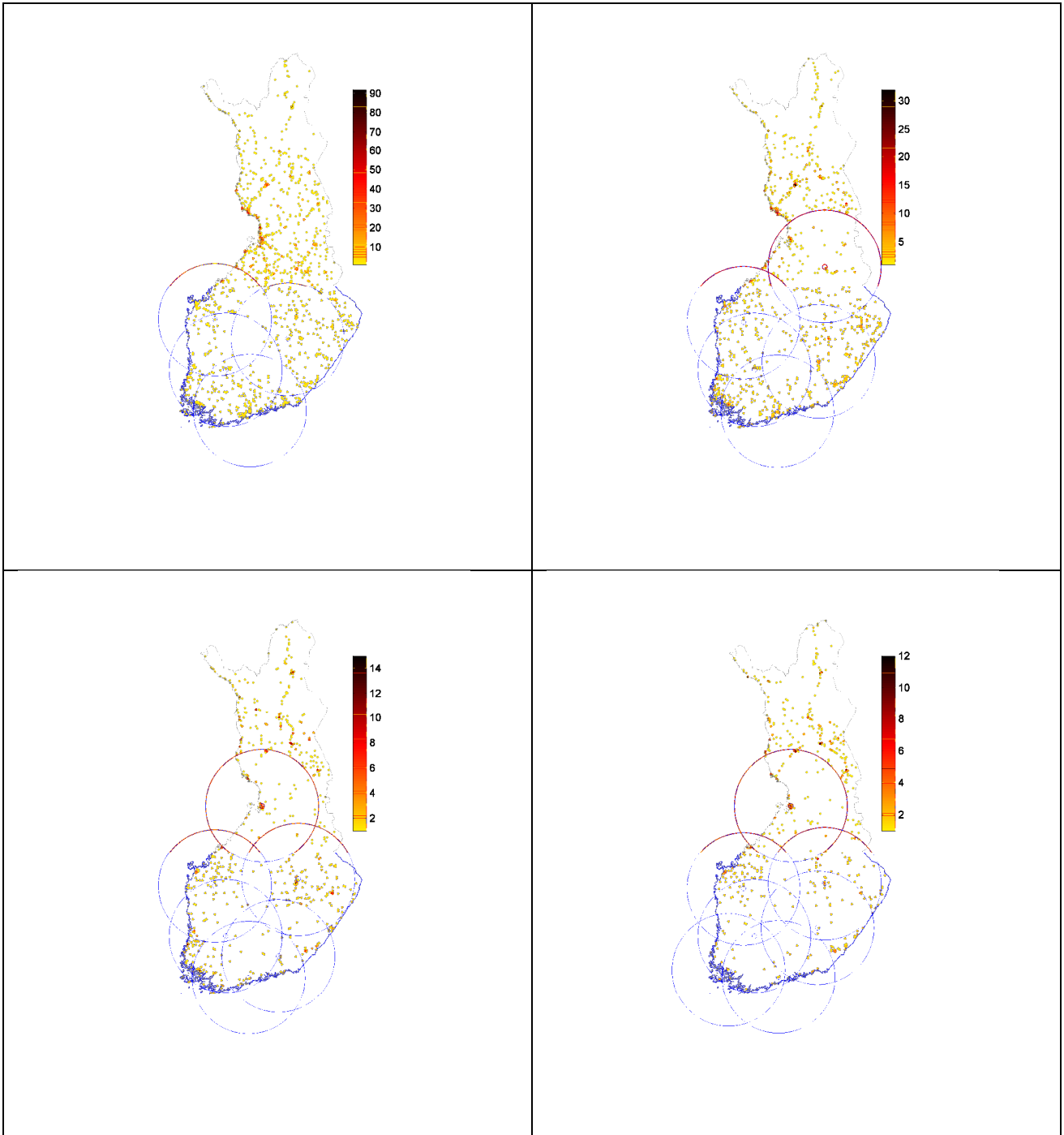
## 9.5 Tukikohtien määrä

Kaikki samat analyysit, kuin kuudella tukikohdalla tehtiin myös neljällä, viidellä ja seitsemällä tukikohdalla. Näitä kaikkia ei käsitellä tässä, mutta vertailun vuoksi esitetään kaikkien tukikohtamäärien pareto-optimaalisten ratkaisujen muodostamat käyrät.

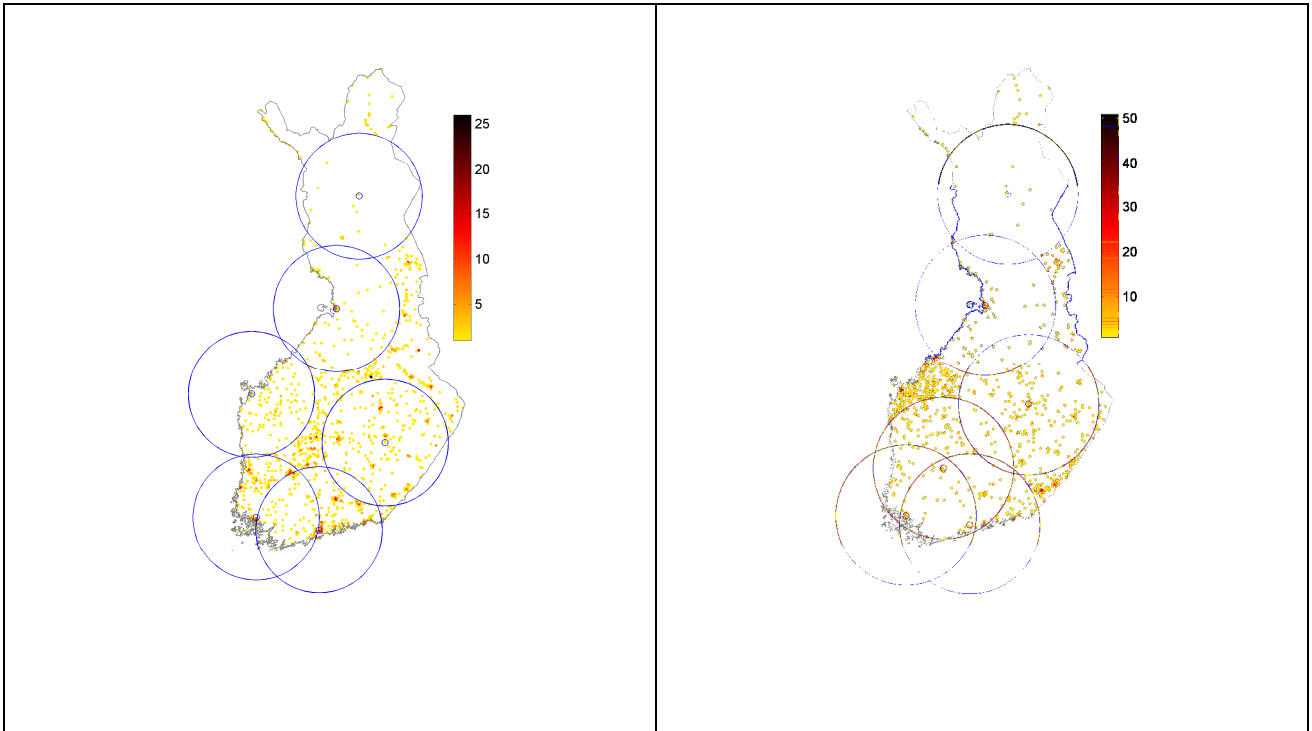


Kuva 19: Paretokäyrät 4-7 tukikohdalla ja nykytilanne sekä yliopistollisten sairaaloiden vaihtoehto

Kuvasta havaitaan, että tukikohtien määrän lisääminen siirtää käyriä kohti parempia tuloksia, ja parannus pienenee, kun tukikohtien määrä kasvaa. Samassa kuvassa on piirrettyä myös nykyisten tukikohtien tulokset erilaisilla helikopterityypeillä. Nykyinen tyyppi on hitaampi, kuin tyyppi 5, joten pelkällä tyypin vaihdolla voidaan saavuttaa suuri parannus. Lisäksi kuvassa on piirrettyä yliopistollisten sairaaloiden vaihtoehdon tulokset. Kuvan perusteella on myös selkeästi havaittavissa, että ainakaan tavoittamisaikojen keskiarvon tai suorittamatta jääneiden tehtävien perusteella ei nykyinen sijoittelu ole optimaalinen. Lähes yhtä hyvään tulokseen päästäisiin jo neljällä tukikohdalla ja viidellä tukikohdalla päästäisiin jo merkittävästi parempiin tuloksiin.



Kuva 20: Suoritettujen tehtävien perusteella parhaat tukikohtakombinaatit 4-7 tukikohdalla ja suorittamattomien tehtävien jakautuminen näissä tilanteissa



Kuva 21: Nykytilanne ja yliopistollisiin sairaaloihin sijoitetut tukikohdat ja suorittamatta jääneiden tehtävien jakautuminen niissä

Kuvissa 22 ja 23 olevat suorittamatta jääneet tehtävät eivät ole keskenään vertailukelpoisia, sillä niiden määrien suuresta vaihtelusta johtuen on kunkin kuvan värit skaalattu erikseen ja niistä tummuuden perusteella näkee miten kullakin tukikohtakombinaatiolla suorittamatta jääneet tehtävät sijoittuvat.

Kuvassa 22 olevat tukikohtakombinaatiot ovat paretokäyrien vasemmasta laidasta, eli niillä saavutetaan mahdollisimman pieni suorittamatta jääneiden tehtävien osuus. Paretokäyrien oikeassa laidassa olevissa kombinaatioissa kaikki helikopterit on sijoitettu Vaasan eteläpuolelle. Kuvasta 22 havaitaan, että tukikohtien määrästä riippumatta, niitä ei tule sijoitetuksi Oulun pohjoispuolelle. Lisäksi yleinen piirre kaikissa kombinaatioissa on tukikohtien sijoittaminen sisämaahan. Helikopterien määrän kasvaessa niitä sijoitetaan lisää Etelä-Suomeen jossa ovat päällekkäiset tehtävät aiheuttavat enemmän suorittamattomia tehtäviä, kuin pohjoisen vähäiset tehtävät, jotka eivät ole helikopterien toiminta-alueilla. Kuvan 23 tukikohtasijoittelut ovat täysin vastoin kuvasta 22 tehtyjä havaintoja, joten ei ole yllättävää, että ne sijoittuvat niin huonosti kuvan 21 paretokäyriin nähden.



## 10 Johtopäätökset

### 10.1 Tukikohtien sijoittelu

Nykyisillä tukikohdilla kaksi kolmasosaa suorittamattomista tehtävistä sijoittuu helikopterien kantama-alueiden sisäpuolelle eli tukikohtien sijaintien kannalta suurimmat parannukset olisi saavutettavissa tukikohtien tiiviimmällä sijainnilla tiheään asutuilla alueilla, niin että kantama-alueet osuvat päällekkäin, jolloin lähimmän helikopterin ollessa varattuna, voisi toiseksi lähin helikopteri suorittaa tehtävän.

Tukikohtavaihtoehtoja tarkasteltaessa on annettava pääasiallinen painoarvo suorittamattomien tehtävien määrälle, koska tavoittamisaikojen minimointi johtaa toteuttamiskelvottomiin, alueellisesti epätasapainoisiin ratkaisuihin. Keskittyminen suorittamattomiin tehtäviin ei kuitenkaan johda huonoihin tavoittamisaikoihin, koska kaikki löydettyt järkevät ratkaisut ovat myös tavoittamisaikojen suhteen reilusti nykytilannetta parempia. Löydetyistä hyvistä tukikohtayhdistelmistä voidaan kiinnittää huomio seuraaviin yleisiin niitä koskeviin periaatteisiin.

1. Lapin tehtävämäärä on sen verran vähäinen että koko Suomen kannalta tarkasteltuna Oulun pohjoispuolelle ei ole kannattavaa sijoittaa tukikohtaa, ei edes, jos tukikohtia olisi seitsemän.

2. Rannikotukikohdilla puolet lentoalueesta sijoittuu merelle, mikä ei ole tarkoituksenmukaista maalla sijaitsevien tehtävien suorittamisen kannalta. Rannikotukikohdat ovat soveltuvia ainoastaan suhteessa ympäristöönsä hyvin tiheään asutuille alueille, Ouluun ja Pääkaupunkiseudulle sekä mahdollisesti Turkuun. Nykyinen Vaasan tukikohta on erityisen huono yli puolen kantama-alueesta sijaitessa merellä, samalla kun sisämaan Seinäjoesta löytyisi saman kokoluokan väestökeskittymä, jossa oleva tukikohta palvelisi hyvin myös Vaasaa.

3. Päällekkäisillä lentoalueilla voidaan tehokkaasti vähentää suorittamattomien tehtävien määrää. Esimerkiksi Lahden seudulla, joka nykyään on vain Helsinki-Vantaan helikopterin kantama-alueella, ja jossa on suuri määrä suorittamattomia tehtäviä, olisi hyvin palveltu, mikäli tukikohtia olisi pääkaupunkiseudulla, Tampereella ja Mikkelissä. Kaikista näistä pääsee lentämään Lahteen ja kolmesta eteläisestä tukikohdasta aina jostain löytynee vapaa helikopteri. Tämä edellyttää kuitenkin joko dispatch toimintaa tai hälytyskeskusten välistä yhteistyötä.

### 10.2 Helikopterit

Suoritusarvotarkastelun perusteella tutkitut helikopterit soveltuvat HEMS toimintaan Suomessa yhtä mallia lukuun ottamatta. Vaikka CAT A VTOL vaatimus on suorituskyvyn kannalta rankka, on tehtävissä tarvittava kuorma sen verran kevyt ja tarvittavat kantamat niin lyhyitä, että CAT A vaatimus ei rajoita suoritettavia tehtäviä. Tähän vaikuttavat myös suomen matalat maanpinnanmuodot ja leuto ilmasto. Korkean ja kuumen ilmanalan olosuhteet ovat mitättömän pieni osa HEMS-tehtäviä.

Helikopterien tehtävään soveltuvuutta tutkittaessa lopputulos oli se, että helikopterin maksimi reittilentonopeus ratkaisee helikopterien keskinäisen järjestyksen. Nopea helikopteri pystyy saavuttamaan lähellä olevat potilaat nopeammin, kuin hidas helikopteri ja nopean helikopteri pystyy myös tavoittamaan potilaita laajemmalla alueella rajallisessa ajassa.

## 11 Tulosten luotettavuuden tarkastelu

### 11.1 Datan epäluotettavuus

Helikoptereiden suoritusarvodata on osittain epäluotettavaa, sillä eri helikoptereiden tiedot on kerätty erilaisista lähteistä, eivätkä siis ole välttämättä keskenään vertailukelpoisia. Kaikkia tietoja ei edes saatu kaikista helikoptereista, vaan osa tiedoista jouduttiin arvioimaan muiden tyyppien tietojen pohjalta. Tällä saattaa olla pientä vaikutusta simulointien tuloksiin, mutta on vaikutus aina samansuuntainen. Mahdollinen epätarkkuus aiheuttaa lopulta vain paretokäyrien siirtymisen suuntaan tai toiseen. Niiden muodot ja keskinäinen järjestys pysyvät muuttumattomina.

### 11.2 Tulosten kalibrointi

Käytettävissä ei ollut tarkkaa dataa HEMS toiminnan tämänhetkisistä tavoittamisajoista tai suorittamatta jääneiden tehtävien määrästä. Siispä nykytilanteen simuloinnin tuloksia ei voitu vertailla todelliseen tilanteeseen. Tälläkään ei ole vaikutusta tukikohtakombinaatioiden väliseen järjestykseen, mutta mikäli tiedot olisivat olleet käytettävissä, olisi ollut mahdollista kalibroida simulaatiossa käytettäviä vakioita siten, että simulaation tulos vastaisi tarkemmin lukuarvoiltaan todellista tilannetta ja parempien tukikohtakombinaatioiden tuloksia olisi voinut arvioida sellaisenaan, ei pelkästään suhteessa nykytilanteeseen.

### 11.3 Maanpäälliset lääkäriambulanssit

Lähtötietoina ei ollut käytettävissä tietoa autolla maanpäällisistä lääkäriambulansseista, kuten Helsingin pelastuslaitoksen lääkäriambulanssista. Joissain kaupungeissa näitä on ja ne hoitavat lääkäriä vaativat ensihoitotehtävät toiminta-alueillaan. Näille alueille ei siis todellisuudessa tule lääkärihelikopteria vaativia tehtäviä. Tietojen puuttumisen takia ovat nämäkin tehtävät kuitenkin simuloitu lääkärihelikopterilla suoritettaviksi. Tämä ei aiheuta suurta virhettä, sillä hyvissä tukikohtakombinaatioissa helikopterit olivat sijoitettuina suurien kaupunkien lähistölle ja simulaatiossa näihin kaupunkiin tulevat tehtävät hoidettiin autolla.

## 12 Viitteet

[1] David E. Goldberg. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Addison-Wesley, 1989.

[2] Carlos M. Fonseca and Peter J. Fleming. Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization. Genetic Algorithms: Proceedings of the Fifth International Conference (S. Forrest, ed.), San Mateo, CA: Morgan Kaufmann, July 1993.

[3] JAR-OPS 3: Commercial Air Transportation (Helicopters), Joint Aviation Authorities, 2007