



Ambulanssien optimaaliseen sijoittamiseen ohjaava
monitavoitemalli

Pauliina Mäkinen

Pro gradu -tutkielma
Huhtikuu 2018

MATEMATIIKAN JA TILASTOTIETEEN LAITOS
TURUN YLIOPISTO

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck-järjestelmällä

TURUN YLIOPISTO

Matematiikan ja tilastotieteen laitos

MÄKINEN, PAULIINA Ambulanssien optimaaliseen sijoittamiseen ohjaava monitavoitemalli

Pro gradu, 133 s., 30 liites.

Sovellettu matematiikka

Huhtikuu 2018

Tässä pro gradu -tutkielmassa kehitetään ambulanssien optimaaliseen sijoittamiseen ohjaava generinen monitavoitemalli. Ambulanssien optimaaliseen sijoittamiseen liittyvät ongelmat ovat ajankohtaisia, sillä vuoden 2020 alussa voimaan tuleva sote-uudistus johtaa monilla alueilla täysin uudenlaisen asemapaikkaverkoston syntymiseen. Tämän työn tavoitteena on luoda mahdollisimman todenmukaisesti ambulanssien sijoittamisongelmaan liittyviä aspekteja mallintava monitavoiteoptimointimalli, jonka avulla käytettävissä olevat ambulanssit pystytään sijoittamaan optimaalisesti mahdollisille asemapaikoille. Monitavoiteoptimointimalli tulee rakentumaan neljästä keskenään enemmän tai vähemmän ristiriitaisesta, mutta silti yhtä tärkeästä, tavoitteesta. Tutkielma sisältää myös osion, missä kehitettyä monitavoiteoptimointimallia sovelletaan reaali maailman ongelmaan; generisen monitavoitemallin avulla tullaan ratkaisemaan Varsinais-Suomen sairaanhoitopiirin (VSSHP) ambulanssien sijoittamisongelma.

Tutkimus pohjautuu Varsinais-Suomen sairaanhoitopiirin tuottamaan aineistoon, jota käsitellään QGIS -paikkatieto-ohjelmistolla. QGIS mahdollistaa ongelman spataalisen luonteen huomioimisen sijaintiperusteisen analyysin kautta. Aineistoon liittyvä temporaalinen ulottuvuus otetaan huomioon erityisesti tähän tarkoitukseen luodun Python-ohjelman avulla. Niin erinäisistä lähteistä kerätty aineisto kuin siitä jatkojalostettu aineistokin liitetään parametreina osaksi kehitettyä monitavoiteoptimointimallia. VSSHP:n ambulanssien sijoittamisongelma ratkaistaan hyödyntämällä monia eri ohjelmistoja, joista keskeisimmässä roolissa on WWW-NIMBUS.

Tutkielma sisältää suosituksen siitä, millainen ambulanssiverkosto Varsinais-Suomen sairaanhoitopiirin alueelle kannattaisi muodostaa. Tuloksista käy ilmi montako ambulanssia kullekin asemapaikalle suositellaan sijoitettavaksi. Tutkielman toisena keskeisenä tuloksena voidaan pitää VSSHP:n sijoittamissuunnitelman taustalla olevaa geneeristä monitavoitemallia, joka antaa tavan kvantifioida ambulanssien sijoittamisen kannalta oleellisia ilmiöitä sekä niiden välisiä suhteita. Samalla se lisää syvällistä ymmärrystä ambulanssien sijoittamiseen vaikuttavien tekijöiden moninaisuudesta ja auttaa tekemään perusteltavissa olevia sijoittamisratkaisuja niin Varsinais-Suomen sairaanhoitopiirin alueella kuin millä tahansa muullakin tutkimusalueella.

Asiasanat: monitavoiteoptimointi, diskreetti optimointi, sijoittamisongelma, mallintaminen, ensihoidon optimaalinen järjestäminen, sote-uudistus, paikkatieto-ohjelmisto, WWW-NIMBUS.

Sisältö

1	Johdanto	1
2	Yksitavoitteinen optimointi	3
2.1	Kattavuuteen perustuvat sijoittamismallit	8
2.1.1	Peitto-ongelma	10
2.1.2	Maksimaalisen kattavuuden ongelma	12
2.1.3	P-keskusongelma	13
2.2	P-mediaaniongelma	14
2.3	Kattavuuteen perustuvien mallien laajennuksia	15
3	Monitavoiteoptimointi	19
3.1	Sijoittamiseen liittyviä monitavoiteoptimointimalleja	24
4	Monitavoiteoptimointiongelmien ratkaisumenetelmiä	27
4.1	Diskreettien epälineaaristen monitavoiteoptimointiongelmien ratkaisumenetelmiä	32
4.1.1	Skalarisoidun optimointiongelman ratkaisumenetelmiä .	37
5	Ambulanssien optimaaliseen sijoittamiseen ohjaava monita- voiteoptimointimalli	44
5.1	Testiongelma	53
6	Ambulanssien optimaalinen sijoittaminen Varsinais-Suomen sairaanhoidopiirin alueella	61
6.1	Aineistojen siirtäminen paikkatieto-ohjelmistoon	64
6.2	Tarkastelualuejako	65
6.3	Tarkastelualuekohtaisen ambulanssitarpeen määrittäminen . .	67
6.4	Paikkatieto-ohjelmiston avulla määritetyt vakiot ja kertoimet .	70
7	Varsinais-Suomen ambulanssien sijoittamisongelman ratkai- seminen	74
7.1	Sopivan ratkaisumenetelmän valinta	75
7.1.1	WWW-NIMBUS	82

7.2	Ihanteellisen kriteerivektorin ja nadir-vektorin määrittäminen .	88
7.3	Parhaimman kompromissin määrittäminen WWW-NIMBUS -ohjelmiston avulla	95
8	Tulokset ja niiden analysointia	112
9	Jatkotutkimussuuntia	121
	Kirjallisuutta	126
A	Varsinais-Suomen sairaanhoitopiirin ambulanssien sijoittamisongelma	134
B	Kohdefunktioiden muodostamisessa hyödynnetyt Wolfram Mathematica -koodit	147
C	Kohdefunktioiden muodostamisessa hyödynnetyt aineistot	148
C.1	Asemapaikkakohtaiset vakiot ja kertoimet	148
C.2	Tarkastelualuekohtaiset vakiot ja kertoimet	149
C.3	Mahdollisten asemapaikkojen ja niiden naapuriasemien väliset etäisyydet	151

1 Johdanto

Sosiaali- ja terveystalvaeluiden uudistus (sote) astuu näillä näkymin voimaan vuoden 2020 alussa. Uudistuksen tarkoituksena on siirtää julkisten sote-palveluiden järjestämisvastuu kunnilta 18:lle perustettavalle maakunnalle. Maakunnat muodostavat viisi yhteistyöaluetta, jotka toimivat sote-palveluiden tuottajina. Yksi näistä yhteistyöalueista on Varsinais-Suomen sairaanhoitopiiri (VSSHP), joka koostuu 27 jäsenkunnasta. Näissä kunnissa asuu yhteensä lähes puoli miljoonaa asukasta. [27], [53], [54]

Varsinais-Suomen sairaanhoitopiirin toimintaan sote-uudistus vaikuttaa siten, että ensihoidon yksiköt tulee siirtää kokonaan julkisten palveluntuottajien tiloihin. Tällä hetkellä käytössä olevasta asemaverkostosta jää jäljelle vain muutama asemapaikka. Jatkossa VSSHP:n ambulanssit tullaan sijoittamaan yksityisten palveluntuottajien tilojen sijasta paloasemille ja vapaapalokunnan asemille. Rakenteilla on lisäksi kaksi täysin uutta paloauto-/ambulanssiasemaa.

Tämän tutkielman tarkoituksena on selvittää yhteistyössä Varsinais-Suomen sairaanhoitopiirin kanssa miten piirin alueella toiminnassa olevat ambulanssit (33 kpl) on optimaalisinta sijoittaa uuden asemaverkoston kiinteille sijoituspaikoille. Optimaalisuuden käsite ei tässä tapauksessa ole lainkaan yksikäsitteinen, sillä ei ole olemassa sellaista suuretta, jonka mittaaminen kuvastaisi yksikäsitteisesti tietyn ambulanssien sijoittamissuunnitelman onnistuneisuutta. Tämän vuoksi tutkimuksessa on turvauduttu monitavoiteoptimointiin, joka mahdollistaa ratkaisun onnistuneisuuden arvioinnin usean toisistaan poikkeavan kriteerin avulla.

Tässä työssä tullaan kehittämään ambulanssien optimaaliseen sijoittamiseen ohjaava geneerinen monitavoiteoptimointimalli. Monitavoiteoptimointimalli tulee koostumaan neljästä erilaisesta tavoitteesta, joista jokainen pyritään toteuttamaan mahdollisimman hyvin. Tavoitteet ovat enemmän tai vähemmän ristiriitaisia keskenään, minkä vuoksi kaikkia tavoitteita ei voida toteuttaa optimaalisesti. Monitavoiteoptimoinnissa onkin yksittäisen tavoitteen optimoinnin sijaan kyse parhaimman kompromissin määrittämisestä. Kehitetystä monitavoiteoptimointimallissa on pyritty sekä spatiaalisen (etäi-

syysriippuvuus) että temporaalisen (aikariippuvuus) näkökulman huomioon ottamiseen. Esimerkiksi artikkeli [4] tukee käsitystä siitä, että ambulanssien optimaalista sijoittamista kartoitettaessa molemmat edellä mainituista ulottuvuuksista tulee ottaa huomioon tavalla tai toisella.

Reaalimaailman ongelmia mallinnettaessa on tasapainoiltava kehitettävän optimointimallin ratkeavuuden ja validiteetin välillä. Validi malli tuottaa tulokset, jotka noudattavat samaa logiikkaa kuin todellinen kuvattava systeemikin. Tällöin mallin antamat johtopäätökset ovat sovellettavissa mallin kuvaamaan todelliseen systeemiin sellaisenaan ja luotettavasti. Käsillä olevan optimointiongelman ratkeavuutta voidaan luonnollisesti parantaa mallia yksinkertaistamalla. Tällöin voidaan kuitenkin joutua tilanteeseen, jossa luotu malli johtaa triviaaleihin tuloksiin, eikä mallista ole juurikaan hyötyä varsinaisen ongelman ratkaisemiseen. Toisaalta liian monimutkainen optimointiongelma voi tuottaa niin hankalan ohjelmistoteknisen ongelman, ettei sen ratkaiseminen onnistu lainkaan järkevässä ajassa ja/tai realistista tietokonekapasiteettia käyttäen. [40]

Ambulanssien optimaalinen sijoittaminen kiinteille asemapaikoille on tärkeää sen vuoksi, että ensihoitoyksikön saapumisnopeuteen vaikuttaa käytävissä olevien ambulanssien määrän lisäksi niiden sijainti hälytyshetkellä. Ensihoitoyksikön saapumisnopeus on keskeistä ensihoidon toiminnan kannalta, sillä ensihoito pyrkii tarjoamaan onnettomuuteen joutuneille tai vakavasti sairastuneille ihmisille luotettavan hoidon riittävän nopeasti. Ensihoito voidaan määritellä sairastuneen tai vammautuneen potilaan välittömäksi hoidoksi, jonka antaa asianmukaisen koulutuksen saanut henkilö [21]. Hoidon tavoitteena on potilaan terveydentilan parantaminen, mikä voi tarkoittaa esimerkiksi elintoimintojen käynnistämistä tai ylläpitämistä [21]. Varsinais-Suomen sairaanhoitopiirin alueella ensihoitopalveluihin luetaan kuuluvaksi sairaankuljetukseen ja sairaalan ulkopuolella annettavaan akuuttihoitoon liittyvät tehtävät [52]. Hyvä ja tehokas ensihoito perustuu ammattitaitoon, oikea-aikaisuuteen ja jatkuvasti kehittyvään osaamiseen [31]. Ensihoidon oikea-aikaisuus tarkoittaa käytännössä avun saamista mahdollisimman nopeasti, sillä esimerkiksi sydänpysähdyspotilaan selviämisenuste on suoraan riippuvainen siitä, miten nopeasti hänet päästään defibrilloimaan [23].

Ensihoidon toiminnan kehittäminen kasvattamalla käytettävissä olevien ambulanssien lukumäärää on kallis ja lyhytnäköinen ratkaisumalli, sillä tällä tavalla pystytään parhaimmassakin tapauksessa takaamaan vain se, että hälytyksen sattuessa jokin ambulanssi on vapaana lähtemään liikkeelle. Oleellisempaa onkin keskittyä selvittämään missä määrin ambulanssien sijainnista voidaan tehdä ensihoidon tavoitteiden toteutumisen kannalta suotuisampaa. Ambulanssien sijainti riippuu pääsääntöisesti kahdesta asiasta: missä niitä työllistävät hälytystehtävät sattuvat ja missä kunkin ambulanssin asemapaikka sijaitsee. Asemapaikkojen sijainti on keskeisessä roolissa sen vuoksi, että jos ambulanssi ei ole kiinni hälytystehtävässä, se on pääsääntöisesti asemapaikallaan odottamassa seuraavaa hälytystehtävää. Hälytystehtävän syntyminen on satunnainen ilmiö, johon liittyvää sijaintia tai ajankohtaa ei voi kukaan ennustaa. Sen sijaan ambulanssin asemapaikka määräytyy täysin sen mukaan, minne se käytettävissä olevista asemapaikoista halutaan sijoittaa. Ambulanssin asemapaikan muuttamiseen (rajattujen vaihtoehtojen sisällä) ei liity mitään kustannuksia. Silti, sijoittamalla optimaalinen määrä ambulansseja optimaalisille asemapaikoille, voidaan parhaimmassa tapauksessa pelastaa ihmishenkiä.

2 Yksitavoitteinen optimointi

Päätösmuuttujan jaollisuus vaikuttaa sekä optimointiongelman luokitteluun että ratkaisemiseen [38]. Jatkuva päätösmuuttuja voi saada mielivaltaisia reaalitylukuarvoja ja on näin ollen jaollinen. Jos jaollisuus ei ole voimassa, päätösmuuttuja on diskreetti [38]. Tällöin päätösmuuttujat voivat saada vain kokonaislukuarvoja. Binäärinen päätösmuuttuja voidaan nähdä diskreetin päätösmuuttujan erikoistapauksena, sillä se voi saada vain arvon 0 tai 1. On myös mahdollista, että samassa optimointiongelmassa esiintyy sekä jatkuvia että diskreettejä päätösmuuttujia. Tällaisia ongelmia kutsutaan sekalukuoptimointiongelmiiksi (Mixed-Integer Programming Problems).

Päätösmuuttujat kuvaavat optimoitavia suureita, joiden arvoja muuttamalla pyritään saavuttamaan mahdollisimman hyvin asetetun optimointiongelman tavoitteet. Optimointiongelman tavoitteita kutsutaan kohdefunk-

tioiksi. Kohdefunktiot koostuvat päätösmuuttujista, parametreista, vakioista sekä niiden välisistä relaatioista. [38]

Sekä päätösmuuttujien, parametrien että vakioiden arvot voivat vaihdella, mutta eivät kuitenkaan identtisellä tavalla. Vaikkei päätösmuuttujien, parametrien ja vakioiden välinen rajanveto olekaan aina niin selkeä, parametrien voidaan ajatella olevan päätösmuuttujia muuttumattomampia. Vakioita puolestaan voidaan pitää parametrejä muuttumattomampina. Vakiot voidaan nähdä myös universaaleina ominaisuuksina. Tällöin parametrin vastaa kyseessä olevan systeemin ominaisuuksia. Päätösmuuttujat taas voivat vaihdella itse systeemin sisällä riippumatta parametreista ja vakioista. [30]

Optimointimallia muodostettaessa tulee ottaa kohdefunktioiden (erilaisien päätösten paremmuutta vertaavien kriteereiden) lisäksi huomioon myös päätöksiä rajoittavat ehdot [38]. Tällaisia ehtoja kutsutaan rajoitteiksi. Optimointiongelma voi olla myös kokonaan rajoitteeton. Usein malleihin liittyy luonnollisia rajarajoitteita, jotka aiheutuvat päätösmuuttujalla kuvattavan suureen ominaisuuksista. Jos esimerkiksi yritetään minimoida aikaa, joka gradun valmistamiseen tulee kulumaan, päivässä käytettävien työtuntien määrää kuvaavalle päätösmuuttujalle x täytyy asettaa alaraja $x \geq 0$. Vuorokaudessa ei nimittäin ole mahdollista työskennellä negatiivista määrää tunteja. Rajoitefunktioiden avulla voidaan kuvata monimutkaisempia rajoitteita. Esimerkkinä tällaisesta voisi toimia vaikkapa rajoite, joka vaatii, että jokaista vuorokaudessa työskenneltävää kolmea tuntia kohti täytyy pitää yksi kahvitunti, nukkumiseen täytyy varata ainakin kuusi tuntia, ja näiden kolmen päätösmuuttujan summa ei saa ylittää 24 tuntia. Kahvitunnin pitämisestä ja nukkumisesta saatava hyöty voidaan kuvata kohdefunktiossa päätösmuuttujien välisenä relaationa. Kyseiseen relaatioon voi liittyä sekä parametrejä että vakioita, joiden avulla pystytään kuvaamaan monimutkaisempia vuorovaikutussuhteita.

Merkitään symbolilla n optimointimalliin liittyvien päätösmuuttujien lukumäärää. Mikäli päätösmuuttujien arvoista koostuva n -ulotteinen vektori toteuttaa kaikki optimointimallin rajoitteet, se kuuluu optimointiongelman sallittuun joukkoon. Diskreetin optimointiongelman optimaalinen ratkaisu on sellainen n -ulotteinen sallittu piste, jossa kohdefunktio saa minimoitaessa

(maksimoitaessa) pienimmän (suurimman) arvonsa. Kohdeavaruus sisältää kaikki ne arvot, jotka kohdefunktio voi saada sallitun joukon n -ulotteisissa pisteissä. Päätösmuuttujan ollessa diskreetti sallittuun joukkoon kuuluu numeroituva määrä n -ulotteisia pisteitä. Numeroitavaan joukkoon voi kuulua joko äärellinen tai ääretön määrä alkioita.

Jos diskreetin päätösmuuttujan käytön lisäksi optimointiongelman sallittu joukko on rajoitettu siten, että ratkaisuehdokkaita on olemassa äärellinen määrä, puhutaan kombinatorisesta optimoinnista. Mikäli sallittu joukko on rajoitettu edellä mainitulla tavalla, myös mahdollisia kohdefunktion arvoja on olemassa rajallinen määrä. Tällöin optimointiongelman optimaalinen piste voitaisiin periaatteessa määrittää laskemalla kohdefunktion arvo jokaisessa sallitussa n -ulotteisessa pisteessä. Sallittujen n -ulotteisten pisteiden joukko on kuitenkin usein niin suuri, ettei tällainen lähestymistapa ole toimiva. Optimaalinen n -ulotteinen piste ei myöskään välttämättä ole yksikäsitteinen, sillä useampi toisistaan poikkeava päätösvektori voi tuottaa saman kohdefunktion arvon.

Diskreetit optimointiongelmat ovat yleensä vaikeammin ratkaistavissa kuin jatkuvaan maailmaan sijoittuvat optimointiongelmat [44]. Esimerkiksi pelkästään diskreettejä päätösmuuttujia sisältävillä kombinatorisilla optimointiongelmillä on taipumusta muodostua NP-vaikeiksi tehtäviksi [8]. Päätösmuuttujan jatkuvuus tarjoaa mahdollisuuden kerryttää informaatiota kohdefunktion käyttäytymisestä myös n -ulotteisen pisteen \mathbf{x} lähiympäristössä. Mikäli kohdefunktio on jatkuvasti differentioituva, kohdefunktion gradientti pystytään määrittämään jokaisessa sallitussa n -ulotteisessa pisteessä. Gradientin saama arvo pisteessä \mathbf{x} kertoo, mihin suuntaan liikuttaessa kohdefunktion arvo tulee pieneneväksi (tai että sellaista pistettä ei enää ole eli optimi on saavutettu). Jos optimointiongelma koostuu diskreeteistä päätösmuuttujista, vastaavan informaation kerryttäminen ei ole mahdollista.

Pelkkä päätösmuuttujan jatkuvuus ei yksinään riitä sen takaamiseen, että kohdefunktion arvon laskemisesta pisteessä \mathbf{x} voitaisiin päätellä mitään funktion käyttäytymisestä pisteen \mathbf{x} lähiympäristössä. Esimerkiksi silloin, kun kohdefunktio sisältää epäjatkuvuuksia, kohdefunktion arvot voivat vaihdella todella paljon vaikka liikuttaisiinkin vain pisteen \mathbf{x} ϵ -säteisen palloympäris-

tön sisällä. On olemassa myös sellaisia kohdefunktioita, jotka eivät jatkuvuudesta huolimatta ole jokaisessa sallitussa pisteessä jatkuvasti differentioituvia. Tällaisia optimointiongelmiä kutsutaan epälineiksi. Sekä optimointiongelman epälineisyys että epäjatkuvuus ovat tiettyssä mielessä paikallisia ongelmia suhteessa diskreetin päätösmuuttujan käyttöön, jolloin funktion käyttäytymisestä "viereisessä" n -ulotteisessa pisteessä ei yleensä pystytä päättämään mitään. Ainoita poikkeuksia muodostavat sellaiset tilanteet, joissa kohdefunktio on todella yksinkertaista muotoa (esimerkiksi aidosti kasvava) ja päätösmuuttujien määrä on pieni. Jatkuvan päätösmuuttujan voidaan siis sanoa olevan diskreettiä päätösmuuttujaa informatiivisempi.

Ero diskreettien ja jatkuvien optimointiongelmiä välillä ei kuitenkaan ole ehdoton. Monet diskreettien optimointiongelmiä ratkaisumenetelmät generoivat diskreetistä ongelmasta jonon jatkuvia aliongelmiä, joiden ratkaisemisen kautta edetään kohti alkuperäisen optimointiongelman ratkaisua [44]. Lisäksi joskus voidaan haluta siirtyä koko ratkaisuprosessin ajaksi diskreetistä päätösmuuttujasta jatkuvaan. Tällöin ratkaistaan alkuperäisen ongelman sijasta relaksoitu ongelma. Parhaimmassa tapauksessa saamme suoraan ratkaisun, joka antaa optimaaliseksi päätösmuuttujien arvoiksi kokonaislukuja. Relaksoitujen ongelman ratkaisu voidaan myös aina palauttaa takaisin kokonaislukujen joukkoon kuuluvaksi esimerkiksi pyöristämällä, mutta sen jälkeen mitään takeita saadun ratkaisun optimaalisuudesta ei ole. Relaksoimalla määritetty ratkaisu saattaa kuitenkin toimia hyvänä approksimaationa alkuperäisen ongelman ratkaisulle. [26]

Yleinen diskreetti optimointiongelma voidaan kirjoittaa muodossa

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Maksimoi} \\ \text{Minimoi} \end{array} \right\} f(x_1, \dots, x_n) \quad (1)$$

$$\text{siten että} \quad g_i(x_1, \dots, x_n) \quad \left\{ \begin{array}{l} \leq \\ = \\ \geq \end{array} \right\} b_i \quad i = 1, \dots, m \quad (2)$$

$$x_i \in \mathbb{Z}_0^+ \quad i = 1, \dots, m, \quad (3)$$

jossa f ja g_i ovat päätösmuuttujien x_i annettuja funktioita ja b_i annettuja parametreja. [38]

Optimointiongelmat jaotellaan lineaarisiin ja epälineaarisiin optimointiongelmiin. Ongelman lineaarisuus vaikuttaa paljon siihen, miten ongelmaa kannattaa lähteä ratkaisemaan. Optimointimalli on lineaarinen, jos verrannollisuuden ja additiivisuuden periaatteet ovat voimassa optimointiongelman kohdefunktiolle, ja sen kaikille rajoitteille. Verrannollisuus takaa, että kunkin päätösmuuttujan vaikutus optimointiongelman kohdefunktioon/rajoitukseen on suoraan verrannollinen sen arvoon. Additiivisuus puolestaan takaa, että kunkin päätösmuuttujan vaikutus kohdefunktioon/rajoitukseen on riippumaton muiden päätösmuuttujien arvoista. [38]

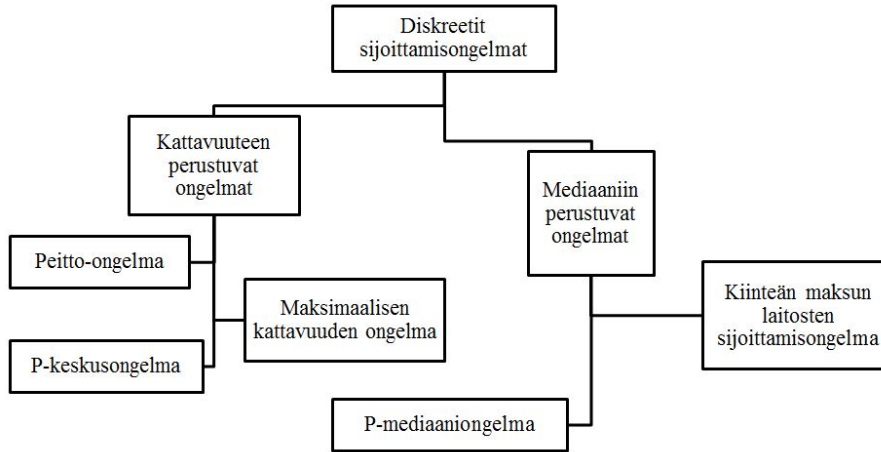
Additiivisuuden ja verrannollisuuden määritelmien pätemistä voidaan testata tutkimalla toteuttaako tarkasteltava funktio yhtälöt $f(\mathbf{x}_1) + f(\mathbf{x}_2) = f(\mathbf{x}_1 + \mathbf{x}_2)$ ja $f(a\mathbf{x}) = af(\mathbf{x}) \forall a \in \mathbb{R}$. Optimointiongelma on epälineaarinen, jos sen kohdefunktio tai jokin sen rajoitteista on epälineaarinen.

Jatkossa tullaan keskittymään sellaisiin diskreetteihin optimointimalleihin, jotka pyrkivät optimoimaan jonkin resurssin sijoittamista. Tässä työssä pyritään selvittämään mille käytettävissä olevista asemapaikoista kannattaa sijoittaa ambulanssi/ambulansseja. Ongelma muistuttaa luonteeltaan laitosten sijoittamisongelmaa, jossa on tavoitteena perustaa joko rajoittamaton tai rajattu määrä laitoksia joihinkin mahdollisista sijoituspaikoista. Ongelmanasettelut eivät ole identtisiä, mutta molemmissa kattavuuden/peittävyden käsitteet ovat keskiössä.

Artikkeleissa [47], [10] ja [1] on koottu yhteen erilaisia tapoja lähestyä laitosten optimaalisen sijoittamisen ongelmaa. Seuraavissa alikappaleissa tullaan käymään tarkemmin läpi kuvassa 1 esitetyn kaavion sisältämät erilaiset optimointimallit. Kiinteän maksun laitosten sijoittamisongelma (Fixed Charge Location Problem) muodostaa poikkeuksen, sillä se tullaan jättämään tarkastelun ulkopuolelle.

Tavallaan sen periaate tullaan kuitenkin käymään läpi, sillä P-mediaaniongelma on kiinteän maksun laitosten sijoittamisongelman läheinen sukulainen. Oleellinen ero mallien välillä muodostuu siitä, että kiinteän maksun laitosten sijoittamisongelmassa laitosten perustamiseen liittyvät rakennus- ja kuljetuskustannukset pystytään ottamaan huomioon. Ambulanssien sijoittamiseen jo olemassaoleville asemapaikoille ei liity kusan-

nuksia, joten P-mediaaniongelman käsittely riittää hyvin.



Kuva 1: Diskreettien sijoittamisongelmien luokittelu [1].

2.1 Kattavuuteen perustuvat sijoittamismallit

Sijoittamismalleihin liittyy aina jokin solmuista ja niitä yhdistävistä kaarista koostuva verkosto, jonka solmukohtat toimivat mahdollisina sijoituspaikkoina. Verkoston solmukohtia kutsutaan tarvesolmuiksi, sillä jokaisella mahdollisella sijoituspaikalla ajatellaan olevan tietty tarve sijoittamisen kohteena olevalle resurssille (esimerkiksi laitoksille). Tarvesolmu voidaan kattaa kahdella tavalla. Joko sijoittamalla laitos kyseiseen tarvesolmuun tai sellaiseen tarvesolmuun, joka pystyy kattamaan itsensä lisäksi myös tarkastelun kohteena olevan tarvesolmun. On monia eri tapoja määrittää, pystytäänkö johonkin tarvesolmuun sijoitetulla laitoksella kattamaan muita tarvesolmuja. Yksi yleisimmin käytössä olevista on etäisyys. Jos tarvesolmu i sijaitsee lähempänä tarvesolmua j kuin asetettu kattavuussäde, tarvesolmuun i perustettu laitos kattaa myös tarvesolmun j . Joissain tapauksissa kattavuussäde on tunnettu fakta (esimerkiksi raitiovaunun kattavuussäde riippuu kiskojen sijainnista) ja joissain taas enemmän approksimoitu (esimerkiksi kuinka kaukaa ihmisten uskotaan saapuvan kauppaan ostoksille).

Toinen yleinen tapa on käyttää aikaa apuna sen määrittämisessä, kuinka laaja alue pystytään kattamaan sijoittamalla laitos tarvesolmuun i . Ajatellaan, että laitos pystyy kattamaan kaikki sellaiset tarvesolmut j , jotka ehdittäisiin kyseisestä laitoksesta tavoittaa tietyssä ajassa. Jos on kyse esimerkiksi paloasemien sijoittamisesta, tavoittamisella voidaan tarkoittaa arvioitua ajoaikaa laitoksesta tarvesolmuun j . Optimaalista sijottelusuunnitelmaa luotaessa voi hyvinkin olla tiedossa, mikä on sellainen minuuttimäärä, jonka sisällä halutaan pystyä vastaamaan tarvesolmuissa esiintyvään tarpeeseen. Tällaisesta minuuttimäärästä käytetään käsitettä palvelustandardi. Yleisesti ottaen palvelustandardilla viitataan siihen, mikä on tavoitteellinen (joskus jopa vaadittu) toiminnantaso. Palvelustandardi voidaan määritellä monella muullakin tavalla kuin ajan suhteen, esimerkiksi etäisyyden tai jonkin ilmiön todennäköisyyden kautta.

Tarvesolmuun i sijoitettavan laitoksen kyky kattaa tarvesolmu j voi riippua etäisyyden lisäksi myös tarvesolmussa j esiintyvän tarpeen määrästä. Optimointiongelman mallinnusvaiheessa voidaan määritellä esimerkiksi, että yksi laitos pystyy vastaamaan tietyn ihmismäärän aiheuttamaan kysyntään. Tällöin tarvesolmun i kyky kattaa muita tarvesolmuja riippuu siitä, kuinka suuri tarve itse tarvesolmussa i on. Kattavuuskyky voidaan määritellä joskus myös verkoston rakenteen mukaan esimerkiksi siten, että tarvesolmuun i sijoitettu laitos pystyy kattamaan kaikki tarvesolmut j , joista lähtee kaari suoraan tarvesolmuun i .

Kirjassa [11] johdatellaan lukija neljän klassisen peittävyyyteen perustuvan diskreetin sijoittamismallin ideologiaan esimerkkiongelman kautta. Esimerkkiongelman on valikoitunut juuri ambulanssien optimaalinen sijoittaminen. Daskin muotoilee sanallisesti erilaisia tavoitteita, joita voi perustellusti pitää ambulanssien sijoittamisen ohjenuorana:

- Minimoidaan tarvittavien ambulanssien lukumäärää, millä pystytään saavuttamaan jokainen tarvesolmu asetetun palvelustandardin (X minuuttia) sisällä
→ Peitto-ongelma
- Maksimoidaan sen tarpeen määrää, mihin pystytään vastaamaan ase-

tetun palvelustandardin sisällä. Käytettävissä olevien yksikköjen lukumäärälle on olemassa yläraja

→ Maksimaalisen kattavuuden ongelma

- Minimoidaan maksimaalista vastausaikaa (etäisyyttä tarvesolmun ja lähimmän ambulanssin välillä)

→ P-keskusongelma

- Minimoidaan keskimääräistä vastausaikaa (etäisyyttä tarvesolmun ja lähimmän ambulanssin välillä)

→ P-mediaaniongelma

P-keskusongelman ja P-mediaaniongelman nimissä esiintyvällä P-alkuliitteellä viitataan siihen, että käytettävissä on p kappaletta ambulansseja.

Daskinin luettelemien tavoitteiden kautta käy selväksi, että ambulanssien sijoittamista kannattaa lähestyä ainakin osittain kattavuuden ja peittävyysnäkökulmasta. Pelkästään kattavuuden optimoiminen ei yksinään liene toimiva lähestymistapa. Käytettävissä ei välttämättä ole riittävän montaa ambulanssia ensimmäisen tavoitteen toteuttamiseen, ja vaikka olisikin, tarvesolmun määritelmä on hieman ongelmallinen. Teoreettisissa tarkasteluissa tarvesolmuja on aina miellyttävä määrä. Reaalimaailmassa kuitenkin jokainen yksittäinen ihminen voidaan ajatella tarvesolmuksi. Sen lisäksi, että tarvesolmuja on tällä tavalla ajateltuna mielettömän paljon, ihmiset myös liikkuvat koko ajan, eikä tarvesolmun sijaintia näin ollen voi tarkasti määrittää. Toki tarvesolmujen voidaan ajatella olevan tietynkokoisten ja -muotoisten alueiden keskipisteitä. Ei ole kuitenkaan mitenkään selvää, miten tutkimuksen kohteena oleva alue saataisiin todenmukaisesti ilmaistua tarvesolmuista koostuvan verkoston avulla.

2.1.1 Peitto-ongelma

Peitto-ongelmassa (Set Covering Location Problem) tavoitteena on sijoittaa minimaalinen määrä laitoksia, joilla pystytään kattamaan kaikki tarvesolmut [10].

Otetaan käyttöön seuraavat merkinnät [10]:

$I = i$:llä indeksöity tarvesolmujen joukko

$J = j$:llä indeksöity mahdollisten sijoituspaikkojen joukko

d_{ij} = tarvesolmun i ja mahdollisen sijoituspaikan j välinen etäisyys

D_c = kattavuussäde

$N_i = \{j \mid d_{ij} \leq D_c\}$

= kaikkien niiden mahdollisten sijaintipaikkojen indeksijoukko,

jotka pystyvät kattamaan tarvesolmun i

$$x_j = \begin{cases} 1, & \text{jos laitos perustetaan mahdolliseen sijaintipaikkaan } j \\ 0, & \text{muuten} \end{cases}$$

Tällöin peitto-ongelma SCLP saa muodon [10]

$$\min \quad \sum_{j \in J} x_j \quad (4)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j \in N_i} x_j \geq 1 \quad \forall i \in I \quad (5)$$

$$x_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J. \quad (6)$$

Kohdefunktio (4) minimoi tutkittavalle alueelle sijoitettavien laitosten lukumäärää. Rajoiterypäs (5) varmistaa, että jokainen tarvesolmu tulee katettua vähintään yhden aseman toimesta. Rajoiterypäs (6) takaa sijoittamisopeeraation binääriseen kyllä tai ei -luonteen toteutumisen. Lausekkeiden (4)-(6) muodostamassa peitto-ongelmassa oletetaan, että mahdolliset laitosten sijoituspaikat sijaitsevat tarkasteltavan verkoston solmukohdissa. On kuitenkin mahdollista laajentaa optimointimallia siten, että sallitaan laitosten perustaminen mihin tahansa kohtaan verkostoa. Käytännössä tämä tarkoittaa joukon J laajentamista äärellisellä (vaikkakin silti suurella) määrällä solmuja, jotka sijaitsevat tarvesolmuja yhdistävillä janoilla. [10]

Peitto-ongelmassa päätösmuuttuja x_j saa arvon yksi silloin, kun kyseinen kohde kuuluu optimaaliseen ratkaisuun. Tavallaan tutkitaan siis jäsenyyttä alijoukoissa. Peitto-ongelmassa rajoitteiden avulla vaaditaan, että ainakin

yksi $j \in N_i$ toteuttaa tämän ehdon. Voidaan kuitenkin vaatia myös toisenlaista jäsenyyttä alijoukoissa. Pakkausongelmissa (Set Packing) vaaditaan, että tietyistä alijoukosta ei oteta mukaan ratkaisuun kuin korkeintaan tietty määrä kohteita. Pakkausongelman rajoitteet ovat muotoa $\sum_{i \in A_i} x_i \leq b$, missä A_i on päätösmuuttujaan x_i liittyvä tietty alijoukko ja b vakio (yleensä yksi, mutta voi olla muukin suhteellisen pieni kokonaisluku). On olemassa myös ositusongelmia (Set Partitioning), joissa vaaditaan, että tietyistä alijoukosta otetaan mukaan ratkaisuun täsmälleen yksi kohde. Ositusongelman rajoitukset ovat siis muotoa $\sum_{i \in A_i} x_i = 1$. [39]

2.1.2 Maksimaalisen kattavuuden ongelma

Maksimaalisen kattavuuden ongelma (Maximal Covering Location Problem) on peitto-ongelmasta poiketen muotoiltu ottamaan huomioon sellaiset sijoittamisongelmat, joissa sijoitettavien laitosten lukumäärälle on olemassa yläraja. Mallin kohdefunktio maksimoi sen tarpeen määrää, mikä ennalta sovitulla p kappaleella laitoksia pystytään kattamaan. [10]

Otetaan käyttöön muutama uusi merkintä jo esiteltyjen lisäksi [10]:

h_i = tarvesolmun i kysyntä

p = sijoitettavien laitosten lukumäärä

$$z_i = \begin{cases} 1, & \text{jos tarvesolmu } i \text{ katetaan} \\ 0, & \text{muuten} \end{cases}$$

Tällöin maksimaalisen kattavuuden ongelma MCLP saa muodon [10]

$$\max \quad \sum_{i \in I} h_i z_i \quad (7)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j \in N_i} x_j - z_i \geq 0 \quad \forall i \in I \quad (8)$$

$$\sum_{j \in J} x_j = p \quad (9)$$

$$x_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J \quad (10)$$

$$z_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I. \quad (11)$$

Kohdefunktio (7) maksimoi yhteenlaskettua katetun kysynnän määrää eli toisin sanoen etsii sellaista p laitosta koskevaa sijoittamissuunnitelmaa, joka pystyy parhaiten vastaamaan tarvesolmuissa esiintyvään kysyntään. Rajoiterypäs (8) varmistaa, ettei tarvesolmua i lasketa katetuksi ellei laitosta sijoiteta vähintään yhteen niistä mahdollisista sijoituspaikoista, jotka kattavat kyseisen solmun. Rajoite (9) kertoo sijoitettavien laitosten lukumäärän. Rajoiteryppäät (10) ja (11) kuvaavat sekä mahdollisen sijoituspaikan käyttöönoton että tarvesolmun kattamisen binääristä luonnetta. Maksimaalisen kattavuuden ongelman mahdollisten laitosten sijoituspaikkojen joukko voidaan laajentaa tarvesolmuista myös niitä yhdistäville janoille samoin kuin peitto-ongelman tapauksessa. [10]

Mielenkiintoista maksimaalisen kattavuuden ongelmassa on se, että vaihtelemalla sijoitettavien asemien lukumäärää p ykkösestä aina siihen minimaaliseen laitosten lukumäärään asti, millä pystytään kattamaan kaikki tarvesolmut, kyetään määrittämään lisälaitosten sijoittamisesta saatava hyöty. [10]

2.1.3 P-keskusongelma

P-keskusongelma pyrkii sijoittamaan ennalta sovitun määrän (p kappaletta) laitoksia siten, että minimoidaan maksimaalinen etäisyys tarvesolmusta lähimpään laitokseen. P-keskusongelmasta on olemassa useita variaatioita. Kärkipiste-versio P-keskusongelmasta vaatii, että laitos täytyy sijoittaa tarvesolmuihin kun taas absoluuttinen P-keskusongelma antaa sijoittaa laitoksen mihin tahansa kohtaan verkostoa (myös solmuja yhdistäville janoille). P-keskusongelmat voivat olla painoitettuja tai painottamattomia. Painot kuvaavat yleensä tarvesolmun tärkeyttä tai kysynnän tasoa. [10]

Otetaan käyttöön vielä seuraavat uudet merkinnät [10]:

W = maksimaalinen etäisyys tarvesolmun ja siihen liitetyn

laitoksen välillä

$$y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{jos tarvesolmu } i \text{ liitetään sijaintipaikkaan } j \text{ perustettavaan laitokseen} \\ 0, & \text{muuten} \end{cases}$$

Tällöin P-keskusongelma saa muodon [10]

$$\min \quad W \quad (12)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j \in J} x_j = p \quad (13)$$

$$\sum_{j \in J} y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (14)$$

$$y_{ij} - x_j \leq 0 \quad \forall i \in I, j \in J \quad (15)$$

$$W - \sum_{j \in J} h_i d_{ij} y_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in I \quad (16)$$

$$x_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J \quad (17)$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, j \in J. \quad (18)$$

Kohdefunktio (12) minimoi maksimaalista kysyntä-painotettua etäisyyttä jokaisen tarvesolmun ja sen lähimmän avoimen laitoksen välillä. Rajoite (13) vaatii, että sijoitetaan tasan p kappaletta laitoksia. Rajoiterypäs (14) vaatii, että jokainen tarvesolmu tulee liittää täsmälleen yhteen laitokseen. Rajoiterypäs (15) rajaa, että tarvesolmu voidaan liittää vain avoimiin laitoksiin. Rajoite (16) määrittää alarajan minimoitavalle maksimaaliselle kysyntä-painotetulle etäisyydelle. Rajoiterypäs (17) vaatii, että laitos joko avataan paikkaan j tai sitten ei, eikä muita vaihtoehtoja ole. Rajoiterypäs (18) vaatii, että solmussa esiintyvä kysyntä voidaan liittää vain yhteen laitokseen. [10]

P-keskusongelma on tyypillinen pullonkaulaongelma. Pullonkaulaongelmiin lasketaan kuuluvaksi sekä P-keskusongelman kaltaiset min-max ongelmat, joissa minimoidaan maksimia, että max-min ongelmat, joissa maksimoidaan äärellisestä joukosta otettua minimia. Pullonkaulaongelmaa voidaan pitää hyvin havainnollistavana nimityksenä, sillä tämän tehtävätyypin ongelmissa pyritään optimoimaan huonointa tapausta. [38]

2.2 P-mediaaniongelma

P-mediaaniongelma pyrkii sijoittamaan ennalta sovitun määrän (p kappaletta) laitoksia siten, että kysyntäpainotettu kokonaisetäisyys tarvesolmujen ja

laitosten, joihin kyseinen tarvesolmu on kiinnitetty, välillä on mahdollisimman pieni [10].

P-mediaaniongelma on muotoa [10]

$$\min \quad \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} h_i d_{ij} y_{ij} \quad (19)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j \in J} x_j = p \quad (20)$$

$$\sum_{j \in J} y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (21)$$

$$y_{ij} - x_j \leq 0 \quad \forall i \in I, j \in J \quad (22)$$

$$x_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J \quad (23)$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, j \in J. \quad (24)$$

Kohdefunktio (19) minimoi kysyntä-painotettua matkustettua kokonaisuutaisuutta. P-mediaaniongelmaan liittyvät rajoitteet ovat P-keskusongelmasta tuttua muotoa. [10]

2.3 Kattavuuteen perustuvien mallien laajennuksia

Daskin mainitsee kirjassaan [11] kaikkien edellä mainittujen neljän klassisen kattavuuteen perustuvan lähestymistavan sivuuttavan kokonaan muutamia tärkeitä аспекteja, mitkä tulisi ottaa huomioon ambulanssien optimaalisesta sijoittamisesta puhuttaessa. Yksi näistä on tarpeen ilmaantuvuuden stokastinen luonne. Ei ole realistista olettaa, että lähin ambulanssi olisi aina käytettävissä tarpeen ilmaantuessa. Perinteisissä deterministisissä malleissa näin joudutaan kuitenkin aina olettamaan. Stokastisissa optimointimalleissa kyseinen oletus poistuu, sillä ainakin osa parametreista on vakioiden sijaan satunnaismuuttujia [39].

Stokastista optimointia on hyödynnetty esimerkiksi artikkelissa [2] korvaamalla perinteinen 0/1-pohjainen kattavuuden käsite todennäköisyydellä, jolla tarvesolmu pystytään kattamaan tavoiteajan sisällä. Artikkelissa [2] selvitetään sekä ambulanssiasemien optimaaliset sijoituspaikat että minimaaliset ambulanssimäärät, jotka tavoitellun palvelutason takaamiseksi kullekin

ambulanssiasemalle tulisi sijoittaa. Käytännössä Alsalloumin ja Randin työ jakaantuu kahteen vaiheeseen. Ensin ratkaistaan optimointiongelma, jonka tavoite on sijoittaa asemat siten, että maksimaaliseen odotettuun kysyntään pystytään vastaamaan ennaltamääritetyssä tavoiteajassa. Tämän jälkeen varmistetaan, että mille tahansa kysynnälle, joka ilmenee aseman palvelualueen sisällä, löytyy vähintään yksi käytettävissä oleva ambulanssi. [2]

Artikkelissa [47] esitellään stokastista ajattelutapaa hyödyntäviä laitosten optimaaliseen sijoittamiseen liittyviä malleja, esimerkiksi jonottava sijoittamisongelma (Queueing Location Problem) ja odotetun katumuksen ongelma (Expected Regret Problem).

Maksimaalinen odotetun kattavuuden ongelma (Maximum Expected Covering Location Problem) on yksi yleisen tason stokastinen laajennus maksimaalisen kattavuuden ongelmasta. Maksimaalisen odotetun kattavuuden ongelmassa oletetaan, että jokaisella ambulanssilla on sama kiireellisyyskerroimeksi nimitetty todennäköisyys q , jolla kyseinen ambulanssi ei kykene vastaamaan hälytykseen. Ambulanssien oletetaan olevan keskenään riippumattomia.

Kiireellisyyskerrointa q voidaan arvioida jakamalla kaikissa tarvesolmuissa ilmenneiden hälytysten yhteenlaskettu kesto käytettävissä olevien ambulanssien lukumäärällä. Jos tarvesolmu i on katettu k :n ambulanssin toimesta, vastaava odotetun kattavuuden kysyntä on $E_k = d_i(1 - q_k)$ ja k :nnen ambulanssin vaikutus odotettuun arvoon on $E_k - E_{k-1} = h_i(1 - q)q^{k-1}$. Maksimaalisen odotetun kattavuuden ongelmassa voidaan sijoittaa yhteensä p kappaletta ambulansseja ja samaan tarvesolmuun voidaan sijoittaa useampi ambulanssi.

Merkitään symbolilla y_{ik} binääristä muuttujaa, joka on yksi, jos tarvesolmu i on katettu vähintään k :n ambulanssin toimesta. Muutetaan joukon N_i määritelmää sen verran, että kyseessä on jatkossa joukko niiden asemapaikkojen indeksejä, jotka kattavat tarvesolmun i siinä mielessä, että asemapaikasta j pystytään tavoittamaan tarvesolmu i palvelustandardin r sisällä. Palvelustandardi r on käytännössä tietty minuuttimäärä. [6], [47]

Aiemmin tässä kappaleessa esiteltyjä merkintöjä käyttäen maksimaalisen

odotetun kattavuuden ongelma MEXCLP saa muodon [6]

$$\max \quad \sum_{i \in I} \sum_{k=1}^p h_i (1-q) q^{(k-1)} y_{ik} \quad (25)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j \in N_i} x_j \geq \sum_{k=1}^p y_{ik} \quad (i \in I) \quad (26)$$

$$\sum_{j \in J} x_j \leq p \quad (27)$$

$$x_j \in \mathbb{Z}_+ \quad (j \in J) \quad (28)$$

$$y_{ik} \in \{0, 1\} \quad (i \in I, k = 1, \dots, p). \quad (29)$$

Toinen tapa laajentaa kattavuuden käsitteeseen perustuvia klassisia optimointiongelmia on siirtyä pois staattisesta ajattelutavasta. Tällöin puhutaan dynaamisesta optimoinnista. Artikkelissa [47] on esitelty myös dynaamisen optimoinnin soveltuvuutta laitosten sijoittamisongelmaan. Mikäli haluamme hälytysajoneuvojen sijoittamisesta puhuttaessa välttää siltä, että olosuhteiden muuttuessa jotkin alueet jäävät kattamatta, niiden uudelleensijoittaminen täytyy toteuttaa tasaisin väliajoin. Brothornen et al. mukaan ambulanssien uudelleensijoittamismalleja on olemassa vain yksi [6]. Gendreau et al. artikkelissa [18] kehittämä malli ottaa kattavuusvaatimuksia ja sijoituspaikkoja koskevien kapasiteettirajoitusten lisäksi huomioon useita ongelman dynaamista luonnetta heijastavia ominaisuuksia:

- Peräkkäisissä uudelleenjärjestelyissä siirreltävät ambulanssit eivät saa olla aina samoja
- Toistuvia edestakaisia matkoja kahden saman aseman välillä tulee välttää
- Pitkiä matkoja lähtö- ja päätepuoleiden välillä tulee välttää.

Ambulanssien uudelleenjärjestelyongelma ratkaisuprosessi toistuu aina, kun ilmaantuu uusi hälytys ja sen rekisteröintiin liittyvä ajanhetki t . Ongelman dynaaminen aspekti on linkitetty ajasta riippuviin vakioihin M_{jl}^t , jotka kuvaavat kustannusta, joka koituu, kun ambulanssin l siirretään sen nykyiseltä asemalta paikalta asemapaikkaan j ajanhetkellä t . Vakio M_{jl}^t voi olla

myös nolla, jos uusi asemapaikka j on sama kuin ambulanssin nykyinen sijaintipaikka. Vakio M_{jl}^t sisältää informaatiota ambulanssin l historiasta. Jos kyseistä ambulanssia on siirrelty tiheästi ennen ajanhetkeä t , vakio on suurempi.

Jos ambulanssin l siirtäminen nykyisestä sijaintipaikasta uuteen asemapaikkaan rikkoo jotain optimointiongelman rajoituksista, siirto yksinkertaisesti hylätään. Binäärinen muuttuja y_{jl} saa arvon yksi, jos ambulanssi l siirretään asemapaikkaan j . Merkitään symbolilla $N1_i$ niiden asemapaikkojen indeksijoukkoa, jotka kuuluvat ensimmäisen palvelustandardin r_1 sisään. Vastaavasti $N2_i = \{j \in J \mid d_{ij} \leq r_2\}$. Palvelustandardi r_1 on aina pienempi tai yhtäsuuri kuin palvelustandardi r_2 . Kaiken kysynnän tulee olla katettuna r_2 palvelustandardin mukaisen minuuttimäärän sisällä ja kertoimen α kokoinen osuus kysynnästä tulee olla katettuna r_1 palvelustandardin mukaisen minuuttimäärän sisällä. Symboli $x_{i,k}$ saa arvon yksi, jos tarvesolmu i kateetaan palvelustandardia r_1 vastaavan minuuttimäärän aikana k kertaa ($k = 1$ tai $k = 2$). [6]

Ottamalla mukaan jo aiemmin tässä kappaleessa esiteltyt merkinnät dynaaminen kaksinkertaisen standardin malli ajanhetkellä t (DDSM^t) saa muodon [6]

$$\max \quad \sum_{i \in I} h_i x_{i,2} - \sum_{j \in J} \sum_{l=1}^p M_{jl}^t y_{jl} \quad (30)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j \in N2_i} \sum_{l=1}^p y_{jl} \geq 1 \quad (i \in I) \quad (31)$$

$$\sum_{i \in I} h_i x_{i,1} \geq \alpha \sum_{i \in I} h_i \quad (32)$$

$$\sum_{j \in N1_i} \sum_{l=1}^p y_{il} \geq x_{i,1} + x_{i,2} \quad (i \in I) \quad (33)$$

$$x_{i,2} \leq x_{i,1} \quad (i \in I) \quad (34)$$

$$\sum_{j \in J} y_{jl} = 1 \quad (l = 1, \dots, p) \quad (35)$$

$$\sum_{l=1}^p y_{lj} \leq p_j \quad (j \in J) \quad (36)$$

$$x_{i,1}, x_{i,2} \in \{0, 1\} \quad (i \in I) \quad (37)$$

$$y_{jl} \in \{0, 1\} \quad (j \in J, l = 1, \dots, p). \quad (38)$$

Kohdefunktiossa (30) kahdesti r_1 aikayksikön sisällä katetun kysynnän määrästä vähennetään ambulanssien siirtämisestä ajanhetkellä t koituvien sakkojen summa [6].

Stokastisten ja dynaamisten laajennusten lisäksi on olemassa paljon erilaisia kattavuuden perusoptimointiongelmiä (varsinkin SCLP:n ja MCLP:n) laajennuksia. Artikkeleista [14] ja [13] löytyy perusteellinen selvitys näistä.

3 Monitavoiteoptimointi

Optimointiongelmat voidaan luokitella myös tavoitteiden lukumäärän mukaan [38]. Mikäli tavoitteita on enemmän kuin yksi, puhutaan monitavoiteoptimoinnista. Moniin reaali maailman ongelmiin on hyvin vaikeaa (jos ei jopa mahdotonta) pyrkiä löytämään optimaalista ratkaisua tähtäämällä vain yhden tavoitteen mahdollisimman hyvään toteutumiseen. Usein saatetaan pyrkiä samanaikaisesti ratkaisusta saatavan hyödyn maksimoimiseen (esimerkiksi saavutettu kattavuustaso tai luotettavuus) ja ratkaisun aiheuttamien kustannusten minimoimiseen. Monitavoiteoptimointiongelman kohdefunktiot ovatkin monesti keskenään ristiriidassa.

Yleinen monitavoiteoptimointiongelma on muotoa

$$\min \quad \{f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_k(\mathbf{x})\} \quad (39)$$

$$\text{s.t.} \quad \mathbf{x} \in S, \quad (40)$$

missä kohdefunktioita $f_i : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ on $k \geq 2$ kappaletta. Mikäli monitavoiteoptimointiongelman päätösmuuttuja on diskreetti, kohdefunktioiden f_i määrittelyjoukko on \mathbb{R}^n sijaan \mathbb{Z}^n . Merkitään kohdevektoria $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = (f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_k(\mathbf{x}))^T$. Päätösvektori $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ kuuluu epätyhjään sallittujen ratkaisujen joukkoon S , joka on \mathbb{R}^n (tai diskreetin muuttujan tapauksessa \mathbb{Z}^n) aliavaruus. Sallittuun joukkoon kuuluvat ne n -ulotteiset päätösvektorit, jotka toteuttavat monitavoiteoptimointiongelman rajoitteet.

Sallitun joukon kuvaa merkitään symbolilla $Z(= \mathbf{f}(S))$, ja se on kohdeavaruuden \mathbb{R}^k aliavaruus. Joukkoon Z kuuluva elementti koostuu kohdefunktioiden arvoista sallitussa pisteessä, $\mathbf{z} = (z_1, z_2, \dots, z_k)^T$, missä $z_i = f_i(\mathbf{x}) \quad \forall i = 1, \dots, k$. [32]

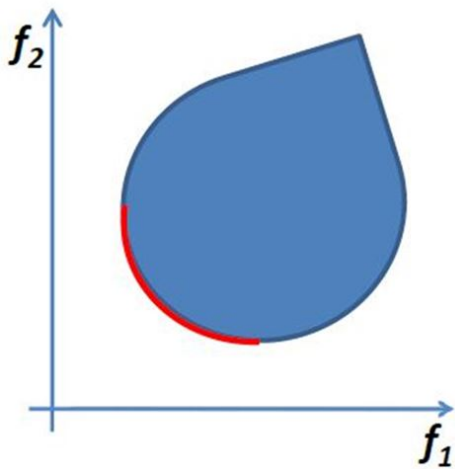
Optimointiongelmassa käsiteltävien tavoitteiden lukumäärän kasvaessa ykköstä suuremmaksi optimaalisuuden käsite vaikeutuu huomattavasti. Kohdefunktioiden keskinäisten ristiriitaisuuksien vuoksi ei ole mahdollista löytää yhtä n -ulotteista pistettä, joka tuottaisi kaikille kohdefunktioille optimaalisen arvon. Monitavoiteongelmat ovat tässä mielessä huonosti asetettuja. Kohdeavaruus ei ole vain osittain järjestäytyneenä luonnollisesti järjestäytynyt. Tämä tarkoittaa sitä, että vaikka pystymme sanomaan kohdeavaruuden vektorin $\{1, 1\}$ olemaan vektoria $\{2, 2\}$ parempi, emme pysty samalla tavalla vertailemaan kohdeavaruuden vektoreita $\{1, 2\}$ ja $\{2, 1\}$. Jotain karsintaa optimaalisia ratkaisuja haettaessa pystytään kuitenkin vektorijoukolle tekemään. Suljetaan ulos sellaiset vektorit, joiden mitään komponenttia ei voida parantaa huonontamatta vähintään yhtä muista komponenteista. [32]

Määritelmä 3.1 ([32]). Päätösvektori $\mathbf{x}^* \in S$ on *Pareto-optimaalinen*, jos ei ole olemassa toista päätösvektoria $\mathbf{x} \in S$, jolle pätee $f_i(\mathbf{x}) \leq f_i(\mathbf{x}^*) \quad \forall i = 1, \dots, k$ ja $f_j(\mathbf{x}) < f_j(\mathbf{x}^*)$ ainakin yhdelle indeksille j .

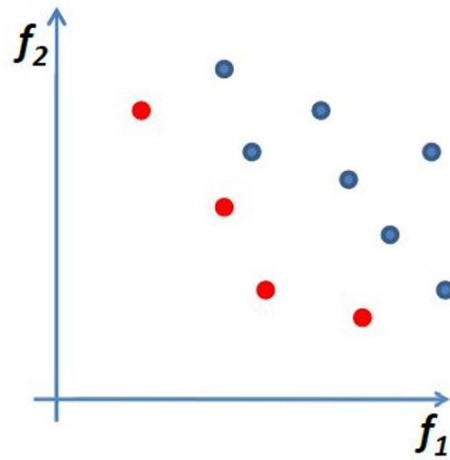
Kohdevektori $\mathbf{z}^* \in Z$ on Pareto-optimaalinen, jos ei ole olemassa toista päätösvektoria $\mathbf{z} \in Z$, jolle pätee $z_i \leq z_i^* \quad \forall i = 1, \dots, k$ ja $z_j < z_j^*$ ainakin yhdelle indeksille j ; tai ekvivalentisti, \mathbf{z}^* on Pareto-optimaalinen, jos sitä vastaava päätösvektori on Pareto-optimaalinen.

Pareto-optimaalisista ratkaisuista muodostuvaa pintaa voidaan havainnollistaa graafisesti. Graafinen esitysmuoto on erityisen mielekäs silloin, kun monitavoiteoptimointiongelma koostuu kahdesta tavoitteesta. Kun ensimmäisen tavoitteen saamia arvoja merkitään $f_1 = f_1(\mathbf{x})$ ja toisen tavoitteen $f_2 = f_2(\mathbf{x})$, niin (f_1, f_2) -avaruudessa ratkaisu on Pareto-optimaalinen, jos ei ole olemassa yhtään toista ratkaisua, joka sijaitsisi kyseisestä kaksiulotteisesta ratkaisupisteestä katsottuna idän ja pohjoisen väliin jäävällä suunnalla. [38]

Lähteeseen [20] pohjautuvassa kuvassa 2 on havainnollistettu, minne Pareto-optimaaliset ratkaisut sijoittuvat kohdefunktioiden $f_1(\mathbf{x})$ ja $f_2(\mathbf{x})$ arvojoukkojen määrittämässä koordinaatistossa. Kuvassa 2(a) kaksitavoitteiseen monitavoiteoptimointiongelmaan liittyvä päätösmuuttuja on jatkuva ja kuvassa 2(b) diskreetti. Huomataan, että käytettäessä diskreettiä päätösmuuttujaa, Pareto-optimaalinen joukko koostuu yksittäisistä pisteistä yhteisen käyrän sijaan.



(a) Esimerkki jatkuvan päätösmuuttujan monitavoiteoptimointiongelman Pareto-optimaalisesta pinnasta.



(b) Esimerkki diskreetin päätösmuuttujan monitavoiteoptimointiongelman Pareto-optimaalisista pisteistä.

Kuva 2: Kaksiulotteisen monitavoiteoptimointiongelman Pareto-optimaaliset ratkaisut.

Määritelmässä **3.1** esitellyn globaalin Pareto-optimaalisuuden lisäksi Pareto-optimaalisuus on olemassa myös lokaalina ilmiönä.

Määritelmä 3.2 ([32]). Päätösvektori $\mathbf{x}^* \in S$ on *lokaalisti Pareto-optimaalinen*, jos on olemassa $\delta > 0$ siten, että \mathbf{x}^* on Pareto-optimaalinen ympäristössä $S \cap B(\mathbf{x}^*, \delta)$.

Kohdevektori $\mathbf{z}^* \in Z$ on lokaalisti Pareto-optimaalinen, jos sitä vastaava päätösvektori on lokaalisti Pareto-optimaalinen.

Yleisyyden lisäksi Pareto-optimaaliset ratkaisut voidaan jaotella myös niiden "voimakkuuden" mukaan. Tällöin puhutaan aidosti ja heikosti Pareto-optimaalisista ratkaisuista.

Määritelmä 3.3 ([32]). Päätösvektori $\mathbf{x}^* \in S$ on *aidosti Pareto-optimaalinen*, jos ei ole olemassa toista päätösvektoria $\mathbf{x} \in S$, jolle pätee $f_i(\mathbf{x}) \leq f_i(\mathbf{x}^*) \quad \forall i = 1, \dots, k$.

Kohdevektori $\mathbf{z}^* \in Z$ on aidosti Pareto-optimaalinen, jos ei ole olemassa toista päätösvektoria $\mathbf{z} \in Z$, jolle pätee $z_i \leq z_i^* \quad \forall i = 1, \dots, k$; tai ekvivalentisti, \mathbf{z}^* on aidosti Pareto-optimaalinen, jos sitä vastaava päätösvektori on aidosti Pareto-optimaalinen.

Määritelmä 3.4 ([32]). Päätösvektori $\mathbf{x}^* \in S$ on *heikosti Pareto-optimaalinen*, jos ei ole olemassa toista päätösvektoria $\mathbf{x} \in S$, jolle pätee $f_i(\mathbf{x}) < f_i(\mathbf{x}^*) \quad \forall i = 1, \dots, k$.

Kohdevektori $\mathbf{z}^* \in Z$ on heikosti Pareto-optimaalinen, jos ei ole olemassa toista päätösvektoria $\mathbf{z} \in Z$, jolle pätee $z_i < z_i^* \quad \forall i = 1, \dots, k$; tai ekvivalentisti, \mathbf{z}^* on heikosti Pareto-optimaalinen, jos sitä vastaava päätösvektori on heikosti Pareto-optimaalinen.

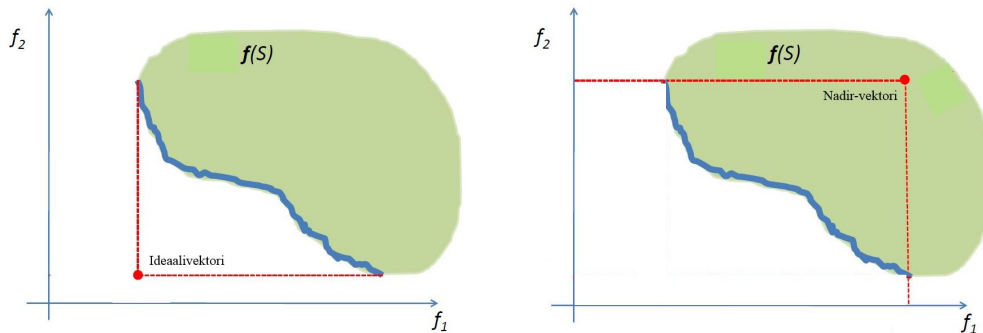
Aidosti Pareto-optimaalinen ratkaisu on aina myös Pareto-optimaalinen. Jokainen Pareto-optimaalinen ratkaisu puolestaan on aina myös heikosti Pareto-optimaalinen. Heikosti Pareto-optimaalisten päätösvektoreiden joukko siis sisältää Pareto-optimaalisten päätösvektoreiden joukon, joka edelleen sisältää aidosti Pareto-optimaalisten päätösvektoreiden joukon.

Lopullisen ratkaisun valinta Pareto-optimaalisten ratkaisujen joukosta jää päätöksentekijän harteille. Yleisesti ottaen päätöksentekijällä viitataan sellaiseen henkilöön, jonka oletetaan tuntevan ratkaisuprosessin kohteena oleva monitavoiteoptimointiongelma ja pystyvän tarjoamaan erilaisten ratkaisuvaihtoehtojen preferointiin liittyvää tietoa. [5]

Ihanteellisen kriteerivektorin ja nadir-vektorin määrittäminen voi auttaa päätöksentekijää valitsemaan "parhaan" vaihtoehdon Pareto-optimaalisten ratkaisujen joukosta. Ihanteellinen kriteerivektori nimittäin antaa alarajan kunkin kohdefunktion Pareto-optimaaliselle joukolle. Vastaavasti

nadir-vektorin avulla pystytään arvioimaan kunkin kohdefunktion Pareto-optimaalisen joukon ylärajaa. Ihanteellinen kriteerivektori toimii myös kätevästi referenssipisteenä ratkaisun "hyvyyttä" pohdittaessa. [32]

Ihanteellisen kriteerivektorin ja nadir-vektorin havainnollistamiseen graafisen esitysmuodon kautta pätee samat lainalaisuudet kuin Pareto-optimaalisista ratkaisuihin koostuvan pinnan havainnollistamiseenkin; graafinen esittäminen on erityisen mielekäs silloin, kun monitavoiteoptimointiongelma koostuu kahdesta tavoitteesta. Lähteeseen [20] pohjautuvissa kuvissa 3(a) ja 3(b) esiintyvä $f(S)$ merkitsee monitavoiteoptimointiongelman kohdeavaruutta ja sininen kiemurteleva viiva taas Pareto-optimaalisten ratkaisujen joukkoa. Kuvat 3(a) ja 3(b) kuvaavat nyt molemmat sellaista tilannetta, jossa monitavoiteoptimointiongelman päätösmuuttuja on jatkuva. Sama periaate pätee kuitenkin myös diskreeteille päätösmuuttujille. Ainut ero olisi se, että yhtenäisen joukon sijaan meillä olisi rykelmä pisteitä (vastaavasti kuin kuvassa 2(b)).



(a) Esimerkki ihanteellisen kriteerivektorin sijainnista suhteessa kohdeavaruuteen $f(S)$ ja Pareto-optimaaliseen ratkaisujoukkoon.

(b) Esimerkki nadir-vektorin sijainnista suhteessa kohdeavaruuteen $f(S)$ ja Pareto-optimaaliseen ratkaisujoukkoon.

Kuva 3: Kaksiulotteisen monitavoiteoptimointiongelman Pareto-optimaalisen joukon ylä- ja alarajaa kuvastavat pisteet.

Ihanteellisen kriteerivektorin arvon määrittäminen kuvan perusteella muuttuu sitä vaikeammaksi mitä korkeammaksi monitavoiteoptimointiongelman kohdefunktioiden lukumäärä nousee. Ihanteellisen kriteerivektorin arvot

pystytään kuitenkin aina määrittämään tarkasti hyödyntämällä seuraavaa määritelmää.

Määritelmä 3.5 ([32]). Ihanteellisen kriteerivektorin $\mathbf{z}^* \in \mathbb{R}^k$ komponentit z_i^* määritetään minimoimalla jokainen kohdefunktioista yksitellen rajoitteiden suhteen eli ratkaisemalla

$$\min \quad f_i(\mathbf{x}) \quad (41)$$

$$\text{s.t.} \quad \mathbf{x} \in S, \quad (42)$$

kaikille $i = 1, \dots, k$.

Pareto-optimaalisen joukon kohdefunktiokohtaisten ylärajojen määrittäminen onkin sitten hankalampaa. Nadir-vektoriksi kutsuttavan epätäydellisen kohdevektorin komponentteja voidaan kuitenkin arvioida käyttämällä hyväksi maksutaulukkoa (payoff table). Maksutaulukko muodostetaan laskemalla kaikkien yksittäisten kohdefunktioiden arvot kaikissa niissä päätösvektoreissa, joilla jokin kohdefunktioista saa minimiarvonsa. Rivi i sisältää kaikkien kohdefunktioiden arvot laskettuna siinä päätösmuuttuja-avaruuden pisteessä, jossa kohdefunktio f_i saavuttaa miniminsä. Ihanteellinen kriteerivektori \mathbf{z}^* muodostuu maksutaulukon päädiagonaalille. Maksutaulukon sarakkeen i suurinta arvoa voidaan pitää arviona kohdefunktion $f_i, i = 1, \dots, n$, Pareto-optimaalisen joukon ylärajalle. Nadir-vektori voi kuulua sallitulle alueelle tai sen ulkopuolelle. Siitä, että edellä kuvatulla tavalla määritetyt arviot nadir-vektorin komponenteille tosiaan olisivat oikeat, ei ole mitään takuita. Saadut arviot saattavat olla liian suuria tai liian pieniä. Tähän on kuitenkin tyytyminen, sillä epälineaarisille monitavoiteoptimointiongelmille ei ole olemassa konstruktivista menetelmää nadir-vektorin tarkkaan määrittämiseen. [32]

3.1 Sijoittamiseen liittyviä monitavoiteoptimointimalleja

Mahdollisuus useiden toisistaan poikkeavien tavoitteiden asettamiseen antaa meille uuden näkökulman, josta lähestyä ambulanssien optimaalista sijoitta-

mista. Diskreettien yksitavoitteisten optimointiongelmien ja monitavoiteoptimointiongelmien leikkauskohdassa on olemassa suurta potentiaalia todellisen maailman ilmiöiden mallintamiseen. Samoin kuin yksitavoitteistenkin mallien tapauksessa, monitavoiteoptimointiin liittyvässä kirjallisuudessa on yleensä käsitelty ambulanssien optimaalisen sijoittamisen ongelmaa alisteisena ambulanssiasemien optimaalisen sijoittamissuunnitelman selvittämiseksi.

Farahani et. al. tarjoavat artikkelissaan [16] kattavan listauksen niistä kriteereistä, joita laitosten sijoittamiseen liittyvissä optimointiongelmissa on käytetty hyväksi:

- Kustannusten minimointi. On olemassa erityyppisiä kustannuksia, jotka voidaan jakaa kiinteisiin ja muuttuviin. Kiinteisiin kustannuksiin kuuluvat muun muassa laitoksen rakentamiskustannukset ja muuttuviin kustannuksiin taas esimerkiksi kuljetuksista, operaatioista, jätteenkäsittelystä, ylläpidosta tai palveluista koituvat kustannukset
→ Kiinteän maksun laitosten sijoittamisongelma
- Ympäristöriskien minimointi. Ympäristöriskeillä voidaan viitata kuljetuksiin tai jätteiden hävittämiseen/käsittelyyn liittyviin riskeihin
- Kattavuuden maksimointi. Kattavuus voidaan määritellä useilla eri tavoilla (kappale 2.1), mutta tässä listauksessa kattavuudella tarkoitetaan etäisyydestä tai ajasta riippuvaa ilmiötä
→ Maksimaalisen kattavuuden ongelma
- Tehokkuuden tai palvelutasojen maksimointi. Tehokkuudella voidaan viitata esimerkiksi tietyssä ajassa valmiiksi saatavien tuotteiden lukumäärään. Palvelutaso voi liittyä käytännössä palveluvalmiuteen, joka usein on riippuvainen tarvesolmun ja laitoksen välisestä etäisyydestä
→ P-keskusongelma, P-mediaaniongelma
- Tuoton/hyödyn maksimointi. Kyse voi olla joko rahallisesta tuotosta tai siitä, kuinka montaa ihmistä tietty sijoittamisratkaisu hyödyttää (eli käytännössä tuo palvelun heidän ulottuvilleen)

- Muut kriteerit. Voidaan haluta esimerkiksi maksimoida raaka-aineiden saannin helppoutta tai minimoida poliittisia riskejä.

Artikkelissa [16] muotoillaan myös muutamia kriteerejä, jotka voisivat tuoda monitavoiteoptimointiin uusia ulottuvuuksia. Tällaisia ovat esimerkiksi ratkaisujen luotettavuuden, stokastisuuden ja kestävyuden huomioon ottaminen. Myös erilaisten ratkaisujen muodostamien verkostojen rakenteen ja tarjontaketjujen tarkasteluun kannustetaan. Näin yleisten ajatusten määrittäminen jollakin tavalla numeerisesti vertailtavaksi voi kuitenkin olla hankalaa. Farahani et al. tuovat kuitenkin kirjallisuuskatsauksessaan [16] hyvin esiin sen, että optimaalisen laitosten sijoittamissuunnitelman kartoittamiseen liittyy todella paljon erilaisia аспекteja, joissa vain mielikuviutus on rajana. Toisaalta tämä tarkoittaa myös sitä, että on monitavoiteoptimointimallin muodostajan vastuulla tunnistaa optimoitavan ilmiön kannalta oleelliset tekijät ja keksiä, miten näiden toteutumista voidaan mahdollisimman luotettavasti arvioida.

Farahanin et al. kirjassa [15] on pyritty luokittelemaan monitavoitteisiin sijoittamisongelmiin liittyviä kohdefunktiota niiden rakenteen perusteella. Kyseisen kirjan mukaan on olemassa tasapainottavia kohdefunktioita, vetotyyllisiä kohdefunktioita (pull objectives), työntötyylyisiä kohdefunktioita (push objectives) ja veto-työntö -tyylyisiä kohdefunktioita (pull-push objectives).

Tasapainottavien kohdefunktioiden tavoitteena on nimensä mukaisesti pyrkiä maksimaaliseen tasapuolisuuteen tai takaamaan palveluiden tasainen jakautuminen käyttäjien kesken. Tapa, jolla tasapuolisuutta mitataan, vaihtelee eri ongelmien välillä. Yksi tapa on pyrkiä minimoimaan kokonaisetäisyyttä tarvesolmuista laitoksiin. Tämä on tilastollisessa mielessä sama asia kuin pyrkiä minimoimaan keskimääräistä etäisyyttä tarvesolmuista lähimpään laitokseen. [15]

Vetotyylliset kohdefunktiot liittyvät usein klassisiksi miellettyihin yksitavoitteisiin sijoittamismalleihin. Esimerkiksi P-mediaaniongelman min-sum ja P-keskusongelman min-max lähestymistavat ovat tyypillisiä vetotyyllisten kohdefunktioiden alaluokkia. Vetotyyllisissä kohdefunktioissa voidaan yrittää minimoida esimerkiksi tehtaiden ja niissä valmistettavia tuotteita myyvien

kauppojen etäisyyttä, joka johtaa edelleen kuljetuskulujen minimoimiseen ja asiakkaiden saatavuuden maksimoimiseen. [15]

Työntötyylisissä kohdefunktioissa taas keskitytään siihen, että laitosten sijoittamisesta aiheutuisi mahdollisimman vähän haittaa tarvesolmuille. Useimmissa tapauksissa haitallinen vaikutus on kääntäen verrannollinen etäisyyteen, jolloin työntötyylisissä kohdefunktioissa pyritään maksimoimaan laitosten ja tarvesolmujen välinen etäisyys. [15]

Usein reaali maailman ongelmista puhuttaessa samaan asiaan voi liittyä sekä vetotyylisiä että työntötyylisiä ominaisuuksia. Ei ole mitenkään tavatonta, että ihmiset toivovat jonkin laitoksen sijaitsevan lähellä, mutta ei kuitenkaan liian lähellä. Veto-työntö -tyyliset kohdefunktiot tarjoavat mahdollisuuden käsitellä keskenään ristiriitaisia tavoitteita saman kohdefunktion sisällä. [15]

Kirjasta [7] löytyy hyvä esimerkki laitosten sijoittamiseen liittyvästä monitavoiteongelmasta. Siinä on hyödynnetty kuutta erilaista kattavuuteen liittyvää kohdefunktiota, joiden avulla optimaalinen paloasemien sijoittamissuunnitelma on määritetty [7]. Myös kirja [29] sisältää tietoa siitä, miten lähestyä terveydenhuoltoon liittyvien päätösten tekemistä monitavoiteoptimoinnin keinoin.

4 Monitavoiteoptimointiongelmiä ratkaisumenetelmiä

Yksi tapa luokitella monitavoiteoptimointimallien ratkaisumenetelmiä perustuu päätöksentekijän rooliin ratkaisuprosessissa. Päätöksentekijä voi vaikuttaa monitavoiteoptimointiongelman ratkaisuprosessiin neljällä eri tavalla: hänellä ei ole mitään roolia ratkaisuprosessissa, hän kertoo oman mielipiteensä kohdefunktioiden tärkeysjärjestyksestä ennen ratkaisumetodin soveltamista, hän kertoo oman mielipiteensä kohdefunktioiden tärkeysjärjestyksestä ratkaisumetodin soveltamisen jälkeen tai hän kertoo omia mielipiteitään kohdefunktioiden tärkeydestä ratkaisuprosessin soveltamisen aikana useaan otteeseen. [5]

Ensimmäisen kategorian ratkaisumenetelmiä kutsutaan ei-mielitymyksiä -menetelmiksi (No-Preference Methods). Ne antavat monitavoiteoptimointiongelmaan neutraalin kompromissiratkaisun. Ratkaisun hakemisessa ei käytetä hyväksi päätöksentekijän preferenssejä vaan tehdään joitain oletuksia siitä, mikä voisi olla järkevä kompromissi. Tyypillisesti menetelmät valitsevat ratkaisun "keskeltä" Pareto-optimaalisten ratkaisujen joukkoa. Ei-mielitymyksiä -menetelmät soveltuvat käytettäviksi silloin, kun päätöksentekijää ei ole saatavilla tai hänelle riittää saada tulokseksi mikä tahansa sallittu Pareto-optimaalinen ratkaisu. [5]

Toisen kategorian ratkaisumenetelmiä kutsutaan etukäteismenetelmiksi (A Priori Methods). Päätöksentekijä ilmaisee kohdefunktioita koskevat toiveensa ennen ratkaisuprosessin alkua. Mielitymykset voidaan ilmaista joko suoranaisesti kohdefunktioiden tärkeysjärjestykseen tai kunkin kohdefunktion arvoa koskeviin tavoitetasoihin liittyen. Etukäteismenetelmien hyvä puoli on se, että jos tyydyttävä ratkaisu pystytään löytämään, päätöksentekijän ei tarvitse investoida ratkaisuprosessiin paljoa aikaa. Huono puoli taas on se, että päätöksentekijä ei välttämättä tiedä, millaisia kohdefunktioiden arvoja on mahdollista saavuttaa. Hän saattaa pettyä tuloksena saamaansa ratkaisuun ja haluta mahdollisesti vaihtaa ratkaisijalle tarjoamiaan preferenssitietoja realistisemmiksi. Halu oppia ratkaisuprosessin edetessä johtaa suoraan neljännen kategorian menetelmiin. [5]

Kolmannen kategorian ratkaisumenetelmiä kutsutaan jälkikäteismenetelmiksi (A Posteriori Methods). Jälkikäteismenetelmistä puhutaan myös Pareto-optimaalisten ratkaisujen joukon generoivina menetelminä. Pareto-optimaalisia ratkaisuja on olemassa joko äärellinen tai ääretön määrä riippuen sekä päätösmuuttujan tyypistä että optimointiongelman rajoitteista. Jälkikäteismenetelmissä päätöksentekijälle tarjotaan Pareto-optimaalisten ratkaisujen joukosta edustajisto, josta päätöksentekijä valitsee lopulliseksi ratkaisuksi häntä eniten miellyttävän vaihtoehdon. Ajatuksena on, että kun päätöksentekijä on saanut yleiskatsauksen erilaisista Pareto-optimaalisista ratkaisuksista, hänen on helpompaa valita "paras" ratkaisu.

Jälkikäteismenetelmien huono puoli on se, että Pareto-optimaalisten ratkaisujen joukon määrittäminen on laskennallisesti raskasta ja usein vähin-

täänkin vaikeaa. Lisäksi päätöksentekijän harteille jäävän valinnan tekeminen muodostuu hankalaksi varsinkin silloin, kun vaihtoehtoja on paljon. Onkin tärkeää miettiä, miten päätöksentekijän valintaprosessia pystyttäisiin tukemaan mahdollisimman hyvin. Pareto-optimaalista joukkoa voidaan visualisoida esimerkiksi k -ulotteisen kuvaajan avulla, mutta se luonnollisesti muuttuu sitä vaikeammaksi/sekavammaksi mitä enemmän ratkaistavaan monitavoiteoptimointiongelmaan liittyy kohdefunktioita. Myös niin kutsuttuja laatikkoindeksijä (box-indices) voidaan hyödyntää ratkaisuvaihtoehtojen vertailussa. [5]

Neljännän kategorian ratkaisumenetelmiä kutsutaan interaktiivisiksi menetelmiksi. Interaktiivinen menetelmä koostuu iteratiivisesta ratkaisuprosessista, jossa päätöksentekijän mieltymykset ohjaavat progressiivisesti menetelmän hakeutumista kohti "optimaalista" ratkaisua. Toisin sanoen preferenssiinformaation hankkimisen (päättösosuus) ja ratkaisun generoimisen (optimointiosuus) vaiheita toistetaan vuorotellen siihen asti, kunnes päätöksentekijä on tyytyväinen saatuun tulokseen tai asetettu lopetuskriteeri täyttyy. Jokaisen iteraatiokierroksen jälkeen menetelmä tarjoaa päätöksentekijälle informaatiota sen hetkisistä ratkaisuvaihtoehdoista. Päätöksentekijää pyydetään arvioimaan niitä kriittisesti tai ilmaisemaan muilla tavoin optimointiongelman ratkaisuun liittyviä preferenssejään. Päätöksentekijän tarjoamaa preferenssitietoa käytetään hyväksi enemmän tai vähemmän eksplisiittisen päätöksentekijän paikallisia mieltymyksiä kuvaavan mallin kehittämisessä. Uusien ratkaisuvaihtoehtojen generointi perustuu tähän malliin. Päätöksentekijä itse ohjaa ratkaisuprosessia, minkä vuoksi interaktiivisissa menetelmissä joudutaan generoimaan ja arvioimaan vain osaa Pareto-optimaalisen joukon ratkaisuista. [5]

Lyhyesti kuvailtuna yleisen interaktiivisen ratkaisumenetelmän askeleet ovat seuraavat [5]:

Askel 0 Alustetaan monitavoiteoptimointiongelman ratkaisuprosessi esimerkiksi määrittämällä ihanteellinen kriteerivektori sekä nadirvektori ja esittämällä tulokset päätöksentekijälle

Askel 1 Generoidaan Pareto-optimaalinen aloituspiste (jokin neutraali

kompromissiratkaisu tai päätöksentekijän tarjoama ratkaisu)

Askel 2 Selvitetään päätöksentekijän preferenssit (esimerkiksi tavoite-
tasot tai uusien generoitavien ratkaisujen lukumäärä)

Askel 3 Generoidaan uusi Pareto-optimaalinen ratkaisu / uudet
Pareto-optimaaliset ratkaisut päätöksentekijän mieltymysten mukaan
ja esitetään ratkaisuvaihtoehto/ratkaisuvaihtoehdot sekä mahdollisesti
muuta ratkaisuun/ratkaisuihin liittyvää lisäinformaatiota päätöksente-
kijälle. Jos generoitiin useampia ratkaisuvaihtoehtoja, pyydetään pää-
töksentekijää valitsemaan niistä paras

Askel 4 Lopetetaan, jos päätöksentekijä niin haluaa. Muuten palataan
askeleeseen 2.

Interaktiivisten menetelmien iteratiivisen rakenteen vuoksi päätöksente-
kijällä ei tarvitse olla etukäteen mitään valmista preferenssirakennetta vaan
hän voi (kolmesta muusta menetelmäkategoriasta poiketen) oppia optimoin-
tiongelman ratkaisuprosessin aikana. Päätöksentekijä pystyy myös hyödyn-
tämään oppimaansa ja spesifioimaan (tai jopa korjaamaan) aiemmin antami-
aan vastauksia saman tilanteen toistuesssa myöhemmin iteratiivisen prosessin
aikana. Lopullisen "parhaan" ratkaisun valitseminen tulee sitä helpommaksi,
mitä enemmän päätöksentekijä oppii optimointiongelmansa mahdollisuuk-
sista ja rajoitteista. Interaktiivisia menetelmiä voidaan pitää laskennallisesti
etukäteis- ja jälkikäteismenetelmiä tehokkaampina, sillä interaktiiviset me-
netelmät generoivat vain päätöksentekijää kiinnostavia Pareto-optimaalisia
ratkaisuja eikä päätöksentekijänkään näin ollen tarvitse vertailla valtavaa
määrää erilaisia ratkaisuvaihtoehtoja. [5]

Interaktiiviset menetelmät eivät kuitenkaan ole mitenkään ylivertaisia
suhteessa muiden kategorioiden monitavoiteoptimointiongelmiin ratkaisume-
netelmiin. Interaktiivisten ratkaisumenetelmien vahvuus voi nimittäin olla
toisinaan myös niiden heikkous. Päätöksentekijällä on mahdollisuus olla ak-
tiivinen osa ratkaisuprosessia, mutta toisaalta häneltä myös vaaditaan sitä.
Tämä tarkoittaa, että menetelmän toimivuus on sidoksissa päätöksentekijän
tietotaitoon, ymmärrykseen ongelman rakenteesta ja kykyyn oppia ongelman

käyttäytymisestä eri tilanteissa. Kyseisen tietomäärän kerryttäminen ei välttämättä aina onnistu, ja vaikka onnistuisikin, se vie päätöksentekijältä paljon aikaa ja energiaa. Interaktiiviset menetelmät vaativatkin päätöksentekijältä huomattavasti enemmän panostusta kuin muiden kategorioiden menetelmät. Itse ratkaisuprosessilla on myös taipumus kestää kauemmin, jos monitavoiteoptimointiongelma ratkaistaan jonkin interaktiivisen menetelmän avulla.

Olemassa olevien interaktiivisten menetelmien kirjo on laaja. Ne eroavat toisistaan sekä tavalla, jolla vuorovaikutus luodaan, että teknisiltä ominaisuuksiltaan. On olemassa monia erilaisia tapoja, joilla menetelmä a) tarjoaa tietoa päätöksentekijälle b) ottaa selvää päätöksentekijän mieltymyksistä. Vuorovaikutustavat voidaan jakaa karkeasti kolmeen luokkaan: vaihtosuhdeinformaatioon, referenssipisteisiin ja luokitteluun perustuvat lähestymistavat. Nämä luokat eivät kuitenkaan sisällä kaikkia tapoja, joilla kehitetyissä interaktiivisissa menetelmissä kommunikoidaan päätöksentekijän kanssa. [5]

Vaihtosuhdeinformaatioon perustuvissa interaktiivisissa menetelmissä päätöksentekijälle pyritään tarjoamaan tietoa siitä, paljonko yhdestä tavoitteesta täytyy antaa periksi, jotta jonkin muun tavoitteen arvoa voidaan parantaa. Vaihtoehtoisesti päätöksentekijä antaa menetelmälle tietoa siitä, paljonko (ja minkä kohdefunktion kustannuksella) hän haluaisi jonkin kohdefunktion arvoa parantaa. Vaihtosuhdeinformaatiolla voidaan menetelmästä riippuen tarkoittaa joko suhteellisia eroja siirryttäessä sallitusta ratkaisusta toiseen tai absoluuttisia (määrällisiä) eroja. [5]

Referenssipisteisiin perustuvissa interaktiivisissa menetelmissä päätöksentekijää pyydetään antamaan sallittu tai ei-sallittu referenssipiste, joka syystä tai toisesta on päätöksentekijän mielestä järkevä/toivottava. Menetelmä taas tarjoaa päätöksentekijälle valikoiman kohdevektoreita, jotka ovat jonkin metriikan mukaan mahdollisimman lähellä päätöksentekijän määrittämää referenssipistettä. Päätöksentekijä valitsee annetuista vaihtoehdoista häntä parhaiten miellyttävän, minkä jälkeen menetelmä siirtyy uudelle iteraatiokierrokselle päätöksentekijän niin halutessa. Päätöksentekijä on vapaa vaihtamaan referenssipistettä vaikka jokaisella iteraatiokierroksella. [32]

Luokitteluun perustuvissa interaktiivisissa menetelmissä päätöksentekijälle kerrotaan kaikkien kohdefunktioiden arvot nykyisessä ratkaisupisteessä,

ja häntä pyydetään luokittelemaan kohdefunktiot johonkin käytettävissä olevista luokista. Luokkajakoja on monenlaisia, mutta käytännössä valittavana voi olla esimerkiksi kolme luokkaa, joista ensimmäiseen luokitellaan sellaiset kohdefunktiot, joiden arvo saa heikentyä, toiseen sellaiset kohdefunktiot, joiden arvon tulee pysyä samalla tasolla ja kolmanteen sellaiset kohdefunktiot, joiden arvon tulee parantua. Päätöksentekijältä saatetaan myös kysyä rajoja, joihin asti kohdefunktion arvojen sallitaan heikentyä / toivotaan paranevan. Tämän tiedon turvin menetelmä generoi halutun määrän uusia Pareto-optimaalisia ratkaisuja. Kohdefunktion arvojen luokittelu on päätöksentekijälle hyvin intuitiivinen tapa ohjata ratkaisuprosessia. Toisaalta se on myös hyvin opettavainen tapa, sillä päätöksentekijä pääsee näkemään, miten hänen toiveensa vaikuttavat generoitaviin ratkaisuvaihtoehtoihin. [5]

Interaktiivisten menetelmien teknisillä eroavaisuuksilla viitataan siihen, että eri menetelmät pystyvät takaamaan erityyppisiä ratkaisuja (esimerkiksi heikosti Pareto-optimaalisia, Pareto-optimaalisia tai ei kumpiakaan näistä) ja käsittelemään erityyppisiä ongelmia (optimointiongelman rakenteelle asetetut matemaattiset oletukset). Eroavaisuudet voivat liittyä myös matemaattiseen konvergenssiin tai siihen, millaista skalarisointifunktiota menetelmä (mahdollisesti) käyttää. Interaktiivisista menetelmistä puhuttaessa olisi oikeastaan matemaattisen konvergenssin sijaan tarkoituksenmukaisempaa puhua psykologisesta konvergenssista. Kyseessä on kuitenkin konstruktiiivinen prosessi, jonka tavoitteena on vakuuttaa päätöksentekijä siitä, että hän on löytänyt itseään parhaiten miellyttävän ratkaisun. [5]

4.1 Diskreettien epälineaaristen monitavoiteoptimointiongelmiin ratkaisumenetelmiä

Miettisen kirjasta [32] löytyy perusteellinen katsaus epälineaarisiin monitavoiteongelmiin soveltuvista ratkaisumenetelmistä. Epälineaariset monitavoiteongelmat, joissa päätösmuuttujat on rajattu kokonaislukujen joukkoon, ovat kuitenkin hyvin hankalasti ratkaistavissa suhteessa kirjassa [32] käsitelyihin jatkuvista muuttujista koostuviin epälineaarisiin monitavoiteoptimointiongelmiin. Itse asiassa artikkelin [24] mukaan on olemassa vain muu-

tama eksakti algoritmi, joilla pystytään määrittämään epälineaarisen kokonaislukumonitavoiteoptimointiongelman ratkaisu. Yksi näistä menetelmistä on jälkikäteismenetelmien luokkaan kuuluva rajoiteyhtälömenetelmä, jonka toimintaa kyseisessä artikkelissa yritetään parantaa ratkaisuavaruutta leikkaamalla.

Rajoiteyhtälömenetelmä hyödyntää perinteistä tapaa ratkaista monitavoiteoptimointitehtäviä; skalarisointia. Skalarisoinnissa monitavoiteoptimointiongelma muunnetaan yksitavoitteiseksi optimointiongelmaksi. Skalarisoinnista puhuttaessa on aina muistettava se, että usein kohdefunktiot kuvaavat paitsi toisistaan poikkeavia ongelman аспекteja, myös mittaavat erilaisia suureita. Tällöin erillisten tavoitteiden yhdistäminen tavalla tai toisella samaan kohdefunktioon voi tuntua paitsi epäluontevalta, myös johtaa erikoisiin tuloksiin. Näin voi käydä esimerkiksi sellaisessa tapauksessa, missä yksittäisten tavoitteiden kohdeavaruudet sijoittuvat toisistaan kaukana oleviin suuruusluokkiin.

Rajoiteyhtälömenetelmässä skalarisointi tapahtuu optimoimalla yhtä monitavoiteoptimointiongelman kriteereistä kerrallaan ja muuntamalla muut tavoitteet optimointiongelman rajoitteiksi. Jokainen rajoiteyhtälömenetelmän avulla löydetty ratkaisu on ainakin heikosti Pareto-optimaalinen. Ratkaisu \mathbf{x} on Pareto-optimaalinen, jos \mathbf{x} on rajoiteyhtälömenetelmän ratkaisu jokaiselle monitavoiteoptimointiongelman kohdefunktiolle siten, että rajoitteina olevien kohdefunktioiden ylärajana toimii kyseisen kohdefunktion arvo pisteessä \mathbf{x} . [32]

Teoriassa rajoiteyhtälömenetelmällä pystytään löytämään jokainen Pareto-optimaalinen ratkaisu vaihtamalla minimoitavaa kohdefunktiota ja rajoitteina esiintyvien muiden kohdefunktioiden ylärajoja. Tulos pätee kaikentyypisille monitavoiteoptimointiongelmiin. Näiden teoreettisten tulosten takana on kuitenkin sellaisia oletuksia, jotka tekevät monitavoiteoptimointiongelman ratkaisemisesta rajoiteyhtälömenetelmällä laskennallisesti varsin raskaan. Yhden Pareto-optimaalisen ratkaisun määrittäminen vaatii nimittäin jokaisen kohdefunktion minimointiin liittyvän optimointiongelman ratkaisemista niin monta kertaa kuin monitavoiteoptimointiongelmassa on kohdefunktioita. [32]

Rajoiteyhtälömenetelmästä on olemassa myös useita modifikaatioita. Esimerkiksi artikkelissa [60] on kehitetty rajoiteyhtälömenetelmän pohjalta yleinen lähestymistapa monitavoitteisen kokonaislukuoptimointitehtävän Pareto-optimaalisten ratkaisujen generoimiseen. Artikkelin [60] menetelmä perustuu tavoitteiden tehokkaiden vaihteluvälien (objective efficiency range) tunnistamiseen. Tunnistaminen tapahtuu käytännössä ratkaisemalla vähemmän rajoitteita sisältäviä (yksinkertaisempia) kokonaislukuoptimointiongelmia. Toinen yleisemmän tason esimerkki rajoiteyhtälömenetelmän modifikaatiosta on elastinen rajoiteyhtälömenetelmä (Elastic Constraint Method), jossa käytetään sakkofunktiota apuna monitavoiteoptimointiongelmien ratkaisemisessa [12]. Elastinen rajoiteyhtälömenetelmä poikkeaa tavallisesta rajoiteyhtälömenetelmästä siinä, että tällä kertaa muiden kohdefunktioiden yläraja-arvoja koskevat rajoitteet relaksoidaan [12].

Relaksoinnilla viitataan yleisesti ottaen optimointiongelmaan liittyvien rajoitteiden lieventämiseen. Relaksoinnin tarkoituksena on päästä ratkaisemaan alkuperäistä optimointiongelmaa helpompia ongelmia kasvattamalla sallittujen pisteiden joukkoa. Relaksoidun ja alkuperäisen optimointiongelman kohdefunktioiden tulee olla identtiset ja jokaisen alkuperäisen ongelman sallitun ratkaisun pitää olla myös relaksoidun ongelman sallittu ratkaisu. Relaksoidulla ongelmalla ei voi myöskään olla ratkaisua, jos alkuperäisellä ongelmalla ei ole. Mikäli relaksoidun ongelman optimiratkaisuksi saadaan sellainen ratkaisu, joka kuuluu myös alkuperäisen ongelman sallittuun joukkoon, relaksoidun ongelman optimiratkaisu on myös alkuperäisen ongelman optimiratkaisu. Relaksoidun ongelman optimiratkaisu toimii jokatapauksessa aina minimimoitaessa alkuperäisen kohdefunktion optimiarvon alarajana ja maksimoitaessa samaisen arvon ylärajana. [39]

Tavallisin esimerkki relaksaatiosta on jo tässäkin työssä sivuttu kokonaislukurajoitusten unohtaminen. Muitakin tapoja kuitenkin on, sillä esimerkiksi elastiseen rajoiteyhtälömenetelmään liittyvä relaksointi poistaa muiden kohdefunktioiden yläraja-arvoja koskevien rajoitteiden ehdottomuuden ja sallii niiden rikkomisen. Rajoitteiden rikkoutumisesta on kuitenkin seurauksia; kohdefunktion arvoa sakotetaan sitä enemmän mitä rajummin jotakin kohdefunktioiden yläraja-arvoja koskevaa rajoitetta laiminlyödään. [12]

Toinen skalarisointia hyödyntävä yleisesti käytössä oleva monitavoiteoptimointiongelman ratkaisumenetelmä on painokerroinmenetelmä. Sitä pidetään yksinkertaisimpana tapana suorittaa muunnos monitavoiteoptimointiongelmastaa yksitavoitteiseksi optimointiongelmaksiksi. Siinä luodaan uusi kohdefunktio, joka koostuu vanhojen yksittäisten kohdefunktioiden kertoimilla $w_i \geq 0$, $i = 1, \dots, k$ painotetusta summasta. Kertoimet w_i kuvastavat kohdefunktion f_i toteutumisen tärkeyttä. [12]

Jokainen painokerroinmenetelmän avulla määritetty ratkaisupiste on rajoiteyhtälömenetelmän tavoin heikosti Pareto-optimaalinen. Ratkaisu \mathbf{x} on Pareto-optimaalinen, jos jokainen kohdefunktioon liittyvä painokerroin on positiivinen. Painokerroinmenetelmä kykenee löytämään kaikki Pareto-optimaaliset ratkaisut joidenkin konveksisten monitavoiteoptimointiongelmien tapauksessa, jos kaikki positiiviset painokertoimet ovat riittävän pientä alarajaa $\epsilon \geq 0$ suurempia. Alarajan ϵ valinta on ratkaisujen Pareto-optimaalisuuden kannalta kriittinen. Alaraja ϵ on ongelmakohtainen, ja sen sopivaa arvoa on vaikeaa arvioida etukäteen. Mikäli ratkaistava monitavoiteoptimointiongelma on epäkonvekksi, kaikkia Pareto-optimaalisia ratkaisuja ei pystytä painokerroinmenetelmän avulla määrittämään. [32]

Edellä mainittujen suoraviivaisten skalarisointimenetelmien lisäksi on olemassa myös luokka tietyn tyyppisiä reaali-lukujen joukossa operoivia funktioita $s_R : \mathbb{R}^k \rightarrow \mathbb{R}$, joita voidaan käyttää monitavoitteisen optimointiongelman skalarisointiin. Funktioita s_R kutsutaan saavutettavuusfunktioiksi (achievement scalarization function) ja skalarisoitu optimointiongelma saa tällöin muodon [12]

$$\min \quad s_R(\mathbf{f}(\mathbf{x})) \quad (43)$$

$$\text{s.t.} \quad \mathbf{x} \in S. \quad (44)$$

Funktion on täytettävä tietyt vaatimukset, jotta se voi toimia monitavoiteoptimointiongelman skalarisoivana saavutettavuusfunktiona [12]. Ennen kyseisten tulosten esittämistä määritellään kasvava, aidosti kasvava (strictly increasing) ja voimakkaasti kasvava (strongly increasing) funktio.

Määritelmä 4.1 ([12]). Saavutettavuusfunktion $s_R : \mathbb{R}^k \rightarrow \mathbb{R}$ sanotaan olevan

1. kasvava, jos siitä, että $\mathbf{y}^1, \mathbf{y}^2 \in \mathbb{R}^k$, $\mathbf{y}_i^1 \leq \mathbf{y}_i^2$, $i = 1, \dots, k$, seuraa $s_R(\mathbf{y}^1) \leq s_R(\mathbf{y}^2)$
2. aidosti kasvava, jos siitä, että $\mathbf{y}^1, \mathbf{y}^2 \in \mathbb{R}^k$, $\mathbf{y}_i^1 < \mathbf{y}_i^2$, $i = 1, \dots, k$, seuraa $s_R(\mathbf{y}^1) < s_R(\mathbf{y}^2)$
3. voimakkaasti kasvava, jos siitä, että $\mathbf{y}^1, \mathbf{y}^2 \in \mathbb{R}^k$, $\mathbf{y}_i^1 \leq \mathbf{y}_i^2$, $i = 1, \dots, k$, ja $\mathbf{y}^1 \neq \mathbf{y}^2$, seuraa $s_R(\mathbf{y}^1) < s_R(\mathbf{y}^2)$.

Wierzbicki on artikkeleissaan [55], [56] määritellyt ehdot, joiden toteutuessa pystytään takaamaan, että saavutettavuusfunktion s_R avulla muodostettu skalarisoitu optimointiongelma tuottaa Pareto-optimaalisia tai heikosti Pareto-optimaalisia ratkaisuja.

Lause 4.2 ([55], [56]). Seuraavat kolme väitettä pitävät paikkansa:

1. Olkoon saavutettavuusfunktio s_R aidosti kasvava. Jos $\mathbf{x}^* \in S$ on skalarisoidun optimointiongelman optimaalinen ratkaisu, niin \mathbf{x}^* on alkuperäisen ongelman heikosti Pareto-optimaalinen ratkaisu.
2. Olkoon saavutettavuusfunktio s_R voimakkaasti kasvava. Jos $\mathbf{x}^* \in S$ on skalarisoidun optimointiongelman optimaalinen ratkaisu, niin \mathbf{x}^* on alkupe-
räisen ongelman Pareto-optimaalinen ratkaisu.
3. Olkoon saavutettavuusfunktio s_R kasvava. Jos $\mathbf{x}^* \in S$ on skalarisoidun optimointiongelman yksikäsitteinen optimaalinen ratkaisu, niin \mathbf{x}^* on alku-
peräisen ongelman Pareto-optimaalinen ratkaisu.

Yksi esimerkki aina heikosti Pareto-optimaalisia ratkaisuja tuottavasta skalarisointifunktiosta on esitetty artikkelissa [59]. Kyseisessä artikkelissa on kehitetty uusi epälineaaristen monitavoiteoptimointiongelmiä ratkaisemiseen soveltuva menetelmä (Two-Slope Parameterized Achievement Scalarization Functions). Sen lisäksi, että TSPASF-menetelmällä pystytään aina määrittämään heikosti Pareto-optimaalinen ratkaisu, menetelmällä myös kyetään löytämään jokainen heikosti Pareto-optimaalinen ratkaisu vaihtamalla skalarisointifunktiosta hyödynnettävän parametrin, referenssipisteen ja/tai paino-vektoreiden arvoa. [59]

4.1.1 Skalarisoidun optimointiongelman ratkaisumenetelmiä

Sen lisäksi, että on olemassa monia tapoja skalarisoida monitavoiteoptimointiongelma, on luonnollisesti olemassa myös useita tapoja ratkaista skalarisoinnin tuloksena saatu yksitavoitteinen optimointiongelma. Artikkelin [3] mukaan yksitavoitteisten kokonaislukuoptimointitehtävien ratkaisemiseen ei ole olemassa yhtä ylivertaisen tehokasta algoritmia vaan käytössä on useita erilaisia tekniikoita. Useimmat tehokkaista yksitavoitteisten kokonaislukuoptimointiongelmien ratkaisualgoritmeista perustuvat yleiseen menetelmään, mutta ovat räätälöityjä ratkaisuprosessin kohteena olevaan ongelmaan sopiviksi. Yksitavoitteisten kokonaislukuoptimointiongelmien ratkaisumenetelmät voidaan jakaa karkeasti eksakteihin ja ei-eksakteihin ratkaisualgoritmeihin. [3]

Eksaktit algoritmit takaavat algoritmin päätyminen optimaaliseen ratkaisuun, mutta tarvitsevat tyypillisesti eksponentiaalisen määrän iteraatio-kerroksia. Ei-eksaktit algoritmit taas päätyvät lähes optimaaliseen ratkaisuun. Ei-eksakteihin ratkaisualgoritmeihin kuuluu sekä polynomiaalisia approksimaatioalgoritmeja että heuristisia algoritmeja. Approksimaatioalgoritmit pystyvät heuristisista algoritmeista poiketen antamaan todistettavissa olevan takuun löytämänsä lähes optimaalisen ratkaisun asteesta. Huolimatta siitä, että heuristiset algoritmit eivät pysty antamaan takuita löytämänsä lähes optimaalisen ratkaisun laadusta tai algoritmin suoritusajasta, ne ovat suunniteltuja löytämään hyviä ratkaisuja nopeasti. Heuristiset menetelmät saattavatkin olla paras valinta suurille tai vaikeille optimointiongelmillä, joihin eksaktit menetelmät eivät pysty löytämään hyvää ratkaisua järkevissä ajassa. [3]

Artikkelin [46] mukaan yksi yleisimmistä diskreettien epälineaaristen optimointiongelmiä ratkaistaan eksakteista ratkaisumenetelmistä on Branch and Bound -menetelmä. Toinen yleisesti hyväksytty menetelmäperhe on leikkaustasojen menetelmät (Cutting Plane Methods) [37]. Branch and Bound -menetelmä ja leikkaustasojen menetelmä eivät kuitenkaan ole mitenkään toisensa poisulkevia vaihtoehtoja. Itseasiassa artikkelin [37] mukaan Branch and Bound -menetelmien suoritustehokkuus on parantunut dramaattisesti sen jälkeen,

kun leikkaustasojen menetelmä sisällytettiin osaksi Branch and Bound -menetelmää. Näitä kahden menetelmäperheen toimintaperiaatteita ja tekniikoita yhdistäviä eksakteja ratkaisualgoritmeja kutsutaan Branch and Cut -menetelmiksi.

Branch and Cut -menetelmät. Branch and Cut -menetelmät toimivat ratkaisemalla peräkkäisiä kokonaislukuoptimointiongelmaa muodostettuja relaxoituja optimointiongelmaa. Leikkaustasojen menetelmä parantaa kokonaislukuoptimointiongelmaa luodun relaxaation tarkkuutta. Branch and Bound -menetelmä puolestaan vastaa sivistyneestä haarautumiseen ja levittäytymiseen (relaksaatioon) perustuvasta lähestymistavasta, jonka kautta ongelmaa lähdetään ratkaisemaan. [37]

Branch and Bound -menetelmässä suoritetaan osittainen luettelointi tutkimalla tarkasti vain lupaavilta tuntuvia ongelman osia. Päätös siitä, kannattaako jotakin ongelman osaa tutkia, perustuu relaxointiin. Ratkaisuprosessi etenee kiinnittämällä muuttujien arvoja yksi kerrallaan. Osittaisella ratkaisulla viitataan sellaiseen ratkaisuun, jossa vasta osa muuttujista on kiinnitetty. Osittaisen ratkaisun täydennys on tehtävän sallittu ratkaisu, jossa kiinnitetyillä muuttujilla on kiinteät arvonsa. [39]

Menetelmässä esiintyvä Branch-nimitys liittyy siihen, että ratkaisun täydentämiseen liittyvä jonkin muuttujan arvon kiinnittäminen johtaa itse asiassa haarautumiseen optimointiongelman ratkaisuprosessia kuvaavassa puussa. Optimointiongelman ratkaiseminen lähtee liikkeelle puun juuresta, jossa kaikki muuttujan arvot ovat kiinnittämättömiä. Jokaista puun solmua (ratkaisua) tutkittaessa täytyy selvittää, mikä olisi sen paras mahdollinen täydennys. Solmu voidaan todeta käsitellyksi (luodatuksi), jos kyseisen täydennyksen antama kohdefunktion arvo ei ole nykyistä parasta kohdefunktion arvoa parempi. Tällöin voidaan karsia käsittelystä kaikki kyseisen solmun täydennykset. Kyseiset alipuut tulevat siis osittaisesti (implisiittisesti) luetteloiduksi. Mikäli tutkittavaa solmua ei voida karsia, täytyy suorittaa haarautuminen puussa. Käytännössä tämä tapahtuu antamalla jollekin kiinnittämättömälle muuttujalle sen kaikki mahdolliset arvot. Haarautumisen seurauksena saadaan uusia aktiivisia solmuja tutkittavaksi. Menettely voidaan lopettaa, kun

kaikki kiinnittämättömiä muuttujia sisältävät solmut on karsittu. [39]

Menetelmässä esiintyvä Bound-nimitys tulee puolestaan siitä, että ratkaisun paras täydennys määritetään aina ratkaisemalla relaxoitu ongelma, jossa osa muuttujista on kiinnitettyjä. Relaxoidun ongelman ratkaisu toimii arviona kohdefunktiolle. Mikäli minimointiongelma (maksimointiongelma) saatu alaraja (yläraja) on suurempi (pienempi) kuin jo saavutettu kohdefunktion arvo, voidaan suorittaa karsinta. [39]

Tapoja, jolla optimointiongelman ratkaisuprosessia kuvaavassa puussa voidaan edetä (valita seuraavaksi käsiteltäväksi otettava solmu), on useampia. Käytettäessä syvyyshakua, valitaan tutkittavaksi solmuksi aina se, joka on syvimmällä puussa. Syvimmällä puussa olevalla solmulla tarkoitetaan sitä solmua, johon liittyy eniten kiinnitettyjä komponentteja. Toinen vaihtoehto on käyttää Paras ensin -versiota, jossa valitaan lupaavin solmu. Solmu on sitä lupaavampi mitä suurempi isäsolmusta saatu relaxaatioarvio on. Kolmas mahdollisuus on yhdistää kahta edellä mainittua tapaa ja valita parhaiten peruuttava syvyyshaku. Siinä otetaan haarautumisen jälkeen tutkittavaksi aina syvimmällä oleva solmu, mutta solmun loppukäsittelyn jälkeen peruutetaan solmuun, jonka relaxaatioarvio on paras. [39]

Toinen Branch and Cut -algoritmien rakennuspalikoista, leikkaustasojen menetelmä, perustuu yritykseen approksimoida alkuperäisestä optimointiongelma muodostettavan relaxoidun ongelman ihanteellista muotoa lisäämällä uusia rajoitteita jokaisen iteraatiokierroksen jälkeen. Lisätyt rajoitteet rajaavat relaxoidun optimointiongelman sallittua aluetta sulkien pois pikkuhiljaa relaxoidun ongelman ei-kokonaislukuratkaisuja poistamatta mitään alkuperäisen ongelman sallittuja ratkaisuja. Leikkaustasojen menetelmän toimintaperiaate algoritmimuodossa [57]:

Askel 0 Ratkaistaan kokonaislukuoptimointiongelma diskreettien päätösmuuttujien sijaan käyttämällä jatkuvia päätösmuuttujia

Askel 1 Jos tuloksena saatu optimaalinen ratkaisu on kokonaisluku, lopetetaan

→ Optimipiste on löydetty

Askel 2 Luodaan leikkaustaso. Toisin sanoen muodostetaan rajoite,

joka toteutuu kaikkien muiden sallittujen ratkaisujen paitsi relaksoidun ongelman optimipisteen kohdalla

Askel 3 Lisätään optimointiongelmaan tämä uusi rajoite, ratkaistaan ongelma uudelleen ja palataan askeleeseen 1.

Yllä esitetyn algoritmin tarvitsema iteraatiokierrosten lukumäärä on äärellinen [57].

Branch and Bound -menetelmään perustuvan algoritmin toimintaa voidaan nopeuttaa lisäämällä uusia rajoitteita. Uudet rajoitteet toimivat niin kutsuttuina leikkaustasoina lisäten relaksaation tarkkuutta. Jokainen lisärajoite pienentää relaksoitua sallittua aluetta. Yhtään alkuperäisen optimointiongelman sallittua ratkaisua ei kuitenkaan tulla leikkaamaan pois. Branch and Cut -menetelmissä muodostetaan lisärajoituksia relaksoinnin suorituksen jälkeen ennen haarautumista. Yleinen Branch and Cut -algoritmi saa minimointiongelmaasta puhuttaessa muodon [39]

Askel 0 (Alustus) Ainoa aktiivinen osittainen ratkaisu saadaan relaksoimalla kaikki kokonaislukurajoitukset reaalisiksi. Jos tunnetaan jokin alkuperäisen ongelman sallittu ratkaisu $\hat{\mathbf{x}}$, lasketaan sen tuottama kohdefunktion arvo \hat{v} . Jos sallittua ratkaisua ei tunneta, niin asetetaan $\hat{v} = \infty$

Askel 1 (Lopetus) Jos aktiivisia osittaisia ratkaisuja on jäljellä, valitaan yksi niistä pisteeksi \mathbf{x}^t ja jatketaan askeleesta 2. Muutoin lopetetaan
→ $\hat{\mathbf{x}}$ on optimi

Askel 2 (Relaksaatio) Ratkaistaan pistettä \mathbf{x}^t vastaava relaksoitu optimointitehtävä

Askel 3 (Ei-sallittavuuslopetus) Jos askeleen 2 relaksoidulla tehtävällä ei ole sallittuja pisteitä, ei myöskään pisteellä \mathbf{x}^t voi olla sallittuja täydennyksiä
→ Ratkaisu \mathbf{x}^t on nyt loppuunkäsitelty
Palataan askeleeseen 1

Askel 4 (Rajalopetus) Jos askeleen 2 relaxoidun tehtävän kohdefunktio \tilde{v} toteuttaa ehdon $\tilde{v} \geq \hat{v}$, paraskaan ratkaisun \mathbf{x}^t täydennys ei voi parantaa kohdefunktion arvoa

→ Ratkaisu \mathbf{x}^t on loppuunkäsitelty

Palataan askeleeseen 1

Askel 5 (Sallittavuuslopetus) Jos kohdan 2 relaxoidun tehtävän ratkaisu $\tilde{\mathbf{x}}^t$ kohdefunktion arvona \tilde{v} toteuttaa kaikki kokonaislukurajoitukset, se on osittaisen ratkaisun \mathbf{x}^t paras täydennys

→ Ratkaisu \mathbf{x}^t on loppuunkäsitelty

Asetetaan $\hat{\mathbf{x}} = \tilde{\mathbf{x}}^t$, $\hat{v} = \tilde{v}$ ja palataan askeleeseen 1

Askel 6 (Leikkausrajoitus) Yritetään muodostaa lisärajoitus, joka leikkaa pois relaxoidun ratkaisun $\tilde{\mathbf{x}}^t$, mutta ei yhtään alkuperäisen tehtävän ratkaisua. Jos tämä onnistuu, lisätään saatu leikkausrajoitus alkuperäiseen tehtävään ja palataan askeleeseen 2

Askel 7 (Haarautuminen) Valitaan jokin askeleen 2 relaxoidun tehtävän ratkaisun ei-kokonaislukukomponentti \tilde{x}_p^t ja haaraututaan tehtävästä \mathbf{x}^t kahteen suuntaan. Lisätään kumpaankin haaraan uusi rajoitus, joilla suljetaan kaikista muodostetuista alipuista pois $\tilde{\mathbf{x}}^t$. Haarautuminen suoritetaan sen mukaan onko $x_p \leq \lfloor \tilde{x}_p^t \rfloor$ vai $x_p \geq \lfloor \tilde{x}_p^t \rfloor + 1$. Palataan askeleeseen 1.

Huomataan, että jos Branch and Cut -yleisalgoritmista poistetaan askel 6, saadaan Branch and Bound -menetelmän yleisalgoritmi.

Geneettiset algoritmit Geneettiset algoritmit -nimellä tunnettu menetelmäluokka pitää sisällään heuristisia, löysästi biologista periytymistä jäljitteleviä ja lokaaleista optimeista pois pyrkiviä yksitavoitteisten optimointiongelmien ratkaisualgoritmeja [39]. Geneettisten algoritmien tavoitteena on saada aikaan älykästä ja oppivaa satunnaishakua [39]. Pinterin mukaan geneettiset algoritmit toimivat reaali maailmaan liittyvien optimointiongelmien ratkaisemisessa jopa paremmin kuin perinteiset eksaktit ratkaisumenetelmät.

Tämä on seurausta siitä, että geneettisillä algoritmeilla on muihin ratkaisumenetelmiin verrattuna kaksi keskeistä etua. Ensinnäkään ne eivät tee mitään oletuksia itse optimointiongelman luonteesta. Kohdefunktio voi olla esimerkiksi epäjatkuva tai sallittu joukko inkoherentti. Toisekseen ne soveltuvat yhtä lailla sellaisten optimointiongelmien ratkaisemiseen, joissa on käytössä jatkuva muuttuja kuin sellaisten, joiden päätösmuuttuja voi saada vain kokonaislukujen joukkoon kuuluvia arvoja. Erityisen hyödyllisiksi kyseiset edut muodostuvat epälineaarisia ja yksitavoitteisia kokonaislukuoptimointiongelmia ratkaistaessa. [48]

Geneettisissä algoritmeissa pidetään yllä p yksilön suuruista ratkaisupopulaatiota, jonka kehitystä seurataan useiden sukupolvien ajan. Populaation jokaisella jäsenellä on oma identifioiva kromosomivektori, jonka alkiota kutsutaan geeneiksi. Vaikka osa populaation jäsenistä saattaa olla hyvinkin heikkoja ratkaisuja, niillä voi silti olla joitain hyviä ominaisuuksia, joiden toivotaan periytyvän eteenpäin seuraaville sukupolville. Periytyminen tapahtuu pääasiassa risteytyksen avulla. Risteytyksessä muodostetaan kahdesta populaation yksilöstä kaksi jälkeläistä. On olemassa useita erilaisia tapoja muodostaa nykyisen sukupolven kromosomeista uusia kromosomeja, mutta tavallisin ja yksinkertaisin tapa on katkaista kromosomit kahtia samasta (satunnaisesti valitusta) kohdasta ja yhdistellä näistä kaksi uutta yksilöä. [39]

Vaikka ei olekaan olemassa mitään takuita, että risteytyksen avulla pystytään parantamaan ratkaisua, ainakin saadaan generoitua uusia ratkaisuja. Käytännössä menettely on kuitenkin usein toiminut hyvin ja onnistunut säilyttämään vanhempien hyvät ominaisuudet seuraavaan sukupolveen. Toivotun tuloksen saamisen kannalta on tärkeää, että populaation yksilöt ovat riittävän erilaisia. Populaation diversiteetti takaa sen, ettei kehitys pääse pysähtymään. Mutaatiot voivat auttaa populaation erilaisuuden ylläpitämisessä, sillä se tarjoaa risteyksestä poikkeavan tavan luoda uuden sukupolven muodostavia yksilöitä. Mutaatio on prosessi, jossa yksittäisen kromosomin geenit muuttuvat satunnaisesti. [39]

Geneettisissä algoritmissa tulee aina päättää, miten risteytykset muodostavat kromosomit valitaan ja mitkä yksilöt säilytetään seuraavaan sukupolveen. Seuraava sukupolvi voidaan muodostaa usealla eri tavalla, joista yksi

vaihtoehto on eliittistrategia. Mikäli uusi sukupolvi muodostetaan eliittistrategian mukaisesti, se tulee koostumaan edellisen sukupolven valioyksilöistä, risteytyksillä saaduista uusista yksilöistä sekä muutamasta mutaatiosta. Risteytykseen valitaan kromosomeja kelpoisuusarvon perusteella. Geneettiset algoritmit poikkeavat toisistaan myös siinä, miten kelpoisuusarvo määritellään. Kromosomien kelpoisuusarvot voidaan määrittää esimerkiksi siten, että populaation kohdefunktioltaan paras kromosomi saa kelpoisuusarvon p , toiseksi paras $p - 1$ ja niin edelleen aina siihen asti, että huonoin saa arvon 1. Tällöin risteytettävät kromosomit voidaan valita esimerkiksi niin, että toinen valitaan satunnaisesti ja toinen kelpoisuusarvonsa mukaisella todennäköisyydellä. [39]

Geneettisten algoritmien yleistason toimintaperiaate algoritmimuodossa [36]:

Askel 0 Valitaan populaatiokoko, sallittu alkupopulaatio, sukupolvien lukumäärä, populaation valioyksilöiden määrä, mutaatioyksilöiden määrä ja risteytyksillä saatavien yksilöiden määrä. Asetetaan lopetuskriteerin parametrit

Askel 1 Alustetaan populaatio satunnaisilla luvuilla

Askel 2 Lasketaan populaation kunkin kromosomin kelpoisuusarvo. Suoritetaan valinta, risteytys, mutaatio ja valioyksilöiden valinta, joiden kautta muodostetaan uusi populaatio

Askel 3 Jos lopetuskriteeri ei täyty, palataan askeleeseen 2. Muuten valitaan viimeisen sukupolven paras yksilö lopulliseksi ratkaisuksi.

Askeleen 3 lopetuskriteeri voi käytännössä liittyä esimerkiksi iteraatiokierrosten maksimimäärään tai vaadittuun toleranssiin [36]. Toleranssin avulla pystytään määrittämään minkä verran kunkin sukupolven parhaan kelpoisuusarvon halutaan vähintään paranevan viimeisten N ($N \geq 0$) iteraatiokierroksen aikana [36]. Artikkelissa [9] on hyödynnetty geneettisiä algoritmeja ambulanssien sijoittamiseen liittyvien ongelmien yhteydessä.

5 Ambulanssien optimaaliseen sijoittamiseen ohjaava monitavoiteoptimointimalli

Tässä työssä luodaan diskreetti monitavoiteoptimointimalli, joka ohjaa sijoittamaan optimaalisen määrän ambulansseja kullekin käytettävissä olevalle asemapaikalle. Ambulanssien lukumäärä on rajattu. Vaikka tutkimus onkin saanut inspiraationsa Varsinais-Suomen sairaanhoitopiirin ensihoidon optimaaliseen järjestämiseen liittyvistä kysymyksistä, ei ole mitään syytä, miksi kehitettyä mallia ei voitaisi yleistää generiselle tasolle.

Syyt siihen, miksi ambulanssien optimaalista sijoittamista on lähdetty selvittämään juuri monitavoiteoptimoinnin keinoin ovat pitkälti samoja, jotka Savickin artikkelissaan [50] mainitsee. Hän nostaa esiin kolme syytä, joiden vuoksi siirtyminen yksitavoitteisesta optimoinnista monitavoiteoptimointiin tukee paremmin päätöksentekoprosessia. Ensimmäkin lähestyttäessä tutkittavaa ilmiötä monitavoitteisen optimointimallin kautta pystytään yleensä tunnistamaan laajempi vaihtoehtoisten ratkaisujen joukko. Lisäksi tasapainoilu useiden eri kohdefunktioiden toteutumisen välillä painottaa päätöksentekijän roolia käsillä olevan optimointiongelman ratkaisussa aivan eri tavalla. Päätöksentekijä tuntee yleensä optimoinnin kohteena olevan ilmiön ratkaisijaa paremmin, joten on järkevää hyödyntää tutkimusprosessin aikana kertynyttä tietotaitoa myös ratkaisuvaiheessa. Savic myös väittää useita tavoitteita sisältävien mallien olevan yksitavoitteisia optimointiongelmia realistisempia. Ambulanssien optimaalisen sijoittamisen tapauksessa tämä on hyvin uskottava väite. On nimittäin erittäin vaikeasti määriteltävissä, minkä yksittäisen, jollakin tavalla mitattavissa olevan suureen minimoiminen/maksimoiminen johtaisi optimaaliseen sijoittamissuunnitelmaan ilman, että sivuuttaisi jokin toista, yhtä oleellisesti ilmiöön liittyvää aspektia.

Otetaan käyttöön diskreetti päätösmuuttuja x_i , joka kuvastaa sitä montako ambulanssia asemapaikalle i tullaan sijoittamaan. Diskreetin päätösmuuttujan käyttäminen on luonnollinen valinta, sillä osittaisia ambulansseja ei voi millekään asemapaikalle sijoittaa. Ambulanssien optimaalisen sijoittamisen selvittämistä varten kehitetyssä mallissa pyritään optimoimaan neljän kohdefunktion yhtäaikaista toteutumista.

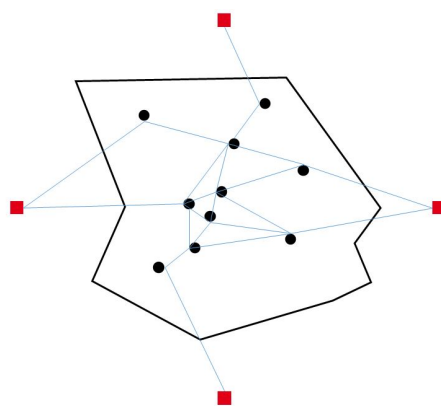
Kohdefunktioiden taustalla olevat tavoitteet sanallisesti muotoiltuna:

1. Halutaan, että ambulanssit sijoitetaan siten, että pystytään vastaamaan mahdollisimman hyvin tarkastelualuekohtaiseen ambulanssitarpeeseen.
2. Halutaan sijoittaa ambulanssit sinne, missä on sattunut määrällisesti eniten hälytyksiä tarkasteltavan ajanjakson aikana.
3. Halutaan minimoida ilman ambulansseja jätettävien asemien määrää. Yli puolet asemapaikoista kuitenkin jää pakostakin ilman ambulanssia, joten pyritään siihen, että jätetään tyhjäksi sellaiset asemat, jotka osallistuvat mahdollisimman harvan, mahdollisimman pienen asukasluvun omaavan tarkastelualueen kattamiseen.
4. Halutaan jälleen minimoida ilman ambulansseja jätettävien asemien määrää. Pyritään tällä kertaa asettelemaan ambulanssit spatiaalisesti mahdollisimman tasaisesti eli siten, että ilman ambulanssia jäävien asemien lähiympäristössä olisi mahdollisimman paljon ambulansseja saatavilla mahdollisimman lyhyen etäisyyden päässä.

Sanallisissa tavoitteissa esiintyy tarkastelualueen käsite. Tutkimusalue jaetaan tarkastelualueisiin, jotka viittaavat asemapaikkaverkoston solmukoh-tien väliin jääviin osa-alueisiin. Tarvesolmun määritelmän hankaluutta sivut-tiin jo kattavuuteen perustuvien sijoittamismallien yhteydessä. Tässä työs-sä käännetäänkin perinteisissä sijoittamismalleissa esiintyvä ajatus tarvesol-muista tavallaan pääläelleen. Ajatellaan, että tarve ei esiinny samoissa sol-muissa, jonne voidaan sijoittaa ambulansseja, vaan itse asiassa kaikkialla muualla tutkimusalueella. Verkoston rakenteen selkärankana toimivat yhä mahdollisia asemapaikkoja kuvaavat solmut. Tutkimusalue halutaan jakaa tarkastelualueisiin siten, että jokainen tutkimusalueen osa (joka ei ole mah-dollista asemapaikkaa kuvaava solmu) kuuluu johonkin tarkastelualueeseen, ja itse asiassa täsmälleen yhteen. Käytännössä jokaiseen tarkastelualueeseen kuuluu kolme mahdollista asemapaikkaa, ja tarkastelualue muodostuu näitä kolmea asemaa yhdistävien janojen väliin. Lopputuloksena saadaan jaettua

tutkimusalue (reuna-alueita lukuunottamatta) kolmionmuotoisiin alueisiin, joissa asemapaikat toimivat kolmion kärkipisteinä.

Kuva 4 toimii havainnollistavana esimerkkinä fiktiivisen tutkimusalueen jakamisesta kolmen aseman rajaamiin tarkastelualueisiin. Mustat ääriviivat kuvaavat tutkimusalueen rajoja ja siniset ääriviivat muodostettujen tarkastelualueiden rajoja. Mahdolliset asemapaikat on kuvattu mustien pisteiden avulla ja tutkimusalueen jakamisessa hyödynnettävät kiintopisteet on merkitty kuvaan punaisilla neliöillä.



Kuva 4: Yksi tapa jakaa fiktiivinen tutkimusalue kolmesta asemasta ja niitä yhdistävistä janoista muodostuviin tarkastelualueisiin.

Kuvasta 4 huomataan, että esimerkkitutkimusalueen reunimmaiset "kolmiot" on laajennettu siten, että koko esimerkkinä toimiva tutkimusalue saadaan katettua tarkastelualueilla. Reunimmaisten tarkastelualueiden venytys tapahtuu käytännössä korvaamalla kahta lähinnä tutkimusalueen rajoja sijaitsevia asemia yhdistävä jana molemmista asemista lähtevillä janoilla, joista jokainen suuntautuu kohti yhtä neljästä tutkimusalueen ulkopuolella sijaitsevistä punaisista kiintopisteistä. Kiintopisteiden tarkka sijainti ei ole mitenkään keskeinen; ne ovat vain yksi keino varmistaa, että jokainen tutkimusalueen osa kuuluu tasan yhteen tarkastelualueeseen.

Kiintopisteiden sijainti on sekä kuvan 4 että myöhemmin reaali maailman ongelman tapauksessa määritetty menettelemällä seuraavasti:

1. Kuvitellaan tutkimusalueen ympärille pienin mahdollinen koko tutkimusalueen kattava suorakulmio
2. Määritetään jokaisen kiintopisteen toinen koordinaatti sen mukaan, mikä on kunkin kuvitteellisen suorakulmion särmän keskipiste
3. Asetetaan jokaisen kiintopisteen toiseksi koordinaatiksi jokin kiinteä etäisyys lähinnä kutakin kiintopistettä sijaitsevan kuvitteellisen suorakulmion särmästä. Etäisyys kuvitteellisen suorakulmion lähimmästä särmästä on jokaiselle kiintopisteelle sama. Jokaisen kiintopisteen tulee sijaita sen verran kaukana tutkimusalueen ulkopuolella, että tarvittavista reunimmaisista tarkastelualueista rajaavista asemista voidaan vetää suorat janat johonkin niistä ilman, että janat leikkaavat tai sivuavat toisiaan (tai mitään muutakaan janaa) tutkimusalueen sisäpuolella.

Kannattaa huomioida, että tarkastelualueet rajaavien asemapaikkojen lukumäärän ei tarvitse olla juuri kolme. Tässä työssä käytetään kolmea asemapaikkaa tarkastelualueen kärkipisteinä sen vuoksi, että se on pienin solmumäärä, jolla saamme muodostettua jonkin asemapaikkojen väliin jäävän alueen janan tai pisteen sijaan. Tarkastelualueita rajaavien kärkipisteiden lukumäärän lisääminen kasvattaa välttämättä tarkastelualueiden kokoa. Tarkastelualueiden pinta-alan kasvaminen ei kuitenkaan tässä tapauksessa ole suotavaa, sillä pyrkimyksenä on havaita mahdollisimman tarkasti lokaaleja muutoksia siinä, miten kipeästi kukin alue/paikka tarvitsee ambulanssia.

Ambulanssitarpeen käsite saattaa myös vaatia täsmennystä. Tässä yhteydessä sillä kuvataan ambulanssien sijoittamiseen vaikuttavan ilmiön tempo-
raalista ulottuvuutta. Ambulanssien toiminta perustuu pääasiassa tapahtuneisiin hälytyksiin (ainakin ensihoidon osalta). Hälytykset tapahtuvat paitsi jossain tietyssä paikassa, myös tietyllä ajanhetkellä. Ambulanssitarve kuvastaa sitä ambulanssien lukumäärää, joka tarkastelualueelle olisi pitänyt sijoittaa, jotta siellä ei olisi tarkasteltavan ajanjakson aikana syntynyt kertaakaan sellaista tilannetta, että tarkastelualueella on yhtäaikaisesti enemmän hälytystehtäviä käynnissä kuin alueen kattamisesta vastaaville asemapaikoille on sijoitettu ambulansseja.

Otetaan käyttöön seuraavat merkinnät:

b = tarkastelualueiden lukumäärä

v_k = tarkastelualueen k ambulanssitarve

K_k = indeksijoukko, joka sisältää niiden asemapaikkojen indeksit i ,
jotka kuuluvat tarkastelualueeseen k

a = mahdollisten sijoituspaikkojen lukumäärä

p_i = tutkittavan ajanjakson aikana lähimpänä asemaa i
tapahtuneiden hälytysten prosentuaalinen osuus

w_k = tarkastelualueella k asuvien ihmisten lukumäärä

e_{ij} = aseman i etäisyys asemasta j

c = vakio, joka määrittää kuinka monta lähintä asemaa
lasketaan mukaan naapuriasemien joukkoon

I_i = indeksijoukko, johon kuuluu niiden c aseman indeksit
 j , jotka sijaitsevat lähimpänä asemaa i

d = vakio, joka määrää neljännessä kohdefunktiossa esiintyvän
sakotusermin suuruuden

u_i = asemapaikkakohtainen maksimaalinen sijoituspaikkakapasiteetti

M = käytettävissä olevien ambulanssien lukumäärä.

Formaalisti ilmaistuna ambulanssien optimaaliseen sijoittamiseen ohjaava monitavoiteoptimointimalli saa muodon

$$\min \sum_{k=1}^b \left(v_k - \sum_{i \in K_k} x_i \right) \quad (45)$$

$$\max \sum_{i=1}^a p_i x_i \quad (46)$$

$$\min \sum_{k=1}^b \left(\sum_{i \in K_k} \frac{w_k}{x_i + \frac{1}{w_k}} \right) \quad (47)$$

$$\min \sum_{i=1}^a \frac{1}{x_i + \frac{1}{\sum_{j \in I_i} e_{ij} \frac{1}{x_j + \frac{1}{d}}}} \quad (48)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^a x_i \leq M \quad (49)$$

$$\sum_{i \in K_k} x_i \leq v_k \quad \forall k = \{1, \dots, b\} \quad (50)$$

$$0 \leq x_i \leq u_i \quad \forall i = \{1, \dots, a\} \quad (51)$$

$$x_i \in \mathbb{Z}_0^+ \quad \forall i = \{1, \dots, a\}. \quad (52)$$

Neljäs kohdefunktio voidaan kirjoittaa myös muodossa

$$\sum_{i=1}^a \frac{1}{x_i + \sum_{j \in I_i} \frac{x_j + \frac{1}{d}}{e_{ij}}}. \quad (53)$$

Ensimmäinen kohdefunktio pyrkii vastaamaan alueella esiintyvään ambulanssitarpeeseen mahdollisimman hyvin. Käytännössä kohdefunktiossa pyritään saamaan tarkastelualuekohtaisesti määritetyn ambulanssitarpeen v_k ja tarkastelualueen asemapaikoille sijoitettavien ambulanssien summan erotus mahdollisimman lähelle nollaa. Tämä johtuu siitä, että oletuksena on, että tarkastelualueen rajaavat kolme asemapaikkaa vastaavat aina niiden väliin jäävän alueen kattamisesta. Asemapaikat toimivat aina useamman kuin yhden tarkastelualueen kärkipisteenä, mikä tarkoittaa sitä, että ne osallistuvat myös usean tarkastelualueen kattamiseen. itse asiassa aseman sijaintia voidaan pitää sitä kriittisempänä, mitä useamman alueen kattamiseen asema osallistuu. Tämä näkyy myös ensimmäisen kohdefunktion muotoilussa. Mitä useammin tietty asema osallistuu tarkastelualueiden kattamiseen, sitä enemmän kyseinen asema pystyy pienentämään minimoitavaa erotusta.

On huomionarvoista, että ensimmäinen kohdefunktio muistuttaa ideologialtaan melko paljon peitto-ongelmaa. Yksi oleellinen ero (erilaisen verkostorakenteen lisäksi) on siinä, että kattavuutta ei tässä tapauksessa määritellä etäisyyden avulla eikä myöskään saavutettavuustavoitteita kuvastavan ajan avulla. Kattavuus ajatellaan nyt tilanteeksi, jossa tietyllä määrällä ambulansseja olisi kokonaan tarkasteltavan ajanjakson aikana pystytty estämään ei-toivotun ilmiön esiintyminen. Ei-toivotulla ilmiöllä viitataan sellaiseen tilanteeseen, jossa tarkastelualueella on jollain ajanhetkellä useampi hälytys yhtäaikaaisesti käynnissä kuin mitä kyseisen tarkastelualueen kattamiseen osallistuville asemapaikoille on aseteltu ambulansseja.

Toinen poikkeavuus ongelman muotoilujen välillä on siinä, että peitto-ongelmassa vaaditaan, että kaikki alueet pystytään kattamaan. Tässä työssä peitto-ongelman täydellistä kattavuutta vaativat rajoitteet on relaksoitu kohdefunktion muotoon. Vaatimus täydellisestä kattavuudesta joudutaan sivuuttamaan, koska peitto-ongelman muotoiseen optimointiongelmaan

$$\begin{aligned}
 \min \quad & \sum_{i=1}^a x_i \\
 \text{s.t.} \quad & \sum_{i \in K_k} x_i \geq v_k \quad \forall k = \{1, \dots, b\} \\
 & 0 \leq x_i \leq u_i \quad \forall i = \{1, \dots, a\} \\
 & x_i \in \mathbb{Z}_0^+ \quad \forall i = \{1, \dots, a\}
 \end{aligned}$$

ei välttämättä aina löydetä sallittua ratkaisua. On mahdollista, että tuloksena saatu sijoitettavien ambulanssien lukumäärää kuvaava kohdefunktion arvo ylittää käytettävissä olevien ambulanssien lukumäärän. On myös mahdollista, että asemapaikoille ei voida sijoittaa niin montaa yksikköä kuin kaikkien tarkastelualueiden kattamiseksi olisi tarpeen. Tavoitteena onkin muodostaa mahdollisimman moneen tilanteeseen soveltuva monitavoiteoptimointimalli, minkä vuoksi ei vaadita täydellistä kattavuutta, vaan yritetään saada kattavuus toteutumaan mahdollisimman hyvin jokaisen tarkastelualueen kohdalla.

Toisen kohdefunktion avulla pyritään sijoittamaan ambulanssit sinne, missä ambulansseja työllistäviä hälytyksiä on sattunut eniten. Erot lähimpänä kutakin asemaa tapahtuneiden hälytysten määrissä ovat absoluuttisia lukumääriä tärkeämpiä, ja siksi kerroin p_i kuvastaakin hälytysten suhteellista jakautumista ambulanssiasemien lähiympäristöön. Toinen kohdefunktio on muista poiketen ilmaistu maksimoitavana tavoitteena lähinnä sen vuoksi, että tavoite on tällöin helpommin ymmärrettävissä. Kohdefunktio saa sitä paremman arvon mitä enemmän ambulansseja sijoitetaan sellaiselle asemalle, jota lähimpänä on tapahtunut tarkasteltavan ajanjakson aikana paljon hälytyksiä.

Kolmas ja neljäs kohdefunktio ohjaavat sijoittamaan ambulanssit siten, että mahdollisimman harva asema jäisi kokonaan ilman ambulansseja. Kolmas ja neljäs kohdefunktio toimivat hyvänä periaatteellisena vastapainona

ensimmäiselle ja toiselle kohdefunktiolle, jotka molemmat tukevat sitä, että suurimman hyödyn tuottavalle asemalle tulee asetella niin paljon ambulansseja kuin sinne vain mahtuu. Kolmas ja neljäs kohdefunktio onkin muotoiltu siten, että ne sakottavat suhteellisesti paljon siitä, jos jokin asema jätetään kokonaan ilman ambulanssia. Tällaisella sakottamisperiaatteella pyritään painottamaan sitä, että sillä sijoitetaanko asemapaikalle nolla vai yksi (tai useampia) ambulansseja on huomattava ero.

Kolmannen kohdefunktion nimittäjässä esiintyvällä termillä $1/w_k$ on suuri vaikutus termin $w_k/(x_i + (1/w_k))$ arvoon silloin, kun asemalle i sijoitetaan nolla ambulanssia. Tällöin päädymme jakamaan reippaasti ykköstä pienemmällä luvulla, joka tekee termin $w_k/(x_i + (1/w_k))$ tuloksesta hyvin suuren (ja näin ollen aseman jättämisestä ilman ambulanssia hyvin epätoivotun ratkaisun). Mikäli asemalle sijoitetaan ambulanssi (tai useampi), sakkotermillä ei ole lähestulkoon ollenkaan merkitystä (ykköstä suurempi luku jaettuna luvulla 2.0 on lähestulkoon täsmälleen sama kuin samainen luku jaettuna luvulla 2.1).

Kolmas kohdefunktio ohjaa sijoittamaan yksikön mieluiten sellaiselle asemalle, joka osallistuu mahdollisimman monen eri tarkastelualueen kattamiseen. Aseman osallistuessa monen tarkastelualueen kattamiseen, kyseiseen asemaan liittyviä $w_k/(x_i + (1/w_k))$ termejä tulee useampia kuin sellaisten, jotka osallistuvat harvempien tarkastelualueiden kattamiseen. Luonnollisesti tällöin useamman tarkastelualueen kattamiseen osallistuvan aseman ambulanssimäärällä on suurempi painoarvo.

Kolmannen kohdefunktion sakkotermi $1/w_k$ sakottaa kohdefunktiota sitä enemmän mitä suurempi asukasmäärä ilman ambulanssia jätettävän aseman vastuulla olevalla tarkastelualueella on. Siinä tapauksessa, että asemalle sijoitetaan nolla ambulanssia, kyseistä asema-katettava tarkastelualue -paria vastaava termi muuntuu muotoon w_k^2 . On selvää, että asukasmäärän jakamisen vaihtuminen sen korottamiseen toiseen potenssiin on suuri muutos. Tämä kertoo mallille, että on kannattavampaa jättää kattamatta sellainen asema, joka osallistuu paitsi mahdollisimman harvan tarkastelualueen kattamiseen myös mahdollisimman pienen asukasmäärän omaavien tarkastelualueiden kattamiseen.

Neljäs kohdefunktio eroaa kolmannesta siinä, että tällä kertaa pyritään jättämään ilman ambulanssia sellaiset asemat, joiden lähistöllä on paitsi eniten myös lähimpänä saatavilla olevaa apua. Neljännessä kohdefunktiossa oletetaan, että jokaisen aseman lähiympäristön auttamiskapasiteetti ei ulotu c lähintä asemaa pidemmälle. Rajoittuminen c lähimpään asemaan johtuu siitä, että liian monen naapuriaseman huomioon ottaminen voisi tasapäistää tuloksia liikaa, mikä taas vaikeuttaa lokaalien eroavaisuuksien havaitsemista. Toisaalta taas rajoittuminen liian pieneen naapuriasemien lukumäärään saattaa johtaa siihen, että jonkin aseman naapurustossa ei olisi ollenkaan apua tarjolla. Tällainen tilanne saattaisi vääristää sitä suhdetta, miten erilaisia asemien tilanteet todellisuudessa ovat.

Neljännessä kohdefunktiossa käytetään samaa sakotusperiaatetta kuin kolmannessa kohdefunktiossa. Kolmannesta kohdefunktioista poiketen neljännessä kohdefunktiossa esiintyvä sakkotermi on kiinteä. Sakkotermi on riippuvainen vain parametrin d arvosta. Parametrin d arvoa voi säätää tilannekohtaisesti sen mukaan, miten paljon naapuriasemien jättämisestä ilman ambulansseja halutaan sakottaa. Mitä suuremman arvon parametri d saa sitä suurempi vaikutus sakkotermillä on kohdefunktion arvoon.

Neljäs kohdefunktio poikkeaa kolmannesta kohdefunktioista myös siinä mielessä, että nyt sakotusperiaatetta sovelletaan useampaan kertaan. Muuttujan x_i saadessa nollaa suuremman arvon, kohdefunktion loppuosan vaikutus on mitätön. Silloin, kun asemalle i ei aseteta yhtään yksikköä, naapuriasemien merkitys kasvaa. Jokaisesta asema-naapuriasema parista muodostuu oma terminsä, joiden summaa pyritään minimoimaan. Pahin asemaparikohtainen tilanne on se, että asemalle i ei aseteta yhtään ambulanssia, eikä myöskään asemalle j . Tällöin päädytään sakottamaan maksimaalinen määrä. Kiinteä sakkotermi $1/d$ saa $x_j + (1/d)$ arvon pieneksi, joka taas saa $1/(x_j + (1/d))$ arvon suureksi. Kyseistä termiä painotetaan asemien välisellä etäisyydellä. Mitä suurempi etäisyys on sitä suurempi luonnollisesti on myös $e_{ij}(1/(x_j + (1/d)))$ arvo. Edelleen $1/(e_{ij}(1/(x_j + (1/d))))$ arvo on pieni (sitä pienempi mitä suurempi etäisyys asemien i ja j välillä on). Tällöin lopullisen termin $1/(x_i + (1/(e_{ij}(1/(x_j + (1/d))))))$ arvo on suuri (sitä suurempi mitä suurempi etäisyys asemien i ja j välillä on).

Luonnollisesti mitä useampi asemapareihin ij liittyvistä termeistä saa aseman i kohdalla suuren arvon sitä suurempi on myös niiden summa. Sitä ei-toivotumpaa aseman i jättäminen ilman ambulanssia tällöin on. Toisin päin ajateltuna neljäs kohdefunktio siis suosittelee sijoittamaan ambulansseja sellaisille asemille j , jotka sijaitsevat mahdollisimman lähellä mahdollisimman montaa asemaa. Tällöin aseman j ambulanssi osallistuu montaa asemaa i koskevan termin $1/(x_i + (1/(e_{ij}(1/(x_j + (1/d))))))$ arvon pienentämiseen, ja on näin ollen toivotumpi ratkaisu kuin jokin muu harvemman aseman lähistöllä sijaitseva asema. Sen määrittäminen, missä kohtaa on kokonaissumman minimoinnin kannalta hyödyllisempää sijoittaa ambulanssi sellaiselle asemalle, joka sijaitsee lähellä hieman harvempia asemia kuin sellaiselle asemalle, joka sijaitsee vähän kauempana (mutta silti kymmenen lähimmän aseman joukossa) useampia asemia, on erittäin vaikeaa.

Ensimmäinen ja toinen kohdefunktio ovat lineaarisia. Monitavoiteoptimointiongelma ei kuitenkaan kokonaisuudessaan ole lineaarinen, sillä sekä kolmas että neljäs kohdefunktio ovat epälineaarisia.

Ensimmäinen monitavoiteoptimointiongelman rajoitteista takaa sen, että ambulansseja ei tule sijoitettua käytettävissä oleville asemapaikoille enempää kuin ambulansseja on käytettävissä. Toinen monitavoiteoptimointiongelman rajoitteista on itse asiassa rajoiterypäs, joka takaa sen, että ensimmäisen kohdefunktion arvon pysymisen positiivisina kaikissa tapauksissa. Matemaattiset syyt eivät ole kuitenkaan ainoa motivaatio näihin rajoitteisiin. Sellaista tilannetta, jossa jollekin tarkastelualueelle sijoitetaan enemmän ambulansseja kuin mitä siellä on tarkasteltavan ajanjakson aikana pahimmillaan ollut tarve, voidaan pitää ei-toivottuna ilmiönä. Kolmas monitavoiteoptimointiongelman rajoitteista on sekin rajoiterypäs, joka takaa sen, ettei yhdellekään asemalle i sijoiteta enempää ambulansseja kuin sinne mahtuu.

5.1 Testiongelma

Kehitettyä monitavoiteoptimointimallia tullaan myöhemmin tässä työssä soveltamaan massiiviseen 75:stä kokonaislukumuuttujasta koostuvaan VSSHP:n ambulanssien sijoittamisongelmaan. Ongelman kokoluokasta sekä

monimutkaisuudesta johtuen tämän työn lopussa saatavien tulosten luotettavuutta olisi vaikea arvioida suoralta kädeltä. Tämän vuoksi kehitetyn monitavoiteoptimointimallin toimivuutta testataan ensin pienemmän sekä hieman yksinkertaistetun ongelman, testiongelman, ratkaisemisessa.

Testiongelmassa esiintyvä optimointiongelma on pyritty muotoilemaan siten, että se olisi rakenteeltaan mahdollisimman samanlainen VSSHP:n ambulanssien sijoittamisongelman kanssa, ja sisältäisi kaikki kehitetyn monitavoiteoptimointimallin toiminnan kannalta oleelliset aspektit. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että testiongelman tulee koostua useasta tarkastelualueesta. Lisäksi halutaan välttyä tasapäistämistä ongelmakenttää liikaa. Mahdollisten asemapaikkojen välillä tulee olla eroja sekä siinä, monenko tarkastelualueen kattamiseen kukin asemapaikka osallistuu että siinä, kuinka suuri osuus alueen hälytystehtävistä on tapahtunut lähinnä kutakin asemapaikkaa.

Testiongelmassa esiintyvää tilannetta tullaan yksinkertaistamaan paitsi pienentämällä huomattavasti käsillä olevan optimointiongelman dimensiota myös olettamalla, että niillä tarkastelualueilla, joilla on suurin ambulanssitarve, on myös suurin asukasluku. Tämä ei välttämättä pidä paikkaansa oikeassa elämässä. Testiongelma puhuttaessa kyseinen oletus on kuitenkin hyödyllinen. Se nimittäin auttaa monitavoitemallin avulla määritetyn sijoittamisratkaisun järkevyyden arvioinnissa.

Testiongelmassa pyritään selvittämään, mikä on optimaalinen tapa sijoittaa käytettävissä olevat ambulanssit tutkimusalueen kahdeksalle asemapaikalle. Jotta pystyttäisiin mahdollisimman objektiivisesti kartoittamaan millaisen ratkaisun suuntaan kehitetty monitavoiteoptimointimalli ohjaa, sallitaan jokaiselle asemapaikalle sijoitettavan maksimissaan kaksi ambulanssia. Valitaan sijoitettavien ambulanssien kokonaismääräksi kuusi yksikköä, jotta pystytään arvoimaan menetelmän toimivuutta myös tarkastelualueiden välillä. Suurin sallittu tarkastelualuekohtainen ambulanssitarve on viisi, joten vähintään yksi ambulanssi joudutaan sijoittamaan jonkin muun tarkastelualueen kattamisesta vastaavalle asemapaikalle.

On huomionarvoista, että yhdessä suhteessa tällä tavalla muodostettu testiongelma eroaa varsin paljon VSSHP:n ambulansseja koskevasta sijoittamisongelmasta. Testiongelmassa sijoitettavia ambulansseja on paljon enemmän

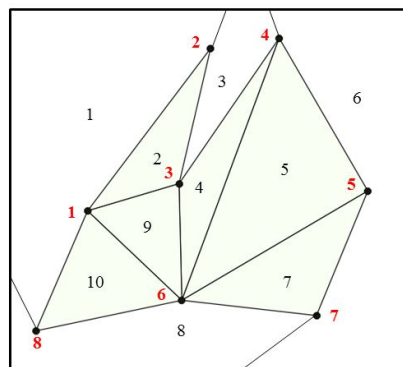
suhteessa mahdollisiin asemapaikkoihin kuin VSSHP:n ambulanssien sijoittamisongelmassa. Tällä ei sinänsä pitäisi olla vaikutusta monitavoiteoptimallin toimivuuteen, mutta se täytyy ottaa huomioon analysoitaessa syitä sille, miten hyvin kukin kehitetyn monitavoiteoptimointimallin tavoitteista toteutuu.

Testiongelmassa esiintyvät luvut eivät perustu mihinkään reaaliseen aineistoon. Myöskään tutkimusalue ei pohjaudu todellisuuteen, mutta se on jaettu tarkastelualueisiin samalla tavalla kuin mitä myöhemmin VSSHP:n ambulanssien sijoittamisongelmaa ratkaistaessa tullaan toimimaan. Asemapaikkojen väliset etäisyydet ovat mielivaltaisesti määritettyjä, mutta silti suhteessa oikeansuuruisia. Etäisyyksien välisten suhteiden realistisuus on tärkeää, jotta tulosten järkevyyden arviointi visuaalisesti on mahdollista.

Kuvassa 5 on tiivistetysti esitetty testiongelman ongelmakenttä sekä mahdollisiin asemapaikkoihin ja tarkastelualueisiin liittyvä aineisto. Karttakuvassa on merkitty mustalla tarkastelualueiden numerot ja punaisella verkoston solmuissa sijaitsevien mahdollisten asemapaikkojen numerot. Musta laatikkoreunus kuvastaa tutkimusalueen rajoja.

Tarkastelu- alue	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
v_k (10 min)	2	3	2	4	3	2	3	3	5	4
w_k	3000	6000	5750	9500	6500	5000	8500	7000	10000	9000

	p_i -kertoimet
x1	0.19
x2	0.02
x3	0.20
x4	0.12
x5	0.05
x6	0.25
x7	0.08
x8	0.09



Kuva 5: Testiongelman liittyvä tarkastelualueista ja mahdollisista asemapaikoista koostuva verkosto sekä ongelmakenttään liittyvä aineisto.

Taulukossa 1 on esitetty mahdollisten asemapaikkojen väliset etäisyydet matriisimuodossa. Jokaisella etäisyysmatriisin rivillä on merkitty punaisella kolme pienintä lukua. Nämä luvut kertovat, mitkä kolme asemaa ovat kunkin mahdollisen paikan naapuriasemat. Lähiasemiin liittyvää tietoa tarvitaan neljännen kohdefunktion muodostamisessa. Käsillä olevan ongelman kokoluokka määrää pitkälti sen, montako asemaa kannattaa ottaa mukaan niin kutsutun naapurivaikutuksen mallintamiseen.

Testiongelman tapauksessa parametrille c päädyttiin antamaan arvo kolme lähinnä sen vuoksi, että neljä asemaa olisi tarkoittanut jo puolta kaikista mahdollisista asemapaikoista, ja näin suuren osuuden huomioon ottaminen olisi voinut vaikeuttaa lokaalien eroavaisuuksien mallintamista. Kaksi lähintä asemaa puolestaan ovat melko usein juuri ne kaksi muuta saman tarkastelualueen rajaavaa asemaa, mikä ei ole sekään optimaalista, sillä neljännen kohdefunktion tarkoituksena on mallintaa naapuruussuhteita tarkastelualuekohtaista tarkkuutta laajemmin.

	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8
x1	0	44000	20000	55000	60000	29000	54000	26000
x2	44000	0	29000	14000	45000	54000	61000	70000
x3	20000	29000	0	37000	41000	25000	41000	44000
x4	55000	14000	37000	0	38000	60000	59000	81000
x5	60000	45000	41000	38000	0	46000	29000	77000
x6	29000	54000	25000	60000	46000	0	30000	32000
x7	54000	61000	41000	59000	29000	30000	0	60000
x8	26000	70000	44000	81000	77000	32000	60000	0

Taulukko 1: Testiongelmaan liittyvien asemien väliset etäisyydet.

Kappaleessa 4 kehitetyn monitavoiteoptimointimallin toinen kohdefunktio on ilmaistu maksimoitavana tavoitteena. On kuitenkin jollain tavalla selkeämpää (varsinkin monitavoiteoptimointiongelman ratkaisuvaiheessa), jos kaikkien kohdefunktioiden arvot muuttuvat samaan suuntaan kohdefunktion arvon huonontuessa/parantuessa.

Muunnetaan siis toinen kohdefunktio minimointitehtävän muotoon

$$\min - \sum_{i=1}^a p_i x_i. \quad (54)$$

VSSHP:n ambulanssien sijoittamisongelmaa ratkaistaessa parametri d tulee saamaan arvon 100, joten käytetään sitä samaa testiongelman tapauksesakin. Kappaleessa 4 kehitetty monitavoiteoptimointimalli saa testiongelman ongelmakenttään sovellettuna muodon

$$\begin{aligned} \min \quad & 31 - 4x_1 - 3x_2 - 4x_3 - 4x_4 - 3x_5 - 6x_6 - 3x_7 - 3x_8 \\ \min \quad & -0.19x_1 - 0.02x_2 - 0.20x_3 - 0.12x_4 - 0.05x_5 - 0.25x_6 - 0.08x_7 - 0.09x_8 \\ \min \quad & \frac{3000}{x_1 + \frac{1}{3000}} + \frac{3000}{x_2 + \frac{1}{3000}} + \frac{3000}{x_8 + \frac{1}{3000}} + \frac{6000}{x_1 + \frac{1}{6000}} + \frac{6000}{x_2 + \frac{1}{6000}} + \frac{6000}{x_3 + \frac{1}{6000}} \\ & + \frac{5750}{x_2 + \frac{1}{5750}} + \frac{5750}{x_3 + \frac{1}{5750}} + \frac{5750}{x_4 + \frac{1}{5750}} + \frac{9500}{x_3 + \frac{1}{9500}} + \frac{9500}{x_4 + \frac{1}{9500}} + \frac{9500}{x_6 + \frac{1}{9500}} \\ & + \frac{6500}{x_4 + \frac{1}{6500}} + \frac{6500}{x_5 + \frac{1}{6500}} + \frac{6500}{x_6 + \frac{1}{6500}} + \frac{5000}{x_4 + \frac{1}{5000}} + \frac{5000}{x_5 + \frac{1}{5000}} + \frac{5000}{x_7 + \frac{1}{5000}} \\ & + \frac{8500}{x_5 + \frac{1}{8500}} + \frac{8500}{x_6 + \frac{1}{8500}} + \frac{8500}{x_7 + \frac{1}{8500}} + \frac{7000}{x_6 + \frac{1}{7000}} + \frac{7000}{x_7 + \frac{1}{7000}} + \frac{7000}{x_8 + \frac{1}{7000}} \\ & + \frac{10000}{x_1 + \frac{1}{10000}} + \frac{10000}{x_3 + \frac{1}{10000}} + \frac{10000}{x_6 + \frac{1}{10000}} + \frac{9000}{x_1 + \frac{1}{9000}} + \frac{9000}{x_6 + \frac{1}{9000}} + \frac{9000}{x_8 + \frac{1}{9000}} \\ \min \quad & \frac{1}{x_1 + \left(\frac{x_3 + \frac{1}{100}}{20000} + \frac{x_6 + \frac{1}{100}}{29000} + \frac{x_8 + \frac{1}{100}}{26000}\right)} + \frac{1}{x_2 + \left(\frac{x_1 + \frac{1}{100}}{44000} + \frac{x_3 + \frac{1}{100}}{29000} + \frac{x_4 + \frac{1}{100}}{14000}\right)} \\ & + \frac{1}{x_3 + \left(\frac{x_1 + \frac{1}{100}}{20000} + \frac{x_2 + \frac{1}{100}}{29000} + \frac{x_6 + \frac{1}{100}}{25000}\right)} + \frac{1}{x_4 + \left(\frac{x_2 + \frac{1}{100}}{14000} + \frac{x_3 + \frac{1}{100}}{37000} + \frac{x_5 + \frac{1}{100}}{38000}\right)} \\ & + \frac{1}{x_5 + \left(\frac{x_3 + \frac{1}{100}}{41000} + \frac{x_4 + \frac{1}{100}}{38000} + \frac{x_7 + \frac{1}{100}}{29000}\right)} + \frac{1}{x_6 + \left(\frac{x_1 + \frac{1}{100}}{29000} + \frac{x_3 + \frac{1}{100}}{25000} + \frac{x_7 + \frac{1}{100}}{30000}\right)} \\ & + \frac{1}{x_7 + \left(\frac{x_3 + \frac{1}{100}}{41000} + \frac{x_5 + \frac{1}{100}}{29000} + \frac{x_6 + \frac{1}{100}}{30000}\right)} + \frac{1}{x_8 + \left(\frac{x_1 + \frac{1}{100}}{26000} + \frac{x_3 + \frac{1}{100}}{44000} + \frac{x_6 + \frac{1}{100}}{32000}\right)} \\ \text{s.t.} \quad & x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 \leq 6 \\ & x_1 + x_2 + x_8 \leq 2 \quad x_1 + x_2 + x_3 \leq 3 \quad x_2 + x_3 + x_4 \leq 2 \\ & x_3 + x_4 + x_6 \leq 4 \quad x_4 + x_5 + x_6 \leq 3 \quad x_4 + x_5 + x_7 \leq 2 \\ & x_5 + x_6 + x_7 \leq 3 \quad x_6 + x_7 + x_8 \leq 3 \quad x_1 + x_3 + x_6 \leq 5 \\ & x_1 + x_6 + x_8 \leq 4 \end{aligned}$$

$$\begin{array}{cccc}
0 \leq x_1 \leq 2 & 0 \leq x_2 \leq 2 & 0 \leq x_3 \leq 2 & 0 \leq x_4 \leq 2 \\
0 \leq x_5 \leq 2 & 0 \leq x_6 \leq 2 & 0 \leq x_7 \leq 2 & 0 \leq x_8 \leq 2 \\
x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8 \in \mathbb{Z}_0^+.
\end{array}$$

Testiongelma ratkaistaan interaktiivisella monitavoiteoptimointiongelmien ratkaisemiseen soveltuvalla NIMBUS-menetelmällä samoin kuin myös VSSHP:n ambulanssien sijoittamisongelma tullaan myöhemmin tässä työssä ratkaisemaan. Perustelut sille, miksi sekä testiongelma että VSSHP:n ambulanssien sijoittamisongelma tullaan ratkaisemaan luokitteluun perustuvan NIMBUS-menetelmän avulla, löytyvät kappaleesta 7.1.

On huomionarvoista, että kappaleessa 7.1.1 esiteltävä WWW-NIMBUS -ohjelmisto kaatuu aikakatkaisuun jo ratkaisuprosessin ensimmäisessä vaiheessa, jos testiongelman ongelma syötetään sinne täsmälleen yllä olevassa muodossa. Ongelma poistuu kuitenkin siinä tapauksessa, että osa jakolaskuista suoritetaan jo etukäteen. Näin voidaan tehdä neljännessä kohdefunktiossa esiintyvän etäisyyttä kuvaavan termin kanssa. Sen sijaan, että kerrottaisiin lauseketta $x_j + \frac{1}{100}$ termillä $\frac{1}{e_{ij}}$, kerrotaankin se tämän jakolaskun tuloksella. Wolfram Mathematica -ohjelmisto (lisätietoja kappaleessa 7) on tässä suureksi avuksi. Siellä on olemassa käsky $N[.]$, joka muuntaa hakasulkeiden sisässä olevan lausekkeen desimaalimuotoon. Kyseinen havainto on tärkeä siirryttäessä kohti monimutkaisempaa ja huomattavasti laajempaa VSSHP:n ambulanssien sijoittamisongelmaa.

Neljännen kohdefunktion esittämismuotoon kohdistuneiden muokkausten jälkeen WWW-NIMBUS -ohjelmistolla saadaan määritettyä monitavoiteoptimointiongelman "optimi". Testiongelman tapauksessa optimilla tarkoitetaan sellaista WWW-NIMBUS -ohjelmiston avulla löydettyä Pareto-optimaalista ratkaisupistettä, jossa kaikki neljä kohdefunktiota toteutuivat paitsi mahdollisimman hyvin, myös keskenään tasaisesti. Tällöin pystytään parhaiten arvioimaan sitä, ohjaako neljästä kohdefunktiosta koostuva optimointimalli kohti realistista lopputulosta. Sellaista ratkaisupistettä, jossa kohdefunktiot toteutuisivat suhteessa täsmälleen yhtä hyvin, ei pystytty Pareto-optimaalisten ratkaisuvaihtoehtojen joukosta löytämään. Kappaleessa 7.3 tullaan avaamaan tarkemmin, miten kohdefunktioiden suhteellista

toteutumistasoa ollaan mitattu. Samassa kappaleessa on myös dokumentoitu VSSHP:n ambulanssien sijoittamisongelman ratkaisuprosessi vaihe vaiheelta. Testiongelman on ratkaistu samoja periaatteita noudattaen.

Kahdeksanulotteisessa ratkaisupisteessä ensimmäinen kohdefunktio saa arvon 4, toinen kohdefunktio arvon -1.1, kolmas kohdefunktio arvon 363 942 800 ja neljäs kohdefunktio arvon 37 969. Ensimmäinen kohdefunktio voi tämän harjoitusongelman tapauksessa saada arvoja väliltä [3, 31] ja toinen kohdefunktio väliltä [-1.2, 0]. Vastaavasti kolmas kohdefunktio voi saada arvoja väliltä [217 738 500, 1 613 438 000] ja neljäs kohdefunktio väliltä [15 994.54, 7 463 228].

Huomataan, että lopulliseksi ratkaisuksi valikoituneessa ratkaisupisteessä parhaiten toteutuu neljäs kohdefunktio ja heikoiten kolmas kohdefunktio. Neljännen kohdefunktion (muihin suhteutettuna poikkeuksellisen) hyvää toteutumista selittää se, että testiongelmassa oli käytettävissä huomattavan paljon ambulansseja suhteutettuna mahdollisten asemapaikkojen lukumäärään. Neljäs kohdefunktio perustuu kerrostukselliseen sakottamiseen, joka pystyttiin tässä tapauksessa tehokkaasti välttämään, kun periaatteessa tarvitsisi jättää vain kaksi asemaa ilman ambulanssia. Lisäksi ambulanssittomien asemapaikkojen kolmen lähimmän aseman joukosta löytyy lähestulkoon varmasti yksi tai useampia ambulansseja, jotka pienentävät ilman ambulanssia jättämisestä koituvia sakotuksia.

Periaatteessa kolmannenkin kohdefunktion tulisi hyötyä siitä, että pakosta tarvitsee jättää vain kaksi asemaa kattamatta. Näin onkin, mutta sakotusermi on luonteeltaan kovin erilainen neljännen kohdefunktioon verrattuna. Neljännessä kohdefunktiossa itse sakotusermi on kiinteä ja sen kertautuminen riippuu lähiympäristöstä. Kolmannessa kohdefunktiossa taas sakkotermien suuruus vaihtelee tarkastelualueittain, ja se on myös huomattavasti suurempi kuin neljännen kohdefunktion "sisin" 1/100-sakkotermi. Kolmannen kohdefunktion huonompaa toteutumista selittää se, että sakotusta ei hillitse mikään; jos mahdollinen asemapaikka jätetään kattamatta, siitä rankaistaan suoraan.

Kolmannen ja neljännen kohdefunktion toteutumisessa havaittavat erot tulevat tasoittumaan siinä kohtaa, kun ongelman dimensio nousee ja ennen

kaikkea suhde sijoitettavien ambulanssien lukumäärän ja mahdollisten asemapaikkojen lukumäärän välillä kääntyy kohti tilannetta, jossa ambulansseja on käytettävissä reilusti vähemmän kuin tutkimusalueella on mahdollisia asemapaikkoja. Silloin myös neljännen kohdefunktion sakotuseriaate alkaa toimia paremmin kerryttäen suurempaa rangaistusta (neljännen kohdefunktion arvointervallin sisällä) jonkin mahdollisen asemapaikan kattamatta jättämisestä.

WWW-NIMBUS -ohjelmistolla määritetyssä optimipisteessä testiongelman mahdollisille asemapaikoille sijoitettavien ambulanssien lukumäärää kuvaavat muuttujat saivat seuraavat arvot: $x_1 = 1$, $x_3 = 1$, $x_4 = 1$, $x_6 = 2$ ja $x_8 = 1$. Loput muuttujista (eli x_2, x_5, x_7) saivat arvon nolla. Saatua ratkaisua tukevat ainakin seuraavat seikat:

- Tarkastelualueella 9 on suurin ambulanssitarve sekä asukasluku
→ Asemat 1,3 ja 6 ovat tärkeitä
- Aseman 6 sijainti on kriittisin (toisin sanoen asema 6 osallistuu useamman tarkastelualueen kattamiseen kuin mikään muu asema)
- Aseman 6 läheisyydessä on esiintynyt suhteessa eniten hälytystehtäviä
- Asemat 4 ja 8 osallistuvat tarkastelualueen 9 jälkeen sekä ambulanssitarpeen että asukasmäärän avulla vertailtuna kriittisimpien tarkastelualueiden kattamiseen
- Ambulanssikapasiteettia on pyritty "venyttämään" mahdollisimman kattavasti koko tutkimusalueelle
- Ilman ambulanssia jätettävät asemat ovat sijaitsevat kaikki tutkimusalueen reunoilla
→ Mikään muu asema ei osallistu harvemman tarkastelualueen kattamiseen kuin nämä kolme asemaa
- Ilman ambulanssia jätettävien asemien läheisyydessä oli myös sattunut vähiten hälytystehtäviä.

Edellä listatut ominaisuudet menevät aika lailla yksi yhteen niiden ominaisuuksien kanssa, joita geneeristä monitavoiteoptimointimallia luotaessa pidettiin keskeisinä hyvän ambulanssien sijoittamissuunnitelman ominaisuuksina. On huomionarvoista, että vaikka kolmas ja neljäs kohdefunktio saattavat melko voimakkaastikin siitä, että jokin asema jää ilman ambulanssia, monitavoiteoptimointimalli antaa silti optimaaliseksi ratkaisuksi sijoittaa jollekin asemalle enemmän kuin yksi ambulanssi.

Suosituksista kahden ambulanssin sijoittamisesta asemalle 6 voidaan pitää perustellusti järkevänä. Ensinnäkin aseman 6 läheisyydessä on sattunut entisen hälytystehtäviä. Toisekseen asema 6 sijaitsee kriittisessä kohdassa verkostoa osallistuen monen tarkastelualueen kattamiseen. Edellisen huomion painoarvoa nostaa entisestään se, että tarkastelualueisiin, joiden kattamiseen asema 6 osallistuu, liittyy sekä suurimmat tarkastelualuekohtaiset asukasluvut että ambulanssitarpeet. Saatu ratkaisu on silläkkin tavalla miellyttävä, että jokaisen tarkastelualueen asemista vähintään yhdelle sijoitetaan ambulanssi/ambulansseja. Lisäksi jokaisen ilman ambulanssia jäävän aseman kolmen lähimmän aseman joukosta löytyy vähintään yksi asema, jolle suositellaan sijoitettavan ambulanssi/ambulansseja. Kaiken kaikkiaan monitavoiteoptimointimallin kriteerit tuntuvat ohjaavan luotettavasti kohti halutut ominaisuudet mahdollisimman hyvin täyttävää ratkaisua.

6 Ambulanssien optimaalinen sijoittaminen Varsinais-Suomen sairaanhoitopiirin alueella

Tässä luvussa sovelletaan geneeristä monitavoiteoptimointimallia VSSHP:n ambulanssien optimaaliseen sijoittamiseen liittyvän ongelman ratkaisemiseen. Varsinais-Suomen sairaanhoitopiirin alueella sijaitsee 75 kappaletta paloasemia ja vapaapalokuntia, joiden tiloihin ambulansseja voidaan sijoittaa. Symboli a saa siis VSSHP:n ambulanssien sijoittamisongelman tapauksessa arvon 75. Aseman muuttujan indeksi i juontaa juurensa siitä, monesko kyseinen asema on asemien nimen mukaan aakkostamalla muodostetussa jonossa. Esimerkiksi päätösmuuttuja x_1 kuvastaa Alastaron asemalle sijoitettavien

ambulanssien lukumäärää. Asemille pystytään sijoittamaan vaihteleva määrä ambulansseja. Maksimaalista sijoituspaikkakapasiteettia kuvaava symboli u_i saa arvoja väliltä [1, 7]. Tarkka listaus mahdollisista asemapaikoista, niiden tunnuksista sekä niiden maksimaalisesta sijoituspaikkakapasiteetista löytyy liitteestä C.1 taulukosta 13.

Varsinais-Suomen sairaanhoitopiiri, ja näin ollen myös tutkimusalue, koostuu 27 kunnasta: Aura, Kaarina, Kemiönsaari, Koski tl, Kustavi, Laitila, Lieto, Loimaa, Marttila, Masku, Mynämäki, Naantali, Nousiainen, Oripää, Paimio, Parainen, Punkalaidun, Pyhäranta, Pöytyä, Raisio, Rusko, Salo, Sauvo, Somero, Taivassalo, Turku, Uusikaupunki ja Vehmaa [52]. Monitaivoiteoptimointimalli sisältää paljon spatiaalista ulottuvuutta (toisin sanoen sijaintiin perustuvaa) hyödyntävää tietoa, jota täytyy pystyä luomaan ja käsittelemään jossain. Paikkatieto-ohjelmisto tarjoaa tähän oivan vaihtoehdon. Tässä työssä on hyödynnetty avoimen lähdekoodin paikkatieto-ohjelmistoa Quantum GIS (QGIS) [49].

Quantum GIS QGIS-ohjelmiston avulla pystytään visualisoimaan, käsittelemään, muokkaamaan sekä analysoimaan aineistoa, johon liittyy sijaintitietoa. QGIS-ohjelmiston toiminta perustuu useiden eri karttatasojen sisältämän tietomäärän prosessointiin. Karttatasot voivat olla joko vektorimuotoisia tai rasterimuotoisia. Rasterimuotoinen taso koostuu pienistä, rastereiksi kutsuttavista, ruuduista. Jokaiseen rasteriin liittyy sen vasemmasta alakulmasta tallennetun sijaintitiedon lisäksi kartoitettavaa ilmiötä kuvaava arvo. Rasteriin liittyvää ominaisuutta kuvaava arvo voi olla joko absoluuttinen arvo (esimerkiksi lämpötila) tai kategorinen tunnus (spesifioi esimerkiksi mihin maanpeiteluokkaan rasteri kuuluu). Ominaisuustietotaulussa on lueteluna kaikki eri arvot, joita kuvattu ominaisuus rasteritasossa on saanut, ja niihin liittyvät tiedot (esimerkiksi tiettyyn luokkaan kuuluvien rastereiden lukumäärä). Rasterimuotoisesta datasta voidaan hahmottaa joitakin alueita ja muotoja, mutta näiden "objektien" tunnistaminen perustuu ihmissilmän tulkintaan samanarvoisista, ja näin ollen kuvassa samalla värillä kuvautuvista rastereista. Rasterimuotoinen taso ei käsittele dataa objekteina, joten se sopii hyvin jatkuvien ilmiöiden (esimerkiksi maaperän kosteus) kuvaamiseen.

Rasteritaso myös mahdollistaa vektoritasoa paremmin objektien sisäisen diversiteetin havainnollistamisen. Tämä johtuu siitä, että yhden rasterin koko on usein reaali maailman objektia (esimerkiksi peltoalue) pienempi, jolloin erotuskyky on parempi. [41]

Vektorimuotoisessa tasossa objektit ovat tarkkaan määriteltyjä nooiden (solmu) ja segmenttien (kaari) avulla. Tällöin pystytään kuvaamaan kaiken muotoisia ja keskenään eri kokoisia objekteja toisin kuin rasterimuotoisessa tasossa. Taso sisältää tyypillisesti vain yhdentyypisiä objekteja, esimerkiksi ambulanssiasemia tai hälytyksiä, ja jokaiseen objektiin liittyy geometrisen tiedon (objektin muoto ja sijainti kartalla) lisäksi attribuuttitietoa. Attribuuttitiedon avulla kuvataan objektiin liittyviä ominaisuuksia. Ominaisuustietotaulussa jokainen rivi vastaa karttatason objektia ja sarake vastaa jotakin ominaisuutta (esimerkiksi hälytystehtävän koodi tai sijainnin x-koordinaatti). Objektiin liitettäville ominaisuustiedoille ei ole olemassa ylärajaa, mutta jokaiseen ominaisuustietoon voi liittyä vain yksi arvo. Tämä arvo voi olla ilmaistuna numeerisen tiedon lisäksi esimerkiksi tekstinä. [41]

Paikkatieto-ohjelmistoissa käytettävät menetelmät jakaantuvat kahteen eri tyyppiin: spatiaalisiin ja ei-spatiaalisiin menetelmiin. Yksinkertaisimmillaan spatiaalinen menetelmä on objektien valitsemista kartalta ja ei-spatiaalinen menetelmä on objektien valitsemista attribuuttitaulun kautta (esimerkiksi valitse sellaiset objektit, joiden asukasmäärä on yli 10 000). Kyselyjen tekeminen on mahdollista, sillä QGIS tukee SQL-kyselykieltä. SQL (Structured Query Language) on ohjelmointikieli, joka on erikoisesti suunniteltu helpottamaan datan prosessointia relaatiotietokannoissa. SQL perustuu suhteelliseen algebraan, jonka avulla voidaan lisätä dataa, suodattaa tietoa kyselyitä tekemällä, päivittää ja poistaa tietoa sekä kontrolloida aineistoa. SQL-kieli rakentuu lausekkeista, joiden avulla määritellään kyselyihin liittyvät komponentit sekä varsinaiset kyselylausekkeet. [41]

QGIS-ohjelmisto tukee myös monia muita formaatteja kuin valmiita vektori-/rasteritasoja. Tämä mahdollistaa esimerkiksi csv-tiedostojen (erotinmerkkejä sisältävä tiedosto) avaamisen ja käsittelyn paikkatieto-ohjelmassa. Paikkatieto-ohjelmistossa suoritettujen prosessien tuloksia on myös monissa tapauksissa mahdollista tallentaa ja viedä ulos ohjelmistosta

csv-muodossa. QGIS tukee myös monia eri koordinaattijärjestelmiä. Koordinaattijärjestelmä muodostuu koordinaattiakselistosta ja koordinaateista [41]. Koordinaatit taas ovat lukuarvoja, joiden avulla ilmoitetaan kohteen tarkka sijainti maapallon pinnalla astelukuina tai metrimääräisinä arvoina [41].

Se, että QGIS-ohjelmisto pystyy suorittamaan koordinaatistomuunnoksia (prosessi, jossa yhdessä koordinaatistossa oleva aineisto muunnetaan toiseen koordinaatistoon) osoittautuu usein varsin hyödylliseksi ominaisuudeksi. Kaikkien QGIS-projektin tasojen täytyy nimittäin olla samassa koordinaatistossa, jotta niitä voidaan tarkastella visuaalisesti päällekkäin/rinnakkain, ja niiden välillä voidaan tehdä spatiaalista analyysia. Käytännössä (myös VSSHP:n ambulanssien sijoittamisongelman tapauksessa) yhteen projektiin liittyy usein monista eri lähteistä tullutta aineistoa, jolloin ei ole ollenkaan poikkeuksellista, että sijaintitiedot on ilmaistu eri koordinaatistossa.

6.1 Aineistojen siirtäminen paikkatieto-ohjelmistoon

Tutkimusalueen rajat saatiin siirrettyä QGIS-ohjelmistoon lataamalla Maanmittauslaitoksen ylläpitämästä avoimien aineistojen tiedostopalvelusta Suomen kuntarajat [28]. Tiedostopalvelussa käyttäjä pääsee valitsemaan ladattavan tuotteen mieleisessään mittakaavassa ja valitsemaan alueen, jolta hän kyseistä aineistoa haluaa. Tämän jälkeen tiedostopalvelu toimittaa latauslinkin annettuun sähköpostiosoitteeseen.

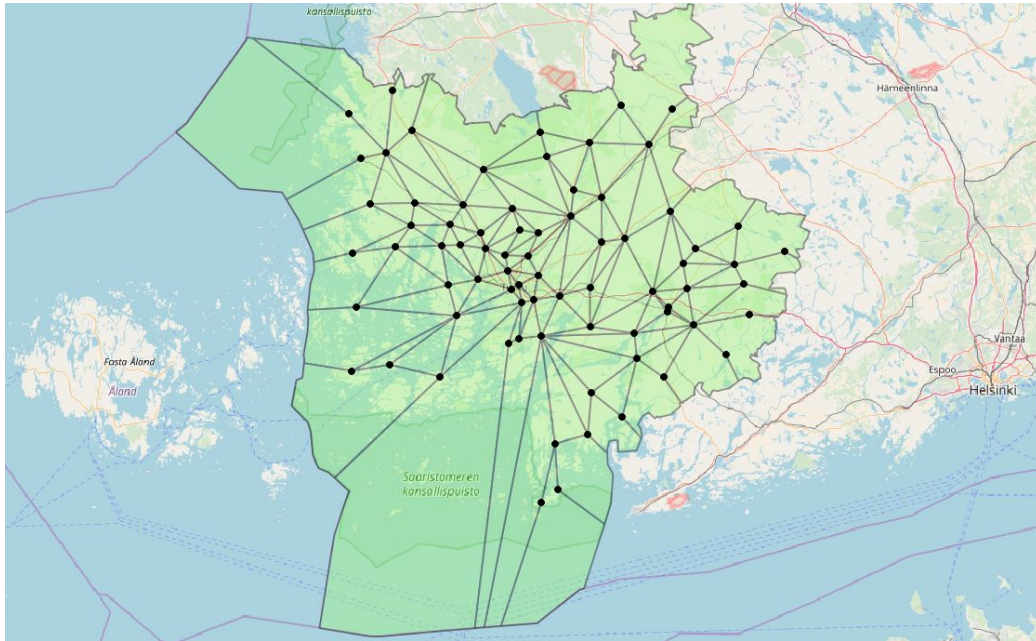
Kuntarajat on annettu vektorimuodossa, joten ne pystyttiin tiedostojen lataamisen jälkeen avaamaan suoraan vektoritasona QGIS-ohjelmistossa. Vektoritasoa muokattiin siten, että sinne jätettiin ainoastaan Varsinais-Suomen sairaanhoitopiirin alueelle kuuluvien kuntien rajat. Käytännössä tämä tapahtui siten, että koko Suomen kuntarajat sisältävän vektoritason ominaisuustietotaulu avattiin ja siellä suoritettiin objektien valinta lausekkeen avulla. Lauseke muotoiltiin SQL-kielillä sellaiseksi, että tasosta voitiin valita sellaiset objektit, joiden objektien nimeä kuvaavan kentän arvo oli sama kuin jokin Varsinais-Suomen sairaanhoitopiirin alueeseen kuuluvien kuntien nimistä. Valintaprosessin suorittamisen jälkeen suljettiin ominaisuustietotaulu ja luotiin koko Suomen kuntarajat sisältävästä vektoritasosta uusi vektoritaso,

johon otettiin mukaan vain tällä hetkellä valittuna olevat objektit.

Tämän jälkeen paikkatieto-ohjelmistoon siirrettiin käytettävissä olevia asemapaikkoja koskevat tiedot. Tiedot asemapaikkojen nimistä, sijainnista (osoite sekä koordinaatit) ja maksimaalisesta ambulanssipiikkakapasiteetista saatiin Varsinais-Suomen sairaanhoitopiiriltä csv-tiedostona. Kyseinen tiedosto pystyttiin suoraan avaamaan QGIS-ohjelmistossa spesifioimalla käytetty erotinmerkki ja kertomalla ohjelmistolle mistä sarakkeista löytyvät objektin sijainnin määrittävät x- ja y-koordinaatit. QGIS loi automaattisesti csv-tiedoston avaamisen yhteydessä siitä vektoritason.

6.2 Tarkastelualuejako

Perustietojen siirtämisen jälkeen QGIS-paikkatieto-ohjelmistossa suoritettiin tutkimusalueen jakaminen kolmen aseman rajaamiin, pääasiassa kolmionmuotoisiin tarkastelualueisiin. Kuvasta 6 nähdään, millaiseen tarkastelualuejakoon päädyttiin. Kuvan 6 mittakaava on 1:4 757 350. Tarkastelualueita luotiin yhteensä 123 kappaletta (kehitettyssä monitavoiteoptimointimallissa esiintyvä symboli b saa siis arvon 123). Luonnollisesti myös indeksijoukkoja K_k syntyy tällöin 123 kappaletta. Tarkka listaus siitä, mitkä kolme indeksiä kuuluvat kunkin tarkastelualueen indeksijoukkoon K_k löytyy liitteestä C.1 taulukosta 14.



Kuva 6: Tutkimusalueen jako tarkastelualueisiin. Mahdolliset asemapaikat on merkattu mustilla pisteillä.

Reunimmaisiet tarkastelualueet poikkeavat muodoltaan kolmioista. Tämä johtuu siitä, että tarkastelualueiden avulla haluttiin pystyä kattamaan koko Varsinais-Suomen sairaanhoitopiiri. Siispä reunimmaisiet "kolmiot" laajennettiin Varsinais-Suomen sairaanhoitopiirin reunoille suorilla viivoilla, jotka kohdistuivat kohti tutkimusalueen ulkopuolelle luotuja kohdennuspisteitä. Kohdennuspisteitä oli yhteensä kahdeksan kappaletta. Neljä näistä loivat tutkimusalueen ympärille ajateltavan ison neliön kulmapisteet, ja loput neljä sijoituivat jokaisen kuvitteellisen neliön sivujan keskikohtaan. Valinta siitä, mitä kohdennuspistettä kohti reunimmaisten tarkastelualueiden asemista lähtevät suorat viivat kohdistuivat, perustuu siihen, että samaa tarkastelualueita rajaavat reunaviivat eivät saa leikata toisiaan tutkimusalueen sisällä. Myöskään eri tarkastelualueita rajaavien viivojen ei sallittu leikata toisiaan (olisi johtanut uusien tarkoituksettomien alueiden syntyyn).

6.3 Tarkastelualuekohtaisen ambulanssitarpeen määrittäminen

Ambulanssitarve v_k on määritetty jokaiselle tarkastelualueelle k erikseen. Ambulanssitarve määritetään VSSHP:n ambulanssien sijoittamisongelmaa varten luodulla Python-kielisellä ohjelmalla. Ohjelman avulla pystytään selvittämään suurin mahdollinen yhtäaikaisesti tehtävissä vuonna 2016 kiinni olleiden ambulanssien lukumäärä. Kuitenkin sillä rajoituksella, että saman päällekkäisten tehtävien lukumäärän tulee olla voimassa yhtäjaksoisesti vähintään w minuuttia, jotta sitä voidaan pitää riittävän merkittävänä ilmiönä.

Tarkastelualuekohtaiset ambulanssitarpeet on määritetty tässä työssä käyttämällä kahta erilaisista minuuttirajaa w : 10 minuuttia ja 30 minuuttia. Kyseiset minuuttirajat liittyvät Varsinais-Suomen sairaanhoitopiirin alueella ensihoidolle asetettuihin tavoittamistavoitteisiin. Tavoiteaika, jossa jokaiseen hälytykseen pyritään vastaamaan, on 10 minuuttia. Kymmenen minuutin tavoitteen toteutuminen ei kuitenkaan ole aina mahdollista. Tämän vuoksi tavoittamistavoitteisiin liittyy myös vaatimus, jonka mukaan jokaiseen hälytykseen on pystyttävä vastaamaan puolen tunnin sisällä. Tässä työssä käytetään 10 minuutin yhtäjaksoista minimikestoa edellyttävää versioita ambulanssitarpeesta. Tähän päädyttiin sen vuoksi, että tässä vaiheessa pyritään vasta selvittämään optimaaliset ambulanssien sijoituspaikat kiinteiden asemapaikkojen joukosta, jolloin on aivan perusteltua pyrkiä toteuttamaan ambulanssien saavutettavuuden tavoitetaso mahdollisimman hyvin.

Ambulanssitarpeen määrittävä Python-koodin syötetiedosto pohjautuu csv-tiedostoon, joka sisältää jokaiseen vuoden 2016 aikana sattuneeseen hälytystehtävään liittyvän ajanhetken, jolloin hälytystehtävä on käynnistynyt, ja ajanhetken, jolloin hälytystehtävä on päättynyt. Hälytystehtävän alkamis- ja päättymisajanhetken välisen ajan ambulanssi on kiinni kyseisessä hälytystehtävässä. Hälytyksen vastaanottamistiedot ovat ambulanssikohtaisia eli jos samaa hälytystehtävää lähtee suorittamaan kaksi ambulanssia, tekstitiedostossa näkyy kaksi samaan hälytykseen liittyvää riviä, joissa tehtävää suorittamaan lähteneen yksikön tunnus on eri.

Ambulanssitarpeesta saadaan luotua tarkastelualuekohtainen ilmiö, kun vuoden 2016 hälytystiedot sisältävä csv-tiedosto avataan paikkatieto-ohjelmistossa vektoritasona. Ensimmäiseksi onkin suoritettava vuoden 2016 hälytystiedot sisältävälle vektoritasolle spatiaalinen tasojen leikkaus - operaatio, jossa luodaan uusi taso niistä vuoden 2016 hälytystiedot sisältävän vektoritason objekteista, jotka sijaitsevat tarkastelualueen k sisällä. Voidaan nimittäin pitää toivottavana sellaista yleistä periaatetta, että tarkastelualueen rajaavien asemien ambulanssien yhteenlaskettu ambulanssikapasiteetti riittää vastaamaan kaikkiin tarkastelualueella ilmaantuviin hälytyksiin 10 minuutin tavoiteajassa.

Seuraavaksi uusien paikkatieto-ohjelmiston avulla luotujen vektoritasojen ominaistietotaulu avataan ja kaikki tason sisältämä tieto tallennetaan ensin csv-tiedosto -muodossa ja sen jälkeen edelleen tekstitiedostoksi, jonka ambulanssitarpeen määrittävä Python-ohjelma tulee saamaan syötetiedostonaan. Kyseisen lähdetiedoston sisältämällä tiedoilla pystytään määrittämään se lukumäärä ambulansseja, joka kaikkien kyseessä olevalla tarkastelualueella sattuneiden hälytystehtävien tavoittamiseen 10 minuutin sisällä olisi tarvittu. Jos nimittäin pääsee syntymään esimerkiksi sellainen tilanne, että alueella on ollut viisi tehtävää päällekkäin vuonna 2016 20 minuuttia yhtäjaksoisesti, alueelle tarvitsee sijoittaa vähintään viisi ambulanssia. Viisi ambulanssia riittää myös siinä tilanteessa, että kuuden tehtävän päällekkäisyys on kestänyt esimerkiksi kuusi minuuttia yhtäjaksoisesti. Tällöin jokin tehtävissä kiinni olleista yksiköistä on ehtinyt vapautua edellisestä tehtävästään ja vastata tehtävään tavoitteellisen 10 minuutin ajan sisällä.

Ambulanssitarpeen määrittävän Python-ohjelman syötetiedosto sisältää tiedot pelkästään vuoden 2016 aikana sattuneista hälytyksistä siitä yksinkertaisesta syystä, että aiemmilta vuosilta kerätty aineisto oli aikaleimojen olemassaolon suhteen niin vajavaista, ettei sitä ole voitu ambulanssitarpeen määrittämisessä hyödyntää. Aikaleimat puuttuivat noin viidenneksestä vuosittaisista hälytystehtävistä. Tämän kokoluokan vaje aineistossa vääristäisi Python-ohjelman avulla saatavia tuloksia jo todella paljon.

Tarkastelualuekohtaisen ambulanssitarpeen määrittävä ohjelma ajetaan komentorivin kautta. Koska jokaista tarkastelualuetta kohti on oma hälytys-

tiedot sisältävä pohjatiedostonsa, ohjelma joudutaan ajamaan erikseen jokaiselle tarkastelualueelle. Ohjelma tulostaa suurimman vähintään 10 minuuttia yhtäjaksoisesti kestäneen yhtä aikaa käynnissä olleiden tehtävien lukumäärän komentoriville.

Ambulanssitarpeen määrittämisessä hyödynnetyn Python-ohjelman toimintaperiaate on seuraava:

Askel 0 Luodaan tyhjä lista, johon tullaan algoritmin edetessä tallentamaan jokainen minuutti, jolloin jokin ambulanssi on ollut suorittamassa jotakin vuoden 2016 aikana tarkastelualueella k sattunutta hälytystehtävää

Askel 1 Käydään läpi jokainen syötetiedostona saadun tekstitiedoston rivi. Yksi rivi sisältää yhden hälytystehtävän tiedot

Askel 2 Lasketaan kyseisen hälytyksen kesto vähentämällä päättymisajanhetkestä alkamisajanhetki. Sekä alkamis- että päättymisajanhetki on pyöristetty lattiafunktion avulla lähimpään tasaminuuttiin

Askel 3 Siirytään sisäkkäiseen for-silmukkaan, jossa kirjataan listaan tarkastelun kohteena olevan hälytystehtävän alkamisajanhetki sekä siitä eteenpäin jokainen minuutin tarkkuudella ilmaistu ajanhetki aina siihen asti, että kyseisen tehtävän päättymisajanhetki tulee vastaan. Minuutti, jolla kyseinen tehtävä päättyy, kirjataan vielä listaan

Askel 4 Kun jokainen syötetiedoston rivi on käyty läpi, lasketaan montako kertaa kukin minuutin tarkkuudella ilmaistu ajanhetki esiintyy listassa. Tämän vaiheen tuloksena saadaan uusi lista, joka koostuu avainarvo -pareista. Avaimena toimii jokainen listassa esiintynyt minuutin tarkkuudella ilmaistu ajanhetki ja arvona taas kokonaisluku, joka kertoo montako kertaa kyseinen ajanhetki listassa esiintyi. Tähän listaan viitataan jatkossa tunnuksella C

Askel 5 Järjestetään edellisessä vaiheessa luotu lista C aikajärjestykseen avainten suhteen siten, että vanhimpaan minuutin tarkkuudella

ilmaistuun ajanhetkeen liittyvä avain-arvo -pari on listan C ensimmäinen alkio. Tähän järjestettyyn listaan viitataan jatkossa tunnuksella S

Askel 6 Luodaan muuttuja v_k , joka alustetaan nolllaksi

Askel 7 Käydään läpi lista S minuutin tarkkuudella ilmaistu ajanhetki kerrallaan

Askel 8 Testataan kestääkö sama (tai suurempi) ambulanssitarve nykyisen minuutin tarkkuudella ilmaistun ajanhetken lisäksi vähintään 10 minuuttia yhtäjaksoisesti

- Jos kyllä, päivitetään muuttujan v_k arvoa ja siirrytään seuraavaan minuutin tarkkuudella ilmaistuun ajanhetkeen
- Jos ei, siirrytään vain suoraan seuraavaan minuutin tarkkuudella ilmaistuun ajanhetkeen

Askel 9 Kun kaikki listan S alkiot on käyty läpi, tulostetaan muuttujan v_k arvo.

Tarkka listaus tuloksena saaduista tarkastelualuekohtaisista ambulanssitarpeista löytyy liitteestä C.1 taulukosta 14. Taulukkoon 14 on kirjattu sekä 10 minuutin että 30 minuutin minimikestolla määritetyt v_k -kertoimet. Vähintään 30 minuutin yhtäkestoisuuteen perustuvat ambulanssitarpeet määritellään muuten täysin samalla tavalla kuin 10 minuutin versiot v_k -kertoimista, paitsi askeleessa 9 testataan, että sama (tai suurempi) ambulanssitarve kestää myös nykyistä minuutin tarkkuudella annettua ajanhetkeä seuraavat 29 minuuttia.

6.4 Paikkatieto-ohjelmiston avulla määritetyt vakiot ja kertoimet

Kertoimet p_i ovat asemakohtaisia kertoimia, jotka kertovat, miten suuri osa hälytyksistä on tapahtunut lähimpänä asemaa x_i . Kertoimien p_i määrittämiseen käytetään vuosien 2014, 2015 ja 2016 hälytystehtäväaineistoja. Nyt

voidaan hyödyntää muidenkin kuin vuoden 2016 hälytystehtäviin liittyvää aineistoa, sillä tällä kertaa pelkkä hälytyksen sijainnin tietäminen riittää.

Hälytystehtävät sisältävää aineistoa esikäsiteltiin Excelin avulla. Ensin suodatettiin pois hälytyksistä sellaiset rivit, jotka liittyvät kiireettömiin siirtoajoihin. Kiireettömät siirtoajot eivät ole yleensä ensihoitoyksiköiden vastuulla, vaan niitä hoitavat tähän tarkoitukseen erikoistuneet yksiköt. Tästä syystä ensihoitoyksikköjen optimaalisen sijoittamisen kannalta kiireettömiin siirtoajoihin liittyvät hälytykset tulee jättää analyysin ulkopuolelle. Kiireettömiä siirtoajoja koskevien hälytysrivien poistaminen oli mahdollista, sillä aineisto sisältää tiedon jokaisen tehtävän koodista ja siihen liittyvästä prioriteetista.

Tehtävän luonteen lisäksi aineistoa suodatettiin vielä tehtävään vastanneen yksikön suhteen. Hälytystehtäväaineistosta poistettiin sellaiset rivit, joissa tehtävää suorittamaan lähtenyt yksikkö oli paloauto, pelastushelikopteri tai pelastusvene. Näiden toiminta ei vaikuta ambulanssien optimaaliseen sijoittamiseen siinä suhteessa mitä toinen kohdefunktio mallintaa. Aineistoon sen sijaan jätettiin kaikki sellaiset hälytystehtävää koskevat rivit, joihin on vastannut jokin ensihoitoyksikkö. Huolimatta siis siitä, että kyseinen yksikkö saattaa olla Satakunnan tai Kanta-Hämeen ambulanssi. Hälytysaineistoa ei rajattu myöskään spatiaalisesti tutkimusalueen rajojen mukaan. Oletetaan, että kaikki se data, joka sairaanhoitopiiriltä on saatu, pitää sisällään vain sellaisia hälytyksiä, jotka ensihoidon toiminnassa nähdään kuuluvaksi Varsinais-Suomen sairaanhoitopiirin vastuupiiriin.

Koska aineisto sisältää oman rivinsä jokaiselle yksikölle, joka on vastannut hälytystehtävään, aineistoa täytyy vielä muokata hieman ennen kuin se voidaan syöttää paikkatieto-ohjelmistoon. Tähän tarkoitukseen kirjoitettiin Pythonilla lyhyt ohjelma. Koodi kävi läpi kaikki hälytysaineiston rivit ja kirjoitti uuteen tiedostoon pohjatiedostoa vastaavan rivin mikäli samalla tehtävätunnisteella ei vielä ollut tulostiedostossa riviä. Jos taas oli, koodi siirtyi seuraavaan lähdetiedoston riviin.

Lähimmän asemapaikan määrittäminen kullekin hälytykselle tapahtuu hyödyntämällä paikkatieto-ohjelmiston etäisyysmatriisityökalua. Lähdetaksoksi valitaan esikäsitelty vuosien 2014, 2015 ja 2016 hälytystehtävät sisältävä

taso. Kohdetasoksi valitaan asemapaikat sisältävä taso. Tuloksena saadaan taulukko, joka kertoo kullekin hälytystehtävälle lähimmän aseman. Etäisyysmatriisityökalun avulla määritetyt tulokset tallennetaan csv-tiedostona. Kyseinen csv-tiedosto avataan Excelissä, jonka jälkeen tulostiedosto suodatetaan jokaisen aseman nimen suhteen, jotta saadaan tietää kuinka monelle hälytykselle kukin asemapaikka on hälytystä lähin asema.

Kirjataan ylös uuteen Excel-tiedostoon kutakin asemaa lähimpänä sattuneiden hälytysten lukumäärä. Näiden lukujen perusteella lasketaan kuinka suuri osa hälytyksistä on suhteessa tapahtunut lähimpänä kutakin asemaa. Ilmaistaan kyseiset luvut välille $[0, 100]$ skaalattuna. Tällöin kertoimet kuvastavat suoraan sitä, montako prosenttia hälytyksistä on tapahtunut lähimpänä kutakin ambulanssiasemaa. Toinen syy skaalaukselle on se, että ei haluta lisätä VSSHP:n ambulanssien sijoittamisongelman numeerista haastavuutta käyttämällä hyvin lähellä nollaa olevia kertoimia tällaisessa tilanteessa, jossa se on vältettävissä. Asemakohtaiset prosentuaaliset osuudet lähimpänä sattuneista hälytyksistä on listattu liitteestä C.1 löytyvään taulukkoon 13.

Kertoimilla w_k kuvataan tarkastelualueella asuvien ihmisten lukumäärää. Kertoimien w_k määrittämiseen tarvittava aineisto on vapaasti ladattavissa Tilastokeskuksen rajapintapalvelun kautta [51]. Asukastiedot sisältävä paikkatietoaineisto voidaan ladata useassa eri muodossa. Ensinnäkin voidaan valita millä tarkkuudella haluamme, että asukasmääriä on kartoitettu. Ladataan sellainen aineisto, jossa asukasmäärät on kartoitettu mahdollisimman tarkasti eli mahdollisimman pienille alueille. Toisin sanoen valitaan $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ -kokoiset ruudut. Kyseisestä aineistosta on olemassa kaksi erilaista vektorimuotoista versiota. Ensimmäisessä asukasmäärä on kiinnitetty jokaiseen neliökilometrin kokoiseen objektiin ja toisessa taas kuvitteellisten neliökilometrin kokoisten objektien keskipisteeseen.

Asukasmäärien tiedon sijaitseminen yksittäisissä pisteissä on parempi näistä kahdesta vaihtoehdosta, sillä asukastiedot sisältävää tasoa tullaan leikkaamaan tarkastelualueiden rajoilla. Aina objekteista koostuvia tasoja leikattaessa ongelmaksi muodostuu se, että ne ulottuvat monen leikkaavan objektin alueelle yhtä aikaa, jolloin leikkattavan tason objektin ominaistieto tulee helposti virheellisesti monistettua. Nyt kuitenkin kyseinen ongelma vältetään,

sillä piste ei voi sijaita kahden leikkaavan tason objektin alueella yhtä aikaa. Lataamisen jälkeen vektorimuotoista tasoa leikataan tarkastelualuejakotasolla. Lopuksi lasketaan yhteen kaikkien tarkastelualueelle kuuluvien pisteiden asukasmäärät, joista muodostuu koko tarkastelualueen yhteenlaskettu asukasmäärä. Tarkastelualuekohtaiset asukasmäärät on lueteltu liitteestä C.1 löytyvässä taulukossa 14.

Kertoimet e_{ij} kuvaavat asemapaikkojen i ja j välistä etäisyyttä. Nämäkin etäisyydet on määritetty käyttämällä QGIS paikkatieto-ohjelmiston etäisyysmatriisityökalua. Tällä kertaa sitä sovelletaan saman tason sisällä. Lähtö- ja kohdetasona toimii siis sama vektoritaso. Tavoitteena on selvittää etäisyydet lähimmän kohteen sijasta kymmeneen lähimpään objektiin. Parametrin c valinta kohdistui juuri 10 lähimpään asemaan kappaleessa 4 lueteltujen tekkijöiden lisäksi pääosin laskennallisista syistä. Optimointiongelmaan liittyvä päätösmuuttujien lukumäärä vaikuttaa siihen, minkä kokoiselta alueelta lähiympäristövaikutus kannattaa ottaa huomioon. Käsillä oleva monitavoiteoptimointiongelma koostuu 75:stä päätösmuuttujasta, joka tarkoittaa sitä, että jokainen lisätty naapuriasema kasvattaa kohdefunktion termien lukumäärää 75:llä. Ottamalla kymmenen lähintä asemaa mukaan naapurustovaikutuksen mallintamiseen saadaan siis jo 750 termistä koostuva lauseke.

Etäisyysmatriisityökalun tuottamat tulokset sisältävät lähtöobjektin ja pääteobjektin tunnisteet (jotka tällä kertaa on määritetty objektin nimeksi) sekä niiden välisen etäisyyden metreinä. Paikkatieto-ohjelmisto antaa tulostaulukon lineaarisessa matriisimuodossa. Etäisyysmatriisityökalun avulla määritetyt tulostaulukko tallennetaan csv-tiedostona. Aseman i kymmenen lähimmän aseman indeksijoukko I_i saadaan nimittäin selville avaamalla kyseinen csv-tiedosto Excelissä ja suodattamalla aineisto aakkosjärjestykseen lähtöobjektin ja pääteobjektin tunnisteet sisältävien sarakkeiden mukaan. Liitteestä C.1 löytyvästä taulukosta 15 käy ilmi jokaisen aseman kymmenen lähintä asemaa sekä niiden väliset etäisyydet.

7 Varsinais-Suomen ambulanssien sijoittamisongelman ratkaiseminen

Wolfram Mathematica -ohjelmistoa on käytetty avuksi kohdefunktioiden muodostamisessa. Wolfram Mathematica on tehokas matemaattisten tehtävien ratkaisemiseen keskittynyt symbolinen laskentaohjelmisto. Wolfram Mathematicalla on oma ohjelmointikieltänsä (Wolfram Language), jolla pystyy symbolisten ja numeeristen operaatioiden lisäksi esimerkiksi piirtämään 2- ja 3-ulotteisia kuvioita. Wolfram Mathematica tukee kaikenmuotoisen tiedon käsittelyä (esimerkiksi kompleksiluvut, matriisit) ja sisältää laajan kirjaston erikoisfunktioita. Wolfram Mathematica kykenee myös optimoimaan, integroimaan tai derivoimaan funktioita sekä ratkaisemaan differentiaaliyhälöitä tai analysoimaan graafeja. [58]

Ensimmäisen, toisen, kolmannen ja neljännen kohdefunktion muodostamisessa hyödynnetyt Wolfram Mathematica -koodit löytyvät liitteestä B. Wolfram Mathematica hakee kohdefunktioiden muodostamisessa tarvitsemansa kertoimet suoraan csv-tiedostoista, joihin paikkatieto-ohjelmistolla tai Python-ohjelmilla saadut tulokset on tallennettu. VSSHP:n ambulanssien sijoittamisongelman kohdefunktiot koostuvat huomattavan suuresta määrästä termejä, joista osa koostuu edelleen useasta numeroarvosta. Tämän vuoksi inhimillisen kopiointivirheen todennäköisyys olisi ollut hyvin suuri, jos kohdefunktioiden lausekkeet olisi muodostettu käsin.

Ensimmäiseen ja kolmanteen kohdefunktioon liittyvät Wolfram Mathematica -koodit on kirjoitettu siten, että ne vastaavat rakneteeltaan suoraan kappaleessa 5 esitettyjä geneerisiä kohdefunktioiden lausekkeita. Wolfram Mathematica vain korvaa kappaleessa 5 parametreina käsitellyt arvot kappaleessa 6 määritetyillä todenmukaisilla arvoilla. Neljänteen kohdefunktioon liittyy ongelmakohtainen parametri d , jonka arvon päätöksentekijä saa itse valita. Asetetaan parametrin d arvoksi VSSHP:n ambulanssien sijoittamisongelman tapauksessa 100. Toista kohdefunktiota käsitellään jälleen (testiongelman tavoin) maksimointitehtävän sijaan minimointitehtävänä $\min - \sum_{i=1}^a p_i x_i$.

VSSHP:n ambulanssien optimaalista sijoittamista ohjaavan diskreetin monitavoiteoptimointiongelman lopullinen muoto löytyy liitteestä A.

7.1 Sopivan ratkaisumenetelmän valinta

VSSHP:n ambulanssien sijoittamisongelma pitää sisällään monia erityispiirteitä, jotka vaikuttavat siihen, millaisella ratkaisumenetelmällä käsillä olevaa ongelmaa on ylipäänsä mahdollista lähteä ratkaisemaan. Ratkaisumenetelmän valinnan kannalta keskeiset VSSHP:n ambulanssien sijoittamisongelman ominaisuudet:

- Monitavoiteoptimointiongelma
- Päätösmuuttujat voivat saada vain positiivisten kokonaislukujen joukkoon kuuluvia arvoja
- Kolmas ja neljäs tavoite ovat epälineaarisia
→ Monitavoiteongelma on epälineaarinen
- Neljä itsenäistä kohdefunktiota
→ Vaikea asettaa tärkeysjärjestykseen
→ Vaikea asettaa sopivia painokertoimia

Lähdetään liikkeelle sopivan ratkaisumenetelmän kartoittamisessa Mietisen kirjasta [32] lähinnä sen vuoksi, että diskreeteille epälineaarisille monitavoiteoptimointiongelmiin ei ole saatavilla vastaavaa teosta. Mikään etukäteismenetelmä ei ole kovin toimiva valinta, sillä malli koostuu neljästä itsenäisestä ja tasavahvasta kohdefunktiosta, joita on lähes mahdotonta laittaa tärkeysjärjestykseen. Riittävien tavoitetasojen määrittäminen tyhjästä ennen tehtävän ratkaisua on lähes yhtä vaikeaa, sillä kaikki kohdefunktiot eivät kuvaa mitään selkeää ongelman ominaisuutta/suuretta, jolla olisi yksikkö. [32]

Jälkikäteismenetelmien kategoria suljetaan harkinnan ulkopuolelle osittain samoista syistä. Esimerkiksi rajoiteyhtälömenetelmä vaatii tiedon siitä,

mikä kohdefunktio tulee ratkaista ensin ja mitkä ovat hyvät tavoitetasot lo-puille rajoitteissa esiintyville kohdefunktioille. Etukäteismenetelmistä poike-ten jälkikäteismenetelmissä määritetään ensin Pareto-optimaalinen ratkaisujoukko, ja kysytään vasta sen jälkeen päätöksentekijän mielipidettä. Tämä on periaatteessa parempi järjestys VSSHP:n ambulanssien sijoittamisongelman kannalta. Pareto-optimaalisen ratkaisujoukon määrittäminen on kuitenkin raskas prosessi ja on hyvin todennäköistä, että varsinkin näin valtavan monitavoiteongelman tapauksessa päätöksentekijä joutuisi lopuksi valitsemaan suosikkinsa huomattavan suuresta määrästä sallittuja ratkaisuja. [32]

Ei mieltymyksiä -kategoriaan kuuluvien menetelmien vahvuus on se, että niissä tavoitteita ei tarvitse painottaa. Tämän kategorian menetelmissä hyödynnetään ihanteellista kriteerivektoria, mikä tarkoittaa, että sen tulee olla määritettävissä. VSSHP:n ambulanssien sijoittamisongelman tapauksessa ihanteellinen kriteerivektori kuuluu niihin harvoihin asioihin, jotka pysytään etukäteen määrittämään suhteellisen tarkasti. Esimerkiksi globaalin kriteerin menetelmän soveltamisessa ongelmaksi muodostuukin metriikan valinta. Saatu ratkaisu riippuu hyvin paljon siitä, millä metriikalla etäisyyttä ihanteellisesta kriteerivektorista mitataan. Kirjallisuudesta ei löydy juurikaan neuvoja siihen, mitä metriikkaa kannattaisi milloinkin käyttää. Mieltisen kirjassa mainittiin myös, että ei mieltymyksiä -kategorian menetelmiä kannattaa käyttää silloin, kun riittää saada selville vain jokin Pareto-optimaalinen ratkaisu. Sijoittamalla ambulanssit optimaalisesti voidaan mahdollisesti kyetä pelastamaan ihmishenkiä, joten käsillä olevaan monitavoiteoptimointiongelma on hyvä esimerkki ongelmasta, jonka ratkaisemiseen tämän kategorian menetelmät eivät sovellu. [32]

Jäljelle jää interaktiivisten ratkaisumenetelmien luokka. Diskreetin päätösmuuttujan käytöstä johtuen suhteellisen monta tämän kategorian ratkaisumenetelmää jouduttiin kuitenkin sulkemaan heti suoralta kädeltä pois. Useat menetelmät vaativat esimerkiksi, että kohdefunktiot ovat jatkuvasti differentioituvia. Koko differentioituvuuden käsite sopii huonosti diskreettiin maailmaan. Kaikki mallin kohdefunktiot ovat kyllä derivoituvia jokaisessa sallitun joukkonsa päätösmuuttuja-avaruuden pisteessä, mutta varsinaisesti differentioituvuudesta ei voida puhua, kun on kyse yksittäisistä pisteistä. [32]

Miettisen kirjassa [32] olevan menetelmän valintaa helpottavan kaavion perusteella kallistutaan joko Tchebycheff-menetelmän, referenssipistemenetelmän tai NIMBUS-menetelmän käyttöön. Tchebycheff-menetelmän idea on pitkälti sama kuin ei-mieltymyksiä -kategoriaan kuuluvassa globaalien kriteerien menetelmässä; menetelmässä minimoidaan Tchebycheffin metriikkaa käyttämällä etäisyyttä ihanteelliseen kriteerivektoriin tai muuhun utopistiseen tavoitevektoriin. Erona on se, että Tchebycheff-menetelmä on iteratiivinen ja päätöksentekijä pystyy ohjaamaan ratkaisuprosessia. VSSHP:n ambulanssien sijoittamiseen liittyvä monitavoiteoptimointiongelma koostuu neljästä kohdefunktiosta, mikä tarkoittaa sitä, että päätöksentekijä pääsisi valitsemaan suosikkinsa suhteellisen pienestä määrästä ratkaisuvaihtoehtoja. Tchebycheff-menetelmä nimittäin tarjoaa jokaisella iteraatiokierroksella noin kohdefunktioiden lukumäärää vastaavan lukumäärän vaihtoehtoisia ratkaisuvaihtoehtoja. [32]

Tchebycheff-menetelmä pystyy löytämään kaikki Pareto-optimaaliset ratkaisut ja lisäksi kaikkien päätöksentekijälle esitettävien ratkaisuvaihtoehtojen taataan olevan Pareto-optimaalisia. Tchebycheff-menetelmän heikkous on sen laskennallinen raskaus (ei kuitenkaan niin raskas kuin jälkikäteismenetelmät). Toinen heikkous on se, että suoritettavien iteraatiokierrosten lukumäärä tulee määrittää ennen Tchebycheff-menetelmän algoritmin suorituksen alkamista. Tämä tarkoittaa sitä, että algoritmin suoritus päättyy sitten, kun asetettu iteraatiokierrosten lukumäärä on saavutettu riippumatta siitä onko päätöksentekijä tyytyväinen lopulliseen ratkaisuun. Päätöksentekijän ei ole myöskään mahdollista muuttaa mieltänsä, sillä tarkastelusta poistettuja ratkaisuvaihtoehtojen osia ei voida enää palauttaa. [32]

Referenssipistemenetelmä on ideologialtaan pitkälti samanlainen kuin Tchebycheff-menetelmä. Referenssipistemenetelmässä minimoidaan etäisyyttä päätöksentekijän antamaan referenssipisteeseen. Referenssipiste voi olla joko sallittu tai ei-sallittu. Referenssipisteenä käytetään usein utopistista kohdefunktioiden arvoista koostuvaa ihanteellista kriteerivektoria. Tchebycheff-menetelmästä poiketen iteraatiokierrosten määrä ei ole ennalta lukkoon lyöty, vaan ratkaisuprosessi päättyy silloin, kun päätöksentekijä on tyytyväinen ratkaisuun. Referenssipistemenetelmässä päätöksentekijän on sallittua muuttaa

mielipidettään. Kolikolla on kääntöpuolensakin; referenssipistemenetelmä ei tue päätöksentekijää optimaalisen ratkaisun määrittämisprosessissa samalla tavalla kuin Tchebycheff-menetelmä. [32]

Sekä referenssipistemenetelmä että Tchebycheff-menetelmä nojaavat pitkälti siihen, että monitavoiteoptimointiongelman ihanteellinen kriteerivektori on tarkasti määritettävissä tai vähintäänkin siihen, että päätöksentekijällä on suhteellisen hyvä mielikuva siitä, millaisiin kohdeavaruuden arvoihin hän haluaa ratkaisun johtavan. VSSHP:n ambulanssien sijoittamisongelmas- ta puhuttaessa kyseiset oletukset täyttyvät vain osittain. Ensimmäisen, toisen ja kolmannen kohdefunktion utopistinen ihannearvo pystyttiin määrittämään tarkasti. Neljännen kohdefunktion minimiä ei kuitenkaan pystytty luotettavasti selvittämään eikä näin ollen voida olla lainkaan varmoja, millaiseen arvoon neljännen kohdefunktion kohdalla tulisi pyrkiä. Olisikin luot- tamusta herättävämpää, jos valittava menetelmä ei nojaisi niin vahvasti pää- töksentekijän tarjoaman ihanteellisen kriteerivektorin arvoihin. Tchebycheff- menetelmän ja referenssipistemenetelmän käytön sivuuttamiseen vaikuttaa myös se, että vaikka Tchebycheff-menetelmä tavallaan tukeekin päätöksen- tekijän ajatteluprosessin konvergenssia kohti optimaalista ratkaisua, kumpi- kaan näistä menetelmistä ei tue päätöksentekijää oppimaan ongelmasta ja sen käyttäytymisestä ratkaisuprosessin aikana.

NIMBUS (Nondifferentiable Interactive Multiobjective BUndle-based op- timization System) [33] kykenee käsittelemään sekä differentioituvia että ei- differentioituvia monitavoitteisia ja yksitavoitteisia optimointiongelmiä, joi- hin liittyy sekä lineaarisia että epälineaarisia rajoitteita päätösmuuttujien laatikkorajoitteiden lisäksi. VSSHP:n ambulanssien sijoittamisongelman kan- nalta erityisen tärkeää on se, että NIMBUS pystyy käsittelemään myös ko- konaislukumuuttujia. NIMBUS perustuu kullakin sallitulla ratkaisuvaihtoeh- dolla saavutettavien kohdefunktioiden arvojen luokitteluun. Päätöksenteki- jän tulee jokaisella iteraatiokierroksella määrittää, mihin seuraavista luokista

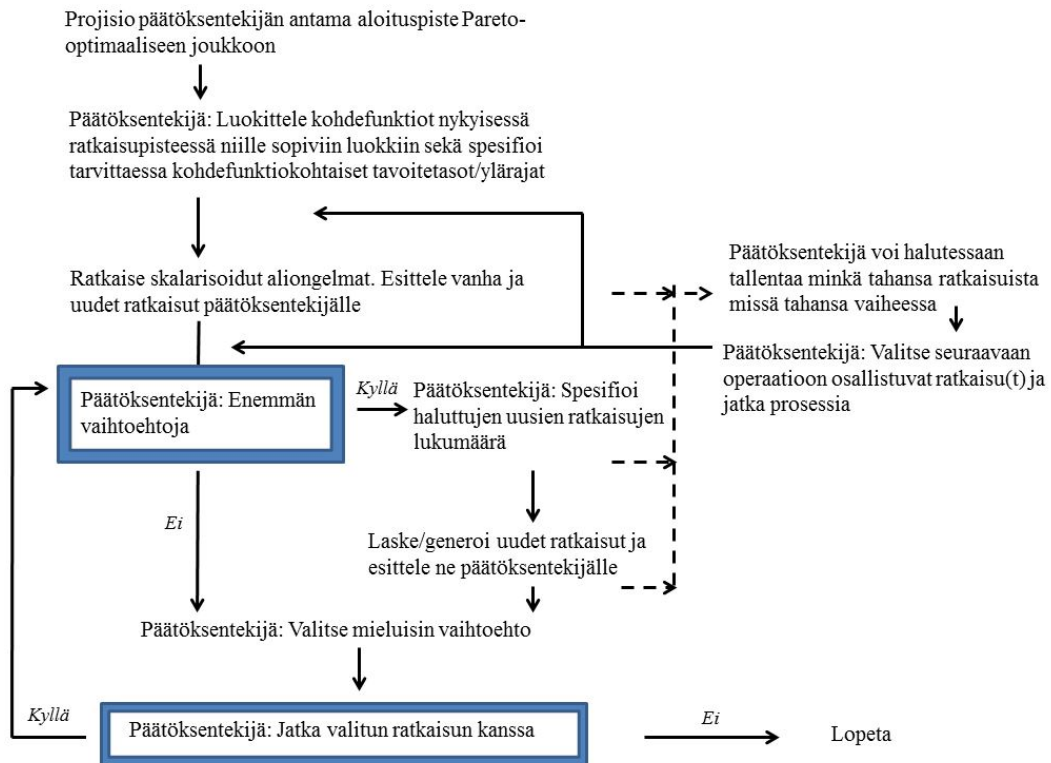
- Kohdefunktion arvoa tulee parantaa. Merkitään kyseiseen luokkaan kuuluvien kohdefunktioiden joukkoa symbolilla $I^<$
- Kohdefunktion arvoa tulee parantaa tiettyyn tavoitetasoon asti. Mer-

kitään kyseiseen luokkaan kuuluvien kohdefunktioiden joukkoa symbolilla I^{\leq}

- Kohdefunktion arvo on tällä hetkellä tyydyttävä. Merkitään kyseiseen luokkaan kuuluvien kohdefunktioiden joukkoa symbolilla $I^=$
- Kohdefunktion arvon sallitaan heikentyvän tiettyyn rajaan asti. Merkitään kyseiseen luokkaan kuuluvien kohdefunktioiden joukkoa symbolilla I^{\geq}
- Kohdefunktion arvo saa muuttua vapaasti. Merkitään kyseiseen luokkaan kuuluvien kohdefunktioiden joukkoa symbolilla $I^>$

kukin yksittäisistä kohdefunktioista kuuluu. [45]

Saamansa informaation perusteella NIMBUS muodostaa uuden aliongelman [45]. Aliongelma ratkaistaan monitavoitteisella proksimaalisella kimp-pumenetelmällä (Multiobjective Proximal Bundle Method) tai geneettisillä algoritmeilla [45]. Kimppumenetelmä on lokaali menetelmä ja geneettiset algoritmit taas globaali menetelmä. NIMBUS-menetelmän toimintaa voidaan kuvata alla olevan vuokaavion avulla.



Kuva 7: NIMBUS-menetelmän algoritmin toimintaperiaate [45].

Kaaviosta 7 nähdään, että algoritmi pysähtyy vasta, kun päätöksentekijä on tyytyväinen saavutettuun tulokseen. NIMBUS-menetelmän voidaan sanoa tukevan päätöksentekijää oppimaan ratkaisuprosessin aikana, sillä NIMBUS auttaa päätöksentekijää ymmärtämään, mikä vaikutus hänen tekemillään luokitteluilla ja asettamillaan tavoitetasoilla/ylärajoilla on kohdefunktioiden arvoihin. NIMBUS tukee oppimisprosessia siinäkin mielessä, että se sallii päätöksentekijän vaihtaa mielipidettään suhteessa siihen, miten hän on aiemmissa ratkaisuprosessin vaiheissa pyytänyt menetelmää toimimaan.

NIMBUS-menetelmän periaatteellinen vahvuus on VSSHP:n ambulanssien sijoittamisongelmaan sovellettuna melkein pä myös sen suurin heikkous. Käyttäjän tulisi nimittäin itse tietää, mikä on kullekin kohdefunktiolle sopiva tavoitetaso. Tämä oli juuri se ongelma, miksi etukäteismenetelmät eivät oikein sovi VSSHP:n ambulanssien sijoittamisongelman ratkaisemiseen.

Tavoitteellisilla arvoilla on kuitenkin NIMBUS-menetelmän toiminnassa pienempi rooli kuin etukäteismenetelmien kategoriaan kuuluvilla menetelmillä. Etukäteismenetelmistä puhuttaessa päätöksentekijä saa yhden mahdollisuuden kertoa, millaiset arvot hän kullekin kohdefunktiolle haluaa. NIMBUS-menetelmässä päätöksentekijä voi sen sijaan vaihtaa mielessään olevia kunkin kohdefunktion tavoitearvoja vaikka jokaisella iteraatiokierroksella.

Lisäksi NIMBUS-menetelmässä ei tarvitse määrittää tarkasti, mitä pitää ideaalisena arvona kullekin kohdefunktiolle. Päätöksentekijän riittää tietää tavoitteensa sillä tarkkuudella, että hän pystyy sen avulla luokittelemaan kohdefunktiot haluamiinsa luokkiin. Oletetaan, että VSSH:n ambulanssien sijoittamisiongelman ihanteellinen kriteerivektori pystytään määrittämään vähintään sillä tarkkuudella, että päätöksentekijä saa siitä riittävästi osviittaa ensimmäisen kohdefunktioiden luokittelun suorittamiseen.

NIMBUS-menetelmä kykenee löytämään jokaisen Pareto-optimaalisen ratkaisun ja myös tarjoaa ratkaisuvaihtoehdoksi vain Pareto-optimaalisia vaihtoehtoja [32]. Vuorovaikutteinen Pareto-optimaalisella pinnalla liikkuminen auttaa käyttäjää kasvamaan päätöksentekijänä. Käytännössä päätöksentekijän tulisi ratkaisuprosessin loppupuolella kyetä paremmin tunnistamaan niitä ominaisuuksia, joita hänen mielestään optimaaliseen ratkaisuun tulisi sisältyä. Samalla päätöksentekijän tulisi hahmottaa paremmin kohdefunktioiden arvojen välisiä relaatioita. Tietyn kohdefunktion arvon parantaminen saattaa välttämättä johtaa aina saman kohdefunktion arvon huononemiseen ja jonkin toisen kohdefunktion arvon parantaminen taas saattaa olla paremmin hajautettavissa useamman kohdefunktion harteille.

Sen lisäksi, että NIMBUS-menetelmä vaikuttaa soveltuvan muita tarjolla olevia vaihtoehtoja paremmin VSSH:n ambulanssien sijoittamisiongelman ratkaisemiseen, NIMBUS-menetelmän valitsemista puoltaa myös sen implementoinnin helppous. Laskennallisesti vaativia epälineaarisia monitavoiteoptimointiongelmia pystytään nimittäin ratkaisemaan ilmaiseksi NIMBUS-menetelmällä internetin kautta toimivalla WWW-NIMBUS -ohjelmistojärjestelmällä [36].

7.1.1 WWW-NIMBUS

Ambulanssien optimaalisen sijoittamissuunnitelman selvittämiseen kehitetty monitavoiteoptimointimalli sisältää vain diskreettejä päätösmuuttujia, mikä vuoksi VSSHP:n ambulanssien sijoittamisongelman ratkaisemisessa joudutaan rajoittumaan WWW-NIMBUS -ohjelmiston globaaleihin ratkaisumenetelmiin. WWW-NIMBUS sisältää kaksi erilaista geneettisiin algoritmeihin perustuvaa ratkaisijaa, joista päätöksentekijä saa jokaisella iteraatiokierröksellä valita mieleisensä [45], [36].

Geneettiset algoritmit eivät perusmuodossaan pysty käsittelemään optimointiongelmissa esiintyviä rajoitteita. Mikäli geneettisillä algoritmeilla halutaan ratkaista jokin rajoitteinen optimointiongelma, ratkaisualgoritmiin tarvitsee sisällyttää jokin rajoitteidenhallintamenetelmä, jonka avulla rajoitteisen optimointiongelman ratkaisut pystytään pitämään sallitulla alueella. Rajoitteidenhallintamenetelmät voidaan jakaa karkeasti kahteen luokkaan sen mukaan, hyödyntääkö menetelmä sakkofunktioita vai ei. Monet sellaiset menetelmät, jotka eivät hyödynnä sakkofunktioita, ovat usein räätälöityjä vain tiettyyn ongelmatyyppiin sopivaksi. [36]

Sakkofunktiomenetelmien toiminta perustuu kohdefunktioon lisättävään sakkotermiin. Sakkotermin avulla pystytään sakottamaan fitness-funktioksi kutsuttavaa sakkofunktiomenetelmän kohdefunktiota sellaisista ratkaisuisista, jotka eivät kuulu optimointiongelman sallitulle alueelle. Optimointiongelmaan liittyvien rajoitteiden hallinta sakkofunktioiden avulla on suosittua siksi, että sakkofunktiomenetelmät ovat helposti implementoitavissa olemassa olevan optimointimenetelmän (WWW-NIMBUS -ohjelmiston tapauksessa geneettiset algoritmit) päälle. [36]

Artikkelissa [36] on vertailtu viittä erilaista sakkofunktiomenetelmää, joita hyödyntämällä geneettiset algoritmit saadaan toimimaan myös rajoitettujen optimointiongelmien ratkaisijoina. Kyseisessä artikkelissa vertailtiin SFP-menetelmän (Method of Superiority of Feasible Points), PFP-menetelmän (Method of Parameter Free Penalties), AP-menetelmän (Method of Adaptive Penalties) ja kahden uuden, näistä menetelmistä muodostetun modifikaation suoriutumista tarkkuuden, tehokkuuden ja luotettavuuden suhteen 33

erilaisen testiongelman ratkaisemisessa. [36]

Artikkelissa [36] esiteltyjen tulosten perusteella valittiin WWW-NIMBUS -ohjelmistoon sisällytettävät geneettiset algoritmit. Tutkimuksen tavoitteena oli löytää sellainen geneettinen algoritmi, joka toimii hyvin useiden erityyppisten optimointiongelmien ratkaisemisessa. Sen vuoksi PFP-menetelmän luotettavuutta pidettiin arvokkaana ominaisuutena. Toinen tärkeä PFP-menetelmän valintaan vaikuttanut tekijä oli se, ettei PFP-menetelmä tarvitse parametrejä rajoitteiden käsittelemiseen. [36]

WWW-NIMBUS -ohjelmiston Global1-niminen ratkaisija on siis geneettinen algoritmi, jossa rajoitteidenkäsitteily hoidetaan PFP-menetelmän avulla. WWW-NIMBUS -ohjelmiston Global2-niminen ratkaisija on samainen geneettinen algoritmi, jossa rajoitteidenkäsitteily hoidetaan PFP-menetelmän sijaan AP-menetelmällä. AP-menetelmä otettiin mukaan WWW-NIMBUS -ohjelmistoon lähinnä sen tehokkuuden vuoksi (se tarvitsi keskimäärin muihin menetelmiin perustuvia algoritmeja vähemmän iteraatiokierroksia). [36]

Tarkempi selvitys ratkaisijoiden Global1 ja Global2 pohjalla olevasta geneettisestä algoritmista löytyy artikkelista [36]. Kyseisestä artikkelista käy ilmi miten WWW-NIMBUS -ohjelmistossa hyödynnetyssä geneettisessä algoritmista on toteutettu seuraavan sukupolven muodostamiseen liittyvät yksilöiden valinta-, risteyttämis- ja mutaatioprosessit sekä millainen lopetus-kriteeri kyseiseen geneettiseen algoritmiin liittyy. Artikkelissa [36] esitellään ratkaisijoiden Global1 ja Global2 toimintaperiaate myös algoritmimuodossa.

Artikkelissa [36] tarkastellaan optimointiongelmaa, joka on muotoa

$$\begin{aligned} \min \quad & f(\mathbf{x}) \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{x} \in S, \end{aligned} \tag{55}$$

missä $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ on kohdefunktio ja $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)^T \in \mathbb{R}^n$ on muuttujavektori. Sallittu joukko $S \neq \emptyset$ on rajattu laatikkorajoitteilla ja m epäyhtälörajoitteella siten, että

$$S = \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n \mid \mathbf{x}^l \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}^u, g_j(\mathbf{x}) \leq 0 \text{ kaikille } j = 1, \dots, m, \} \tag{56}$$

missä $\mathbf{x}^l, \mathbf{x}^u \in \mathbb{R}^n$ ja $g_j(\mathbf{x}) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ kaikille $j = 1, \dots, m$.

Artikkelissa [36] esitellyissä menetelmissä pyritään löytämään optimointiongelman (55) globaali minimi eli toisin sanoen piste $\mathbf{x}^* \in S$, jolle pätee $f(\mathbf{x}^*) \leq f(\mathbf{x})$ kaikille $\mathbf{x} \in S$. Huomataan, että optimointiongelmassa (55) esiintyy vain yksi kohdefunktio f , vaikka WWW-NIMBUS -ohjelmiston piti kyetä ratkaisemaan monitavoiteoptimointiongelmiä. Nämä kaksi asiaa eivät kuitenkaan ole keskenään ristiriidassa, sillä kappaleen 4.1 perusteella tiedetään, että monitavoiteoptimointiongelma voidaan skalarisoida yksitavoitteiseksi optimointiongelmaksi.

Kappaleen 4.1 perusteella tiedetään lisäksi, että muunnos monitavoitteisesta optimointiongelmaasta yksitavoitteiseksi voidaan saada aikaan hyödyntämällä monia erilaisia skalarisointifunktioita. Artikkelista [35] selviää, miten skalarisointi WWW-NIMBUS -ohjelmistossa suoritetaan. WWW-NIMBUS käyttää hyväkseen useita toisistaan poikkeavia skalarisointifunktioita synkronoidulla tavalla. [35]

Yleensä interaktiiviset monitavoiteoptimointiongelmiä ratkaisumenetelmät, jotka tarjoavat päätöksentekijälle useita toisistaan poikkeavia ratkaisuvaihtoehtoja vertailtavaksi, generoivat joukon Pareto-optimaalisia ratkaisuja muokkaamalla päätöksentekijän tarjoamaa preferenssitietoa tavalla tai toisella. Jokainen WWW-NIMBUS -ohjelmiston skalarisointifunktioista sen sijaan muodostetaan samojen preferenssitietojen perusteella. Useita Pareto-optimaalisia ratkaisuja saadaan generoitua vaihtamalla ratkaistavan aliongelman muodostamisessa käytettävää skalarisointifunktiota. [35]

Tällainen menettelytapa antaa päätöksentekijälle paremman mielikuvan siitä, millaisiin Pareto-optimaalisiin ratkaisuvaihtoehtoihin hänen syöttämänsä preferenssitiedot johtavat. Lisäksi synkronoitu useiden sekä luokitte luun että referenssipisteisiin perustuvien skalarisointifunktioiden käyttö auttaa välttämään tilannetta, jossa menetelmänkehittäjä menetelmässä hyödynnettävää skalarisointifunktiota valitessaan tulee myös aika pitkälti "valitsemaan" monitavoiteoptimointiongelman ratkaisun päätöksentekijän puolesta. [35]

Artikkelissa [35] esitellään kolme kirjallisuudesta tuttua skalarisointifunktiota ja yksi uusi skalarisointifunktio. Otetaan käyttöön seuraavat merkinnät [35]:

- \bar{z} =Referenssipiste
- \mathbf{z}^* =Ihanteellinen kriteerivektori
- \mathbf{z}^{**} =Utopistinen ihanteellinen kriteerivektori
- \mathbf{z}^{nad} =Nadir-vektori
- \mathbf{x}^c =Sallittuun joukkoon kuuluva tämänhetkinen Pareto-optimaalinen muuttujavektori.

Käyttöön otettavissa merkinnöissä esiintyy aiemmin tässä työssä läpikäytyjen käsitteiden lisäksi yksi uusi käsite. Utopistinen ihanteellinen kriteerivektori tarkoittaa sellaista vektoria, joka on aidosti ihanteellista kriteerivektoria parempi. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että $z_i^{**} = z_i^* - \epsilon$ kaikille $i = 1, \dots, k$, missä ϵ on pieni positiivinen skalaari. [35]

NIMBUS-menetelmässä ratkaistava aliongelma muodostetaan luokitteluun ja siihen liittyviin tavoitetasoihin sekä ylärajoihin perusteella. Ensimmäinen skalarisointifunktio onkin luokitteluperusteinen ja saa muodon [35]

$$\min \quad \max_{i \in I^<, j \in I^{\leq}} \left[\frac{f_i(\mathbf{x}) - z_i^*}{z_i^{\text{nad}} - z_i^{**}}, \frac{f_j(\mathbf{x}) - \hat{z}_j}{z_j^{\text{nad}} - z_j^{**}} \right] + \rho \sum_{i=1}^k \frac{f_i(\mathbf{x})}{z_i^{\text{nad}} - z_i^{**}} \quad (57)$$

$$\text{s.t.} \quad f_i(\mathbf{x}) \leq f_i(\mathbf{x}^c) \quad \text{kaikille } i \in I^< \cup I^{\leq} \cup I^= \quad (58)$$

$$f_i(\mathbf{x}) \leq \epsilon_i \quad \text{kaikille } i \in I^{\geq} \quad (59)$$

$$\mathbf{x} \in S, \quad (60)$$

missä $\rho \geq 0$ on suhteellisen pieni skalaari. On osoitettu, että painokerrointen $\frac{1}{z_j^{\text{nad}} - z_j^{**}}$ avulla pystytään paremmin heijastamaan päätöksentekijän mieltymyksiä [35]. Painokertoimet auttavat myös parantamaan laskennallista tehokkuutta [35].

Loput kolme skalarisointifunktiota perustuvat referenssipisteisiin. Referenssipisteet pystytään määrittämään NIMBUS-menetelmässä kerättävän luokitteluinformaation perusteella ilman, että päätöksentekijältä tarvitsee

pyytää mitään lisäinformaatiota. WWW-NIMBUS -ohjelmistoon sisällytettävät kolme kirjallisuudesta tuttua skalarisointifunktiota on valittu artikkelin [34] perusteella. Artikkelissa [34] vertailtiin 15 eri skalarisointifunktiota paitsi numeerisesti myös skalarisointifunktioiden teoreettisten ominaisuuksien suhteen. Tavoitteena oli valita sellaiset skalarisointifunktiot, jotka tyydyttävät päätöksentekijän preferenssit riittävän hyvin ja generoivat silti erilaisia ratkaisuja. [35]

Toinen WWW-NIMBUS -ohjelmistoon sisällyteistä skalarisointifunktioista perustuu STOM-menetelmään (Satisficing Trade-off Method). Toinen skalarisointifunktio on muotoa [35]

$$\min \quad \max_{i=1,\dots,k} \left[\frac{f_i(\mathbf{x}) - z_i^{**}}{\bar{z}_i - z_i^{**}} \right] + \rho \sum_{i=1}^k \frac{f_i(\mathbf{x})}{\bar{z}_i - z_i^{**}} \quad (61)$$

$$\text{s.t.} \quad \mathbf{x} \in S. \quad (62)$$

Kolmas WWW-NIMBUS -ohjelmiston skalarisointifunktioista on sellainen, jota käytetään muun muassa referenssipistemethodessa. WWW-NIMBUS -ohjelmistossa käytetään kyseisen saavutettavuusfunktion perusmuotoa [35]

$$\min \quad \max_{i=1,\dots,k} \left[\frac{f_i(\mathbf{x}) - \bar{z}_i}{z_i^{\text{nad}} - z_i^{**}} \right] + \rho \sum_{i=1}^k \frac{f_i(\mathbf{x})}{z_i^{\text{nad}} - z_i^{**}} \quad (63)$$

$$\text{s.t.} \quad \mathbf{x} \in S. \quad (64)$$

Viimeisen aliongelman muodostamiseen käytettävä skalarisointifunktio on sama kuin mitä interaktiivisten monitavoiteoptimointiongelmiä ratkaisumenetelmien kategoriaan kuuluvassa GUESS-menetelmässä käytetään. Neljäs WWW-NIMBUS -ohjelmiston skalarisointifunktio on siis muotoa [35]

$$\min \quad \max_{i \in I^\circ} \left[\frac{f_i(\mathbf{x}) - z_i^{\text{nad}}}{z_i^{\text{nad}} - \bar{z}_i} \right] + \rho \sum_{i=1}^k \frac{f_i(\mathbf{x})}{z_i^{\text{nad}} - \bar{z}_i} \quad (65)$$

$$\text{s.t.} \quad \mathbf{x} \in S. \quad (66)$$

Lisätietoa niin GUESS-menetelmästä, STOM-menetelmästä kuin referenssipistemethodestäkin saa esimerkiksi kirjasta [32]. Nyt kun tiedetään,

miten monitavoiteoptimointiongelma päädytään yksitavoitteiseen optimointiongelmaan, voidaan käydä tarkemmin WWW-NIMBUS -ohjelmiston geneettiseen algoritmiin perustuvien ratkaisijoiden rajoitteidenhallintamenetelmät läpi.

Artikkelissa [36] yksilön sopivuus määritetään kohdefunktioon perustuvan fitness-funktion avulla. PFP-menetelmässä sakotettuun kohdefunktioon lisätään ylimääräinen funktio. Iteraatiokierroksesta riippuva funktio varmistaa, että ei-sallituilla ratkaisuilla on aina huonommat fitness-funktion arvot kuin sallituilla ratkaisuilla. Itseasiassa ei-sallittujen ratkaisupisteiden fitness-funktion arvot eivät riipu kohdefunktion arvoista. [36]

PFP-menetelmän fitness-funktiota hyödyntäen geneettisen algoritmin optimointiongelma saa muodon [36]

$$\min \quad f(\mathbf{x}) + \sum_{j=1}^m \max[0, g_j(\mathbf{x})] + \hat{\theta}_i(\mathbf{x}) \quad (67)$$

$$\text{s.t.} \quad \mathbf{x}^l \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}^u, \quad (68)$$

missä

$$\hat{\theta}_i(\mathbf{x}) = \begin{cases} 0, & \text{jos } \mathbf{x} \in S \\ -f(\mathbf{x}), & \text{jos } X^i \cap S = \emptyset \\ -f(\mathbf{x}) + \max_{\mathbf{y} \in X^i \cap S} f(\mathbf{y}), & \text{muutoin.} \end{cases} \quad (69)$$

Symbolilla X^i merkitään iteraatiokierroksen i populaatiota.

Funktio $\hat{\theta}_i$ takaa, että ei-sallitut ratkaisut suunnataan aina kohti sallittujen ratkaisujen joukkoa S . Tämän johdosta PFP-menetelmä löytää SFP-menetelmää todennäköisemmin sallittuja ratkaisuja. SFP-menetelmän toimintaperiaatteita ei tulla tässä työssä käymään läpi, koska kumpikaan WWW-NIMBUS -ohjelmiston ratkaisijoista ei käsittele monitavoiteoptimointiongelman rajoitteita sen avulla. SFP-menetelmään voi kuitenkin halutesaan tutustua artikkelin [36] avulla. PFP-menetelmän konvergenssi voi hidastua sen vuoksi, että ei-sallituista ratkaisuista puhuttaessa kohdefunktion arvoa ei oteta ollenkaan huomioon. [36]

AP-menetelmä yrittää välttyä ei-sallituilta ratkaisuilta säätämällä sakotuskerrointa. AP-menetelmässä otetaan käyttöön uusi parametri h , joka ker-

too monenko iteraatiokierroksen parhaita yksilöitä tullaan tarkastelemaan. Jos kaikki kuluneiden h iteraatiokierroksen parhaat yksilöt ovat sallittuja, niin sakotuskerrointa pienennetään jakamalla se parametrilla $c_1 > 1$. Jos kaikki kuluneiden h iteraatiokierroksen parhaat yksilöt ovat olleet ei-sallittuja, niin sakotuskerrointa kasvatetaan kertomalla se parametrilla $c_2 > 1$. Jos jotkut näistä h iteraatiokierroksen aikana ilmenneistä parhaista yksilöistä ovat sallittuja ja jotkut ei-sallittuja, niin jatketaan nykyisellä sakotuskertoimella. Täten sakotuskertoimen arvo päivitetään, jos on olemassa mahdollisuus, että sallitun joukon raja ei ole katettu tai etsintä keskittyy ei-sallittuihin ratkaisuihin. [36]

AP-menetelmän fitness-funktiota hyödyntäen geneettisen algoritmin optimointiongelma saa muodon [36]

$$\min \quad f(\mathbf{x}) + r_i \left(\sum_{j=1}^m \max[0, g_j(\mathbf{x})]^2 \right) \quad (70)$$

$$\text{s.t.} \quad \mathbf{x}^l \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}^u, \quad (71)$$

missä sakotuskertoimen r_i arvo tarkistetaan jokaisen h iteraatiokierroksen jälkeen. Merkitään iteraatiokierroksen j parasta yksilöä symbolilla \mathbf{y}^j . Kerrotoimen r_i päivitys tapahtuu kaavalla

$$r_{i+1} = \begin{cases} \frac{r_i}{c_1}, & \text{jos } i \geq h \text{ ja } \mathbf{y}^j \in S \text{ kaikille } i - h + 1 \leq j \leq i \\ c_2 r_i, & \text{jos } i \geq h \text{ ja } \mathbf{y}^j \notin S \text{ kaikille } i - h + 1 \leq j \leq i \\ r_i, & \text{muuten,} \end{cases} \quad (72)$$

missä $c_1, c_2 > 1$ ja $c_1 \neq c_2$ (jotta ei päädytä sykliin).

7.2 Ihanteellisen kriteerivektorin ja nadir-vektorin määrittäminen

Ihanteellisen kriteerivektorin ensimmäistä ja toista kohdefunktiota vastaavat komponentit määritettiin lineaaristen yksitavoitteisten optimointiongelmien ratkaisemiseen soveltuvalla CPLEX-ohjelmistolla. CPLEX-ohjelmisto

on IBM ILOG:n kaupallistama optimointiohjelmistopaketti, joka koostuu algoritmeista, työkaluista ja rajapinnoista. CPLEX kykenee ratkaisemaan yksitavoitteisia jatkuvia päätösmuuttujia, diskreettejä päätösmuuttujia tai niitä molempia sisältäviä lineaarisia, kvadraattisia (toista potenssia olevia) ja rajoitteellisia optimointiongelmia. [25]

CPLEX-ohjelmisto sisältää useita vaihtoehtoisia optimointialgoritmeja. Ohjelmisto osaa itse valita kuhunkin tilanteeseen parhaiten soveltuvan ratkaisumenetelmän. Kokonaislukumuuttujia sisältäviin optimointiongelmiin soveltuvia menetelmiä ovat CPLEX-ohjelmiston optimoijista muun muassa Branch and Cut -menetelmä ja dynaamisen etsimisen menetelmä (Dynamic Search). Vaikka dynaamisen etsimisen menetelmän toimintaperiaate onkin patentoitu ja IBM:n liikesalaisuus, dynaamisen etsimisen menetelmän tiedetään perustuvan Branch and Cut -menetelmään. [25]

CPLEX pystyy lukemaan ratkaistavana olevan optimointiongelman suoraan komentorivin kautta lp-tiedoston muodossa tallennetusta tekstitiedostosta. Optimointiongelman sisältävän lp-tiedoston luomiseen liittyy omat avainsanansa ja oma syntaksinsa, joista saa tarkempaa tietoa esimerkiksi lähteestä [22]. Ensimmäiseen ja toiseen kohdefunktioon liittyvien yksitavoitteisten optimointiongelmien ratkaisemiseen voitiin käyttää pohjana samaa lp-tiedostoa, sillä ainoa eroavaisuus liittyy lp-tiedostojen ensimmäiseen riviin, jossa toisessa minimoidaan ensimmäistä kohdefunktiota ja toisessa maksimoidaan toista kohdefunktiota.

CPLEX ratkaisi ensimmäiseen ja toiseen kohdefunktioon liittyvät optimointiongelmat kahdessa vaiheessa:

- Optimointiongelman esikäsittely
- Esikäsitellyn optimointiongelman ratkaisu Branch and Cut -menetelmään perustuvalla dynaamisen etsimisen menetelmällä.

Esikäsittelyvaiheessa CPLEX pyrkii pienentämään ongelman kokoa ja parantamaan ongelman muotoilua. Tekniikoita, joilla käsillä olevaa optimointiongelmaa esikäsitellään ovat toteuttamiskelvottomuuden (infeasibility) tunnistaminen, tarpeettomuuden (redundancy) tunnistaminen, rajojen parantaminen ja pyöristys (sekä jatkuvia että diskreettejä päätösmuuttujia sisältä-

vien ongelmien tapauksessa). Optimointimallia esikäsitellään myös hyödyn-
tämällä luotaamistekniikoita, jotka kiinnittävät muuttujien arvot joko nol-
laan tai ykköseen ja tarkistavat niistä seuraavien loogisten implikaatioiden
paikkansapitävyyden. Esikäsitteilyn tuloksena syntyy uusi, tiiviimmin muo-
toiltu ja relaksoidusta ongelmasta riippumaton malli. [25] Sekä ensimmäiseen
että toiseen kohdefunktioon liittyvän optimointiongelman kokoa onnistuttiin
pientämään poistamalla lineaarisen optimointiongelman kerroinmatriisista
rivejä, sarakkeita tai molempia.

Kolmas kohdefunktio on epälineaarinen, eikä siihen liittyvää yksita-
voitteista optimointiongelmaa voida sen vuoksi ratkaista ensimmäiseen ja
toiseen kohdefunktioon liittyneiden optimointiongelmiin tapaan CPLEX-
ohjelmistolla. Epälineaaristen yksitavoitteisten optimointiongelmiin ratkai-
semiseen soveltuvia menetelmiä on kuitenkin olemassa ja jopa internetin
kautta vapaasti saatavilla. Yksi useampia ratkaisijoita samaan paikkaan
koonnut sivusto on NEOS SERVER [43]. Sivusto on luokitellut ratkaisijat
eri kategorioihin sen mukaan, millaisten ongelmien ratkaisemiseen ne sovel-
tavat. Mixed Integer Nonlinearly Constrained Optimization -kategorian alle
kuuluvat ratkaisijat soveltuvat parhaiten kolmannen kohdefunktion minimin
selvittämiseen, koska rajoitteellisten, epälineaaristen ja pelkkiä kokonaisluku-
ja sisältävien optimointiongelmiin ratkaisemiseen soveltuvien ratkaisijoiden
kategorialla ei ollut kyseisellä sivustolla tarjolla.

Parhaiten ongelmaan soveltuvaa ratkaisijaa määrittäminen suoralta kä-
deltä ei ole mahdollista, joten sama ongelma kokeiltiin ratkaista erikseen kai-
killa Mixed Integer Nonlinearly Constrained Optimization -kategorian rat-
kaisijoilla. Osa ratkaisijoista sai määritettyä minimin ja osa ei. Ratkaisijat
antoivat myös toisistaan poikkeavia tuloksia. Valinta kohdistui sellaiseen rat-
kaisijaan, joka ensinnäkin pystyi ratkaisemaan ongelman kaatumatta esimer-
kiksi tehtävän ratkaisemista koskevaan aikarajoitteeseen ja toisekseen antoi
parhaimman kohdefunktion arvon. Kolmannen kohdefunktion minimi pää-
dyttiin määrittämään LindoGlobal-nimisellä ratkaisijalla.

LindoGlobal-ratkaisija käyttää hyväkseen Branch and Cut -menetelmää.
Lisätietoa LindoGlobal-ratkaisijan toimintaperiaatteesta löytyy lähteestä
[19]. Kolmanteen kohdefunktioon liittyvän optimointiongelman minimi mää-

ritettiin LindoGlobal-ratkaisijan avulla lähettämällä ratkaistava optimointiongelma etäpalvelimelle GAMS-mallin muodossa. GAMS-mallin luomiseenkin liittyy oma syntaksinsa, johon voi tutustua lähteessä [17].

Myös neljänteen kohdefunktioon liittyvän kohdefunktion minimi yritettiin määrittää LindoGlobal-ratkaisijalla. LindoGlobal pystyi ratkaisemaan tehtävän ilman virheilmoituksia. VSSH:n ambulanssien sijoittamisongelmaa WWW-NIMBUS -ohjelmistolla ratkaistaessa havaittiin kuitenkin, että neljäs kohdefunktio voi saavuttaa huomattavasti LindoGlobalin antamaa parasta mahdollista arvoa parempia arvoja. Tarkemman tarkastelun jälkeen huomattiin, että LindoGlobal-ratkaisijan mukaan neljäs tavoite toteutuu parhaiten, kun tutkimusalueen asemille asetellaan yhteensä 27 ambulanssia. Väite vaikuttaa epäuskottavalta. Optimaalista kohdefunktion arvoa tuskin voidaan saavuttaa sijoittamalla kuusi yksikköä vähemmän kuin ambulansseja on käytettävissä; varsinkin kun neljännen kohdefunktion tiedetään sakottavan jokaisesta ilman ambulanssia jäävästä asemasta.

Havaittu virheellinen tulos saa kyseenalaistamaan myös LindoGlobal-ratkaisijalla määritetyn kolmannen kohdefunktion optimiarvon oikeellisuuden. Kolmanteen kohdefunktioon liittyvän optimointiongelman tapauksessa LindoGlobal kuitenkin neljänteen kohdefunktioon liittyvästä optimointiongelma poiketen ohjaa sijoittamaan asemille kaikki 33 käytettävissä olevaa ambulanssia. Ensimmäiseen ja toiseen kohdefunktioon liittyvien optimointitehtävien minimeitä voidaan pitää luotettavina, sillä ensimmäinen ja toinen kohdefunktio ovat sekä lineaarisia sekä suhteellisen yksinkertaisia.

Ristikkäisvertailu WWW-NIMBUS -ohjelmistolla ja CPLEX-ohjelmistolla määritettyjen ensimmäiseen ja toiseen kohdefunktioon liittyvien optimointiongelmien minimien välillä voisikin auttaa saamaan käsityksen WWW-NIMBUS -ohjelmiston kyvystä löytää yksittäiseen kohdefunktioon liittyvän optimointiongelman minimi. Yksittäiseen kohdefunktioon f_i liittyvän optimointiongelman minimi määritettiin WWW-NIMBUS -ohjelmistolla käytännössä tekemällä sellainen luokittelu, missä f_i luokiteltiin $I^<$ -luokkaan ja muut kohdefunktiot $I^>$ -luokkaan. Toistamalla kyseistä luokittelua muutaman iteraatiokierroksen ajan ja käyttämällä ainakin kertaalleen molempia WWW-NIMBUS -ohjelmiston tarjoamista globaaleis-

ta optimointialgoritmeista, WWW-NIMBUS saatiin tarjoamaan sellaista ratkaisuvaihtoehtoa monitavoiteoptimointiongelmaan, jossa kohdefunktion f_i arvo oli juuri sama kuin mikä CPLEX-ohjelmistolla oli saatu sekä ensimmäisen että toisen kohdefunktion minimiksi. Sitä pienempää arvoa WWW-NIMBUS ei pystynyt löytämään.

Ensimmäinen ja toinen kohdefunktio ovat lineaarisia, jonka vuoksi oli tarpeen suorittaa samainen WWW-NIMBUS -ohjelmiston ja CPLEX-ohjelmiston antamien tulosten ristikkäisvertailu myös epälineaarille kolmanteen kohdefunktioon liittyvälle optimointiongelmalle. Tässäkin tapauksessa pienin WWW-NIMBUS -ohjelmiston löytämä kohdefunktion arvo on ohjelmiston tarjoaman tarkkuuden rajoissa juuri sama kuin mikä LindoGlobal-ratkaisijallakin saatiin tulokseksi. WWW-NIMBUS olisi siis edellä kuvatulla proseduurilla pystynyt löytämään tarkasti kaikkiin kohdefunktioihin liittyneiden optimointiongelmien minimi. Tämän vuoksi neljännen kohdefunktioon liittyvän optimointiongelman minimaalinen arvo päädyttiin määrittämään WWW-NIMBUS -ohjelmiston avulla osana VSSHP:n ambulanssien sijoittamiseen liittyvän monitavoiteoptimointiongelman ratkaisuprosessia. Taustatarkastelujen perusteella voimme olettaa, että tällä tavalla määritetyissä ratkaisuvaihtoehdoissa esiintyvä pienin mahdollinen neljännen kohdefunktion arvo on joko täsmälleen neljännen kohdefunktion globaali minimi tai hyvin lähellä sitä.

Tällöin ihanteellinen kriteerivektori saa muodon $z^* = (241, -200.032, 2\,563\,324\,475, 119\,034)^T$.

Nadir-vektori määritetään maksutaulukon avulla kappaleessa 3 kuvatulla tavalla. Kohdefunktioon f_i liittyvä nadir-vektorin komponentti löytyy siitä maksutaulukon sarakkeesta, joka sisältää kohdefunktion f_i arvot laskettuna kunkin kohdefunktion minimipisteessä. Maksutaulukon muodostaminen edellyttää tietoa siitä, missä pisteessä kukin yksittäinen kohdefunktio saavuttaa minimaalisen arvonsa. Nämä 75-ulotteiset päätösmuuttujien arvoista koostuvat vektorit ovat kuitenkin jo tunnettuja, sillä ihanteellista kriteerivektoria määritettäessä otettiin talteen kunkin kohdefunktion minimaalisen arvon lisäksi myös se piste, jossa kohdefunktio kyseisen arvon sai.

Tilannetta monimutkaistaa se, että ensimmäinen kohdefunktio saavuttaa minimaalisen arvonsa yhteensä 18 eri päätösmuuttuja-avaruuden pisteessä. Huolimatta siitä, että päätösmuuttuja-avaruuden piste, jossa kohdefunktio saavuttaa minimaalisen arvonsa, on usein yksikäsitteinen, näin ei kuitenkaan aina ole. Diskreetin päätösmuuttujan käyttö yhdistettynä ensimmäisen kohdefunktion rakenteeseen (pätösmuuttujien kertoimet eivät ole uniikkeja) antaa syytä epäillä, että optimaalinen kohdefunktion arvo voidaan saavuttaa useassa eri pisteessä. CPLEX-ohjelmiston avulla asiaan saatiin varmistus käyttämällä ensimmäiseen kohdefunktioon liittyvän optimointiongelman ratkaisun jälkeen populate-käskyä, joka tulostaa komentoriville kaikki optimaaliset ratkaisut.

Populate-käsky on luotu työkaluksi, jonka avulla pystytään generoimaan kaikki sallitut ratkaisut käsillä olevaan optimointiongelmaan. Työkaluun liitettäviä parametreja muokkaamalla populate-käsky saadaan kuitenkin tulostamaan komentoriville vain optimaaliset ratkaisut. Käytännössä tämä tapahtui asettamalla absoluuttinen väli (absolute gap) tasan nolnaan ja vaihtamalla intensiivisyyteen liittyvä parametri arvoon 4 (tällöin populate-käskyn suoritus ei katkea ensimmäiseen löydettyyn optimaaliseen ratkaisuun).

Ei voida olettaa, että toinen, kolmas ja neljäs kohdefunktio saavat kaikki huonoimman arvonsa samassa ensimmäisen kohdefunktion optimipisteessä. Sen vuoksi joudutaan suorittamaan yksi ylimääräinen välivaihe ennen varsinaisen maksutaulukon muodostamista. Lasketaan toisen, kolmannen ja neljännen kohdefunktion saavuttamat arvot kaikissa niissä päätösmuuttujien arvoista koostuvissa pisteissä, joissa ensimmäiseen kohdefunktioon liittyvä optimointiongelma saavuttaa minimaalisen arvonsa. Tämän jälkeen valitaan huonoin kohdefunktion f_i saamista arvoista maksutaulukoon siksi arvoksi, joka kertoo minkä arvon kohdefunktio f_i saa ensimmäiseen kohdefunktioon liittyvän optimointiongelman optimaalisessa päätösmuuttuja-avaruuden pisteessä. Tällä tavalla menettelemällä kohdefunktion arvosta ei ainakaan saa parempaa kuvaa kuin mikä se todellisuudessa voi ensimmäisen kohdefunktion minimiin johtavassa päätösmuuttuja-avaruuden pisteessä olla. Ylimääräiseen välivaiheeseen liittyvät tulokset on esitetty taulukossa 2. Huonoin arvo, jonka kukin kohdefunktio voi ensimmäiseen kohdefunktioon liittyvän yksitavoittei-

sen optimointiongelman optimipisteessä saada, on korostettu taulukossa 2 keltaisella taustavärillä.

Taulukko 2: Toisen, kolmannen ja neljännen kohdefunktion saamat arvot ensimmäiseen kohdefunktioon liittyvän yksitavoitteisen optimointiongelman optimipisteissä.

	$f_2(\mathbf{x})$	$f_3(\mathbf{x})$	$f_4(\mathbf{x})$
v_1	-64.883	32 532 353 870	223 786
v_2	-65.449	32 286 467 196	242 451
v_3	-74.486	21 942 748 232	242 988
v_4	-64.629	32 329 100 474	231 388
v_5	-64.871	32 474 310 516	242 275
v_6	-65.120	32 109 819 296	245 025
v_7	-74.156	21 766 100 332	245 577
v_8	-64.761	32 448 551 870	242 206
v_9	-64.742	32 518 427 248	232 344
v_{10}	-64.408	32 534 324 370	238 053
v_{11}	-83.784	16 828 822 690	243 195
v_{12}	-64.299	32 152 452 574	233 976
v_{13}	-64.541	32 297 662 616	244 864
v_{14}	-64.431	32 271 903 970	244 773
v_{15}	-64.413	32 341 779 348	234 932
v_{16}	-64.078	32 357 676 470	240 642
v_{17}	-83.454	16 652 174 790	245 784
v_{18}	-64.553	32 355 705 970	226 375

Varsinaiset nadir-vektorin arvot saadaan selville taulukosta 3. Nadir-vektorin kohdefunktioon f_i liittyvä komponentti on sarakkeen i huonoin (minimointitehtävästä puhuttaessa suurin) arvo. Kyseiset arvot on korostettu taulukossa 3 keltaisella taustavärillä.

Taulukko 3: Nadir-vektorin määrittämisessä hyödynnettävä maksutaulukko.

	$f_1(\mathbf{x})$	$f_2(\mathbf{x})$	$f_3(\mathbf{x})$	$f_4(\mathbf{x})$
minimipiste f_1	241	-64.078	32 532 353 870	245 784
minimipiste f_2	302	-200.032	27 965 585 467	1 079 386
minimipiste f_3	275	-81.494	2 563 324 475	287 092
minimipiste f_4	307	-51.339	49 540 906 829	119 034

Tällöin nadir-vektori saa muodon

$$z^{\text{nad}} = (307, -51.339, 49\,540\,906\,829, 1\,079\,386)^T.$$

7.3 Parhaimman kompromissin määrittäminen WWW-NIMBUS -ohjelmiston avulla

VSSHP:n ambulanssien optimaaliseen sijoittamiseen liittyvä monitavoiteoptimointiongelma ratkaistaan hyödyntämällä WWW-NIMBUS -ohjelmistoa. Liitteessä A esitetyn monitavoiteoptimointiongelman ratkaiseminen WWW-NIMBUS -ohjelmistolla alkaa antamalla ongelmalle nimi ja spesifioimalla monestako kohdefunktiosta, päätösmuuttujasta, lineaarisesta rajoitteesta, epälineaarista epäyhtälörajoitteesta ja epälineaarista yhtälörajoitteesta ongelma koostuu. Ratkaistavan monitavoiteoptimointiongelman kohdefunktioiden sekä rajoitteiden lausekkeet kirjataan niille avautuneisiin kenttiin.

VSSHP:n ambulanssien optimaaliseen sijoittamiseen tähtäävän monitavoiteoptimointimallin kohdefunktiot koostuvat 75 – 369 termistä, joiden monimutkaisuus vaihtelee huomattavasti. Olisikin naiivia olettaa, että kohdefunktioiden muoto säilyy oikeana, mikäli kohdefunktiot syötettäisiin ohjelmistojärjestelmään käsin termi kerrallaan. Lisäksi kyseisen operaation suorittaminen olisi todella hidasta. Tämän vuoksi kohdefunktioiden lausekkeet kopioitiin suoraan Wolfram Mathematica -ohjelmistosta Notepad++-nimiseen ohjelmaan. Notepad++ on monipuolinen tekstin- ja lähdekoodin käsittelyohjelma. Suoritetaan Notepad++-ohjelman avulla tarvittava määrä merkkienkorvausoperaatioita, joiden avulla kohdefunktio saadaan muunnettua sellai-

seen muotoon, missä WWW-NIMBUS sen haluaa vastaanottaa. Yksi esimerkki tarvittavasta merkkienkorvausoperaatiosta on se, että kertoimena toimivan luvun ja päätösmuuttujan väliin on saatava *-kertomerkki. Tarvittavien muokkausoperaatioiden jälkeen kohdefunktioiden lausekkeet kopioidaan WWW-NIMBUS -ohjelmistoon.

WWW-NIMBUS pyytää päätöksentekijää täyttämään kohdefunktioiden lausekkeiden perään kuhunkin kohdefunktioon liittyvät ihanteellisen kriteerivektorin ja nadir-vektorin komponentit niille varattuihin kenttiin. On harmillista, että neljänteen kohdefunktioon liittyvä ihanteellisen kriteerivektorin komponentin arvo jouduttiin määrittämään WWW-NIMBUS -ohjelmiston avulla, sillä tilanne muodostuu kehäpäätelymäiseksi. Ongelmaksi asti hieinan kyseenalainen menettely ei kuitenkaan kehity, sillä päätöksentekijän syöttämät ihanteellinen kriteerivektori ja nadir-vektori eivät tunnu juurikaan WWW-NIMBUS -ohjelmiston toimintaan vaikuttavan. WWW-NIMBUS -ohjelmiston avulla on nimittäin mahdollista ratkaista monitavoiteoptimointiongelma myös jättämällä ihanteellista kriteerivektoria ja nadir-vektoria varten varatut kentät tyhjiksi. Lisäksi WWW-NIMBUS ei olisi pystynyt määrittämään neljännelle kohdefunktiolle huomattavasti (alunperin väärää) parasta mahdollista arvoa pienempää arvoa, jos se rajaisi ratkaisuvaihtoehtojen etsintäintervallinsa päätöksentekijän tarjoamien ihanteellisen kriteerivektorin ja nadir-vektorin mukaan.

WWW-NIMBUS tarvitsee tietoa myös monitavoiteoptimointiongelmaan liittyvistä päätösmuuttujista. Jokaiseen päätösmuuttujaan liittyy yksi rivi, jolla on kerrottu miltä väliltä kyseinen päätösmuuttuja voi saada arvoja, mikä on kyseisen päätösmuuttujan aloitusarvo ja onko kyseessä diskreetti vai jatkuva muuttuja. Aloituspisteeksi valitaan jokin sallittu ratkaisu. Täytetään jokaiseen asemapaikkaan yksi ambulanssi niin kauan, että ambulansseja tulee sijoitettua ylin sallittu lukumäärä eli 33 kappaletta. Tarkastelualuekohtaiset rajoitteet rajaavat kuitenkin sen verran, että asemalle 26 ei voida sijoittaa ambulanssia. Tämän vuoksi viimeinen ambulanssi sijoitetaan asemapaikalle 34. Lopuille asemapaikoille asetellaan aluksi nolla ambulanssia.

Jokaista monitavoiteoptimointiongelmaan liittyvää lineaarista rajoitetta kohti on varattu rivi, joka sisältää 75 kappaletta päätösmuuttujien kerto-

mille varattuja kenttiä, rajoitteeseen liittyvälle vakiolle varatun kentän ja niiden väliin sijoittuvan vertailuoperaattorivalikon. VSSHP:n ambulanssien sijoittamisongelmaan liittyy yhteensä 124 kappaletta lineaarisia epäyhtälörajoitteita eli rajoitteiden kirjoittaminen on verrattavissa 76×124 -kokoisen matriisiin täyttämiseen.

Rajoitteiden syöttämisen jälkeen valitaan mitä ratkaisijaa käyttämällä WWW-NIMBUS -ohjelmiston halutaan ensimmäinen Pareto-optimaalinen ratkaisuvaihtoehto generoivan. Valitaan ratkaisualgoritmiksi Global1 lähinnä sen vuoksi, että artikkelin [36] mukaan se toimi 33 erilaisella monitavoiteongelmalla testattaessa Global2-algoritmia luotettavammin. Ensimmäinen WWW-NIMBUS -ohjelmiston tarjoama ratkaisuvaihtoehto:

$$\begin{aligned} f_1(\mathbf{x}) & 255 \\ f_2(\mathbf{x}) & -167.680 \\ f_3(\mathbf{x}) & 1.107874 \cdot 10^{10} \\ f_4(\mathbf{x}) & 318\,783. \end{aligned}$$

Seuraavaksi käyttäjää pyydetään luokittelemaan ohjelmiston löytämään Pareto-optimaaliseen ratkaisupisteeseen liittyvät kohdefunktion arvot johonkin kappaleessa 7.1 esitellyistä viidestä NIMBUS-menetelmän luokasta. Mikäli yhdellekään kohdefunktiolle ei sallita sen arvon suurenemista, ei muiden kohdefunktioiden arvoja pystytä myöskään pienentämään. Tämä on suora seuraus Pareto-optimaalisuuden määritelmästä. Kohdefunktion arvojen luokittelussa auttaa tieto siitä, mikä kunkin kohdefunktion arvointervalli on. Arvointervallin rajoina toimivat ihanteellisen kriteerivektorin komponentti ja huonoin mahdollinen arvo, jonka kohdefunktio voi sallittuun joukkoon kuuluvassa pisteessä saada. On huomionarvoista, että kohdefunktion huonoin mahdollinen sallitussa pisteessä saavuttama arvo ei ole sama kuin nadirvektorin komponentin arvo, joka kuvaa huonointa mahdollista arvoa, jonka kohdefunktio voi Pareto-optimaalisessa päätösmuuttuja-avaruuden pisteessä saada.

Se, että ambulanssien optimaaliseen sijoittamiseen tähtäävässä monitavoiteoptimointimallissa käytetään laatikkorajoitteilla rajattuja diskreettejä päätösmuuttujia, osoittautuu tässä kohtaa hyödylliseksi ominaisuudeksi. Tässä tapauksessa kaikille kohdefunktioille on nimittäin olemassa yksikäsit-

teisen optimaalisen kohdefunktion arvon lisäksi myös yksikäsitteinen huonoin mahdollinen arvo. Kunkin kohdefunktion huonoin mahdollinen kohdefunktion arvo voidaan määrittää useammallakin tavalla. Mikäli kehitetty monita-voiteoptimointimalli toimii halutulla tavalla, jokaisen kohdefunktion pitäisi tuottaa huonoin mahdollinen kohdefunktion arvo silloin, kun jokaiselle asemalle sijoitetaan nolla yksikköä. VSSHP:n ambulanssien sijoittamisongelma koostuu neljästä minimoitavasta kohdefunktiosta. Kohdefunktion f_i huonoin mahdollinen arvo on siis ekvivalentti kohdefunktion f_i maksimointitehtävän optimaalisen kohdefunktion arvon kanssa. Lisäksi on yleisesti tiedossa, että jos halutaan selvittää jonkin funktion f_i maksimi, se on sama kuin selvitetäisiin kohdefunktion $-f_i$ minimi ja otetaan siitä vastaluku.

Ratkaistaan lineaaristen kohdefunktioiden huonoimmat mahdolliset arvot CPLEX-ohjelmiston avulla. Maksimoidaan yksitellen molemmat kohdefunktiot f_1 ja f_2 . Huomataan, että CPLEX antaa odotetusti optimipisteeksi molemmissa tapauksissa nollavektorin. Kolmannen kohdefunktion huonoin mahdollinen arvo määritetään selvittämällä kohdefunktion f_3 maksimi LindoGlobal-ratkaisijan avulla. Jälleen huomataan, että LindoGlobal-ratkaisijan tarjoamassa optimaalisessa ratkaisupisteessä kaikki päätösmuuttujat saavat arvon nolla. LindoGlobal pystyy ongelmitta ratkaisemaan myös neljännen kohdefunktion huonoimman mahdollisen arvon. Optimipisteeksi saadaan tässäkin tapauksessa nollavektori.

Huonoimmat mahdolliset kohdefunktioiden arvot:

$$\begin{aligned} f_1(\mathbf{x}) & 464 \\ f_2(\mathbf{x}) & 0 \\ f_3(\mathbf{x}) & 79\ 983\ 411\ 120 \\ f_4(\mathbf{x}) & 11\ 925\ 012. \end{aligned}$$

Kohdefunktiot voivat siis saada arvoja väleiltä:

$$\begin{aligned} f_1(\mathbf{x}) & [241, 464] \\ f_2(\mathbf{x}) & [-200.032, 0] \\ f_3(\mathbf{x}) & [2\ 563\ 324\ 475, 79\ 983\ 411\ 120] \\ f_4(\mathbf{x}) & [119\ 034, 11\ 925\ 012]. \end{aligned}$$

Huomataan, että kohdefunktioiden arvointervallit ovat keskenään hyvin erikokoisia. Tämä johtaa siihen, että toisen kohdefunktion arvon pieneneminen kymmenellä voi olla suhteessa todella merkittävää, kun taas toisen kohdefunktion tapauksessa muutos voi olla täysin mitätön. Suhteellinen analyysi onkin tässä tilanteessa huomattavasti absoluuttista lähestymistapaa realistisempi tapa vertailla sitä, onko tämänhetkinen ratkaisuvaihtoehto riittävän hyvä kunkin kohdefunktion kannalta. Luodaan tähän tarkoitukseen NIMBUSapuri-niminen Excel-tiedosto. Tutkitaan sen avulla, miten hyvin kunkin kohdefunktio toteutuu nykyisessä ratkaisupisteessä. Tätä voidaan arvioida laskemalla mihin kohtaan kunkin kohdefunktion arvointervallia nykyisessä ratkaisupisteessä määritetyt kohdefunktion arvot sijoittuvat. Kyseinen tieto saadaan selville kaavalla

$$\frac{f_i(\mathbf{x}) - f_i^I}{f_i^N - f_i^I}, \quad (73)$$

missä $f_i(\mathbf{x})$ on i :nnen kohdefunktion arvo nykyisessä ratkaisupisteessä, f_i^I on kohdefunktion i liittyvän ihanteellisen kriteerivektorin komponentin arvo ja f_i^N on kohdefunktion i liittyvän nadir-vektorin komponentin arvo.

Mitä pienempi luku kaavasta (73) saadaan tulokseksi sitä paremmin kohdefunktion kuvaama tavoite toteutuu. Sellaista ratkaisupistettä, joka toteuttaisi mahdollisimman hyvin (suhteessa) jokaisen tavoitteen, voidaan pitää tietyllä tavalla suositeltavimpana vaihtoehtona. Tämänhetkisen ratkaisupisteen tuottamien kohdefunktioiden arvojen sijainti kunkin kohdefunktion arvointervallissa:

$$\begin{aligned} f_1(\mathbf{x}) & 0.06278 \\ f_2(\mathbf{x}) & 0.16173 \\ f_3(\mathbf{x}) & 0.10999 \\ f_4(\mathbf{x}) & 0.01692. \end{aligned}$$

NIMBUSapuri-tiedostoa hyödyntämällä saadaan selville, että nykyinen ratkaisu toteuttaa suhteessa parhaiten neljännen tavoitteen. Neljäs kohdefunktio saa nykyisessä ratkaisupisteessä lähestulkoon optimaalisen arvonsa (kohdefunktion arvo sijoittuu arvointervallinsa parhaan 2% sisään). Muidenkin tavoitteiden toteutumisasetta voidaan pitää tyydyttävänä, sillä suhteessa huonoitenkin toteutuva tavoite kuuluu arvointervallinsa parhaimpaan vii-

dennekseen. Ongelmaksi muodostuukin lähinnä kohdefunktioiden keskinäinen järjestys sen suhteen, minkä tavoitteen ratkaisupiste toteuttaa parhaiten.

Ensimmäisen kohdefunktion tiedetään perustuvan vuoden 2016 hälytystietoihin. Toisen kohdefunktion lausekkeeseen ovat sen sijaan vaikuttaneet kaikki vuosien 2014-2016 ajalta kerätyt hälytystiedot. Toisen tavoitteen takana on siis huomattavasti ensimmäistä tavoitetta suurempi aineistomäärä, jonka vuoksi toisen tavoitteen toteutumista voidaan pitää juuri tässä nimenomaisessa tilanteessa (ainakin jonkin verran) ensimmäisen tavoitteen toteutumista tärkeämpänä.

Kolmannen kohdefunktion muodostamisessa hyödynnetty aineisto pitää sisällään tiedon siitä, kuinka paljon ihmisiä kullakin tarkastelualueella asuu. Suuri osa ihmisistä kuitenkin viettää noin puolet päivästä muualla kuin kotonaan, joten kolmannen tavoitteen suhteellisesta toteutumisesta voitaisiin antaa vähän periksi siinä tapauksessa, että se parantaa muiden kohdefunktioiden arvoja. Kovin paljon kolmannen kohdefunktion arvon ei kannata antaa heikentyä, sillä suuri asukasluku korreloi usein melko suoraan sen kanssa, paljonko palveluita kyseisellä alueella sijaitsee. Ottaen huomioon vielä sen, että suurin osa ihmisistä työskentelee nykyään palveluiden parissa, kolmas kohdefunktio voi kuvata yllättävänkin todenmukaisesti ihmisten (samalla myös hälytystehtävien syntymispotentiaalin) suhteellista jakautumista tutkimusalueen sisällä.

Neljäs kohdefunktio on ainut kehitetyn monitavoiteoptimointimallin kohdefunktioista, joka kykenee ottamaan huomioon muiden kuin saman tarkastelualueen asemien välisiä naapurustovaikutuksia. Vaikka kappaleessa 6 esitelty tarkastelualuejako onkin perusteltavissa, sitä ei voida pitää ainoana järkevänä tapana jakaa tutkimusalue tarkastelualueisiin. Olisikin toivottavaa, että asemien välistä lähivaikutusta pystyttäisiin mallintamaan muutenkin kuin pelkästään tarkastelualuejakoon nojaten. Neljännen tavoitteen toteutumista voidaan pitää ratkaisun käytännöllisyyden kannalta tärkeänä, sillä asemien ambulanssit osallistuvat reaali maailmassa hyvin todennäköisesti sellaisestikin alueiden pääasialliseen/avustavaan kattamiseen, jotka eivät kuulu niiden tarkastelualueiden alueelle, joiden kattamiseen kyseisen aseman ambulans-

sien tulisi kehitetyn monitavoiteoptimointimallin ja tarkastelualuejaon mukaan osallistua.

Täydellinen neljäskään tavoite ei kuitenkaan ole. Neljännen kohdefunktion lauseke vaihtelee paljon sen mukaan mikä arvo parametrille c annetaan. Parametrin c valintaan liittyy kappaleessa 5 kuvattuja hankaluuksia. Ei voida olla varmoja, onko 10 paras valinta parametrin c arvoksi, vaikka se kappaleen 6.2 perusteella vaikuttaakin hyvältä valinnalta. Tämän vuoksi ei kannata myöskään panostaa liikaa siihen, että neljäs tavoite toteutuisi mahdollisimman hyvin (varsinkin, kun se Pareto-optimaalisuudesta johtuen tapahtuu aina muiden tavoitteiden kustannuksella).

Kolmas ja neljäs tavoite lähestyvät ambulanssien sijoittamisongelmaa tavallaan stabiilimmasta näkökulmasta kuin ensimmäinen ja toinen tavoite. Vaikka ambulanssien sijoittaminen on tiiviisti sidoksissa hälytystehtävien ilmaantumiseen, joka on satunnainen ilmiö, siihen vaikuttaa myös muuttumattomampia aspekteja. Voidaan olettaa, että kolmanteen kohdefunktioon liittyvä asukastietoja koskeva aineisto on ajan suhteen stabiilimpi kuin hälytystehtäviin liittyvä aineisto. Neljänteen kohdefunktioon liittyvää aineistoa voidaan pitää vielä tätäkin vakaampana, sillä asemapaikkojen sijainteihin ei ole tulossa lähivuosina muutoksia. Ensimmäisen tavoitteen kuvaama ilmiö sitä vastoin on mitä suurimmissa määrin satunnainen luonteeltaan. Tarkastelualuekohtaiseen ambulanssitarpeeseen vaikuttaa nimittäin sattuneen hälytystehtävän sijainnin lisäksi myös sen tapahtumisajanhetki. On vasta tutkimusasteella voidaanko hälytystehtävien temporaaliseen ulottuvuuteen perustuvasta aineistosta päätellä luotettavasti mitään säännönmukaisuuksia, ja jos voidaan, missä määrin ne ovat yleistettävissä minkäkin pituiselle ajanjaksolle [42].

Yhteenvedona voidaan todeta, että optimaalisinta lienee pyrkiä toteuttamaan suhteessa erityisen hyvin ainakin yksi sekä ambulanssien sijoittamisongelman satunnaisempaa että stabiilimpaa puolta ilmentävä kohdefunktio. Toisen tavoitteen hyvään toteutumiseen kannattaa panostaa ensimmäistä tavoitetta enemmän (edellä mainittujen syiden lisäksi) senkin vuoksi, että sen taustalla olevan aineiston muodostamisessa ei olla jouduttu hyödyntämään tarkastelualuejakoa.

Toisen kohdefunktion muodosta voidaan päätellä, että se pyrkii asettelemaan mahdollisimman paljon ambulansseja niille asemille, joiden läheisyydessä on esiintynyt paljon hälytystehtäviä. Samaten kolmannen kohdefunktion muodosta voidaan päätellä, että se pyrkii jakamaan ambulanssikapasiteetin mahdollisimman monelle eri asemalle. On siis selvää, että näiden kahden kohdefunktion tavoitteet ovat ainakin asemille sijoitettavien ambulanssien lukumäärän suhteen keskenään ristiriitaiset. Sama ristiriitaisuus on olemassa myös toisen ja neljännen kohdefunktion välillä, mutta ei ollenkaan samassa määrin, koska neljännen kohdefunktion sakotus on kerroksellista. Tämän vuoksi lienee kannattavampaa priorisoida neljännen tavoitteen toteutumista verrattuna kolmannen tavoitteen toteutumiseen.

Otetaan yleiseksi tavoitteeksi tämänhetkisen ratkaisun muokkaamisen sellaiseen suuntaan, että toinen ja neljäs tavoite toteutuisivat suhteessa parhaiten. Pyritään siihen, että toisen kohdefunktion arvon parannus tapahtuu pääosin ensimmäisen ja kolmannen tavoitteen kustannuksella. Ensimmäisen ja kolmannen kohdefunktion arvoista ei silti kannata joustaa liikaa, sillä jokainen tavoite kuvaa ambulanssien optimaalisen sijoittamisen kannalta keskeistä ilmiötä, jota muiden kohdefunktioiden kautta ei voida mallintaa. Jotta WWW-NIMBUS -ohjelmiston toiminta olisi ennalta-arvattavampaa, asetetaan ensimmäisen tavoitteen huononemiselle jokin yläraja ja toiselle tavoitteelle jokin tavoitearvo. Toisaalta sekin pitää paikkansa, että kun annetaan joidenkin kohdefunktioiden arvojen muuttua vapaasti, saadaan eniten tietoa siitä, minkä kohdefunktion kustannuksella jonkin toisen kohdefunktion arvo pystytään parantamaan minkäkin verran. Sallitaan tämän vuoksi neljännen kohdefunktion arvojen muuttua vapaasti.

Neljännen tavoitteen luokittelu $I^>$ -luokkaan ei itseasiassa välttämättä johda kovinkaan huonoihin neljännen kohdefunktion arvoihin. Olettamus perustuu siihen, että muillakin tavoitteilla on samoja sivupyrkimyksiä kuin neljännellä tavoitteella. Kolmas kohdefunktio ajaa samaa tasaisen toteutumisen agenda kuin neljäs kohdefunktio. Toisaalta neljännen kohdefunktion muotoilu suosii sellaisia asemia, jotka sijaitsevat lähellä mahdollisimman montaa muuta asemaa. Usein ajan kuluessa asemapaikkoja on rakennettu sitä tiiviimmin, mitä enemmän kyseessä olevalla alueella on ollut tarvetta hälytysajo-

neuvoille. Sekä ensimmäinen että toinen kohdefunktio pyrkivät sijoittamaan eniten ambulansseja sinne, missä on ollut suurin tarve niin hälytystehtävän temporaalisen kuin spatiaalisenkin ulottuvuuden kannalta.

Sen lisäksi, että neljäs tavoite luokiteltiin $I^>$ -luokkaan, luokitellaan ensimmäinen tavoite I^{\geq} -luokkaan, toinen tavoite I^{\leq} -luokkaan ja kolmas tavoite $I^=$ -luokkaan. Asetetaan ensimmäisen kohdefunktion arvon heikentymisen ylärajaksi sellainen luku, joka sijaitsee 15% sisällä ensimmäisen kohdefunktion arvointervallin alarajasta. Otetaan tavoitteeksi saada toisen kohdefunktion arvoa parannettua niin paljon, että se sijoittuisi toisen kohdefunktion arvointervallissa parhaimman 5% sisään. Kolmannen tavoitteen toteutumista voidaan sen hälytyspotentiaalinen mallintamiskyvyn vuoksi pitää jossain määrin ensimmäisen tavoitteen toteutumista tärkeämpänä, joten halutaan pitää kolmannen kohdefunktion arvo suunnilleen samana (arvointervallinsa parhaan kymmenyksen kieppeillä).

Ennen ratkaisuprosessin siirtymistä seuraavaan vaiheeseen WWW-NIMBUS kysyy vielä, montako erilaista ratkaisuvaihtoehtoa päätöksentekijä toivoo ohjelmistojärjestelmän generoivan. Johtuen siitä, että WWW-NIMBUS -ohjelmistoon on sisällytetty neljä erilaista skalarisointifunktiota, päätöksentekijä saa valita mieluisensa vaihtoehdon yhden ja neljän väliltä. Valitaan neljä, sillä tällä tavalla saadaan mahdollisimman laaja mielikuva siitä, millaisia Pareto-optimaalisia ratkaisuja annettujen preferenssitietojen perusteella pystytään generoimaan. Päätöksentekijän tulee valita myös mitä ratkaisualgoritmia hän haluaa käyttää skalarisoitujen aliongelmiä ratkaisemiseen. Valitaan nyt alkuun Global1.

Seuraavaksi WWW-NIMBUS pyytää päätöksentekijää spesifioimaan luokkiin I^{\leq} ja I^{\geq} luokitteliinsa kohdefunktioihin liittyvät tavoitearvot/ylärajat. Lasketaan ensimmäiseen ja toiseen kohdefunktioon liittyvät tavoitearvot/ylärajat NIMBUSapuri-tiedoston avulla kaavalla

$$f_i^I + s_{f_i}(f_i^N - f_i^I), \quad (74)$$

missä s_{f_i} on tavoiteltava suhteellinen sijainti arvointervallissa (esimerkiksi 0,15).

Tulokseksi saadaan seuraavat tavoitearvot/yläraajat:

$$\begin{aligned} f_1(\mathbf{x}) & 274 \\ f_2(\mathbf{x}) & -190. \end{aligned}$$

Taulukossa 4 on esitetty kolme uutta Pareto-optimaalista ratkaisua, jotka WWW-NIMBUS generoi toisella iteraatiokierroksella. Myös nykyinen ratkaisupiste on merkitty taulukkoon 4 vertailun helpottamiseksi. Huomataan, ettei WWW-NIMBUS pystynyt generoimaan neljää uutta ratkaisuehdotusta nykyisen ratkaisupisteen lisäksi. Tämä johtuu siitä, että eri skalarisointifunktioita käyttämällä saatujen aliongelmiä ratkaisut eivät välttämättä poikkea toisistaan. Tällöin NIMBUS näyttää vain toisistaan poikkeavat ratkaisuvaihtoehdot, joita tällä kertaa oli kolme kappaletta. Sitä, että aliongelmaan ei saada generoitua neljää erilaista ratkaisuvaihtoehtoa, ei kannata pitää takapakkina vaan ennemminkin merkinä aliongelmiä robustisuudesta (vakaudesta). [35]

Taulukko 4: Global1-ratkaisijan avulla generoidut toisen iteraatiokierroksen ratkaisuvaihtoehdot.

Kohdefunktio	Nykyinen ratkaisuvaihtoehto	Ratkaisuvaihtoehto 1	Ratkaisuvaihtoehto 2	Ratkaisuvaihtoehto 3
$f_1(\mathbf{x})$	255	296	274	272
$f_2(\mathbf{x})$	-167.680	-178.414	-187.026	-187.663
$f_3(\mathbf{x})$	$1.107874 \cdot 10^{10}$	$1.393224 \cdot 10^{10}$	$1.201397 \cdot 10^{10}$	$1.163769 \cdot 10^{10}$
$f_4(\mathbf{x})$	318 783	610 934	671 421	692 165

Taulukko 5 sisältää tiedon siitä, miten hyvin taulukon 4 ratkaisuvaihtoehdot toteuttavat kunkin tavoitteen suhteessa niihin liittyvien kohdefunktioiden arvointervalleihin.

Taulukko 5: Toisen iteraatiokierroksen ratkaisuvaihtoehtojen sijoittuminen kohdefunktiokohtaisiin arvointervalleihin.

Kohdefunktio	Nykyinen ratkaisuvaihtoehto	Ratkaisuvaihtoehto 1	Ratkaisuvaihtoehto 2	Ratkaisuvaihtoehto 3
$f_1(\mathbf{x})$	0.06278	0.24664	0.14798	0.13901
$f_2(\mathbf{x})$	0.16173	0.10807	0.06502	0.06184
$f_3(\mathbf{x})$	0.10999	0.14685	0.12207	0.11721
$f_4(\mathbf{x})$	0.01692	0.04167	0.04679	0.04855

Taulukkojen 4 ja 5 perusteella huomataan, että ratkaisuvaihtoehto 1 voidaan sulkea harkinnan ulkopuolelle. Ratkaisuvaihtoehdon 1 ensimmäisen kohdefunktion arvo on nimittäin merkittävästi nykyisen ratkaisun ensimmäisen kohdefunktion arvoa huonompi. Ensimmäisen kohdefunktion arvon rajukin huononeminen voisi olla hyvä juttu, jos se johtaisi muiden kohdefunktioiden arvojen parantumiseen (tai parantaisi oleellisesti jonkin kohdefunktion arvoa). Tässä tapauksessa näin ei kuitenkaan käy, sillä sekä ratkaisuvaihtoehdon kolmannen että neljännen kohdefunktion arvot heikkenevät eikä toisen kohdefunktion arvokaan parane riittävästi verrattuna siihen, mitä toisella ja kolmannella ratkaisuvaihtoehdolla on tarjottavanaan.

Ratkaisuvaihtoehdot 2 ja 3 ovatkin huomattavasti potentiaalisempia ratkaisuja. Ratkaisuvaihtoehtoa 3 voidaan pitää näistä parempana, sillä sekä ensimmäisen, toisen että kolmannen kohdefunktion arvot ovat ratkaisuvaihtoehtoon 2 liittyviä kohdefunktioiden arvoja parempia. Ratkaisuehdotuksen 3 neljännen kohdefunktion arvo sen sijaan on huonompi kuin ratkaisuehdotukseen 2 kuuluva neljännen kohdefunktion arvo. Ero on kuitenkin hyvin pieni ottaen huomioon, että sillä muutoksella saadaan kaikkien muiden kohdefunktioiden arvoa parannettua. Ratkaisuvaihtoehdon 3 neljännen kohdefunktion arvo on toki huomattavasti huonompi kuin nykyiseen ratkaisuun liittyvä neljännen kohdefunktion arvo, mutta siitä oli tarkoituskin antaa vähän periksi. Ei voida sanoa, että neljännen kohdefunktion arvosta tulisi tässä

tapauksessa joustettua liikaa, sillä ratkaisuvaihtoehdossa 3 neljäs tavoite toteutuu suhteessa omaan arvointervalliinsa yhä paremmin kuin mikään muu tavoite.

Ratkaisuvaihtoehtoa 3 voidaan siis pitää nykyistä ratkaisupistettä mielekkäämpänä ratkaisuna. Siitä huolimatta ei valita ratkaisuvaihtoehtoa 3 vielä, vaan valitaan uudelleen nykyinen ratkaisupiste. Toimitaan näin sen vuoksi, että halutaan kartoittaa mahdollisimman laajasti tarjolla olevat vaihtoehdot. Voi nimittäin olla, että ratkaisijaa Global2 käyttämällä WWW-NIMBUS kykenee löytämään vielä taulukossa 4 esiteltyjä ratkaisuehdotuksiakin parempia Pareto-optimaalisia ratkaisuja. Pidetään kuitenkin mielessä Global1-ratkaisualgoritmin avulla löydetty ratkaisuvaihtoehto 3 ja palataan valitsemaan se, jos parempaa vaihtoehtoa ei löydy. Muistamisen helpottamiseksi korostetaan ratkaisuvaihtoehtoon 3 liittyvät taulukon 4 ja taulukon 5 solut keltaisella taustavärillä.

Taulukossa 6 on esitetty tulokset, jotka saadaan toistamalla nykyisen ratkaisupisteen luokittelu sekä ylärajojen/tavoitearvojen syöttäminen samalla tavalla kuin toisen iteraatiokierroksen aikana. Kolmas iteraatiokierros poikkeaa toisesta iteraatiokierroksesta vain siinä mielessä, että käytettäväksi ratkaisijaksi valitaan tällä kertaa Global2.

Taulukko 6: Global2-ratkaisijan avulla generoidut kolmannen iteraatiokierroksen ratkaisuvaihtoehdot.

Kohdefunktio	Nykyinen ratkaisuvaihtoehto	Ratkaisuvaihtoehto 1	Ratkaisuvaihtoehto 2	Ratkaisuvaihtoehto 3
$f_1(\mathbf{x})$	255	276	274	276
$f_2(\mathbf{x})$	-167.680	-188.929	-181.305	-183.276
$f_3(\mathbf{x})$	$1.107874 \cdot 10^{10}$	$1.223841 \cdot 10^{10}$	$1.262442 \cdot 10^{10}$	$1.173874 \cdot 10^{10}$
$f_4(\mathbf{x})$	318 783	672 973	453 435	649 914

Kirjataan taulukkoon 7 tiedot siitä, miten hyvin taulukon 6 ratkaisuvaihtoehdot toteuttavat kunkin tavoitteen suhteessa niihin liittyvien kohdefunktioiden arvointervalleihin.

Taulukko 7: Kolmannen iteraatiokierroksen ratkaisuvaihtoehtojen sijoittuminen kohdefunktiokohtaisiin arvointervalleihin.

Kohdefunktio	Nykyinen ratkaisuvaihtoehto	Ratkaisuvaihtoehto 1	Ratkaisuvaihtoehto 2	Ratkaisuvaihtoehto 3
$f_1(\mathbf{x})$	0.06278	0.15695	0.14798	0.15695
$f_2(\mathbf{x})$	0.16173	0.05551	0.09362	0.08377
$f_3(\mathbf{x})$	0.10999	0.12497	0.12995	0.11851
$f_4(\mathbf{x})$	0.01692	0.04692	0.02832	0.04497

Taulukkojen 6 ja 7 perusteella nähdään, että kaikki uudet ratkaisuehdotukset toteuttavat toisen tavoitteen paremmin kuin mitä se nykyisessä ratkaisupisteessä toteutuu. Ensimmäinen, kolmas ja neljäs tavoite sen sijaan toteutuvat kaikissa taulukon 7 ratkaisuvaihtoehtoissa huonommin kuin mitä ne tämänhetkisessä ratkaisupisteessä toteutuvat. Toisen iteraatiokierroksen ratkaisuvaihtoehto 3 tuottaa paremman toisen kohdefunktion arvon kuin ratkaisuvaihtoehdot 2 ja 3. Toisen kohdefunktion arvon parantaminen oli toisen ja kolmannen iteraatiokierroksen tärkein tavoite, joten suljetaan ratkaisuvaihtoehdot 2 ja 3 harkinnan ulkopuolelle.

Ratkaisuehdotus 1 sen sijaan onnistuu parantamaan toisen kohdefunktion arvoa toisen iteraatiokierroksen ratkaisuvaihtoehtoa 3 enemmän. Ero on kuitenkin pieni (5,5% vs. 6,1% päässä toisen kohdefunktion arvointervallin alarajasta). Lisäksi ensimmäinen ja kolmas tavoite toteutuvat ratkaisuvaihtoehdossa 1 huonommin kuin toisen iteraatiokierroksen ratkaisuehdotuksessa 3 (15,7% vs. 13,9% ja 12,5% vs. 11,7% päässä toisen kohdefunktion arvointervallin alarajasta). Neljäs tavoite sen sijaan toteutuu ratkaisuvaihtoehdossa 1 toisen iteraatiokierroksen ratkaisuvaihtoehtoa 3 paremmin (4,7% vs. 4,9% päässä toisen kohdefunktion arvointervallin alarajasta). Ratkaisuvaih-

toehtoon 1 liittyvät kohdefunktioiden arvot sijoittuvat suhteessa arvointervalliinsa siis yhteensä 0,8 prosenttiyksikön verran paremmin. Toisaalta yhtä aikaa ratkaisuvaihtoehtoon 1 liittyvät kohdefunktioiden arvot sijoittuvat kumulatiivisesti laskettuna 2,6 prosenttiyksikköä huonommin kuin mitä toisen iteraatiokierroksen 3 ratkaisuvaihtoehto.

Toisen iteraatiokierroksen ratkaisuvaihtoehtoa 3 voidaan siis pitää kaikkia taulukossa 6 esiteltyjä ratkaisuvaihtoehtoja parempana. Jotta toisen iteraatiokierroksen ratkaisuvaihtoehto 3 voidaan oikeasti valita, tulee suorittaa yksi "väli-iteraatiokierros". Käytännössä tämä tapahtuu valitsemalla alkuperäinen ratkaisuehdotus vielä kertaalleen ja suorittamalla toisen iteraatiokierroksen kanssa identtinen iteraatiokierros. Tällöin saadaan generoitua samat ratkaisuvaihtoehdot kuin toisella iteraatiokierroksella ja päästään valitsemaan haluttu ratkaisuehdotus.

Huolimatta siitä, että toinen ja kolmas iteraatiokierros tuottivat suurilta osin juuri sellaisen ratkaisuvaihtoehdon mikä oli tavoitteena, jatketaan silti vielä ratkaisuprosessia. VSSHP:n ambulanssien sijoittamisongelma koostuu neljästä periaatteesta tasavahvasta kohdefunktiosta, jonka vuoksi kannattaa ainakin tutkia onko mahdollista löytää vielä tämänhetkistä ratkaisuvaihtoehtoa tasaisemmin kaikki tavoitteet toteuttava Pareto-optimaalinen ratkaisupiste. Otetaan tavoitteeksi kaikkien tavoitteiden toteutuminen arvointervallinsa parhaimman kymmenen prosentin sisään. Käytännössä asetetaan kaikkien kohdefunktioiden kohdalla tavoitearvoksi/yläraajaksi kahdeksan prosentin päässä kunkin kohdefunktion arvointervallin alarajasta sijaitseva arvo. Valinta kohdistui juuri kahdeksaan prosenttiin lähinnä sen vuoksi, että jos nykyisen ratkaisupisteen tuottamien kohdefunktioiden arvojen suhteelliset sijainnit kohdefunktiokohtaisissa arvointervalleissa tasapainotettaisiin, keskiarvo tulisi olemaan kahdeksan ja yhdeksän prosentin välillä. Lähde-tään ratkaisemaan tasaiseen toteutumiseen tähtäävää aliongelmaa Global1-ratkaisijan avulla.

Hyödyntämällä NIMBUSapuri-tiedostoa saadaan tulokseksi seuraavat tavoitearvot/yläraajat:

$$\begin{array}{ll} f_1(\mathbf{x}) & 259 \\ f_2(\mathbf{x}) & -184 \end{array}$$

$$f_3(\mathbf{x}) \quad 8\,756\,931\,407$$

$$f_4(\mathbf{x}) \quad 1\,063\,512.$$

Taulukossa 8 on esitetty viidennen iteraatiokierrokseen liittyvät ratkaisuvaihtoehdot.

Taulukko 8: Global1-ratkaisijan avulla generoidut viidennen iteraatiokierroksen ratkaisuvaihtoehdot.

Kohdefunktio	Nykyinen ratkaisuvaihtoehto	Ratkaisuvaihtoehto 1	Ratkaisuvaihtoehto 2	Ratkaisuvaihtoehto 3
$f_1(\mathbf{x})$	272	272	266	264
$f_2(\mathbf{x})$	-187.663	-173.757	-167.33	-169.392
$f_3(\mathbf{x})$	$1.163769 \cdot 10^{10}$	$1.193168 \cdot 10^{10}$	$1.13999 \cdot 10^{10}$	$1.169977 \cdot 10^{10}$
$f_4(\mathbf{x})$	692 165	375 990	334 227	362 012

Kirjataan taulukkoon 9 tiedot siitä, miten hyvin taulukossa 8 esitellyt ratkaisuvaihtoehdot toteuttavat kunkin tavoitteen suhteessa niihin liittyvien kohdefunktioiden arvointervalleihin.

Taulukko 9: Viidennen iteraatiokierroksen ratkaisuvaihtoehtojen sijoittuminen kohdefunktiokohtaisiin arvointervalleihin.

Kohdefunktio	Nykyinen ratkaisuvaihtoehto	Ratkaisuvaihtoehto 1	Ratkaisuvaihtoehto 2	Ratkaisuvaihtoehto 3
$f_1(\mathbf{x})$	0.13901	0.13901	0.11211	0.10314
$f_2(\mathbf{x})$	0.06184	0.13135	0.16348	0.15318
$f_3(\mathbf{x})$	0.11721	0.12101	0.11414	0.11801
$f_4(\mathbf{x})$	0.04855	0.02176	0.01823	0.02058

Taulukkojen 8 ja 9 perusteella voidaan todeta, että kyseinen luokittelu ei ainakaan Global1-ratkaisijaa käyttämällä johda toivottuihin tuloksiin. Sekä ratkaisuvaihtoehto 1, 2 että 3 heikensivät radikaalisti toisen kohdefunktion toteutumistasetta (6% vs. 13-16% päässä toisen kohdefunktion arvointervalin alarajasta). Viimeistään näistä tuloksista nähdään, että tasaiseen toteutumiseen pyrkiminen johtaa tämän nimenomaisen monitavoiteoptimointiongelman tapauksessa siihen, että neljäs tavoite toteutuu ylivoimaisen hyvin verrattuna muihin tavoitteisiin. Kaikissa viidennen iteraatiokierroksen aikana generoiduista ratkaisuvaihtoehdoista ero parhaiten ja toiseksi parhaiten suhteessa kohdefunktiokohtaiseen arvointervalliin toteutuvan tavoitteen välillä kasvaa. Tällaista kehitystä ei voida pitää toivottana, sillä vaikka tavoitteena onkin löytää ratkaisupiste, joka toteuttaisi toisen ja neljännen tavoitteen ensimmäistä ja kolmatta tavoitetta paremmin, kyse on lähinnä nyanssieroista ideologialtaan tasavahvojen tavoitteiden välillä.

Valitaan siis uudelleen tämänhetkinen ratkaisupiste ja tarkistetaan vielä lopuksi mitä ratkaisuvaihtoehtoja Global2-ratkaisija pystyy tarjoamaan. Kuudenteen iteraatiokierrokseen liittyvät ratkaisuvaihtoehdot on esitelty taulukossa 10.

Taulukko 10: Global2-ratkaisijan avulla generoidut kuudennen iteraatiokierroksen ratkaisuvaihtoehdot.

Kohdefunktio	Nykyinen ratkaisuvaihtoehto	Ratkaisuvaihtoehto 1	Ratkaisuvaihtoehto 2	Ratkaisuvaihtoehto 3
$f_1(\mathbf{x})$	272	265	262	261
$f_2(\mathbf{x})$	-187.663	-179.445	-178.073	-176.86
$f_3(\mathbf{x})$	$1.163769 \cdot 10^{10}$	$1.101027 \cdot 10^{10}$	$1.111319 \cdot 10^{10}$	$1.089685 \cdot 10^{10}$
$f_4(\mathbf{x})$	692 165	687 188	341 873	370 284

Kirjataan taulukkoon 11 tiedot siitä, miten hyvin taulukossa 10 esitellyt ratkaisuvaihtoehdot toteuttavat kunkin tavoitteen suhteessa niihin liittyvien kohdefunktioiden arvointervalleihin.

Taulukko 11: Kuudennen iteraatiokierroksen ratkaisuvaihtoehtojen sijoittuminen kohdefunktiokohtaisiin arvointervalleihin.

Kohdefunktio	Nykyinen ratkaisuvaihtoehto	Ratkaisuvaihtoehto 1	Ratkaisuvaihtoehto 2	Ratkaisuvaihtoehto 3
$f_1(\mathbf{x})$	0.13901	0.10762	0.09417	0.08969
$f_2(\mathbf{x})$	0.06184	0.10292	0.10978	0.11584
$f_3(\mathbf{x})$	0.11721	0.10911	0.11043	0.10764
$f_4(\mathbf{x})$	0.04855	0.04812	0.01888	0.02128

Tälläkään kertaa ei saada näkyviin haluttua muutosta. Viidennen iteraatiokierroksen tavoin toisen kohdefunktion arvot huononevat jälleen eniten ja suurin parannus kohdistuu ensimmäisen kohdefunktion arvoihin. Merkille pantavaa on etenkin se, että neljännen kohdefunktion arvot paranevat suhteessa nykyiseen ratkaisuun sen sijaan, että kaikkien tavoitteiden toteutumistasot olisivat lähentyneet toisiaan.

Laajojen testauksien perusteella havaitaan, että ensimmäisen kohdefunktion arvon parantuminen saavutetaan toisen ja kolmannen kohdefunktion arvoista joustamalla. Tällöin neljäs tavoite toteutuu tyypillisesti erittäin hyvin muihin tavoitteisiin verrattuna. Tämä on ongelmallista sen vuoksi, että yhtenä "parhaimman kompromissin" tunnusmerkeistä voidaan pitää sitä, ettei ero tavoitteiden suhteellisessa toteutumisessa pääse kasvamaan liian suureksi. Vaikuttaa epätodennäköiseltä, että tavoitteet voitaisiin saada toteutumaan suhteessa omiin arvointervalleihinsa yhtään nykyistä ratkaisua tasaisemmin; varsinkaan sillä rajoitteella, että toisen tavoitteen toteutumistaso halutaan neljännen tavoitteen toteutumistasoisen lisäksi pitää hyvällä tasolla. Huomionarvoista on sekin, että mikäli jatketaan ensimmäisen ja kolmannen kohdefunktion arvojen parantamista, lähestytään sitä ratkaisuvaihtoehtoa, jota WWW-NIMBUS ensimmäiseksi tarjosi.

Nykyistä ratkaisupistettä voidaan pitää perustellusti tyydyttävänä, sillä kohdefunktioiden suhteellinen toteutuminen kuvastaa nyt aika hyvin niitä

olosuhteita, joista kukin ajatustasolla tasavahva kohdefunktio on VSSHP:n ambulanssien sijoittamisongelmassa alkunsa saanut. Ensimmäinen tavoite toteutuu huonoiten suhteessa omaan arvointervalliinsa. Senkin toteutumistasoa voidaan kuitenkin pitää riittävänä, sillä ensimmäinen kohdefunktio perustuu vain vuoden 2016 hälytystehtäviin. Voidaan lisäksi pitää vähintäänkin epätodennäköisenä, että vuoden ajalta kerätty hälytystehtäväaineisto olisi tarpeeksi niin satunnaiseen ilmiöön kuin ambulanssitarve liittyvien säännönmukaisuuksien havaitsemiseen. Tämän vuoksi ei voida olla kovin varmoja ambulanssitarvetta kuvaavien vakioden luotettavuudesta pidemmällä aikavälillä. Vaatimusta siitä, että ensimmäisen tavoitteen tulee toteutua täydellisesti (tai edes suhteessa kovin hyvin), ei siis voida pitää tarkoituksenmukaisena. Kovin kauaksi siitä periaatteellisesta tavoitteesta, että jokainen kohdefunktio toteutuu yhtä hyvin, ei kuitenkaan päädytty, sillä jokainen kohdefunktio toteutuu lopulliseksi ratkaisuksi valikoituneessa ratkaisupisteessä oman arvointervalinsa parhaan seitsemänneksen sisään.

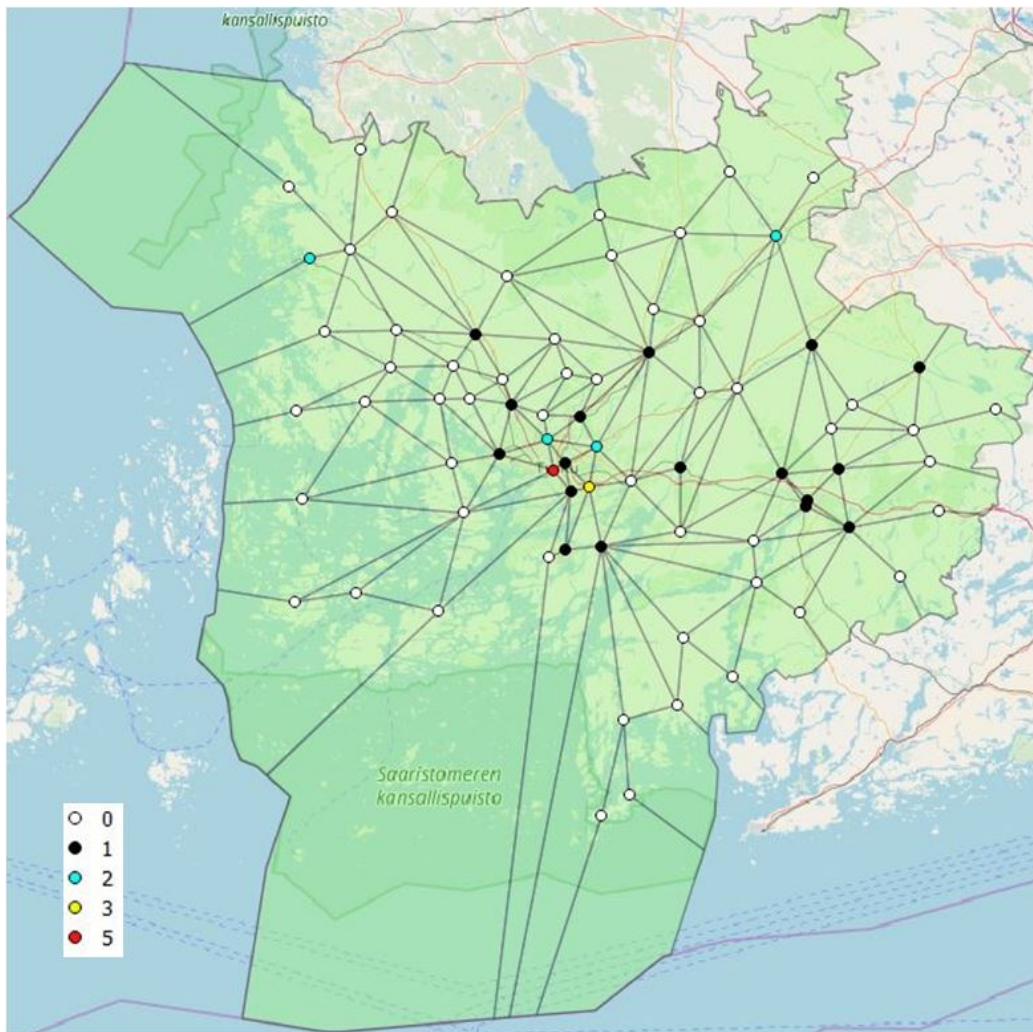
8 Tulokset ja niiden analysointia

Taulukossa 12 on esitelty WWW-NIMBUS -ohjelmiston avulla määritetty ratkaisu VSSHP:n ambulanssien optimaaliseen sijoittamiseen liittyvään monitavoiteoptimointiongelmaan. Testiongelman perusteella voimme perustellusti pitää muodostettua monitavoiteoptimointimallia hyvin tutkimuksen kohteena olevaa ilmiötä mallintavana. Lopulliseksi ratkaisuksi valikoitunutta Pareto-optimaalista ratkaisupistettä $(272, -187.663, 1.163769 \cdot 10^{10}, 692\ 165)$ vastaavat päätösmuuttujien arvot löytyvät taulukosta 12. Taulukkoon 12 on listattu kaikkien nolasta eroavien päätösmuuttujien arvot. Tulostaulukosta käy ilmi, mille asemille ambulanssit kannattaisi asetella. Asemille sijoitettavien ambulanssien lukumäärä vaihtelee yhdestä ambulanssista viiteen.

Taulukko 12: Suositus käyttöön otettavista asemista ja niille sijoitettavien ambulanssien lukumäärästä.

Asemapaikan tunnus	Aseman nimi	Ambulansseja
x3	Auran VPK	1
x6	Halikon VPK, Märynummi	1
x11	Jäkärän VPK	1
x12	Kaarinan VPK	1
x16	Keskusasema	5
x22	Kosken VPK	1
x23	Kuninkojan asema	2
x29	Lielax FBK	1
x30	Lieto	2
x31	Loimaan paloasema	2
x34	Maskun VPK	1
x38	Muurlan VPK, Muurla	1
x39	Mynämäen VPK	1
x40	Naantali	1
x46	Paimio	1
x47	Parainen	1
x51	Perttelin VPK, Kaivola	1
x56	Rantakulman VPK	1
x61	Salo	1
x62	Salon VPK	1
x64	Skanssin/Krossin asema	3
x66	Someron PVPK	1
x70	Uusikaupunki	2

Kuvasta 8 käy ilmi, miltä WWW-NIMBUS -ohjelmiston avulla määritetty, "parhaaksi kompromissiksi" mielletty, ratkaisupiste näyttää karttapohjalle sijoitettuna. Kuvan 8 vasemmasta alalaidasta löytyy tieto siitä, kuinka monen ambulanssin sijoittamista minkäkin värinen symboli vastaa. Kuvan 8 mittakaava on 1:2 950 750.



Kuva 8: Ambulanssien optimaalinen sijoittamissuunnitelma Varsinais-Suomen sairaanhoitopiirin alueella.

Karttakuvasta 8 nähdään, että määritetyssä "optimaalisessa" ratkaisupisteessä saavutetut päätösmuuttujien arvot ohjaavat sijoittamaan suurimman

osan käytettävissä olevasta ambulanssikapasiteetista Turun keskusta-alueelle ja sen lähetyville. Tulosta ei voida pitää yllättävänä, sillä keskusta-alueella on sattunut sekä määrällisesti että suhteellisesti eniten ambulansseja työllistäneitä hälytystehtäviä tarkastellun ajanjakson aikana, siellä asuu eniten ihmisiä ja siellä asemapaikkojen väliset etäisyydet ovat pieniä. Toinen isompi (mutta silti huomattavasti edellistä pienempi) ambulanssikeskittymä näyttää muodostuvan Salon lähetyville. Myös Uuteenkaupunkiin ja Loimaalle näyttää muodostuvan pieni kahden ambulanssin muodostama keskittymä.

Mainittujen ambulanssikeskittymien lisäksi ambulansseja ohjataan sijoittamaan myös muutamille yksittäisille asemille. Mynämäen, Auran ja Paimion asemille sijoitettavat yksittäiset ambulanssit voidaan nähdä klustereiden välisinä tasapainottavina toimijoina. Nämä yksittäiset ambulanssit nimittäin näyttävät sijoittuvan sellaisiin paikkoihin, missä ne katkaisevat suhteellisen tehokkaasti laajan ilman ambulansseja jäävien asemapaikkojen vyöhykkeen.

Yksi asia määritetyssä suositeltavassa VSSHP:n ambulanssien sijoittamissuunnitelmassa kuitenkin pistää silmään. Saaristoon tai sen välittömään läheisyyteen ei nimittäin mallin mukaan kannata sijoittaa Paraisille ja Lielax:iin sijoitettavien ambulanssien lisäksi enempää yksiköitä. Tulos on matemaattiselta kannalta täysin ymmärrettävä, sillä kehityksessä optimointimalissa tarkastelualueiden erityispiirteisiin ei ole kiinnitetty huomiota. Asemien välisen etäisyyden mittarina on käytetty linnuntietä mitattavaa etäisyyttä ja tuloksena saadun etäisyyden oletetaan joka paikassa "tarkoittavan" samaa asiaa.

Näin ei kuitenkaan välttämättä ole. Jos esimerkiksi eri saarilla sijaitsevien asemien välinen etäisyys on kymmenen kilometriä, tarkoittaa se aivan eri asiaa kuin sama vastaava etäisyys Kaarinan ja Piikkiön asemien välillä. Kaarinaan sijoitettavasta ambulanssista on huomattavasti enemmän apua Piikkiössä sattuvien hälytystehtävien hoidossa kuin eri saarella sijaitsevasta ambulanssista, joka ei käytännössä ikinä pysty auttamaan kymmentä lähintä naapuriasemaansa (elleivät ne sitten sijaitse samalla saarella).

Saariston aiheuttamat käytetyn mallinnustavan epärealistisuudet ovat juuri Varsinais-Suomen sairaanhoitopiirille ominainen erityispiirre. Tässä työssä oli tarkoitus luoda geneerinen ambulanssien optimaalista sijoittamis-

ta kiinteille asemapaikoille ohjaava monitavoiteoptimointimalli. Tässä mielessä ei olisi ollut tarkoituksenmukaista rakentaa mallia liialti tapauskohtaisten piirteiden varaan. Mikäli nämä erityispiirteet halutaan ottaa mukaan, se on kuitenkin melko helposti saavutettavissa. Tulosten realistisuutta voidaan VSSHP:n ambulanssien sijoittamisongelman tapauksessa parantaa lisäämällä malliin pakottavia rajoitteita, jotka vaativat esimerkiksi, että saariston asemilla on niiden suhteellisen saavutettavuuden vuoksi välttämätöntä olla ambulanssi käytettävissä.

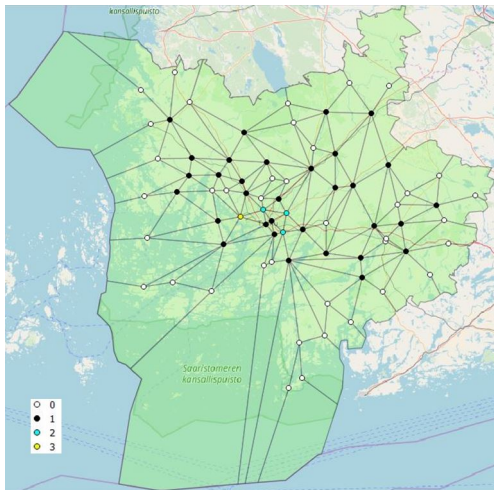
Mikäli päätöksentekijä haluaisi sisällyttää tällaisia tapauskohtaisia rajoitteita malliin, ne tulisivat käytännössä olemaan peitto-ongelmasta tuttua muotoa $\sum_{i \in H} x_i \geq 1$. Tässä symbolilla H viitataan indeksijoukkoon, joka koostuu niistä asemapaikoista, joille vaaditaan sijoitettavan ainakin yksi ambulanssi. Indeksijoukko voi tietenkin koostua myös vain yhdestä asemasta, jos halutaan vaatia, että Nauvon ainoalle asemapaikalle tulee sijoittaa ainakin yksi ambulanssi. Luonnollisesti rajoitteen voi korvata myös sellaisella versiolla, jossa epäyhtälömerkki korvataan yhtäsuuruusmerkillä. Vertailuoperaattorin vaihtaminen merkitsee käytännössä sitä, että nyt indeksijoukkoon H kuuluville asemille halutaan sijoittaa ainakin yhden ambulanssin sijasta tasan yksi ambulanssi.

Pyrkimys yleispätevän monitavoiteoptimointimallin kehittämiseen oli yksi syy saariston erityisvaatimusten sivuuttamiseen. Toinen syy on se, että edellä mainitun kaltaiset rajoitteet ovat tässä tapauksessa, kun sijoitettavia ambulansseja on yhteensä vain 33 kappaletta, melko voimakkaastikin tuloksia ohjaavia. Helposti käy myös niin, että jos esimerkiksi Nauvoon vaaditaan aseteltavan ainakin yksi ambulanssi, pitää sitä vaatia myös Kemiönsaarelle, Paraisille ja niin edelleen, jolloin lähestytään pikkuhiljaa tilannetta, että optimointiongelman ratkaisu on jo rajoitteiden avulla lähestulkoon lyöty lukkoon. Lisäksi ei ole aina lainkaan niin yksinkertaista päättää, tarvitaanko jollekin asemapaikalle/asemapaikkajoukolle välttämättä ambulanssia. Päätöksen tekemistä hankaloittaa esimerkiksi se tosiasia, että saaristossa usein operoidaan ensihoitotehtävissä ambulansseja enemmän pelastusveneillä ja helikoptereilla, jolloin ambulanssin pakkosijoittaminen Nauvoon ei välttämättä palvele kokonaiskuvaa.

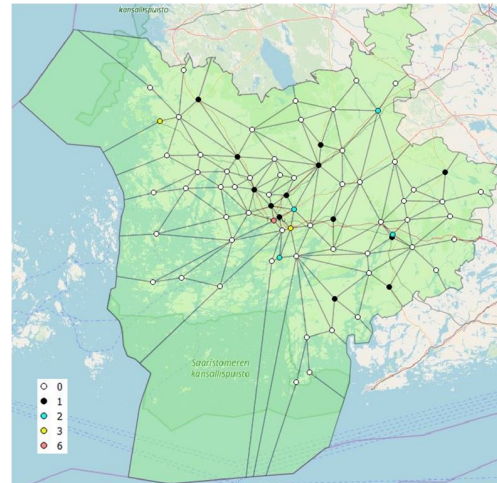
Lopuksi voidaan vielä tarkastella sitä, miten samanlainen/erilainen suositeltava sijoittamissuunnitelma on kuhunkin kohdefunktioon liittyvän yksitavoitteisen optimointiongelman optimaaliseen ratkaisupisteeseen verrattuna. Kappaleen 7.2 perusteella tiedetään, että ensimmäiseen kohdefunktioon liittyvän yksitavoitteisen optimointiongelman paras mahdollinen kohdefunktion arvo pystytään saavuttamaan yhteensä 18 toisistaan poikkeavassa päätösmuuttuja-avaruuden pisteessä. Tämä luonnollisesti hankaloittaa ensimmäisen tavoitteen optimaalisen ratkaisun visuaalista vertailua WWW-NIMBUS -ohjelmiston avulla määritettyyn monitavoiteoptimointiongelman "optimaaliseen" ratkaisuun. Huolimatta siitä, että ensimmäiseen kohdefunktioon liittyvän yksitavoitteisen optimointiongelman minimiarvo voidaan saavuttaa 18 eri ratkaisupisteessä, optimaalisiin ratkaisupisteisiin ei kuitenkaan liity niin montaa asemaa kuin äkkiseltään voisi kuvitella.

Tämän vuoksi ensimmäiseenkin kohdefunktioon liittyvän yksitavoitteisen optimointiongelman optimaalista ratkaisua pyritään hahmottelemaan yhdistämällä samaan kuvaan 9(a) kaikissa optimaalisissa ratkaisupisteissä (eri kombinaatioilla) esiintyvät asemat. Suurin osa optimaalisen ratkaisupisteen muodostavista asemista ovat jokaisessa minimin tuottavassa ratkaisupisteessä samoja, jonka vuoksi kuvasta 9(a) saadaan varmasti selville ainakin se, mille asemille ensimmäisen kohdefunktion mukaan kannattaa sijoittaa useampi kuin yksi ambulanssi. Riittävästi osviittaa saadaan myös siitä, mitkä asemat ovat ensimmäisen kohdefunktion mukaan suositeltavimpia valintoja yhden ambulanssin sijoituspaikoiksi. Täytyy kuitenkin pitää mielessä, että karttakuvassa 9(a) on muista kuvan 9 karttakuvista poiketen esitettynä sijoituspaikat yhteensä 42 ambulanssille, kun niistä voi oikeasti yhdessä optimaalisessa ratkaisussa olla käytössä vain 33 kappaletta.

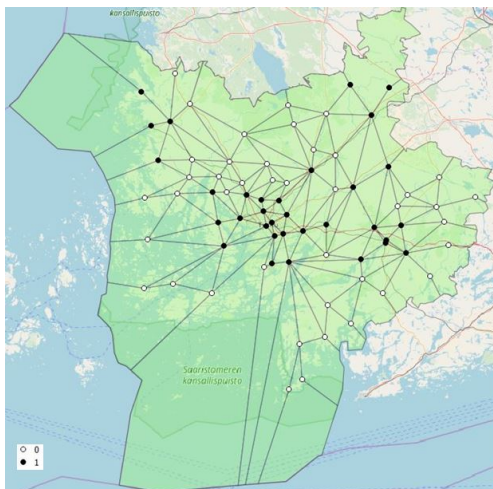
Kuvassa 9(b) on näkyvissä miltä toiseen kohdefunktioon liittyvän yksitavoitteisen optimointiongelman optimaalinen päätösmuuttuja-avaruuden ratkaisupiste karttapohjalla näyttää. Vastaavasti karttakuvasta 9(c) käy ilmi kolmanteen kohdefunktioon liittyvän yksitavoitteisen optimointitehtävän optimiratkaisu ja karttakuvasta 9(d) neljänteen kohdefunktioon liittyvän yksitavoitteisen optimointitehtävän optimiratkaisu. Kuvien 9(a)-9(d) mittakaava on 1:6 216 250.



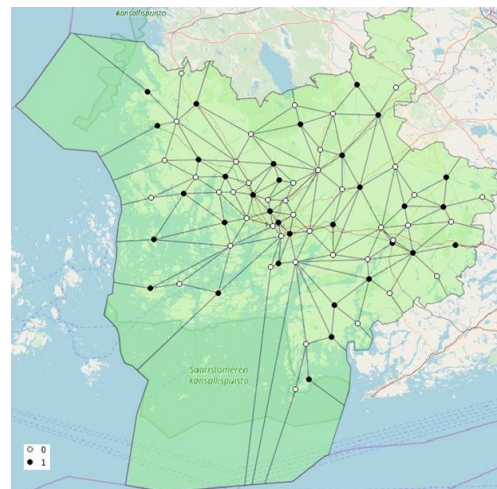
(a) Ensimmäisen tavoitteen optimaalinen ratkaisu.



(b) Toisen tavoitteen optimaalinen ratkaisu.



(c) Kolmannen tavoitteen optimaalinen ratkaisu.



(d) Neljännen tavoitteen optimaalinen ratkaisu.

Kuva 9: Jokaiseen monitavoiteoptimointiongelman kohdefunktioon liittyvän yksitavoitteisen optimointiongelman optimaalinen ratkaisupiste karttapohjalla esitettynä.

Karttakuvista 9(b) ja 9(c) käy ilmi, että niihin liittyvien yksitavoitteisten optimointiongelmien optimaalinen ratkaisu painottuu Turun, Salon, Uudenkaupungin ja Loimaan keskusta-alueiden lisäksi enemmän tutkimusalueen itäpuolelle kuin saaristossa/saariston läheisyydessä tai tutkimusalueen pohjoisosassa sijaitseville asemille. Karttakuva 9(d) ei vaikuta juurikaan mitenkään VSSHP:n ambulanssien sijoittamisongelmaan liittyvän monitavoiteoptimointiongelman ratkaisun spatiaaliseen painopisteeseen, sillä sen tavoite oli nimenomaan taata ambulanssikapasiteetin jakautuminen alueellisesti (asemien välisten etäisyyksien suhteen) mahdollisimman tasaisesti. Karttakuvassa 9(a) on sijoitettu karttakuvissa 9(b) ja 9(c) esitetyt ratkaisupisteitä enemmän ambulansseja tutkimusalueen pohjoisosassa sijaitseville asemille. Tämä saattaa kuitenkin olla hieman harhaanjohtava havainto, sillä karttakuvassa 9(a) on esitettynä yhtä aikaa kaikki ne asemat, jotka esiintyvät jossain 18 toisistaan poikkeavassa ensimmäiseen kohdefunktioon liittyvän yksitavoitteisen optimointiongelman optimaaliseen kohdefunktion arvoon johtavassa ratkaisupisteessä.

Yksi hieman vaikeammin selitettävissä oleva kuva 8 esitetyn sijoittamissuunnitelman ominaisuuksista liittyy Someron ja Kosken asemiin. Niille sijoitettavat yksiköt eivät nimittäin selity pelkästään sillä, että niiden sijainti olisi mitenkään poikkeuksellisen hyvä käyttöönotettavista ambulanssien sijoituspaikoista koostuvan verkoston tasapainottamisen kannalta. Visuaalisen tarkastelun perusteella kyseisestä verkostosta tulisi tasapainoisempi, jos ainakin toinen näiden asemien ambulansseista sijoitettaisiin saaristoon/lähelle saaristoa tai jollekin tutkimusalueen pohjoisosassa sijaitsevista asemista. Kuvan 9 perusteella voidaan kuitenkin paremmin ymmärtää syyt siihen, miksi suositellun sijoittamissuunnitelman mukaan sekä Someron että Kosken asemille tulee sijoittaa yksi ambulanssi. Ei voida nimittäin pitää kovinkaan yllättävänä, että havaittu ensimmäiseen, toiseen ja kolmanteen tavoitteeseen liittyvien optimointiongelmien optimaalinen ratkaisupiste painottuu tutkimusalueen itäpuolelle, näkyy jossain määrin myös WWW-NIMBUS -ohjelmiston avulla määritetyssä monitavoiteoptimointiongelman lopullisessa ratkaisussa.

Yleisemmällä tasolla kuvasta 9 voidaan huomata, että kuhunkin koh-

defunktioon liittyvien yksitavoitteisten optimointiongelmiä optimiratkaisut poikkeavat hyvinkin paljon toisistaan. Tämä huomio tukee käsitystä siitä, että monitavoitteinen lähestymistapa ambulanssien optimaalisen sijoittamissuunnitelman selvittämiseen oli järkevä valinta. Kuvista 9(a)-9(d) havaitaan myös, että kuvassa 8 esitetystä ambulanssien sijoittamissuunnitelmasta ei ole otettu käyttöön yhtäkään sellaista asemaa, joka ei kuuluisi johonkin kohdefunktioon liittyvän yksitavoitteisen optimointiongelman optimiratkaisuun.

Itseasiassa WWW-NIMBUS -ohjelmiston avulla määritetty lopullinen ratkaisupiste sisältää viisi sellaista asemaa $(x_{12}, x_{23}, x_{31}, x_{34}, x_{64})$, jotka otettiin käyttöön jokaisessa yksittäiseen tavoitteeseen liittyvän optimointiongelman optimiratkaisussa. Yhdeksän lopullisen ratkaisupisteen asemista $(x_3, x_{11}, x_{16}, x_{30}, x_{38}, x_{46}, x_{47}, x_{62}, x_{70})$ otettiin käyttöön kolmessa johonkin tavoitteeseen liittyvän optimointiongelman optimiratkaisussa ja samaten yhdeksän lopullisen ratkaisupisteen asemaa $(x_6, x_{22}, x_{29}, x_{39}, x_{40}, x_{51}, x_{56}, x_{61}, x_{66})$ otettiin käyttöön kahdessa johonkin tavoitteeseen liittyvän optimointiongelman optimiratkaisussa.

WWW-NIMBUS -ohjelmiston avulla määritetyn "optimaalisen" ratkaisupisteen luotettavuutta lisää sekin, että sellaisia asemia, jotka kuuluvat kolmeen johonkin tavoitteeseen liittyvän optimointiongelman optimiratkaisuun, mutta eivät sisälly lopullisessa ratkaisussa käyttöönotettavien asemien joukkoon, on vain kaksi kappaletta. Toisaalta taas jokaiseen tavoitteeseen liittyvän optimointiongelman optimiratkaisu sisältää sellaisia käyttöönotettavia asemia, joita ei oteta käyttöön WWW-NIMBUS -ohjelmiston avulla määritetyssä lopullisessa ratkaisussa. Tämä toimii hyvänä indikaattorina siitä, että yksikään kohdefunktio ei ole liian dominoivassa roolissa vaan jokainen tavoite pääsee vaikuttamaan "optimaaliseksi" ratkaisuksi valikoituvan ratkaisupisteen sisältämien päätösmuuttujien arvoihin.

Suosittelavan sijoittamisratkaisun tiedetään kappaleessa 7.3 dokumentoidun ratkaisuprosessin perusteella toteuttavan suhteessa parhaiten toisen tavoitteen. Lopullisessa ratkaisussa asemakohtaiset ambulanssimäärät eivät kuitenkaan ole aivan niin korkeita kuin mitä ne ovat parhaiten toteutuvaan toiseen tavoitteeseen liittyvän optimointiongelman optimaalisessa ratkaisupisteessä. Suurin osa käyttöönotettavista asemista saa lopullisessa ratkaisus-

sa yhden ambulanssin, ikäänkuin kompromissina kolmanteen ja neljänteen tavoitteeseen liittyvien yksitavoitteisten optimointiongelmiä optimiratkaisuista (haluaisi sijoittaa tasan yhden yksikön niin monelle asemalle kuin mahdollista) ja toiseen tavoitteeseen liittyvän yksitavoitteisen optimointiongelman optimiratkaisusta (haluaisi sijoittaa aina niin paljon ambulansseja käyttöönotettavalle asemalle kuin sinne vain mahtuu). Suositeltava ambulanssien sijoittamissuunnitelma näyttää siis asemille sijoitettavien ambulanssien lukumäärän suhteen sijoittuvan yksittäisiin tavoitteisiin liittyvien optimointiongelmiä ihanneratkaisujen väliin. Tämä selittää osaltaan sitä, miksi NIMBUS-menetelmällä määritettyä monitavoiteoptimointiongelmaa kutsutaan usein "parhaaksi kompromissiksi".

9 Jatkotutkimussuuntia

Tässä työssä esitelty geneerinen ambulanssien optimaaliseen sijoittamiseen tähtäävä malli on melko poikkeuksellinen suhteessa muihin samankaltaisten ongelmien (esimerkiksi laitosten sijoittamisongelma) ratkaisemiseen luotuihin malleihin. Yleensä optimaalista sijoittamismallia lähdetään etsimään minimoimalla kustakin sijoittamissuunnitelmasta koituvia kustannuksia ja maksimoimalla palvelutasoa (tai jotain muuta attribuuttia, joka kuvastaa suoraan, miten suuri "hyöty" saavutetaan sijoittamalla ambulanssit/laitokset tietyllä tavalla).

Yksi kehityssuunta voisikin olla se, että poistetaan tässä mallissa ehdottomat, asemapaikoille sijoitettavien ambulanssien lukumäärää koskevat rajoitteet. Käytännössä tämä tarkoittaisi sitä, että sallitaan asemapaikkojen laajentaminen. Tällöin voitaisiin lisätä malliin mukaan kustannusten minimointia mallintava kohdefunktio. Kyseinen kohdefunktio voisi sisältää jonkinmoisen sakkotermin, joka sakottaisi sellaisista ratkaisuista, jotka ylittävät asemakohtaisen maksimaalisen sijoituspaikkakapasiteetin.

Toinen kehityssuunta voisi olla se, että keskitytään parantamaan/tarkentamaan tarkastelualuekohtaista ambulanssitarvetta kuvaavia v_k -kertoimia. Ambulanssitarpeella on suhteellisen keskeinen rooli kehittämässämme monitavoiteoptimointimallissa, joten olisi ollut toivottavaa, että ambulanssitar-

peen määrittäminen olisi voitu perustaa suurempaan määrään laadukasta aineistoa. Vertaileminen varsinkin eri vuosien välillä olisi ollut tarpeen. Silloin olisi mahdollisesti pystytty paremmin tunnistamaan poikkeukset ja määrittämään luotettavammin kullekin tarkastelualueelle ominainen ambulanssitarve. Lisäksi, jos tarkastelualuekohtaiset ambulanssitarpeet olisi pystytty määrittämään useammalle vuodelle, niistä olisi voitu etsiä tarkastelualuekohtaisia trendejä.

Myös ambulanssitarpeen käsitteen määrittelemisen eri tavalla on mahdollinen kehityssuunta. Sen lisäksi, että vaaditaan tietyn määrän päällekkäisiä hälytystehtäviä kestävän minimissään w minuuttia, olisi voitu vaatia myös ilmiön esiintyvän riittävän monta kertaa vuoden aikana. Silloin keskityttäisiin vastaamaan mahdollisimman hyvin keskimääräiseen ambulanssitarpeeseen, mikä poikkeaa tämän työn monitavoiteoptimointimallin pyrkimyksestä vastata mahdollisimman hyvin pahimman mahdollisen tilanteen kysyntään. On hyvin haastellista sanoa, mikä olisi paras tapa lähteä parantelemaan ambulanssitarvetta kuvaavien kertoimien tarkkuutta. Saattaisikin olla tarpeen kartoittaa ensin, miten erilaiset edellä mainitut modifikaatiot ambulanssitarpeen määrittämisprosessissa vaikuttavat tuloksiin.

Edellä mainittujen kehityssuuntien lisäksi jatkossa voitaisiin harkita myös hälytystehtäviin liittyvien tehtäväkoodien ja prioriteettien hyödyntämistä. Ne olisi voitu suhteellisen suoraviivaisesti integroida osaksi toista kohdefunktiota. Tehtäväkoodit ja niihin liittyvät prioriteetit olisi voitu ottaa huomioon siten, että jokaisen hälytystehtävän painoarvo riippuu siihen liitetystä tehtäväkoodi-prioriteetti -yhdistelmästä. Paikkatieto-ohjelmiston käyttö nimittäin mahdollistaa kunkin tarkastelualueen sisällä tapahtuneisiin hälytystehtäviin liittyvän ominaisuustiedon analysoinnin. Paikkatieto-ohjelmistolla pystytään SQL-kyselykielen avulla muodostamaan lausekkeita, joiden avulla pystytään valitsemaan esimerkiksi kiireisimpään tehtävätyyppiin liittyvät hälytystehtävät (tai laskemaan niiden tarkastelualuekohtainen lukumäärä).

Tehtäväkoodeihin ja prioriteetteihin liittyvän aineiston hyödyntäminen tietysti edellyttää, että on olemassa jokin jaottelu, joka kertoo miten tehtäväkoodi-prioriteetti -yhdistelmät tulee pistää järjestykseen. Erilaisia hälytystehtäviin liittyviä tehtäväkoodeja on satoja ja erilaisia prioriteetti-

luokkia on olemassa neljä. Todennäköisesti jouduttaisiin siis tekemään jokin luokittelu, joka kertoisi mihin "tärkeysluokkaan" kukin tehtäväkoodiprioriteetti -yhdistelmä kuuluu. Luokkia voi olla miten monta tahansa, mutta yksinkertaisimmillaan se voisi jakaantua kolmeen seuraavasti: kiireelliset, ei-kiireelliset ja siihen väliin menevät.

Luokkarajojen määrittäminen saattaisi käytännössä osoittautua kuitenkin yllättävän hankalaksi. Prioriteetikoodit nimittäin voivat aiheuttaa päällekkäisyyttä tehtävätyyppien tärkeysjärjestykseen. Voi olla, että jokin tehtävä on periaatteessa toista tärkeämpi, mutta tilanne kääntyy siinä kohtaa, jos toisen tyyppin tehtävä on kiireisimmällä kiireellisyyskoodilla varustettu ja periaatteessa tärkeämpään luokkaan kuuluva hälytystehtävä taas on kiireellisyyskoodiltaan alhaisempaa tasoa. Luultavasti tehtäväkoodienkaan asettaminen yksikäsitteiseen tärkeysjärjestykseen ei ole mahdollista, sillä potilas ei välttämättä osaa ambulanssia tilatessaan kertoa kaikkia todellisen tilanteen kiireellisyyteen vaikuttavia asioita. Lisäksi eri sairauksia/kiputiloja voi olla erittäin vaikea pistää järjestykseen tilanteen kriittisyyden mukaan. Jos tällaista luokittelua kuitenkin yritetään joskus lisätä osaksi mallia, se tulee suorittaa sellaisen henkilön kanssa, jolla on riittävästi alaan (ensihoito, erilaiset sairaudet) liittyvää tietotaitoa.

Varsinkin VSSHP:n ambulanssien sijoittamisongelman tapauksessa yksi hyvinkin relevantti kehityssuunta voisi olla naapuriasemiksi laskettavien asemien lukumäärän muuntaminen asemakohtaiseksi vakioksi. Tämä mahdollistaisi sen, että esimerkiksi saaristossa sijaitseville asemille ei otettaisi mukaan lähiympäristövaikutuksen kartoittamiseen sellaisia asemia, joista ei käytännössä ole kyseiselle asemalle mitään apua. Tällöin joidenkin asemien naapuriasemien indeksijoukko I_i voisi olla tyhjä joukko. Naapuriasemien puuttuminen auttaisi painottamaan, että kyseisen aseman jättäminen ilman ambulanssia ei ole toivottavaa.

Saaristossa vallitsevien ensihoidon kannalta poikkeuksellisten olosuhteiden huomioon ottaminen muuttamalla parametri c asemakohtaiseksi vakioksi ei olisi kuitenkaan yhtä ehdoton kuin kappaleessa 8 esitelty tapa vaatia rajoitteiden avulla saaristoon asetettavaksi ambulansseja. Kohdefunktion muodossa ilmaistuna saariston asemat voidaan yhä jättää ilman ambulansseja,

jos ambulanssin sijoittaminen jollekin muulle asemalle parantaa kohdefunktion arvoa vielä saariston asemalle sijoittamista enemmän. Asemakohtaisesti määritettävän yksilöllisen naapuriasemiksi laskettavien lähimpien asemien lukumäärän määrittäminen on haastavaa ja vaatii syvää tuntemusta tutkimuksen kohteena olevasta ongelmakentästä.

Huomioon otettavan naapurustovaikutuksen laajuuden määräävän parametrin c lisäksi kehitettyyn monitavoiteoptimointimalliin liittyy myös toinen parametri, jonka arvolla voi olla vaikutusta mallin käyttäytymiseen. Parametri d määrää neljänteen kohdefunktioon liittyvän sakkotermin suuruuden. Voisi olla mielenkiintoista tutkia, miten parametrin d arvon vaihtaminen vaikuttaa monitavoiteoptimointiongelman ratkaisuprosessiin.

Myös tarkastelualueen rajaavien asemien lukumäärän kasvattaminen on yksi vaihtoehto (mahdollisesti) kehittää tässä työssä luotua generistä ambulanssien optimaaliseen sijoittamiseen tähtäävää monitavoiteoptimointimallia. Ei ole ollenkaan taattua, että asemien lukumäärän kasvattaminen auttaisi saamaan realistisempia tuloksia. Itse asiassa loogisesti päätellen sen pitäisi huonontaa, sillä lokaalien ilmiöiden mallinnustarkkuus kärsii tarkastelualueiden koon kasvamisesta. Voisi kuitenkin olla tarpeen tutkia vaikuttaako tarkastelualueita rajaavien asemien lukumäärän muuttaminen tuloksiin oletetulla tavalla.

Relevantimpi tarkastelualuejakoon liittyvä kehityssuunta saattaisikin olla koko menettelytavan uudistaminen. Tässä työssä hyödynnetty aluejako on tutkimusalueen reuna-alueiden osalta paikoittain hieman epälooginen. Esimerkiksi Rosalan, Hiittiksen ja Dragsfjärdin asemat ovat luultavasti suuremmilta osin vastuussa Saaristomeren pienemmillä saarilla tapahtuvien hälytystehtävien hoitamisesta kuin kauempana sisämaassa sijaitsevat Paraisten, Lielaxin ja Korppoon asemat. On myös mahdollista, ettei tässä työssä käytetty systemaattinen tapa jatkaa tarkastelualueiden rajoja tutkimusalueen äärireunoille saakka ole välttämättä aina optimaalista sellaisillekaan tutkimusalueelle, jotka eivät sisällä saaristoa. Voisi olla realistisempaa ulottaa tarkastelualueet koko tutkimusalueelle asemien ja kiintopisteiden välille asetettujen suorien janojen sijaan kaarilla tai jopa vapaalla kädellä vedetyillä viivoilla. Se mahdollistaisi ulokkeiden luomisen tarkastelualueisiin ilman, et-

tä tarkastelualueiden ääriviivat leikkaisivat toisiaan.

Mainittakoot loppuun myös, että koska työ toteutettiin yhteistyössä Varsinais-Suomen sairaanhoitopiirin ensihoitopäällikön kanssa, on todennäköistä, että ongelma tullaan myöhemmin ratkaisemaan yhteisvoimin vielä uudelleen. Kehitettyä ambulanssien optimaaliseen sijoittamiseen tähtäävää monitavoiteoptimointimallia sinänsä ei tulla enää siinä vaiheessa muuttamaan, vaan hienosäätö tulee todennäköisesti kohdistumaan naapurustovaikutuksen tarkempaan mallintamiseen (ainakin saaristossa sijaitsevien asemien kohdalla) ja itse luodun ongelman ratkaisuprosessin etenemiseen. On yleisesti tiedossa, että monitavoiteoptimointiongelmien ratkaisemisesta puhuttaessa päätöksentekijän mielipiteillä on aina suuri vaikutus määritettyyn lopputulokseen. Siksi olisikin toivottavaa, että WWW-NIMBUS -ohjelmiston tarjoamien Pareto-optimaalisten ratkaisuvaihtoehtojen priorisointiin osallistuisi nykyisen päätöksentekijän lisäksi myös ensihoitopäällikön kaltainen henkilö, jolla on vuosien kokemus ensihoidon toiminnan organisoimisesta Varsinais-Suomen sairaanhoitopiirin alueella.

Kirjallisuutta

- [1] A. Ahmadi-Javid, P. Seyedi, S. Syam: *A Survey of Healthcare Facility Location*. Computers & Operations Research 79, s. 223-263, 2017.
- [2] O. Alsalloum, G. Rand: *Extensions to Emergency Vehicle Location Models*. Working Paper 34, Lancaster University Management School, 2003.
- [3] E. Bartolini: *Lecture 9: Integer Optimization Algorithms*. Linear Programming -kurssin luentodiapaketti, Aalto-yliopisto, 2015. Luentodiat perustuvat kirjaan D. Bertsimas, J. Tsitsiklis: *Introduction to Linear Optimization*, Athena Scientific, 1997.
- [4] G. Berlin, J. Liebman: *Mathematical Analysis of Emergency Ambulance Location*. Socio-Economic Planning Sciences 8, s. 323-328, 1974.
- [5] J. Branke, K. Deb, K. Miettinen, R. Slowinski: *Multiobjective Optimization: Interactive and Evolutionary Approaches*. Springer, Berlin, 2008.
- [6] L. Brotcorne, G. Laporte, F. Semet: *Ambulance Location and Relocation Models*. European Journal of Operational Research 147, s. 451-463, 2003.
- [7] J. Cohon: *Multiobjective Programming and Planning*. Academic Press Inc, New York, 1978.
- [8] C. Coello, C. Dhaenens, L. Jourdan: *Multiobjective Combinatorial Optimization: Problematic and Context*. Advances in Multi-objective Nature Inspired Computing, s. 1-21, 2010.
- [9] A. Comber, S. Sasaki, H. Suzuki, C. Brunsdon: *A Modified Grouping Genetic Algorithm to Select Ambulance Site Locations*. International Journal of Geographical Information Science 25, s. 807-823, 2011.
- [10] J. Current, M. Daskin, D. Schilling: *Discrete Network Location Models*. Kirjassa Eds. Z. Drezner and H. Hamacher: *Facility Location: Applications and Theory*, Springer, Berlin, 2001.

- [11] M. Daskin: *Network and Discrete Location: Models, Algorithms and Applications*. John Wiley & Sons Inc, New York, 1995.
- [12] M. Ehrgott: *Multicriteria Optimization*. Springer, Berlin, 2005.
- [13] E. Erkut, A. Ingolfsson, T. Sim, G. Erdogan: *Computational Comparison of Five Maximal Covering Models for Locating Ambulances*. *Geographical Analysis* 41, s. 43-65, 2009.
- [14] R. Farahani, N. Asgari, N. Heidari, M. Hosseiniinia, M. Goh: *Covering Problems in Facility Location: A Review*. *Computers & Industrial Engineering* 62, s. 368-407, 2012.
- [15] R. Farahani, M. Hekmatfar: *Facility Location: Concepts, Models, Algorithms and Case Studies*. Springer, Berlin, 2009.
- [16] R. Farahani, M. Seifi, N. Asgari: *Multiple Criteria Facility Location Problems: A Survey*. *Applied Mathematical Modelling* 34, s. 1689-1709, 2010.
- [17] GAMS: *A GAMS Example*.
<https://www.gams.com/products/simple-example/>
 Vierailtu 04.02.2018 klo 18.46.
- [18] M. Gendreau, G. Laporte, F. Semet: *A Dynamic Model and Parallel Tabu Search Heuristic for Real-time Ambulance Relocation*. *Parallel Computing* 27, s. 1641-1653, 2001.
- [19] GAMS: *LINDO and LINDOGlobal*.
https://www.gams.com/latest/docs/S_LINDO.html
 Vierailtu 04.02.2018 klo 18.41.
- [20] J. Hakanen: *TIES592 Monitavoiteoptimointi ja teollisten prosessien hallinta*. Luentodiapaketti, Jyväskylän yliopisto ja Tampereen teknillinen yliopisto, 2010.

[21] J. Heinonen: *Ensihoito: Ambulanssien kiinteiden sijoituspaikkojen optimointitehtävän mallinnus*. Pro gradu -tutkielma, Turun Yliopisto, Matematiikan laitos, 2011.

[22] IBM Knowledge Center: *Using the LP format*.

https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/en/SSSA5P_12.6.1/ilog.odms.cplex.help/CPLEX/GettingStarted/topics/tutorials/InteractiveOptimizer/usingLPformat.html

Vierailtu 04.02.2018 klo 18.45.

[23] V. Ihamäki: *Paikkatietojärjestelmien (GIS) käyttö palo- ja pelastustoimen yhteistoiminnan suunnittelussa*. Pro gradu -tutkielma, Helsingin yliopisto, Maantieteen laitos, 1997.

[24] S. Li, Y. Yu, H. Wang, X. Huang: *Exact Algorithms for Multi-objective Integer Non-linear Programming by Cutting Solution Space*. Service Systems and Service Management -nimisen kansainvälisen konferenssin tuotoksia, 2017.

[25] R. Lima: *IBM ILOG CPLEX: What is inside of the box?* EWO-seminaarin tuotoksia, Carnegie Mellon University, 2010.

[26] L. Lovasz: *Discrete and Continuous: Two Sides of The Same?* Geometric and Functional Analysis Part I, 2000.

[27] Maakunta- ja sote-uudistus: *Toimijat uudessa sote- ja maakuntarakenteessa*.

<http://alueuudistus.fi/rakenne>

Vierailtu 04.02.2018 klo 18.35.

[28] Maanmittauslaitos: *Avoimien aineistojen tiedostopalvelu*.

<https://tiedostopalvelu.maanmittauslaitos.fi/tp/kartta>

Vierailtu 28.02.2018 klo 14.03.

- [29] K. Marsh, M. Goetghebeur, P. Thokala, R. Baltussen: *Multi-Criteria Decision Analysis to Support Healthcare Decisions*. Springer, Cham, 2017.

- [30] Math Lair: *Variables, Parameters, and Constants*.

<https://mathlair.allfunandgames.ca/variables.php>

Vierailtu 14.02.2018 klo 09.17.

- [31] Med Group Oy: *Ensihoito*.

<http://www.medgroup.fi/palvelut/ensihoito>

Vierailtu 04.02.2018 klo 18.22.

- [32] K. Miettinen: *Nonlinear Multiobjective Optimization*. Kluwer Academic Publishers, Boston, 1999.

- [33] K. Miettinen, M.M. Mäkelä: *Interactive Bundle-based Method for Non-differentiable Multiobjective Optimization: NIMBUS*. Optimization 34, s. 231-246, 1995.

- [34] K. Miettinen, M.M. Mäkelä: *On Scalarizing Functions in Multiobjective Optimization*. OR Spectrum 24, s. 193-213, 2002.

- [35] K. Miettinen, M.M. Mäkelä: *Synchronous Approach in Interactive Multiobjective Optimization*. European Journal of Operational Research 170, s. 909-922, 2006.

- [36] K. Miettinen, M.M. Mäkelä, J. Toivanen: *Numerical Comparison of Some Penalty-Based Constraint Handling Techniques in Genetic Algorithms*. Journal of Global Optimization 27, s. 427-446, 2003.

- [37] J. Mitchell: *Branch and Cut*. Kirjassa Eds. J. Cochran, L. Cox, P. Keskinocak, J. Kharoufeh, J. Smith: *Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science*, John Wiley & Sons, 2010.

- [38] M.M. Mäkelä: *Matemaattinen optimointi I*. Luentomoniste, Turun yliopisto, Matematiikan ja tilastotieteen laitos, 2012.
- [39] M.M. Mäkelä: *Matemaattinen optimointi II*. Luentomoniste, Turun yliopisto, Matematiikan ja tilastotieteen laitos, 2012.
- [40] M.M. Mäkelä: *Optimointialgoritmit*. Luentomoniste, Turun yliopisto, Matematiikan ja tilastotieteen laitos, 2016.
- [41] P. Mäkinen: *Ambulanssien tarkoituksenmukainen sijoittaminen Varsinais-Suomen sairaanhoitopiirin alueella*. LuK-tutkielma, Turun yliopisto, Matematiikan ja tilastotieteen laitos, 2015.
- [42] P. Mäkinen: *Ambulanssityhjiöiden ilmeneminen Varsinais-Suomen sairaanhoitopiirin alueella*. Raportti, Turun yliopisto, Matematiikan ja tilastotieteen laitos, 2018.
- [43] NEOS Server: *NEOS Solvers*.
<https://neos-server.org/neos/solvers/index.html>
Vierailtu 01.03.2018 klo 10.50.
- [44] Neos Guide: *Types of Optimization Problems*.
<https://neos-guide.org/optimization-tree>
Vierailtu 04.02.2018 klo 18.40.
- [45] NIMBUS-Info: *NIMBUS is a Nondifferentiable Interactive Multiobjective BUNDLE-based optimization System*.
<https://wwwnimbus.it.jyu.fi/info.html>
Vierailtu 20.01.2018 klo 11.14.
- [46] *Optimization Problem Formulation and Solution Techniques*.

https://www.brad.ac.uk/staff/vtoropov/burgeon/thesis_sameh/chap5.pdf

Vierailtu 19.01.2018 klo 19.54.

- [47] S. Owen, M. Daskin: *Strategic Facility Location: A Review*. European Journal of Operational Research 111, s. 423-447, 1998.

- [48] J. Pinter: *Global Optimization: Scientific and Engineering Case Studies*. Springer, New York, 2006.

- [49] QGIS Development Team: *QGIS User Guide: Release 2.18*.

<https://docs.qgis.org/2.18/pdf/en/QGIS-2.18-UserGuide-en.pdf>

Vierailtu 28.02.2018 klo 10.35.

- [50] D. Savic: *Single-objective vs. Multiobjective Optimisation for Integrated Decision Support*. Ensimmäisen joka toinen vuosi järjestettävän kansainvälisen Environmental Modelling and Software Society -tapahtuman tuotoksia, 2002.

- [51] Tilastokeskus: *Inspire-aineistot*.

https://www.stat.fi/tup/rajapintapalvelut/inspire_aineistot.html

Vierailtu 19.04.2018 klo 15.58.

- [52] Varsinais-Suomen sairaanhoitopiiri: *Ensihoito*.

<http://www.vsshp.fi/fi/ammattilaisille/ensihoito/Sivut/default.aspx>

Vierailtu 04.02.2018 klo 18.32.

- [53] Varsinais-Suomen sairaanhoitopiiri: *Sairaanhoitopiiri*.

<http://www.vsshp.fi/fi/sairaanhoitopiiri/Sivut/default.aspx>

Vierailtu 04.02.2018 klo 18.36.

- [54] Varsinais-Suomen sairaanhoitopiiri: *Varsinais-Suomen sairaanhoitopiirin valtuuston kokoustiedote 28.11.2017*.

<http://www.vsshp.fi/fi/sairaanhoitopiiri/media-tiedotteet-viestinta/tiedotteet/Sivut/valtuuston-kokoustiedote-28.11.2017.aspx>

Vierailtu 04.02.2018 klo 18.38.

- [55] A. Wierzbicki: *A Methodological Approach to Comparing Parametric Characterizations of Efficient Solutions*. Kirjassa Eds. G. Fandel, M. Grauer, A. Kurzhanski, A. Wierzbicki: *Large-Scale Modelling and Interactive Decision Analysis*, s. 27-45, Springer, Berlin, 1986.
- [56] A. Wierzbicki: *On the Completeness and Constructiveness of Parametric Characterizations to Vector Optimization Problems*. OR Spectrum 8, s. 73-87, 1986.
- [57] W. Wiesemann: *Integer Programming*. 2009.

<https://www.google.fi/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwifx4qyg4LaAhUnDJoKHYYTiBPUQFgg1MAA&url=http%3A%2F%2Fwww.doc.ic.ac.uk%2F~br%2Fberc%2FIPlecture1.pdf&usg=A0vVaw085G4k0Zoe17MSXu1VUt8T>

Vierailtu 23.03.2018 klo 10.30.

- [58] Wikipedia: *Wolfram Mathematica (software)*

[https://en.wikipedia.org/wiki/Wolfram_Mathematica_\(software\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Wolfram_Mathematica_(software))

Vierailtu 19.01.2018 klo 19.23.

- [59] O. Wilppu, M.M. Mäkelä, Y. Nikulin: *New Two-Slope Parametrized Achievement Scalarizing Functions for Nonlinear Multiobjective Optimization*. Kirjassa Eds. N. Daras and M. Rassias: *Operations Research, Engineering, and Cyber Security*, s. 403-422, Springer, Cham, 2017.

- [60] M. Özlen, M. Azizoglu: *Multi-objective Integer Programming: A General Approach for Generating All Non-dominated Solutions*. European Journal of Operational Research 199, s. 25-35, 2009.

A Varsinais-Suomen sairaanhoitopiirin ambulanssien sijoittamisongelma

$$\begin{aligned}
 \min \quad & 464 - 3x_1 - 6x_2 - 10x_3 - 4x_4 - 6x_5 - 8x_6 - 2x_7 - 6x_8 - 3x_9 - 4x_{10} - 5x_{11} - 5x_{12} - 7x_{13} - 6x_{14} \\
 & - 6x_{15} - 5x_{16} - 4x_{17} - 4x_{18} - 2x_{19} - 3x_{20} - 3x_{21} - 6x_{22} - 7x_{23} - 3x_{24} - 5x_{25} - 4x_{26} - 4x_{27} - 5x_{28} \\
 & - 10x_{29} - 6x_{30} - 6x_{31} - 4x_{32} - 7x_{33} - 7x_{34} - 5x_{35} - 2x_{36} - 6x_{37} - 9x_{38} - 7x_{39} - 7x_{40} - 4x_{41} \\
 & - 5x_{42} - 7x_{43} - 6x_{44} - 5x_{45} - 4x_{46} - 4x_{47} - 3x_{48} - 3x_{49} - 6x_{50} - 7x_{51} - 7x_{52} - 4x_{53} - 2x_{54} - 2x_{55} \\
 & - 6x_{56} - 6x_{57} - 2x_{58} - 5x_{59} - 7x_{60} - 4x_{61} - 4x_{62} - 6x_{63} - 6x_{64} - 2x_{65} - 4x_{66} - 2x_{67} - 5x_{68} - 5x_{69} \\
 & - 2x_{70} - 4x_{71} - 4x_{72} - 5x_{73} - 4x_{74} - 5x_{75} \\
 \min \quad & - 0.560033x_1 - 0.217888x_2 - 0.657164x_3 - 0.536407x_4 - 0.183761x_5 - 0.464652x_6 - 0.0691291x_7 \\
 & - 0.128633x_8 - 0.129508x_9 - 0.0367522x_{10} - 1.12094x_{11} - 10.1567x_{12} - 0.383273x_{13} - 0.560033x_{14} \\
 & - 0.190761x_{15} - 19.455x_{16} - 0.210012x_{17} - 0.724543x_{18} - 0.406024x_{19} - 0.457652x_{20} - 0.207387x_{21} \\
 & - 0.573159x_{22} - 8.28411x_{23} - 0.345645x_{24} - 0.34302x_{25} - 0.163635x_{26} - 1.80348x_{27} - 0.244139x_{28} \\
 & - 0.279141x_{29} - 2.34426x_{30} - 3.00143x_{31} - 0.25114x_{32} - 0.392023x_{33} - 0.834799x_{34} - 0.300143x_{35} \\
 & - 0.200387x_{36} - 0.26339x_{37} - 0.287892x_{38} - 1.15507x_{39} - 4.53539x_{40} - 0.483028x_{41} - 0.542532x_{42} \\
 & - 0.116382x_{43} - 0.399023x_{44} - 0.532031x_{45} - 2.0555x_{46} - 1.92074x_{47} - 1.16644x_{48} - 0.229263x_{49} \\
 & - 0.214388x_{50} - 0.493529x_{51} - 1.19707x_{52} - 0.651038x_{53} - 0.290517x_{54} - 0.140883x_{55} - 3.68834x_{56} \\
 & - 0.109381x_{57} - 0.0288767x_{58} - 0.396398x_{59} - 0.403399x_{60} - 2.58403x_{61} - 4.7314x_{62} - 0.513655x_{63} \\
 & - 6.57951x_{64} - 0.206512x_{65} - 2.5114x_{66} - 0.409524x_{67} - 0.554783x_{68} - 0.432275x_{69} - 2.66978x_{70} \\
 & - 0.189886x_{71} - 0.242389x_{72} - 0.413899x_{73} - 0.363146x_{74} - 0.0796297x_{75} \\
 \min \quad & \frac{15388}{\frac{1}{15388} + x_1} + \frac{5284}{\frac{1}{5284} + x_1} + \frac{3510}{\frac{1}{3510} + x_1} + \frac{11622}{\frac{1}{11622} + x_2} + \frac{4418}{\frac{1}{4418} + x_2} + \frac{2536}{\frac{1}{2536} + x_2} + \frac{1432}{\frac{1}{1432} + x_2} + \frac{746}{\frac{1}{746} + x_2} \\
 & + \frac{602}{\frac{1}{602} + x_2} + \frac{17256}{\frac{1}{17256} + x_3} + \frac{10606}{\frac{1}{10606} + x_3} + \frac{4512}{\frac{1}{4512} + x_3} + \frac{4330}{\frac{1}{4330} + x_3} + \frac{3766}{\frac{1}{3766} + x_3} + \frac{3200}{\frac{1}{3200} + x_3} + \frac{1760}{\frac{1}{1760} + x_3} \\
 & + \frac{1656}{\frac{1}{1656} + x_3} + \frac{1580}{\frac{1}{1580} + x_3} + \frac{1340}{\frac{1}{1340} + x_3} + \frac{3654}{\frac{1}{3654} + x_4} + \frac{2754}{\frac{1}{2754} + x_4} + \frac{478}{\frac{1}{478} + x_4} + \frac{224}{\frac{1}{224} + x_4} + \frac{14004}{\frac{1}{14004} + x_5} \\
 & + \frac{12198}{\frac{1}{12198} + x_5} + \frac{1528}{\frac{1}{1528} + x_5} + \frac{1498}{\frac{1}{1498} + x_5} + \frac{1482}{\frac{1}{1482} + x_5} + \frac{568}{\frac{1}{568} + x_5} + \frac{14004}{\frac{1}{14004} + x_6} + \frac{7464}{\frac{1}{7464} + x_6} + \frac{5888}{\frac{1}{5888} + x_6} \\
 & + \frac{4486}{\frac{1}{4486} + x_6} + \frac{4200}{\frac{1}{4200} + x_6} + \frac{1498}{\frac{1}{1498} + x_6} + \frac{1454}{\frac{1}{1454} + x_6} + \frac{1384}{\frac{1}{1384} + x_6} + \frac{478}{\frac{1}{478} + x_7} + \frac{224}{\frac{1}{224} + x_7} + \frac{5388}{\frac{1}{5388} + x_8} \\
 & + \frac{2088}{\frac{1}{2088} + x_8} + \frac{2038}{\frac{1}{2038} + x_8} + \frac{1870}{\frac{1}{1870} + x_8} + \frac{1168}{\frac{1}{1168} + x_8} + \frac{740}{\frac{1}{740} + x_8} + \frac{2036}{\frac{1}{2036} + x_9} + \frac{1060}{\frac{1}{1060} + x_9} + \frac{338}{\frac{1}{338} + x_9} \\
 & + \frac{2858}{\frac{1}{2858} + x_{10}} + \frac{2198}{\frac{1}{2198} + x_{10}} + \frac{1504}{\frac{1}{1504} + x_{10}} + \frac{1060}{\frac{1}{1060} + x_{10}} + \frac{10606}{\frac{1}{10606} + x_{11}} + \frac{10374}{\frac{1}{10374} + x_{11}} + \frac{5100}{\frac{1}{5100} + x_{11}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{3864}{\frac{1}{3864} + x_{11}} + \frac{1656}{\frac{1}{1656} + x_{11}} + \frac{64894}{\frac{1}{64894} + x_{12}} + \frac{49676}{\frac{1}{49676} + x_{12}} + \frac{47034}{\frac{1}{47034} + x_{12}} + \frac{38654}{\frac{1}{38654} + x_{12}} + \frac{14914}{\frac{1}{14914} + x_{12}} \\
& + \frac{13354}{\frac{1}{13354} + x_{13}} + \frac{12230}{\frac{1}{12230} + x_{13}} + \frac{6824}{\frac{1}{6824} + x_{13}} + \frac{5674}{\frac{1}{5674} + x_{13}} + \frac{4700}{\frac{1}{4700} + x_{13}} + \frac{4368}{\frac{1}{4368} + x_{13}} + \frac{1738}{\frac{1}{1738} + x_{13}} \\
& + \frac{3766}{\frac{1}{3766} + x_{14}} + \frac{3694}{\frac{1}{3694} + x_{14}} + \frac{3312}{\frac{1}{3312} + x_{14}} + \frac{2260}{\frac{1}{2260} + x_{14}} + \frac{1760}{\frac{1}{1760} + x_{14}} + \frac{1638}{\frac{1}{1638} + x_{14}} + \frac{7964}{\frac{1}{7964} + x_{15}} \\
& + \frac{2632}{\frac{1}{2632} + x_{15}} + \frac{2622}{\frac{1}{2622} + x_{15}} + \frac{1580}{\frac{1}{1580} + x_{15}} + \frac{1340}{\frac{1}{1340} + x_{15}} + \frac{238}{\frac{1}{238} + x_{15}} + \frac{73220}{\frac{1}{73220} + x_{16}} + \frac{69128}{\frac{1}{69128} + x_{16}} \\
& + \frac{49676}{\frac{1}{49676} + x_{16}} + \frac{47034}{\frac{1}{47034} + x_{16}} + \frac{30032}{\frac{1}{30032} + x_{16}} + \frac{4262}{\frac{1}{4262} + x_{17}} + \frac{3304}{\frac{1}{3304} + x_{17}} + \frac{2038}{\frac{1}{2038} + x_{17}} + \frac{1168}{\frac{1}{1168} + x_{17}} \\
& + \frac{3074}{\frac{1}{3074} + x_{18}} + \frac{2824}{\frac{1}{2824} + x_{18}} + \frac{1394}{\frac{1}{1394} + x_{18}} + \frac{1172}{\frac{1}{1172} + x_{18}} + \frac{9172}{\frac{1}{9172} + x_{19}} + \frac{2336}{\frac{1}{2336} + x_{19}} + \frac{13898}{\frac{1}{13898} + x_{20}} \\
& + \frac{6018}{\frac{1}{6018} + x_{20}} + \frac{2126}{\frac{1}{2126} + x_{20}} + \frac{2036}{\frac{1}{2036} + x_{21}} + \frac{338}{\frac{1}{338} + x_{21}} + \frac{194}{\frac{1}{194} + x_{21}} + \frac{14762}{\frac{1}{14762} + x_{22}} + \frac{10566}{\frac{1}{10566} + x_{22}} \\
& + \frac{4200}{\frac{1}{4200} + x_{22}} + \frac{2798}{\frac{1}{2798} + x_{22}} + \frac{1832}{\frac{1}{1832} + x_{22}} + \frac{1454}{\frac{1}{1454} + x_{22}} + \frac{73220}{\frac{1}{73220} + x_{23}} + \frac{49676}{\frac{1}{49676} + x_{23}} + \frac{38654}{\frac{1}{38654} + x_{23}} \\
& + \frac{16864}{\frac{1}{16864} + x_{23}} + \frac{5100}{\frac{1}{5100} + x_{23}} + \frac{3864}{\frac{1}{3864} + x_{23}} + \frac{3818}{\frac{1}{3818} + x_{23}} + \frac{2014}{\frac{1}{2014} + x_{24}} + \frac{1504}{\frac{1}{1504} + x_{24}} + \frac{810}{\frac{1}{810} + x_{24}} \\
& + \frac{1870}{\frac{1}{1870} + x_{25}} + \frac{1832}{\frac{1}{1832} + x_{25}} + \frac{1454}{\frac{1}{1454} + x_{25}} + \frac{1384}{\frac{1}{1384} + x_{25}} + \frac{740}{\frac{1}{740} + x_{25}} + \frac{10566}{\frac{1}{10566} + x_{26}} + \frac{2088}{\frac{1}{2088} + x_{26}} \\
& + \frac{1832}{\frac{1}{1832} + x_{26}} + \frac{740}{\frac{1}{740} + x_{26}} + \frac{7964}{\frac{1}{7964} + x_{27}} + \frac{6824}{\frac{1}{6824} + x_{27}} + \frac{5674}{\frac{1}{5674} + x_{27}} + \frac{2622}{\frac{1}{2622} + x_{27}} + \frac{8790}{\frac{1}{8790} + x_{28}} \\
& + \frac{4638}{\frac{1}{4638} + x_{28}} + \frac{4418}{\frac{1}{4418} + x_{28}} + \frac{3138}{\frac{1}{3138} + x_{28}} + \frac{1432}{\frac{1}{1432} + x_{28}} + \frac{15682}{\frac{1}{15682} + x_{29}} + \frac{13898}{\frac{1}{13898} + x_{29}} + \frac{11604}{\frac{1}{11604} + x_{29}} \\
& + \frac{3654}{\frac{1}{3654} + x_{29}} + \frac{3636}{\frac{1}{3636} + x_{29}} + \frac{2824}{\frac{1}{2824} + x_{29}} + \frac{2754}{\frac{1}{2754} + x_{29}} + \frac{1482}{\frac{1}{1482} + x_{29}} + \frac{1394}{\frac{1}{1394} + x_{29}} + \frac{568}{\frac{1}{568} + x_{29}} \\
& + \frac{64894}{\frac{1}{64894} + x_{30}} + \frac{38654}{\frac{1}{38654} + x_{30}} + \frac{17570}{\frac{1}{17570} + x_{30}} + \frac{17256}{\frac{1}{17256} + x_{30}} + \frac{10606}{\frac{1}{10606} + x_{30}} + \frac{3864}{\frac{1}{3864} + x_{30}} + \frac{15388}{\frac{1}{15388} + x_{31}} \\
& + \frac{14762}{\frac{1}{14762} + x_{31}} + \frac{3694}{\frac{1}{3694} + x_{31}} + \frac{3510}{\frac{1}{3510} + x_{31}} + \frac{3312}{\frac{1}{3312} + x_{31}} + \frac{2798}{\frac{1}{2798} + x_{31}} + \frac{13354}{\frac{1}{13354} + x_{32}} + \frac{2014}{\frac{1}{2014} + x_{32}} \\
& + \frac{1738}{\frac{1}{1738} + x_{32}} + \frac{894}{\frac{1}{894} + x_{32}} + \frac{11010}{\frac{1}{11010} + x_{33}} + \frac{4486}{\frac{1}{4486} + x_{33}} + \frac{4200}{\frac{1}{4200} + x_{33}} + \frac{3694}{\frac{1}{3694} + x_{33}} + \frac{2798}{\frac{1}{2798} + x_{33}} \\
& + \frac{2260}{\frac{1}{2260} + x_{33}} + \frac{1574}{\frac{1}{1574} + x_{33}} + \frac{16864}{\frac{1}{16864} + x_{34}} + \frac{8790}{\frac{1}{8790} + x_{34}} + \frac{4638}{\frac{1}{4638} + x_{34}} + \frac{3866}{\frac{1}{3866} + x_{34}} + \frac{3818}{\frac{1}{3818} + x_{34}} \\
& + \frac{3238}{\frac{1}{3238} + x_{34}} + \frac{1418}{\frac{1}{1418} + x_{34}} + \frac{11622}{\frac{1}{11622} + x_{35}} + \frac{8164}{\frac{1}{8164} + x_{35}} + \frac{2858}{\frac{1}{2858} + x_{35}} + \frac{2536}{\frac{1}{2536} + x_{35}} + \frac{2198}{\frac{1}{2198} + x_{35}} \\
& + \frac{15388}{\frac{1}{15388} + x_{36}} + \frac{14762}{\frac{1}{14762} + x_{36}} + \frac{3426}{\frac{1}{3426} + x_{37}} + \frac{3138}{\frac{1}{3138} + x_{37}} + \frac{2242}{\frac{1}{2242} + x_{37}} + \frac{1432}{\frac{1}{1432} + x_{37}} + \frac{934}{\frac{1}{934} + x_{37}} \\
& + \frac{746}{\frac{1}{746} + x_{37}} + \frac{14964}{\frac{1}{14964} + x_{38}} + \frac{12198}{\frac{1}{12198} + x_{38}} + \frac{10968}{\frac{1}{10968} + x_{38}} + \frac{9172}{\frac{1}{9172} + x_{38}} + \frac{4262}{\frac{1}{4262} + x_{38}} + \frac{3304}{\frac{1}{3304} + x_{38}} \\
& + \frac{2336}{\frac{1}{2336} + x_{38}} + \frac{1776}{\frac{1}{1776} + x_{38}} + \frac{1528}{\frac{1}{1528} + x_{38}} + \frac{6824}{\frac{1}{6824} + x_{39}} + \frac{4728}{\frac{1}{4728} + x_{39}} + \frac{4700}{\frac{1}{4700} + x_{39}} + \frac{3426}{\frac{1}{3426} + x_{39}}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{2632}{\frac{1}{2632} + x_{39}} + \frac{2622}{\frac{1}{2622} + x_{39}} + \frac{2242}{\frac{1}{2242} + x_{39}} + \frac{73220}{\frac{1}{73220} + x_{40}} + \frac{30032}{\frac{1}{30032} + x_{40}} + \frac{16864}{\frac{1}{16864} + x_{40}} + \frac{11622}{\frac{1}{11622} + x_{40}} \\
& + \frac{8790}{\frac{1}{8790} + x_{40}} + \frac{8164}{\frac{1}{8164} + x_{40}} + \frac{4418}{\frac{1}{4418} + x_{40}} + \frac{10426}{\frac{1}{10426} + x_{41}} + \frac{6018}{\frac{1}{6018} + x_{41}} + \frac{2036}{\frac{1}{2036} + x_{41}} + \frac{194}{\frac{1}{194} + x_{41}} \\
& + \frac{4728}{\frac{1}{4728} + x_{42}} + \frac{4638}{\frac{1}{4638} + x_{42}} + \frac{3426}{\frac{1}{3426} + x_{42}} + \frac{3238}{\frac{1}{3238} + x_{42}} + \frac{3138}{\frac{1}{3138} + x_{42}} + \frac{4728}{\frac{1}{4728} + x_{43}} + \frac{4330}{\frac{1}{4330} + x_{43}} \\
& + \frac{3238}{\frac{1}{3238} + x_{43}} + \frac{2632}{\frac{1}{2632} + x_{43}} + \frac{2390}{\frac{1}{2390} + x_{43}} + \frac{1418}{\frac{1}{1418} + x_{43}} + \frac{1340}{\frac{1}{1340} + x_{43}} + \frac{5284}{\frac{1}{5284} + x_{44}} + \frac{3510}{\frac{1}{3510} + x_{44}} \\
& + \frac{3312}{\frac{1}{3312} + x_{44}} + \frac{1638}{\frac{1}{1638} + x_{44}} + \frac{1562}{\frac{1}{1562} + x_{44}} + \frac{822}{\frac{1}{822} + x_{44}} + \frac{10374}{\frac{1}{10374} + x_{45}} + \frac{4330}{\frac{1}{4330} + x_{45}} + \frac{2390}{\frac{1}{2390} + x_{45}} \\
& + \frac{1656}{\frac{1}{1656} + x_{45}} + \frac{1280}{\frac{1}{1280} + x_{45}} + \frac{11010}{\frac{1}{11010} + x_{46}} + \frac{7718}{\frac{1}{7718} + x_{46}} + \frac{4268}{\frac{1}{4268} + x_{46}} + \frac{1574}{\frac{1}{1574} + x_{46}} + \frac{15628}{\frac{1}{15628} + x_{47}} \\
& + \frac{13898}{\frac{1}{13898} + x_{47}} + \frac{12930}{\frac{1}{12930} + x_{47}} + \frac{2126}{\frac{1}{2126} + x_{47}} + \frac{9172}{\frac{1}{9172} + x_{48}} + \frac{3110}{\frac{1}{3110} + x_{48}} + \frac{1776}{\frac{1}{1776} + x_{48}} + \frac{3110}{\frac{1}{3110} + x_{49}} \\
& + \frac{3074}{\frac{1}{3074} + x_{49}} + \frac{1172}{\frac{1}{1172} + x_{49}} + \frac{3110}{\frac{1}{3110} + x_{50}} + \frac{3074}{\frac{1}{3074} + x_{50}} + \frac{2824}{\frac{1}{2824} + x_{50}} + \frac{1776}{\frac{1}{1776} + x_{50}} + \frac{1528}{\frac{1}{1528} + x_{50}} \\
& + \frac{1482}{\frac{1}{1482} + x_{50}} + \frac{14964}{\frac{1}{14964} + x_{51}} + \frac{10426}{\frac{1}{10426} + x_{51}} + \frac{7464}{\frac{1}{7464} + x_{51}} + \frac{4262}{\frac{1}{4262} + x_{51}} + \frac{2038}{\frac{1}{2038} + x_{51}} + \frac{1870}{\frac{1}{1870} + x_{51}} \\
& + \frac{1384}{\frac{1}{1384} + x_{51}} + \frac{17570}{\frac{1}{17570} + x_{52}} + \frac{17256}{\frac{1}{17256} + x_{52}} + \frac{11604}{\frac{1}{11604} + x_{52}} + \frac{7718}{\frac{1}{7718} + x_{52}} + \frac{4512}{\frac{1}{4512} + x_{52}} + \frac{4268}{\frac{1}{4268} + x_{52}} \\
& + \frac{3636}{\frac{1}{3636} + x_{52}} + \frac{3200}{\frac{1}{3200} + x_{53}} + \frac{1760}{\frac{1}{1760} + x_{53}} + \frac{1638}{\frac{1}{1638} + x_{53}} + \frac{822}{\frac{1}{822} + x_{53}} + \frac{12230}{\frac{1}{12230} + x_{54}} + \frac{4368}{\frac{1}{4368} + x_{54}} \\
& + \frac{5674}{\frac{1}{5674} + x_{55}} + \frac{4368}{\frac{1}{4368} + x_{55}} + \frac{69128}{\frac{1}{69128} + x_{56}} + \frac{47034}{\frac{1}{47034} + x_{56}} + \frac{14914}{\frac{1}{14914} + x_{56}} + \frac{12930}{\frac{1}{12930} + x_{56}} + \frac{6018}{\frac{1}{6018} + x_{56}} \\
& + \frac{2126}{\frac{1}{2126} + x_{56}} + \frac{2014}{\frac{1}{2014} + x_{57}} + \frac{934}{\frac{1}{934} + x_{57}} + \frac{894}{\frac{1}{894} + x_{57}} + \frac{810}{\frac{1}{810} + x_{57}} + \frac{746}{\frac{1}{746} + x_{57}} + \frac{602}{\frac{1}{602} + x_{57}} \\
& + \frac{2754}{\frac{1}{2754} + x_{58}} + \frac{224}{\frac{1}{224} + x_{58}} + \frac{10374}{\frac{1}{10374} + x_{59}} + \frac{5100}{\frac{1}{5100} + x_{59}} + \frac{3866}{\frac{1}{3866} + x_{59}} + \frac{3818}{\frac{1}{3818} + x_{59}} + \frac{1280}{\frac{1}{1280} + x_{59}} \\
& + \frac{69128}{\frac{1}{69128} + x_{60}} + \frac{30032}{\frac{1}{30032} + x_{60}} + \frac{10426}{\frac{1}{10426} + x_{60}} + \frac{8164}{\frac{1}{8164} + x_{60}} + \frac{2198}{\frac{1}{2198} + x_{60}} + \frac{1060}{\frac{1}{1060} + x_{60}} + \frac{338}{\frac{1}{338} + x_{60}} \\
& + \frac{14964}{\frac{1}{14964} + x_{61}} + \frac{10968}{\frac{1}{10968} + x_{61}} + \frac{7464}{\frac{1}{7464} + x_{61}} + \frac{5888}{\frac{1}{5888} + x_{61}} + \frac{14004}{\frac{1}{14004} + x_{62}} + \frac{12198}{\frac{1}{12198} + x_{62}} + \frac{10968}{\frac{1}{10968} + x_{62}} \\
& + \frac{5888}{\frac{1}{5888} + x_{62}} + \frac{11010}{\frac{1}{11010} + x_{63}} + \frac{4486}{\frac{1}{4486} + x_{63}} + \frac{4268}{\frac{1}{4268} + x_{63}} + \frac{3636}{\frac{1}{3636} + x_{63}} + \frac{1498}{\frac{1}{1498} + x_{63}} + \frac{568}{\frac{1}{568} + x_{63}} \\
& + \frac{64894}{\frac{1}{64894} + x_{64}} + \frac{17570}{\frac{1}{17570} + x_{64}} + \frac{15682}{\frac{1}{15682} + x_{64}} + \frac{14914}{\frac{1}{14914} + x_{64}} + \frac{12930}{\frac{1}{12930} + x_{64}} + \frac{11604}{\frac{1}{11604} + x_{64}} + \frac{5388}{\frac{1}{5388} + x_{65}} \\
& + \frac{1168}{\frac{1}{1168} + x_{65}} + \frac{10566}{\frac{1}{10566} + x_{66}} + \frac{5388}{\frac{1}{5388} + x_{66}} + \frac{2088}{\frac{1}{2088} + x_{66}} + \frac{194}{\frac{1}{194} + x_{66}} + \frac{3304}{\frac{1}{3304} + x_{67}} + \frac{2336}{\frac{1}{2336} + x_{67}} \\
& + \frac{2858}{\frac{1}{2858} + x_{68}} + \frac{2536}{\frac{1}{2536} + x_{68}} + \frac{1504}{\frac{1}{1504} + x_{68}} + \frac{810}{\frac{1}{810} + x_{68}} + \frac{602}{\frac{1}{602} + x_{68}} + \frac{7718}{\frac{1}{7718} + x_{69}} + \frac{4512}{\frac{1}{4512} + x_{69}} \\
& + \frac{3766}{\frac{1}{3766} + x_{69}} + \frac{2260}{\frac{1}{2260} + x_{69}} + \frac{1574}{\frac{1}{1574} + x_{69}} + \frac{13354}{\frac{1}{13354} + x_{70}} + \frac{12230}{\frac{1}{12230} + x_{70}} + \frac{3866}{\frac{1}{3866} + x_{71}} + \frac{2390}{\frac{1}{2390} + x_{71}}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1418}{\frac{1}{1418} + x_{71}} + \frac{1280}{\frac{1}{1280} + x_{71}} + \frac{3654}{\frac{1}{3654} + x_{72}} + \frac{1394}{\frac{1}{1394} + x_{72}} + \frac{1172}{\frac{1}{1172} + x_{72}} + \frac{478}{\frac{1}{478} + x_{72}} + \frac{4700}{\frac{1}{4700} + x_{73}} \\
& + \frac{2242}{\frac{1}{2242} + x_{73}} + \frac{1738}{\frac{1}{1738} + x_{73}} + \frac{934}{\frac{1}{934} + x_{73}} + \frac{894}{\frac{1}{894} + x_{73}} + \frac{7964}{\frac{1}{7964} + x_{74}} + \frac{5284}{\frac{1}{5284} + x_{74}} + \frac{1562}{\frac{1}{1562} + x_{74}} \\
& + \frac{238}{\frac{1}{238} + x_{74}} + \frac{3200}{\frac{1}{3200} + x_{75}} + \frac{1580}{\frac{1}{1580} + x_{75}} + \frac{1562}{\frac{1}{1562} + x_{75}} + \frac{822}{\frac{1}{822} + x_{75}} + \frac{238}{\frac{1}{238} + x_{75}} \\
\min & \frac{1}{0.0001738(\frac{1}{100} + x_2) + 0.0000601104(\frac{1}{100} + x_{23}) + x_{28} + 0.000126191(\frac{1}{100} + x_{34})} \\
& + 0.0000777959(\frac{1}{100} + x_{35}) + 0.000144384(\frac{1}{100} + x_{37}) + 0.0000824748(\frac{1}{100} + x_{39}) \\
& + 0.0000836761(\frac{1}{100} + x_{40}) + 0.000139197(\frac{1}{100} + x_{42}) + 0.0000617449(\frac{1}{100} + x_{57}) \\
& + 0.0000702058(\frac{1}{100} + x_{59}) \\
& + \frac{1}{0.000046888(\frac{1}{100} + x_{12}) + 0.000053035(\frac{1}{100} + x_{16}) + 0.0000547399(\frac{1}{100} + x_{20})} \\
& + 0.0000474859(\frac{1}{100} + x_{23}) + 0.000045894(\frac{1}{100} + x_{28}) + 0.000102701(\frac{1}{100} + x_{35}) \\
& + 0.000077529(\frac{1}{100} + x_{40}) + 0.0000514216(\frac{1}{100} + x_{41}) + 0.0000485641(\frac{1}{100} + x_{47}) \\
& + x_{60} + 0.0000484451(\frac{1}{100} + x_{56}) \\
& + \frac{1}{0.000079153(\frac{1}{100} + x_{12}) + 0.0000920867(\frac{1}{100} + x_{16}) + 0.0000654529(\frac{1}{100} + x_2)} \\
& + 0.00010344(\frac{1}{100} + x_{23}) + 0.0000836761(\frac{1}{100} + x_{28}) + 0.000101806(\frac{1}{100} + x_{34}) \\
& + 0.000108976(\frac{1}{100} + x_{35}) + x_{40} + 0.000070272(\frac{1}{100} + x_{42}) + 0.0000882038(\frac{1}{100} + x_{59}) \\
& + 0.000077529(\frac{1}{100} + x_{60}) \\
& + \frac{1}{0.0000512573(\frac{1}{100} + x_{16}) + 0.0000812845(\frac{1}{100} + x_2) + 0.0000531476(\frac{1}{100} + x_{23})} \\
& + 0.0000777959(\frac{1}{100} + x_{28}) + 0.0000624326(\frac{1}{100} + x_{34}) + x_{35} + 0.0000540453(\frac{1}{100} + x_{37}) \\
& + 0.000108976(\frac{1}{100} + x_{40}) + 0.0000534881(\frac{1}{100} + x_{42}) + 0.0000505664(\frac{1}{100} + x_{59}) \\
& + 0.000102701(\frac{1}{100} + x_{60}) \\
& + \frac{1}{0.000044553(\frac{1}{100} + x_{19}) + 0.0000641351(\frac{1}{100} + x_{25}) + 0.0000472477(\frac{1}{100} + x_{26})} \\
& + 0.00010907(\frac{1}{100} + x_{38}) + 0.0000492296(\frac{1}{100} + x_{48}) + 0.0000826809(\frac{1}{100} + x_5) \\
& + 0.0000579789(\frac{1}{100} + x_{50}) + 0.000105963(\frac{1}{100} + x_{51}) + 0.00013298(\frac{1}{100} + x_6) \\
& + x_{62} + 0.000800117(\frac{1}{100} + x_{61}) \\
& + \frac{1}{0.00007867(\frac{1}{100} + x_{25}) + 0.0000537819(\frac{1}{100} + x_{26}) + 0.0000545214(\frac{1}{100} + x_{33})} \\
& + 0.0000617029(\frac{1}{100} + x_{38}) + 0.0000515664(\frac{1}{100} + x_{46}) + 0.0000713561(\frac{1}{100} + x_5) \\
& + 0.0000472042(\frac{1}{100} + x_{50}) + 0.0000938309(\frac{1}{100} + x_{51}) + x_6 + 0.000146714(\frac{1}{100} + x_{61}) \\
& + 0.00013298(\frac{1}{100} + x_{62}) \\
& + \frac{1}{0.0000436583(\frac{1}{100} + x_{19}) + 0.0000697189(\frac{1}{100} + x_{25}) + 0.000050177(\frac{1}{100} + x_{26})} \\
& + 0.00010551(\frac{1}{100} + x_{38}) + 0.0000464397(\frac{1}{100} + x_{48}) + 0.0000764973(\frac{1}{100} + x_5) \\
& + 0.000054209(\frac{1}{100} + x_{50}) + 0.000120132(\frac{1}{100} + x_{51}) + 0.000146714(\frac{1}{100} + x_6) \\
& + x_{61} + 0.000800117(\frac{1}{100} + x_{62})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{0.0000437879(\frac{1}{100} + x_{18}) + 0.0000487834(\frac{1}{100} + x_{19}) + 0.0000535608(\frac{1}{100} + x_{38})} \\
& + x_{48} + 0.0000564757(\frac{1}{100} + x_{49}) + 0.0000614864(\frac{1}{100} + x_5) + 0.0000991633(\frac{1}{100} + x_{50}) \\
& + 0.0000376051(\frac{1}{100} + x_6) + 0.0000464397(\frac{1}{100} + x_{61}) + 0.0000492296(\frac{1}{100} + x_{62}) \\
& + 0.0000362955(\frac{1}{100} + x_{63}) \\
& + \frac{1}{0.0000569478(\frac{1}{100} + x_{18}) + 0.0000490103(\frac{1}{100} + x_{38}) + 0.0000381155(\frac{1}{100} + x_{46})} \\
& + 0.0000991633(\frac{1}{100} + x_{48}) + 0.0000537532(\frac{1}{100} + x_{49}) + 0.000128021(\frac{1}{100} + x_5) \\
& + x_{50} + 0.0000472042(\frac{1}{100} + x_6) + 0.000054209(\frac{1}{100} + x_{61}) + 0.0000579789(\frac{1}{100} + x_{62}) \\
& + 0.000057247(\frac{1}{100} + x_{63}) \\
& + \frac{1}{0.0000441821(\frac{1}{100} + x_{18}) + 0.0000541975(\frac{1}{100} + x_{38}) + 0.0000507926(\frac{1}{100} + x_{46})} \\
& + 0.0000614864(\frac{1}{100} + x_{48}) + x_5 + 0.000128021(\frac{1}{100} + x_{50}) + 0.0000468409(\frac{1}{100} + x_{51}) \\
& + 0.0000713561(\frac{1}{100} + x_6) + 0.0000764973(\frac{1}{100} + x_{61}) + 0.0000826809(\frac{1}{100} + x_{62}) \\
& + 0.0000719054(\frac{1}{100} + x_{63}) \\
& + \frac{1}{0.0000740801(\frac{1}{100} + x_{11}) + 0.000153572(\frac{1}{100} + x_{12}) + 0.000134(\frac{1}{100} + x_{16})} \\
& + 0.0000646187(\frac{1}{100} + x_{20}) + 0.000083581(\frac{1}{100} + x_{23}) + 0.0000874926(\frac{1}{100} + x_{29}) \\
& + 0.000129927(\frac{1}{100} + x_{30}) + 0.0000784329(\frac{1}{100} + x_{47}) + 0.000124511(\frac{1}{100} + x_{52}) \\
& + x_{64} + 0.000275176(\frac{1}{100} + x_{56}) \\
& + \frac{1}{0.0000493624(\frac{1}{100} + x_{18}) + 0.0000652718(\frac{1}{100} + x_{29}) + 0.000082269(\frac{1}{100} + x_{46})} \\
& + 0.0000450861(\frac{1}{100} + x_{47}) + 0.0000719054(\frac{1}{100} + x_5) + 0.000057247(\frac{1}{100} + x_{50}) \\
& + 0.0000744327(\frac{1}{100} + x_{52}) + 0.000044954(\frac{1}{100} + x_{56}) + 0.0000449743(\frac{1}{100} + x_6) \\
& + x_{63} + 0.0000518108(\frac{1}{100} + x_{64}) \\
& + \frac{1}{0.0000547704(\frac{1}{100} + x_{12}) + 0.0000599552(\frac{1}{100} + x_{16}) + x_{20} + 0.0000445885(\frac{1}{100} + x_{23})} \\
& + 0.0000971592(\frac{1}{100} + x_{29}) + 0.0000457772(\frac{1}{100} + x_{40}) + 0.000282324(\frac{1}{100} + x_{47}) \\
& + 0.0000467119(\frac{1}{100} + x_{52}) + 0.000075428(\frac{1}{100} + x_{56}) + 0.0000547399(\frac{1}{100} + x_{60}) \\
& + 0.0000646187(\frac{1}{100} + x_{64}) \\
& + \frac{1}{0.0000605695(\frac{1}{100} + x_{12}) + 0.000065247(\frac{1}{100} + x_{16}) + 0.000282324(\frac{1}{100} + x_{20})} \\
& + 0.0000471465(\frac{1}{100} + x_{23}) + 0.000145489(\frac{1}{100} + x_{29}) + 0.0000490843(\frac{1}{100} + x_{30}) + x_{47} \\
& + 0.00005532(\frac{1}{100} + x_{52}) + 0.0000897821(\frac{1}{100} + x_{56}) + 0.0000485641(\frac{1}{100} + x_{60}) \\
& + 0.0000784329(\frac{1}{100} + x_{64}) \\
& + \frac{1}{0.0000580132(\frac{1}{100} + x_{12}) + 0.0000587121(\frac{1}{100} + x_{16}) + 0.0000971592(\frac{1}{100} + x_{20}) + x_{29}} \\
& + 0.0000532624(\frac{1}{100} + x_{30}) + 0.0000470695(\frac{1}{100} + x_{46}) + 0.000145489(\frac{1}{100} + x_{47}) \\
& + 0.0000736162(\frac{1}{100} + x_{52}) + 0.0000840034(\frac{1}{100} + x_{56}) + 0.0000652718(\frac{1}{100} + x_{63}) \\
& + 0.0000874926(\frac{1}{100} + x_{64}) \\
& + \frac{1}{0.0000644118(\frac{1}{100} + x_{11}) + 0.0000767846(\frac{1}{100} + x_{12}) + 0.0000675128(\frac{1}{100} + x_{16})} \\
& + 0.0000566705(\frac{1}{100} + x_{23}) + 0.0000736162(\frac{1}{100} + x_{29}) + 0.000109597(\frac{1}{100} + x_{30}) \\
& + 0.000101923(\frac{1}{100} + x_{46}) + x_{52} + 0.0000857871(\frac{1}{100} + x_{56}) + 0.0000744327(\frac{1}{100} + x_{63}) \\
& + 0.000124511(\frac{1}{100} + x_{64})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{0.0000879696\left(\frac{1}{100} + x_{11}\right) + 0.000401393\left(\frac{1}{100} + x_{12}\right) + x_{16} + 0.000169797\left(\frac{1}{100} + x_{23}\right) \\
& + 0.000108383\left(\frac{1}{100} + x_{30}\right) + 0.0000674039\left(\frac{1}{100} + x_{34}\right) + 0.0000920867\left(\frac{1}{100} + x_{40}\right) \\
& + 0.0000675128\left(\frac{1}{100} + x_{52}\right) + 0.0001935\left(\frac{1}{100} + x_{56}\right) + 0.0000937141\left(\frac{1}{100} + x_{59}\right) \\
& + 0.000134\left(\frac{1}{100} + x_{64}\right) \\
& + \frac{1}{0.000107376\left(\frac{1}{100} + x_{11}\right) + x_{12} + 0.000401393\left(\frac{1}{100} + x_{16}\right) + 0.000182132\left(\frac{1}{100} + x_{23}\right) \\
& + 0.00014822\left(\frac{1}{100} + x_{30}\right) + 0.0000665617\left(\frac{1}{100} + x_{34}\right) + 0.000079153\left(\frac{1}{100} + x_{40}\right) \\
& + 0.0000767846\left(\frac{1}{100} + x_{52}\right) + 0.000181096\left(\frac{1}{100} + x_{56}\right) + 0.000100167\left(\frac{1}{100} + x_{59}\right) \\
& + 0.000153572\left(\frac{1}{100} + x_{64}\right) \\
& + \frac{1}{0.0000696442\left(\frac{1}{100} + x_{11}\right) + 0.000181096\left(\frac{1}{100} + x_{12}\right) + 0.0001935\left(\frac{1}{100} + x_{16}\right) \\
& + 0.000075428\left(\frac{1}{100} + x_{20}\right) + 0.0000929727\left(\frac{1}{100} + x_{23}\right) + 0.0000840034\left(\frac{1}{100} + x_{29}\right) \\
& + 0.000102539\left(\frac{1}{100} + x_{30}\right) + 0.0000897821\left(\frac{1}{100} + x_{47}\right) + 0.0000857871\left(\frac{1}{100} + x_{52}\right) \\
& + x_{56} + 0.000275176\left(\frac{1}{100} + x_{64}\right) \\
& + \frac{1}{0.0000502238\left(\frac{1}{100} + x_{17}\right) + 0.0000741322\left(\frac{1}{100} + x_{19}\right) + 0.0000520841\left(\frac{1}{100} + x_{25}\right) \\
& + x_{38} + 0.0000535608\left(\frac{1}{100} + x_{48}\right) + 0.0000541975\left(\frac{1}{100} + x_5\right) + 0.0000879697\left(\frac{1}{100} + x_{51}\right) \\
& + 0.0000617029\left(\frac{1}{100} + x_6\right) + 0.00010551\left(\frac{1}{100} + x_{61}\right) + 0.00010907\left(\frac{1}{100} + x_{62}\right) \\
& + 0.0000571548\left(\frac{1}{100} + x_{67}\right) \\
& + \frac{1}{0.0000737398\left(\frac{1}{100} + x_{14}\right) + 0.0000434456\left(\frac{1}{100} + x_{22}\right) + 0.000081707\left(\frac{1}{100} + x_3\right) \\
& + 0.0000452787\left(\frac{1}{100} + x_{30}\right) + 0.00014045\left(\frac{1}{100} + x_{33}\right) + 0.0000510419\left(\frac{1}{100} + x_{45}\right) \\
& + 0.0000690914\left(\frac{1}{100} + x_{46}\right) + 0.0000473199\left(\frac{1}{100} + x_{52}\right) + 0.0000553425\left(\frac{1}{100} + x_{53}\right) \\
& + x_{69} + 0.0000455844\left(\frac{1}{100} + x_6\right) \\
& + \frac{1}{0.0000468856\left(\frac{1}{100} + x_{11}\right) + 0.0000470695\left(\frac{1}{100} + x_{29}\right) + 0.0000608968\left(\frac{1}{100} + x_{30}\right) \\
& + 0.000054565\left(\frac{1}{100} + x_{33}\right) + x_{46} + 0.0000507926\left(\frac{1}{100} + x_5\right) + 0.000101923\left(\frac{1}{100} + x_{52}\right) \\
& + 0.0000515664\left(\frac{1}{100} + x_6\right) + 0.000082269\left(\frac{1}{100} + x_{63}\right) + 0.0000561467\left(\frac{1}{100} + x_{64}\right) \\
& + 0.0000690914\left(\frac{1}{100} + x_{69}\right) \\
& + \frac{1}{0.0000686374\left(\frac{1}{100} + x_{14}\right) + 0.0000612727\left(\frac{1}{100} + x_{22}\right) + 0.0000516215\left(\frac{1}{100} + x_{25}\right) \\
& + 0.000045597\left(\frac{1}{100} + x_{26}\right) + 0.0000557873\left(\frac{1}{100} + x_3\right) + x_{33} + 0.000054565\left(\frac{1}{100} + x_{46}\right) \\
& + 0.0000408099\left(\frac{1}{100} + x_{51}\right) + 0.0000460781\left(\frac{1}{100} + x_{53}\right) + 0.0000545214\left(\frac{1}{100} + x_6\right) \\
& + 0.00014045\left(\frac{1}{100} + x_{69}\right) \\
& + \frac{1}{0.000119201\left(\frac{1}{100} + x_{11}\right) + 0.0000592941\left(\frac{1}{100} + x_{12}\right) + 0.0000769299\left(\frac{1}{100} + x_{23}\right) \\
& + 0.0000623791\left(\frac{1}{100} + x_3\right) + 0.0000670696\left(\frac{1}{100} + x_{30}\right) + 0.0000833111\left(\frac{1}{100} + x_{34}\right) \\
& + 0.000082067\left(\frac{1}{100} + x_{42}\right) + 0.000144985\left(\frac{1}{100} + x_{43}\right) + 0.00017525\left(\frac{1}{100} + x_{45}\right) \\
& + x_{71} + 0.000111822\left(\frac{1}{100} + x_{59}\right) \\
& + \frac{1}{0.000151784\left(\frac{1}{100} + x_{11}\right) + 0.00014822\left(\frac{1}{100} + x_{12}\right) + 0.000108383\left(\frac{1}{100} + x_{16}\right) \\
& + 0.000106331\left(\frac{1}{100} + x_{23}\right) + x_{30} + 0.0000776294\left(\frac{1}{100} + x_{45}\right) + 0.000109597\left(\frac{1}{100} + x_{52}\right) \\
& + 0.000102539\left(\frac{1}{100} + x_{56}\right) + 0.0000849437\left(\frac{1}{100} + x_{59}\right) + 0.000129927\left(\frac{1}{100} + x_{64}\right) \\
& + 0.0000670696\left(\frac{1}{100} + x_{71}\right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{0.000131178(\frac{1}{100} + x_{11}) + 0.000182132(\frac{1}{100} + x_{12}) + 0.000169797(\frac{1}{100} + x_{16})} \\
& + x_{23} + 0.000106331(\frac{1}{100} + x_{30}) + 0.000104448(\frac{1}{100} + x_{34}) + 0.00010344(\frac{1}{100} + x_{40}) \\
& + 0.0000929727(\frac{1}{100} + x_{56}) + 0.000209042(\frac{1}{100} + x_{59}) + 0.000083581(\frac{1}{100} + x_{64}) \\
& + 0.0000769299(\frac{1}{100} + x_{71}) \\
& + \frac{1}{0.0000795285(\frac{1}{100} + x_2) + 0.000070538(\frac{1}{100} + x_{23}) + 0.000139197(\frac{1}{100} + x_{28})} \\
& + 0.000201883(\frac{1}{100} + x_{34}) + 0.000102402(\frac{1}{100} + x_{37}) + 0.0000999164(\frac{1}{100} + x_{39}) \\
& + 0.000070272(\frac{1}{100} + x_{40}) + x_{42} + 0.0000807164(\frac{1}{100} + x_{43}) + 0.0000984386(\frac{1}{100} + x_{59}) \\
& + 0.000082067(\frac{1}{100} + x_{71}) \\
& + \frac{1}{0.0000756601(\frac{1}{100} + x_{11}) + 0.0000734072(\frac{1}{100} + x_2) + 0.000104448(\frac{1}{100} + x_{23})} \\
& + 0.000126191(\frac{1}{100} + x_{28}) + x_{34} + 0.000075716(\frac{1}{100} + x_{37}) + 0.000101806(\frac{1}{100} + x_{40}) \\
& + 0.000201883(\frac{1}{100} + x_{42}) + 0.0000678204(\frac{1}{100} + x_{43}) + 0.000156912(\frac{1}{100} + x_{59}) \\
& + 0.0000833111(\frac{1}{100} + x_{71}) \\
& + \frac{1}{0.000143419(\frac{1}{100} + x_{11}) + 0.000100167(\frac{1}{100} + x_{12}) + 0.0000937141(\frac{1}{100} + x_{16})} \\
& + 0.000209042(\frac{1}{100} + x_{23}) + 0.0000849437(\frac{1}{100} + x_{30}) + 0.000156912(\frac{1}{100} + x_{34}) \\
& + 0.0000882038(\frac{1}{100} + x_{40}) + 0.0000984386(\frac{1}{100} + x_{42}) + 0.0000820651(\frac{1}{100} + x_{45}) \\
& + x_{59} + 0.000111822(\frac{1}{100} + x_{71}) \\
& + \frac{1}{0.000107376(\frac{1}{100} + x_{12}) + x_{11} + 0.0000879696(\frac{1}{100} + x_{16}) + 0.000131178(\frac{1}{100} + x_{23})} \\
& + 0.000151784(\frac{1}{100} + x_{30}) + 0.0000756601(\frac{1}{100} + x_{34}) + 0.000129159(\frac{1}{100} + x_{45}) \\
& + 0.0000696442(\frac{1}{100} + x_{56}) + 0.000143419(\frac{1}{100} + x_{59}) + 0.0000740801(\frac{1}{100} + x_{64}) \\
& + 0.000119201(\frac{1}{100} + x_{71}) \\
& + \frac{1}{0.000129159(\frac{1}{100} + x_{11}) + 0.0000587055(\frac{1}{100} + x_{12}) + 0.0000674338(\frac{1}{100} + x_{23})} \\
& + 0.0000900597(\frac{1}{100} + x_3) + 0.0000776294(\frac{1}{100} + x_{30}) + 0.0000592895(\frac{1}{100} + x_{34}) \\
& + 0.0000918869(\frac{1}{100} + x_{43}) + x_{45} + 0.0000586199(\frac{1}{100} + x_{53}) + 0.0000820651(\frac{1}{100} + x_{59}) \\
& + 0.00017525(\frac{1}{100} + x_{71}) \\
& + \frac{1}{0.0000767201(\frac{1}{100} + x_{18}) + 0.0000297177(\frac{1}{100} + x_{29}) + 0.0000943513(\frac{1}{100} + x_4)} \\
& + 0.0000339405(\frac{1}{100} + x_{48}) + 0.000082777(\frac{1}{100} + x_{49}) + 0.0000290027(\frac{1}{100} + x_5) \\
& + 0.0000356964(\frac{1}{100} + x_{50}) + 0.000038853(\frac{1}{100} + x_{58}) + 0.0000300826(\frac{1}{100} + x_{63}) \\
& + x_{72} + 0.0000510352(\frac{1}{100} + x_7) \\
& + \frac{1}{0.000026558(\frac{1}{100} + x_{18}) + 0.0000198306(\frac{1}{100} + x_{20}) + 0.0000193547(\frac{1}{100} + x_{29})} \\
& + 0.000053038(\frac{1}{100} + x_4) + 0.0000199155(\frac{1}{100} + x_{41}) + 0.0000194679(\frac{1}{100} + x_{47}) \\
& + 0.0000271808(\frac{1}{100} + x_{49}) + 0.0000186055(\frac{1}{100} + x_{50}) + x_{58} + 0.000151392(\frac{1}{100} + x_7) \\
& + 0.000038853(\frac{1}{100} + x_{72}) \\
& + \frac{1}{0.0000312524(\frac{1}{100} + x_{18}) + 0.0000208596(\frac{1}{100} + x_{20}) + 0.0000208466(\frac{1}{100} + x_{29})} \\
& + 0.0000694052(\frac{1}{100} + x_4) + 0.0000206368(\frac{1}{100} + x_{47}) + 0.0000208467(\frac{1}{100} + x_{48}) \\
& + 0.0000330064(\frac{1}{100} + x_{49}) + 0.0000210218(\frac{1}{100} + x_{50}) + 0.000151392(\frac{1}{100} + x_{58}) \\
& + x_7 + 0.0000510352(\frac{1}{100} + x_{72})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{0.0000335827(\frac{1}{100} + x_{20}) + x_{18} + 0.0000428044(\frac{1}{100} + x_{29}) + 0.0000512226(\frac{1}{100} + x_4) \\
& + 0.0000358108(\frac{1}{100} + x_{47}) + 0.0000437879(\frac{1}{100} + x_{48}) + 0.0000819316(\frac{1}{100} + x_{49}) \\
& + 0.0000441821(\frac{1}{100} + x_5) + 0.0000569478(\frac{1}{100} + x_{50}) + 0.0000493624(\frac{1}{100} + x_{63}) \\
& + 0.0000767201(\frac{1}{100} + x_{72}) \\
& + \frac{1}{0.0000819316(\frac{1}{100} + x_{18}) + 0.0000282172(\frac{1}{100} + x_{29}) + 0.0000442968(\frac{1}{100} + x_4) \\
& + 0.0000564757(\frac{1}{100} + x_{48}) + x_{49} + 0.0000383081(\frac{1}{100} + x_5) + 0.0000537532(\frac{1}{100} + x_{50}) \\
& + 0.0000282702(\frac{1}{100} + x_{62}) + 0.0000338381(\frac{1}{100} + x_{63}) + 0.0000330064(\frac{1}{100} + x_7) \\
& + 0.000082777(\frac{1}{100} + x_{72}) \\
& + \frac{1}{0.0000512226(\frac{1}{100} + x_{18}) + 0.0000292402(\frac{1}{100} + x_{20}) + 0.0000297803(\frac{1}{100} + x_{29}) \\
& + x_4 + 0.0000290755(\frac{1}{100} + x_{47}) + 0.0000442968(\frac{1}{100} + x_{49}) + 0.0000272835(\frac{1}{100} + x_{50}) \\
& + 0.000053038(\frac{1}{100} + x_{58}) + 0.0000265033(\frac{1}{100} + x_{63}) + 0.0000694052(\frac{1}{100} + x_7) \\
& + 0.0000943513(\frac{1}{100} + x_{72}) \\
& + \frac{1}{0.0000568026(\frac{1}{100} + x_{13}) + 0.0000650908(\frac{1}{100} + x_2) + 0.0000529504(\frac{1}{100} + x_{28}) \\
& + 0.0000736433(\frac{1}{100} + x_{32}) + 0.0000793338(\frac{1}{100} + x_{37}) + 0.0000671256(\frac{1}{100} + x_{39}) \\
& + 0.0000451562(\frac{1}{100} + x_{42}) + 0.00014337(\frac{1}{100} + x_{57}) + 0.0000682116(\frac{1}{100} + x_{68}) \\
& + x_{73} + 0.0000471249(\frac{1}{100} + x_{70}) \\
& + \frac{1}{0.0000529029(\frac{1}{100} + x_{13}) + 0.0000273747(\frac{1}{100} + x_{15}) + 0.00007528(\frac{1}{100} + x_{27}) \\
& + 0.0000285091(\frac{1}{100} + x_{32}) + 0.0000225704(\frac{1}{100} + x_{37}) + 0.0000244257(\frac{1}{100} + x_{39}) \\
& + 0.0000664369(\frac{1}{100} + x_{54}) + x_{55} + 0.000024171(\frac{1}{100} + x_{57}) + 0.0000441861(\frac{1}{100} + x_{70}) \\
& + 0.000028757(\frac{1}{100} + x_{73}) \\
& + \frac{1}{0.0000610516(\frac{1}{100} + x_{13}) + 0.0000225866(\frac{1}{100} + x_{15}) + 0.0000236408(\frac{1}{100} + x_{24}) \\
& + 0.0000506209(\frac{1}{100} + x_{27}) + 0.0000355275(\frac{1}{100} + x_{32}) + x_{54} + 0.0000664369(\frac{1}{100} + x_{55}) \\
& + 0.0000257177(\frac{1}{100} + x_{57}) + 0.0000232733(\frac{1}{100} + x_{68}) + 0.0000713295(\frac{1}{100} + x_{70}) \\
& + 0.0000296589(\frac{1}{100} + x_{73}) \\
& + \frac{1}{0.0000597561(\frac{1}{100} + x_{10}) + 0.0000310465(\frac{1}{100} + x_{13}) + 0.0000365938(\frac{1}{100} + x_2) \\
& + x_{24} + 0.0000630165(\frac{1}{100} + x_{32}) + 0.0000321801(\frac{1}{100} + x_{35}) + 0.0000322592(\frac{1}{100} + x_{37}) \\
& + 0.000050701(\frac{1}{100} + x_{57}) + 0.0000750936(\frac{1}{100} + x_{68}) + 0.0000345841(\frac{1}{100} + x_{70}) \\
& + 0.0000410548(\frac{1}{100} + x_{73}) \\
& + \frac{1}{0.0000965868(\frac{1}{100} + x_{13}) + 0.000040216(\frac{1}{100} + x_{15}) + x_{27} + 0.0000387976(\frac{1}{100} + x_{32}) \\
& + 0.0000322132(\frac{1}{100} + x_{37}) + 0.0000360203(\frac{1}{100} + x_{39}) + 0.0000506209(\frac{1}{100} + x_{54}) \\
& + 0.00007528(\frac{1}{100} + x_{55}) + 0.0000344247(\frac{1}{100} + x_{57}) + 0.0000568438(\frac{1}{100} + x_{70}) \\
& + 0.0000450675(\frac{1}{100} + x_{73}) \\
& + \frac{1}{0.000128271(\frac{1}{100} + x_{13}) + 0.0000345841(\frac{1}{100} + x_{24}) + 0.0000568438(\frac{1}{100} + x_{27}) \\
& + 0.0000706728(\frac{1}{100} + x_{32}) + 0.0000296363(\frac{1}{100} + x_{37}) + 0.0000713295(\frac{1}{100} + x_{54}) \\
& + 0.0000441861(\frac{1}{100} + x_{55}) + 0.0000392728(\frac{1}{100} + x_{57}) + 0.0000344918(\frac{1}{100} + x_{68}) \\
& + x_{70} + 0.0000471249(\frac{1}{100} + x_{73})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{0.0000965868(\frac{1}{100} + x_{27}) + x_{13} + 0.0000611614(\frac{1}{100} + x_{32}) + 0.0000341506(\frac{1}{100} + x_{37})} \\
& + 0.0000351295(\frac{1}{100} + x_{39}) + 0.0000610516(\frac{1}{100} + x_{54}) + 0.0000529029(\frac{1}{100} + x_{55}) \\
& + 0.0000426726(\frac{1}{100} + x_{57}) + 0.000034603(\frac{1}{100} + x_{68}) + 0.000128271(\frac{1}{100} + x_{70}) \\
& + 0.0000568026(\frac{1}{100} + x_{73}) \\
& + \frac{1}{0.0001738(\frac{1}{100} + x_{28}) + x_2 + 0.0000734072(\frac{1}{100} + x_{34}) + 0.0000812845(\frac{1}{100} + x_{35})} \\
& + 0.000145218(\frac{1}{100} + x_{37}) + 0.0000712219(\frac{1}{100} + x_{39}) + 0.0000654529(\frac{1}{100} + x_{40}) \\
& + 0.0000795285(\frac{1}{100} + x_{42}) + 0.0000894991(\frac{1}{100} + x_{57}) + 0.0000712059(\frac{1}{100} + x_{68}) \\
& + 0.0000650908(\frac{1}{100} + x_{73}) \\
& + \frac{1}{0.000080891(\frac{1}{100} + x_{15}) + 0.0000712219(\frac{1}{100} + x_2) + 0.0000824748(\frac{1}{100} + x_{28})} \\
& + 0.0000672029(\frac{1}{100} + x_{34}) + 0.00013798(\frac{1}{100} + x_{37}) + x_{39} + 0.0000999164(\frac{1}{100} + x_{42}) \\
& + 0.0000662703(\frac{1}{100} + x_{43}) + 0.0000581196(\frac{1}{100} + x_{57}) + 0.0000528681(\frac{1}{100} + x_{71}) \\
& + 0.0000671256(\frac{1}{100} + x_{73}) \\
& + \frac{1}{0.0000454481(\frac{1}{100} + x_{10}) + 0.0000712059(\frac{1}{100} + x_2) + 0.0000750936(\frac{1}{100} + x_{24})} \\
& + 0.0000505122(\frac{1}{100} + x_{28}) + 0.0000655226(\frac{1}{100} + x_{32}) + 0.000050013(\frac{1}{100} + x_{35}) \\
& + 0.0000557369(\frac{1}{100} + x_{37}) + 0.0000410558(\frac{1}{100} + x_{39}) + 0.000123947(\frac{1}{100} + x_{57}) \\
& + x_{68} + 0.0000682116(\frac{1}{100} + x_{73}) \\
& + \frac{1}{0.0000611614(\frac{1}{100} + x_{13}) + 0.0000396711(\frac{1}{100} + x_2) + 0.0000630165(\frac{1}{100} + x_{24})} \\
& + 0.0000387976(\frac{1}{100} + x_{27}) + x_{32} + 0.0000398064(\frac{1}{100} + x_{37}) + 0.0000355275(\frac{1}{100} + x_{54}) \\
& + 0.0000711236(\frac{1}{100} + x_{57}) + 0.0000655226(\frac{1}{100} + x_{68}) + 0.0000706728(\frac{1}{100} + x_{70}) \\
& + 0.0000736433(\frac{1}{100} + x_{73}) \\
& + \frac{1}{0.000145218(\frac{1}{100} + x_2) + 0.000144384(\frac{1}{100} + x_{28}) + 0.000075716(\frac{1}{100} + x_{34})} \\
& + 0.0000540453(\frac{1}{100} + x_{35}) + x_{37} + 0.00013798(\frac{1}{100} + x_{39}) + 0.0000529751(\frac{1}{100} + x_{40}) \\
& + 0.000102402(\frac{1}{100} + x_{42}) + 0.0000840344(\frac{1}{100} + x_{57}) + 0.0000557369(\frac{1}{100} + x_{68}) \\
& + 0.0000793338(\frac{1}{100} + x_{73}) \\
& + \frac{1}{0.0000894991(\frac{1}{100} + x_2) + 0.000050701(\frac{1}{100} + x_{24}) + 0.0000617449(\frac{1}{100} + x_{28})} \\
& + 0.0000711236(\frac{1}{100} + x_{32}) + 0.0000463429(\frac{1}{100} + x_{35}) + 0.0000840344(\frac{1}{100} + x_{37}) \\
& + 0.0000581196(\frac{1}{100} + x_{39}) + 0.0000466354(\frac{1}{100} + x_{42}) + x_{57} + 0.000123947(\frac{1}{100} + x_{68}) \\
& + 0.00014337(\frac{1}{100} + x_{73}) \\
& + \frac{1}{0.0000366411(\frac{1}{100} + x_1) + 0.0000482735(\frac{1}{100} + x_{14}) + 0.000050352(\frac{1}{100} + x_{15})} \\
& + 0.0000509605(\frac{1}{100} + x_3) + 0.0000526768(\frac{1}{100} + x_{43}) + 0.0000733108(\frac{1}{100} + x_{44}) \\
& + 0.0000426516(\frac{1}{100} + x_{45}) + 0.0000773918(\frac{1}{100} + x_{53}) + 0.000042031(\frac{1}{100} + x_{71}) \\
& + x_{75} + 0.000129634(\frac{1}{100} + x_{74}) \\
& + \frac{1}{0.0000639802(\frac{1}{100} + x_1) + 0.0000291192(\frac{1}{100} + x_{14}) + 0.000032075(\frac{1}{100} + x_{22})} \\
& + 0.0000771218(\frac{1}{100} + x_{31}) + 0.000023797(\frac{1}{100} + x_{33}) + x_{36} + 0.0000369757(\frac{1}{100} + x_{44}) \\
& + 0.0000258506(\frac{1}{100} + x_{53}) + 0.000024473(\frac{1}{100} + x_{66}) + 0.0000246341(\frac{1}{100} + x_{74}) \\
& + 0.0000246003(\frac{1}{100} + x_{75})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{0.0000678299(\frac{1}{100} + x_1) + 0.0000465647(\frac{1}{100} + x_{14}) + 0.0000467067(\frac{1}{100} + x_{22})} \\
& + 0.0000309949(\frac{1}{100} + x_3) + x_{31} + 0.000033851(\frac{1}{100} + x_{33}) + 0.0000771218(\frac{1}{100} + x_{36}) \\
& + 0.0000557327(\frac{1}{100} + x_{44}) + 0.0000375561(\frac{1}{100} + x_{53}) + 0.0000304961(\frac{1}{100} + x_{69}) \\
& + 0.0000321003(\frac{1}{100} + x_{75}) \\
& + \frac{1}{0.0000349833(\frac{1}{100} + x_{14}) + x_1 + 0.0000279501(\frac{1}{100} + x_{22}) + 0.0000269494(\frac{1}{100} + x_3)} \\
& + 0.0000678299(\frac{1}{100} + x_{31}) + 0.0000245745(\frac{1}{100} + x_{33}) + 0.0000639802(\frac{1}{100} + x_{36}) \\
& + 0.0000673775(\frac{1}{100} + x_{44}) + 0.0000340264(\frac{1}{100} + x_{53}) + 0.0000388856(\frac{1}{100} + x_{74}) \\
& + 0.0000366411(\frac{1}{100} + x_{75}) \\
& + \frac{1}{0.0000462489(\frac{1}{100} + x_{22}) + x_{14} + 0.0000902755(\frac{1}{100} + x_3) + 0.0000465647(\frac{1}{100} + x_{31})} \\
& + 0.0000686374(\frac{1}{100} + x_{33}) + 0.0000592418(\frac{1}{100} + x_{44}) + 0.0000451263(\frac{1}{100} + x_{45}) \\
& + 0.000113395(\frac{1}{100} + x_{53}) + 0.0000737398(\frac{1}{100} + x_{69}) + 0.0000373021(\frac{1}{100} + x_{71}) \\
& + 0.0000482735(\frac{1}{100} + x_{75}) \\
& + \frac{1}{0.0000417833(\frac{1}{100} + x_{28}) + x_{15} + 0.0000416268(\frac{1}{100} + x_{34}) + 0.0000510598(\frac{1}{100} + x_{37})} \\
& + 0.000080891(\frac{1}{100} + x_{39}) + 0.0000517125(\frac{1}{100} + x_{42}) + 0.0000674132(\frac{1}{100} + x_{43}) \\
& + 0.0000465047(\frac{1}{100} + x_{71}) + 0.0000430972(\frac{1}{100} + x_{73}) + 0.0000479777(\frac{1}{100} + x_{74}) \\
& + 0.000050352(\frac{1}{100} + x_{75}) \\
& + \frac{1}{0.0000560869(\frac{1}{100} + x_{11}) + 0.0000902755(\frac{1}{100} + x_{14}) + x_3 + 0.0000486603(\frac{1}{100} + x_{30})} \\
& + 0.0000557873(\frac{1}{100} + x_{33}) + 0.0000557492(\frac{1}{100} + x_{43}) + 0.0000900597(\frac{1}{100} + x_{45}) \\
& + 0.000121534(\frac{1}{100} + x_{53}) + 0.000081707(\frac{1}{100} + x_{69}) + 0.0000623791(\frac{1}{100} + x_{71}) \\
& + 0.0000509605(\frac{1}{100} + x_{75}) \\
& + \frac{1}{0.0000654322(\frac{1}{100} + x_{11}) + 0.0000674132(\frac{1}{100} + x_{15}) + 0.0000557492(\frac{1}{100} + x_3)} \\
& + 0.0000678204(\frac{1}{100} + x_{34}) + 0.0000662703(\frac{1}{100} + x_{39}) + 0.0000807164(\frac{1}{100} + x_{42}) \\
& + x_{43} + 0.0000918869(\frac{1}{100} + x_{45}) + 0.0000694619(\frac{1}{100} + x_{59}) + 0.000144985(\frac{1}{100} + x_{71}) \\
& + 0.0000526768(\frac{1}{100} + x_{75}) \\
& + \frac{1}{0.0000673775(\frac{1}{100} + x_1) + 0.0000592418(\frac{1}{100} + x_{14}) + 0.0000432942(\frac{1}{100} + x_3)} \\
& + 0.0000557327(\frac{1}{100} + x_{31}) + 0.0000369757(\frac{1}{100} + x_{36}) + 0.0000324325(\frac{1}{100} + x_{43}) \\
& + x_{44} + 0.0000666463(\frac{1}{100} + x_{53}) + 0.000033023(\frac{1}{100} + x_{69}) + 0.0000650369(\frac{1}{100} + x_{74}) \\
& + 0.0000733108(\frac{1}{100} + x_{75}) \\
& + \frac{1}{0.000113395(\frac{1}{100} + x_{14}) + 0.000121534(\frac{1}{100} + x_3) + 0.0000460781(\frac{1}{100} + x_{33})} \\
& + 0.0000512653(\frac{1}{100} + x_{43}) + 0.0000666463(\frac{1}{100} + x_{44}) + 0.0000586199(\frac{1}{100} + x_{45}) \\
& + x_{53} + 0.0000553425(\frac{1}{100} + x_{69}) + 0.0000488889(\frac{1}{100} + x_{71}) + 0.0000494521(\frac{1}{100} + x_{74}) \\
& + 0.0000773918(\frac{1}{100} + x_{75}) \\
& + \frac{1}{0.0000388856(\frac{1}{100} + x_1) + 0.0000367705(\frac{1}{100} + x_{14}) + 0.0000479777(\frac{1}{100} + x_{15})} \\
& + 0.0000366284(\frac{1}{100} + x_3) + 0.0000403985(\frac{1}{100} + x_{43}) + 0.0000650369(\frac{1}{100} + x_{44}) \\
& + 0.0000325211(\frac{1}{100} + x_{45}) + 0.0000494521(\frac{1}{100} + x_{53}) + 0.0000328877(\frac{1}{100} + x_{71}) \\
& + x_{74} + 0.000129634(\frac{1}{100} + x_{75})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{0.000150171(\frac{1}{100} + x_{17}) + 0.000063926(\frac{1}{100} + x_{25}) + 0.0000786917(\frac{1}{100} + x_{26})} \\
& + 0.0000448043(\frac{1}{100} + x_{38}) + 0.0000620955(\frac{1}{100} + x_{51}) + 0.000041375(\frac{1}{100} + x_{61}) \\
& + 0.0000397909(\frac{1}{100} + x_{62}) + 0.0000626494(\frac{1}{100} + x_{65}) + 0.0000849839(\frac{1}{100} + x_{66}) \\
& + x_8 + 0.0000623879(\frac{1}{100} + x_{67}) \\
& + \frac{1}{0.0000445003(\frac{1}{100} + x_{17}) + x_{19} + 0.0000741322(\frac{1}{100} + x_{38}) + 0.0000487834(\frac{1}{100} + x_{48})} \\
& + 0.0000345494(\frac{1}{100} + x_5) + 0.0000363292(\frac{1}{100} + x_{50}) + 0.0000424562(\frac{1}{100} + x_{51}) \\
& + 0.0000436583(\frac{1}{100} + x_{61}) + 0.000044553(\frac{1}{100} + x_{62}) + 0.0000693727(\frac{1}{100} + x_{67}) \\
& + 0.000035918(\frac{1}{100} + x_8) \\
& + \frac{1}{0.0000462489(\frac{1}{100} + x_{14}) + x_{22} + 0.0000615421(\frac{1}{100} + x_{25}) + 0.0000731042(\frac{1}{100} + x_{26})} \\
& + 0.0000467067(\frac{1}{100} + x_{31}) + 0.0000612727(\frac{1}{100} + x_{33}) + 0.0000415446(\frac{1}{100} + x_{51}) \\
& + 0.0000398406(\frac{1}{100} + x_6) + 0.0000476871(\frac{1}{100} + x_{66}) + 0.0000434456(\frac{1}{100} + x_{69}) \\
& + 0.0000396151(\frac{1}{100} + x_8) \\
& + \frac{1}{0.0000575084(\frac{1}{100} + x_{17}) + 0.000127678(\frac{1}{100} + x_{25}) + 0.0000803856(\frac{1}{100} + x_{26})} \\
& + 0.0000879697(\frac{1}{100} + x_{38}) + 0.0000468409(\frac{1}{100} + x_5) + x_{51} + 0.0000938309(\frac{1}{100} + x_6) \\
& + 0.000120132(\frac{1}{100} + x_{61}) + 0.000105963(\frac{1}{100} + x_{62}) + 0.0000483082(\frac{1}{100} + x_{67}) \\
& + 0.0000620955(\frac{1}{100} + x_8) \\
& + \frac{1}{0.000105014(\frac{1}{100} + x_{17}) + 0.0000693727(\frac{1}{100} + x_{19}) + 0.0000388468(\frac{1}{100} + x_{25})} \\
& + 0.0000383924(\frac{1}{100} + x_{26}) + 0.0000571548(\frac{1}{100} + x_{38}) + 0.0000483082(\frac{1}{100} + x_{51}) \\
& + 0.0000398278(\frac{1}{100} + x_{61}) + 0.0000393904(\frac{1}{100} + x_{62}) + 0.0000454329(\frac{1}{100} + x_{65}) \\
& + x_{67} + 0.0000623879(\frac{1}{100} + x_8) \\
& + \frac{1}{0.0000628492(\frac{1}{100} + x_{17}) + 0.0000274554(\frac{1}{100} + x_{19}) + 0.0000270828(\frac{1}{100} + x_{22})} \\
& + 0.0000319391(\frac{1}{100} + x_{25}) + 0.0000367136(\frac{1}{100} + x_{26}) + 0.0000279166(\frac{1}{100} + x_{38}) \\
& + 0.0000313824(\frac{1}{100} + x_{51}) + x_{65} + 0.0000612902(\frac{1}{100} + x_{66}) + 0.0000454329(\frac{1}{100} + x_{67}) \\
& + 0.0000626494(\frac{1}{100} + x_8) \\
& + \frac{1}{0.0000508075(\frac{1}{100} + x_{17}) + 0.0000615421(\frac{1}{100} + x_{22}) + x_{25} + 0.000169371(\frac{1}{100} + x_{26})} \\
& + 0.0000516215(\frac{1}{100} + x_{33}) + 0.0000520841(\frac{1}{100} + x_{38}) + 0.000127678(\frac{1}{100} + x_{51}) \\
& + 0.00007867(\frac{1}{100} + x_6) + 0.0000697189(\frac{1}{100} + x_{61}) + 0.0000641351(\frac{1}{100} + x_{62}) \\
& + 0.000063926(\frac{1}{100} + x_8) \\
& + \frac{1}{0.0000547377(\frac{1}{100} + x_{17}) + 0.0000731042(\frac{1}{100} + x_{22}) + 0.000169371(\frac{1}{100} + x_{25})} \\
& + x_{26} + 0.000045597(\frac{1}{100} + x_{33}) + 0.0000803856(\frac{1}{100} + x_{51}) + 0.0000537819(\frac{1}{100} + x_6) \\
& + 0.000050177(\frac{1}{100} + x_{61}) + 0.0000472477(\frac{1}{100} + x_{62}) + 0.0000684745(\frac{1}{100} + x_{66}) \\
& + 0.0000786917(\frac{1}{100} + x_8) \\
& + \frac{1}{0.0000563134(\frac{1}{100} + x_{17}) + 0.0000476871(\frac{1}{100} + x_{22}) + 0.0000494222(\frac{1}{100} + x_{25})} \\
& + 0.0000684745(\frac{1}{100} + x_{26}) + 0.0000407561(\frac{1}{100} + x_{51}) + 0.0000304393(\frac{1}{100} + x_6) \\
& + 0.0000304654(\frac{1}{100} + x_{61}) + 0.0000612902(\frac{1}{100} + x_{65}) + x_{66} + 0.0000366845(\frac{1}{100} + x_{67}) \\
& + 0.0000849839(\frac{1}{100} + x_8)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{0.0000445003(\frac{1}{100} + x_{19}) + x_{17} + 0.0000508075(\frac{1}{100} + x_{25}) + 0.0000547377(\frac{1}{100} + x_{26})} \\
& + 0.0000502238(\frac{1}{100} + x_{38}) + 0.0000575084(\frac{1}{100} + x_{51}) + 0.0000410673(\frac{1}{100} + x_{61}) \\
& + 0.0000628492(\frac{1}{100} + x_{65}) + 0.0000563134(\frac{1}{100} + x_{66}) + 0.000105014(\frac{1}{100} + x_{67}) \\
& + 0.000150171(\frac{1}{100} + x_8) \\
& + \frac{1}{0.0000508006(\frac{1}{100} + x_{10}) + 0.000021103(\frac{1}{100} + x_2) + 0.000084497(\frac{1}{100} + x_{21})} \\
& + 0.0000275354(\frac{1}{100} + x_{24}) + 0.0000251013(\frac{1}{100} + x_{35}) + 0.0000208487(\frac{1}{100} + x_{40}) \\
& + 0.000036363(\frac{1}{100} + x_{41}) + 0.0000207396(\frac{1}{100} + x_{57}) + 0.0000273673(\frac{1}{100} + x_{60}) \\
& + x_9 + 0.0000247488(\frac{1}{100} + x_{68}) \\
& + \frac{1}{0.0000297578(\frac{1}{100} + x_{10}) + 0.0000424885(\frac{1}{100} + x_{20}) + 0.0000618281(\frac{1}{100} + x_{21})} \\
& + 0.0000297202(\frac{1}{100} + x_{29}) + 0.0000353031(\frac{1}{100} + x_{35}) + 0.0000311941(\frac{1}{100} + x_{40}) \\
& + x_{41} + 0.0000369308(\frac{1}{100} + x_{47}) + 0.000029345(\frac{1}{100} + x_{56}) + 0.0000514216(\frac{1}{100} + x_{60}) \\
& + 0.000036363(\frac{1}{100} + x_9) \\
& + \frac{1}{0.0000310787(\frac{1}{100} + x_2) + x_{10} + 0.0000488974(\frac{1}{100} + x_{21}) + 0.0000597561(\frac{1}{100} + x_{24})} \\
& + 0.0000313693(\frac{1}{100} + x_{32}) + 0.0000344023(\frac{1}{100} + x_{35}) + 0.0000297578(\frac{1}{100} + x_{41}) \\
& + 0.0000332603(\frac{1}{100} + x_{57}) + 0.0000323714(\frac{1}{100} + x_{60}) + 0.0000454481(\frac{1}{100} + x_{68}) \\
& + 0.0000508006(\frac{1}{100} + x_9) \\
& + \frac{1}{0.0000488974(\frac{1}{100} + x_{10}) + 0.0000250216(\frac{1}{100} + x_2) + 0.0000266845(\frac{1}{100} + x_{20})} \\
& + x_{21} + 0.0000275704(\frac{1}{100} + x_{24}) + 0.0000327568(\frac{1}{100} + x_{35}) + 0.0000264594(\frac{1}{100} + x_{40}) \\
& + 0.0000618281(\frac{1}{100} + x_{41}) + 0.000039041(\frac{1}{100} + x_{60}) + 0.0000275847(\frac{1}{100} + x_{68}) \\
& + 0.000084497(\frac{1}{100} + x_9)
\end{aligned}$$

s.t. $x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 + x_9 + x_{10} + x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} + x_{15} + x_{16} + x_{17} + x_{18}$
 $+ x_{19} + x_{20} + x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{24} + x_{25} + x_{26} + x_{27} + x_{28} + x_{29} + x_{30} + x_{31} + x_{32} + x_{33} + x_{34}$
 $+ x_{35} + x_{36} + x_{37} + x_{38} + x_{39} + x_{40} + x_{41} + x_{42} + x_{43} + x_{44} + x_{45} + x_{46} + x_{47} + x_{48} + x_{49} + x_{50}$
 $+ x_{51} + x_{52} + x_{53} + x_{54} + x_{55} + x_{56} + x_{57} + x_{58} + x_{59} + x_{60} + x_{61} + x_{62} + x_{63} + x_{64} + x_{65} + x_{66}$
 $+ x_{67} + x_{68} + x_{69} + x_{70} + x_{71} + x_{72} + x_{73} + x_{74} + x_{75} \leq 34$

$$\begin{array}{llll}
x_3 + x_{15} + x_{75} \leq 4 & x_{23} + x_{34} + x_{40} \leq 6 & x_{11} + x_{23} + x_{40} \leq 6 & x_3 + x_{11} + x_{30} \leq 5 \\
x_{11} + x_{23} + x_{59} \leq 3 & x_{23} + x_{34} + x_{59} \leq 3 & x_{11} + x_{45} + x_{59} \leq 4 & x_{34} + x_{59} + x_{71} \leq 3 \\
x_3 + x_{11} + x_{45} \leq 3 & x_{45} + x_{59} + x_{71} \leq 2 & x_{34} + x_{42} + x_{43} \leq 3 & x_{34} + x_{43} + x_{71} \leq 3 \\
x_{43} + x_{45} + x_{71} \leq 2 & x_{39} + x_{42} + x_{43} \leq 4 & x_3 + x_{43} + x_{45} \leq 2 & x_3 + x_{15} + x_{43} \leq 3 \\
x_{15} + x_{39} + x_{43} \leq 5 & x_{13} + x_{27} + x_{39} \leq 4 & x_{13} + x_{39} + x_{73} \leq 4 & x_{15} + x_{27} + x_{39} \leq 4 \\
x_{12} + x_{16} + x_{23} \leq 8 & x_{16} + x_{23} + x_{40} \leq 8 & x_2 + x_{35} + x_{40} \leq 4 & x_{12} + x_{30} + x_{64} \leq 10 \\
x_{12} + x_{23} + x_{30} \leq 6 & x_{10} + x_{35} + x_{68} \leq 3 & x_2 + x_{35} + x_{68} \leq 3 & x_{28} + x_{34} + x_{40} \leq 4 \\
x_2 + x_{28} + x_{40} \leq 3 & x_{30} + x_{52} + x_{64} \leq 5 & x_3 + x_{30} + x_{52} \leq 6 & x_2 + x_{57} + x_{68} \leq 4 \\
x_{28} + x_{34} + x_{42} \leq 5 & x_2 + x_{28} + x_{37} \leq 5 & x_{28} + x_{37} + x_{42} \leq 4 & x_2 + x_{37} + x_{57} \leq 2
\end{array}$$

$x_{37} + x_{39} + x_{42} \leq 3$	$x_{37} + x_{57} + x_{73} \leq 5$	$x_{37} + x_{39} + x_{73} \leq 4$	$x_{29} + x_{52} + x_{63} \leq 4$		
$x_5 + x_6 + x_{63} \leq 2$	$x_{46} + x_{52} + x_{63} \leq 3$	$x_6 + x_{33} + x_{63} \leq 4$	$x_{33} + x_{46} + x_{63} \leq 5$		
$x_{46} + x_{52} + x_{69} \leq 5$	$x_3 + x_{52} + x_{69} \leq 5$	$x_{33} + x_{46} + x_{69} \leq 2$	$x_{13} + x_{54} + x_{55} \leq 3$		
$x_{13} + x_{54} + x_{70} \leq 4$	$x_{13} + x_{27} + x_{55} \leq 3$	$x_{15} + x_{27} + x_{74} \leq 5$	$x_{13} + x_{32} + x_{73} \leq 4$		
$x_{13} + x_{32} + x_{70} \leq 5$	$x_{24} + x_{32} + x_{57} \leq 3$	$x_{24} + x_{57} + x_{68} \leq 5$	$x_{32} + x_{57} + x_{73} \leq 2$		
$x_{10} + x_{24} + x_{68} \leq 3$	$x_{20} + x_{41} + x_{56} \leq 6$	$x_{20} + x_{47} + x_{56} \leq 2$	$x_{29} + x_{47} + x_{64} \leq 6$		
$x_{12} + x_{16} + x_{56} \leq 7$	$x_{16} + x_{40} + x_{60} \leq 6$	$x_{41} + x_{56} + x_{60} \leq 5$	$x_{47} + x_{56} + x_{64} \leq 5$		
$x_{29} + x_{52} + x_{64} \leq 4$	$x_{16} + x_{56} + x_{60} \leq 7$	$x_{12} + x_{56} + x_{64} \leq 6$	$x_{22} + x_{31} + x_{36} \leq 5$		
$x_1 + x_{31} + x_{36} \leq 3$	$x_4 + x_7 + x_{58} \leq 2$	$x_4 + x_{29} + x_{58} \leq 4$	$x_4 + x_7 + x_{72} \leq 2$		
$x_{18} + x_{49} + x_{72} \leq 3$	$x_{48} + x_{49} + x_{50} \leq 3$	$x_4 + x_{29} + x_{72} \leq 4$	$x_{18} + x_{29} + x_{72} \leq 3$		
$x_{18} + x_{49} + x_{50} \leq 3$	$x_{20} + x_{29} + x_{47} \leq 4$	$x_{18} + x_{29} + x_{50} \leq 3$	$x_5 + x_{29} + x_{50} \leq 3$		
$x_1 + x_{44} + x_{74} \leq 3$	$x_{44} + x_{53} + x_{75} \leq 3$	$x_{44} + x_{74} + x_{75} \leq 3$	$x_{15} + x_{74} + x_{75} \leq 2$		
$x_1 + x_{31} + x_{44} \leq 2$	$x_{14} + x_{31} + x_{44} \leq 3$	$x_3 + x_{14} + x_{53} \leq 3$	$x_{14} + x_{44} + x_{53} \leq 5$		
$x_{14} + x_{31} + x_{33} \leq 3$	$x_3 + x_{53} + x_{75} \leq 4$	$x_{14} + x_{33} + x_{69} \leq 4$	$x_{22} + x_{31} + x_{33} \leq 5$		
$x_3 + x_{14} + x_{69} \leq 3$	$x_{19} + x_{38} + x_{48} \leq 4$	$x_{19} + x_{38} + x_{67} \leq 4$	$x_{38} + x_{48} + x_{50} \leq 3$		
$x_5 + x_{38} + x_{50} \leq 3$	$x_5 + x_{29} + x_{63} \leq 3$	$x_6 + x_{51} + x_{61} \leq 4$	$x_6 + x_{25} + x_{51} \leq 2$		
$x_8 + x_{17} + x_{51} \leq 2$	$x_{17} + x_{38} + x_{51} \leq 3$	$x_8 + x_{17} + x_{65} \leq 3$	$x_6 + x_{22} + x_{25} \leq 3$		
$x_8 + x_{25} + x_{51} \leq 2$	$x_5 + x_{38} + x_{62} \leq 5$	$x_5 + x_6 + x_{62} \leq 3$	$x_{38} + x_{61} + x_{62} \leq 4$		
$x_{17} + x_{38} + x_{67} \leq 3$	$x_{38} + x_{51} + x_{61} \leq 3$	$x_6 + x_{61} + x_{62} \leq 4$	$x_8 + x_{65} + x_{66} \leq 3$		
$x_8 + x_{25} + x_{26} \leq 3$	$x_6 + x_{22} + x_{33} \leq 4$	$x_{22} + x_{25} + x_{26} \leq 2$	$x_8 + x_{26} + x_{66} \leq 2$		
$x_{22} + x_{26} + x_{66} \leq 4$	$x_{21} + x_{41} + x_{60} \leq 2$	$x_9 + x_{21} + x_{60} \leq 2$	$x_{35} + x_{40} + x_{60} \leq 5$		
$x_9 + x_{10} + x_{60} \leq 2$	$x_{10} + x_{35} + x_{60} \leq 2$	$x_9 + x_{21} + x_{41} \leq 4$			
$0 \leq x_1 \leq 1$	$0 \leq x_2 \leq 1$	$0 \leq x_3 \leq 1$	$0 \leq x_4 \leq 1$	$0 \leq x_5 \leq 1$	$0 \leq x_6 \leq 1$
$0 \leq x_7 \leq 1$	$0 \leq x_8 \leq 1$	$0 \leq x_9 \leq 1$	$0 \leq x_{10} \leq 1$	$0 \leq x_{11} \leq 1$	$0 \leq x_{12} \leq 1$
$0 \leq x_{13} \leq 1$	$0 \leq x_{14} \leq 1$	$0 \leq x_{15} \leq 1$	$0 \leq x_{16} \leq 7$	$0 \leq x_{17} \leq 1$	$0 \leq x_{18} \leq 1$
$0 \leq x_{19} \leq 1$	$0 \leq x_{20} \leq 1$	$0 \leq x_{21} \leq 1$	$0 \leq x_{22} \leq 1$	$0 \leq x_{23} \leq 2$	$0 \leq x_{24} \leq 1$
$0 \leq x_{25} \leq 1$	$0 \leq x_{26} \leq 1$	$0 \leq x_{27} \leq 1$	$0 \leq x_{28} \leq 1$	$0 \leq x_{29} \leq 1$	$0 \leq x_{30} \leq 2$
$0 \leq x_{31} \leq 2$	$0 \leq x_{32} \leq 1$	$0 \leq x_{33} \leq 1$	$0 \leq x_{34} \leq 1$	$0 \leq x_{35} \leq 1$	$0 \leq x_{36} \leq 1$
$0 \leq x_{37} \leq 1$	$0 \leq x_{38} \leq 1$	$0 \leq x_{39} \leq 1$	$0 \leq x_{40} \leq 3$	$0 \leq x_{41} \leq 1$	$0 \leq x_{42} \leq 1$
$0 \leq x_{43} \leq 1$	$0 \leq x_{44} \leq 1$	$0 \leq x_{45} \leq 1$	$0 \leq x_{46} \leq 1$	$0 \leq x_{47} \leq 3$	$0 \leq x_{48} \leq 1$
$0 \leq x_{49} \leq 1$	$0 \leq x_{50} \leq 1$	$0 \leq x_{51} \leq 1$	$0 \leq x_{52} \leq 1$	$0 \leq x_{53} \leq 1$	$0 \leq x_{54} \leq 1$
$0 \leq x_{55} \leq 1$	$0 \leq x_{56} \leq 1$	$0 \leq x_{57} \leq 1$	$0 \leq x_{58} \leq 1$	$0 \leq x_{59} \leq 1$	$0 \leq x_{60} \leq 1$
$0 \leq x_{61} \leq 2$	$0 \leq x_{62} \leq 1$	$0 \leq x_{63} \leq 1$	$0 \leq x_{64} \leq 3$	$0 \leq x_{65} \leq 1$	$0 \leq x_{66} \leq 1$

$$\begin{array}{llllll}
0 \leq x_{67} \leq 1 & 0 \leq x_{68} \leq 1 & 0 \leq x_{69} \leq 1 & 0 \leq x_{70} \leq 3 & 0 \leq x_{71} \leq 1 & 0 \leq x_{72} \leq 1 \\
0 \leq x_{73} \leq 1 & 0 \leq x_{74} \leq 1 & 0 \leq x_{57} \leq 1 & & & \\
x_i \in \mathbb{Z}_0^+ & \forall i = 1, \dots, 75 & & & &
\end{array}$$

B Kohdefunktioiden muodostamisessa hyödynnetty Wolfram Mathematica -koodit

Ensimmäisestä kohdefunktiosta on Wolfram Mathematica -ohjelmiston avulla muodostettu kaksi toisistaan poikkeavaa versiota. Ensimmäisessä versiossa (ko1) on käytetty niitä v_k -kertoimia, joiden määrittämisessä käytettiin rajana 10 minuutin yhtäkestoisuutta. Toisessa versiossa (ko1toinen) taas on käytetty hyväksi niitä v_k -kertoimia, joiden määrittämisessä käytettiin rajana 30 minuutin yhtäkestoisuutta. Tässä työssä ensimmäisestä kohdefunktiosta käytetään ko1-versiota.

Ensimmäisen kohdefunktion määrittämiseen käytetyt Wolfram Mathematica -käskyt:

```

mu=Table[Symbol["x"<>ToString[i]],{i,75}]
ain=ReadList["H:/alueindeksit.csv"]
ko1=Sum[(-1) mu[[ain[[i,k]]]],{i,1,123},{k, 1, 3}]+464
ko1toinen=Sum[(-1) mu[[ain[[h,1]]]],{h,1,123},{1,1,3}]+424

```

Toisen kohdefunktion määrittämiseen käytetyt Wolfram Mathematica -käskyt:

```

pke=ReadList["H:/pikertoimetkaikki.csv"]
ko2=Sum[pke[[j]] mu[[j]],{j,1,75}]

```

Kolmannen kohdefunktion määrittämiseen käytetyt Wolfram Mathematica -käskyt:

```

as=ReadList["H:/asukaslkm.csv"]
ko3=Sum[as[[v]]/(mu[[ain[[v,w]]]]+(1/as[[v]])),{v,1,123},{w,1,3}]

```

Neljännän kohdefunktion määrittämiseen käytetyt Wolfram Mathematica -käskyt:

```

asetta=ReadList["H:/etacsv.csv"]
asind=ReadList["H:/asemaindeksit.csv"]
ko4ka=Sum[1/(mu[[i]]+(1/(asetta[[i,j]] (1/(mu[[asind[[i,j]]]]
+1/100))))),{i,1,75},{j,1,10}]

```

C Kohdefunktioiden muodostamisessa hyödynnetyt aineistot

C.1 Asemapaikkakohtaiset vakiot ja kertoimet

Taulukko 13: Kaikki asemapaikkakohtaiset kertoimet, joita VSSHP:n ambulanssien sijoittamisongelmaa kuvaavan mallin muodostamiseen tarvitaan.

Asemapaikan tunnus	Asemapaikan nimi	Lähimpänä asemapaikkaa sattuneiden hälytysten lukumäärä	Lähimpänä asemapaikkaa sattuneiden hälytysten prosentuaalinen osuus kaikista hälytyksistä (%)	Maksimaalinen ambulanssien sijoituspaikkakapasiteetti
x1	Alastaron paloasema	640	0.560032902	1
x2	Askaisten VPK	249	0.217887801	1
x3	Auran VPK	751	0.657163608	1
x4	Dragsfjärd PVPK	613	0.536406514	1
x5	Halikon VPK, Kokkila	210	0.183760796	1
x6	Halikon VPK, Märynummi	531	0.464652298	1
x7	Hiittis FBK	79	0.069129061	1
x8	Hirvelan VPK	147	0.128632557	1
x9	Houtsjär FBK	148	0.129507609	1
x10	Iniö FBK	42	0.036752159	1
x11	Jäkärilän VPK	1281	1.120940855	1
x12	Kaarinan VPK	11608	10.15759676	1
x13	Kalannin VPK	438	0.383272517	1
x14	Karinaisten VPK	640	0.560032902	1
x15	Karjalan VPK	218	0.190761207	1
x16	Keskusasema	22233	19.45501798	7
x17	Kiikalan VPK	240	0.210012338	1
x18	Kimito FBK	828	0.724542567	1
x19	Kiskon VPK	464	0.406023854	1
x20	Korpo FBK	523	0.457651887	1
x21	Korpo FBK, Norrskata	237	0.207387184	1
x22	Kosken VPK	655	0.573158673	1
x23	Kuninkojan asema	9467	8.284111692	2
x24	Kustavin vpk	395	0.345645307	1
x25	Kuusjoen VPK, Kurkela	392	0.343020152	1
x26	Kuusjoen VPK, Ylikulma	187	0.163634614	1
x27	Laitilan paloasema	2061	1.803480955	1
x28	Lemun VPK	279	0.244139343	1
x29	Lielax FBK	319	0.2791414	1
x30	Lieto	2679	2.344262725	2
x31	Loimaan paloasema	3430	3.001426334	2
x32	Lokalahden VPK	287	0.251139754	1
x33	Marttilan VPK	448	0.392023031	1
x34	Maskun VPK	954	0.834799044	1

x35	Merimaskun VPK	343	0.300142633	1
x36	Metsämaan VPK	229	0.200386773	1
x37	Mietoisten VPK	301	0.263390474	1
x38	Muurlan VPK, Muurla	329	0.287891914	1
x39	Mynämäen VPK	1320	1.15506786	1
x40	Naantali	5183	4.535391454	3
x41	Nagu FBK	552	0.483028378	1
x42	Nousiaisten VPK	620	0.542531874	1
x43	Nousiaisten VPK Valpperi	133	0.116381837	1
x44	Oripään VPK	456	0.399023443	1
x45	Paattisten VPK	608	0.532031257	1
x46	Paimio	2349	2.05549576	1
x47	Parainen	2195	1.920737843	3
x48	Perniön VPK, Perniö	1333	1.166443529	1
x49	Perniön VPK, Särkisalo	262	0.229263469	1
x50	Perniön VPK, Teijo	245	0.214387595	1
x51	Perttelin VPK, Kaivola	564	0.493528995	1
x52	Piikkiön VPK	1368	1.197070328	1
x53	Pyhämäen VPK	744	0.651038248	1
x54	Pyhärannan VPK	332	0.290517068	1
x55	Pöytyän VPK	161	0.140883277	1
x56	Rantakulman VPK	4215	3.68834169	1
x57	Rautilan paloasema	125	0.109381426	1
x58	Rosala FBK	33	0.028876697	1
x59	Ruskon VPK	453	0.396398288	1
x60	Rymättylän VPK	461	0.4033987	1
x61	Salo	2953	2.584026812	2
x62	Salon VPK	5407	4.73140297	1
x63	Sauvon VPK	587	0.513655177	1
x64	Skanssin / Krossin asema	7519	6.579511546	3
x65	Somerniemen VPK Jakkula	236	0.206512133	1
x66	Someron PVPK	2870	2.511397545	1
x67	Suomusjärven VPK	468	0.40952406	1
x68	Taivassalon VPK	634	0.554782593	1
x69	Tarvasjoen VPK	494	0.432275396	1
x70	Uudenkaupunki	3051	2.66978185	3
x71	Vahdon VPK	217	0.189886156	1
x72	Vehmaan VPK	277	0.24238924	1
x73	Västanfjärd FBK	473	0.413899317	1
x74	Yläneen kirkonkylän VPK	415	0.363146335	1
x75	Yläneen VPK	91	0.079629678	1

C.2 Tarkastelualuekohtaiset vakiot ja kertoimet

Taulukko 14: Kaikki tarkastelualuekohtaiset kertoimet, joita VSSHP:n ambulanssien sijoittamisongelmaa kuvaavan mallin muodostamiseen tarvitaan.

Tarkastelualue	Tarkastelualueen rajaavien asemien indeksijoukko	Ambulanssitarvekerroin v_k 10 min	Ambulanssitarvekerroin v_k 30 min	Asukasmäärä
1	{3,15,75}	4	3	1580
2	{23,34,40}	6	6	16864
3	{11,23,30}	6	6	3864
4	{3,11,30}	5	5	10606
5	{11,23,59}	3	3	5100
6	{23,34,59}	3	3	3818
7	{11,45,59}	4	3	10374
8	{34,59,71}	3	2	3866
9	{3,11,45}	3	2	1656
10	{45,59,71}	2	2	1280
11	{34,42,43}	3	3	3238
12	{34,43,71}	3	3	1418
13	{43,45,71}	2	2	2390

14	{39,42,43}	4	3	4728
15	{3,43,45}	2	2	4330
16	{3,15,43}	3	3	1340
17	{15,39,43}	5	5	2632
18	{13,27,39}	4	4	6824
19	{13,39,73}	4	4	4700
20	{15,27,39}	4	3	2622
21	{12,16,23}	8	7	49676
22	{16,23,40}	8	7	73220
23	{2,35,40}	4	3	11622
24	{12,30,64}	10	10	64894
25	{12,23,30}	6	6	38654
26	{10,35,68}	3	3	2858
27	{2,35,68}	3	3	2536
28	{28,34,40}	4	3	8790
29	{2,28,40}	3	3	4418
30	{30,52,64}	5	3	17570
31	{3,30,52}	6	5	17256
32	{2,57,68}	4	4	602
33	{28,34,42}	5	5	4638
34	{2,28,37}	5	3	1432
35	{28,37,42}	4	3	3138
36	{2,37,57}	2	2	746
37	{37,39,42}	3	3	3426
38	{37,57,73}	5	5	934
39	{37,39,73}	4	3	2242
40	{29,52,63}	4	3	3636
41	{5,6,63}	2	2	1498
42	{46,52,63}	3	3	4268
43	{6,33,63}	4	4	4486
44	{33,46,63}	5	4	11010
45	{46,52,69}	5	5	7718
46	{3,52,69}	5	5	4512
47	{33,46,69}	2	2	1574
48	{13,54,55}	3	3	4368
49	{13,54,70}	4	4	12230
50	{13,27,55}	3	3	5674
51	{15,27,74}	5	4	7964
52	{13,32,73}	4	3	1738
53	{13,32,70}	5	5	13354
54	{24,32,57}	3	3	2014
55	{24,57,68}	5	4	810
56	{32,57,73}	2	2	894
57	{10,24,68}	3	3	1504
58	{20,41,56}	6	6	6018
59	{20,47,56}	2	2	2126
60	{29,47,64}	6	4	15682
61	{12,16,56}	7	7	47034
62	{16,40,60}	6	5	30032
63	{41,51,60}	5	3	10426
64	{47,56,64}	5	5	12930
65	{29,52,64}	4	4	11604
66	{16,56,60}	7	7	69128
67	{12,56,64}	6	5	14914
68	{22,31,36}	5	4	14762
69	{1,31,36}	3	3	15388
70	{4,7,58}	2	1	224
71	{4,29,58}	4	3	2754
72	{4,7,72}	2	2	478
73	{18,49,72}	3	3	1172
74	{48,49,50}	3	3	3110
75	{4,29,72}	4	4	3654
76	{18,29,72}	3	2	1394
77	{18,49,50}	3	3	3074
78	{20,29,47}	4	3	13898
79	{18,29,50}	3	2	2824
80	{5,29,50}	3	3	1482

81	{1,44,74}	3	3	5284
82	{44,53,75}	3	3	822
83	{44,74,75}	3	2	1562
84	{15,74,75}	2	2	238
85	{1,31,44}	2	2	3510
86	{14,31,44}	3	3	3312
87	{3,14,53}	3	3	1760
88	{14,44,53}	5	5	1638
89	{14,31,33}	3	3	3694
90	{3,53,75}	4	4	3200
91	{14,33,69}	4	4	2260
92	{22,31,33}	5	5	2798
93	{3,14,69}	3	3	3766
94	{19,38,48}	4	4	9172
95	{19,38,67}	4	4	2336
96	{38,48,50}	3	3	1776
97	{5,38,50}	3	3	1528
98	{5,29,63}	3	3	568
99	{6,51,61}	4	4	7464
100	{6,25,51}	2	2	1384
101	{8,17,51}	2	2	2038
102	{17,38,51}	3	3	4262
103	{8,17,65}	3	2	1168
104	{6,22,25}	3	3	1454
105	{8,25,51}	2	2	1870
106	{5,38,62}	5	5	12198
107	{5,6,62}	3	3	14004
108	{38,61,62}	4	4	10968
109	{17,38,67}	3	3	3304
110	{38,51,61}	3	3	14964
111	{6,61,62}	4	4	5888
112	{8,65,66}	3	3	5388
113	{8,25,26}	3	3	740
114	{6,22,33}	4	3	4200
115	{22,25,26}	2	2	1832
116	{8,26,66}	2	2	2088
117	{22,26,66}	4	3	10566
118	{21,41,66}	2	2	194
119	{9,21,60}	2	2	338
120	{35,40,60}	5	3	8164
121	{9,10,60}	2	2	1060
122	{10,35,60}	2	2	2198
123	{9,21,41}	4	4	2036

C.3 Mahdollisten asemapaikkojen ja niiden naapuriase- mien väliset etäisyydet

Taulukko 15: Jokaisen mahdollisen asemapaikan etäisyydet kymmeneen lähimpään naapuriasemaan.

Asemapaikka	Naapuriasema	Etäisyys metreinä
Alastaron paloasema	Auran VPK	37106.5444253
Alastaron paloasema	Karinaisten VPK	28585.0332059
Alastaron paloasema	Kosken VPK	35778.0880367
Alastaron paloasema	Loimaan paloasema	14742.7595414
Alastaron paloasema	Marttilan VPK	40692.5131668
Alastaron paloasema	Metsamaan VPK	15629.8293471
Alastaron paloasema	Oripaan VPK	14841.7419108
Alastaron paloasema	Poytyn VPK	29388.9105077
Alastaron paloasema	Ylanean kirkonkylän VPK	25716.4710536
Alastaron paloasema	Ylanean VPK	27291.7239513

Askaisten VPK	Lemun VPK	5753.74880882
Askaisten VPK	Maskun VPK	13622.6333628
Askaisten VPK	Merimaskun VPK	12302.4741263
Askaisten VPK	Mietoisten VPK	6886.20072757
Askaisten VPK	Mynamaen VPK	14040.6190533
Askaisten VPK	Naantali	15278.1560885
Askaisten VPK	Nousiaisten VPK	12574.1143671
Askaisten VPK	Rautilan paloasema	11173.3005294
Askaisten VPK	Taivassalon VPK	14043.7703887
Askaisten VPK	Vehmaan VPK	15363.1463538
Auran VPK	Jakarlan VPK	17829.4608835
Auran VPK	Karinaisten VPK	11077.2024726
Auran VPK	Lieto	20550.6255419
Auran VPK	Marttilan VPK	17925.2195692
Auran VPK	Nousiaisten VPK Valpperi	17937.4906074
Auran VPK	Paattisten VPK	11103.7486808
Auran VPK	Poytyn VPK	8228.16652238
Auran VPK	Tarvasjoen VPK	12238.8489953
Auran VPK	Vahdon VPK	16031.0148589
Auran VPK	Ylanean VPK	19623.0434588
Dragsfjard PVPK	Hiittis FBK	14408.1336568
Dragsfjard PVPK	Kimito FBK	19522.6502936
Dragsfjard PVPK	Korpo FBK	34199.44517
Dragsfjard PVPK	Lielax FBK	33579.2236639
Dragsfjard PVPK	Parainen	34393.179416
Dragsfjard PVPK	Pernion VPK Sarkisalo	22574.9940273
Dragsfjard PVPK	Pernion VPK Teijo	36652.1364622
Dragsfjard PVPK	Rosala FBK	18854.4080303
Dragsfjard PVPK	Sauvon VPK	37731.1969412
Dragsfjard PVPK	Vastanfjard FBK	10598.6919614
Halikon VPK Kokkila	Halikon VPK Marynummi	14014.2098595
Halikon VPK Kokkila	Kimito FBK	22633.5811089
Halikon VPK Kokkila	Muurlan VPK Muurla	18451.0211076
Halikon VPK Kokkila	Paimio	19687.9170338
Halikon VPK Kokkila	Pernion VPK Pernio	16263.766316
Halikon VPK Kokkila	Pernion VPK Teijo	7811.22253034
Halikon VPK Kokkila	Perttelin VPK Kaivola	21348.8701038
Halikon VPK Kokkila	Salo	13072.3630984
Halikon VPK Kokkila	Salon VPK	12094.6912879
Halikon VPK Kokkila	Sauvon VPK	13907.1571861
Halikon VPK Marynummi	Halikon VPK Kokkila	14014.2098595
Halikon VPK Marynummi	Kuusjoen VPK Kurkela	12711.3233371
Halikon VPK Marynummi	Kuusjoen VPK Ylikulma	18593.6242735
Halikon VPK Marynummi	Marttilan VPK	18341.430132
Halikon VPK Marynummi	Muurlan VPK Muurla	16206.6842773
Halikon VPK Marynummi	Paimio	19392.4868428
Halikon VPK Marynummi	Pernion VPK Teijo	21184.5484771
Halikon VPK Marynummi	Perttelin VPK Kaivola	10657.4648625
Halikon VPK Marynummi	Salo	6815.99810581
Halikon VPK Marynummi	Salon VPK	7519.95023669
Hiittis FBK	Dragsfjard PVPK	14408.1336568
Hiittis FBK	Kimito FBK	31997.5365037
Hiittis FBK	Korpo FBK	47939.6100965
Hiittis FBK	Lielax FBK	47969.5520189
Hiittis FBK	Parainen	48457.23317
Hiittis FBK	Pernion VPK Pernio	47969.2393688
Hiittis FBK	Pernion VPK Sarkisalo	30297.1860146
Hiittis FBK	Pernion VPK Teijo	47569.7329593
Hiittis FBK	Rosala FBK	6605.35987481
Hiittis FBK	Vastanfjard FBK	19594.3280817
Hirvelan VPK	Kiikalan VPK	6659.08581905
Hirvelan VPK	Kuusjoen VPK Kurkela	15643.0852851
Hirvelan VPK	Kuusjoen VPK Ylikulma	12707.8240074
Hirvelan VPK	Muurlan VPK Muurla	22319.3061125
Hirvelan VPK	Perttelin VPK Kaivola	16104.236469
Hirvelan VPK	Salo	24169.1629096
Hirvelan VPK	Salon VPK	25131.3711959

Hirvelan VPK	Somerniemen VPK Jakkula	15961.8499279
Hirvelan VPK	Someron PVPK	11766.9369146
Hirvelan VPK	Suomusjarven VPK	16028.7426286
Houtskar FBK	Askaisten VPK	47386.6401812
Houtskar FBK	Inio FBK	19684.7923521
Houtskar FBK	Korpo FBK Norrskata	11834.7359027
Houtskar FBK	Kustavin vpk	36316.9477048
Houtskar FBK	Merimaskun VPK	39838.6266384
Houtskar FBK	Naantali	47964.5999747
Houtskar FBK	Nagu FBK	27500.4666463
Houtskar FBK	Rautilan paloasema	48217.0356177
Houtskar FBK	Rymattylan VPK	36539.91021
Houtskar FBK	Taivassalon VPK	40405.9809648
Inio FBK	Askaisten VPK	32176.3518927
Inio FBK	Houtskar FBK	19684.7923521
Inio FBK	Korpo FBK Norrskata	20450.9921065
Inio FBK	Kustavin vpk	16734.6994786
Inio FBK	Lokalahden VPK	31878.3440828
Inio FBK	Merimaskun VPK	29067.828365
Inio FBK	Nagu FBK	33604.6724393
Inio FBK	Rautilan paloasema	30065.8573451
Inio FBK	Rymattylan VPK	30891.4737989
Inio FBK	Taivassalon VPK	22003.1192418
Jakarlan VPK	Kaarinan VPK	9313.0774729
Jakarlan VPK	Keskusasema	11367.5638056
Jakarlan VPK	Kuninkojan asema	7623.2138017
Jakarlan VPK	Lieto	6588.31574982
Jakarlan VPK	Maskun VPK	13217.0062992
Jakarlan VPK	Paattisten VPK	7742.40136679
Jakarlan VPK	Rantakulman VPK	14358.6954824
Jakarlan VPK	Ruskon VPK	6972.56351113
Jakarlan VPK	Skanssin tai Krossin asema	13498.9003415
Jakarlan VPK	Vahdon VPK	8389.17318689
Kaarinan VPK	Jakarlan VPK	9313.0774729
Kaarinan VPK	Keskusasema	2491.32417231
Kaarinan VPK	Kuninkojan asema	5490.5199514
Kaarinan VPK	Lieto	6746.73396255
Kaarinan VPK	Maskun VPK	15023.6494303
Kaarinan VPK	Naantali	12633.7599222
Kaarinan VPK	Piikkion VPK	13023.4440236
Kaarinan VPK	Rantakulman VPK	5521.93474045
Kaarinan VPK	Ruskon VPK	9983.30478354
Kaarinan VPK	Skanssin tai Krossin asema	6511.60753302
Kalannin VPK	Laitilan paloasema	10353.3837184
Kalannin VPK	Lokalahden VPK	16350.1696873
Kalannin VPK	Mietoisten VPK	29282.0673146
Kalannin VPK	Mynamaen VPK	28466.114623
Kalannin VPK	Pyhamaan VPK	16379.5916979
Kalannin VPK	Pyharannan VPK	18902.5552716
Kalannin VPK	Rautilan paloasema	23434.245748
Kalannin VPK	Taivassalon VPK	28899.229327
Kalannin VPK	Uudenkaupunki	7795.99611458
Kalannin VPK	Vehmaan VPK	17604.8264263
Karinaisten VPK	Auran VPK	11077.2024726
Karinaisten VPK	Kosken VPK	21622.1151195
Karinaisten VPK	Loimaan paloasema	21475.4815173
Karinaisten VPK	Marttilan VPK	14569.3096328
Karinaisten VPK	Oripaan VPK	16879.9620793
Karinaisten VPK	Paattisten VPK	22160.0285587
Karinaisten VPK	Poytyn VPK	8818.72825423
Karinaisten VPK	Tarvasjoen VPK	13561.2031261
Karinaisten VPK	Vahdon VPK	26808.1512738
Karinaisten VPK	Ylanean VPK	20715.3192539
Karjalan VPK	Lemun VPK	23933.0256112
Karjalan VPK	Maskun VPK	24022.9626653
Karjalan VPK	Mietoisten VPK	19584.8605071
Karjalan VPK	Mynamaen VPK	12362.3128277

Karjalan VPK	Nousiaisten VPK	19337.6763431
Karjalan VPK	Nousiaisten VPK Valpperi	14833.8916786
Karjalan VPK	Vahdon VPK	21503.1862543
Karjalan VPK	Vehmaan VPK	23203.3379429
Karjalan VPK	Ylaneen kirkonkylän VPK	20843.0149029
Karjalan VPK	Ylaneen VPK	19860.1900684
Keskusasema	Jakarlan VPK	11367.5638056
Keskusasema	Kaarinan VPK	2491.32417231
Keskusasema	Kuninkojan asema	5889.38401459
Keskusasema	Lieto	9226.57016788
Keskusasema	Maskun VPK	14835.9434746
Keskusasema	Naantali	10859.336019
Keskusasema	Piikkion VPK	14812.0131967
Keskusasema	Rantakulman VPK	5167.95893698
Keskusasema	Ruskon VPK	10670.7485559
Keskusasema	Skanssin tai Krossin asema	7462.70573582
Kiikalan VPK	Hirvelän VPK	6659.08581905
Kiikalan VPK	Kiskon VPK	22471.7768549
Kiikalan VPK	Kuusjoen VPK Kurkela	19682.1350452
Kiikalan VPK	Kuusjoen VPK Ylikulma	18268.9516554
Kiikalan VPK	Muurlan VPK Muurla	19910.8786802
Kiikalan VPK	Perttelin VPK Kaivola	17388.764306
Kiikalan VPK	Salo	24350.3007863
Kiikalan VPK	Somerniemen VPK Jakkula	15911.0995647
Kiikalan VPK	Someron PVPK	17757.7770382
Kiikalan VPK	Suomusjarven VPK	9522.49962702
Kimito FBK	Dragsfjard PVPK	19522.6502936
Kimito FBK	Halikon VPK Kokkila	22633.5811089
Kimito FBK	Korpo FBK	29777.2748863
Kimito FBK	Lielax FBK	23362.1080524
Kimito FBK	Parainen	27924.5099904
Kimito FBK	Pernion VPK Pernio	22837.3413226
Kimito FBK	Pernion VPK Sarkisalo	12205.2997663
Kimito FBK	Pernion VPK Teijo	17559.9510132
Kimito FBK	Sauvon VPK	20258.3165638
Kimito FBK	Vastanfjard FBK	13034.3958269
Kiskon VPK	Halikon VPK Kokkila	28944.0632993
Kiskon VPK	Hirvelän VPK	27841.1670107
Kiskon VPK	Kiikalan VPK	22471.7768549
Kiskon VPK	Muurlan VPK Muurla	13489.4084644
Kiskon VPK	Pernion VPK Pernio	20498.7679128
Kiskon VPK	Pernion VPK Teijo	27526.0644304
Kiskon VPK	Perttelin VPK Kaivola	23553.7130976
Kiskon VPK	Salo	22905.1290993
Kiskon VPK	Salon VPK	22445.182094
Kiskon VPK	Suomusjarven VPK	14414.8858186
Korpo FBK	Kaarinan VPK	18258.0333806
Korpo FBK	Keskusasema	16679.1268912
Korpo FBK	Kuninkojan asema	22427.3198082
Korpo FBK	Lielax FBK	10292.3870639
Korpo FBK	Naantali	21844.9237798
Korpo FBK	Parainen	3542.02931005
Korpo FBK	Piikkion VPK	21407.8299693
Korpo FBK	Rantakulman VPK	13257.6722939
Korpo FBK	Rymattylan VPK	18268.1957995
Korpo FBK	Skanssin tai Krossin asema	15475.3892406
Korpo FBK Norrskata	Askaisten VPK	39965.4861871
Korpo FBK Norrskata	Houtskar FBK	11834.7359027
Korpo FBK Norrskata	Inio FBK	20450.9921065
Korpo FBK Norrskata	Korpo FBK	37474.9528349
Korpo FBK Norrskata	Kustavin vpk	36270.8183895
Korpo FBK Norrskata	Merimaskun VPK	30527.967346
Korpo FBK Norrskata	Naantali	37793.7080519
Korpo FBK Norrskata	Nagu FBK	16173.8766311
Korpo FBK Norrskata	Rymattylan VPK	25614.0898931
Korpo FBK Norrskata	Taivassalon VPK	36251.9399162
Kosken VPK	Halikon VPK Marynummi	25100.016761

Kosken VPK	Hirvelan VPK	25242.8863785
Kosken VPK	Karinaisten VPK	21622.1151195
Kosken VPK	Kuusjoen VPK Kurkela	16249.0359295
Kosken VPK	Kuusjoen VPK Ylikulma	13679.0976655
Kosken VPK	Loimaan paloasema	21410.2046067
Kosken VPK	Marttilan VPK	16320.4811982
Kosken VPK	Perttelin VPK Kaivola	24070.4964681
Kosken VPK	Someron PVPK	20970.0172204
Kosken VPK	Tarvasjoen VPK	23017.290141
Kuninkojan asema	Jakarlan VPK	7623.2138017
Kuninkojan asema	Kaarinan VPK	5490.5199514
Kuninkojan asema	Keskusasema	5889.38401459
Kuninkojan asema	Lieto	9404.57715161
Kuninkojan asema	Maskun VPK	9574.09638521
Kuninkojan asema	Naantali	9667.44071005
Kuninkojan asema	Rantakulman VPK	10755.8424274
Kuninkojan asema	Ruskon VPK	4783.73098774
Kuninkojan asema	Skanssin tai Krossin asema	11964.435829
Kuninkojan asema	Vahdon VPK	12998.8460788
Kustavin vpk	Askaisten VPK	27327.0529611
Kustavin vpk	Inio FBK	16734.6994786
Kustavin vpk	Kalannin VPK	32209.7194624
Kustavin vpk	Lokalahden VPK	15868.8625323
Kustavin vpk	Merimaskun VPK	31075.0785038
Kustavin vpk	Mietoisten VPK	30998.8612705
Kustavin vpk	Rautilan paloasema	19723.4749269
Kustavin vpk	Taivassalon VPK	13316.7056276
Kustavin vpk	Uudenkaupunki	28915.0389925
Kustavin vpk	Vehmaan VPK	24357.6788619
Kuusjoen VPK Kurkela	Halikon VPK Marynummi	12711.3233371
Kuusjoen VPK Kurkela	Hirvelan VPK	15643.0852851
Kuusjoen VPK Kurkela	Kiikalan VPK	19682.1350452
Kuusjoen VPK Kurkela	Kosken VPK	16249.0359295
Kuusjoen VPK Kurkela	Kuusjoen VPK Ylikulma	5904.19112056
Kuusjoen VPK Kurkela	Marttilan VPK	19371.7646135
Kuusjoen VPK Kurkela	Muurlan VPK Muurla	19199.7197057
Kuusjoen VPK Kurkela	Perttelin VPK Kaivola	7832.18318175
Kuusjoen VPK Kurkela	Salo	14343.3031488
Kuusjoen VPK Kurkela	Salon VPK	15592.0827859
Kuusjoen VPK Ylikulma	Halikon VPK Marynummi	18593.6242735
Kuusjoen VPK Ylikulma	Hirvelan VPK	12707.8240074
Kuusjoen VPK Ylikulma	Kiikalan VPK	18268.9516554
Kuusjoen VPK Ylikulma	Kosken VPK	13679.0976655
Kuusjoen VPK Ylikulma	Kuusjoen VPK Kurkela	5904.19112056
Kuusjoen VPK Ylikulma	Marttilan VPK	21931.2585073
Kuusjoen VPK Ylikulma	Perttelin VPK Kaivola	12440.0370003
Kuusjoen VPK Ylikulma	Salo	19929.4565307
Kuusjoen VPK Ylikulma	Salon VPK	21165.0561402
Kuusjoen VPK Ylikulma	Someron PVPK	14603.9837552
Laitilan paloasema	Kalannin VPK	10353.3837184
Laitilan paloasema	Karjalan VPK	24865.6958841
Laitilan paloasema	Lokalahden VPK	25774.7902618
Laitilan paloasema	Mietoisten VPK	31043.1643465
Laitilan paloasema	Mynamaen VPK	27762.1479589
Laitilan paloasema	Pyhamaan VPK	19754.6874697
Laitilan paloasema	Pyharannan VPK	13283.7446458
Laitilan paloasema	Rautilan paloasema	29048.9309887
Laitilan paloasema	Uudenkaupunki	17592.0710635
Laitilan paloasema	Vehmaan VPK	22188.932181
Lemun VPK	Askaisten VPK	5753.74880882
Lemun VPK	Kuninkojan asema	16636.0583654
Lemun VPK	Maskun VPK	7924.50732115
Lemun VPK	Merimaskun VPK	12854.1522909
Lemun VPK	Mietoisten VPK	6925.99632248
Lemun VPK	Mynamaen VPK	12124.9221537
Lemun VPK	Naantali	11950.8405483
Lemun VPK	Nousiaisten VPK	7184.06953806

Lemun VPK	Rautilan paloasema	16195.6821344
Lemun VPK	Ruskon VPK	14243.8284156
Lielax FBK	Kaarinan VPK	17237.4693191
Lielax FBK	Keskusasema	17032.2597081
Lielax FBK	Korpo FBK	10292.3870639
Lielax FBK	Lieto	18774.9625915
Lielax FBK	Paimio	21245.1815126
Lielax FBK	Parainen	6873.38756592
Lielax FBK	Piikkion VPK	13583.9757115
Lielax FBK	Rantakulman VPK	11904.2858311
Lielax FBK	Sauvon VPK	15320.54963
Lielax FBK	Skanssin tai Krossin asema	11429.542522
Lieto	Jakarlan VPK	6588.31574982
Lieto	Kaarinan VPK	6746.73396255
Lieto	Keskusasema	9226.57016788
Lieto	Kuninkojan asema	9404.57715161
Lieto	Paattisten VPK	12881.7110616
Lieto	Piikkion VPK	9124.32095502
Lieto	Rantakulman VPK	9752.35068161
Lieto	Ruskon VPK	11772.4999235
Lieto	Skanssin tai Krossin asema	7696.65681416
Lieto	Vahdon VPK	14909.8856204
Loimaan paloasema	Alastaron paloasema	14742.7595414
Loimaan paloasema	Auran VPK	32263.385932
Loimaan paloasema	Karinaisten VPK	21475.4815173
Loimaan paloasema	Kosken VPK	21410.2046067
Loimaan paloasema	Marttilan VPK	29541.2200714
Loimaan paloasema	Metsamaan VPK	12966.5081124
Loimaan paloasema	Oripaan VPK	17942.7802268
Loimaan paloasema	Poytyn VPK	26626.8013345
Loimaan paloasema	Tarvasjoen VPK	32791.0857456
Loimaan paloasema	Ylaneen VPK	31152.3295196
Lokalahden VPK	Askaisten VPK	25207.2715134
Lokalahden VPK	Kalannin VPK	16350.1696873
Lokalahden VPK	Kustavin vpk	15868.8625323
Lokalahden VPK	Laitilan paloasema	25774.7902618
Lokalahden VPK	Mietoisten VPK	25121.6029131
Lokalahden VPK	Pyhamaan VPK	28147.2261013
Lokalahden VPK	Rautilan paloasema	14060.0244699
Lokalahden VPK	Taivassalon VPK	15261.9138972
Lokalahden VPK	Uudenkaupunki	14149.7126055
Lokalahden VPK	Vehmaan VPK	13578.9634533
Marttilan VPK	Auran VPK	17925.2195692
Marttilan VPK	Halikon VPK Marynummi	18341.430132
Marttilan VPK	Karinaisten VPK	14569.3096328
Marttilan VPK	Kosken VPK	16320.4811982
Marttilan VPK	Kuusjoen VPK Kurkela	19371.7646135
Marttilan VPK	Kuusjoen VPK Ylikulma	21931.2585073
Marttilan VPK	Paimio	18326.7520379
Marttilan VPK	Perttelin VPK Kaivola	24503.8735865
Marttilan VPK	Poytyn VPK	21702.2740075
Marttilan VPK	Tarvasjoen VPK	7119.97936595
Maskun VPK	Askaisten VPK	13622.6333628
Maskun VPK	Jakarlan VPK	13217.0062992
Maskun VPK	Kuninkojan asema	9574.09638521
Maskun VPK	Lemun VPK	7924.50732115
Maskun VPK	Mietoisten VPK	13207.2417774
Maskun VPK	Naantali	9822.64482902
Maskun VPK	Nousiaisten VPK	4953.35364872
Maskun VPK	Nousiaisten VPK Valpperi	14744.8253371
Maskun VPK	Ruskon VPK	6372.98804563
Maskun VPK	Vahdon VPK	12003.2000169
Merimaskun VPK	Askaisten VPK	12302.4741263
Merimaskun VPK	Keskusasema	19509.4038187
Merimaskun VPK	Kuninkojan asema	18815.5158463
Merimaskun VPK	Lemun VPK	12854.1522909
Merimaskun VPK	Maskun VPK	16017.2653911

Merimaskun VPK	Mietoisten VPK	18502.9810966
Merimaskun VPK	Naantali	9176.31625252
Merimaskun VPK	Nousiaisten VPK	18695.7322598
Merimaskun VPK	Ruskon VPK	19775.9896654
Merimaskun VPK	Rymattylan VPK	9737.03905249
Metsamaan VPK	Alastaron paloasema	15629.8293471
Metsamaan VPK	Karinaisten VPK	34341.5941284
Metsamaan VPK	Kosken VPK	31176.965009
Metsamaan VPK	Loimaan paloasema	12966.5081124
Metsamaan VPK	Marttilan VPK	42022.0877365
Metsamaan VPK	Oripaan VPK	27044.7876891
Metsamaan VPK	Poytyn VPK	38683.78547
Metsamaan VPK	Someron PVPK	40861.4105408
Metsamaan VPK	Ylanean kirkonkylän VPK	40594.0835642
Metsamaan VPK	Ylanean VPK	40649.9066831
Mietoisten VPK	Askaisten VPK	6886.20072757
Mietoisten VPK	Lemun VPK	6925.99632248
Mietoisten VPK	Maskun VPK	13207.2417774
Mietoisten VPK	Merimaskun VPK	18502.9810966
Mietoisten VPK	Mynamaen VPK	7247.45281247
Mietoisten VPK	Naantali	18876.7897544
Mietoisten VPK	Nousiaisten VPK	9765.41533118
Mietoisten VPK	Rautilan paloasema	11899.886413
Mietoisten VPK	Taivassalon VPK	17941.4494946
Mietoisten VPK	Vehmaan VPK	12604.97015
Muurlan VPK Muurla	Halikon VPK Kokkila	18451.0211076
Muurlan VPK Muurla	Halikon VPK Marynummi	16206.6842773
Muurlan VPK Muurla	Kiikalan VPK	19910.8786802
Muurlan VPK Muurla	Kiskon VPK	13489.4084644
Muurlan VPK Muurla	Kuusjoen VPK Kurkela	19199.7197057
Muurlan VPK Muurla	Pernion VPK Pernio	18670.3802174
Muurlan VPK Muurla	Perttelin VPK Kaivola	11367.5457751
Muurlan VPK Muurla	Salo	9477.81223159
Muurlan VPK Muurla	Salon VPK	9168.43113256
Muurlan VPK Muurla	Suomusjarven VPK	17496.3429647
Mynamaen VPK	Askaisten VPK	14040.6190533
Mynamaen VPK	Karjalan VPK	12362.3128277
Mynamaen VPK	Lemun VPK	12124.9221537
Mynamaen VPK	Maskun VPK	14880.320882
Mynamaen VPK	Mietoisten VPK	7247.45281247
Mynamaen VPK	Nousiaisten VPK	10008.3705269
Mynamaen VPK	Nousiaisten VPK Valpperi	15089.7252156
Mynamaen VPK	Rautilan paloasema	17205.9032873
Mynamaen VPK	Vahdon VPK	18914.9980504
Mynamaen VPK	Vehmaan VPK	14897.4444037
Naantali	Askaisten VPK	15278.1560885
Naantali	Kaarinan VPK	12633.7599222
Naantali	Keskusasema	10859.336019
Naantali	Kuninkojan asema	9667.44071005
Naantali	Lemun VPK	11950.8405483
Naantali	Maskun VPK	9822.64482902
Naantali	Merimaskun VPK	9176.31625252
Naantali	Nousiaisten VPK	14230.4260751
Naantali	Ruskon VPK	11337.3826369
Naantali	Rymattylan VPK	12898.4051649
Nagu FBK	Houtskar FBK	27500.4666463
Nagu FBK	Inio FBK	33604.6724393
Nagu FBK	Korpo FBK	23535.806932
Nagu FBK	Korpo FBK Norrskata	16173.8766311
Nagu FBK	Lielax FBK	33647.1926851
Nagu FBK	Merimaskun VPK	28326.1609439
Nagu FBK	Naantali	32057.3871021
Nagu FBK	Parainen	27077.6767769
Nagu FBK	Rantakulman VPK	34077.3775292
Nagu FBK	Rymattylan VPK	19447.082528
Nousiaisten VPK	Askaisten VPK	12574.1143671
Nousiaisten VPK	Kuninkojan asema	14176.7552842

Nousiaisten VPK	Lemun VPK	7184.06953806
Nousiaisten VPK	Maskun VPK	4953.35364872
Nousiaisten VPK	Mietoisten VPK	9765.41533118
Nousiaisten VPK	Mynamaen VPK	10008.3705269
Nousiaisten VPK	Naantali	14230.4260751
Nousiaisten VPK	Nousiaisten VPK Valpperi	12389.061554
Nousiaisten VPK	Ruskon VPK	10158.6148098
Nousiaisten VPK	Vahdon VPK	12185.1663139
Nousiaisten VPK Valpperi	Auran VPK	17937.4906074
Nousiaisten VPK Valpperi	Jakarlan VPK	15283.0061873
Nousiaisten VPK Valpperi	Karjalan VPK	14833.8916786
Nousiaisten VPK Valpperi	Maskun VPK	14744.8253371
Nousiaisten VPK Valpperi	Mynamaen VPK	15089.7252156
Nousiaisten VPK Valpperi	Nousiaisten VPK	12389.061554
Nousiaisten VPK Valpperi	Paattisten VPK	10882.9496333
Nousiaisten VPK Valpperi	Ruskon VPK	14396.3904393
Nousiaisten VPK Valpperi	Vahdon VPK	6897.25830579
Nousiaisten VPK Valpperi	Ylanean VPK	18983.6733732
Oripaan VPK	Alastaron paloasema	14841.7419108
Oripaan VPK	Auran VPK	23097.8074331
Oripaan VPK	Karinaisten VPK	16879.9620793
Oripaan VPK	Loimaan paloasema	17942.7802268
Oripaan VPK	Metsamaan VPK	27044.7876891
Oripaan VPK	Nousiaisten VPK Valpperi	30833.3053973
Oripaan VPK	Poytyn VPK	15004.5852906
Oripaan VPK	Tarvasjoen VPK	30281.9526355
Oripaan VPK	Ylanean kirkonkylän VPK	15375.8924412
Oripaan VPK	Ylanean VPK	13640.5587339
Paattisten VPK	Auran VPK	11103.7486808
Paattisten VPK	Jakarlan VPK	7742.40136679
Paattisten VPK	Kaarinan VPK	17034.165857
Paattisten VPK	Kuninkojan asema	14829.3590784
Paattisten VPK	Lieto	12881.7110616
Paattisten VPK	Maskun VPK	16866.3938053
Paattisten VPK	Nousiaisten VPK Valpperi	10882.9496333
Paattisten VPK	Poytyn VPK	17059.0600821
Paattisten VPK	Ruskon VPK	12185.4496509
Paattisten VPK	Vahdon VPK	5706.1215222
Paattisten VPK	Halikon VPK Kokkila	19687.9170338
Paimio	Halikon VPK Marynummi	19392.4868428
Paimio	Jakarlan VPK	21328.5059173
Paimio	Lielax FBK	21245.1815126
Paimio	Lieto	16421.2115805
Paimio	Marttilan VPK	18326.7520379
Paimio	Piikkion VPK	9811.29217834
Paimio	Sauvon VPK	12155.2419407
Paimio	Skanssin tai Krossin asema	17810.4880319
Paimio	Tarvasjoen VPK	14473.583254
Parainen	Kaarinan VPK	16509.9574817
Parainen	Keskusasema	15326.3791223
Parainen	Korpo FBK	3542.02931005
Parainen	Kuninkojan asema	21210.4666746
Parainen	Lielax FBK	6873.38756592
Parainen	Lieto	20373.1331364
Parainen	Piikkion VPK	18076.6456925
Parainen	Rantakulman VPK	11138.0773838
Parainen	Rymattylan VPK	20591.3392989
Parainen	Skanssin tai Krossin asema	12749.7560695
Pernion VPK Pernio	Halikon VPK Kokkila	16263.766316
Pernion VPK Pernio	Halikon VPK Marynummi	26592.1704444
Pernion VPK Pernio	Kimito FBK	22837.3413226
Pernion VPK Pernio	Kiskon VPK	20498.7679128
Pernion VPK Pernio	Muurlan VPK Muurla	18670.3802174
Pernion VPK Pernio	Pernion VPK Sarkisalo	17706.7430309
Pernion VPK Pernio	Pernion VPK Teijo	10084.3712025
Pernion VPK Pernio	Salo	21533.2930316
Pernion VPK Pernio	Salon VPK	20312.9853955

Pernion VPK Pernio	Sauvon VPK	27551.5928547
Pernion VPK Sarkisalo	Dragsfjard PVPK	22574.9940273
Pernion VPK Sarkisalo	Halikon VPK Kokkila	26104.1466513
Pernion VPK Sarkisalo	Hiittis FBK	30297.1860146
Pernion VPK Sarkisalo	Kimito FBK	12205.2997663
Pernion VPK Sarkisalo	Lielax FBK	35439.3707079
Pernion VPK Sarkisalo	Pernion VPK Pernio	17706.7430309
Pernion VPK Sarkisalo	Pernion VPK Teijo	18603.5290285
Pernion VPK Sarkisalo	Salon VPK	35372.9279755
Pernion VPK Sarkisalo	Sauvon VPK	29552.5132618
Pernion VPK Sarkisalo	Vastanfjard FBK	12080.6512978
Pernion VPK Teijo	Halikon VPK Kokkila	7811.22253034
Pernion VPK Teijo	Halikon VPK Marynummi	21184.5484771
Pernion VPK Teijo	Kimito FBK	17559.9510132
Pernion VPK Teijo	Muurlan VPK Muurla	20403.8940477
Pernion VPK Teijo	Paimio	26236.0413422
Pernion VPK Teijo	Pernion VPK Pernio	10084.3712025
Pernion VPK Teijo	Pernion VPK Sarkisalo	18603.5290285
Pernion VPK Teijo	Salo	18447.1372186
Pernion VPK Teijo	Salon VPK	17247.6579559
Pernion VPK Teijo	Sauvon VPK	17468.1609846
Perttelin VPK Kaivola	Halikon VPK Kokkila	21348.8701038
Perttelin VPK Kaivola	Halikon VPK Marynummi	10657.4648625
Perttelin VPK Kaivola	Hirvelan VPK	16104.236469
Perttelin VPK Kaivola	Kiikalan VPK	17388.764306
Perttelin VPK Kaivola	Kuusjoen VPK Kurkela	7832.18318175
Perttelin VPK Kaivola	Kuusjoen VPK Ylikulma	12440.0370003
Perttelin VPK Kaivola	Muurlan VPK Muurla	11367.5457751
Perttelin VPK Kaivola	Salo	8324.15728766
Perttelin VPK Kaivola	Salon VPK	9437.22896967
Perttelin VPK Kaivola	Suomusjarven VPK	20700.4074508
Piikkion VPK	Jakarlan VPK	15525.0969763
Piikkion VPK	Kaarinan VPK	13023.4440236
Piikkion VPK	Keskusasema	14812.0131967
Piikkion VPK	Kuninkojan asema	17645.8560236
Piikkion VPK	Lielax FBK	13583.9757115
Piikkion VPK	Lieto	9124.32095502
Piikkion VPK	Paimio	9811.29217834
Piikkion VPK	Rantakulman VPK	11656.7680675
Piikkion VPK	Sauvon VPK	13434.9468762
Piikkion VPK	Skanssin tai Krossin asema	8031.44208042
Poytyan VPK	Auran VPK	8228.16652238
Poytyan VPK	Karinaisten VPK	8818.72825423
Poytyan VPK	Marttilan VPK	21702.2740075
Poytyan VPK	Nousiaisten VPK Valpperi	19506.3813738
Poytyan VPK	Oripaan VPK	15004.5852906
Poytyan VPK	Paattisten VPK	17059.0600821
Poytyan VPK	Tarvasjoen VPK	18069.291163
Poytyan VPK	Vahdon VPK	20454.5565604
Poytyan VPK	Ylaneen kirkonkylän VPK	20221.5951513
Poytyan VPK	Ylaneen VPK	12921.2723793
Pyhamaan VPK	Kalannin VPK	16379.5916979
Pyhamaan VPK	Karjalan VPK	44274.0854007
Pyhamaan VPK	Kustavin vpk	42299.7932191
Pyhamaan VPK	Laitilan paloasema	19754.6874697
Pyhamaan VPK	Lokalahden VPK	28147.2261013
Pyhamaan VPK	Pyharannan VPK	15051.8785762
Pyhamaan VPK	Rautilan paloasema	38883.7258619
Pyhamaan VPK	Taivassalon VPK	42967.6425362
Pyhamaan VPK	Uudenkaupunki	14019.4430511
Pyhamaan VPK	Vehmaan VPK	33716.6417178
Pyharannan VPK	Kalannin VPK	18902.5552716
Pyharannan VPK	Karjalan VPK	36530.1065489
Pyharannan VPK	Laitilan paloasema	13283.7446458
Pyharannan VPK	Lokalahden VPK	35076.567577
Pyharannan VPK	Mietoisten VPK	44305.8005266
Pyharannan VPK	Mynamaen VPK	40940.5209789

Pyharannan VPK	Pyhamaan VPK	15051.8785762
Pyharannan VPK	Rautilan paloasema	41371.958136
Pyharannan VPK	Uudenkaupunki	22631.5416601
Pyharannan VPK	Vehmaan VPK	34774.1861427
Rantakulman VPK	Jakarlan VPK	14358.6954824
Rantakulman VPK	Kaarinan VPK	5521.93474045
Rantakulman VPK	Keskusasema	5167.95893698
Rantakulman VPK	Korpo FBK	13257.6722939
Rantakulman VPK	Kuninkojan asema	10755.8424274
Rantakulman VPK	Lielax FBK	11904.2858311
Rantakulman VPK	Lieto	9752.35068161
Rantakulman VPK	Parainen	11138.0773838
Rantakulman VPK	Piikkion VPK	11656.7680675
Rantakulman VPK	Skanssin tai Krossin asema	3634.04081957
Rautilan paloasema	Askaisten VPK	11173.3005294
Rautilan paloasema	Kustavin vpk	19723.4749269
Rautilan paloasema	Lemun VPK	16195.6821344
Rautilan paloasema	Lokalahden VPK	14060.0244699
Rautilan paloasema	Merimaskun VPK	21578.2870912
Rautilan paloasema	Mietoisten VPK	11899.886413
Rautilan paloasema	Mynamaen VPK	17205.9032873
Rautilan paloasema	Nousiaisten VPK	21442.9323013
Rautilan paloasema	Taivassalon VPK	8067.95341194
Rautilan paloasema	Vehmaan VPK	6974.95161977
Rosala FBK	Dragsfjard PVPK	18854.4080303
Rosala FBK	Hiittis FBK	6605.35987481
Rosala FBK	Kimito FBK	37653.3701441
Rosala FBK	Korpo FBK	50427.1564073
Rosala FBK	Lielax FBK	51667.1291854
Rosala FBK	Nagu FBK	50212.2269607
Rosala FBK	Parainen	51366.6432771
Rosala FBK	Pernion VPK Sarkisalo	36790.6448853
Rosala FBK	Pernion VPK Teijo	53747.4923108
Rosala FBK	Vastanfjard FBK	25738.0407333
Ruskon VPK	Jakarlan VPK	6972.56351113
Ruskon VPK	Kaarinan VPK	9983.30478354
Ruskon VPK	Keskusasema	10670.7485559
Ruskon VPK	Kuninkojan asema	4783.73098774
Ruskon VPK	Lieto	11772.4999235
Ruskon VPK	Maskun VPK	6372.98804563
Ruskon VPK	Naantali	11337.3826369
Ruskon VPK	Nousiaisten VPK	10158.6148098
Ruskon VPK	Paattisten VPK	12185.4496509
Ruskon VPK	Vahdon VPK	8942.78367879
Rymattylan VPK	Kaarinan VPK	21327.4328693
Rymattylan VPK	Keskusasema	18855.4735344
Rymattylan VPK	Korpo FBK	18268.1957995
Rymattylan VPK	Kuninkojan asema	21058.8712624
Rymattylan VPK	Lemun VPK	21789.3641492
Rymattylan VPK	Merimaskun VPK	9737.03905249
Rymattylan VPK	Naantali	12898.4051649
Rymattylan VPK	Nagu FBK	19447.082528
Rymattylan VPK	Parainen	20591.3392989
Rymattylan VPK	Rantakulman VPK	20641.9316461
Salo	Halikon VPK Kokkila	13072.3630984
Salo	Halikon VPK Marynummi	6815.99810581
Salo	Kiskon VPK	22905.1290993
Salo	Kuusjoen VPK Kurkela	14343.3031488
Salo	Kuusjoen VPK Ylikulma	19929.4565307
Salo	Muurlan VPK Muurla	9477.81223159
Salo	Pernion VPK Pernio	21533.2930316
Salo	Pernion VPK Teijo	18447.1372186
Salo	Perttelin VPK Kaivola	8324.15728766
Salo	Salon VPK	1249.81785192
Salon VPK	Halikon VPK Kokkila	12094.6912879
Salon VPK	Halikon VPK Marynummi	7519.95023669
Salon VPK	Kiskon VPK	22445.182094

Salon VPK	Kuusjoen VPK Kurkela	15592.0827859
Salon VPK	Kuusjoen VPK Ylikulma	21165.0561402
Salon VPK	Muurlan VPK Muurla	9168.43113256
Salon VPK	Pernion VPK Pernio	20312.9853955
Salon VPK	Pernion VPK Teijo	17247.6579559
Salon VPK	Perttelin VPK Kaivola	9437.22896967
Salon VPK	Salo	1249.81785192
Sauvon VPK	Halikon VPK Kokkila	13907.1571861
Sauvon VPK	Halikon VPK Marynummi	22234.9032421
Sauvon VPK	Kimito FBK	20258.3165638
Sauvon VPK	Lielax FBK	15320.54963
Sauvon VPK	Paimio	12155.2419407
Sauvon VPK	Parainen	22179.8070299
Sauvon VPK	Pernion VPK Teijo	17468.1609846
Sauvon VPK	Piikkion VPK	13434.9468762
Sauvon VPK	Rantakulman VPK	22244.9669584
Sauvon VPK	Skanssin tai Krossin asema	19300.9935435
Skanssin tai Krossin asema	Jakarlan VPK	13498.9003415
Skanssin tai Krossin asema	Kaarinan VPK	6511.60753302
Skanssin tai Krossin asema	Keskusasema	7462.70573582
Skanssin tai Krossin asema	Korpo FBK	15475.3892406
Skanssin tai Krossin asema	Kuninkojan asema	11964.435829
Skanssin tai Krossin asema	Lielax FBK	11429.542522
Skanssin tai Krossin asema	Lieto	7696.65681416
Skanssin tai Krossin asema	Parainen	12749.7560695
Skanssin tai Krossin asema	Piikkion VPK	8031.44208042
Skanssin tai Krossin asema	Rantakulman VPK	3634.04081957
Somerniemen VPK Jakkula	Hirvelan VPK	15961.8499279
Somerniemen VPK Jakkula	Kiikalan VPK	15911.0995647
Somerniemen VPK Jakkula	Kiskon VPK	36422.7676493
Somerniemen VPK Jakkula	Kosken VPK	36923.7396958
Somerniemen VPK Jakkula	Kuusjoen VPK Kurkela	31309.6013099
Somerniemen VPK Jakkula	Kuusjoen VPK Ylikulma	27237.893076
Somerniemen VPK Jakkula	Muurlan VPK Muurla	35820.9788533
Somerniemen VPK Jakkula	Perttelin VPK Kaivola	31865.0357657
Somerniemen VPK Jakkula	Someron PVPK	16315.8336721
Somerniemen VPK Jakkula	Suomusjarven VPK	22010.4744581
Someron PVPK	Halikon VPK Marynummi	32852.2872656
Someron PVPK	Hirvelan VPK	11766.9369146
Someron PVPK	Kiikalan VPK	17757.7770382
Someron PVPK	Kosken VPK	20970.0172204
Someron PVPK	Kuusjoen VPK Kurkela	20233.8118141
Someron PVPK	Kuusjoen VPK Ylikulma	14603.9837552
Someron PVPK	Perttelin VPK Kaivola	24536.2192964
Someron PVPK	Salo	32824.0681461
Someron PVPK	Somerniemen VPK Jakkula	16315.8336721
Someron PVPK	Suomusjarven VPK	27259.4992853
Suomusjarven VPK	Hirvelan VPK	16028.7426286
Suomusjarven VPK	Kiikalan VPK	9522.49962702
Suomusjarven VPK	Kiskon VPK	14414.8858186
Suomusjarven VPK	Kuusjoen VPK Kurkela	25742.1348894
Suomusjarven VPK	Kuusjoen VPK Ylikulma	26046.8150133
Suomusjarven VPK	Muurlan VPK Muurla	17496.3429647
Suomusjarven VPK	Perttelin VPK Kaivola	20700.4074508
Suomusjarven VPK	Salo	25108.087023
Suomusjarven VPK	Salon VPK	25386.8752541
Suomusjarven VPK	Somerniemen VPK Jakkula	22010.4744581
Taivassalon VPK	Askaisten VPK	14043.7703887
Taivassalon VPK	Inio FBK	22003.1192418
Taivassalon VPK	Kustavin vpk	13316.7056276
Taivassalon VPK	Lemun VPK	19797.1991922
Taivassalon VPK	Lokalahden VPK	15261.9138972
Taivassalon VPK	Merimaskun VPK	19994.7859799
Taivassalon VPK	Mietoisten VPK	17941.4494946
Taivassalon VPK	Mynamaen VPK	24357.0961247
Taivassalon VPK	Rautilan paloasema	8067.95341194
Taivassalon VPK	Vehmaan VPK	14660.2537747

Tarvasjoen VPK	Auran VPK	12238.8489953
Tarvasjoen VPK	Halikon VPK Marynummi	21937.3144614
Tarvasjoen VPK	Karinaisten VPK	13561.2031261
Tarvasjoen VPK	Kosken VPK	23017.290141
Tarvasjoen VPK	Lieto	22085.4260982
Tarvasjoen VPK	Marttilan VPK	7119.97936595
Tarvasjoen VPK	Paattisten VPK	19591.7347521
Tarvasjoen VPK	Paimio	14473.583254
Tarvasjoen VPK	Piikkion VPK	21132.7365762
Tarvasjoen VPK	Poytyn VPK	18069.291163
Uudenkaupunki	Kalannin VPK	7795.99611458
Uudenkaupunki	Kustavin vpk	28915.0389925
Uudenkaupunki	Laitilan paloasema	17592.0710635
Uudenkaupunki	Lokalahden VPK	14149.7126055
Uudenkaupunki	Mietoisten VPK	33742.3705674
Uudenkaupunki	Pyhamaan VPK	14019.4430511
Uudenkaupunki	Pyharannan VPK	22631.5416601
Uudenkaupunki	Rautilan paloasema	25462.895401
Uudenkaupunki	Taivassalon VPK	28992.3752352
Uudenkaupunki	Vehmaan VPK	21220.2011428
Vahdon VPK	Auran VPK	16031.0148589
Vahdon VPK	Jakarlan VPK	8389.17318689
Vahdon VPK	Kaarinan VPK	16865.0840067
Vahdon VPK	Kuninkojan asema	12998.8460788
Vahdon VPK	Lieto	14909.8856204
Vahdon VPK	Maskun VPK	12003.2000169
Vahdon VPK	Nousiaisten VPK	12185.1663139
Vahdon VPK	Nousiaisten VPK Valperi	6897.25830579
Vahdon VPK	Paattisten VPK	5706.1215222
Vahdon VPK	Ruskon VPK	8942.78367879
Vastanfjard FBK	Dragsfjard PVPK	10598.6919614
Vastanfjard FBK	Halikon VPK Kokkila	34479.5614177
Vastanfjard FBK	Hiittis FBK	19594.3280817
Vastanfjard FBK	Kimito FBK	13034.3958269
Vastanfjard FBK	Lielax FBK	33649.9368472
Vastanfjard FBK	Pernion VPK Pernio	29463.3063426
Vastanfjard FBK	Pernion VPK Sarkisalo	12080.6512978
Vastanfjard FBK	Pernion VPK Teijo	28014.054145
Vastanfjard FBK	Rosala FBK	25738.0407333
Vastanfjard FBK	Sauvon VPK	33241.787656
Vehmaan VPK	Askaisten VPK	15363.1463538
Vehmaan VPK	Kalannin VPK	17604.8264263
Vehmaan VPK	Lemun VPK	18885.5957092
Vehmaan VPK	Lokalahden VPK	13578.9634533
Vehmaan VPK	Mietoisten VPK	12604.97015
Vehmaan VPK	Mynamaen VPK	14897.4444037
Vehmaan VPK	Nousiaisten VPK	22145.3570272
Vehmaan VPK	Rautilan paloasema	6974.95161977
Vehmaan VPK	Taivassalon VPK	14660.2537747
Vehmaan VPK	Uudenkaupunki	21220.2011428
Ylaneen kirkonkylan VPK	Alastaron paloasema	25716.4710536
Ylaneen kirkonkylan VPK	Auran VPK	27301.2157274
Ylaneen kirkonkylan VPK	Karinaisten VPK	27195.7465534
Ylaneen kirkonkylan VPK	Karjalan VPK	20843.0149029
Ylaneen kirkonkylan VPK	Nousiaisten VPK Valperi	24753.4087593
Ylaneen kirkonkylan VPK	Oripaan VPK	15375.8924412
Ylaneen kirkonkylan VPK	Paattisten VPK	30749.2826402
Ylaneen kirkonkylan VPK	Poytyn VPK	20221.5951513
Ylaneen kirkonkylan VPK	Vahdon VPK	30406.4896048
Ylaneen kirkonkylan VPK	Ylaneen VPK	7714.03643625
Ylaneen VPK	Alastaron paloasema	27291.7239513
Ylaneen VPK	Auran VPK	19623.0434588
Ylaneen VPK	Karinaisten VPK	20715.3192539
Ylaneen VPK	Karjalan VPK	19860.1900684
Ylaneen VPK	Nousiaisten VPK Valperi	18983.6733732
Ylaneen VPK	Oripaan VPK	13640.5587339
Ylaneen VPK	Paattisten VPK	23445.7881906

Ylaneen VPK	Poytyn VPK	12921.2723793
Ylaneen VPK	Vahdon VPK	23791.9420659
Ylaneen VPK	Ylaneen kirkonkylän VPK	7714.03643625