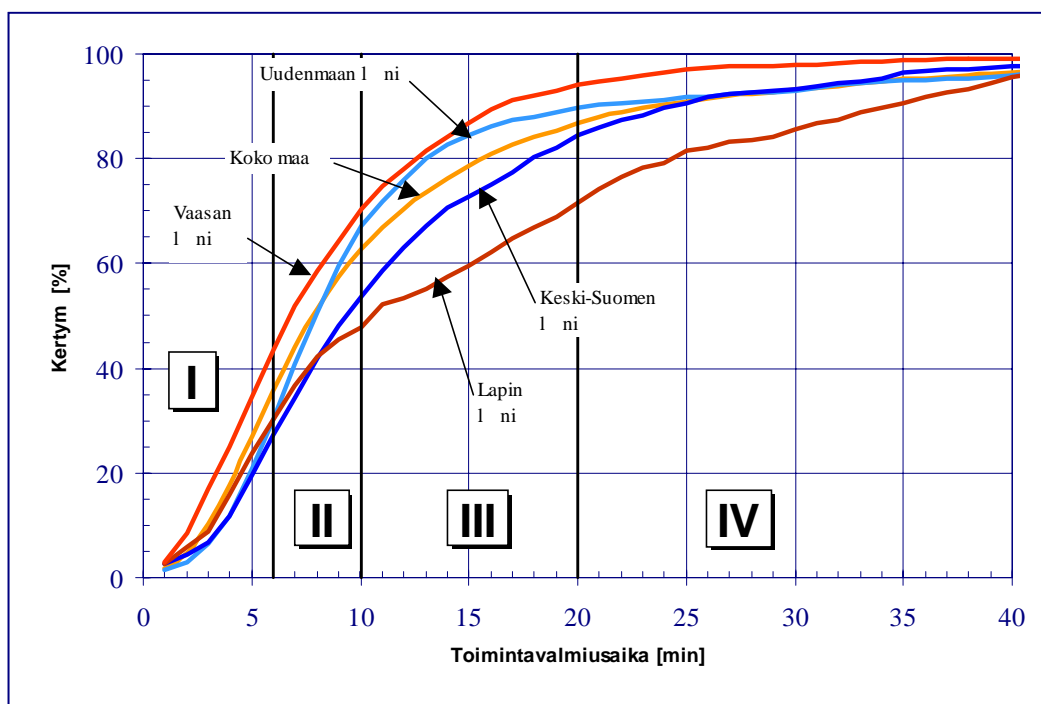


Kati Tillander & Olavi Keski-Rahkonen

Palokunnan saatavuuden merkitys rakennuksen paloriskitarkastelussa



Palokunnan saatavuuden merkitys rakennuksen paloriskitarkastelussa

Kati Tillander

Olavi Keski-Rahkonen

VTT Rakennustekniikka



ISBN 951-38-5634-8 (nid.)
ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-5635-6 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)
ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 2000

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 4374

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 4374

Technical Research Centre of Finland (VTT), Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4374

VTT Rakennustekniikka, Rakennusfysiikka, talo- ja palotekniikka, Kivimiehentie 4, PL 1803, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 4815

VTT Byggnadsteknik, Byggnadsfysik, hus- och brandteknik,
Servicecentrum, Stenkarlsvägen 4, PB 1803, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 4815

VTT Building Technology, Building Physics, Building Services and Fire Technology,
Kivimiehentie 4, P.O.Box 1803, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4815

Toimitus Leena Ukskoski

Otamedia Oy, Espoo 2000

Tillander, Kati & Keski-Rahkonen, Olavi. Palokunnan saatavuuden merkitys rakennuksen paloriski-tarkastelussa. [The influence of fire department intervention to the safety of a building assessed using fire risk analysis]. Espoo 2000, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 2013. 200 s. + liitt. 55 s.

Avainsanat buildings, fire safety, fire prevention, risk analysis, allocation, fire brigade, fire department, failures, statistical analysis, dispatch times, response times, comparison

Tiivistelmä

Palon aiheuttama rasitus rakennuksen erilaisiin toiminnallisiin osiin on esitettävissä erilaisilla riskianalyysin puurakenteilla. Tässä työssä tarkastellaan vikapuutekniikalla erityisesti palokunnan epäonnistumiseen johtavia tekijöitä, joiden tilastotietoihin pohjautuvien todennäköisyyksien määrittäminen oli tutkimuksen päätarkoitus. Työn tärkein tilastolähde oli kansallinen onnettomuustietokanta, ONTIKA, joka myös määritteli vikapuiden erittelyasteet.

Ilmoitusvirran havaittiin olevan Helsingissä tilastollisella tarkkuudella saman kuin koko maassa, mutta toiminta-aikojen eron takia Helsingissä samanaikaisten asiakkaiden (rakennuspalojen) keskimääräinen lukumäärä on vain noin puolet koko maan keskimääräisestä arvosta.

Kun Suomen olosuhteisiin sovellettiin kansainvälisestä kirjallisuudesta poimittuja malleja, todettiin, että estotodennäköisyys eli todennäköisyys, että hälytyksen tullessa lähimmän aseman kaikki yksiköt ovat varattuina muihin tehtäviin, on melko pieni koko Suomen alueella. Näin ollen pelastushenkilöstön määrää voidaan pitää kattavana koko maassa.

Yksi työn osa-alueista oli verrata palokuntien lähtövalmius-, toimintavalmius- ja palveluaikojen alueellisia eroja maassamme. Koko Suomen valmius- ja palveluaikojen havaittiin olevan kuvattavissa likimain gammajakaumilla. Ajoajan osuus toimintavalmiusajasta tuli selvästi näkyviin Mikkelin, Kuopion ja Lapin lääneissä. Ajoaikojen alueellisia ja ajoneuvotyypin välisiä eroja tarkasteltiin sovittamalla esimerkkialueiden havaintoihin karkea ajoaikamalli, jonka avulla määriteltiin yleisimmille ajoneuvotyypeille ajoaikakaavat. Johtopäätöksenä todettiin, että palokuntien onnistuminen Suomessa on useimmiten riippuvainen ajoajan pituudesta kohteeseen.

Työssä esitetään lisäksi kaksi operatiivisten yksiköiden sijoituksen optimoinnin periaatteet osoittavaa mallia, joita ei tämän tutkimuksen puitteissa sovellettu käytäntöön.

Lopuksi osoitetaan esimerkeillä, miten kehitetyllä menetelmällä palokuntien osuus voidaan ottaa huomioon kohteen paloteknisessä toiminnallisessa suunnittelussa.

Tillander, Kati & Keski-Rahkonen, Olavi. Palokunnan saatavuuden merkitys rakennuksen paloriskitarkastelussa. [The influence of fire department intervention to the safety of a building assessed using fire risk analysis]. Espoo 2000, Technical Research Centre of Finland, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 2013. 200 p. + app. 55 p.

Keywords buildings, fire safety, fire prevention, risk analysis, allocation, fire brigade, fire department, failures, statistical analysis, dispatch times, response times, comparison

Abstract

The fire actions on the different functional parts of a building are best expressed with various tree structures of risk analysis. In this study particularly the probabilities of the elements leading to fire department failure are analyzed with the fault-tree technique. The main purpose of this study was to determine these probabilities based on statistics. The most important statistical source was the national accident data base, ONTIKA, which also prescribed the degree of refinement of the fault tree.

The alarm rate in the entire country was statistically the same as in Helsinki. However, as a result of the difference between operating times, the average number of simultaneous clients (fires) in Helsinki is only half of the number in entire country.

When models from international literature were applied to the Finnish environment, it was found that in Finland the probability that all units are reserved, the blocking probability, is rather low and thereby the number of the rescue personnel is adequate in the entire country.

One sub-area of this study was to compare the regional differences between the fire departments dispatch times, fire system response times, and operating times in Finland. It was found that each of these phenomena were described approximately by gamma distributions. The effect of travel time in the response time was conspicuous in the provinces of Mikkeli, Kuopio and Lapland. The differences in travel time between different regions and vehicle types were analyzed by fitting a rough travel time model to the data of the example areas. With this model the travel time formulas for the most common vehicle types were determined. It was discovered that in most cases the success of the fire department is dependent on the travel time.

Also two models indicating the principles for optimizing the allocation of fire units are demonstrated but are not applied in practice within this master's thesis.

Finally, through examples it is shown, how this developed method can be applied to take into account the contribution of fire department in performance based fire safety design of buildings.

Alkusanat

Tämä raportti on VTT Rakennustekniikassa vuosina 1996–2000 käynnissä olevan kansallisen tutkimusohjelman ”Toiminnallisten palosäädösten tekniset perusteet” (TOPA-projekti, osaprojekti A6: palokunnan toimintaedellytykset, loppuraportti). Työn tarkoituksena on saada kvantitatiivisia ohjeita palokunnan osuudesta toiminnallisen paloteknisen mitoituksen pohjaksi.

Tutkimusta rahoittavat Palotutkimusraati ry, Palosuojelurahasto, ympäristöministeriö, Suomen Vakuutusyhtiöiden Keskusliitto, Rakennustuoteteollisuus ry, Suomen Puututkimus Oy, Teräsrakenneyhdistys ry, Suomen Muoviteollisuusliitto ry sekä VTT Rakennustekniikka.

Raportti perustuu Kati Tillanderin Teknillisessä korkeakoulussa tekemään samannimiseen diplomityöhön. Työn valvojana ja ohjaajana toimi VTT Rakennustekniikasta dosentti Olavi Keski-Rahkonen. Diplomityön raporttia on tässä hieman laajennettu ja otettu huomioon kentältä saatua palautetta.

Kiitämme VTT Rakennustekniikan Palotekniikan työntekijöitä sekä Juha-Pekka Laakosta (Helsingin pelastuslaitos), Seppo Männikköä (Tampereen aluepelastuslaitos), Ossian Lahnalampea (Kälviän palolaitos) ja Tauno Pentistä (Jyväskylän mlk:n palolaitos) heidän antamastaan avusta. Kiitokset myös professori Jorma Virtamolle (TKK), jonoteorian opettamisesta.

Lisäksi kiitämme arvokkaita kommentteja antaneita Pekka Kallioniemeä (TEVA), Esko Kaukosta (Pelastusopisto), Antti Lastua (SPEK) sekä Jari Terviötä (Helsinki–Vantaan lentoasema) heidän työtä kohtaan osoittamastaan kiinnostuksesta. Kiitoksemme myös muille työssä avustaneille henkilöille.

Tässä työssä korvaamaton apuväline oli sisäasiainministeriön pelastusosaston ylläpitämä ONTIKA-tietokanta. Kiitokset myös sisäasiainministeriön pelastusosaston henkilökunnalle.

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	3
Abstract	4
Alkusanat	5
Symbolit ja määritelmät	10
1. Johdanto	13
1.1 Tutkimuksen taustaa	13
1.2 Tutkimuksen tavoitteet	13
1.3 Tutkimuksen toteutus ja rajaus	14
2. Paloriskianalyysia	15
2.1 Vikapuu	15
2.2 Tuhoutuneen omaisuuden arvo	17
2.2.1 Yleistä	17
2.2.2 Lineaarinen vastefunktio	19
2.2.3 Epälineaarisia vastefunktioita	24
2.2.4 Tuhoutumisprosentti	25
2.2.5 Vaimennettu Pareton-jakauma	26
2.2.6 Yhteenveto	28
2.3 Palokuolemat	28
2.3.1 Yleistä	28
2.3.2 Lineaarinen vastefunktio	29
2.3.3 Epälineaarisia vastefunktioita	31
2.3.4 Yhteenveto	31
3. Teoria	32
3.1 Syttymien aikajakauma	32
3.2 Tulipalojen määrä	34
3.2.1 Aikaisempia tutkimuksia	34
3.2.2 Taustaa Suomen tulipalojen määristä	37
3.2.3 Taajama-aste	39
3.2.4 Kerrosala asukasta kohden	42
3.2.5 Tehollinen säde	43
3.2.6 Asukastiheys	45
3.2.7 Asukasluku	46
3.2.8 Hälytysten määrän korrelaatio	47
3.2.9 Yhteenveto	50

4. Pelastusyksiköiden toiminta paikkakunnalla	52
4.1 Teoreettinen malli	52
4.1.1 Aikaisemmat tutkimukset	52
4.1.2 Määritelmiä	53
4.1.3 Palokuntien palveluiden saatavuuden jonoteoreettiset mallit	54
4.1.3.1 Estojärjestelmä ja Erlangin estokaava	55
4.1.3.2 Ääretön määrä odotuspaikkoja, yksi palvelupaikka	60
4.1.3.3 Ääretön määrä odotuspaikkoja, S palvelupaikkaa	66
4.1.3.4 Ominaisuuksiltaan erilaiset jonot	70
4.1.4 Todelliset esimerkit	82
4.1.4.1 Novomoskovsk	82
4.1.4.2 Helsinki	85
4.1.4.3 Koko Suomi	89
4.1.5 Herkkyysanalyysi	93
4.1.6 Yhteenveto	95
4.1.7 Kaupungin paloasemien määrä ja sijoitus	96
4.1.7.1 Brušlinskin sijoitusmalli	97
4.1.8 New Yorkin sijoitusmalli	100
5. Lähtö- ja toimintavalmiusajat	108
5.1 Aikaisemmat tutkimukset	108
5.2 Yleistä	108
5.3 Lähtövalmiusaika	110
5.3.1 Kunnallisten palokuntien valmiusasteet	110
5.3.2 Lähtövalmiusaika minuutin luokissa	110
5.3.3 Lähtövalmiusaika sekunnin luokissa	111
5.3.4 Gammajakauman sovitus	113
5.3.5 Ajoneuvojen määritelmiä	115
5.3.6 Ajoneuvojen lähtövalmiusajat	116
5.3.7 Gammajakauman sovitus	119
5.4 Toimintavalmiusaika	121
5.4.1 Riskialueet	122
5.4.2 Kertymäfunktiot	124
5.4.3 Gammajakauman sovitus	126
5.4.4 Ajoneuvojen toimintavalmiusajat	128
5.4.5 Gammajakauman sovitus	131
5.5 Palveluaika	132
5.5.1 Operatiivisten yksiköiden palveluaika	132
6. Ajoaikakorrelaatiokaavan määrittäminen	135
6.1 Tehtävä, menetelmät	135
6.2 Ajoaikateoria	135

6.2.1	Keskimääräinen ajomatka	135
6.2.2	Ajoajan riippuvuus ajomatkasta	136
6.3	Helsinki	141
6.4	Tampere	142
6.5	Maaseutukunnat	143
6.6	Ajoajan riippuvuus matkasta	144
6.6.1	Sovite	144
6.6.2	Luottamusvälit	147
6.6.3	Yhdistely	149
6.6.3.1	Eri paikkakuntien pelastus- ja johtoyksiköt	149
6.6.3.2	Alueittainen yhdistely	152
6.6.3.3	Yhteenvedo	154
7.	Palokunnan epäonnistumisen arviointi	155
7.1	Teoreettisia perusteita	155
7.1.1	Epäonnistumisen tapahtuma- ja vikapuu	155
7.1.2	Palokunnan sammutuskyky	158
7.2	Suuri liikerakennus Jyväskylän alueella	160
7.2.1	Ehtiikö palokunta ajoissa?	160
7.2.2	Palokunta ei lähde koko vahvuudessaan	166
7.2.3	Yhteenvedo	167
7.3	VTT Otaniemen maamerkki	168
7.3.1	Palotehojen määrittäminen	175
7.3.1.1	Myymälät	175
7.3.1.2	Kahvila-aulatila	175
7.3.1.3	Kahvila-ravintola	175
7.3.1.4	Toimisto	175
7.3.2	Ehtiikö palokunta ajoissa?	176
7.3.3	Yhteenvedo	182
7.3.3.1	Ostoskeskus	182
7.3.3.2	Hotelli	182
7.3.3.3	Toimistotilat	183
7.3.4	Koko rakennus	184
7.4	Itämerentori	185
7.4.1	Palo atriumissa	185
7.4.2	Maanalaiset kerrokset	186
7.4.3	Toimistotilat	187
7.4.4	Ehtiikö palokunta ajoissa?	189
7.4.5	Yhteenvedo	191
7.4.5.1	Osasto 1	191
7.4.5.2	Toimistotilat	192

8. Yhteenveto	193
Lähdeluettelo	196

LIITTEET

- Liite A: Brušlinskin mallin virhearviot
- Liite B: 8 yksikön tilat
- Liite C: Lähtövalmiusajat
- Liite D: Toimintavalmiusajat
- Liite E: Helsingin yksiköiden aikajakaumat
- Liite F: Koko maan pelastusyksiköiden aikajakaumat
- Liite G: Kunnallisten palokuntien hälytysluonteiset lähdöt
- Liite H: Kaupunkien palokuntien lukumäärät
- Liite I: Ajoaika-ajomatkasovitteet
- Liite J: Otaniemen maamerkin syttymien ja sammutuksen epäonnistumisen todennäköisyydet

Symbolit ja määritelmät

a	kiihtyvyys [m/s ²]
A_l	tapahtuma, jossa hälytystehtävän hoitoon lähtee l yksikköä
B_l	tapahtuma, jossa hälytystehtävän hoidosta vapautuu l yksikköä
c	ilmoitusvirta asukasmäärää kohden. Käytännöllinen tapa on ilmoittaa lukuarvo 1 000 asukasta kohden vuodessa
C_M^N	kombinaatioiden lukumäärä, millä M kappaletta voidaan poimia N :n joukosta
D	tehokkuuskerroin
f, F	taajuus
F_E	systemin tilaan E siirtymisen taajuus
$f_{EE'}$	siirtymätaajuus tilasta E tilaan E' [1/d]
$I_E\{A_l\}$	tapahtumavirta; tilassa E olevan järjestelmän A_l -tapahtumien lukumäärä [1/d]
$I_E\{B_l\}$	tapahtumavirta; tilassa E olevan järjestelmän B_l -tapahtumien lukumäärä aikayksikössä [1/d]
l	hälytykseen kerralla lähtevien yksiköiden lukumäärä
N, n, k, M, L	lukumäärä
\bar{N}	asiakkaiden määrä systeemissä tietyllä ajan hetkellä

P	todennäköisyys
P_E	todennäköisyys, että systeemi on tilassa E mielivaltaisella hetkellä
$P_{EE'}$	systeemin suoran siirtymisen tilasta E tilaan E' todennäköisyys
Q_c	paloteho [W]
s	matka
S	palvelupaikkojen lukumäärä
t, T	aika (perusyksikkö sekunti [s], pitempiä käytännöllisiä yksiköitä soveltuvien kohdina: minuutti [min], tunti [h], vuorokausi [d], vuosi [a])
$\overline{T_E}$	systeemin tilan E keskimääräinen kesto
$t_{\frac{\alpha}{2}}$	t-jakauman parametri
u	asukasluku
\overline{W}	toiminta-aika
W	odotusaika, kokonaishaittafunktio
$w_i\{n_i\}$	haittafunktio
v	nopeus [km/h]
V	vahingon suuruus [mk]
α, β	gammafunktion parametreja
$\gamma(\alpha, \beta)$	epätäydellinen gammafunktio
$\Gamma(\alpha)$	gammafunktio

λ	ilmoitusvirta [1/d]
$\bar{\lambda}_i$	tehollinen työaika
μ	vapautuvien yksiköiden virta, lasketaan keskimääräisestä toiminta-ajasta [1/d]
ρ	palvelukerroin
σ	keskihajonta
τ	toiminta-aika
Ilmoitusvirta asukasmäärää kohden	hälytysten määrä aikayksikössä asukasta kohden. Käytännöllinen tapa on ilmoittaa lukuarvo 1 000 asukasta kohden vuodessa.
Ilmoitusvirta kerrosalaa kohden	hälytysten määrä aikayksikössä kerrosalaa kohden. Käytännössä lukuarvo lasketaan yhtä kerrosalan neliökilometriä (miljoona m ²) kohden vuodessa.
Ilmoitusvirta pinta-alaa kohden	hälytysten määrä aikayksikössä pinta-alaa kohden. Käytännössä lukuarvo lasketaan tuhatta pinta-alan neliökilometriä kohden vuodessa.
ONTI	sähköinen onnettomuustilastointijärjestelmä, johon jokaisen kunnan tulee pyrkiä syöttämään tiedot palo- ja pelastustoimelle kuuluvista onnettomuuksista.
ONTIKA	valtakunnallinen onnettomuustietokanta, sisäasianministeriön pelastusosaston ylläpitämä järjestelmä, johon ONTI:n tiedot kootaan.

1. Johdanto

1.1 Tutkimuksen taustaa

VTT Rakennustekniikassa käynnissä olevan kansallisen tutkimusohjelman ”Toiminnallisten palosäädösten tekniset perusteet” (TOPA-projekti) tavoitteena on kehittää Suomen olosuhteisiin soveltuvat menetelmät ja menettelytavat, jotta toiminnalliset palosäädökset voitaisiin ottaa käyttöön uudistuneen E1:n rinnalle vuoteen 2001 mennessä. Perinteisissä palosäädöksissä rakennusten paloturvallisuutta on säädelty asettamalla yksityiskohtaisia vaatimuksia rakennustarvikkeiden ja rakennusosien palo-ominaisuuksille tai rakennusten koolle ja muille ominaisuuksille. Toiminnallisissa palosäädöksissä paloteknisten suunnitelmien hyväksyttävyyden ratkaisee ainoastaan tulipaloriski eli palovahinkojen odotusarvo rakennuksen käyttöänsä aikana. Palovahingoiksi lasketaan sekä henkilö-, omaisuus- että ympäristövahingot (Kokkala 1996, Keski-Rahkonen 1997). Toiminnallisen suunnittelun perusajatuksena on tehdä kohteelle riskianalyysi, joka pohjautuu tilastollisiin malleihin (Keski-Rahkonen & Björkman 1999b). Riskianalyysin teoria on ollut tunnettua pitkään ja sitä on sovellettu laajalti onnettomuuksien estämiseen esimerkiksi ydintekniikan ja kemian tekniikan alalla. Palotekniikassa menetelmien käyttöä on estänyt lähes täydellinen tilastoaineiston puuttuminen. TOPA-projektissa (Rahikainen 1998, Rahikainen & Keski-Rahkonen 1998 a,b,c) tätä aukkoa on katettu tekemällä laajahkoja kartoituksia käyttämällä varsinkin sisäasiainministeriön ylläpitämää ONTIKA-tietokantaa. Toiminnallisessa suunnittelussa on osattava laskea koko prosessin riskit, ja palokunnat ovat osa tästä kokonaisuudesta ja niiden resurssit tulisi ottaa huomioon rakennussuunnittelussa. Tämä työ jatkaa tilastojen analyysiä käyttäen ja nojautuen osittain aiempiin töihin (Rahikainen 1998, Keski-Rahkonen & Björkman, 1999a) mutta pyrkii sen lisäksi keräämään edustavasti palokuntien toiminnasta laadittuja malleja kansainvälisestä kirjallisuudesta ja soveltamaan niitä Suomen olosuhteisiin. Työn ensimmäinen vaihe esitettiin Tillanderin (1999) diplomityönä, joka monistettiin TOPA-projektin sekä muiden asiasta kiinnostuneiden lausunnolle. Alan ensimmäisenä suomenkielisenä tieteellisenä tutkimuksena tehtävä paisui yli diplomityön laajuuden ja työtä jatkettiin, jotta lupaavat tulokset voitaisiin tuoda käytännössä hyödynnettävälle tasolle. Tässä raportissa on otettu huomioon lukijoiden palautetta, täydennetty diplomityössä suppeasti käsiteltyjä kohtia sekä lisätty sovellus-esimerkkejä auttamaan tulosten soveltamista käytännön suunnittelukohteisiin.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet

Tutkimuksen tarkoituksena oli saada mm. tilastoanalyysia apuna käyttäen kvantitatiivisia ohjeita toiminnallisen mitoituksen pohjaksi. Tämä toteutettiin konstruoimalla vika-puu, johon pyrittiin valtakunnallisen onnettomuustietokannan, ONTIKAN, avulla määrittämään eri tekijöiden todennäköisyydet, jotka pohjautuvat tilastotietoihin eivätkä pel-

kästään asiantuntija-arvioon. Vikapuun ja sen todennäköisyyksien avulla voidaan määrittää palokunnan saatavuuden merkitys toiminnallisista lähtökohdista suunnitellun rakennuksen paloriskitarkastelussa.

Lisäksi tutkittiin palo- ja pelastustoimen valmiusaikoja ja toiminta-aikaa sekä niiden jakautumista. Tähän tarvittavat tiedot löytyivät ONTIKASTA. Tulipalojen määrän riippuvuutta eri tekijöistä tarkasteltiin pyrkimyksenä arvioida ne tunnusluvut, joiden perusteella palokunnan resursseja tulisi jakaa, jotta palotoimen palvelutaso olisi kattava koko maassa. Ajoajan riippuvuutta ajomatkastasta tarkasteltiin erityyppisillä alueilla tarkoituksena tutkia eroavaisuuksia erityyppisten paikkakuntien ja ajoneuvotyyppien välillä. Lisäksi kansainvälisestä kirjallisuudesta poimittujen mallien avulla oli tarkoituksena määrittää palo- ja pelastustoimen operatiivisten yksiköiden optimaalinen lukumäärä siten, että todennäköisyys sille, että kaikki yksiköt olisivat samanaikaisesti varattuina, on riittävän pieni. Näiden tekijöiden avulla palokunnan epäonnistumisen todennäköisyyttä voitiin tarkastella vikapuun kautta.

1.3 Tutkimuksen toteutus ja rajaus

Tutkimus rajoitettiin kattamaan vain rakennuspaloja vuosilta 1994–1997, joiden tilastolliset tiedot saatiin valtakunnallisesta onnettomuustietokannasta, ONTIKASTA. ONTIKASTA poimittua aineistoa muokattiin Microsoft Excelin VBA-kielisillä makroilla ja jakaumien sovittamisessa käytettiin hyväksi STATISTICA-ohjelmaa (StaSoft, 1995). Kuntien pinta-alat, väkiluvut ja kerrosalat saatiin Tilastokeskuksesta.

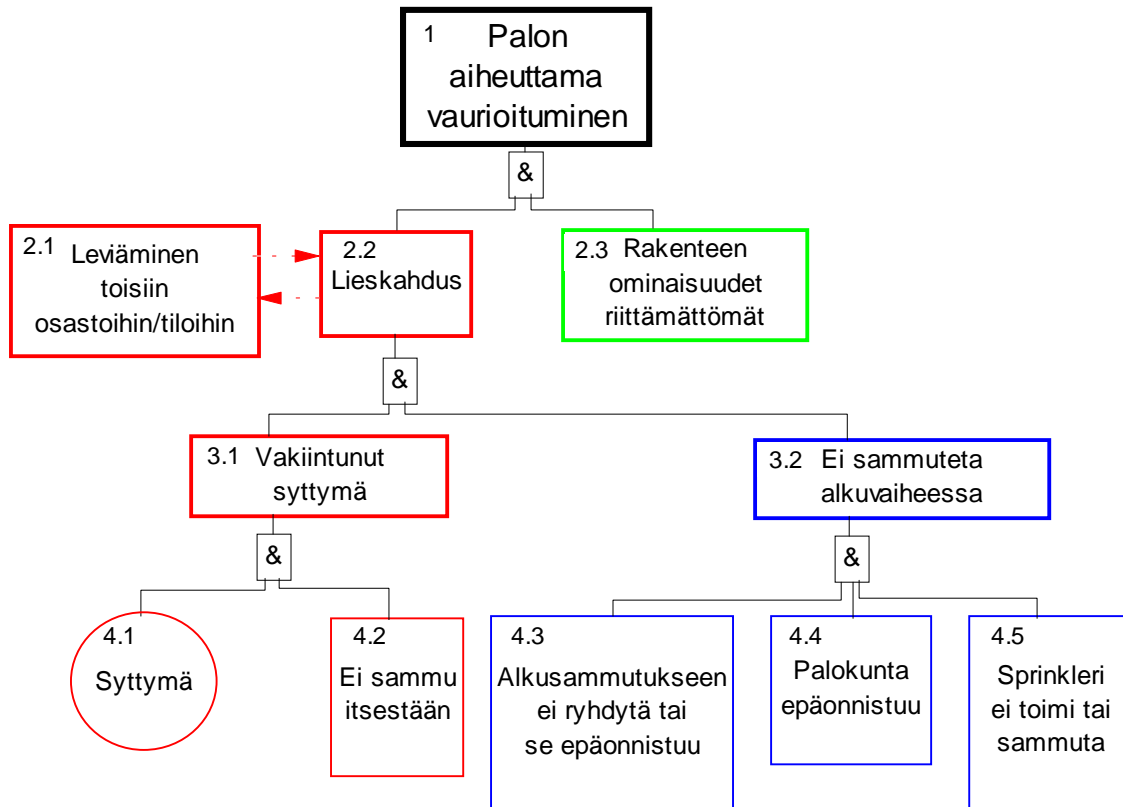
Tutkimuksen ulkopuolelle rajattiin Ahvenenmaan maakunta, missä ONTIKASTAAN ei ole syötetty tietoja mainitulta ajalta.

2. Paloriskianalyysia

2.1 Vikapuu

Paloriskianalyysissa kohdetta arvioidaan kaikkien mahdollisten palovahinkojen ja tilanteiden kannalta. Sattuneet palovahingot ja niistä tehtävät tilastoanalyysit auttavat arvioimaan, millaisia tilanteita tarkasteluun on otettava mukaan. Paloriskianalyysia voidaan tehdä monella eri tarkkuustasolla, jolloin myös analyysin kustannukset voivat vaihdella paljonkin. Toiminnallisen suunnittelun pohjaksi on vahvistumassa uhkakuvamalli, missä kaikki mahdolliset paloriskit kohteessa pyritään ottamaan huomioon muutamalla tilanteella, joihin sijoitetaan vakioitu mitoituspalo (Keski-Rahkonen & Björkman 1999b) Mitoituspalo määritetään siten, että se kuvaa keskimääräisesti tulipalon aiheuttamaa uhkaa koko maan rakennuskantaan. Mitoituspaloja voi olla muutamia erilaisia sen mukaan, tarkastellaanko henkilöihin, omaisuuteen vai ympäristöön kohdistuvaa uhkaa. Sen lisäksi voimme tarkastella palon rakennuksen erilaisiin toiminnallisiin osiin aiheuttamaa rasiusta, mikä on parhaiten esitettävissä erilaisilla riskianalyysin puurakenteilla. Tässä luvussa tarkastellaan vikapuutekniikalla erityisesti palon aiheuttamaa vaurioitumista sekä tutkitaan tilastoaineiston pohjalta omaisuusvahinkojen ja palokuolemien ajallista jakaumaa palon havaitsemishetkeen verrattuna.

Vikapuuta voidaan käyttää apuna määrittäessä syy-yhteyksiä jonkin tietyn ei-toivotun tapahtuman ilmenemiseen. Puu muodostuu tapahtumista sekä niiden välisistä porteista. Tarkastelun alaisena oleva päätapahtuma on puussa ylinnä. Päätapahtumasta haarautuvat tapahtumat, jotka myötävaikuttavat päätapahtuman esiintymiseen. Nämä on liitetty päätapahtumaan JA- tai TAI-porteilla. Jokainen näistä tapahtumista jaetaan samankaltaisesti edelleen, jolloin syntyy puukaavio. Määrittämällä juuresta lähtien tapahtumien todennäköisyydet saadaan lopulta päätapahtuman todennäköisyys. Riippuen portista saman tason todennäköisyydet joko kerrotaan tai lasketaan yhteen keskenään. JA-portin ollessa kyseessä todennäköisyydet kerrotaan ja TAI-portin tapauksessa ne lasketaan yhteen.



Kuva 1. Esimerkki vaurioitumisen vikapuusta (CIB 1983).

Kuvassa 1 on esimerkki palon aiheuttamaan vaurioitumiseen johtavasta vikapuusta (CIB 1983). Puun kaikki portit ovat JA-portteja, joten todennäköisyydet joka tasolla kerrotaan keskenään. Puu on ollut tunnettuna pitkään, mutta sen käytännön soveltaminen tähän saakka on ollut vähäistä puuttuvien tilastotietojen takia. Nyt saadun uuden tiedon pohjalta voimme käyttää sitä Suomessa. Tarkastellaan vikapuuta alhaalta ylöspäin. (4.1) Syttymän todennäköisyytenä pinta-alayksikköä kohden voidaan käyttää suurissa rakennuksissa ($> 300 \text{ m}^2$) arvoa $1 \cdot 10^{-5}/\text{m}^2\text{a}$ (Rahikainen & Keski-Rahkonen 1998 a,b,c). Kertomalla tämä syttymistäajuustiheys palo-osaston pinta-alalla saadaan rakennuksen syttymistäajuus vuodessa. Tietyllä todennäköisyydellä (Keski-Rahkonen & Björkman 1999b) (4.2) syttymä ei sammu itsestään ja kertomalla todennäköisyydet (4.1) ja (4.2) saadaan (3.1) vakiintuneen syttymän todennäköisyys. Tulipalon syttyä, jos (4.3) alkusammutukseen ei ryhdytä tai se epäonnistuu ja samanaikaisesti (4.5) automaattinen sammutusjärjestelmä ei toimi tai ei sammuta ja lisäksi palokunnan saavuttua paikalle se (4.4) epäonnistuu, sammuttamisessa seuraa tilanne, että (3.2) paloa ei sammuteta alkuvaiheessa. Tämän todennäköisyys saadaan kertomalla laatikoiden (4.3)–(4.5) todennäköisyydet keskenään. Palokunnan epäonnistumista (4.4) käsitellään lähemmin luvussa 7. Siihen vaikuttavat monet eri tekijät, ja tämän työn tarkoituksena on selvittää niitä kvantitatiivisia menetelmiä, joilla palokunnan epäonnistumisen todennäköisyydestä saataisiin luotettava arvio vikapuuhun. Kun syttymä on vakiintunut eikä sitä ole sammutettu alkuvaiheessa, palo johtaa lieskahdukseen. Lieskahduksen todennäköisyys saadaan kertomalla (3.1) vakiintuneen syttymän ja (3.2) puuttuvan alkusammutuksen toden-

näköisyydet keskenään. Kun rakennus (2.2) lieskahtaa, palo (2.1) leviää muihin tiloihin ja palo-osastoihin, ja jos lisäksi (2.3) rakennuksen ominaisuudet ovat riittämättömät kes-
tämään lieskahdus, syntyy (1) palon aiheuttamaa vaurioitumista, jonka todennäköisyys
saadaan kertomalla laatikoiden (2.2) ja (2.3) todennäköisyydet keskenään. Tämä vika-
puu on kuitenkin vain yksi esimerkki, yhdelle rakennukselle ja sen palotapahtumalle
voidaan piirtää useita kuvan 1 kaltaisia vikapuita vaihtamalla huipputapahtuman luon-
netta tai fyysistä kohdetta rakennuksessa.

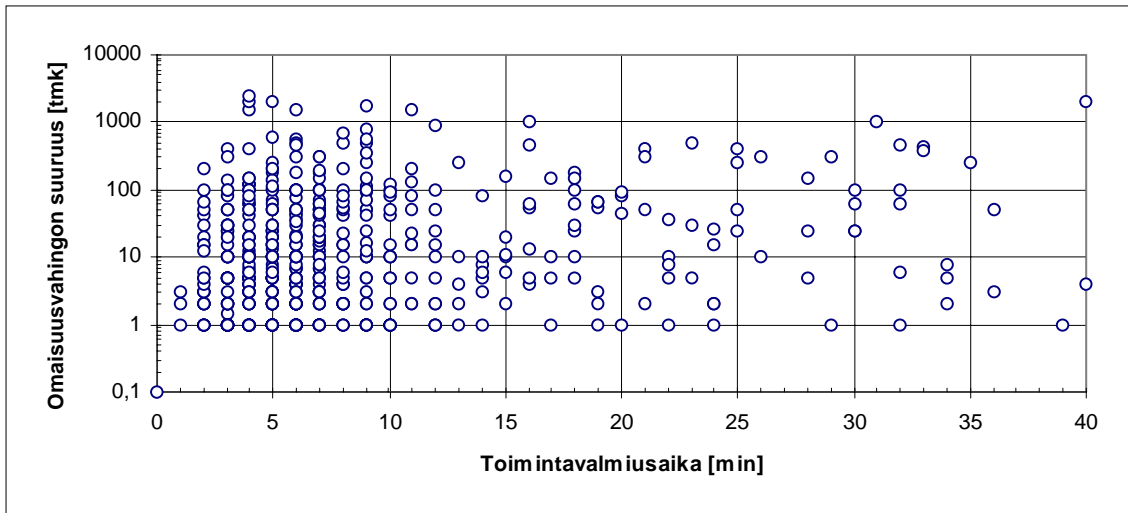
2.2 Tuhoutuneen omaisuuden arvo

2.2.1 Yleistä

Tämän kohdan tarkoituksena on tilastoaineiston pohjalta vastata kysymykseen: Kyke-
neekö palokunta ripeällä toiminnallaan vaikuttamaan omaisuusvahinkojen määrään?
Kvalitatiivisen vastauksen lisäksi pyrittiin luonnostelemaan kvantitatiivinen malli, josta
voitaisiin karkeasti arvioida toiminnan nopeuden vaikutus vahinkojen suuruuteen.

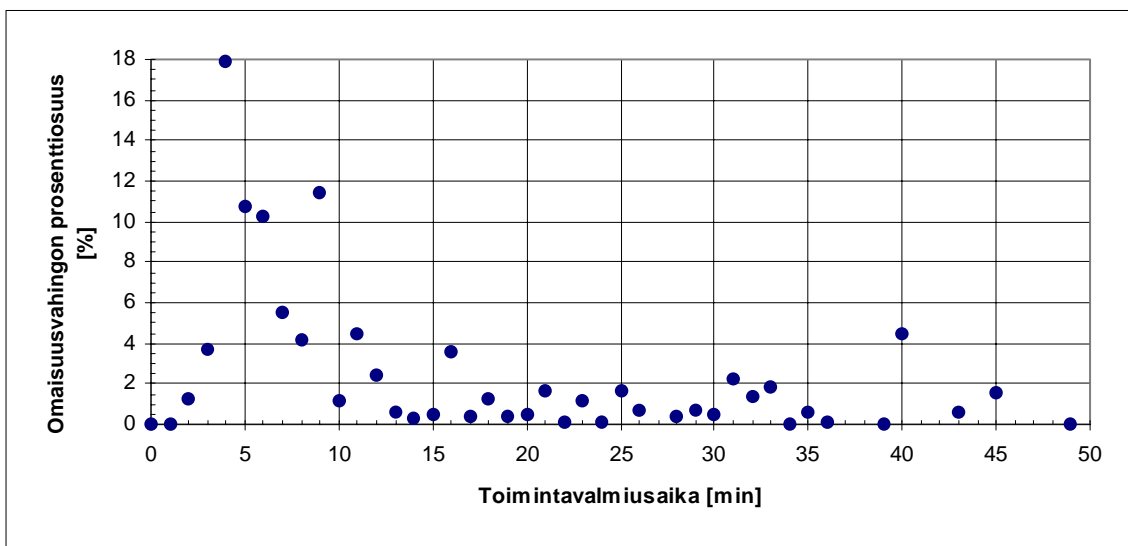
Tutkimuksen pohjana käytettiin Tampereen kaupungissa tehtyä palotapausten seuranta-
järjestelmän kokeilua vuosilta 1989–1990¹ (Lehtinen 1991), sillä ONTIKAssa ei ollut
käytettävissä tätä tietoa. Kokeiluun kuului yksitoista kuntaa, joita olivat Hämeenkyrö,
Kemijärvi, Kerava, Kuopio, Kuusankoski, Lieksa, Peräseinäjoki, Suomussalmi, Tampe-
re, Viiala ja Virrat. Käytettävissä olevia havaintoja rakennuspaloista tänä aikana oli 717
kappaletta, joista kelvollisia oli 656. Havainnoista kävi ilmi kussakin palossa tuhoutu-
neen sekä uhattuna olleen omaisuuden suuruus sekä palo- ja pelastustoimen toiminta-
valmiusaika. Kuvassa 2 y-akselilla on jokaisen tapauksen omaisuusvahingon suuruus tu-
hansina markkoina ja x-akselilla toimintavalmiusaika minuutteina. Siitä ei silmä-
varaisesti havaita vahingon voimakasta riippuvuutta toimintavalmiustajasta.

¹ Vuonna 1991 valmistuneen tutkimuksen suorittivat Tampereen kaupungin palo- ja väestönsuojelu-
päällikkö Sakari Lehtinen sekä johtava palotarkastaja Seppo Männikkö.



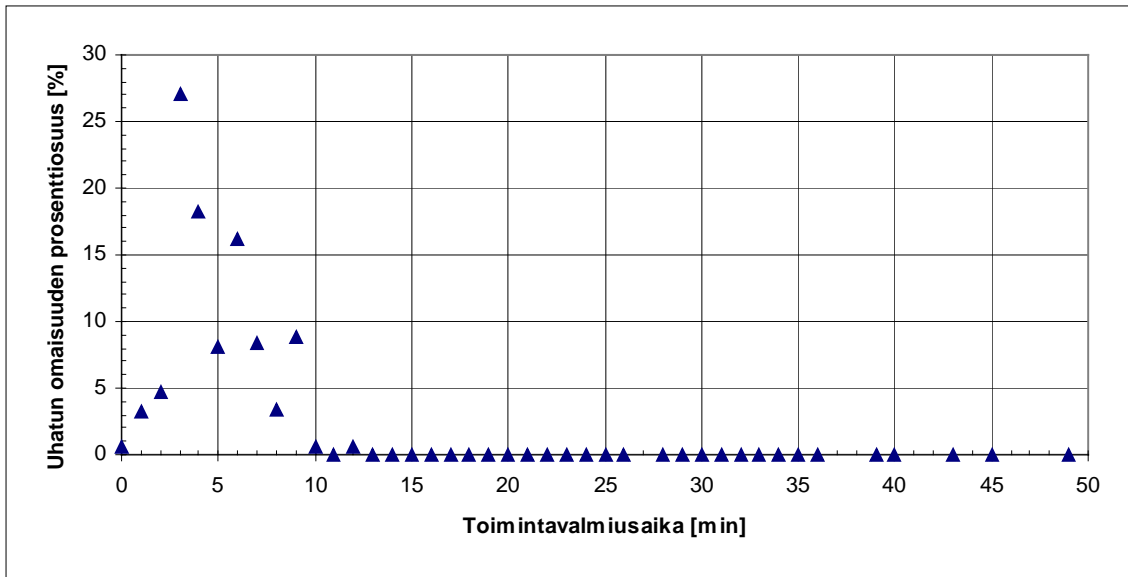
Kuva 2. Omaisuvahingon suuruus tuhansina markkoina.

Omaisuvahingon suuruus toimintavalmiusajan kutakin minuuttia kohden saatiin laskeamalla yhteen niiden hälytysten omaisuvahinkojen suuruudet, joihin palokunta oli saapunut samalla minuutilla. Kuvassa 3 on kutakin toimintavalmiusajan minuuttia vastaava omaisuvahingon prosentuaalinen osuus kokonaisvahingosta. Kokonaisvahinko eli kaikkien havaintojen ($N = 656$) yhteenlaskettu omaisuvahinko oli 45,1 milj. mk.



Kuva 3. Omaisuvahingon prosentuaalinen osuus kokonaisvahingosta kutakin toimintavalmiusajan minuuttia kohden.

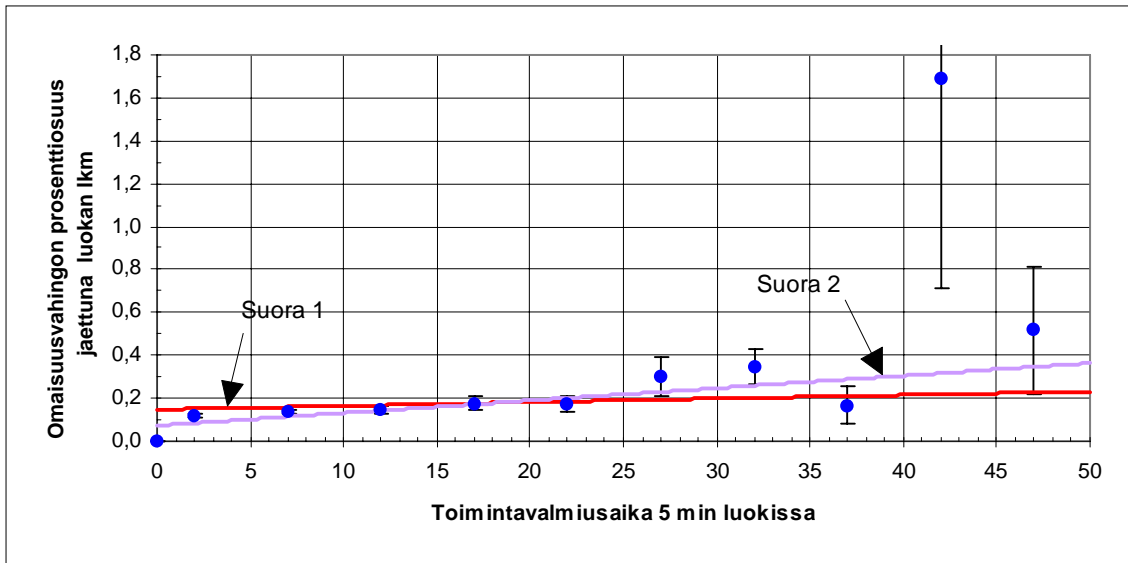
Kun tarkastellaan vastaavaa käyrää uhatun omaisuuden suuruudesta toimintavalmiusajan minuuttia kohden havaitaan, miksi omaisuvahingon suuruus on korkeimmillaan toimintavalmiusajan pienillä arvoilla. Kuvasta 4 nähdään, että kohteissa, joihin palokunta on saapunut nopeasti, on myös uhatun omaisuuden arvo ollut suurin ja siten myös pallossa tuhoutuneen omaisuuden arvo on kasvanut suureksi.



Kuva 4. Uhatun omaisuuden prosentuaalinen osuus koko uhatusta omaisuudesta kutakin toimintavalmiusajan minuuttia kohden.

2.2.2 Lineaarinen vastefunktio

Toimintavalmiusaika jaettiin viiden minuutin luokkiin ja omaisuusvahingon suuruus luokkaa kohden määritettiin laskemalla summa luokkaan kuuluvista havainnoista. Kunkin luokan omaisuusvahingon suuruuden prosentuaalinen osuus kokonaisvahingosta määritettiin ja normitettiin lisäksi luokkaan kuuluvien havaintojen lukumäärällä. Toisin sanoen esimerkiksi havaintoja, joissa toimintavalmiusajan arvo oli 10–14 minuuttia oli 62 kappaletta. Näiden havaintojen yhteenlaskettu omaisuusvahingon suuruus oli 4,1 milj. mk. Tällöin kuvan 5 tämän luokan y-arvo saatiin laskemalla $4,1 / (45,1 \times 62) \times 100 = 0,145$.



Kuva 5. Toimintavalmiusaika jaettuna viiden minuutin luokkiin ja omaisuusvahingon normitettu osuus kutakin luokkaa kohden.

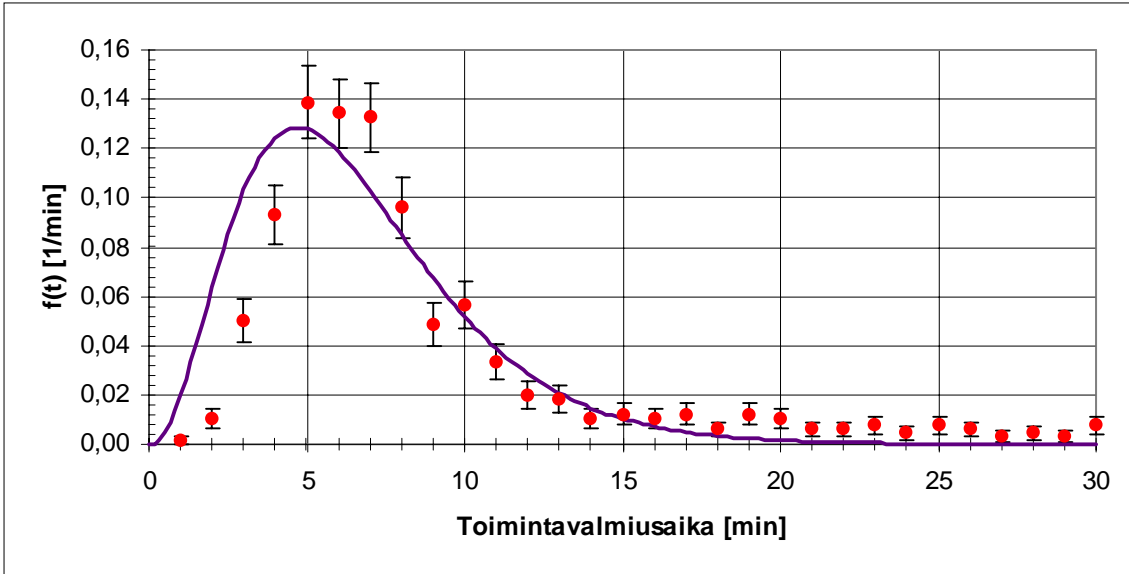
Havaintoihin sovitettiin kaksi suoraa $y = At + B$, joiden parametrien A - ja B -arvot ovat näkyvässä taulukossa 1. Ensimmäisessä sovitteessa olivat kaikki havaintopisteet mukana, kun taas toista suoraa sovitettaessa poistettiin alkupään nollihavainnot sekä loppupään havainnot, joiden virheet olivat hyvin suuret. Virherajojen puitteissa sovitteet ovat kuitenkin samat. Tämä käänteinen ongelma ei ole kuitenkaan yksikäsitteinen eikä sen numeerista ratkaisua ei ole voitu viedä kovin pitkälle havaintojoukon pienuuden takia. Tässä on tehty yksinkertaistava oletus, että sovite on lineaarinen, mutta sen paikkansa pitävyyden tarkistamiseksi havaintojoukkoa tulisi suurentaa. Tämän vuoksi olisi erityisen tärkeää, että ONTIKASTA olisi saatavissa todelliset vahinkojen suuruudet, jotta niiden kehittymistä olisi mahdollista seurata.

Taulukko 1. Kuvan 5 suorien parametrien A - ja B -arvot.

	A	B
Suora 1	0,0017	0,1483
Suora 2	0,0058	0,0737

Kuvasta 5 voidaan havaita markkamääräisen vahingon kasvavan lievästi toimintavalmiusajan pidentyessä.

Tampereen vuosien 1989–1990 toimintavalmiusaikaohjelmalle sovitettiin gamma-jakauma STATISTICA-ohjelmalla, jolla parametrien arvoiksi saatiin $\alpha = 3,47$ ja $\beta = 1,91$ min. Gammajakauma on sovitettu havaintoihin kuvassa 6.



Kuva 6. Gammajakauman sovitus toimintavalmiusaikahavaintoihin Tampereella vuosina 1989–1990.

Havaintojen lukumäärä tietyllä aikavälillä saadaan kuvan 6 gammajakaumasta. Gammajakauman tiheysfunktio määritellään seuraavasti (Milton & Arnold 1990):

$$f(t) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} t^{\alpha-1} e^{-\frac{t}{\beta}}. \quad (1)$$

Kuvia 5 ja 6 apuna käyttäen voidaan periaatteessa määrittää vahingon suuruus markkoina jotakin tiettyä toimintavalmiusaika tai -aikaväliä kohden. Tätä varten tulee kuitenkin tuntea kummankin kuvan normitukset. Kuvan 5 havaintopisteiden arvot on määritetty seuraavasti.

$$S_k = \frac{1}{N_k} \frac{\sum_{j=1}^{N_k} V_{jk}}{V} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

missä V on kokonaisvahingon suuruus tuhansina markkoina ja N_k on luokkaan k kuuluvien havaintojen lukumäärä. Luokkaan kuuluvien havaintojen vahinkojen summa

tuhansina markkoina $\sum_{j=1}^{N_k} V_{jk}$ saadaan siten kaavasta

$$\sum_{j=1}^{N_k} V_{jk} = \frac{S_k N_k V}{100}. \quad (3)$$

Nyt S_k saadaan sovitekäyrästä, jolloin vahingon markkamääräinen suuruus yhtä hälytystä kohden saadaan kaavasta

$$V_{mk} = 0,01V(At + B). \quad (4a)$$

Vahinkojen lukumäärä saadaan kaavasta

$$V_{lkm}(dt) = f(t) \cdot N dt. \quad (5)$$

missä N on havaintojen kokonaislukumäärä kyseessä olevalla aikavälillä. Nyt vahingon suuruus voidaan laskea tietyllä toimintavalmiusajan arvolla tai aikavälillä seuraavasti:

$$V_{mk} \cdot V_{lkm}(dt) = \frac{0,01VN}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} (At + B)t^{\alpha-1} e^{-\frac{t}{\beta}} dt. \quad (6)$$

Kun tämä integroidaan saadaan vahingon kertymä.

Käyttäen lyhennysmerkintää

$$D = \frac{0,01VN}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} \quad (7)$$

yhtälön (6) integrointi onnistuu jopa suljetussa muodossa. Saadaan

$$D \int_0^{t_0} (At + B)t^{\alpha-1} e^{-\frac{t}{\beta}} dt = D \left[\int_0^{t_0} At^\alpha e^{-\frac{t}{\beta}} dt + \int_0^{t_0} Bt^{\alpha-1} e^{-\frac{t}{\beta}} dt \right]. \quad (8a)$$

Sijoitetaan $y = \frac{t}{\beta}$, $dy = \frac{dt}{\beta}$, jolloin saadaan yhtälö (8) seuraavaan muotoon:

$$U = D \left[A \int_0^{\frac{t_0}{\beta}} (\beta y)^\alpha e^{-y} \beta dy + B \int_0^{\frac{t_0}{\beta}} (\beta y)^{\alpha-1} e^{-y} \beta dy \right] = D \left[A \int_0^{\frac{t_0}{\beta}} \beta^{\alpha+1} y^\alpha e^{-y} dy + B \int_0^{\frac{t_0}{\beta}} \beta^\alpha y^{\alpha-1} e^{-y} dy \right], \quad (9a)$$

josta saadaan edelleen

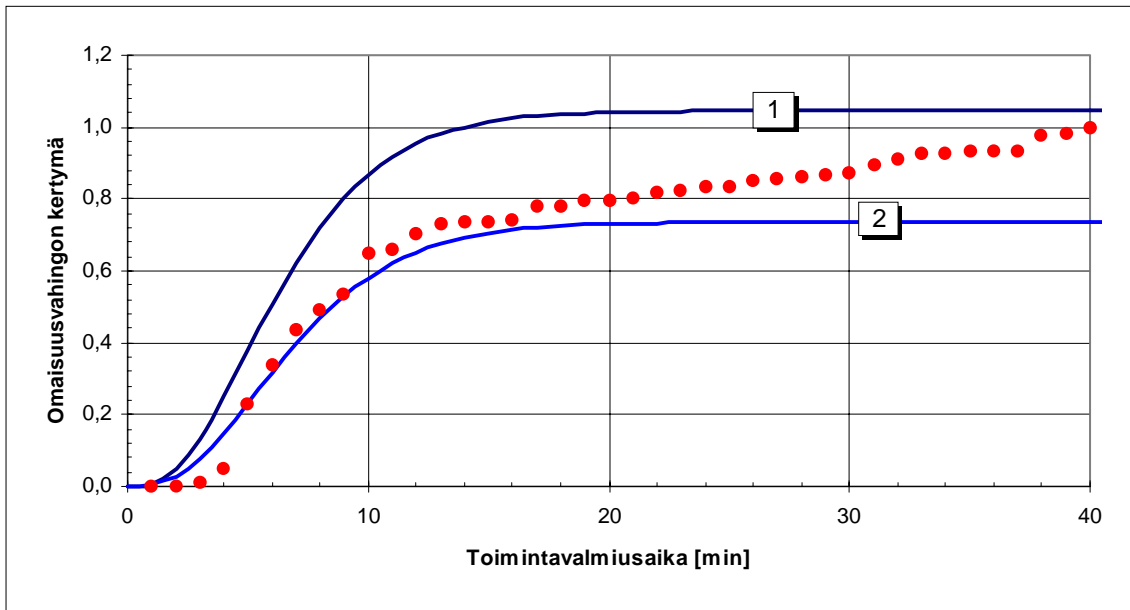
$$U = D \left[A\beta^{\alpha+1}\gamma\left(\alpha+1, \frac{t_0}{\beta}\right) + B\beta^\alpha\gamma\left(\alpha, \frac{t_0}{\beta}\right) \right], \quad (9b)$$

missä

$$\gamma\left(\alpha, \frac{t_0}{\beta}\right) \text{ ja } \gamma\left(\alpha+1, \frac{t_0}{\beta}\right)$$

ovat epätäydellisiä gammafunktioita (McCormick 1981). Epätäydellisen gammafunktion arvo annetuilla parametreilla voidaan laskea sarjakehitelmästä (Gradshteyn & Ryzhik 1983)

$$\gamma\left(\alpha, \frac{t_0}{\beta}\right) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \left(\frac{t_0}{\beta}\right)^{\alpha+n}}{n!(\alpha+n)}. \quad (10a)$$



Kuva 7a. Omaisuuksvahingon teoreettiset sekä todellinen kertymäfunktiot.

Kuvaan 7a on piirretty kaavan (6) integraali. Kertymäkuvaaja, jossa on käytetty kaavassa (4) suoran 1 arvoja, on merkitty ykkösellä ja vastaavasti kakkosella käyrä, jonka määrittämisessä on käytetty suoran 2 parametrien arvoja. Todelliset havainnot on piirretty kuvaan 7a pisteinä. Kumpikaan kertymäkuvaaja ei vastaa todellisten havaintojen kertymää riittävällä tarkkuudella. Tämä voi johtua gammajakauman heikosta sovituksesta (kuva 6) tai myös kuvan 5 sovitesuoran epätarkkuudesta. Jotta kuvaa 7a voitaisiin käyttää, olisi tunnettava kokonaisvahingon suuruus jollakin tietyllä tarkasteltavalla aikavälillä. Tällöin kuvasta voidaan määrittää omaisuusvahingon kertymä valittuun toimintavalmiusajan arvoon asti.

Esimerkkinä oletetaan kokonaisvahingon suuruudeksi 50 milj. mk vuodessa ja tutkitaan omaisuusvahingon suuruutta 10 minuutin toimintavalmiusajalla. Käyttämällä kuvan 7a ylempää käyrää saadaan omaisuusvahingon suuruudeksi $0,87 \times 50$ milj. mk = 43,5 milj. mk ja käyttämällä alemmaa käyrää saadaan vahingon suuruudeksi $0,58 \times 50$ milj. mk = 29 milj. mk. Tämä on niiden tapausten omaisuusvahinkojen summa vuodessa, joissa toimintavalmiusaika on yhtä suuri tai pienempi kuin 10 minuuttia.

Otetaan toiseksi esimerkiksi Tampereen kokeilu, jossa kokonaisvahinkojen suuruus 1989–1990 oli 45,1 milj. mk. Kuvasta 7a nähdään, että niiden tapausten omaisuusvahinkojen summa Tampereella, joissa toimintavalmiusaika oli enintään 10 minuuttia oli $0,87 \times 45,1$ milj. mk = 39,3 milj. mk. Kun tarkastellaan samaa arvoa toimintavalmiusajan ollessa enintään yhdeksän minuuttia, saadaan vahinkojen suuruudeksi $0,8024 \times 45,1$ milj. mk = 36,1 milj. mk. Näiden erotus on 3,2 milj. mk, eli minuutin nopeam- malla toimintavalmiusajalla olisi saavutettu yli kolmen miljoonan säästöt kahden vuo- den aikavälillä.

2.2.3 Epälineaaraisia vastefunktioita

Samoihin havaintoihin kokeiltiin vielä toista vastefunktiota

$$J = a \cdot \arctan\left(\frac{t}{b}\right), \quad (4b)$$

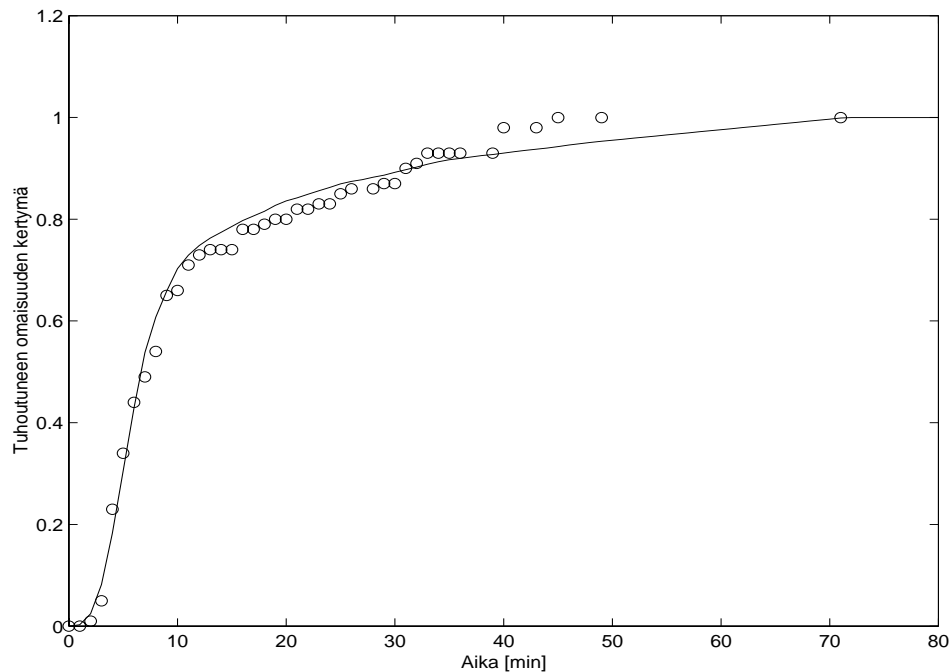
jolloin koko integraali (8) sai muodon

$$\frac{1}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} \int_0^{t_0} J t^{\alpha-1} e^{-\frac{t}{\beta}} = \frac{a}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} \int_0^{t_0} \arctan\left(\frac{t}{b}\right) t^{\alpha-1} e^{-\frac{t}{\beta}}. \quad (8b)$$

Integraali ratkaistiin numeerisesti ja, koska kuvasta 6 havaittiin gammajakauman sopi- van todellisiin havaintoihin heikosti, käytettiin integraalissa gammajakauman tilalla to- dellisia toimintavalmiusajan havaintopisteitä. Tällöin siis yhtälössä (8b) gamma- jakauman (yhtälö (1)) tilalla olivat todelliset havainnot. Kuvassa 7b on esitetty edellä kuvatulla tavalla määritetty kertymäfunktion kuvaaja sovitettuna todellisiin havaintoi- hin. Parametrien arvoiksi saatiin $a = 0,669$ ja $b = 1$. Lisäksi kokeilun vuoksi sovitukseen käytettiin myös kolmatta vastefunktiota

$$J = a \cdot \tanh\left(\frac{t}{b}\right), \quad (4c)$$

jonka antama tulos ei kuitenkaan poikennut merkittävästi tuloksesta, joka saatiin kun vastefunktiona käytettiin yhtälöä (4b).

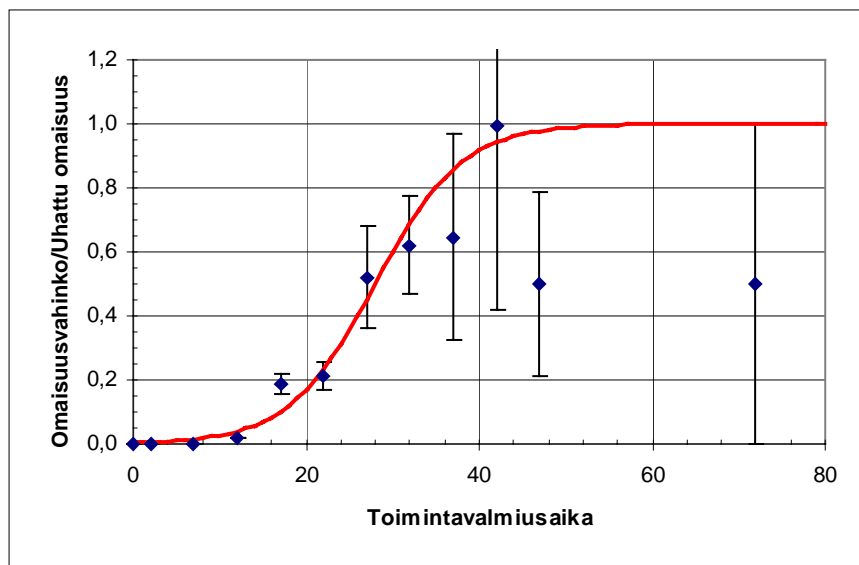


Kuva 7b. Omaisuusvahingon teoreettinen sekä todellinen kertymäfunktio.

Kun verrataan kuvia 7 ja 7b, havaitaan että kuvan 7b sovitusta on huomattavasti parempi, mikä johtuu siitä, että kuvan 7b kertymäfunktion määrittämisessä on käytetty toiminta-
valmiusajan tiheysfunktion todellisia arvoja eikä niihin sovitettua gammafunktioita.

2.2.4 Tuhoutumisprosentti

Omaisuusvahingon ja uhatun omaisuuden arvon suuruus määritettiin kutakin toiminta-
valmiusajan minuuttia kohden, jonka jälkeen tilastokohinan pienentämiseksi toiminta-
valmiusaikaluokkia suurennettiin viiteen minuuttiin ja laskettiin summa kuhunkin luok-
kaan kuuluvista vahingoista ja uhatun omaisuuden suuruudesta. Kuvassa 7c on esitetty
pisteinä toiminta-
valmiusajan funktiona omaisuusvahingon suuruus jaettuna uhatun
omaisuuden suuruudella. Tätä kutsutaan myös tuhoutumisprosentiksi ja sen arvo saa-
daan kertomalla y-arvo 100 %:lla.



Kuva 7c. Tuhoutumisprosentti toimintavalmiusajan funktiona.

Kuvan 7c havaintoihin on sovitettu funktio

$$y = \frac{1}{2} \left[1 + \tanh\left(\frac{t - t_0}{\tau}\right) \right], \quad (10b)$$

missä t on toimintavalmiusaika ja $t_0 = 28$ min ja $\tau = 10$ min.

2.2.5 Vaimennettu Pareton-jakauma

Tuhoutuneen omaisuuden arvoa paloa kohden tutkittiin ottamalla logaritmi tuhansina markkoina ilmoitetusta kunkin vahingon suuruudesta ja jakamalla ne tämän jälkeen sopivan suuruisiin luokkiin. Kuvassa 7d on x-akselilla tuhoutuneen omaisuuden arvo tuhansina markkoina ja y-akselilla tapahtumien lukumäärä luokkaa kohden. Jakauma on normitettu siten, että havaintopisteiden ja x-akselin välinen pinta-ala eli integraali on yksi. Näihin havaintoihin sovitettiin vaimennettu Pareton-jakauma

$$f(X) = A \exp(-\alpha X^2) X^{-n} ; X \geq a, \quad (10c)$$

joka oli havaittu käyttökelpoiseksi esimerkiksi tutkittaessa moniuhrisia palokuolemia (Keski-Rahkonen 1998). Yhtälössä (10b) X on tuhoutunut omaisuus markkoina A , α ja n ovat sovitussparametreja ja a :lla on merkitty Pareton-jakauman kynnsarvoa. Yhtälön (10a) jakauma sovitettiin havaintoihin, jolloin parametrien arvoiksi saatiin $A = 0,4$, $\alpha = 1,00 \text{ E-}07$ ja $n = 1,4$. Kun yhtälö (10b) integroitiin kynnsarvosta a äärettömään ja integraalin arvoksi asetettiin yksi, saatiin A :n arvoksi

$$A = \frac{2\alpha^{\frac{-n+1}{2}}}{\Gamma(\frac{1-n}{2}, \alpha a^2)}, \quad (10d)$$

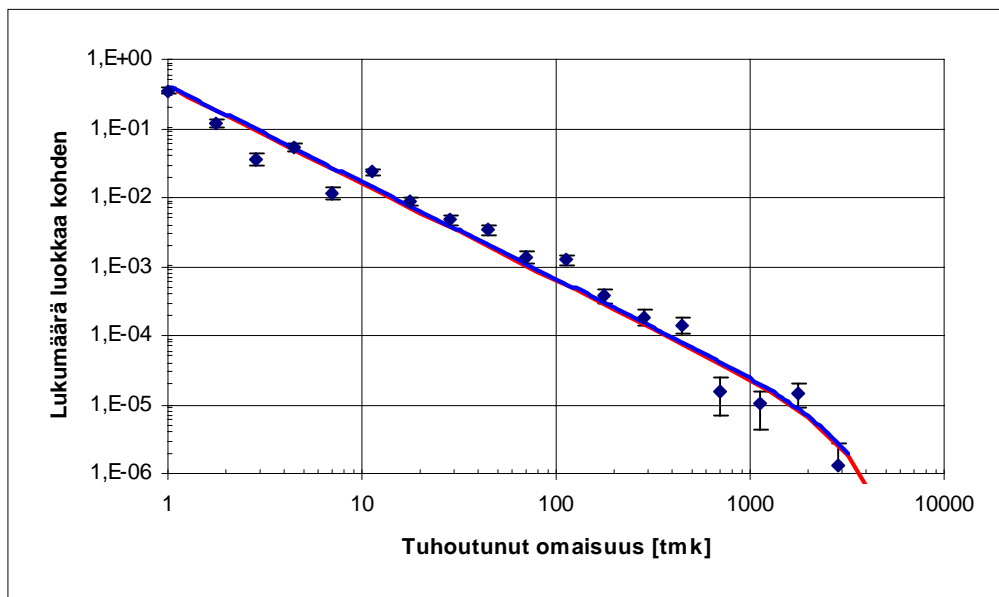
jolloin yhtälö (10b) saa normitetun muodon

$$f(X) = \frac{2\alpha^{\frac{-n+1}{2}}}{\Gamma(\frac{1-n}{2}, \alpha a^2)} \frac{e^{-\alpha X^2}}{X^n}. \quad (10e)$$

Koska $(1-n)/2 = (1-1,4)/2 = -0,2$ on negatiivinen, gammafunktion ratkaisemiseksi käytetään yhtälöä (Gradshteyn & Ryzhik 1983)

$$\Gamma(1-z)\Gamma(z) = \frac{\pi}{\sin \pi z}. \quad (10f)$$

Yhtälö (10e) on käyttökelpoinen vain, kun $n > -1$, jolloin $z < 1$. Kuvassa 7d havaintoihin on sovitettu normitettu jakauma (10d), jonka parametrien arvot ovat $n = 1,4$, $\alpha = 1,0E-07$ ja $a = 1$.



Kuva 7d. Vaimennettu Pareton-jakauma sovitettuna omaisuusvahingon havaintopisteisiin.

2.2.6 Yhteenveto

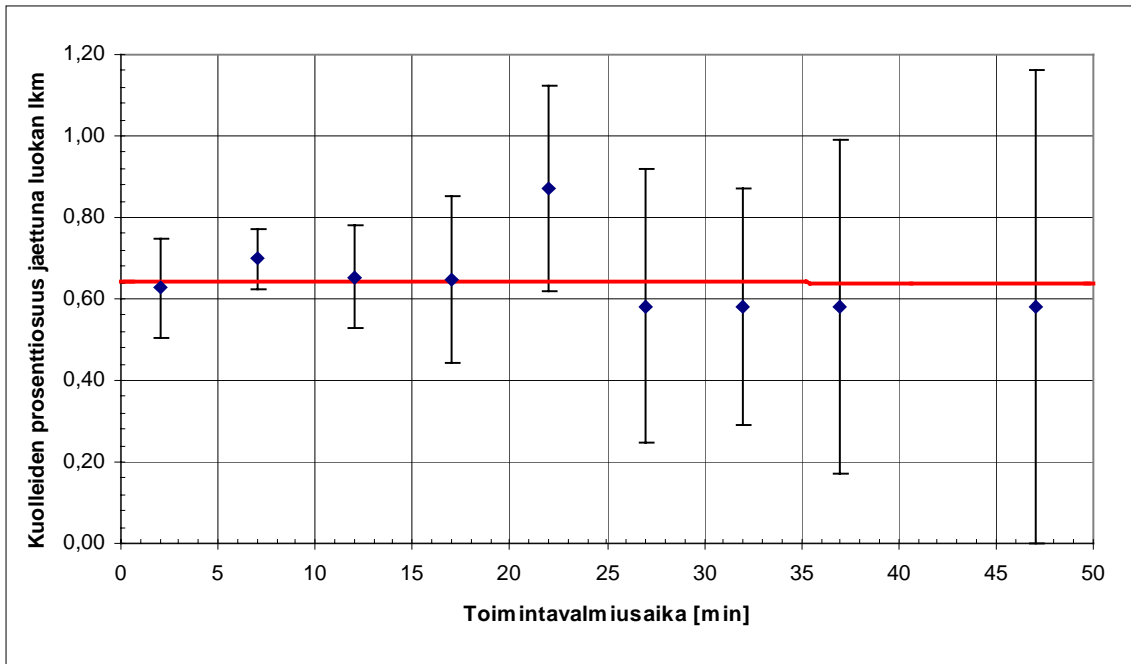
Kokeiltaessa integraaliyhtälöön (8) erilaisia vastefunktioita havaittiin sen olevan luonteeltaan sellainen, ettei näin vähillä havainnoilla voida määrittää vastefunktiota ja sen parametreja järkevällä tasolla. Periaate on hyvä, mutta vaatii kuitenkin suurempia määriä tarkempia havaintoja ollakseen käyttökelpoinen. On todettava, ettei tässä tehdyllä analyysillä kyetä tekemään tarkkoja johtopäätöksiä toimintavalmiusajan vaikutuksesta tuhoutuneen omaisuuden suuruuteen. Alustavasti tuhoutumisprosentin voidaan olettaa riippuvan toimintavalmiusajasta yhtälön (10a) mukaisesti. Vaimennettu Pareton-jakauma (10b) kuvaa kohtuullisella tavalla Tampereen kokeilun omaisuusvahinkojakaumaa, mutta näytteen suppeuden vuoksi tulosten yleistyksessä on oltava varovainen.

2.3 Palokuolemat

2.3.1 Yleistä

Tämän luvun peruskysymys oli henkilöturvallisuuden suhteen sama kuin kohdan 2.2 omaisuusvahinkojen osalta. Kuitenkin suppean tilastoaineiston vuoksi on jo etukäteen epäiltävissä, että tulokset ovat vain suuntaa antavia.

Aineisto perustui J. Rahikaisen (1998) tutkimusaineistoon palokuolemista Suomessa. Palokuolemat sijoittuivat vuosille 1994–1997 ja yhteensä havaintoja tältä ajalta oli 170 kappaletta, joissa kuolemantapauksia oli tapahtunut yhteensä 198. Näistä havainnoista kelvollisia oli 148 kappaletta ja yhteensä näissä tapauksissa oli tapahtunut 172 kuolemantapausta. Kelvottomiksi havainnoiksi luettiin ne, joissa toimintavalmiusaika oli selvästi kirjattu väärin. Toimintavalmiusaika jaettiin viiden minuutin luokkiin ja palokuolemien lukumäärän prosentuaalinen osuus koko määrästä määritettiin kutakin luokkaa kohden. Saadut prosentuaaliset osuudet jaettiin vielä luokkaan kuuluvien tapausten lukumäärällä. Havaintopisteet ovat näkyvissä kuvassa 8.

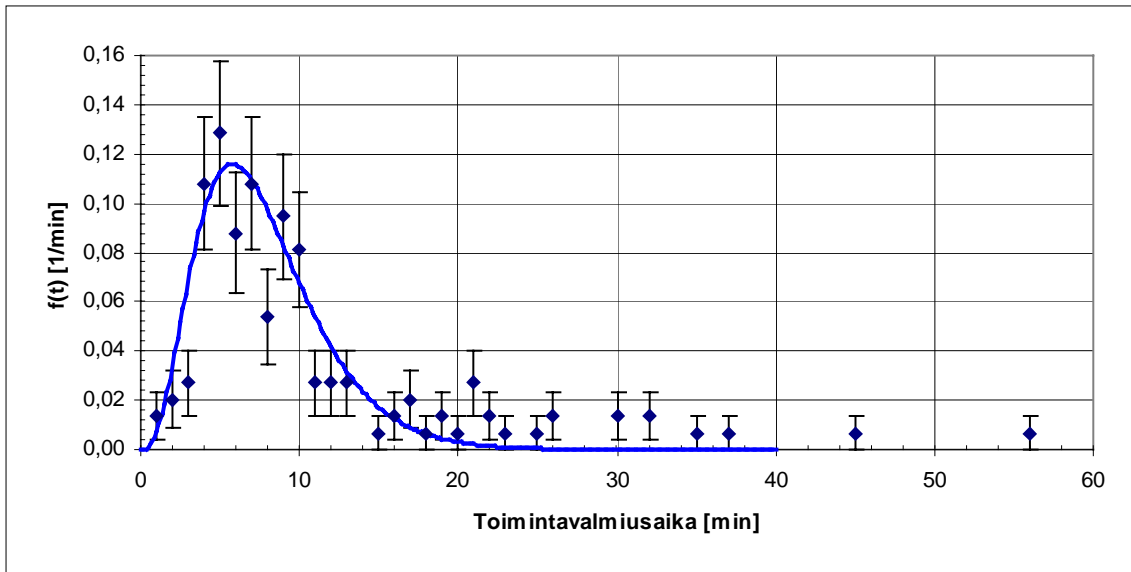


Kuva 8. Toimintavalmiusaika jaettuna viiden minuutin luokkiin ja tulipaloissa kuolleiden normitettu osuus kutakin luokkaa kohden.

2.3.2 Lineaarinen vastefunktio

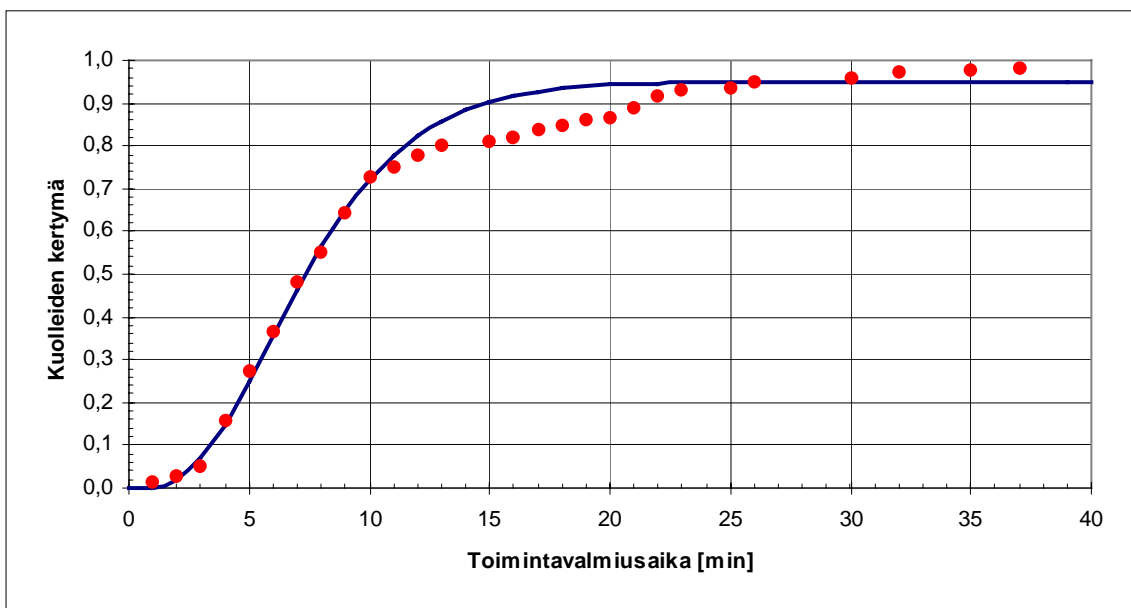
Havaintoihin sovitettiin suora $y = At + B$, jonka parametrien arvoiksi saatiin $A = -4,6E-0,5$ ja $B = 0,642$. Havaitaan, että palokuolemien määrä pysyy käytännöllisesti katsoen vakiona kaikilla toimintavalmiusajan arvoilla, ja voidaan todeta, että kuvan 8 mukaan palokuolemien määrä ei merkittävästi riipu palo- ja pelastustoimen toimintavalmiusajasta. Palokuolemia tapahtuu kuitenkin melko vähän, ja tämän vuoksi havaintojoukon pienuuden takia tilastokohina kasvaa hyvin suureksi ja palokuolemien kehittymisestä voidaan tehdä vain suuntaa antava arvio. Tässä tapauksessa on tehty yksinkertaisin mahdollinen oletus ja sovitettu havaintoihin suora. Virherajojen puitteissa on kuitenkin mahdollista, että vaste on epälineaarinen.

Tutkimusaineistosta saatuun toimintavalmiusaikajakaumaan sovitettiin gammajakauma STATISTICA-ohjelmalla, jonka parametrien arvoiksi saatiin $\alpha = 4,00$ ja $\beta = 1,91$ min. Gammajakauma on sovitettu havaintoihin kuvassa 9.



Kuva 9. Gammajakauman tiheysfunktion sovitus palokuntien toimintavalmiusaika havaintoihin.

Samalla tavoin kuin kohdassa 2.2 määritettiin palokuolemien kertymäfunktio. Kuvassa 10a on pisteillä merkitty palokuolemien todellista kertymää ja yhtenäisellä viivalla teoreettisesti määritettyä kertymäfunktioita.



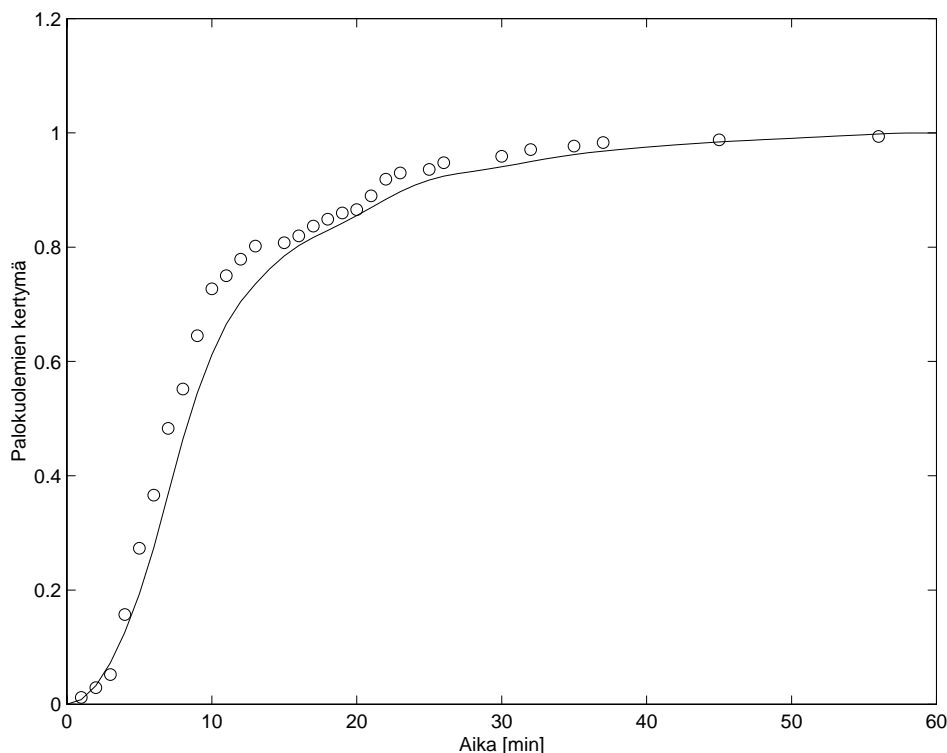
Kuva 10a. Palokuolemien todellinen sekä teoreettinen kertymäfunktio.

Oletetaan esimerkkinä, että tietyllä alueella kuolee rakennuspaloissa sata ihmistä vuositain. Tarkastellaan palokuolemien lukumäärää, kun toimintavalmiusaika on enintään kuusi minuuttia. Tällöin kuvasta 10a tulkitaan, että $0,36 \times 100 = 36$ palokuolemaa esiintyy vuoden aikana rakennuspaloissa, joissa toimintavalmiusaika on ollut pienempi tai yhtä suuri kuin kuusi minuuttia. Palokuolemien määrä, kun toimintavalmiusaika on pienempi tai yhtä suuri kuin viisi minuuttia, on kuvan 10 avulla laskettuna $0,25 \times 100 = 25$

kappaletta vuoden aikana. Eli minuutin nopeammalla toimintavalmiusajan arvolla palokuolemien lukumäärä on 11 kappaletta pienempi.

2.3.3 Epälineaarisia vastefunktioita

Palokuolemahavaintoihin sovitettiin samalla tavoin kuin tuhoutuneen omaisuuden tapauksessa kaksi muutakin vastefunktiota, jotka ovat muotoa (4b) ja (4c). Näitä vastefunktioita sovitettaessa integraaliyhtälössä (8) käytettiin jälleen gammajakauman yhtiön tilalla todellisia toimintavalmiusaikahavaintoja ja integraali ratkaistiin numeerisesti. Tällöin saatiin parametrien arvoiksi $a = 0,133$ ja $b = 0,001$. Sovite on esitetty kuvassa 10b.



Kuva 10b. Palokuolemien todellinen sekä teoreettinen kertymäfunktio.

2.3.4 Yhteenveto

Palokuolemien kohdalla tilanne on sama kuin kohdan 2.2 omaisuusvahinkojen suuruuden arvioinnissa. Tilastanalyysi antaa tietoa suurien joukkojen käyttäytymisestä, ja palokuolemahavaintojen lukumäärä on melko pieni, jonka vuoksi tässä käytetyllä mallilla ei voida tehdä tarkkoja johtopäätöksiä toimintavalmiusajan vaikutuksesta palokuolemien lukumäärään. Tässä käytetyn aineiston kaltaiset epäsuorat mittaukset, joissa ei ole suoraa korrelaatiota toimintavalmiusaikaan, eivät riitä, vaan johtopäätösten tekemiseen tarvitaan suurempi joukko tarkempia havaintoja.

3. Teoria

3.1 Syttymien aikajakauma

Palokunnan operatiivisten pelastusyksiköiden lähtöjen määrää kuvaa hyvin ajasta riippumaton poissonjakauma (Brušlinski 1988)

$$P_k(\tau) = \frac{(\lambda\tau)^k}{k!} \cdot e^{-\lambda\tau} (k = 0, 1, 2, \dots), \quad (11)$$

missä, $P_k(\tau)$ on todennäköisyys sille, että ajassa τ tulee k hälytystä, ja λ on ilmoitusvirta. Palokunnan operatiivisen toiminnan ajallista jakaumaa (toimintavalmiusaika, tulipalon sammutukseen kuluva aika, toiminta-aika) kuvaa lähes tyhjentävästi Erlangin sääntö

$$f(\tau) = \mu \frac{(\mu\tau)^r}{r!} \cdot e^{-\mu\tau}; (\tau > 0), \quad (12)$$

missä $\mu = (r + 1) / \bar{\tau}$ on jakautumisparametri, r on kertalukua osoittava indeksi ($r = 0, 1, 2, \dots$) ja $\bar{\tau}$ on keskimääräinen toimintaan kuluva aika.

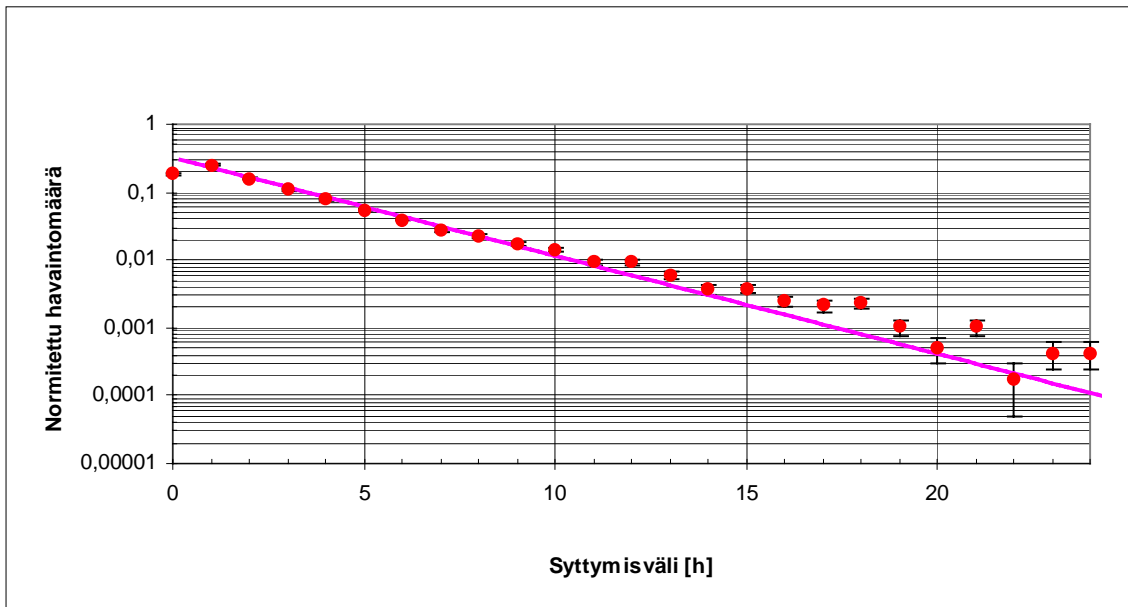
Yksittäistapauksesta $r = 0$ seuraa eksponenttijakauma (nollannen kertaluvun Erlangin kaava)

$$f(\tau) = \mu e^{-\mu\tau}; (\tau > 0), \quad (13)$$

missä $\mu = 1 / \bar{\tau}$.

Tutkittaessa rakennuspalojen syttymisväliä eli kahden peräkkäisen tulipalon syttymisen välistä aikaa, aikaisempien tutkimusten perusteella (Rahikainen 1998) tiedettiin syttymisviivejakauman olevan eksponentiaalisesti jakautunut. Jakauma näytti sisältävän kaksi eri eksponenttijakaumaa, mikä tulkittiin syttymistaajuuden vuorokausivaihtelusta johtuvaksi (Rahikainen & Keski-Rahkonen 1998b). Koska edellisen tutkimuksen jälkeen oli kertynyt paljon uutta aineistoa, tutkittiin kaikki vuosina 1994–1997 ONTIKAAn kirjatut rakennuspalot Suomessa. ONTI/ONTIKAssa rakennuspalo määritellään seuraavasti: rakennuspalolla tarkoitetaan kaikkia tulipaloja, jotka tapahtuvat rakennuksen sisällä tai sen välittömässä läheisyydessä siten, että rakennuksen syttyminen palon johdosta on todennäköistä. Myös rakennuksen sisällä tapahtunut koneen tai laitteen palaminen, joka ei sinällään aiheuta vahinkoa rakennukselle, katsotaan rakennustulipaloksi (Rahikainen 1998). Tässä rakennuspalon määritelmän tulkinnassa saattaa olla eri paikkakunnilla eroja, jotka voivat vaikuttaa rakennuspalojen lukumäärään. Havaintojen kokonaismäärä skaalattiin ykköseksi siten, että jokaisen pisteen havaintomäärä jaettiin

havaintojen kokonaismäärällä. Yhteensä havaintoja vuosilta 1994–1997 oli 11 659 kappaletta ja ne pyöristettiin lähimpään kokonaiseen tuntiin, jonka jälkeen niihin sovittiin eksponenttijakauman tiheysfunktio STATISTICA-ohjelmalla, jolloin saatiin parametrin λ arvoksi $\lambda = 0,333/h = 7,992/d$. Eksponenttijakauman sovitus havaintoihin on kuvassa 11.



Kuva 11. Rakennuspalojen syttymisvälijakauma vuosina 1994–1997 koko maassa.

Kun verrataan sovitetta J. Rahikaisen (1998) aikaisempaan sovitteeseen, jossa $\lambda = 0,255/h = 6,120/d$, kun havaintoja ei painotettu, voidaan havaita sovitteiden olevan virherajojen puitteissa samat. Kaavan yksittäisen luokan tilastolliselle virheelle on johtanut mm. Beers (1953) ja se on esitetty Rahikaisen (1998) työssä.

Kun hälytyskeskukseen tulevien hälytysten väli on osoitettu eksponenttijakautuneeksi, tästä tuloksesta seuraa useita hyödyllisiä ominaisuuksia, joita myöhemmän teoreettisen käsittelyn yhteydessä käytetään hyväksi (Virtamo 1993). Edellä olevasta on jo käynyt ilmi, että syttymisvälin eksponenttijakauma (13) on seurausta yhtälön (11) poissonjakautumasta. Voidaan osoittaa, että tämä pätee myös kääntäen. Lisäksi poissonjakautuneelle suurelle havaitaan, että infinitesimaalisella aikavälillä dt voi tulla vain yksi hälytys ja sen todennäköisyys on λdt , täysin riippumatta saapumisista muina ajanhetkinä. Taaßen kääntäen, jos tämä otetaan lähtöoletukseksi, ilmoitusvirran poissonjakauma ja syttymisvälin eksponenttijakauma voidaan johtaa tästä.

Poissonprosessia voidaan monella tapaa pitää mahdollisimman tasan jakaantuneena. Jos kaksi poissonprosessia λ_1 ja λ_2 yhdistetään, saadaan poissonprosessi, jonka ilmoitusvirta on $\lambda_1 + \lambda_2$. Vastaavasti, jos poissonprosessista poimitaan satunnaisesti osuus p , poimittu jono muodostaa poissonprosessin, jonka virta on $p\lambda$. Poissonprosessi on myös täysin muistiton. Tietyn ajankohdan jälkeen tapahtuma ei riipu mitenkään sitä edeltävistä tapahtumista.

3.2 Tulipalojen määrä

3.2.1 Aikaisempia tutkimuksia

Brušlinskin et al. (1998) mukaan palotilastoissa hälytystiheydeksi c kutsutaan yleensä hälytysten H määrää asukaslukua u kohden vuodessa. Myöhemmin kohdassa 3.2.2 samasta suureesta on käytetty nimitystä ilmoitusvirta asukasmäärää kohden. Useissa muissakin varhaisissa tutkimuksissa on oletettu, että hälytysten määrä on laskettavissa yksinkertaisesta suhteellisuusmallista

$$H = cu, \quad (14)$$

missä u on kaupungin (kunnan) väkiluku tuhansina ja c verrannollisuuskerroin, hälytystiheys, jonka yksikkönä on hälytyksiä vuodessa tuhatta asukasta kohden. Esimerkiksi Fire Journalissa (Anon. 1970) julkaistiin tuloksia useista sellaisista Yhdysvaltojen ja Kanadan kaupungeista, joiden väkiluku ylitti 20 000 asukasta. Vuonna 1969 selvittäessä yli 20 000 asukkaan kaupunkien keskimääräisiä tuloksia Yhdysvalloissa todettiin, että $c = 23,5$ kunnan kaikkien hälytysten ja 11,3 tulipalojen osalta. Seurattaessa Tanskan palokuntia (Haurum 1977) havaittiin, että maassa 1970-luvun puolivälissä palokunnan kaikille hälytyksille $c = 3,2$ (sekä kaupungissa että maaseudulla). Vuonna 1977 Saksassa saatiin $c = 7,7$ kaikille hälytyksille ja $c = 1,8$ tulipaloille.

Näistä esimerkeistä nähdään, ettei hälytystiheys eli c :n lukuarvo ole mikään yleismaailmallinen vakio vaan se vaihtelee maittain. Yleismaailmallista on yhtälön (14) muoto, karkea verrannollisuus asukasmäärään. Ajallisesti c ei ole myöskään vakio edes samalla paikkakunnalla. Esimerkiksi Moskovassa 20:n viime vuoden aikana palokunnan yksiköiden hälytysmäärä vuodessa on kasvanut noin nelinkertaiseksi muuttuen pääasiallisesti lineaarisesti, mutta Kiovassa hälytysmäärä kasvoi samassa ajassa lähes kuusinkertaiseksi. Tämä kasvu voi johtua esimerkiksi väkiluvun sekä kaupungin ekonomisen potentiaalisen kasvusta (mm. Kiovan väkiluku mainittuna aikana kasvoi 1,6:sta miljoonasta 2,4:ään miljoonaan), ja tästä syystä voidaan olettaa ilmoitusvirran riippuvan joukosta erilaisia tekijöitä. Tanskalaisten asiantuntijoiden (Haurum) mukaan tärkein tekijä on asukasmäärä ja siten yhtälö (14) käyttökelpoinen. Brušlinski selvitti vuonna 1968 Neuvostoliitossa 82 kaupungin (asukasluku 30 000–1 500 000) palokuntien hälytysten määriä ja päätyi korrelaatio-, regressio- ja hajonta-analyysijä käyttäen lineaariseen yhtälöön

$$H = Au + B, \quad (15)$$

missä on nyt kaksi kokeellisesti määritettävää suuretta A ja B . Vaikka yhtälö (15) on vain lievä yleistys yhtälöstä (14), A :ta ei voida nyt suoraan tulkita hälytystiheydeksi c . Vakioiden arvoiksi saatiin $A = 1,92$ ja $B = 30,24$. Tämän mallin korrelaatiokerroin on

$r_{xy} = 0,94$. Siten kaupungin väkiluku monien tekijöiden summana selittää 89 % hälytysten määrästä (r_{xy}^2).

Tämä tutkimus vahvisti, ulkomaisten esimerkkien mukaan, että Neuvostoliitonkin kaupungeissa tai tutkimuksissa käytetyillä havainnollisilla alueilla väkiluku oli tärkein hälytysten määrään vaikuttava tekijä. Yhtälöön (15) päädyttiin tilastollisesti merkittävällä tarkkuudella 1960-luvun lopun tilastoaineiston perusteella. Laajempi aineisto kerättiin vuosilta 1976–1978 yhteensä 140:stä Neuvostoliiton kaupungista (joissa oli mukana kaikki tasavallat sekä valtakunnan muut keskeiset hallinnolliset alueet). Tutkimuksessa käytettiin yleistä regressioanalyysimallia ja otettiin huomioon, että hälytyskeskuksiin tuleva soittovirta on ajallisesti poissonjakautunut (yhtälö (11)).

Mallin oletusmuotona oli edelleen lineaarinen yhtälön (14) muoto. Tarkastelun kohteena oli, riippuuko y lineaarisesti x :stä. Pienimmän neljösumman menetelmällä määritettiin parametrien A ja B arvot, jolloin saatiin $\hat{A} = 4,3$; $\hat{B} = 8,6$. Siten

$$y = 4,3x + 8,6. \quad (16)$$

Tarkistaaksemme \hat{A} :n ja \hat{B} :n luotettavuudet laskettiin hajonnat $\sigma_{\hat{A}}^2$ ja $\sigma_{\hat{B}}^2$ käyttäen kaavoja

$$\sigma_{\hat{A}}^2 = \frac{\sigma^2}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} = \frac{\sigma^2}{(n-1)\sigma_x^2} \quad (17)$$

$$\sigma_{\hat{B}}^2 = \sigma_{\hat{A}}^2 \frac{\sum_i x_i^2}{n} \quad (18)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-2} \sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad (19)$$

missä n on tutkittujen kaupunkien lukumäärä, y_i ja x_i yksittäiset arvoparit, \bar{x} keskiarvo x_i -havainnoista ja \hat{y}_i i luokan hälytysten lukumäärän keskiarvo.

Tällä tavoin laskien käytetyille havaintoaineistolle saatiin $\sigma_{\hat{A}} = 0,005$ ja $\sigma_{\hat{B}} = 5$.

Tilastanalyysillä saadaan $A / \sigma_{\hat{A}} = 860$ ja $B / \sigma_{\hat{B}} = 1,7$. Käyttämällä kaksipuolista t-testiä (Lokki 1980, Laininen 1980) 1 %:n luottamustasolla ja 138 vapausasteella, saadaan $t_{138}^{0,005} = 2,58$. Nyt $A / \sigma_{\hat{A}} = 860 \gg 2,58$ ja $B / \sigma_{\hat{B}} = 1,7 < 2,58$. Sen vuoksi \hat{B} ei merkittävästi poikkeaa nolasta ja voidaan olettaa, että $\hat{B} = 0$, kun samanaikaisesti \hat{A}

poikkeaa nolasta merkittäväällä tavalla. Siten A :n luottamusväli saadaan t -testin mukaisesti 99 %:n luottamustasolla:

$$\hat{A} - t_{n-2}^{0,005} \sigma_{\hat{A}} \leq A \leq \hat{A} + t_{n-2}^{0,005} \sigma_{\hat{A}}, \quad (20)$$

mikä on yksinkertaisemmin merkittynä $A = 4,300 \pm 0,013$.

Käyttämällä Fisherin kriteeriä voimme testata kaupungin väkiluvun ja palokunnan yksiköiden hälytysmäärän välisen lineaarisen yhteyden. Voidaan osoittaa (Laininen 1979, Lokki 1980), että suure

$$F(1, n-2) = \frac{\sum_i (\hat{y}_i - \bar{y})^2 (n-2)}{\sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (21)$$

noudattaa Fisherin jakaumaa vapausasteilla 1 ja $n-2$.

Tässä tapauksessa $F(1, \infty) = 607 \gg 6,6$ (kun luottamustaso $\alpha = 0,01$), joka mahdollistaa oletuksen lineaarisesta yhteydestä. Lopulta lasketaan korrelaatiokerroin $R^2 = 0,816$ ja päästään tulokseen, että x selittää 82 % havaitusta y :n muutoksesta ja kaikki muut tekijät (joita tässä ei ole käsitelty) loput 18 %.

Siten koko pitkän analyysin tulos voidaan pukea lopulta yhtälön (14) tyyppiseen muotoon

$$y = 4,3x, \quad (22)$$

missä x on kaupungin väkiluku tuhansina ja y on kaupungin palokunnan kaikkien hälytysten keskiarvo vuodessa.

Jakamalla kaupungit kolmeen ryhmään asukasluvun mukaan yhtälön (22) kertoimet voitiin määrittää niille taulukon 2 mukaan.

Taulukko 2. Yhtälön (22) parametrin A arvot eri asukaslukuryhmille.

Asukasluku	A
> 500 000	4,3
250 000–500 000	4,9
< 250 000	4,3

Lisäksi saatiin samanlainen riippuvuus tulipalojen ja syttymien lukumäärän y_1 ja kaupunkien asukasluvun x välille. Tämä riippuvuus koko tutkitulle kaupunkien joukolla ($n = 140$) oli

$$y_1 = 0,4x. \quad (23)$$

Verrattaessa yhtälöitä (15) ja (22) Brušlinskin tutkimuksessa voitiin havaita, että vuosikymmenen aikana kaupunkien palokuntien yksiköiden ilmoitusvirtojen tiheydet kasvoivat Neuvostoliitossa yli kaksinkertaisiksi. Kun tarkastellaan 1980-luvulta saatavissa olevia tilastoja näyttäisi, että yhtälön (22) kertoimen arvoksi tulisi jo noin kuusi.

Tanskassa tehtyjen tutkimuksien perusteella (Haurum 1977) havaittiin, että ainut tärkeä tulipalojen määrään vaikuttava tekijä oli kaupungin (kunnan) asukasluku. Tilastojen sekä käytännön kokemuksen perusteella määritettiin samanaikaisesti esiintyville tulipaloille seuraavanlainen yksinkertainen sääntö:

- Alueilla, joilla asukkaita on vähemmän kuin 15 000, on hyvin epätodennäköistä, että useampi kuin yksi tulipalo esiintyy samanaikaisesti.
- Alueilla, joiden asukasluku on 15 000–35 000, on todennäköistä kahden samanaikaisen tulipalon esiintyminen.
- Alueilla, joiden asukasluku on 35 000–60 000, on todennäköistä kolmen samanaikaisen tulipalon esiintyminen.
- Alueiden, joiden asukasluku ylitti 60 000, tilastotiedot olivat liian vähäisiä, jotta niiden perusteella olisi voitu tehdä johtopäätöksiä.

Tanskalaisten palokuntien säännöt pohjautuvat näihin tutkimustuloksiin. Todettiin, että ensilähden yksiköitä tulee olla käytettävissä tietyn väkimäärän omaavalla alueella seuraavasti:

- Yksi yksikkö alueella, jonka väkiluku on alle 15 000.
- Kaksi yksikköä alueella, jonka väkiluku on 15 000–35 000.
- Kolme yksikköä alueella, jonka väkiluku on 35 000–60 000.

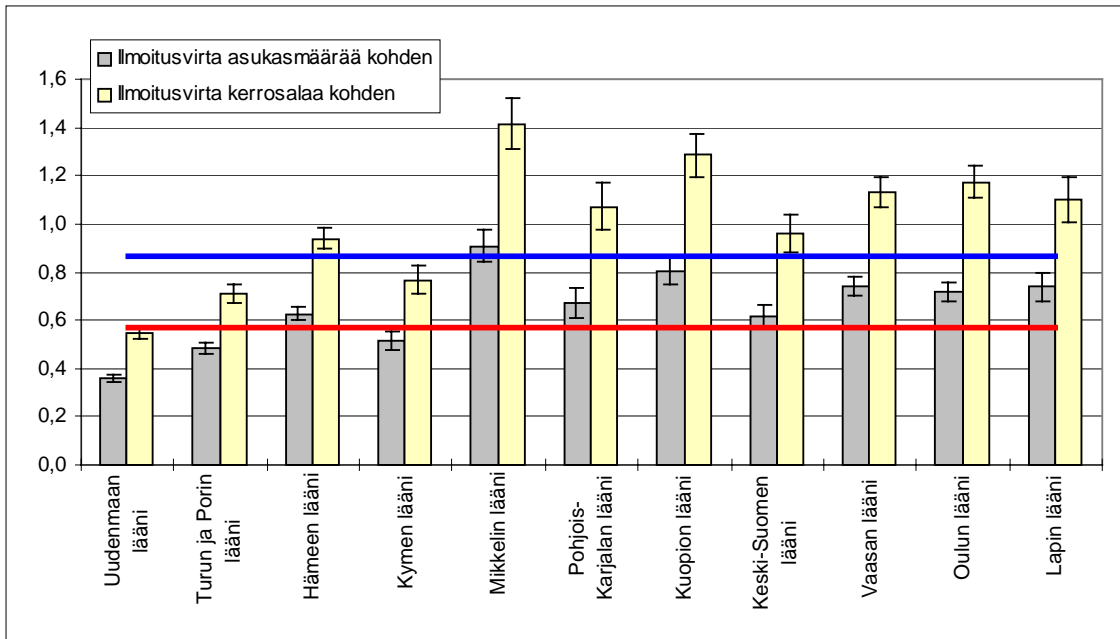
Yli 60 000 asukkaan alueilla yksiköiden lukumäärä tulee määrittää tapauskohtaisesti.

3.2.2 Taustaa Suomen tulipalojen määristä

Tämän osan tehtävänä oli tutkia tulipalojen jakaumaa eri kunnissa ja etsiä niiden määrän riippuvuutta erilaisista ilmeisiltä tuntuvista tekijöistä. Tässä pyrittiin tarkastelemaan muidenkin tekijöiden kuin edellä käsitellyn asukasluvun vaikutusta. Tulosten perusteella

pyrittiin arvioimaan, mitkä ovat ne tunnusluvut, joiden perusteella palokuntien resurssi- ja olisi pyrittävä jakamaan, kun koko maahan haluttaisiin luoda kattava palotoimen palvelutaso. Kuntien asukasluvut ja kerrosalat saatiin Tilastokeskuksesta. Koko maan kerrosala oli 334 761 028 neliometriä ja asukasluku vuodelta 1995 5 091 624 asukasta. Molemmista luvuista on poistettu Ahvenenmaan osuus.

Rakennuspalojen lukumäärä 1994–1997 määritettiin ONTIKASTA vuosittain joka kunnalle erikseen. Jos jonkin kunnan kohdalla jonakin vuonna havaittiin merkittävä poikkeama muihin vuosiin verrattuna, muutettiin täksi arvoksi muiden vuosien keskiarvosta laskettu luku. Lisäksi kuntauudistuksen myötä yhdistettyjä kuntia, kuten esimerkiksi Porvoo ja Porvoon maalaiskunta, käsiteltiin yhtenä kuntana. Rakennuspalohälytysten määräksi tuli näiden korjausten jälkeen neljän vuoden aikana yhteensä 12 691 eli keskimäärin 3 173 vuodessa. Hälytysten lukumäärät jaoteltiin eri tavoin luokkiin ja niiden määrää normitettiin kerrosalalla, pinta-alalla sekä väkiluvulla. Kuvassa 12 on käytetty hälytysten lukumäärien arvoja ennen tehtyjä korjauksia, jolloin niiden lukumäärä koko maassa vuoden aikana oli keskimäärin 2 927. Muissa kuvissa on käytetty korjattua hälytysten määrää (3 173 hälytystä vuodessa). Kuvassa 12 rakennuspalohälytykset on jaettu lääneittäin, jonka jälkeen niitä on normitettu läänikohtaisella kerrosalalla ja asukasluvulla. Silmämääräisesti kuvasta 12 nähdään, että rakennuspalojen määrä tuhatta asukasta kohden vuodessa eli ilmoitusvirta asukasmäärää kohden sekä rakennuspalojen määrä sataatuhatta kerrosalaneliometriä kohden eli ilmoitusvirta kerrosalaa kohden kuvaavat aluejakaumaa samalla tavalla. Toinen silminnähtävä piirre on maan jakautuminen ruuhka-Suomeen ja haja-asutus-Suomeen, vaikka raja ei olekaan kovin dramaattinen. Ruuhka-Suomen muodostavat tässä vanhat Uudenmaan, Turun ja Porin, Hämeen sekä Kymen läänit. Kun verrataan yksittäisiä läänejä valtakunnallisiin keskiarvoihin Uudenmaan, Turun ja Porin, Mikkelin, Kuopion, Vaasan ja Oulun läänit poikkeavat niistä enemmän kuin kolmen hajonnan verran. Valtakunnallinen ilmoitusvirran keskiarvo kerrosalaa kohden oli 0,87 ja ilmoitusvirran keskiarvo asukasmäärää kohden 0,57. Kuvassa 12 ilmoitusvirta kerrosalaa kohden on määritetty poikkeuksellisesti sataatuhatta kerrosalaneliometriä kohden, muissa kuvissa ja kohdissa sama suure on määritetty miljoonaa neliometriä kohden.



Kuva 12. Ilmoitusvirta asukasmäärää ja kerrosalaa kohden vanhojen läänien mukaan jaoteltuina vuosien 1994–1997 keskiarvoina. Paksuilla vaakaviivoilla on esitetty kummankin suureen valtakunnallinen keskiarvo painottaen joko väkiluvulla tai kerrosalalla. Ilmoitusvirta kerrosalaa kohden on poikkeuksellisesti määritetty sataatuhatta m²:ä kohden.

Korjatulla hälytysten määrällä ($N = 3\,173$) saatiin valtakunnallisiksi keskiarvoiksi koko maan asukasluvun ja kerrosalan avulla

$$\text{Ilmoitusvirran keskiarvo asukasmäärää kohden} = \quad (24)$$

$$\frac{3173}{5091,624} = 0,62 \text{ tuhatta asukasta kohden}$$

$$\text{Ilmoitusvirran keskiarvo kerrosalaa kohden} = \quad (25)$$

$$\frac{3173}{334,76} = 9,48 \text{ kerrosalan km}^2 \text{ kohden.}$$

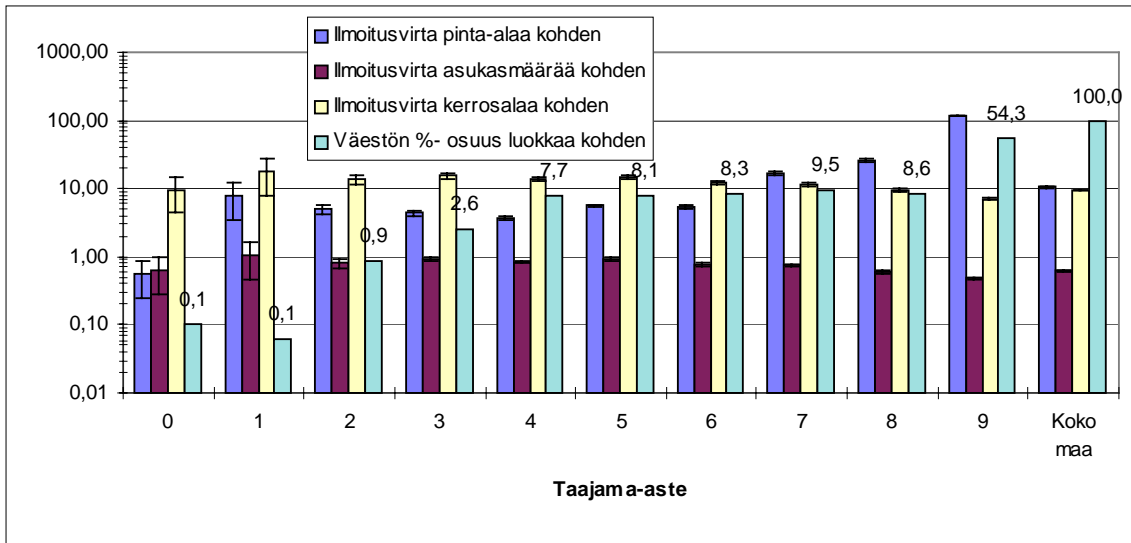
3.2.3 Taajama-aste

Tilastokeskuksen mukaan taajamaksi määritellään kaikki vähintään 200 asukkaan rakennusryhmät, joissa rakennusten välinen etäisyys ei yleensä ole 200:aa metriä suurempi. Taajamien rajauksissa otetaan huomioon asuinrakennusten lisäksi mm. liike-, toimisto- ym. työpaikkoina käytetyt rakennukset. Taajamien rajausta tapahtuu koneellisesti käyttäen hyväksi rakennusten koordinaattitietoja. Taajama-aste määräytyy seuraavasti:

- Taajama-aste 0 = kunnan asukkaista 0–9,9 % asuu taajamissa
- Taajama-aste 1 = kunnan asukkaista 10–19,9 % asuu taajamissa
- Taajama-aste 2 = kunnan asukkaista 20–29,9 % asuu taajamissa
- Taajama-aste 3 = kunnan asukkaista 30–39,9 % asuu taajamissa
- Taajama-aste 4 = kunnan asukkaista 40–49,9 % asuu taajamissa
- Taajama-aste 5 = kunnan asukkaista 50–59,9 % asuu taajamissa
- Taajama-aste 6 = kunnan asukkaista 60–69,9 % asuu taajamissa
- Taajama-aste 7 = kunnan asukkaista 70–79,9 % asuu taajamissa
- Taajama-aste 8 = kunnan asukkaista 80–89,9 % asuu taajamissa
- Taajama-aste 9 = kunnan asukkaista 90–99,9 % asuu taajamissa.

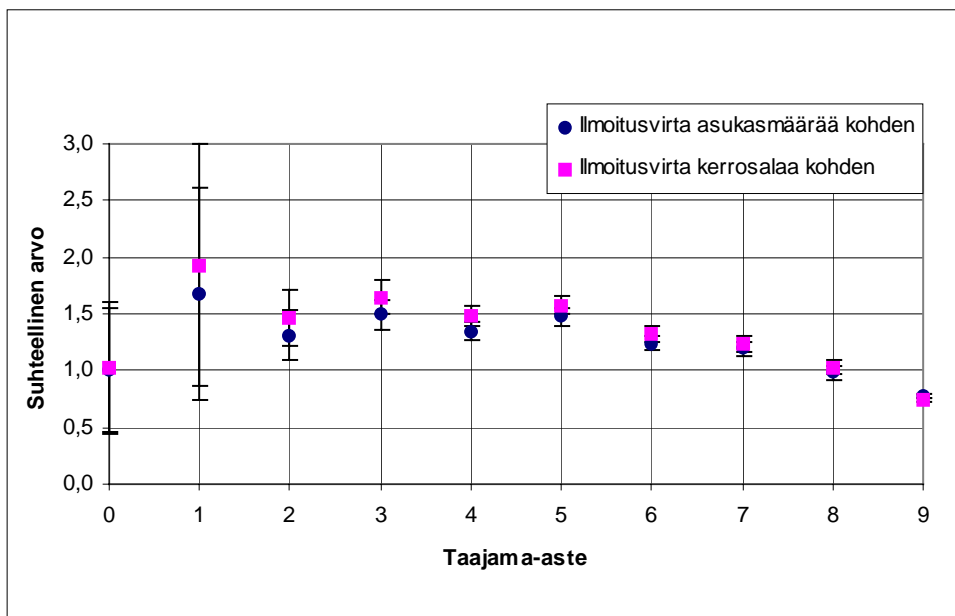
Kunnan taajamissa asuvan väestön prosenttiosuus on kunnan taajama-alueilla asuvien henkilöiden osuus kunnan koko väestöstä. Henkilö asuu taajama-alueella, jos hänen kotipaikkatunnukseen perustuvan asuntonsa rakennuksen koordinaatit vievät rakennuksen taajama-alueen sisään.

Hälytykset jaoteltiin taajama-asteen mukaisesti luokkiin, jonka jälkeen niistä laskettiin ilmoitusvirrat asukasmäärää, kerrosalaa sekä lisäksi kunnan tuhatta pinta-alaneliökilometriä kohden. Jo etukäteen tiedettiin kuitenkin pinta-alan olevan huono normitusperuste, kuten kuvasta 13 voidaan havaita, sillä pinta-alalla normitettuna ilmoitusvirran vaihtelu on hyvin suuri. Kuvasta 13 nähdään sen vaihtelevan yli sadasta hälytyksestä 1 000 km²:ä kohden (tihein taajama-asteluokka) vuodessa 0,6:een hälytykseen (harvin taajama-asteluokka).



Kuva 13. Ilmoitusvirrat asukasmäärää, kerrosalaa sekä kunnan pinta-alaa kohden taajama-asteen perusteella jaoteltuna. Neljännellä pylväällä on osoitettu väestön prosentiosuus kussakin luokassa.

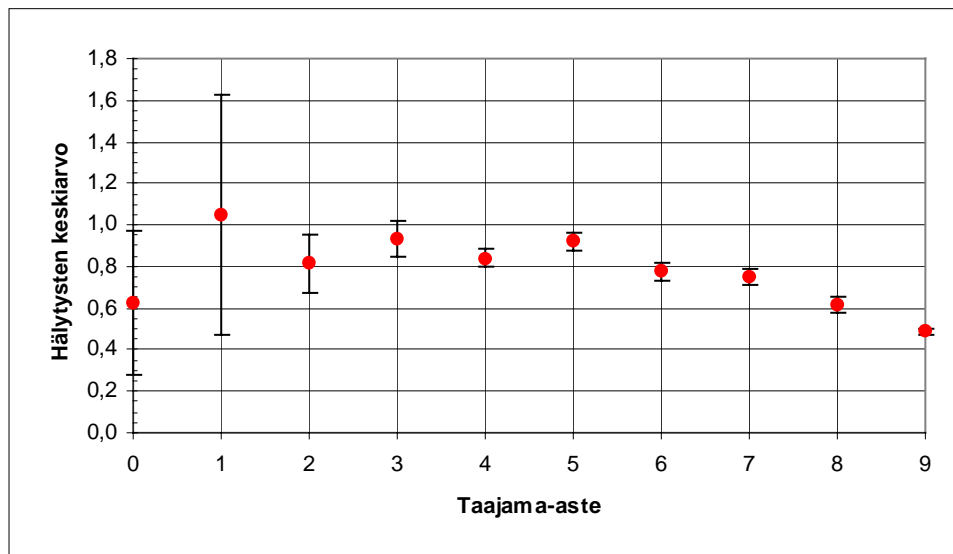
Kuvassa 13 on näkyvissä myöskin kuhunkin taajama-asteluokkaan kuuluvan väestön prosentiosuus koko väestöstä. Kuvassa 14a on esitetty ilmoitusvirrat asukasmäärää ja kerrosalaa kohden, jotka on lisäksi jaettu koko maan vastaavalla keskiarvolla. Tuloksista näkyy, että virherajojen puitteissa molemmat suureet riippuvat täysin samalla tavoin taajama-asteesta.



Kuva 14a. Ilmoitusvirta asukasmäärää ja kerrosalaa kohden taajama-asteen perusteella jaoteltuna. Jokainen piste on lisäksi jaettu koko maan keskiarvolla.

Kuvasta 14a havaitaan lisäksi, että palojen suhteellinen määrä pysyy vakiona, kun taajama-aste on 2–5, ja sen jälkeen määrä alkaa pienetä. Ylimmässä taajama-asteluokassa (9)

on paloja vain 53 % taajama-astetta 5 alempana olevien luokkien keskiarvosta. Suuri suhteellinen virhe taajama-asteen arvoilla 0 ja 1 estää tarkempien johtopäätösten tekemisen hälytysmäärän muutossuunnasta.

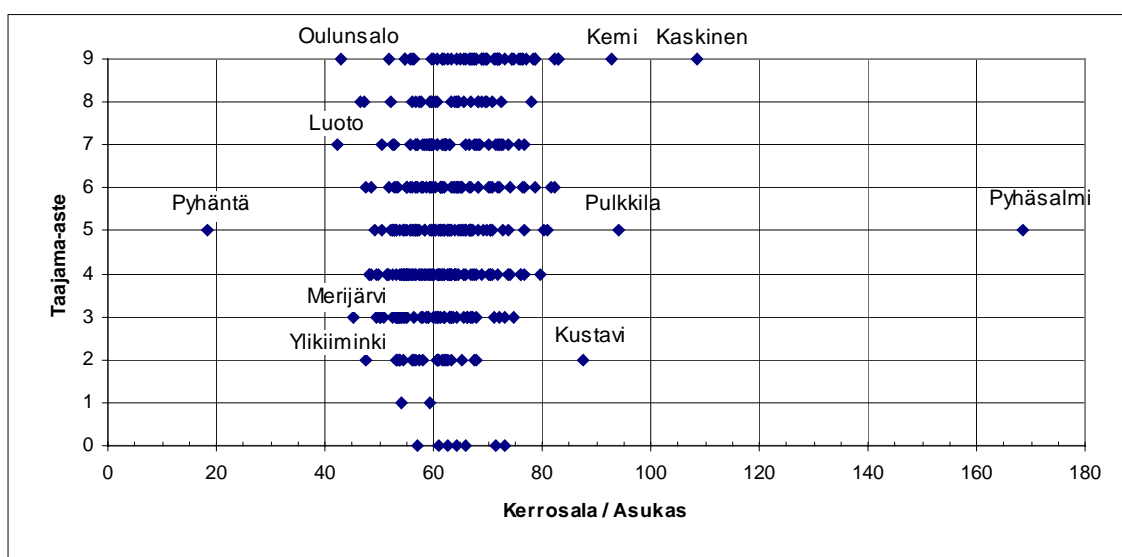


Kuva 14b. Keskimääräinen ilmoitusvirta asukasmäärää kohden (hälytyksiä vuodessa tuhatta asukasta kohden) kussakin taajama-asteluokassa.

Kuvasta 14b nähdään selvästi palojen määrän asukasta kohden pienenevän taajama-asteen suurilla arvoilla.

3.2.4 Kerrosala asukasta kohden

Jokaiselle kunnalle määritettiin kerrosala asukasta kohden jakamalla kunnan yhteenlaskettu kerrosala sen asukasluvulla.

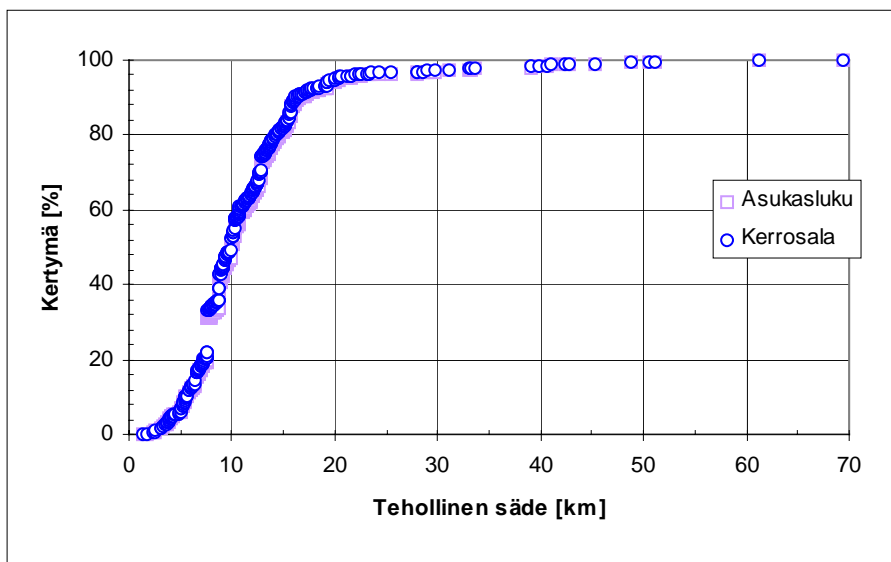


Kuva 15. Kuntien kerrosalan ja taajama-asteen jakautuminen.

Kuvassa 15 x-akselilla on kerrosala asukasta kohden ja y-akselilla taajama-aste. Kaikki kunnat on piirretty kuvaan omina pisteinään. Kuvasta voidaan todeta, että muutamia ääritapauksia lukuun ottamatta kerrosala asukasta kohden ei vaihtele kovin merkittävästi kunnittain koon tai sijaintiläänin mukaan.

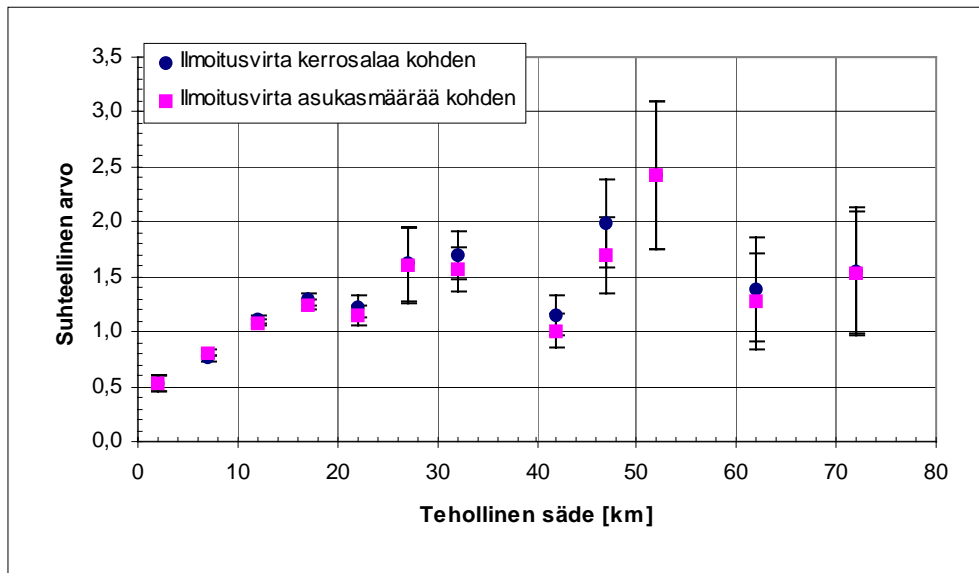
3.2.5 Tehollinen säde

Palokunnat sijaitsevat yleensä kuntakeskuksissa, ja kussakin kunnassa on vähintään yksi paloasema. Palokunnan saatavuus tiettyyn paikkaan kunnan sisällä riippuu kohteen keskimääräisestä etäisyydestä paloasemasta. Yksinkertaisin mahdollinen kunnan koon mitta tähän tarkoitukseen on tehollinen säde r . Se määritettiin ajattelemalla kunta ympyrän muotoiseksi, jolloin sen pinta-ala olisi $A = \pi r^2$, josta ratkaisemalla r saatiin tehollinen säde. Kerrosalan ja asukasluvun prosentuaalinen kertymä suhteessa teholliseen säteeseen on esitetty kuvassa 16. Siitä näkyy selkeästi, että sekä asukasluvun että kerrosalan kertymät ovat hyvin tarkkaan samat, mikä on sopusoinnussa myös kuvasta 15 saatavan tiedon kanssa. Lisäksi huomataan, että yli 50 % asukkaista ja kerrosalasta sijaitsee yli 10 kilometrin päässä kuntakeskuksesta. Tämä tulos on ilmeisesti harhaanjohtava ja johtuu liian yksinkertaisesta mallista, missä asukkaiden oletetaan jakautuvan tasaisesti kunnan alueelle. Kuten kuvasta 13 ilmenee, yli puolet väestöstä asuu taajama-asteen 9 kunnissa ja 88,9 % taajama-asteen 5–9 kunnissa. Jotta saataisiin todellinen kuva siitä, kuinka kaukana ihmiset tai rakennukset ovat paloasemista, tarvitaan tässä esitettyä huomattavasti yksityiskohtaisempi malli. Sellainen on periaatteessa tehtävissä, sillä meillä on sekä rakennuksista että ihmisten asuinpaikkojen koordinaateista yksityiskohtaiset sähköiset tietokannat. Kysymystä ei kuitenkaan käsitellä tässä enempää.



Kuva 16. Asukasluvun ja kerrosalan prosentuaalinen kertymä suhteessa teholliseen säteeseen.

Kuvassa 17 säteet jaettiin viiden kilometrin luokkiin ja hälytysten lukumäärä määritettiin kullekin luokalle normitusta varten. Hälytysten määrästä laskettiin ilmoitusvirrat asukasmäärää ja kerrosalaa kohden, jotka kumpikin jaettiin koko maan keskiarvolla.

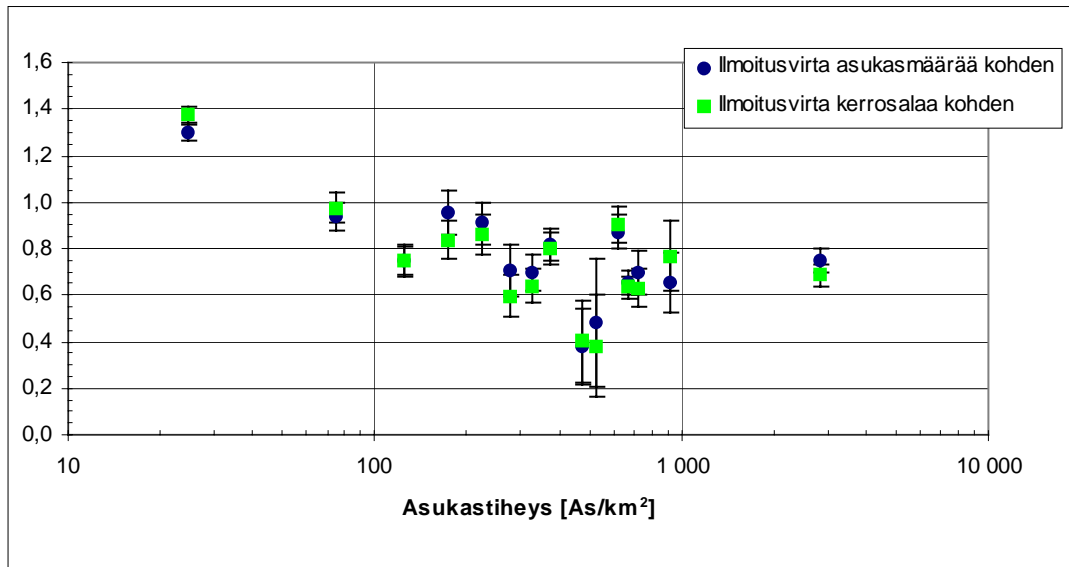


Kuva 17. Valtakunnan keskiarvoilla normitettujen ilmoitusvirtojen kerrosalaa ja asukasmäärää kohden riippuvuus kunnan tehollisesta säteestä.

Kuvasta 17 voidaan todeta suhteellisen hälytysmäärän kasvavan tehollisen säteen kasvassa aina 20 kilometriin asti, jonka jälkeen se näyttäisi pysyvän virherajojen puitteissa vakiona. Suuri tilastollinen virhe suurilla tehollisen säteen arvoilla estää kuitenkin tarkempien johtopäätösten tekemisen muutossuunnasta. Havaitaan, että hälytysten määrän keskiarvo kunnissa, joiden tehollinen säde on alle 10 kilometriä, on vain noin 40 % palojen hälytysten määrän keskiarvosta kunnissa, joiden tehollinen säde on yli 30 kilometriä. Kuva 17 muistuttaa suuresti kuvaa 14 peilattuna pystyakselin suhteen. Ilmiöiden selitys lienee sama, sillä taajama-aste ja tehollinen säde korreloivat vahvasti. Valtakunnallinen keskiarvo palojen määrässä ylittyy kuvan 14 mukaan, kun taajama-aste on yhtä suuri tai pienempi kuin seitsemän. Kuvan 17 mukaan tämä tapahtuu kunnan tehollisen halkaisijan ylittäessä 20 kilometriä.

3.2.6 Asukastiheys

Kunnan asukastiheys saatiin jakamalla kunnan asukasluku sen pinta-alalla. Asukastiheys jaettiin luokkiin siten, että luokan kooksi tuli 50 asukasta neliökilometrillä. Hälytysten lukumäärä määritettiin luokkaa kohden ja kuvassa 18 on ilmoitusvirrat asukasmäärää ja kerrosalaa kohden, jotka on lisäksi jaettu koko maan vastaavalla keskiarvolla.

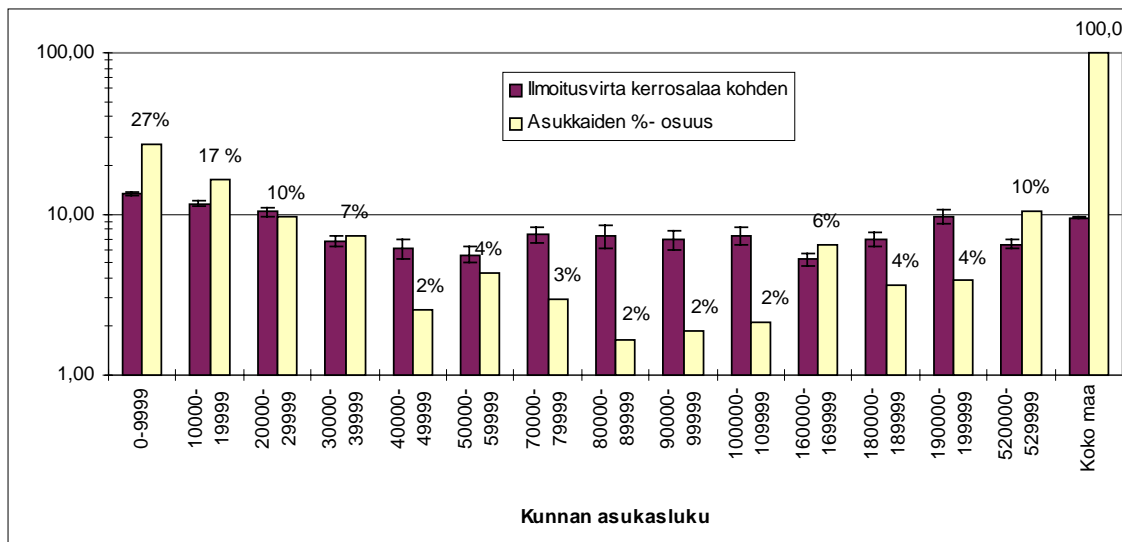


Kuva 18. Ilmoitusvirrat asukasmäärää ja kerrosalaa kohden jaettuna luokkiin asukastiheyden mukaisesti ja normitettuna koko maan keskiarvolla. Huomaa logaritminen vaak akseli.

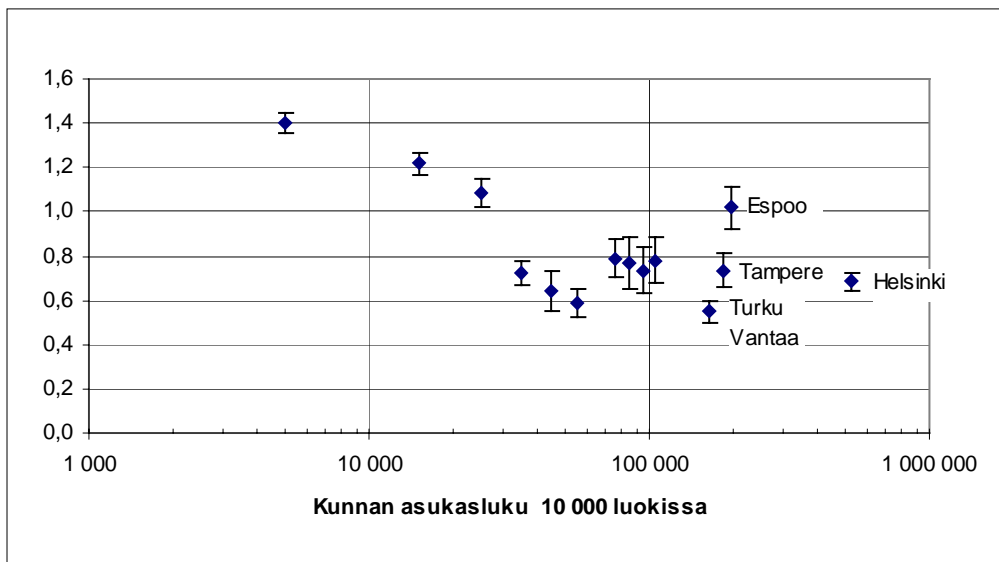
Kuvasta 18 voidaan todeta hälytysten suhteellisen määrän ensin pienenevän asukastiheyden kasvaessa, jonka jälkeen se pysyy suunnilleen virherajojen puitteissa vakiona. 600 asukasta neliökilometrillä ylempänä olevien luokkien hälytysten määrän keskiarvo on vain noin 65 % asukastiheyttä 100 alempana olevien luokkien keskiarvosta. Havaitaan, että hälytyksiä voidaan normittaa joko asukasluvulla tai kerrosalalla ja että kumpikin normitus on samanarvoinen, kuten kuvasta 18 hyvin nähdään.

3.2.7 Asukasluku

Kuvassa 19 kunnan asukasluku on jaettu 10 000 asukkaan luokkiin ja luokkaa vastaavaa hälytysten määrää on painotettu kerrosalalla. Oikean puoleinen pylväs kuvaa luokkaan sisältyvien asukkaiden määrän prosenttiosuutta koko väestöstä.



Kuva 19. Ilmoitusvirta kerrosalaa kohden luokiteltuna kunnan asukasluvun mukaisesti.



Kuva 20. Ilmoitusvirta kerrosalaa kohden luokiteltuna kunnan asukasluvun mukaisesti.

Kuvasta 20 nähdään, että hälytysten suhteellinen määrä pienenee kunnan asukasluvun kasvaessa aina 50 000 asukkaan kokoiseen kuntaan asti. Tämän jälkeen määrä pysyy tilastollisen virheen rajoissa lähes vakiona. Suurimmassa asukaslukuluokassa on hälytyksiä vain noin 49 % pienimmän asukaslukuluokan arvosta. 70 000:ta suurempien asukaslukuluokkien keskiarvo on vain noin 54 % pienimmän luokan arvosta.

3.2.8 Hälytysten määrän korrelaatio

Hälytysten määrän riippuvuutta asukasluvusta ja kerrosalasta tutkittiin piirtämällä hälytysten lukumäärä kunnittain sekä asukasluvun että kerrosalan funktioina. Näihin havaintoihin sovitettiin pienimmän neliösumman keinolla asukasluvulla tai kerrosalalla painotetut suorat, joiden yhtälöt ovat muotoa

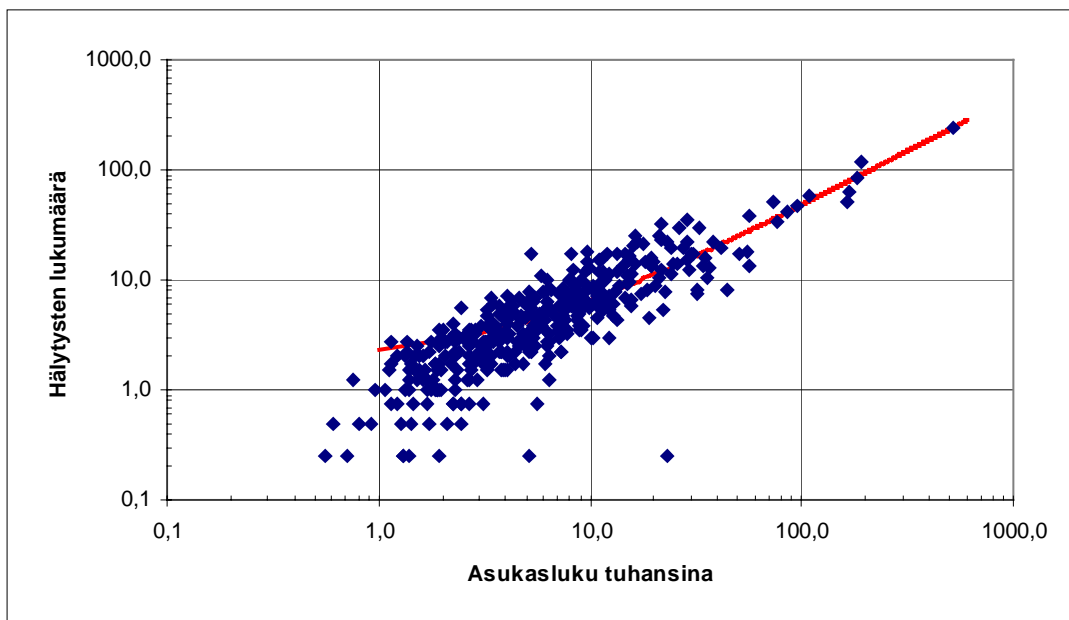
$$y = Ax + B, \quad (26)$$

missä y on hälytysten lukumäärä vuodessa ja x on joko asukasluku tuhansina tai kerrosala neliökilometreinä.

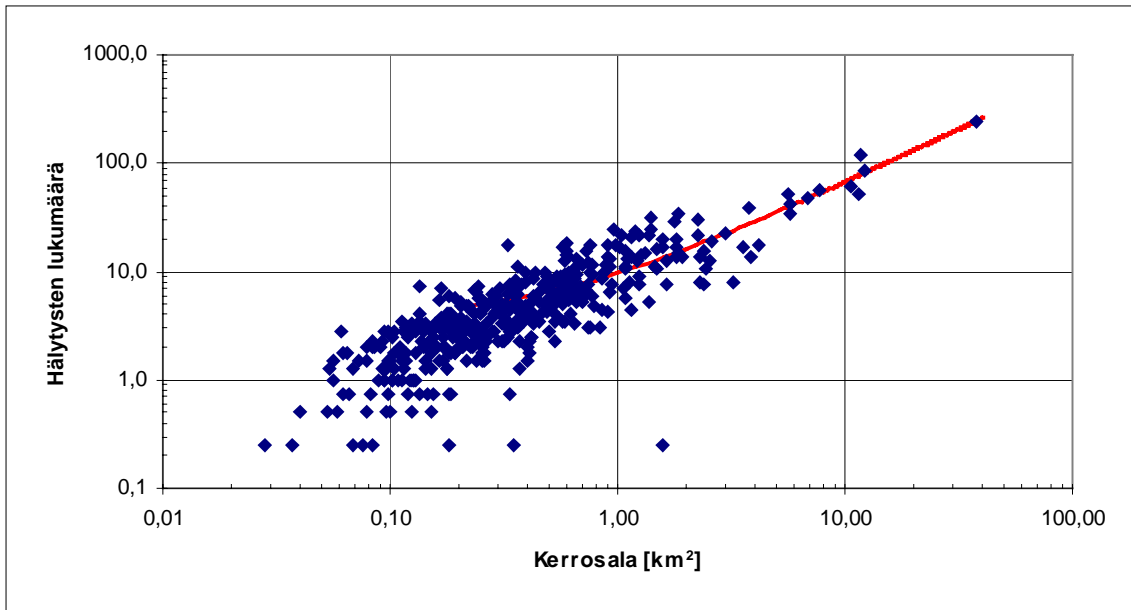
Sovitteet on esitetty kuvissa 21 ja 22. Parametrien A ja B arvot saatiin derivoimalla pienimmän neliösumman kaava

$$\sum_i w_i (Ax_i + B - y_i)^2 = \min! \quad (27)$$

A :n ja B :n suhteen ja asettamalla derivaattojen arvot nolliksi, jonka jälkeen yhtälöryhmästä ratkaistiin A ja B . Kaavassa (27) w_i on painokerroin, x_i on kunnan asukasluku tai kerrosala ja y_i on hälytysten lukumäärä kunnassa. Painokerroin saatiin kullekin kunnalle jakamalla kunnan asukasluku tai kerrosala koko maan vastaavalla arvolla.



Kuva 21. Kuntien hälytysten lukumäärä vuodessa asukasluvun funktiona.



Kuva 22. Kuntien hälytysten lukumäärä vuodessa kerrosalan funktiona.

Soviteparametrien arvot ovat taulukossa 3.

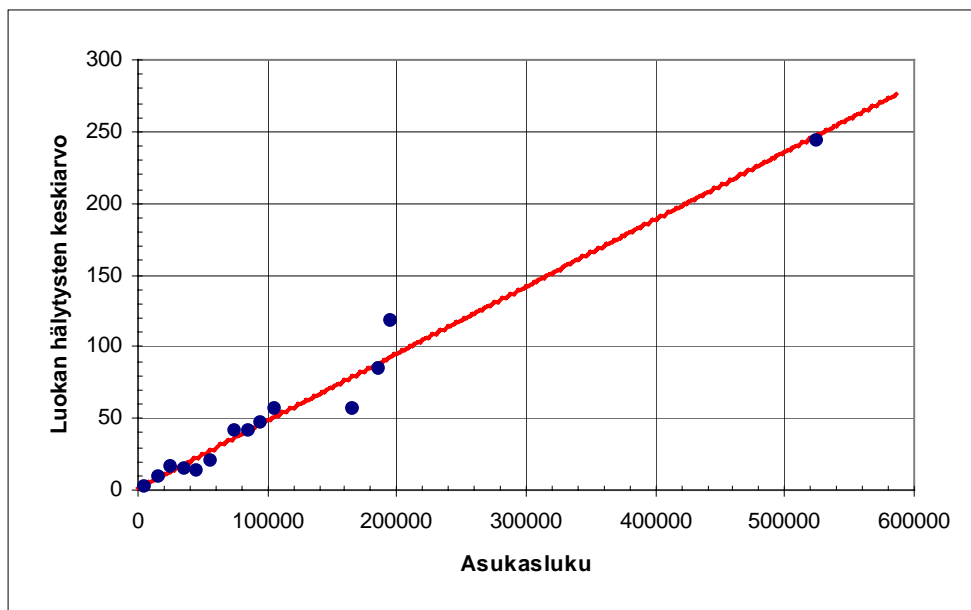
Taulukko 3. Kuvien 21 ja 22 muotoa $y = Ax+B$ olevien sovitesuorien parametrit.

	A	B
Asukasluku [1 000 as]	0,46	2,06
Kerrosala [km²]	6,42	3,33

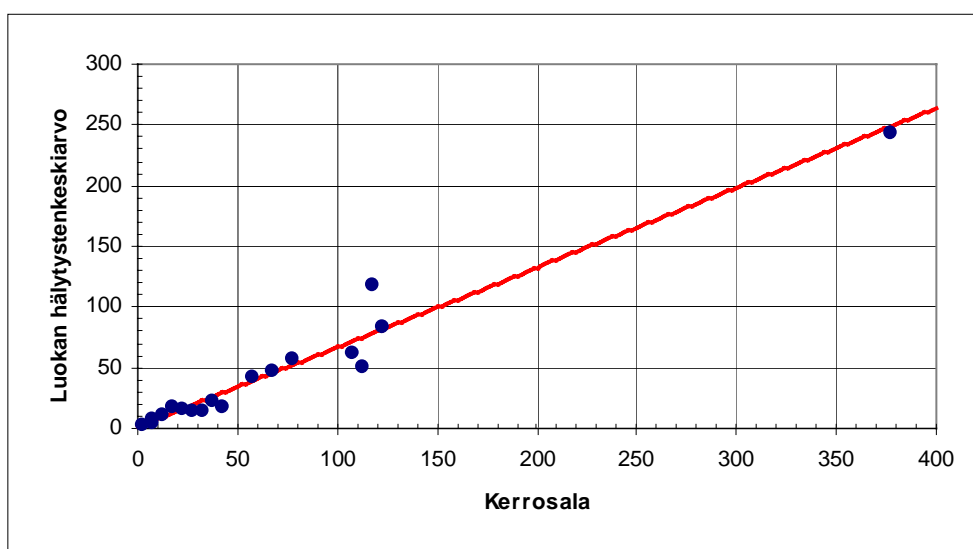
Seuraavaksi havainnot jaettiin asukasluvun perusteella 10 000 asukkaan ja kerrosalan perusteella 100 000 m²:n luokkiin ja määritettiin kunkin luokan hälytysten lukumäärän keskiarvo. Luokkien keskiarvopisteistä muodostuvalle havaintojoukolle sovitetiin STATISTICA-ohjelmalla suorat, joiden parametrien arvot ovat taulukossa 4 ja sovitteet on esitetty kuvissa 23 ja 24.

Taulukko 4. Kuvien 23 ja 24 muotoa $y = Ax+B$ olevien sovitesuorien parametrit.

	A	B
Asukasluku [1 000 as]	0,47	1,41
Kerrosala [km²]	6,55	1,47



Kuva 23. Hälytysten keskiarvo 10 000 asukkaan luokissa.



Kuva 24. Hälytysten keskiarvo 100 000 kerrosalaneliömetrin luokissa.

STATISTICA-ohjelma laski parametrien hajonnat σ_A ja σ_B , joiden avulla tarkistettiin A :n ja B :n luotettavuudet. Tarkastellaan ensin asukasmäärän perusteella luokiteltuja havaintoja. Kaksipuolisella t -testillä saatiin 1 %:n luottamustasolla ja 12:lla vapausasteella $t_{12}^{0,005} = 3,055$. Nyt $A/\sigma_A = 950 \gg 3,055$ ja $B/\sigma_B = 0,096 < 3,055$. Tämän vuoksi B ei merkittävästi poikkea nolasta ja voidaan olettaa, että $B = 0$, kun samalla A poikkeaa nolasta merkittävästi. A :n luottamusväli 99 %:n luottamustasolla lasketaan kaavan (20) avulla, jolloin saadaan $A = 0,4686 \pm 0,015$. Fisherin kriteerin avulla tarkastettiin oletus kaupungin väkiluvun ja palokunnan yksiköiden hälytysmäärän lineaarisesta yhteydestä. Yhtälöstä (21) saatiin käytetylle havaintoaineistolle $F(1,12) = 6020$. Luottamustasolla α

= 0,01 saadaan F-jakaumasta $F(1,12) = 9,33 \ll 6020$, joka mahdollistaa oletuksen lineaarisesta käyttäytymisestä.

Tarkasteltaessa kerrosalan mukaisesti luokiteltuja havaintoja saatiin t-testillä 1 %:n luottamustasolla ja 15:llä vapausasteella $t_{15}^{0,005} = 2,947$. Nyt $A/\sigma_A = 48 \gg 2,947$ ja $B/\sigma_B = 0,087 < 2,947$. Tämän vuoksi B ei merkittävästi poikkea nolasta ja voidaan olettaa, että $B = 0$, kun samalla A poikkeaa nolasta merkittävästi. A :n luottamusväliksi 99 %:n luottamustasolla saatiin $A = 6,551 \pm 0,406$. Yhtälöstä (21) laskettiin $F(1,15) = 403$ ja F-jakaumasta saatiin luottamustasolla $\alpha = 0,01$ $F(1,15) = 8,68 \ll 403$, joka mahdollistaa oletuksen mallin lineaarisesta luonteesta.

Tällöin rakennuspalojen keskimääräinen lukumäärä vuodessa saadaan kaavoista

$$y = 0,47x_1 \quad (28)$$

$$y = 6,55x_2, \quad (29)$$

missä y on rakennuspalojen keskimääräinen lukumäärä vuodessa ja x_1 on asukasluku tuhansina ja x_2 kerrosala neliökilometreinä.

3.2.9 Yhteenveto

Kun hälytykset jaoteltiin taajama-asteen mukaisesti luokkiin havaittiin (kuva 15), että hälytysten suhteellinen määrä pysyi vakiona, kun taajama-aste oli 2–5. Suuremmilla taajama-asteen arvoilla palojen suhteellinen määrä pieneni. (Arvoilla 0 ja 1 ei suuren tilastollisen virheen takia voitu tehdä johtopäätöksiä hälytysmäärän muutossuunnasta.)

Samoin todettiin (kuva 18) suhteellisen hälytysmäärän ensin pienenevän asukastiheyden kasvaessa noin sataan asukkaaseen neliökilometrillä ja sen jälkeen pysyvän virherajojen puitteissa lähes vakiona. (Suuremmilla asukastiheyden arvoilla tilastollinen virhe kasvoi liian suureksi, jotta johtopäätöksiä olisi voinut tehdä.)

Lisäksi havaittiin (kuva 20) hälytysten suhteellisen määrän pienenevän kunnan asukasluvun kasvaessa aina 50 000 asukkaan kokoiseen kuntaan asti, jonka jälkeen määrä pysyi tilastollisen virheen puitteissa lähes vakiona.

Suhteellinen hälytysmäärä kasvoi (kuva 17) myös tehollisen säteen kasvaessa aina 40 kilometriin asti, jonka jälkeen tilastollisen virheen suuruus esti tarkemmat johtopäätökset suuremmilla tehollisen säteen arvoilla.

Taajama-astetta tarkasteltaessa kuvasta 14 havaittiin, että ylimmässä taajama-asteessa (9) on paloja vain 53 % taajama-astetta 5 alempana olevien luokkien keskiarvosta. Kuvan 17 mukaisesti hälytysten määrä kunnissa, joiden tehollinen säde on alle 10 kilometriä, oli vain noin 40 % palojen hälytysten määrästä kunnissa, joiden tehollinen säde ylittää 30 kilometriä. Kuvasta 18 nähtiin, että taajaan asutuilla alueilla hälytysten määrän keskiarvo oli vain noin 65 % harvaan asuttujen alueiden luokkien keskiarvosta. Kuvasta 20 havaittiin puolestaan, että suurimmassa asukaslukuluokassa oli hälytyksiä vain noin 49 % pienimmän asukaslukuluokan arvosta. 70 000:ta suurempien asukaslukuluokkien keskiarvo oli vain noin 54 % pienimmän luokan arvosta. Voidaan todeta, että tekijä kaksi riittää kuvaamaan luokkien eroja riittävällä tarkkuudella.

Hälytysten määrä asukasta kohden näytti pienenevän taajaan asutuilla alueilla jopa alle koko maan keskiarvon, kun se harvaan asutuilla alueilla puolestaan ylitti sen hieman. Havaittavissa oli myöskin lievä raja ruuhka-Suomen ja haja-asutus-Suomen välillä. Ruuhka-Suomen alueella suhteellinen hälytysmäärä oli pienempi kuin haja-asutus-Suomessa. Tekijä kaksi riittää kuitenkin kuvaamaan kaikkia alueellisia eroja. Johtopäätöksenä voidaan todeta, että hälytysten määrää voidaan normittaa joko kerrosalaa tai asukaslukua kohden. Kumpikin normitus on virherajojen puitteissa samanarvoinen, sillä kerrosala asukasta kohden ei vaihtelee kovin merkittävästi kunnittain koon tai sijaintiläänin mukaan. Tarkasteltaessa suhteellista hälytysmäärää voidaan todeta Suomen olevan yleisesti ottaen melko homogeeninen alue, sillä hälytysten jaottelemiseen käytettyjen luokkien väliset erot eivät kasvaneet kovin suuriksi. Siksi mitoittavana tekijänä palokunnan resurssitarpeen arvioimiseksi syttymien osalta voidaan ensisijaisesti pitää koko maassa joko kerrosalaa tai asukaslukua.

4. Pelastusyksiköiden toiminta paikkakunnalla

4.1 Teoreettinen malli

4.1.1 Aikaisemmat tutkimukset

Pelastuslaitoksen operatiivista toimintaa voidaan kuvata jonoteoreettisilla malleilla, joiden tyypillisten parametrien arvot määritetään palotilastoista. Jonoteoriasta on hyvin paljon teoreettista kirjallisuutta, sillä sitä on sovellettu erityisesti puhelinliikenteen mallittamiseen jo sen syntyajoista eli yli sadan vuoden ajan. Jonoteoria kykenee kuitenkin kuvaamaan hyvinkin erilaisia tapahtumaketjuja, joilla ei ole mitään tekemistä itse puhelinten kanssa, mutta joiden matemaattinen rakenne on analoginen käsivälitteiseen puhelinvaihteeseen satunnaisesti jonottavan ihmisryhmän käyttäytymisen kanssa. Mallien matemaattiset perusteet on esitetty yksinkertaisimmillaan Morsen (1958) monografiassa ja Iversenin uudessa oppikirjassa (1998). Takácsin (1962) oppikirjassa erilaiset mallit on esitetty kursorisesti, mutta niiden matemaattisiin perusteisiin ja yhtälöiden johtoon kiinnostuneita kehotetaan tutustumaan Shrivastavan ja Kashyapin (1982) laajaan teokseen. Jonoteoriasta on suomen kielellä jonkin verran kirjallisuutta (Hertzberg 1972, Virtamo 1993), joista selviää erityisesti alan suomenkielinen termistö.

Erityisesti pelastusyksiköiden toimintaan jonoteoriaa on soveltanut Moskovan palokorkeakoulun professori Brušlinski (1988), jonka esittämään yksinkertaiseen malliin tässä esitetty teoria ja sen sovellukset perustuvat. Tässä hänen esitystään on laajennettu muista lähteistä erityisesti siitä syystä, ettei meillä ole helposti saatavissa niitä venäjänkielisiä oppikirjoja tai alkuperäisiä julkaisuja, joihin hän tekstinsä tueksi viittaa.

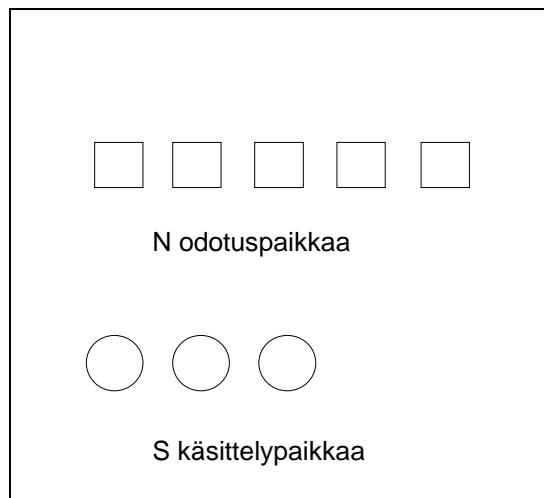
Brušlinskin käyttämä eksponentiaalinen palveluaikajakauma ei vastaa meillä tilastoista saatua likimäärin gammajakautunutta mallia (Rahikainen 1998, tarkempi esitys tämän julkaisun kohdassa 5.5). Brušlinski valitsi tämän mallin siksi, että se on ratkaistavissa suljetussa muodossa analyytisesti. Pollaczek (1953) on osoittanut, miten tämä malli on yleistettävissä mielivaltaiselle jakautumalle, ja sitä yleistystä sovelletaan tässä Takácsin (1962) ja Morsen (1958, luku 5) esittämässä muodossa.

Seuraavassa selostetaan yleistä jonoteoreettista mallia siinä laajuudessa, kuin sitä tarvitaan pelastustoimen operatiivisten yksiköiden (= ajoneuvojen) kuvaukseen.

4.1.2 Määritelmiä

Hertzbergin (1972) määritelmien mukaisesti jono muodostuu, kun asiakkaita saapuu paikalle, jossa tarjotaan tiettyjä palveluja, ja kun asiakkaat vaativat palvelua. Syöttö kuvaa, miten asiakkaat saapuvat ja liittyvät järjestelmään. Asiakkaiden lukumäärä voi olla äärellinen tai ääretön, ja ne voivat saapua yksitellen tai ryhmittäin. Jos jokaiselle saapuvalla asiakkaalla ei voida järjestää palvelua samanaikaisesti, käytetään jonotus- tai odotusjärjestelmää. Ellei järjestelmä ota vastaan uutta asiakasta, kun sen N jonotuspaikkaa on täynnä, kyseessä on estollinen viivejärjestelmä. Jonojärjestys määrää, kuinka asiakkaat käyttäytyvät jonossa. Yksinkertaisin tapaus on “ensin tullut, ensin käsittelyyn” -periaate, jonka mukaan asiakkaat käsitellään saapumisjärjestyksessä. Järjestelmässä, jossa on monta rinnakkaista palvelupaikkaa ($S > 1$), asiakkaalla voi olla vapaa pääsy joko kaiseen, mutta jokaisella käsittelypaikalla voi olla oma jononsa, jolla on oma jonojärjestys. Odotusaika on se aika, joka kuluu ennen kuin järjestelmään hetkellä t saapunut asiakas otetaan palveltavaksi. Tänä aikana palvellaan järjestelmässä ennen häntä olevia asiakkaita. Jonon pituus on sama kuin järjestelmässä hetkellä t olevien asiakkaiden lukumäärä.

Jonotusjärjestelmän kuvaamiseen on otettu käyttöön kuvan 25 mukaiset piirrostavat. Odotuspaikkoja kuvataan neliöillä ja käsittelypaikkoja ympyröillä.



Kuva 25. Jonotusjärjestelmää kuvaavat piirrostavat.

Tarkastellaan mielivaltaista järjestelmää, jonka sulkee sisäänsä tietty rajapinta (alue) ja johon tapahtuu saapumisia tiheydellä λ . Vastaavasti asiakkaat poistuvat järjestelmästä tiettyinä ajanhetkinä. Kun \bar{W} on asiakkaan keskimääräinen viipymisaika järjestelmän sisällä eli tässä operatiivisen yksikön toiminta-aika, niin keskimääräinen asiakkaiden lukumäärä \bar{N} järjestelmän sisällä saadaan kaavasta (Virtamo 1993)

$$\bar{N} = \lambda \bar{W}. \quad (30)$$

Tämä kaava tunnetaan nimellä Littlen tulos. Tuloksen käyttökelpoisuus johtuu sen yleisyydestä, sillä saapumisprosessista tarvitsee olettaa ainoastaan sen riippumattomuus ajasta. Määritetään Littlen tulos Helsingin kaupungin ja keskimäärin koko maan palohälytyksille (taulukko 5a). Toiminta-aika on määritetty kaikkien pelastusyksiköiden toiminta-ajan keskiarvosta. Taulukon 5a mukaisesti hälytyksiä esiintyy koko maassa 1,36 ja Helsingissä 1,30 vuorokaudessa miljoonaa asukasta kohden ja keskimääräinen rakennuspalojen lukumäärä järjestelmän sisällä on koko maassa 0,099 ja Helsingissä 0,048 miljoonaa asukasta kohden vuodessa.

Taulukko 5a. Littlen tulos koko maalle ja Helsingin palohälytyksille (tulokset normitettuna miljoonaa asukasta kohden vuodessa.)

	Rakennuspalojen lukumäärä vuodessa	Toiminta-aika \bar{W} [min]	Ilmoitusvirta λ [1/d]	Asiakkaiden määrä \bar{N}
Koko maa	498	104,9	1,36±0,03	0,099±0,002
Helsinki	474	53,4	1,30±0,08	0,048±0,003

Tilastokeskuksesta saadut asukasluvut ovat vuodelta 1995. Koko maassa (Ahvenanmaan väkiluku vähennetty) asukkaita oli tuolloin 5 091 624 ja Helsingissä 525 031. Katsottaessa asukasluvulla normitettuja tuloksia huomataan, että ilmoitusvirta Helsingissä on tilastollisella tarkkuudella sama kuin koko maassa, mutta toiminta-aikojen eron vuoksi Helsingissä on asiakkaita järjestelmän sisällä keskimäärin vain puolet koko maan keskiarvosta. Käyttämällä kaikkia kunnallisten palokuntien hälytysluonteisia lähtöjä (taulukko G1) ilmoitusvirran laskemiseen ja olettamalla rohkeasti toiminta-ajan olevan kaikissa tehtävissä saman kuin rakennuspalloissa asiakkaiden määräksi \bar{N} tulee noin satakertaiset arvot, toisin sanoen miljoonaa asukasta kohden on samanaikaisesti toiminnassa 10 yksikköä, joista kahdeksan sairaankuljetustehtävissä.

4.1.3 Palokuntien palveluiden saatavuuden jonoteoreettiset mallit

Tarkastellaan yksinkertaisia jonoja, joilla saapumis- ja palveluaika ovat eksponentiaalisesti jakautuneet. Eksponentiaalisella saapumisvälajakautumalla tarkoitetaan, että aikavälit t ($n-1$):en ja n :nnen hälytyksen välillä, syttymisvälit, ovat riippumattomia satunnaismuuttujia, joiden tiheysfunktio on

$$a(t) = \lambda e^{-\lambda t}. \quad (31)$$

Palveluaikajakauman tiheysfunktio on

$$s(t) = \mu e^{-\mu t}. \quad (32)$$

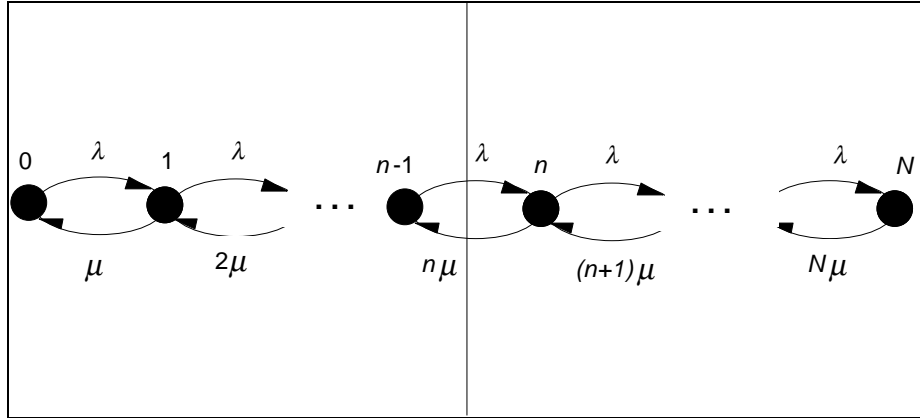
Kuvasta 11 nähdään, että syttymisväli noudattaa melko hyvin yhtälön (31) mukaista käyttäytymistä. Palveluaikajakaumasta katso huomautusta kohdassa 4.1.1.

Palokunnan saatavuutta voidaan kuvata klassisen tietoliikenneteorian ongelman menelmin. Palotekniikan kielelle käännettynä ongelma on seuraava: Käytettävissä on N pelastusyksikköä ja ilmoitusvirta (poissonjakautunut) on λ . Keskimääräinen yksikön toiminta-aika (palveluaika) on \bar{W} . Mikä on todennäköisyys, että hälytyksen tullessa kohteeseen ei voida lähettää pelastusyksikköä?

Ellei kohteeseen voida heti lähettää yksikköä, palo kehittyy siitä huolimatta ja tarvekin menee itsestään ohi. Käytännössä joko lähettäminen tapahtuu viivästetysti tai yksikkö tulee lähintä asemaa kauempaa. Todellisuudessa hälytykset joudutaan myös arvottamaan siten, että korkeariskiset palvellaan ensin ja matalariskiset ja riskittömät jonottavat. Tapauksissa, joissa lähin vapaa yksikkö on liian kaukana, jätetään matalariskinen tehtävä kesken ja siirrytään korkeariskisen tehtävän hoitamiseen. Jotta näkisimme mallin yleisiä piirteitä, teemme liioitellun yksinkertaistavan oletuksen, että hälytykseen ei reagoida lainkaan, ellei lähimmällä asemalla ole vapaata yksikköä. Lisäksi oletamme palveluajan eksponentiaalisesti jakautuneeksi yhtälön (32) mukaisesti ($\mu = 1/\bar{W}$). Tämäkin on vastoin havaintoja, mutta tässä helpottaa matemaattista käsittelyä. Näillä ehdoilla pelastuslaitos toimisi klassisen tietoliikenneteorian estojärjestelmän tavoin, jolloin kaikki kutsut (hälytykset), joihin ei voida heti vastata, katsotaan menetetyiksi. Menetysten ei oleteta vaikuttavan järjestelmän myöhempään tilaan esimerkiksi uusintakutsuina (-hälytyksinä).

4.1.3.1 Estojärjestelmä ja Erlangin estokaava

Estojärjestelmä muodostaa yksinkertaisen Markovin ketjun, jota voidaan kaavamaisesti esittää kuvan 26 tavalla (Virtamo 1993).



Kuva 26. Estojärjestelmän (Markovin ketjun) tilasiirtymäkaavio.

Kukin kuvan 26 solmupiste esittää järjestelmää tilassa, jossa on samanaikaisesti varattuna $0, 1, 2, \dots, N$ kappaletta yksiköitä. Näiden tilojen muutos voi tapahtua vain syntymäkuolemaprosessien välityksellä. Järjestelmän kuormitus kasvaa aina yhdellä yksiköllä kerrallaan, jonka siirtymänopeus (ilmoitusvirta) on λ . Kuormitus vähenee yksiköiden vapautuessa tilasta n nopeudella (vapautumisvirta) $n\mu$. Jakamalla ketju tilojen n ja $n+1$ välisellä rajapinnalla kahteen osaan joukkojen välille saadaan tasapainoyhtälö

$$\lambda P_{n-1} = n\mu P_n, \quad (33)$$

missä P_n on tilan todennäköisyys tasapainotilassa. Yhtälöstä (33) saadaan palautuskaava

$$P_n = \frac{1}{n} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right) P_{n-1}. \quad (34)$$

Soveltamalla kaavaa (34) peräkkäin koko ketjuun saadaan yleisesti

$$P_n = \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^n P_0. \quad (35)$$

Koska kaikkien tilojen todennäköisyyksien summan tulee olla yksikön suuruinen

$$\sum_{n=0}^N P_n = 1. \quad (36)$$

Tästä normitusehdosta seuraa

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{n=0}^N \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n}, \quad (37)$$

joten lopulta

$$P_n = \frac{\frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n}{\sum_{n=0}^N \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n}. \quad (38)$$

Yhtälöiden (37) ja (38) nimittäjässä oleva summa on eksponenttifunktion Taylorin sarjan n ensimmäistä termiä. Kun

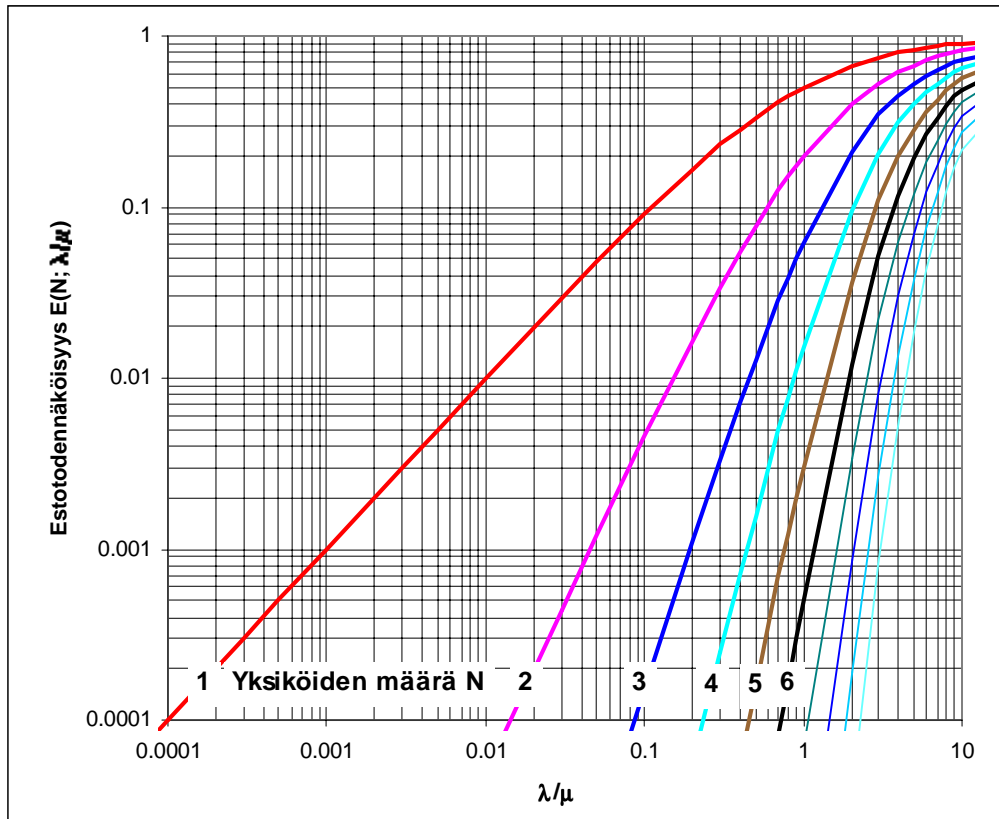
$$n \gg \frac{\lambda}{\mu}, \quad (39)$$

summan arvo lähestyy arvoa $\exp(-\lambda/\mu)$ ja siten vastaava P_n poissonjakauman todennäköisyyttä, kuten yhtälöstä (11) havaitaan.

Esto syntyy, kun kaikki N yksikköä ovat varatut. Sen todennäköisyys P_N on yhtälöstä (38)

$$P_N = E\left(N, \frac{\lambda}{\mu}\right) = \frac{\frac{1}{N!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^N}{\sum_{n=0}^N \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n}, \quad (40)$$

mikä tunnetaan Erlangin estokaavana. Kuvassa 27 on esitetty graafisesti, miten eston todennäköisyys riippuu yksiköiden määrästä N sekä suhteesta λ/μ .



Kuva 27. Erlangin estotodennäköisyyden riippuvuus yksiköiden lukumäärästä ja suhteesta λ/μ .

Esimerkkinä kuvasta 27 nähdään, että käytettäessä taulukon 5 mukaisia keskiarvoja ilmoitusvirralle ja toiminta-ajalle $\bar{W} = 1/\mu$ saadaan $E(1;0,099) = 9,0 \%$, $E(2;0,099) = 0,44 \%$ jne. Tämä tulos on tulkittava palotoimen operaatioissa siten, että Suomen keskivertopaikkakunnalla toimiva valtakunnan keskitasoa oleva palokunta ei voi $9,0 \%$:n todennäköisyydellä vastata kutsuun, kun käytössä on vain yksi yksikkö, ja $0,44 \%$:n todennäköisyydellä, kun käytössä on kaksi yksikköä miljoonaa asukasta kohti.

Koska miljoona henkilöä on Suomessa suuri luku yhden kunnan asukasmääräksi, katsotaan toisessa esimerkissä, miten Erlangin estokaavaa käytetään todellisuudessa esimerkiksi Jyväskylässä, missä palohälytysten määrän sekä pelastustoimen sammutukseen käyttämän ajan oletamme olevan valtakunnan keskiarvoja. Jyväskylän asukasmäärä oli vuonna 1995 Tilastokeskuksen mukaan 74 072 henkeä. Ilmoitusvirta on siten taulukon 5 mukaan $(74\,072/1\,000\,000) \times 1,36\,1/d = 0,10\,1/d$. Suhde $\lambda/\mu = 0,10 \times (104,9/(60 \times 24)) = 0,007$. Tästä saadaan $E(1;0,007) = 0,7 \%$. Tämä tulkitaan siten, että jos Jyväskylässä olisi vain yksi pelastusyksikkö, se ei voi $0,7 \%$ todennäköisyydellä vastata kutsuun, kun sen tehtävänä olisi pelkästään rakennuspalojen sammuttaminen.

Tämän perusteella näyttäisi, että palokuntamme ovat vahvasti ylimitoitettuja, koska yksiköitä on huomattavasti enemmän kuin Erlangin estokaava (40) näyttäisi edellyttävän. Tähän on kuitenkin huomautettava, että käytetyissä toimintavalmius- ja toiminta-aikojen

sekä hälytysmäärien tilastoissa on mukana vain rakennuspalot, sillä ne on rekisteröity melko luotettavasti ja TOPA-projekti koskee pääasiassa vain rakennuksia. Kun otetaan huomioon palokunnan muut tehtävät, erityisesti ilmoitusvirrat kasvavat, kuten Venäjän esimerkki (yhtälöt (22) ja (23)) osoittaa. Koska meillä on lisäksi mukana sairaankuljetus toisin kuin Venäjällä, ilmoitusvirran suuruus pelkkiin rakennuspaloihin verrattuna on huomattava. Ilmoitusvirran eri komponenteille Suomessa saamme liitteen G taulukon G1 mukaiset keskimääräiset arvot vuosina 1980–1992 (Sisäasiainministeriö 1997). Oletetaan lisäksi suuresti yksinkertaistaen, koska suoraa mitattua tietoa ei ole käytettävissä, että näissä muissa hälytyksissä toiminta-aika on sama kuin rakennuspalloissa, jolloin taulukon G1 tietoja käyttämällä suhde $\lambda/\mu = \rho$, palvelukerroin, kasvaa noin satakertaiseksi. Siten kuvan 27 mukaan estotodennäköisyydet ovat $E(1;10) = 91 \%$, $E(2;10) = 82 \%$ ja $E(10;10) = 21 \%$, mitkä kaikki ovat niin suuria, että heti nähdään 10 yksikköä liian vähäiseksi määräksi hoitamaan miljoonan asukkaan tarpeita. Jyväskylään sovellettaessa saamme keskimäärin $\lambda/\mu = 0,7$, jolloin $E(1;0,7) = 41 \%$, $E(2;0,7) = 13 \%$, $E(3;0,7) = 2,9 \%$, $E(4;0,7) = 0,50 \%$ ja $E(5;0,7) = 0,07 \%$. Hyväksyttävästä todennäköisyydestä meillä ei ole normeja ja kuntien välinen yhteistoiminta monimutkaistaa mallia, mutta karkeasti ottaen voitaisiin arvioida tehtävien hoitamiseen tarvittavan 3–5 yksikköä. On oletettavissa, että sairaankuljetusten toiminta-aika ainakin Jyväskylässä on palon sammuttamista nopeampaa. Siksi nämä numeroesimerkit saattavat olla melko epärealistisia, kunnes myös sairaankuljetusten osalta on käytettävissä todellisia toiminta-aikajakaumia.

Vertailun vuoksi lasketaan estotodennäköisyydet Tanskassa. Kohdassa 3.2.1 todettiin, että Tanskassa tehtyjen tutkimusten perusteella on todettu, että ensilähdön yksiköitä tulee olla käytettävissä tietyn väkimäärän omaavalla alueella siten, että kun väkiluku on alle 15 000, yksiköitä tulee olla yksi, kun väkiluku on 15 000–35 000, yksiköitä tulee olla kaksi ja kun väkiluku on 35 000–60 000, yksiköitä tulee olla kolme (Haurum 1977). Ilmoitusvirran arvoksi Tanskassa saatiin tilastosta 3,38 hälytystä vuodessa tuhatta asukasta kohden (Anon. 1981). Koska toiminta-ajasta ei ollut saatavissa tilastotietoa, oletettiin sen olevan saman kuin Helsingissä eli 53,4 min.

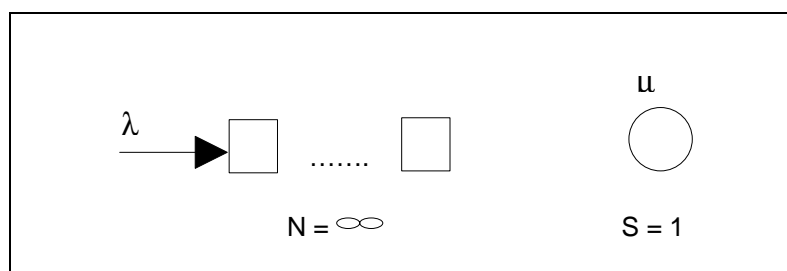
Taulukko 5b. Estotodennäköisyydet Tanskassa.

Asukkaiden lukumäärä	Ilmoitusvirta [1/d]	Yksiköiden lukumäärä, N	Palvelukerroin, ρ	Estotodennäköisyys $E(N, \rho)$ [%]
15 000	0,139	1	0,005	0,5
15 000	0,139	2	0,005	0,001
35 000	0,324	2	0,012	0,007
35 000	0,324	3	0,012	0,00003
60 000	0,556	3	0,021	0,0001

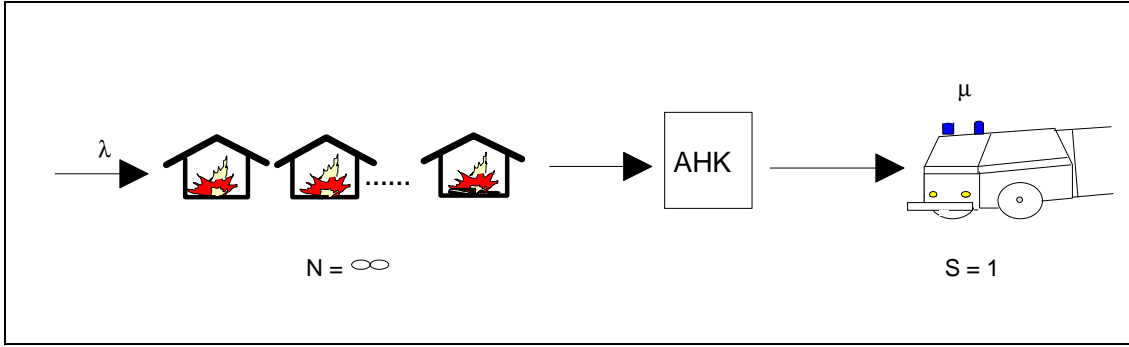
Tanskan estotodennäköisyydet asukaslukujen raja-arvoilla on esitetty taulukossa 5b. Estotodennäköisyydet näillä käytettävissä olevien yksiköiden määrillä $5E-3-3E-7$. Hyväksyttävän estotodennäköisyyden arvosta Brušlinski (1992) on todennut, että yksiköiden lukumäärä N tulee valita siten, että estotodennäköisyys on korkeintaan välillä $10E-3-10E-4$.

4.1.3.2 Ääretön määrä odotuspaikkoja, yksi palvelupaikka

Esitetty estojärjestelmä oli monin tavoin epärealistisesti yksinkertaistettu. Seuraavassa esitetään muutamia hieman realistisempia pelastustoimen jonoteoreettisia malleja, joilla järjestelmän palveluiden saatavuutta voidaan arvioida. Tarkastellaan kuvan 28 mukaista järjestelmää, jossa voi olla mielivaltainen määrä asiakkaita, joista yksi on aina palveltavana. Palvelupaikka on tyhjä vain, jos koko järjestelmässä ole yhtään asiakasta. Jos palvelupaikka on varattu, seuraavat asiakkaat (hälytykset) odottavat jonossa saapumisjärjestyksessä, kunnes palvelupaikka vapautuu ja seuraava asiakas siirtyy palveltavaksi.



Kuva 28. Järjestelmä, jossa on ääretön määrä odotuspaikkoja ja yksi palvelupaikka.



Kuva 29. Järjestelmä, jossa ääretön määrä hälytyksiä jonossa ja yksi operatiivinen yksikkö niiden hoitamiseen.

Kuvassa 29 on esitetty kaavamaisesti, mitä kuva 28 sovellettuna pelastustoimeen tarkoittaa asiallisesti. Uusia tulipaloja esiintyy λ kappaletta päivässä eli λ on ilmoitusvirta. Näistä paloista tulee ilmoitus aluehälytyskeskukseen (AHK), joka välittää hälytyksen eteenpäin paloasemalle. Asemalla on ainoastaan yksi operatiivinen yksikkö ($S = 1$), joka hoitaa yhden hälytyksen kerrallaan. Hälytyksiä voi tulla ääretön määrä, ja ne jäävät jonoon odottamaan omaa vuoroaan saapumisjärjestyksessä. Kun yksikkö on saanut yhden hälytyksen hoidettua loppuun ajassa $1/\mu$, se vapautuu palvelemaan seuraavana jonossa olevaa hälytystä.

Todennäköisyyttä sille, että aikavälissä $(0,t)$ saapuu k kappaletta uusia hälytyksiä jonoon, kun odotuspaikkoja on riittävästi, kuvaa ajasta riippumaton poissonjakauma (Hertzberg 1972, Morse 1958)

$$A_k(t) = e^{-\lambda t} \frac{(\lambda t)^k}{k!}. \quad (41)$$

Todennäköisyys, että aikavälissä $(0,t)$ palvelin (operatiivinen yksikkö) vapautuu, on

$$S_0(t) = e^{-\mu t}. \quad (42)$$

Todennäköisyyden P_n , että systeemissä on n yksikköä, muutos aiheutuu uusien hälytysten saapumisesta sekä vanhojen hälytysten loppuun saattamisesta. Esimerkiksi uuden hälytyksen saapumisen seurauksena muutos tilasta n tilaan $n+1$ seuraavalla ajanhetkellä dt on P_n kertaa se todennäköisyys, että ajassa dt tulee yksi hälytys.

$$P_n A_1(dt) = P_n (\lambda dt) e^{-\lambda dt} \quad (43)$$

joka on sama kuin $P_n \lambda dt$, kun jätetään ottamatta huomioon dt :n korkeammat potenssit. Toisaalta todennäköisyys, että P_n kasvaa systeemin siirtyessä tilasta $n-1$ tilaan n , on

$$P_{n-1} A_1(dt) \rightarrow P_{n-1} \lambda dt \quad (44)$$

ja mahdollisuus, että systeemi siirtyisi tiloista $n-2, n-3, \dots$ tilaan n , voidaan jättää ottamatta huomioon, kun dt on riittävän pieni. Yhtälön (43) mukaisesti saadaan palvelun päättyessä tilassa n ja siirryttäessä tilaan $n-1$ todennäköisyydeksi $P_n \mu dt$ ja siirryttäessä tilasta $n+1$ tilaan n vastaavasti $P_{n+1} \mu dt$, missä μ on palveluaikajakauman, yhtälön (32) parametri. Voidaan todeta, että P_n :ien arvot hetkellä $t+dt$ riippuvat melko yksimielisesti arvoista hetkellä t , jos prosessi, joka aiheuttaa muutoksen tilasta n tilaan m , ei riipu suoraan ajasta. Eksponentiaalisissa prosesseissa tämä on voimassa. Todennäköisyys $P_n(t+dt)$ systeemin tilasta n hetkellä $t+dt$ on yhtä suuri kuin tulon $P_m(t) T_{mn}(dt)$ summa kaikkien tilojen yli, missä $P_m(t)$ on tilan m todennäköisyys hetkellä t ja $T_{mn}(dt)$ siirtymis-todennäköisyys tilasta m tilaan n aikavälillä dt .

$$P_n(t+dt) = \sum_m T_{mn}(dt) P_m(t) = T_{nn} P_n + T_{n+1,n} P_{n+1} + T_{n-1,n} P_{n-1} = \quad (45)$$

$$P_n [1 - (\mu + \lambda) dt] + P_{n+1} (\mu dt) + P_{n-1} (\lambda dt)$$

$$\frac{dP_n}{dt} = -(\mu + \lambda) P_n + \mu P_{n+1} + \lambda P_{n-1} \quad (46)$$

Todennäköisyydeksi, että tila n säilyy ajan dt , joka on sama kuin todennäköisyys, että uusia hälytyksiä ei tule eikä palvella, saadaan kaavasta

$$T_{nn} = A_0(dt) S_0(dt) = e^{-(\mu+\lambda)dt} \cong 1 - (\mu + \lambda) dt. \quad (47)$$

Muutoksen todennäköisyys tilasta m tilaan n (jos $m < n$) on todennäköisyys, että hälytyksiä saapuu $m-n$ kappaletta tai että hälytyksiä saapuu $l-n+m$ kappaletta ja niistä l hälytystä palvellaan ajassa dt (vastaavasti $m > n$). Ainoat tällaiset dt :n ensimmäistä kertalukua olevat termit ovat

$$T_{n+1,n} \cong A_0(dt) S_1(dt) \cong \mu dt \quad \text{ja} \quad (48)$$

$$T_{n-1,n} \cong A_1(dt) S_0(dt) \cong \lambda dt \quad (\text{kun } n > 0). \quad (49)$$

Yhtälöstä (48) on tulkittava, että yhtään uutta hälytystä ei saavu ja yksi hälytys saadaan palveltua, kun yhtälössä (49) saapuu yksi uusi hälytys, mutta yhtään vanhaa ei palvella loppuun asti ajassa dt .

Huomioimalla, että Taylorin sarjakehitelmän mukaan $P_n(t+dt)$ on $P_n(t)+dP_n$, ja katkaisemalla ensimmäisen asteen termin jälkeen saadaan

$$P_n(t+dt) = P_n + dP_n = T_{nn}P_n + T_{n+1,n}P_{n+1} + T_{n-1,n}P_{n-1}. \quad (50)$$

Sijoittamalla siirtymätodennäköisyydet yhtälöistä (47)-(49) ja termejä järjestelemällä, saadaan lopulta siirtymätodennäköisyyksille differentiaaliyhtälö.

$$\frac{dP_n}{dt} = \lambda P_{n-1} + \mu P_{n+1} - (\lambda + \mu)P_n. \quad (51)$$

Kun yhtälön (51) aikaderivaatta asetetaan nolllaksi, todennäköisyydet P_n eivät enää riipu ajasta. Tämä on käytännössä useimmiten esiintyvä tapaus ja myöhemmin vain tätä käsitellään. Nämä tilansiirtoja käsittelevät yhtälöt ovat voimassa, kun kaikki muutokset ovat eksponentiaalisia prosesseja ja keskimääräinen ilmoitus- ja vapautumisvirta ovat ajasta riippumattomia.

Asettamalla yhtälö (51) nolllaksi vuorotellen kullekin n :n arvolle saadaan vakiokertoiminen differenssiyhtälöryhmä (Kolmogorovin yhtälöt), joka on helppo ratkaista. Todennäköisyydellä P_0 on erityinen muoto, koska ei ole olemassa tilaa P_{-1} , josta siirtyä tilaan P_0 . Tällöin kaikki yksiköt ovat vapaita.

$$\mu P_1 - \lambda P_0 = 0 \quad (52)$$

$$\mu P_{n+1} + \lambda P_{n-1} - (\lambda + \mu)P_n = 0 \quad (53)$$

Muut yhtälöt ovatkin yleistä muotoa. Tästä saadaan

$$\mu P_{n+1} - \lambda P_n = \mu P_n - \lambda P_{n-1}. \quad (54)$$

Antamalla n :lle vuoronperään arvot $n, n-1, \dots, 1$ havaitaan, että

$$\mu P_n - \lambda P_{n-1} = \mu P_{n-1} - \lambda P_{n-2} = \dots = \mu P_1 - \lambda P_0 = 0, \quad (55)$$

josta seuraa

$$\frac{P_{n+1}}{P_n} = \frac{\lambda}{\mu} = \rho, \quad (56)$$

jossa ρ on palvelukerroin. Tästä seuraa, että

$$P_{n+1} = P_0 \rho^{n+1}. \quad (57)$$

P_0 :n arvo saadaan ottamalla huomioon, että todennäköisyyksien summan tulee olla yksi ja kun lisäksi tiedetään geometrisen sarjan yleinen summakaava

$$\sum_{n=0}^{\infty} r^n = \frac{1}{1-r}, \quad (58)$$

saadaan

$$\sum_{n=0}^{\infty} P_n = P_0 \sum_{n=0}^{\infty} \rho^n = P_0 \frac{1}{1-\rho} = 1, \quad (59)$$

mistä saadaan edelleen

$$P_0 = (1-\rho), \quad \rho < 1 \quad (60)$$

ja lopulta

$$P_n = (1-\rho)\rho^n. \quad (61)$$

Tässä järjestelmässä olevien palveltavien asiakkaiden keskimääräinen lukumäärä \bar{N} saadaan kaavasta (Virtamo 1993)

$$\bar{N} = \sum_{n=0}^{\infty} nP_n = \rho + \frac{\rho^2}{1-\rho}. \quad (62)$$

Kaavassa (62) ensimmäinen termi oikealla (ρ) on tulkittava palveltavana olevien asiakkaiden lukumääräksi ja toinen termi odottavien asiakkaiden määräksi. Littlen tuloksesta (30) saadaan yhtälöä (62) käyttäen keskimääräinen odotusaika

$$W = \frac{(\bar{N} - \rho)}{\lambda} = \frac{\rho}{\mu - \lambda}. \quad (63)$$

Arvioitaessa järjestelmän tehoa tätä odotusaikaa on verrattava keskimääräiseen toimintavalmiusaikaan, joita on määritetty kohdassa 5.4.

Tämän kohdan tulokset pätevät toistaiseksi vain eksponentiaaliselle palveluaikajakaumalle, mikä on vastoin havaintoja, kuten edellä on huomautettu. Tulokset voidaan kuitenkin yleistää mielivaltaiselle palveluaikajakaumalle (Virtamo 1993) käyttäen Pol-

laczekin–Hintšin keskiarvokaavaa (Pollaczek 1953, Hintšin 1955) Tulokset esitetään johtamatta niitä matemaattisesti. Keskimääräinen asiakkaiden lukumäärä \bar{N} on nyt

$$\bar{N} = \rho + \rho^2 \frac{1 + \mu^2 \sigma^2}{2(1 - \rho)} \quad (64)$$

ja keskimääräinen odotusaika W

$$W = \frac{\rho(1 + \mu^2 \sigma^2)}{2(1 - \rho)} \frac{1}{\mu} \quad (65)$$

joissa σ^2 on palveluaikajakauman varianssi. Kun palveluaikajakauma on eksponentiaalinen ($\sigma = 1/\mu$), kaavat (64) ja (65) supistuvat vastaavasti muotoon (62) ja (63).

Tarkastellaan nyt aluetta, jossa oletetaan olevan käytettävissä yksi palo- ja pelastustoimen operatiivinen yksikkö. Otetaan esimerkiksi Kannus, jossa vuonna 1996 esiintyi kuusi ONTIKAan kirjattua rakennuspaloa, joiden keskimääräinen toiminta-aika oli noin 60 minuuttia. Tällöin saadaan ilmoitus- ja vapautumisvirroiksi

$$\lambda = \frac{6}{365d} = 0,0164 \frac{1}{d} \quad (66)$$

$$\mu = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{60 \text{ min}} = 24 \frac{1}{d},$$

jolloin palvelukertoimeksi ρ saadaan

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{0,0164}{24} = 0,0007. \quad (67a)$$

Palveltavien asiakkaiden lukumäärä järjestelmässä on

$$\bar{N} = 0,0007 + 0,00002 \quad (68)$$

sekä odotusaika

$$W = 0,04 \text{ min} \quad (69)$$

kaavan (63) ja

$$W = 0,08 \text{ min} \quad (70)$$

kaavan (65) mukaan.

Saadaan todennäköisyyksiksi kaavojen (60) ja (61) avulla

$$\begin{aligned} P_0 &= 0,9993 \text{ ja} \\ P_1 &= 0,0007. \end{aligned} \quad (71a)$$

Tällöin tietyllä ajanhetkellä järjestelmässä on 0,0007 rakennuspaloa, joiden keskimääräinen odotusaika on 0,04 minuuttia eksponentti- ja 0,08 minuuttia gammajakautuman mukaan. Todennäköisyys, että tietyllä ajan hetkellä yksi yksikkö on varattu, on 0,0007. Täten järjestelmän ruuhkautuminen ei ole pelkona. Jos edellä esitettyyn tapaan lasketaan samat arvot käyttämällä kaikkien hälytyslähtöjen määrää taulukosta G1, josta nähdään, että rakennuspalojen osuus on noin 2,7 % kaikista hälytyksistä, saadaan kaikkien hälytysten määräksi Kannuksessa 222 kappaletta vuodessa ja siten palvelukertoimeksi

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{0,608}{24} = 0,025. \quad (67b)$$

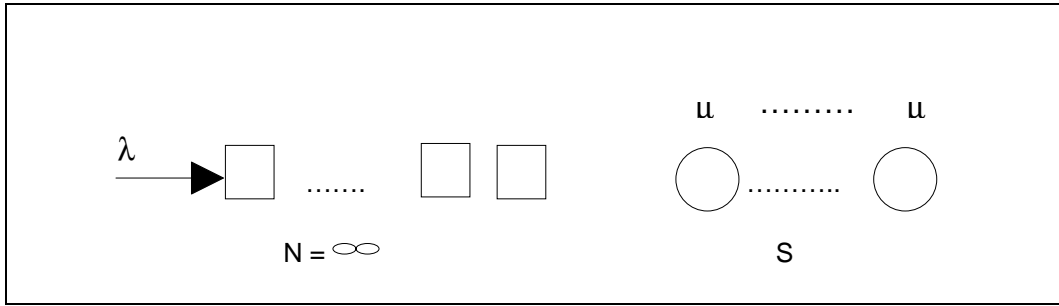
Tällöin todennäköisyydet ovat

$$\begin{aligned} P_0 &= 0,9747 \text{ ja} \\ P_1 &= 0,0247. \end{aligned} \quad (71b)$$

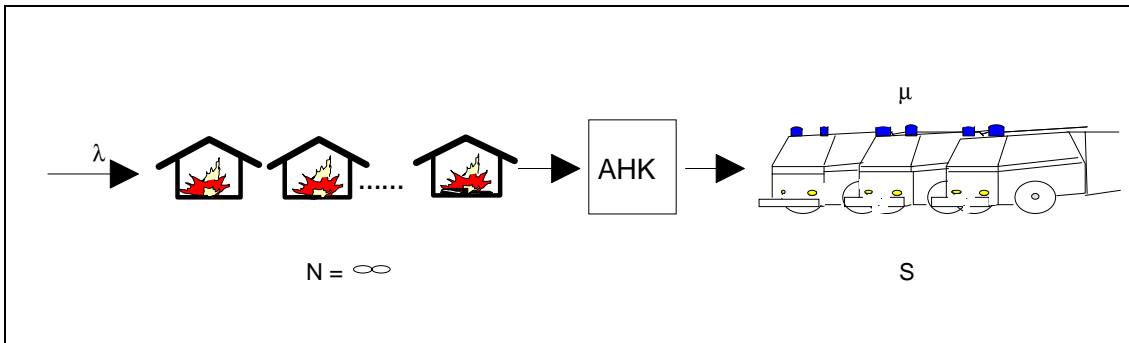
Tämä tarkoittaa sitä, että tietyllä ajanhetkellä järjestelmässä olevien hälytysten määrä on keskimäärin 0,026 hälytystä (kaava (62)), joiden keskimääräinen odotusaika on 1,56 minuuttia eksponentti- ja 3,22 minuuttia gammajakautuman mukaan. Todennäköisyys, että tietyllä ajan hetkellä on yksi yksikkö varattuna, on 0,0247. Tämä todennäköisyys on neljän desimaalin tarkkuudella samansuuruinen kuin Erlangin estokaavasta (40) saatava estotodennäköisyys.

4.1.3.3 Ääretön määrä odotuspaikkoja, S palvelupaikkaa

Kuvassa 30 on teoreettisin symbolein esitetty järjestelmä, jossa on ääretön määrä odotuspaikkoja ja S kappaletta keskenään samanlaista palvelupaikkaa. Kuvassa 31 on havainnollistettu, millainen tämä järjestelmä olisi hälytyskeskuksen ja sieltä ohjattavan paloaseman yhdistelmänä.



Kuva 30. Systeemi, jossa on ääretön määrä jonotuspaikkoja ja S rinnakkaista palvelupaikkaa.



Kuva 31. Systeemi, jossa voi olla ääretön määrä hälytyksiä jonossa ja S kappaletta operatiivisia yksiköitä niiden palvelemiseen.

Järjestelmän palvelemalla alueella esiintyy uusia tulipaloja λ kappaletta vuorokaudessa, jolloin ilmoitusvirta on λ . Niistä tulee ilmoitus aluehälytyskeskukseen, josta ne välittyvät edelleen paloasemalle. Hälytykset jäävät jonoon saapumisjärjestyksessään ja aseman S :stä operatiivisesta yksiköstä yhtä hälytystä hoitamaan lähtee vain yksi yksikkö. Jono siis muodostuu, jos systeemissä on samanaikaisia hälytyksiä enemmän kuin S kappaletta.

Kuvan 30 mukaisessa tapauksessa, jossa palvelupaikkoja (yksiköitä) on tietty määrä S ja odotuspaikkoja äärettömästi, kirjoitetaan differentiaali-differenssiyhtälöt seuraavasti (Hertzberg 1972):

$$P\{\text{yksi tulee lisää}\} = \lambda dt \quad (72)$$

$$P\{\text{yksi lähtee pois}\} = \mu_n dt \quad (73)$$

$$P\{\text{mitään ei tapahdu}\} = 1 - (\lambda + \mu_n) dt, \quad (74)$$

joissa

$$\mu_n = \begin{cases} n\mu, & \text{jos } 0 \leq n \leq S \\ S\mu, & \text{jos } n \geq S. \end{cases} \quad (75)$$

Tällaisessa systeemissä kuitenkin yksi palvelupaikka palvelee yhden asiakkaan eli aina yksi operatiivinen yksikkö lähetetään kuhunkin hälytykseen. Kuten yhden palvelupaikan (yksikön) tapauksessa voidaan kirjoittaa differenssi-differentiaaliyhtälöt tilatodennäköisyyksille. Saadaan

$$\frac{dP_n(t)}{dt} = -(\lambda + \mu_n)P_n(t) + \lambda P_{n-1}(t) + \mu_{n+1}P_{n+1}(t), \quad n \geq 0. \quad (76)$$

Käyttäen hyväksi kaavoja (75) saadaan

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t) \quad (77)$$

$$\frac{dP_n(t)}{dt} = -(\lambda + n\mu)P_n(t) + \lambda P_{n-1}(t) + \mu(n+1)P_{n+1}(t), \quad (1 \leq n \leq S-1) \quad (78)$$

$$\frac{dP_n(t)}{dt} = -(\lambda + S\mu)P_n(t) + \lambda P_{n-1}(t) + S\mu P_{n+1}(t), \quad (n \geq S). \quad (79)$$

Tarkasteltaessa ajasta riippumattomia tasapainoyhtälöitä vasemman puolen derivaatat asetetaan nolliksi ja yhtälöryhmä (77)–(79) saa muodon

$$\mu P_1 = \lambda P_0 \quad (80)$$

$$\mu(n+1)P_{n+1} = (\lambda + n\mu)P_n - \lambda P_{n-1}, \quad 1 \leq n \leq S-1 \quad (81)$$

$$\mu S P_{n+1} = (\lambda + S\mu)P_n - \lambda P_{n-1}, \quad n \geq S. \quad (82)$$

Tämä yhtälöryhmä voidaan ratkaista (kuten yhtälö (54)) termi kerrallaan alkaen pienimmistä indekseistä, jolloin saadaan

$$P_1 = \frac{\lambda}{\mu} P_0 \quad (83)$$

$$P_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{\lambda}{\mu} + 1 \right) P_1 - \frac{\lambda}{2\mu} P_0 = \frac{1}{2} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^2 P_0$$

$$P_3 = \dots = \frac{1}{3!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^3 P_0, \dots$$

$$P_S = \frac{1}{S!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^S P_0$$

$$\begin{aligned} P_{S+1} &= \frac{1}{S} \left(\frac{\lambda}{\mu} + S \right) P_S - \frac{\lambda}{S\mu} P_{S-1} = \left(\frac{\lambda}{S\mu} + 1 \right) \frac{1}{S!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^S P_0 - \frac{1}{S!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^S P_0 \\ &= \frac{1}{S \cdot S!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^{S+1} P_0. \end{aligned}$$

Tästä huomataan, että käyttäen induktiomenettelyä voidaan kirjoittaa yleisesti

$$P_n = \begin{cases} \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^n}{n!} P_0, & 0 \leq n \leq S \\ \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^n}{S^{n-S} S!} P_0 = P_S \left(\frac{\lambda}{S\mu} \right)^{n-S}, & n \geq S \end{cases} \quad (84)$$

Koska kaikkien todennäköisyyksien summan on oltava yksi, normitusehdosta saadaan ratkaistuksi P_0 :

$$\sum_{n=0}^{\infty} P_n = \sum_{n=0}^{S-1} \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^n}{n!} P_0 + \sum_{n=S}^{\infty} \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^n}{S^{n-S} S!} P_0 = 1, \quad (85)$$

jolloin

$$P_0 = \left[\sum_{n=0}^{S-1} \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^n}{n!} + \sum_{n=S}^{\infty} \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^n}{S^{n-S} S!} \right]^{-1} \quad (86)$$

Yhtälön (86) jälkimmäinen termi on ääretön geometrinen sarja, joka on sarjan summaussäännön perusteella kirjoitettavissa muotoon

$$\sum_{n=S}^{\infty} \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n}{S^{n-S} S!} = \frac{1}{S^{-S} S!} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{\lambda}{S\mu}\right)^{n+S} = \frac{1}{S^{-S} S!} \left(\frac{\lambda}{S\mu}\right)^S \frac{1}{1 - \frac{\lambda}{S\mu}} = \frac{S}{S - \frac{\lambda}{\mu}} \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^S}{S!}, \quad (87)$$

jolloin

$$P_0 = \left[\sum_{n=0}^{S-1} \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n}{n!} + \frac{S}{S - \frac{\lambda}{\mu}} \frac{1}{S!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^S \right]^{-1}. \quad (88)$$

Tarkastellaan esimerkkinä samaa aluetta kuin kohdassa 4.1.4.2, mutta oletetaan nyt alueella olevan käytettävissä kolme palo- ja pelastustoimen operatiivista yksikköä. Tällöin siis palvelupaikkojen lukumäärä S on kolme. Rinnakkain on merkitty parametrien arvot rakennuspaloille vasemmalla sekä kaikille hälytysluontoisille tehtäville oikealla. Ilmoitusvirta λ ja vapautuvien yksiköiden virta μ ovat

$$\lambda = 0,0164 \frac{1}{d}; \lambda = 0,6082 \frac{1}{d} \quad (89)$$

$$\mu = 24 \frac{1}{d}; \mu = 24 \frac{1}{d}. \quad (90)$$

P_0 lasketaan kaavasta (88) ja muut suureet kaavasta (84)

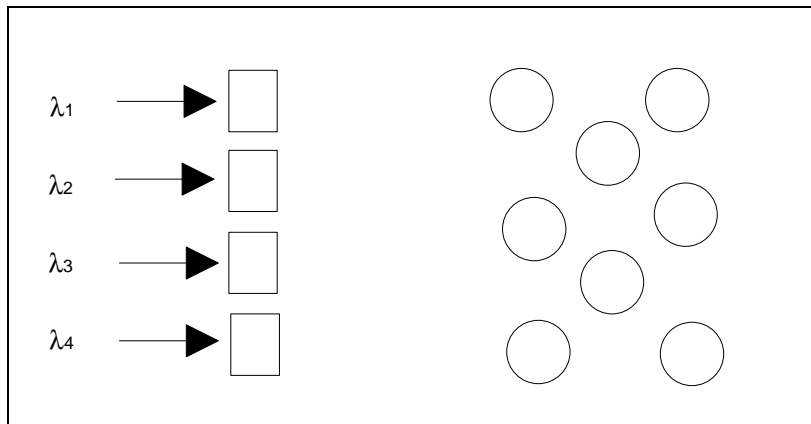
$$\begin{aligned} P_0 &= 0,9993 & P_0 &= 0,9750 \\ P_1 &= 0,0007 & P_1 &= 0,0247 \\ P_2 &= 2,34E-07 & P_2 &= 0,0003 \\ P_3 &= 5,35E-11 & P_3 &= 2,64E-06. \end{aligned} \quad (91)$$

Todennäköisyydet $n:n$ arvoilla 0 ja 1 ovat täsmälleen samansuuruiset kuin kaavasta (61) lasketut, eivätkä kohdan (91) arvot poikkea merkittävästi Erlangin estokaavalla (40) määritetyistä todennäköisyyksistä. Voidaan todeta kaikilla kaavoilla soveltuvuus-alueellaan päädyttävän samaan tulokseen.

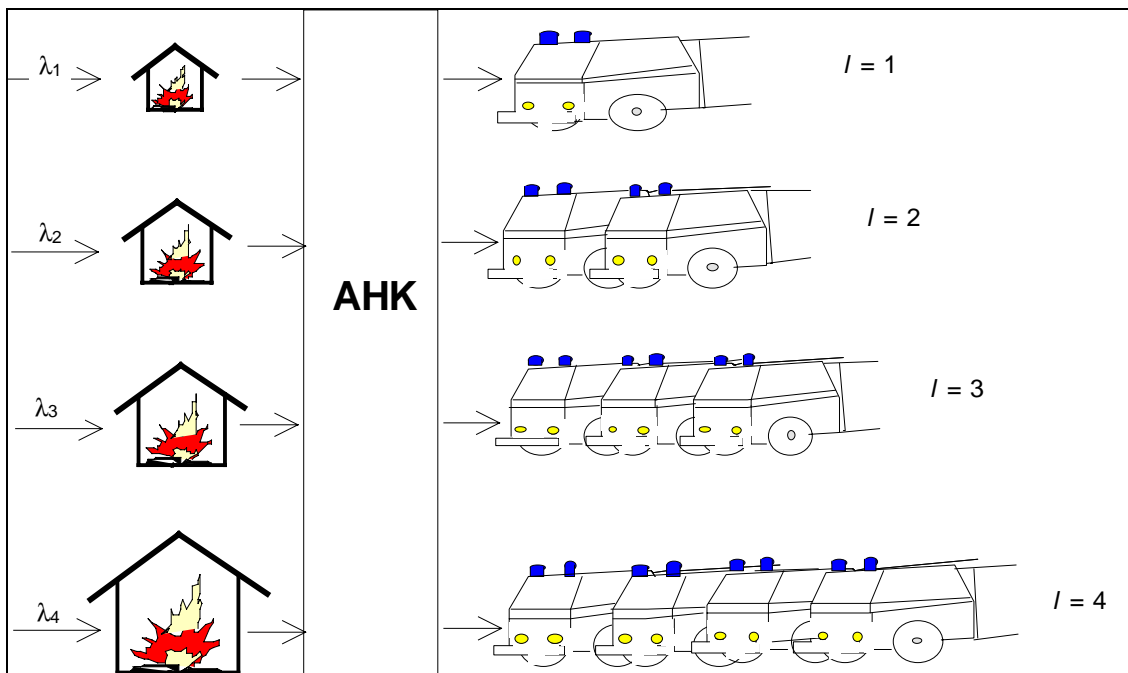
4.1.3.4 Ominaisuuksiltaan erilaiset jonot

Tarkastellaan kuvan 32 mukaista järjestelmää, missä on ääretön määrä odotuspaikkoja ja tietty määrä palvelupaikkoja (operatiivisia yksiköitä). Järjestelmään tulevat ilmoitus-

virrat ovat ominaisuuksiltaan erilaisia. Kuvassa 33 on havainnollistettu, millainen tämä järjestelmä olisi hälytyskeskuksen ja sieltä ohjattavan paloaseman yhdistelmänä.



Kuva 32. Järjestelmä, jossa on ääretön määrä ominaisuuksiltaan erilaisia rinnakkaisia jonoja ja tietty määrä palvelupaikkoja.



Kuva 33. Systemi, johon voi tulla ääretön määrä ominaisuuksiltaan erilaisia hälytyksiä ja jossa on N operatiivista yksikköä niiden hoitamiseen.

Kun tulipalo tai muu hätätilanne syntyy, kaupungin hälytyskeskus saa paloilmoituksen, jonka hoitoon komennetaan operatiivisia yksiköitä (Brušlinski 1988). Ilmoitukset ovat satunnaisia ajan, paikan, yksiköiden lukumäärän sekä toiminta-ajan suhteen. Määritellään palotapahtumaksi tilanne hälytyskeskukseen tulleesta soitosta siihen hetkeen, kun pelastusyksiköt ovat ilmoittaneet palanneensa kohteesta. Yksinkertaisuuden vuoksi oletamme vielä, että kaikki yksiköt lähtevät kohteeseen ja palaavat sieltä samanaikaisesti.

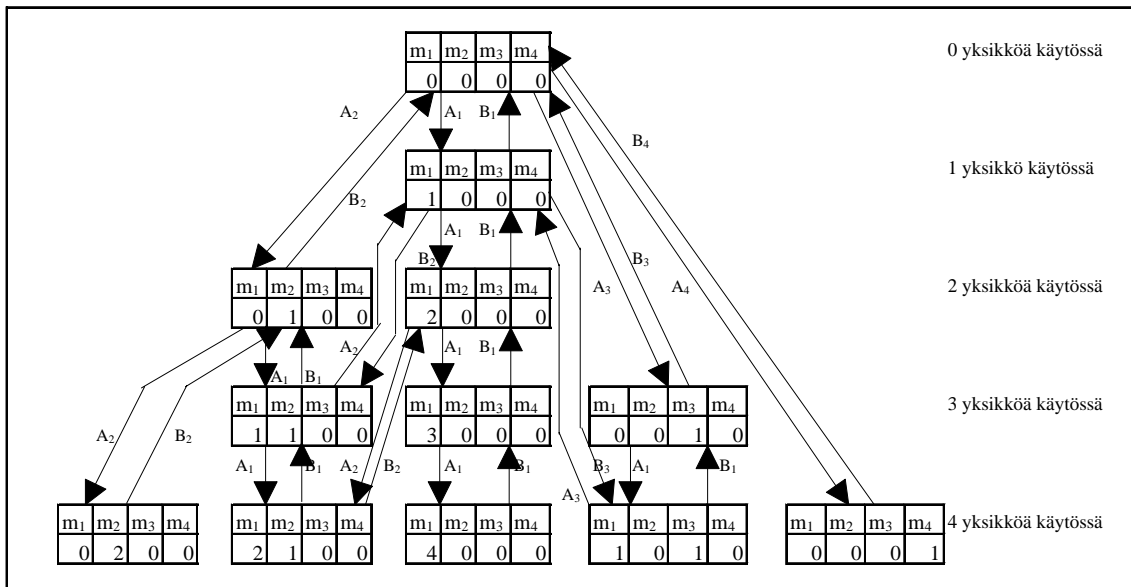
Tarkastellaan seuraavaa analyttistä mallia. Oletetaan, että on olemassa N kappaletta tietyn tyyppistä palokunnan operatiivista yksikköä. Hälytyskeskukseen saapuvat hälytykset ovat erilaatuisia. Nämä luokitellaan tarvittavien operatiivisten yksiköiden lukumäärän mukaan. Hälytyksiä, joiden palvelemiseen tarvitaan l yksikköä, nimitetään l -luokan ($l = 1, 2, \dots, L$) palotapahtumiksi. L -luokkien lukumäärä on sama kuin niiden yksiköiden suurin lukumäärä, jotka voivat lähteä hälytyksiin. Mielivaltaisella hetkellä jokainen systeemin N operatiivisesta yksiköstä on joko varattuna hälytykseen tai vapaa. Koko systeemin tilaa voidaan kuvata L -ulotteisella vektorilla (m_1, m_2, \dots, m_l) , missä m_l on l -luokan samanaikaisten palotapahtumien lukumäärä. Samanaikaisten palotapahtumien lukumääräksi M koko kaupungissa saadaan

$$M = \sum_{l=1}^L m_l . \quad (92)$$

Samanaikaisiin palotapahtumiin osallistuvien yksiköiden kokonaislukumäärä k on silloin

$$k = \sum_{l=1}^L l m_l . \quad (93)$$

Systeemin siirtyminen yhdestä tilasta toiseen tapahtuu välittömästi seuraavan tapahtuman tullessa esiin. Tapahtumassa A_l hälytykseen lähtee l yksikköä ja tapahtumassa B_l hälytystehtävän hoidosta vapautuu l yksikköä, jotka ovat jälleen valmiina seuraavaan lähtöön. A_l -tyyppiset tapahtumat lisäävät operatiivisten yksiköiden kuormitusta ja B_l -tyyppiset puolestaan vapauttavat varattuja yksiköitä. Systeemin mahdolliset tilat ja siirtymät niiden välillä, kun käytettävissä on neljä operatiivista yksikköä, näkyvät kuvassa 34.



Kuva 34. Neljän operatiivisen yksikön kuormitustilojen graafi.

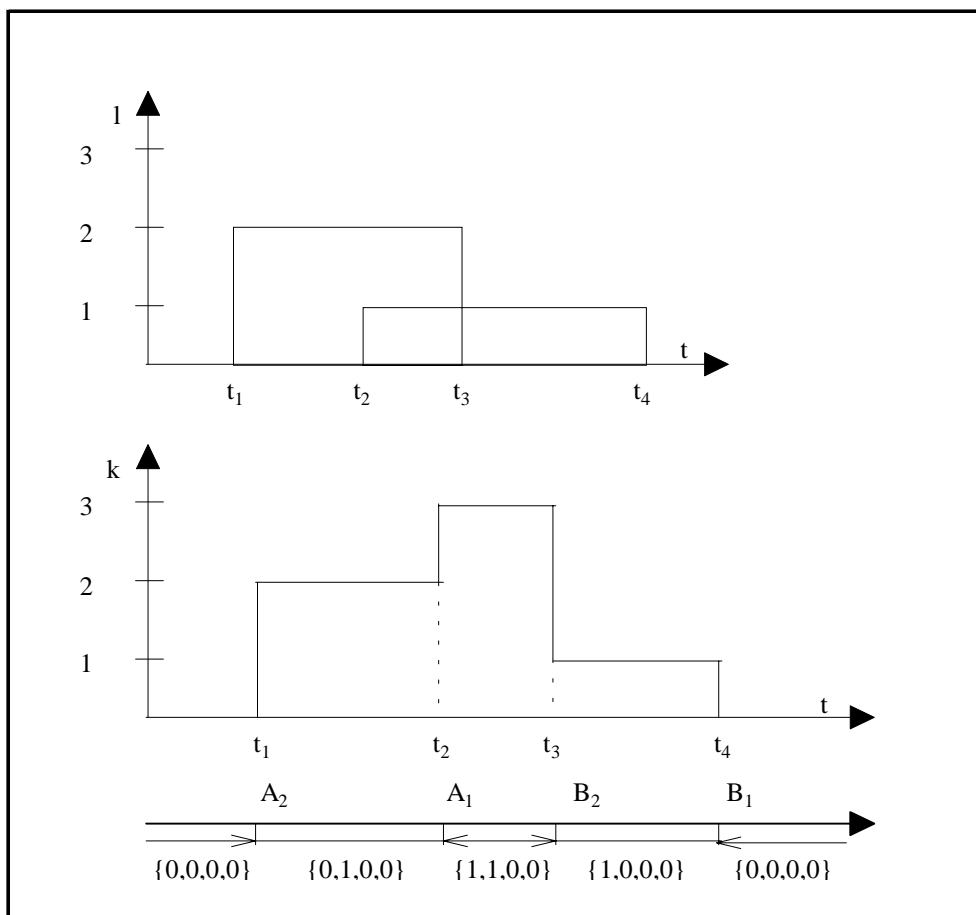
Kuvan 34 systeemin tilojen graafi koostuu neljästä palokunnan operatiivisesta yksiköstä. Jokainen graafin kärki vastaa erästä systeemin tilaa, joka määritellään vektorilla $\{m_1, m_2, m_3, m_4\}$. Esimerkiksi vektorin $\{2, 1, 0, 0\}$ tila, vastaa sellaista tilannetta, jossa neljä operatiivista yksikköä palvelee samanaikaisesti kolmea eri palotapahtumaa. Niistä kaksi tarvitsee yhden yksikön ja kolmas kaksi yksikköä. Graafin nuolet liittävät toisiinsa tilat, joiden välillä suorat tilan vaihdot ovat mahdollisia. Jokainen nuoli vastaa sellaista tapahtumaa, jossa systeemi siirtyy tilasta toiseen nuolen suunnan mukaisesti. Systeemin tiloja on kuvattu siten, että jokaisella vaakarivillä on tila, jossa on sama määrä (k kappaletta) varattuja yksiköitä (kaava 93).

Systeemin mahdollisten tilojen lukumäärä voidaan laskea kaavasta (Abramowitz & Stegun 1970, s. 825)

$$p(N) = \sum_{1 \leq \frac{3k^2 \pm k}{2} \leq N} (-1)^{k-1} p\left(N - \frac{3k^2 \pm k}{2}\right) \quad (94)$$

$$p(0) = 1.$$

Yksiköiden lukumäärän N kasvaessa kasvaa myös systeemin mahdollisten tilojen lukumäärä hyvin nopeasti. Esimerkiksi kun N on viisi, systeemin tilojen lukumäärä on yhteensä 19 ja kun N on kuusi, tilojen lukumäärä on yhteensä 30. Laskennan volyyymi kasvaa ja tulosten laatu huononee. Tilojen lukumäärät eri N :n arvoilla kahdeksaan saakka on esitetty liitteen B taulukossa B1 ja kahdeksan yksikön tilojen graafi kuvassa B1. Kuvassa 35a on esimerkki neljän yksikön toiminnasta.



Kuva 35. Kaupungin palontorjuntatoiminnan kuvaus.

Vaaka-akselilla on aika t ja pystyakselilla hälytykseen lähetettyjen yksiköiden lukumäärä l (yläkuva) tai koko laitoksen yksiköiden kuormitus k (alakuva). Ennen hetkeä t_1 kaikki yksiköt ovat vapaita ja systeemi on tilassa, jossa nuolen kärki on $\{0,0,0,0\}$. Hetkellä t_1 esiintyy A_2 -tyyppinen tapahtuma, jolloin hälytykseen lähtee kaksi operatiivista yksikköä. Systeemi siirtyy tilasta $\{0,0,0,0\}$ tilaan $\{0,1,0,0\}$. Hetkellä t_2 esiintyy A_1 -tyyppinen tapahtuma, jolloin hälytykseen lähtee yksi operatiivinen yksikkö. Tällöin systeemi siirtyy tilasta $\{0,1,0,0\}$ tilaan $\{1,1,0,0\}$, jolloin yhteensä kolme yksikköä hoitaa samanaikaisesti kahta palotapahtumaa, joista toiseen osallistuu kaksi ja toiseen yksi yksikkö. Hetkellä t_3 esiintyy tapahtuma B_2 , jolloin kaksi yksikköä lopettaa tehtävänsä ja systeemi siirtyy tilasta $\{1,1,0,0\}$ tilaan $\{1,0,0,0\}$. Hetkellä t_4 esiintyy tapahtuma B_1 , jolloin yksi yksikkö vapautuu ja systeemi palaa tilasta $\{1,0,0,0\}$ tilaan $\{0,0,0,0\}$. Tämän systeemin eri tilojen todennäköisyys tulevaisuudessa ei riipu menneisyydestä vaan on seurausta nykyisestä tilasta. Tällaista satunnaista prosessia kutsutaan Markovin prosessiksi. Pelastustoimen yksiköiden toiminnan mallittamisessa määritetään seuraavien parametrien arvot laskennallisesti:

- todennäköisyys P_E , että systeemi on tilassa E mielivaltaisella hetkellä
- systeemin tilan E keskimääräinen kesto $\overline{T_E}$

- systeemin siirtymistaajuus F_E tilaan E (keskimääräinen hälytysten lukumäärä aikayksikössä)
- systeemin suoran siirtymisen tilasta E tilaan E' todennäköisyys $P_{EE'}$
- systeemin suoran siirtymisen tilasta E tilaan E' taajuus $f_{EE'}$.

Lisäksi mallintamiseen tarvitaan seuraavat oletukset:

- hälytyskeskukseen saapuu L toisistaan riippumatonta ilmoitusvirtaa. ($l = 1, 2, \dots, L$)
- jokainen ilmoitusvirta λ_l on poissonvirta (yhtälö (11))
- virran l palotapahtumien hoitoon kuluva aika τ_l on eksponenttijakautunut suure (yhtälö (13)) ja vapautuvien yksiköiden lukumäärä aikayksikössä eli vapautumisvirta μ_l , lasketaan keskimääräisestä toiminta-ajasta

$$\mu_l = \frac{1}{\tau_l}. \quad (95)$$

τ_l on yksi mallin parametreista ja se määritetään pitkän ajanjakson kattavista tilastoista. Tämä hahmotettu malli on analoginen tietoliikenteessä käytetyn monibittinopeusjärjestelmän eston mallittamisen kanssa ja sieltä saatuja esityksiä (Virtamo 1993, Iversen 1998) on käytetty tässä muuten pääasiassa Brušlinskin (1988) tekstiin nojaavassa luvussa.

Nyt tarkastellaan kuvan 32 mukaisia rinnakkaisia jonoja, jotka ominaisuuksiltaan eroavat toisistaan. Kullakin jonolla on oma ilmoitusvirtansa sekä toiminta-aikansa, joita merkitään alaindekseillä l ($l = 1, 2, \dots, L$) ja yhteen palotapahtumaan voi osallistua useampia yksiköitä samanaikaisesti. Systeemin tilojen todennäköisyydet saadaan tilojen graafista (kuva 34, kuva B1) laskemalla Kolmogorovin yhtälöistä (52)–(53), joiden ker-toimina ovat $I_E\{A_l\}$ ja $I_E\{B_l\}$, jotka ovat A_l - ja B_l -tyyppisten tapahtumien tiheyksiä, kun systeemi siirtyy tilasta E muuhun tilaan. Jos jollain hetkellä systeemi on tilassa E (m_1, m_2, \dots, m_l), silloin joko uuden hälytyksen saapuminen (tapahtuma A_l) tai yksiköiden vapautuminen käynnissä olevan palotapahtuman hoidosta (tapahtuma B_l) saa sen siirtymään muuhun tilaan.

Eri ryhmien A_l -tyyppisten tapahtumien virta eli ilmoitusvirta on

$$I_E\{A_l\} = \lambda_l \quad (l=1, 2, \dots, L). \quad (96)$$

B_l -tyyppisten tapahtumien virta eli vapautumisvirta on

$$I_E \{B_l\} = m_l \mu_l \quad (l=1,2,\dots,L), \quad (97)$$

koska m_l :n samanaikaisen hälytyksen tiheys on m_l kertaa suurempi kuin yhden hälytyksen tiheys μ_l .

Nyt jonot ovat ominaisuuksiltaan erilaiset ja ilmoitusvirrat ($l = 1,2,\dots,L$) ovat toisistaan riippumattomia, jolloin kaava (84) saa muodon

$$P_E = \left(\prod_{l=1}^L \frac{(\alpha_l)^{m_l}}{m_l!} \right) P_0, \quad (98)$$

josta voidaan laskea L :n tekijän tulona todennäköisyys P_E , että systeemi on tilassa E (m_1, m_2, \dots, m_l). Kaavassa (98) $\alpha_l = \lambda_l / \mu_l = \lambda_l \bar{\tau}_l$ ja P_0 on kaikkien yksiköiden vapaan tilan todennäköisyys. Kaavalla (98) voidaan laskea kaikki systeemin mahdolliset tilat alkaen mielivaltaisesta P_0 :n arvosta. Sitten lasketut arvot normitetaan siten, että niiden todennäköisyyksien summa on yksi. Liitteen B taulukossa B2 on todennäköisyydet P_E/P_0 kaavan (98) mukaan auki kirjoitettuna kaikille tapauksille välillä $0 \leq N \leq 8$. Kun yksiköiden määrä N on suuri ($N > 5$), todennäköisyys P_0 lasketaan kaavasta

$$P_0 = \exp\left(-\sum_{l=0}^L \alpha_l\right). \quad (99a)$$

Kaava (99) saadaan kaavasta (98) laskemalla kaikki mahdolliset tilat äärettömään asti seuraavasti

$$\begin{aligned} P_0 \left[\sum_{m_1=0}^{\infty} \dots \sum_{m_l=0}^{\infty} \left(\prod_{l=1}^L \frac{\alpha_l^{m_l}}{m_l!} \right) \right] &= P_0 \left[\sum_{m_1=0}^{\infty} \frac{\alpha_1^{m_1}}{m_1!} \cdot \sum_{m_2=0}^{\infty} \frac{\alpha_2^{m_2}}{m_2!} \dots \sum_{m_l=0}^{\infty} \frac{\alpha_l^{m_l}}{m_l!} \right] = \\ P_0 [e^{\alpha_1} \cdot e^{\alpha_2} \dots e^{\alpha_l}] &= P_0 \exp\left(\sum_{l=0}^L \alpha_l\right). \end{aligned} \quad (100)$$

Tämän summan tulee olla yksi, josta voidaan ratkaista P_0 ja saadaan yhtälö (99).

Kahdeksan yksikön tapauksessa P_0 voidaan määrittää laskemalla taulukon B2 kahdeksan tekijän summa ja ottamalla sen käänteisluku. Laskettaessa P_0 Helsingin parametrien arvoilla saadaan sen tarkaksi arvoksi taulukosta B2 0,9513 ja kaavalla (99) likiarvo 0,9511. Pienillä N :n arvoilla P_0 voidaan helposti määrittää tarkasti taulukosta B2.

Oletetaan, että systeemi on tietyllä ajan hetkellä tilassa $E \{m_1, m_2, \dots, m_l\}$. Jos tämä tila ei muutu ajan τ kuluessa, seuraavat toisistaan riippumattomat ehdot toteutuvat:

a) yhtään uutta hälytystä ei tule eikä

b) yhtään yksikköä vapaudu L :n hälytyksen palvelemisesta.

Todennäköisyysjakauma satunnaiselle ajalle T_E , jonka systeemi on tilassa E , saadaan kaavan (47) tulosta yleistäen

$$P\{T_E > \tau\} = \prod_{l=1}^L (e^{-\lambda_l \tau} e^{-m_l \mu_l \tau}) = \exp\left[-\tau \sum_{l=1}^L (\lambda_l + m_l \mu_l)\right], \quad (101)$$

missä $P\{T_E > \tau\}$ on todennäköisyys, että arvo T_E on suurempi kuin etukäteen määritelty arvo τ . Näin arvo T_E on kaavan (101) mukaan eksponenttijakauman yleistä muotoa ja sen keskiarvo on tämän jakauman yleisen ominaisuuden mukaisesti

$$\bar{T}_E = \left[\sum_{l=1}^L (\lambda_l + m_l \mu_l) \right]^{-1}. \quad (102)$$

Kun P_E ja \bar{T}_E tunnetaan, siirtymätaajuudeksi F_E , tilaan E saadaan

$$F_E = \frac{P_E}{\bar{T}_E} = P_E \sum_{l=1}^L (\lambda_l + m_l \mu_l). \quad (103)$$

Samalla F_E on taajuus, jolla systeemi siirtyy tilasta E muuhun tilaan. Kaavan (103) kertojana on kokonaistapahtumavirta I_E , joka siirtää systeemin tilasta E $\{m_1, m_2, \dots, m_L\}$ muuhun mielivaltaiseen tilaan

$$I_E = \sum_{l=1}^L [I_E \{A_l\} + I_E \{B_l\}] = \sum_{l=1}^L (\lambda_l + m_l \mu_l). \quad (104)$$

Valitaan kaksi mielivaltaista systeemin tilaa E ja E' , joiden välillä suorat siirtymät edestakaisin ovat mahdollisia. Oletetaan, että siirto tilasta E tilaan E' liittyy tapahtumaan A_r ja siirto tilasta E' tilaan E liittyy tapahtumaan B_r . Tällöin vektorit E $\{m_1, m_2, \dots, m_L\}$ ja E' $\{m_1, m_2, \dots, m_L\}$ erottuvat toisistaan vain parilla m_r ja m'_r . Siten E :n ja E' :n komponenttien välillä vallitsee riippuvuus

$$m_l = \begin{cases} m_r + 1, & \text{kun } l = r \\ m_l, & \text{kun } l \neq r \end{cases}. \quad (105)$$

Kaavasta (98) seuraa, että systeemin tilojen E ja E' todennäköisyyksien P_E ja $P_{E'}$ suhde on

$$\frac{P_{E'}}{P_E} = \frac{\alpha_r^{m_r+1} m_r!}{(m_r+1)! \alpha_r^{m_r}} = \frac{\alpha_r}{m_r+1} = \frac{\lambda_r}{\mu_r(m_r+1)}. \quad (106)$$

Todennäköisyys $P_{EE'}$, että systeemi siirtyy tilasta E tilaan E' eikä mihinkään muuhun on se osa, jonka tapahtumavirta A_r (siirtymä $E \rightarrow E'$) muodostaa yhteisestä tapahtumavirrasta (siirto $E \rightarrow$ muu tila). Todennäköisyydeksi $P_{EE'}$ saadaan siten

$$P_{EE'} = \frac{I_E\{A_r\}}{I_E} = \frac{\lambda_r}{\sum_{l=1}^L (\lambda_l + m_l \mu_l)}. \quad (107)$$

Samalla tavalla lasketaan päinvastaisen siirtymän $E \rightarrow E'$ todennäköisyys $P_{E'E}$

$$P_{E'E} = \frac{I_{E'}\{B_r\}}{I_{E'}} = \frac{m_r \mu_r}{\sum_{l=1}^L (\lambda_l + m_l \mu_l)} = \frac{(m_r+1)\mu_r}{\sum_{l=1}^L (\lambda_l + m_l \mu_l) + \mu_r}. \quad (108)$$

Kaavojen (96)–(98) ja (106) avulla lasketaan systeemin tilasiirtojen taajuuudet $f_{EE'}$ ja $f_{E'E}$

$$f_{EE'} = I_E\{A_r\}P_E = \lambda_r P_E \quad (109)$$

$$f_{E'E} = I_{E'}\{B_r\}P_{E'} = m_r \mu_r P_{E'} = (m_r+1)\mu_r \frac{\lambda_r}{(m_r+1)\mu_r} P_E = \lambda_r P_E. \quad (110)$$

Tästä seuraa

$$f_{EE'} = f_{E'E}, \quad (111)$$

joka on erittäin tärkeä ominaisuus. Taajuus F_E voidaan esittää kahden komponentin summana

$$F_E = f_E^* + f_E^0, \quad (112)$$

missä f_E^* on systeemin tilasta E , tapahtumaan B_l , liittyvä siirtymisen taajuus ja f_E^0 on systeemin tilaan E , tapahtumaan A_l , liittyvä siirtymisen taajuus. Kaavojen (103), (107), (108) ja (111) mukaan vastaavat taajuuudet lasketaan

$$f_E^* = P_E \sum_{l=1}^L I_E \{B_l\} = P_E \sum_{l=1}^L m_l \mu_l \quad (113)$$

$$f_E^0 = P_E \sum_{l=1}^L I_E \{A_l\} = P_E \sum_{l=1}^L \lambda_l . \quad (114)$$

Todennäköisyys $P\{k\}$, että millä tahansa ajan hetkellä on samanaikaisesti varattuna k yksikköä (tilanne $E\{k\}$), lasketaan kaavasta

$$P\{k\} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^L j \lambda_j \bar{\tau}_j P\{k-j\} . \quad (115a)$$

Tätä kutsutaan Kaufman–Robertsin palautuskaavaksi ja sen johto löytyy esimerkiksi Rossin (1995) teoksesta.

$P\{k\}$ lasketaan peräkkäin arvoille $k = 1, 2, \dots, N$ alkaen mielivaltaisesta arvosta $P(0)$.

Tämän jälkeen todennäköisyydet normitetaan siten, että ehto $\sum_{i=1}^N P(k) = 1$ toteutuu.

Kun N on suuri, $P(0)$ arvioidaan kaavasta (99). Tilan $E\{k\}$ taajuus $F\{k\}$ voidaan esittää kahden komponentin summana, kuten kaavassa (112),

$$F(k) = f^*(k) + f^0(k) , \quad (116)$$

missä $f^0(k)$ on tilan $E\{k\}$ tapahtumiin A_1, A_2, \dots, A_L liittyvä siirtymien taajuus ja vastaavasti $f^*(k)$ on tilan $E\{k\}$ tapahtumiin B_1, B_2, \dots, B_L liittyvä siirtymien taajuus. Yhtälön (111) esittämän tasapainoehdon mukaisesti systeemin siirron taajuudet kahden tilanteen välillä ovat yhtä suuret. Esimerkiksi systeemin siirron taajuus $f(k, k+l)$, tapahtumien A_l aiheuttamana tilasta $E\{k\}$ tilaan $E\{k+l\}$ sekä tapahtumien B_l aiheuttama taajuus tilasta $E\{k+l\}$ tilaan $E\{k\}$ saadaan kaavasta

$$f\{k, k+l\} = f\{k+l, k\} = \lambda_l P\{k\} \quad (k = 0, 1, 2, \dots, l = 1, 2, \dots, L) . \quad (117)$$

Taajuudet $f^*(k)$ ja $f^0(k)$ saadaan kaavoista

$$f^*\{k\} = \sum_{l=1}^k f\{k-l, k\} = \sum_{l=1}^k f\{k, k-l\} = \sum_{l=1}^k \lambda_l P\{k-l\} \quad (118a)$$

$$f^0\{k\} = \sum_{l=1}^L f\{k+l, k\} = \sum_{l=1}^L f\{k, k+l\} = \sum_{l=1}^L \lambda_l P\{k\}. \quad (119)$$

Systeemin tilassa $E\{k\}$ viettämäksi keskimääräiseksi ajaksi saadaan

$$\bar{T}\{k\} = \frac{P\{k\}}{F\{k\}}. \quad (120)$$

Tällainen malli mahdollistaa palontorjuntayksiköiden toiminnan analysoinnin.

Tarkastellaan seuraavaksi operatiivisten yksiköiden lukumäärää, joka tarvitaan takaamaan kaupungin tietty paloturvallisuustaso. Yksiköiden lukumäärä N kaupungissa valitaan siten, että hälytyksiin lähteminen on mahdollisimman häiriötöntä. Esto on tapahtuma, jossa hälytyksen tullessa ei riitä vapaita yksiköitä sen hoitamiseen. Tarkastellaan tilannetta hetkellä, kun saapuu l -luokan hälytys ja k yksikköä N :stä on jo varattu. Tämä tilanne esiintyy taajuudella $\lambda_l P\{k\}$ ja todennäköisyydellä $P\{k\}$, joka lasketaan kaavasta (115). Tässä tilanteessa on kolme vaihtoehtoa:

1. jos $k \leq N - l$, l yksikköä voi lähteä l -luokan palotapahtumaan.
2. jos $N - l < k < N$, vain $N - k$ yksikköä voi lähteä l -luokan palotapahtumaan.
3. jos $k \geq N$, kaikki yksiköt ovat varattuina eikä mikään niistä voi lähteä.

Tapauksia 2 ja 3 kutsutaan estoiksi puhelinliikenteen mallin mukaan. Tapauksessa 2 syntyy osittaisesto ja tapauksessa 3 täysesto. Näin ollen estot syntyvät silloin, kun tapahtuma A_l siirtää systeemin tilaan $E\{>N\}$. Silloin samanaikaisten palotapahtumien hoito vaatii enemmän yksiköitä kuin on olemassa. Tilanteen $E\{>N\}$ todennäköisyys mielivaltaisella hetkellä saadaan kaavasta

$$P\{>N\} = 1 - \sum_{k=0}^N P\{k\}. \quad (121)$$

Tässä $P\{k\}$ ($k = 0, 1, 2, \dots, N$) lasketaan kaavoista (99) ja (115). Osittais- ja täysestojen taajuuksiksi saadaan

$$f_{\text{osittaisesto}} = \sum_{l=2}^L \lambda_l \sum_{k=N-l+1}^{N-1} P\{k\}. \quad (122)$$

Osittaisen eston taajuus saadaan kertomalla ilmoitusvirran arvo todennäköisyydellä, että varattuna on sen verran yksiköitä, ettei hälytystä voida kokonaan hoitaa. Koska kyseessä on osittainen häiriö, yksiköitä on oltava vapaana vähintään yksi ja tällöin varattuja yksiköitä saa olla enintään $N - 1$ ja vähintään $N - l + 1$ kappaletta. Yhtälössä (122) ilmoitusvirtojen summa juoksee lähtien kakkosesta, sillä järjestelmään on tultava vähintään 2-luokan hälytys, jotta osittainen häiriö olisi mahdollinen. Koska järjestelmässä on vähintään yksi yksikkö vapaana, voitaisiin 1-luokan palotapahtuma hoitaa kokonaan. Tarkastellaan yhtälöä (122) esimerkin kautta. Oletetaan, että järjestelmässä on käytettävissä kahdeksan yksikköä ja satunnaisella ajan hetkellä siihen tulee 3-luokan hälytys. Osittaisen eston syntymiseksi yksiköitä saa olla varattuna enintään $N - 1 = 7$ kappaletta, jolloin hälytykseen voidaan lähettää yksi yksikkö. Vähintään varattuja yksiköitä on oltava $N - l + 1 = 8 - 3 + 1 = 6$ kappaletta, koska muutoin hälytys voidaan hoitaa kokonaan ja estoa ei synny.

$$f_{\text{täysesto}} = \sum_{l=1}^L \lambda_l \sum_{k=N}^{+\infty} P\{k\} = \sum_{l=1}^L \lambda_l \left(1 - \sum_{k=0}^{N-1} P\{k\}\right) \quad (123)$$

Täysestossa oletetaan, että kaikki yksiköt ovat varattuja, ja siten hälytyksen tullessa sitä

hoitamaan ei voida lähettää yhtään yksikköä. $\sum_{k=0}^{N-1} P\{k\}$ on todennäköisyys, että ainakin yksi yksikkö on vapaana. Sen komplementti $1 - \sum_{k=0}^{N-1} P\{k\}$ ilmaisee todennäköisyyden,

että kaikki yksiköt ovat varattuina. Tällöin minkä tahansa luokan hälytys voi tulla eikä sitä pystytä hoitamaan edes osittain.

$$f_e = f_{\text{osittaisesto}} + f_{\text{täysesto}} = f^* \{> N\} = \sum_{l=1}^L \lambda_l - \sum_{k=1}^N f^* \{k\} = \sum_{l=1}^L \lambda_l - \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^k \lambda_l P\{k-l\} \quad (124)$$

Estotaajuus on osittais- ja täyseston summa. Kaavassa (124) koko ilmoitusvirrasta vähennetään ne, jotka kyetään täysin palvelemaan. Tällöin jäljelle jää se osuus, jonka palvelemisessa esiintyy häiriöitä.

Keskimääräinen aikaväli estojen välillä, estoväli, on niiden taajuuden käänteisarvo. Todennäköisyys, että uutta hälytystä ei voida hoitaa, on sama kuin estojen osuus kaikista tulevista hälytyksistä. Eston todennäköisyydeksi (joko osittais- tai täys-) saadaan kaavasta

$$P_{esto} = \frac{f_{esto}}{\sum_{l=1}^L \lambda_l}. \quad (125)$$

Täydellisen tai osittaisen eston todennäköisyys lasketaan samalla tavalla. Kun N kasvaa, estojen todennäköisyys pienenee ja vastaavasti kaupungin operatiivisen paloturvallisuuden valmius paranee.

4.1.4 Todelliset esimerkit

4.1.4.1 Novomoskovsk

Ensimmäisenä esimerkkinä tarkastellaan yksiköiden jonoteoreettisen mallintamisen tuloksia Novomoskovskin kaupungissa (Brušlinski 1988). Taulukon 6 ilmoitusvirta λ_l ja toiminta-aika τ_l ($l = 1, 2, \dots, 6$) on määritetty tilastoista. Taulukon 7 todennäköisyys $P\{k\}$, että mielivaltaisella hetkellä k ($k = 1, 2, \dots$) yksikköä on samanaikaisesti varattuina palontorjuntatehtäviin, saadaan kaavasta (115).

Taulukko 6. Mallin parametrien tilastoarviointi. Novomoskovsk (Brušlinski 1988).

l	1	2	3	4	5	6
λ_l häl/d	0,244	0,452	0,027	0,014	0,011	0,003
$\overline{\tau_l}$ min	76,9	43,9	129,4	130,8	141,3	49,0

Hälytysvirta λ_l on tulevien ilmoitusten lukumäärä aikayksikössä. Taulukossa 6 yksikkönä on hälytyksiä vuorokaudessa. Toiminta-aika τ_l on yksiköiden hälytystehtävään kuluttama aika eli asemalta lähdön ja sinne takaisin paluun välinen aika. Jos hälytykseen osallistuu useampia yksiköitä, oletetaan niiden poistuvan asemalta ja saapuvan sinne takaisin samanaikaisesti².

² Tämä on oletus eikä Suomessa todellisuudessa tapahdu näin. Novomoskovskin menettelytapaa emme tiedä.

Taulukko 7. Laskettuja ja kokeellisia $P\{k\}$:n arvoja Novomoskovskissa (Brušlinski 1988).

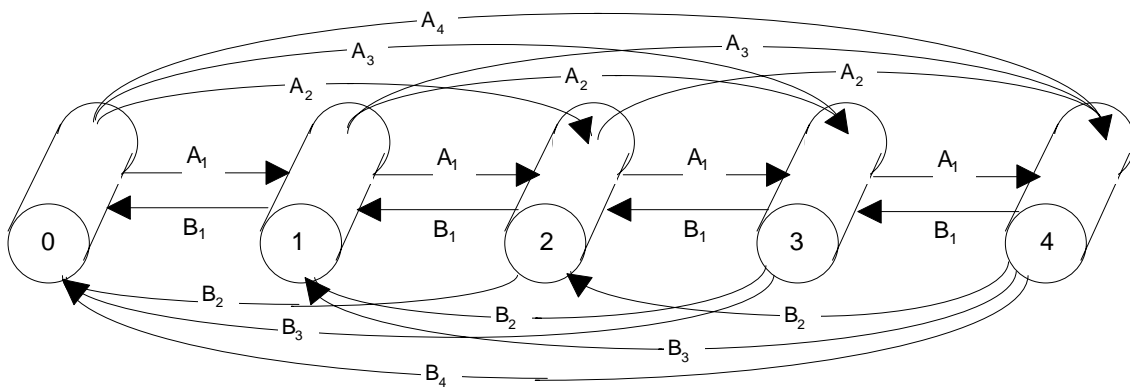
k	0	1	2	3	4	5	6
Laskettu	0,9688	0,0126	0,0134	0,0026	0,0013	0,0011	0,00012
Kokeellinen	0,9689	0,0124	0,0135	0,0028	0,0012	0,0011	0,00009

Taulukon 7 $P\{k\}$ kertoo todennäköisyyden, jolla mielivaltaisella ajan hetkellä tarkasteltaessa k yksikköä on samanaikaisesti varattuina. Esimerkiksi $P\{2\} = 0,0134$ eli 1,3 %:n todennäköisyydellä tietyllä ajan hetkellä on kaksi yksikköä samanaikaisesti hälytystehtävissä.

Tilanteen $E\{k\}$ esiintymistiheydet on esitetty taulukossa 8 sekä kaavoilla (118), (119) ja (116) laskettuina ennusteina että niiden tilastoista mitattuina arvoina. Taulukon 8 taajuuksien yksikkönä on $[1/a]$. Taulukon ensimmäisellä rivillä oleva taajuus $f^*\{k\}$ kertoo, kuinka monta kertaa aikayksikössä systeemi siirtyy tilasta $E\{k\}$ muuhun tilaan poistumisten kautta, eli esimerkiksi taulukosta 8 nähdään, että kun $k = 2$ eli kaksi operatiivista yksikköä on samanaikaisesti varattuina, Novomoskovskissa 161 kertaa vuoden aikana systeemi siirtyy toiseen tilaan poistumisten kautta siksi, että yksiköitä vapautuu hälytystehtävien hoidosta. Taulukon toisella rivillä oleva $f^0\{k\}$ ilmaisee, kuinka montaa kertaa aikayksikössä systeemin tila $E\{k\}$ vaihtuu toiseen tilaan saapumisten kautta, eli esimerkiksi taulukosta 8, kun $k = 2$, niin 3,6 kertaa vuoden aikana tulee uusi l -luokan hälytys ja tila $E\{2\}$ muuttuu tilaksi $E\{2+l\}$ sen seurauksena. $F\{k\}$ on edellisten summa, joka ilmaisee, kuinka monta kertaa vuoden aikana tila muuttuu joko saapumisten tai poistumisten seurauksena. Esimerkiksi taulukosta 8 nähdään, että kun $k = 2$, niin 165 kertaa vuoden aikana tila $E\{2\}$ siirtyy toiseen tilaan sen seurauksena, että tulee joko uusi hälytys tai yksiköitä vapautuu vanhojen tehtävien hoidosta. Tätä on havainnollistettu myös kuvassa 35b. Sylinterit kuvaavat varattujen yksiköiden lukumäärää, joita kuvan 35b tapauksessa on enintään neljä, ja nuolilla on merkitty systeemin tilan siirtymistä toiseen tilaan. A_l :lla on merkitty tapahtumaa, kun tila siirtyy toiseen uuden hälytyksen seurauksena, ja B_l :lla tapahtumaa, jossa tila vaihtuu, kun yksiköitä vapautuu hälytystehtävien hoidosta. Kuvan 35b avulla voidaan havainnollistaa taulukkoa 8, vaikkakaan ne ei eivät ole täysin yhteensopivia, sillä kuvassa 35b operatiivisia yksiköitä on oletettu olevan neljä ja taulukossa 8 kuusi kappaletta. Kuvasta 35b nähdään esimerkiksi, että varattujen yksiköiden määrän ollessa nolla tilasiirtojen lukumäärä aikayksikössä on $A_1+A_2+A_3+A_4+A_5+A_6$, jonka arvoksi voidaan taulukosta 8 lukea 266.

Taulukko 8. Lasketut ja kokeelliset tilanteen $E\{k\}$ taajuudet f^* [1/a], f^0 [1/a] sekä summataajuus F [1/a]. (Brušlinski 1988).

k	0	1	2	3	4	5	6
$f^*\{k\}$ laskettu	-	86,2	161	13,0	7,3	4,6	1,4
kokeellinen	-	85	165	10	5	7	2
$f^0\{k\}$ laskettu	265,5	3,4	3,6	0,6	0,4	0,3	0,01
kokeellinen	266	2	1	2	3	0	0
$F\{k\}$ laskettu	265,5	89,6	164,6	13,6	7,7	4,9	1,4
kokeellinen	266	87	166	12	8	7	2



Kuva 35b. Systemin tilasiirtojen graafi.

Vertaamalla laskettuja ja tilastoista määritettyjä kokeellisia arvoja taulukoissa 7–8 havaitaan erittäin hyvä yhteensopivuus, jolloin käytettyä mallia voidaan pitää tehtävään hyvin sopivana. Siksi se on otettu tähän ja alempana sitä sovelletaan kotimaisiin kohteisiin.

Taulukossa 9 on esitetty hälytysten palvelemisessa esiintyvien häiriöiden todennäköisyydet ja esiintymistiheydet yksiköiden lukumäärän funktiona Novomoskovskin kaupungissa. Todennäköisyydet on laskettu kaavoista (122)–(124). Taulukkoon 9 on laskettu myös keskimääräinen aikaväli estojen välillä eli estoväli, joka saadaan esto-
taajuuksien käänteisarvosta.

Taulukko 9. Hälytysten hoitamisessa esiintyvien häiriöiden todennäköisyydet P ja estotaajuudet f ja estovälit $[a]$ Novomoskovskissa. (Brušlinski 1988).

N	0	1	2	3	4	5	6
Pesto	1,000	0,685	0,098	0,050	0,023	0,007	0,0014
Positt._{esto}	0	0,654	0,079	0,046	0,021	0,006	0,001
Ptäysesto	1,000	0,031	0,019	0,005	0,003	0,001	1,6E-0,4
festo [1/a]	274	188	26,9	14,0	6,5	1,9	0,4
f_{os.esto} [1/a]		179	21,8	12,6	5,8	1,6	0,34
f_{täysesto} [1/a]	274	8,6	5,1	1,4	0,7	0,3	0,04
Estovälit [a] (Suluissa estoväli vuorokausina [d])							
esto	0,004 (1,3)	0,005 (1,9)	0,04 (14)	0,07 (26)	0,15 (56)	0,5 (191)	2,6 (955)
osittaisesto		0,006 (2,0)	0,05 (17)	0,08 (29)	0,17 (63)	0,6 (233)	3,0 (1079)
täysesto	0,004 (1,3)	0,117 (43)	0,20 (72)	0,71 (259)	1,40 (510)	2,9 (1060)	23 (8303)

Taulukossa 9 estotaajuudet (f) ilmaisevat estojen lukumäärän vuoden aikana. Estovälit saadaan tällöin taajuuksien käänteisarvoina. Todennäköisyys, että esto esiintyy, saadaan jakamalla taajuus kaikkien hälytysten lukumäärällä aikayksikössä. Esimerkiksi taulukon 9 mukaan, kun kaupungissa on kaikkia hälytyksiä palvelemaan kaksi yksikköä, ilmenee tilanne, ettei hälytystä ei voida hoitaa täydellisesti, 26,9 kertaa vuoden aikana. Kun vuoden aikana palokunnalle tulee 274 hälytystä, saadaan eston todennäköisyys $26,9 / 274 = 0,098$. Puolestaan estoväli on $1 / 26,9 = 0,04$ a = 14 d eli esto esiintyy kerran 14:ssä päivässä. Jos kaupungissa olisi käytettävissä yksi yksikkö, esto tapahtuisi 188 kertaa vuoden aikana eli noin kerran kahdessa päivässä. Jos yksiköitä olisi viisi, esiintyisi esto 1,9 kertaa vuoden aikana eli noin kerran puolessa vuodessa.

4.1.4.2 Helsinki

Otetaan toiseksi todelliseksi esimerkiksi Helsinki vuonna 1996 ja lähempään tarkasteluun pelastusyksiköt, joita Helsingissä on kahdeksan kappaletta. Vuonna 1996 tapahtui 249 palo- ja pelastustoimen hälytystä rakennuspalon sammutukseen ja taulukossa 10 on niihin osallistuneiden pelastusyksiköiden lukumäärä ja toiminta-aika. Normaalissa peruslähdössä hälytykseen lähtee kaksi pelastusyksikköä kerrallaan, mutta oletetaan nyt, että hälytyksen tullessa yksiköitä komennetaan tehtävään satunnainen määrä, joka on kuitenkin välillä 1–8. Jotta saataisiin jonkinlainen kokonaiskuva pelastustoimen kuormi-

tuksesta, rakennuspalojen hälytysten rinnalle lasketaan kaikissa tapauksissa koko ilmoitusvirtaa vastaavat arvot. Liitteen G taulukossa G1 on esitetty kunnallisten palokuntien kaikki hälytysluonteiset lähdöt ja kuvissa G1 ja G2 niiden suhteelliset osuudet vuosittain 1980–1992 (viimeinen sisäministeriön julkaisema vuosi).

Oletetaan karkeasti toiminta-ajan olevan kaikissa hälytyksissä saman kuin rakennuspalojen sammutuksessa. Jaetaan rakennuspalojen lukumäärät niiden suhteellisella osuudella kokonaisilmoitusvirrasta, josta on poistettu sairaankuljetuksen osuus. Tällöin rakennuspalojen osuus koko ilmoitusvirrasta on 16 %. Näin saadut tulokset on esitetty kursivoituina taulukoissa 10–14.

Taulukko 10. Palokunnan hälytyksiin vuonna 1996 osallistuneiden Helsingin pelastusyksiköiden lukumäärä ja toiminta-aika.

Yksiköiden lukumäärä	Hälytysten lukumäärä vuodessa	Rakennuspalojen ilmoitusvirta λ [1/d]	Toiminta-aika τ [min]	Kokonais-ilmoitusvirta [1/d]
1	49	0,134±0,019	45,8	<i>0,839</i>
2	174	0,477±0,036	41,2	<i>2,979</i>
3	17	0,047±0,011	75,6	<i>0,291</i>
4	5	0,014±0,006*	97,2	<i>0,086</i>
5	2	0,005±0,004*	172,4	<i>0,034</i>
6	0	0	0	<i>0</i>
7	1	0,003±0,003*	154,4	<i>0,017</i>
8	1	0,003±0,003*	143,8	<i>0,017</i>
Yhteensä	249			

*Tilastokohina on tätäkin arviota suurempi.

Taulukon 10 toisessa sarakkeessa on hälytysten lukumäärä, joihin on osallistunut ensimmäisen sarakkeen määrä operatiivisia yksiköitä ja neljännessä sarakkeessa toiminta-aika yksikköä kohden. Oletetaan, että jos hälytykseen komennetaan useampia yksiköitä samanaikaisesti, ne lähtevät paloasemalta ryhmänä ja palaavat sinne myös takaisin samanaikaisesti. Tällöin kaikki yksiköt ovat siis saman ajan poissa asemalta. Todellisuudessa käytäntö on kuitenkin erilainen, mutta oletus tehtiin matemaattisen käsittelyn yksinkertaistamiseksi. Todellisesta aikajakauhasta ei vielä ole selkeätä kuvaa ONTIKAN havaintojen perusteella. Toiminta-ajan määrittämiseksi selvitettiin ensin kuhunkin hälytykseen osallistuneiden pelastusyksiköiden lukumäärä. Niiden toiminta-aikojen keskiarvosta saatiin aika, jonka yksiköt keskimäärin olivat poissa asemaltaan yhtä hälytystä kohden. Kolmannen sarakkeen rakennuspalojen ilmoitusvirta on hälytysten lukumäärä aikayksikössä. Taulukosta 10 nähdään esimerkiksi, että Helsingissä vuonna 1996 oli 174

hälytystä, joiden palvelemiseen osallistui kaksi operatiivista yksikköä ja tällaisia hälytksiä saapui keskimäärin $0,477 \pm 0,036$ vuorokaudessa. Yksiköt poistuivat asemalta ja saapuivat takaisin samanaikaisesti ja viipyivät tehtävässään 41,2 minuuttia. Viisi yksikköä vaativien hälytysten ilmoitusvirran arvo on $0,005 \pm 0,004$, joka ei enää tilastollisesti merkittävästi poikkea nolasta. Tämän vuoksi näiden havaintojen perusteella ei voi tehdä päätelmiä kuin alueella $\lambda_1 - \lambda_4$.

Kaavasta (115) laskettiin todennäköisyydet $P\{k\}$, että satunnaisella ajan hetkellä on k yksikköä samanaikaisesti varattuna. Saadut arvot on esitetty taulukossa 11. Taulukoihin on laskettu kunkin suureen virherajat, joiden kaavat on esitetty liitteessä A. Taulukosta 11 havaitaan, että esimerkiksi $P\{2\} = 0,0133$ eli on 1,3 %:n todennäköisyys, että tietyllä ajan hetkellä on kaksi yksikköä samanaikaisesti varattuna hälytystehtävien hoitoon.

Taulukon 11 kokeelliset arvot perustuvat ONTIKAn vuoden 1996 rakennuspaloihin Helsingissä. Tilastoista tarkasteltiin, kuinka kauan vuoden 1996 aikana oli samanaikaisesti varattuina k yksikköä ja ajoista laskettiin todennäköisyydet kullekin k :n arvolle. Verrattaessa kokeellisia havaintoja laskettuihin niiden nähdään olevan melko lähellä toisiaan, ja siten mallia voidaan pitää hyvänä kuvaamaan yksiköiden jonoteoreettista mallintamista Helsingissä.

Taulukko 11. Helsingin $P\{k\}$:n laskettuja ja kokeellisia arvoja.

k	0	1	2	3	4	5	6	7	8
P{k} laskettu	$0,9778 \pm 0,0036$	$0,0042 \pm 0,0006$	$0,0133 \pm 0,0010$	$0,0024 \pm 0,0006$	$0,0010 \pm 0,0004$	$0,0007 \pm 0,0005$	0,0000	$0,0003 \pm 0,0003$	$0,0003 \pm 0,0003$
kokeellinen	0,9684	0,0131	0,0159	0,0019	0,0004	0,0001			
kaikki hyl.	0,869	0,023	0,074	0,015	0,009	0,005	0,001	0,002	0,002

Taulukossa 12 on esitetty tilanteen $E\{k\}$ esiintymistiheydet, jotka lasketaan kaavoista (118), (119) ja (116). Taulukon 12 ensimmäisen rivin taajuus ilmaisee, kuinka monta kertaa aikayksikössä, tässä tapauksessa vuoden aikana, systeemin tila $E\{k\}$ muuttuu poistumisten eli yksiköiden vapautumisen seurauksena, ja toisen rivin taajuus puolestaan sen lukumäärän, kuinka monta kertaa tila muuttuu saapumisten eli uusien hälytysten seurauksena. Summataajuus $F\{k\}$ ilmaisee kuinka monta kertaa aikayksikössä tila ylipäättään muuttuu joko uusien hälytysten tai vanhojen loppuunsaattamisen seurauksena. Taulukosta 12 voidaan nähdä, että kun kaksi yksikköä on varattuna eli systeemi on tilassa $E\{2\}$, tila muuttuu 170 kertaa vuoden aikana yksiköiden vapautumisen ja 3,3 kertaa uuden hälytyksen tuleminen vuoksi. Yhteensä tilan muutoksia tällöin tapahtuu siis 174 kertaa vuoden aikana.

Taulukko 12. Helsingin lasketut tilanteen $E\{k\}$ taajuudet f^* , f^0 ja F [1/a].

k	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$f^*\{k\}$	-	47,9± 6,7	170,3± 12,3	18,0± 4,3	7,40± 2,59	2,68± 1,62	0,32± 0,17	1,15± 1,10	1,02± 1,02
$f^0\{k\}$	243,5± 28,4	1,0± 0,3	3,3± 0,6	0,6± 0,2	0,25± 0,13	0,17± 0,14	0,005± 0,003	0,07± 0,08	0,07± 0,08
$F\{k\}$	243,5± 28,4	48,9± 6,9	173,7± 13,0	18,6± 4,5	7,65± 2,72	2,85± 1,76	0,33± 0,18	1,23± 1,19	1,09± 1,09
$f^*\{k\}$		266	952	140	115	30,7	15,1	13,3	8,0
$f^0\{k\}$	1353	36,1	116	23,8	13,3	7,7	1,16	3,18	2,55
$F\{k\}$	1353	302	1068	164	129	46,4	16,2	16,5	10,5

Taulukon 13 erilaisten häiriöiden todennäköisyydet määritettiin laskemalla kaavoista (119)–(121).

Taulukko 13. Helsingin hälytysten hoitamisessa esiintyvien estojen lasketut todennäköisyydet ja taajuudet.

N	0	1	2	3	4	5	6	7	8
P_{esto}	1,000± 0,000	0,808± 0,004	0,124± 0,029	0,051± 0,021	0,021± 0,014	0,011± 0,009	0,009± ,009	0,005± 0,004	0,0007± 0,0007
$P_{ositt.esto}$	0,000± 0,000	0,785± 0,007	0,105± 0,026	0,046± 0,019	0,019± 0,012	0,009± 0,008	0,009± ,008	0,004± 0,004	0,0004± 0,0004
$P_{täysesto}$	1,000± 0,000	0,022± 0,004	0,018± 0,003	0,005± 0,002	0,002± 0,001	0,001± 0,001	0,0006± 0,0006	0,0006± 0,0006	0,0003± 0,0003
f_{esto} [1/a]	249,0± 30,0	201,1± 23,3	30,8± 11,0	12,8± 6,7	5,4± 4,1	2,7± 2,5	2,3± 2,3	1,2± 1,2	0,17± 0,20
$f_{os.esto}$ [1/a]		195,6± 21,7	26,3± 9,7	11,6± 6,0	4,8± 3,7	2,4± 2,2	2,2± 2,2	1,1± 1,1	0,11± 0,12
$f_{täysesto}$ [1/a]	249,0± 30,0	5,5± 1,6	4,5± 1,3	1,2± 0,7	0,57± 0,43	0,32± 0,30	0,15± 0,16	0,14± 0,16	0,07± 0,08
P_{esto}	1,000	0,829	0,217	0,127	0,053	0,028	0,018	0,010	0,004
$P_{ositt.esto}$	0,000	0,698	0,109	0,094	0,035	0,019	0,014	0,006	0,003
$P_{täysesto}$	1,000	0,131	0,108	0,033	0,018	0,009	0,004	0,004	0,002
f_{esto} [1/a]	1556	1290	338	197	82,1	43,4	28,3	15,0	6,98
$f_{os.esto}$ [1/a]		1086	170	146	54,2	28,8	21,4	9,25	4,43
$f_{täysesto}$ [1/a]	1556	204	167	51,6	27,9	14,6	6,89	5,73	2,55

Estotaajuudet (*f*) ilmaisevat estojen lukumäärän aikayksikössä eli tässä vuoden aikana. Estotaajuuksien käänteisarvona saadaan keskimääräinen estojen välinen aika eli estoväli. Esimerkiksi, jos oletetaan, että Helsingissä toimii kahdeksan yksikköä, tällöin tilanne, että hälytyksen tullessa sitä hoitamaan voidaan lähettää vain vajaa määrä yksiköitä, esiintyy kerran yhdeksässä vuodessa. Samoin tilanne, että hälytyksen tullessa kaikki kahdeksan yksikköä ovatkin varattuina muihin hälytyksiin eikä yhtään yksikköä voida lähettää hälytystä hoitamaan, esiintyy kerran 15 vuodessa. Kerran kuudessa vuodessa esiintyy jompi kumpi, joko osittainen tai täyesto. Estovälit on esitetty taulukossa 14.

Taulukko 14. Helsingin estovälit eri N:n arvoilla [a].

N	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Esto	0,004	0,005	0,03	0,08	0,19	0,4	0,4	0,8	5,8
Osittainen esto		0,005	0,04	0,09	0,21	0,4	0,5	0,9	9,4
Täyesto	0,004	0,181	0,22	0,85	1,77	3,2	6,8	7,1	15
<i>Esto</i>	<i>0,0006</i>	<i>0,0008</i>	<i>0,003</i>	<i>0,005</i>	<i>0,012</i>	<i>0,023</i>	<i>0,035</i>	<i>0,067</i>	<i>0,143</i>
<i>Osittainen esto</i>		<i>0,0009</i>	<i>0,006</i>	<i>0,007</i>	<i>0,018</i>	<i>0,035</i>	<i>0,047</i>	<i>0,108</i>	<i>0,226</i>
<i>Täyesto</i>	<i>0,0006</i>	<i>0,0049</i>	<i>0,006</i>	<i>0,019</i>	<i>0,036</i>	<i>0,069</i>	<i>0,145</i>	<i>0,175</i>	<i>0,392</i>

Kun tarkastellaan kursivoituja estovälejä, jotka on määritetty käyttämällä kaikkien hälytysten ilmoitusvirtaa, havaitaan, että esto esiintyy 0,143 vuoden välein eli noin kerran kahdessa kuukaudessa. Näitä hälytyksiä on kuitenkin todellisuudessa hoitamassa suurempi määrä yksiköitä kuin vain tämän esimerkin kahdeksan pelastusyksikköä, jolloin todellinen estoväli on huomattavasti suurempi.

4.1.4.3 Koko Suomi

Vuonna 1996 löytyi 2 535 sellaista ONTIKAan kirjattua rakennuspaloa, joihin osallistui vähintään yksi pelastusyksikkö. Otetaan esimerkiksi pääkaupunkiseutu. Aiemmin todettiin hälytysten määrän riippuvan kerrosalasta. Normitetaan koko maan hälytysten määrä vastaamaan kerrosalaltaan pääkaupunkiseudun kaltaista aluetta, jolloin saatu hälytysten määrä on 456 kappaletta. Taulukossa 15 ensimmäisessä sarakkeessa on yhteen hälytykseen osallistuneiden yksiköiden lukumäärä ja toisessa sarakkeessa hälytysten lukumäärä, jotka ovat vaatineet ensimmäisen sarakkeen määrän yksiköitä.

Taulukko 15. Hälytyksiin samanaikaisesti osallistuneiden yksiköiden lukumäärä.

Yksiköiden lukumäärä l	Hälytysten lukumäärä	Ilmoitusvirta λ	Toiminta-aika τ
1	198±6	0,542±0,016	78,4
2	166±6	0,456±0,015	84,5
3	56±3	0,152±0,009	117,6
4	22±2	0,060±0,005	148,6
5	8±1	0,021±0,003	137,7
6	3±0,7	0,008±0,002	158,6
7	2±0,5	0,004±0,001	174,2
8	1±0,5	0,003±0,001	164,5
9	0,2±0,2	0,0005±0,0005	117,2
10	0,2±0,2	0,0005±0,0005	185,0
11	0,4±0,3	0,0010±0,0007	234,4
12	0,2±0,2	0,0005±0,0005	163,6
22	0,2±0,2	0,0005±0,0005	521,0

Taulukossa 15 on esitetty lisäksi koko maan tilastotiedoista määritetyt kunkin luokan toiminta-ajat ja hälytysten lukumäärän avulla saadut kunkin luokan ilmoitusvirrat eli hälytysten lukumäärät aikayksikössä. Ilmoitusvirran virheen havaitaan kasvavan suureksi, kun yksiköiden lukumäärä l ylittää seitsemän, jonka vuoksi johtopäätöksiä voidaan tehdä vain alueella λ_1 – λ_7 .

Taulukon 15 avulla määritetyt tilatodennäköisyydet eli todennäköisyys, että mielivaltaisella ajan hetkellä on k yksikköä samanaikaisesti varattuna, on esitetty taulukossa 16.

Taulukko 16. Todennäköisyydet, että satunnaisella ajanhetkellä on varattuna k yksikköä.

k	0	1	2	3	4	5	6
P{k}	0,924± 0,004	0,027± 0,001	0,025± 0,001	0,012± 0,001	0,006± 0,001	0,0024± 0,0003	0,0011± 0,0002
k	7	8	9	10	11	12	
P{k}	0,0007± 0,0002	0,0005± 0,0002	0,00009± 0,00005	0,00009± 0,00007	0,00016± 0,00011	0,00006± 0,00006	

Tilan $E\{k\}$ taajuudet on esitetty taulukossa 17.

Taulukko 17. Tilan $E\{k\}$ taajuudet $[1/a]$.

k	0	1	2	3	4	5	6
f*{k}		182,6±4,8	159,1±4,8	60,9±3,3	28,4±2,3	12,5±1,6	5,8±1,0
f⁰{k}	421,5±17,1	12,4±0,9	11,5±0,9	5,6±0,6	2,9±0,4	1,1±0,2	0,52±0,1
F{k}	421,5±17,1	195,1±5,7	170,5±5,6	66,5±3,8	31,3±2,7	13,5±1,8	6,3±1,2
k	7	8	9	10	11	12	
f*{k}	3,0±0,8	2,0±0,6	0,64±0,32	0,41±0,26	0,46±0,30	0,26±0,23	
f⁰{k}	0,30±0,10	0,21±0,08	0,04±0,03	0,04±0,03	0,07±0,05	0,03±0,03	
F{k}	3,3±0,9	2,2±0,7	0,68±0,34	0,45±0,30	0,53±0,35	0,29±0,26	

Taulukossa 17 taajuus $f^*\{k\}$ ilmaisee, kuinka monta kertaa vuoden aikana tila $E\{k\}$ muuttuu yksiköiden vapautumisen ja taajuus $f^0\{k\}$ uusien hälytysten saapumisten seurauksena. Taajuus $F\{k\}$ on näiden summa.

Erityyppisten estojen taajuudet ja esiintymistodennäköisyydet on esitetty taulukossa 18.

Taulukko 18. Estojen todennäköisyydet ja taajuudet.

N	0	1	2	3	4	5	6
Pesto	1,000± 0,00	0,600± 0,007	0,251± 0,012	0,117± 0,011	0,055±± 0,009	0,028± 0,007	0,015± 0,005
P_{os.esto}	0,000± 0,000	0,524± 0,004	0,202± 0,010	0,094± 0,009	0,044± 0,007	0,023± 0,006	0,012± 0,004
Ptäysesto	1,00± 0,00	0,076± 0,004	0,049± 0,003	0,024± 0,002	0,011± 0,002	0,005± 0,001	0,003± 0,001
festo [1/a]	456,2± 20,3	273,6± 15,5	114,5± 10,8	53,6± 7,5	25,2± 5,1	12,7± 3,6	6,9± 2,5
f_{os.esto} [1/a]		238,9± 12,3	92,2± 8,5	42,8± 6,0	19,9± 4,2	10,4± 3,0	5,7± 2,2
ftäysesto [1/a]	456,2± 20,3	34,7± 3,2	22,2± 2,3	10,8± 1,5	5,2± 0,9	2,3± 0,5	1,2± 0,3
N	7	8	9	10	11	12	
Pesto	0,009± 0,003	0,004± 0,002	0,0028± 0,0016	0,0019± 0,0011	0,0009± 0,0005	0,0003± 0,0001	
P_{os.esto}	0,007± 0,003	0,003± 0,002	0,0024± 0,0016	0,0016± 0,0013	0,0007± 0,0005	0,0002± 0,0002	
Ptäysesto	0,0015± 0,0004	0,0009± 0,0002	0,0004± 8,95E-08	0,0003± 0,00002	0,0002± 0,0001	0,0001± 0,0002	
festo [1/a]	3,9± 1,7	1,9± 1,1	1,3± 0,8	0,86± 0,54	0,40± 0,24	0,14± 0,01	
f_{os.esto} [1/a]	3,2± 1,5	1,5± 1,0	1,1± 0,8	0,71± 0,63	0,30± 0,26	0,11± 0,08	
ftäysesto [1/a]	0,69± 0,21	0,39± 0,10	0,18± 0,01	0,14± 0,003	0,10± 0,04	0,03± 0,09	

Estotaajuudet (f) ilmaisevat kuinka monta kertaa vuoden aikana tietty esto esiintyy. Taulukossa 19 esitetyt estovälit saadaan estotaajuuksien käänteislukuina. Estotodennäköisyys saadaan jakamalla estotaajuudet kaikkien hälytysten lukumäärällä aikayksikössä. Esimerkiksi taulukosta 18 nähdään, että jos kaupungissa on operatiivisia yksiköitä 10 kappaletta ($N = 10$) niin esto esiintyy 0,86 kertaa vuoden aikana eli kerran 1,2 vuodessa. Estotodennäköisyys on 0,0019.

Taulukko 19. Keskimääräiset estovälit [a].

N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Esto	0,002	0,004	0,01	0,02	0,04	0,08	0,14	0,26	0,52	0,79	1,2	2,5	7,4
Osittainen esto		0,004	0,01	0,02	0,05	0,10	0,18	0,31	0,66	0,92	1,4	3,4	9,4
Täysesto	0,002	0,029	0,04	0,09	0,19	0,44	0,83	1,46	2,6	5,5	7,0	9,7	35

Verrataan Helsingin estotaajuuksia pääkaupunkiseudulle normitettuihin arvoihin. Taulukossa 20 on näkyvissä estojen esiintymiskerrat vuotta kohden virherajoinen. Eli kun oletetaan, että Helsingissä yksiköiden lukumäärä $N = 8$, nähdään taulukosta 20, että esto esiintyy $0,2 \pm 0,2$ kertaa vuoden aikana. Helsingin pienempi estojen määrä johtuu pienemmästä ilmoitusvirrasta sekä pienemmistä toiminta-ajoista. Koko maan toiminta-ajat, joita tässä käytettiin pääkaupunkiseudun arvoina, olivat noin puolitoistakertaisia ($N = 1, 2, \dots, 8$) verrattuna Helsingin vastaaviin arvoihin.

Taulukko 20a. Eston esiintymistaajuudet [$1/a$] vuodessa Helsingissä ja pääkaupunkiseudulla.

N	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Helsinki	249±30	201±23	31±11	13±7	5±4	3±3	2±2	1±1	0,2±0,2
Pääkaupunkiseutu	456±20	274±16	115±11	54±8	25±5	13±4	7±3	4±2	2±1

Taulukosta 20a nähdään yksiköiden lukumäärän vaikutus estojen esiintymistiheyteen. Ottamalla kriteeriksi jokin eston esiintymistaajuuden arvo kaupungissa, voidaan taulukon 20a avulla arvioida tarvittava yksiköiden lukumäärä N siten, että estoväli pysyy riittävän suurena. Tässä kuitenkin suurilla N :n arvoilla havaintoaineisto oli niin pieni, että suhteellinen virhe kasvoi melko suureksi, mikä vaikeuttaa johtopäätösten tekemistä.

4.1.5 Herkkyysanalyysi

Liitteen G taulukon G1 mukaisesti rakennuspalojen osuus kaikista hälytyksistä on 3 %. Jos sairaankuljetus jätetään huomioimatta, rakennuspalojen osuus on 16 %. Kun tarkasteltiin kaikkia hälytyksiä, mallissa oletettiin tilastoaineiston puuttumisen vuoksi vain ilmoitusvirran muuttuvan ja muiden ominaisuuksien olevan identtiset rakennuspalohälytysten kanssa. Koska tarkkaa tietoa toiminta-ajoista ja yksiköiden jakaantumisesta muiden kuin rakennuspalojen osalta ei ole, tarkastellaan mallin toimivuutta herkkyysanalyysin avulla. Tarkoituksena on tarkastella syöteparametrien muutoksen vaikutusta mallin käyttäytymiseen. Analyysi toteutetaan siten, että käytetään ilmoitusvirran λ ja toiminta-ajan τ arvoina rakennuspalolle määritettyjä arvoja, jotka on esitetty taulukoissa 6 ja 10. Parametrien λ ja τ arvot kerrottiin vuorotellen tekijällä kaksi, jonka jälkeen tulok-

sia vertailtiin alkuperäisiin arvoihin. Taulukossa 20b on esitetty kunkin suureen keskimääräinen poikkeama alkuperäisestä arvosta. Toisessa sarakkeessa vasemmalta on esitetty poikkeama, kun ilmoitusvirta on kaksinkertainen, ja kolmannessa sarakkeessa, kun toiminta-aika on kaksinkertainen.

Taulukko 20b. Suureiden poikkeamat alkuperäisistä arvoista, kun ilmoitusvirta ja toiminta-aika on kerrottu tekijällä 2.

	λ	τ
λ	100 %	0 %
τ	0 %	100 %

$P\{k\}$	100 %	100 %
$f^*\{k\}$	100 ... 150 %	15 %
$f^0\{k\}$	300 %	100 %
$F\{k\}$	100 ... 150 %	15 %
P_{kielto}	20 ... 30 %	20 ... 30 %
$P_{\text{ositt.kielto}}$	20 ... 30 %	20 ... 30 %
$P_{\text{täyskielto}}$	100 %	100 %
f_{kielto}	100 ... 150 %	20 ... 30 %
$f_{\text{ositt.kielto}}$	100 ... 150 %	20 ... 30 %
$f_{\text{täyskielto}}$	300 %	100 %

Estovälit

kielto	60 %	20 %
osittaiskielto	60 %	20 %
täyskielto	70 %	50 %

Kummankin parametrin muutos vaikutti todennäköisyyteen $P\{k\}$, että samanaikaisesti on varattuna k yksikköä, keskimäärin lineaarisesti, jolloin $P\{k\}$:n arvo nousi keskimäärin 100 % molemmissa tapauksissa kaikilla k :n arvoilla. Kun ilmoitusvirran arvot kerrottiin tekijällä kaksi, taajuus $f^*\{k\}$, jolla tila $E\{k\}$ muuttuu, kun yksiköitä vapautuu hälytystehtävien hoidosta, kasvoi keskimäärin noin 130 % tulosten kasvun ollessa eri k :n arvoilla 100–150 %. Kun toiminta-aika kerrottiin kahdella, taajuus $f^*\{k\}$ kasvoi keskimäärin vain noin 15 % vaihdellen eri k :n arvoilla muutamasta prosentista 30 %:iin. Summataajuus $F\{k\}$ eli tilamuutoksen esiintymistiheys kasvoi keskimäärin 130 %, kun ilmoitusvirran arvot kaksinkertaistettiin. Toiminta-ajan kaksinkertaistaminen kasvatti taajutta $F\{k\}$ eri k :n arvoilla muutamasta prosentista 35 %:iin keskimääräisen kasvun ollessa noin 15 %.

Kun ilmoitusvirran arvot kaksinkertaistettiin, osittaiskieltojen lukumäärä aikayksikössä $f_{ositt.kielto}$ kasvoi noin sadasta prosentista jopa kolmeensataan suurilla $N:n$ arvoilla. Keskimäärin taajuus kasvoi 150 %. Osittaiskiellon todennäköisyys $P_{ositt.kielto}$ kasvoi tällöin noin 20–30 %. Täyskieltojen lukumäärä aikayksikössä $f_{täyskielto}$ kasvoi puolestaan noin keskimäärin 300 %, jolloin täyskiellon esiintymistodennäköisyys $P_{täyskielto}$ kasvoi noin 100 %. Kieltojen lukumäärä aikayksikössä f_{kielto} kasvoi keskimäärin 150 % ja kiellon todennäköisyys P_{kielto} kasvoi noin 30 %. Kun toiminta-ajan arvot kaksinkertaistettiin, osittaiskieltojen lukumäärän aikayksikössä $f_{ositt.kielto}$ kasvu vaihteli muutamasta prosentista sataan prosenttiin. Keskimäärin taajuus kasvoi noin 20–30 %. Osittaiskiellon todennäköisyys $P_{ositt.kielto}$ kasvoi tällöin noin 20–30 %. Täyskieltojen lukumäärä aikayksikössä $f_{täyskielto}$ kasvoi puolestaan noin keskimäärin 100 %, jolloin täyskiellon esiintymistodennäköisyys $P_{täyskielto}$ kasvoi noin 100 %. Kieltojen lukumäärä aikayksikössä f_{kielto} kasvoi keskimäärin noin 30 % ja kiellon todennäköisyys P_{kielto} kasvoi noin 30 %.

Taulukosta 20b voidaan nähdä, että ilmoitusvirran λ muutoksella on huomattavasti suurempi vaikutus mallin antamiin tuloksiin kuin toiminta-ajan τ muutoksella. Ilmoitusvirta on tällä hetkellä kuitenkin huomattavasti paremmin tunnettu suure kuin toiminta-aika.

Toiminta-aikoina käytettiin rakennuspalojen tilastoista määritettyjä toiminta-aikoja, olettaen karkeasti niiden olevan muissakin hälytyksissä samansuuruiset. Taulukosta G1 nähdään ilmoitusvirran jakaantuminen eri tehtävien kesken. Tulipaloista luultavimmin vain maastopalot ovat sen kaltaisia, että niissä palokunnan toiminta-aika voi olla suurempi kuin rakennuspalojen toiminta-aika kerrottuna tekijällä kaksi, jolloin myös tulokset muuttuvat enemmän kuin taulukossa 20b on määritetty. Maastopalojen osuus kaikista tulipaloista on 22 % ja rakennuspalojen 44 %. Väärät hälytykset ovat myös ryhmä, joiden toiminta-ajat saattavat olla lyhyempiä kuin tekijällä kaksi jaetut rakennuspalojen toiminta-ajat. Muiden hälytysten osalta on oletettavissa, että toiminta-ajat eivät poikkeaa rakennuspalojen toiminta-ajoista enempää kuin tekijällä kaksi. Tällöin mallin antamien tulosten poikkeamat pysyvät taulukon 20b esittämässä rajoissa.

4.1.6 Yhteenveto

Käytetty malli sisältää yksinkertaistuksia, mutta verrattaessa tuloksia kokeellisiin mitauksiin voidaan todeta, että sen avulla voidaan melkoisella tarkkuudella arvioida palokunnan operatiivista toimintaa. Kohdan 4.1.4 esimerkit on tehty olettaen, että kaupungin kaikki hälytykset koostuvat vain rakennuspalloista. Jonkinlaisen kokonaiskuvan muodostamiseksi pelastustoimen koko kuormituksesta otettiin Helsingin esimerkissä rinnalle tapaukset, joissa ilmoitusvirrassa olivat mukana kaikki pelastustoimen hälytysluonteiset lähdöt liitteen G taulukon G1 mukaisesti. Tässä tehtiin rohkea oletus, että kaikki muut ominaisuudet, kuten toiminta-aika ja lähtevien yksiköiden jakaantuminen, ilmoitusvirtaa

lukuun ottamatta, ovat samat kuin rakennuspaloissa. Näin ei todellisuudessa kuitenkaan ole, mutta tämä yksinkertaistus tehtiin, koska todellisia mittauksia näistä parametreista ei tämän työn puitteissa onnistuttu hankkimaan. Tämän vuoksi tarkasteltiin mallin herkkyyttä syöteparametrien suhteen muuttamalla rakennuspaloille määritettyjen ilmoitusvirtojen ja toiminta-aikojen arvoja tekijällä kaksi. Oli selvästi havaittavissa, että malli on paljon herkempi reagoimaan ilmoitusvirran kuin toiminta-ajan muutoksiin. Tämän vuoksi mallia sovellettaessa on erittäin tärkeää määrittää ilmoitusvirtojen arvot mahdollisimman tarkasti. Toiminta-ajan muutoksille malli ei osoittautunut yhtä herkäksi, ja lähes poikkeuksetta voidaan olettaa, etteivät muiden hälytysten toiminta-ajat poikkea rakennuspalojen toiminta-ajoista enempää kuin tekijällä kaksi. Tämän vuoksi voidaan päätellä, että vaikka todellisia toiminta-aikoja ei ollutkaan käytössä, malli antaa kuitenkin melko hyviä tuloksia, koska käytetyt ilmoitusvirrat olivat tarkasti tilastoista määritettyjä todellisia ilmoitusvirtoja. Tehtyjen esimerkkien perusteella voidaan siis tehdä johtopäätös, että koska estotodennäköisyydet Suomessa jäävät melko alhaisiksi, yksiköiden saatavuus ei muodostu palokunnan epäonnistumista mitoittavaksi tekijäksi.

4.1.7 Kaupungin paloasemien määrä ja sijoitus

Euroopan kaupungeissa oletetaan yleensä olevan useampia paloasemia, joissa on kussakin useita operatiivisia yksiköitä (Brušlinski 1992). Yhdysvalloissa ja Japanissa sama on ratkaistu muodostamalla pieniä paloasemia, joissa on 1–2 operatiivista yksikköä ja silti niiden kattavuus (asemien lukumäärä pinta-alayksikköä kohden) on riittävä siten, että yhden paloauton palvelema alue on vain muutaman neliökilometrin laajuinen. Tästä on esimerkkinä esitetty liitteen H taulukossa H1 palokuntien kattavuuksia muutamissa kaupungeissa.

Lisäksi liitteen H taulukossa H2 on esitetty palotoimen varustuksen määriä suhteutettuna asukaslukuun sekä hälytysten määrä vuorokaudessa yhtä paloasemaa kohden eri kaupungeissa.

Todennäköisyys sille, että mielivaltaisella ajanhetkellä kaupungissa tarvitaan operatiivisia yksiköitä enemmän kuin N , on (Brušlinski 1992)

$$P_{>N} = 1 - \sum_{k=0}^N P_k . \quad (126)$$

Arvo N valitaan siten, että todennäköisyys $P_{>N}$ on riittävän pieni (10^{-3} – 10^{-4})

Brušlinskin mukaisesti kaupunkiin tarvittavien paloasemien määrä N_g voidaan laskea kaavasta (Brušlinski 1992)

$$N_g = \frac{\alpha k^2 A}{v^2 \tau^2} + \lambda \bar{\tau}, \quad (127)$$

missä A on kaupungin pinta-ala neliökilometreinä, k on laaduton kerroin, joka kuvaa epälineaarista tieverkkoa ja voi saada arvon 1–1,4, v on pelastusyksiköiden keskinopeus kilometreinä tunnissa, τ on keskimääräinen ajoaika minuuteissa ja α on laaduton kokeellinen kerroin, joka ottaa huomioon kaupungin topologian ja voi 1 100–1 800, λ on ilmoitusvirta aikayksikössä ja $\bar{\tau}$ on keskimääräinen toiminta-aika.

Brušlinskin mukaisesti kaavojen (115) ja (126)–(127) avulla mitoittamalla tarvittavien operatiivisten yksiköiden lukumäärä Venäjällä voitaisiin vähentää puoleen nykyisestä paloturvallisuustason silti laskematta.

4.1.7.1 Brušlinskin sijoitusmalli

Käsitellään nyt rationaalista yksiköiden jakautumista eri paloasemille Brušlinskin (1988) mukaan. Oletetaan, että kaupunkiin sijoitetaan paloasemia jokin määrä M , joissa jokaisessa on tietty määrä yksiköitä. Kullekin paloasemalle määritetään oma toiminta-alue, jonka raja riippuu ensimmäisen yksikön sallitusta ajoajasta onnettomuuspaikalle. N yksikköä jakaantuu M :n aseman kesken M -dimensioisen vektorin mukaisesti (n_1, n_2, \dots, n_M) , jonka komponentit toteuttavat ehdon

$$\sum_{i=1}^M n_i \leq N \quad (0 \leq n_i \leq N), \quad (128)$$

missä n_i on yksiköiden lukumäärä paloasemalla i . Paloaseman alueelta tuleviin hälytyksiin lähtevät ensin aseman vapaat yksiköt. Jos niitä ei ole riittävästi, yksiköitä lähtee lähiasemilta. Näiden saapumiseen paikalle kuluu enemmän aikaa, jolloin palovahinko kasvaa. Tilannetta, jolloin yksiköitä tarvitaan enemmän kuin aseman i käytettävissä olevat n_i yksikköä, kuvataan haittafunktiolla $w_i\{n_i\}$. Tämä on monotonisesti laskeva n_i -yksiköiden funktio, joka saavuttaa maksiminsa, kun $n_i = 0$. Tällöin muut asemat palvelevat kaikki hälytykset i -aseman alueella. N :n yksikön M :n aseman kesken jakaantumisen tehokkuudeksi D saadaan

$$D = \frac{\sum_{i=1}^M w_i \{0\} - \sum_{i=1}^M w_i \{n_i\}}{\sum_{i=1}^M w_i \{0\}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^M w_i \{n_i\}}{\sum_{i=1}^M w_i \{0\}}. \quad (129)$$

$D = 0$ vastaa pahinta jakautumaa, kun kaikki N yksikköä on sijoitettu alueen ulkopuolelle. $D = 1$ silloin, kun n_i yksikköä hoitaa kaikki mahdolliset i -aseman alueen hälytykset ($i = 1, 2, \dots, M$). Haittafunktio $w_i \{n_i\}$ voidaan muodostaa yhdellä seuraavista parametreista

- kokonaisaika $t_i \{n_i\}$, jonka i -aseman hälytyksiä hoitavat muiden asemien yksiköt
- hälytysten lukumäärä $r_i \{n_i\}$ i -aseman alueella, johon tarvitaan lisää yksiköjä muualta
- aseman i ulkopuolelta tulevien yksiköiden kokonaismäärä $s_i \{n_i\}$.

Oletetaan mielivaltaisella hetkellä i -aseman hälytyksien, jotka vaativat l yksikköä, muodostavan yksinkertaisen virran tiheydellä λ_{il} . Satunnainen aikaväli, jonka yksiköt ovat varattuina hälytyksiin, on eksponentiaalisesti jakautunut ja keskiarvoltaan $\overline{\tau_{il}}$ ($i = 1, 2, \dots, M; l = 1, 2, \dots, L$). Tarkastellaan tilaa $E\{k\}$ i -aseman ($i = 1, 2, \dots, M$) alueella, jolloin k ($k = 1, 2, \dots$) yksikköä on samanaikaisesti varattuina. Tämän tilanteen todennäköisyys sekä sen taajuus lasketaan kaavoilla (yhtälöt (99), (115) ja (118))

$$P_i \{0\} = e^{(-\sum_{l=1}^L \lambda_{il} \overline{\tau_{il}})} \quad (99b)$$

$$P_i \{k\} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k j \lambda_{ij} \overline{\tau_{ij}} P_i \{k-l\} \quad (k = 1, 2, 3, \dots) \quad (115b)$$

$$f_i^* \{k\} = \frac{1}{k} \sum_{l=1}^k \lambda_{il} P_i \{k-l\} \quad (k = 1, 2, 3, \dots) \quad (118b)$$

Edellisten kaavojen avulla voidaan arvioida $t_i \{n_i\}$, $r_i \{n_i\}$ ja $s_i \{n_i\}$ seuraavasti:

$$t_i \{n_i\} = 1 - \sum_{k=0}^{n_i} P_i \{k\} \quad (130)$$

$$r_i \{n_i\} = \sum_{l=1}^L \lambda_{il} - \sum_{k=1}^{n_i} f_i^* \{k\} = \sum_{k=1}^L \lambda_{il} - \sum_{k=1}^{n_i} \sum_{l=1}^k P_i \{k-l\} \lambda_{il} \quad (131)$$

$$s_i \{n_i\} = \sum_{l=1}^L l \lambda_{il} - \sum_{k=1}^{n_i} \sum_{l=1}^k P_i \{k-l\} l \lambda_{il} - \sum_{j=0}^{n_i-1} P_i \{j\} (U_i - j) \sum_{k=n_i+1}^N \lambda_{i,k-j}. \quad (132)$$

D on arvo, joka sisältää haittafunktion $w_i \{n_i\}$ eli jonkun kolmesta arvosta $t_i \{n_i\}$, $r_i \{n_i\}$ tai $s_i \{n_i\}$. Merkitään niitä $D^{(t)}$, $D^{(r)}$ ja $D^{(s)}$. Käytännössä tärkein on $D^{(s)}$, joka osoittaa alueen yksiköiden vähenemisen, kun niitä siirretään toiselle alueelle. N :n yksikön optimaalisen jakautumisen M :lle asemalle etsiminen supistuu vektorin komponenttien (n_1, n_2, \dots, n_M) etsimiseen, jotka täyttävät ehdon (128) ja turvaavat maksimi D :n arvon. Arvo D lasketaan peräkkäin kaikille mahdollisille jakautuman vaihtoehdoille, joiden lukumäärä on niiden kombinaatioiden lukumäärä C_{M+N-1}^N , millä N :n yksikön joukosta voidaan poimia $M+N-1$ yksikköä. Tämä on tunnetusti

$$C_{M+N-1}^N = \frac{(M+N-1)!}{N!(M-1)!}. \quad (133)$$

Esimerkkinä Helsingin kaupungin kahdeksalle paloasemalle on sijoitettu yhteensä kahdeksan pelastusyksikköä. Silloin kombinaatioiden lukumäärä on

$$C_{15}^8 = \frac{15!}{8!7!} = 6435. \quad (134)$$

D :n arvioinnin toinen menetelmä on dynaaminen ohjelmointi. Tehokkuuden D sijaan voidaan käyttää haittafunktioista muodostettua suuretta W , kokonaishaittafunktiota, joka on haittafunktion $w_i \{n_i\}$ summan minimi aikayksikössä.

$$W = \sum_{i=1}^M w_i \{n_i\} \quad (135)$$

Dynaamisen ohjelmoinnin menetelmä, N :n yksikön optimaalista jakautumista M :lle asemalle etsittäessä, koostuu kahdesta vaiheesta. Kumpikin vaihe sisältää M askelta. Jokaisella askeleella i jaetaan n_i yksikköä asemalle i . Ensimmäisessä vaiheessa jokaisella askeleella i (alussa $i = M$ ja lopussa $i = 1$) etsitään yksiköiden optimaalinen määrä n_i asemalle i ja vastaava optimaalinen haitta $W_i \{N^*\}$ ottaen huomioon, että $(i-1)$:n edellisen askeleen jälkeen on jakamatta N^* yksikköä ($N^* = 0, 1, \dots, N$). Optimaalinen tila saavutetaan, kun N^* yksikköä on jaettu $(M-i-1)$:lle asemalle. Sen funktionaalinen yhtälö on

$$W_i \{N^*\} = \min_{0 \leq n_i \leq N^*} [w_i \{n_i\}] + W_{i+1} \{N^* - n_i\}. \quad (136)$$

Askeleella M yhtälö (136) on seuraava

$$W_W \{N^*\} = \min_{0 \leq n_M \leq N^*} [w_M \{n_M\}] = w_M \{N^*\}. \quad (137)$$

Toisen vaiheen askeleella i (alussa $i = 1$ ja lopussa $i = M$) etsitään yksiköiden optimaalinen lukumäärä n_i^{opt} , joka yhteensä minimoi kokonaishaittafunktion eli kriteerin (135). Taulukossa 20c esitetään laskelmien tuloksia aikavälillä $T = 1$ a = 8 760 h kahdelle eri vaihtoehdolle, jossa eräässä Neuvostoliiton kaupungissa kuusi operatiivista yksikköä on jaettu kolmelle asemalle.

Taulukko 20c. Kahden vaihtoehdon tulokset, kun kuusi operatiivista yksikköä on jaettu kolmelle asemalle Neuvostoliitossa.

	$\sum_{i=1}^M t_i \{n_i\}$ [h]	$\sum_{i=1}^M t_i \{0\}$ [h]	D^t [%]	$\sum_{i=1}^M r_i \{n_i\}$	$\sum_{i=1}^M r_i \{0\}$	$D^{(r)}$ [%]	$\sum_{i=1}^M s_i \{n_i\}$	$\sum_{i=1}^M s_i \{0\}$	D^s [%]
1	152	673	77,4	96	1000	90,3	138	1376	90,0
2	132	673	80,4	91	1000	90,9	149	1376	89,1

Vaihtoehto 1 on optimaalinen $D^{(s)}$ -arvon mukaisesti, kun $(n_1 = n_2 = n_3 = 2)$. Vaihtoehto 2 on optimaalinen arvojen $D^{(t)}$ ja $D^{(r)}$ mukaisesti, kun $(n_1 = 2, n_2 = 1, n_3 = 3)$. Huomataan, että vaihtoehdossa 2 siirtojen lukumäärä alueelta toiseen kasvaa 138:sta 149:ään, mutta hälytysten lukumäärä, joihin kutsutaan vieraita yksikköjä laskee 96:sta 91:een ja vieraiden yksiköiden toiminta-aika laskee 152 tunnista 132 tuntiin. Käytännössä osoitettiin, että arvot t , r ja s eivät ole ristiriidassa keskenään. Jos joku vaihtoehdoista on optimaalinen yhden arvon suhteen, se lähestyy optimaalista myös muiden arvojen suhteen.

4.1.8 New Yorkin sijoitusmalli

Tarkoituksena oli muodostaa malli, jonka avulla olisi mahdollista määrittää paloasemien sijainnit useiden sijoituskriteerien avulla. Selviä toiminnan mittayksikköjä ovat arvioitu kuolleiden määrä sekä rahalliset vahingot millä tahansa alueen paloasemien jaolla.

Mallin (Kolesar 1975) mukaisesti lähimmän hälytykseen reagoineen yksikön ajoaika t_a (aika yksikön asemalta lähtöhetkestä hetkeen, jolloin se saapuu onnettomuuspaikalle) tietyllä alueella kaupungissa saadaan yhtälöstä

$$t_a = \alpha + \beta \left(\frac{A}{n-b} \right)^\gamma, \quad (138)$$

missä A on alueen pinta-ala, n on kaikkien ja b on varattujen yksiköiden lukumäärä tarkasteltavalla alueella. α , β ja γ ovat alueen fyysisistä ominaisuuksista, kuten tiivistyksestä, riippuvia parametreja.

Pitämällä ajoaikaa palotointia mitoittavana tekijänä, voidaan tarkastella useita sijoituskriteerejä. Yksi mahdollinen menetelmä, kun kullekin kaupungin alueelle on määritetty keskimääräinen ajoaika, on painottaa ajoaikaa alueen ilmoitusvirralla ja minimoida sen keskiarvo koko kaupungissa. Tällä tavoin useimmat paloasemat sijoitettaisiin alueille, joissa ilmoitusvirta on suurin. Se ei välttämättä ole tyydyttävä ratkaisu, sillä ajoaika alueille, joissa ilmoitusvirta on pienempi, kasvaa tällöin merkittävän suureksi. Toinen mahdollinen menetelmä on asettaa keskimääräiset ajoajat eri alueilla yhtä suuriksi ja varmistaa että kaikki kaupungin alueet saavutetaan yhtä nopeasti. Tämä menetelmä puolestaan johtaa palokuntien ylimitoitukseen alueilla, joiden ilmoitusvirta on alhainen, ja asettaa suuria vaatimuksia palokunnille alueilla, joilla ilmoitusvirta on korkea.

Koska kumpikaan näistä äärilaidoista ei ole täysin tyydyttävä tapa sijoittaa palokuntia, on oletettavaa, että hyväksyttävä menetelmä on jotakin niiden väliltä. Tämän vuoksi seuraava malli käyttää kohdefunktiota, joka sisältää, muuttamalla yhden parametrin arvoa, kriteerin keskimääräisestä minimiajoajasta ja samansuuruisesta ajoajasta sekä välikriteerin. Funktio sisältää keskimääräisiä alueellisia ajoaikoja korotettuina potenssiin ja painotettuina kertoimilla, jotka ovat suhteessa riskeihin ja ilmoitusvirtaan alueella. Tämän sijoitusmallin yleiselle muodolle (Rider 1975)

$$\sum_{i=1}^n w_i [t_{ai}(n_i)]^\beta = \min! \quad (139a)$$

etsitään kohdefunktion ekstremaali (minimi) ottamalla huomioon rajoitusehto

$$\sum_{i=1}^n n_i = M, \quad (140)$$

missä w_i on alueen i paino, $t_{ai}(n_i)$ on arvioitu ajoaika alueella i , johon on sijoitettu n_i yksikköä, M on kaikkien sijoitettavien yksiköiden lukumäärä ja β on painotuseksponentti ($\beta \geq 0$).

Suomessa palojen määrä on verrannollinen kerrosalaan. Siksi on loogista asettaa pelastustoimen optimoinnin perusteeksi vaatimus, että keskimäärin kohteet saavutetaan toiminta-alueella lyhimmissä mahdollisissa ajassa. Siten yhtälö (139) voitaisiin kirjoittaa

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{N_i} w_{ij} t_{aj}(n_i) = \min!, \quad (139b)$$

missä N_i on alueella i olevien rakennusten lukumäärä, $t_{aj}(n_i)$ ajoaika asemalta i rakennukseen j sekä w_{ij} rakennuksen j suhteellinen kerrosala koko toiminta-alueella.

Normituksesta johtuen $\sum_{ij} w_{ij} = 1$.

Merkitsemällä keskimääräistä ajoaikaa alueessa n_k symbolilla \bar{t}_{ak} saadaan

$$\bar{t}_{ak} = \frac{\sum_{j=1}^{N_k} w_{kj} t_{aj}(n_k)}{\sum_{j=1}^{N_k} w_{kj}}, \quad (139c)$$

jolloin yhtälö (139a) yksinkertaistuu muotoon

$$\sum_{i=1}^{N_i} w_i \bar{t}_{ai}(n_i) = \min!. \quad (139d)$$

Tämä painotus vastaa ilmoitusvirralla painotettua keskimääräisen ajoajan kriteeriä, mikä erityisesti toiminta-alaltaan laajoissa kunnissa saattaisi johtaa voimien liialliseen hajotamiseen. Siksi tämän rinnalle tarvittaisiin toinenkin kriteeri, mutta aihetta ei Suomen osalta käsitellä tässä pidemmälle.

On osoittautunut käytännölliseksi painottaa alueen erityyppisiä ilmoitusvirtoja vastavalla keskimääräisellä työajalla. Tällöin

$$\bar{\lambda}_i = \sum_{j=1}^k \lambda_{ij} \tau_j, \quad (141)$$

missä $\bar{\lambda}_i$ on tehollinen työaika alueella i , λ_{ij} on j -tyyppisten hälytysten osuus alueella i ja τ_j on j -tyyppisten tapahtumien kokonaistyöaika.

$\bar{\lambda}_i$ tunnistaa työajan palokunnan vaatimusten mitaksi, ja kaikkien järkevien painotustapojen antamien tuloksien oletetaan olevan suunnilleen samoja. Alueita, joilla rakennuspalojen ilmoitusvirta on suuri, painotetaan voimakkaammin, kun taas alueita, joissa pääosa hälytyksistä on vääriä tai ilmoitusvirta on pienempi, painotetaan vähemmän. Koska eri alueilla tulipalo kehittyy eri tavoin, otetaan käyttöön riskikerroin, joka toimii aicasuhteutuskertoimena ja sisältyy alueelliseen painotukseen. Vaikka ilmoitus-

virrat eri alueilla olisivat samat, vaadittu keskimääräinen ajoaika voi vaihdella, sillä alueiden mahdolliset riskit voivat olla erisuuruisia. Alueellisen painotuksen täydellinen muoto on

$$w_i = \bar{\lambda}_i h_i^\beta, \quad (142)$$

missä w_i on alueen i paino, $\bar{\lambda}_i$ on alueen i tehollinen työaika ja h_i on alueen i riskikerroin. On kuitenkin useita tapoja sijoittaa palokuntia tarvitsematta määrittää alueellisia riskikertoimia.

Seuraavaksi minimointiprobleema ratkaistaan analyttisesti löytääksemme optimaalisen palokuntien sijoittelun kaupungin alueilla β :n funktiona. Käyttämällä yhtälöä (139) ja alueellisen painon kaavaa voidaan ongelma kirjoittaa muotoon

$$Z = \sum_{i=1}^n \bar{\lambda}_i \left[h_i c \left(\frac{A_i}{n_i - b_i} \right)^\alpha \right]^\beta = \min!, \quad (143)$$

jossa etsitään tämän funktion minimi ottaen huomioon ehto (140). Yhtälössä (143) $\bar{\lambda}_i$ on alueen i tehollinen työaika, h_i on alueen riskikerroin, A_i on alueen i pinta-ala, n_i on yksiköiden lukumäärä alueella i , b_i on varattujen yksiköiden lukumäärä alueella i , M on

yksiköiden kokonaismäärä ($> \sum_i b_i$), c ja α ovat alueelle ominaisia parametreja ja β painotuseksponentti.

Käyttämällä Lagrangen kertoimia tämä pakotettu minimointiongelma voidaan muuntaa seuraavaksi vapaaksi probleemaksi:

$$\hat{Z} = \sum_{i=1}^n \bar{\lambda}_i \left[h_i c \left(\frac{A_i}{n_i - b_i} \right)^\alpha \right]^\beta + \xi \left(\sum_{i=1}^n n_i - M \right) = \min!, \quad (144)$$

missä ξ on määrittelemätön Lagrangen kerroin. Tämä ei-pakotettu ongelma ratkaistaan etsimällä sellainen n_k , joka täyttää ehdon

$$\frac{\partial \hat{Z}}{\partial n_k} = 0, \quad (k = 1, 2, \dots, n). \quad (145)$$

Derivoidaan yhtälö (144)

$$\frac{\partial \hat{Z}}{\partial n_k} = \overline{\lambda}_k (h_k c)^\beta A_k^{\alpha\beta} (-\alpha\beta)(n_k - b_k)^{-\alpha\beta-1} + \xi = 0, \quad (k = 1, 2, \dots, n), \quad (146)$$

jota järjestelmällä edelleen saadaan

$$\xi(n_k - b_k)^{\alpha\beta+1} = \alpha\beta\lambda_k (h_k c)^\beta A_k^{\alpha\beta}, \quad (147)$$

josta lopulta

$$n_k = \left(\frac{\alpha\beta\lambda_k (h_k c)^\beta A_k^{\alpha\beta}}{\xi} \right)^{\frac{1}{\alpha\beta+1}} + b_k. \quad (148)$$

Merkitään

$$v = \frac{1}{\alpha\beta + 1}, \quad (149)$$

jolloin ratkaisuksi saadaan

$$n_k^* = \overline{\lambda}_k^{-v} h_k^{v\beta} c^{v\beta} \left(\frac{\xi}{\alpha\beta} \right)^{-v} A_k^{1-v} + b_k. \quad (150)$$

Alkuperäisen ongelman sijoitusehdon $M = \sum n_i$ avulla ratkaistaan termi $(\xi / \alpha\beta)^{-v}$, jonka

perusteella eliminoidaan Lagrangen kerroin ξ . Summaamalla yhtälössä (150) n_k^* :n yli ja järjestämällä termit uudelleen saadaan yhtälö

$$\left(\frac{\xi}{\alpha\beta} \right)^{-v} = \left(\sum_{i=1}^n \overline{\lambda}_i h_i^{v\beta} c^{v\beta} A_i^{1-v} \right)^{-1} (M - \sum_i b_i). \quad (151)$$

Tämä on vain normitustekijä, joka takaa sen, että sijoitettavien yksiköiden summaksi tulee M kappaletta. Yhtälön (151) sijoittaminen yhtälöön (150) ja tekijän $c^{v\beta}$, joka esiintyy ratkaisun osoittajassa ja normitustekijän nimittäjässä, supistaminen johtaa lopulliseen muotoon

$$n_k^* = \overline{\lambda}_k^{-v} h_k^{v\beta} A_k^{1-v} N(v) + b_k, \quad (152)$$

missä normitustekijä $N(\nu)$ on nyt

$$N(\nu) = \left(\sum_{i=1}^n \bar{\lambda}_{i\nu}^{-\nu} h_i^{\nu\beta} A_i^{1-\nu} \right)^{-1} \left(M - \sum_{i=1}^n b_i \right). \quad (153)$$

Ratkaisu on kahden termin summa. Toinen termi oikealla varmistaa, että jokaiselle alueelle on sijoitettu yksiköitä ainakin se määrä, joka keskimäärin tietyllä ajanhetkellä on varattuna alueella. Ensimmäinen termi kuvaa niitä sijoitettavia yksiköitä, jotka jäävät jäljelle, kun varatut yksiköt on sijoitettu. Yleensä ratkaisut eivät ole kokonaislukuja. Tämä ei kuitenkaan ole ongelma, sillä alueiden rajat ovat keinotekoisia ja merkityksettömiä, kun yksikkö saa hälytyksen. Puolikkaan yksikön sijoitus alueelle ja toisen puolikkaan sijoitus viereiselle alueelle tarkoittaa yleensä sitä, että yksikkö sijoitetaan lähelle alueen rajaa ja sen vaikutukset jakautuvat tasaisesti molempien alueiden kesken. Hälytyskertoimen määrittystavan vuoksi tapauksella, jossa $\beta \rightarrow 0$, on merkityksellinen tulkinta. Tässä tapauksessa $\nu = 1$ ja ratkaisu on

$$n_k^* = \bar{\lambda}_k N(1) + b_k, \quad (154)$$

joka on riippuvainen riskikertoimesta. Valitun tehollisen työajan osittainen muoto on

$$\bar{\lambda}_i = \sum_j \lambda_{ij} \tau_j, \quad (155)$$

joka on sama kuin varattujen yksiköiden lukumäärä alueella i . Sijoittamalla b_k $\bar{\lambda}_k$:hon saadaan ratkaisuksi

$$n_k^* = b_k [1 + N(1)], \quad (156)$$

ja jakautuminen on riippuvainen varattujen yksiköiden lukumäärästä alueella i . Tämä yhtäläistäää keskimääräisen työmäärän kaupungin eri alueiden välillä. Siksi sijoitusmalli, jossa $\beta \rightarrow 0$, sisältää kolmannen palokuntien sijoitusmenetelmän. Yksinkertainen selitys voidaan antaa yllä olevalle ratkaisulle, jos joitakin uusia muuttujia määritellään. Merkitään:

$$\mu_k = \frac{n_k - b_k}{A_k} = \text{käytettävissäolotiheys (vapaita yksiköitä pinta-ala yksikköä kohden)}$$

$$\eta_k = h_k^{1/\alpha} = \text{uudelleen määritetty riskikerroin}$$

$$\rho_k = \frac{\bar{\lambda}_k}{A_k} = \text{varattunaolotiheys (varattuja yksiköitä pinta-ala yksikköä kohden)}.$$

Käyttämällä näitä muuttujia voidaan kirjoittaa

$$\mu_k^* = \rho_k^v \eta_k^{1-v} N(v). \quad (157)$$

Aikaisemmista tutkimuksista tiedetään, että ρ_k koostuu sellaisista tekijöistä, kuin kokonaisaika joka yksiköltä menee palon sammuttamiseen, alueen tulipalojen lukumäärä tuntia kohden, keskimääräiset menetykset paloa kohden, jne. η_k koostuu sellaisista tekijöistä, kuin ajonopeus, palon leviämisenopeus, jne. ja v on painotuseksponentti kahdenlaisten vaatimuksien välillä. Ratkaisu koostuu vain muuttujista, jotka eivät riipu pinta-alasta. Yksi tämän seurauksista on, että kahden alueen, joilla on sama ilmoitusvirta ja riskikerroin, vapaiden yksiköiden sijoitus on riippuvainen pinta-alasta riippumatta v :n arvosta. Tutkitaan nyt kahta aluetta, pinta-aloiltaan A_1 ja A_2 , joilla on sama ilmoitusvirta ja riskikerroin, ja lasketaan sijoitettavien vapaiden yksiköiden suhde alueilla. Suhde on

$$\frac{n_2^* - b_2}{n_1^* - b_1} = \frac{\mu_2 A_2}{\mu_1 A_1} = \frac{\rho_2^v \eta_2^{1-v} A_2 N(v)}{\rho_1^v \eta_1^{1-v} A_1 N(v)} = \frac{A_2}{A_1}, \quad \text{kun } \rho_2 = \rho_1 \text{ ja } \eta_2 = \eta_1. \quad (158)$$

Jos kaksi varattunaolotiheydeltään erilaista aluetta yhdistetään, sijoitettujen yksiköiden määräksi tulee suurempi kuin, jos näitä alueita olisi tarkasteltu erillisinä. Tarkastellaan kahta aluetta, joissa varattujen yksiköiden määrä pinta-alayksikköä kohden on ρ_1 ja ρ_2 . Yhdistetyn alueen varattunaolotiheys on tällöin

$$\rho = a\rho_1 + (1-a)\rho_2, \quad (159)$$

missä

$$a = \frac{A_1}{A_1 + A_2}. \quad (160)$$

Jos normitustekijä $N(v)$ oletetaan kiinnitettyksi, kun v on pienempi kuin yksi, μ :n toinen derivaatta ρ :n suhteen yhtälöstä (157) on negatiivinen. Tästä voidaan päätellä, että optimaalinen käytettävissäolotiheys, kun $N(v)$ on kiinnitetty, on varattunaolotiheyden kovera funktio. Tällöin saadaan

$$a\mu(\rho_1) + (1-a)\mu(\rho_2) \leq \mu(\rho) \quad \text{kun } 0 < v < 1. \quad (161)$$

Jos $N(v)$:n annetaan muuttua, yhdistetyn alueen ylimääräiset sijoitettavat yksiköt voivat aiheuttaa $N(v)$:n korvaavan muutoksen. Tämä muutos ei kuitenkaan ole tarpeeksi suuri muuttamaan yhtälön (161) erisuuruisuuden suuntaa.

Nämä kaksi mallia ovat tässä esimerkkeinä palokunnan yksiköiden sijoituksen optimoinnista. Muitakin malleja on, mutta nämä osoittavat käytetyt tärkeimmät periaatteet.

Tämän työn puitteissa ei ollut mahdollisuuksia kerätä Suomesta riittävästi havaintoja, jotta olisi voitu soveltaa malleja todellisiin tilanteisiin ja verrata niiden antamia tuloksia nykykäytäntöön. Suuremmilla paikkakunnilla, missä paloasemia on useita, mallien soveltamiseen kannattaisi paneutua tulevaisuudessa.

5. Lähtö- ja toimintavalmiusajat

5.1 Aikaisemmat tutkimukset

J. Rahikainen (1998b) on diplomityössään alustavasti tutkinut lähtövalmiusajan, toimintavalmiusajan, toiminta-ajan ja työtuntien jakautumista ja esittänyt karkeat sovitteet toimintavalmius- ja työajoille.

5.2 Yleistä

ONTIKASTA poimittiin kaikki palo- ja pelastustoimen hälytykset vuosilta 1994–1997. Niistä poistettiin ne tapaukset, joissa palotiedot eli palon syttymiskohta, kehitymisaste sekä laajuus palokunnan saapuessa paikalle ja laajuus tilanteen loppuessa oli merkattu nolliksi. Lisäksi poistettiin ne hälytystapaukset, joissa rakennustyyppi oli merkattu nolaksi tai tyyppinumero oli tuntematon. Tällöin tapaukset rajoittuivat vain rakennuspaloihin. Palojen lukumäärät vuosittain ovat taulukossa 21.

Taulukko 21. ONTIKAan kirjattujen rakennuspalojen lukumäärät vuosittain koko maassa.

Vuosi	1994	1995	1996	1997	Yhteensä
Rakennuspalojen määrä	2 348	3 395	3 209	2 755	11 707

ONTIKASTA saatiin tietoa koko maan palo- ja pelastustoimen lähtövalmius-, toimintavalmius- sekä toiminta-ajoista. Näistä havainnoista piirrettiin kuvaajat, joihin sovitettiin gammajakauman tiheysfunktio (Milton & Arnold 1990)

$$f(t) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} t^{\alpha-1} e^{-\frac{t}{\beta}}. \quad (162a)$$

Gammajakauman kertymäfunktion yhtälö on (McCormick 1981)

$$F(t) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^{\frac{t}{\beta}} y^{\alpha-1} e^{-y} dy = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \gamma\left(\alpha, \frac{t}{\beta}\right), \quad (162b)$$

missä $\gamma(\alpha, \frac{t}{\beta})$ on epätäydellinen gammafunktio (Abramowitz & Stegun 1970). Sen arvo voidaan laskea kaavan (10) sarjakehitelmällä.

Gammajakauman tiheysfunktio sovitettiin joko käyttämällä STATISTICA-ohjelmaa (StatSoft 1995) tai osittain silmävaraisesti käyttämällä alkuperäisen jakauman huippuarvo-menetelmää. Huippuarvo- menetelmässä gammajakauman tiheysfunktio (162) derivoidaan ja merkitään nolllaksi, koska maksimikohdassa ensimmäinen derivaatta häviää.

$$\frac{df(t)}{dt} = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} \left[(\alpha-1)t^{\alpha-2} - t^{\alpha-1} \frac{1}{\beta} \right] e^{-\frac{t}{\beta}} = 0 \quad (163)$$

Merkitsemällä huippupistettä koordinaatein (x_{\max}, y_{\max}) saadaan

$$\frac{\alpha-1}{x_{\max}} = \frac{1}{\beta}, \quad (164)$$

josta edelleen

$$x_{\max} = \beta(\alpha-1). \quad (165)$$

Sijoittamalla (165) yhtälöön (162) saadaan

$$f(x_{\max}) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} \beta^{\alpha-1} (\alpha-1)^{\alpha-1} e^{\alpha-1}, \quad (166)$$

joka sieventämisen jälkeen saa muodon

$$f(x_{\max}) = \frac{1}{x_{\max} \Gamma(\alpha)} (\alpha-1)^\alpha e^{1-\alpha}. \quad (167)$$

Tällöin valmiusaikajakauman huippupisteen (x_{\max}, y_{\max}) avulla voidaan määrittää α -parametrin arvo ratkaisemalla yhtälöstä (168) numeerisesti tai graafisesti sekä β -parametrin arvo yhtälöstä (169).

$$g = x_{\max} y_{\max} = \frac{(\alpha-1)^\alpha}{\Gamma(\alpha)} e^{1-\alpha} \quad (168)$$

$$\beta = \frac{x_{\max}}{\alpha-1} \quad (169)$$

5.3 Lähtövalmiusaika

5.3.1 Kunnallisten palokuntien valmiusasteet

Sisäasianministeriön pelastusosaston ohjeen mukaan kunnallisten palokuntien hälytysvalmiudessa oleva henkilöstö on erilaisissa valmiusasteissa seuraavasti (Sisäasiainministeriö, 1993):

I valmiusasteessa ovat ne palokunnat tai osat palokunnista, joiden lähtövalmiusaikavaatimus on alle minuutin. Henkilöstö on päivystyksessä paloasemalla tai palokunnan tehtävien edellyttäessä myös muualla.

II valmiusasteessa ovat ne palokunnat tai osat palokunnista, joiden lähtövalmiusaikavaatimus on alle viisi minuuttia. Tämä edellyttää, että henkilöstö on varallaolossa tai sen tavoitettavuus on muutoin luotettavasti varmistettu.

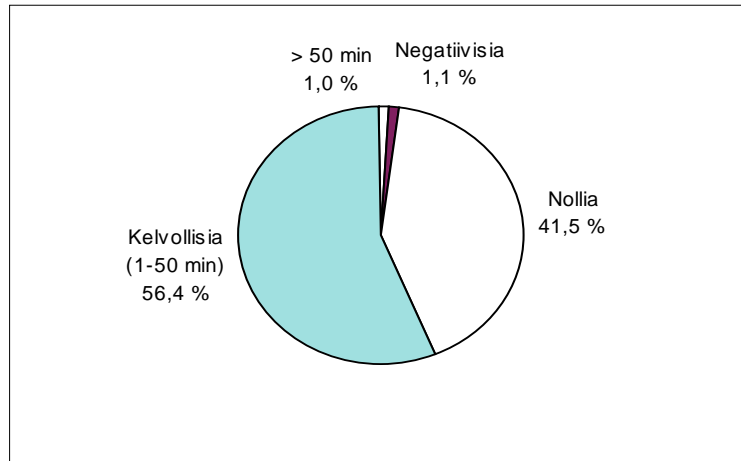
III valmiusasteessa ovat ne palokunnat tai osat palokunnista, joiden lähtövalmiusaikavaatimus on alle 10 minuuttia. Henkilöstö voi olla varallaolossa tai sen tavoitettavuus on muutoin arvioitavissa.

IV valmiusasteessa ovat ne palokunnat tai osat palokunnista, joiden lähtöaikaa on etukäteen vaikea luotettavasti arvioida tai joiden osalta se on sovittu suuremmaksi kuin 10 minuuttia.

5.3.2 Lähtövalmiusaika minuutin luokissa

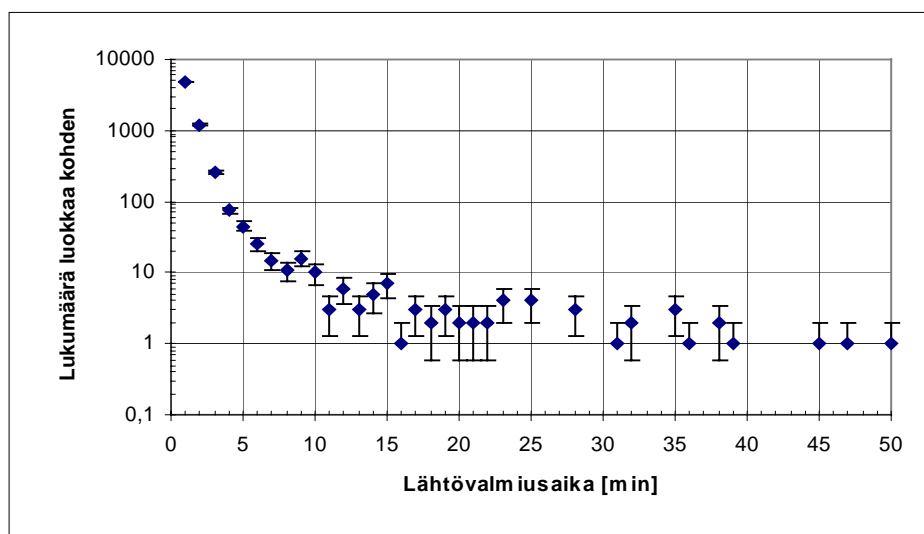
Lähtövalmiusaika määritellään ajaksi, jonka kuluessa palokunnan ensimmäinen yksikkö hälytysilmoituksen saatuaan lähtee asemalta. Lähtövalmiusaika saatiin laskemalla se ONTIKASTA yksikön asemalta lähdön ja hälytysajan erotuksena. ONTIKAN tiedot perustuivat aluehälytyskeskuksen laatimiin onnettomuusselosteisiin. Esimerkiksi Helsingissä on käytössä sähköinen tilatietojärjestelmä, jolloin aluehälytyskeskukseen rekisteröityy automaattisesti aika, jolloin hälytys yksiköille on annettu, ja kun yksikkö poistuu asemalta, se painaa autossa olevasta niin kutsutusta matolaatikosta matkalla-nappia, jolloin lähtöajan tulisi rekisteröityä aluehälytyskeskukseen. Virheitä aiheuttaa kuitenkin se, että signaali ei välttämättä kaikissa tapauksissa saavuta aluehälytyskeskusta, sekä se, jos nappia yksinkertaisesti unohdetaan painaa. Kaikissa pelastuslaitoksissa ei tilatietojärjestelmää ole käytössä ja tällöin lähtöaika tulisi ilmoittaa radiolla aluehälytyskeskukseen. Tilatietojärjestelmän puute suurimmassa osassa Suomen pelastuslaitoksia on luultavasti syynä siihen, että 41,5 % lähtövalmiusaikahavainnoista oli nolliä eli häly-

tyksen vastaanottoaika oli merkitty samaksi kuin yksikön lähtöaika. Havainnoista poistettiin virheelliset eli ne, joiden arvo oli negatiivinen, nolla tai yli 50 minuuttia. Kelvollisia tapauksia jäi siten 6 598 kappaletta vuosina 1994–1997. Lähtövalmiusaikojen jakauminen kelvollisiin ja virheellisiin on kuvassa 36.



Kuva 36. Lähtövalmiusaikojen jakaantuminen kelvollisiin ja virheellisiin koko maassa.

ONTIKASTA lasketut lähtövalmiusajat pyöristettiin lähimpään minuuttiin sekä piirrettiin aikajakaumat minuutin luokissa valtakunnallisesti, lääneittäin ja pääkaupunkiseudulle. Kuvassa 37 on koko maan havainnot jaoteltuina minuutin luokkiin.

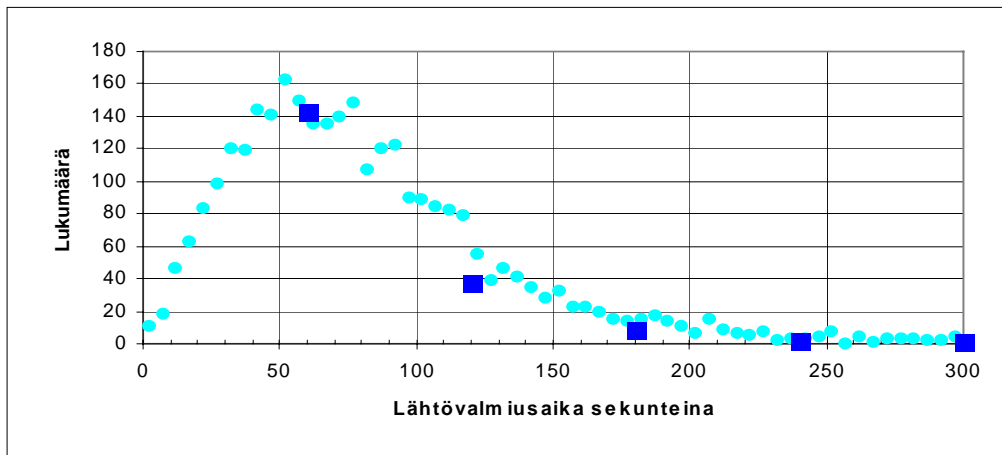


Kuva 37. Palokuntien rakennuspalojen lähtövalmiusaika vuosina 1994–1997 koko maassa.

5.3.3 Lähtövalmiusaika sekunnin luokissa

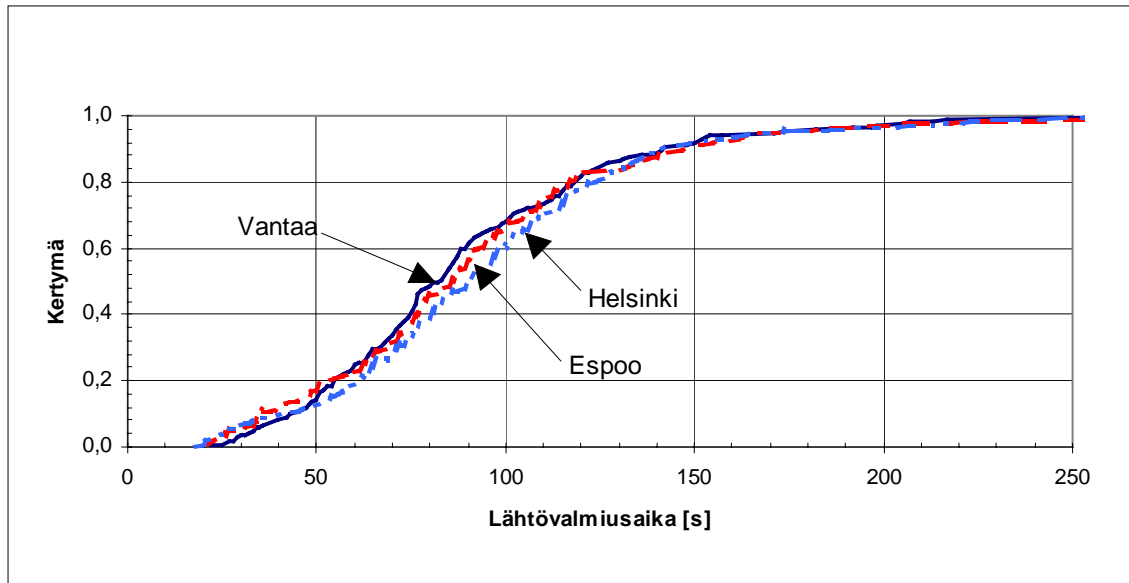
Havaintojoukosta otettiin otos, joka sisälsi havainnot 300 sekuntiin asti. Näitä havaintoja oli virheellisten poistamisen jälkeen 6 769. Alle 30 sekunnin havaintoja, jotka pyöristettäessä lähimpään minuuttiin pyöristyivät nolnaan, oli 321 kappaletta. Koska 56 % ha-

vainnoista oli valmiiksi minuutin tarkkuudella, korvattiin täysien minuuttien havaintojen lukumäärä sen viereisten pisteiden keskiarvolla. Tällöin havaintojen yhteislukumäärä putosi 3 015:sta. Tarkistettiin, kuvasiko otos koko havaintojoukkoa riittäväällä tarkkuudella siten, että kuvassa 38 samaan kuvaan piirrettiin havainnot sekä minuutin että sekunnin tarkkuudella.



Kuva 38. Lähtövalmiusaikahavainnot minuutin sekä sekunnin tarkkuudella viiteen minuuttiin asti.

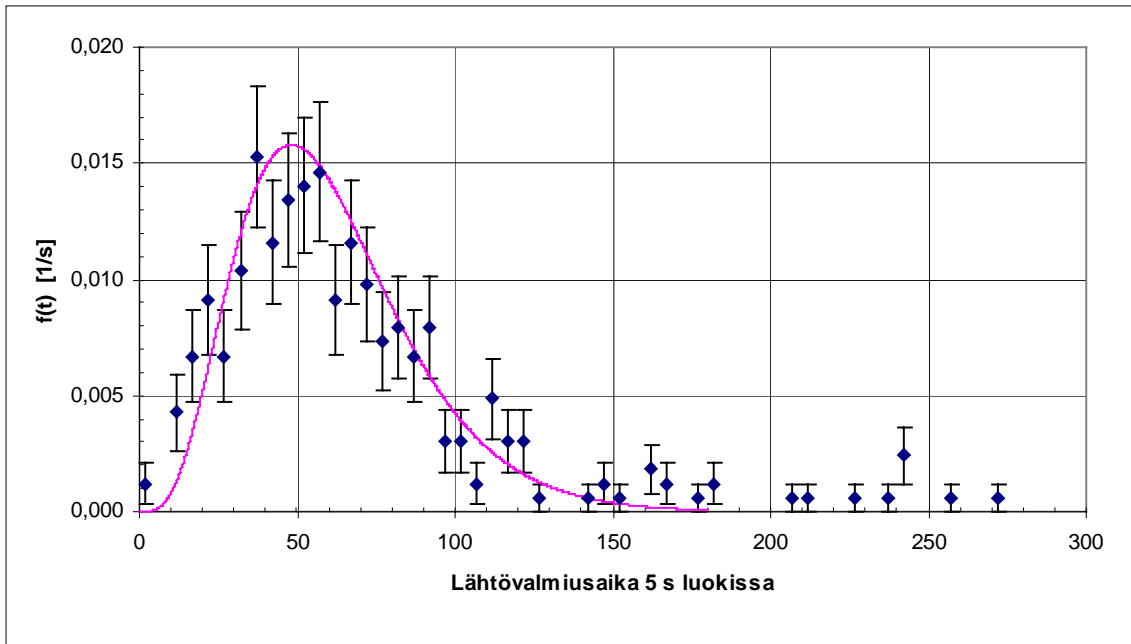
Kuvasta 38 voitiin havaita otoksen edustavan koko havaintojoukkoa riittäväällä tarkkuudella yhden minuutin ylittävällä aika-alueella. Tämän perusteella oletettiin, että sekä minuutin että sekunnin tarkkuudella ilmoitetut lähtövalmiusajat oli poimittu samasta perusjoukosta. Arkikielellä tämä merkitsisi, että kuvassa 38 neliöinä esitetty jakauma olisi samanmuotoinen kuin ympyröillä esitetty, jos edellisessä mittaukset olisikin tehty sekunnin tarkkuudella. Lähtövalmiusaikojen kertymäfunktioit Helsingissä, Vantaalla ja Espoossa on esitetty kuvassa 39.



Kuva 39. Pääkaupunkiseudun palokuntien rakennuspalojen lähtövalmiusaikojen kertymäfunktiot 1994–1997.

5.3.4 Gammajakauman sovitus

Sekunnin ja minuutin tarkkuudella oleviin lähtövalmiusaikahavaintoihin sovitettiin gammajakauman tiheysfunktio (162). Kaikkien läänien osalta tätä ei kuitenkaan voitu tehdä, sillä Pohjois-Karjalan, Keski-Suomen sekä Lapin lääneissä lähes poikkeuksetta kaikki havainnot oli kirjattu vain minuutin tarkkuudella. Sovittamista varten normitettiin lähtövalmiusaikajakauma havaintojen määrästä riippumattomaksi siten, että havaintopisteitä yhdistävän viivan ja x-akselin välisen pinta-alan eli integraalin arvoksi tuli yksi. Lähtövalmiusaikajakaumat minuutin tarkkuudella ja niihin sovitetut gammajakauman tiheysfunktiot on esitetty liitteessä C.



Kuva 40. Gammajakauman tiheysfunktion sovitus Turun ja Porin läänin palokuntien lähtövalmiusaikoihin vuosina 1994–1997.

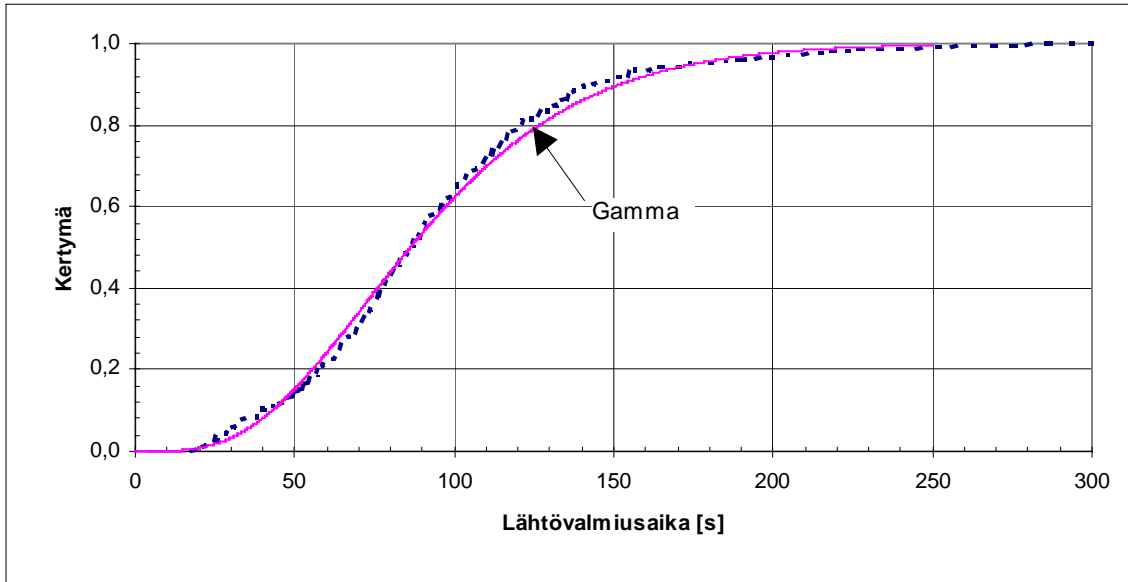
Kuvassa 40 on Turun ja Porin läänin lähtövalmiusaikoihin sovitettu gammajakauman tiheysfunktion, jossa parametrien arvoiksi määritettiin; $\alpha = 4,80$, $\beta = 12,69$ s ja $\Gamma(\alpha) = 17,84$. Gammajakauman sovitus sekunnin tarkkuudella oleviin lähtövalmiusaikahavaintoihin on esitetty liitteessä C.



Kuva 41. Gammajakauman kertymäfunktion sovitettuna Turun ja Porin läänin palokuntien lähtövalmiusaikojen kertymähavaintoihin vuosina 1994–1997.

Kuvassa 41 gammajakauman kertymäfunktion (162a) on sovitettu Turun ja Porin läänin lähtövalmiusaikojen minuutin tarkkuudella oleviin kertymähavaintoihin. Gammajakauman parametrien arvot olivat $\alpha = 4,80$ ja $\beta = 0,21$ min. Kuvassa 42 puolestaan on gamma-

jakauman kertymäfunktio sovitettuna pääkaupunkiseudun sekunnin tarkkuudella oleviin lähtövalmiusaikahavaintoihin. Gammajakauman parametrien arvoiksi pääkaupunkiseudulle saatiin $\alpha = 4,46$ ja $\beta = 20,88$ s.



Kuva 42. Gammajakauman kertymäfunktio sovitettuna pääkaupunkiseudun palokuntien lähtövalmiusaikan kertymähavaintoihin 1994–1997.

5.3.5 Ajoneuvojen määritelmiä

Sisäasiainministeriön ohjeessa esitetään seuraavat määritelmät (Sisäasiainministeriö 1993):

Pelastusyksikkö on työryhmä, jonka muodostavat johtaja ja viisi miestä. Pelastusyksiköllä on yleensä yksi sammutusauto ja sellainen muu kalusto, että se kykenee suorittamaan sammutus-, pelastus- ja lääkintätehtäviä.

Pelastusauto on erityisesti rakennettu, kokonaismassaltaan yli 3,5 tonnia oleva auto, palokunnan omistuksessa oleva miehistöauto, jossa kuljettajan lisäksi on tilaa vähintään kahdeksalle henkilölle, sekä muu auto, joka on kunnan tai valtion pelastushallinnon viranomaisen, valtion pelastushallinnon oppilaitoksen tai ilmailulaitoksen hallinnassa ja jota käytetään yksinomaan palo- ja pelastustoimen tehtäviin.

Sammutusauto on kiinteällä pumpulla, vesisäiliöllä, miehistötilalla (1+5:lle) sekä sammutus-, pelastus- ja lääkintätöihin soveltuvalla kalustolla varustettu pelastusauto.

Raivausauto on pelastuskalustolla, miehistötilalla ja alkusammutusvälineillä varustettu pelastusauto.

Säiliöauto on kiinteällä vähintään 5 000 litran säiliöllä ja pumpulla varustettu vedenkuljetukseen tarkoitettu pelastusauto.

Tikasauto on konetikkailla varustettu pelastusauto.

Nostolava-auto on nostovarrella ja -korilla varustettu pelastusauto.

Puomitikasauto on nostovarrella ja siihen liitetyillä tikkailla varustettu pelastusauto.

Letkuauto on lähinnä paloletkujen kuljettamiseen ja selvittämiseen tarkoitettu pelastusauto.

Vaahtoauto on kiinteällä vaahtonestesäiliöllä ja pumpulla varustettu pelastusauto.

Jauheauto on kiinteällä jauhesäiliöllä varustettu pelastusauto.

Vahingontorjunta-auto on öljyvahinkojen sekä vesi- ja muiden seurausvahinkojen torjuntaan tarkoitettu pelastusauto.

Johtoauto on johtamistoimintaan tarvittavalla viesti-, tiedustelu- ym. välineillä varustettu pelastusauto.

Tässä työssä on käytetty kaikissa yhteyksissä termiä yksikkö. Esimerkiksi pelastusyksiköllä tarkoitetaan sammutusautoa miehistöineen. Käsitteet vaihtelevat jonkin verran eri puolilla Suomea, mutta tässä on pyritty käyttämään yhtenäisiä nimityksiä yksiköistä.

5.3.6 Ajoneuvojen lähtövalmiusajat

Lähtövalmiusaikoja tarkasteltiin yksikköryhmittäin koko maassa sekä Helsingissä vuonna 1996. Kyseisenä vuonna ONTIKAan kirjautuneita rakennuspaloja oli Helsingissä 249 kappaletta, joihin osallistui yhteensä 1 460 palo- ja pelastustoimen operatiivista yksikköä. Operatiivisten yksiköiden tunnusmerkinnät koostuvat kolmesta osasta, jossa tunnuksen kirjain osoittaa toimintakunnan, ensimmäinen numero palo- tai pelastusaseman numeron (kunnissa, joissa asemia on useampia) sekä viimeinen numero yksikön operatiivisen tehtävän. Tällöin esimerkiksi yksikkö, jonka tunnus on H13, on Helsingin pääpelastusaseman (asema 1) säiliö- ja vaahtoyksikkö. Käytetty jaottelu on esitetty taulukossa 22.

Taulukko 22. Operatiivisten yksiköiden tunnusmerkintöihin perustuva yksiköiden ryhmittely Helsingissä.

Yksikön tunnuksen viimeinen numero	Yksikön operatiivinen tehtävä
1	Pelastusyksikkö
3	Säiliöyksikkö
5	Pioneeriyksikkö (Raivausyksikkö)
6,61	Nostolava- / Konetikasyksikkö
7,77	Letkuyksikkö
P1,P2,P02,P002,P3,P4	Johtoyksikkö

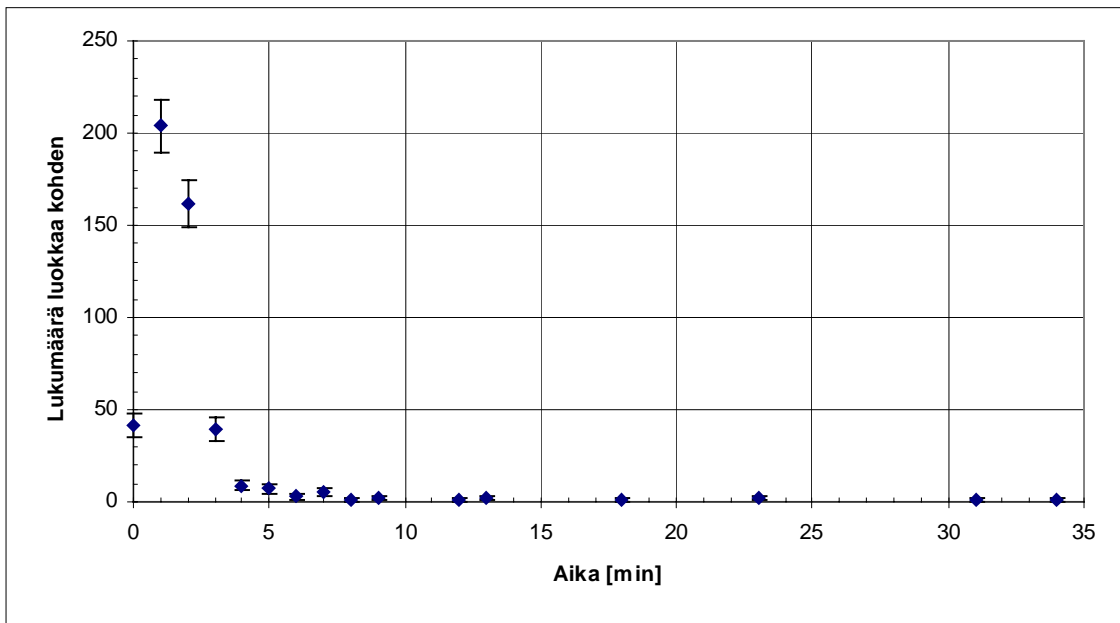
Helsingin lähtövalmiusajoista kelvollisia oli 1 416 kappaletta eli 97 % kaikista havainnoista. Kelvottomiksi katsottiin negatiiviset ja 50 minuuttia ylittävät havainnot. Havaintojen jakaantuminen eri yksikköryhmittäin taulukossa 23.

Taulukko 23. Lähtövalmiusaikahavaintojen jakaantuminen yksikön operatiivisen tehtävän mukaisesti Helsingissä vuonna 1996.

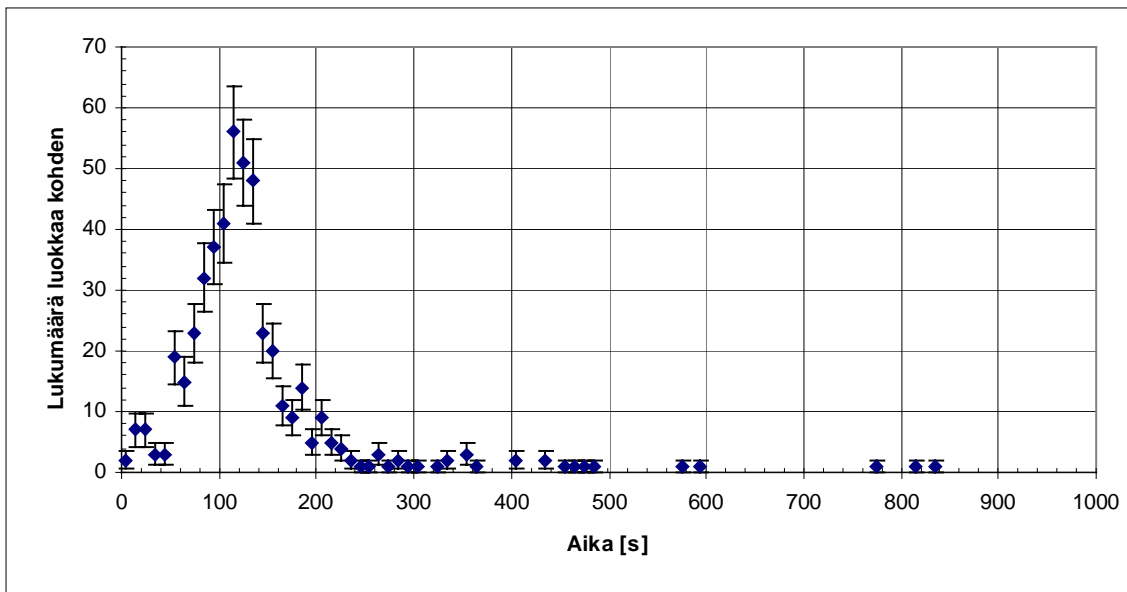
	Yksikön operatiivinen tehtävä	Havaintojen lukumäärä
1	Pelastusyksikkö	481
2	Säiliöyksikkö	213
3	Pioneeriyksikkö (Raivausyksikkö)	219
4	Nostolava- / Konetikasyksikkö	197
5	Johtoyksikkö	232
6	Letkuyksikkö	35
7	Vahingontorjuntayksikkö	7
8	Jauheyksikkö	7
9	Sammutus- ja öljyntorjuntavene	1
10	Sopimuspalokunnan tai pelastuskoulun yksikkö	24
	Yhteensä	1416

Näistä tarkasteltiin kuitenkin vain viittä ensimmäistä yksikköryhmää, joille kullekin piirrettiin lähtövalmiusaikajakaumat minuutin sekä 10 tai 30 sekunnin luokissa. Pelastusyksiköiden lähtövalmiusaikajakaumat Helsingissä vuonna 1996 ovat kuvissa 43

ja 44. Helsingin eri yksiköiden lähtövalmiusajan jakaumat ja kertymät on esitetty liitteessä E.



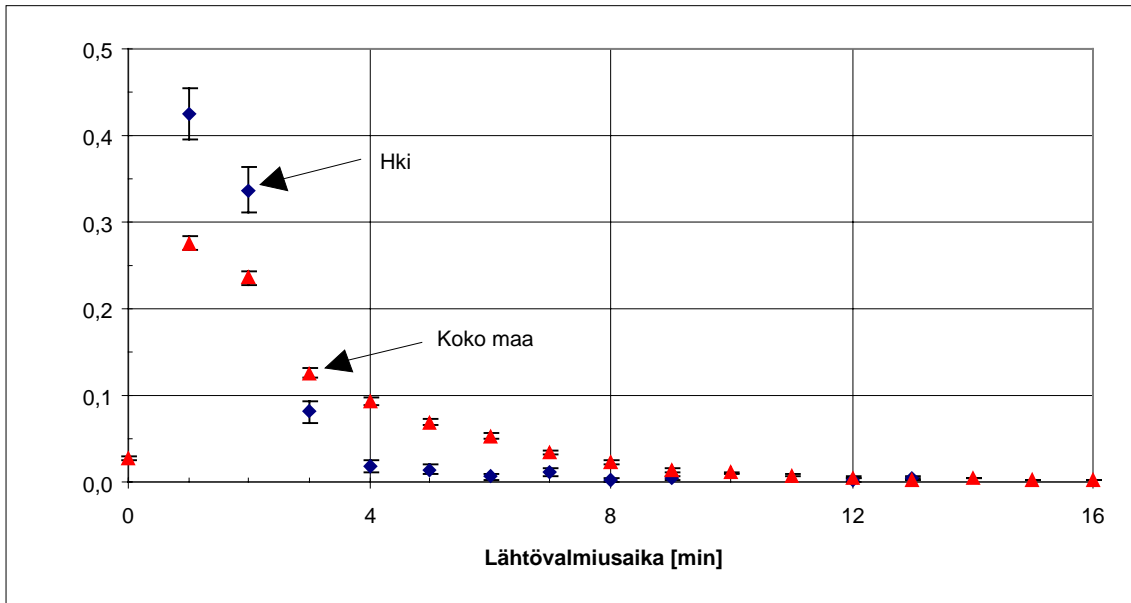
Kuva 43. Pelastusyksiköiden lähtövalmiusaika minuutin luokissa Helsingissä vuonna 1996.



Kuva 44. Pelastusyksiköiden lähtövalmiusaika jaoteltuna 10 sekunnin luokkiin Helsingissä vuonna 1996.

Samalla tavoin tarkasteltiin koko maan lähtövalmiusaikahavaintoja. 14 005 havainnosta kelpollisia oli 12 907 kappaletta eli 92 %. Havainnot pyöristettiin lähimpään minuuttiin ja jaoteltiin yksikköryhmille operatiivisen tunnuksen avulla, olettaen koko maassa noudatettavan yhtenäistä tunnuksien käyttöä. Tällöin pelastusyksiköiden havaintoja saatiin 4 577 kappaletta. Pelastusyksiköiden lähtövalmiusaikajakaumat normitettuna havaintojen

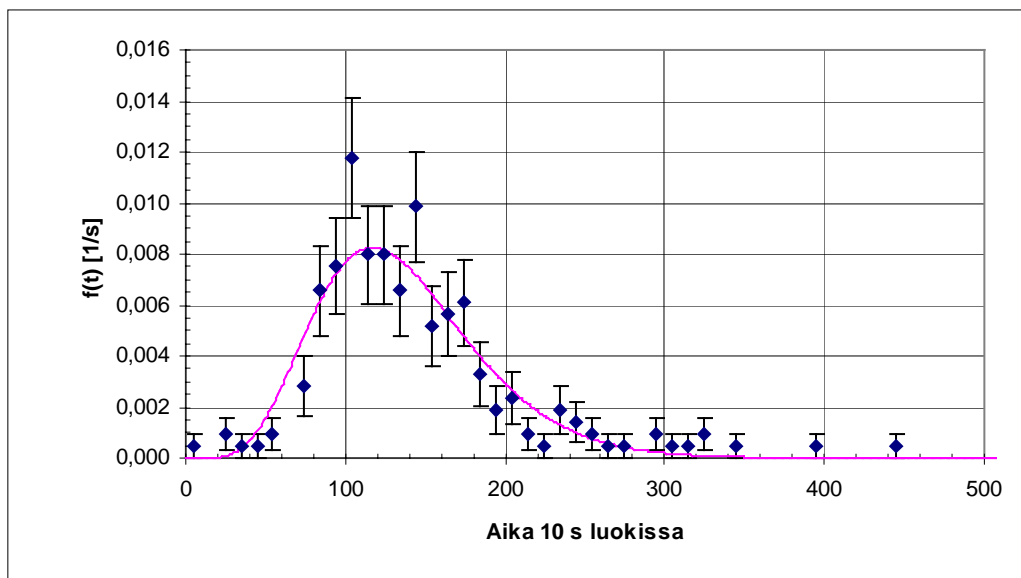
määrästä riippumattomiksi koko maassa sekä Helsingissä ovat kuvassa 45. Koko maan pelastusyksiköiden lähtövalmiusajan jakauma ja kertymä on esitetty liitteessä F.



Kuva 45. Palokuntien pelastusyksiköiden lähtövalmiusaikajakaumat vuonna 1996 Helsingissä ja koko maassa.

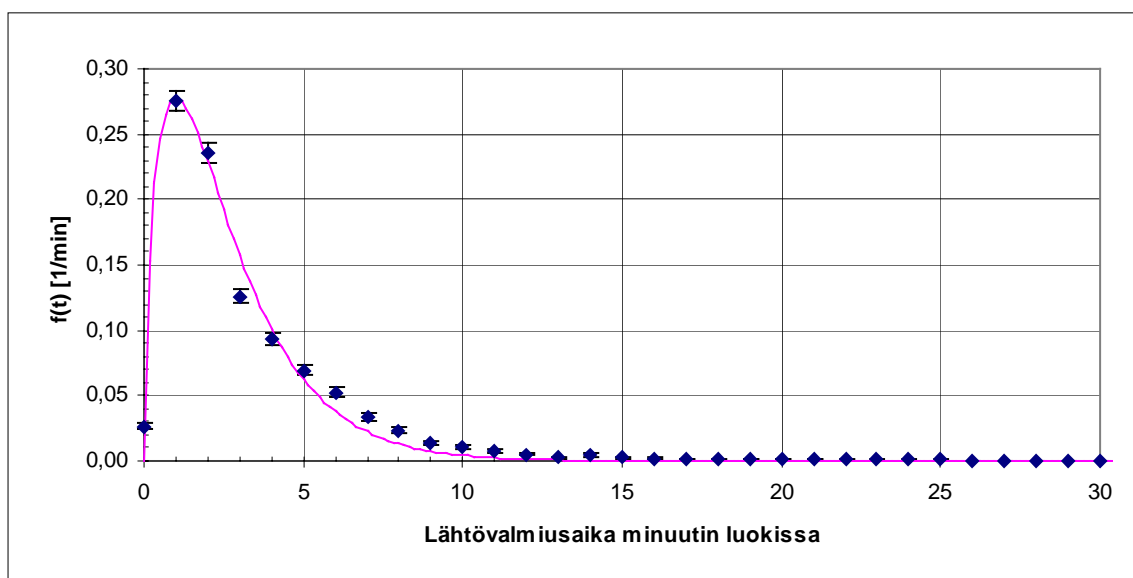
5.3.7 Gammajakauman sovitus

Lähtövalmiusaikahavaintoihin sovitettiin gammajakauman tiheysfunktio STATISTICA-ohjelman avulla. Ohjelma laski havainnoista sellaisen gammajakauman tiheysfunktion parametrien arvot, joka parhaiten kuvasi havaintoja. Säiliöyksiköiden lähtövalmiusaikajakauman tapauksessa parametrien arvoiksi saatiin $\alpha = 7,00$ ja $\beta = 19,49$ s. Gammajakauman tiheysfunktio on sovitettu havaintoihin kuvassa 46.

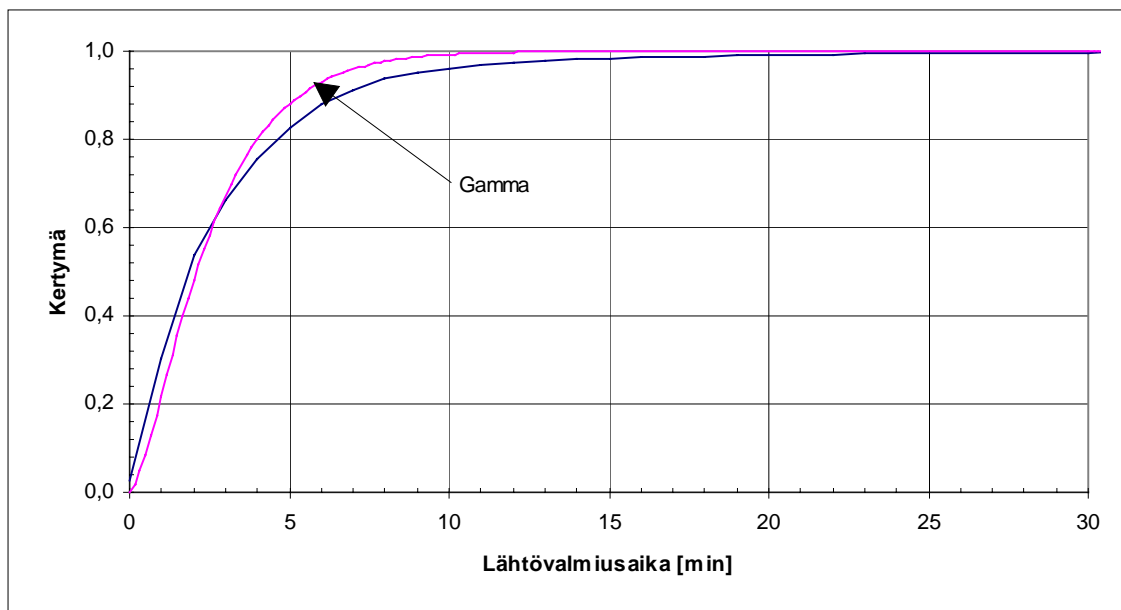


Kuva 46. Gammajakauman tiheysfunktion sovitus palokunnan säiliöyksiköiden lähtövalmiusaikoihin vuonna 1996 Helsingissä.

Koko maan pelastusyksiköiden minuutin tarkkuudella oleviin lähtövalmiusaikahavaintoihin sovitettiin gammajakauma, jonka parametrien arvot saatiin käyttämällä alkuperäisen jakauman huippuarvo-menetelmää. Tällä menetelmällä saatiin koko maan pelastusyksiköiden lähtövalmiusaikajakaumaan sovitetun gammajakauman tiheysfunktion parametrien arvoiksi $\alpha = 1,62$ ja $\beta = 1,61$ min. Sovitus havaintoihin on kuvassa 47. Kuvassa 48 on pelastusyksiköiden kertymään sovitettu gammajakauman kertymäfunktio samoilla parametrien arvoilla.



Kuva 47. Gammajakauman tiheysfunktion sovitus koko maan palokuntien pelastusyksiköiden lähtövalmiusaikahavaintoihin vuonna 1996.



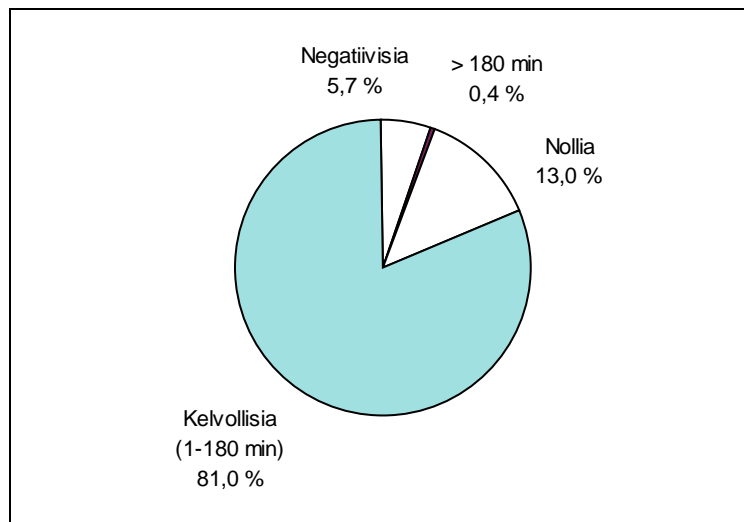
Kuva 48. Gammajakauman kertymäfunktion sovitus koko maan palokuntien pelastusyksiköiden lähtövalmiusaajan kertymähavaintoihin vuonna 1996.

Lähtövalmiusaikoihin aiheuttaa epätarkkuutta tilatietojärjestelmän puute suurimmassa osassa maata. Tällöin lähtövalmiusaika kirjautuu ONTIKAan vain minuutin tarkkuudella. Esimerkiksi Pohjois-Karjalan, Keski-Suomen ja Lapin lääneissä lähes poikkeuksetta kaikki havainnot oli kirjattu minuutin tarkkuudella. Tilatietojärjestelmän puute suurimmassa osassa Suomen pelastuslaitoksia on luultavasti synnyttänyt myös siihen, että 41,5 % havainnoista oli nollia eli hälytyksen vastaanottoaika oli merkitty samaksi kuin yksikön lähtöaika. Läänien välisten erojen tarkastelua haittasi lähtövalmiusaajan kirjaamisen tarkkuuserot. Pääkaupunkiseudun kuntien erot eivät kasvaneet merkittävän suuriksi. Voidaan todeta, että gammajakauma soveltui karkeasti ottaen kuvaamaan lähtövalmiusaajan jakautumista.

5.4 Toimintavalmiusaika

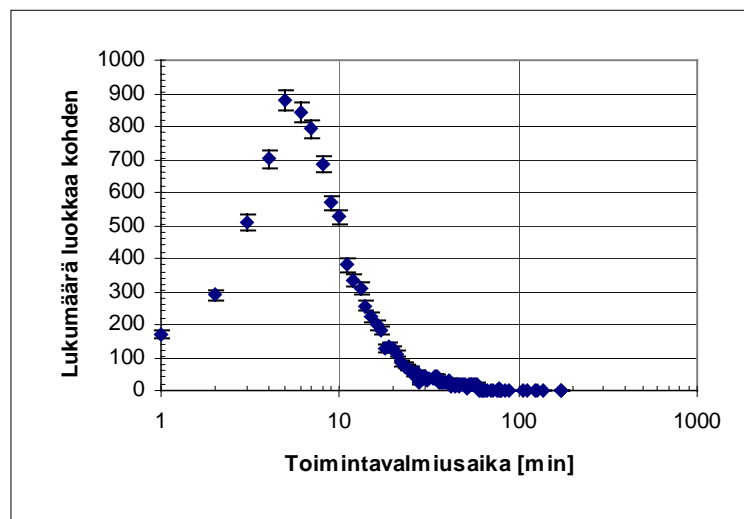
Toimintavalmiusaika määritellään hätäilmoituksen ja palokunnan toimintakykyisen yksikön perille tulon väliseksi ajaksi (Sisäasiainministeriö 1993). Toimintavalmiusaika saatiin suoraan ONTIKASTA, nopeimman yksikön saapumisajasta onnettomuuspaikalle. Kun aluehälytyskeskukseen tulee hälytyssoitto, sen tuloaika rekisteröityy ja on näkyvässä myös hälytysselesteessä. Saatuaan riittävästi tietoa onnettomuudesta aluehälytyskeskus hälyttää yksiköitä paikalle. Autossa olevasta matolaatikosta painetaan perillä-nappia silloin, kun yksikkö saavuttaa onnettomuuskohteen. Virheitä saapumisaikaan voi syntyä napin painalluksen unohtumisesta tai siitä, ettei signaali saavuta aluehälytyskeskusta. Tilatietojärjestelmän puuttuessa ilmoitetaan perille saapumisesta radiolla. Todellinen toimintavalmiusaika on kuitenkin tässä esitettyä jonkin verran suurempi, sillä varsinaisiin sammutustöihin ei päästä välittömästi kohteeseen saavuttua. Havainnoista

poistettiin negatiiviset, nollat sekä suuremmat kuin 180 minuuttia, jolloin jäljelle jäi 9 480 tapausta. Kuvassa 49 on havaintojen jakaantuminen kelvollisiin ja kelvottomiin.



Kuva 49. Palokuntien toimintavalmiusaikojen jakaantuminen kelvollisiin ja kelvottomiin koko maassa vuosina 1994–1997.

Toimintavalmiusajat pyöristettiin lähimpään minuuttiin ja lukumäärät luokkaa kohden piirrettiin ajan funktiona valtakunnallisesti, lääneittäin sekä pääkaupunkiseudulle. Koko maan toimintavalmiusaikahavainnot ovat kuvassa 50.



Kuva 50. Palokuntien toimintavalmiusaikajakauma koko maassa vuosina 1994–1997. Huomaa logaritminen aika-asteikko.

5.4.1 Riskialueet

Sisäasianministeriön pelastusosaston ohjeen mukaan kunta jaetaan riskialueisiin seuraavasti (Sisäasiainministeriö, 1993):

IV riskialueeseen kuuluvat asumattomat alueet sekä alueet, joilla on yksittäisiä asumuksia harvassa.

III riskialueeseen kuuluvat sellaiset asutut alueet, joilla on yksittäisiä asumuksia laajempia kylätaajamia tai asutuskokonaisuuksia sekä vilkkaasti liikennöidyt väylät.

II riskialueeseen kuuluvat alueet, joilla suuren määrän ihmishenkiä vaarantavat tai suuria omaisuus-, ympäristö- tai kulttuuriarvoja uhkaavat onnettomuudet ovat mahdollisia. Tällaisia ovat erityisesti alueet, joilla on

- tiheä rakennuskanta, jossa tulipalon leviäminen rakennuksista toisiin on mahdollista,
- hoito-, huolto-, rangaistus-, majoitus-, oppi- tai vastaavia laitoksia tai suuria kokoontumishuoneistoja, joissa tapahtuva tulipalo tai muu onnettomuus aiheuttaa erityistä vaaraa useille ihmisille,
- teollisuus-, liike- tai vastaavia laitoksia, suurvarastoja, suuria määriä vaarallisten aineiden kuljetuksia taikka muita kohteita, joissa tapahtuva onnettomuus aiheuttaa vaaraa useille ihmisille tai merkittävälle omaisuus- tai ympäristöarvoille,
- suuri liikennetiheys, joissa onnettomuusriski on suuri, sekä matkustajaliikennettä, jossa tapahtuva onnettomuus aiheuttaa vaaraa useille ihmisille,
- kulttuurihistoriallisesti merkittäviä kohteita, joihin liittyy tulipalon tai muun onnettomuuden riski.

I riskialueeseen kuuluvat tiheään rakennetut suuria, monikerroksisia rakennuksia sisältävät laajat ja tiheään liikennöidyt kaupunkikeskukset, joissa onnettomuustodennäköisyys on suuri ja joilla erityisen suuren määrän ihmishenkiä vaarantavat taikka erityisen suuria omaisuus-, ympäristö-, tai kulttuuriarvoja uhkaavat onnettomuudet ovat mahdollisia. Tähän riskialueeseen kuuluvat suurehkojen kaupunkien keskustaaajat.

Kullekin riskialueelle on annettu suositukset toimintavalmiusajalle eli ajalle, jonka kuluessa pelastustoiminnan tulisi käynnistyä hälytyksestä.

Toimintavalmiusaikasuositukset riskialueittain:

I riskialueella pelastustoiminnan tulisi käynnistyä kuuden minuutin kuluessa hälytyksestä. Tavoitteena on, että peruslähtö saadaan kokonaisuudessaan onnettomuuspaikalle 20 minuutin kuluessa hälytyksestä.

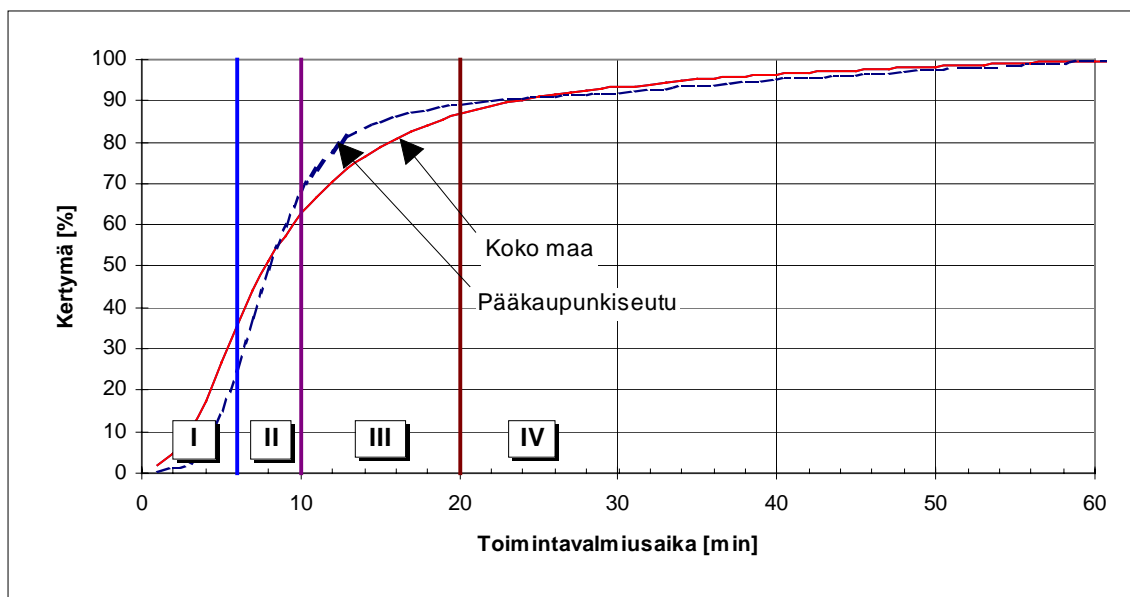
II riskialueella pelastustoiminnan tulisi käynnistyä onnettomuuspaikalla kymmenen minuutin kuluessa hälytyksestä. Tavoitteena on, että peruslähtö saadaan kokonaisuudessaan onnettomuuspaikalle 20 minuutin kuluessa hälytyksestä.

III riskialueella pelastustoiminnan tulisi käynnistyä onnettomuuspaikalla 20 minuutin kuluessa hälytyksestä. Tavoitteena on, että peruslähtö saadaan kokonaisuudessaan onnettomuuspaikalle 30 minuutin kuluessa hälytyksestä.

IV riskialueella toimintavalmiusaika voi olla pitempi kuin I–III riskialueilla. Erityistapauksissa otetaan huomioon tarvittavat lisäjärjestelyt esimerkiksi metsäpalon sattuessa.

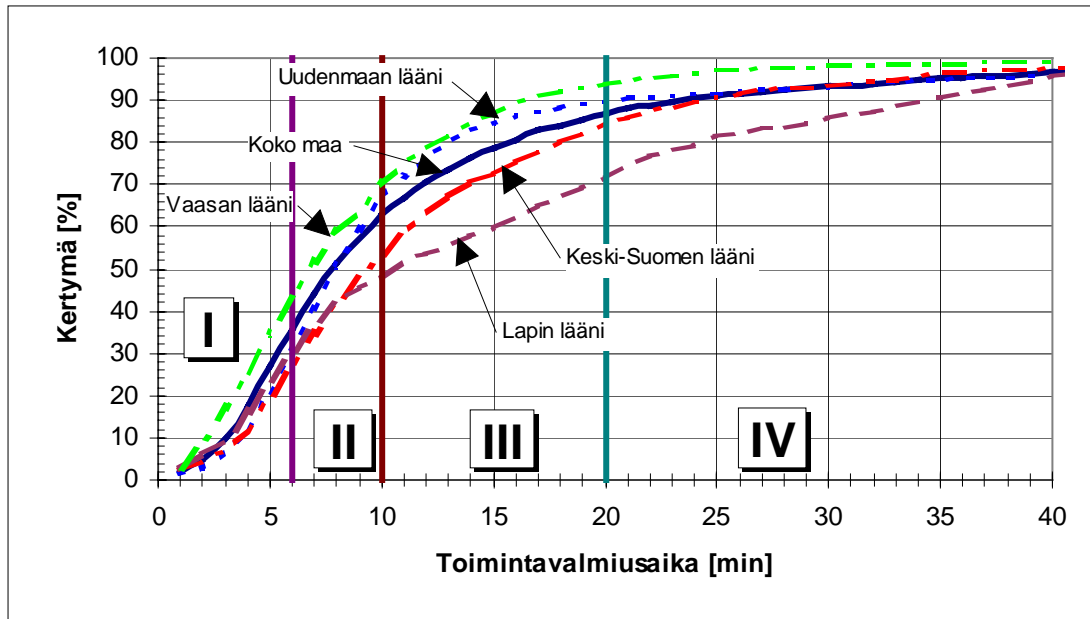
5.4.2 Kertymäfunktiot

Havainnoista piirrettiin kertymäfunktiot, joista on nähtävissä havaintojen prosentuaalinen kertyminen kullakin toimintavalmiusajan arvolla. Nolla-havainnot poistettiin, jolloin ensimmäinen havaintopiste on yhden minuutin kohdalla. Kuvassa 51 on esitetty toimintavalmiusaikojen prosentuaalinen kertyminen koko maassa sekä pääkaupunkiseudulla. Kertymäfunktiot lääneittäin ja pääkaupunkiseudulle on esitetty liitteessä D.



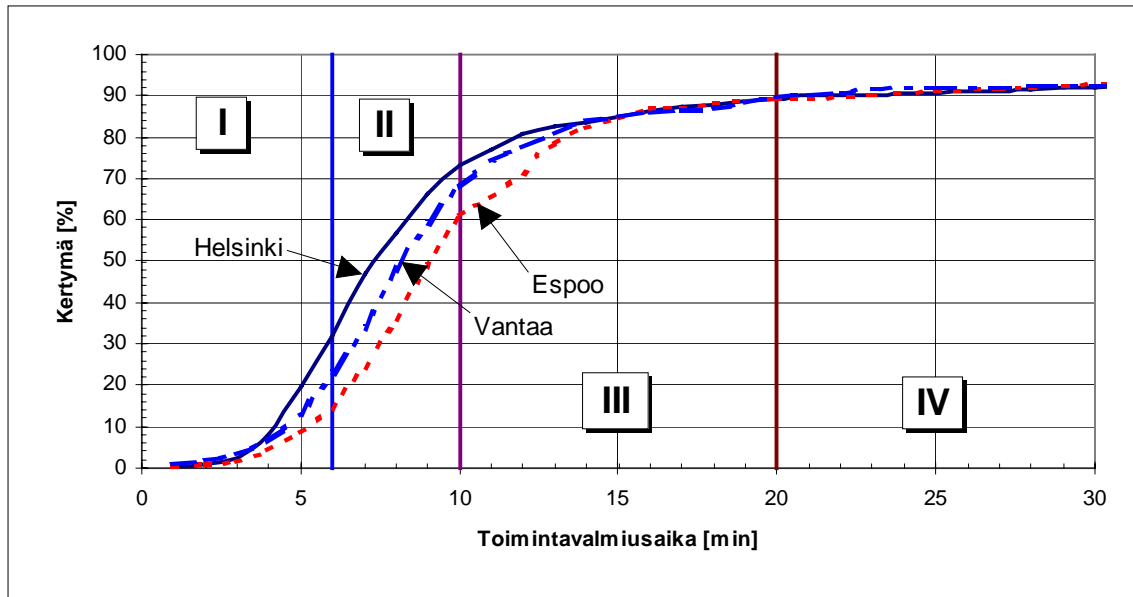
Kuva 51. Palokuntien toimintavalmiusaikojen prosentuaalinen kertyminen koko maassa ja pääkaupunkiseudulla vuosina 1994–1997.

Kuvaan 51 on piirretty näkyviin eri riskialueiden toimintavalmiusaikojen suositusrajat. Kuvassa 52 on muutamia ääriesimerkkejä toimintavalmiusaikojen kertymäfunktioista maassamme.



Kuva 52. Palokuntien toimintavalmiusajan prosentuaalinen kertyminen vuosina 1994–1997 eri alueilla.

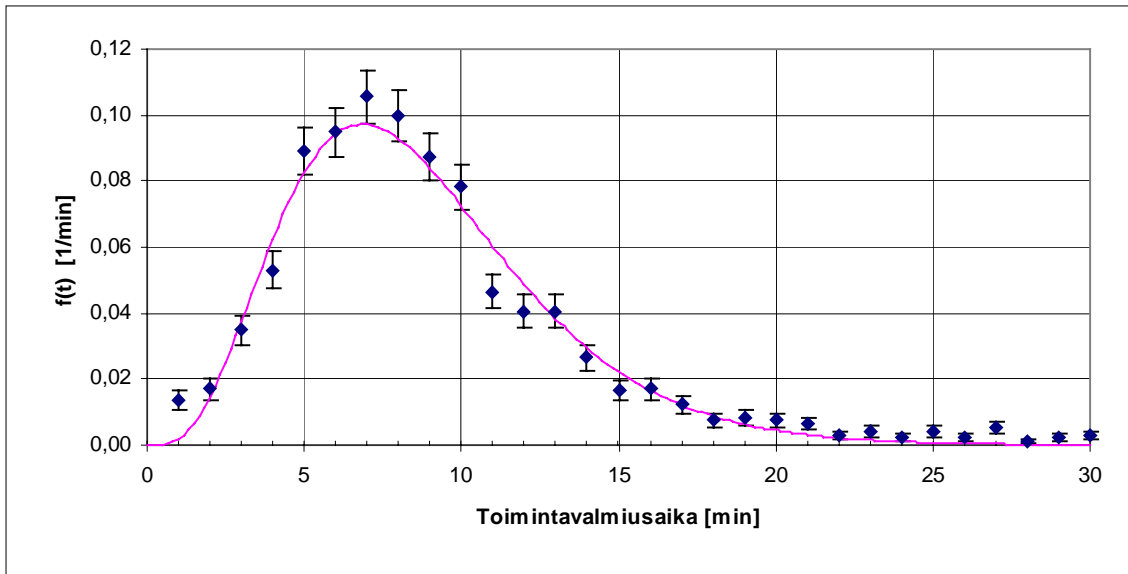
Kuvassa 53 on esitetty pääkaupunkiseudun kuntien toimintavalmiusajan kertymäkuvaajat. Kuvista 51–53 näkyy selkeästi, että eri paikkakunnilla riskialueiden suositusrajat johtavat melko lailla erilaiseen operatiivisen toiminnan kokonaiskuvaan. Koko maassa 35 % kohteista saavutetaan I riskialueen toimintavalmiusajan suositusaikana. Vaasan läänissä luku on 43 %, Keski-Suomen läänissä 25 % ja pääkaupunkiseudulla vain 23 %. Ei ole kovin hyvin perusteltua, että pääkaupunkiseudulla olisi vähiten riskikohteita. Tulos osoittaa, että sisäasiainministeriön (1993) riskialueiden suositusrajat perustuvat enemmän toiveisiin kuin todellisuuteen. Kohdassa 5.4.1 esitetyt alueiden kriteerit ja toimintavalmiusajalle esitettävät tavoiteajat Suomessa vaatisivat tarkemman mallittamisen riskien sijainnista, mikä on henkilömäärinä ja kerrosalana jo paikkatietojärjestelmissä helposti käytettävissä. Lisäksi tarvittaisiin operaatioanalyttinen tarkastelu, ovatko olemassa olevat resurssit sijoitettu oikein, jotta niillä saataisiin koko valtakunnan tasolla optimaalinen palvelutaso. ONTIKAN tilastojen tarjoaman havaintoaineiston sekä tässä työssä esitettyjen mallien pohjalta tällaista optimointia voidaan jo yrittää melko realistiselta pohjalta.



Kuva 53. Pääkaupunkiseudun kuntien palokuntien toimintavalmiusajan prosentuaalinen kertyminen 1994–1997.

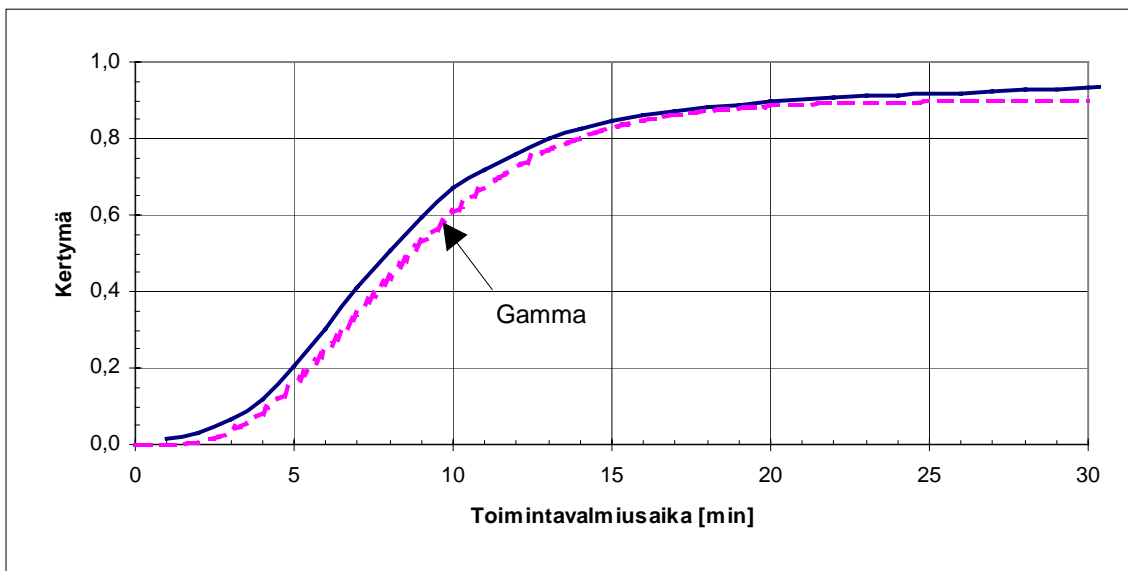
5.4.3 Gammajakauman sovitus

Gammajakauman tiheysfunktiota sovitettaessa STATISTICA-ohjelmalla huomioitiin havainnot vain 20 minuuttiin asti, jotta sovitus olisi mahdollisimman hyvä alkupään havaintojen osalta. Koska parametrien arvot oli määritetty ottamalla huomioon vain osa havainnoista, oli gammajakauman tiheysfunktio kerrottava suhdeluvulla, jolloin se laski alaspäin. Suhdeluku määritettiin jakamalla koko havaintojoukon tietyn pisteen y-arvo saman pisteen arvolla tapauksessa, jossa havaintoja oli vain 20 minuuttiin asti. Koska x-akselin ja käyrien väliset pinta-alat oli normitettu ykköseksi, käyrät eivät ilman suhdeluvulla kertomista vastanneet toisiaan. Kuvassa 54 on gammajakauman tiheysfunktio sovitettu Uudenmaan läänin toimintavalmiusaikahavaintoihin. Gammajakauman tiheysfunktion sovitukset lääneittäin ja pääkaupunkiseudun kunnille ovat nähtävissä liitteessä D.

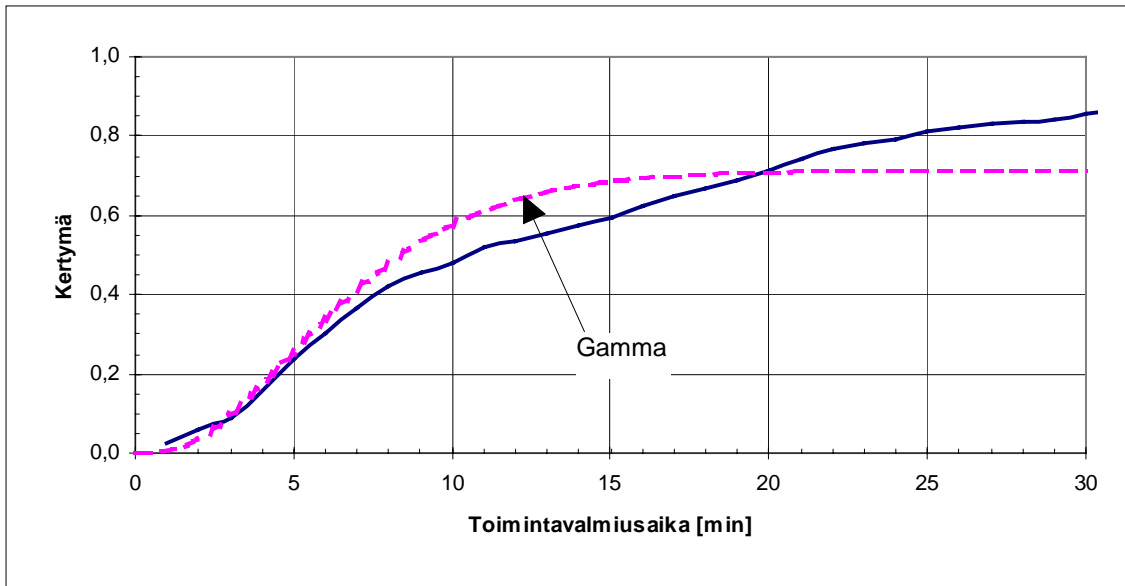


Kuva 54. Gammajakauman tiheysfunktio sovitettuna Uudenmaan läänin palokuntien vuosien 1994–1997 toimintavalmiusaikahavaintoihin.

Tiheysfunktion parametrien arvoiksi määritettiin $\alpha = 4,63$, $\beta = 1,87$ min, $\Gamma(\alpha) = 14,05$ ja suhdeluvuksi 0,90. Lisäksi normitettujen havaintojen kertymäfunktion kanssa samaan kuvaan piirrettiin gammajakauman kertymäfunktiot lääneittäin sekä pääkaupunkiseudun kunnille. Kuvassa 55 on sovitettu gammajakauman kertymäfunktio Uudenmaan läänin sekä kuvassa 56 Lapin läänin toimintavalmiusajan kertymähavaintoihin.



Kuva 55. Palokuntien toimintavalmiusajan kertymäfunktio Uudenmaan läänissä vuosina 1994–1997 sekä gammajakauman kertymäfunktio.



Kuva 56. Palokuntien toimintavalmiusajan kertymäfunktio Lapin läänissä vuosina 1994–1997 sekä gammajakauman kertymäfunktio.

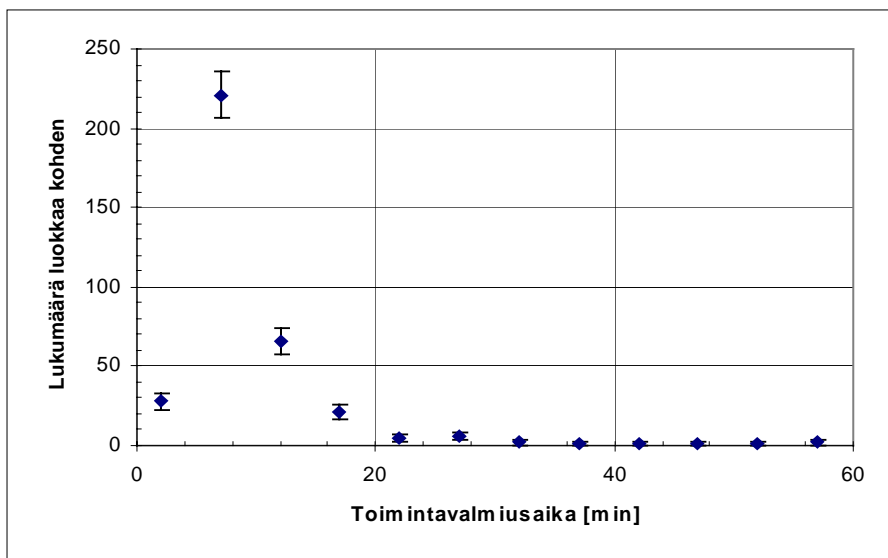
5.4.4 Ajoneuvojen toimintavalmiusajat

Helsingissä vuonna 1996 kelpollisia toimintavalmiusaikoja oli 1 460 havainnosta 1 107 kappaletta eli 76 %. Kelpollisiksi katsottiin havainnot, jotka olivat suurempia kuin nolla ja pienempiä kuin 180 minuuttia. Havainnot jakautuivat eri yksikköryhmille taulukon 24 mukaisesti.

Taulukko 24. Toimintavalmiusaikahavaintojen jakaantuminen yksikön operatiivisen tehtävän mukaisesti Helsingissä vuonna 1996.

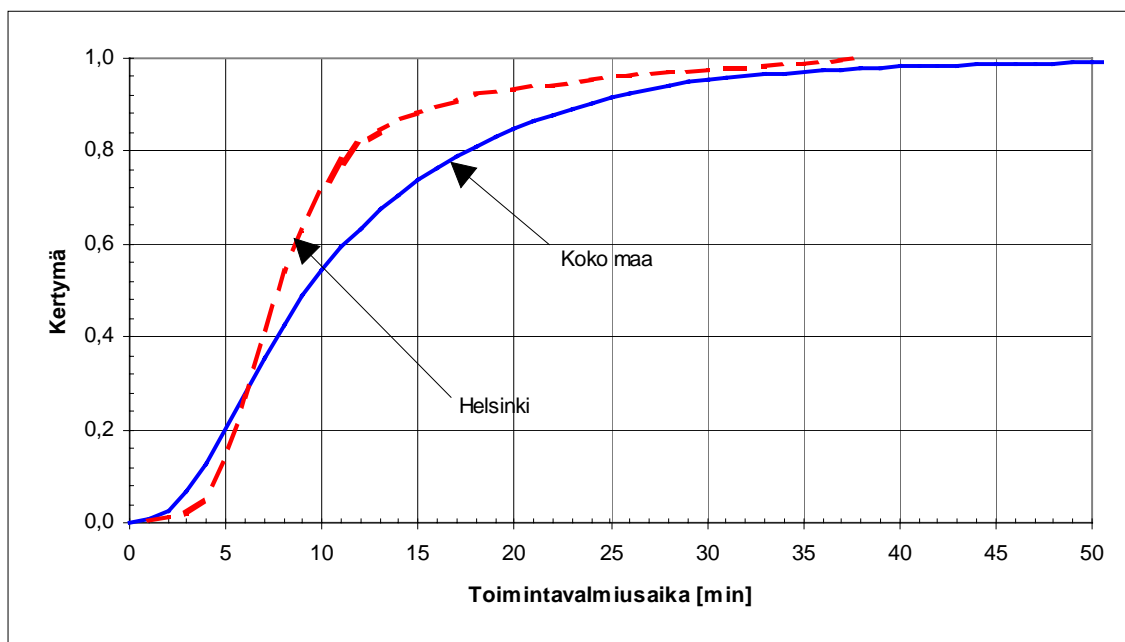
	Yksikön operatiivinen tehtävä	Havaintojen lukumäärä
1	Pelastusyksikkö	360
2	Säiliöyksikkö	169
3	Pioneeriyksikkö (Raivausyksikkö)	164
4	Nostolava- / Konetikasyksikkö	149
5	Johtoyksikkö	211
6	Letkuyksikkö	21
7	Vahingontorjuntayksikkö	6
8	Jauheyksikkö	6
9	Sammutus- ja öljyntorjuntavene	1
10	Sopimuspalokunnan tai pelastuskoulun yksikkö	20
	Yhteensä	1107

Näistä tarkasteltiin viittä ensimmäistä ryhmää, joiden osalta toimintavalmiusajat pyöristettiin lähimpään kokonaiseen minuuttiin, jonka jälkeen havainnot jaettiin viiden minuutin luokkiin ja piirrettiin aikajakaumat kullekin yksikköryhmälle. Kuvassa 57 on pelastusyksiköiden toimintavalmiusaikajakauma Helsingissä vuonna 1996. Toimintavalmiusajan jakaumat ja kertymät Helsingin yksiköille on esitetty liitteessä E ja koko maan pelastusyksiköille liitteessä F.



Kuva 57. Pelastusyksiköiden toimintavalmiusaika viiden minuutin luokissa Helsingissä vuonna 1996.

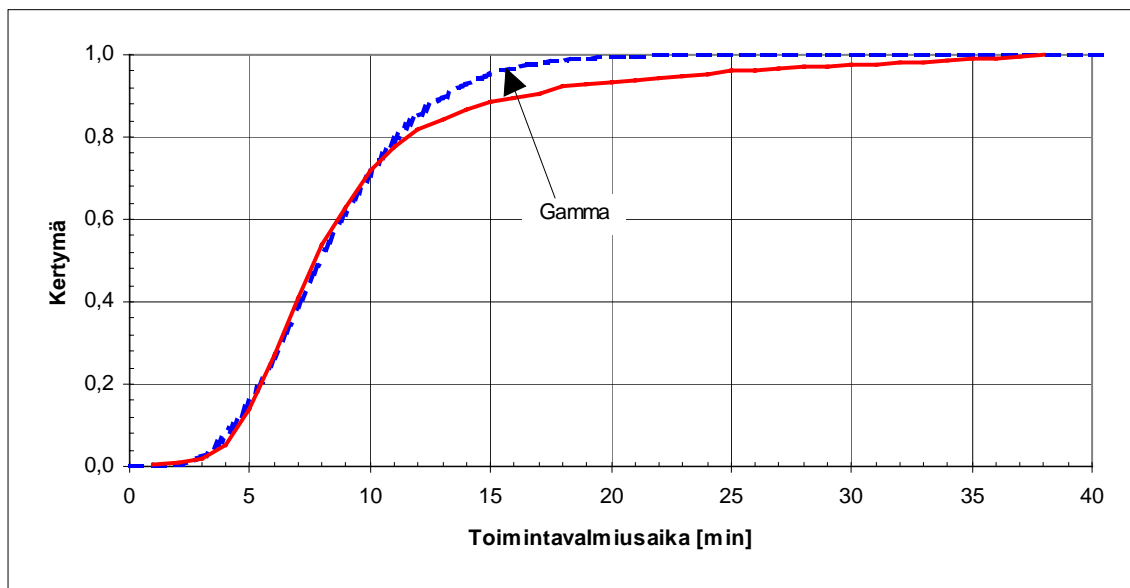
Koko maassa kelpollisia toimintavalmiusaikahavaintoja vuodelta 1996 oli 11 740 kappaletta eli 84 % kaikista havainnoista. Näistä pelastusyksiköihin liittyviä havaintoja oli 4 157 kappaletta. Nämä pyöristettiin lähimpään minuuttiin, ja koko maalle piirrettiin toimintavalmiusaikajakauma. Koko maan ja Helsingin pelastusyksiköiden toimintavalmiusaikojen kertymäfunktioiden kuvaajat on esitetty kuvassa 58.



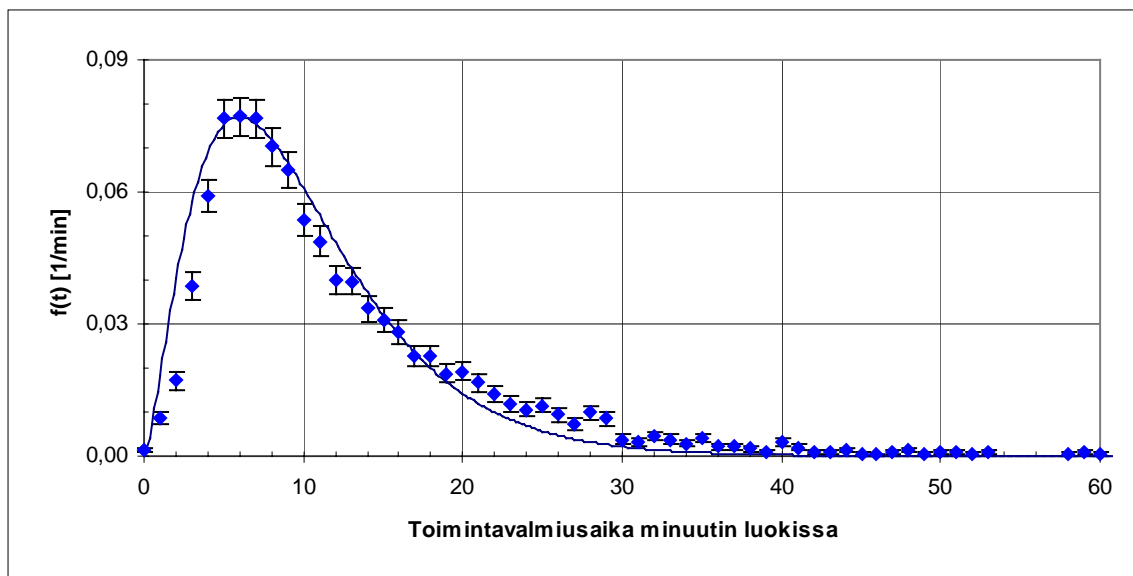
Kuva 58. Palokuntien pelastusyksiköiden toimintavalmiusajan kertyminen Helsingissä ja koko maassa vuonna 1996.

5.4.5 Gammajakauman sovitus

Toimintavalmiusaikajakauman huippupisteen avulla määritettiin sovittavan gammajakauman tiheysfunktion parametrit. Jakauma sovitettiin eri yksikköryhmien toimintavalmiusaikoihin Helsingissä sekä pelastusyksiköiden havaintoihin koko maassa. Kuvassa 59 on sovitettu gammajakauman kertymäfunktio parametrein $\alpha = 5,82$ ja $\beta = 1,45$ min Helsingin pelastusyksiköiden toimintavalmiusaikahavaintoihin sekä kuvassa 60 gammajakauman tiheysfunktio parametrien arvoilla $\alpha = 2,50$ ja $\beta = 4,00$ min koko maan pelastusyksiköiden havaintoihin.



Kuva 59. Gammajakauman kertymäfunktio sovittuna Helsingin palokuntien pelastusyksiköiden toimintavalmiusaikahavaintoihin vuonna 1996.



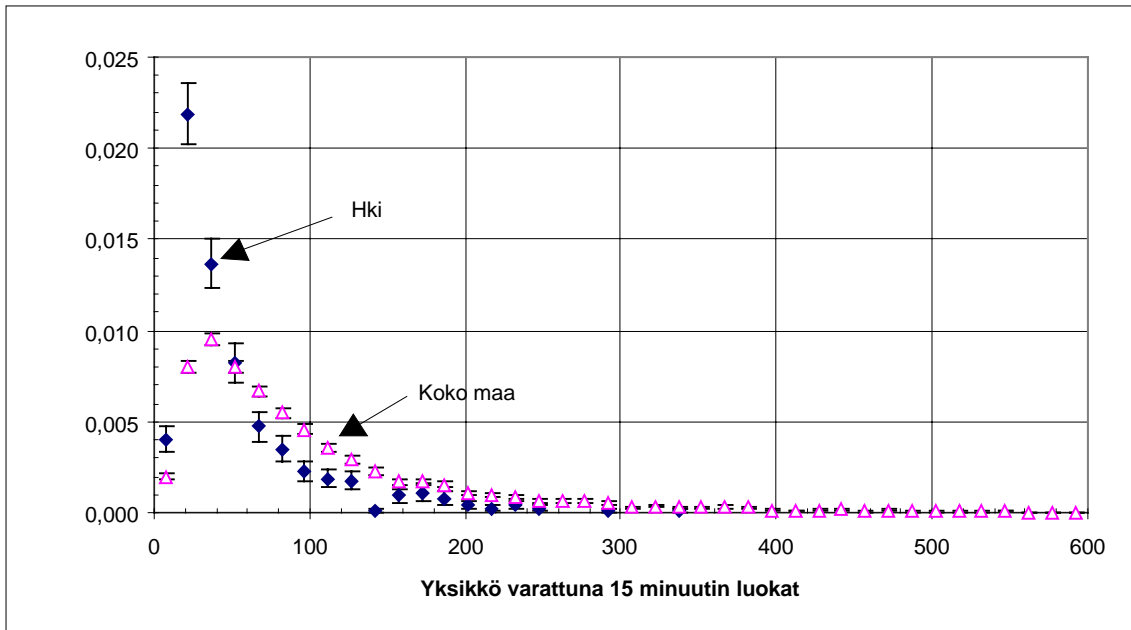
Kuva 60. Gammajakauman tiheysfunktio sovitettuna koko maan palokuntien pelastusyksiköiden toimintavalmiusaikahavaintoihin vuonna 1996.

Lääneissä, joissa välimatkat ovat lyhyitä ja kaupungit suuria, gammajakauma soveltui kuvaamaan toimintavalmiusajan jakautumista melko hyvin. Lääneissä, jotka ovat maantieteellisesti hyvin rikkonaisia (vesistöt) ja ajomatkat pitkiä, gammajakauma soveltui havaintojen kuvaajaksi hieman heikommin. Tässä gammajakaumat sovitettiin siten, että ne kuvaavat toimintavalmiusaikahavaintoja riittäväällä tarkkuudella pienillä ajan arvoilla eli toimintavalmiusajoilla, jotka eivät ylitä kymmentä minuuttia. Lääneistä erityisesti Lapin, Mikkelin ja Kuopion läänien toimintavalmiusajoissa ajoajan merkitys tuli näkyviin, muissa lääneissä sen vaikutus oli pienempi.

5.5 Palveluaika

5.5.1 Operatiivisten yksiköiden palveluaika

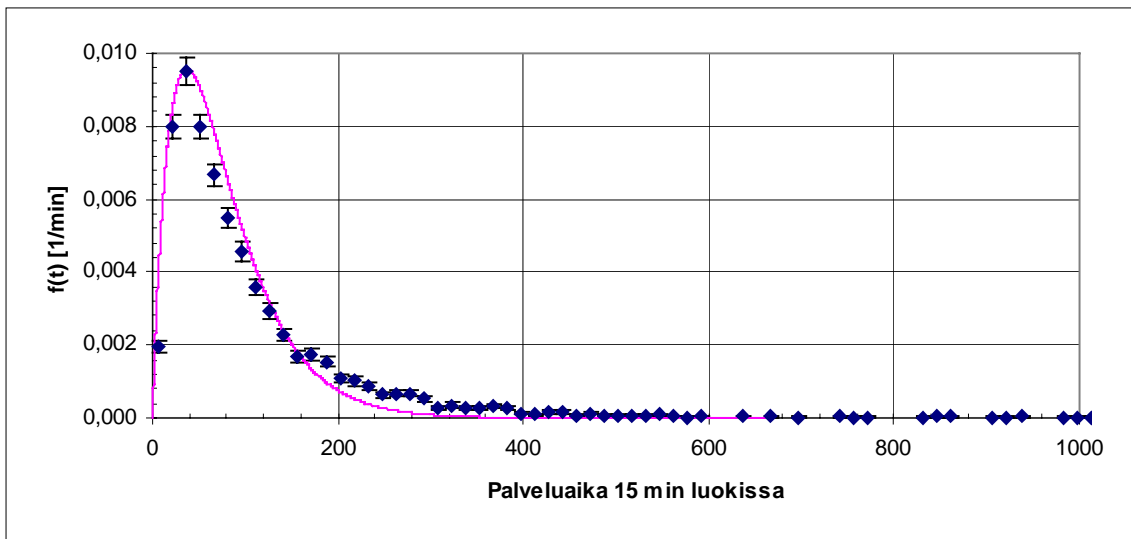
Yksikön katsotaan olevan varattuna hälytyksestä siihen hetkeen, kun se saapuu takaisin asemalle. ONTIKASTA laskettiin näiden aikojen erotus ja pyöristettiin lähimpään minuuttiin. Koko maassa kelpollisia havaintoja oli 13 924 kappaletta eli 99 % kaikista, joista pelastusyksiköitä koskevia havaintoja oli 4 872. Helsingissä kelpollisia havaintoja oli yhteensä 1 460 kappaletta eli 100 % kaikista. Kelpollisiksi katsottiin palveluajat, jotka eivät olleet negatiivisia tai kohtuuttoman suuria. Tilastokohinan pienentämiseksi havainnot jaettiin viidentoista minuutin luokkiin. Jakaumat piirrettiin operatiivisen tehtävän mukaisesti jaotelluille yksikköryhmille Helsingissä sekä pelastusyksiköille koko maassa. Palveluajan jakaumat ja kertymät Helsingin yksiköille on esitetty liitteessä E ja koko maan pelastusyksiköille liitteessä F.



Kuva 61. Palokuntien pelastusyksiköiden palveluaika 15 minuutin luokissa Helsingissä ja koko maassa vuonna 1996.

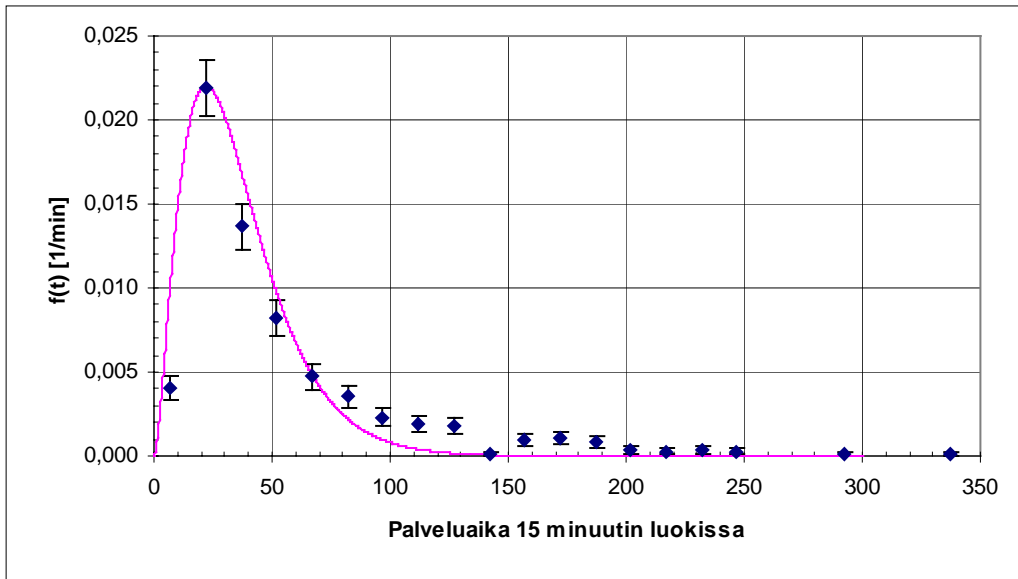
Kuvassa 61 ovat Helsingin ja koko maan pelastusyksiköiden jakaumat piirrettyinä samaan kuvaan.

Kuvassa 62 on koko maan pelastusyksiköiden havaintoihin sovitettu gammajakauman tiheysfunktio, jonka parametrien arvoiksi saatiin $\alpha = 1,94$ ja $\beta = 39,57$ min.



Kuva 62. Gammajakauman tiheysfunktio sovitettuna palokuntien koko maan pelastusyksiköiden palveluaikahavaintoihin vuonna 1996.

Kuvan 63 Helsingin pelastusyksiköiden havaintoihin sovitetun gammajakauman parametreiksi saatiin $\alpha = 2,63$ ja $\beta = 13,50$ min.



Kuva 63. Gammajakauman tiheysfunktio sovitettuna Helsingin palokuntien pelastusyksiköiden palveluaikahavaintoihin vuonna 1996.

Havainnoista voitiin todeta palveluajan olevan likimäärin gammajakautunut.

6. Ajoaikakorrelaatiokaavan määrittäminen

6.1 Tehtävä, menetelmät

Ajoajan riippuvuutta ajomatka-ajasta tutkittiin määrittämällä palo- ja pelastustoimen ajoaikoja ja ajomatkoja eri hälytyskohteisiin vuonna 1996. Tarkoituksena oli sovittaa ajoaikamalli havaintoihin sekä tutkia sen eroavaisuuksia erityyppisten paikkakuntien ja ajoneuvotyyppien välillä. Tutkimus suoritettiin kolmella eri esimerkkialueella, joita olivat Helsinki, Tampere sekä seitsemän kunnan yhteistoiminta-alue Keski-Pohjanmaalla. Helsingistä sekä Tampereelta käyttöön saatiin vuoden 1996 rakennuspalojen hälytys- sekä onnettomuusselosteet, joista selvisi kohteen osoite, ja kunkin operatiivisen yksikön ajoaika kohteeseen saatiin ONTIKAn tiedoista. Selosteista ei kuitenkaan selvinnyt ajomatka kohteeseen. Tämän vuoksi matka mitattiin kartalta käsivaraisesti linnuntietä kulkevan yksikölle erikseen sen sijaintiasemalta onnettomuuskohteeseen. Keski-Pohjanmaan kunnista onnettomuus- sekä hälytysselesteiden liitteenä saatiin myös ajomatkat kohteeseen sekä linnuntietä että maantietä pitkin mitattuna. Ajoaika vaikuttaa kaikkialla toimintavalmiusaikaan, vaikka kohdan 5.4 perusteella voisikin päätellä sen näkyvän vain pitkillä etäisyyksillä, kuten Lapin, Mikkelin ja Kuopion lääneissä. Suomen kaupunki- ja kuntakeskukset ovat rakenteeltaan niin samanlaisia, että toimintavalmiusajat näyttivät noudattavan melko yhtenäistä gammajakaumaa, jossa voitaisiin olettaa erilaisten satunnaisten tekijöiden, kuten liikennetiheyden, keliolosuhteiden, tien laadun, matkan pituuden (linnuntiehen verrattuna) jne., ratkaisevan. Tämä on kuitenkin suurelta osalta näköharhaa ja johtuu paljolti asutuskeskusten samanlaisuudesta. ONTIKAssa olevien hälytystietojen tarkka analyysi, lisätynä kohteen tarkoilla paikka- ja muilla vastaavilla tiedoilla, kykenisi vastaamaan kvantitatiivisesti näihin kysymyksiin. Tässä työssä rajoitetaan kuitenkin ilmeisimmän yksittäisen tekijän, ajoajan, deterministiseen käsittelyyn.

6.2 Ajoaikateoria

6.2.1 Keskimääräinen ajomatka

Arvioimme ensin keskimääräistä ajomatkaa palokunnan hälytyksiin, kun se toimii n :llä yksiköllä paikkakunnalla, jonka pinta-ala on A [km²]. Lisäksi oletetaan yksiköt jaetuiksi jotenkin rationaalisesti eri paloasemille paikkakunnan sisällä. Lähimmän hälytykseen reagoivan palokunnan ajomatka s , joka on keskimääräinen etäisyys tulipalosta lähimpään paloasemaan tietyllä alueella, saadaan yhtälöstä (170) mitä Kolesar ja Blum ehdottivat teoreettisen mallin pohjalta 1973.

$$s = k \sqrt{\frac{A}{n-b}} \quad (170)$$

missä A on pinta-ala neliökilometreinä, n on kaikkien yksiköiden lukumäärä sekä k ko-keellisesti määritettävä laaduton kerroin. Varattujen yksiköiden määräksi b saadaan

$$b = \lambda \bar{\tau} \quad (171)$$

missä λ on ilmoitusvirta eli keskimääräinen hälytysten lukumäärä vuorokaudessa ja $\bar{\tau}$ kaikkien yhteen hälytykseen reagoineiden yksiköiden arvioitu kokonaistyöaika. $A = (\text{pituus})^2$ ja yhden yksikön kattama pinta-ala vähenee lineaarisesti yksiköiden lisäyk- sen suhteessa. Yhtälö (170) osoittaa, että arvioitu ajomatka pienenee suhteessa vapaiden yksiköiden lukumäärän neliöjuureen. Brušlinski käyttää tätä samaa mallia yhtälössä (127), missä $v\tau = s$ ja N_g on paloasemien eikä yksiköiden n lukumäärä.

6.2.2 Ajoajan riippuvuus ajomatkasta

Ajatellaan, että arvioitu ajoaika T on ajomatkan s funktio, ja oletetaan, että lyhyillä mat-koilla yksikkö ei koskaan saavuta täyttä kulkunopeuttaan vaan kiihdyttää alku-puoliskolla ja hidastaa loppupuoliskolla (Kolesar 1975). Pidemmällä matkoilla oletam-me alussa olevan samanlaisen kiihdytysvaiheen, jonka jälkeen nopeus säilyy vakiona, kunnes yksikkö saapuu lähelle hälytyspaikkaa ja jälleen hidastaa. Merkitään a :lla kiihty-vyyttä ja v_c :llä kulkunopeutta. Oletetaan lisäksi, että kiihtyvyys ja hidastuvuus alku- ja loppuvaiheessa sekä nopeus keskivaiheessa ovat vakioita.

Tasaisesti kiihtyvän liikkeen nopeus ajan funktiona on

$$v = v_0 + at \quad (172)$$

ja kuljettu matka

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} at^2, \quad (173)$$

missä v_0 on alkunopeus ja t on aika.

Ajoneuvo lähtee levosta ja kiihdyttää vakionopeuteen v_c . Merkitään t_k :lla kiihdytys-vaiheeseen kuluvaa aikaa ja s_k :lla ajassa t_k kuljettua matkaa. Tällöin

$$v_c = at_k \Rightarrow t_k = \frac{v_c}{a} \quad (174)$$

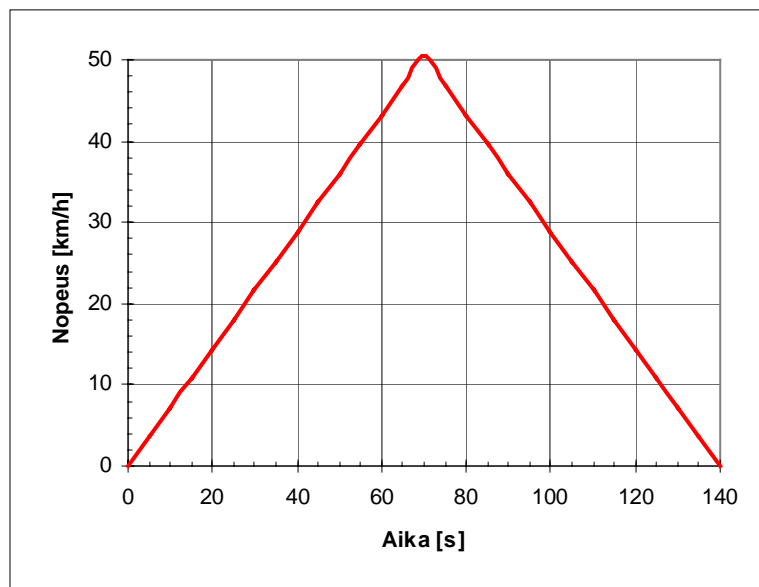
ja

$$s_k = \frac{at_k^2}{2} = \frac{a}{2} \left(\frac{v_c}{a} \right)^2 = \frac{v_c^2}{2a}. \quad (175)$$

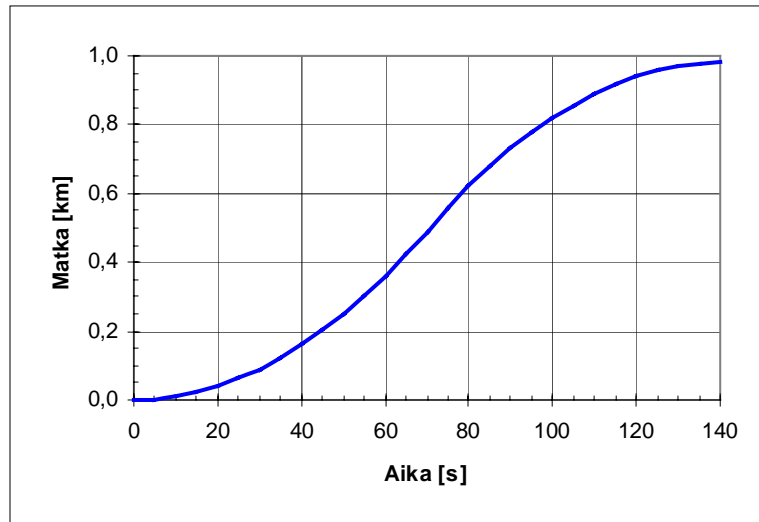
Esimerkkinä tarkastellaan tapausta, jossa ajoneuvon kiihtyvyys $a = 0,2m/s^2$. Kuvassa 64 on ajoneuvon nopeus ajan funktiona, kun oletetaan ajoneuvon ensin tasaisesti kiihdyttävän nopeuteen 30 km/h ja välittömästi sen saavutettuaan alkavan hidastaa samalla kiihtyvyydellä. Tällöin saadaan

$$\frac{s}{2} = \frac{at_k^2}{2} \Rightarrow t_k = \sqrt{\frac{s}{a}}. \quad (176)$$

Kuljettu matka on kuvassa 65.

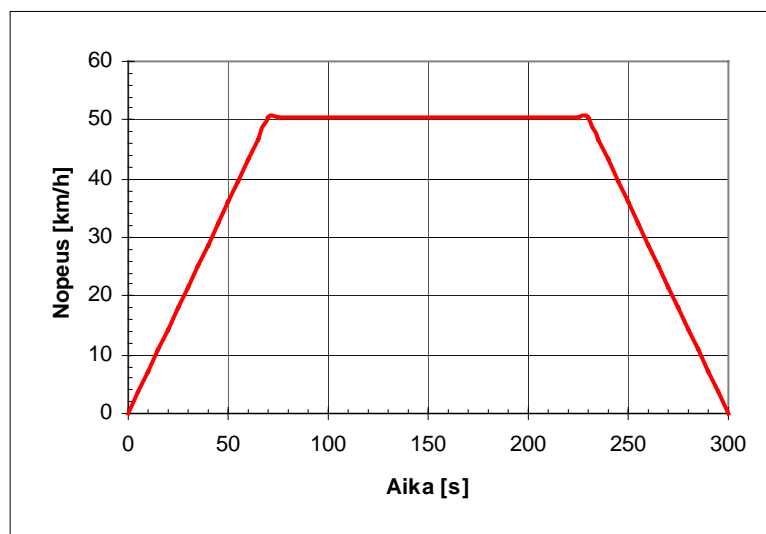


Kuva 64. Nopeus matkan funktiona, kun ajoneuvo heti kiihdytyksen jälkeen alkaa hidastaa.

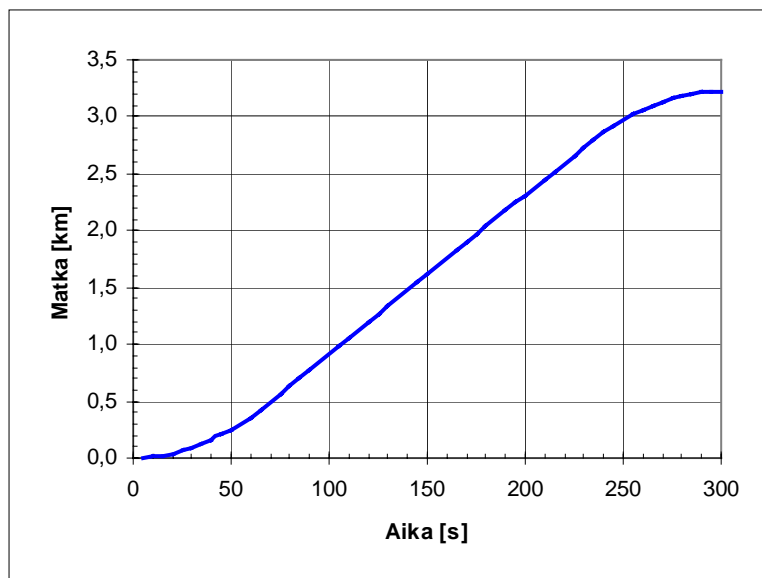


Kuva 65. Ajoneuvon kulkema matka ajan funktiona kuvan 64 nopeuksilla.

Oletetaan, että ajoneuvo kiihdyttää tasaisesti tiettyyn nopeuteen, jonka se säilyttää jonkin aikaa, ennen kuin alkaa samalla hidastuvuudella pienentää nopeuttaan. Kuvassa 66 on ajoneuvon, jonka kiihtyvyys $a = 0,2 \text{ m/s}^2$ nopeus ajan funktiona sekä kuvassa 67 sen samassa ajassa kulkema matka.



Kuva 66. Ajoneuvon nopeus ajan funktiona, kun se kiihdyttää tasaisesti vakionopeuteensa säilyttäen sen jonkun aikaa ja sitten jarruttaa vakiokiihtyvyydellä.



Kuva 67. Ajoneuvon kulkema matka kuvan 66 nopeuksilla.

Ajoneuvon tasaisella nopeudella kulkema matka s_v on

$$s_v = s - 2s_k = s - \frac{v_c^2}{a}, \quad (177)$$

missä s on koko kuljettu matka. Ja aika t_v , jolloin ajoneuvo kulkee tasaisella nopeudella, on

$$t_v = \frac{s_v}{v_c} = \frac{s}{v_c} - \frac{v_c}{a}. \quad (178)$$

Koko prosessiin kuluva aika t on siten

$$t = t_v + 2t_k = \frac{s}{v_c} + \frac{v_c}{a}. \quad (179)$$

Mallin mukaisesti ajoaika saadaan kaavasta, johon on yhdistetty kaavojen (176) ja (179) esittämät tulokset.

$$T(s) = \begin{cases} 2\sqrt{\frac{s}{a}}, & \text{kun } s \leq 2s_k \\ \frac{v_c}{a} + \frac{s}{v_c}, & \text{kun } s > 2s_k, \end{cases} \quad (180)$$

missä s_k on matka, joka tarvitaan ajonopeuden v_c saavuttamiseksi.

Tämä malli on yksinkertaistus eikä palokunnan yksiköiden todellisuudessa kuvitella aina kulkevan tällä tavoin. Kuitenkin on käynyt ilmi, että malli antaa keskimäärin oikeita arvioita, ja se on laajalti testattu tilastollisesti ja vahvistettu toimivaksi New York Cityn paloautoille.

Ajatellaan jotakin tiettyä kaupunginosaa ja yhdistetään ajoaikamalli ja ajoetäisyysmalli toisiinsa. Merkitään matkasta riippuvaa ajoaikaa $T(x)$:llä, jossa x on ajoetäisyys ja $F_s(x)$ ajoetäisyyksien todennäköisyysjakauman kertymä. Tällöin T , arvioitu riippumaton ajoaika (hälytykseen mielivaltaisen matkan päässä), saadaan kaavasta

$$T = \int_0^{\infty} T(x) dF_s(x). \quad (181)$$

Olettaen, että ajoaikamalli on paikkansa pitävä saadaan sijoittamalla yhtälöt (180) yhtälöön (181)

$$T = \int_0^{2d} c_2 \sqrt{\frac{x}{a}} dF_s(x) + \int_0^{2d} \left(\frac{v_c}{a} + \frac{x}{v_c} \right) dF_s(x). \quad (182)$$

Ottamalla huomioon, että $T(x)$:n molemmat osat ovat koveria, saadaan Jensenin epäyhtälöstä

$$T \leq \begin{cases} 2\sqrt{\frac{s}{a}}, & \text{jos } s \leq 2s_c \\ \frac{v_c}{a} + \frac{s}{v_c}, & \text{jos } s > 2s_c \end{cases} \quad (183)$$

Kuitenkin jättämällä erisuuruisuus huomioimatta ja sijoittamalla (170) yhtälöön (183) T voidaan arvioida kaavasta

$$T \cong \begin{cases} c_1 \left(\frac{A}{n-b} \right)^{\frac{1}{4}}, & \text{jos } s \text{ 'pieni'} \\ c_2 + c_3 \left(\frac{A}{n-b} \right)^{\frac{1}{2}}, & \text{jos } s \text{ 'suuri'}, \end{cases} \quad (184)$$

missä

$$c_1 = \sqrt{\frac{k}{a}}, \quad c_2 = \frac{v_c}{a}, \quad c_3 = \frac{k}{v_c}.$$

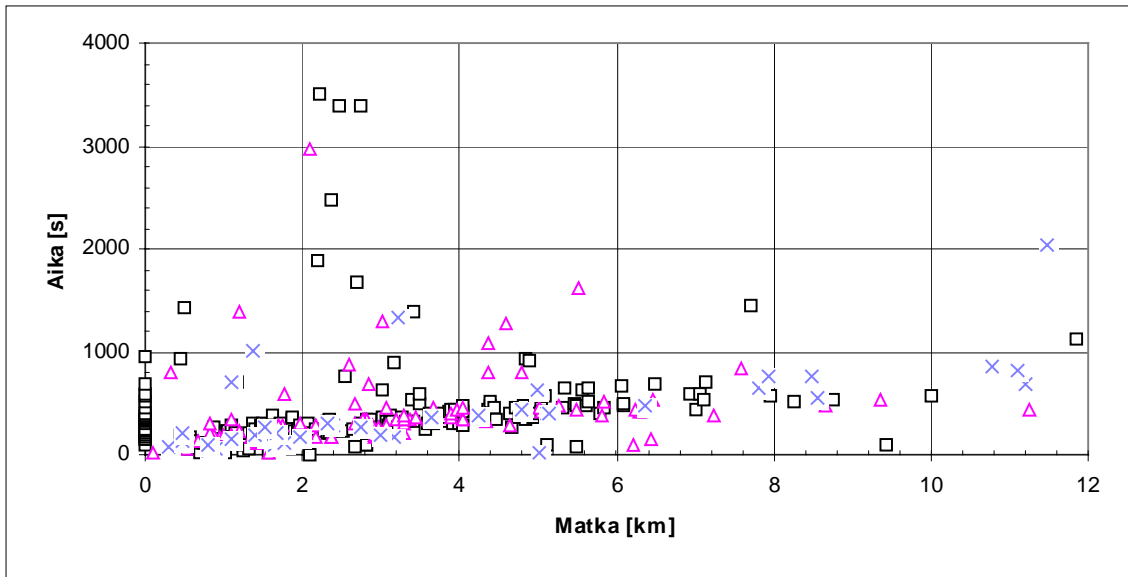
Yhtäläillä ajoajan riippuvuutta ajomatkasta voidaan kuvata seuraavilla yhtälöillä (Chaiken et al. 1975)

$$T = \begin{cases} a\sqrt{s} & , s \leq d \\ bs + c & , s \geq d, \end{cases} \quad (185)$$

joissa s on ajomatka, T on ajoaika ja a, b, c ja d kullekin kaupungille ominaisia vakioita. Tällainen kuvaaja saadaan, jos yksikkö kiihdyttää vakionopeutensa, säilyttää sen varsinaisen ajon ajan ja tämän jälkeen hidastaa saapuessaan määräpaikkaansa. Pienillä matkoilla yksikkö ei koskaan saavuta täyttä ajonopeuttaan, ja tätä ilmiötä kuvaa käyrän paraabelimainen alkuosuus. New York Cityn tilastojen mukaan kaavojen (184) ja (185) malleille ei saatu kovin merkittäviä tilastollisia eroja (Kolesar 1975). Tätä teoreettista tietoa käytettiin pohjana etsittäessä Suomen olosuhteisiin sopivaa ajoaikamallia.

6.3 Helsinki

Vuonna 1996 ONTIKasta löytyi 249 rakennuspaloa Helsingin alueella. Toiminta- valmius- ja lähtövalmiusajan erotuksena saatiin kunkin operatiivisen yksikön ajoaika onnettomuuskohteeseen. Ajoajoista kelvollisia oli 75 % 1 460:stä havainnosta. Lisäksi hälytysselosteen numeron perusteella etsittiin ONTIsta kunkin onnettomuuden sijaintipaikka. Hälytyksiin osallistuneiden operatiivisten yksiköiden tunnusten avulla pystyttiin määrittämään asema, josta yksikkö oli onnettomuuspaikalle lähtenyt. Kartasta mitattiin käsivaraisesti matka linnuntietä kunkin operatiivisen yksikön sijaintiasemalta onnettomuuspaikalle ja havainnoista piirrettiin ajomatka-ajokaikajakaumat kullekin yksikköryhmälle erikseen.

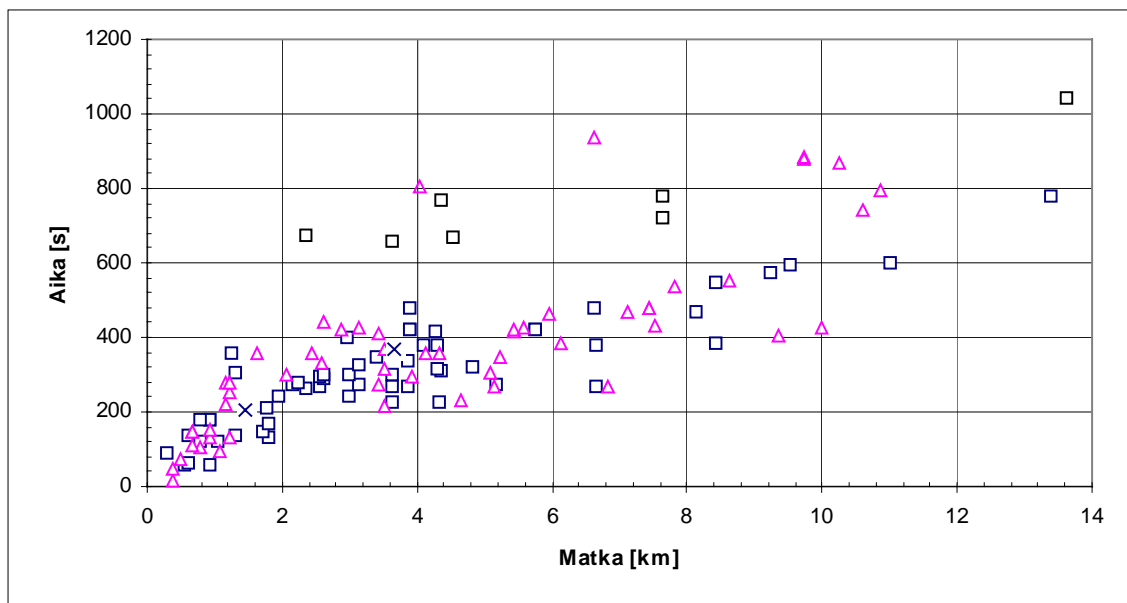


Kuva 68. Helsingin pelastusyksiköiden matka-aikahavainnot vuonna 1996.

Kuvaan 68 on pisteinä piirretty Helsingin pelastusyksiköiden matka-aikahavainnot vuonna 1996. Neliöillä on piirretty matkat, jotka pystyttiin kartalta määrittämään tarkasti, kolmioilla matkat, joissa oli pientä epäselvyyttä, jolloin matkan pituus saattaa poiketa todellisesta noin 100–200 metriä, ja rasteilla on merkitty matkoja osoitteisiin, joiden sijainteja ei pystytty osoitteen epäselvyyden tai kartan epätarkkuuden takia määrittämään tarkasti, jolloin poikkeama todellisesta saattaa olla useita satoja metrejä.

6.4 Tampere

Vuonna 1996 ONTIKASTA löytyi Tampereen alueella 74 rakennuspaloa, joihin oli lähetetty 428 palo- ja pelastustoimen operatiivista yksikköä. Kelvottomien ajoaikojen poistamisen jälkeen havaintoja jäi 307 kappaletta, eli 72 % havainnoista oli kelvollisia. Kuvasssa 69 Tampereen pelastusyksiköiden ajoaika ajomatkan funktiona.

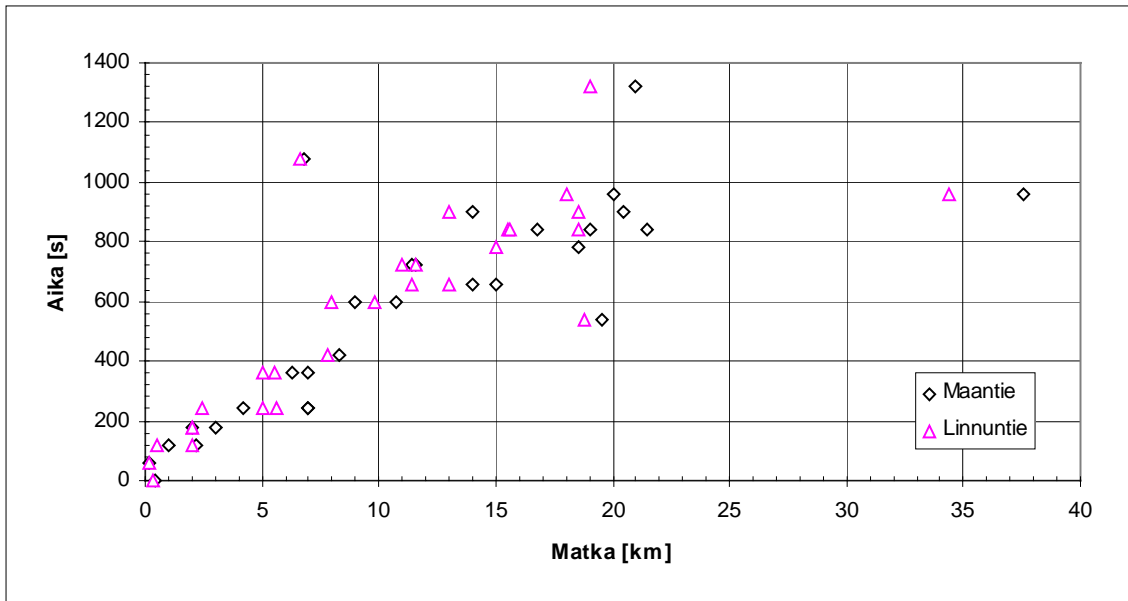


Kuva 69. Tampereen pelastusyksiköiden matka-aikahavainnot vuonna 1996.

Samalla tavoin kuin Helsingissä etäisyydet mitattiin käsivaraisesti kartalta linnuntietä. Kuvaan 69 on piirretty neliöinä matkat, jotka pystyttiin kartalta määrittämään tarkasti, kolmioina matkat, joissa oli pientä epäselvyyttä, ja rasteilla matkat osoitteisiin, joiden sijainteja ei pystytty osoitteen epäselvyyden tai kartan epätarkkuuden takia määrittämään tarkasti.

6.5 Maaseutukunnat

Ajoajan suhdetta ajomatkaan tutkittiin lisäksi myös maaseutumaisissa kunnissa. Esimerkkikohteiksi saatiin Keski-Pohjanmaalta Kannuksen, Kaustisen, Kälviän, Perhon, Toholammin, Ullavan ja Vetelin kunnat käsittävä yhteistoiminta-alue. Tämä alue valittiin tietoisesti alueelta, missä vesistöt eivät voimakkaasti pirsto kulkuyhteyksiä. Koska alue on tyypillistä jokivarsiasutusta, päätietä kulkeva ajomatka paloasemalta kohteeseen ei poikkea keskimäärin niin voimakkaasti linnuntietä mitatusta matkasta kuin esimerkiksi suurten vesistöjen alueella olevilla paikkakunnilla. Yhteensä näissä kunnissa tapahtui vuonna 1996 25 hälytystä, joihin osallistui 88 palo- ja pelastustoimen operatiivista yksikköä. Kelvollisia ajoaikahavainnoja oli 85 kappaletta eli 97 % kaikista havainnoista. Kunnista saatiin hälytysten tiedot, joissa mukana oli ajomatka mitattuna maantietä sekä linnuntietä pitkin. Kuvassa 70 on piirretty ajoaika ajomatkan funktiona.



Kuva 70. Maaseutukuntien pelastusyksiköiden matka-aikahavainnot vuonna 1996, kun matka on mitattu sekä linnuntietä että maantietä.

6.6 Ajoajan riippuvuus matkasta

6.6.1 Sovite

Yhtälön (185) kuvaaja sovitettiin aika- ja matkahavaintoihin STATISTICA-ohjelmalla. Käyrän oletettiin kulkevan origon kautta ja funktioille sekä niiden ensimmäisille derivaatoille asetettiin jatkuvuusehto pisteessä d . Tällöin voitiin määrittää seuraavat riippuvuudet parametrien välillä.

$$\frac{dT}{ds} = \frac{1}{2\sqrt{s}} a \Big|_{d=s} = b \Big|_{d=s}, \quad (186)$$

josta saadaan

$$a = 2b\sqrt{d} = 2\sqrt{bc} \quad (187)$$

$$T(s) = bs + c \Big|_{d=s} = a\sqrt{s} \Big|_{d=s}, \quad (188)$$

josta saadaan

$$d = \frac{c}{b}. \quad (189)$$

Määritettäväksi jäi kaksi vapaata epälineaarista parametria, b ja c , joita käyttäen yhtälö (185) voidaan kirjoittaa muotoon

$$T = \begin{cases} 2\sqrt{bcs} & ; s \leq \frac{c}{b} \\ bs + c & ; s > \frac{c}{b}. \end{cases} \quad (190)$$

Ennen sovitusta havainnoista poistettiin selvästi muusta joukosta poikkeavat arvot mahdollisimman hyvän tuloksen saavuttamiseksi. Taulukossa 25 on havaintojen lukumäärä ennen poikkeavien havaintojen poistoa ja sen jälkeen.

Taulukko 25. Havaintojen lukumäärät ennen muusta joukosta poikkeavien arvojen poistoa ja sen jälkeen Helsingissä, Tampereella ja maaseutukunnissa.

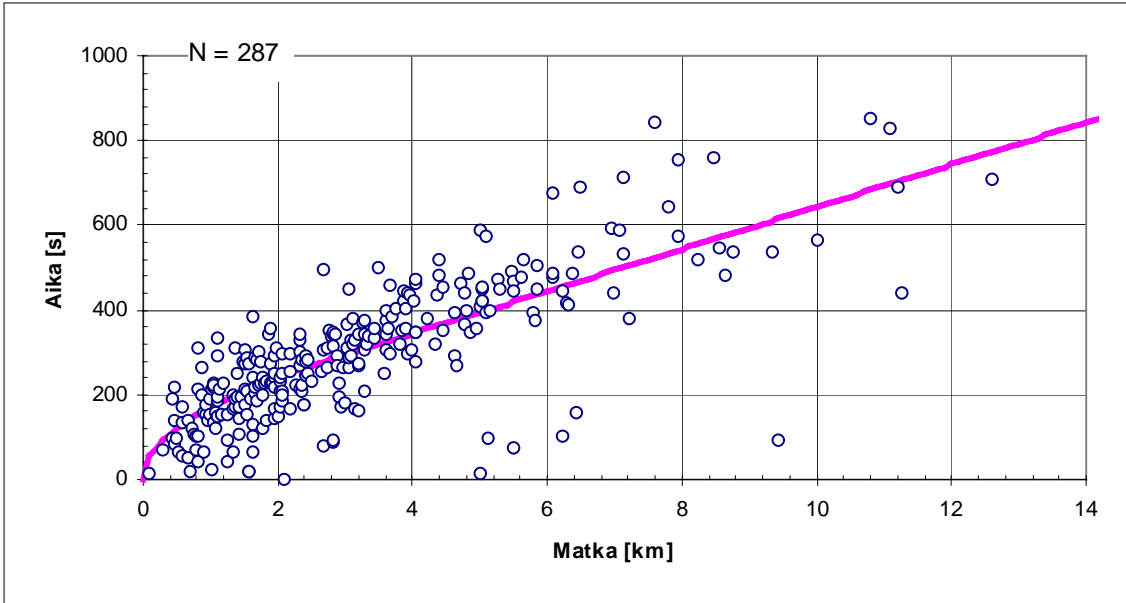
HELSINKI	Kelvolliset havainnot	Joukosta poikkeavat	Lopullinen määrä
Pelastusyksiköt	307	20	287
Säiliöyksiköt	147	13	134
Konetikas- ja nostolavayksiköt	133	8	125
Pioneeriyksiköt	146	6	140
Johtoyksiköt	188	7	181
Yhteensä	921	54	867
TAMPERE			
Pelastusyksiköt	123	12	111
Raivausyksiköt	33	0	33
Säiliöyksiköt	25	3	22
Johtoyksiköt	49	2	47
Puomitikas- ja nostolavayksiköt	13	0	13
Sairaankuljetusyksiköt	28	0	28
Yhteensä	271	17	254
MAASEUTUKUNNAT			
Pelastusyksiköt	28		28
Johtoyksiköt	15		15
Säiliöyksiköt	26		26
Yhteensä	69		69

STATISTICA-ohjelmalla määritettiin parametrien b ja c arvot, jonka jälkeen parametrien a ja d arvot voitiin määrittää yhtälöistä (187) ja (189). Parametrien arvot eri alueilla kullekin yksikköryhmälle taulukossa 26.

Kuvassa 71 on esitetty käyrän (185) sovitukset Helsingin pelastusyksiköiden ajoaika-havaintoihin.

Taulukko 26. Ajoaikakaavojen parametrien arvot eri alueilla ajoneuvoryhmittäin.

HELSINKI	a	b	c	d [km]
Pelastusyksiköt	170,2	49,8	145,3	2,9
Säiliöyksiköt	215,6	61,5	189,1	3,1
Konetikas- ja nostolavayksiköt	178,1	58,8	134,9	2,3
Pioneeriyksiköt	186,3	33,3	260,3	7,8
Johtoyksiköt	139,5	48,6	100,2	2,1
TAMPERE	a	b	c	d [km]
Pelastusyksiköt	168,5	39,9	178,1	4,5
Raivausyksiköt	169,7	53,0	135,8	2,6
Säiliöyksiköt	170,2	41,2	175,8	4,3
Johtoyksiköt	130,6	53,2	80,1	1,5
Sairaankuljetus	156,7	38,2	160,5	4,2
MAASEUTUKUNNAT	a	b	c	d [km]
Pelastusyksiköt	199,8	16,9	592,0	35,1
Johtoyksiköt	131,5	45,5	95,0	2,1
Säiliöyksiköt	212,8	17,8	635,6	35,7



Kuva 71. Ajoaikakäyrän sovitus Helsingin pelastusyksiköiden ajoaikahavaintoihin vuonna 1996.

6.6.2 Luottamusvälit

STATISTICA laski sovitettaville havainnoille keskiarvot sekä keskihajonnat ja parametrien keskivirheet sekä kovarianssi- ja korrelaatiomatriisin. Luottamusvälit määritettiin samoin kuin lineaarisessa tapauksessa, käyttämällä suureina STATISTICAn epälineariselle tapaukselle laskemia suureiden arvoja. Luottamusvälit ajoajan keskiarvolle saatiin seuraavasti (Milton & Arnold 1990)

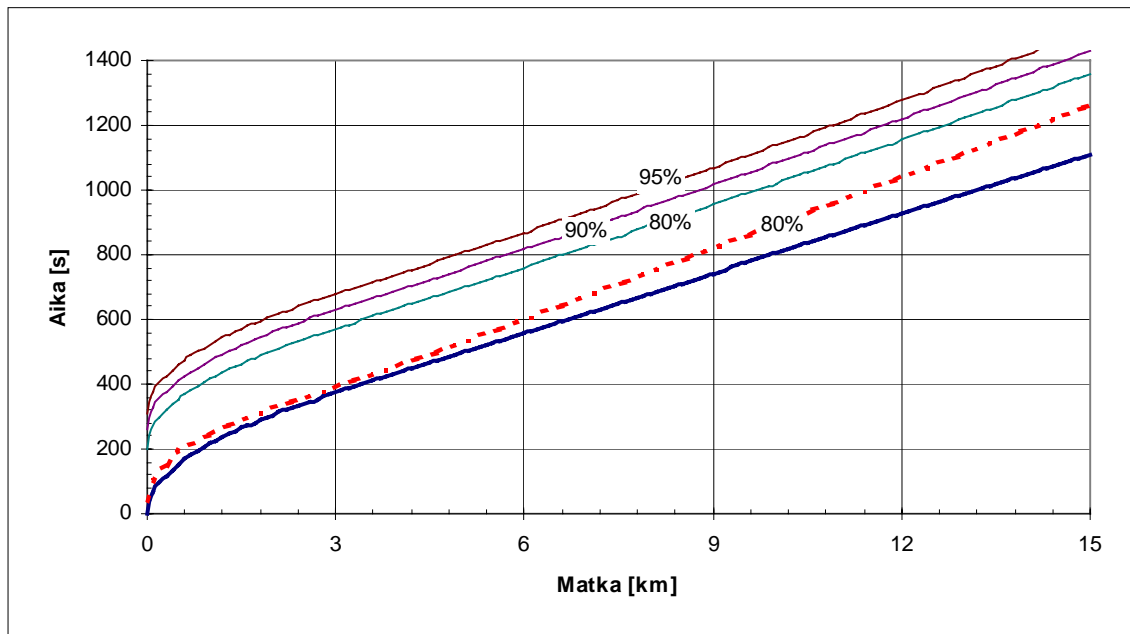
$$\mu_T + t_{\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\text{Var}[\bar{T} + B(s - \bar{s})]} = \mu_T + t_{\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{\sigma^2}{n} + (s - \bar{s})^2 \text{Var}B}, \quad (191)$$

missä μ_T on ajoajan keskiarvo tietyllä matkan arvolla, σ^2 on ajomatkan keskihajonta, n havaintojen lukumäärä, \bar{s} ajomatkan keskiarvo ja α halutun luottamusvälin suuruus. $t_{\frac{\alpha}{2}}$ saadaan T_{n-2} -jakaumasta. Kaavasta (191) saadaan ajoajan arvo, jolla yksikkö tietyllä luottamustasolla keskimäärin saavuttaa kohteen.

Luottamusväli jollekin tietylle ajoajan arvolle jollakin tietyllä ajomatkan arvolla saadaan kaavasta (192). Määrittämällä luottamusväli ajoajalle useissa pisteissä eli useilla matkan arvoilla, saadaan käyrä, joka kuvaa määrättyä luottamustasoa. (Milton & Arnold 1990)

$$\hat{T} + t_{\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\sigma^2 + \frac{\sigma^2}{n} + (s - \bar{s})^2 \text{Var}B} \quad (192)$$

Kaavasta saadaan ajoajan arvo, jolla yksikkö tietyllä luottamustasolla viimeistään saavuttaa onnettomuuskohteen.



Kuva 72. Helsingin säiliöyksiköiden ajoaikakuvaaja luottamuväleineen.

Kuvassa 72 alempi katkoviivalla merkitty 80 %:n luottamuvälikäyrä on laskettu kaavasta (191) ja ylemmät käyrät kaavasta (192) eri α :n arvoilla. Kuvasta 72 luottamuvälit voidaan tulkita seuraavasti:

- 80 %:n todennäköisyydellä keskiarvoa esittävä paksu käyrä on alempana kuin katkoviivalla esitetty 80 %:n käyrä.
- Tarkasteltaessa yksittäistä ajoaikaa, esimerkiksi yhdeksän kilometrin matkaa, siihen kuluu 80 %:n todennäköisyydellä enintään 955 sekuntia eli 15,9 minuuttia ylemmän käyräparven mukaan. Jos luottamustasoa halutaan suurentaa enimmäisajoaikakin kasvaa: 90 %:n luottamustasolla aika on alle 1 020 sekuntia eli 17,0 minuuttia ja 95 %:n tasolla alle 1 070 sekuntia eli 17,8 minuuttia.

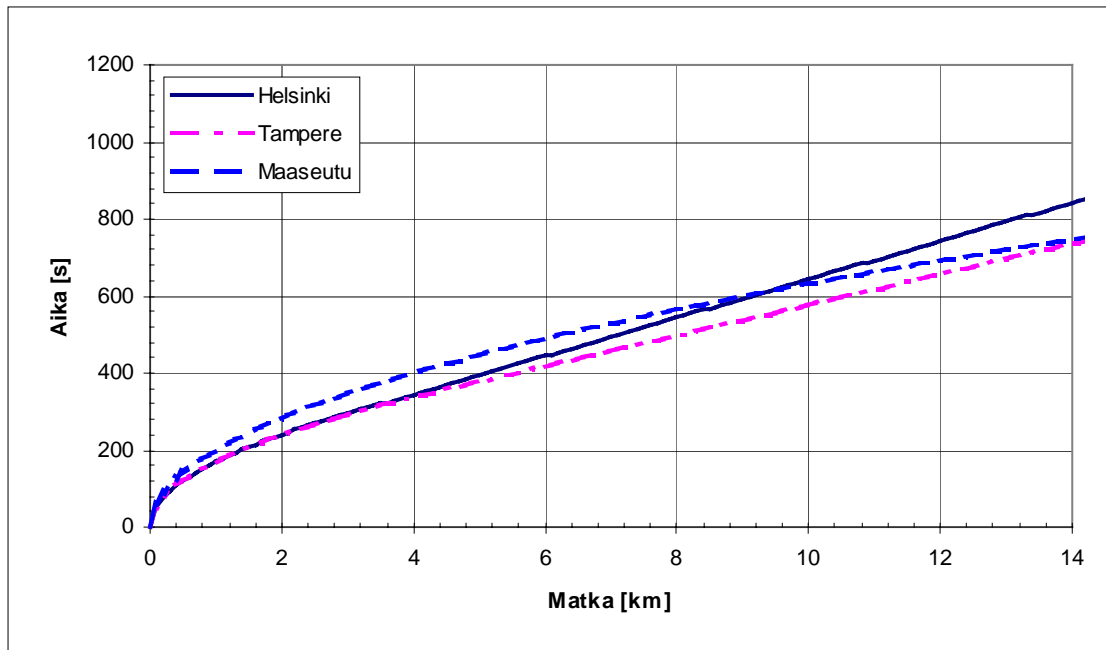
Huomattavan suuret yksittäisen ajoajan virherajat johtuvat havaintojoukon hajonnasta. Tässä käyttämämme yksinkertaisin mahdollinen malli ei kykene vielä selittämään kaikkia ajoikaan vaikuttavia tekijöitä, joihin kohdassa 6.1 alustavasti viitattiin. Kun näiden mallien käytöstä saadaan lisää kokemuksia, on arvioitava uudestaan, pitäisikö tätä mallia parantaa.

Keskiarvokäyrän 80 %:n luottamusraja on 10 %:n suhteellisen virheen tuntumassa, mikä on tämänkaltaisessa mallinnuksessa melko hyvä tulos. Sen perusteella jatkossa katsotaankin erilaisten ajoneuvoryhmien keskiarvokäyriä eri paikkakunnilla ja arvioidaan, missä määrin ne ovat yhdistettävissä yleispätevimiksi käyriksi.

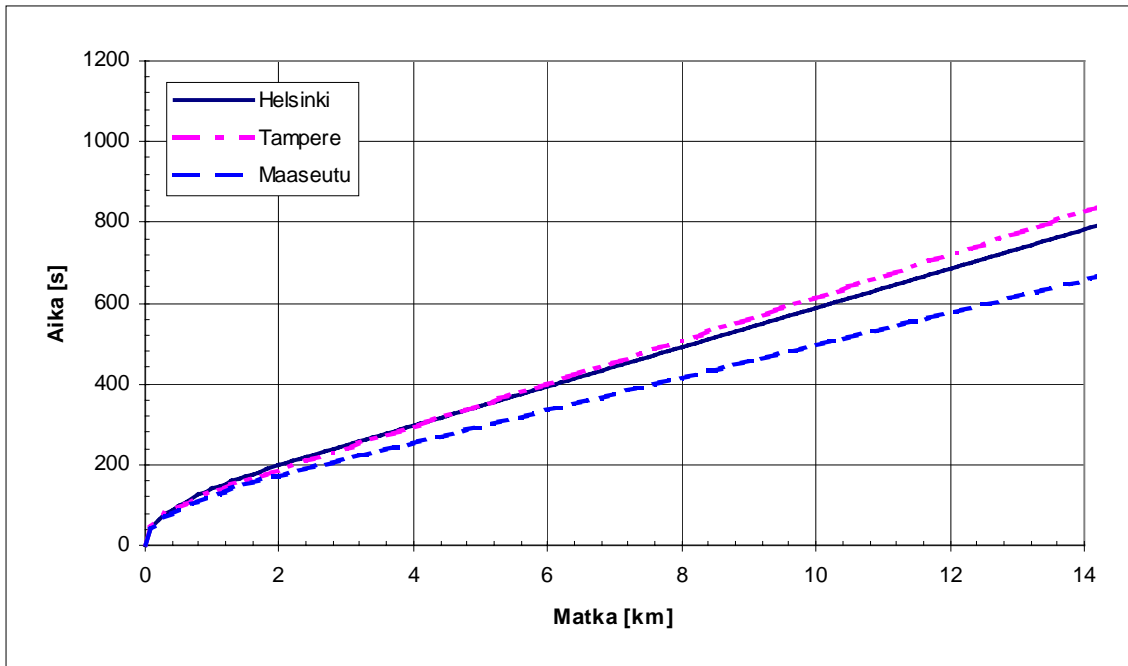
6.6.3 Yhdistely

6.6.3.1 Eri paikkakuntien pelastus- ja johtoyksiköt

Tarkastellaan lähemmin alueiden pelastus- ja johtoyksiköitä. Kuvissa 73 ja 74 on samaan kuvaan piirretty eri alueiden sovitekäyrät. Parametrien arvot saatiin taulukosta 26.



Kuva 73. Pelastusyksiköiden aika-matkakuvaajat Helsingissä, Tampereella ja maaseutukunnissa.



Kuva 74. Johtoyksiköiden aika-matkakuvaajat Helsingissä, Tampereella ja maaseutukunnissa.

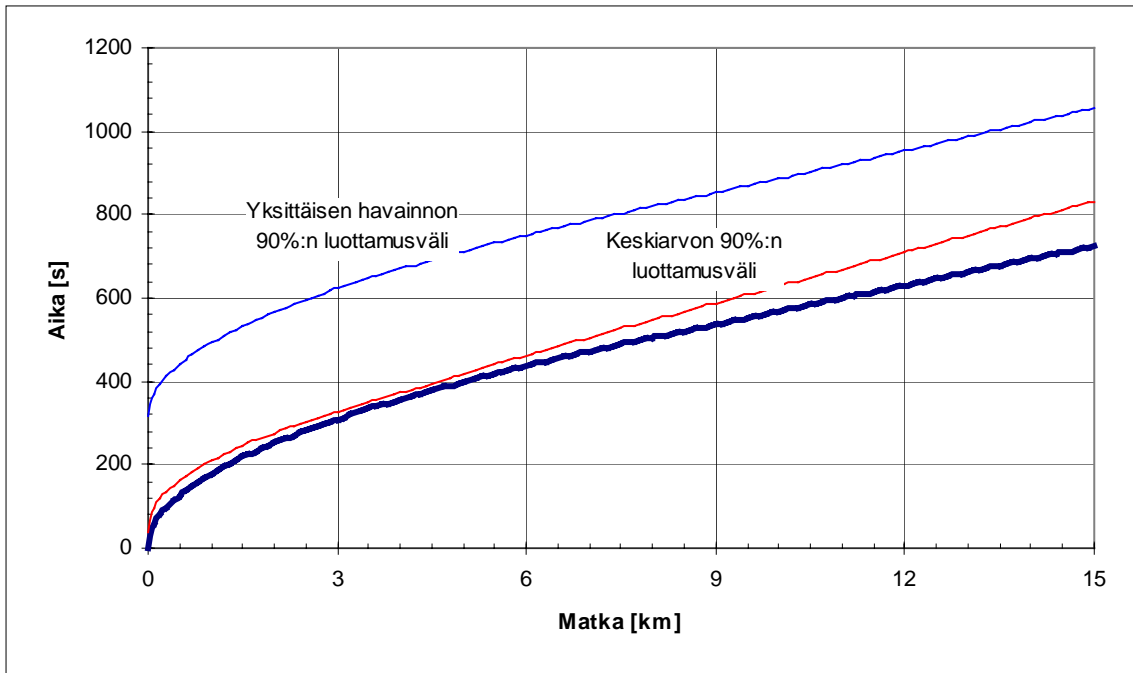
Voidaan havaita vertaamalla kuvia 73 ja 74 Helsingin yksiköiden virheeseen 80 %:n luottamustasolla, etteivät alueelliset erot ole tilastollisesti merkittäviä.

Eri alueiden pelastus- ja johtoyksiköiden havainnot yhdistettiin ja näihin havaintoihin sovitettiin STATISTICAlla uusi sovitekäyrä. Yhteensä pelastusyksikköhavaintoja oli 426 kappaletta ja johtoyksikköhavaintoja 243 kappaletta. Sovitekäyrien parametrien arvot ovat taulukossa 27.

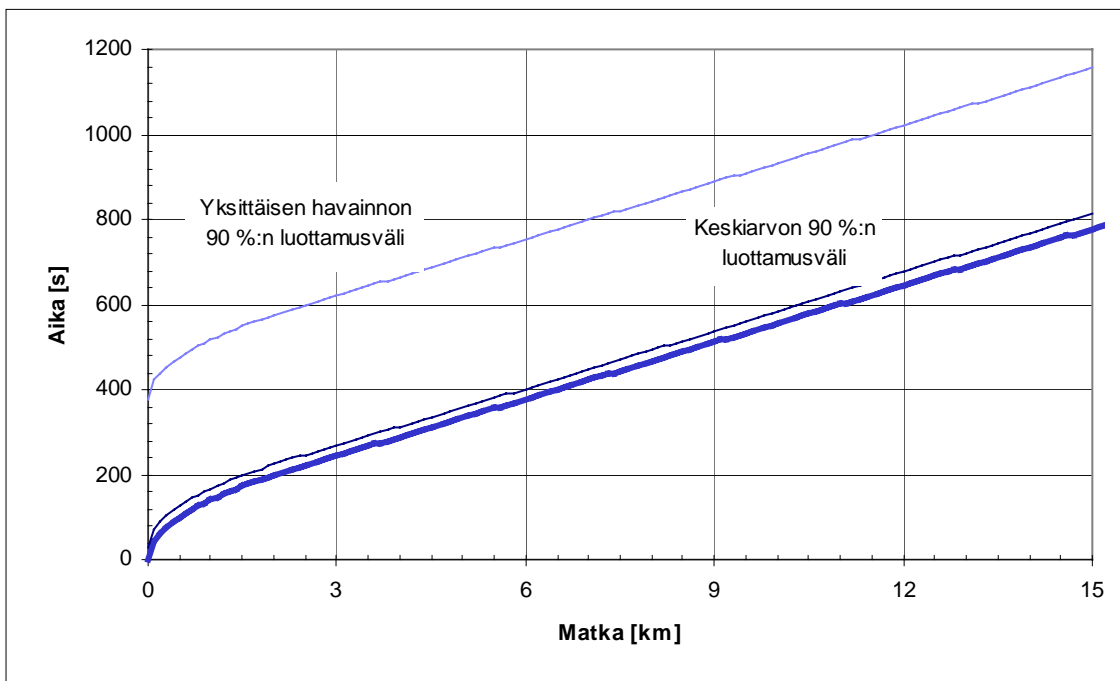
Taulukko 27. Alueiden yhdistettyihin havaintoihin sovitettujen käyrien parametrien arvot pelastus- ja johtoyksiköille.

	a	b	c	d [km]
Pelastusyksiköt	178,5	31,5	252,9	8,0
Johtoyksiköt	140,3	44,5	110,7	2,5

Sovitteet alueiden yhdistetyille havainnoille on esitetty kuvissa 75 ja 76. Kuviin on piirretty lisäksi 90 %:n luottamusvälit keskiarvolle sekä yksittäiselle havainnolle.



Kuva 75. Helsingin, Tampereen ja maaseudun pelastusyksiköiden yhdistettyihin havaintoihin sovitettu käyrä sekä 90 %:n luottamusvälit.



Kuva 76. Helsingin, Tampereen ja maaseudun johtoyksiköiden yhdistettyihin havaintoihin sovitettu käyrä sekä 90 %:n luottamusvälit.

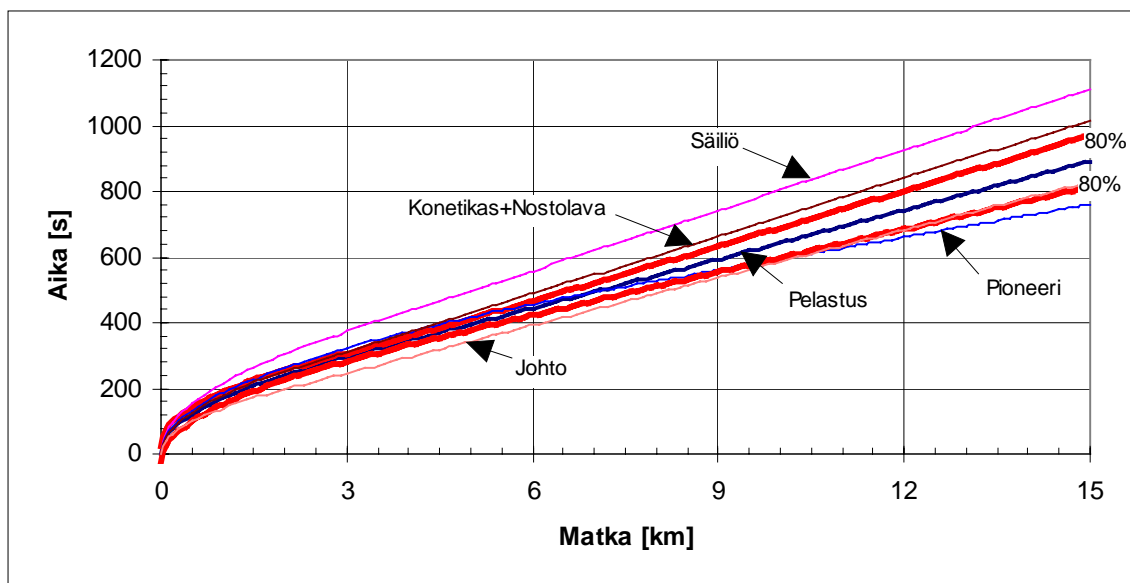
Kuvissa 75 ja 76 paksumpi käyrä on sovitteikäyrä ja alempi luottamusvälikuvaaja on keskiarvon luottamusväli ja ylempi yksittäisen havainnon luottamusväli. Kuvista 75 ja 76 voidaan tulkita, että jos matkaa kohteeseen on kuusi kilometriä, niin 90 %:n luottamustasolla pelastusyksikön ajoaika kohteeseen on keskimäärin 463 sekuntia eli 7,7 minuut-

tia ja johtoyksikön keskimäärin 402 sekuntia eli 6,7 minuuttia. Kuvien ylemmistä luottamustasokäyristä nähdään, että 90 %:n luottamustasolla pelastusyksikkö ajaa kohteeseen enintään 751 sekuntia eli 12,5 minuuttia ja johtoyksikkö 754 sekuntia eli 12,6 minuuttia.

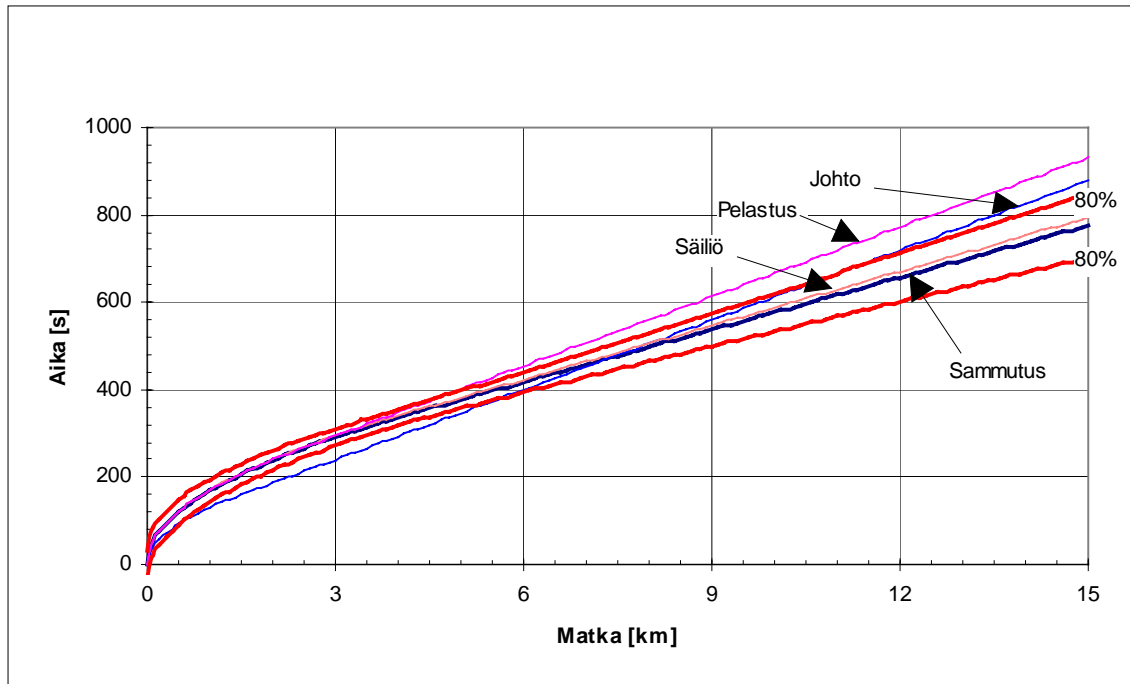
Kuvista 75 ja 76 havaitaan keskiarvokäyrän virherajan olevan alle 10 kilometrin ajo- matkoilla niin pieni, ettei virhe aiheuta kovin suurta vaikutusta palokunnan toiminta- kyvyn arviointiin keskimäärin. Sitä vastoin yksittäisen ajoajan virhe 90 %:n luottamus- tasolla on merkittävän suuri itse ajoaikaan verrattuna (esim. 3 kilometrin matkalla 100 % ja 10 kilometrin matkalla 57 %) On ilmeistä, että näin suuren lisän ottaminen ajoai- koihin antaa epäedullisen kuvan yksikön toiminnasta, ja mallia pitäisi jatkossa tarkentaa.

6.6.3.2 Alueittainen yhdistely

Eri yksikköryhmien eroja eri alueilla tutkittiin siten, että Helsingissä, Tampereella ja maaseudulla samaan kuvaan piirrettiin kaikkien tarkasteltavien yksiköiden sovite- kuvaajat. Helsingin ja Tampereen kuviin piirrettiin lisäksi pelastusyksiköiden kuvaajan 80 %:n luottamuskäyriä ja tarkasteltiin muiden yksiköiden kuvaajien sijoittumista siihen nähden. Luottamuskäyriä on merkitty paksuilla viivoilla kuvissa 77 ja 78.

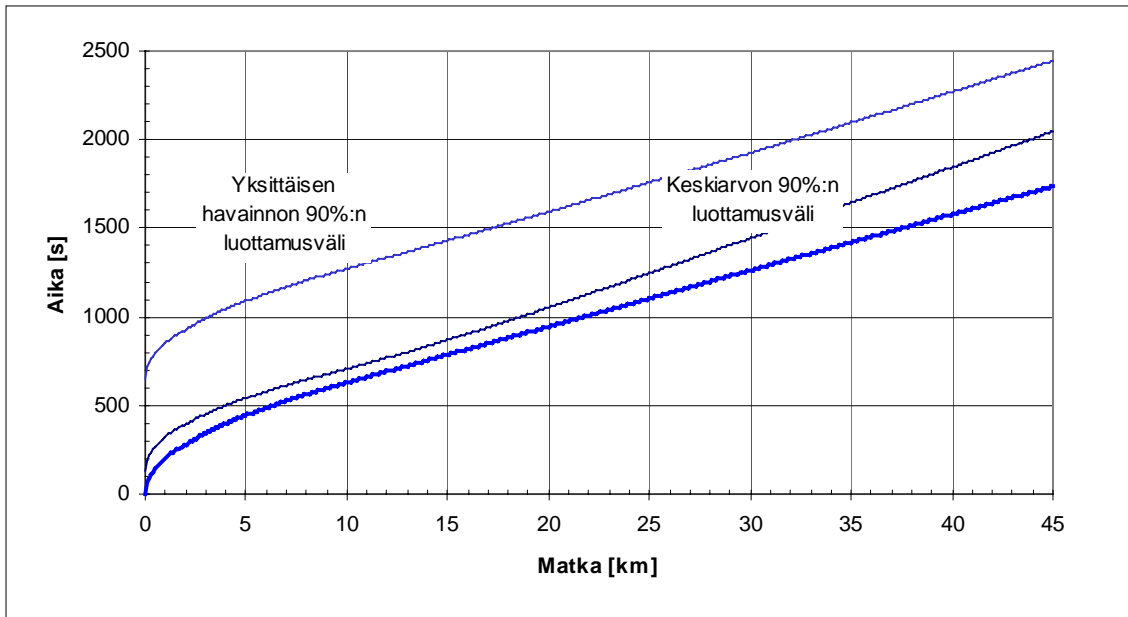


Kuva 77. Eri yksiköiden sovitekuvaajat Helsingissä ja Helsingin pelastusyksiköiden 80 %:n luottamuskäyriä.



Kuva 78. Eri yksiköiden sovitekuvaajat Tampereella ja Tampereen pelastusyksiköiden 80 %:n luottamusvälikuvaaja.

Havaitaan eri yksiköiden ajoajoissa olevan selviä eroja molemmissa kaupungeissa. Luonnollisestihan raskaampien yksiköiden, kuten säiliöyksikköjen, ajoaika on pitempi kuin kevyempien yksiköiden, jotka saavuttavat suuremman ajonopeuden ja siten kohteen aikaisemmin. Helsingissä ja Tampereella eri yksiköiden havaintoja ei ryhdytty yhdistämään, kunkin yksikköryhmän sovitekäyrät luottamusväleineen ovat nähtävissä liitteessä I. Maaseudulla pelastus- ja säiliöyksiköiden sovitekäyrät eivät poikenneet merkittävästi toisistaan. Sen sijaan johtoyksiköiden havaintoihin sovitettu kuvaaja poikkesi edellisistä, mutta havaintojoukon pienuuden takia ($N = 15$) ei kuvaaja välttämättä kuvaa todellisuutta kovinkaan hyvin. Maaseudun kaikki havainnot yhdistettiin, jolloin niitä oli yhteensä 69 kappaletta ja näihin havaintoihin sovitettiin kuvassa 79 käyrä, jolle määritettiin luottamusvälit samoin kuin edellä. Kuvan 79 sovitekäyrän parametrien arvoiksi saatiin $a = 198,9$, $b = 31,7$, $c = 312,6$ ja $d = 9,9$ km.



Kuva 79. Maaseudun yhdistettyihin havaintoihin sovitettu kuvaaja ja 90 %:n luottamusvälit.

6.6.3.3 Yhteenveto

Tässä kohdassa esitettävät tulokset ovat vain suuntaa antavia. Tarkempien tuloksien saamiseksi olisi havaintojoukkoa kasvatettava, lisäksi käytössä tulisi olla todelliset ajoamatkat. Jos havaintojoukko on riittävän suuri, voidaan ottaa huomioon myös monien seikkojen, kuten vuorokaudenajan, vaikutus ajoaikoihin. Karkean mallinnuksen tuloksena saatiin, että ajoaika T [s] voidaan määrittää pelastusyksiköille kaavasta

$$T_{pelastus} = \begin{cases} 178,5\sqrt{s} , & \text{kun } s \leq 8,0 \text{ km} \\ 31,5s + 252,9 , & \text{kun } s \geq 8,0 \text{ km} \end{cases} \quad (193)$$

ja johtoyksiköille kaavasta

$$T_{johto} = \begin{cases} 140,3\sqrt{s} , & \text{kun } s \leq 2,5 \text{ km} \\ 44,5s + 110,7 , & \text{kun } s \geq 2,5 \text{ km} \end{cases} \quad (194)$$

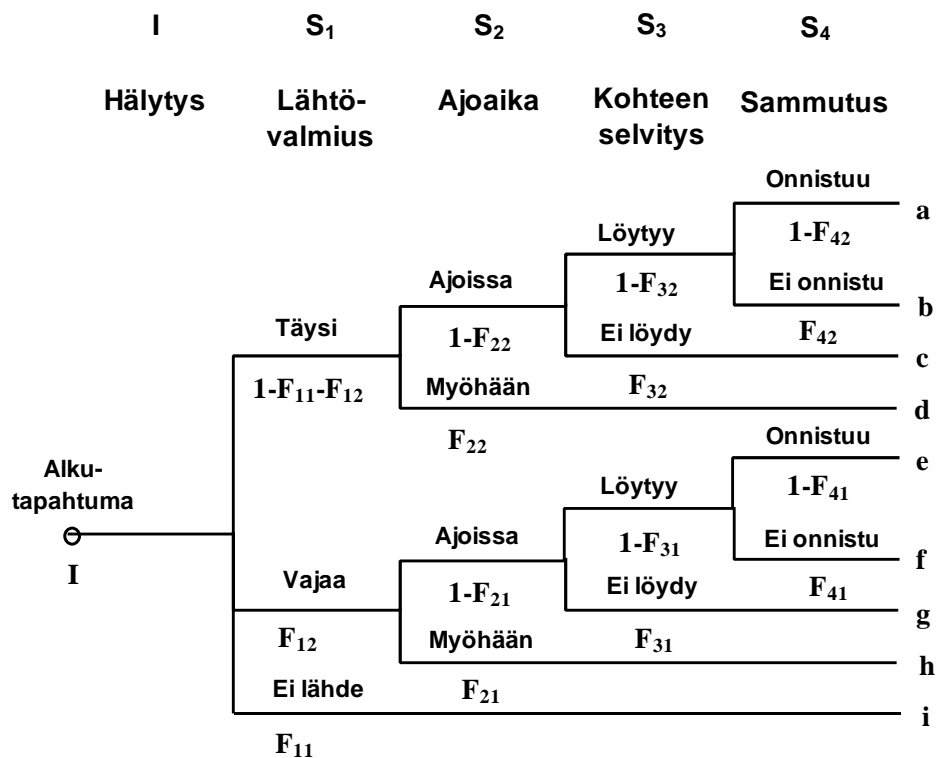
Havaintojoukoissa hajonta oli suuri, ja tämän vuoksi yksittäisen ajoajan virheet olivat melko suuria. Ajoajan keskiarvon luottamusraja ei kuitenkaan kasvanut kohtuuttoman suureksi, jonka vuoksi eri ajoneuvoryhmien keskiarvokäyrät olivat yhdistettävissä yleispätevimmiiksi käyriksi. Tämä yksinkertaisin mahdollinen malli ei ota huomioon kaikkia ajoaikaan vaikuttavia tekijöitä, kuten keliolosuhteita, liikennetiheyttä tai tien laatua. Kun mallien käytöstä saadaan lisää kokemuksia, voidaan arvioida, kuinka tätä mallia voitaisiin parantaa.

7. Palokunnan epäonnistumisen arviointi

7.1 Teoreettisia perusteita

7.1.1 Epäonnistumisen tapahtuma- ja vikapuu

Palosäädöksissä on usein hiljaisena oletuksena, että tietyn ajan kuluttua palokunta on paikalla ja sammuttaa tai rajaa palon. Jo lyhyen ajan lehtileikeotanta paljastaa kuitenkin, että palokunnan suorituskyky vaihtelee laajoissa rajoissa, eikä paikkakunta ole välttämättä ainut epäonnistumisen selittävä tekijä (Katajamäki 1997, 1998, Anon. 1999). Tässä luvussa hahmotellaan riskianalyttinen menetelmä, jolla palokunnan epäonnistuminen voidaan arvioida puolikvantitatiivisesti käyttäen tässä työssä edellä kerättyä tietoa. Koska palokunnan ja erityisesti pelastustoimen tehtävät ovat hyvin moninaiset, niitä ei yritetäkään arvioida mitenkään kokonaisvaltaisesti vaan keskitytään tiettyyn operatiiviseen tehtävään, joka määrittyy kuvan 1 vaurioitumisen vikapuusta. Heti aluksi on huomautettava, että yhdelle rakennukselle ja sen yhdelle tulipalolle voidaan piirtää useita kuvan 1 mukaisia vikapuita vaihtamalla huipputapahtuman luonnetta tai fyysistä kohdetta rakennuksessa. Alempana käsittelemme laskentaesimerkkinä tapauksen, jota sopivasti yleistämällä useimmat vastaavat tapaukset ovat arvioitavissa.



Kuva 80a. Palokunnan epäonnistumisen tapahtumapuu.

Kuvan 1 4.4 ”Palokunta epäonnistuu” -laatikon arvon määrittämiseksi tarkastellaan palokunnan operatiivisia yksiköitä kuvan 80a tapahtumapuuta käyttäen. Alkutapahtumasta (I), joka on palohälytys, operatiivinen tehtävä jaetaan neljään eri osaan: (S_1) lähtövalmius, (S_2) ajoaika, (S_3) kohteen selvitys ja (S_4) sammutus. Osaan S_1 kuuluvat kaikki toiminnot palohälytyksen vastaanottamisesta hälytyskeskukseen tai asemalle siihen saakka, kun hälytysajoneuvo lähtee liikkeelle. Osaan S_2 luetaan kaikki tapahtumat ajoneuvon liikkeellelähdestä siihen hetkeen, kun se pysähtyy palokohteen tontille. Osaan S_3 kuuluvat yksikön kaluston selvitys, kohteen tiedustelu ja itse palopesäkkeen etsintä rakennuksesta. Osa S_4 on itse sammutustapahtuma. Tässä käytetty jako ei ole mitenkään ainut mahdollinen mutta vastaa likipitään prosessin virtauksen logiikkaa ja niitä osia, joita tilastoinnissa (ONTIKA) seurataan erikseen. Kukin osa S_i voidaan periaatteessa pilkkoa pienempiin osiin, mikäli näistä osista on saatavissa riittävästi havaintoja. Erityisesti osa S_3 olisi loogista jakaa eri osiin, mutta sitä ei tehdä, koska siitä meillä Suomesta ei ole vielä todellisiin mittauksiin perustuvaa tietoa. Taulukossa 28a on esitetty eri tapahtumaketjut. Kuvan 80a oikeaan laitaan on kirjoitettu tapahtumaketjut symbolisesti merkitsemällä onnistunutta tapahtumaa S_i :llä ja epäonnistunutta F_i :llä (McCormick 1981). Ensimmäisessä approksimaatiossa ketjujen eri osia voidaan pitää toisistaan riippumattomina ehkä lukuun ottamatta osaa S_4 , jonka todennäköisyyteen vaikuttaa koko edeltävän ketjun suoritukseen kuluva aika.

Taulukko 28a. Kuvan 80a tapahtumapuun tapahtumaketjut.

a	$(1-F_{11}-F_{12})(1-F_{22})(1-F_{32})(1-F_{42})$
b	$(1-F_{11}-F_{12})(1-F_{22})(1-F_{32})F_{42}$
c	$(1-F_{11}-F_{12})(1-F_{22})F_{32}$
d	$(1-F_{11}-F_{12})F_{22}$
e	$F_{12}(1-F_{21})(1-F_{31})(1-F_{41})$
f	$F_{12}(1-F_{21})(1-F_{31})F_{41}$
g	$F_{12}(1-F_{21})F_{31}$
h	$F_{12}F_{21}$
i	F_{11}

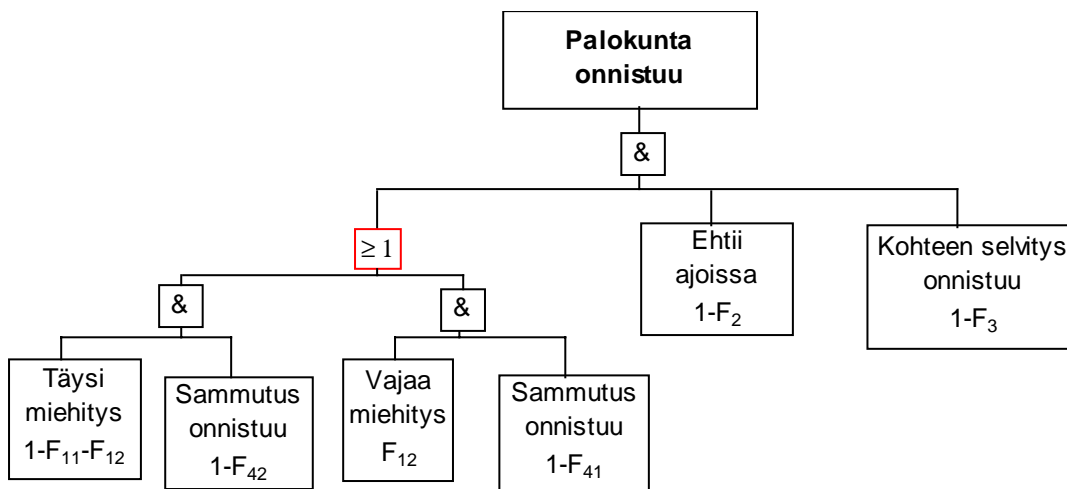
Kuvan 80a tapahtumapuusta havaitaan, että sammuttamisen onnistumisen todennäköisyys on ketjujen a ja e summa. Epäonnistumistodennäköisyys saadaan onnistumistodennäköisyyden komplementtina. Kun ketjut a ja e summataan, saadaan

$$a + e = (1 - F_{11} - F_{12})(1 - F_{22})(1 - F_{32})(1 - F_{42}) + F_{12}(1 - F_{21})(1 - F_{31})(1 - F_{41}). \quad (195a)$$

Tapahtumapuusta (kuva 80a) nähdään, että palokunta voi lähteä hälytykseen joko vajaalla tai täydellä miehityksellä. Kummassakin tapauksessa ensimmäisen yksikön ajoaika palopaikalle voidaan olettaa samansuuruisiksi, jolloin $F_{21} = F_{22} = F_2$. Samoin oletetaan, ettei ensilähdön miehitys vaikuta kohteen selvitystodennäköisyyteen, jolloin myös $F_{31} = F_{32} = F_3$. Tällöin yhtälö (195a) yksinkertaistuu muotoon

$$a + e = (1 - F_2)(1 - F_3)[(1 - F_{11} - F_{12})(1 - F_{42}) + F_{12}(1 - F_{41})]. \quad (195b)$$

Kuvassa 80b tämä on piirretty vikapuun muotoon, jossa huipputapahtumana on palokunnan onnistumistodennäköisyys. Epäonnistuminen saadaan tämän komplementtina.

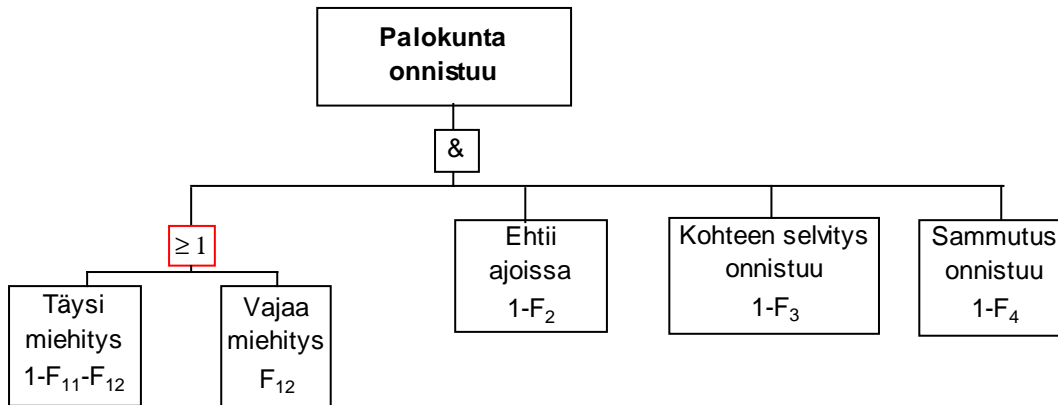


Kuva 80b. Palokunnan onnistumisen vikapuun diagrammi.

Jos kunkin laatikon todennäköisyydet ovat tunnettuja, palokunnan onnistumisen todennäköisyys voidaan määrittää. Koska sammutuksen onnistumisen todennäköisyydestä ei ole käytettävissä riittävästi tutkimustuloksia, ei siitä voida tehdä luotettavia arvioita tällä tarkkuudella. Tämän vuoksi yksinkertaistetaan vikapuuta edelleen olettamalla sammutuksen onnistumistodennäköisyyden olevan samansuuruinen sekä vajaalla että täydellä miehityksellä. Tällöin kaava (195a) yksinkertaistuu muotoon

$$a + e = (1 - F_{11})(1 - F_2)(1 - F_3)(1 - F_4), \quad (195c)$$

joka on esitetty vikapuuna kuvassa 80c.



Kuva 80c. Palokunnan onnistumisen vikapuuh.

Jotta sammuttamisen onnistumistodennäköisyys ei olisi tapauskohtainen, jonka arvioimiseksi ei ole lisäksi menetelmiä, ehdotetaan käänteistä keinoa käyttämällä sammutettavan kohteen kriittistä palotehoa (esim. $P_{kr} = 15 \text{ MW} / \text{sammutuspari}$, kuten kohdassa 7.1.2 perustellaan), jossa onnistumistodennäköisyys olisi 80 % määritelmän mukaan. Silloin sammutustodennäköisyys olisi riippumaton edeltävästä tapahtumaketjusta ja $P(S_4) = 0,8$ sekä $F(S_4) = 0,2$. Koko ketjun todennäköisyyksien laskeminen siirtyisi tehtäväksi arvioida, millä todennäköisyydellä palokunta on paikalla sammutusvalmiudessa ennen hetkeä $P(t_{kr}) = P_{kr}$. Tämän laskemiseen tähän raporttiin on kehitetty kvantitatiiviset arviointitavat (paitsi vaiheelle S_3).

Edellä esitetyt vikapuut eivät ole yksikäsitteisiä eivätkä ainoita mahdollisia. Ne on pyritty konstruoimaan pitäen mielessä kaksi periaatetta. (a) Ensinnäkin vikapuuhun on oltava mahdollisimman yksinkertainen, mutta kuitenkin kohdetta kuvaava ja (b) lisäksi eri tekijöiden todennäköisyydet on pystyttävä hankkimaan tilastotiedoista eikä pelkästään asiantuntija-arviolla. Tärkein tilastolähteenne on ONTIKA-tietokanta ja siihen sisältyvät kohteesta talletettavat tiedot ovat suurelta osalta sanalleet vikapuiden erittelyasteen.

7.1.2 Palokunnan sammutuskyky

Palokunnan sammutuksen epäonnistuminen palopaikalla ei ole yksikäsitteisesti määriteltävissä. Useita kvantitatiivisia menetelmiä voidaan ehdottaa, mutta useimmat määritelmät ovat mittausvaikeuksien vuoksi vaikeita saattaa käytäntöön. Siten esimerkiksi palavan alueen pinta-ala, jota on Britanniassa käytetty tilastotarkasteluissa (Keski-Rahkonen & Björkman 1999a), olisi käsitteenä yksinkertainen, mutta meillä ei ole siitä tällä hetkellä havaintotietoa siten, että voisimme soveltaa sitä käytäntöön. Epäonnistuminen ei myöskään ole mustavalkoinen kyllä-eisuure, vaan pikemminkin jatkuva, mikä jollain kvantitatiivisella suhteellisella asteikolla on mitattavissa välillä 0–1 (0–100 %).

ONTIKA-järjestelmässä rakennuspalon suuruutta arvioidaan suhteessa huonetilojen koon: osa syttymisosasto, koko syttymisosasto, palo-osasto, useampi palo-osasto, naapuri. Teemme hyvin karkean onnistumiskriteeriedotuksen: palon sammutusoperaatiota kohteessa pidetään onnistuneena, jos palo tilanteen lopussa pysyy saman ONTIKAN kategorian sisällä kuin se on palokunnan saapuessa paikalle. Muussa tapauksessa sammuttaminen epäonnistuu. Sen perusteella voimme määrittää ONTIKasta kvantitatiivisesti epäonnistumisten määrät. Epäonnistumistodennäköisyyden keskimääräisten numeeristen arvojen määrittäminen ONTIKA-tietokannasta on karkeasti yritetty ja havaittu sen mahdollisuudet (Keski-Rahkonen & Björkman 1999a), mutta yksityiskohtaisempien arvojen määrittäminen analysointi erityyppisiin tilanteisiin on vielä keskeneräinen (Keski-Rahkonen & Björkman 1999b).

Kriittisen palotehon arvioimiseksi oletamme käytettävän yleisintä sammutetta, vettä. Saatavan veden määrä riippuu kohteesta. Yhdellä suihkulla on mahdollista saavuttaa virtaama 10–50 l/s, missä alaraja on lähellä todellisuudessa saavutettavaa tilannetta epäedullisissakin olosuhteissa. Vettä riittää 1 m³ säiliöstä tälle suihkulle 1,4 min ja 10 m³ säiliöstä 14 min. Suihkuja voidaan käyttää useitakin, mutta ensimmäinen suihku on ratkaisevin arvioitaessa, päästääkö tulen herraksi syttymiskohdan välittömässä ympäristössä. Veden sammutuskyky vaihtelee laajoissa rajoissa käytännön kohteista saadun tilastotiedon valossa. Veden jäähdytyskapasiteetille voidaan laskea tarkat arvot, jotka tunnetaan, mutta kaikkea käytettyä vettä ei voida ohjata suoraan sammutettavaan kohteeseen. Rasbash (1986) on esittänyt sammuttamiseen tarvittavan vesivuontiheyden olevan jähmeille aineille 1,3–11 g/m²s. Thomas (1959) havaitsi suppeassa tilastanalyysissä, että sammutukseen tarvittavien suihkujen lukumäärä J oli verrannollinen palon pinta-alan A (m²) neliöjuureen

$$J = 0,33\sqrt{A} = 0,09P, \quad (195d)$$

missä kaavan jälkimmäinen osa osoittaa suihkujen määrän kasvavan suoraan verrannollisena palon piiriin P (m). Käytännön esimerkkinä kaavan (195b) perusteella laskien 10 m² palon sammuttamiseen tarvitaan 1 suihku, 100 m² sammuttamiseen 3 ja 1 000 m² sammuttamiseen 10 suihkua. Nämä luvut saattavat olla Suomessa nyt käytössä olevilla välineillä erilaisia ja tulokset on esitetty pelkästään keskustelun kirvoittamiseksi.

Yu ym. (1994) päätyivät sammutuskokeillaan kriittisen vesivuon arvoon 7–18 g/m²s erilaisille korkeavarastossa oleville standardipakkauksille. Olettaen Thomasin (1959) tilastojen suihkun virtaaman olevan 10 l/s, kaavan (195b) mukaan saatavat vesivuon tiheydet ovat alueella 1 000–100 g/m²s, kun pinta-ala on välillä 10–1 000 m². Tästä nähdään, että määrä on 10–100-kertainen kriittiseen vesivuohon verrattuna.

Suihkun jäähdytysvaikutuksen perusteella veden sammutusteho on vesivirralla 1 l/s 3,5 MW. Ottaen huomioon, että koko liekkien energiamäärää ei tarvitse jäähdyttää mutta toisaalta kaikki vesi ei osu kohteeseen, voidaan ottaa hypoteesiksi, että suihku 10 l/s voi sammuttaa 15 MW:n palon. Tämä arvo on vielä aika mielivaltainen, mutta on tässä esillä keskustelun aloittamiseksi. Seuraavissa esimerkeissä $P_{kr} = 15$ MW ja palokunnan onnistumista arvioidaan ajanhetkeen, jolloin paloteho ylittää tämän rajan.

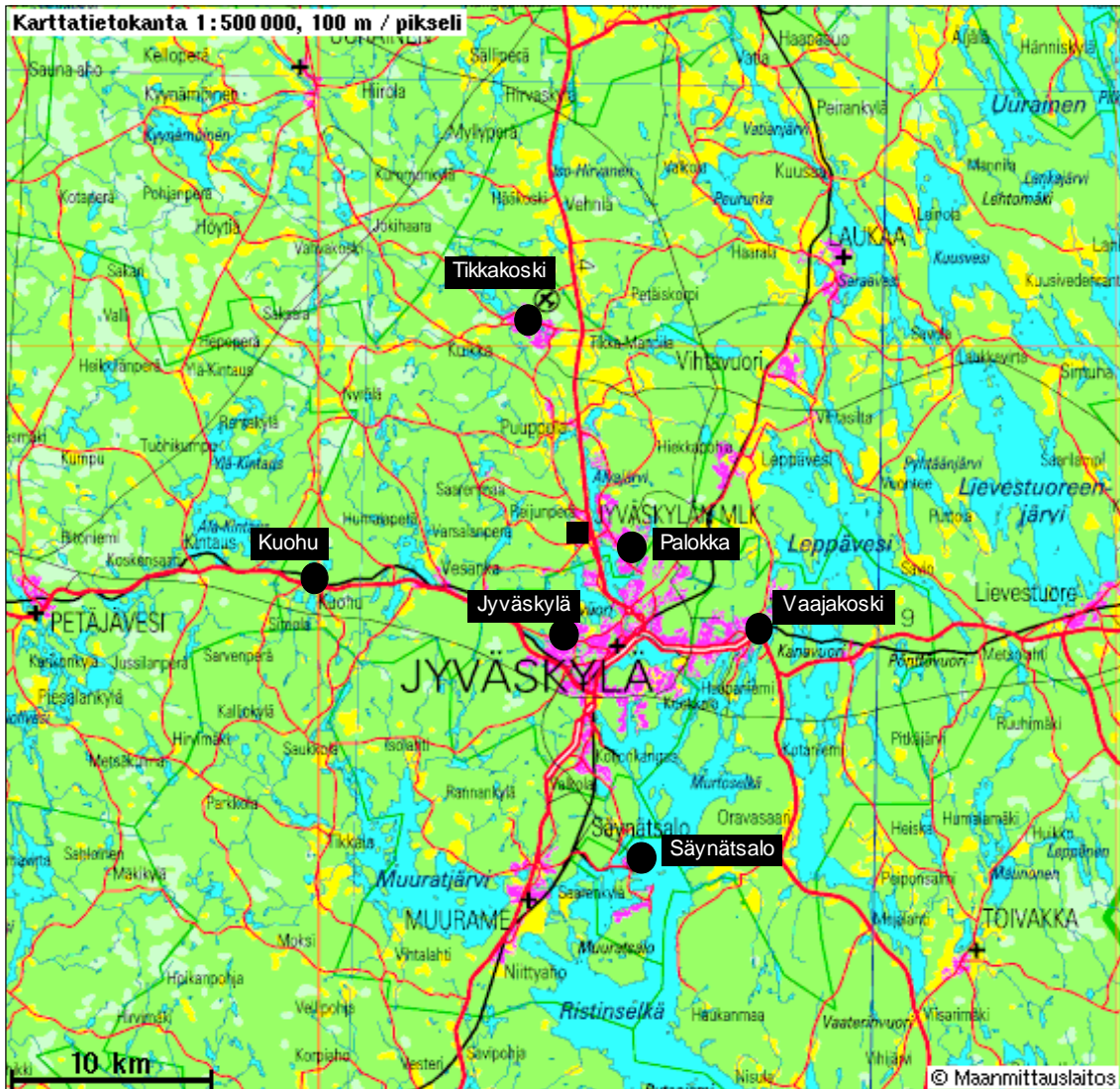
7.2 Suuri liikerakennus Jyväskylän alueella

7.2.1 Ehtiikö palokunta ajoissa?

Otetaan esimerkiksi Keski-Palokassa sijaitseva liikerakennus (kuva 81), joka on pinta-alaltaan 10 500 neliometriä. Rakennuksen kerrosala on niin suuri, että sieltä hälytettävään paloon komennetaan todennäköisesti aluelähtö. Etäisyydet Jyväskylän seudun eri paloasemilta tähän kohteeseen ovat taulukossa 28b. Kuvassa 81 näkyvät tarkasteltavat paloasemat mustina ympyröinä ja onnettomuuskohtetta on merkitty mustalla neliöllä. Matkat on mitattu käsivaraisesti kartalta sekä linnuntietä että maantietä. Mittaustavan taktia matkat eivät välttämättä ole tarkalleen paikkansa pitäviä, mutta suuruusluokka on kuitenkin oikea. Taulukossa 28b on näkyvissä myös ajomatkan avulla kaavoista (193) ja (194) määritettävät pelastus- sekä johtoyksiköiden ajoajat kohteeseen ja ajoajan maksimivirhe 80 %:n luottamustasolla.

Taulukko 28b. Matkat kultakin paloasemalta kohteeseen sekä linnuntietä että maantietä ja pelastus- sekä johtoyksiköiden keskimääräiset ajoajat minuutteina. + -merkin jälkeen on ajoajan maksimivirhe 80 %:n luottamusvälillä.

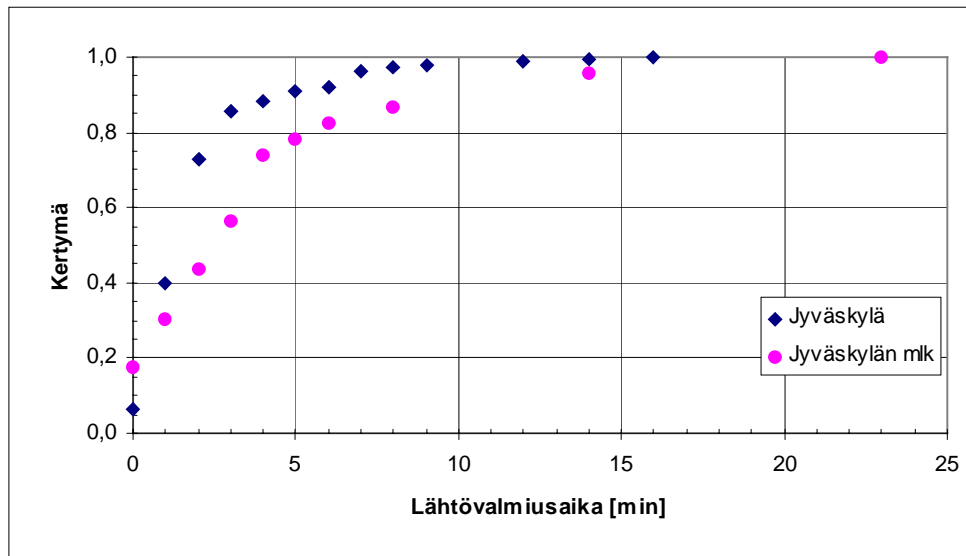
	Matka [km]		Ajoaika [min] Pelastusyksiköt		Ajoaika [min] Johtoyksiköt	
	Linnuntie	Maantie	Linnuntie	Maantie	Linnuntie	Maantie
Palokka	2,2	3,1	4,4+4,1	5,2+4,1	3,4+4,9	4,1+4,9
Jyväskylä	5,6	9,1	7,0+4,1	9,0+4,1	6,0+4,9	8,6+4,9
Vaajakoski	10,0	12,8	9,4+4,1	10,9+4,2	9,2+4,9	11,3+4,9
Tikkakoski	12,3	14,1	10,7+4,2	11,6+4,2	10,9+4,9	12,3+4,9
Kuohu	14,5	16,5	11,8+4,3	12,9+4,3	12,6+4,9	14,1+4,9
Säynätsalo	16,8	22,0	13,0+4,4	15,8+4,6	14,3+4,9	18,2+4,9



Kuva 81. Tarkasteltavat Jyväskylän seudun paloasemat. Onnettomuuskohdetta on merkitty mustalla neliöllä.

Vuonna 1996 oli ONTIKAan kirjautunut Jyväskylässä sekä Jyväskylän maalaiskunnassa yhteensä 40 rakennuspaloa, joihin oli osallistunut 151 palo- ja pelastustoimen operatiivista yksikköä Jyväskylältä sekä 23 yksikköä Jyväskylän maalaiskunnasta. Näistä havainnoista piirrettiin lähtövalmiusajan kertymäkuvaajat molemmille alueille. Kuvasta 82 nähdään, että 50 %:ssa onnettomuuksista Jyväskylässä lähtövalmiusaika oli pienempi kuin 1,3 minuuttia ja maalaiskunnassa pienempi kuin 2,5 minuuttia. 80 %:ssa onnettomuuksista Jyväskylässä lähtövalmiusaika oli pienempi kuin 2,6 minuuttia ja maalaiskunnassa pienempi kuin 5,4 minuuttia. Jyväskylän maalaiskunnan paloasemat ovat kaikki II valmiusasteen palokuntia. Kun lähtövalmiusaika lisätään ajoaikoihin, saadaan aika, jossa yksikkö on hälytyskäsken saatuaan saapunut perille kohteeseen. Perille tulon jälkeen kestää vielä hetken ennen kuin yksikkö on valmiina sammutustoiimiin. Arvioidaan australialaisen raportin perusteella palomiehen etenemisnopeudeksi 1,9 m/s (Australasian Fire Authorities Council 1997). 70 metrin matkaan kuluu tällöin 37 sekun-

tia. Aikaa palopaikalle pääsyyn eli oven murtamiseen tai avaimella avaamiseen päätel-
lään saman raportin mukaisesti kuluva 30 sekuntia. Yhteensä aikaa kuluu 67 sekuntia,
joka lisätään lähtövalmius- ja ajoaikoihin.



Kuva 82. Palo- ja pelastustoimen lähtövalmiusaika Jyväskylässä ja Jyväskylän maalais-
kunnassa vuonna 1996.

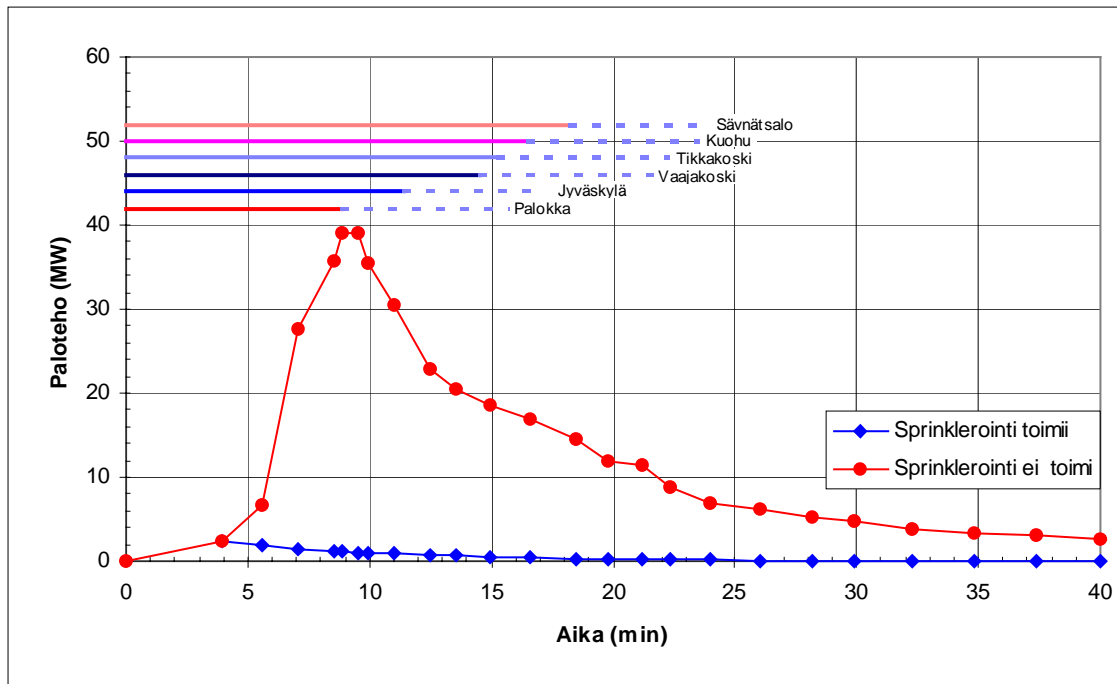
Taulukossa 29 arvioitu kokonaisaika, joka kunkin aseman johto- ja pelastusyksiköiltä
yksiköltä menee hälytyksestä sammutustoimien alkamishetkeen.

Taulukko 29. Arvioitu pelastus- ja johtoyksiköiden kuluttama keskimääräinen aika häly-
tyksestä sammutustoimien alkamiseen. + -merkin jälkeen on merkitty ajan maksimivirhe
80 %:n luottamustasolla.

	Pelastusyksiköt [min]		Johtoyksiköt [min]	
	Linnuntie	Maantie	Linnuntie	Maantie
Palokka	8,0+7,0	8,8+7,0	7,1+7,8	7,8+7,8
Jyväskylä	9,5+5,4	11,4+5,4	8,4+6,2	11,0+6,2
Vaajakoski	13,1+7,0	14,6+7,1	12,9+7,8	15,0+7,8
Tikkakoski	14,3+7,1	15,3+7,1	14,6+7,8	16,0+7,8
Kuuhu	15,5+7,2	16,5+7,2	16,2+7,8	17,7+7,8
Säynätsalo	15,5+5,7	18,2+5,9	16,7+6,2	20,6+6,2

Arvioitaessa taulukon 29 aikoja käytetään kriteerinä kuvan 83 australialaisen palo-
kokeen mukaista palotehokäyrää (Bennets et al. 1998), jota voidaan pitää edustavimpa-
na suurimpana palona tällaisessa liikekeskuksessa. Tässä palokokeessa poltettiin va-

paassa tilassa kenkävaraston hylly, jolloin suurimmaksi palotehoksi saatiin 40 MW. Alempi käyrä kuvaa tapausta, jossa sprinklaus aktivoituu neljän minuutin kuluttua alkuhetkestä. Kuvaan on piirretty aikajanoina, milloin kunkin aseman pelastusyksikkö on paikalla ja aloittaa sammutustoimet. Janoissa on käytetty taulukon 29 aikoja, joissa pelastusyksiköiden ajomatka on mitattu maantietä pitkin. Yhtenäisellä viivalla on merkitty sen ajan keskiarvoa, jossa yksikkö on hälytyksen jälkeen valmiina aloittamaan sammutustoimet, ja katkoviivalla on merkitty 80 %:n luottamustasolla saman ajan enimmäisarvoa.



Kuva 83. Kenkävarastohyllyn paloteho, kun kohteessa sprinklaus toimii tai ei toimi (Bennets 1998). Aikajanoina kunkin aseman pelastusyksiköiden kuluttama aika hälytyksestä sammutustoimien aloittamiseen 50 %:n ja 80 %:n luottamustasoilla.

Kun oletetaan, ettei kohteen sprinklaus toimi, nähdään kuvasta 83 palotehon saavuttavan huippuarvonsa yhdeksän minuutin kuluttua palon alusta. Tarkkaa hetkeä sille, jolloin palo on vielä mahdollista saada hallintaan, on vaikea määrittää, mutta otetaan tässä kriteeriksi, että onnistuakseen palokunnan on oltava paikalla ennen kuin paloteho saavuttaa edellä esitetyn kriittisen palotehon arvon 15 MW. Tämä tapahtuu 6,2 min kuluttua palon alkuhetkestä. Jos oletetaan, että sprinklaus aktivoituu neljän minuutin kuluttua palon alusta, palotehon huippuarvo jää huomattavasti alemmaksi (kuva 83). Palotehon arvot sprinklauksen aktivoiduttua saadaan kaavasta (Madrzykowski & Vetteri 1992).

$$Q_c(t) = Q_{akt} \exp\left(-\frac{t}{435s}\right), \quad (195e)$$

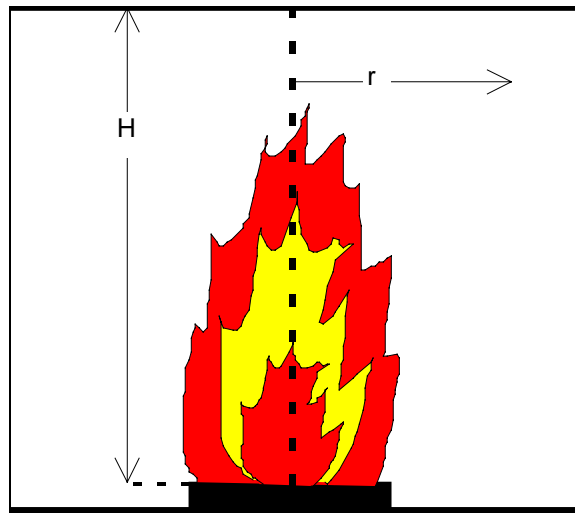
missä Q_{akt} on paloteho hetkellä, jolloin sprinklerit aktivoituvat, ja t on aika sprinklerien aktivoitumishetkestä sekunteina.

Lasketaan Alpertin kaavoista (196) ja (197) palokaasujen maksimilämpötila T_{max} katon rajassa, kun huoneen korkeus H on 5,45 metriä. Alpert on osoittanut, että millä tahansa säteen arvolla r palopatsaan akselista pystysuuntainen lämpötilajakauma saavuttaa maksimiarvonsa lähellä kattoa (Drysdale 1985). Symbolit ovat näkyvissä kuvassa 84.

$$T_{max} - T_{\infty} = \frac{5,38 \left(\frac{Q_c}{r} \right)^{\frac{2}{3}}}{H}, \text{ kun } r > 0,18H \quad (196)$$

$$T_{max} - T_{\infty} = \frac{16,9 Q_c^{\frac{2}{3}}}{H^{\frac{5}{3}}}, \text{ kun } r \leq 0,18H, \quad (197)$$

missä Q_c on paloteho kilowatteina ja T_{∞} ympäristön lämpötila.



Kuva 84. Alpertin kaavojen palopatsas.

Lasketaan kaavasta (197) palopatsaan lämpötila, kun paloteho tapauksessa, jossa sprinklaus ei toimi, on 40 MW ja kun sprinklaus toimii, 2,3 MW. Ympäristön lämpötila molemmissa tapauksissa on 20 °C. Näillä arvoilla saadaan palopatsaan lämpötilaksi, kun sprinklaus ei toimi, 1191 °C alle 0,98 m etäisyydellä palopatsaan keskiakselista. Kun sprinklaus aktivoituu neljän minuutin kuluttua alkuhetkestä, vastaava lämpötilan arvo on 194 °C.

Kuvan 83 perusteella havaitaan, että ensimmäisenä sammutustoimiin ehtii Palokan pelastusyksikkö keskimäärin 8,9 minuutin kuluttua hälytyksestä. 80 %:n luottamus-

tasolla yksikkö on sammutustoimissa viimeistään 15,9 minuutin kuluttua hälytys-ilmoituksesta. Jos kohteen sprinklaus ei toimi, 50 %:n todennäköisyydellä paikalle ehtii yhdeksässä minuutissa pelastusyksikkö ja sekin saapuu paikalle juuri palotehon saavuttaessa huippunsa, jolloin palovahingot kohteessa nousevat suuriksi. Jos taas sprinklaus toimii, ehtii palo- ja pelastustoimi riittävän ajoissa kohteeseen saadakseen palon hallintaansa.

Jotta palokunta ehtisi ajoissa, kriteeriksi otettiin, että sen tulisi olla paikalla 6,2 min kuluttua hälytyksestä, jonka oletetaan olevan sama kuin palon alkamishetki. Määritetään todennäköisyys, jolla kahden ensimmäisenä paikalle saapuvan yksikön kuluttamien aikojen keskiarvo on tällä välillä. Todennäköisyys määritetään kahden ensimmäisen yksikön keskiarvon avulla sen vuoksi, että ensimmäisenä paikalle saapuva yksikkö tulee Palokan II valmiusasteen paloasemalta. Toisena paikalle saapuva yksikkö tulee Jyväskylän vakinaiselta paloasemalta. Lähtövalmiusajoiksi 30 %:n todennäköisyydellä saatiin Jyväskylässä 0,7 minuuttia ja Jyväskylän maalaiskunnassa 1,0 minuuttia. Ajoajan virheeksi saatiin tällöin Palokan sekä Jyväskylän pelastusyksiköille 3,4 minuuttia. Ajoaikaan ja lähtövalmiusaikaan lisätään lisäksi 67 sekunnin aika perille tulon ja sammutustoimien alkamisen väliseksi ajaksi. Ajat hälytyksestä sammutustoimien aloittamiseen 30 %:n luottamustasolla ovat taulukossa 30.

Taulukko 30. Palokan ja Jyväskylän pelastusyksiköiden kuluttama aika hälytyksestä sammutustoimien aloittamiseen 30 %:n luottamustasolla.

Paloasema	Lähtövalmiusaika [min]	Ajoaika [min]	Ajoajan virhe [min]	Aika saapumisesta sammutustoimien aloitukseen [min]	Yhteensä [min]
Palokka	1,0	5,2	3,4	1,1	3,9
Jyväskylä	0,7	9,0	3,4	1,1	7,4

Yksiköiden kuluttama aika 30 %:n luottamustasolla saadaan vähentämällä taulukon 30 kolmannen sarakkeen 50 %:n luottamustasolla ilmoitetusta ajoajasta neljännessä sarakkeessa esitetty virhe ja lisäämällä tähän arvoon lähtövalmiusaika ja aika saapumisesta sammutustoimien aloittamiseen. Näin saadaan Palokan pelastusyksikön kuluttamaksi ajaksi 3,9 minuuttia ja Jyväskylän 7,4 minuuttia. Näiden keskiarvo on 5,7 minuuttia, joka on alle vaaditun 6,2 min. Tämä tarkoittaa, että 30 %:n todennäköisyydellä palokunta ehtii ajoissa kohteeseen. Sen komplementtina saadaan todennäköisyys, ettei se ehti ajoissa, joka on siten

$$P_{\text{palokunta ei ehti ajoissa}} = 1 - 0,30 = 0,70. \quad (198)$$

7.2.2 Palokunta ei lähde koko vahvuudessaan

Kun palokunta ei lähde hälytykseen koko vahvuudessaan, paikalle lähetetään vaihtoehtoisesti joko vajaa määrä yksiköitä tai, jos kaikki yksiköt ovat jo varattuina, ei ollenkaan yksiköitä. Brušlinski (1988) on kehittänyt teorian, jonka mukaisesti voidaan määrittää todennäköisyydet näille tapauksille. Teoria ja laskentakaavat on esitetty kohdassa 4.1.4. Määritetään Jyväskylän seudun hälytysten määrä kaavasta (28), jossa käytetään asukaslukuna vuoden 1995 tietoja (Tilastokeskus), jolloin Jyväskylässä oli 74 072 ja Jyväskylän maalaiskunnassa 30 435 asukasta. Tällöin Jyväskylän ja sen maalaiskunnan rakennuspalojen lukumääräksi saadaan yhteensä

$$0,47 \cdot 104,507 = 49 \text{ rakennuspaloa.} \quad (199)$$

Arvioidaan kuhunkin hälytykseen tarvittujen yksiköiden lukumäärä kertomalla taulukon 10 Helsingin arvot Jyväskylän ja Helsingin hälytysten suhteella. Kaavalla (28) saadaan Helsingin rakennuspalojen määräksi vuoden aikana 247 kappaletta. Kerrotaan taulukon 10 hälytysten lukumäärä suhteella 49/247. Näin saatu hälytysten lukumäärä ja ilmoitusvirta ovat taulukossa 31.

Taulukko 31. Jyväskylän seudun esimerkin ilmoitusvirrat, hälytysten lukumäärät ja toiminta-ajat.

Yksiköiden lukumäärä	1	2	3	4	5	6
Hälytysten lukumäärä	10	35	3	1	0	0
Ilmoitusvirta [1/d]	0,027	0,095	0,009	0,003	0,001	0
Toiminta-aika [min]	45,8	41,2	75,6	97,2	172,4	0

Oletetaan, että esimerkkitapauksessa toiminta-ajat ovat samansuuruisia kuin Helsingissä. Taulukon 31 arvoilla saadaan estotodennäköisyyksiksi kaavoista (122)–(124) seuraavasti, kun oletetaan, että rakennuspalaja Jyväskylän seudulla hoitaa viisi yksikköä ($N = 5$):

$$P_{esto} = 0,0004$$

$$P_{osittaisesto} = 0,0003$$

$$P_{täysesto} = 0,0001.$$

Kaavan (125) mukaisesti estotaajuus saadaan kertomalla estotodennäköisyys ilmoitusvirralla, eli tässä estotaajuus on $P_{esto} \cdot \sum \lambda = 0,0004 \cdot 49 \approx 0,021$ 1/a. Estoväli saadaan estotaajuuden käänteisarvona eli esto esiintyy kerran 49:ssä vuodessa. Jos oletetaan, että liitteen G mukaisesti rakennuspalojen osuus on 16 % kaikista hälytyksistä (sairaankuljetusta ei ole otettu huomioon), Jyväskylän seudun tulipalojen määräksi saa-

daan 306 kappaletta. Kun nämä jaetaan yksiköiden määrän mukaisesti ryhmiin kertomalla Helsingin ja Jyväskylän arvoista saatavalla suhdeluvulla samoin kuin edellä, ja käyttämällä toiminta-aikana Helsingin aikoja estotodennäköisyyksiksi viidellä yksiköllä saadaan ($N = 5$)

$$P_{esto} = 0,003$$

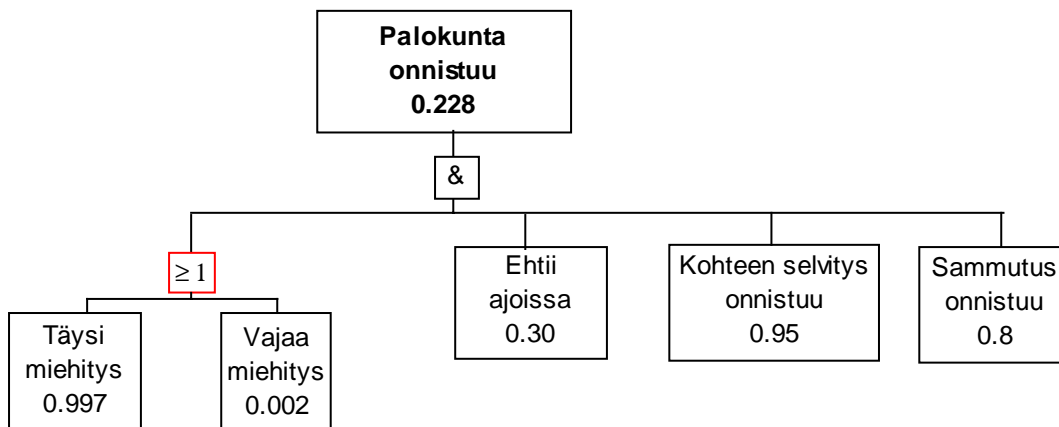
$$P_{osittaisesto} = 0,002 = F_{12}$$

$$P_{täysesto} = 0,001 = F_{11}$$

$$Estovälit = \begin{cases} \frac{1}{P_{esto} \cdot \sum \lambda} = \frac{1}{0,003 \cdot 247} \approx 1,35a \\ \frac{1}{P_{osittaisesto} \cdot \sum \lambda} = \frac{1}{0,002 \cdot 247} \approx 2,02a \\ \frac{1}{P_{täysesto} \cdot \sum \lambda} = \frac{1}{0,001 \cdot 247} \approx 4,05a \end{cases}$$

Esto esiintyy kerran vuodessa, osittaisesto kerran kahdessa ja täysesto kerran neljässä vuodessa.

7.2.3 Yhteenveto



Kuva 85. Palokunnan epäonnistumisen vikapuun.

Palokunnan onnistumisen todennäköisyyttä voidaan arvioida vikapuun avulla kirjaamalla edellä määritetyt todennäköisyydet omiin laatikoihinsa. Kohdassa 7.2.1 määritettiin todennäköisyydeksi, että palokunta ei ehdi ajoissa paikalle 0,30. Kohdassa 7.2.2 tarkasteltiin todennäköisyyksiä, että palokunta ei lähde koko vahvuudessaan. Todennäköisyydeksi, että hälytykseen lähtee vajaa miehistö, määritettiin 0,002 ja puolestaan todennäköisyydeksi, että hälytykseen lähtee täysi miehitys, 0,997. Jyväskylän arvoilla

estotodennäköisyydet jäivät pieniksi, jolloin järjestelmän ruuhkautumisen mahdollisuus on niin olematon, ettei se merkittävästi vaikuta palokunnan epäonnistumistodennäköisyyteen. Helsingin vastaavat arvot löytyvät taulukosta 13 ja estotodennäköisyydet ovat, kun yksiköiden lukumäärä N on kahdeksan,

$$P_{esto} = 0,004 \quad (200a)$$

$$P_{osittaisesto} = 0,003$$

$$P_{täysesto} = 0,002.$$

Helsingin hälytysmäärillä tämä tarkoittaa sitä, että esto esiintyy noin seitsemän kertaa, osittaisesto neljä kertaa ja täysesto kolme kertaa vuodessa.

Sammutuksen onnistumista käsiteltiin kohdassa 7.2.1, jonka perusteella sen todennäköisyydeksi arvioitiin 0,8. Palopesäkkeen paikallistamisen onnistumistodennäköisyydestä ei ole riittävästi tutkittua tietoa, ja tässä käytetty arvo 0,95 perustuu asiantuntija-arvioon. Edellä kerätyn tiedon avulla voidaan täten vikapuun avulla määrittää palokunnan onnistumistodennäköisyys, joksi saadaan

$$P_{Palokunta\ onnistuu} = (0,997 + 0,002) \cdot 0,30 \cdot 0,95 \cdot 0,80 = 0,228. \quad (200b)$$

Sama tulos saadaan myös kaavasta (195c)

$$a + e = (1 - F_{11})(1 - F_2)(1 - F_3)(1 - F_4) = (1 - 0,001) \cdot 0,30 \cdot 0,95 \cdot 0,80 = 0,228. \quad (200c)$$

Palokunnan onnistumistodennäköisyys on 0,23, jolloin epäonnistumistodennäköisyys saadaan sen komplementtina eli

$$P_{Palokunta\ epäonnistuu} = 1 - 0,23 = 0,77. \quad (200d)$$

7.3 VTT Otaniemen maamerkki

Sisäasianministeriön ylläpitämän kansallisen onnettomuustietokannan ONTIKAN tietojen perusteella on eri rakennustyypeille määritetty syttymistaajuustiheydet. Tekemällä ONTIKAN tietoihin lähdekriittinen tarkastelu ja ottamalla huomioon mahdolliset virherajat voidaan syttymistaajuustiheys mitoittaa kaikissa rakennuksen käyttötapaluokissa käyttäen arvoa $1 \cdot 10^{-5} / \text{m}^2\text{a}$ (Rahikainen 1998b). Kertomalla tämä syttymistaajuustiheys palo-osaston pinta-alalla saamme kerroksittain syttymistaajuudet taulukon 32 mukaisesti. Rakennuksen elinkaaren pituutena on käytetty 50:tä vuotta. Syttymien lukumäärä elinkaaren aikana on saatu kertomalla syttymistaajuus elinkaaren pituudella. Syttymän

toistumisaika [a] saadaan syttymistäajuuden käänteislukuna. Taulukkoon 32 on otettu vertailun vuoksi myös laskelma kokonaisriskistä. Kokonaisriskiä laskettaessa on rohkeasti oletettu, että riskikohteiden määrä ja arvo (henkilöt, omaisuus) on tasan jakautunut kerrosalalle ja että palon vaikutus ulottuu koko palo-osaston alueelle yhtä voimakkaana. Suhteellisen riskin arvo on saatu kertomalla syttymistäajuus pinta-alalla, ja näin saatu arvo on vain suuntaa antava mutta antaa viitteitä siitä, mitä kohteita olisi otettava huolellisemman tarkastelun alaiseksi. Kuudennessa sarakkeessa on oletettu todennäköisyydeksi, ettei palo sammuu itsestään, 99 %, ja silloin vakiintuneen syttymän todennäköisyys saadaan kertomalla syttymistäajuus 0,99:llä. Kun oletetaan sprinklaamattoman rakennuksen alkusammutuksen epäonnistuvan 25 %:n todennäköisyydellä ja kerrotaan tämä vakiintuneen syttymän todennäköisyydellä, saadaan todennäköisyys, että palo jatkuu, kunnes palokunta saapuu paikalle sammuttamaan palon. Kertomalla palon jatkumisen todennäköisyys elinkaaren pituudella saadaan todennäköisyys, jolla palo uhkaa kantavia rakenteita rakennuksen elinkaaren aikana. Tulokset on esitetty taulukon 32 toiseksi viimeisessä sarakkeessa. Viimeisessä sarakkeessa on kussakin tilassa syntyvä suurin paloteho. Taulukossa 32 ensimmäisessä sarakkeessa on esitetty kussakin kerroksessa sijaitsevien tietyntyyppisten tilojen kokonaispinta-ala, kuten taulukosta 1 voidaan nähdä. Esimerkiksi ensimmäisen kerroksen myymälätilojen kokonaispinta-ala on 1 666 neliometriä, mutta huomioitavaa on, että paloteho on määritetty tässä tapauksessa vain yhdelle myymälälle, joka on pinta-alaltaan 208 m². Tällaisia myymälöitä on ensimmäisessä kerroksessa kahdeksan kappaletta ($8 \cdot 208 \text{ m}^2 \cong 1\,666 \text{ m}^2$). Syttymä voi ilmetä kuitenkin missä tahansa näistä kahdeksasta myymälästä, jonka vuoksi todennäköisyyksien laskennassa tulee huomioida myymälöiden kokonaispinta-ala.

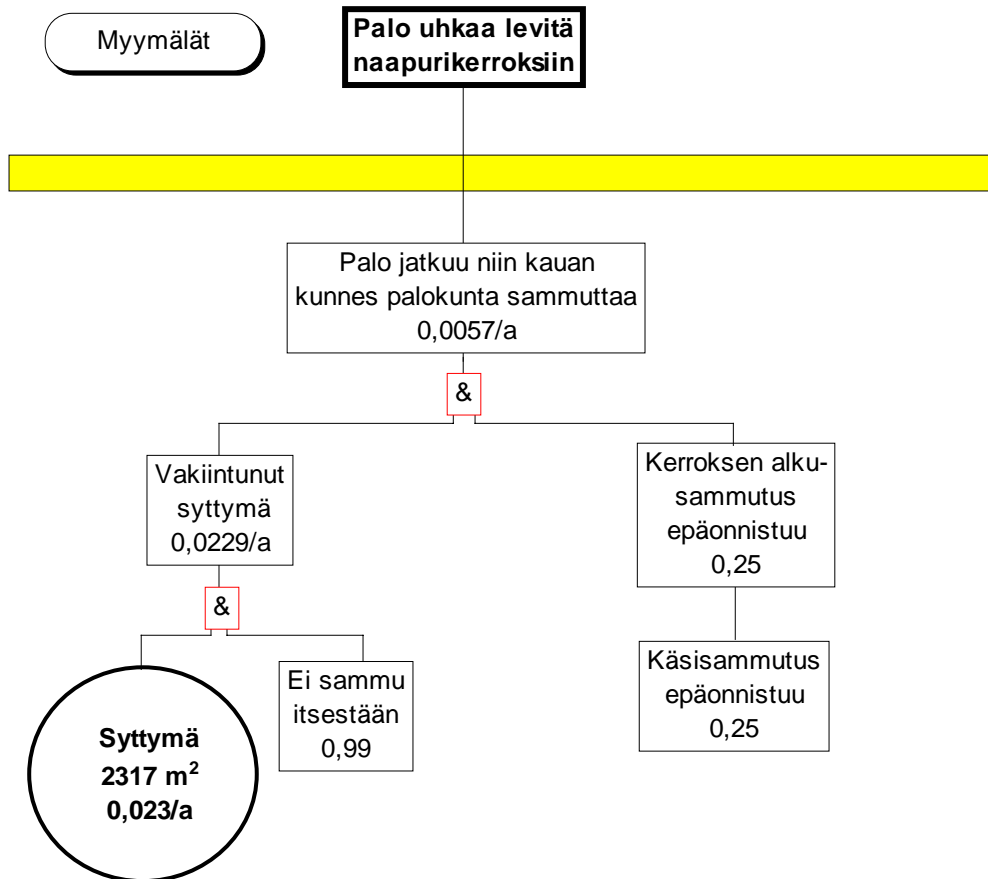
Taulukko 32. Eri tilojen syttymien ja sammutuksen epäonnistumisen todennäköisyydet.

Tila	A [m ²]	Syttymis- taajuus [1/a]	Syttymiä elinkaaren aikana	Toistumis- aika [a]	Suhteellinen riski [mielivalt. yksikkö]	Ei sammu [%]	Vakiintunut syttymä [1/a]	Alkusamm. epäonnistuu [%]	Palo jatkuu [1/a]	Palo uhkaa kantavia rakenteita elinkaaren aikana [%]	Mitoitus- palon teho [MW]
1. KERROS											
Ostoskeskus											
Kahvila+ aula	2863	0,029	1,4	35	82	99	0,0283	25	0,0071	35	3,8
Myymälät	1666	0,017	0,8	60	28	99	0,0165	25	0,0041	21	54
Kioski	126	0,001	0,1	797	0,2	99	0,0012	25	0,0003	2	50
Hotelli											
Aula	1458	0,015	0,7	69	21	99	0,0144	25	0,0036	18	3,8
Kabinetit	543	0,005	0,3	184	3	99	0,0054	25	0,0013	7	5,9
Kahvila/ ravintola	1472	0,015	0,7	68	22	99	0,0146	25	0,0036	18	5,0
Toimistot	312	0,003	0,2	320	1	99	0,0031	25	0,0008	4	12,4
Myymälä	208	0,002	0,1	480	0,4	99	0,0021	25	0,0005	3	54
Toimisto											
Toimistot	650	0,007	0,3	154	4	99	0,0064	25	0,0016	8	12,4
Aula	521	0,005	0,3	192	3	99	0,0052	25	0,0013	6	3,8
Käytävä	281	0,003	0,1	356	1	99	0,0028	25	0,0007	3	3,8
Pysäköinti											
Pysäköinti	4170	0,042	2,1	24	174	99	0,0413	25	0,0103	52	16,6

Tila	A [m ²]	Syttymis- taajuus [1/a]	Syttymiä elinkaaren aikana	Toistumis- aika [a]	Suhteellinen riski [mielivalt. yksikkö]	Ei sammu [%]	Vakiintunut syttymä [1/a]	Alkusamm. epäonnistuu [%]	Palo jatkuu [1/a]	Palo uhkaa kantavia rakenteita elinkaaren aikana [%]	Mitoitus- palon teho [MW]
2. KERROS											
Ostoskeskus											
Myymälät	2317	0,023	1,2	43	54	99	0,0229	25	0,0057	29	54
Hotelli											
Kabinetit	364	0,004	0,2	274	1	99	0,0036	25	0,0009	5	5,9
Ravintola	774	0,008	0,4	129	6	99	0,0077	25	0,0019	10	5,0
Rav. keittiö	455	0,005	0,2	220	2	99	0,0045	25	0,0011	6	8,0
Toimistot	208	0,002	0,1	480	0,4	99	0,0021	25	0,0005	3	12,4
Huoneet	677	0,007	0,3	148	5	99	0,0067	25	0,0017	8	2,8
Toimisto											
Toimistot	469	0,005	0,2	213	2	99	0,0046	25	0,0012	6	12,4
Maisema- toimisto	1093	0,011	0,5	91	12	99	0,0108	25	0,0027	14	
Käytävä	453	0,005	0,2	221	2	99	0,0045	25	0,0011	6	3,8
Pysäköinti											
Pysäköinti	4170	0,042	2,1	24	174	99	0,0413	25	0,0103	52	16,6

Tila	A [m ²]	Syttymis- taajuus [1/a]	Syttyä elinkaaren aikana	Toistumis- aika [a]	Suhteellinen riski [mielivalt. yksikkö]	Ei sammu [%]	Vakiintunut syttymä [1/a]	Alkusamm. epäonnistuu [%]	Palo jatkuu [1/a]	Palo uhkaa kantavia rakenteita elinkaaren aikana [%]	Mitoitus- palon teho [MW]
3. KERROS											
Ostoskeskus											
Toimistot	2403	0,024	1,2	42	58	99	0,0238	25	0,0059	30	12,4
IV- konehuone	856	0,009	0,4	117	7	99	0,0085	25	0,0021	11	
Hotelli											
9											
Huoneet	1424	0,014	0,7	70	20	99	0,0141	25	0,0035	18	2,8
Käytävä	729	0,007	0,4	137	5	99	0,0072	25	0,0018	9	3,8
Toimisto											
Toimistot	989	0,010	0,5	101	10	99	0,0098	25	0,0024	12	12,4
Käytävä	453	0,005	0,2	221	2	99	0,0045	25	0,0011	6	3,8
Pysäköinti											
Pysäköinti	4170	0,042	2,1	24	174	99	0,0413	25	0,0103	52	16,6

Kuvassa 86 on esitetty puukaaviona toisen kerroksen sprinklaamattomien myymälätilojen sammutuksen epäonnistuminen. Arvot ovat näkyvissä taulukossa 32 ja samanlainen puu voidaan muodostaa jokaiselle taulukon 32 tilalle.



Kuva 86. Palon sammutuksen epäonnistuminen toisen kerroksen myymälätiloissa.

Pahimmat mahdolliset palotilanteet valitaan taulukon 32 avulla. Valitaan suurimman suhteellisen riskin omaavat tilat ensin tarkastelun kohteeksi. Taulukkoon 33 on poimittu taulukosta 32 ne tilat, joiden suhteellinen riski on vähintään 20.

Taulukko 33. Suurimpien suhteellisten riskien omaavien tilojen sammutuksen epäonnistumisen todennäköisyydet ja tilojen palotehot.

		A [m ²]	Syttymis- taajuus [1/a]	Suhteellinen riski [mielivalt. yksikkö]	Palon jatkumisen todennäköisyys [1/a]	Paloteho [MW]
1	Kahvila+aula 1.krs	2 863	0,029	82	0,0071	3,8
2	Myymälät 1.krs	1 666	0,017	25	0,0041	54
3	Hotellin aula 1.krs	1 458	0,015	21	0,0036	3,8
4	Kahvila/ ravintola 1. krs	1 472	0,015	22	0,0036	5,0
5	Myymälät 2.krs	2 317	0,023	54	0,0057	54
6	Toimistot 3.krs	2 403	0,024	58	0,0059	12,4
7	Hotellihuoneet 3.krs	1 424	0,014	20	0,0035	2,8
8	Pysäköinti 1.-3. krs	4 170	0,042	174	0,0103	16,6

Taulukosta 33 nähdään, että suurin suhteellinen riski sijoittuu rakennuksen pysäköintitiloihin (rivi 8). Tiedetään kuitenkin, että mitoittava palo pysäköintitiloissa on muutama auton paikallinen palo, sillä useamman kuin kahden auton yhtäaikainen palaminen on hyvin harvinaista. Yhden auton palotehoksi arvioidaan 8,3 MW (CEC Agreements 1996), jolloin kahden auton yhtäaikaisessa palossa saadaan palotehoksi 16,6 MW. Vaikka pysäköintihallin paloteho on rajallinen, se on kuitenkin huomioitava, ja on tarkasteltava kantavien rakenteiden kestävyyttä, poistumisturvallisuutta sekä savunpoistoa. Henkilöautojen paloajat ovat noin 30 minuuttia, joten pysäköintitilojen kantavien rakenteiden mitoituksessa on tärkeää ottaa huomioon se, että rakenteet kestävät sortumatta palokunnan sammutustoimien aloitukseen asti alkusammutuksen epäonnistuttua. Taulukon 33 rivien 3, 4 ja 7 suhteelliset riskit ovat samankokoiset, jolloin näistä valitaan pahimmaksi suurimman palotehon omaava kahvila-ravintolatilalan palo (rivi 4). Taulukon 33 perusteella valitaan lähemmän tarkastelun kohteiksi rivit 1, 4, 5 ja 6 eli ensimmäisen kerroksen kahvilatila, toisen kerroksen kahvila-ravintola, toisen kerroksen myymälät sekä kolmannen kerroksen toimistotilat.

7.3.1 Palotehojen määrittäminen

Mitoituspalon löytämiseksi asetettiin tulipaloja rakennuksen eri osiin ja tutkittiin niiden palotehon kehittymistä tarkastelemalla lähemmin palokuorman määrää, laatua ja sijoitumista sekä jakaantumista kyseiseen tilaan.

7.3.1.1 Myymälät

Ensimmäisen kerroksen myymälöiden kokonaispinta-ala on 1 666 m² ja toisen kerroksen 2 317 m². Tila on jaettu kevyillä väliseinillä erillisiksi myymälätiloiksi. Väliseinät pidättävät palokaasuja huomattavan ajan pienehkössä tilassa ja tällä tavalla nopeuttavat kyseisen myymälän lieskahdusta verrattuna suurempaan yhtenäiseen tilaan. Yhden myymälän (14,4 x 14,4 x 5,7 m) oletettiin syttyvän palamaan. Palokuorman tiheydeksi tälle tilalle saatiin tilastojen perusteella 700 MJ/m². Myymälän sisäpuolisen seinän oletettiin olevan lasia, jolloin se rikkoutuu niin pian nopeasti kehittyvän palon alkamisen jälkeen, että koko etuseinän voitiin olettaa olevan avoin koko palon ajan. Tällöin saatiin palotehon maksimiarvoksi 54 MW.

7.3.1.2 Kahvila-aulatila

Kahvilatilassa oletettiin syttyvän palo, jonka palokuorman pinta-ala on 40 m². Koska tila on hyvin suuri, se ei lieskahda kokonaan, vaan palo jää paikalliseksi ja on tällöin polttoainerajoitteinen. Suurimmaksi palotehon arvoksi kahvila-aulatilassa saatiin 5,0 MW.

7.3.1.3 Kahvila-ravintola

Vastaavasti kuin kahvila-aulatilassa laskettiin kahvila-ravintolatilaa (43,3 x 34,0 x 3,6 m) paikallisen palon palotehokäyrä. Palokuorman pinta-ala arvioitiin 30 m², jolloin suurimmaksi palotehon arvoksi saatiin 3,8 MW.

7.3.1.4 Toimisto

Toimiston (7,22 x 7,22 x 3,6 m) palokuorman tiheydeksi arvioitiin 1 000 MJ/m² (Korpela 1999). Toimiston oven (1,25 x 2,00 m) oletettiin olevan auki sekä ikkunoiden rikkoutuvan hyvin nopeasti palon alun jälkeen, jolloin aukkojen pinta-ala arvioitiin 9,26 m². Kooltaan 1,3 x 1,3 m olevia ikkunoita oletettiin suuressa toimistohuoneessa olevan neljä kappaletta. Tällöin saatiin suurimmaksi palotehon arvoksi toimistohuoneessa 12,4 MW.

7.3.2 Ehtiikö palokunta ajoissa?

Esimerkkirakennus sijaisee Espoon Otaniemessä. Taulukon 34 matkat paloasemilta kohteeseen on mitattu käsivaraisesti kartalta sekä linnuntietä että maantietä. Mittaustavan takia matkojen virhe on suurehko, mutta tähän tarkoitukseen riittävän tarkka.

Taulukko 34. Ajomatkat paloasemilta kohteeseen linnuntietä sekä maantietä.

Paloasema	Matka linnuntietä [km]	Matka maantietä [km]
Kallio (Helsinki)	6,9	11,9
Erottaja (Helsinki)	7,0	10,4
Haaga (Helsinki)	4,8	6,8
Sepänkylä (Espoo)	5,5	6,9
Niittykumpu (Espoo)	3,4	3,9
Espoonlahti (Espoo)	9,7	12,5

Yleensä huonepalo, jossa palokuormana on kiinteää ainetta, voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen: alkupaloon, täysin kehittyneeseen paloon sekä jäähtymisvaiheeseen. Kunkin vaiheen paloteho voidaan määrittää seuraavista kaavoista (Keski-Rahkonen 1993):

Alkupalo:

$$Q_1(t) = Q_0 \left(\frac{t}{t_0}\right)^2 ; 0 \leq t \leq t_1 \quad (201)$$

Täysin kehittynyt palo:

$$Q_2 = Q_0 \left(\frac{t_1}{t_0}\right)^2 = \text{vakio} ; t_1 \leq t \leq t_2 \quad (202)$$

Jäähtymisvaihe:

$$Q_3(t) = Q_0 \left(\frac{t_1}{t_0}\right)^2 e^{-\frac{(t-t_2)}{\tau}} ; t_2 \leq t < \infty, \quad (203)$$

joissa t_0 on aikavakio ja τ hiipumisvakio (Linkova 1999). Alkupalon kasvuluokat on esitetty taulukossa 35. Taulukkolaskentaohjelmalla (Keski-Rahkonen 1993) määritettiin ajat t_1 ja t_2 , kun palokuorman määrä kohteesta oli arvioitu.

Taulukko 35. Alkupalon kasvuluokat. (Keski-Rahkonen 1993)

	Kasvukerroin c [W/s ²]	Aikavakio t_0 [s]
Hidas	2,93	584
Keskimääräinen	11,72	292
Nopea	46,9	146
Erittäin nopea	187,6	73

Kullekin rakennuksesta valitulle tarkastelukohteelle määritettiin palotehokäyrät tapauksille, joissa alkupalon kasvunopeus on joko nopea tai erittäin nopea. Saatujen palotehokäyrien avulla määritettiin sprinklereiden toiminta-ajat kussakin tilassa käyttämällä PALDET 2,0T-ohjelmaa (Baroudi et al. 1998). Sprinklerin toimintalämpötilaksi oletettiin 68 astetta sekä vasteaikaindeksin arvoksi $200 (m \cdot s)^{1/2}$ (Nordic Committee on Building Regulations 1995). Ilmaisimen tuntoelimen ja katon väliseksi etäisyydeksi oletettiin 0,03 m. Kun oletettiin lisäksi ilmaisimen vaakasuoraksi etäisyydeksi palopatsaan keskiakselilta 2,5 m saatiin taulukon 36 mukaiset reagointiajat sprinklereille eri tiloissa.

Taulukko 36. Sprinklereiden toiminta-ajat.

	Nopeasti kasvava palo $t_0 = 146 \text{ s}$	Erittäin nopeasti kasvava palo $t_0 = 73 \text{ s}$
	Toiminta-aika [s]	Toiminta-aika [s]
Kahvila-aula	196	121
Myymälä	196	121
Kahvila-ravintola	166	104
Toimisto	166	104

Vuosina 1994–1997 ONTIKAan kirjautuneissa rakennuspaloissa palokunnan lähtövalmiusaika pääkaupunkiseudulla oli 50 %:n luottamustasolla 86 sekuntia ja 80 %:n luottamustasolla 120 sekuntia. Ajoajat pelastusyksiköille määritettiin kaavoista (193) ja (194). Palopaikalle saapumisen ja tulen saavuttamisen väliseksi ajaksi arvioitiin edellisen esimerkin mukaisesti 67 sekuntia.

Taulukko 37. Pelastusyksiköiden kuluttamat ajat 50 %:n todennäköisyydellä. Suluissa on pelastusyksiköiden 80 %:n todennäköisyydellä kuluttama aika.

Paloasema	Lähtövalmiusaika [min]	Ajoaika [min]	Aika saapumisesta sammutustoimien aloittamiseen [min]	Yhteensä [min]
Kallio (Helsinki)	1,4 (2,0)	10,5 (14,1)	1,1	13,0 (17,2)
Erottaja (Helsinki)	1,4 (2,0)	9,7 (13,2)	1,1	12,2 (16,3)
Haaga (Helsinki)	1,4 (2,0)	7,7 (11,2)	1,1	10,3 (14,4)
Sepänkylä (Espoo)	1,4 (2,0)	7,8 (11,3)	1,1	10,4 (14,4)
Niittykumpu (Espoo)	1,4 (2,0)	5,9 (9,3)	1,1	8,4 (12,4)
Espoonlahti (Espoo)	1,4 (2,0)	10,8 (14,4)	1,1	13,3 (17,5)

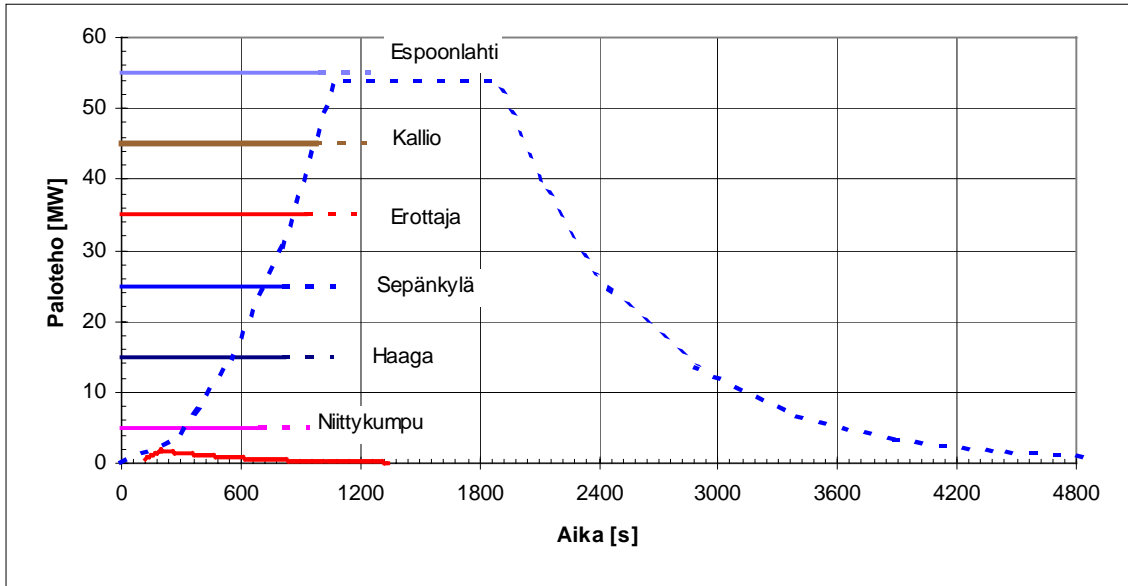
Kun kokonaisaikaan lisätään PALDET 2,0T –ohjelmalla laskettu paloilmaisimen toiminta-aika, saadaan kokonaisaika, joka palokunnalta kuluu palon alkamishetkestä kohteen saavuttamiseen. Nopeasti kasvavassa palossa ilmaisisimen toiminta-aika oli taulukon 36 mukaisesti kahvila-aula- sekä myymälätiloissa 3,3 minuuttia ja kahvila-ravintola- ja toimistotiloissa 2,8 minuuttia. Kokonaisajat 50 %:n ja 80 %:n luottamustasoilla on esitetty taulukossa 38.

Taulukko 38. Eri asemien pelastusyksiköiden käyttämät kokonaisajat. Palo on oletettu nopeasti kasvavaksi.

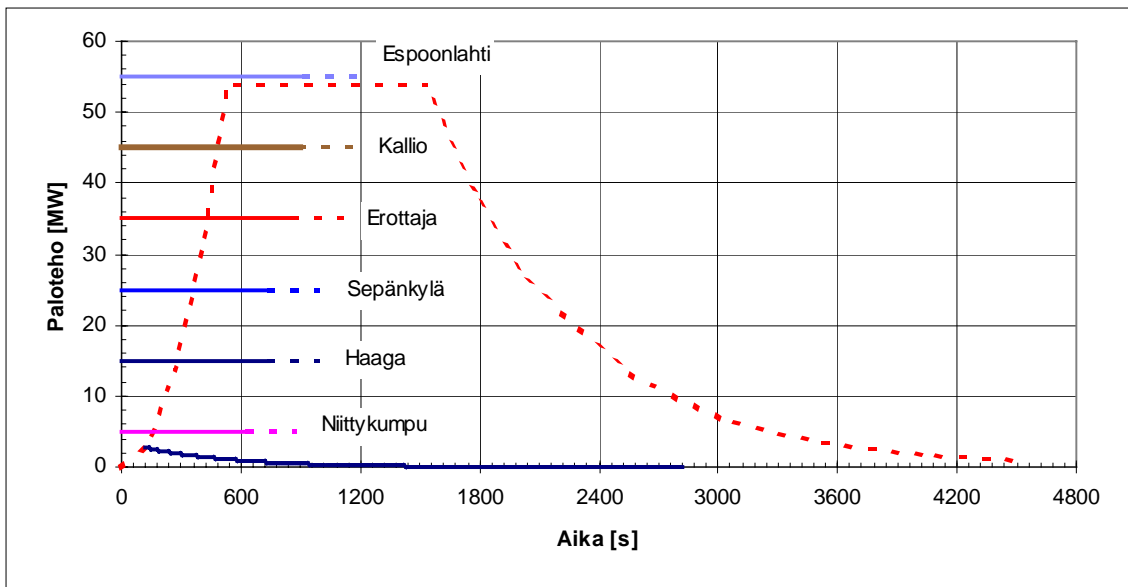
Paloasema	Kahvila-aula- ja myymälätilat		Kahvila-ravintola- ja toimistotilat	
	50 % [min]	80 % [min]	50 % [min]	80 % [min]
Kokonaisaika 50 %:n ja 80%:n luottamustasoilla (nopeasti kasvava palo)				
Kallio	16,3	20,5	15,8	20,0
Erottaja	15,5	19,6	15,0	19,1
Haaga	13,6	17,7	13,1	17,2
Sepänkylä	13,7	17,7	13,2	17,2
Niittykumpu	11,7	15,7	11,2	15,2
Espoonlahti	16,6	20,8	16,1	20,3

Kuvissa 87 ja 88 on piirretty myymälätilan palotehokäyrien kanssa samaan kuvaan eri paloasemien pelastusyksiköiden saapumisajat aikajanoina. Yhtenäisellä viivalla on merkitty yksiköiden käyttämää aikaa 50 %:n luottamustasolla ja katkoviihvalla aikaa 80 %:n luottamustasolla. Kuvassa 87 on kyseessä tilanne, jossa alkupalo kasvaa nopeasti ja ku-

vassa 88 erittäin nopeasti. Katkoviivalla on merkitty palotehon kehittymistä tilanteessa, jossa sprinklausta ei ole tai se ei toimi, ja yhtenäisellä viivalla palotehoa, kun sprinklaus toimii. Muiden tilojen vastaavat kuvaajat on esitetty liitteessä J.

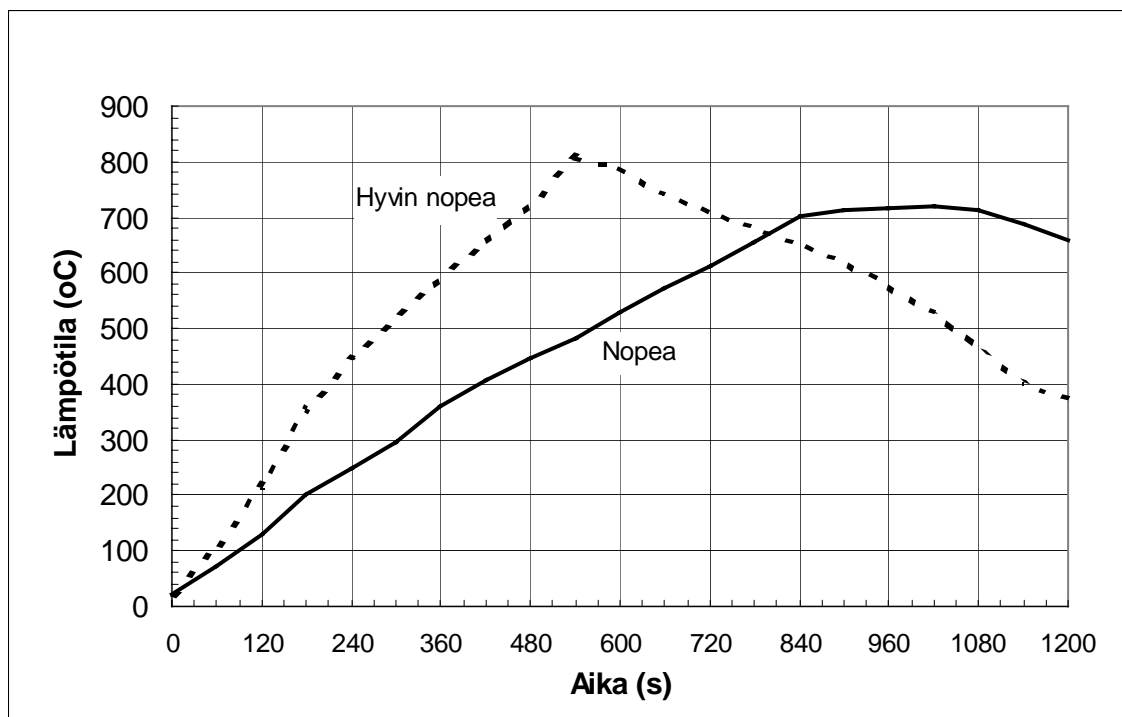


Kuva 87. Myymälätilan nopeasti kasvavan palon palotehokäyrä. Katkoviivalla on merkitty palotehoa, kun sprinklaus ei toimi, ja yhtenäisellä viivalla palotehoa, kun sprinklaus toimii. Aikajanoilla on merkitty palokunnan eri asemilta lähtevien pelastusyksiköiden kuluttamaa aikaa palon alusta sammutustoimien alkamiseen.



Kuva 88. Myymälätilan erittäin nopeasti kasvavan palon palotehokäyrä. Katkoviivalla on merkitty palotehoa, kun sprinklaus ei toimi, ja yhtenäisellä viivalla palotehoa, kun sprinklaus toimii. Aikajanoilla on merkitty palokunnan eri asemilta lähtevien pelastusyksiköiden kuluttamaa aikaa palon alusta sammutustoimien alkamiseen.

Kuvasta 88 nähdään, että erittäin nopeasti kasvavassa palossa, kun käytetään lieskahduskriteerinä kuuman kerroksen 500 K:n lämmönousua, myymälätila lieskahtaa 5,0 minuutin kuluttua palon alkuhetkestä. Kuvasta 88 havaitaan, että palokunnan ensimmäinen yksikkö saapuu paikalle 10,5 min kuluttua palon alusta ja ilman sammutustoimia paloteho saavuttaa huippuarvonsa 8,9 min kuluttua. Sammutuksen epäonnistuessa palon kasvaessa erittäin nopeasti, palokunnan ensimmäinen yksikkö saapuu paikalle vasta myymälätilan lieskahdettua ja palotehon kohottua maksimiarvoonsa, jolloin palokunnan tehtäväksi jää estää palon leviäminen ja tilanteen kehittyminen suurkatastrofiksi. Itse myymälätilaa palokunta ei ehdi enää pelastaa. Kun oletetaan alkupalon kasvukertoimeksi nopea, paloteho kasvaa hitaammin ja myymälätila lieskahtaa 9,8 minuutin kuluttua palon alkuhetkestä. Kuvasta 87 nähdään, että palokunnan ensimmäinen yksikkö saapuu paikalle 11,7 minuuttia palon alkamisesta ja ilman sammutustoimia paloteho saavuttaisi maksimiarvonsa 17,9 minuutin kuluttua palon alusta. Tässäkin tapauksessa myymälätila on jo ehtinyt lieskahtaa ennen kuin palokunnan ensimmäinen yksikkö ehtii sammutustoimiin.

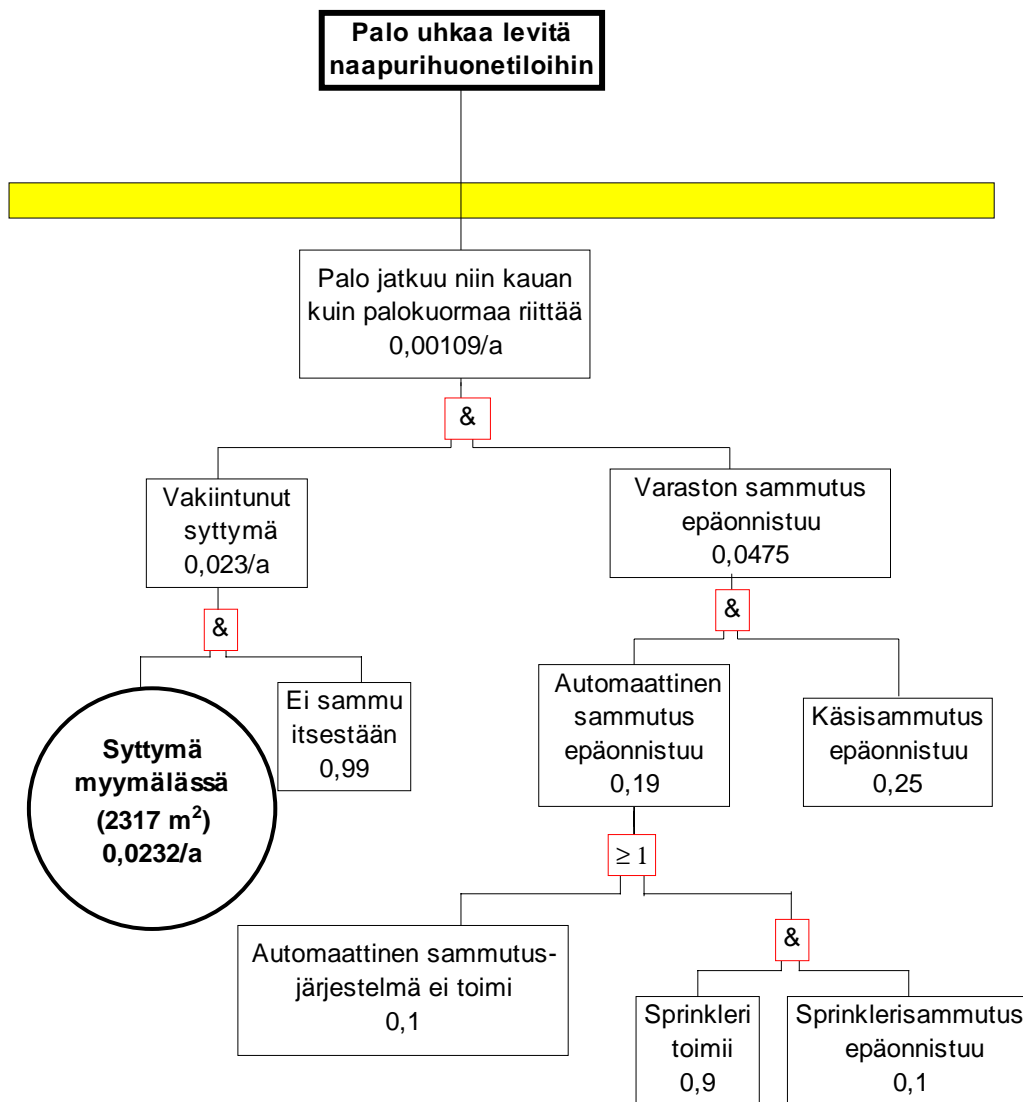


Kuva 89. Kuuman kerroksen lämpötila myymälätilassa.

Myös toimistotiloissa kummallakin kasvukertoimen arvolla palo kehittyy niin nopeasti, että huonetila ehtii lieskahtaa ennen kuin palokunta ehtii sammutustoimiin. Kahvila-au-la- sekä kahvila-ravintolatiloissa palo jää paikalliseksi eikä kummassakaan tapauksessa maksimipaloteho nouse kovinkaan suureksi. Näissäkään tapauksissa palokunta ei kuitenkaan ehdi paikalle ennen kuin suurin osa palokuormasta on jo ehtinyt palaa.

Sprinklauksen toimiessa kussakin tapauksessa palotehon maksimiarvo jää pieneksi ja rajoittaa paloa tehokkaasti. Tällöin palokunta saapuessaan paikalle pääsee luultavimmin tulen herraksi ja palovahingot pienenevät huomattavasti verrattuna sprinklaamattomaan tilanteeseen.

Kuvan 86 kaltaisen vikapuun avulla voidaan laskea todennäköisyys palon jatkumiselle sprinklauksesta huolimatta. Kuvan 90 sprinklatun myymälän sammutuksen epäonnistumisen kaltainen vikapuun voidaan muodostaa mille tahansa rakennuksen sprinklatulle tilalle. Liitteen J taulukossa J1 on esitetty kussakin tarkastellussa rakennuksen tilassa kunkin vikapuun haaran todennäköisyydet. Taulukkoon 39 on poimittu liitteen J taulukosta pinta-ala, syttymistäajuus, vakiintuneen syttymän sekä palon jatkumisen todennäköisyydet. Tuloksista voidaan nähdä, että sammutuksen epäonnistumisen todennäköisyys sprinklaamattomassa tilanteessa on viisinkertainen verrattuna sprinklatuun.



Kuva 90. Palon sammutuksen epäonnistuminen toisen kerroksen sprinklatuissa myymälätiloissa.

Taulukko 39. Palon sammutuksen epäonnistumistodennäköisyys, kun tilat ovat sprinklatut.

	A [m ²]	Tapahtuman taajuus [1/a]			Palo jatkuu
		Syttyminen	Vakiintunut syttymä	Tilan sammutus epäonnistuu	
Kahvila-aula	2 863	0,0286	0,028	0,0475	0,00135
Kahvila-ravintola	1 472	0,0147	0,015	0,0475	0,00069
Myymälät	2 317	0,0232	0,023	0,0475	0,00109
Toimistot	2 403	0,0240	0,024	0,0475	0,00113

7.3.3 Yhteenveto

7.3.3.1 Ostoskeskus

Mitoituspalona ostoskeskuksessa voidaan käyttää myymälän paloa, jossa paloteho kohoaa 54 MW:iin. Koska atrium rikkoo kerrososastoinnin, todennäköisyyksiä arvioitaessa lasketaan kaikkien kerrosten myymälätilojen kerrosalat yhteen. Myymälätilaa ostoskeskuksessa on yhteensä 3 983 m². Syttymistaajuudeksi saadaan 0,040/a, eli syttymä esiintyy kerran 25:ssä vuodessa. Kun myymälätiloja ei ole sprinklatu, saadaan sammutuksen epäonnistumistaajuudeksi 0,0099/a eli kerran 101:ssä vuodessa. Tämä luokitellaan ryhmään epätodennäköinen. Kun myymälät ovat sprinklatut, sammutuksen epäonnistumistaajuus on 0,0019/a, eli sammutus epäonnistuu kerran 534:ssä vuodessa ("epätodennäköinen"). Jos alkusammutustoimet epäonnistuvat, myymälätilan palo ehtii kehittyä suureksi, ja tila lieskahtaa ennen palokunnan saapumista, minkä vuoksi paloa erittäin vaikea saada enää hallintaan. Molemmissa tapauksissa myymälätila luultavimmin tuhoutuu, ja palokunta ehtii paikalle vain rajaaman palon muttei pysty enää itse myymälätilaa pelastamaan.

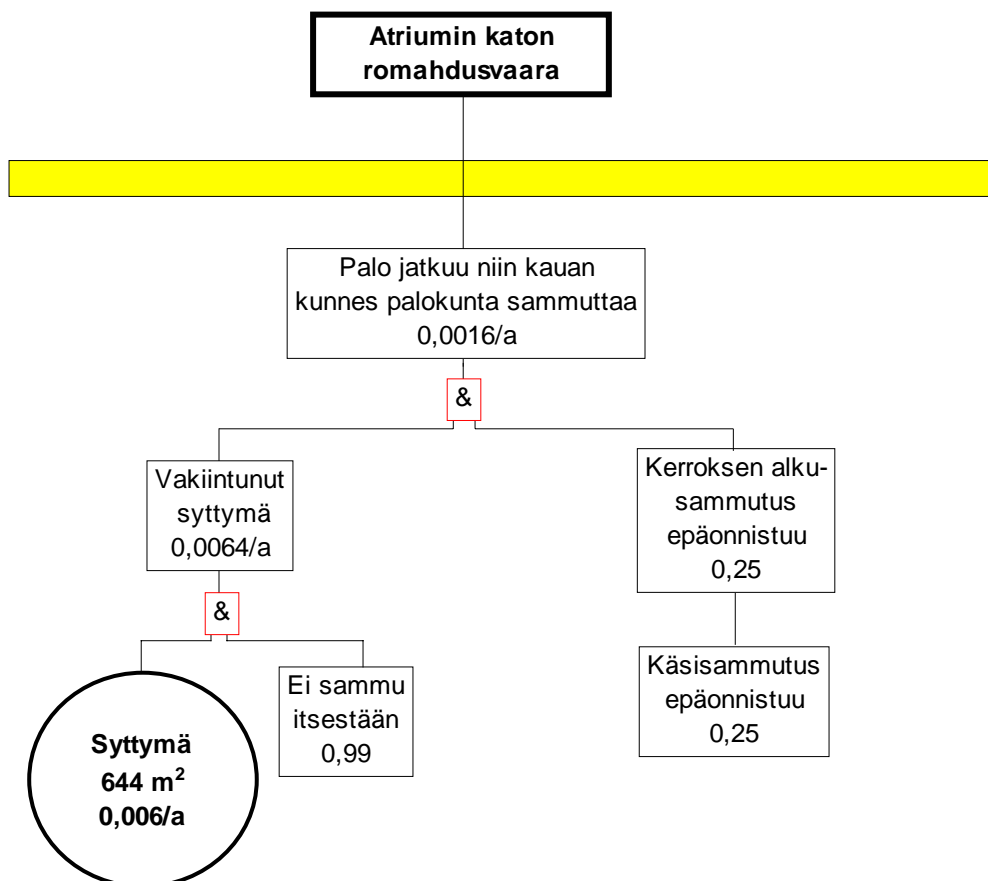
7.3.3.2 Hotelli

Hotellin sisääntuloaulassa sijaitsevan myymälän syttymän taajuus on 0,002/a eli syttymä esiintyy kerran 480 vuodessa ("epätodennäköinen"). Todennäköisempää on hotellin kahvila-ravintolatilan syttymä. Toisen kerroksen ravintolatila on alakertaan avoin, mikä rikkoo kerrososastoinnin. Ravintolatilojen yhteenlasketuksi pinta-alaksi saadaan 2 245 m², jolloin syttymistaajuus on 0,022/a eli syttymä esiintyy kerran 45 vuodessa. Palo ravintolatilassa jää kuitenkin paikalliseksi, ja paloteho nousee suurimmillaan arvoon 3,8

MW. Sammutuksen epäonnistumistaajuus sprinklaamattomassa ravintolassa on 0,0056/a eli kerran 180:ssä vuodessa ("epätodennäköinen"). Kun tila on sprinklattu, sama taajuus on 0,0011/a eli kerran 947 vuodessa ("epätodennäköinen"). Jos sammutus epäonnistuu, palokunta ei ehdi paikalle ennen kuin suurin osa palokuormasta on jo ehtinyt palaa.

7.3.3.3 Toimistotilat

Kolmannessa kerroksessa on toimistotiloja, jotka on erotettu atriumista lasiseinin. Jos lasit rikkoutuvat tulipalossa, pääsevät liekit osumaan lasikattoon, jolloin on olemassa katon sortumisvaara. Atriumin viereisten toimistotilojen pinta-ala on 644 m², jolloin syttymistaajuudeksi saadaan 0,006/a eli syttymä esiintyy kerran 155 vuodessa, mikä kuuluu luokkaan "epätodennäköinen". Kuvassa 91 on esitetty tilan sammutuksen epäonnistuminen, jonka todennäköisyydeksi saatiin 0,0016/a, eli sammutus epäonnistuu kerran 628 vuodessa. Tämä kuuluu luokkaan "epätodennäköinen".



Kuva 91. Atriumiin rajoittuvien toimistotilojen sammutuksen epäonnistuminen.

Jos atriumiin rajoittuvat toimistotilat sprinklataan, saadaan sammutuksen epäonnistumistodennäköisyydeksi 0,0003/a, eli sammutus epäonnistuu kerran 3 300

vuodessa. Tämä kuuluu luokkaan ”erittäin epätodennäköinen”. Erityisen tärkeää on varmistaa esimerkiksi sprinklereiden avulla, etteivät liekit pääse läpäisemään toimistotilan ja atriumin välistä lasiseinämää ja siten vaikuttamaan atriumin kattorakenteisiin. Sprinklaamalla päästään epäonnistumisessa tässä tapauksessa niin matalalle tasolle, että siitä seuraava riski voidaan ottaa.

Missä tahansa kolmannen kerroksen toimistotiloissa syttymän taajuus on 0,024/a eli syttymä toistuu 42 vuoden välein. Sammutuksen epäonnistumistodennäköisyys on sprinklaamattomassa tapauksessa 0,0059/a eli kerran 168 vuodessa (”epätodennäköinen”) ja jos tilat ovat sprinklatut, 0,0011/a eli kerran 885 vuodessa (”epätodennäköinen”). Toimistohuoneen maksimipaloteho nousee 12,4 MW:iin, ja sammutuksen epäonnistumista palokunta ehtii paikalle vasta huoneen jo lieskahdettua.

Taulukossa 40 on esitetty kunkin tarkastellun tilan syttymistaajuus, sammutuksen epäonnistuminen sprinklatussa ja sprinklaamattomassa tapauksessa sekä kunkin ilmiön toistumisajat.

Taulukko 40. Todennäköisyyksiä eri tiloissa.

	Syttymis- taajuus [1/a]	Toistu- misaika [a]	Sammutuksen epäonnistuminen Tila sprinklaamaton [1/a]	Toistu- misaika [a]	Sammutuksen epäonnistuminen Tila sprinklatu [1/a]	Toistu- misaika [a]
Ostoskeskus Myymälät	0,040	25	0,0099	101	0,0019	534
Hotelli Ravintola-tilat	0,022	45	0,0056	180	0,0011	947
Toimisto Atrium	0,006	155	0,0016	628	0,0003	3300
Muut tsto-tilat	0,024	42	0,0059	168	0,011	885

7.3.4 Koko rakennus

Riskialtimpien tilojen lähemmän tarkastelun jälkeen johtopäätöksenä voidaan todeta, että sprinklaamalla rakennus todennäköisyydet laskevat siedettävälle tasolle.

Oletetaan rakennuksen kuuluvan paloluokkaan P1, jolloin ostoskeskuksen, hotellin ja toimiston kantavat rakenteet voidaan suunnitella ohjeen R120 ja osastointi ohjeen EI90 mukaisesti. Pysäköintitilan kantavat rakenteet voidaan suunnitella ohjeen R60 mukaan.

7.4 Itämerentori

Rakennus on tyypiltään suuri atriumrakennus, johon liittyy lisäksi korkea torni. Taulukossa 41 on esitetty kunkin palo-osaston pinta-ala, syttymistaajuus, syttymien lukumäärä elinkaaren aikana sekä syttymien toistumisaika ja suhteellinen riski. Elinkaaren pituudeksi on oletettu 50 vuotta.

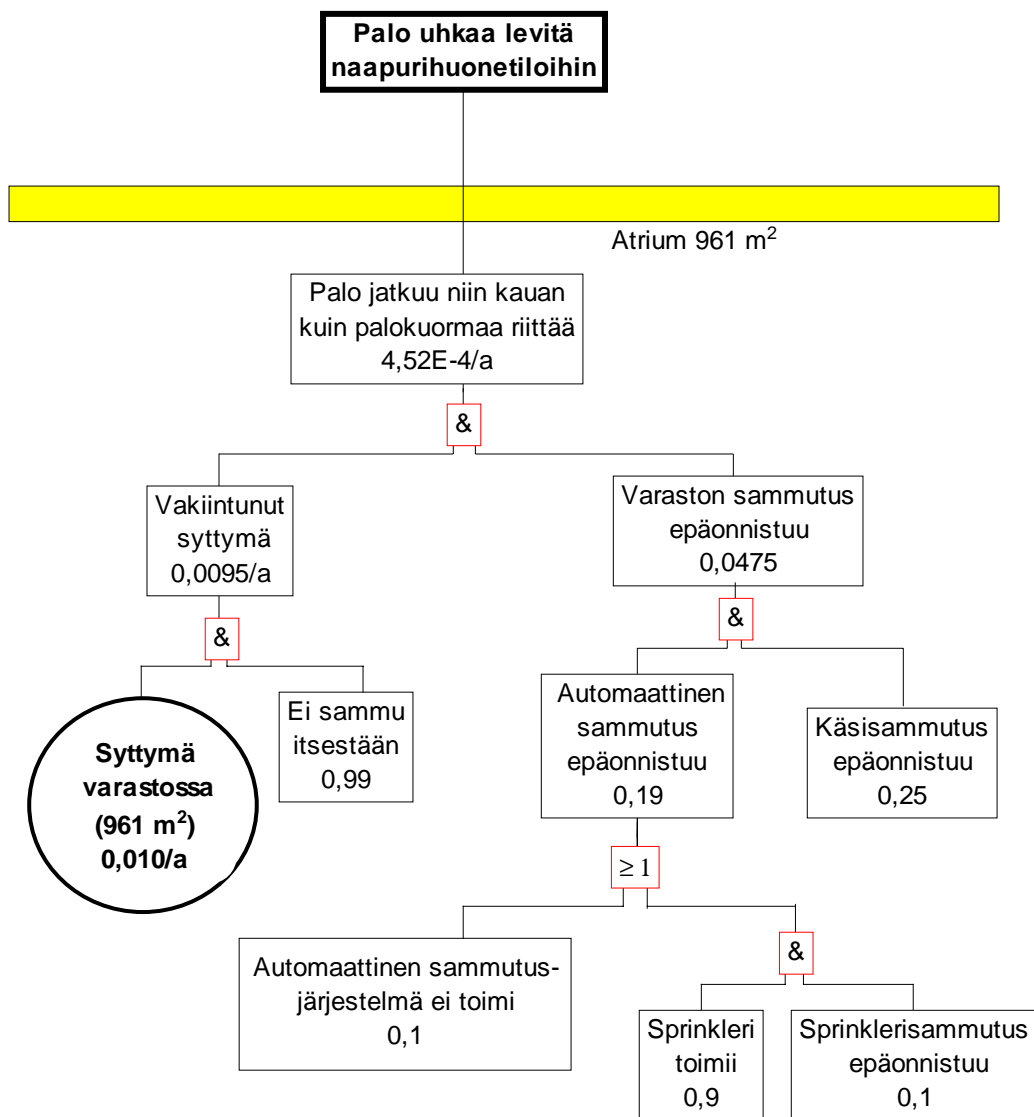
Taulukko 41. Syttymän todennäköisyys eri osastoissa.

	Pinta-ala [m²]	Syttymis- taajuus [1/a]	Syttymien lkm elinkaaren aikana	Syttymän toistumisaika [a]	Suhteellinen riski [mielivalt. yksikkö]
Os 1	4 875	0,049	2,4	21	238
Os 2	4 875	0,049	2,4	21	238
Os 3	11 200	0,112	5,6	9	1 254
Os 4	175	0,002	0,1	571	0,3
Os 5-18	330	0,003	0,2	303	1

Laskettaessa suhteellista riskiä on rohkeasti oletettu riskikohteiden määrän ja arvon (henkilöt, omaisuus) jakautuneen tasan koko kerrosalalle ja palon ulottuvan koko palo-osaston alueelle yhtä voimakkaana kaikissa osastoissa niiden koosta riippumatta (Keski-Rahkonen & Lindberg 1998). Suurin suhteellinen riski on osastossa 3, johon kuuluu myös viisi kerrosta korkea atrium. Toiseksi suurin suhteellinen riski on pysäköintikellareissa eli osastoissa 1 ja 2. Torniosan eli osastojen 5–18 riski jää huomattavan pieneksi verrattuna osastoihin 1–3.

7.4.1 Palo atriumissa

Ensimmäisessä kerroksessa on viiden kerroksen korkea atriumtila, jonka pinta-ala on 961 m². Syttymistaajuus atriumissa on 0,010/a, joka saadaan kertomalla pinta-ala syttymistaajuustiheydellä ($1 \cdot 10^{-5}/a$) (Rahikainen & Keski-Rahkonen 1998a) eli syttymä esiintyy kerran 104 vuodessa. Atriumin sammutuksen epäonnistumisen todennäköisyyttä on kuvattu puurakenteella kuvassa 92.



Kuva 92. Atriumin sammutuksen epäonnistuminen.

Atriumin sammutuksen epäonnistumistodennäköisyys on $4,52E-4/a$ eli sammutus epäonnistuu kerran 2 200 vuodessa. Tämä todennäköisyys on riittävän pieni, mutta on huolehdittava, ettei palo pääse leviämään atriumin viereisiin tiloihin varmistamalla, että savusulkuna toimiva lasiseinä ei pääse rikkoutumaan atriumin lattiatasolla olevan palon vaikutuksesta. Atriumissa sijaitsevassa tiedenäyttelytilassa oletetaan syttyvän tulipalo, jonka palokuorman pinta-alaksi arvioitiin 80 m^2 . Oletetaan palokuorman tiheydeksi 500 MJ/m^2 . Koska atriumtila on niin suuri, koko tila ei palon vaikutuksesta lieskahda, vaan palo jää paikalliseksi. Suurimmaksi palotehoksi tilassa saatiin $10,1 \text{ MW}$.

7.4.2 Maanalaiset kerrokset

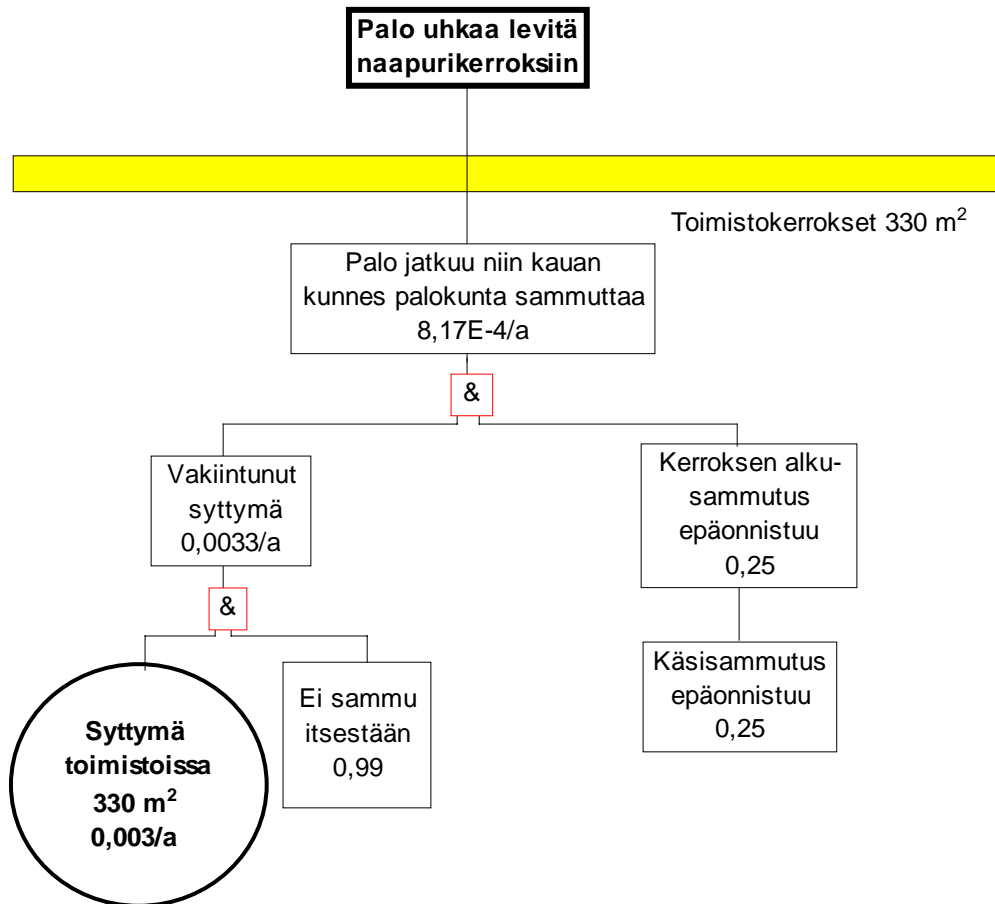
Maanalaisissa kerroksissa on sekä pysäköinti- että varastotiloja. Suurin varastotila on kooltaan 189 m^2 ja sen syttymistäajuus on tällöin $0,002/a$ eli syttymä varastossa ilmenee

kerran 530 vuodessa. Kun maanalaiset kerrokset on sprinklattu saadaan kuvan 92 kaltaisen puun avulla sammutuksen epäonnistumistaajuudeksi $8,90E-5/a$ eli kerran 11 240:ssä vuodessa. Varastotilan suurimmaksi palotehoksi saatiin 3,2 MW, kun oven oletettiin olevan avoinna. Todellisuudessa varaston palo-ovi on kuitenkin aina kiinni, jolloin palo luultavimmin sammuu hapenpuutteeseen tai vaihtoehtoisesti jatkuu pienellä teholla syttymishuoneessa, kunnes palokunta sen sammuttaa.

Pysäköintitiloissa syttymä esiintyy todennäköisyydellä 0,052/a eli kerran 19 vuodessa. Sammutus epäonnistuu todennäköisyydellä 0,002 eli kerran 409 vuodessa. Tiedetään, että mitoitettava palo pysäköintitiloissa on muutaman auton paikallinen palo ja useamman kuin kahden auton yhtäaikainen palaminen on hyvin harvinaista. Yhden auton palotehoksi arvioidaan 8,3 MW (CEC Agreements 1996), jolloin kahden auton yhtäaikaisessa palossa saadaan palotehoksi 16,6 MW. Henkilöautojen paloajat ovat noin 30 minuuttia, joten pysäköintitiloissa on tärkeää ottaa huomioon kantavien rakenteiden mitoitus siten, että ne kestävät sortumatta palokunnan sammutustoimien aloitukseen asti alkusammutuksen epäonnistuttua.

7.4.3 Toimistotilat

Toimistotiloissa yhden palo-osaston pinta-ala on 330 m². Tällöin syttymistaajuus on 0,003/a eli syttymä esiintyy kerran 303:ssa vuodessa. Toimistotilat eivät ole sprinklatut, ja tällöin sammutuksen epäonnistumistodennäköisyydeksi saadaan $8,17E-4/a$ eli kerran 1 224:ssä vuodessa. Sammutuksen epäonnistuminen on esitetty puukaaviona kuvassa 93. Yhden toimistohuoneen (2,7 x 4,8 x 3,4 m) suurimmaksi palotehoksi saatiin 6,1 MW, kun oletettiin oven (0,8 x 2,0 m) olevan auki ja ikkunan (1,5 x 2,0 m) rikkoutuvan niin pian palon alusta, että sen voidaan olettaa olevan avoin koko palon ajan.



Kuva 93. Toimistotilojen sammutuksen epäonnistuminen.

Taulukossa 42 on esitetty kunkin tilan pinta-ala, syttymistajuus, vakiintuneen syttymän, alkusammutuksen (sprinklerit tai käsisammutus) ja koko tilan sammutuksen epäonnistumisen todennäköisyydet sekä tilan paloteho.

Taulukko 42. Eri tilojen syttymien ja sammutuksen epäonnistumisen todennäköisyydet.

	Pinta-ala [m ²]	Syttymis- taajuus [1/a]	Vakiintunut syttymä [1/a]	Tilan sammutus epäonnistuu [%]	Palo jatkuu [1/a]	Palo- teho [MW]
Atrium	961	0,010	0,0095	0,0475	4,52E-4	10,1
Varasto	189	0,002	0,0019	0,0475	8,90E-5	3,2
Toimisto	330	0,003	0,0033	0,25	8,17E-4	6,1
Pysäköinti	5 200	0,052	0,0515	0,0475	0,002	16,6

7.4.4 Ehtiikö palokunta ajoissa?

Taulukossa 43 on esitetty matkat paloasemilta kohteeseen. Matkat on mitattu käsi-varaisesti kartalta sekä linnuntietä että maantietä. Mittaustavan takia matkojen virhe on suurehko, mutta tähän tarkoitukseen riittävän tarkka.

Taulukko 43. Ajomatkat paloasemilta kohteeseen linnuntietä sekä maantietä.

Paloasema	Matka linnuntietä [km]	Matka maantietä [km]
Erottaja	1,8	2,4
Kallio	3,1	4,3
Haaga	5,2	7,1
Niittykumpu	8,0	9,2

Vuosina 1994–1997 ONTIKAan kirjautuneissa rakennuspaloissa palokunnan lähtövalmiusaika pääkaupunkiseudulla oli 50 %:n luottamustasolla 86 s ja 80 %:n luottamustasolla 120 s. Ajoajat pelastusyksiköille määritettiin kaavoista (193) ja (194). Palopaille saapumisen ja tulen saavuttamisen väliseksi ajaksi arvioitiin edellisten esimerkkien mukaisesti 67 s.

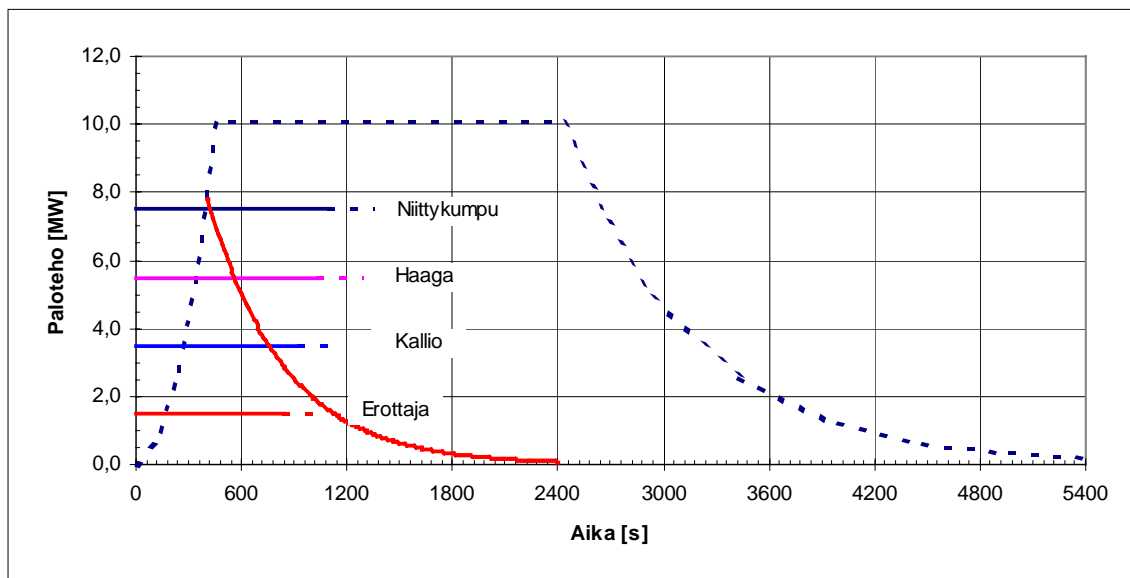
Taulukko 44. Pelastusyksiköiden kuluttamat ajat 50 %:n todennäköisyydellä. Suluissa on pelastusyksiköiden 80 %:n todennäköisyydellä kuluttama aika.

Paloasema	Lähtövalmiusaika [min]	Ajoaika [min]	Aika saapumisesta sammutustoimien aloittamiseen [min]	Yhteensä [min]
Erottaja	1,4 (2,0)	4,6 (8,0)	1,1	7,2 (11,2)
Kallio	1,4 (2,0)	6,2 (9,6)	1,1	8,7 (12,7)
Haaga	1,4 (2,0)	7,9 (11,4)	1,1	10,5 (14,5)
Niittykumpu	1,4 (2,0)	9,1 (12,6)	1,1	11,6 (15,7)

Taulukossa 44 on esitetty pelastusyksiköiden kuluttama kokonaisaika hälytyksestä sammutustoimien alkamiseen. Tähän on vielä lisättävä se aika, joka kuluu palon alkamisesta siihen hetkeen, kun palokunta saa siitä ilmoituksen. Oletetaan, että kohteessa on lämpöilmaisimet, jolloin ilmaisimen toiminta-ajat eri tiloissa saadaan PALDET 2,0T-ohjelmalla, johon syötetään oletetun palon palotehokäyrä. Kun oletetaan, että ilmaisimet ovat atriumin katossa ($h = 18,1$ m), saadaan ilmaisimen toiminta-ajaksi 408 sekuntia ja puolestaan toimistotiloissa ($h = 3,4$ m) 163 sekuntia. Lisäksi oletettiin ilmaisimen toimintalämpötilaksi 68 °C ja vasteaikaindeksiksi $200 \text{ m}^{1/2}\text{s}^{1/2}$. Taulukossa 45 on lisätty ilmaisimen toiminta-aika taulukon 44 kokonaisaikoihin.

Taulukko 45. Eri asemien pelastusyksiköiden käyttämät kokonaisajat palon alkuhetkestä sammutustoimien aloittamiseen. Palo on oletettu nopeasti kasvavaksi.

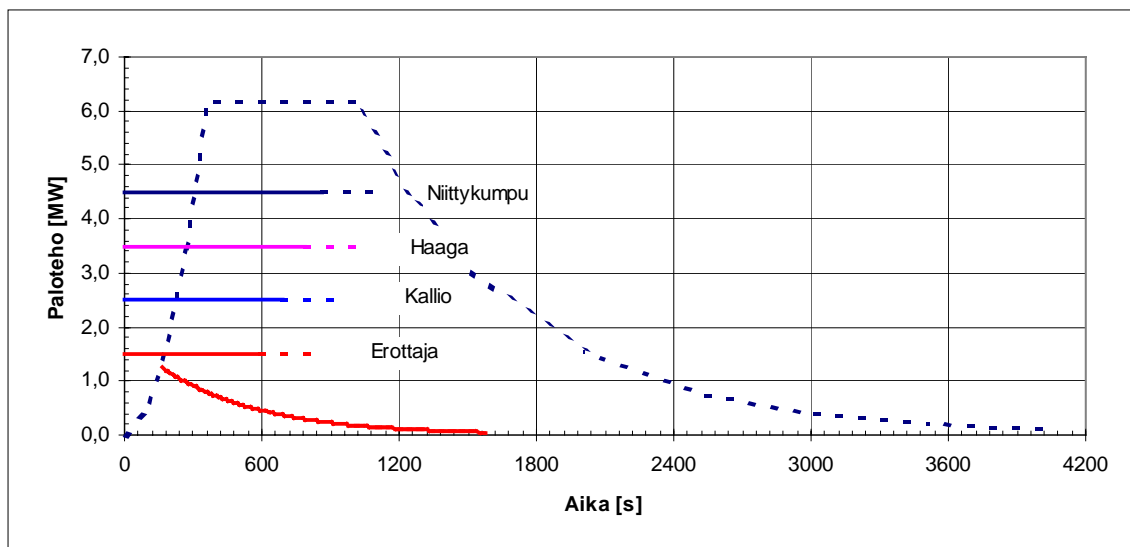
Paloasema	Atrium		Toimisto	
Kokonaisaika 50 %:n ja 80%:n luottamustasoilla (nopeasti kasvava palo)				
	50 % [min]	80 % [min]	50 % [min]	80 % [min]
Erottaja	14,0	18,0	9,9	13,9
Kallio	15,5	19,5	11,5	15,4
Haaga	17,3	21,3	13,2	17,2
Niittykumpu	18,4	22,5	14,3	18,4



Kuva 94. Atriumtilan nopeasti kasvavan palon palotehokäyrä. Katkoviivalla on merkitty palotehoa, kun sprinklaus ei toimi, ja yhtenäisellä viivalla palotehoa, kun sprinklaus toimii. Aikajanoilla on merkitty palokunnan eri asemilta lähtevien pelastusyksiköiden kuluttamaa aikaa palon alusta sammutustoimien alkamiseen.

Kuvassa 94 on piirretty atriumtilan palotehokäyrien kanssa samaan kuvaan eri paloasemien pelastusyksiköiden saapumisajat aikajanoina. Yhtenäisellä viivalla on merkitty yksiköiden kuluttamaa aikaa 50 %:n ja katkoviivalla 80 %:n luottamustasoilla. Palotehokäyristä katkoviivalla on merkitty palotehon kehittymistä tilanteessa, jossa sprinklaus ei toimi, ja yhtenäisellä viivalla palotehon kehitystä, kun sprinklaus toimii. Sprinklereiden aktivoitumisajaksi on oletettu sama kuin lämpöilmaisimien toiminta-aika.

Kuvassa 95 on samankaltaisesti toimistotilan palotehokäyrä piirrettynä samaan kuvaan eri paloasemien yksiköiden saapumisaikajanojen kanssa.



Kuva 95. Toimistotilan nopeasti kasvavan palon palotehokäyrä. Katkoviivalla on merkitty palotehoa, kun sprinklaus ei toimi, ja yhtenäisellä viivalla palotehoa, kun sprinklaus toimii. Aikajanoilla on merkitty palokunnan eri asemilta lähtevien pelastusyksiköiden kuluttamaa aikaa palon alusta sammutustoimien alkamiseen.

7.4.5 Yhteenveto

7.4.5.1 Osasto 1

Osastossa 1 on 961 m² suuruinen sprinklattu atriumtila, jossa esiintyy syttymä kerran 104 vuodessa. Sammutus ennen palokunnan saapumista paikalle epäonnistuu noin kerran 2 200 vuodessa. Tämä todennäköisyys on riittävän pieni, mutta sprinklauksessa on varmistettava, ettei atriumin muista tiloista erottava lasiseinä pääse palon aikana rikkoutumaan. Varsinkin ylimmän kerroksen toimistotilan ja atriumin välisessä seinässä on erityisen tärkeää, etteivät liekit lasin rikkoutuessa pääse vaikuttamaan atriumin kattorakenteisiin ja siten aiheuttamaan katon sortumavaaran. Kun atriumin lattiatasolla sijaitsevan 80 m² suuruisen tiedenäyttelyn oletettiin syttyvän palamaan, nousi paloteho suurimmillaan 10,1 MW:iin. Kun palon kasvukerroin oletettiin nopeaksi, paloteho saavutti huippunsa 7,7 minuutin kuluttua alkuhetkestä. Kun lämpöilmalämpötilan oletettiin olevan atriumin katossa ($h = 18,1$ m), oli ilmaisimen toiminta-aika eli aika, jossa palokunta saa hälytyksen tulipalosta, 6,8 min. Tällöin ensimmäinen yksikkö saavutti kohteen 14,0 min kuluttua palon alkamisesta. Tällöin paloteho on jo saavuttanut maksiarvonsa ja suuri osa palokuormasta on ehtinyt palaa. Jos oletetaan, että tieto palosta menee heti sen alettua palokunnalle, esimerkiksi puhelinoitolla, voidaan ajasta vähentää ilmaisimen toiminta-aika ja palokunnan ensimmäinen yksikkö saapuu paikalle 7,2 min kuluttua palon alkamishetkestä. Tällöin paloteho on noin 9 MW ja palokunta kykenee luultavasti pelastamaan osan palokuormasta ja rajaamaan palon.

7.4.5.2 Toimistotilat

Toimistotilakerrosten palo-osaston pinta-ala on 330 m². Tässä tilassa esiintyy syttymä kerran 330 vuodessa ja sammutus epäonnistuu kerran 1 220 vuodessa, mikä kuuluu luokkaan ”erittäin epätodennäköinen”. Suurimman palotehon arvoksi yhdessä toimistohuoneessa ($A = 13 \text{ m}^2$) saatiin 6,1 MW. Nopeasti kasvava palo saavutti palotehon huippuarvonsa 6,0 min kuluttua, ja palokunnan ensimmäinen yksikkö saapui paikalle 9,9 min kuluttua palon alkuhetkestä. Palokunnan saapuessa paikalle paloteho on jo kohonnut huippuunsa ja huonetila lieskahtanut. Itse palotilaa ei pystytä enää pelastamaan, jolloin palokunta keskittyy palon leviämisen estämiseen. Lämpöilmaisimen toiminta-aika tässä tapauksessa oli 2,7 min. Vaikka palokunnan sammutus tulee liian myöhään, tilan sammutuksen epäonnistumisen todennäköisyys on niin pieni, että sellainen riski voidaan ottaa.

8. Yhteenveto

Tutkimuksen tarkoituksena oli saada mm. tilastoanalyysia apuna käyttäen kvantitatiivisia ohjeita toiminnallisen mitoituksen pohjaksi. Tämä toteutettiin konstruoimalla vika-puu, johon pyrittiin ONTIKA-tietokannan avulla määrittämään eri tekijöiden todennäköisyydet, jotka pohjautuvat tilastotietoihin eivätkä pelkästään asiantuntija-arvioon. Vikapuun ja sen todennäköisyyksien avulla voidaan määrittää palokunnan saatavuuden merkitys toiminnallisista lähtökohdista suunnitellun rakennuksen paloriskitarkastelussa.

Työssä pyrittiin luonnostelevaan malli, jonka avulla voitaisiin karkeasti arvioida palokunnan toiminnan nopeuden vaikutus palovahinkojen suuruuteen ja palokuolemien määrään. Yritettäessä löytää sopivaa vastefunktiota todettiin, ettei tässä käytettävissä olleilla havainnoilla kyetty määrittämään vastefunktiota järkevällä tasolla. Tarkempaan analyysiin tarvittaisiin suurempi joukko tarkempia havaintoja ja siten tässä tehdyllä analyysillä ei voida tehdä tarkkoja johtopäätöksiä toimintavalmiusajan vaikutuksesta tuhoutuneen omaisuuden suuruuteen tai palokuolemien määrään.

Tarkastelemalla tulipalojen jakaumaa eri kunnissa, pyrittiin etsimään niiden määrän riippuvuutta erilaisista ilmeisiltä tuntuvista tekijöistä. Tarkasteltaessa suhteellista hälytysmäärää voitiin todeta Suomen olevan yleisesti ottaen melko homogeeninen alue, sillä hälytysten jaotteluun käytettyjen luokkien erot eivät kasvaneet kovin suuriksi. Todettiin, että mitoittavana tekijänä palokunnan resurssitarpeen arvioinnissa syttymien osalta voidaan käyttää joko kerrosalaa tai asukaslukua. Kumpikin normitus on virherajojen puitteissa samanarvoinen. Rakennuspalojen lukumäärä voidaan karkeasti määrittää kaavasta

$$y = \begin{cases} 0,47x_1 \\ 6,55x_2 \end{cases}, \quad (204)$$

missä x_1 on asukasluku tuhansina ja x_2 kerrosala neliökilometreinä.

Ilmoitusvirran havaittiin olevan tilastollisella tarkkuudella sama koko maassa ja Helsingissä, mutta toiminta-aikojen eron takia asiakkaiden keskimääräinen lukumäärä järjestelmän sisällä Helsingissä on keskimäärin vain noin puolet koko maan keskiarvosta.

Palo- ja pelastustoimen ajoaikaa ajomatkan funktiona tutkittiin piirtämällä jakaumat eri yksikköryhmille. Havaintoihin sovitettiin malli, jonka karkeana tuloksena saatiin, että ajoaika pelastus- ja johtoyksiköille voidaan määrittää seuraavasti:

$$T_{pelastus} = \begin{cases} 178,5\sqrt{s} , & \text{kun } s \leq 8,0 \text{ km} \\ 31,5s + 252,9 , & \text{kun } s \geq 8,0 \text{ km} \end{cases}$$

$$T_{johto} = \begin{cases} 140,3\sqrt{s} , & \text{kun } s \leq 2,5 \text{ km} \\ 44,5s + 110,7 , & \text{kun } s \geq 2,5 \text{ km} \end{cases}$$

Tulokset ovat vain suuntaa antavia, ja tarkempien tuloksien saavuttamiseksi tulisi havaintojoukon olla suurempi ja ajomatkojen aivan tarkkoja. Havainnoissa oli paljon hajontaa, jolloin yksittäisen ajoajan virheet kasvoivat suuriksi. Ajoajan keskiarvon luottamusraja ei kuitenkaan kasvanut kohtuuttoman suureksi, jonka vuoksi eri ajoneuvoryhmien keskiarvokäyrät olivat yhdistettävissä yleispätevimmiä käyriksi. Tämä yksinkertaisin mahdollinen malli ei kykene selittämään kaikkia ajoaikaan vaikuttavia tekijöitä, kuten keliolosuhteet, liikennetiheys tai tien laatu, ja tämän vuoksi mallia tulisi jatkossa tarkentaa.

Eräs palokunnan epäonnistumista mitoittavista tekijöistä on yksiköiden saatavuus palopaikalle. Tietyllä alueella tulee olla riittävästi yksiköitä palvelemaan hälytyksiä, jotta todennäköisyys ettei tulevaan hälytykseen voida lähettää riittävää määrää yksiköitä, estotodennäköisyys, on riittävän pieni. Työssä käytetyillä alustavilla malleilla koko Suomen alueella estotodennäköisyydet näyttäisivät olevan melko pieniä ja pelastushenkilöstö siten kattava koko maassa. Malli on kuitenkin keskittynyt etujoukkoihin eli se ei ota huomioon tilannetta, jossa yksiköitä joudutaan hälyttämään myöhemmin lisää onnettomuuspaikalle. Mallissa oletetaan hälytysvirran olevan riippumaton ja yksiköiden saapuvan lähietäisyydeltä palopaikalle. Käytäntö on kuitenkin erilainen useissa Suomen kunnissa, kuten Jyväskylän esimerkki (luku 7) osoittaa. Kun operatiivinen henkilökunta ei päivystä paloasemalla, sen saaminen palopaikalle kestää useita minutteja kauemmin kuin esimerkiksi pääkaupunkiseudulla, jossa on useampia päätoimisia palokuntia suhteellisen lähellä toisiaan. Tämän vuoksi malli toimiikin pääkaupunkiseudulla, jossa samanaikaisesti saadaan lähtemään useita yksiköitä samaan hälytykseen vaikkakin ne lähtisivät eri asemilta.

Käytetty malli sisältää yksinkertaistuksia, mutta verrattaessa tuloksia kokeellisiin mitauksiin voidaan todeta, että sen avulla voidaan melko tarkkaan arvioida palokunnan operatiivista toimintaa. Lisäksi tehtiin rohkea oletus, että erityyppisissä hälytyksissä kaikki ominaisuudet, ilmoitusvirtaa lukuunottamatta, ovat samat kuin rakennuspaloissa. Tarkasteltaessa mallin herkkyyttä syöteparametrien suhteen oli selvästi havaittavissa, että malli on paljon herkempi reagoimaan ilmoitusvirran kuin toiminta-ajan muutoksiin. Tämän vuoksi mallia sovellettaessa on erittäin tärkeää määrittää ilmoitusvirtojen arvot mahdollisimman tarkasti. Toiminta-ajan muutoksille malli ei osoittautunut yhtä herkäksi, ja lähes poikkeuksetta voidaan olettaa, etteivät muiden hälytysten toiminta-ajat

poikkeaa rakennuspalojen toiminta-ajoista enempää kuin tekijällä kaksi. Tämän vuoksi voidaan päätellä, että vaikka todellisia toiminta-aikoja ei ollutkaan käytössä, malli antaa kuitenkin melko hyviä tuloksia, koska käytetyt ilmoitusvirrat olivat tarkasti tilastoista määritettyjä todellisia ilmoitusvirtoja. Tehtyjen esimerkkien perusteella voidaan siis tehdä johtopäätös, että koska estotodennäköisyydet Suomessa jäävät melko alhaisiksi, yksiköiden saatavuus ei muodostu palokunnan epäonnistumista mitoittavaksi tekijäksi.

Toinen epäonnistumista mitoittava tekijä on yksikön ajoaika kohteeseen. Tutkimuksen mukaan noin 80 % väestöstä asuu kunnissa, joiden tehollinen säde on alle 15 kilometriä, ja noin 50 % kunnissa, joiden tehollinen säde on alle 10 kilometriä. Ajoajan vaikutus toimintavalmiusaikaan näkyi muutamien läänien toimintavalmiusajoissa, kuten Mikkelin, Kuopion ja Lapin lääneissä. Muissa lääneissä ei ajoaika samankaltaisesti tullut esiin, mikä johtuu oletettavastikin siitä, että pinta-alaltaankin suurissa kunnissa väestö on keskittynyt kuntakeskuksiin ja siten myös tulipalot sattuvat enimmäkseen niissä. Tämä tutkimus ei kuitenkaan ota kantaa siihen, kuinka väestö on maassamme jakautunut. Sen määrittäminen vaatii tarkemman tutkimuksen, jossa digitaalisen tieverkon, paikkatietojärjestelmän sekä rekisterin, johon on merkitty kiinteistöjen koordinaatit, avulla määritetään, kuinka väestö ja kerrosala maassamme ovat sijoittuneet sekä todelliset matkat paloasemilta kohteisiin. Johtopäätöksenä todetaan, että useimmiten Suomessa pelastustoimen onnistuminen on riippuvainen ajoajan pituudesta onnettomuuskohteeseen.

Palo- ja pelastustoimen lähtövalmius-, toimintavalmius- sekä palveluaikoja tutkittiin luokittelemalla havainnot sopiviin aikaväleihin ja piirtämällä niiden jakaumat. Sekä lähtövalmius- että toimintavalmiusajan ja myös palveluajan havaittiin olevan karkeasti gammajakautuneita. Kunnissa, joissa ei ole päätoimisia palokuntia, nämä toiminta- ja lähtövalmiusajat ovat kuitenkin melko optimistisia. Jotta saataisiin todellinen kuva koko maan valmiusajoista, tulisi käytettävissä olla kaikkien yksiköiden yksilölliset valmiusajat. Pienet kunnat poikkeavat väkisin suurkaupungeista, joissa reservejä on enemmän lyhyemmän matkan päässä.

Tässä työssä ei käsitelty lainkaan paloasemien miehitystä ja sen riittävyyden osuutta epäonnistumistodennäköisyyteen, vaan keskityttiin vain operatiivisten ajoneuvojen saatavuuteen.

Lähdeluettelo

Abramowitz, A. & Stegun, I. A. 1970. Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs and Mathematical Tables. 9. p. New York: Dover Publications Inc. 1045 s. ISBN 0-486-61272-4

Anon. 1970. Fire Record of Cities 1969. Fire Journal, Vol. 64, No 4, s. 54–59, 62.

Anon. 1980. Statens Brandinspektions udrykningsstatistik 1979. Brandvaern. 6. årgång. S. 30.

Anon. 1981. Statistik. Brandvaern. 7. årgång. S. 14.

Anon. 1999. Paloauto ja apuun tulleet ajokit liukastelivat tieltä Vuosaaressa. Helsingin Sanomat 2.1.1999. S. B3.

Australasian Fire Authorities Council, 1997. Fire Intervention Model. Version 2.1. 188 s.

Baroudi, D., Kokkala, M., Weckman, H. 1998. Lämpöilmaisimien toiminta-aikojen laskentaohjelma PALDET 2.0T. Espoo: VTT Tiedotteita 1922. 34 s. + liitt. 19s. ISBN 951-38-5328-4/ISSN1235-0605

Beers, Y. 1953. Introduction to the Theory of Error. Cambridge, MS. 65 p.

Bennets, I. D., Poh, K. W., Poon, S. L., Thomas, I. R., Lee, A. C., Beever, P. F., Ramsay G. C. & Timms, G. R. 1998. Fire Safety in Shopping Centres, Fire Code Reform Research Program. Australia: Fire Code Reform Center Limited. 156 s. + liitt. 77 s. ISBN 0-7337-2212-1.

Brušlinski, N. N., Sokolov, S. V., Kolomiets, Yu. A., Naumenko, A. P. & Alyokhin Ye. M. 1998. Resenie organizacionno-upravlenceskih problem pozarnoj ohrany na osnove informacionnyh tehnologij. Pozarovzryvobezopasnost (Nro 3.). S. 60–66. ISSN 0869-7493 (venäjänkielinen) [Palotoimen organisointikysymysten ratkaiseminen informaatiotekniikan keinoin]

Brušlinski, N. N. 1988. Sistemnyj Analiz i Problemy Pozarnoj Bezopasnosti Narodnogo Hozjajstva. Moskva Strojizdat. 413 s. ISBN 5-274-00176-9. (venäjänkielinen) [Paloturvallisuusongelmien systeemianalyysi kansantaloudellisista näkökohdista]

Brušlinski, N. N. 1992. Normirovanie Tsisla Pozarnyh Avtomobilej i Pozarnyh Depo dlja Gorodov. Pozarovzryvobezopasnost (Nro 4). S. 34–38. (venäjänkielinen) [Kaupunkien paloasemien ja operatiivisten yksiköiden lukumäärän suositusnormi]

CEC Agreements, 7210-SA/211/318/518/620/933. 1996. Development of Design Rules for Steel Structures Subjected to Natural Fires in Closed Car Parks. Technical Report no 6, Semestrial Report, Period from 01.01.96–30.06.96.

Chaiken, J. M., Ignall, J. E. & Walker, W. E. 1975. Deployment Methodology for Fire Departments, How Station Locations and Dispatching Practices Can Be Analyzed and Improved. (R-1853-HUD.) The New York City-Rand Institute. 71 s.

CIB W14, Workshop. 1983. A Conceptual Approach Towards a Probability Based Design Guide on Structural Fire Safety. Fire Safety Journal 6, s. 1–79.

Drysdale, D. 1985. An Introduction to Fire Dynamics Chichester. John Wiley & Sons Ltd. 424 s. ISBN 0–471–90613–1

Gradshteyn, I. S. & Ryzhik, I. M. 1983. Table of Integrals, Series, and Products. 4. p. Academic Press, Inc. New York. 1160 s. ISBN 0–12–294760–6

Haurum, G. 1977. Judging the Size of Fire Brigades - The Danish Approach. Fire International, Dec., s. 41–45.

Hertzberg, S. 1972. Jonotusjärjestelmistä. Helsingin teknillinen korkeakoulu: Puhelin-tekniikan laboratorio. 140 s. (Raportti 13/72.) ISBN 951–752–670–9

Hintšin, A. Ja. 1932. [Ajasta riippumattoman jonon matemaattinen teoria]. Matematičeskij Sbornik 39 (Nro 4.). S. 189–197. (venäjänkielinen)

Hintšin, A. Ja. 1955. [Joukkopalvelinten teorian matemaattiset menetelmät] Trudy Matematičeskogo instituta im. V. A. Steklova. (Nro 49.) (venäjänkielinen)

Iversen, V. B. 1998. Data- og teletrafikteori laerebog. Danmarks Tekniske Universitet, Institut for Telekommunikation. Luku 10. (englanninkielinen kopio valmisteilla olevan teoksen käsikirjoituksesta)

Katajamäki, J. 1997. Lahden kerrostalopalo. Pelastustieto, Vol. 48. Nro 1, s. 8–19. ISSN 1236–8369

Katajamäki, J. 1998. Jyväskylän synkkä junaturma oli myös nopea pelastusoperaatio. Pelastustieto, Vol. 49, nro 1, s. 8–11. ISSN 1236–8369

Keski-Rahkonen, O. & Björkman, J. 1999a. Palotilastoja Suomesta ja ulkomailta toiminnallisten palosäädösten perusteiksi. VTT Tiedotteita 1990. Espoo: Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus. 56 s.

- Keski-Rahkonen, O. & Björkman, J. 1999b. Mitoituspalo. VTT Tiedotteita. Espoo. Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus. (julkaistaan)
- Keski-Rahkonen, O. 1993. Design Fire Construction for Individual Assessment. Proceedings of the, 3rd CIB/W14 Workshop, "Modelling", 25–26 January 1993. Rijswijk, The Netherlands: TNO Building and Construction Research. S. 43–48.
- Keski-Rahkonen, O. 1997. Palokuolemien riskistä Suomessa ja ulkomailla. Palontorjuntatekniikka, Vol. 27, Nro 4 s. 19–25.
- Keski-Rahkonen, O. 1998. Probability of Multiple Deaths in Building Fires According to an International Fire Statistics Study. Human Behaviour in Fire, Proceedings of the First International Symposium, 31 August - 2 September 1998. University of Ulster, Fire Safety Engineering Research and Technology Centre. S. 381–391. ISBN 1–85923 103–9
- Keski-Rahkonen, O. & Lindberg, L. 1998. Performance Based Fire Safety Design of an Office Complex with Large Atria. Teoksessa: EUROFIRE '98: Fire Safety through Design, Engineering and Management, Brussels, 11–13 March 1998. 16 s.
- Kokkala, M. 1996. Toiminnalliset palosäädökset. Palontorjuntatekniikka, Vol. 26, Nro1, s. 20–22.
- Kolesar, P. A. 1975. Model for Predicting Average Fire Company Travel Times. (R-1624-NYC.) New York City-Rand Institute. 19 s.
- Korpela, K. 1999. Toimistorakennusten palokuormat. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu. 84 s. + liitt 115 s.
- Laininen, P. 1979. Todennäköisyyslasku ja tilastomatematiikka. Espoo: Otakustantamo. 254 s. ISBN 9516712606
- Lehtinen, S. 1991. Palotapausten seurantajärjestelmän kokeilu 1989–1990. Palontorjuntatekniikka, Vol. 21, Nro 3, s. 10–14.
- Linkova, P. 1999. Palotehokäyrien aikavakioiden määrittäminen. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu. 43 s. + liitt 202 s.
- Lokki, O. 1980. Tutkimustulosten tilastollinen hallinta ja käyttö. Helsinki: Insinööritieto Oy. 591 s. ISBN 9517931956

Madrzykowski, D. & Vettori, R. L. 1992. A Sprinkler Fire Suppression Algorithm for the GSA Engineering Fire Assessment System. NISTIR 4833. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology. 35 s.

McCormick, N. J. 1981. Reliability and Risk Analysis. Orlando, Academic Press, Inc. 446 s. ISBN 0-12-482360-2

Milton, J. S. & Arnold, J. C. 1990. Introduction to Probability and Statistics. 2. p. McGraw-Hill. New York. 700 s. ISBN 0-07-100812-8

Morse, P. M. 1958. Queues, Inventories and Maintenance. New York: John Wiley & Sons, Inc. 202 s.

Nordic Committee on Building Regulations, NKB Fire Safety Committee. 1995. Performance Requirements for Fire Safety and Technical Guide for Verification by Calculation. NKB Committee and Work Reports 1994:07 E. Helsinki: Monila Oy. 77 s. ISBN 951-53-0421-0

Pollaczek, F. 1930. Über eine Aufgabeder Wahrscheinlichkeitstheorie. Mathematische Zeitschrift 32. S. 64-100 ja 729-750.

Pollaczek, F. 1953. Sur une generalisation de la theorie des attentes. Comptes Rendus Hebdomadaires des seances de l'academie des Sciences. S. 578-80. (Paris 236.) (ranskankielinen)

Rahikainen, J. & Keski-Rahkonen, O. 1998a. Palojen syttymistaajuuksien tilastollinen määrittäminen. Palontorjuntateknikka, Vol. 28, Nro 2, s. 12-17.

Rahikainen, J. & Keski-Rahkonen, O. 1998b. Determination of Ignition Frequency of Fire in Different Premises in Finland. Proceedings of EUROFIRE '98: Fire safety by design, engineering and management, Brussels, 11th-13th March 1998. IFE. Asse.

Rahikainen, J. & Keski-Rahkonen, O. 1998c. Determination of Ignition Frequency of Fires in Different Premises in Finland. Fire Engineers Journal, Vol. 58, No 197, s. 33-37.

Rahikainen, J. 1998a. Palokuolemat Suomessa vuosina 1988-97. Poliisiammattikorkeakoulun tutkimuksia 4/1998. Helsinki. 136 s. ISBN 951-815-010-9

Rahikainen, J. 1998b. Palotilastojen analysointi toiminnallisten palosäädösten pohjaksi. VTT Tiedotteita 1892. Espoo. 111 s. + liitt. 79 s. ISBN 951-38-5198-2

- Rasbash, D. J. 1986. Extinction of Fire With Plain Water. International Association for Fire Safety Science. Fire Safety Science. Proceedings of 1st International Symposium, Gathersburg, 7–11 October 1985. Hemisphere Publishing Corp. New York. S. 1145–1163.
- Rider, K. L. 1975. A Parametric Model for the Allocation of Fire Companies. (R-1615-NYC-HUD.) The New York City-Rand Institute. 19 s.
- Ross, K. W. 1995. Multiservice Loss Models for Broadband Telecommunication Networks. Springer-Verlag. Berlin. 343 s.
- Shrivastava, H. M., & Kashyap, B. R. K. 1982. Special Functions in Queuing Theory and Related Stochastic Processes. Academic Press, Inc., New York. 308 s.
- Sisäasiainministeriö, Pelastusosasto. 1997. Palo- ja pelastustoimen vuosi- ja aikasarjatilasto vuosilta 1976, 1980–1992. Helsinki: Oy Edita Ab. 30 s. (B:16.). ISBN 951–37–2368–2.
- Sisäasiainministeriö. 1993. Ohje kunnallisten palokuntien toimintavalmiudesta. Pelastusosasto. (A:42.) 54 s.
- StatSoft. 1995. STATISTICA for Windows (Volume III: Statistics II). 2. p. 3782 s. ISBN 1–884233–13–9
- Takács, L. 1962. Introduction to the Theory of Queues. Oxford University Press, Inc., New York. 268 s.
- Tillander, K. 1999. Palokunnan saatavuuden merkitys rakennuksen paloriskitarkastelussa. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Talonrakennustekniikka. 213 s.
- Thomas, P. H. 1959. Use of Water in Extinction of Large Fires. Institution of Fire Engineers Quarterly. S. 130–132.
- Virtamo, J. 1993. Liikenneteorian perusteet. Technical Research Centre of Finland, Telecommunications Laboratory. 36 s.
- Yu H. Z., Lee, J. L., & Kung, H. C. 1994. Suppression of Rack-Storage Fires by Water. International Association for Fire Safety Science. Fire Safety Science. Proceedings of 4th International Symposium, Canada, 13–17 July, 1994. S. 901–912.

Liite A: Brušlinskin mallin virhearviot

$$P_0 = e^{-\sum_{l=1}^L \lambda_l \tau_l} \quad (205)$$

$$dP_0 = e^{-\sum_{l=1}^L \lambda_l \tau_l} \left(-\sum_{l=1}^L \tau_l d\lambda_l \right) \quad (206)$$

$$P(k) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^L j \lambda_j \overline{\tau_j} P\{k-j\} \quad (207)$$

$$dP(k) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^L \{ j d\lambda_j \overline{\tau_j} P\{k-j\} + j \lambda_j \tau_j dP\{k-j\} \} \quad (208)$$

$$f^* \{k\} = \sum_{l=1}^k \lambda_l P\{k-l\} \quad (209)$$

$$df^* \{k\} = \sum_{l=1}^k \{ d\lambda_l P\{k-l\} + \lambda_l dP\{k-l\} \} \quad (210)$$

$$f^0 \{k\} = \sum_{l=1}^L \lambda_l P\{k\} \quad (211)$$

$$df^0 \{k\} = \sum_{l=1}^L \{ d\lambda_l P\{k\} + \lambda_l dP\{k\} \} \quad (212)$$

$$f_{\text{osittainen häiriö}} = \sum_{l=2}^L \lambda_l \sum_{k=N-l+1}^{N-1} P\{k\} \quad (213)$$

$$df_{\text{osittainen häiriö}} = \sum_{l=2}^L d\lambda_l \sum_{k=N-l+1}^{N-1} P\{k\} + \sum_{l=2}^L \lambda_l \sum_{k=N-l+1}^{N-1} dP\{k\} \quad (214)$$

$$f_{\text{täyshäiriö}} = \sum_{l=1}^L \lambda_l (1 - \sum_{k=0}^{N-1} P\{k\}) \quad (215)$$

$$df_{\text{täyshäiriö}} = \sum_{l=1}^L d\lambda_l (1 - \sum_{k=0}^{N-1} P\{k\}) - \sum_{l=1}^L \lambda_l \sum_{k=0}^{N-1} dP\{k\} \quad (216)$$

$$f_h = \sum_{l=1}^L \lambda_l - \sum_{k=1}^N f^* \{k\} \quad (217)$$

$$df_h = \sum_{l=1}^L d\lambda_l - \sum_{l=1}^N df^* \{k\} \quad (218)$$

$$P_{\text{kielto}} = \frac{f_{\text{kielto}}}{\sum_{l=1}^L \lambda_l} \quad (219)$$

$$dP_{\text{kielto}} = \frac{df_{\text{kielto}} \sum_{l=1}^L \lambda_l - f_{\text{kielto}} \sum_{l=1}^L d\lambda_l}{(\sum_{l=1}^L \lambda_l)^2} \quad (220)$$

Liite B: 8 yksikön tilat

Kahdeksan yksikön tilojen lukumäärät kaavasta (94) taulukossa B1.

Taulukko B1. Mahdollisten tilojen lukumäärät kahdeksan yksikön tapauksessa.

N	P(N)
0	1
1	$P(0) = 1$
2	$P(0) + P(1) = 2$
3	$P(1) + P(2) = 3$
4	$P(2) + P(3) = 5$
5	$P(3) + P(4) - P(0) = 7$
6	$P(4) + P(5) - P(1) = 11$
7	$P(5) + P(6) - P(2) - P(0) = 15$
8	$P(6) + P(7) - P(3) - P(1) = 22$

Kahdeksan yksikön eri tilojen graafi kuvassa B1. Huomaa, että kuvaan B1 sisältyvät kaikki kahdeksan ja sitä pienempien yksiköiden määrän tilojen graafit, esimerkiksi kuvan 34 graafi on kuvan B1 viidellä ylimmällä rivillä, kun jätetään ottamatta huomioon tilat $m_i > 4$, mitkä ovat kaikki nolliä.

0 yksikköä käytössä

m1	m2	m3	m4	m5	m6	m7	m8
0	0	0	0	0	0	0	0

1 yksikköä käytössä

m1	m2	m3	m4	m5	m6	m7	m8
1	0	0	0	0	0	0	0

2 yksikköä käytössä

m1	m2	m3	m4	m5	m6	m7	m8
2	0	0	0	0	0	0	0

3 yksikköä käytössä

m1	m2	m3	m4	m5	m6	m7	m8
3	0	0	0	0	0	0	0

4 yksikköä käytössä

m1	m2	m3	m4	m5	m6	m7	m8
4	0	0	0	0	0	0	0

5 yksikköä käytössä

m1	m2	m3	m4	m5	m6	m7	m8
5	0	0	0	0	0	0	0

6 yksikköä käytössä

m1	m2	m3	m4	m5	m6	m7	m8
6	0	0	0	0	0	0	0

7 yksikköä käytössä

m1	m2	m3	m4	m5	m6	m7	m8
7	0	0	0	0	0	0	0

8 yksikköä käytössä

m1	m2	m3	m4	m5	m6	m7	m8
8	0	0	0	0	0	0	0

m1	m2	m3	m4	m5	m6	m7	m8
0	0	0	0	0	0	0	0

m1	m2	m3	m4	m5	m6	m7	m8
1	0	0	0	0	0	0	0

m1	m2	m3	m4	m5	m6	m7	m8
2	0	0	0	0	0	0	0

m1	m2	m3	m4	m5	m6	m7	m8
3	0	0	0	0	0	0	0

m1	m2	m3	m4	m5	m6	m7	m8
4	0	0	0	0	0	0	0

m1	m2	m3	m4	m5	m6	m7	m8
5	0	0	0	0	0	0	0

m1	m2	m3	m4	m5	m6	m7	m8
6	0	0	0	0	0	0	0

m1	m2	m3	m4	m5	m6	m7	m8
7	0	0	0	0	0	0	0

m1	m2	m3	m4	m5	m6	m7	m8
8	0	0	0	0	0	0	0

Kuva B1. Kahdeksan yksikön tilojen graafi.

Kahdeksalle yksikölle yhtälön (98) tekijät ovat tarkasti ottaen taulukon B2 mukaiset, missä ensimmäisessä sarakkeessa on yksiköiden lukumäärä ja toisessa sitä vastaava P_E jaettuna P_0 :lla. Taulukko B2 on saatu kirjoittamalla auki yhtälö (98) kaikille kuvan B1 graafissa esitetyille tiloille.

Taulukko B2.

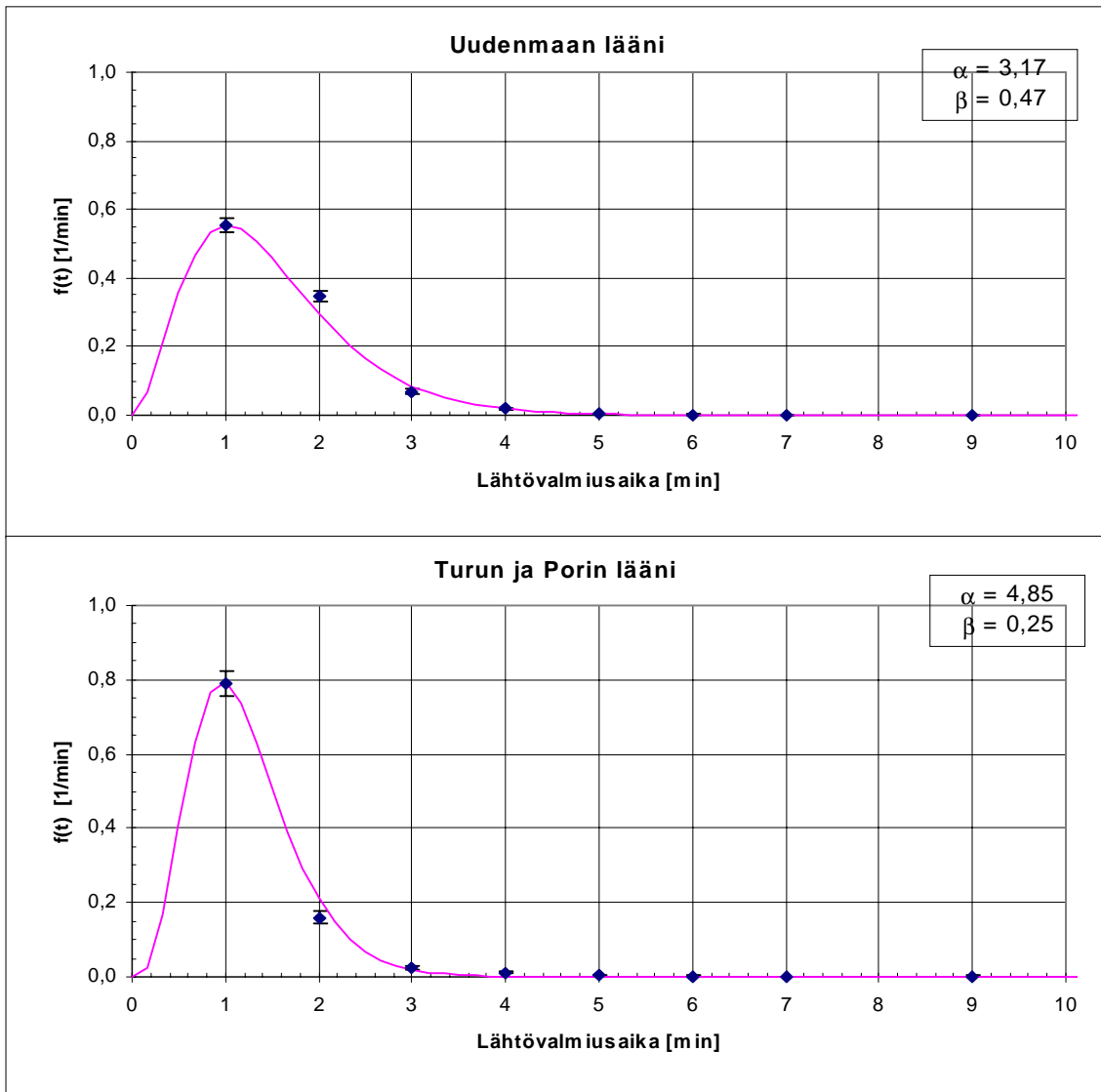
	P_E / P_0
0	1
1	α_1
2	$\frac{\alpha_1^2}{2!} + \alpha_2$
3	$\frac{\alpha_1^3}{3!} + \alpha_1\alpha_2 + \alpha_3$
4	$\frac{\alpha_1^4}{4!} + \frac{\alpha_1^2\alpha_2}{2!} + \frac{\alpha_2^2}{2!} + \alpha_1\alpha_3 + \alpha_4$
5	$\frac{\alpha_1^5}{5!} + \frac{\alpha_1^3\alpha_2}{3!} + \frac{\alpha_1^2\alpha_2^2}{2!} + \frac{\alpha_1^2\alpha_3}{2!} + \alpha_2\alpha_3 + \alpha_1\alpha_4 + \alpha_5$
6	$\frac{\alpha_1^6}{6!} + \frac{\alpha_1^4\alpha_2}{4!} + \frac{\alpha_1^2\alpha_2^2}{2!2!} + \frac{\alpha_2^3}{3!} + \frac{\alpha_1^3\alpha_3}{3!} + \alpha_1\alpha_2\alpha_3 + \frac{\alpha_1^2\alpha_4}{2!} + \alpha_2\alpha_4 + \alpha_1\alpha_5 + \frac{\alpha_3^2}{2!} + \alpha_6$
7	$\frac{\alpha_1^7}{7!} + \frac{\alpha_1^5\alpha_2}{5!} + \frac{\alpha_1^3\alpha_2^2}{3!2!} + \frac{\alpha_1\alpha_2^3}{3!} + \frac{\alpha_1^2\alpha_2\alpha_3}{2!} + \frac{\alpha_2^2\alpha_3}{2!} + \frac{\alpha_1^3\alpha_4}{3!} + \alpha_1\alpha_6 + \alpha_1\alpha_2\alpha_4 + \alpha_3\alpha_4 + \frac{\alpha_1^2\alpha_5}{2!} +$ $\alpha_2\alpha_5 + \frac{\alpha_1^4\alpha_3}{4!} + \frac{\alpha_1\alpha_3^2}{2!} + \alpha_7$
8	$\frac{\alpha_1^8}{8!} + \frac{\alpha_1^6\alpha_2}{6!} + \frac{\alpha_1^4\alpha_2^2}{4!2!} + \frac{\alpha_1^2\alpha_2^3}{2!3!} + \frac{\alpha_2^4}{4!} + \frac{\alpha_1^2\alpha_2\alpha_4}{2!} + \frac{\alpha_2^2\alpha_4}{2!} + \frac{\alpha_1^5\alpha_3}{5!} + \frac{\alpha_1^2\alpha_3^2}{2!2!} + \frac{\alpha_1^3\alpha_2\alpha_3}{3!} +$ $\frac{\alpha_1\alpha_2^2\alpha_3}{2!} + \frac{\alpha_1^4\alpha_4}{4!} + \alpha_3\alpha_5 + \frac{\alpha_1^2\alpha_6}{2!} + \frac{\alpha_4^2}{2!} + \alpha_1\alpha_3\alpha_4 + \frac{\alpha_1^3\alpha_5}{3!} + \alpha_1\alpha_2\alpha_5 + \alpha_2\alpha_6 + \alpha_1\alpha_7 + \alpha_8 + \frac{\alpha_2\alpha_3^2}{2!}$

Liite C: Lähtövalmiusajat

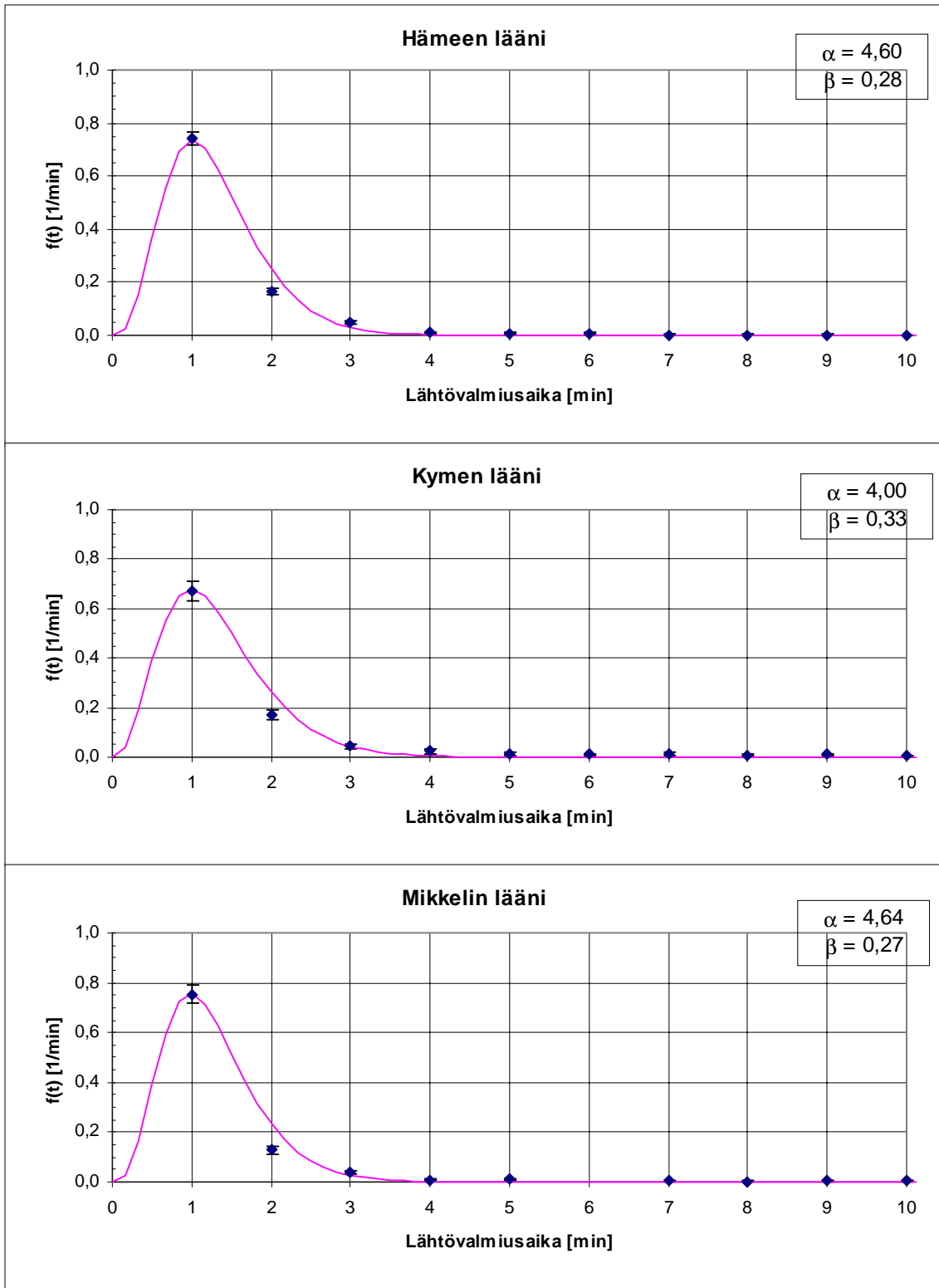
Gammajakauman tiheysfunktion sovitus

Havainnot minuutin tarkkuudella

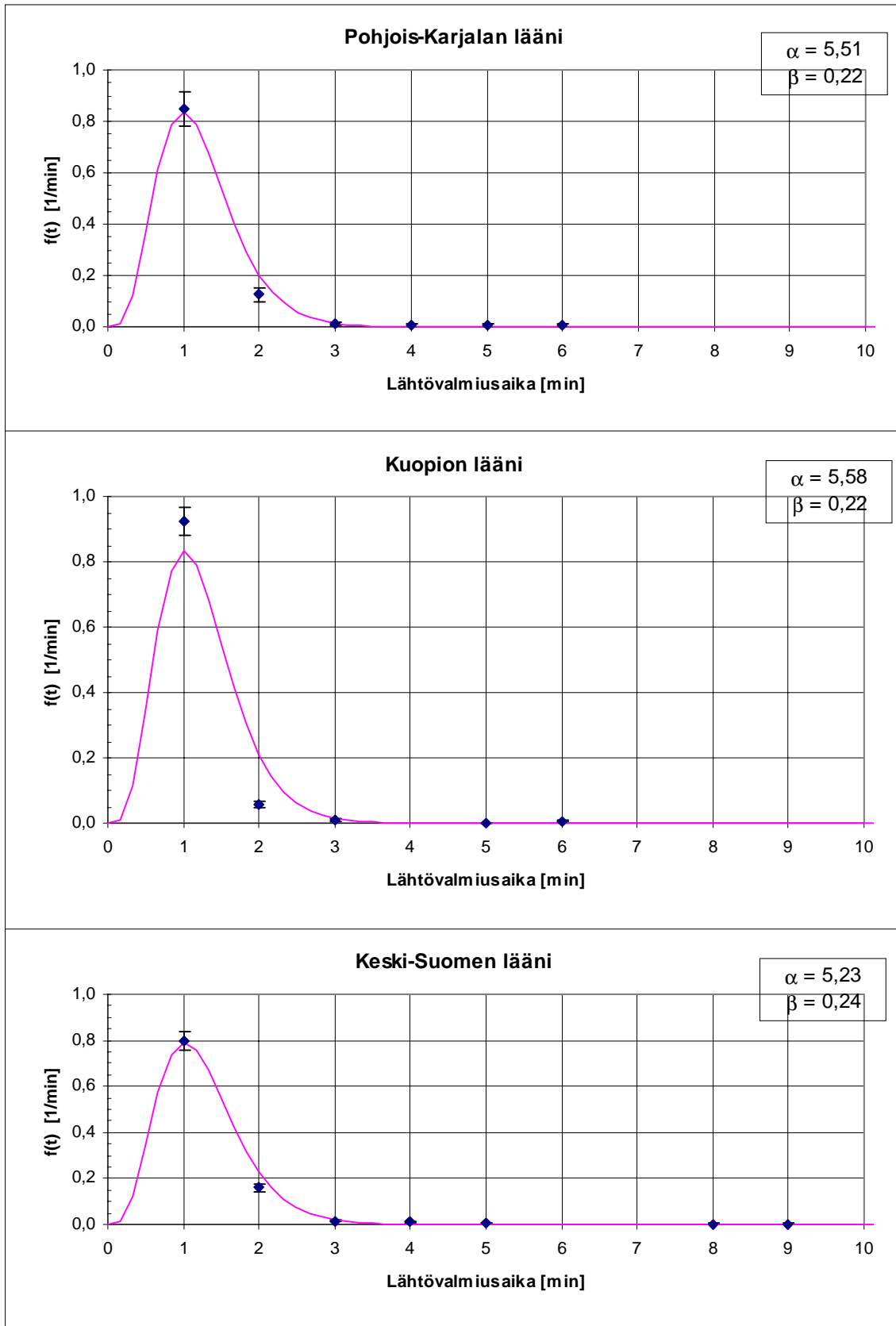
Läänit



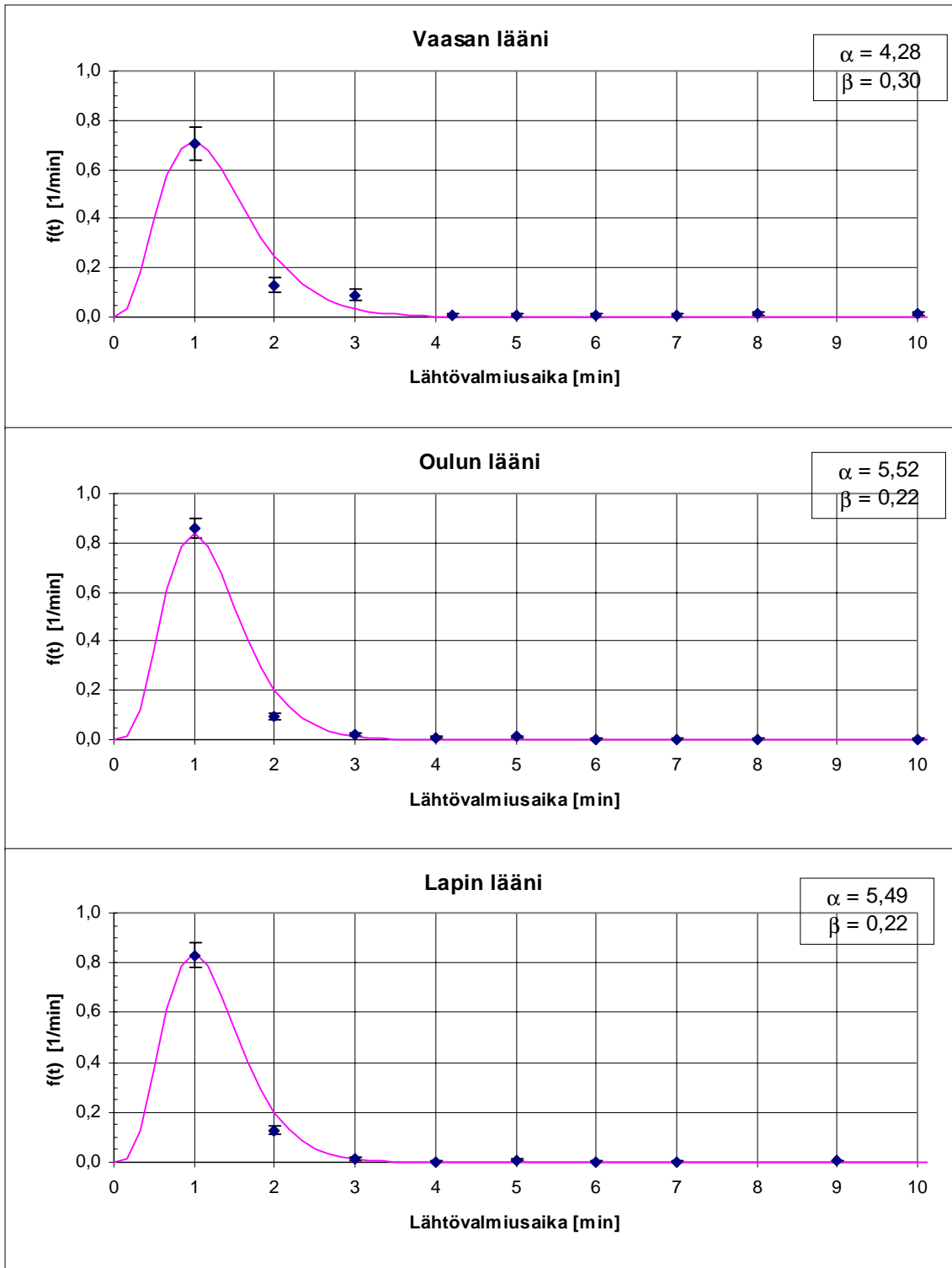
Kuva C1. Gammajakauman tiheysfunktion sovitus minuutin tarkkuudella oleviin lähtövalmiusaikahavaintoihin lääneittäin.



Kuva C2. Gammajakauman tiheysfunktion sovitukset minuutin tarkkuudella oleviin lähtövalmiusaikahavaintoihin lääneittäin.



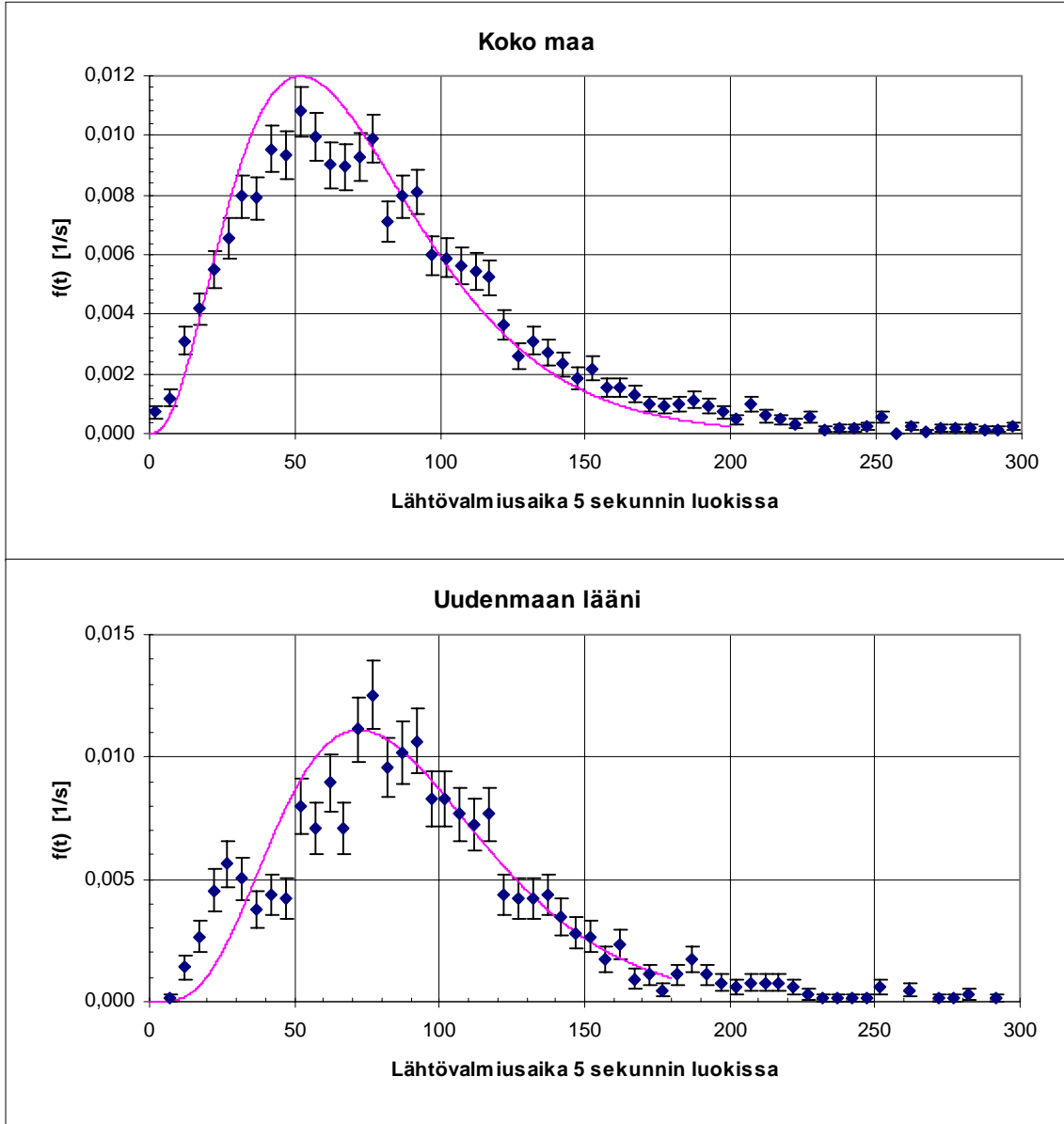
Kuva C3. Gammajakauman tiheysfunktion sovitukset minuutin tarkkuudella oleviin lähtövalmiusaikahavaintoihin lääneittäin.



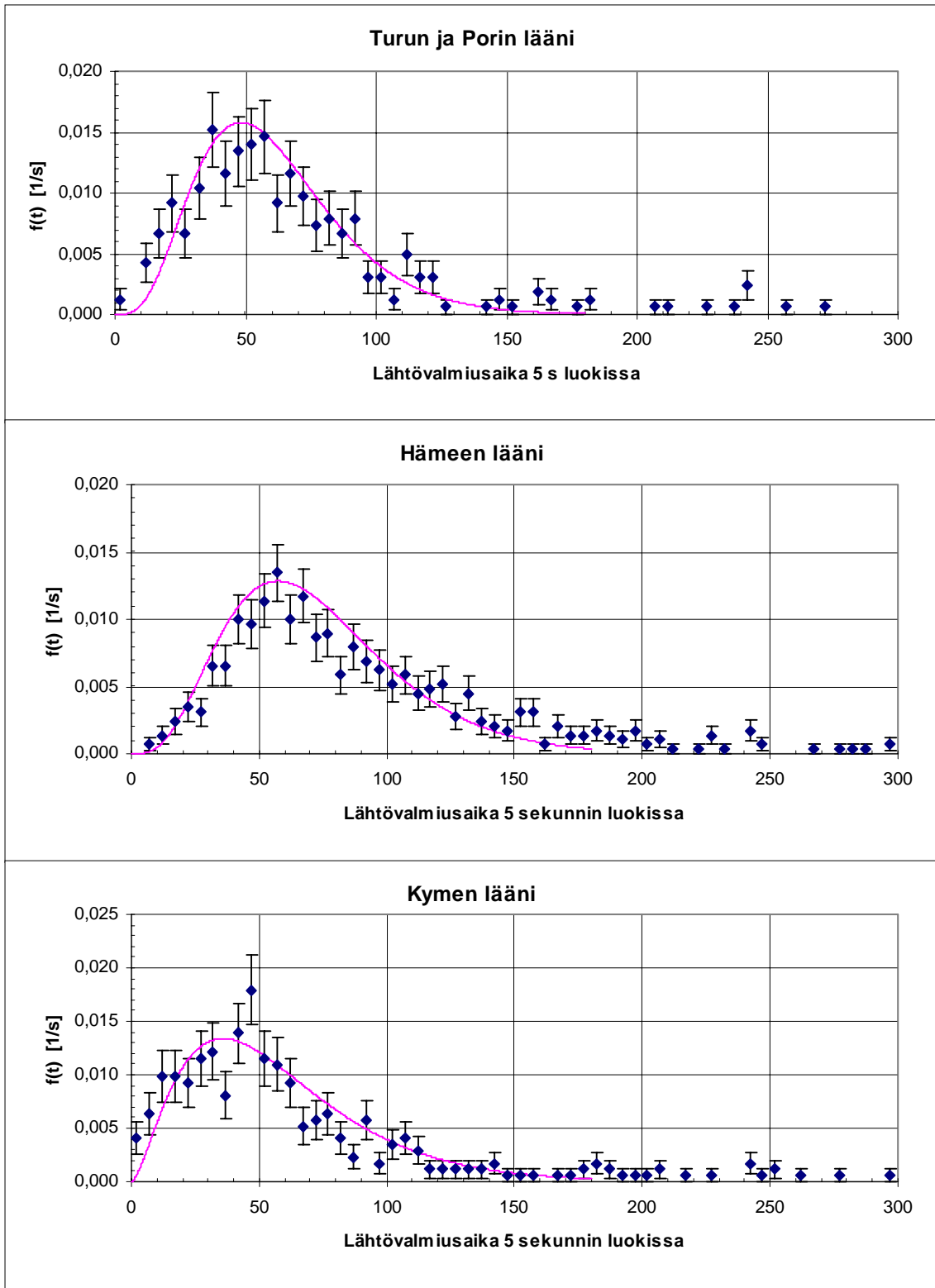
Kuva C4. Gammajakauman tiheysfunktion sovitus minuutin tarkkuudella oleviin lähtövalmiusaikahavaintoihin lääneittäin.

Havainnot sekunnin tarkkuudella

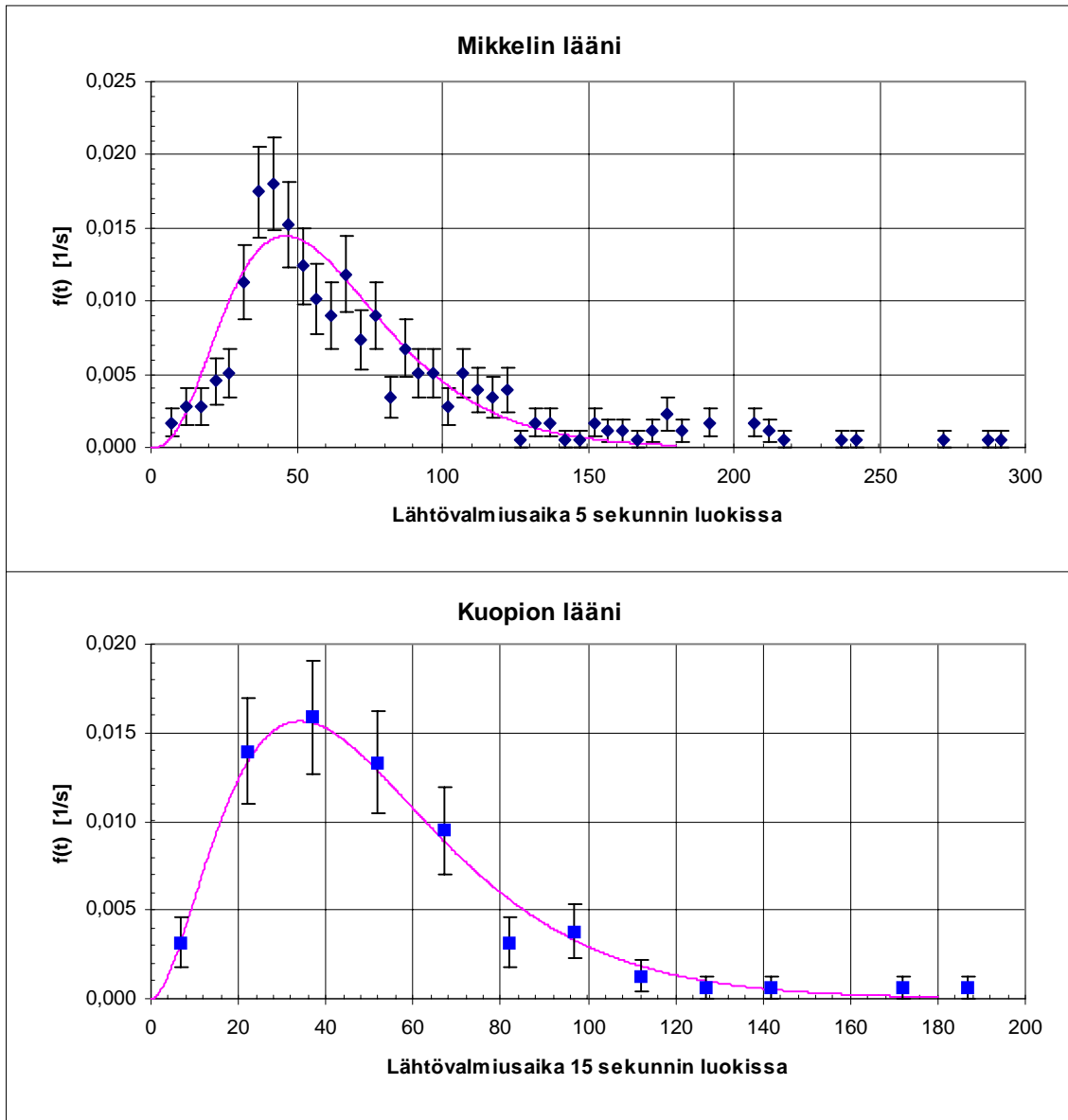
Läänit



Kuva C5. Gammajakauman tiheysfunktion sovitus sekunnin tarkkuudella oleviin lähtövalmiusaikahavaintoihin lääneittäin. Gammajakauman parametrien arvot on esitetty taulukossa C1.

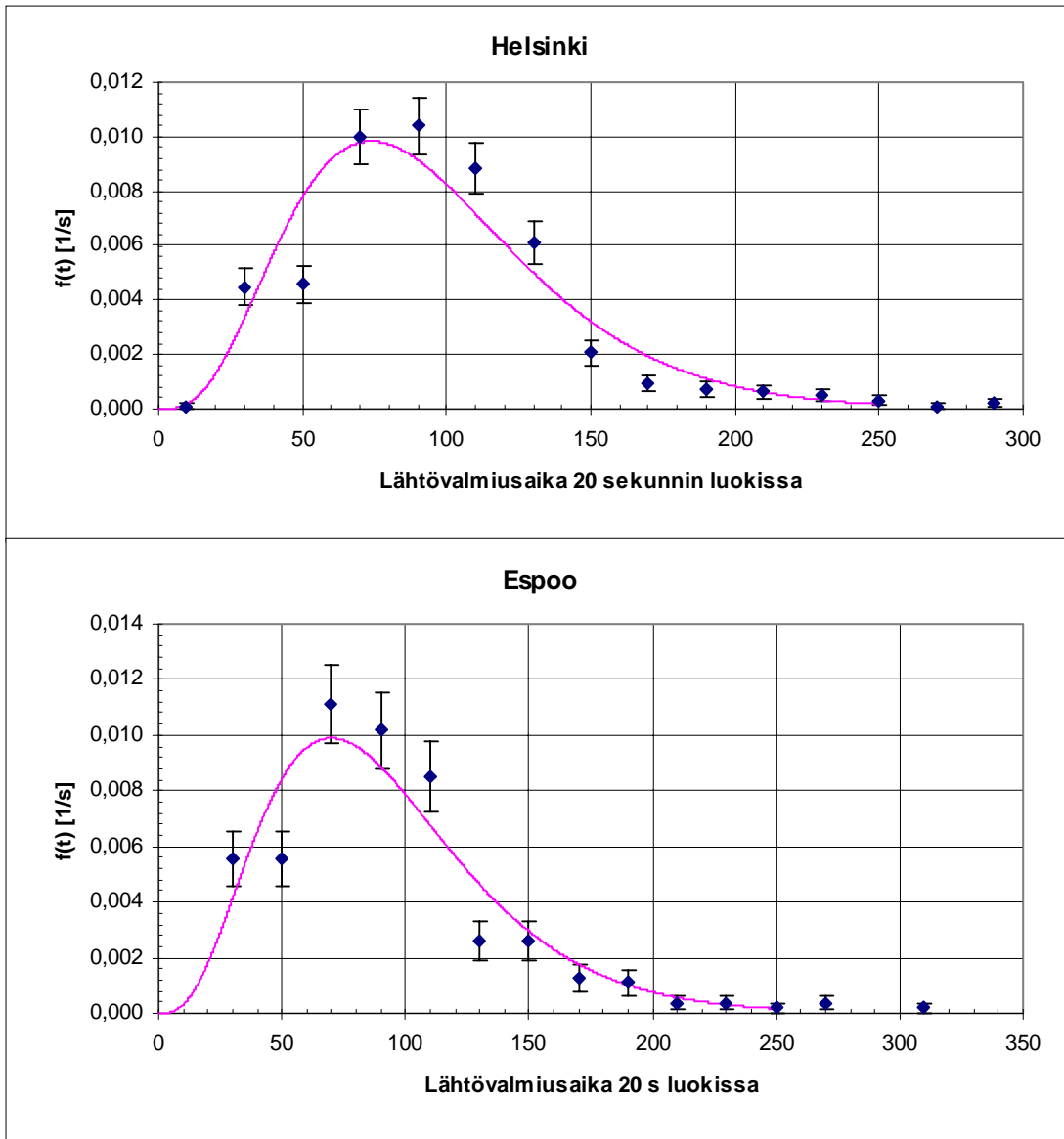


Kuva C6. Gammajakauman tiheysfunktion sovitus sekunnin tarkkuudella oleviin lähtövalmiusaikahavaintoihin lääneittäin. Gammajakauman parametrien arvot on esitetty taulukossa C1.

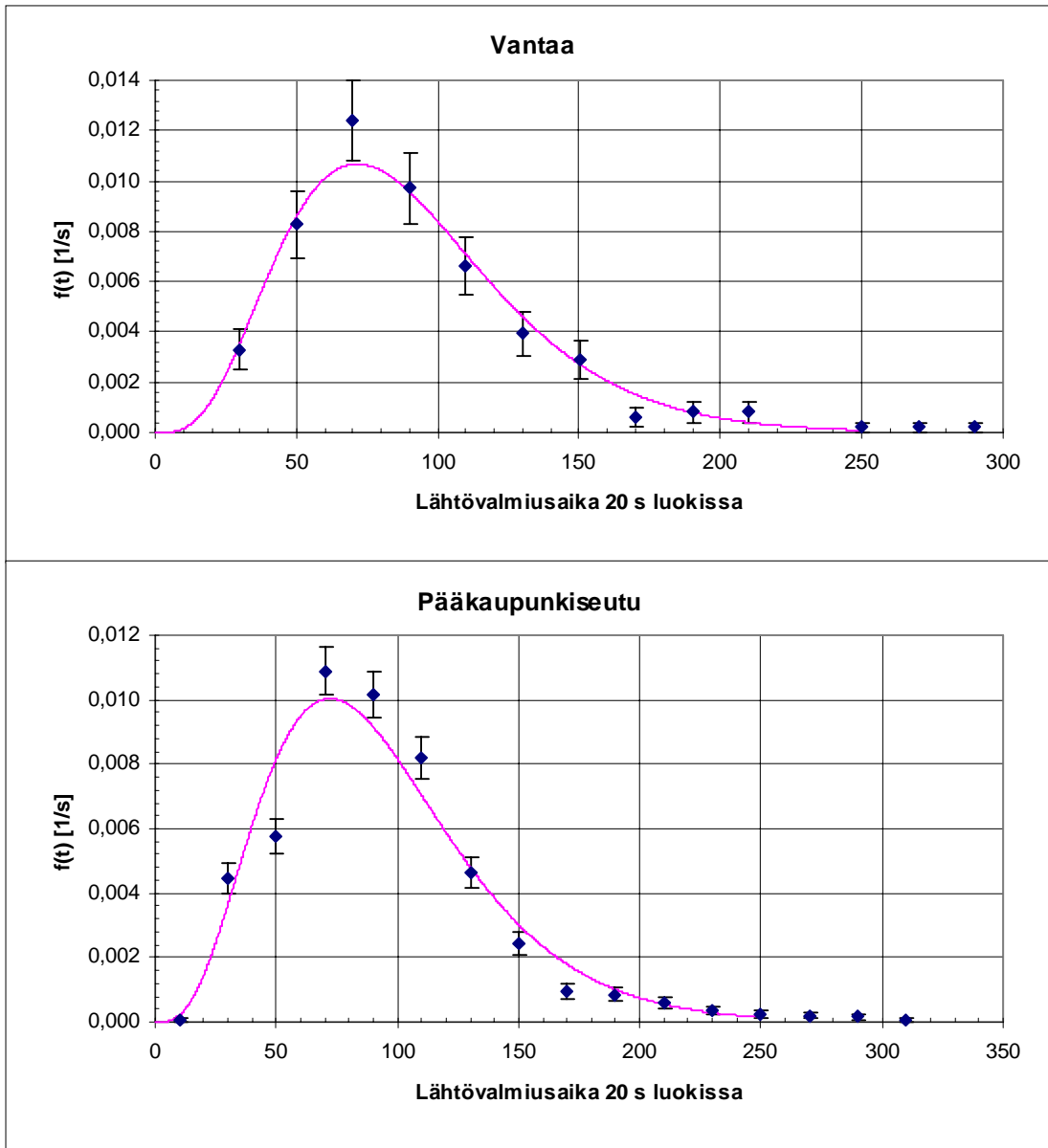


Kuva C7. Gammajakauman tiheysfunktion sovitus sekunnin tarkkuudella oleviin lähtövalmiusaikahavaintoihin lääneittäin. Gammajakauman parametrien arvot on esitetty taulukossa C1.

Pääkaupunkiseutu



Kuva C8. Gammajakauman tiheysfunktion sovitus sekunnin tarkkuudella oleviin lähtövalmiusaikahavaintoihin pääkaupunkiseudulla. Gammajakauman parametrien arvot on esitetty taulukossa C1.

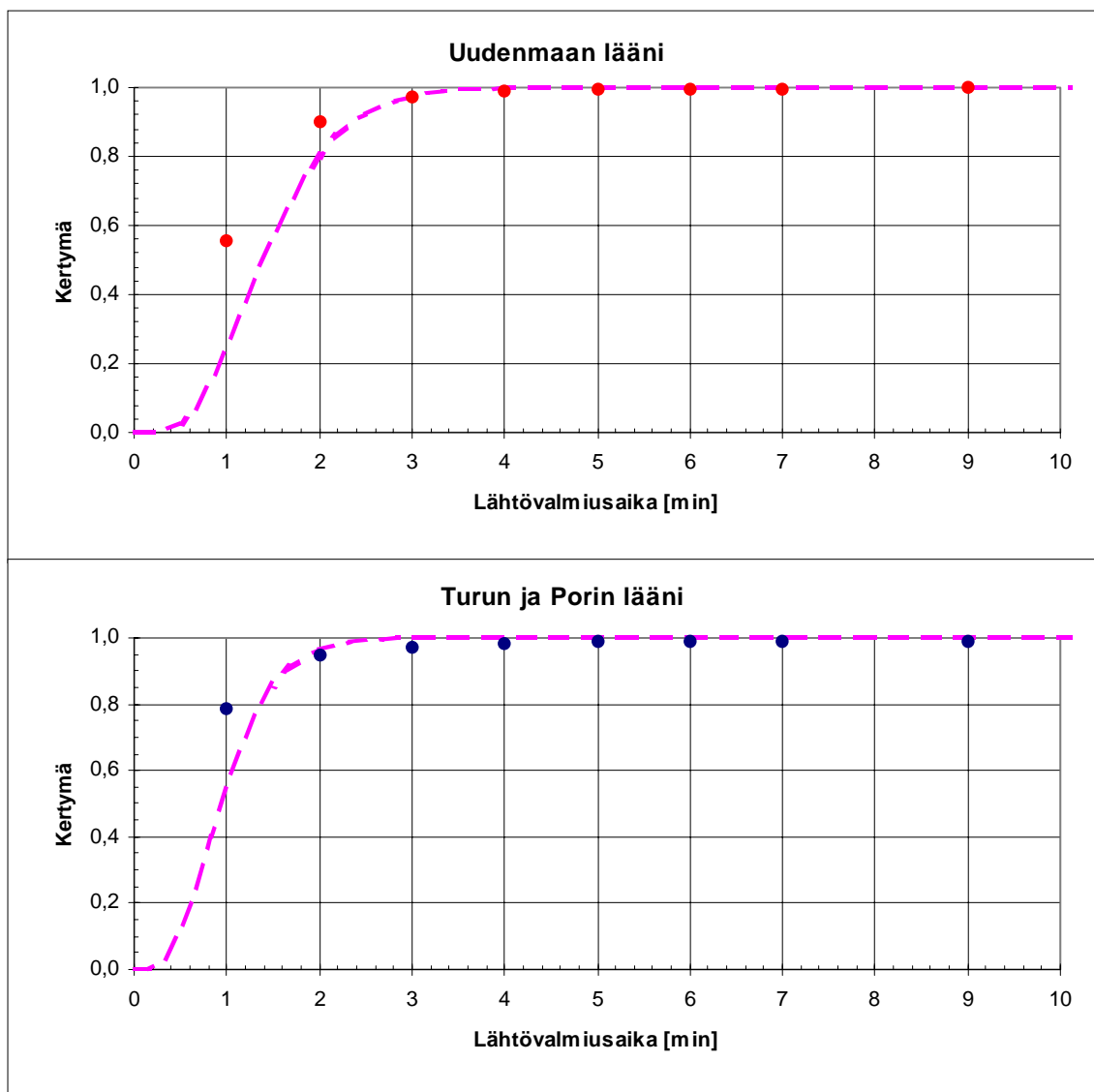


Kuva C9. Gammajakauman tiheysfunktion sovitus sekunnin tarkkuudella oleviin lähtövalmiusaikahavaintoihin pääkaupunkiseudulla. Gammajakauman parametrien arvot on esitetty taulukossa C1.

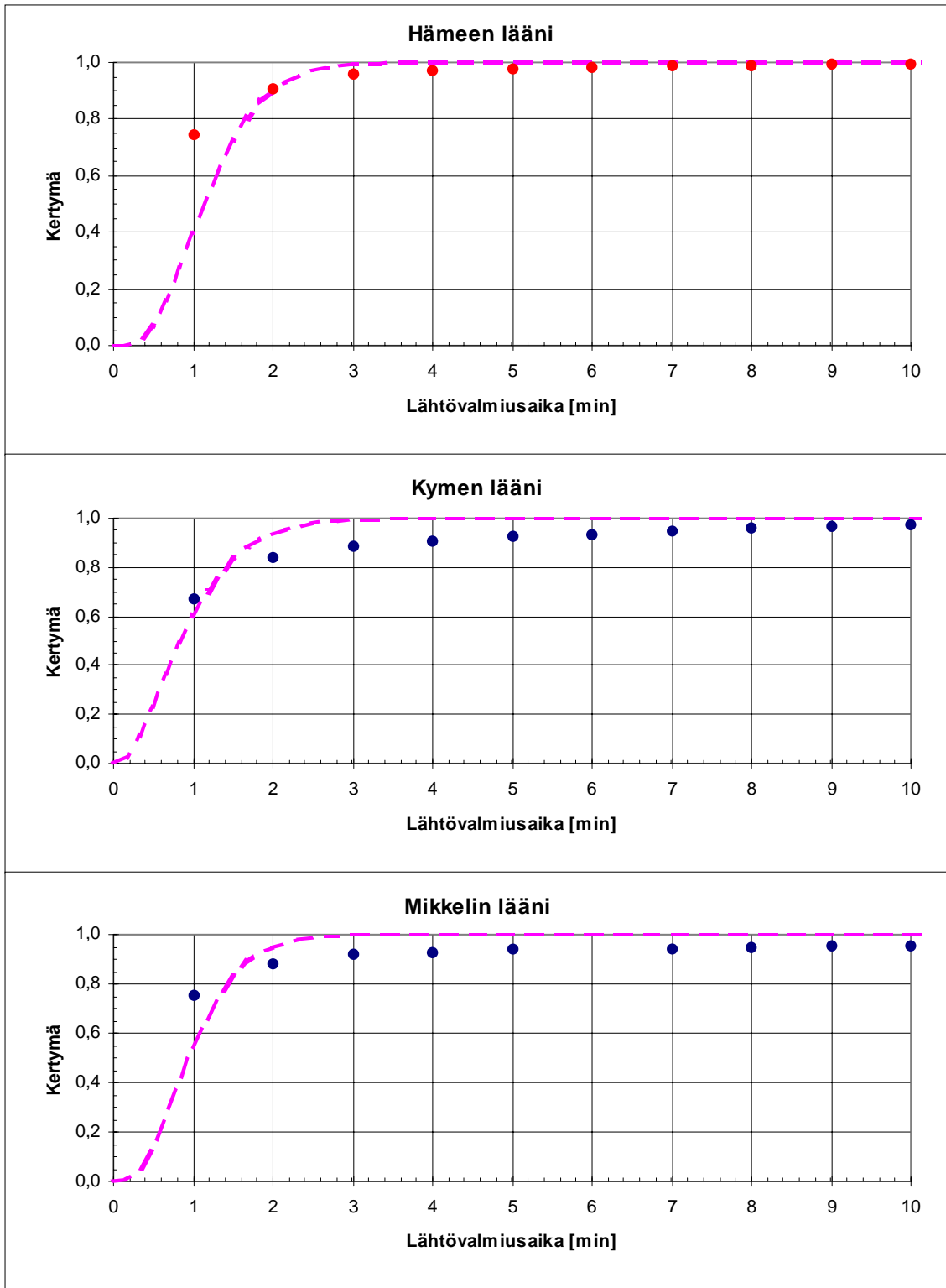
Kertymäfunktiot

Läänit

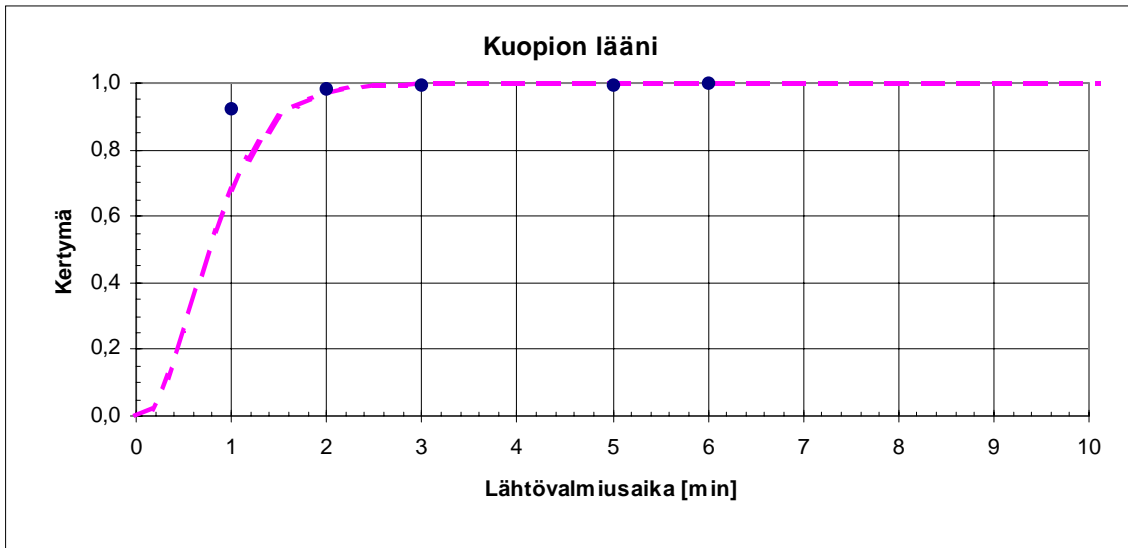
Minuutin tarkkuudella olevista lähtövalmiusajoista määritettyihin kertymäfunktioihin sovitettiin gammajakauman kertymäfunktio, jonka parametrien arvoina käytettiin taulukon C1 arvoja. Koska sovitusta tehtiin minuutin tarkkuudella oleviin havaintoihin, tuli laadullinen parametri β jakaa 60:llä.



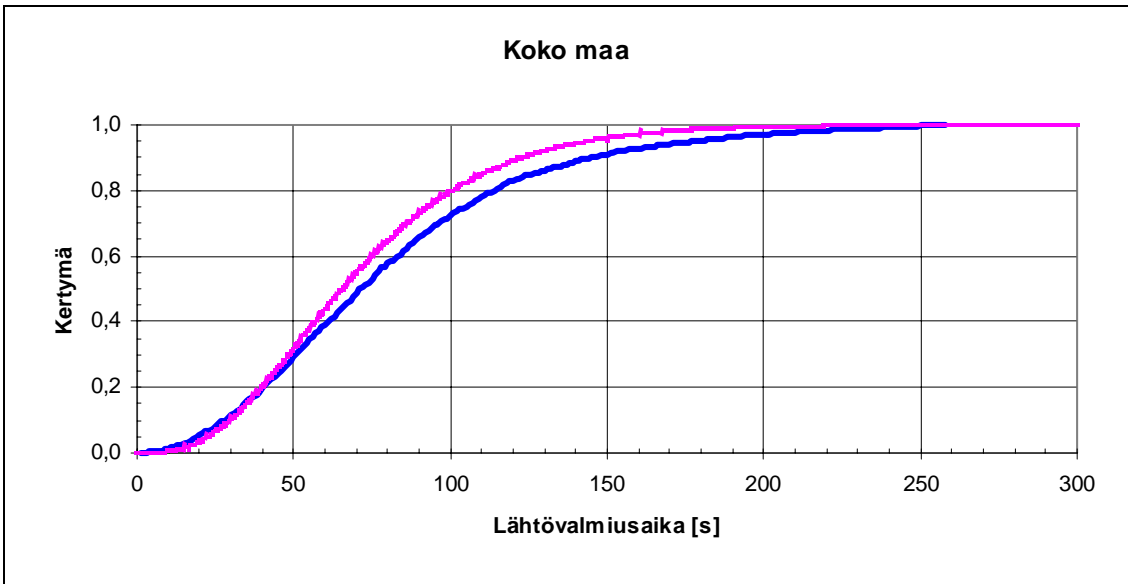
Kuva C10. Gammajakauman kertymäfunktio sovitettuna lähtövalmiusajan kertymään eri lääneissä. Gammajakauman parametrien arvot on esitetty taulukossa C1.



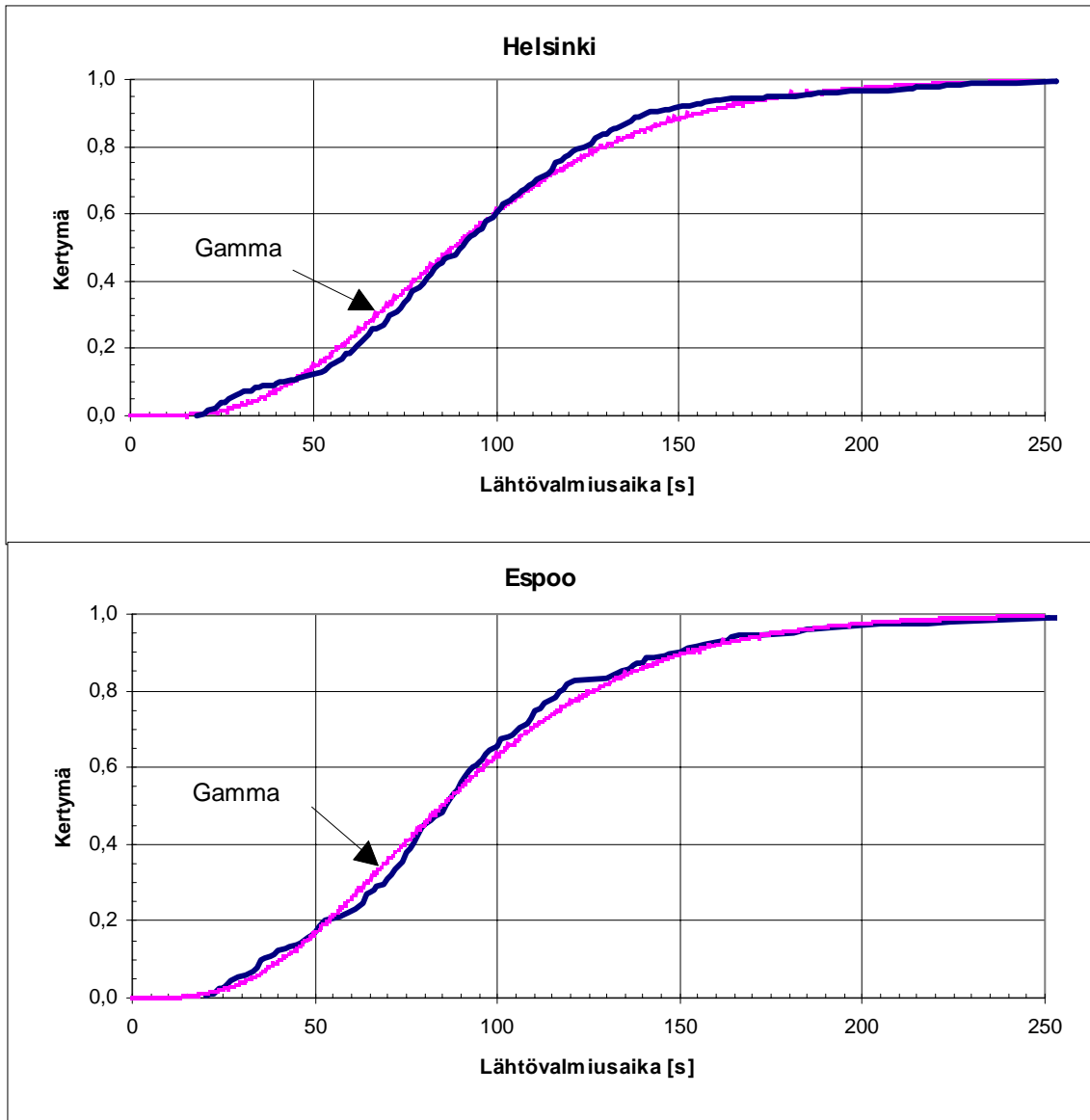
Kuva C11. Gammajakauman kertymäfunktio sovitettuna lähtövalmiusaajan kertymään eri lääneissä. Gammajakauman parametrien arvot on esitetty taulukossa C1.



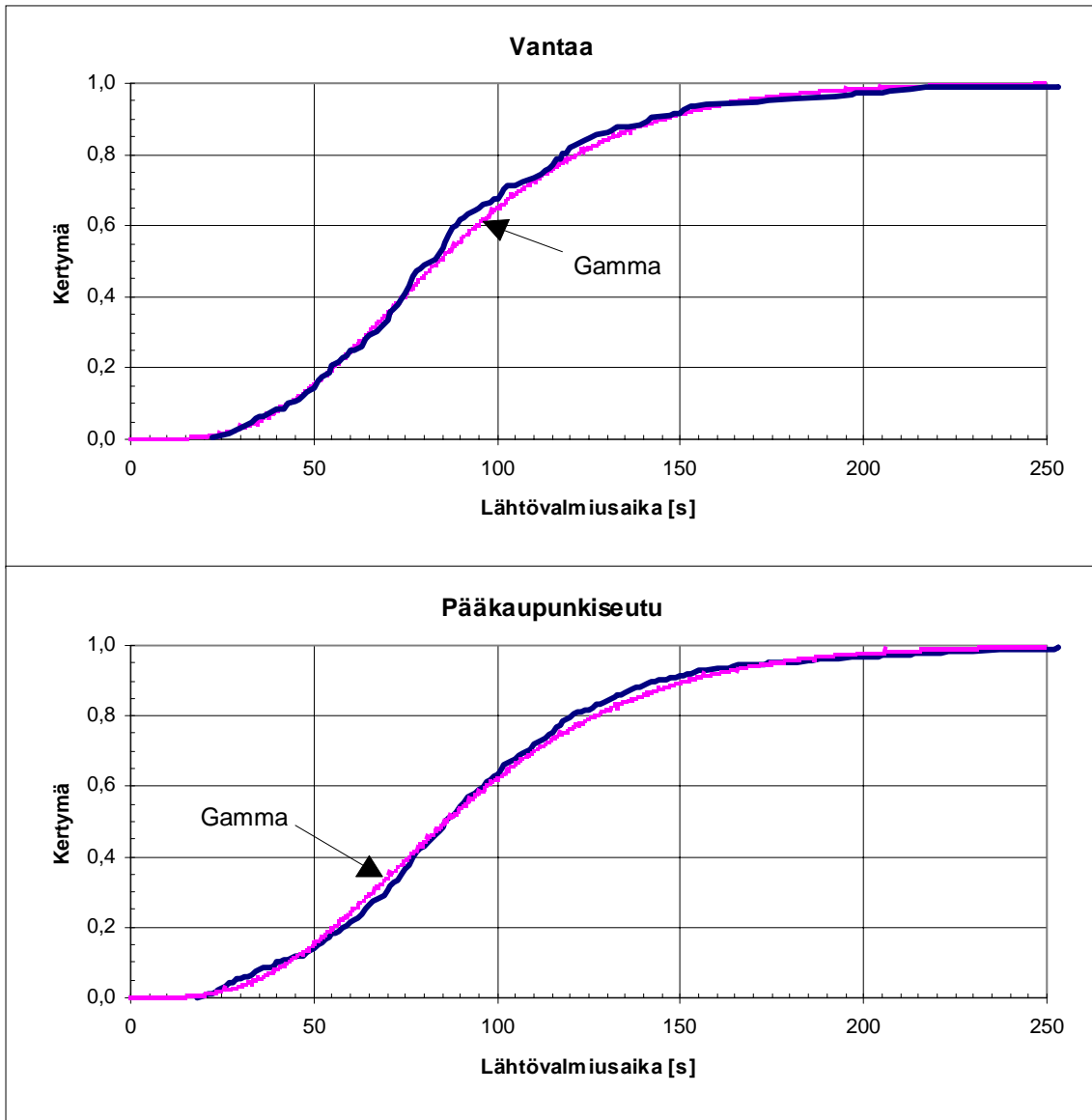
Kuva C12. Gammajakauman kertymäfunktio sovitettuna lähtövalmiusaajan kertymään eri lääneissä. Gammajakauman parametrien arvot on esitetty taulukossa C1.



Kuva C13. Gammajakauman kertymäfunktio sovitettuna koko maan lähtövalmiusaajan kertymään. Gammajakauman parametrien arvot on esitetty taulukossa C1.



Kuva C14. Gammajakauman kertymäfunktio sovitettuna lähtövalmiusaajan kertymään pääkaupunkiseudun kunnissa. Gammajakauman parametrien arvot on esitetty taulukossa C1.



Kuva C15. Gammajakauman kertymäfunktio sovitettuna lähtövalmiusaajan kertymään pääkaupunkiseudun kunnissa. Gammajakauman parametrien arvot on esitetty taulukossa C1.

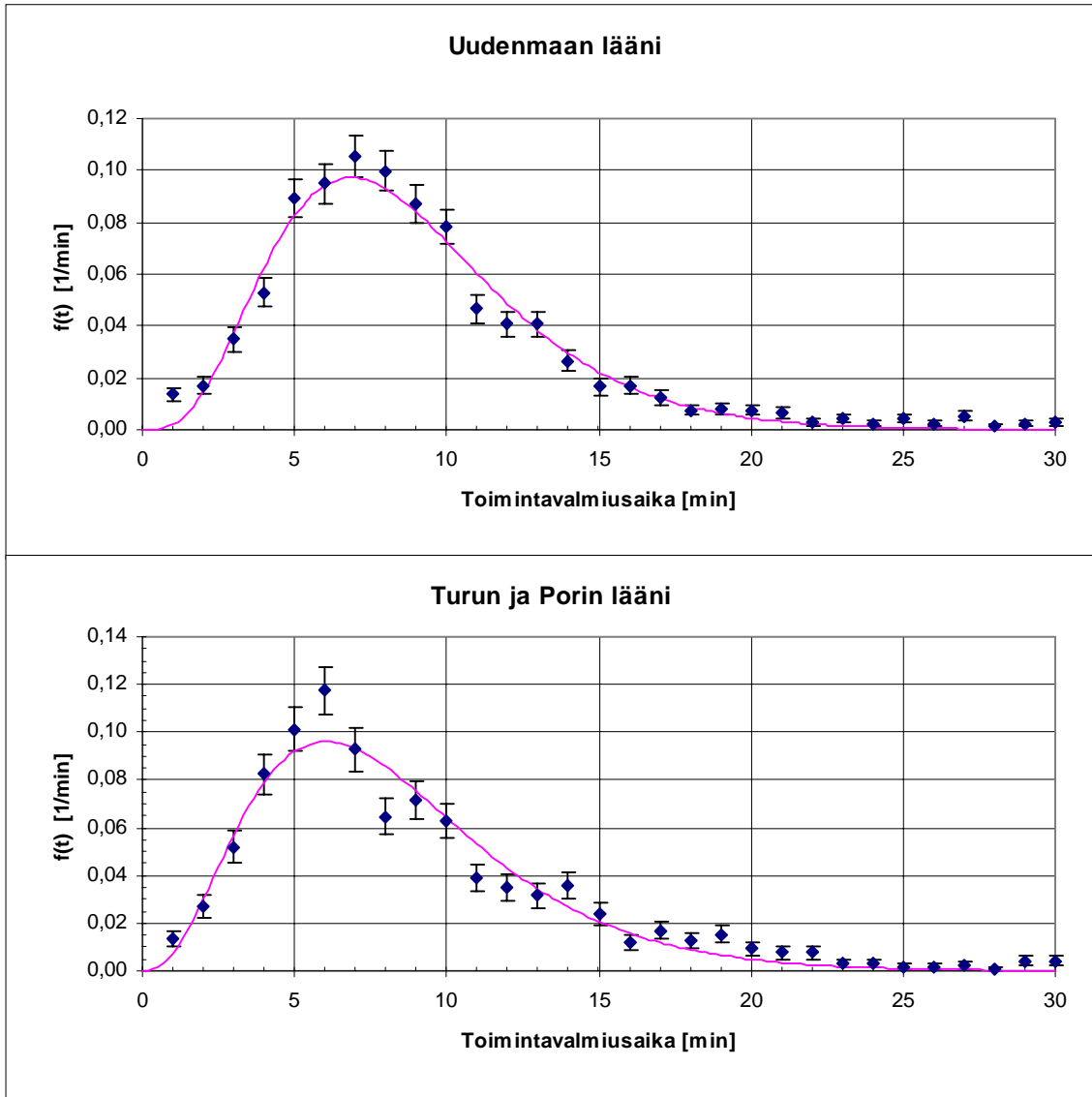
Taulukko C1. Kuvien C5 - C15 gammajakaumien parametrien arvot

	α	β [s]
Koko maa	3,60	20,00
Uudenmaan lääni	5,20	17,19
Turun ja Porin lääni	4,80	12,69
Hämeen lääni	4,57	16,06
Kymen lääni	2,60	22,40
Mikkelin lääni	3,96	15,59
Kuopion lääni	2,95	17,47
Pääkaupunkiseutu	4,46	20,88
Helsinki	4,48	21,24
Espoo	4,17	22,04
Vantaa	4,82	18,70
Koko maa	3,60	20,00

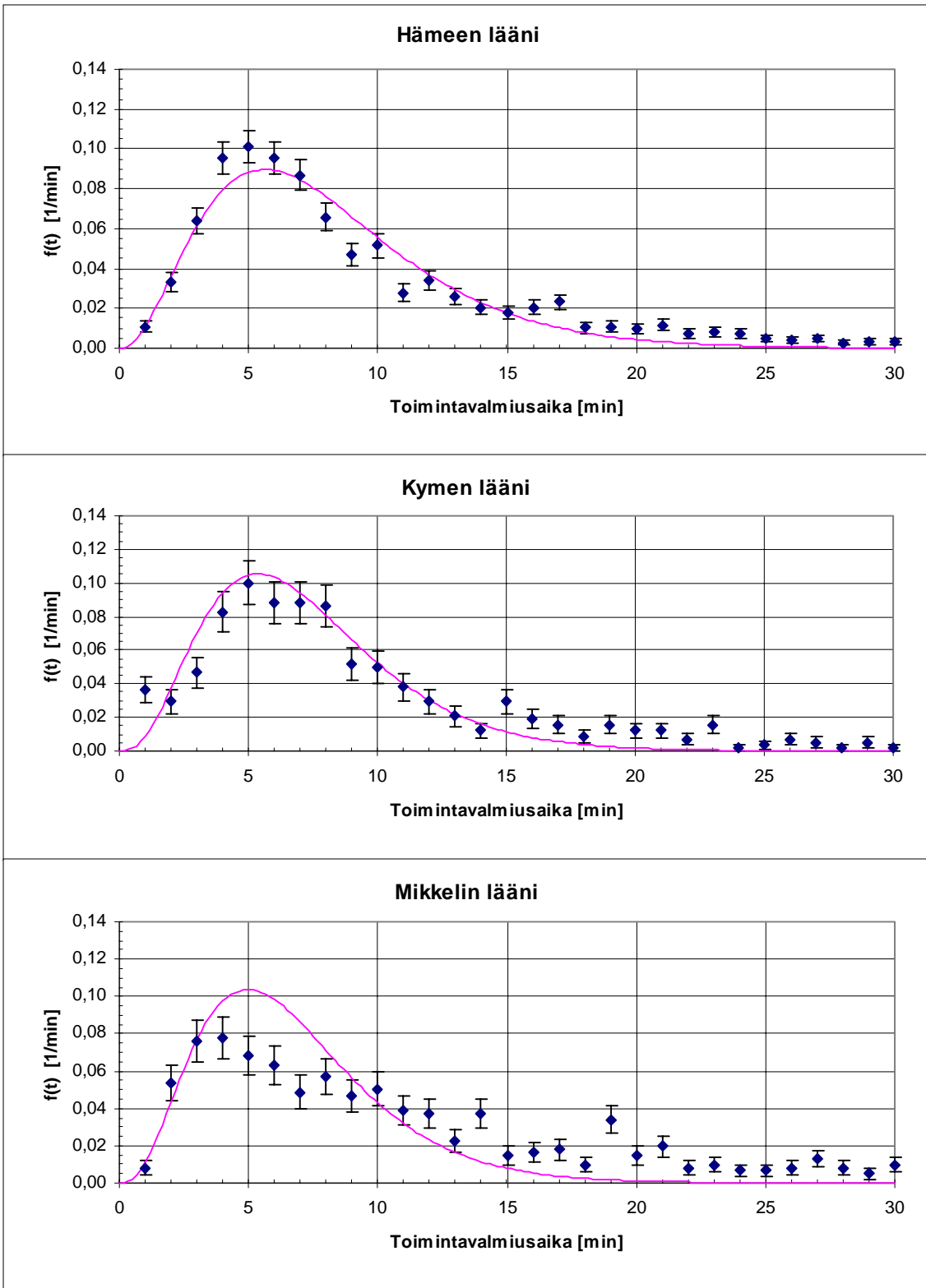
Liite D: Toimintavalmiusajat

Gammajakauman tiheysfunktion sovitus

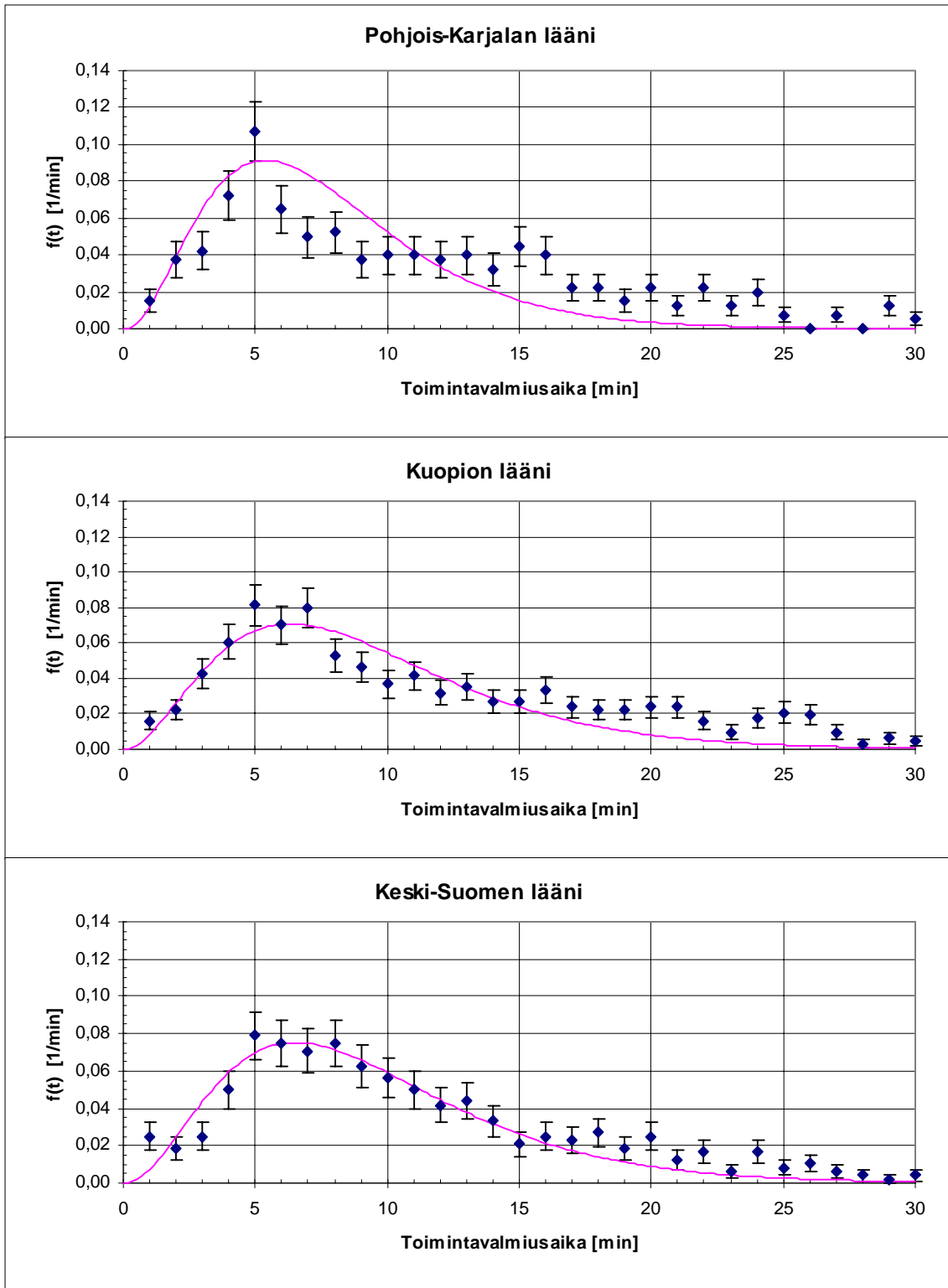
Läänit



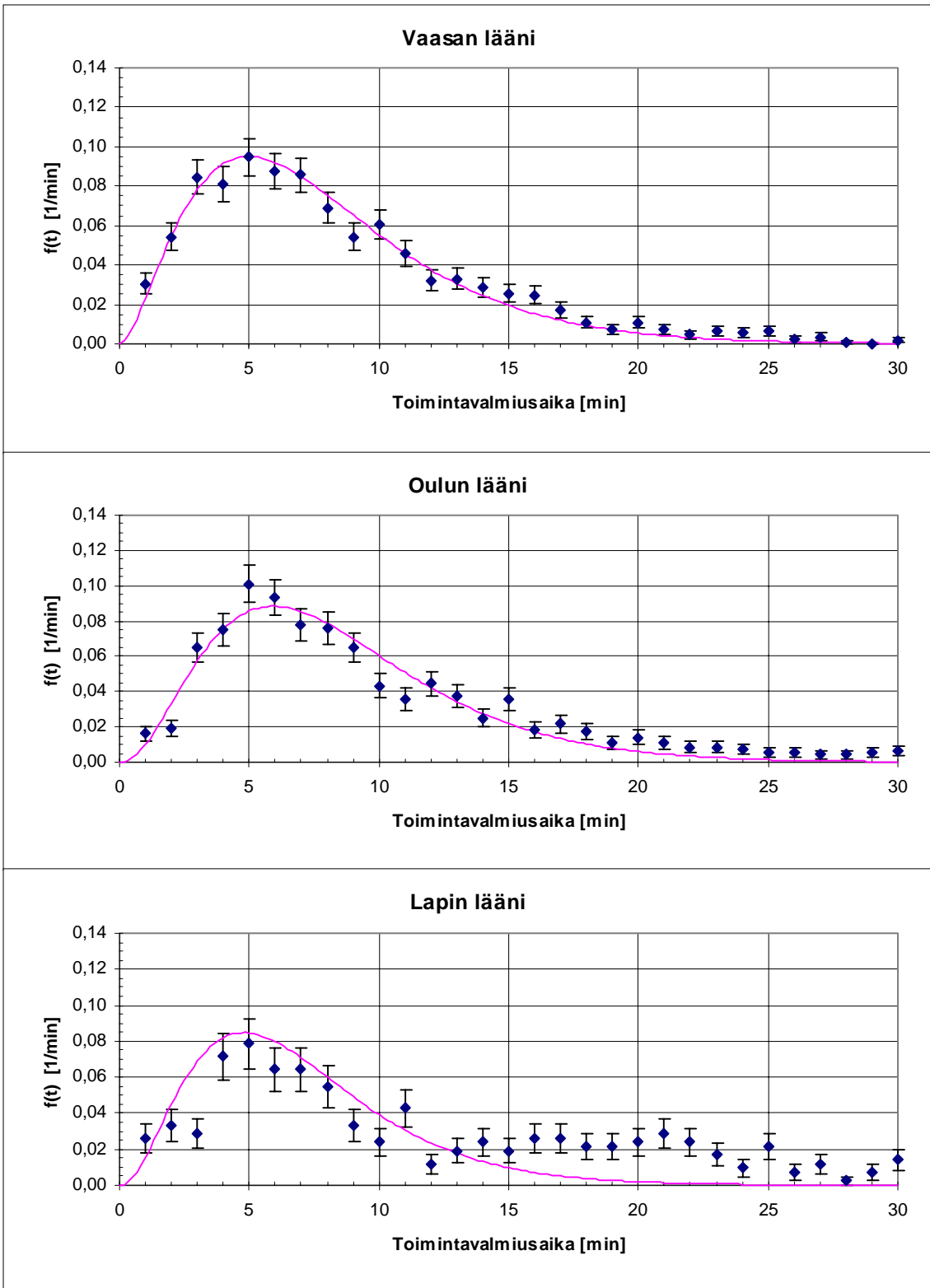
Kuva D1. Gammajakauman tiheysfunktion sovitus läänien toimintavalmiusaika-havaintoihin. Gammajakauman parametrien arvot on esitetty taulukossa D1.



Kuva D2. Gammajakauman tiheysfunktion sovitus läänien toimintavalmiusaika-havaintoihin. Gammajakauman parametrien arvot on esitetty taulukossa D1.

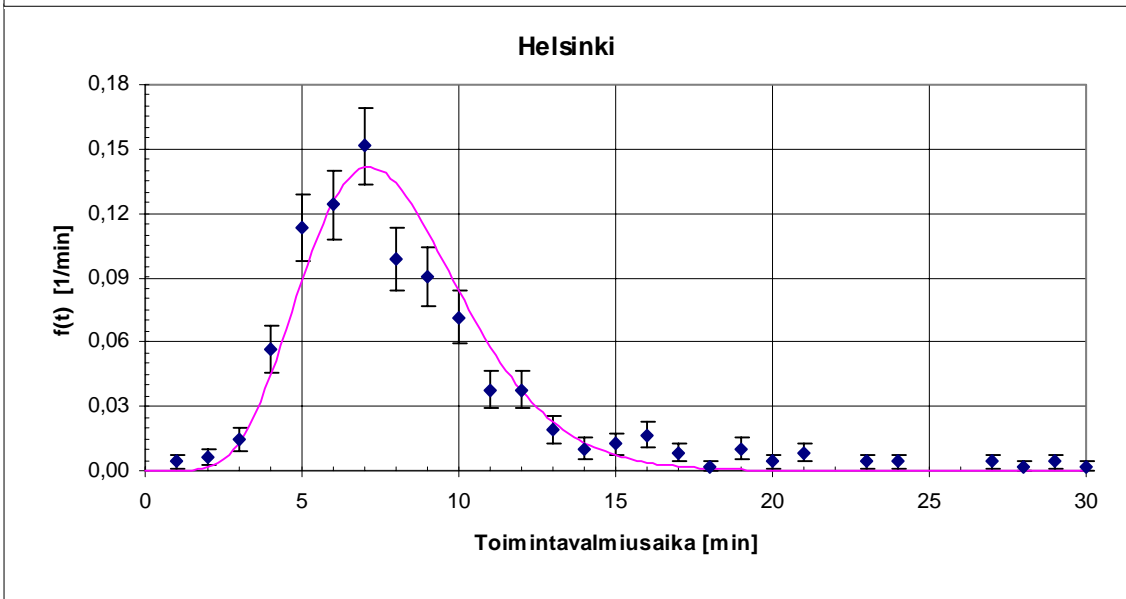
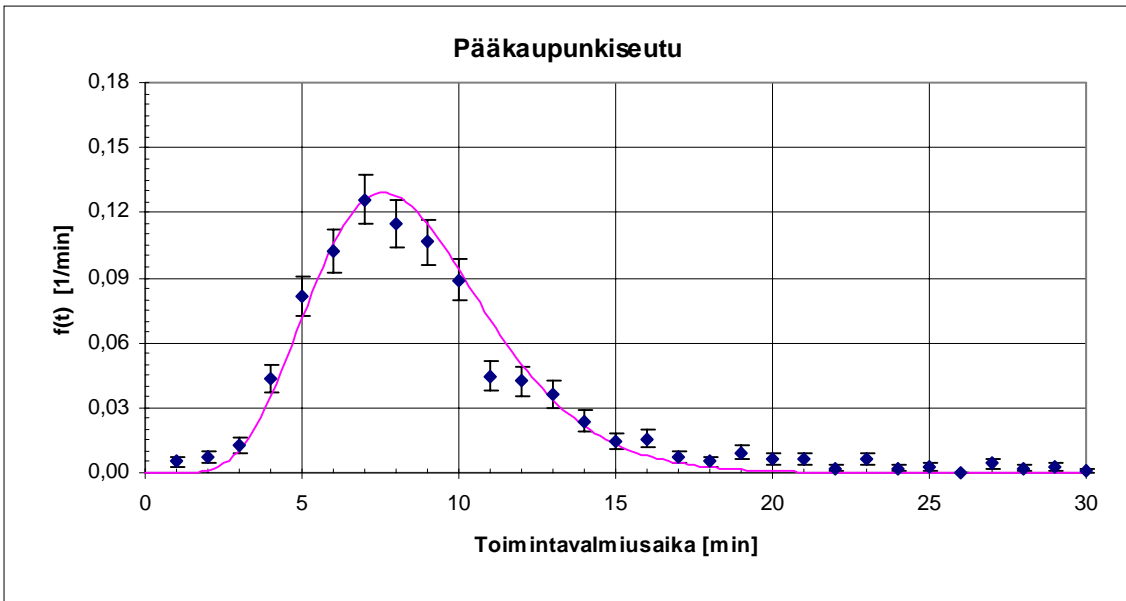


Kuva D3. Gammajakauman tiheysfunktion sovitukset läänien toimintavalmiusaika havaintoihin. Gammajakauman parametrien arvot on esitetty taulukossa D1.

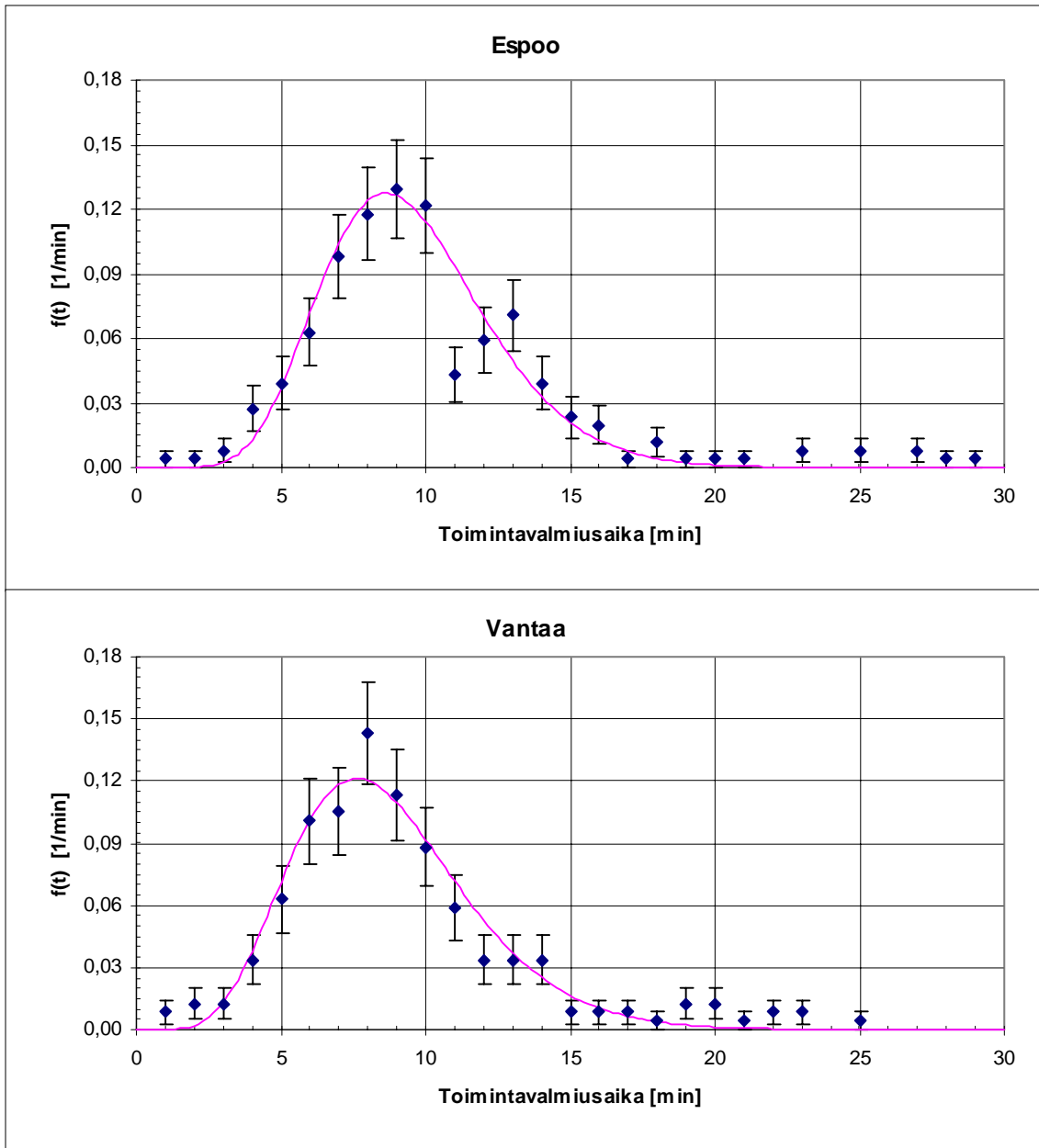


Kuva D4. Gammajakauman tiheysfunktion sovitus läänien toimintavalmiusaikahavain-
toihin. Gammajakauman parametrien arvot on esitetty taulukossa D1.

Pääkaupunkiseutu



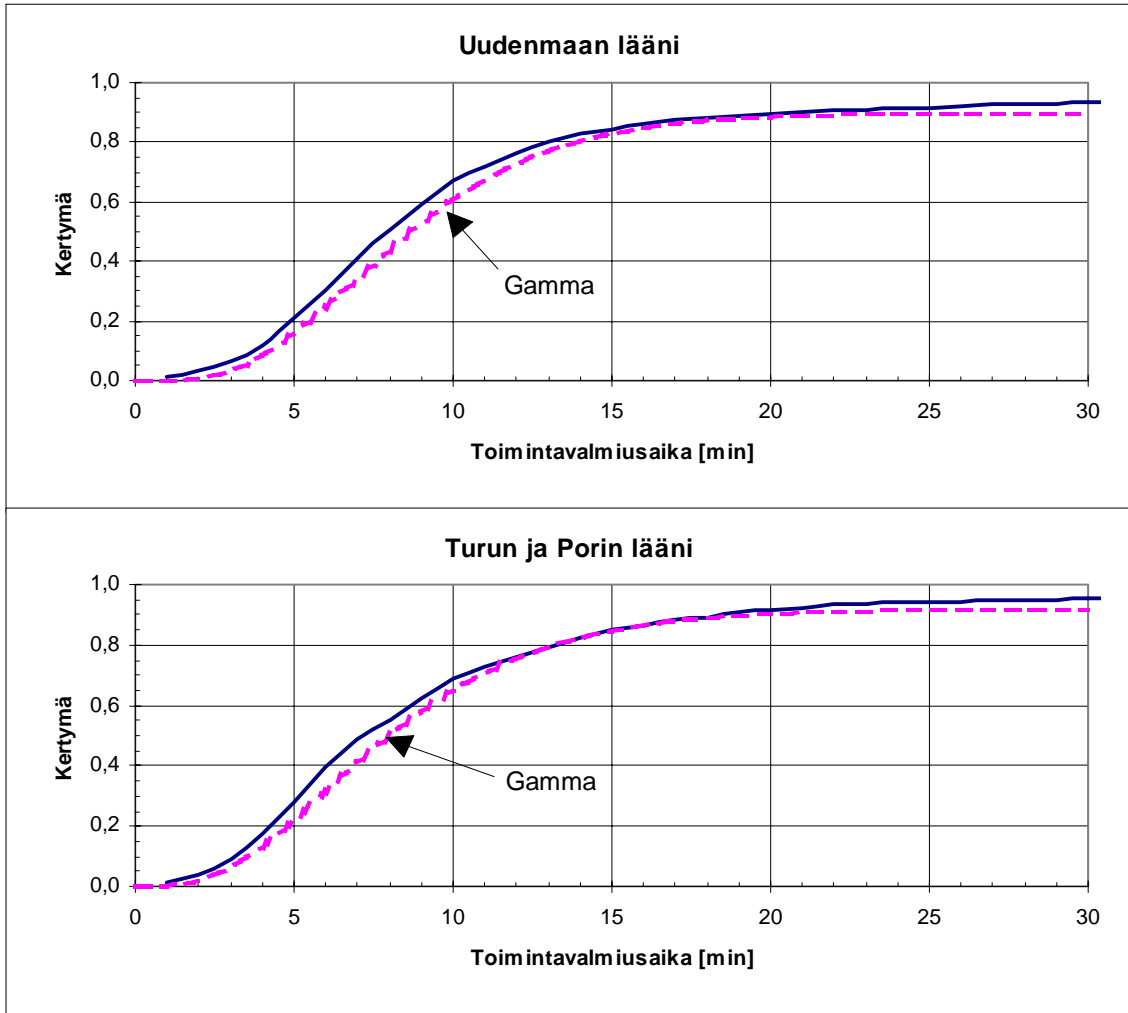
Kuva D5. Gammajakauman tiheysfunktion sovitukset pääkaupunkiseudun toimintavalmiusaika havaintoihin. Gammajakauman parametrien arvot on esitetty taulukossa D1.



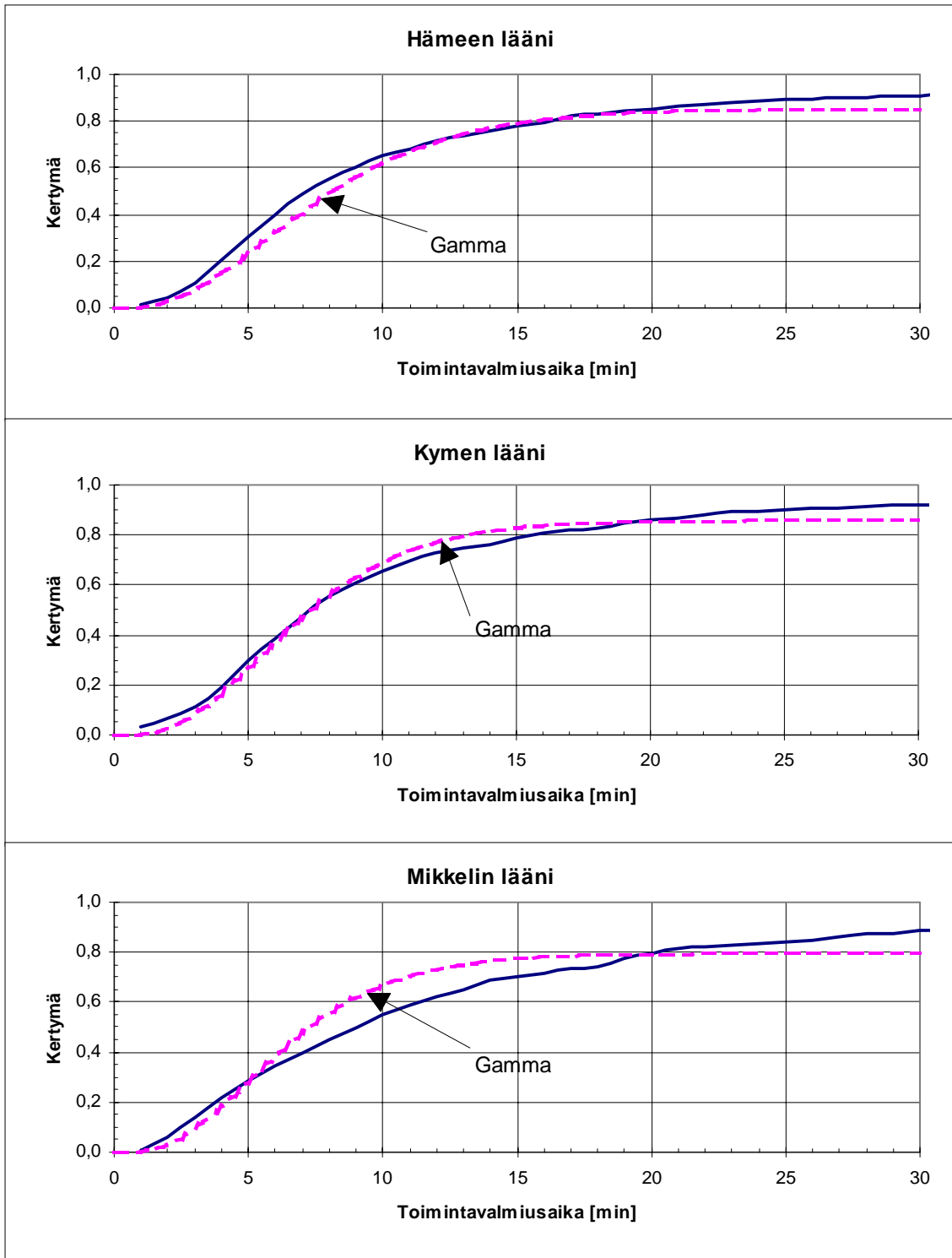
Kuva D6. Gammajakauman tiheysfunktion sovitukset pääkaupunkiseudun toimintavalmiusaika havaintoihin. Gammajakauman parametrien arvot on esitetty taulukossa D1.

Kertymäfunktiot

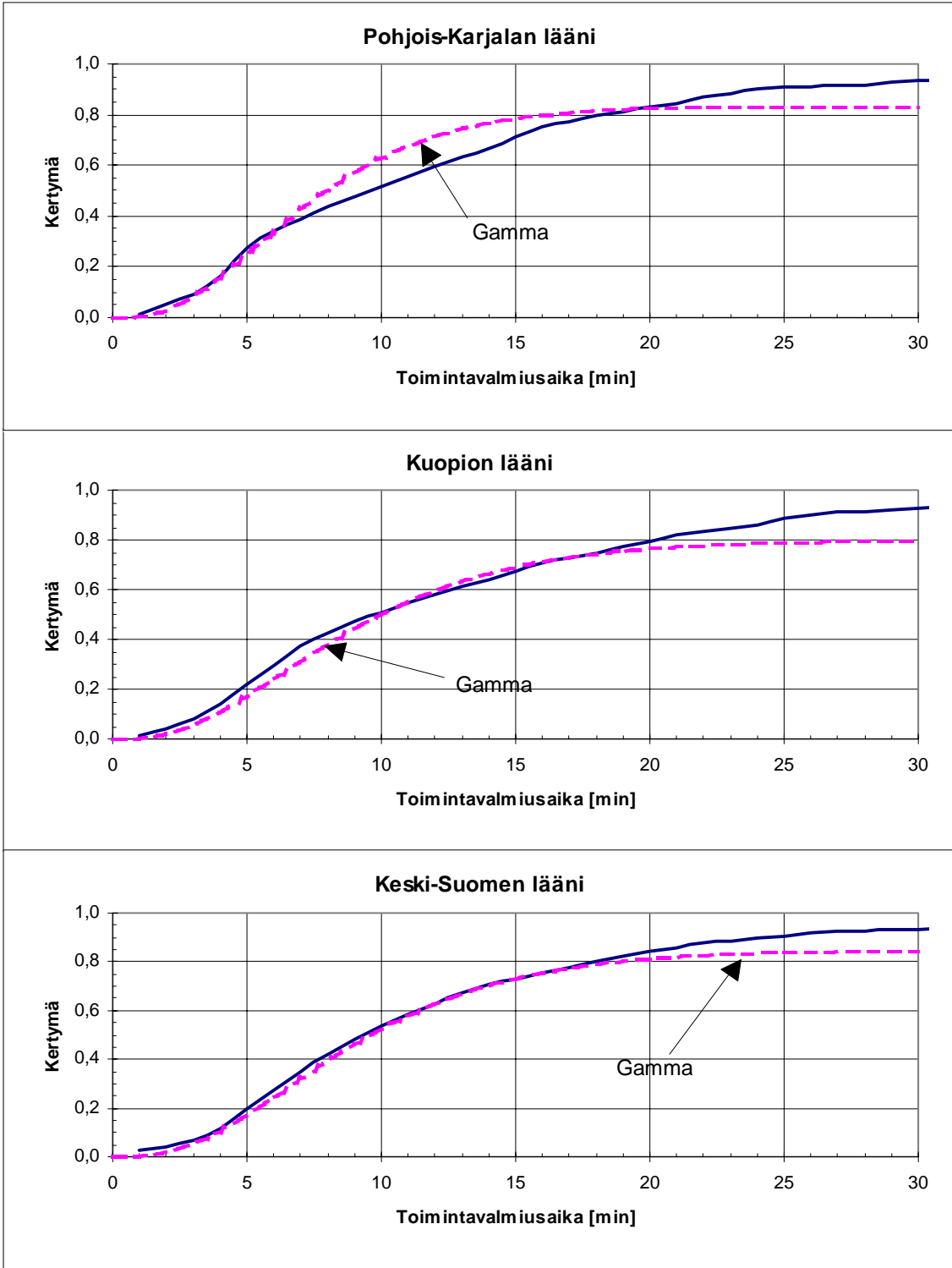
Läänit



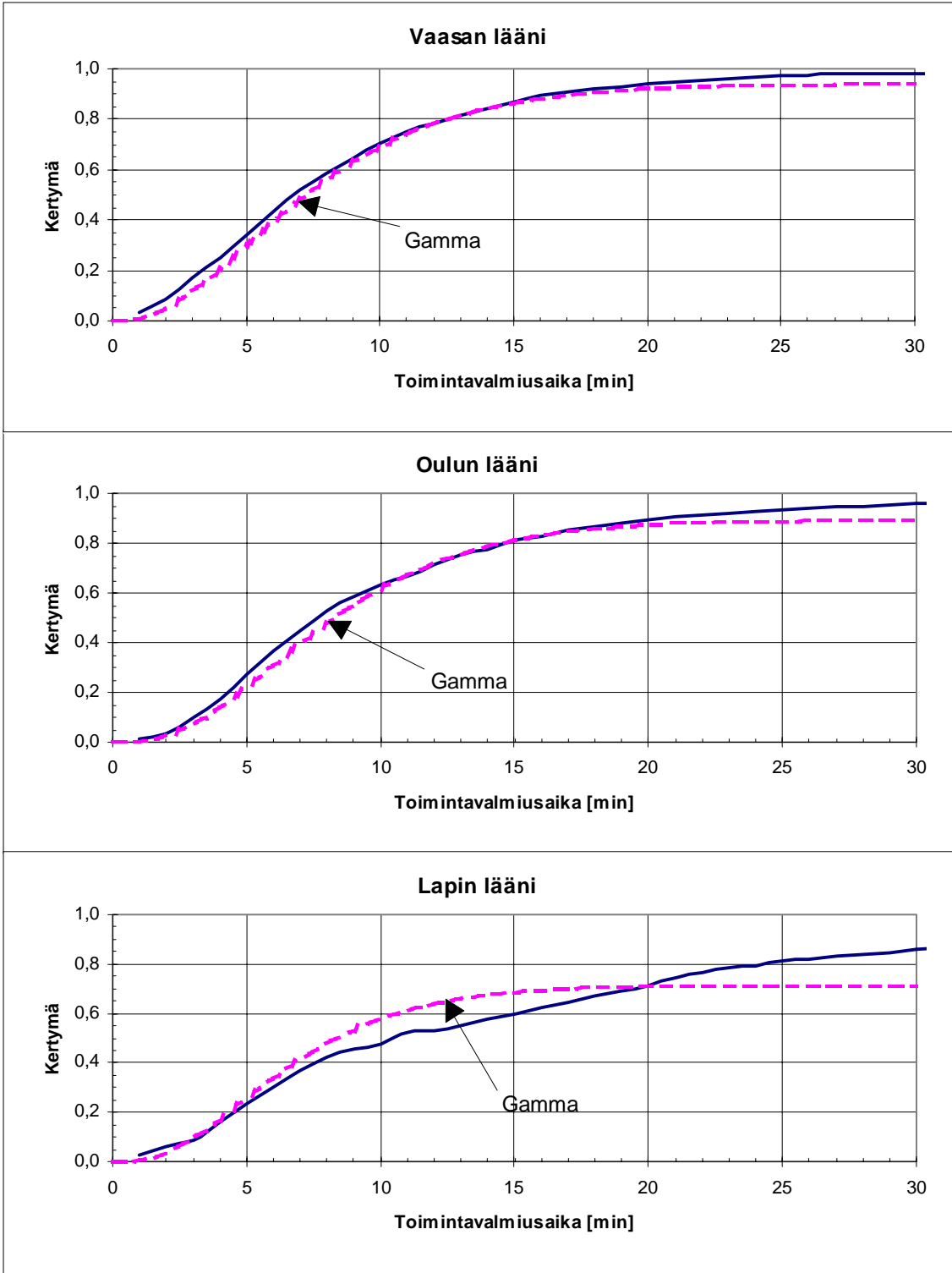
Kuva D7. Gammajakauman kertymäfunktion sovitus toimintavalmiusajan kertymahavaintoihin. Gammajakauman parametrien arvot on esitetty taulukossa D1.



Kuva D8. Gammajakauman kertymäfunktion sovitus toimintavalmiusajan kertymähavaintoihin. Gammajakauman parametrien arvot on esitetty taulukossa D1.

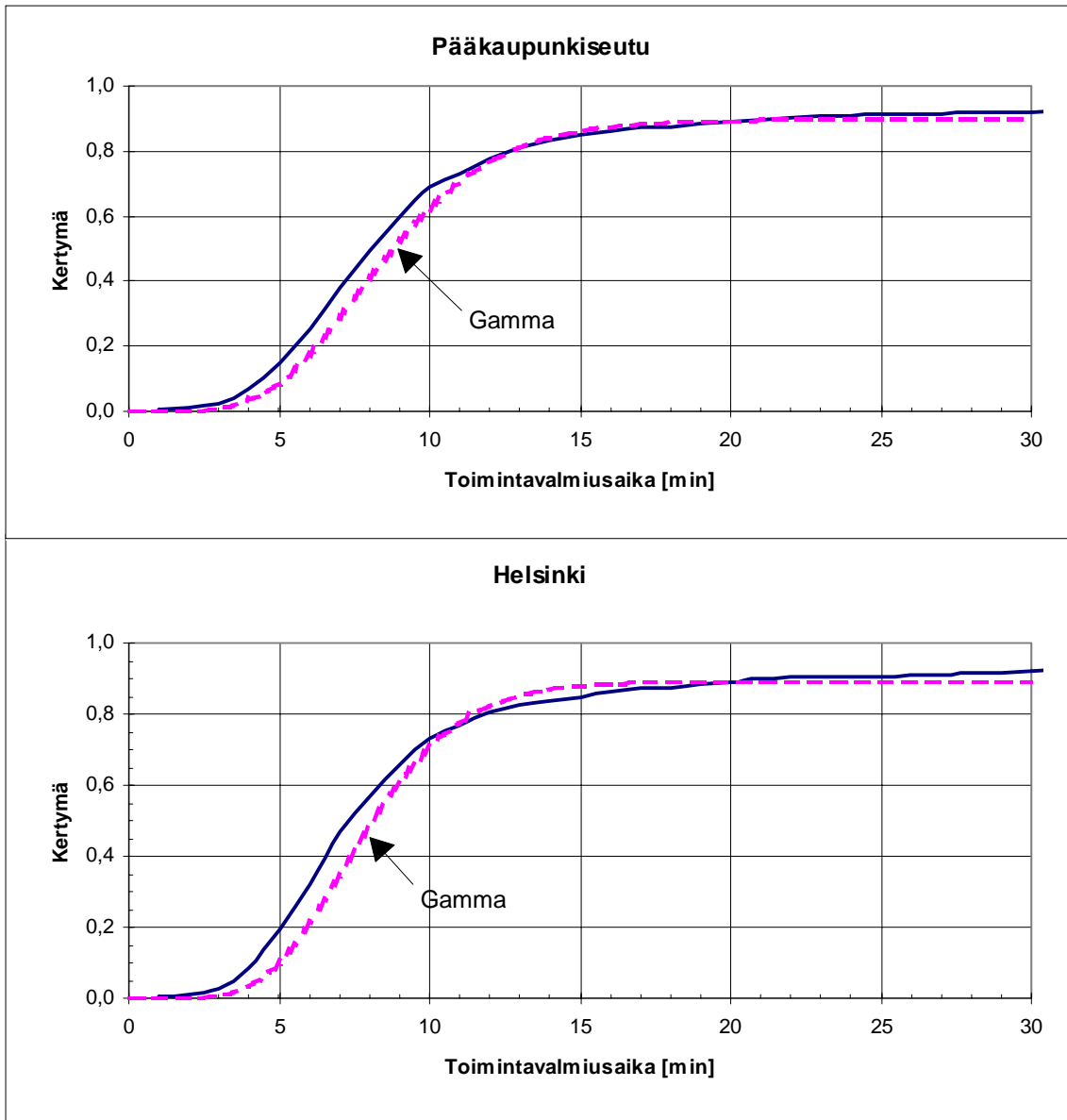


Kuva D9. Gammajakauman kertymäfunktion sovitus toimintavalmiusajan kertymähavaintoihin. Gammajakauman parametrien arvot on esitetty taulukossa D1.

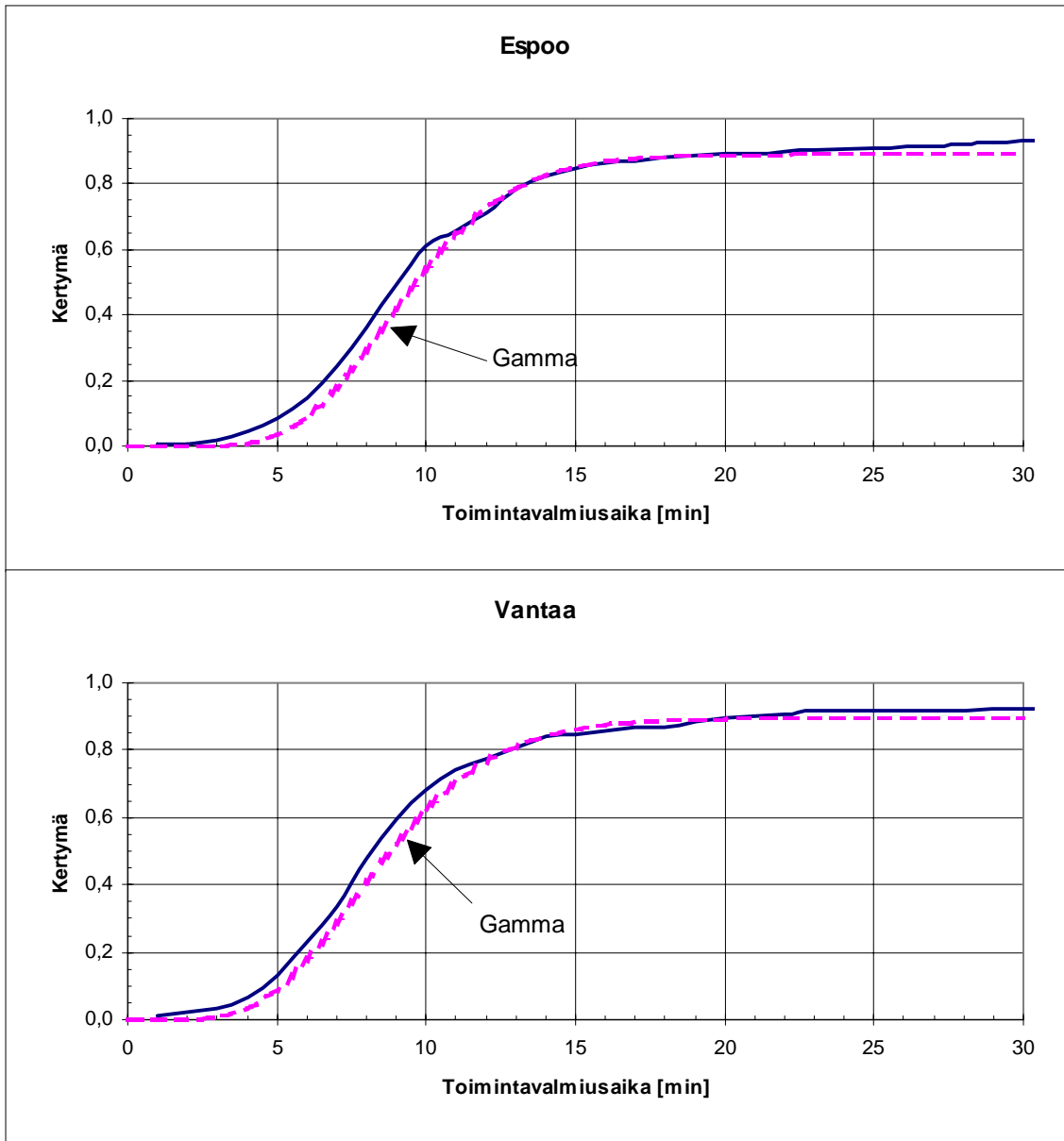


Kuva D10. Gammajakauman kertymäfunktion sovitus toimintavalmiusajan kertymähavaintoihin. Gammajakauman parametrien arvot on esitetty taulukossa D1.

Pääkaupunkiseutu



Kuva D11. Gammajakauman kertymäfunktion sovitus pääkaupunkiseudun toimintavalmiusajan kertymähavaintoihin. Gammajakauman parametrien arvot on esitetty taulukossa D1.



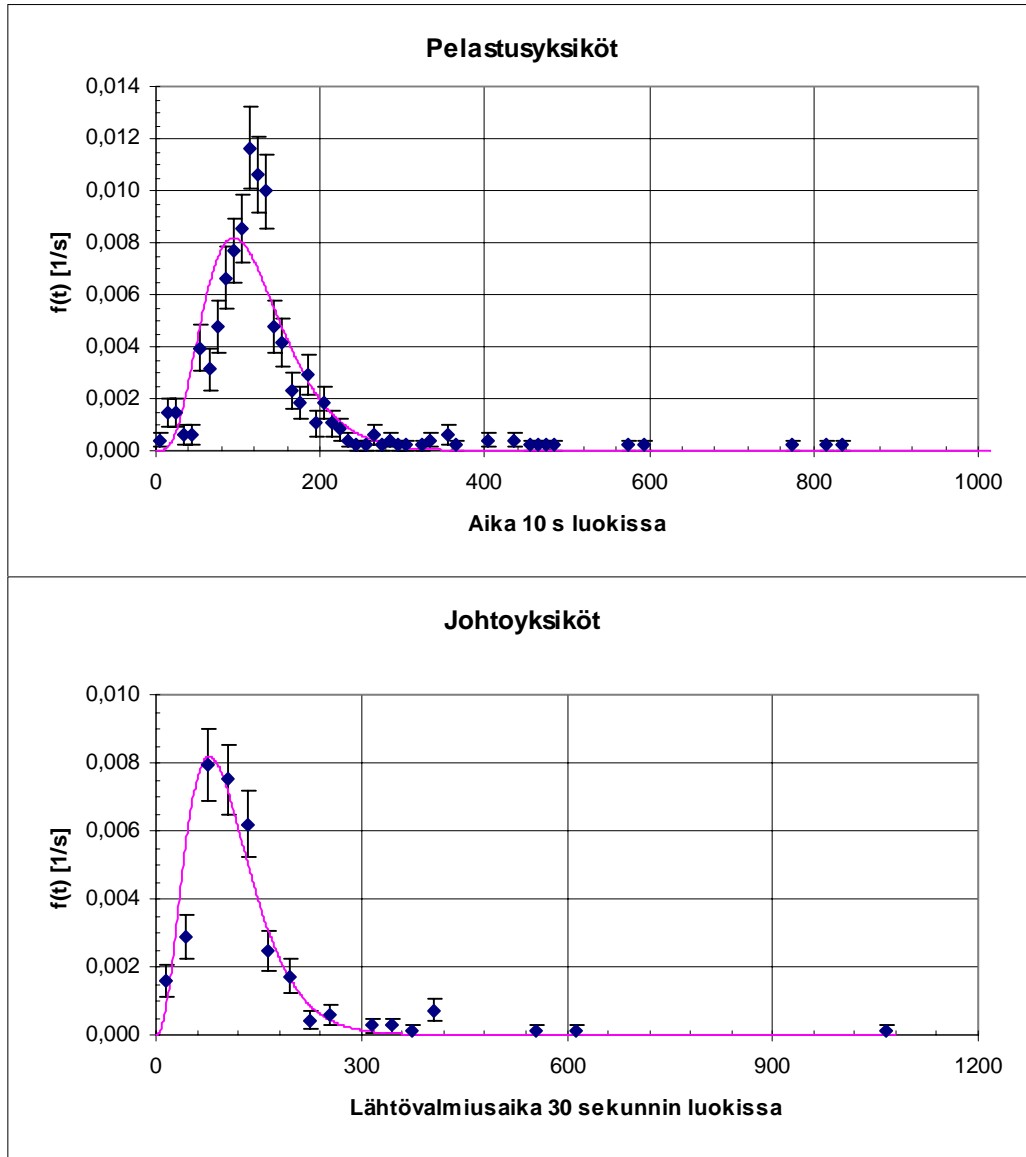
Kuva D12. Gammajakauman kertymäfunktion sovitus pääkaupunkiseudun toimintavalmiusajan kertymähavaintoihin. Gammajakauman parametrien arvot on esitetty taulukossa D1.

Taulukko D1. Kuvien D1 - D12 gammajakaumien parametrien arvot

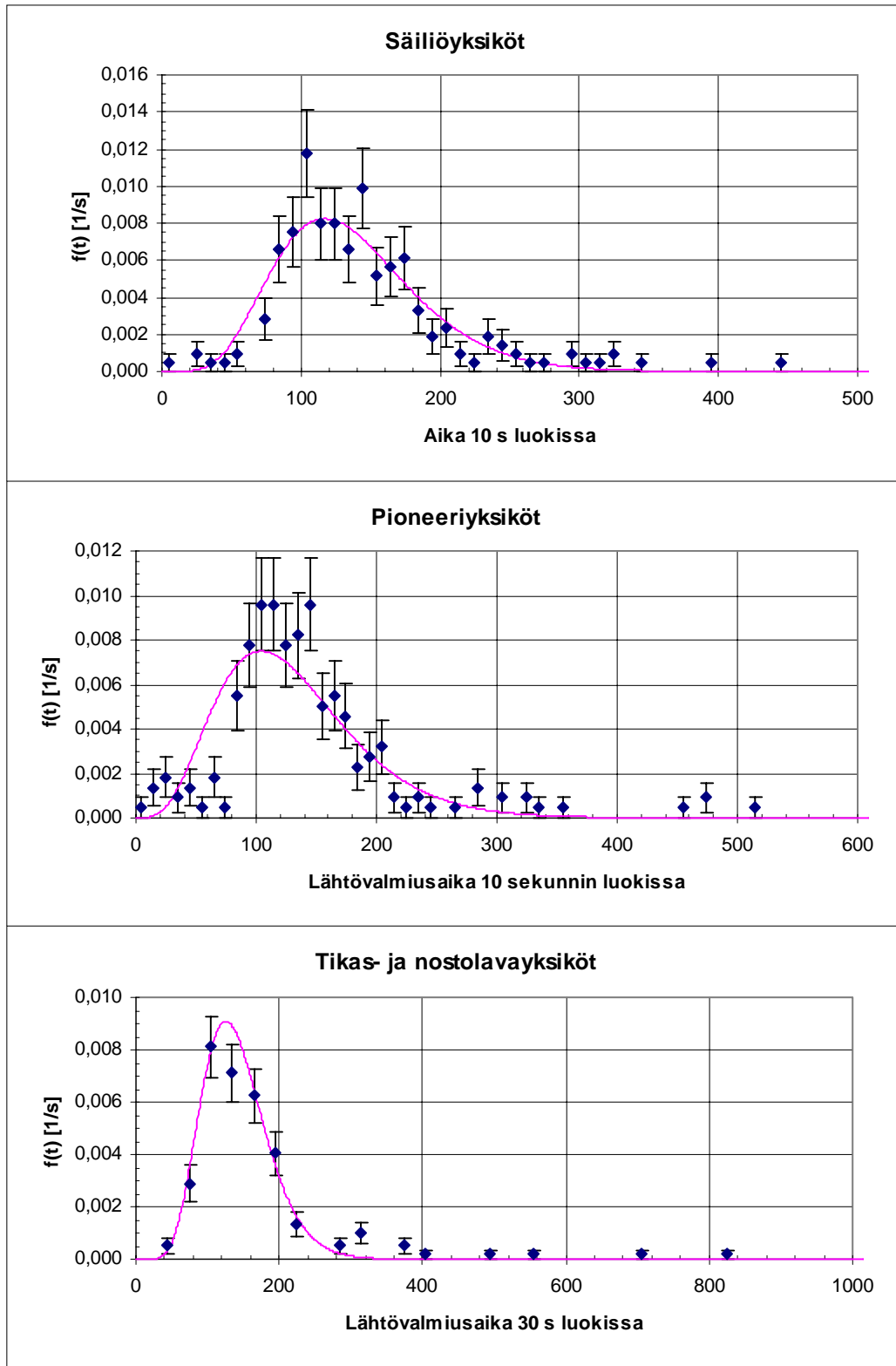
	α	β [min]
Uudenmaan lääni	4,63	1,89
Turun ja Porin lääni	3,67	2,26
Hämeen lääni	3,36	2,38
Kymen lääni	3,89	1,86
Mikkelin lääni	3,81	1,77
Pohjois-Karjalan lääni	3,35	2,29
Kuopion lääni	3,14	2,95
Keski-Suomen lääni	3,28	2,87
Vaasan lääni	2,76	2,84
Oulun lääni	3,32	2,56
Lapin lääni	3,19	2,18
Pääkaupunkiseutu	8,78	0,98
Helsinki	9,26	0,86
Espoo	10,78	0,88
Vantaa	7,84	1,11

Liite E: Helsingin yksiköiden aikajakaumat

Lähtövalmiusaika

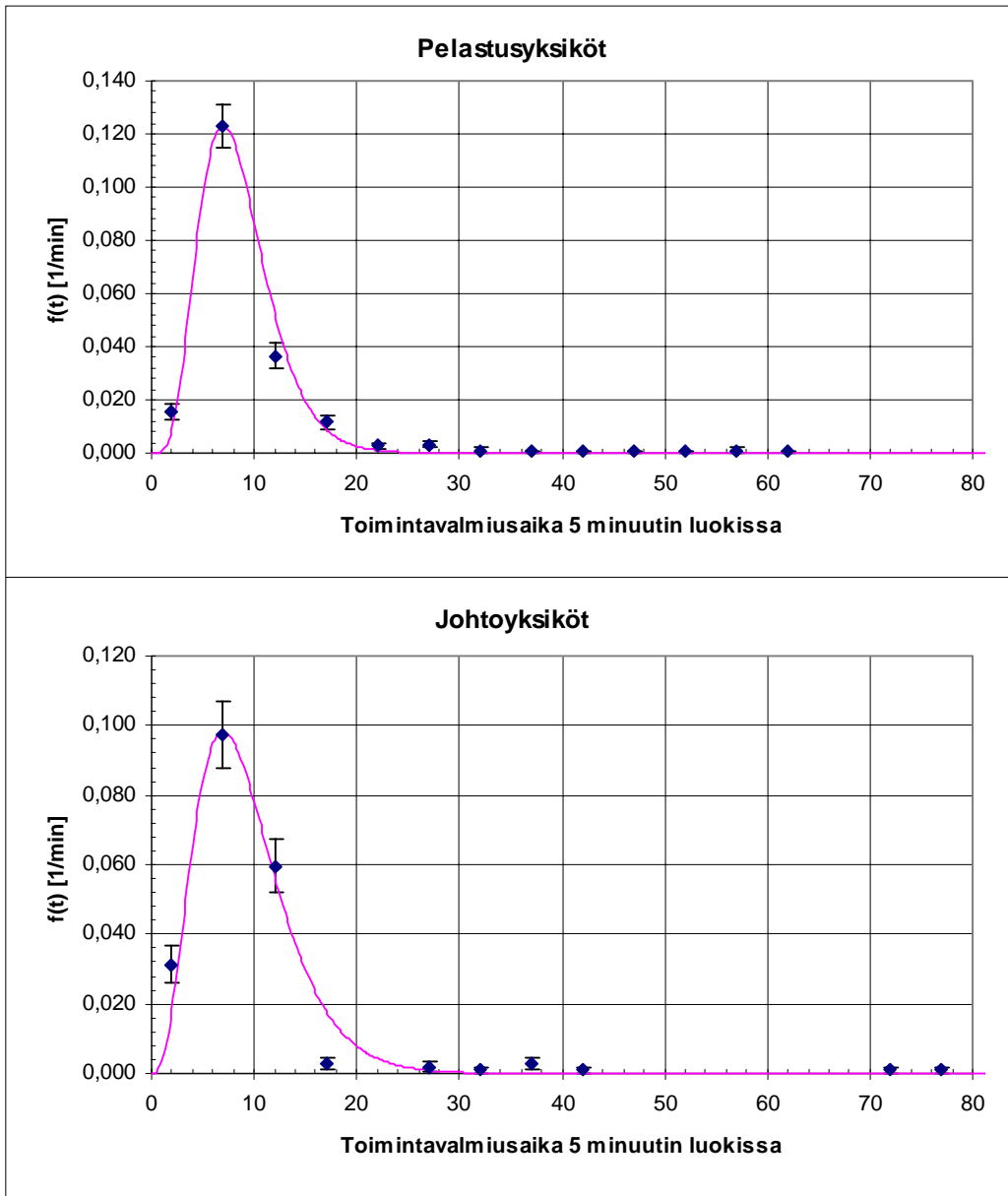


Kuva E1. Helsingin yksiköiden lähtövalmiusaikajakauma. Gammajakauman parametrien arvot on esitetty taulukossa E1.

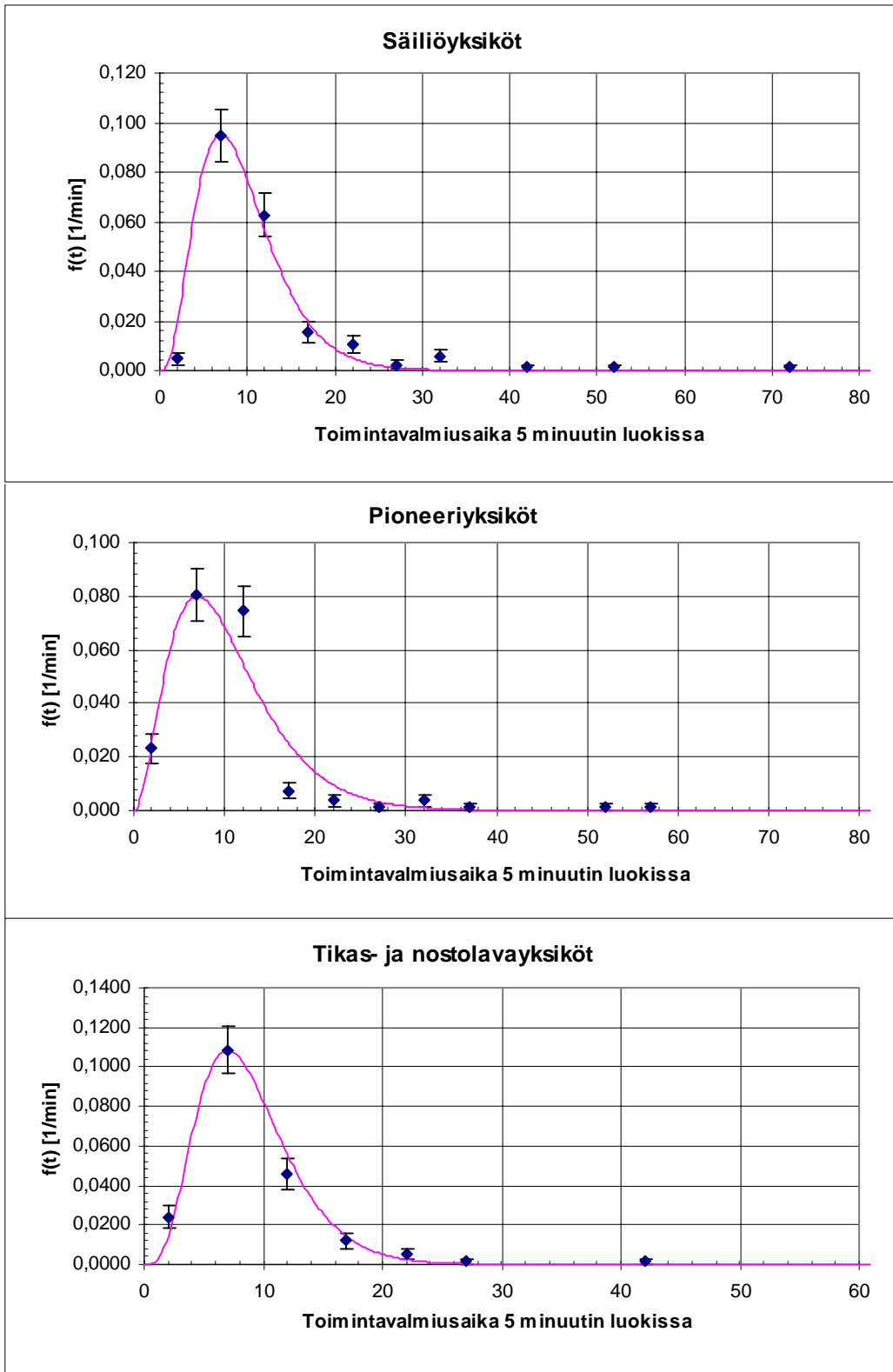


Kuva E2. Helsingin yksiköiden lähtövalmiusaikajakauma. Gammajakauman parametrien arvot on esitetty taulukossa E1.

Toimintavalmiusaika

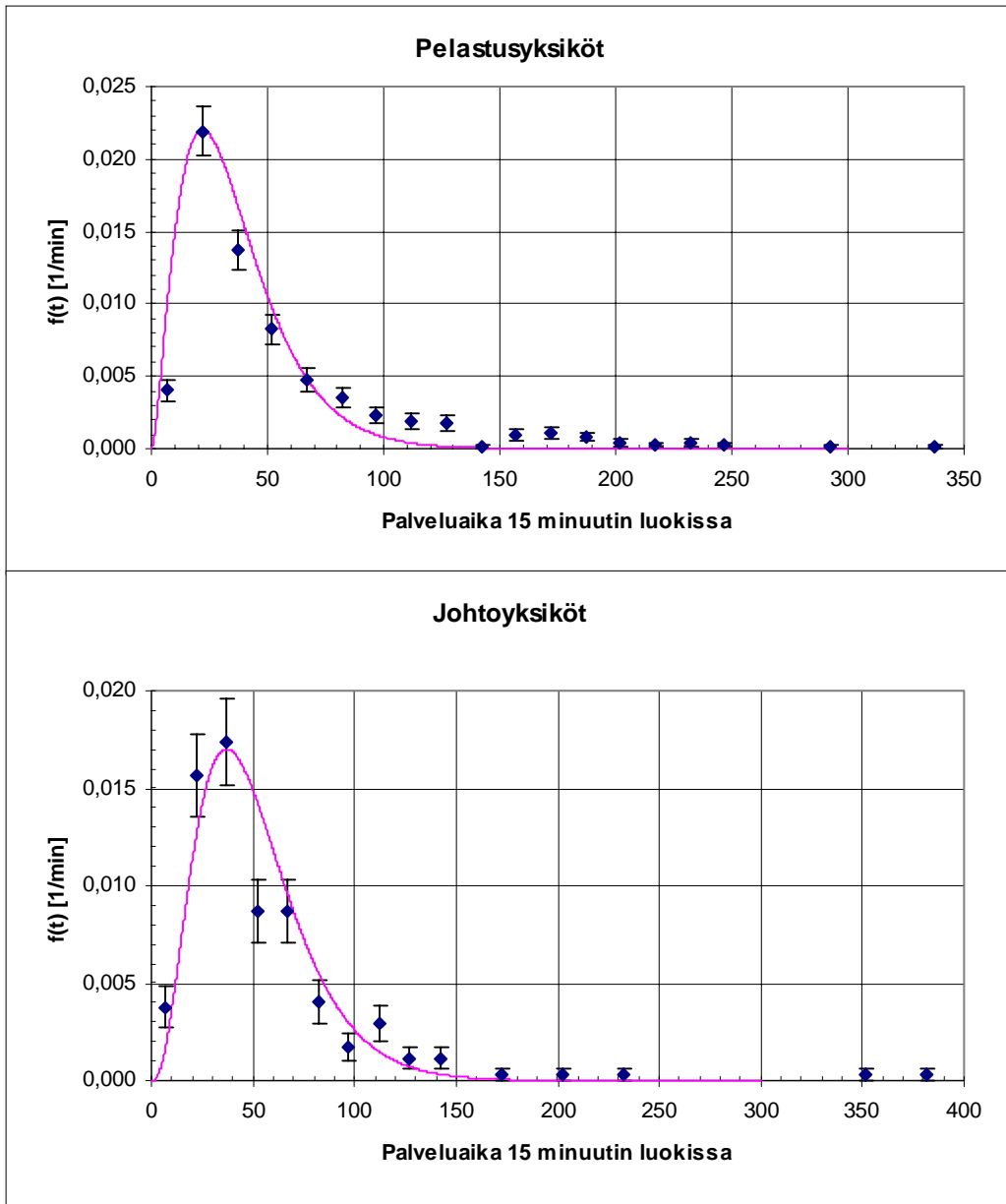


Kuva E3. Helsingin yksiköiden toimintavalmiusaikajakauma. Gammajakauman parametrien arvot on esitetty taulukossa E1.

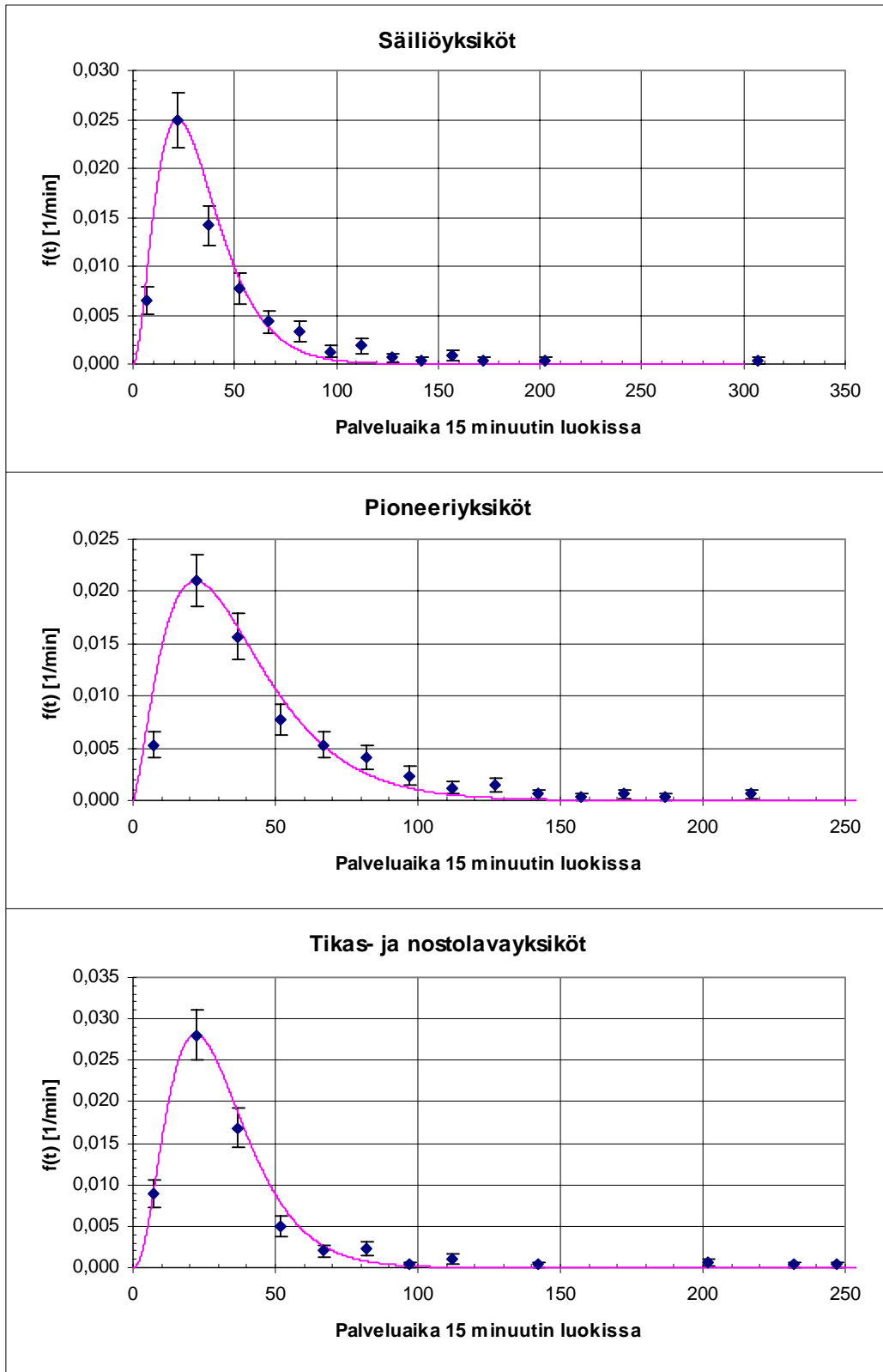


Kuva E4. Helsingin yksiköiden toimintavalmiusaikajakauma. Gammajakauman parametrien arvot on esitetty taulukossa E1.

Palveluaika

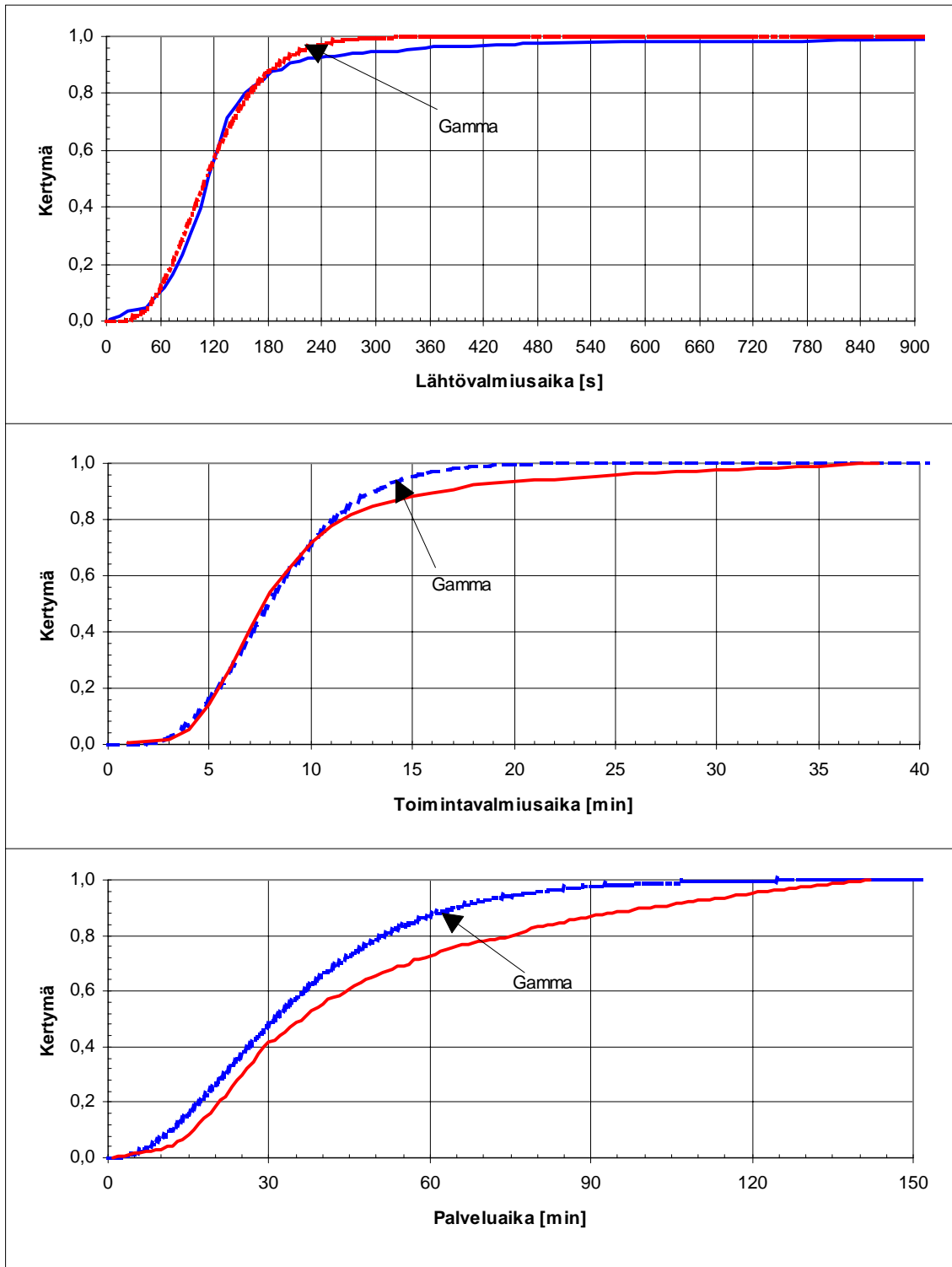


Kuva E5. Helsingin yksiköiden palveluaikahavaintoihin sovitettu gammajakauman tiheysfunktio. Gammajakauman parametrit on esitetty taulukossa E1.



Kuva E6. Helsingin yksiköiden palveluaikahavaintoihin sovitettu gammajakauman tiheysfunktio. Gammajakauman parametrit on esitetty taulukossa E1.

Kertymät pelastusyksiköille

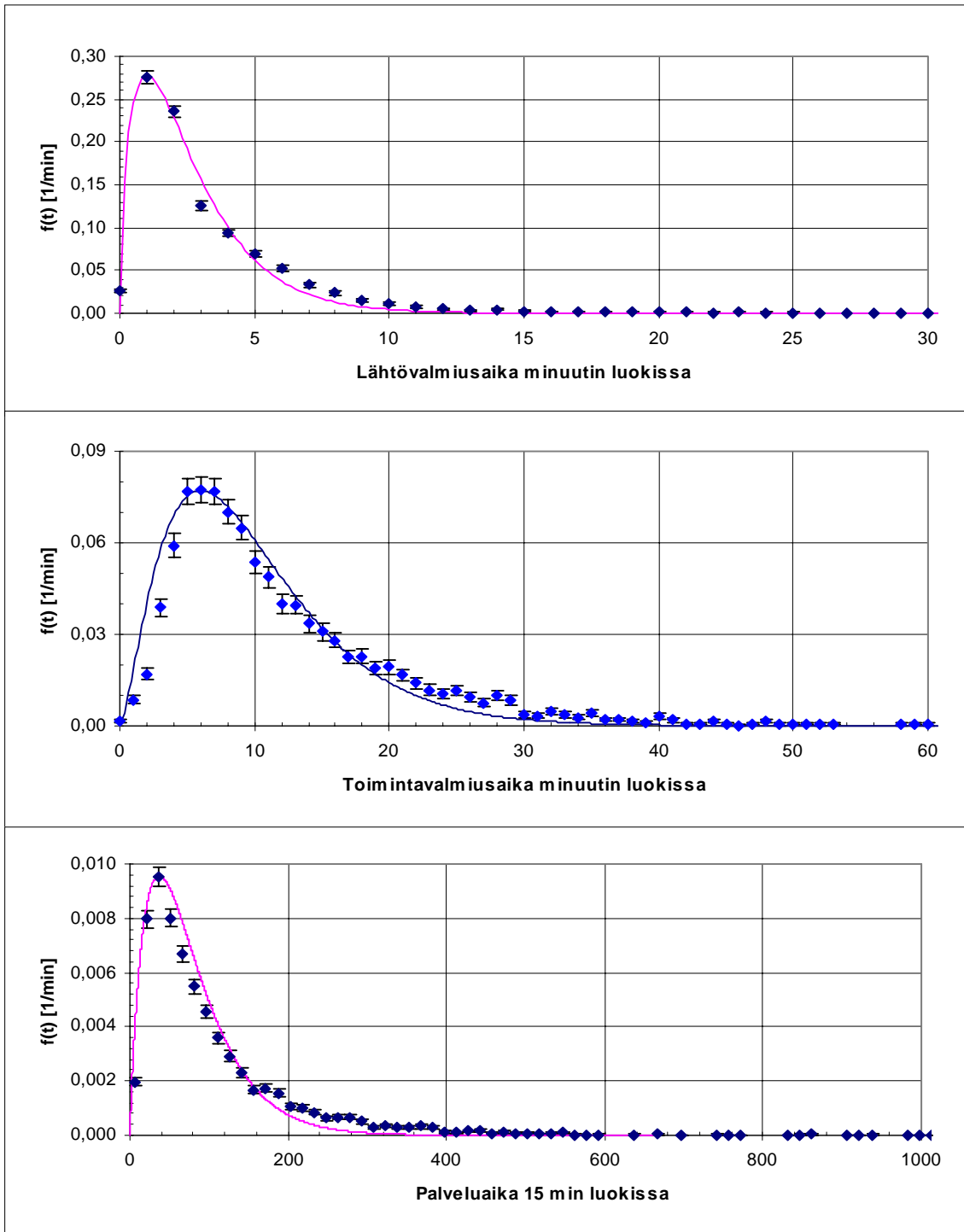


Kuva E7. Helsingin pelastusyksiköiden havaintoihin sovitettu gammajakauman kertymäfunktio. Gammajakauman parametrit on esitetty taulukossa E1.

Taulukko E1. Kuvien E1 - E7 gammajakaumien parametrien arvot

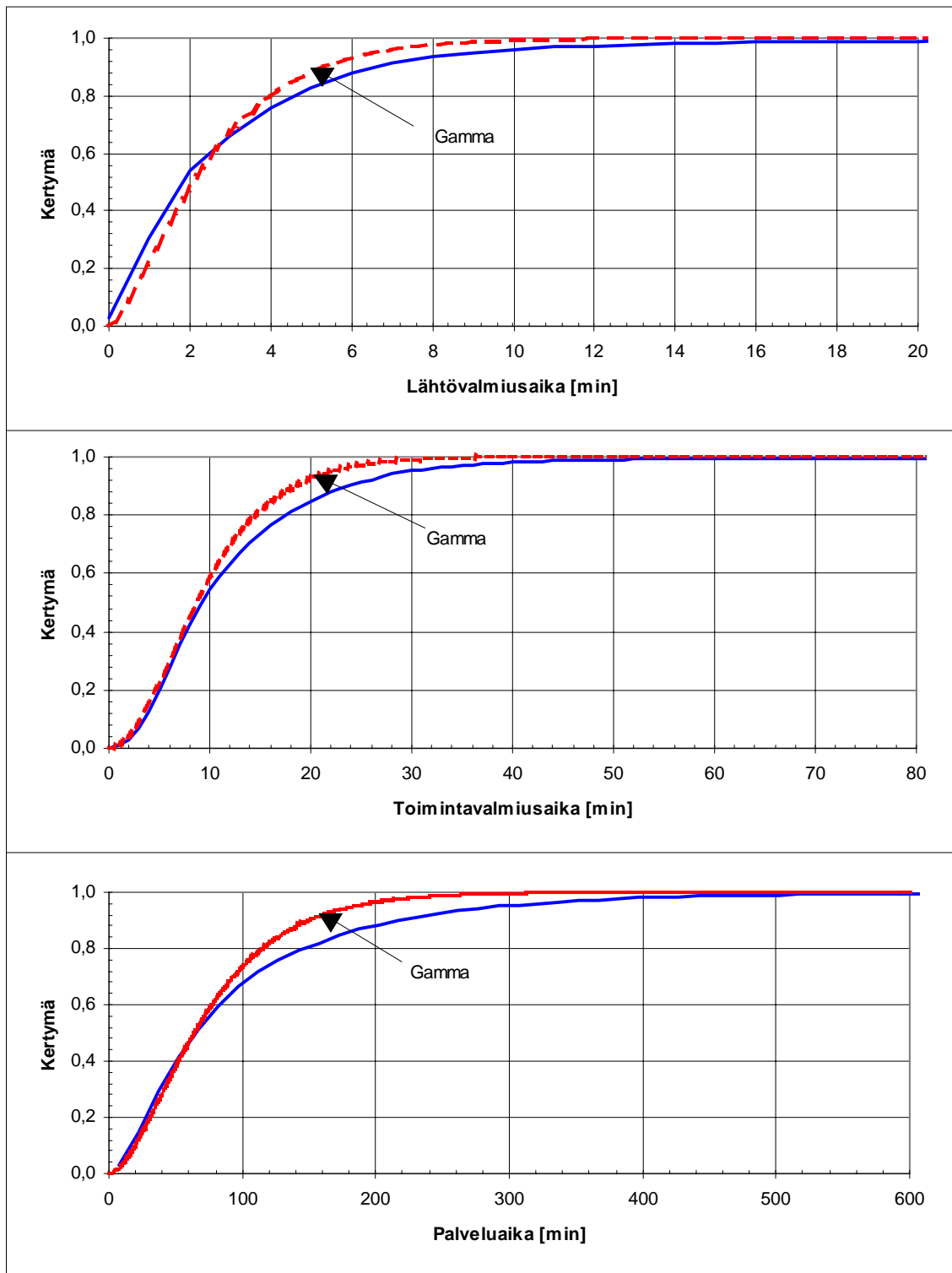
LÄHTÖVALMIUSAIKA	α	β [s]
Pelastusyksiköt	4,93	24,07
Johtoyksiköt	3,72	28,67
Säiliöyksiköt	7,00	19,49
Pioneeriyksiköt (Raivaus-)	5,01	26,03
Tikas- ja nostolavayksiköt	9,36	15,02
TOIMINTAVALMIUSAIKA	α	β [min]
Pelastusyksiköt	5,82	1,45
Johtoyksiköt	4,12	2,24
Säiliöyksiköt	3,94	2,38
Pioneeriyksiköt (Raivaus-)	3,13	3,29
Tikas- ja nostolavayksiköt	4,79	1,85
PALVELUAIKA	α	β [min]
Pelastusyksiköt	2,63	13,50
Johtoyksiköt	3,65	13,96
Säiliöyksiköt	3,06	10,68
Pioneeriyksiköt (Raivaus-)	2,50	14,72
Tikas- ja nostolavayksiköt	3,56	8,59

Liite F: Koko maan pelastusyksiköiden aikajakaumat



Kuva F1. Koko Suomen pelastusyksiköiden havaintoihin sovitettu gammajakauman tiheysfunktio. Gammajakauman parametrien arvot taulukossa F1.

Kertymät



Kuva F2. Koko Suomen pelastusyksiköiden kertymähavaintoihin sovitettu gamma-jakauman kertymäfunktio. Gammajakauman parametrien arvot taulukossa F1.

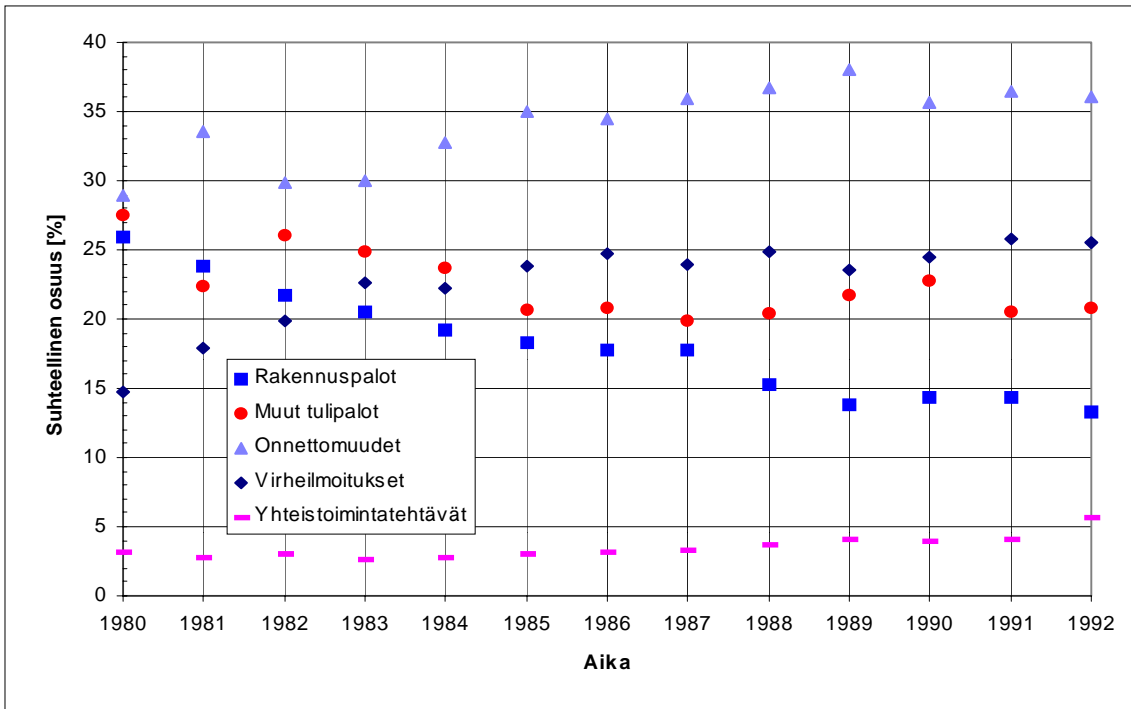
Taulukko F1. Koko maan pelastusyksiköiden havaintoihin sovitettujen gammajakaumien parametrien arvot.

Pelastusyksiköt	α	β
Lähtövalmiusaika	1,62	1,61
Toimintavalmiusaika	2,50	4,00
Palveluaika	1,94	39,57

Liite G: Kunnallisten palokuntien hälytysluonteiset lähdöt

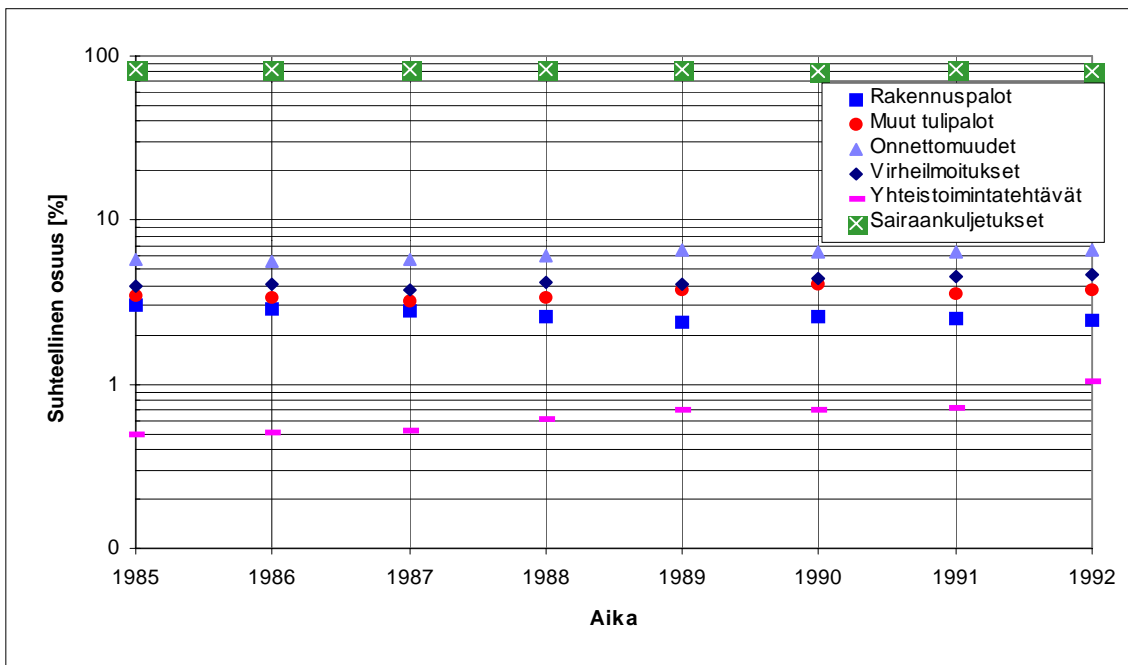
Taulukko G1. Palotoimen ilmoitusvirran keskimääräinen jakautuminen eri tehtäviin Suomessa vuosina 1980–1992 (Sisäasiainministeriö 1997) normittuna miljoonaa asukasta kohden. * vuosien 1985–1992 keskiarvo

No	Hälytystyyppi	Ilmoitusvirta [1/d]															
		1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	k.a. *		
	Asukasluku tuhansina	4 788	4 812	4 842	4 870	4 894	4 911	4 926	4 939	4 954	4 974	4 998	5 029	5 055	4 973		
1	Tulipalot	7,6	6,5	7,2	7,0	7,1	7,6	7,6	7,6	8,0	8,3	8,4	7,9	7,8	7,9		
1.1	Rakennuspalot	3,7	3,4	3,3	3,2	3,2	3,6	3,6	3,7	3,5	3,3	3,4	3,4	3,2	3,4		
1.2	Ajoneuvopalot	1,1	1,0	1,0	1,1	1,0	1,1	1,2	1,2	1,3	1,4	1,3	1,3	1,1	1,2		
1.3	Maastopalot	2,1	1,3	1,8	1,7	1,8	1,5	1,5	1,2	1,7	2,0	2,2	1,8	2,1	1,8		
1.4	Nokipalot	0,7	0,8	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,5	0,5	0,3		
1.5	Muut palot	0,7	0,8	0,8	0,7	0,7	1,0	1,0	1,2	1,3	1,3	1,3	0,9	0,9	1,1		
2	Onnettomuudet	4,2	4,7	4,6	4,7	5,5	6,9	6,9	7,4	8,4	9,1	8,3	8,5	8,6	8,0		
2.1	Liikenneonnettomuudet	1,1	1,2	1,3	1,4	1,6	1,9	2,1	2,3	2,8	3,2	3,2	3,1	2,8	2,7		
2.2	Räjähdysonnettomuudet	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,02	0,04	0,03	0,03	0,03		
2.3	Öljyvahingot	1,1	1,2	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,3	1,4	1,6	1,5	1,3	1,2	1,3		
2.4	Tulvat	0,8	0,9	0,5	0,4	0,9	1,1	0,6	1,2	1,1	0,7	0,7	0,7	0,5	0,8		
2.5	Vaarallisten aineiden aih.	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,3		
2.6	Muut	1,0	1,2	1,4	1,5	1,7	2,5	2,7	2,2	2,7	3,2	2,6	3,2	3,8	2,9		
3	Virkehälytykset	2,1	2,5	3,1	3,6	3,8	4,7	5,0	4,9	5,7	5,6	5,7	6,0	6,1	5,5		
4	Yhteistoimintateht.	0,5	0,4	0,5	0,4	0,5	0,6	0,6	0,7	0,8	1,0	0,9	1,0	1,3	0,9		
	Yhteensä	14,4	14,1	15,3	15,7	16,9	19,8	20,1	20,5	22,9	24,0	23,4	23,3	23,8	22,2		
5	Sairaankuljetus						99,6	101,8	108,4	113,6	112,7	106,6	109,0	105,8	107,2		
4.1	Sk-kiireellinen						52,0	52,3	53,4	55,6	53,5	48,3	50,8	55,7	52,7		
4.2	Sk-kiireetön						47,6	49,5	55,0	58,0	59,2	58,3	58,3	50,1	54,5		



Kuva G1. Pelastustoimen ilmoitusvirran suhteellisten osuuksien kehittyminen vuosina 1980–1992.

Kuvassa G1 ei ole hälytysten kokonaismäärään laskettu mukaan sairaankuljetuksia.



Kuva G2. Pelastustoimen ilmoitusvirran suhteellisten osuuksien kehittyminen vuosina 1985–1992.

Kuvassa G2 on otettu huomioon myös sairaankuljetusten osuus kokonaishälytysten määrässä.

Liite H: Kaupunkien palokuntien lukumäärät

Taulukko H1. Paloasemien kattavuus eri kaupungeissa (Brušlinski 1988).

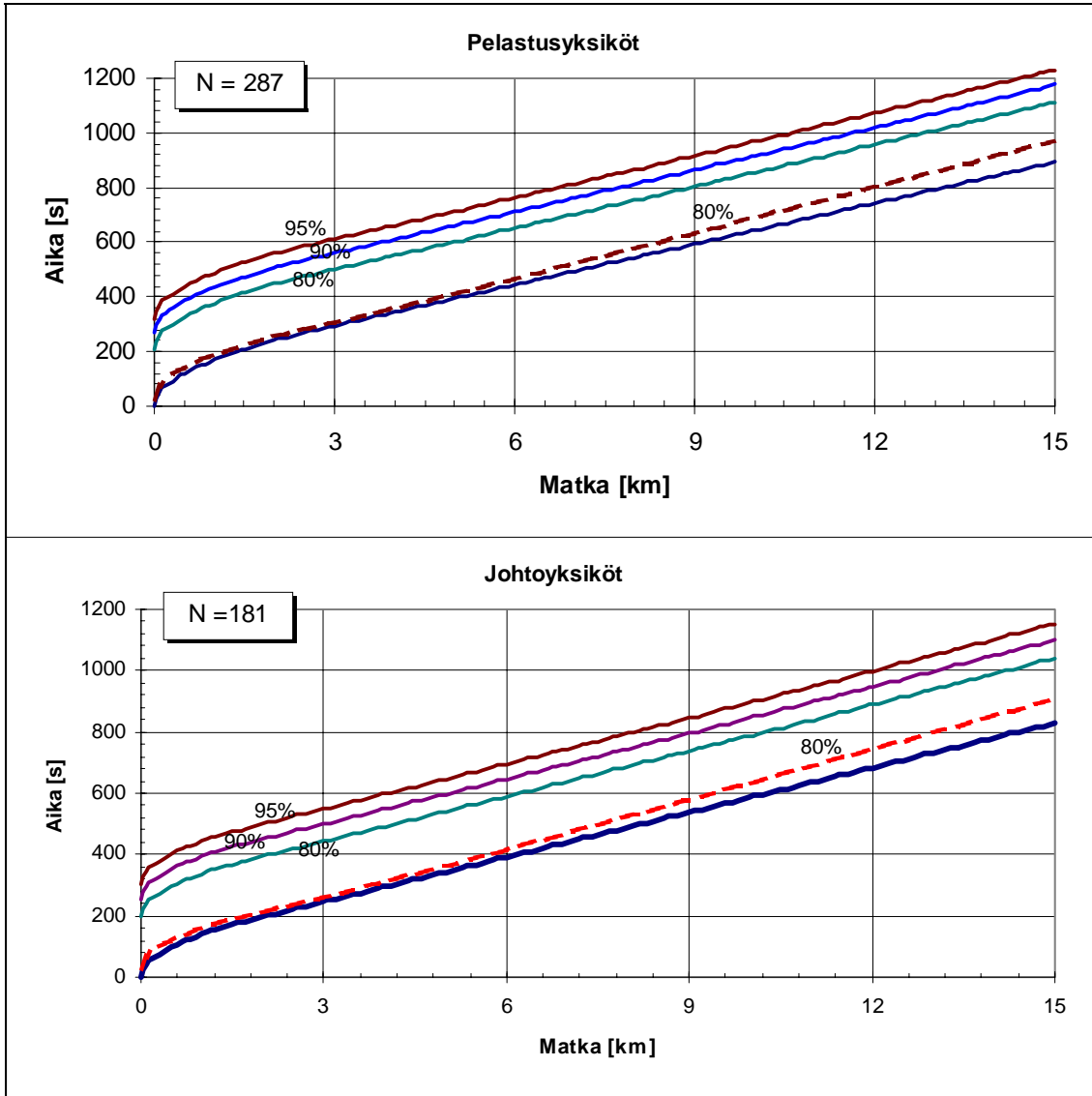
Kaupunki	Asukas- luku tuhansina	Pinta-ala neliökilo- metreinä	Palo- asemien lukumäär	Yhden aseman palvelualue	Asukkaiden lukumäärä yhtä asemaa kohden
Helsinki	500	450	8	56	63
Oslo	450	453	9	50	50
Riika	930	350	9	39	103
Vilna	630	262	7	37	90
Budapest	2 100	525	15	35	140
Varsova	1 700	485	15	32	113
Berliini	3 400	883	34	26	100
Tukholma	670	216	9	24	74
Rotterdam	600	280	15	19	40
Pietari	5 000	750	45	17	111
Moskova	9 000	994	64	16	141
Lontoo	7 000	1600	114	14	61
Kööpenhamina	460	90	9	10	51
Pariisi	2 170	105	24	4	90
Yhteensä	34 610	7 443	377	20	92
New York	7 300	790	217	3,6	34
Chicago	3 000	592	170	3,5	18
Tokio	10 000	720	229	3,1	44
Osaka	2 700	213	90	2,4	30
Yhteensä	23 000	2 307	703	3,3	33

*Taulukko H2. Suhteellisia palojen ja kaluston määriä muutamissa kaupungeissa.
(Brušlinski 1988)*

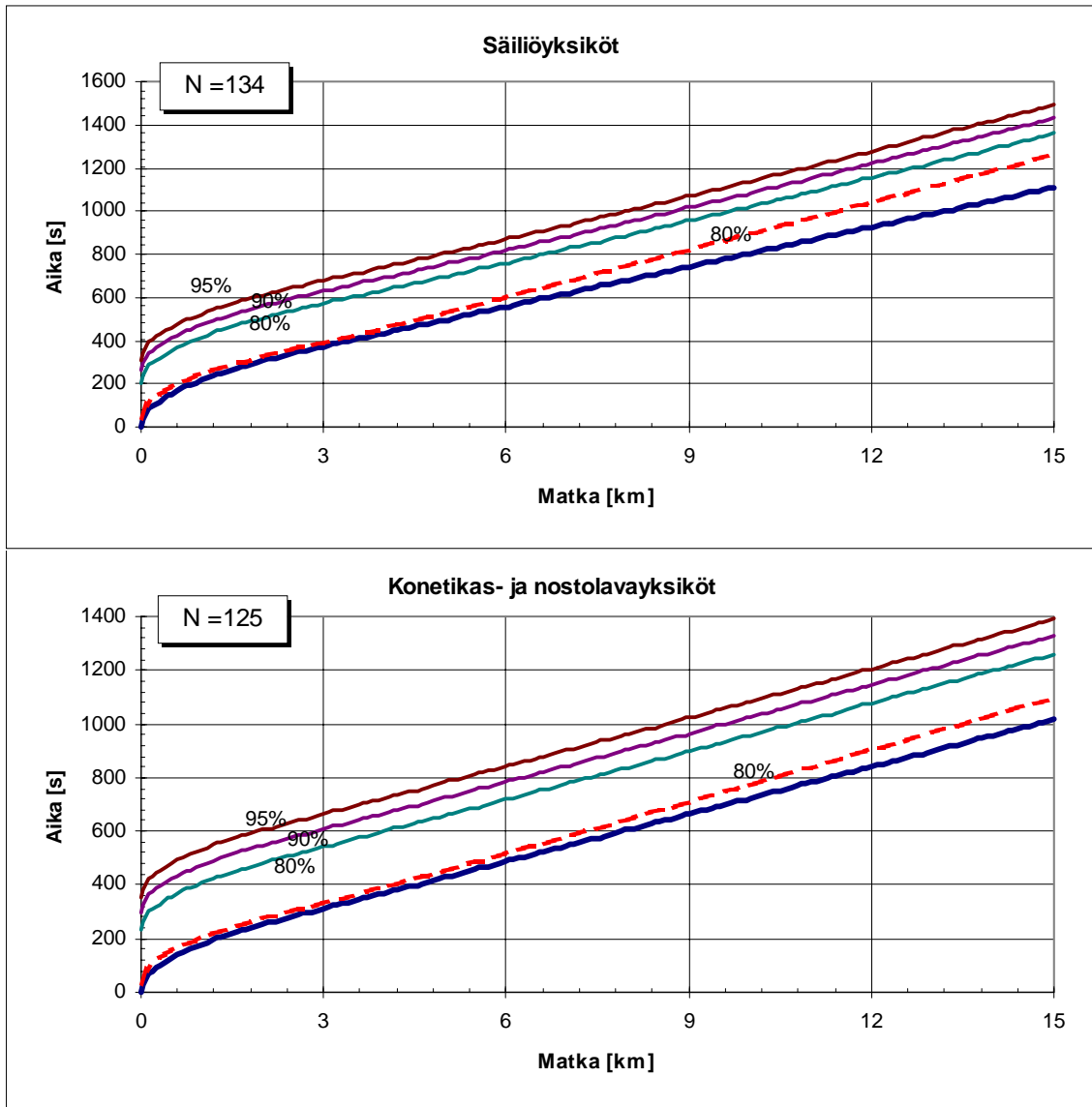
Kaupunki	Asukasluku tuhansina yhtä perusyksikköä kohden	Asukasluku tuhansina yhtä tikasautoa kohden	Asukasluku yhtä tulipaloa kohden	Hälytysten määrä vuorokaudessa yhtä paloasemaa kohden
Moskova	38	225	750	4
New York	32	51	608	4
Pariisi	29	194	886	8
Tokio	24	140	657	6
Osaka	24	87	788	3
Lontoo	23	219	875	4

Liite I: Ajoaika-ajomatkasovitteet

Helsinki

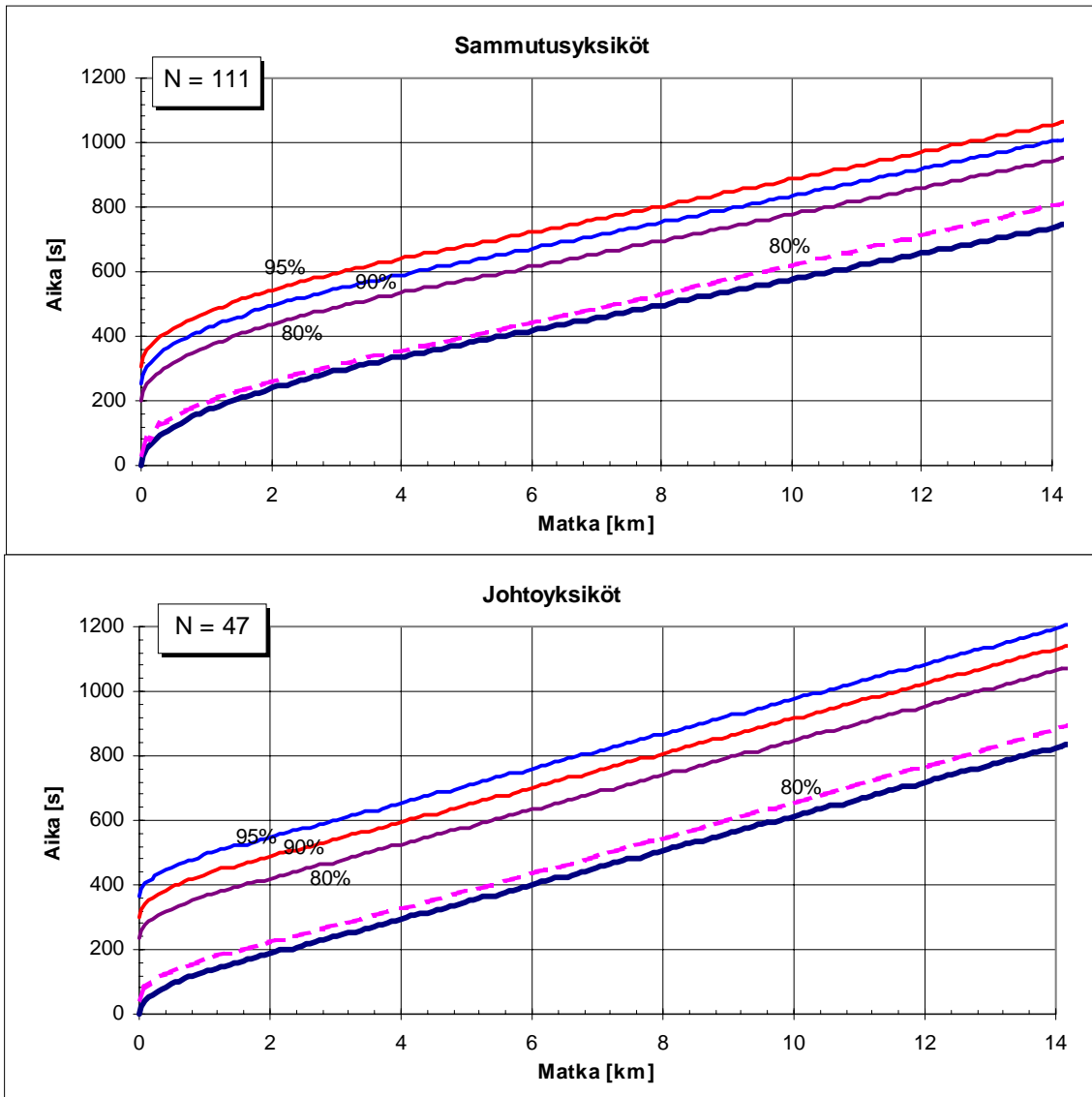


Kuva II. Helsingin eri yksiköiden matka-aikakuvaajat. Katkoviivalla on merkitty keskiarvon 80 %:n luottamusväli ja yhtenäisillä käyrillä yksittäisen havainnon 80 %:n, 90 %:n ja 95 %:n luottamusvälejä. Kuvaajien yhtälöiden parametrien arvot ovat taulukossa 26.

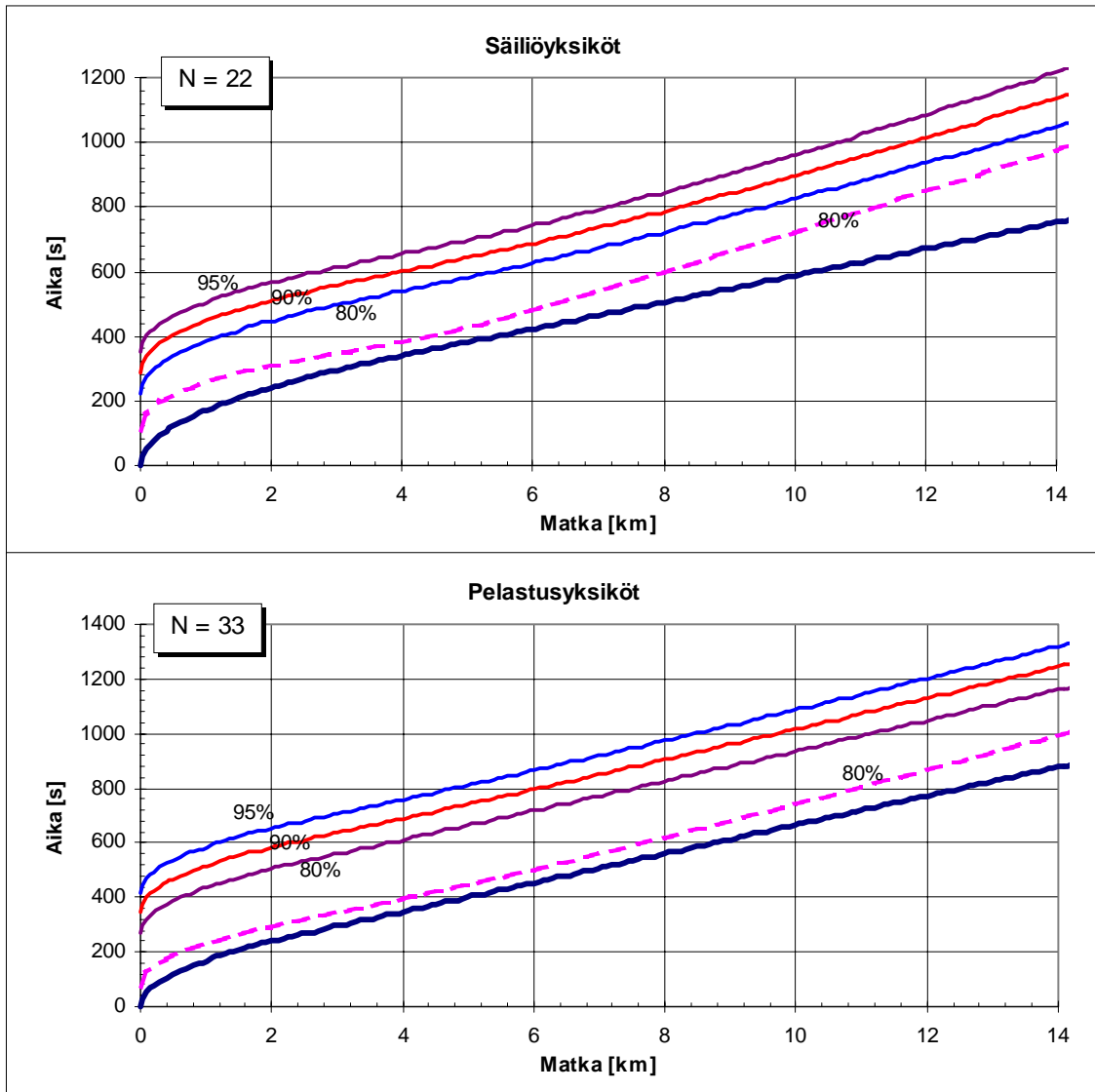


Kuva 12. Helsingin eri yksiköiden matka-aikakuvaajat. Katkoviivalla on merkitty keskiarvon 80 %:n luottamusväli ja yhtenäisillä käyrillä yksittäisen havainnon 80 %:n, 90 %:n ja 95 %:n luottamusvälejä. Kuvaajien yhtälöiden parametrien arvot ovat taulukossa 26.

Tampere



Kuva 13. Tampereen eri yksiköiden matka-aikakuvaajat. Katkoviivalla on merkitty keskiarvon 80 %:n luottamusväli ja yhtenäisillä käyrillä yksittäisen havainnon 80 %:n, 90 %:n ja 95 %:n luottamusvälejä. Kuvaajien yhtälöiden parametrien arvot ovat taulukossa 26.

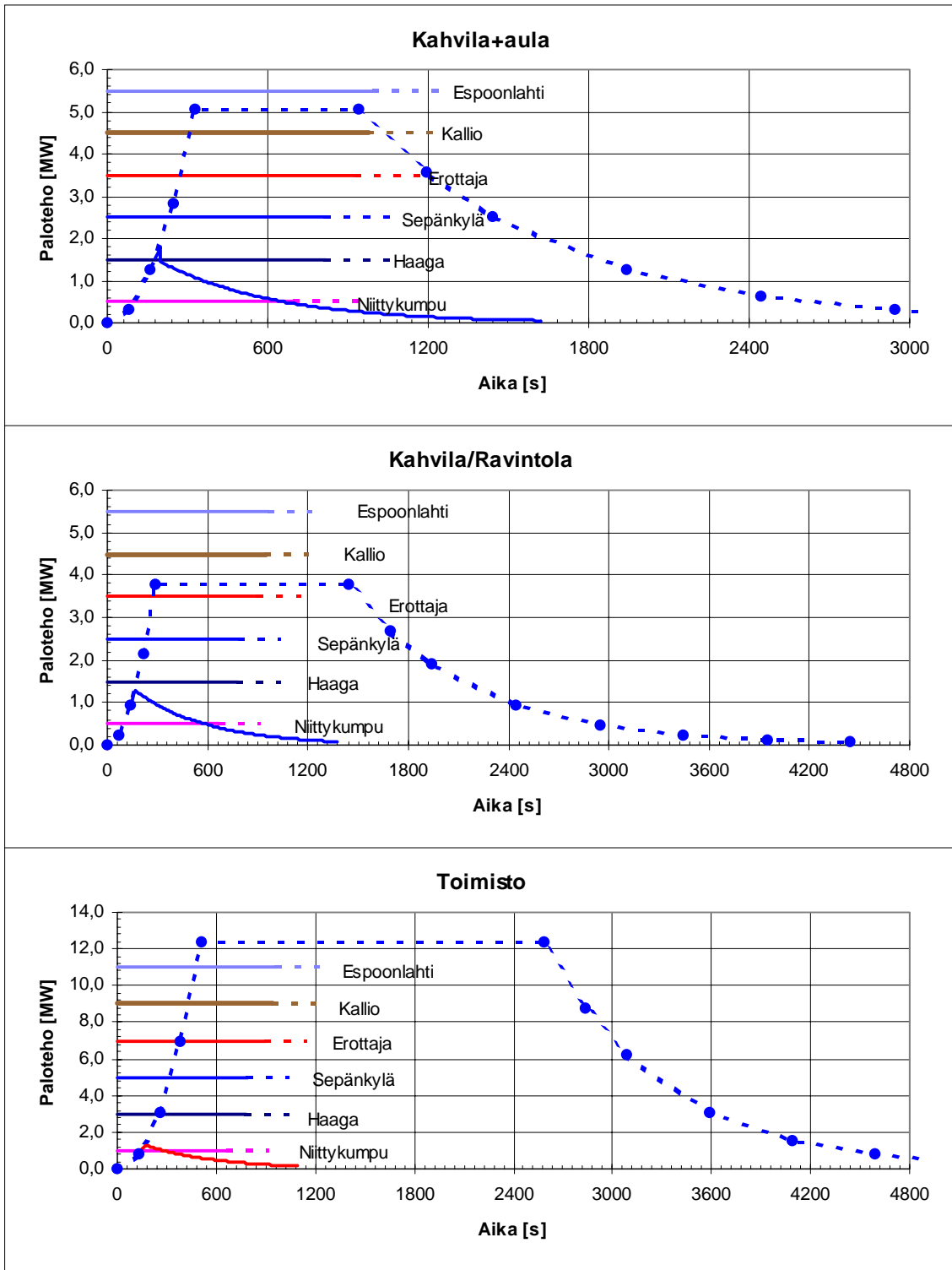


Kuva I4. Tampereen eri yksiköiden matka-aikakuvaajat. Katkoviivalla on merkitty keskiarvon 80 %:n luottamusväli ja yhtenäisillä käyrillä yksittäisen havainnon 80 %:n, 90 %:n ja 95 %:n luottamusvälejä. Kuvaajien yhtälöiden parametrien arvot ovat taulukossa 26.

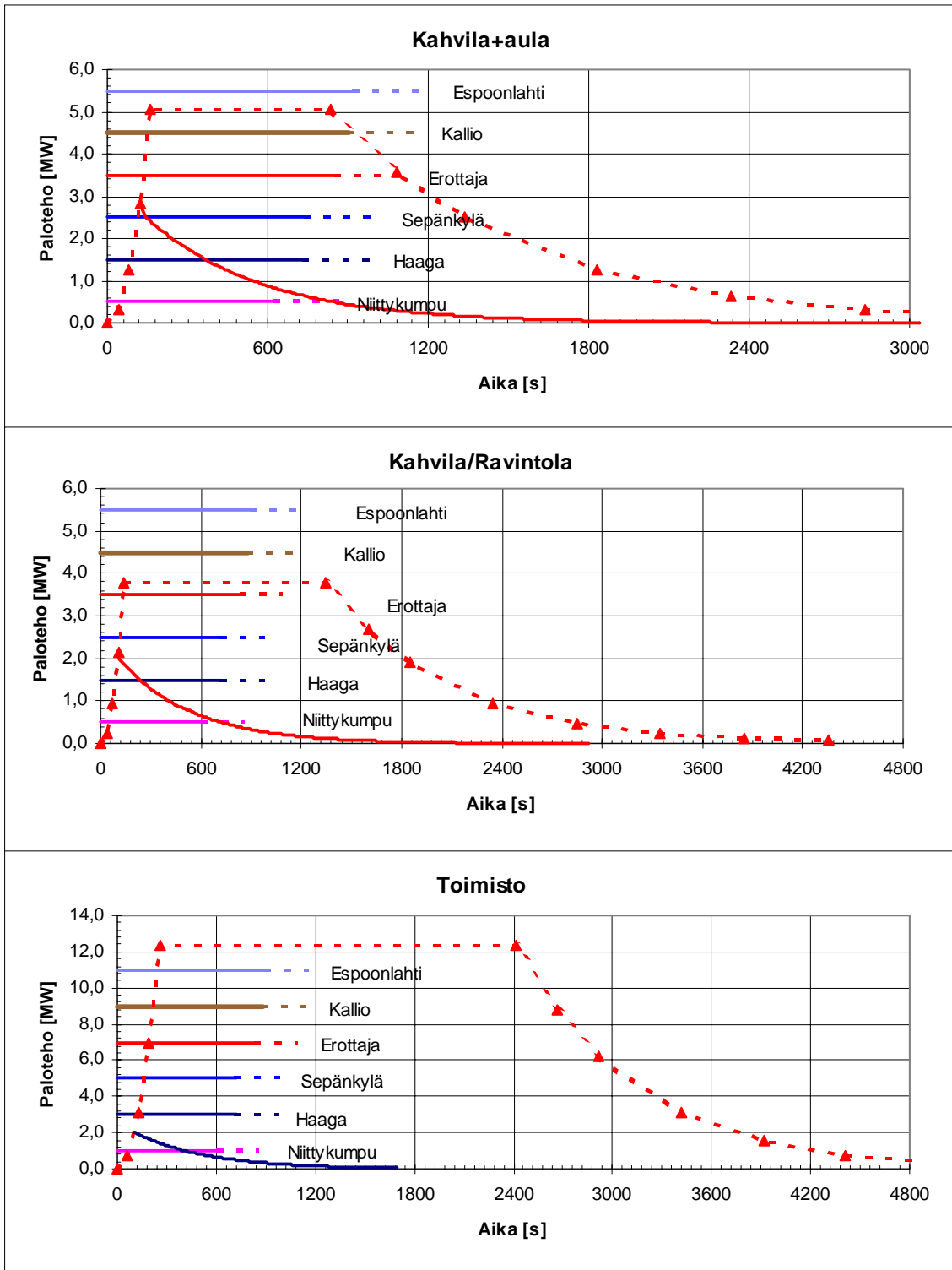
Liite J: Otaniemen maamerkin syttymien ja sammutuksen epäonnistumisen todennäköisyydet

Taulukko J1. Otaniemen maamerkin eri tilojen syttymien ja sammutuksen epäonnistumisen todennäköisyydet.

	A	Syttymis- taajuus [1/a]	Ei sammu [%]	Vakiintunut syttymä [1/a]	Sprinkleri toimii [%]	Sprinkleri ei toimi [%]	Autom. sammuus epäonnistuu [%]	Käsi- sammuus epäonnistuu [%]	Tilan sammuus epäonnistuu [1/a]	Palo jatkuu [1/a]
Kahvila- aula	2863	0,0286	99	0,028	90	10	19	25	0,0475	0,00135
Kahvila- ravintola	1472	0,0147	99	0,015	90	10	19	25	0,0475	0,00069
Myymälät	2317	0,0232	99	0,023	90	10	19	25	0,0475	0,00109
Toimistot	2403	0,0240	99	0,024	90	10	19	25	0,0475	0,00113



Kuva J1. Nopeasti kasvavan palo palotehokäyrät Otaniemen maamerkin eri tiloissa. Katkoviivalla on merkitty palotehoa, kun sprinklaus ei toimi, ja yhtenäisellä viivalla palotehoa, kun sprinklaus toimii. Aikajanoilla on merkitty palokunnan eri asemilta lähtevien pelastusyksiköiden käyttämää aikaa palon alkuhetkestä sammutustoimien aloittamiseen.



Kuva J2. Erittäin nopeasti kasvavan palo palotehokäyrät Otaniemen maamerkin eri tiloissa. Katkoviivalla on merkitty palotehoa, kun sprinklaus ei toimi, ja yhtenäisellä viivalla palotehoa, kun sprinklaus toimii. Aikajanoilla on merkitty palokunnan eri asemilta lähtevien pelastusyksiköiden käyttämää aikaa palon alkuehetkestä sammutustoimien aloittamiseen.

