

YVY

TUTKIMUS 3

Vesijohtoverkon toiminnan luotettavuus

yhdykskuntien vesi- ja ympäristöprojekti

HELSINKI 1976

YVY

TUTKIMUS 3

Vesijohtoverkon toiminnan luotettavuus

SUOMEN KAUPUNKILIITTO

JOUKO LIIMATAINEN
KARI SAARIKOSKI

yhdyskuntien vesi- ja ympäristöprojekti

HELSINKI 1975

KYRIIRI OY
Luotsikatu 4, 00160 H:KI 16
PAINO: 90-630 230
MYyntI: 90-440 211/KIRJAKAUPPA
RUNEBERGINK. 14—16
(H:GIN KAUPPAKORKEAKOULU)
00100 Helsinki 10

ESIPUHE

Yhdyskuntien vesi- ja ympäristöprojektin tutkimustavoitteiksi veden jakelun osalta on määriteltä mm. vedenjakelujärjestelmän mitoitus- ja valintaperusteiden kehittäminen. Tutkimus "Vesi-johtoverkon toiminnan luotettavuus, mitoitus-tilanteen vaikutus suunnitteluun ja mitoitus-tilanteen esiintymisen todennäköisyys" pyrkii omalta osaltaan em. tavoitteeseen. Tutkimus perustuu esitutkimuksen E-11, "Vesi- ja jätehuollon simulointimallit", sisältämään projektiehdotukseen.

YVY-projektin johtoryhmä suositteli keväällä 1974 tutkimuksen rahoittamista vesihallitukselle myönnetystä ns. YVY-määrärahasta. Tutkimuksen toteuttamisesta on sovittu Suomen Kaupunkiliiton ja vesihallituksen kesken.

Tutkimuksen vastuullisena johtajana on toiminut dipl.ins. Jouko Liimatainen ja tutkijana dipl.ins. Kari Saarikoski Suomen Kaupunkiliiton toimistosta. Tutkimusta on valvonut tekn.lis. Matti Viitasaari vesihallituksesta.

Tutkimus vastaa sille asetettuja tavoitteita ja on johtanut vedenjakelujärjestelmän säätöä käsittelevään jatkotutkimukseen.

Yhdyskuntien vesi- ja ympäristöprojekti

SISÄLLYSLUETTELO

	sivu
ESIPUHE	I
SISÄLLYSLUETTELO	II
YHTEENVETO	V
ENGLISH SUMMARY	IX
0. JOHDANTO	1
Vedenjakelujärjestelmän toimintavarmuudesta	1
Mitoitusarvot ja jakelujärjestelmän perusratkaisu toimintavarmuuden kannalta	1
Laitteet, materiaalit ja energia	2
Valvonta ja ohjaus	3
Huolto- ja korjaustoiminta	3
Tutkimuksessa käsitellyt asiat	3
1. VEDENJAKELUN KATKOT	4
1.1 Putkirikot	4
1.1.0 Yleistä	4
1.1.1 Kerätty aineisto	4
1.1.2 Saadut tulokset	7
1.1.2.1 Putkirikön toistuvuus	7
1.1.2.2 Putkirikkojen korjauksen kesto	8
1.1.2.3 Putkirikkojen syistä	11
1.2 Pumppaamoissa sattuneet häiriöt	14
1.2.0 Yleistä	14
1.2.1 Käytetty aineisto	15
1.2.2 Saadut tulokset	16
1.2.2.1 Sähköhäiriöt	16
1.2.2.2 Pumppuyksikössä sattuneet häiriöt	17
1.2.2.3 Imuultaiden pesu	18
1.2.2.4 Muut häiriöt	19
1.2.3 Yhteenveto tuloksista	20
2. MITOITUSARVOJEN MERKITYKSESTÄ JAKELUVARMUUDEN KANNALTA	21
2.0 Yleistä	21
2.1 Mitoitustilanteet ja -vesimäärät	21
2.2 Kulutusvaihteluarvoja	22

2.2.1	Vuorokausikulutusvaihtelut	22
2.2.2	Tuntikulutusvaihtelut	23
2.2.3	Kulutusvaihtelut yhteensä	23
2.3	Mitoitustilanteen esiintymisen todennäköisyys	24
2.3.1	Käytetty aineisto	24
2.3.2	Saadut tulokset	25
2.3.2.1	Vuorokausikulutuksen vaihtelut	25
2.3.2.2	Suurimman tuntikulutuksen vaihtelu	27
2.3.2.3	Tuntikulutuksen vaihtelu	31
2.3.2.4	Huipputuntikulutus mitoitusperusteena	34
2.3.3	Sammutusveden tarve	37
2.3.3.1	Käytetty aineisto	37
2.3.3.2	Saadut tulokset	38
	Tulipalojen toistuvuus	38
	Sammutuksen kesto	39
	Sammutukseen kulunut vesimäärä	39
	Sammutustyön vaatima suurin hetkel- linen vesimäärä	40
2.3.4	Putkirikön aikana vuotanut vesimäärä	41
3.	JÄRJESTELMIEN TOIMINTAVARMUUS JA SEN VAIKUTUS KUSTANNUKSIIN (Lähteet /7/ ja /8/)	43
3.0	Yleistä	43
3.1	Järjestelmien luotettavuus	43
3.1.1	Järjestelmän komponentin häiriötaajuus	43
3.1.2	Sarjajärjestelmä	44
3.1.3	Rinnakkaisjärjestelmä	45
3.1.4	Yhdistetyt järjestelmät	45
3.2	Korjattavat järjestelmät	46
3.2.0	Yleistä	46
3.2.1	Korjattavan järjestelmän luotettavuuden laskemisesta	47
3.3	Toimintavarmuus ja kustannustekijät	47
3.4	Vedenjakelujärjestelmän toimintavarmuus	50
3.4.1	Pumppaus	50
3.4.2	Säiliöt	51
3.4.3	Verkosto	52
3.5	Toimintavarmuus ja vastuu	53

4.	PUMPPAAMON JA VEDENJAKELUJÄRJESTELMÄN KÄYTETTÄVYYDESTÄ TOIMINTAVARMUUDEN KANNALTA	54
4.1	Käytetty vertailuperuste	54
4.2	Pumppaamon käytettävyydestä	55
4.2.1	Sähköhäiriöiden osuus	55
4.2.2	Muiden tekijöiden osuus	56
4.3	Vedenjakelujärjestelmän käytettävyydestä	59
4.3.0	Yleistä	59
4.3.1	Eräiden vedenjakelujärjestelmän perustyyppien käytettävyydestä	59
	LÄHDELUETTELO	63
	LIITTEET I...IX	

YHTEENVETO

Tutkimustyön lähtökohdaksi otettiin vedenjakelujärjestelmän toimintavarmuus laajassa mielessä, jolloin siihen kuuluu lähinnä

- mitoitusarvojen todenmukaisuus
- järjestelmien rakenne (kiertoyhteydet, säiliöt)
- yksittäisten komponenttien kestävyys
- energian saanti
- valvonta ja ohjaus
- järjestetty huolto- ja korjaustoiminta

Tärkeimmiksi katsottujen tekijöiden osalta tutkimus jakautuu seuraaviin pääkohtiin:

- Yleistä
- Vedenjakelun katkot
- Mitoitusarvojen merkitys jakeluvarmuuden kannalta
- Järjestelmän toimintavarmuus
- Todennäköisyysslaskennan ja luotettavuusteorian menetelmiä
- Analyysi vedenjakelujärjestelmän käytettävyydestä

Jakelukatkoista kerättiin aineistoa eräiltä maamme vesilaitoksilta, joilla oli olemassa tilastoja putkirikoista ja pumppaamoilla sattuneista häiriöistä.

Putkirikkojen osalta saatiin tietoja mm. seuraavista seikoista:

- korjausaika
- vuotoveden määrä
- rikkoontumisen syy
- jakamatta jäänyt vesimäärä

Osaksi saatiin tietoa myös seuraavista tekijöistä:

- vuodon eristämiseen kulunut aika
- kaivuutyön kesto
- asennustyön kesto
- putken ikä
- korjauskustannukset

Perusmateriaali käsiteltiin tilastomatematisella ATK-ohjelmistolla. Aineisto on reikäkorkeilla. Tuloksia on pyritty esittämään paljolti graafisesti.

Merkittävimmät tulokset putkistojen osalta olivat seuraavat:

Putkirikkojen toistuvuudeksi saatiin suurten putkien (yli 250 mm) osalta 5...21 kpl/100km x v ja pienten putkien osalta 3...12 kpl/100 km x v. Käytännön keskiarvoksi saatiin molemmille n. 10 kpl/100 km x v.

Korjauksen kestoa käsiteltiin eri kriteerien pohjalta ja saatiin käyttökelpoisia arviointeja korjausajoista. Merkittävien vuotojen osalta ne ovat keskimäärin suuruusluokkaa 1 vrk, joskin saadut hajonnat ovat ymmärrettävästi suuria.

Putkirikoista saatiin myös selvitettyä niiden jakautuminen eri ajankohdille ja syyt. Ne antavat käyttökelpoisia viitteitä suunnittelussa ja rakentamisessa huomioon otettaviin näkökohtiin. Putkirikkoja aiheuttavat eniten pohjavahvistuksen virheet (n. 44 %), ulkopuolisten toimenpiteet, kuten räjäytykset (n. 13 %) ja korrosio (n. 10 %).

Aineistosta laskettiin myös korrelaatiomatriisi (eri tekijöiden keskinäinen riippuvuustaulukko), josta ei kuitenkaan saatu merkittäviä riippuvuuksia vuotojen syistä selville.

Pumppaamohäiriöiden osalta saatiin tietoa kerättyä 24 pumppaamolta. Tähän, niin kuin muihinkin vedenjakelujärjestelmän haittoihin, kiinnitettiin merkittävää huomiota vain harvoilla laitoksilla, joten perusaineiston saannissa oli tiettyjä vaikeuksia. Käyttökelpoisimpia tuloksia kertyi sähköhäiriöistä, pumppujen häiriöistä ja huolto-
töistä.

Sähköhäiriöitä oli sattunut havaintoaikana (n. 4 v) yhteensä 369 kpl. Häiriöväliksi saatiin suuruusluokaltaan 2 1/2 kuukautta ja

kestoajaksi n. 50 minuuttia.

Vastaavia tuloksia kerättiin myös pumppuvioista, määräaikaishuolloista, pohjaventtiilivaurioista, imualtaiden pesuista, automatiikasta jne.

Veden kulutusvaihteluista pyrittiin saamaan pienehkön aineiston pohjalta esimerkinomainen todennäköisyysanalyysi. Aineistona käytettiin SITRAn YVY-projektiin liittyvästä tutkimuksesta "Vedenkulutuksen vaihtelut" saatua aineistoa. Jonkin kulutusvirtaaman esiintymisen todennäköisyyden selville saamiseksi laskettiin vuoro-kausikulutusten keskihajonta, päivittäisten suurimpien tuntikulutusten jakautumat sekä tuntikulutusten jakautumat. Tulokset on esitetty graafisesti.

Tutkimuksessa pyrittiin saamaan selville myös huipputuntikulutuksen soveltuvuus mitoitusperusteeksi ja tuntia lyhyempien kulutusjaksojen huomioonoton tarve. Selvitys jäi puutteelliseksi lähinnä perusaineiston laadun ja lyhyen tutkimusajan johdosta.

Sammutusveden oton tilastollista merkitystä selvitettiin. Tuloksena esitetään vuosilta 1967...68 Suomen kaupungeissa ja kauppaloissa sattuneista tulipaloista toistuvuus, kesto, kulunut vesimäärä ja hetkellinen suurin vedenotto. Niillä on erittäin suuri taloudellinen merkitys vedenjakelujärjestelmän suunnittelussa. Yleistoteamuksena voidaan sanoa, ettei ole merkittävää todennäköisyyttä paljon vettä kuluttavan palon sattumiselle samanaikaisesti muun huippukulutuksen kanssa.

Tutkimukseen on kerätty kirjallisuudesta ym. lähteistä teoreettista selvitystä vedenjakelujärjestelmään soveltuvista toimintavarmuuskäsitteistä ja niiden matemaattisista malleista. Ne antavat kuvan mm. rinnakkaisten komponenttien (rinnakkaisjohdot, varavoimalähde jne.) tarpeesta.

Yksinkertaistetulla analyysillä on pyritty selvittämään eräiden

esimerkkien avulla vedenjakelujärjestelmän käytettävyyttä kokonaisuutena. Kuitenkin menetelmät ja lähtöarvojen määrittely ovat vielä niin hahmottumatta, että tulos on enintään suuntaa osoittava.

Tutkimuksen liitteenä on muistio vedenjakelujärjestelmän automaattisen valvonnan ja ohjauksen periaatteista. Jos tällainen systeemi saataisiin kehitetyksi käyttöön soveltuvaksi, parantuisi toimintavarmuus etenkin laajojen vedenjakelujärjestelmien osalta. Tutkimukseen on liitetty myös luotettavuustekniikan sanasto.

Tehdyn tutkimuksen suurin merkitys on vedenjakelujärjestelmän eri varmuustekijöiden kartoittamisessa, käytännön häiriötapausten analysoinnissa ja pyrkimyksessä saada matemaattisia riippuvuuksia esille. Osa tuloksista on sellaisenaan käytettävissä hyväksi käytännön suunnittelutyössä, osan vaatiessa muokkaamista ja soveltamisohjeiden antoa.

SUMMARY OF THE RESULTS OF THE STUDY AND OF THEIR SIGNIFICANCE

The reliability in service of a water distribution system in a wide sense was made the starting point of the research work; this concept is then understood to comprise in the first place:

- the veracity of the design data
- the structure of the systems (detour connections, reservoirs)
- durability of individual components
- availability of energy
- supervision and control, and
- organised maintenance and repair activities.

With regard to the factors considered most important the study is divided into the following main parts:

- General
- Interruptions in the water distribution
- Significance of the design values in view of reliability of distribution
- The system's reliability in service
- Methods of statistical mathematics and of the theory of reliability
- Analysis of the usability of a water distribution system.

Material concerning interruptions of the distribution was collected from certain Finnish waterworks which had statistics of pipe failures and of trouble at the pumping stations.

As regards pipe failures, information was obtained i.a. concerning the following:

- Length of repair time
- Water leakage quantity

- Cause of failure
- Water quantity not distributed.

Information was also partly gained concerning the following factors:

- Time consumed in isolating the leak
- Duration of excavation work
- Duration of installation work
- Age of the pipe
- Repair costs.

The material covered more than 1200 pipe failures.

The basic material was further processed by the aid of a set of statistical EDP programmes. The material exists on punch cards. Graphical representations have been largely used in presenting the material.

The most notable results regarding pipe systems were:

The recurrence of pipe failures was found to be, in the case of large (over 250 mm) pipes, 5 to 21 failures per 100 km and year, and for small pipes 3 to 12 per 100 km and year. The average in practice, for both, was found to be about 10 failures per 100 km and year.

The time consumed in repairs was considered from the viewpoint of various criteria, and usable estimates of the repair times were obtained. In the case of significant leaks they are on the average of the order of 24 hours, although the standard deviations found are understandably large.

The distribution of pipe failures between different times and their causes could also be clarified. Useful suggestions emerge herefrom with regard to aspects which should be observed in designing and building. The majority was

due to faulty ground reinforcement (about 44%), to action by outsiders, such as blasting (about 13%) and to corrosion (about 10%).

The correlation matrix (table showing the interdependence of different factors) was computed from the material, but no significant relationships between the causes of leaks were thereby established.

Information concerning trouble at the pumping station could be gathered from 24 pumping stations. It was observed that only few of the waterworks paid any remarkable attention to this aspect, or to other disturbances in the water distribution system. Certain difficulties were therefore experienced in obtaining the basic material. The circumstances regarding which the most usable results could be compiled were failures of electricity, pump failures and maintenance work.

During the period of observation (about 4 years) there had been altogether 369 failures of electric power. The interval of failures was found to be of the order of 2.5 months and their duration, about 50 minutes.

Similar data were also gained concerning pump failures, servicing at predetermined times, foot valve damage, washing of aspiration basins, automatics, etc.

An effort was made to obtain, on the basis of the comparatively small material, a probability analysis serving as an example. The material derived from the study "On the Variations of Water Consumption" associated with SITRA's Community--Water Supply--Environment project was used herefor. The following were calculated in order to find the probability of occurrence of a given consumption flow rate: standard deviation of the daily consumption figures, distributions of the highest daily consumptions per hour,

and distributions of the consumption per hour values. The results have been graphically shown.

An effort was also made in the study to assess the applicability of the peak consumption per hour as basis of dimensioning and the need of taking into account consumption periods shorter than one hour. The clarification remained incomplete, in the first place owing to the quality of the basic material and to the short study period.

The statistical significance of the drawing of fire-extinguishing water was studied. As results herefrom the following are presented concerning the fires which occurred in Finnish towns and townships in 1967-1968: recurrence, duration, water quantity used, and highest momentary withdrawal of water. These possess very high economic significance in the planning of a water distribution system. The general observation can be made that there is no significant probability that a fire consuming large quantities of water would coincide with the general consumption peak.

Theoretical clarifications of the reliability in service aspects which are appropriate in application to a water distribution system and of their mathematical models were collected for this study from the literature and from other references. Among other things they give an idea of the need of parallel components (duplicated lines, spare energy source, etc.).

A simplified analysis was made in the endeavour to clarify with the aid of certain examples the availability of a water distribution system as a whole. However, the procedures and the fixing of starting values are still uncrystallized to such extent that the result is orientative at the most.

Appended to the study is a P.M. of the principles for automatic supervision and control of a water distribution system. If such a system could be developed so that it would be fit for use in practice, the reliability in service would improve particularly in extensive water distribution systems. A glossary of reliability technology is also appended to the study.

The greatest significance of the study that has been carried out lies in the mapping of the water distribution system's various reliability factors, in analysis of instances of trouble encountered in actual practice and in the attempts to elicit mathematical relationships. Part of the results is utilizable as such in practical planning work, while another part requires modification and the giving of instructions for application.

0. JOHDANTO

Vedenjakelujärjestelmän toimintavarmuudesta

Vedenjakelujärjestelmän muodostavat vesijohtoverkko, pumppaamot ja vesisäiliöt. Sen toimintavarmuuteen vaikuttavat

- mitoituservojen todenmukaisuus ja jakelujärjestelmän rakenne
- laitteiden ja osien kestävyys
- energian saanti
- jakelujärjestelmän valvonta ja ohjaus
- huolto- ja korjaustoiminnan järjestely.

Lisäksi siihen liittyy vedenpuhdistuslaitosten ja kuluttajalaitteiden toimintavarmuus. Näin ollen toimintavarmuudella ymmärretään sitä, että kuluttaja saa riittävän määrän normaalilaatuista vettä.

Yleisesti voidaan sanoa, että vedenjakelu voi olla keskeytyneenä putkirikön, haaroituksen teon, muun rakentamistyön tai huuhtelujen ja tulipalojen vaatiman suuren vedentarpeen johdosta. Keskeytys voi aiheutua myös pumpuista, pumppaamojen putkistoista ja automatiikasta, sähkökatkosta tai vedenpuhdistuslaitoksen toimintahäiriöistä tai sen huollon vaatimista keskeytyksistä.

Kiinteistön vesilaitteiston huolto- ja korjaustyöt ovat usein syynä jakelukatkoksiin.

Vesi voi olla toisaalta käyttöön kokonaan tai osaksi kelpaamatonta vedenjakelun jatkon, kiertosuuntien vaihtelun tai suuren hetkellisen virtaaman aiheuttaman veden laadun huononemisen tai verkoston likaantumisen vuoksi.

Mitoituservot ja jakelujärjestelmän perusratkaisu toimintavarmuuden kannalta

Vedenjakelujärjestelmän mitoitukseen vaikuttavia kysymyksiä toimintavarmuuden kannalta ovat:

- sallittujen vedenjakeluhäiriöiden (lähinnä jakelukatkojen) enimmäismäärä vuodessa
- alimman ja ylimmän painetason määrittely ja yksittäiselle kiinteistölle tämän seurauksena mahdollisesti esitettävät vaatimukset
- tulipalojen sammutusta varten varatun vesijohtoveden määrä ja varastointi sekä periaatteet kiinteistökohtaisten sammutuslaitteiden (sprinklaus) osalta
- muut veden varastointitarpeeseen liittyvät kysymykset
- mitoitusvirtaamien määrittely ja mitoitusilanteen esiintymisen todennäköisyys
- karkeuskertoimet ja niiden todennäköinen muuttuminen ajan mukana
- kiertoyhteydet
- varakapasiteetti (paineenkorotuspumput, alasäiliöiden pumput)

Käytännön mitoitus- ja suunnittelumenetelmien tulisi soveltua sekä uusille että oleville järjestelmille ja antaa tulokseksi pääoma- ja käyttökustannusten kannalta edullisin ratkaisu. Siinä tulisi ottaa huomioon myös jakelujärjestelmän toimintavarmuus.

Kiertoyhteyksien määrä ja koko jakeluverkon geometria vaikuttavat ratkaisevasti jakelujärjestelmän luotettavuuteen. Suuri varmuus tässä suhteessa eliminoi täysin esim. yksittäisen putkirikon haittavaikutukset. Ratkaisu voi olla kuitenkin hyvin kallis. Tulisikin lähteä yksinkertaisen järjestelmän häiriöalttiuden selvittämisestä ja saada täten kriteerit tarvittaville kiertoyhteyksille ja muille verkon geometrian tekijöille.

Laitteet, materiaalit ja energia

Vedenjakelujärjestelmässä käytettyjen laitteiden ja materiaalien on oltava kestävyydeltään, virtausominaisuuksiltaan, rikkoutumisominaisuuksiltaan ja korjausmahdollisuuksien kannalta asetetut vaatimukset täytettäviä sen lisäksi, ettei niistä saa liueta johdettavan veden laatua huonontavia aineita. Toimintavarmuutta lisäävät myös asianmukaiset kaivantotyöt ja putkistojen tarkoituksenmukainen sijoitus.

Käytännössä on varapumppujen ja -energialähteiden tarve selvitettävä häiriötaajuuteen yms. perustuen ottaen huomioon myös korjaus- ja vaihtoajat ja muutkin paikkakuntakohtaiset tekijät.

Valvonta ja ohjaus

Vedenjakelujärjestelmän käyttäytymistä eri kulutustilanteissa on voitava seurata ja ohjata. Järjestelmän ohjaus voi olla joko käsi-käyttöinen tai automaattinen. Em. seikkoja ja niiden kehittämistarvetta on lyhyesti esitetty liitteessä I.

Huolto- ja korjaustoiminta

Asianmukainen vedenjakelujärjestelmän huolto- ja korjaustoiminta on jakeluvarmuuden saamisen ehdoton edellytys.

Tutkimuksessa käsitellyt asiat

Seuraavassa tutkimuksessa on käsitelty etenkin vesijohtoverkossa ja pumppaamoilla syntyneitä jakelukatkoksia ja mitoitusarvojen merkitystä käytännöstä kerätyn aineiston pohjalta. Lisäksi on koottu tietoa järjestelmien toimintavarmuustekijöistä ja todennäköisyyslaskennan ja luotettavuusteorian menetelmistä. Esimerkinomaisesti on käsitelty myös pumppaamon ja eräiden vedenjakelujärjestelmien käytettävyyttä saadun aineiston pohjalta.

1. VEDENJAKELUN KATKOT

1.1 Putkirikot

1.1.0 Yleistä

Putkirikoilla on suhteellisen suuri osuus vedenjakelujärjestelmän toimintavarmuustekijänä, koska ne yleensä estävät kokonaan veden johtamisen kyseisen johto-osan kautta. Niiden korjaus kestää usein kauan ja hukkaan mennyt vesimäärä voi olla huomattava.

Rajanveto "tavallisen" putkivuodon ja putkirikon välillä on usein hankalaa. Tämän selvityksen yhteydessä on vuodolla ymmärretty sel- laista tapausta, joka ei sanottavasti vaikuta jakelujärjestelmän toimintaan ja joka korjataan tavallisimmin normaalina työaikana.

Putkirikolla taas on tarkoitettu tapausta, joka häiritsee laitoksen normaalia toimintaa eri tavoin. Hukkaan mennyt vesimäärä voi olla niin suuri, että laitoksen kapasiteetti ei riitä tai painevaatimuk- sia ei pystytä tyydyttämään tai putkirikon korjaamisen vuoksi jou- dutaan yhteyksiä sulkemaan. Putkirikot joudutaan usein korjaamaan välittömästi niiden synnyttyä.

Jakeluhäiriöitä on kuitenkin vaikea ryhmittää edellä olevan jaon mukaisesti. Saattaa olla niin, että samanlaiset tapahtumat joskus ovat haitallisia vesilaitoksen toiminnalle ja joskus taas niillä ei ole kovinkaan suurta merkitystä.

1.1.1 Kerätty aineisto

Putkirikkojen toistuvuuden, vuotaneen vesimäärän ja korjauksen kes- ton yms. seikkojen selville saamiseksi kerättiin tutkimuksen yhtey- dessä aineistoa Suomessa tapahtuneista putkirikoista.

Kyselyn kohteeksi valittiin viisi suurta kaupunkia, joista saatiin tiedot sattuneista putkirikoista 2...4 vuoden ajalta. Tiedustelun ulkopuolelle jätettiin tonttijohdoissa ja alle NS 100 suuruisissa ka-

tujohdoissa sattuneet putkirikot. Yhteensä saatiin aineistoa 1 218 putkirikosta. Kyseisissä kaupungeissa oli vesilaitostoiminnan yhteydessä kirjattu jokainen sattunut putkirikko.

Liitteenä II on esitetty Espoon kaupungin käyttämä kaavake, jolle putkirikot oli kirjattu. Myös muiden kaupunkien käyttämä kaavake oli pääpiirteissään samanlainen.

Kustakin kaavakkeesta kirjattiin tutkimusaineistoon seuraavat tiedot:

- paikkakuntakoodi
- putkirikon päivämäärä
- putken kokonaiskorjausaika (vuodon ilmoituksesta käyttöönottoon asti)
- vuotoveden määrä
- putken halkaisija
- materiaalitunnus
- rikon aiheuttaneen syyn tunnus ja
- häiriön aikana jakamatta jäänyt vesimäärä

Tampereella sattuneista putkirikoista kirjattiin vielä seuraavat tiedot:

- vuodon eristysaika
- kaivutyön kesto
- putken korjauksen kesto
- putken asennusvuosi ja
- korjauksen kustannus

Tutkimuksen yhteydessä käytetyt materiaalitunnukset olivat seuraavat:

- 1 = valurauta
- 2 = muovi
- 3 = asbestisementti
- 4 = teräs
- 5 = betonipaineputket

Vuodon aiheuttaneet syyt koodattiin seuraavasti:

1 = laitevika	7 = pohjavahvistus
2 = asennusvirhe	8 = täyttö (kivet)
3 = liitos	9 = ulkopuolinen syy (kaivukone, louhinta ym.)
4 = materiaalivika	
5 = syöpyminen	10 = muu syy
6 = kulmien tukeminen	11 = tuntematon

Hukkaan vuotaneen veden määrä on otettu suoraan kaavakkeesta, ja se on kaavakkeen täyttäneen henkilön arvio. Lähes 20 % tapauksista oli kuitenkin jätetty ilman tätä arviota. Arviot olivat myös varsin kirjavia. Aineistosta saattoi päätellä, että joku ilmoituskaavakkeen täyttäjä suhtautui vuotoveden määrään varovaisemmin ja toinen reilummin kuin muut.

Jakamatta jääneen veden määrä on arvioitu tutkimuksen aikana kaavakkeissa ilmoitetun ajan ja talomäärän perusteella. Mainittakoon, että tämä arvio on edellistä vielä epätarkempi, koska sekä mainitut ajat että talojen tyypit (omakotitalo, kerrostalo) olivat ilmoitetut melko ylimalkaisesti. Tämän muuttujan avulla arvioitiin osaltaan putkirikon merkitystä kuluttajan kannalta, joskin tulosten luotettavuus jäi huonoksi em. virhelähteiden vuoksi.

Periaatteessa kuitenkin jakamatta jäänyt vesimäärä tai oikeammin vesimäärä, joka olisi kulutettu normaalitilanteen aikana, antaa hyvän kuvan vuodon merkityksestä. Tästä syystä olisikin toivottavaa, että vastaisuudessa ko. kaavaketta täyttävä henkilö arvioisi myös jakamatta jääneen vesimäärän. Arvioinnin tulisi tapahtua kuitenkin yhtenäisin perustein eri kaupungeissa, tai ainakin arviointiperusteet olisi ilmoitettava.

Kerätty aineisto käsiteltiin BMD (= Biomedical Computer Programs)-nimisellä tilastomatemaattisella ohjelmapakettilla. Se sisältää yli 40 yleistä tilastomatemaattista ohjelmaa. Ohjelmat ovat itsenäisiä, ne on kirjoitettu FORTRAN-kielellä ja normaalisti kutakin käytetään erikseen. BMD-paketin käyttö on suhteellisen helppoa, koska ohjelmat on hyvin dokumentoitu.

Tämän selvityksen yhteydessä käytettiin suhteellisen yksinkertaisia ristiintaulukointi- ja korrelaatiomatriisin laskentaohjelmia. Alkuperäinen aineisto säilytetään reikäkorteilla Suomen Kaupunkiliitossa.

1.1.2 Saadut tulokset

1.1.2.1 Putkirikön toistuvuus

Jotta putkiriköiden toistuvuutta määritettäessä pienehköt rikot eivät olisi vaikuttaneet lopputulokseen, suoritettiin aineiston karsinta. Merkitykseltään vähäisenä pidettiin vikaa, joka täytti seuraavat ehdot:

- vuotanut vesimäärä oli alle 30 m^3
- korjauksen kesto oli yli 120 tuntia

Kuitenkin tapaukset, joissa jakamatta jäänyt vesimäärä oli suurempi kuin 8 m^3 hyväksyttiin aineistoon mukaan.

Aineisto luokiteltiin myös putkiköiden mukaan kahteen eri luokkaan. Toiseen kuuluivat putket, joiden halkaisija oli 250 mm tai siitä pienempi, ja toiseen luokkaan kuuluivat 250 mm:ä suuremmat putket.

Putkiriköiden toistuvuus todettiin putkikilometriä kohti, ja laaduksi tuli siten kpl/km x vuosi eli sattuneita putkiriköitä kilometriä ja vuotta kohti.

Taulukossa 1 on esitetty saatuja arvoja:

Taulukko 1. Putkiriköiden toistuvuuksien arvoja.

Paikkakunta	Toistuvuus	
	NS >250	NS ≤250
	kpl/putki-km x v	kpl/putki-km x v
1	0,06	0,12
2	0,09	0,06
3	0,05	0,03
4	0,07	0,12
5	0,21	0,12

Havaitaan, että hajonta on suuri, jopa nelinkertaisia arvoja esiintyy. Paikallisilla olosuhteilla on merkitystä samoin kuin putkiston iällä. Asiaa ei valitettavasti voitu lähemmin selvittää aineiston puutteellisuuden vuoksi.

Havaintovuosien lukumäärän mukaan painotettuna saadaan isoille putkille arvoksi 0,09 kpl/km x vuosi ja pienille 0,1 kpl/km x vuosi. Arvot ovat siis hyvin lähellä toisiaan ja käytännössä voitaneenkin kummallekin kokoluokalle käyttää samaa arvoa eli 0,1 kpl/putki-km x vuosi.

1.1.2.2 Putkirikkojen korjauksen kesto

Putkirikon korjaaminen voidaan jakaa seuraavanlaisiin tapahtumiin (vrt. liite II):

- ilmoitus vuodosta
- vuodon eristäminen
- kaivantotyöt
- rikkinäisen putken korjaus
- johtolinjan käyttöönotto

Koska tämän selvityksen yhteydessä oltiin lähinnä kiinnostuneita kokonaiskorjausajasta (= aika, joka kuluu vuodon ilmoituksesta käyttöönottoon) ei em. tehtäväjakautumaan kiinnitetty erityistä huomiota, vaan nämä arvot kirjattiin ainoastaan yhden kaupungin osalta. Aikojen jakautuma on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Putkirikon korjauksen osa-aikojen jakautuma.

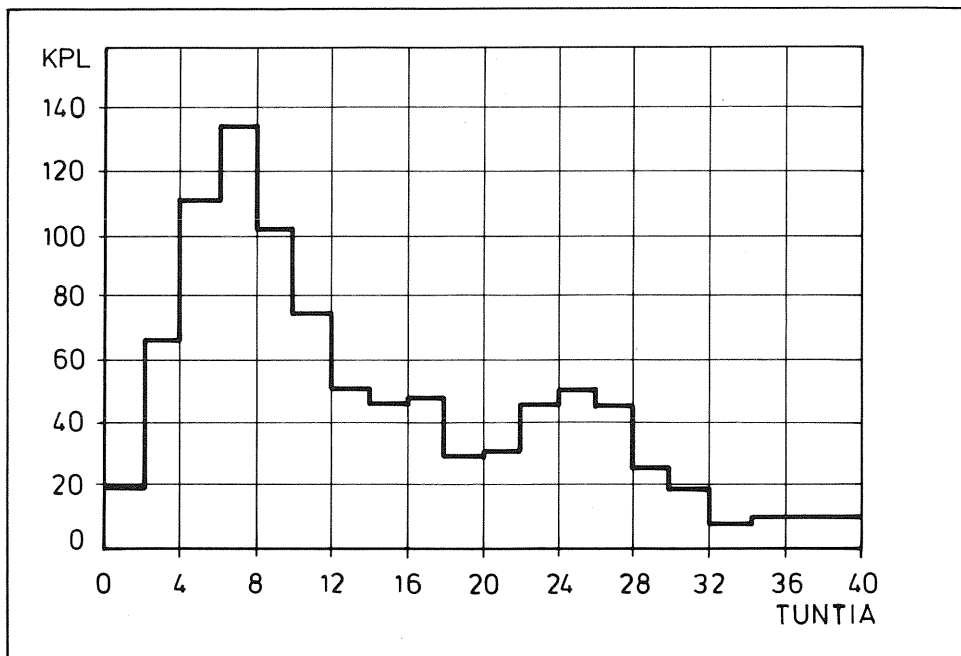
Tehtävä	Keskimääräinen kesto tuntia (h)
Vuodon eristäminen	2,3
Kaivantotyöt	3,4
Putken korjaus	1,2
Yhteensä	6,9
Kokonaiskorjausaika	15,8

Taulukosta havaitaan runsaasti aikaa menneen siten, ettei sitä ole kirjattu millekään em. osatekijälle. Asia selittyy suurelta osin

siitä, että kun vuoto on saatu eristetyksi, ei ole ollut välitöntä tarvetta alkaa korjata putkirkkoa. Toisaalta tällaiset korjaustyöt pyritään suorittamaan mahdollisuuksien mukaan normaalina työaikana, ja vain erityisen merkittävät rikot korjataan hätätyönä.

Koko aineiston keskimääräiseksi kokonaiskorjausajaksi saatiin 37,2 h ja keskihajonta oli 80 h. Keskiarvo on siten melko suuri samoin kuin keskihajontakin. Arvojen suuruuteen vaikuttaa se, että mukana on huomattavasti pieniä korjaustöitä, jotka ovat kestäneet hyvinkin pitkään. Ilmeisesti niiden korjaamista ei ole pidetty kovin tärkeänä asiana.

Kuvassa 1 on graafisesti esitettyä korjausajan jakautuma. Koko jakautumaa ei kuvaan ole voitu piirtää, koska "häntä" oikealle jatkuu melko pitkälle. Jakautumasta näkyy 24 tunnin kohdalla selvä kohouma. Asia selittyy siitä, että korjaustapahtuma noudattaa vuorokausirytmää. Kuvaajan muoto siis osoittaa, että aineistossa on mukana putkirikkoja, joilla ei ole ollut suurta merkitystä, jolloin ne on voitu korjata normaalina työaikana.

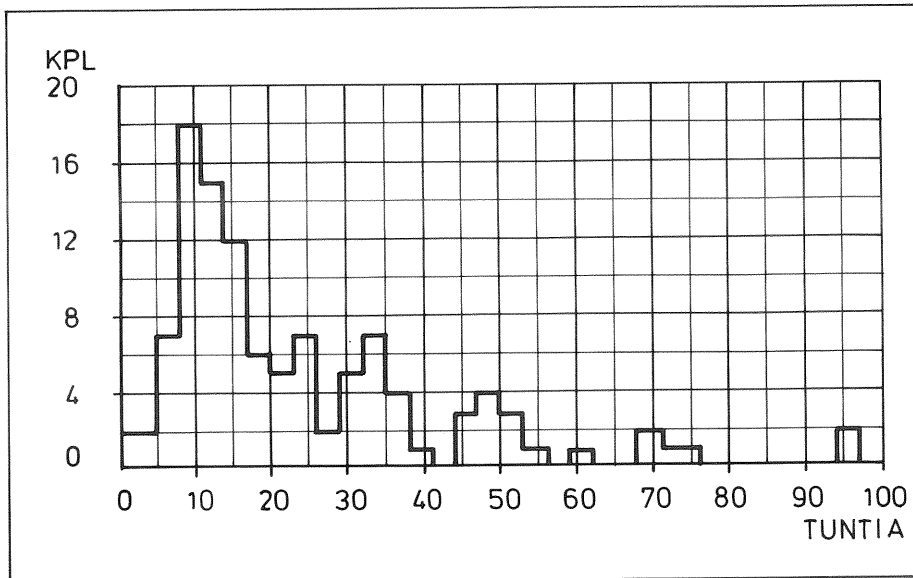


Kuva 1. Korjausajan jakautuma. Koko aineisto.

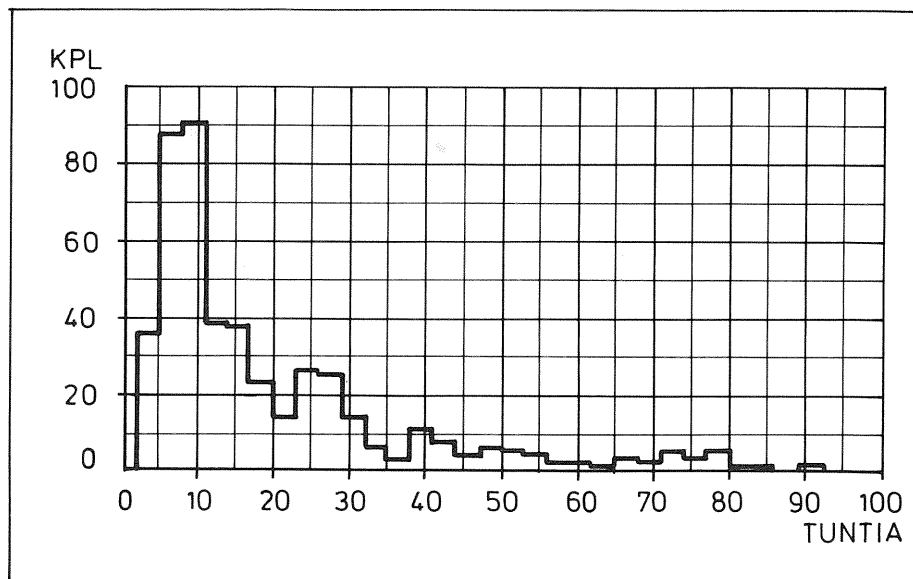
Aineiston karsinnan jälkeen (vrt. kohta 1.1.2.1) em. arvot muuttuivat jonkin verran. Isoille putkille saatiin keskiarvoksi 27,8 h ja keskihajonnaksi 26,4 h. Korjausajan keston suhteen on isoilla ja pienillä putkilla keskimäärin verrattain vähän eroa, sillä pienillä putkilla em. arvot olivat 21,9 h ja 22,2 h.

Kummankin tapauksen jakautumat on esitetty graafisesti kuvissa 2 ja 3.

Myös näillä jakautumilla on pitkä "häntä" oikealle. 24 tunnin kohdalla oleva kohoutuma on isojen putkien osalta miltei kokonaan hävinnyt, ja pienten putkien kohdallakin se on vain vähäinen. Tätä seikkaa voidaan pitää osoituksena karsintaperusteiden onnistumisesta, sillä em. kohoutuma juuri osoitti ei merkitsevien rikkojen mukanaolon aineistossa.



Kuva 2. Korjausajan jakautuma. Isot putket. Merkittävät putkirikot.



Kuva 3. Korjausajan jakautuma. Pienet putket. Merkittävät putkirikot.

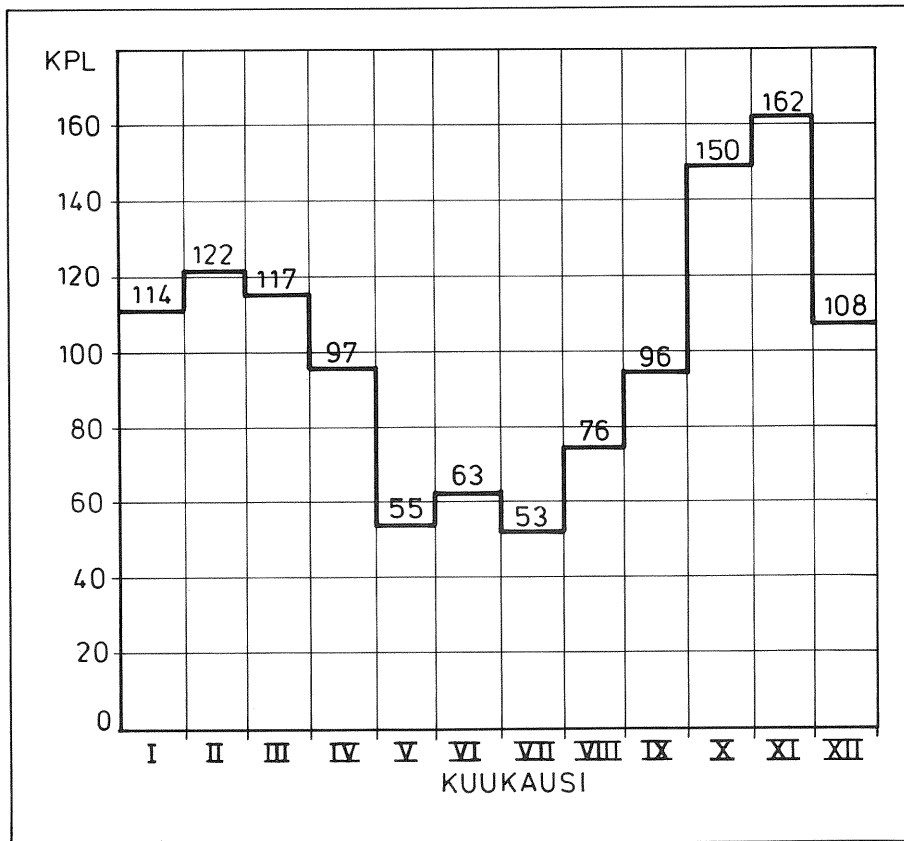
Yhteenvedona putkirikkojen toistuvuudesta ja korjauksen kestosta voidaan esittää seuraava taulukko:

Taulukko 3. Putkirikkojen toistuvuus ja korjauksen kesto.

Aineisto	Toistuvuus kpl/km x v	Keskim. kesto h
Kokonaisaineisto	0,1	37,2
Pienet putket	0,1	21,9
Isot putket	0,09	27,8

1.1.2.3 Putkirikkojen syistä

Kuvassa 4 on esitetty putkirikkojen lukumäärät eri kuukausina. Tarkastelussa on mukana koko aineisto.



Kuva 4. Putkirikkojen lukumäärä eri kuukausina.

Kuvasta havaitaan, että vuodenajalla on erittäin merkittävä osuus putkirikkojen ilmenemiseen. Esim. touko-elokuussa rikkojen osuus on 20 % vuoden koko määrästä (ajallisesti 33 %).

Rikkojen suurin esiintymistiheys on aineiston mukaan loka-marraskuussa, jolloin maa alkaa jäätyä. Maan pinnalla ei tällöin ole vielä eristävää lumikerrosta ja routa pääsee nopeasti tunkeutumaan maaperään.

Keskitalvella on vähän hiljaisempi kausi, minkä jälkeen putkirikkojen määrä jälleen jonkin verran kasvaa, kun routa sulaa maasta. Käyttämällä aikaisemmin esillä ollutta jaottelua kirjattujen putkirikkojen syyt jakautuivat taulukko 4 mukaan.

Taulukko 4. Putkirikkojen syiden jakautuma.

Syy	Suhteellinen osuus (%)
1. laitevika	0,3
2. asennusvirhe	4,0
3. liitos	5,3
4. materiaalivika	2,9
5. syöpyminen	10,0
6. kulmien tukeminen	0,5
7. pohjavahvistus	43,7
8. täyttö (kivet)	5,4
9. ulkopuolinen syy	12,7
10. muu syy	3,8
11. tuntematon	11,4
Yhteensä	100,0

Taulukosta havaitaan, että selvästi suurin putkirikkojen aiheuttaja on ollut vika pohjavahvistuksessa. Tosin on todettava, että putkirikkokaavakkeiden täyttäjät näyttivät mielellään kirjanneen putkirikon syyn juuri pohjavahvistuksen osalle. Hyvin usein saattoi syyn kohdalla vain olla "maa painunut" tai "putki poikki, maa painunut". Tämä on ymmärrettävää, koska syytä on usein vaikea määrittellä. Toisaalta taas ei ole mitään aihetta uskoa, että aineisto tämän vuoksi olisi olennaisesti vääristynyt.

Seuraavaksi yleisin syy oli ulkopuoliset tekijät, millä tarkoitetaan, että esim. kaivukone on rikkonut putken tai että näin on tapahtunut räjäytystöiden yhteydessä. Tällaiset viat ovat yleisiä varsinkin silloin, kun rakennetaan kadulle jälkeenpäin viemäriinjaa yms.

Taulukossa esiintyvällä muulla syyllä tarkoitetaan sellaisia putkirikon aiheuttajia, jotka kaavakkeessa oli selvästi ilmoitettu, mutta joita ei yksityistapauksina kannattanut erikseen kirjata taulukossa 4 esitetyn jaotuksen lisäksi.

Syyn osalta tuntemattomiksi jäi 11,4 % tapauksista.

Aineistosta laskettiin myös korrelaatiomatriisi, joka on esitetty liitteessä III. Siitä havaitaan, ettei mitään kovin merkittäviä korrelaatioita esiinny.

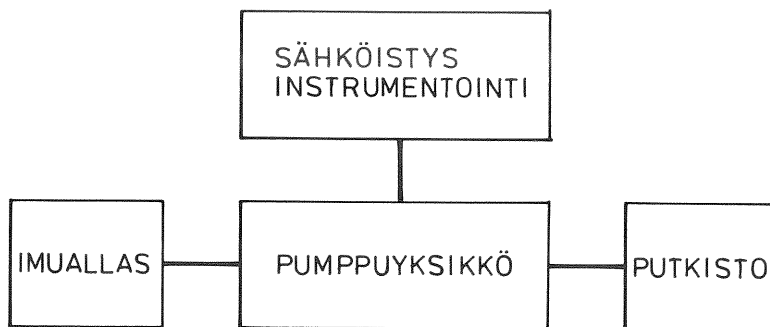
Suurin korrelaatio on asennusvuoden ja jakamatta jääneen vesimäärän välillä. Korrelaatiokerroin on $-0,648$. Toisin sanoen, mitä vanhempi putki on ollut, sitä enemmän on jäänyt vettä jakamatta. Tämä osoittaa sitä, että vanhetessaan verkostot ovat herkempiä suuremmille jakeluhäiriöille, mikä johtuu kaikesti putkiston huonosta yleiskunnosta, jolloin myös putken korjaamiseen kuluu paljon aikaa.

Suuri korrelaatio ($0,632$) on niin ikään putken halkaisijan ja korjauksen kustannuksen välillä. Myös muita suurehkoja korrelaatioita esiintyy, mutta ne ovat joko näennäisiä tai itsestään selviä. Mitään erityistä ei korrelaatiomatriisin avulla saatu putkirikkojen luonteesta esiin.

1.2 Pumppaamoissa sattuneet häiriöt

1.2.0 Yleistä

Pumppaamon toimintavarmuuteen vaikuttavat tekijät voidaan esittää esim. seuraavan kaavamaisen kuvan avulla.



Kuva 5. Pumppaamo kaavamaisesti esitettynä.

Pumppuyksikköön voi kuulua imuputki pohjaventtiileineen, sähkömoottori, pumppu ja putkistot niiltä osin kuin ne voidaan eristää pumppaamon muusta putkistosta ja toisista pumppuyksiköistä.

Imuallasta joudutaan pesemään. Pesun aikana allasta ei voida käyt-

tää, ja katkos kestää yleensä useita tunteja. Jos pumppaamossa on vain yksi imuallas, niin pesun aikana pumppaamo ei voi toimia ol-
lenkaan.

Suoran pumppauksen laitoksissa (paineenkorotuspumppaamot yms.) ei näitä vaikeuksia tietenkään ole.

Sähköistyksellä ja instrumentoinnilla tarkoitetaan lähinnä:

- sähköverkostoa (pumppaamon ulkopuolinen)
- pumppaamon sähköistystä (sisäiset sähkölaitteet)
- automatiikkaa (moottoreiden käynnistys ja pysäytys, venttiileiden avaus ja sulkeminen jne.)

Tämän osan häiriöt vaikuttavat suoranaisesti pumppuyksikön toimintaan. Sähköverkostohäiriö yleensä pysäyttää koko pumppaamon toiminnan. Sisäisessä sähköistyksessä ja automatiikassa sattuvat häiriöt sen sijaan voivat olla suppeampiakin.

Kuvassa 5 putkistolla on tarkoitettu niitä putkia, jotka välittävät veden pumppuyksiköistä verkostoon. Yleensä putkistossa sattuva häiriö haittaa huomattavasti pumppaamon toimintaa, ja saattaa jopa pysäyttää sen kokonaan. Putkistovaurioita tiedetään tapahtuneen lähinnä paineiskujen seurauksena.

1.2.1 Käytetty aineisto

Edellä käsiteltyjen toimintavarmuustekijöiden selville saamiseksi suoritettiin kysely. Vastauksia saatiin yhteensä 24 pumppaamolta, kultakin keskimäärin n. neljän vuoden ajalta. Saatu aineisto oli siten verrattain pieni. Tämä johtuu siitä, että pumppaamoilla ei yleensä ole pidetty kovin tarkkoja tilastoja sattuneista häiriöistä.

Aineisto koskee lähinnä puhdistuslaitosten yhteydessä olevia pumppaamoja ja puhdasvesialtaita.

Käytetty kyselykaavake on esitetty liitteenä IV. Siinä on viat py-

rittä ryhmittelemään siten, että ne olisivat mahdollisimman hyvin tulkittavissa jonkin edellisessä kappaleessa mainitun komponentin viaksi. Erityistä painoa tässä selvityksessä on annettu vian kestolle. Vaaditut tiedot olivat siis melko yksityiskohtaisia, mikä osaltaan selittänee pienen vastausprosentin (n. 50 %).

Liitteenä V on yhteenvetotaulukko saaduista tuloksista. Havaitaan, että tulokset ovat varsin kirjavia. Sähköhäiriöiden osalta tiedot olivat kaikkein parhaiten kirjattu. Myös pohjaventtiilin ja imualtaan osalta aineisto lienee melko luotettava, mutta muiden syiden kohdalla tilanne on epätarkempi. Esiintyneitä vikoja tarkastellaan seuraavassa yksityiskohtaisemmin.

1.2.2 Saadut tulokset

1.2.2.1 Sähköhäiriöt

Tässä kappaleessa sähköhäiriöllä tarkoitetaan sähkön jakeluverko-
tossa, so. pumppaamon ulkopuolella, sattunutta häiriötä.

Yhteenvetotaulukossa (liite V) on esitetty sähköhäiriöiden keskimääräisiä aikavälejä ja keskimääräisiä korjausaikoja. Havaitaan, että kolmella pumppaamolla on selvästi muista poikkeavia arvoja, nimittäin pumppaamoilla 8, 17 ja 24. Kahdessa ensimmäisessä ei häiriöitä ole kirjattu ollenkaan ja viimeisessä 1 kpl lähes 5 vuoden aikana. Em. pumppaamoiden arvot poikkeavat siinä määrin muusta havaintoaineistosta, että niiden todenperäisyys lienee kyseenalainen.

Häiriöitä oli sattunut yhteensä 369, ja niiden keston keskiarvo oli 0,83 h.

Havaintoja oli tehty yhteensä 89 vuoden ajalta. Kun lasketaan keskimääräinen häiriöväli siten, että havainnoinnin kokonaisaika jaetaan tapausten kokonaismäärällä, saadaan arvoksi 2 110 h (n. 3 kk), kun koko aineisto on mukana, ja 1 850 h (n. 2,5 kk), kun pumppaamojen 8, 17 ja 24 arvot eivät ole mukana.

1.2.2.2 Pumppuyksikössä sattuneet häiriöt

Yhteenvetotaulukossa (liite V) on pumppuyksikössä sattuneet viat jaettu kolmeen eri sarakkeeseen: 'pumppuyksikkö ilman pohjaventtiiliä', 'pohjaventtiili' sekä 'määräaikaishuolto'.

Määräaikaishuollon lopullista osuutta on vaikea arvioida. Kyselyä laadittaessa sillä tarkoitettiin sellaista huoltoa, jossa pumppu puretaan ja huolletaan. Tällainen työ kestää yleensä useita päiviä, ja tavallisesti pumppu viedään laitokselta huoltokorjaamolle.

Pumppaamoiden 2 ja 7 osalta ei liene kysymys edellä kerrotun laisesta määräaikaishuollosta, joten niiden häiriöt luetaan jäljempänä pumpun vioiksi.

Pumppaamoissa 10, 13, 14 ja 17 sen sijaan oli kysymys juuri tarkoitettusta määräaikaishuollosta. Huoltoajat olivat pitkiä, 4...28 vrk, ja keskimääräinen huoltoväli on 2...4 vuotta pumppua kohti.

Määräaikaishuoltoa olisi suoritettu vastausten mukaan vain neljällä pumppaamolla 24:stä, mikä osoittaa, että ilmeisesti määräaikaishuollon tarpeellisuudesta ja osin muodoistakin vallitsee eriaviä käsityksiä.

Tässä yhteydessä onkin laskettu arvot sekä ottaen määräaikaishuolto huomioon että ilman sitä.

Aineiston yhteydessä saatiin tiedot yhteensä 328 pumppuvuodelta ja erilaatuisia vikoja oli seuraavasti:

- pumppuvikoja 92 kpl
- määräaikaishuoltotapahtumia 36 kpl
- pohjaventtiilivaurioita 23 kpl

Tulosten perusteella saatiin keskimääräisiksi vikaväleiksi seuraavat arvot:

- pumppuviat 31 231 h (n. 3,5 vuotta)
- pumppu- ja pohjaventtiilivauriot 25 094 h (n. 3 vuotta)
- kaikki yhteensä 19 091 h (n. 2 vuotta)

Keskimääräisiksi korjausajoiksi saatiin vastaavasti seuraavat arvot:

35 h, kun kyseessä olivat pelkät pumppuviat, ja 37 h, kun kyseessä olivat yhdistetyt pumppu- ja pohjaventtiilivauriot. Kun kaikki yli sadan tunnin kestäneet korjausajat karsittiin, saatiin arvoiksi vastaavasti 14 h ja 16 h. Karsintaa perustellaan sillä, että sata tuntia on suhteellisen pitkä aika, yli neljä vuorokautta, ja tässä ajassa pitäisi ennättää korjata vika tai suorittaa pumpun vaihto uuteen. Korjausaikojen joukossa oli vain muutamia hyvin pitkiä aikoja, jotka juuri nostivat edellä mainittuja keskiarvoja. Pitkät korjausajat johtuivat ilmeisesti siitä, että korjaustapahtumaa ei koettu tärkeäksi ja korjaus oli saanut odottaa. Toisaalta kyse voi olla myös siitä, että ei saatu jotakin osaa valmistajalta tai siitä, että korjauksen yhteydessä suoritettiin määräaikaishuoltoa.

Määräaikaishuollon keskimääräinen kesto oli 475 h eli noin 19 vrk huoltotapahtumaa kohden. Jos mukaan lasketaan edellisessä kappaleessa mainitut 'pitkät korjausajat', tulee keskiarvoksi n. 409 h eli noin 17 vrk. Voidaan siis todeta, että perusteellinen pumpun ja moottorin huolto kestää keskimäärin 2,5 viikkoa.

1.2.2.3 Imualtaiden pesu

Imualtaiden pesun ajankohta voidaan valita melko vapaasti, sillä allas likaantuu vähitellen. Likaantumisen syistä voidaan mainita puhdistetun veden laatu sekä imualtaan hydrauliset ominaisuudet. Imualtaan pitäisi olla sellainen, että vesi virtaa tasaisesti sen läpi. Jos esiintyy selvää oikovirtausta, on imualtaassa myös kohtia, joissa veden vaihtuvuus on pieni ja allas on näin ollen herkempi likaantumaa. Myös tapahtuu suodattimien läpäisseiden partikkelien laskeutumista.

Imualtaalla ei ole yhtä suurta merkitystä pumppaamon toimintavarmuuden kannalta kuin esim. pumpuilla itsellään, koska suoran pumpun mahdollisuus voidaan usein järjestää. Jos käytössä on riittävän suuri ylävesisäiliö, voidaan pesu suorittaa vapaasti valitta-

vana ajankohtana. Alavesisäiliöjärjestelmän yhteydessä on pesun tapahduttava mahdollisimman pienen kulutuksen aikana, yleensä yöllä. Alavesisäiliöjärjestelmän yhteydessä pitäisi olla vähintään kaksi imuallasta jakeluvarmuuden kannalta.

Tämän selvityksen yhteydessä kerätyssä aineistossa oli 13 pumppaamon kohdalla kirjattu imualtaan pesutapahtumia. Kahdesta pumppaamosta ei saatu tämän osalta tietoja ja loput 9 pumppaamoja olivat tulleet toimeen ilman altaiden pesua. Luvut osoittavat, että imualtaan pesulta ei voida kuitenkaan vältyä, vaan siihen on jo suunnittelun yhteydessä varauduttava.

Koko aineiston osalta oli pesutapahtumien keskimääräinen väliaika 26 235 h (n. 3 vuotta). Havaintovuosien suhteen painotettuna se on 27 540 h. Jos arvot lasketaan pelkästään edellä mainittujen 13 pumppaamon osalta, tulokseksi saadaan vastaavasti 17 385 h (n. 2 vuotta) ja 12 382 h (n. 1,5 vuotta). Periaatteessa em. lukujen pitäisi olla kutakuinkin samanlaisia. Ero osoittanee sitä, että aineisto ei ole kovin luotettava, so. kaikkia pesutapahtumia ei ole merkitty.

Pesun keston suhteen aineisto oli melko yhtenäinen. Keskiarvoksi saatiin 6 h, ja hajonta on pienehkö.

Myös vesitornien pesulla on merkitystä jakeluvarmuuden kannalta. Vesitornin pesu on pääpiirteissään yhtäläinen imualtaan pesun kanssa, joskin sen kesto lienee suurempi ja sen vaikutukset merkittävämpiä.

1.2.2.4 Muut häiriöt

Muilla häiriöillä tarkoitetaan tässä yhteydessä kokoomataulukon (liite V) sarakkeiden 'muut viat' ja 'automaatiikka' häiriöitä yhdistettyinä.

Häiriöiden esiintymisen keskimääräinen väliaika on 13 809 h (n. 1,5 vuotta).

Keskimääräinen korjausaika oli 6 h.

On mahdollista, että jotkin 'muista häiriöistä' ovat itse asiassa pumppujen tms. häiriöitä, mutta epäselvyyksien takia ne on jouduttu kirjaamaan muuksi häiriöksi.

Ilmoitetut häiriöt koostuivat yleisimmin automatiikasta, venttiilien vuodoista, asennustöistä, laitoksen rakenteellisista muutostöistä jne.

1.2.3 Yhteenveto tuloksista

Seuraavassa on esitetty taulukkona yhteenveto tuloksista. Taulukossa esiintyviä arvoja on myöhemmin käytetty laskuesimerkkien laskemisessa.

Taulukko 5. Yhteenveto pumppaamoilla sattuneista häiriöistä.

	Sähkö- häiriö	Häiriö- pumppu- yksi- kössä	Imu- altaan pesu	Muu häiriö
Keskimääräinen esiintymisväli- aika (h)	1 850	25 000	26 235	13 809
Keskimääräinen korjausaika (h)	0,83	15,7	6,0	6,3

2. MITOITUSARVOJEN MERKITYKSESTÄ JAKELUVARMUUDEN KANNALTA

2.0 Yleistä

Tutkimusselostuksen alussa kartoitettiin jo vedenjakelujärjestelmien suunnitteluun ja mitoitukseen vaikuttavia seikkoja toimintavarmuuden kannalta. Kysymys riittävästä vesimäärästä, tarkoituksenmukaisesta paineesta ja taloudellisesta mahdollisesta varmuudesta ovat keskeisimmät seikat vedenjakelujärjestelmän suunnittelussa. Etenkin toimivuusseikat ovat jääneet maassamme pohtimatta. Voidaanko sallia vuosittain esim. neljä puolen tunnin jakelukatkoa kulutusvaihtelujen seurauksena mitoituksen kannalta epäedullisissa verkoston osissa? Ilmeistä ainakin on, että tulipalon ja putkiriikon seurauksena tätäkin pitemmät häiriöt ymmärretään kuluttajien taholta.

Tähän asti on hyväksytty tietty ylimitoitus ja se on etenkin kasvavissa yhdyskunnissa ja veden käytön lisääntyessä ollut perusteltuakin. Kuitenkin vastaisuudessa joudutaan näitäkin asioita pohtimaan entistä tarkemmin.

Mitoitusvesimääriä määriteltäessä ovat keskeisiä kysymyksiä etenkin seuraavat:

- millaisena ajankohtana sattuu suurin normaalikulutus, mikä on sen suuruus ja kesto
- kuinka em. tilanne on arvioitavissa saatavista vaihtelutiedoista
- miten suurella todennäköisyydellä tulipalojen sammutus sattuu suurimpien normaalikulutusten ajaksi
- millaisiin sammutus- ja hukkavesimääriin tulee varautua

2.1 Mitoitustilanteet ja -vesimäärät

Kaupunkiliiton toimiston julkaisussa B 34: "Vedenjakelujärjestelmän yleiset mitoitusohjeet" on esitetty, että päävesijohdot ja jakelujohdot mitoitetaan ensi sijaisesti seuraaville tapauksille:

- a) joko suurimmalle normaalin vedenkäytön tuntikulutukselle (huipputuntikulutukselle) tai
- b) keskimääräisen vuorokauden suurimmalle tuntikulutukselle ja sen kanssa samanaikaiselle sammutusveden otolle.

Käytetään mitoitusvaihtoehtoista sitä, joka antaa suurimmat putkikoot.

Tietyllä johto-osalla voi olla myös sekundäärisiä mitoitusperusteita, kuten esimerkiksi säiliön täyttämisen ja mahdollisen putkirikön arvioitu vaikutus kyseiseen suunnittelukohteeseen.

Em. mitoituslaitteissa a ja b voi olla erilaiset painetasovaatimukset.

Yleensä on, kuten edelläkin esitetään, mitoitusvesimääräksi otettu tunnin mittaisen jakson keskimääräinen virtaama. Kuitenkin eri suunnittelukohteilla tulisi ilmeisesti olla erilaiset kulutusjaksot, esimerkiksi seuraavasti:

- päävesijohdot 30...60 min.
- jakelujohdot 15...30 min.

Tonttijohdoissa otetaan huomioon jo nykyäänkin verraten lyhytaikaiset kulutushuiput.

2.2 Kulutusvaihteluarvoja

2.2.1 Vuorokausikulutusvaihtelut

Kaupunkiliiton tekemässä SITRAN YVY-projektiin liittyvässä "Vedenkulutuksen vaihtelut"-selvityksessä saatiin seuraavat arvot suurimmille vrk-kulutuskertoimille:

Paikkakunnan koko				Suurin vrk-kulutuskerr.	
Kulutus	Asukasluku ominaiskulutuksen mukaan			95 %:n	Viiden suurimman arvon keskiarvo
m ³ /vrk	200 l/as. x vrk	300 l/as. x vrk	400 l/as. x vrk	varmuus- raja	
200... 3000	1000...15000	600... 10000		2,50...1,60	2,00...1,55
3000...10000	15000...50000	10000... 40000	8000...30000	1,60...1,50	1,55...1,45
10000...30000		40000...100000	30000...80000	1,50...1,35	1,45...1,35
yli 30000			yli 80000	1,35	1,35

2.2.2 Tuntikulutusvaihtelut

Em. tutkimuksessa saatiin suurimman tuntikulutuksen ohjeellisiksi arvoiksi seuraavat:

Paikkakunnan koko				Maksimituntikulutus	
Kulutus	Asukasluku ominaiskulutuksen avulla			x)	x)
m ³ /vrk	200 l/as. x vrk	300 l/as. x vrk	400 l/as. x vrk	%	kerroin
100... 200	500...1000			10,6...8,6	2,5...2,1
200... 500	1000...3000	700... 2000		8,6...7,5	2,1...1,8
500...1500	3000...8000	2000... 5000	1500... 4000	7,5...7,0	1,8...1,7
1500...5000		5000...20000	4000...15000	7,0...6,8	1,7...1,6
yli 5000			yli 15000	6,8	1,6

x) Teollisuuden osuuden vedenkulutuksesta ollessa yli 20 % voidaan ohjearvoja vähentää 8 %:lla eli tällöin vaihtelee %-arvo 9,8... 6,3 ja kerroin 2,4...1,5 välillä.

2.2.3 Kulutusvaihtelut yhteensä

Suunnittelussa joudutaan ennustamaan tilanne 20...30 vuotta etukäteen, joten lopputilanteen kulutusvaihtelu- ja mitoitusarvot ovat arvioitavissa vain karkealla tarkkuudella. Toisaalta niin kauan kuin vesimäärät kasvavat, on vesimäärien ennustevirhe käytännössä virhe ennustejakson pituudessa. Mitoitustilanne saavutetaan siis ennustettua aikaisemmin tai myöhemmin.

Kun tietyllä paikkakunnalla on havaittu toisistaan riippumatta sekä vrk- että tuntikulutusvaihteluja, ei ole lainkaan selvää, että molempien maksimiarvoja tarvitsee ottaa huomioon suurinta tuntikulutusta ennustettaessa. Vrk-kulutuskertoimia esittävässä taulukossa (2.2.1) mainittiin viiden suurimman kerroinarvon keskiarvo. Kertoimien keskinäinen riippuvuus on loppujen lopuksi selvitettävissä vain paikkakuntakohtaisesti. Mikäli lisäksi suunniteltava kohde mitoitetaan tuntia lyhyemmälle huippukulutusjaksolle, tulee kerroin kasvamaan.

Mitoitusvesimäärä riippuu siis keskimääräisestä kulutuksesta ja seuraavista vaihtelukertoimista:

$$k = k_0 \cdot k_1 \cdot k_2$$

k_1 = huipputuntikulutuskerroin
 k_2 = suurin vrk-kulutuskero
 k_0 = kulutusjaksokerroin

Tilastollisesti tulisi siis saada selvitettyä mikä on k_1 :n ja k_2 :n arvojen keskinäinen riippuvuus ja kuinka k_0 riippuu jakson pituudesta.

Em. kysymysten perusteellinen tutkimus edellyttäisi laajan tilastollisen aineiston hankkimista ja sen tilastomatemattista käsittelyä. Tässä yhteydessä voidaan asiaa lähestyä lähinnä esimerkinomaisesti.

2.3 Mitoitustilanteen esiintymisen todennäköisyys

2.3.1 Käytetty aineisto

Tässä yhteydessä on käytetty aineistoa, joka kerättiin Suomen Kaupunkiliiton toimesta SITRALle tehtyyn tutkimukseen vedenkulutuksen vaihtelut. Aineisto käsittää tietoja n. 40 erikokoiselta suomalaiselta paikkakunnalta. Saatuna tietoina kultakin paikkakunnalta oli tavallisesti vuorokausikulutuksen vaihtelu n. 1...1,5 vuoden ajalta sekä tuntikulutuksen vaihtelu 8...16 vuorokauden ajalta.

Tämän selvityksen yhteydessä on huomio kiinnitetty lähinnä siihen, millä todennäköisyydellä jokin kulutusvirtaama esiintyy. Tätä varten laskettiin eräiden paikkakuntien vuorokausikulutusten keskihajonta, koko aineistosta saatujen päivittäisten suurimpien tuntikulutusten jakautumat sekä edelleen muutamien paikkakuntien tuntikulutusten jakautumat.

Käytetty aineisto luokiteltiin erikokoisten paikkakuntien mukaan seuraavasti:

Paikkakuntaluokka	Asukasluku
I	0...10 000
II	10 000...30 000
III	> 30 000

Kullekin yhdyskuntakoolle pyrittiin löytämään omat tyypilliset parametrisä kustakin selvitettävänä olleesta asiasta.

Käytetty aineisto oli pienehkö eikä tuloksia voi yleistää.

2.3.2 Saadut tulokset

2.3.2.1 Vuorokausikulutuksen vaihtelu

Vuorokausikulutuksen on tässä yhteydessä ajateltu olevan normaalisti jakautunut satunnaissuure. Sitä onko vuorokausikulutus todella normaalisti jakautunut ei tässä yhteydessä ole tarkemmin testattu. Toisaalta voidaan olettaa jakautuman normalisuus, koska hyvin monet samantyyppiset tapahtumat on todettu normaalisti jakautuneiksi.

Normaalijakautuman parametrien, keskiarvon ja keskihajonnan, avulla voidaan määrittää jonkin vuorokausivirtaaman esiintymisen todennäköisyys. Keskiarvon voidaan aina katsoa olevan tunnettu, kun taas keskihajonta ei yleensä ole tiedossa.

Keskihajonnan selville saamiseksi laskettiin kustakin paikkakuntaluokasta yhden esimerkkikunnan keskihajonnan arvo. Aineisto oli valitettavan pieni, mutta näin jouduttiin menettelemään käytettävissä ole-

vien resurssien vähyyden vuoksi. Tulokset on esitetty seuraavassa:

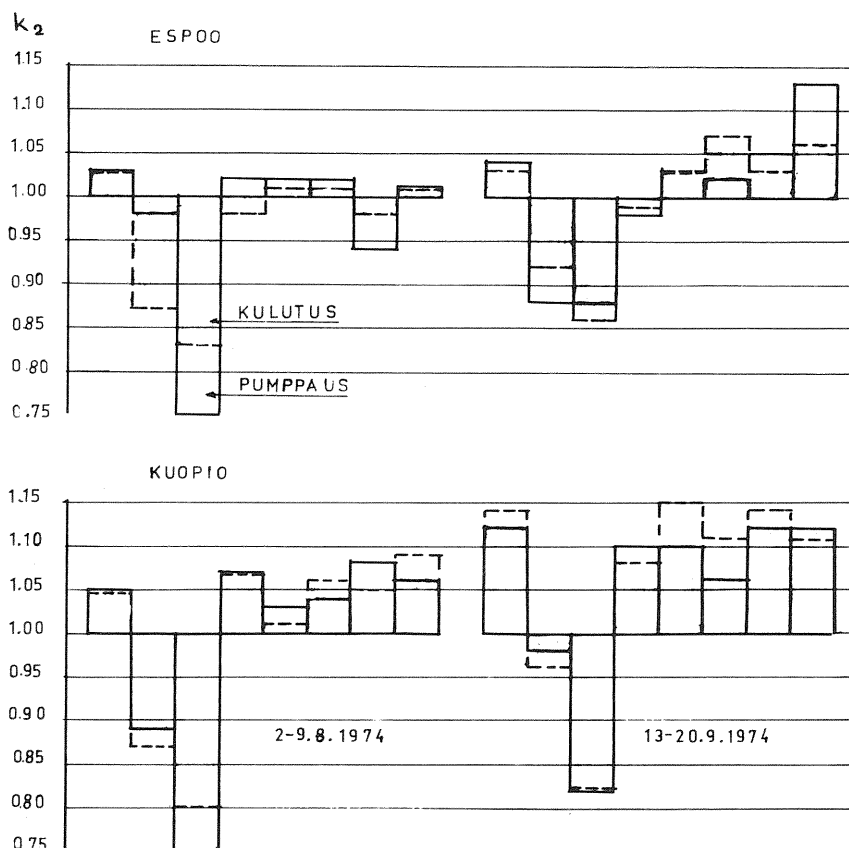
Paikkakuntaluokka	Keskihajonta	Havaintojen lukumäärä vrk
I	20 %	540
II	11 %	365
III	12 %	365

Tulee ottaa huomioon, että paikkakuntaluokassa I käytetty n. 1,5 vuoden ajanjakso aiheuttaa kulutuksen kasvun seurauksena suuremman tulosten hajonnan.

Arvot eivät tunnu vaihtelevan kovin merkittävästi, vaikka olisi ollut odotettavissa, että paikkakuntakoon kasvaessa vedenkulutuksen keskihajonta olisi pienentynyt selvemmin kuin tuloksista voi havaita. Kuten edellä mainittiin, on käytetty aineisto pieni eikä tuloksia voi yleistää.

Kun tilastoissa puhutaan vuorokausikulutuksesta, niin yleensä tarkoitetaan verkostoon pumpattua vesimäärää. Pienillä vesilaitoksilla, missä vedenjakelujärjestelmässä ei ole vesisäiliöitä, määrät ovat samat. Sen sijaan kun jakelualueella on säiliöitä, eroaa kulutetun veden määrä vuorokausittain pumpatun veden määrästä. Vesisäiliöt pyritään pumppaamaan täyteen kerran vuorokaudessa, isoilla laitoksilla öisin aamuun mennessä halvan yösähkön avulla. Tällainen pumppauksen järjestely aiheuttaa pumppauksessa erilaiset vrk-vaihtelut kuin todellisuudessa kulutuksessa on asianlaita. Esimerkkinä (kuva 6) pumppaus- ja kulutusvaihteluja Espoosta ja Kuopiosta.

Käytännön suunnittelutyössä tulisi selvittää em. vaihteluarvojen ero ja sen merkitys eri suunnittelukohteiden osalta (laitos, pääjohdot, jakelujohdot).



Kuva 6. Verkostoon pumpatun vesimäärän ja vedenkulutuksen suhde.

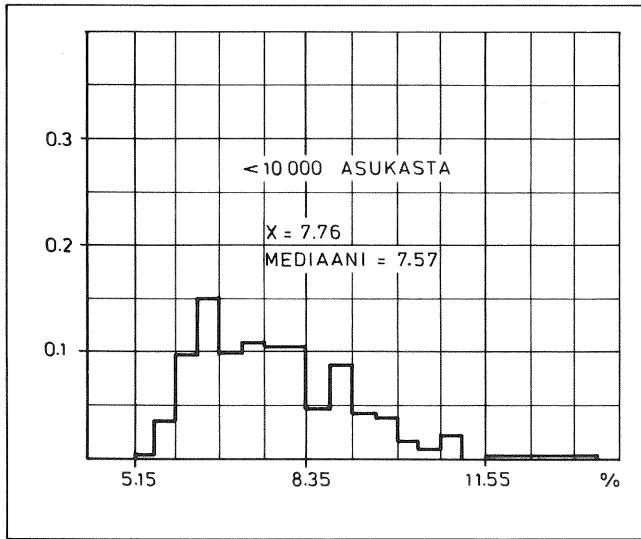
2.3.2.2 Suurimman tuntikulutuksen vaihtelu

Käytettävissä olleesta aineistosta laskettiin eri vuorokausien huipputuntikertoimien jakautuma. Tulokset on esitetty graafisesti kuvassa 7 a...d sekä numeerisesti liitteessä VI.

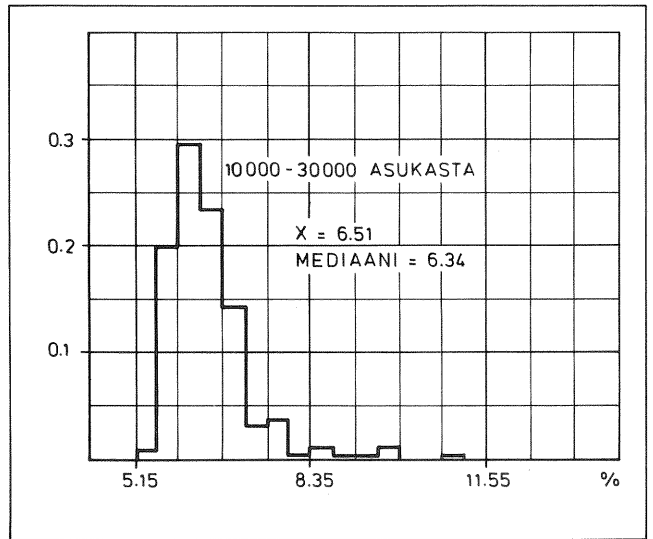
Jakautumien muodosta havaitaan, että ne ovat kaikki vasemmalle vinoja. Tämä onkin ymmärrettävää, sillä ehdoton minimi huippuvirtaamalle on vuorokautinen keskiarvo, kun taas suurin huipputuntivirtaama saattaa joskus olla hyvinkin suuri, mikä selittää jakautuman pitkän "hännän" oikealle.

Erikokoisten paikkakuntien vaikutus on selvästi havaittavissa. Mitä suurempi paikkakunta, sitä pienempi on ollut jakautuman hajonta.

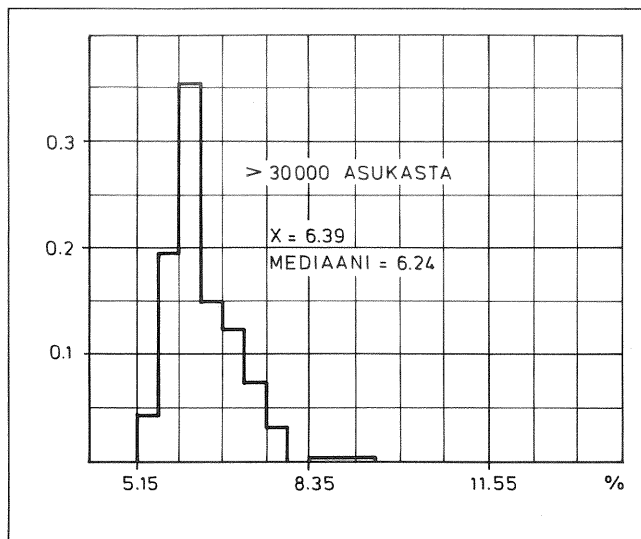
a



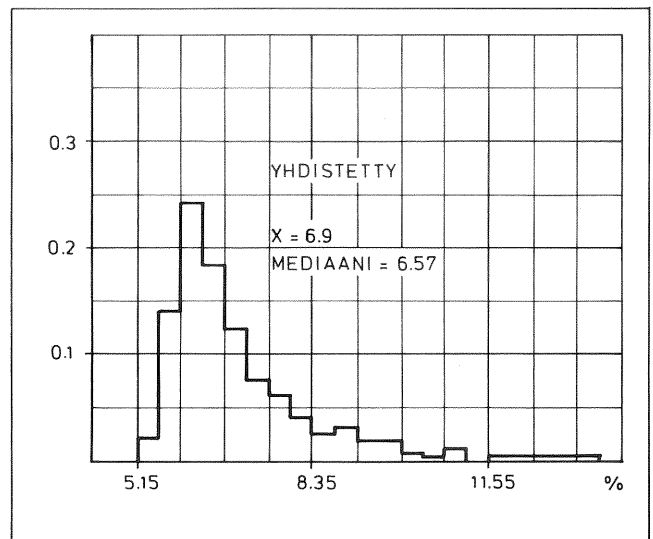
b



c



d



Kuva 7. Vuorokausien huipputuntikertoimien jakautumat.

Edellä olevien tietojen, vuorokausikulutuksen hajonnan ja huipputunnin jakautuman perusteella voidaan arvioida jonkin tietyn suuruisen huipputuntivirtaaman esiintymisen todennäköisyyttä. Asia selvinnee helpoimmin lasketun esimerkin avulla.

Esimerkkiyhdykskunnan kooksi on oletettu 30 000 asukasta. Lähteen /1/ mukaan sen huipputuntikertoimeksi on otettu $k_1 = 1,7$ ja suurimmaksi vuorokausivirtaamakertoimeksi 1,4. Seuraavassa on laskettu millä todennäköisyydellä em. paikkakunnan huipputuntivirtaama on yhtä suuri tai suurempi kuin mainittu arvo eli $1,4 \times 1,7 \times$ keskimääräinen vedenkulutus. Vuorokausivirtaamien keskihajonnaksi on oletettu 12 %.

k_1	k_2	z	$P(x \geq z)$	$P(x \geq z) \cdot P(x = k_1)$
2,24	1,06	-0,52	0,3050	0,00183
2,15	1,11	-0,89	0,1867	0,0011202
2,05	1,16	-1,34	0,09012	0,00054072
1,96	1,21	-1,79	0,03673	0,00
1,86	1,28	-2,33	0,009903	0,000307
1,76	1,35	-2,94	0,001641	0,000123
1,67	1,43	-3,54	0,000200	0,000025
1,57	1,52	-4,9	≈ 0	0,00
			Yhteensä	0,00395

Laskutaulukon merkinnät ovat seuraavat:

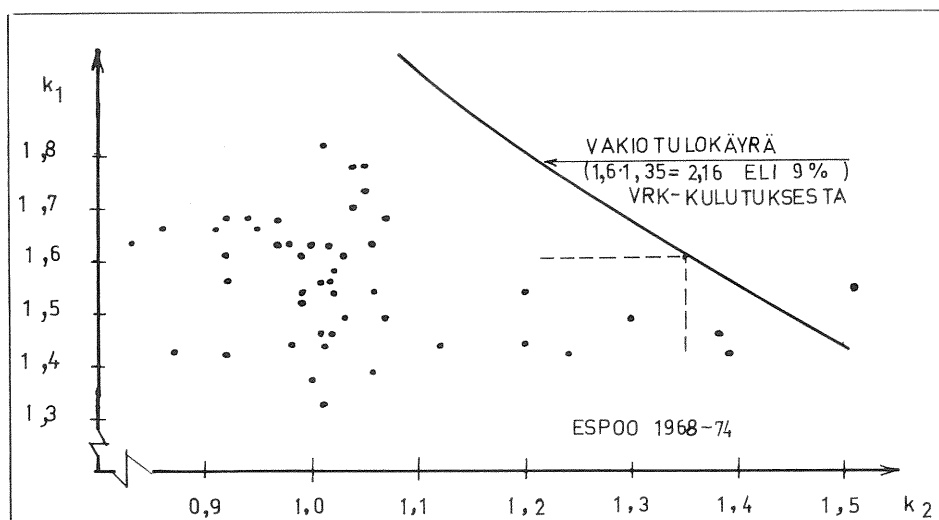
k_1	=	huipputuntikerroin
k_2	=	toteuttava vrk-kulutuskerroin = $2,38/k_1$
z	=	normeeratun normaalijakautuman parametri ($z = (1-k_2)/\delta$)
$P(x \geq z)$	=	todennäköisyys sille, että $k_2 >$ ao. rivillä mainittu arvo
$P(x \geq z) \cdot P(x = k_1)$	=	todennäköisyys sille, että huipputuntikulutus $> k_1$ kertaa todennäköisyys sille, että vrk-kulutus $k_2 \geq$ kuin ao. rivillä mainittu arvo.

Tulokseksi saatiin siis, että oletettu huipputuntivirtaama ($\geq 2,38 \times Q_{\text{keskim}}$) ylittyy todennäköisyydellä 0,0039 eli keskimäärin suunnilleen kerran vuodessa.

Saatu tulos antaa todennäköisyyden vain sille, että suurin vuorokauden tuntikulutus ylittää jonkin annetun rajan. Täten on kaikki muut tunnit jätetty tarkastelun ulkopuolelle. Voihan käydä esim. niin, että huipputunti ja myös jokin muu tuntikulutus ylittävät em. rajan samana päivänä. Näin ollen tätä menetelmää ei voida käyttää niiden tuntien lukumäärän laskemiseen, jotka jossakin ajanjaksoissa esim. vuodessa ylittävät jonkin tietyn kulutusarvon. Asiaa on selvitetty kohdassa 2.3.2.3.

Edellä kuvattu menetelmä on jossain määrin epätarkka, koska huippu-tuntikertoimen arvo on jonkin verran riippuvainen vuorokausikulutuksen suuruudesta. Jotta menetelmä olisi ollut täsmällinen, olisi kutakin eri vuorokausikulutusta varten pitänyt määrittää myös huipputuntikertoimen oma jakautuma. Tämä olisi tehnyt tarkastelun huomattavasti mutkikkaammaksi.

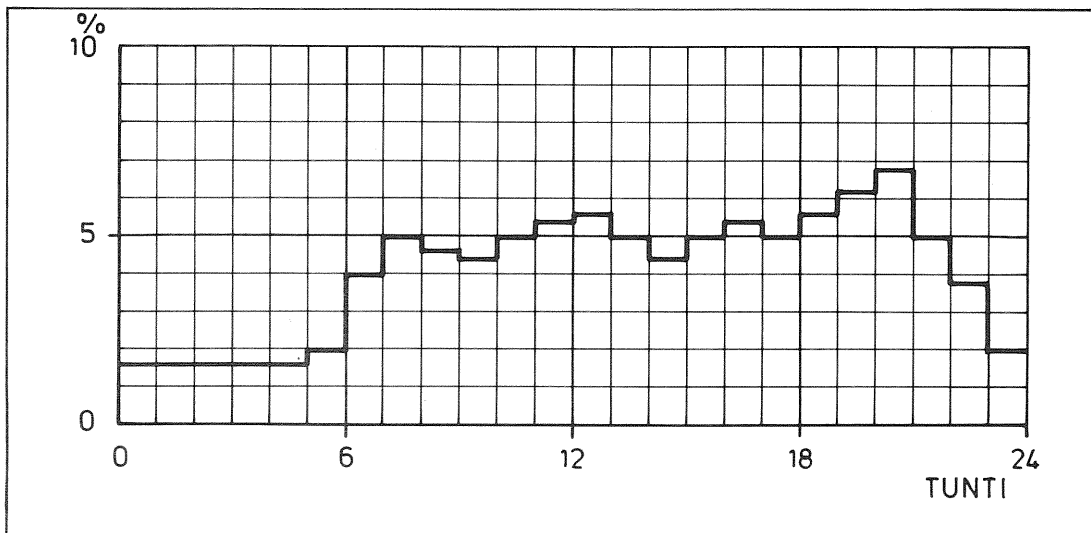
Vuorokausi- ja tuntikulutuskertoimien keskinäistä riippuvuutta on esimerkinomaisesti selvitetty kuvassa 8. On ilmeistä, että yleisestikin ottaen vuorokausikulutuksen hetkellisesti kasvaessa suurimman tuntikulutuksen prosentuaalinen osuus pienenee. Asia on erittäin tärkeä käytännön mitoitusyössä ja vaatisi laajempaa selvitystä.



Kuva 8. Vuorokausikulutuskertoimien ja suurimpien tuntikulutuskertoimien keskinäinen riippuvuus.

2.3.2.3 Tuntikulutusten vaihtelu

Tuntikulutusten vaihtelu vuorokauden eri aikoina on esimerkinomaisesti esitetty kuvassa 9.

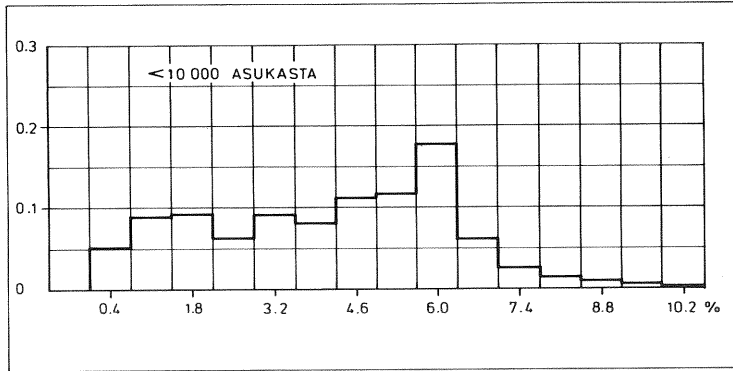


Kuva 9. Tuntikulutusten vaihtelu vuorokauden eri aikoina.

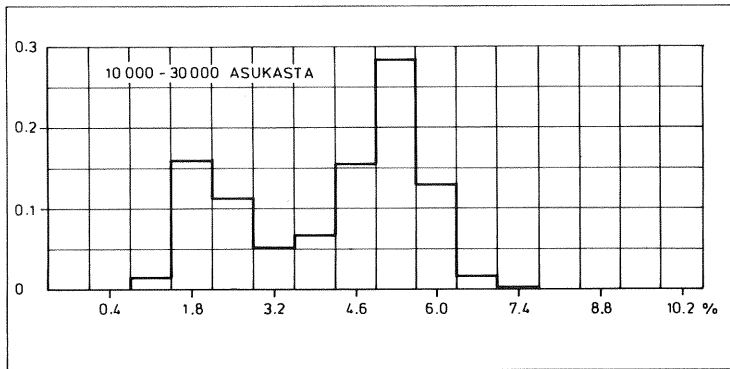
Edellisessä kappaleessa esiin tulleen epäkohdan poistamiseksi tässä yhteydessä on selvitetty myös vuorokautisten tuntikulutusten vaihtelua. Käsitelty aineisto on pienehkö käsittäen yhteensä 12 paikkakuntaa, neljä jokaisesta em. paikkakuntakokoluokasta.

Tulokset on esitetty graafisesti kuvassa 10.

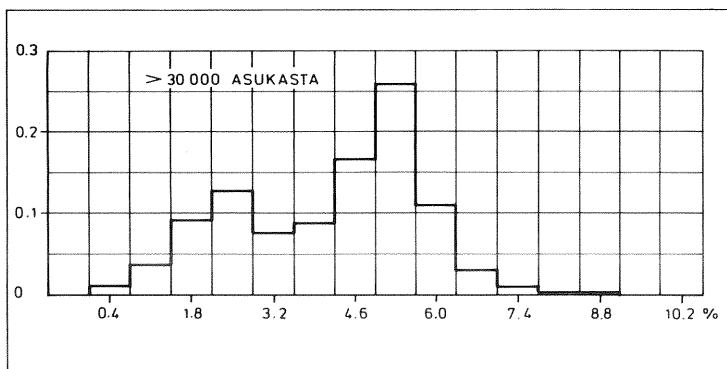
Kuvista havaitaan, että tyypillisellä vuorokauden tuntikulutusjakautumalla on kaksi huippua. Pieniä ja suuria arvoja esiintyy runsaasti, kun taas keskimääräistä kulutusta edustavia arvoja on suhteellisen vähän. Matemaattista esitystä tämän tyyppiselle jakautumalle on vaikea löytää, ja tässä yhteydessä onkin laskujen yhteydessä käytetty kuvien esittämää jakautumaa sellaisenaan. Tämä aiheuttaa jonkin verran virhettä, koska matemaattinen esitysmuoto olisi ollut tarkempi, toisin sanoen, siinä olisi voitu välttää aineiston pienuudesta aiheutuvia virheitä.



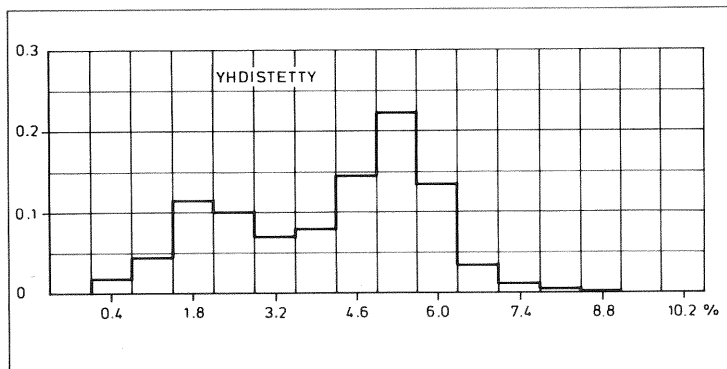
a



b



c



d

Kuva 10. Vuorokautisten tuntikulutusten jakautumat.

Seuraavassa on jälleen esimerkin valossa esitetty miten voidaan laskea arvio todennäköisyydelle, jolla tuntikulutus on suurempi kuin jokin tietty arvo. Alkuarvot ovat samat kuin kohdan 2.3.2.2 esimerkissä (n. 30 000 asukkaan jakelualue).

k_1	k_2	z	$P(x \geq z)$	$P(x \geq z) \cdot P(x = k_1)$
0,936	2,54	12,6	0	≈ 0
1,272	1,87	7,3	0	≈ 0
1,440	1,65	5,44	$3,0 \cdot 10^{-8}$	$9,0 \cdot 10^{-10}$
1,776	1,34	2,83	0,00233	$2,33 \cdot 10^{-5}$
1,944	1,22	1,87	0,03075	$6,15 \cdot 10^{-5}$
2,112	1,13	1,06	0,14457	$1,45 \cdot 10^{-4}$
2,280	1,04	0,37	0,35570	$\approx 0,0$
2,448	0,97	-0,23	0,59870	$\approx 0,0$

$$P = 2,298 \cdot 10^{-4}$$

Todennäköisyys, että tuntivirtaama ylittää tai on yhtä suuri kuin $2,38 \cdot Q_{\text{keskim}}$, on siis 0,0003. Keskimäärin tällainen virtaama esiintyy kerran 181 vuorokaudessa eli n. 2 kertaa vuodessa. Siis keskimäärin 2 tunnin ajan vuodessa on kulutusvirtaama suurempi kuin em. raja-arvo.

Laskelma antaa jonkin verran erilaisia tuloksia kuin kohdassa 2.3.2.2 esitetty. Ero johtuu siitä, että laskettava arvo koskee periaatteessa eri asiaa - aikaisemmin huipputuntivirtaamaa ja tässä mitä tahansa tuntivirtaamaa.

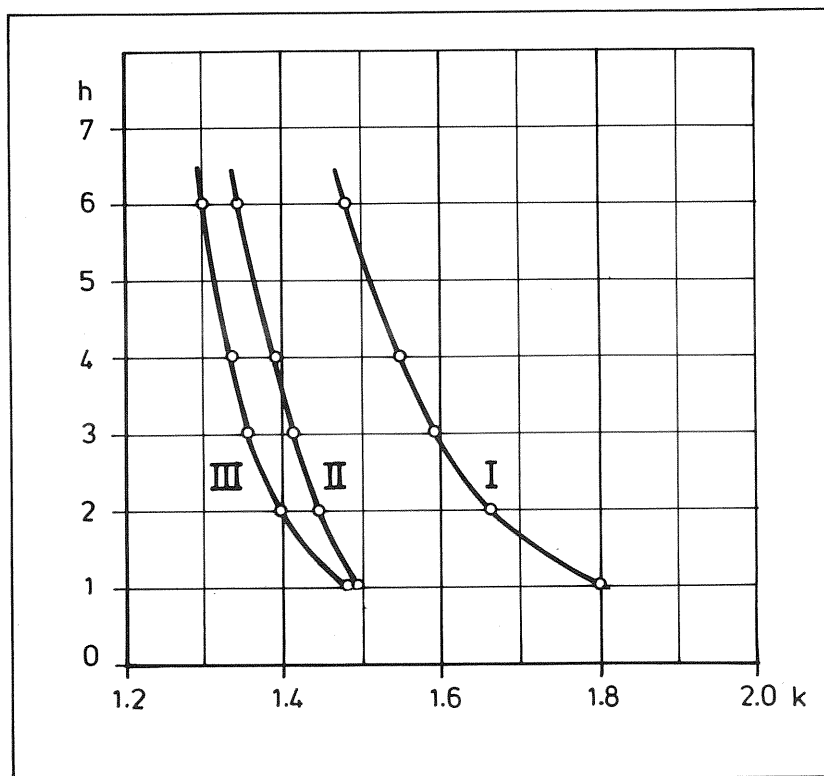
Tässäkin esitettyssä laskutavassa on epätarkkuutena se, ettei ole huomioitu vuorokausikulutuksen ja vuorokautisen tuntijakautuman riippuvuutta toisistaan. Jos tämä otettaisiin huomioon, päädyttäisiin oletettavasti tulokseen, joka olisi tässä esitettyä arvoa pienempi, joten tässä esitetyn laskutavan mukaiset tulokset ovat "varman päällä".

Kummankin esitetyn laskutavan suurin hyöty lienee siinä, että näin voidaan arvioida, vaikkakin karkeasti, jonkin vedenkulutusarvon esiintymisen todennäköisyyttä ja varsinkin sitä voidaan käyttää kahden tai useamman eri mitoitutusarvon keskinäiseen vertailuun varmuuden kannalta.

2.3.2.4 Huipputuntikulutus mitoitusperusteena

Selvityksen tässä osassa oli pyrkimyksenä tutkia huipputuntikulutuksen soveltuvuutta mitoitusperusteeksi eli saada selville, min-
kä kokoisia kestoiltaan tuntia lyhyempiä ja pitempiä virtaamia esiintyy, ja mikä on niiden suhde huipputuntivirtaamaan. Kuiten-
kaan käytettävissä olleesta aineistosta ei ollut mahdollista las-
kea tuntia lyhyempiä kulutusvirtaamia. Sen sijaan laskettiin
1...4 ja 6 tunnin aikaiset maksimivirtaamat kustakin tutkitusta
vuorokaudesta. Käytetty aineisto oli jälleen pieni käsittäen
10 paikkakuntaa.

Tuloksia on esitetty kuvassa 11 sekä taulukossa 6.



Kuva 11. Erikokoisten paikkakuntien kulutuskertoimen muuttumi-
nen kulutusjakson pituuden funktiona.

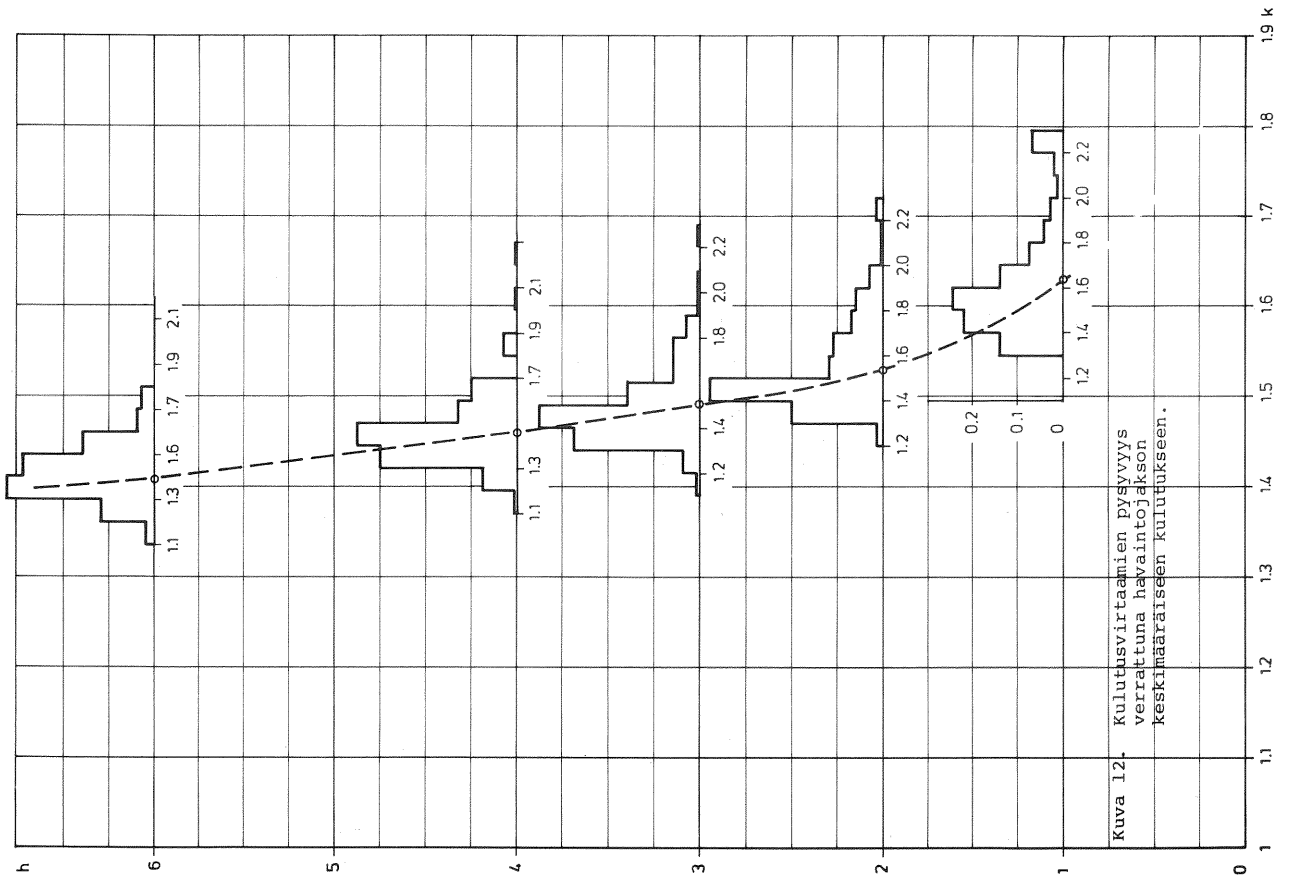
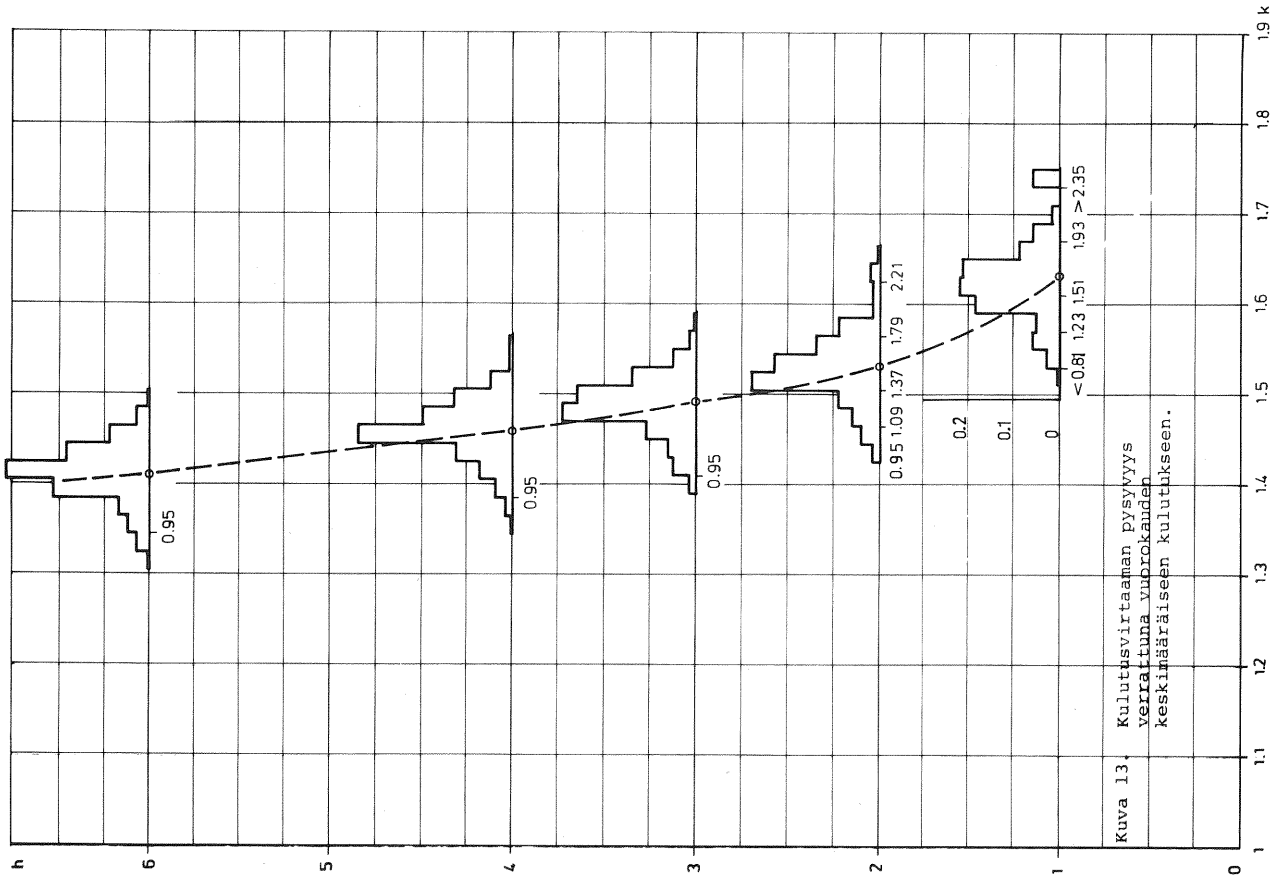
Taulukko 6. Erikokoisten paikkakuntien kulutusvirtaamien pysyvyys.

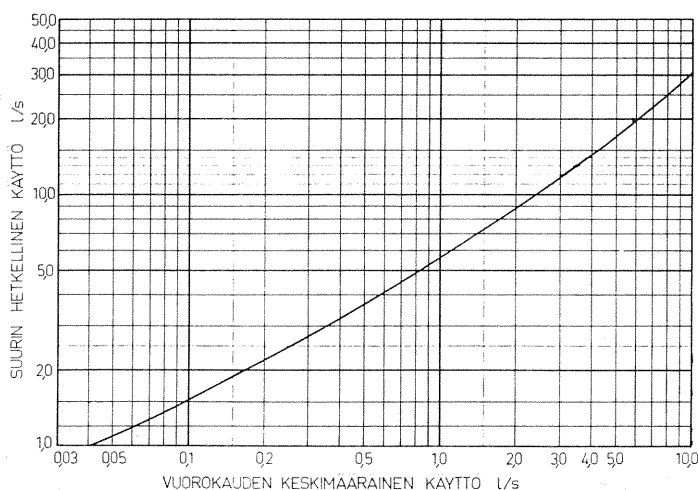
Paikka- kunta- luokka	Kulutuskerroin, kun kulutustilanteen kesto on					Havain- tojen luku- määrä
	1 h	2 h	3 h	4 h	6 h	
I	1,80	1,66	1,59	1,55	1,48	63
II	1,49	1,44	1,41	1,39	1,35	56
III	1,48	1,39	1,36	1,34	1,30	15

Kuvissa 12 ja 13 on esitetty em. taulukon keskimääräiset arvot. Kuviin on piirretty myös havaintoarvojen jakautumat siten, että kuvassa 12 vertailuvirtaama on ollut koko havaintojakson keskimääräinen virtaama, kun taas kuvassa 13 vertailuvirtaamana on käytetty kunkin vuorokauden keskimääräistä virtaamaa.

Voidaan päätellä, että jakautumien hajonta ei kovin paljon muutu siirryttäessä huipputuntikulutuksesta kuuden tunnin aikaiseen virtaamaan. Tässä yhteydessä on myös huomattava, että koko kuvaajan vaaka-akselin ja jakautumien vaaka-akselien asteikot ovat erilaiset.

Suurimman hetkellisen vedenkäytön ja vuorokauden keskimääräisen käytön riippuvuus pienissä vesilaitoksissa on esitetty kuvassa 14 /2/. Havaitaan, että kulutuskerroin on suuruusluokkaa 3...5 vuorokausipumppauksen ollessa 1 000...100 m³. Mittauksiin perustuvaa informaatiota tuntia lyhyemmän ajanjakson kulutuksista on vähän eikä sitä tämänkään tutkimuksen aikana saatu esille mm. jatkuvasti rekisteröivien mittalaitteiden puuttuessa vesilaitoksilta. Vastaisuudessa tulisikin saada käynnistettyä aihetta koskeva lisätutkimus.





Kuva 14. Suurimman hetkellisen vedenkäytön ja vuorokauden keskimääräisen käytön riippuvuus pienissä vesilaitoksissa.

2.3.3 Sammutusveden tarve

2.3.3.1 Käytetty aineisto

Tässä kappaleessa esitetty aineisto ja pääosa tuloksista ovat suoraan Suomen Kaupunkiliiton aiemmin suorittamasta tutkimuksesta.

Aineistoa kerätessä oli suoritettu kysely, jossa pyydettiin tietoja vuosina 1967...1968 sattuneista rakennuspaloista. Koska tarkoituksena oli tilastoida vesijohtoverkon mitoittamiseen vaikuttavia vesimääriä, karsittiin vastauksista alle 10 m^3 kuluttaneet palot ja palon alut, joiden sammutus oli tapahtunut lähes poikkeuksetta paloautojen säiliövedellä. Vastauksia saatiin kaikkiaan 50 palolaitokselta ja yhteensä 313 palosta, joista 173 jäi jäljelle aineiston karsinnan jälkeen. Samoin tiedusteltiin kymmenvuotiskaudella 1958...1967 sattuneiden palojen lukumääriä.

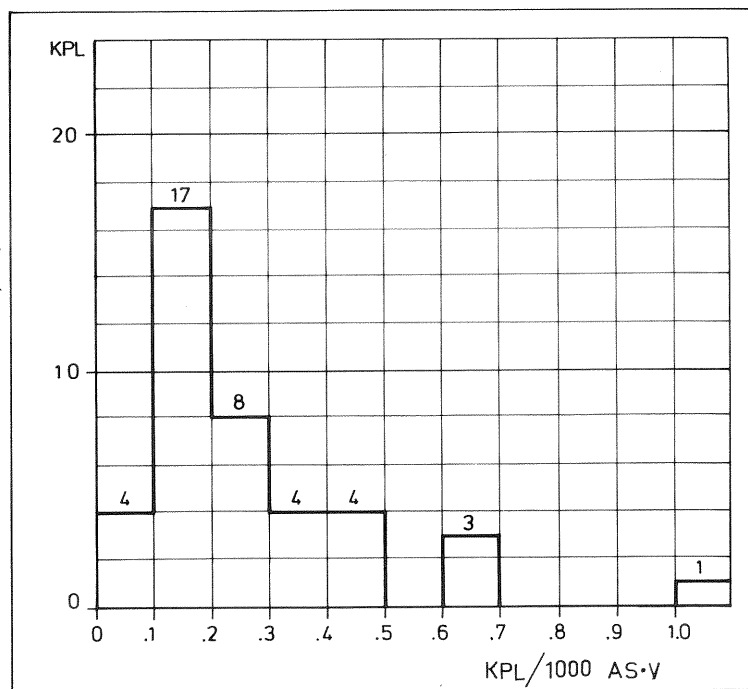
2.3.3.2 Saadut tulokset

2.3.3.2.1 Tulipalojen toistuvuus

Tulipalojen toistuvuuden selville saamiseksi laskettiin em. aineistosta sattuneiden palojen lukumäärä 1000:ta asukasta ja vuotta kohden. Yhdyskunnan kokoa kuvaavana tekijänä on siten asukasluku, koska muita selittäjiä (esim. rakennusten määrä, laatu jne.) ei ollut käytettävissä.

Kuvassa 15 on esitetty palojen toistuvuuden jakautuma.

Keskiarvoksi tulee 0,26 paloa/1000 as x vuosi. Siten esim. 30 000 asukkaan kaupungissa oli keskimäärin 7,8 paloa vuodessa, joiden sammutuksessa tarvittiin vesijohtovettä.

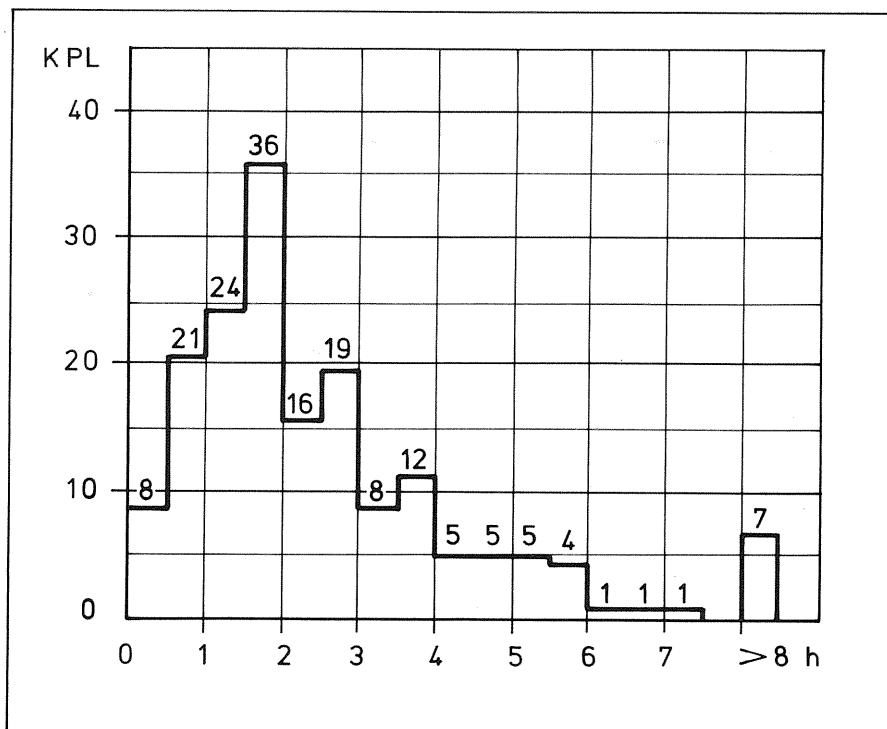


Kuva 15. Palojen toistuvuuden jakautuma 1000 asukasta ja vuotta kohden.

2.3.3.2.2 Sammutuksen kesto

Tulipalojen sammutuksen kestolla on merkitystä siinä mielessä, että voidaan arvioida aikaa, kuinka kauan vesilaitoksen oletetaan toimittavan vettä palonsammutusta varten. Asia riippuu kuitenkin suuresti paikallisista olosuhteista (luonnonvesistön läheisyys ym.).

Kuvassa 16 on esitetty palon keston jakautuma.

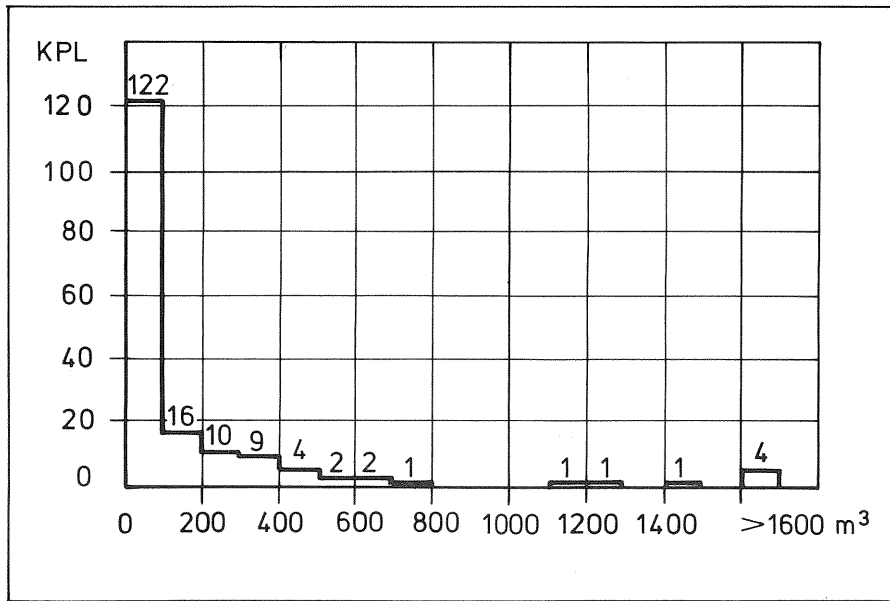


Kuva 16. Palon keston jakautuma.

Palon keston keskiarvo on 2,3 h ja mediaani noin 1,6 h.

2.3.3.2.3 Sammutukseen kulunut vesimäärä

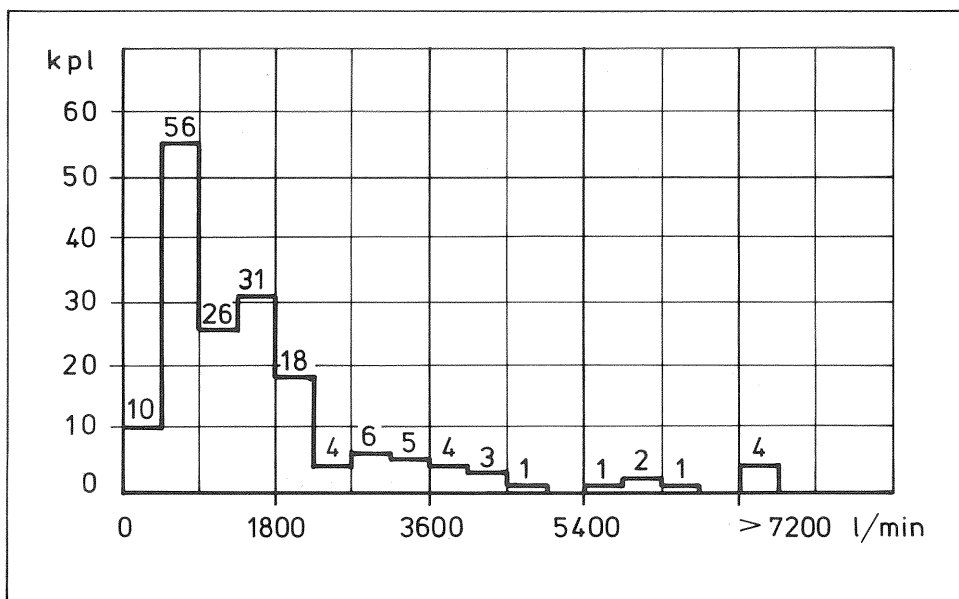
Kuvassa 17 on esitetty tulipalojen vaatiman vesimäärän jakautuma. Keskiarvoksi tulee 136 m^3 ja mediaani on 70 m^3 kohdalla.



Kuva 17. Sammutukseen käytetty kokonaisvesimäärä.

2.3.3.2.4 Sammutustyön vaatima suurin hetkellinen vesimäärä

Kuvassa 18 on suurimman hetkellisen kulutuksen jakautuma. Keskiarvoksi tulee 25,3 l/s ja mediaaniksi noin 20 l/s.



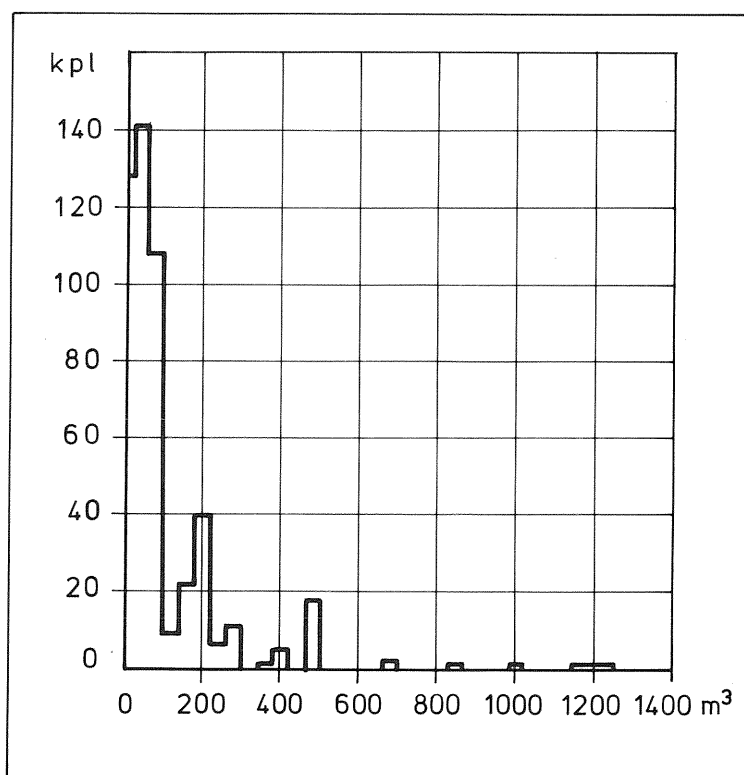
Kuva 18. Suurin hetkellinen vedenotto sammutustyön yhteydessä.

2.3.4 Putkirikön aikana vuotanut vesimäärä

Kuten aikaisemmin on mainittu, ovat lähtöaineistona käytettyihin vuotoraportteihin kirjatut arvot ao. henkilön henkilökohtaisia arviointeja, joten niihin on syytä suhtautua varauksellisesti. Etenkin putkirikossa hukkaan joutuneen vesimäärän arviointi on niin vaikea tehtävä, että suuruusluokkavirheetkin saattavat olla mahdollisia.

Tässä selvityksessä on kuitenkin käytetty em. arvioita sellaisinaan, koska parempaakaan informaatiota ei ollut saatavissa eikä arvioita voitu muuttaa "paremmiksi" tai karsia "vääriä" arvioita.

Kuvassa 19 on vuotaneen veden jakautuma graafisesti esitettyinä.



Kuva 19. Putkirikoissa hukkaan joutuneen vesimäärän jakautuma. Pienet putket.

Kun käytetään samaa jakoa kuin kohdassa 1.1.2.1, saadaan vuotaneille vesimäärille seuraavia arvoja:

	Keskiarvo m ³	Keskihajonta m ³	kpl
Koko aineisto	162	606	917
Pienet putket	129	286	503
Isot putket	474	1435	116

Hajontojen arvot ovat melkoisia, varsinkin ryhmän "isot putket" arvo on huomattavasti muita suurempi. Tämä johtuu osaksi siitä, että mukana on muutamia erittäin suuria vuotoveden määriä, jotka nostavat keskiarvoa. Jos aineistosta karsitaan yli 3 000 m³:ä suuremmat arvot, saadaan keskiarvoksi 293 m³. Näitä suuria vuotoja esiintyi aina 12 000 m³:iin asti.

3. JÄRJESTELMIEN TOIMINTAVARMUUS JA SEN VAIKUTUS KUSTANNUKSIIN (lähteet /7/ ja /8/)

3.0 Yleistä

Luotettavuudella eli käyttövarmuudella tarkoitetaan todennäköisyyttä siitä, että laite tai järjestelmä toimii tietyn ajan. Luotettavuus on nolla, kun laite ei toimi, ja lähenee yhtä, mitä varmempi laitteen toiminta on. Luotettavuus on kuitenkin aina < 1 . Käytännössä puhuttaessa luotettavuudesta käytetään usein prosentteja nollan ja sadan väliltä.

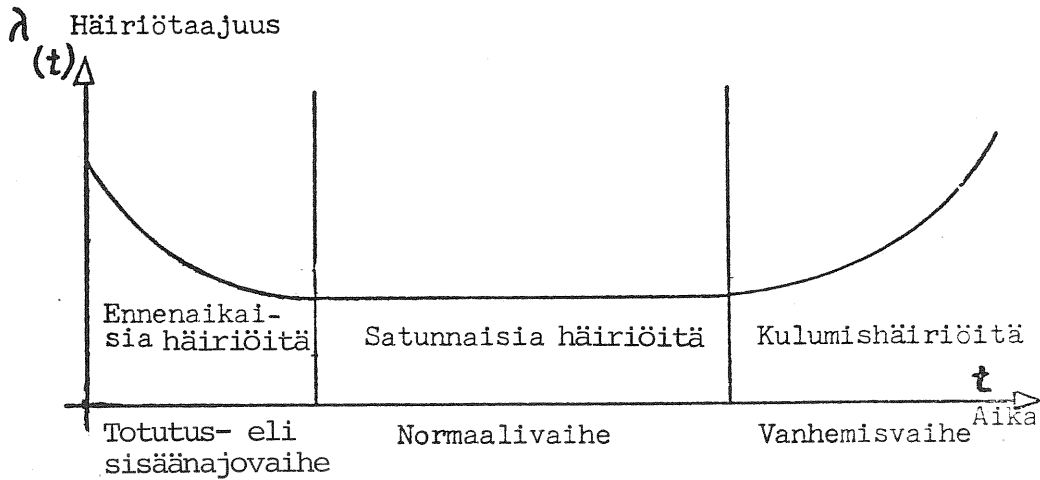
Toimiva järjestelmä, esim. vedenjakelujärjestelmä, koostuu pienemmistä osista, joiden toiminta muodostaa koko systeemin toiminnan. Kaikkien osien toimintavarmuus vaikuttaa koko systeemin toimintavarmuuteen. Yleensä jonkin järjestelmän toimintavarmuutta on pyritty lähestymään siten, että on määriteltä järjestelmän eri osat, niiden keskinäiset suhteet ja osien toimintavarmuus. Yhdistämällä osat jälleen kokonaisuudeksi voidaan tehdä johtopäätöksiä koko systeemin toimintavarmuudesta.

Vedenjakelujärjestelmässä eri osien nimeäminen on paikoitellen hankalaa. Järjestelmän toimintavarmuuteen vaikuttavat itse asiassa kaikki ne vaiheet, jotka käyttövesi joutuu läpikäymään kulkiessaan vesistöstä tai pohjavesikaivosta kuluttajan avaamaan hanaan.

3.1 Järjestelmien luotettavuus

3.1.1. Järjestelmän komponentin häiriötaajuus

Häiriöiden esiintymistodennäköisyys vaihtelee järjestelmän eliniän aikana häiriöiden keskimääräisen esiintymisvälin eli häiriötaajuuden mukaan. Systeemin tai komponenttien käytössä erotetaan kolme perustapausta: totutusvaihe, normaalivaihe ja vanhenemisvaihe. Asiaa havainnollistaa kuva 20.



Kuva 20. Komponentin elinikä.

Uudella järjestelmällä häiriötaajuus on tavallisesti suurimmillaan ja vähenee ajan mukana tiettyyn vakioarvoon. Tämä tilanne, jossa komponentti pettää sattumanvaraisesti, säilyy siihen saakka, kun kulumisen, väsymisen, vanhenemisen tms. seikkojen vuoksi häiriöt taas alkavat lisääntyä.

Tämän vuoksi järjestelmä olisi rakennettava niin, että sen varsinaisena käyttöaikana komponentit toimisivat alueella, jossa häiriötaajuus on pieni ja tavallisesti vakio. Lastentaudit olisi pyrittävä poistamaan totutusvaiheessa. Varsinainen käyttö tapahtuisi tällöin normaalilla alueella, ja näin koko järjestelmän luotettavuutta olisi tarkoituksenmukaisesti lisätty. Luonnollisesti vanhenemiskauden edettyä järjestelmä tulisi uusiksi.

3.1.2 Sarjajärjestelmä

Luotettavuuden suhteen jonkin laitteen komponenttien sanotaan olevan sarjassa, jos yhden komponentin häiriö aiheuttaa koko laitteen toiminnan häiriön.

Pelkistetyssä muodossaan tekninen järjestelmä - siten myös vesilaitos kokonaisuutena ja osineen - koostuu luotettavuuden suhteen sarjaan kytketystä komponenttien ketjusta. Tämänkin ketjun suhteen pätee sääntö, että ketju on niin vahva kuin sen heikoin rengas. Tässä "lujuudella" tarkoitetaan komponenttiketjun toimintavarmuutta, oikeammin sanottuna sen luotettavuutta eli todennäköisyyttä siitä, että järjestelmä toimii oikein halutun ajan.

Kokonaisluotettavuus on osien luotettavuuksien tulo. Jos järjestelmän luotettavuudeksi halutaan 80 % ja se koostuu esimerkiksi kymmenestä komponentista, tulee kunkin komponentin luotettavuuden olla 97,7 %. Jos komponenttien lukumäärä on 50, 100 tai 400, tulee yksittäisten osien luotettavuuksien olla vastaavasti 99,6 %, 99,8 % ja 99,9 %, jotta kokonaisluotettavuus olisi äskeinen 80 %.

Komponenttien luvun kasvaessa siis kokonaisluotettavuus nopeasti pienenee. Järjestelmän luotettavuutta voidaan parantaa:

- yksittäisten komponenttien luotettavuutta lisäämällä
- komponenttien lukumäärää pienentämällä
- rinnakkaisjärjestelmiä rakentamalla

3.1.3 Rinnakkaisjärjestelmä

Luotettavuuden suhteen jonkin laitteen komponenttien tai apulaitteiden sanotaan olevan rinnakkain, jos häiriön sattuessa toisella tai toisilla komponenteilla tai apulaitteilla voidaan korvata häiriöön joutunut osa.

3.1.4 Yhdistetyt järjestelmät

Käytännössä laitekombinaatioissa on samaan aikaan sekä sarjoja että rinnakkaisia järjestelmiä. Viime vuosina on otettu käyttöön mutkikkaita tietoliikennejärjestelmiä yms., joissa komponenttien luku on hyvin suuri. Aluksi järjestelmiä rakennettiin vanhan tavan mukaan ja todettiin, että kokonaisuus ei toiminutkaan luotettavasti, vaikka jokainen sen osa yksinään toimi hyvin. Asian lä-

hempi tarkastelu johti luotettavuusteorioiden syntyyn.

Luotettavuuden ja kustannusten kasvua komponentteja lisäämällä havainnollistavat kuva 21 ja myöhemmin kuva 22.

Käytettävissä olevat komponentit

	1	2	3	4	5
Välttämättömät komponentit					
1	0,80000	0,96000	0,99200	0,99840	0,99968
2		0,64000	0,89600	0,97280	0,99328
3			0,51200	0,81920	0,94208
4				0,40960	0,73728
5					0,32768

Kuva 21. Luotettavuuden muuttuminen komponenttien keskinäisen suhteen muuttuessa.

3.2 Korjattavat järjestelmät

3.2.0 Yleistä

Korjausmahdollisuus parantaa aina järjestelmän käytettävyyttä. Luotettavuus sen sijaan paranee vain, jos kysymyksessä ei ole pelkkä sarjajärjestelmä, vaan vainakin joissakin kohdin järjestelmää on olemassa korjattavia rinnakkaisyksiköitä.

Järjestelmän luotettavuuden ja käytettävyyden suhteen pitää paikkansa se, mitä edellä on sanottu korjattavasta yksiköstä. Voidaanhan järjestelmää kokonaisuutena käsitellä kuten yksikköä.

3.2.1 Korjattavan järjestelmän luotettavuuden laskemisesta

Järjestelmän luotettavuuden ja käytettävyyden laskeminen sen yksiköiden ominaisuuksista lähtemällä mutkistuu huomattavasti, kun korjausmahdollisuudet otetaan huomioon. Jos oletetaan yksiköiden vioittumis- ja korjausaikojen noudattavan eksponentiaalijakautumaa, on kysymyksessä ns. homogeeninen Markovin prosessi.

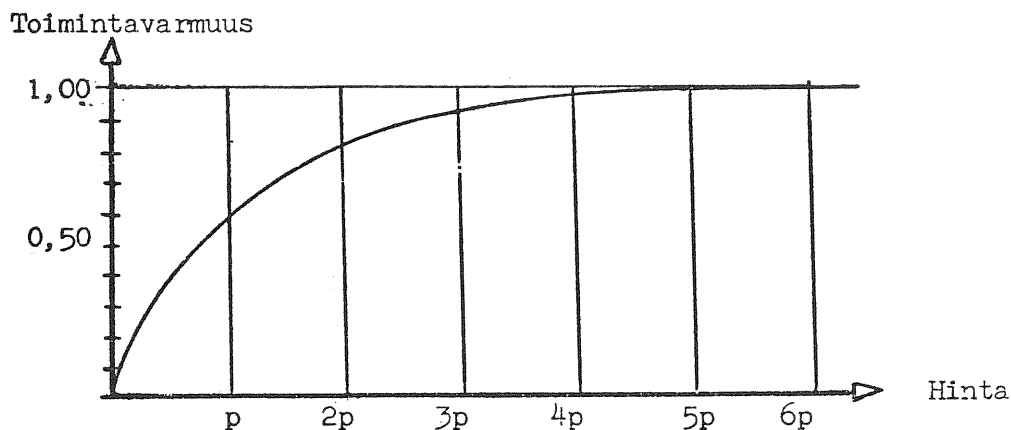
Korjattavan järjestelmän yleinen analyysi on hyvin vaikea suorittaa. Tehtävän analyttiset ratkaisut perustuvat yleensä uusiutumisprosessien teoriaan. Korjattavista yksiköistä muodostuva järjestelmä kuvataan uusiutumisprosessina, joka on sen yksiköitä kuvaavien prosessien yhdistelmä. Korjattavien järjestelmien luotettavuus- ja käytettävyydestarkastelut johtavat hyvin nopeasti monimutkaisuutensa takia käytännön tarkoituksiin soveltumattomiin lausekkeisiin. Näin on etenkin silloin, kun vioittumis- ja korjausaikajakautumien ei voida olettaa olevan eksponentiaalisia. Teoreettisiin tarkasteluihin perustuen on kuitenkin mahdollista johtaa käyttökelpoisia likimääräislausekkeita.

Korjattavat järjestelmät muodostavat käytännössä erittäin keskeisen ja tärkeän ryhmän, jonka luotettavuusteoreettisen käsittelyn tarve on suuri. Tämä on vaikuttanut siihen, että useilla tahoilla on ryhtytty kehittämään järjestelmän simulointiin perustuvia ratkaisumenetelmiä, ns. Monte-Carlo-menetelmiä.

3.3 Toimintavarmuus ja kustannustekijät

Laitteen käyttövarmuusasteikon ja sen hinta-asteikon välillä on melko läheinen riippuvuus. Tekniikan jossakin kehitysvaiheessa laitteen toimintavarmuutta voidaan parantaa vain lisäkustannuksilla. Toimintavarmuus ei kuitenkaan ole määrättömästi kasvava hinnan funktio. Ajateltakoon esim. vesijohtoverkkoa. Ensin jokainen uusi ver-

kon haarautumispisteisiin lisätty sulku lisää toimintavarmuutta. Kuitenkin sulku sinänsä on helposti vioittuva osa. Näin ollen jollakin hetkellä verkon toimintavarmuus lakkaa lisääntymästä sulkujen lukumäärän mukaan ja jopa pienenee suluissa ilmenevien vikojen ja niiden ylläpitorasitteiden johdosta. Loppujen lopuksi on ilmeistä, ettei kaikkein varmatoimintaisin verkko ole se, joka muodostuu sulusta toisensa jälkeen. Edullisimman vaihtoehdon arviointi on työläs ongelma, ja mielipiteet esimerkiksi sopivasta sulkujen määrästä vaihtelevat huomattavasti.



Kuva 22. Toimintavarmuuden suhde kustannuksiin.

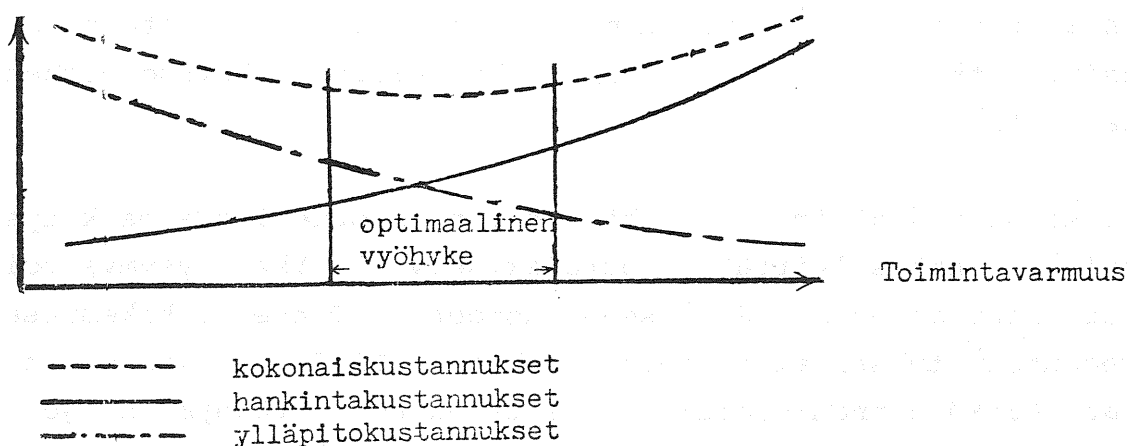
Jos kunkin osan kohdalla tunnetaan sen toimintavarmuuden ja hinnan välinen suhde, niin voidaan saavuttaa jompi kumpi seuraavista tavoitteista:

- toteuttaa laitteelle määrätty kokonaistoimintavarmuus edullisimmalla omakustannushinnalla valitsemalla tarkasti kunkin osan toimintavarmuus
- saavuttaa etukäteen määrättyyn omakustannushintaan paras kokonaistoimintavarmuus, etsimällä kullekin osalle sen hinta huomioon ottaen paras perustoimintavarmuus

Etenkin vedenjakelun kohdalla on harvinaista, että tämä ongelma voidaan ratkaista matemaattisesti, koska se edellyttäisi, että kunkin osan toimintavarmuus/kustannukset-suhde olisi täysin tunnettu.

Toimintavarmuus ja ylläpitokustannukset voivat olla suoraan tai kääntäen verrannollisia. Kuvassa 23 on esitetty esimerkki kummas-takin tapauksesta.

Ajan tasalle
saatetut
kustannukset



Kuva 23. Toimintavarmuuden kustannustekijöitä.

Esimerkissä tarkoitetaan, että ajan tasalle saatetuissa kustannuksissa on otettu huomioon myös ne säästöt, joita toimintavarmuuden parantuminen tuo mukanaan vähentäessään järjestelmän mahdollisten vikojen aiheuttamia haittoja.

Kuvassa 23 esitetyn kokonaiskustannusten optimaalisen vyöhykkeen sijainti riippuu hankintakustannusten poistoajasta. Lyhyellä poistoajalla kokonaiskustannusten optimi saavutetaan "huonolla" laadulla. Jos laitteiden poisto-aika on 10...20 vuotta, luotettavuuden tulla olla huomattavan suuri.

Joskin esimerkistä ilmenevät tekijät voidaan ilmaista numeroin ja muuttaa yhtälöiksi, jää ongelmasta vesilaitostoimintaan sovellettu- na kysymysmerkiksi ongelman inhimillinen puoli. Tällöin toiminta- varmuuden hinnasta muodostuu melko subjektiivinen käsite: minkä

hinnan asettaa ihmisen hyvinvoinnille ja mukavuudelle tai minkä arvoinen on hänen terveytensä?

Taloudellisten laskelmien suorittamiseksi toimintavarmuuden optimivähykkeestä täytyisi verrata toimintavarmuuden hintaan niitä kustannuksia, jotka voivat aiheutua järjestelmän häiriöistä. Periaatteessa pitäisi voida ilmoittaa luvuin kaikki haitatkin. Vaikeutena on haitan mittaaminen markkoina: miten ilmaista markkoina esim., että jonkin ajan kuluessa huoneiston kylpyhuoneeseen ei saada vettä!

Esimerkiksi vedentoimituksen häiriöiden taloudellista merkitystä voitaisiin ehkä selvittää kuluttajakyselyllä. Yksi kysymys voitaisiin asettaa esim. tällaiseen muotoon: "Tunnette kokemukselta vedentoimituksen aika ajoin katkeavan. Tiedätte myös veden hinnan. Minkä hinnankorotuksen olette valmis hyväksymään, jos vedentoimituksen katkojen toistuvuus tai kestoaika vähenee puoleen?" Tämän tyyppisiä arvostus- ym. kysymyksiä on osin käsitelty SITRAN teettämässä vesihuollon taloudellisuutta koskevassa selvityksessä.

3.4 Vedenjakelujärjestelmän toimintavarmuus

3.4.1 Pumppaus

Useimmilla pumppuasemilla on suoraan kytkettävät keskipakopumput, joissa on ei-synkronoidut kolmivaiheiset sähkömoottorit. Niillä on saavutettu hyvin suuri sisäinen toimintavarmuus. Niinpä häiriöiden ollessa kysymyksessä ne tavataan yleensä pumppuryhmään liittyvistä sähköisistä tai hydraulisista varusteista. Näin ollen on käyttövarmuuden kannalta ehdottomasti väärin, ellei varapumpulle säästäväisyssyistä ole erillisiä hallinta- ja käynnistyslaitteita.

Kaikkien sellaisten laitteiden käyttö, jotka ovat monimutkaisempia kuin vakionopeudella toimiva suorakytkentäinen pumppu, johtaa toimintavarmuuden ehkä huomattavaankin vähentymiseen. Käytetystä

laitteesta riippumatta - ja niitä on lukuisia: sähköisiä, elektronisia, hydraulisia ja mekaanisia - nopeussäätöisillä pumppuryhmillä on selvästi pienempi toimintavarmuus kuin vakionopeudella toimivilla moottoreilla ja pumpuilla. Lisäksi nopeudenvaihteluja on säädettävä virtaus- tai painemittarilla, joista saattaa koitua uusia häiriöitä. Tekninen kehitys on kuitenkin lisännyt nopeussäätöisten pumppuryhmien toimintavarmuutta siinä määrin, ettei niiden käytön yleistymiselle vedenjakelussa ole estettä.

Joskus on ilmeisesti syytä tehdä toimintavarmuuden nimissä uhraus energian kulutuksessa ottamalla käyttöön eri syöttöjä varten identtiset pumput. Tällainen on tilanne, jos vettä joudutaan syöttämään puhdistuslaitokselta eri suuntiin siten, että tarvittavat nostokorkeudet ja virtaamat eivät ole kovinkaan kaukana toisistaan. Varapumppuja muutamien lisäsuluin voidaan tällöin käyttää molemmissa syötöissä.

3.4.2 Säiliöt

Vesilaitostoiminnassa vesisäiliöitä voi olla raakaveden hankinnassa luonnonvesistön ja puhdistuslaitoksen välillä, puhdistuslaitoksella käsittelyn ja korkeapainepumppauksen välillä, sekä itse jakeluverkossa monella eri tavoin sijoitettuina.

Kaikissa tapauksissa vesisäiliöillä on toiminnallinen perusröoli, johon kuuluu virtaaman vaihteluiden tasaaminen yhden vaihteluperiodin ajaksi. Jakso voi olla päivittäinen, viikoittainen tai vuodenajan kestävä. Se voi raakaveden hankinnassa käsittää jopa useita vuosia, jos kysymyksessä on varmistus kuivia vuosia silmällä pitäen.

Virtaamavaihtelujen tasaamiseen tarvittava teoreettinen kapasiteetti voidaan tilastoja ja todennäköisyyksiä käyttäen määrittää.

Säiliöillä on tärkeä rooli vedenjakelujärjestelmän toimintavarmuuden parantamisessa yleensä. Säiliö, jossa on lisäkapasiteettia toimintavarmuuden vuoksi, voi saada aikaan sen, etteivät kuluttajat huomaa muutaman tunnin käsittely- tai pumppauskatkoa.

Nykypäivinä joidenkin silmissä ylävesisäiliöt näyttävät kalliilta ja rumilta maiseman pilaajilta. Ne ovat kuitenkin yksinkertaisuutensa vuoksi hyvin varmoja estämään lyhyitä toimituskatkoja, taasaamaan paineenvaihteluja verkostossa ja varmistamaan riittävän sammutusvesivaraston tulipalojen varalta.

3.4.3 Verkosto

Vesijohtoverkossa on useita luotettavuusmielessä rinnan kytkettyjä johtoja turvaamassa vedenjakelua. Kahden rinnan kytketyn putken suhteen on äärimmäinen tapaus, että kumpikin pystyy yksinään turvaamaan veden toimittamisen. Tällöin vahingon korjausaikana jakelu pystytään hoitamaan normaalisti. Toinen ääritapaus kahden putken systeemissä on se, että niissä yhteensä on riittävä virtaama. Jos toinen on poissa käytöstä, jakelu voidaan turvata vain pienemmällä virtaamalla ja paineella.

Silloin, kun arvioidaan tietyn ajan kestävän vedenpuutteen seurauksia, ei tule ajatella yksinomaan vedenkäyttäjiä ja heidän veden puutettaan. Lyhyenkin ajan kestävistä vedenpuutteista voi seurata alipainetta jakeluverkoston joissakin osissa ja tämän mukana vakaava saastumisriski.

Alipaineen vallitessa ilmaa tunkeutuu vesijohtoihin hanojen, takaisinimusuojien ja ilmaventtiilien kautta. Useimmiten putken sisäseinämät ovat rautahydroksidi-kalsium-karbonaattisakan peittämiä. Sakka on normaalisti paikallaan, mutta sen jouduttua täten suspensioon vesi sameutuu muutamaksi tunniksi, jopa useiksi päiviksi.

Vedenjakelujärjestelmästä pyritään luomaan toisaalta varmatoimintainen järjestelmä, jonka avulla voidaan turvata vedensaanti kaikkiin kulutuspisteisiin eri kulutustilanteissa jopa poikkeuksellisten putkirikkojen sattuessa, toisaalta mahdollisimman taloudellinen järjestelmä, jonka rakennus- ja kunnossapitokustannukset ovat kohtuulliset ja joka voidaan toteuttaa vaiheittain kulutuksen kasvun mukaan. Nämä päävaatimukset tyydytetään rakentamalla mahdollisimman paljon ns. rengasjohtoja, jolloin kulutuspisteiden ts.

kiinteistöjen kohdalla olevaan katujohdoton voidaan syöttää vettä kahdesta suunnasta ja rengasjohdot voidaan rakentaa suhteellisen pieninä ja vaihteittain.

3.5 Toimintavarmuus ja vastuu

Vesilaitoksen luotettavuus on suunnittelu-, rakentamis- ja käyttöhenkilöiden yhteisvastuulla. Erityisen tärkeä on suunnittelijan vastuu luotettavuuskysymysten tutkimisessa ja numeeristen menetelmien käyttöönotosta. Numeerisista luotettavuusanalyysistä kiinnostunut suunnittelija on avainhenkilö käyttäjän ja valmistajan välillä, jotta valmistajalta saataisiin numeerisia luotettavuustietoja laitteesta ja jotta käyttäjältä saataisiin täsmällisiä vika- ja häiriötilastoja.

Kun laitosta suunnitellaan ja rakennetaan tai jo rakennettua laitosta käytetään, olisi syytä suorittaa luotettavuusanalyysi, vaikka luotettavuustiedot ovatkin vaikeasti etukäteen saatavia. Usein riittää komponenteittain suoritettu arviokin. Ainakin se on parempi kuin, että asiaan ei kiinnitetä lainkaan huomiota.

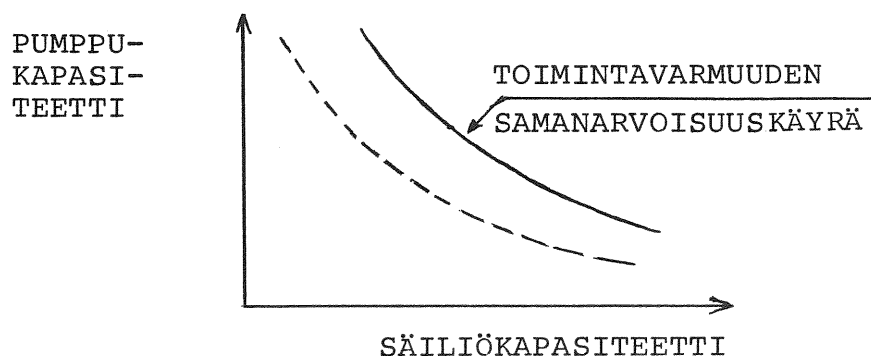
Sähkölaitoksissa, nimenomaan jakelulaitoksissa, sovelletaan jo melkoisesti uudenaikaista luotettavuustekniikkaa. Vesilaitoksissa sitä vastoin luotettavuuskysymykset hoidetaan sormituntumalla. Viimeistäänkin automaation myötä luotettavuuskysymysten selvittelyn erikoistekniikka tulee käyttöön myös vesilaitoksissa muodostaen tulevaisuudessa ehkä olennaisen osan vesilaitosinsinöörin tehtävistä.

Vesilaitosten luotettavuus- eli toimintavarmuuskysymyksiin on suhtauduttava vakavasti ja tiettyä kritiikkiä noudattaen. Probleemaa on pyrittävä analysoimaan ja harkittava tarkkaan, millä investoinneilla ja toimenpiteillä vesilaitoksen ja vedenjakelun toimintavarmuus on parhaiten ja edullisimmin hoidettavissa. Ensin kannattaa varmistaa laitoksen sellaiset arat kohdat ja pullonkaulat, joissa parannus saadaan aikaan pienillä uhrauksilla.

4. PUMPPAAMON JA VEDENJAKELUJÄRJESTELMÄN KÄYTETTÄVYYDESTÄ TOIMINTAVARMUUDEN KANNALTA

4.1 Käytetty vertailuperuste

Tämän tutkimuksen yhteydessä ei ollut mahdollista yksityiskohtaisen tarkasti saada selville vedenjakelujärjestelmän luotettavuusparametreja. Tarkka selvitys olisi johtanut Markovin prosessin tai simuloinnin käyttöön. Itse asiassa tämälntapainen tarkastelu on aina monidimensionaalinen prosessi, jossa dimensioita on yhtä monta kuin tarkasteltavia muuttujia. Muuttujia voivat olla esim. säiliökapasiteetti, pumppukapasiteetti, varavoima, verkoston kiertoyhteyksien määrä jne. Asiaa selventää alla oleva kuva.



Kuva 24. Toimintavarmuuden samantarvoisuus.

Tässä yhteydessä ei voitu mennä edellä kuvattuun monidimensionaaliseen tarkasteluun, vaan riittävänä tietona pidettiin sellaista, jonka avulla vaihtoehtoiset järjestelmät voitiin asettaa paremmuusjärjestykseen ja saada jonkinlainen kuva järjestelmän tehokkuudesta. Tällaiseksi tehokkuusindeksiksi valittiin järjestelmän käytettävyys. Koska käytettävyyskin on hankala tarkasti laskea, tyydyttiin tässä yhteydessä likimääräisarvoon. Likimääräisarvot laskettiin aivan samoin kuin järjestelmän luotettavuus, erona se, että komponentin rikkoontumistodennäköisyyden tilalle kaavoihin sijoitettiin komponentin käytettävyys A (∞) (vrt. liite VII.4.3).

4.2 Pumppaamon käytettävyydestä

4.2.1 Sähköhäiriöiden osuus

Kuten kohdassa 1.2.2.1 esitettiin, on sähköhäiriöiden keskimääräinen aikaväli 1 850 h ja keskimääräinen kesto 0,83 h. Em. arvojen perusteella voidaan päätellä, että pumppaamo on keskimäärin 3,9 h vuodessa toimimatta sähköhäiriön vuoksi.

Tuntimäärä tuntuu suhteellisen vähäiseltä, mutta silläkin on merkitystä. Asiaa voidaan tarkastella esim. seuraavan taulukon esittämällä tavalla:

Asukasluku	Tarvittava vesimäärä m ³ /vrk	Toimittamatta jäänyt vesimäärä m ³ /vrk
1 000	300	49
10 000	3 000	490
20 000	6 000	982
40 000	12 000	1 965
50 000	15 000	2 450

Taulukon arvoja laskettaessa on ominaiskulutukseksi oletettu 300 l/as. x vrk. Sarakkeessa 'toimittamatta jäänyt vesimäärä' ilmenevät arvot eivät ehkä anna oikeaa kuvaa asiasta, sillä kuluttajilla on tapana käyttää myöhemmin se vesimäärä, mikä heiltä häiriön aikana on jäänyt kuluttamatta. Näin on etenkin lyhytaikaisten jakeluhäiriöiden kyseessä ollen.

Sähköhäiriön haittojen eliminoimiseksi voidaan pumppaamolle hankkia varavoiman käyttömahdollisuus.

Varavoiman edullisuutta arvosteltaessa voidaan arvosteluperusteena käyttää esim. veden marginaalihintaa. Se on hinta, jonka varavoima maksaa jaettuna sillä vesimäärällä, joka varavoiman avulla saadaan toimitetuksi kuluttajille, siis: lisäkustannus jaettuna lisäveden määrällä. Eräillä alkuarvoilla laskien saatiin veden marginaalihinnaksi 4...7 mk/m³ yhdyskunnan koon mukaan.

Kuten aikaisemmin ilmeni, ei marginaalihintaa voi pitää tarkkana tarkastelutapana, koska se sisältää virhetekijöitä laskuperusteissaan. Sen vuoksi varavoiman tarpeellisuutta arvostettaessa on tarkasteltava vedenjakelujärjestelmää kokonaisuutena. Merkittävimpiä tekijöinä ovat tällöin ylävesisäiliön koko ja pumppaamoiden lukumäärä ja niiden kapasiteetit sekä vaadittava jakeluvarmuuden taso. Jos vedenjakelujärjestelmässä on riittävästi yläsäiliötilaa, on varavoima tarpeeton.

4.2.2 Muiden tekijöiden osuus

Pumppaamon toimintavarmuuteen vaikuttavat muut tekijät ovat: imuallas, pumppuyksikkö ja ns. muut häiriöt. Tässä yhteydessä on selvitetty yksityiskohtaisemmin imualtaan ja pumppuyksikön vaikutusta pumppaamon käytettävyyteen. Lähestymistapana on ollut esimerkkien laskeminen ja johtopäätösten teko saaduista tuloksista.

Laskuperiaatteena esimerkeissä on käytetty seuraavia seikkoja: kustakin pumppaamotyypistä on ilmoitettu imualtaiden ja pumppujen määrä sekä kapasiteetti. Kunkin pumpun on oletettu olevan kapasiteetiltaan yhtä suuri. Pumppuasemalla on tarkasteluhetkellä oletettu olevan mitoituskapasiteettia vastaava toimintatilanne, joten koko pumppuaseman on katsottu olevan epäkunnossa, ellei se ole voinut toimittaa mitoituslaitannetta vastaavaa virtaamaa. Tämä on teoreettinen tilanne, sillä pumppaamot mitoitetaan yleensä huippuvirtaamaa varten, joka esiintyy suhteellisen harvoin. Jokin virtaamatilanne laskuperustaksi täytyi kuitenkin valita ja mitoitusvirtaaman valinnassa on se etu, että näin lopputulosten keskinäiset erot tulevat selvemmin esille.

Seuraavassa on esimerkki laskentatavasta.

Pumppaamossa on kaksi imuallasta sekä kolme yhtä suurta pumppua, joiden kunkin kapasiteetti on puolet vaaditusta. Käytettävyyden määrittämiseksi saadaan seuraavat periaatteet: pumppaamo toimii, jos 1) vähintään kaksi pumppua toimii ja molemmat imualtaat ovat käytössä, 2) pienempi imuallas on poissa käytöstä ja toisen altaan

pumput toimivat. Tällöin käytettävyydet ovat:

$$P_{\text{pumppu}} = 0,99937$$

$$P_{\text{allas}} = 0,99977$$

$$P \text{ (vähintään kaksi pumppua ja imualtaat toimivat)} = 0,99954$$

$$P \text{ (pieni allas rikki ja kolme pumppua toimii)} = 0,00023$$

$$P \text{ (pieni allas rikki ja toisen altaan kaksi pumppua toimii)} = \underline{0,00000014}$$

$$\Sigma = 0,99977$$

Toisin sanoen pumppaamo on toimimatta keskimäärin 2,01 h vuodessa.

Seuraavassa taulukossa on eräiden pumppaamotyyppien käytettävyyksiä. Laskuperusteet ovat olleet samat kuin edellisessä esimerkissä. Esim. pumppaamotyyppimerkintä 1 I, 1 P, $p_k = K$ tarkoittaa, että pumppaamossa on yksi imuallas ja yksi pumppu, jonka kapasiteetti on sama kuin kokonaiskapasiteetti.

Taulukko Erityyppisten pumppaamojen käytettävyyksiä.

Pumppaamotyyppi	Pumppaamo ei toimi h/v	Vertailulukku	Käytettävyys
1I, 1 P, $p_k = 1 K$	7,50	0,27	0,999149
1I, 2 P, $p_k = 1/2K$	13,00	0,16	0,998516
1I, 3 P, $p_k = 1/2K$	2,01	1,00	0,999770
2I, 3 P, $p_k = 1/2K$	2,01	1,00	0,999770
1I, 4 P, $p_k = 1/3K$	2,01	1,00	0,999770
2I, 4 P, $p_k = 1/2K$	0,005	400	0,999999
3I, 3 P, $p_k = 1/2K$	0,019	105	0,999998
2I, 8 P, $p_k = 1/4K$	0,07	29	0,999992

Taulukossa olevat käytettävyyden arvot eivät paljon poikkea toisistaan, eivät absoluuttisesti eivätkä suhteellisesti. Pumppaamon tehokkuutta tässä yhteydessä onkin arvosteltu sen aikamäärän mukaan,

jonka pumppaamo on keskimäärin vuodessa toimimatta. Taulukossa esiintyvät vertailuluvut kuvaavat juuri tämän eron muutoksia. Havaitaan, että näin menetellen saadaan pumppaamoratkaisuille huomattavia eroja.

Tuloksista havaitaan, ettei pumppaamon tehokkuus tämän teoreettisluontoisen tarkastelun perusteella kasva pumppukapasiteettia lisättäessä, vaan myös imualtaiden määrää on lisättävä. Sopiva pumppujen määrä imuallasta kohti tuntuu olevan kaksi pumppua, vaikka ehdotonta ohjetta ei voida antaa. Vielä on muistettava, että tässä kohdassa imualtaiden merkitys on jonkin verran korostunut, koska likaantuneen imualtaan pesun ajankohta voidaan valita melko vapaasti. Toisaalta pumppaamalla pitäisi olla ainakin kaksi imuallasta, jotta se ei olisi täysin pysähdyksissä altaan pesun aikana. Näin on ehdottomasti silloin, kun kyseessä on alavesisäiliölaitos, jonka pumppaamon on toimittava joka hetki.

Mainittakoon vielä, että esimerkkipumppaamoille laskettiin käytettävyyden arvoja myös sellaisissa tapauksissa, joissa pohjaventtiiliä ei voinut nostaa imualtaasta ylös, vaan oletettiin, että imuallas tyhjennetään korjauksen ajaksi. Tulokseksi saatiin, että pumppaamojen epäkäytettävyys (= l-käytettävyys) kasvoi tapausten mukaan 4...8-kertaiseksi. Tästä voidaankin päätellä, että imuputki on aina suunniteltava siten, että se voidaan nostaa imualtaasta ylös muiden pumppujen toiminnan siitä häiriintymättä.

Esimerkkien pumppukapasiteetin muuttumisesta voidaan päätellä, että noin 1/3 ylikapasiteetti tuntuu riittävältä. Koska tässä yhteydessä on pumppaamoja tarkasteltu huippukulutuksen aikana, riittää ehkä pienempikin ylikapasiteetti, esim. 1/4 suurimmasta tarpeesta, kuitenkin vähintään yksi varapumppuyksikkö.

Esimerkeistä havaitaan myös, että rinnakkaisia komponentteja lisäämällä pumppuyksikkö saadaan varsin nopeasti toimimaan erittäin varmasti, ja näin ollen määrääväksi tekijäksi tulevat pumppaamon muut osat. Sähköhäiriön osuus 3,9 h/v tuntuu em. esimerkkeihin verrattuna jo melko suurelta. Myös muiden vikojen osuus 4 h/v on suurehko,

mutta sekin voidaan eliminoida rinnakkaisjärjestelmiä rakentamalla. Kuten aikaisemmin on tullut esille, ei tässä selvityksessä ole yksityiskohtaisesti selvitetty näitä vikoja, eikä niiden eliminoinnista voida antaa mitään ohjetta.

4.3 Vedenjakelujärjestelmän käytettävyydestä

4.3.1 Yleistä

Verrattuna pumppaamoista tehtyyn luotettavuusanalyysiin, on vedenjakelujärjestelmästä analyysin tekeminen huomattavasti hankalampaa. Vedenkulutuksen vaihtelu tekee vedenjakelujärjestelmän toiminnasta dynaamisen ja järjestelmän toiminnan luonne muuttuu vuorokauden eri aikoina. Luotettavuusanalyysia suoritettaessa olisi tarkan lopputuloksen selvittämiseksi laskelmat tehtävä monella erilaisella vedenkulutusarvolla ja saadut erilaiset lopputulokset vielä painotettavasiinä suhteessa, kuinka kauan em. tilanne kestää keskimäärin jakelujärjestelmän toimiessa. Näinkin menetellen analyysi on vielä hyvin vaikea suorittaa, koska jokaisella vedenkulutusarvolla on erilaisia toiminnallisia tilanteita huomattava määrä eikä käytettävissä oleva lähtöaineisto aina anna mahdollisuutta analyyttiseen tarkasteluun. Tarkastelutapana paras lieneekin järjestelmäsimulointi, johon tämän selvityksen yhteydessä ei voitu mennä.

Jäljempänä on kuitenkin esimerkinomaisesti laskettu eräille vedenjakelujärjestelmille käytettävyyden lukuarvoja. Tosin järjestelmän toimintaa on jouduttu huomattavasti yksinkertaistamaan ja ilmeisen mahdollisiakin tilanteita jättämään tarkastelun ulkopuolelle. Tämä tietenkin huonontaa lopputulosta, mutta selviä suuntaviivoja laistostyyppin toimintavarmuudesta voitaneen kuitenkin saada.

4.3.2 Eräiden vedenjakelujärjestelmän perustyyppien käytettävyydestä

Tässä kappaleessa on laskettu kolmen erilaisen vedenjakelujärjestelmän käytettävyys keskimääräisessä kulutustilanteessa. Vaihtoehdot ovat:

1. yläsäiliölaitos, jossa on yksi pumppaamo
2. alasäiliölaitos, jossa on yksi pumppaamo
3. alasäiliölaitos, jossa on kaksi pumppaamoa

Esimerkkiyhdykskunnan kooksi oletettiin 20 000 asukasta ja ominaiskulutukseksi 320 l/asukas x vrk. Tavanomaisten mitoitusperusteiden mukaan laskien tuli ensimmäisen vaihtoehdon vesitornin tilavuudeksi noin 3 000 m³, mistä 1 300 m³ on sammutusveden ja käyttöhäiriöiden varalta. Pumppaamon kapasiteetiksi arvioitiin 130 l/s. Vaihtoehdon 2 pumppaamon kapasiteetiksi oletettiin 220 l/s ja vaihtoehdossa 3 kumpikin pumppaamo oli kapasiteetiltaan 110 l/s.

Kussakin eri vaihtoehdossa oletettiin, että kulutustilanteena on keskimääräinen vedenkulutus eli 70 l/s.

Seuraavassa on esitetty esimerkkien laskenta:

Esimerkki 1

Palonsammutusta varten on vesisäiliötilaa keskimääräisen vedenkulutuksen aikana 2 200 m³. Koska pumppaamolla on 60 l/s ylikapasiteettia, mikä voidaan sammutustilanteessa ottaa käyttöön, on vielä arvioitu saatavan 600 m³ lisäkapasiteettia, joten yhteensä palonsammutusta varten on käytettävissä 2 800 m³. Tulipaloja esiintyy keskimäärin 5,1 kpl/v, ja paloja, jotka kuluttavat vettä yli 2 800 m³, esiintyy keskimäärin $7,9 \times 10^{-7}$ kpl/v. Edellä mainituilla arvoilla saadaan käytettävyydeksi tulipalojen suhteen noin 0,999999991 eli ≈ 1 .

Putkirikkojen varalta on jälleen käytettävissä 2 200 m³. Lisäksi on arvioitu, että pumppaamon ylikapasiteetista voidaan vielä laskea hyväksi noin 200 m³. Yhteensä on siten käytettävissä 2 400 m³ varavettä putkirikkojen varalta. Rikkoja sattuu keskimäärin 4 kpl/v, ja rikkoja, joissa kuluu vettä yli 2 400 m³, sattuu keskimäärin $4,1 \times 10^{-5}$ kpl/v. Käytettävyyden arvoksi putkirikkojen suhteen saatiin 0,9999999957 eli ≈ 1 .

Pumppaamovaurioiden suhteen on varavettä käytettävissä luonnolli-

sesti vain $2\,200\text{ m}^3$. Koska keskimääräinen kulutus on 70 l/s , saa häiriö kestää korkeintaan $8,35\text{ h}$, jotta järjestelmän toiminta ei häiriintyisi. Pumppaamossa oletetaan sovelletun rinnakkaisia pump-puyksiköitä siten, että λ :n arvo on $1/1631$ ja korjausajan $\mu = 1/1,5$. Häiriöitä sattuu siis keskimäärin vuodessa $5,37$, ja häiriöi-tä, jotka kestävät yli $8,35\text{ h}$, sattuu $0,021\text{ kpl/v}$. Näin saadaan käytettävyydeksi $0,99999648$; siis pumppaamo ei toimi keskimäärin 20 min. aikana vuodessa. Kokonaiskäytettävyydelle saadaan siten lähes sama arvo, $0,9999964793$.

Tämän yhteydessä ei ole päällekkäisiä, so. samanaikaisia häiriöta-pauksia otettu huomioon, mutta ne ovat suhteellisen harvinaisia. Havaitaan, että käytettävyyys on hyvin lähellä yhtä, ja voidaan teh-dä johtopäätös, että tämän tyyppinen jakelujärjestelmä on käytet-tävyydeltään hyvä.

Esimerkki 2

Esimerkissä 2 on kyseessä tyypillinen alasäiliöjärjestelmä, jossa koko järjestelmä toimii yhden pumppaamon varassa. Tämän vuoksi pumppaamo on oletettu varmistetun varavoimalla. Täten pumppaamon yhteinen vikataajuus ja keskimääräinen korjausaika muodostuvat seuraaviksi:

$$\lambda = 1/52560 \quad \text{ja} \quad \mu = 1/3$$

Pumppaamolla sattuu siis erittäin harvoin häiriöitä, mutta kor-jausaika on pitempi kuin esimerkissä 1. Koska pumppaamon kapasiteetti on 220 l/s ja keskimääräinen kulutus vain 70 l/s , jää 150 l/s häiriöiden varalle, mikä lienee riittävästi, ja järjestelmäs-sä on häiriö vain silloin, kun pumppaamo ei toimi. Käytettävyydek-si tulee $0,999943$, ts. systeemi on keskimäärin 30 min. vuodessa toimimatta.

Esimerkki 3

Tässä esimerkissä on jakelujärjestelmäksi oletettu alavesisäiliö-laitos, jossa on kaksi yhtä suurta pumppaamo, \dot{a} 110 l/s . Sellai-

nen tapaus, että kumpikin pumppaamo on poissa käytöstä, on niin harvinainen, ettei sitä tässä ole otettu huomioon.

Sen sijaan tapaukset, jolloin toinen pumppaamo on rikki ja jolloin on sammutustilanne tai putkirikko, on otettu huomioon.

Todennäköisyys sille, että toinen pumppaamo toimii ja toinen ei
 $= 1,14 \times 10^{-4}$.

Todennäköisyys sille, että on tulipalo ($1/\lambda = 1711$ h, $1/\mu = 3$ h)
 $= 1,75 \times 10^{-3}$.

Todennäköisyys sille, että em. tapahtumat eivät satu yhtä aikaa
 $= 0,9999998$.

Samoin laskien käytettävyys putkirikon suhteen on $A(\infty) = 0,99999665$.

Esimerkin 3 kokonaiskäytettävyys on näin ollen 0,999996 eli suuruusluokka on suurin piirtein sama kuin esimerkissä 1.

Edellä laskettujen esimerkkien tulokset riippuvat tietysti alkuarvojen valinnasta ja kulloisestakin vedenkulutustilanteesta. Jos vedenkulutusarvot muuttuvat, lopulliset tulokset muuttuvat myös huomattavasti. Sen vuoksi ei edellä laskettujen esimerkkien tuloksia suositella suoraan sovellettavaksi käytäntöön.

LÄHDELUETTELO

1. Vedenjakelujärjestelmän yleiset mitoitusohjeet. Kaupunkiliiton toimiston julkaisu B 34
2. Vesihuolto, RIL 1973
3. J. Ervamaa, J. Malmivuo: Todennäköisyyslaskennan ja luotettavuusteorian perusteet. INSKO 48-72
4. Murray R. Spiegel: Theory and problems of statistic, Schaum's outline series, Schaum publishing Co. New York
5. Arad N.: A method for the evaluation of the system and cost effectiveness of large multistage flash desalting plants. Rep R-1142, 255 pp., Plann. Res. Copp., Washington D.C. 1968
6. M. Abramowitz, I. Segun: Handbook of mathematical functions, Dover publications. Inc, New York
7. V. Saari: Vesilaitostoiminnan luotettavuus. Esitelmä Kaupunkiliiton kursseilla 19.10.1972
8. Jacques Tribut: The reliability of water supply systems from source to Consumer. IWSA: New York 1972
9. Jaakko Malmivuo: Luotettavuustekniikan sanastoa, ERT n:o 2-3, 1971
10. Rao, H.S., Dwibree, J.R. and Benzvi, R.: Extended period simulation of water distribution networks. Under OWRR contract numbers 14 - 31 - 001 - 9027. Project number C - 4164. 1974

SUOMEN KAUPUNKILIITTO
Dipl.ins. Jouko Liimatainen

VEDENJAKELUJÄRJESTELMÄN AUTOMAATTINEN VALVONTA JA OHJAUS

Lähtötilanne

Vedenjakelujärjestelmä koostuu pumppaamoista, putkiverkosta sulkuventtiileineen ym. laitteineen sekä vesisäiliöistä. Tällä hetkellä valvotaan vesilaitoksilla vedenjakelua lähinnä vesimäärän mittauksilla veden syöttöpisteissä ja vesisäiliöiden vedenpinnan korkeustason havaitsemisella. Paineoloja tarkkaillaan tilapäisillä mittauksilla. Vesinäytteitä otetaan määräajoin verkoston eri osista ja säiliöistä. Paineolojen ja vedenlaadun häiriöiden rekisteröinti perustuu kuitenkin pääosin kuluttajien valituksiin. Eräillä vesilaitoksilla on pumppaamojen kaukovalvontalaitteistoja, paineen-tarkkailupisteitä ym. vähäisessä määrin. Selvitystä koko vedenjakelujärjestelmän automaattisesta valvonnasta ja ohjauksesta ei ainakaan Suomessa ole. Aihe on tulossa esille kansainvälisen vesilaitosjärjestön vuonna 1976 pidettävässä kongressissa.

Vedenpuhdistuslaitosten prosessinohjausta varten on kehitetty ja kehitteillä ohjelmistoja. Yleisesti ottaen lisääntyy automatisoinnin tarve vesilaitostoiminnassakin nopeasti henkilökuntapulan - kuten nyt näyttää - sekä vaatimusten kasvun myötä. Vesi on tärkein elintarvike, ja sen jakelun hygieenisuus- ja käyttövarmuusky-symykset tulevat ajan mukana entistä tärkeämmiksi.

Tavoite

Ääritapauksissa valvonta- ja ohjaussysteemi käsittää seuraavat päätoiminnot:

- paineolojen tarkkailu ja säätö
- pumppaamojen ja säiliöiden tehokas käyttö, taloudellisuus
- vedenlaadun valvonta
- kulutustarkkailu ja laskutus
- putkirikkojen paikallistaminen

- verkoston vedenjohtavuuden tarkkailu
- yhteydet vedenpuhdistusprosessiin ja viemärlaitostoimintaan
- dokumentointi

Systeemi tulisi luoda koko tarvetta silmällä pitäen. Käytännössä ilmeisesti mittalaitteiden, tiedonvälitysmenetelmien ja ohjauslaitteistojen kustannuskysymykset karsivat osan edellä olevista toiminnoista. Myös voi tulla käytännössä kyseeseen ainoastaan valvontalaitteiston kehittäminen.

Aikatavoitteena voidaan pitää seuraavaa:

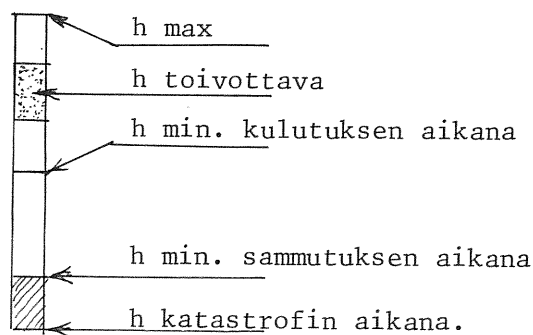
- 1...2 vuoden kuluessa: Määritetään automatisoinnin edellytykset, valvontalaitteistojen laatu ja tarve sekä ohjausohjelmille asetettavat vaatimukset yksityiskohtaisesti.
- 2...5 vuoden kuluessa: Annetaan vedenjakelujärjestelmän suunnitteluohjeet, joissa otetaan huomioon varautuminen automaatioon ja suoritetaan tuotekehittely laitteistojen osalta. Viimeistellään ohjelmat.
- 5...8 vuoden kuluessa: Pyritään aikaansaamaan todellinen vedenjakelujärjestelmän automatisoinnin testaus.
- 8...10 vuoden kuluessa: Järjestelmän käyttöönotto mahdollista.

Vaatimukset

Paineolojen tarkkailu ja säätö

Vedenjakelujärjestelmän ohjaus lienee parhaiten toteutettavissa paineiden avulla. Tunnettaessa riittävästi paineita eri pisteissä voidaan senhetkinen virtaustilanne määrittää. Tämä edellyttää tietenkin järjestelmän rakenteen tuntemista ja esim. vuosittain tapahtuvaa kalibrointia mm. karkeuskertoimien suhteen, ellei tätäkin automatisoida.

Painetasokuvaus:



h max on verkoston ja laitteiden kestävyysmäärä. Arvoa ei saa ylittää.

h toivottava määräytyy kulutuspisteiden korkeustason, putkivastusten jne. perusteella. Se voidaan ilmoittaa jokaisessa vesijohdoverkon pisteessä.

h min on erilainen normaalin kulutustilanteen aikana ja sammutusveden oton aikana. Näiden alittaminen tulee näkyä valvontajärjestelmässä eriasteisina hälytyksinä.

Paineen laskeminen aina 0-tasoon asti tulee olla rekisteröitävissä katastrofitilanteessa.

Ohjausta suoritettaessa paineet tulisi rekisteröidä 1...3 min välein ja virtaamatilanne laskea paineiden määrätystä muuttumisasteesta riippuen. Osan paineenmittauskohdista on voitava olla pois kytkettyinä.

Joko pelkästään ohjaavien paineenmittauspisteiden avulla tai niitä välimittauksilla täydentäen voitaisiin suorittaa putkirikkojen paikallistaminen. (Tarkkuustoivomus on n. \pm 200 m).

Vesimäärien tarkkailu

Vedenjakelujärjestelmässä tulee olla vesimäärän mittareita ainakin kaikissa sisäänsyöttökohdissa. Myös vesisäiliöiden käyttötilanne on tiedettävä joko yksinomaan vedenpinnan vaihteluista tai lisäksi ve-

simittareiden avulla. Vesimäärien rekisteröintiä tarvitaan myös putkistojen karkeuskertoimien määrittelyssä. Mittaus voi olla kiinteissä mittauspisteissä tapahtuvaa tai siirrettävillä, lähinnä magneettisilla vesimittareilla suoritettavaa.

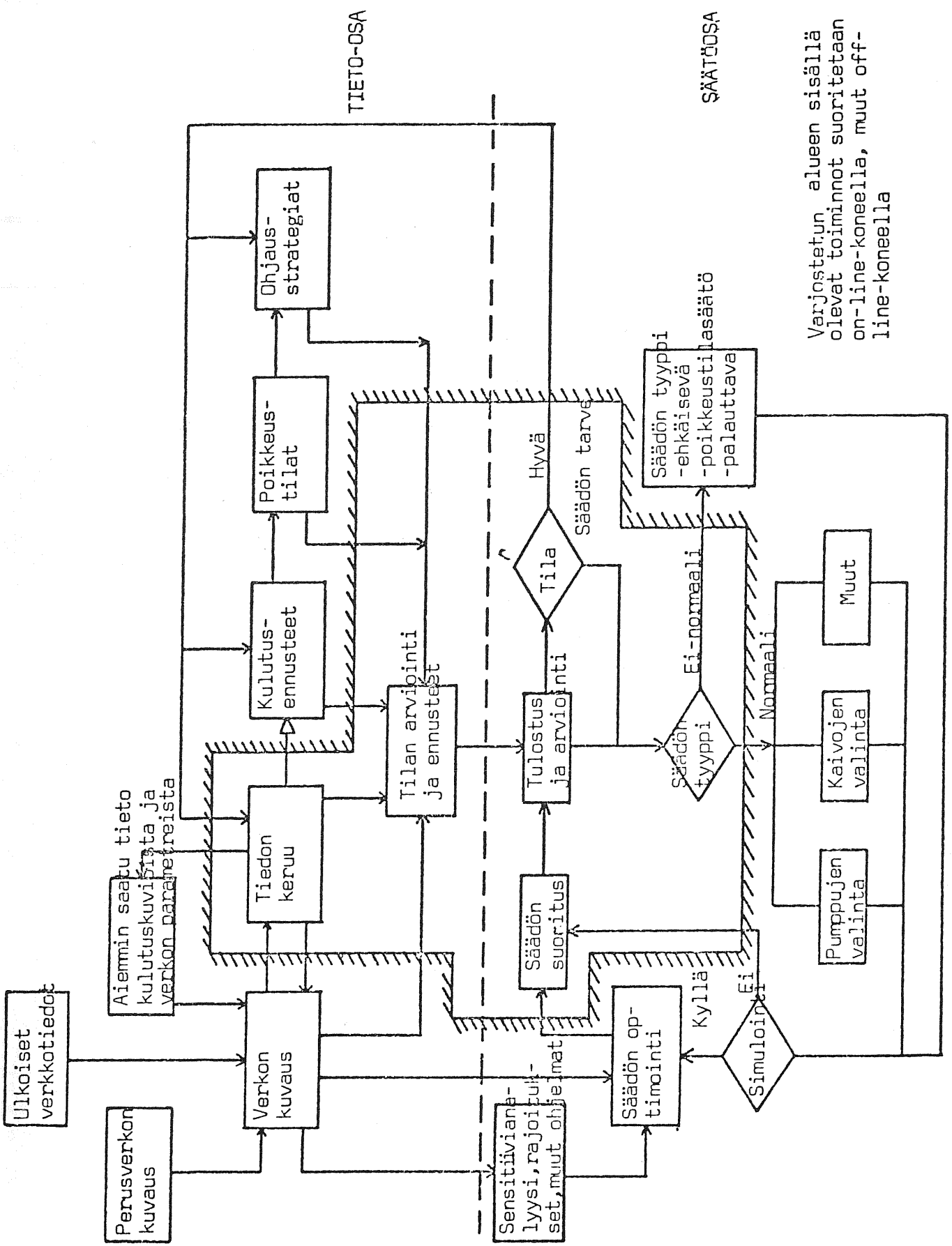
Kiinteistöjen vedenkulutuksen kaukomittausta varten on ulkomailla kehitetty menetelmiä. Tulosten lähettäminen voi tapahtua esimerkiksi puhelinverkon välityksellä, radioteitse, rakennusten ulkoseinään asennetuista liittimistä jne. Jos vesijohtolinjojen yhteyteen rakennettaisiin kaapeliverkko, voisi tulosten lähettäminen tapahtua parhaiten tätä tietä. Kulutustietoja olisi mahdollista käyttää hyväksi välittömästi vedenjakelun ohjaamisessa. Kaapeliverkosta olisi hyötyä myös muoviputkilinjojen paikallistamisessa ja etenkin tietysti ohjausviestien yms. välittämisessä.

Vedenlaadun tarkkailu

Veden laatu on läheisessä riippuvuussuhteessa verkoston virtaamiin ja kuntoon. Hetkellisen suuri vedenotto tai putkirikko sekoittaa tunnetusti veden laajalla alueella lähes käyttökelvottomaksi. Tämän vuoksi tarvitaan suurten virtausnopeuksien kontrollointia ja tarvittaessa rajoitusta. Sama koskee virtaussuuntia. Veden sameuden mittaaminen olisi ilmeisen tehokas keino. Toisaalta liian pienet virtausnopeudet aiheuttavat huonon veden vaihtuvuuden ja pilaavat veden laadun. Myös tätä on tarkkailtava veden vaihtumisnopeuden ja/tai klooripitoisuuden tms. perusteella. Hiljaiseen virtaukseen liittyy putkiston jäätymisvaara. Sitä voitaisiin tarkkailla verkostoon asennettavilla lämpötilamittareilla.

Ohjauskaavio

Alustava vedenjakelujärjestelmän automaattisen ohjauksen malli on oheisessa kaaviokuvassa /10/.

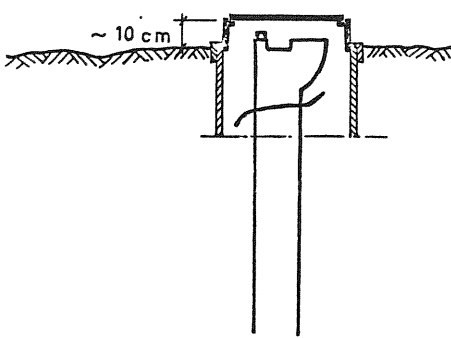


Varjostetun alueen sisällä olevat toiminnot suoritetaan on-line-koneella, muut off-line-koneella

OHJAUKSEN AUTOMATISOINNIN PERIAATEKAAVIO

ESPOON KAUPPALAN
VESILAITOS
Verkkotoimisto

Vesijohtovuodon selvitys

	Verkkopiiri	Vuosi 1971	Viikko n:o 29/1
Vuoto- ilmoitus	Vuodon osoite Soukantie, Soukka		<input checked="" type="checkbox"/> Katujohdo <input type="checkbox"/> Talojohdo
	Ilmoituksen vastaanottaja Vettenranta	Vastaanottoaika päiväys ja klo 12.7. 17.00	Ilmoituksen tekijä Hannula
Korjous- toimen- piteet	Vuoto esitetty (päiväys ja klo) 12.7. 17.40	Korjityö alkoi (päiväys ja klo) 12.7. 18.45	Vuotovesimäärä m ³ 80
	Putken korjaus alkoi (päiväys ja klo) 12.7. 19.25	Johde otettiin käyttöön (päiväys ja klo) 12.7. 19.55	Huuhdeltu vesimäärä m ³ 2
	Korjaus (työryhmän kplto, käytetyt putkenosat yms.) 1 + 2, pakettiauto ja Vamma-kaivuri.		
	1 kpl paloposti		
Vuoto- kohdan yleiset tiedot	Putki: läpim. 100 mm	seinämä vahvuus mm	liitin
	Kallio	aines V	asennus vuosi 1968
	Putkikanavan selostus (kanaväytteen laatu yms.) Kalliokanaali, sepeli-soratäyte	Pintapeite Sepeli	syvyys maanpinnasta putken yläreunaan 1,95
			Roudan syvyys Ilman lämpötila C° 20
Vuodon syy.	Vuodon todennäköinen syy Huoltotraktori katkaisi palopostin.		
Vuodon seuraukset	Ilman vettä ollut tilot ym. (määrä ja tunteja) 5-kerrostaloa 2 tuntia 15 min.		
	Muut haitat (vesivahingot työvahingot) Kävelytietä rikkoutui n. 100 m matkalta.		
Piirros putken vuotokohdasta		Huomautuksia	
		Palopostin runko oli aivan kannen tasolla ja vaarassa tällaiselle tapaukselle. Paikalle vaihdettiin "malli Espoo" ja saatiin runkoputkea hyhennettyä ja palopostin kansikin tien pinnan alle.	
		Päiväys ja selvityksen laatijan allekirjoitus	
		12.7.71 G. A	

YHTEENVETOALUKKO PUMPPAMÖILLÄ SATUNEISTA HÄIRIÖISTÄ

N:o	aika (vuotta)	Sähköhäiriö		Pumppuyksikkö - Pohjaveintiili		Pohjaveintiili		Imultaan pesu tms.		Muut viat		Automatiikka		Määräaikaishuolto	
		keskim. vikaväli (h)	keskim. häiriöaika (h)	keskim. vikaväli (h)	keskim. korj.aika (h)	keskim. vikaväli (h)	keskim. korj.aika (h)	keskim. vikaväli (h)	keskim. korj.aika (h)	keskim. vikaväli (h)	keskim. korj.aika (h)	keskim. vikaväli (h)	keskim. korj.aika (h)	keskim. vikaväli (h)	keskim. korj.aika (h)
1	2,25	1 516	3,7	39 420	0,5	> 39 420	-	> 19 710	-	9 855	1,0	19 710	0,5	-	-
2	6,58	1 130	0,54	-	-	> 173 000	-	28 833	2,0	-	-	-	-	28 833	1,87
3	7,75	1 835	0,59	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	2,33	552	1,33	> 50 326	-	> 50 326	-	> 33 550	-	> 16 775	-	5 104	2,77	-	-
5	3,50	7 665	2,25	61 320	16,0	> 61 320	-	7 665	3,0	30 660	2,0	> 30 660	-	-	-
6	2,00	2 920	1,38	8 800	3,32	> 35 040	-	> 17 520	-	3 504	1,0	> 17 529	-	-	-
7	5,75	1 028	0,42	9 150	12,7	28 783	4, 14	15 111	3,7	8 395	2,7	> 50 370	-	100 740	2,0
8	3,83	> 33 550	-	22 367	-	67 101	-	11 184	-	> 16 775	-	> 16 775	-	-	-
9	3,50	-	-	> 91 980	-	8 760	1,0	8 760	1,0	-	-	-	-	4 380	-
10	7,67	3 359	0,28	19 197	25,5	134 378	264,0	> 134 378	-	33 594	3,0	> 67 189	-	38 394	98,3
11	7,58	4 152	0,56	119 386	7,8	119 386	12,0	9 495	5,0	66 462	2,9	> 66 400	-	-	-
12	6,58	3 604	0,36	173 001	24,3	57 667	8,5	6 407	7,4	19 223	9,1	> 57 641	-	-	-
13	2,17	1 116	0,62	9 612	2,28	56 940	12,0	56 940	64,0	18 980	24,0	> 18 980	-	28 470	156,0
14	9,0	-	-	70 080	31,9	157 680	43,0	13 140	-	39 420	66,0	> 78 840	-	37 666	500,0
15	2,58	1 741	0,44	67 881	4,0	> 67 881	-	45 260	1,0	7 542	0,9	> 22 653	-	-	-
16	2,58	2 057	0,60	113 135	0,1	> 113 135	-	> 22 627	-	22 627	-	11 314	0,3	-	-
17	2,58	> 22 653	-	22 630	141,3	> 67 881	-	> 22 653	-	> 22 653	-	> 22 653	-	16 970	566,0
18	2,58	3 771	0,40	45 260	2,7	> 45 254	-	> 22 653	-	> 22 653	-	> 22 653	-	-	-
19	4,75	1 300	0,24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	1,67	4 865	0,28	14 599	1,0	> 14 599	-	> 14 599	-	> 14 599	-	> 14 599	-	-	-
21	1,88	2 745	0,28	6 600	6,2	> 32 938	-	16 469	2,0	16 498	2,0	-	-	-	-
22	2,78	1 218	1,41	12 155	-	> 35 040	-	> 35 040	-	> 24 353	-	> 24 353	-	-	-
23	4,75	3 783	2,65	74 900	4,2	> 380 000	-	10 403	6,0	4 623	5,7	-	-	-	-
24	4,75	41 610	8,0	41 610	50,0	> 41 610	-	> 41 610	-	6 935	3,7	-	-	-	-

tunti- kulutus- kerroin	paikkakuntaluokka			Yhdistetty
	k	I	II	
0.096	0.052		0.010	0.020
0.264	0.090	0.016	0.037	0.046
0.432	0.092	0.160	0.091	0.116
0.600	0.063	0.113	0.128	0.102
0.768	0.092	0.053	0.075	0.073
0.936	0.081	0.068	0.087	0.080
1.104	0.113	0.156	0.168	0.146
1.272	0.117	0.286	0.260	0.224
1.440	0.179	0.130	0.101	0.136
1.608	0.063	0.017	0.030	0.035
0.1776	0.027	0.002	0.010	0.012
1.944	0.015		0.002	0.005
2.112	0.009		0.001	0.003
2.280	0.004			0.001
2.448	0.003			0.001

Taulukossa on esitetty vuorokautisten tuntikertoimien diskreettiset jakautumat paikkakunnan koon mukaan luokiteltuna.

VII TODENNÄKÖISYYSLASKENNAN JA LUOTETTAVUUSTEORIAN
MENETELMIÄ (lähde /3/)

VII.0 Yleistä

Tässä kappaleessa on pintapuolisesti esitelty todennäköisyyslaskennan ja luotettavuusteorian perusteita. Tarkkaan esitykseen tässä yhteydessä ei katsottu olevan syytä mennä, koska aihe on varsin laaja ja monitahoinen. Esitetyt perusteet ovat miltei sellaisenaan lähteestä /3/, johon asiasta enemmän kiinnostunut lukija voi tutustua. Luotettavuustekniikan määritelmiä ja sanastoa on esitetty liitteessä IX.

VII.1 Todennäköisyyden määritelmä

Todennäköisyysteorian käytännöllisissä sovellutuksissa määritellään tapahtuman A todennäköisyys usein sen suhteellisen esiintymistäajuuden perusteella. Jos tietty koe toistetaan n kertaa ja tapahtuma A esiintyy tällöin n_A kertaa, määritellään tapahtuman A todennäköisyys sen suhteellisen esiintymistäajuuden n_A/n raja-arvona seuraavasti:

$$P(A) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n_A}{n} \quad (\text{VII.1.1})$$

Todennäköisyyden aksiomaattinen määrittely on seuraava: Tapahtuman A todennäköisyys $P(A)$ on tähän tapahtumaan liitettävä luku, jolla on seuraavat ominaisuudet:

$$P(A) \geq 0$$

Varman tapahtuman todennäköisyys on yksi

$$P(S) = 1$$

Jos A ja B ovat toisensa pois sulkevia tapahtumia, niin

$$P(A + B) = P(A) + P(B) \quad (\text{VII.1.2})$$

Jos tapahtumat A_1, A_2, \dots, A_n ovat toisensa pois sulkevia tapahtumia, niin

$$P(A_1 + A_2 + \dots + A_n) = P(A_1) + P(A_2) + \dots + P(A_n)$$

VII.2 Todennäköisyyyslaskennan peruslakeja

Todennäköisyyden aksiomaattiseen määrittelyyn perustuen voidaan osoittaa oikeiksi joukko todennäköisyyyslaskennan perusyhtälöitä, jotka ovat käyttökelpoisia tapahtumakombinaatioiden todennäköisyyksiä laskettaessa.

Mahdottoman tapahtuman todennäköisyys on nolla.

$$P(\emptyset) = 0 \quad (\text{VII.2.1})$$

Jos \bar{A} on tapahtuman A komplementti

$$P(\bar{A}) = 1 - P(A) \quad (\text{VII.2.2})$$

Olkoon tapahtuma A tapahtuman A osatapahtuma, ts. $A \subset B$. Silloin

$$P(B) \geq P(A) \quad (\text{VII.2.3a})$$

$$= P(A) + P(\bar{A}B) \quad (\text{VII.2.3b})$$

Jos tapahtumat A ja B eivät ole toisensa pois sulkevia, saadaan

$$P(A + B) = P(A) + P(B) - P(AB) \quad (\text{VII.2.4})$$

Yhtälössä (VII.2.4) otetaan huomioon molempien tapahtumien samanaikainen esiintyminen. Tapahtumien A ja B samanaikainen esiintyminen sisältyy tapahtumaan $A + B$, mutta summa $P(A) + P(B)$ sisältää tapahtuman AB todennäköisyyden kaksinkertaisena, josta syystä suoritetaan viimeisen termin mukainen korjaus.

VII.3 Ehdollinen todennäköisyys, riippumattomat tapahtumat

Tarkastellaan tapahtumaa AB. Todennäköisyyden $P(AB)$ laskemiseksi tulee olla selvillä siitä, miten se, että tiedetään toisen tapahtumista esiintyvän, vaikuttaa toisen esiintymistodennäköisyyteen. Tapahtuman B todennäköisyyttä, kun tiedetään tapahtuman A esiintyvän, sanotaan tapahtuman B ehdolliseksi todennäköisyydeksi ehdolla A. Se määritellään, kun $P(A) > 0$ yhtälöllä

$$P(B|A) = \frac{P(AB)}{P(A)} \quad (\text{VII.3.1})$$

Yhtälöä (VII.3.1) voidaan havainnollistaa todennäköisyyden suhteel-

liseen esiintymistäajuuteen perustuvaa määrittelyä hyväksi käyttäen. Suoritetaan määrätty koe n kertaa. Jos tapahtumat A , B ja AB esiintyvät n_A , n_B ja n_{AB} kertaa, on yhtälön (VII.1.2) mukaan

$$P(A) \approx \frac{n_A}{n}; \quad P(B) \approx \frac{n_B}{n}; \quad P(AB) \approx \frac{n_{AB}}{n}$$

ja

$$P(B|A) = \frac{P(AB)}{P(A)} \approx \frac{\frac{n_{AB}}{n}}{\frac{n_A}{n}} = \frac{n_{AB}}{n_A}$$

Suhteelliseen esiintymistäajuuteen perustuvassa tarkastelussa on tapahtuman B todennäköisyys ehdolla A siis

$$P(B|A) \approx \frac{n_{AB}}{n_A} \quad (\text{VII.3.2})$$

mikä merkitsee, että havaintoja tehtäessä jätetään kokonaan huomioon ottamatta ne tulokset, joissa tapahtuma A ei esiinny ja tapahtuman B esiintymislukumäärää verrataan tällä tavoin rajoitettuun havaintojen kokonaislukumäärään.

Tapahtumien A ja B ollessa toisensa pois sulkevia, jolloin $P(AB) = 0$, on

$$P(B|A) = P(A|B) = 0 \quad (\text{VII.3.3})$$

Tapahtuman B ollessa A :n osatapahtuma, $B \subset A$, $AB = B$ ja

$$P(B|A) = \frac{P(B)}{P(A)} \geq P(B) \quad (\text{VII.3.4})$$

Jos $A \subset B$, niin $AB = A$ ja

$$P(B|A) = \frac{P(A)}{P(A)} = 1 \quad (\text{VII.3.5})$$

Kaksi tapahtumaa A ja B ovat toisistaan riippumattomia, jos

$$P(AB) = P(A) \cdot P(B) \quad (\text{VII.3.6})$$

Määritelmän ja yhtälön (VII.3.6) perusteella on tällöin

$$\begin{aligned} P(A|B) &= P(A) \\ P(B|A) &= P(B) \end{aligned} \quad (\text{VII.3.7})$$

VII.4 Luotettavuusteorian perusteita

VII.4.1 Luotettavuus ja käytettävyys

Jonkin toimivan yksikön luotettavuus määritetään todennäköisyydeksi, jolla yksikkö toimii ajan t . Luotettavuus on ajan t funktio ja pienenee siirryttäessä suurempiin ajan arvoihin. Luotettavuusfunktiota merkitään tavallisimmin tunnuksella $R(t)$.

Yksikön käytettävyydellä, jota merkitään $A(t)$ tarkoitetaan todennäköisyyttä sille, että yksikkö toimii hetkellä t . Yksikön käytettävyys ilmaisee siten yksikön keskimääräisen toiminta-ajan suhteen kokonaisuikaan.

Vikakertymä- eli vikajakautumafunktio $F(t)$ ilmaisee todennäköisyyden sille, että yksikkö vioittuu ennen hetkeä t . Jos merkitään yksikön vioittumishetkeä (= vioittumiseen kuluvaa aikaa) $t = \tau$, niin

$$F(t) = P(\tau < t) \text{ ja vikatiheysfunktio on} \quad (\text{VII.4.1.1})$$

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (\text{VII.4.1.2})$$

Vikataajuusfunktio $z(t)$ määritellään seuraavasti: $z(t)$ on vikaan kuluvan ajan ehdollinen tiheysfunktio, kun yksikkö ei ole vioittunut ennen hetkeä t . Yksikkö, joka on toiminut hetkeen t asti, vioittuu seuraavalla lyhyellä aikavälillä dt todennäköisyydellä $z(t) dt$. Funktioiden $z(t)$, $F(t)$, $f(t)$, vikataajuuden ja yksikön luotettavuuden väliset riippuvuudet voidaan esittää matemaattisesti.

Matemaattisten yhteyksien johtoa ei tässä katsottu aiheelliseksi esittää, vaan viitataan lähteeseen /3/. Lopputulokset ovat seuraavanlaisia:

$$F(t) = 1 - e^{-\int_0^t z(x) dx} \quad (\text{VII.4.1.3})$$

ja vastaavasti

$$R(t) = e^{-\int_0^t z(x) dx} \quad (\text{VII.4.1.4})$$

Funktiota $z(t)$ voidaan estimoida yksiköistä saatujen käyttökokemusten tai koetulosten perusteella. Olkoon N kappaletta samanlaisia yksiköitä asetettuna ikäkokeeseen. Niiden yksiköiden luku, jotka eivät vioitu ennen hetkeä t , olkoon $n(t)$. Jos Δt on riittävän pieni ja N riittävän suuri, niin

$$F(t) \approx 1 - \frac{n(t)}{N} \quad (\text{VII.4.1.5})$$

$$f(t) \approx \frac{n(t) - n(t + \Delta t)}{N \Delta t} \quad (\text{VII.4.1.6})$$

$$z(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \approx \frac{n(t) - n(t + \Delta t)}{N \Delta t} \frac{N}{n(t)} \quad (\text{VII.4.1.7})$$

$$\approx \frac{n(t) - n(t + \Delta t)}{\Delta t n(t)} \quad (\text{VII.4.1.8})$$

$$z(t) \approx \frac{\Delta n}{\Delta t n(t)} \quad (\text{VII.4.1.9})$$

Yhtälössä (VII.4.1.9) n on aikavälillä $(t, t + \Delta t)$ syntyvien vikojen lukumäärä.

Määriteltäessä kokeellisesti vikataajuusfunktioita, verrataan yhtälön (VII.4.1.9) mukaisesti aikayksikössä syntyvien vikojen lukumäärää niiden yksiköiden lukumäärään, jotka vielä ovat jäljellä. Tästä johtuu ehdollista todennäköisyyttä ilmaisevan suureen $z(t)$ kutsuminen vikataajuudeksi.

Vikataajuuden voidaan olettaa olevan vakio käyttöjakson aikana.

Merkitään

$$z(t) = \lambda$$

Yhtälöihin (VII.4.1.3) ja (VII.4.1.4) sijoittamalla saadaan

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (\text{VII.4.1.10})$$

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \lambda e^{-\lambda t} \quad (\text{VII.4.1.11})$$

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (\text{VII.4.1.12})$$

Vikatiheysfunktio ja luotettavuusfunktio ovat eksponenttikäyriä. Yksikön vikaan kuluvan ajan sanotaan olevan eksponentiaalisesti jakautunut.

Eksponentiaalijakautuma on paljon käytetty luotettavuusteoriassa. Sen asema johtuu siitä, että eksponentiaalijakautuma on fysikaalisesti katsoen luonnollinen ja yksinkertainen käyttää. Melkein kaikki luotettavuusteoreettiset probleemat ovat helpoimmin ratkaistavissa, kun vikaan kuluva ajan oletetaan noudattavan eksponentiaalijakautumaa. Perussyy tehtävien yksinkertaistumiseen on, että yksikön vioittumisajan ollessa eksponentiaalisesti jakautunut todennäköisyys sille, että yksikkö toimii vioittumatta aikavälin $(t, t + \tau)$, on riippumaton hetkestä t ja sitä edeltäneestä historiasta ja riippuu vain aikavälin τ pituudesta. Ts. jos tiedetään yksikön toimivan tietyllä hetkellä, sen tulevaisuus on menneisyydestä riippumaton.

VII.4.2 Keskimääräinen vioittumisaika

Eräs yksikön luotettavuutta kuvaava parametri on keskimääräinen vioittumisaika m_F , jolla tarkoitetaan yksikön vioittumiseen kuluva ajan odotusarvoa:

$$m_F = \int_0^{\infty} t f(t) dt \quad (\text{VII.4.2.1})$$

Jos kyseessä on eksponentiaalisesti jakautunut suure, niin keskimääräinen vioittumisaika on tällöin

$$m_F = 1/\lambda \quad (\text{VII.4.2.2})$$

$$\lambda = \text{vikataajuus}$$

Usein ollaan kiinnostuneita aikavälistä, joka on paljon lyhyempi kuin keskimääräinen vioittumisaika

$$t \ll m_F \quad (\text{VII.4.2.3})$$

Tällöin voidaan luotettavuuden laskemiseen käyttää likimääräiskaavaa

$$R(t) \approx 1 - \frac{t}{m_F} \quad (\text{VII.4.2.4})$$

VII.4.3 Käytettävyyden laskemisesta

Voidaan osoittaa, että käytettävyyden funktio $A(t)$ lähenee nopeasti raja-arvoa

$$A(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t) \quad (\text{VII.4.3.1})$$

$$\text{jolloin } A(\infty) = \frac{m_F}{m_F + m_R} \quad (\text{VII.4.3.2})$$

$$m_R = \text{keskimääräinen korjausaika}$$

Jos sekä vikaan kuluva aika että korjausaika ovat eksponentiaalisesti jakautuneet,

$$A(\infty) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (\text{VII.4.3.3})$$

$1/\mu$ on keskimääräinen korjausaika ja $1/\lambda$ keskimääräinen vikaan kulunut aika. Kun tehdään sijoitukset, palaututaan kaavaan (VII.4.2.2)

Käytännössä on useimmiten

$$m_F \gg m_R \quad (\text{VII.4.3.4})$$

$$\text{jolloin } A(\infty) \approx 1 - \frac{m_R}{m_F} \quad (\text{VII.4.3.5})$$

VII.5 Järjestelmän luotettavuus

VII.5.1 Sarjajärjestelmä

Järjestelmän sanotaan olevan luotettavuusmielessä sarjajärjestelmä, jos minkä tahansa sen yksikön vioittuminen aiheuttaa järjestelmän

vioittumisen. Sarjajärjestelmän toiminta edellyttää siis sen kaikkien yksiköiden toiminnan.

Jos yksiköiden toiminta on toisistaan riippumaton tapahtuma, voidaan luotettavuus laskea kaavasta:

$$R(t) = \prod_{i=1}^n P(X_i) \quad (\text{VII.5.1.1})$$

X_i = yksikkö i toimii

Sarjajärjestelmän vikataajuusfunktio on siis sen yksiköiden vikataajuusfunktioiden summa.

$$Z(t) = \sum_{i=1}^n Z_i(t) \quad (\text{VII.5.1.2})$$

VII.5.2. Rinnakkaisjärjestelmä

Järjestelmän sanotaan olevan luotettavuusmielessä rinnakkaisjärjestelmä, jos järjestelmä vioittuu vain, kun sen kaikki yksiköt vioittuvat. Luotettavuus voidaan ilmaista kaavana:

$$R(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)] \quad (\text{VII.5.2.1})$$

VII.5.3 $\binom{n}{k}$ -järjestelmä

Järjestelmää sanotaan $\binom{n}{k}$ -järjestelmäksi, jos järjestelmä toimii, kun vähintään k kappaletta sen n :stä yksiköstä toimii. Edellisessä luvussa esitettyä rinnakkaisjärjestelmää on siten pidettävä eräänä $\binom{n}{k}$ -järjestelmän erikoistapauksena, jossa k :lla on arvo 1. Toisaalta jos k on yhtä suuri kuin n , on kysymyksessä sarjajärjestelmä. Sarja- ja rinnakkaisjärjestelmä voidaan siis käsittää $\binom{n}{k}$ -järjestelmän erikoistapauksiksi.

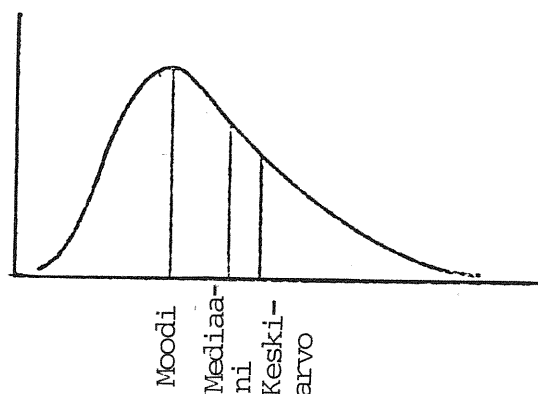
Tarkastellaan tapausta, jossa kaikki yksiköt ovat samanlaisia ja toisistaan riippumattomia. Olkoon yksikön luotettavuus $p(t)$. Todennäköisyys sille, että se ei toimi, on $q(t) = 1 - p(t)$. Täsmälleen k kappaletta n :stä yksiköstä toimii todennäköisyydellä

$$P_k(t) = \binom{n}{k} p^k(t) q^{n-k}(t) \quad (\text{VII.5.3.1})$$

VII.6 Luotettavuusjakautumien matemaattinen muoto

VII.6.0 Yleistä

Tähän kohtaan on katsottu aiheelliseksi ottaa mukaan todennäköisyysjakautumien yleisimpien parametrien määritelmiä. Kuvassa 1 on esitetty tyypillinen vino jakautuma. Havaitaan, että sen moodi, mediaani ja keskiarvo poikkeavat kaikki toisistaan. Symmetriselle jakautumalle, esim. normaalijakautumalle, ne ovat kaikki samassa pisteessä.



Kuva 1. Tyypillinen vino jakautuma.

Seuraavaan on luettelomaisesti kerätty joukko tyypillisimpiä jakautumia määritteleviä parametreja:

$$\text{Keskiarvo } \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (\text{VII.6.1.1})$$

x_i = havainnon arvo

n = havaintojen lukumäärä

$$\text{Harmoninen keskiarvo } H = n / \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i} \quad (\text{VII.6.1.2a})$$

tai

$$\frac{1}{H} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{VII.6.1.2b})$$

Momentit:

$$x^r = \frac{\sum x_i^r}{n} = r:s \text{ momentti} \quad (\text{VII.6.1.3})$$

Jos $r = 1$, saadaan keskiarvo

$$m_r = \sum (x_i - \bar{x})^r / n = r:s \text{ momentti keskiarvon suhteen.}$$

$$\text{Jos } r = 2, \text{ saadaan tulokseksi varianssi.} \quad (\text{VII.6.1.4})$$

Jos kyseessä on luokiteltu aineisto, niin

$$x^r = \sum f_i (x_i)^r / n \quad \text{ja} \quad (\text{VII.6.1.5})$$

$$m_r = \sum f_i (x_i - \bar{x})^r / n \quad (\text{VII.6.1.6})$$

Keskihajontaa merkitään yleensä kirjaimella s , ja se on määritelty seuraavasti:

$$s = \left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / n \right]^{1/2} \quad (\text{VII.6.1.7})$$

Jos aineisto on luokiteltu, niin

$$s = \left[\sum_{i=1}^n f_i (x_i - \bar{x})^2 / n \right]^{1/2} \quad (\text{VII.6.1.8})$$

$$f_i = \text{luokkafrekvenssi}$$

Luokitellun aineiston mediaani voidaan määrittää seuraavasti:

$$\text{mediaani} = L_1 + \frac{\left[\frac{n}{2} - (\sum f)_1 \right] c}{f_{\text{mediaani}}} \quad (\text{VII.6.1.9})$$

L_1 = sen luokan alaraja, jossa mediaani sijaitsee

n = havaintojen kokonaismäärä

$(\sum f)_1$ = niiden luokkien alkiodien lukumäärä, jotka kuuluvat mediaaniluokkaa pienempiin luokkiin

f_{mediaani} = mediaaniluokan alkiodien lukumäärä

c = luokkaväli

Moodi on laskettavissa luokitellusta aineistosta seuraavan kaavan avulla:

$$\text{moodi} = L_1 + \left(\frac{\Delta_1}{\Delta_1 + \Delta_2} \right) c \quad (\text{VII.6.1.10})$$

- L_1 = moodiluokan alaraja
 Δ_1 = moodiluokan ja sitä seuraavaksi pienemmän luokan alkioden lukumäärän erotus
 Δ_2 = moodiluokan ja sitä seuraavaksi suuremman luokan alkioden lukumäärän erotus
 c = luokkaväli

Yleensä on myös voimassa kaava

$$\text{keskiarvo-moodi} = 3 \text{ (keskiarvo-mediaani)} \quad (\text{VII.6.1.11})$$

Jakautuman vinous voidaan karkeasti määrittää kaavasta:

$$\text{vinous} = (\bar{x} - \text{moodi})/s \quad (\text{VII.6.1.12})$$

Moodin, mediaanin ja vinouden laskeminen on yleensä hyödyllistä esittäessä jollekin jakautumalle matemaattista esitysmuotoa. Em. arvoja voidaan verrata matemaattisen muodon vastaaviin ja näin tehdä johtopäätöksiä siitä, minkä tyyppinen matemaattinen muoto parhaiten soveltuu. Liitteessä VIII on esitetty eräitä jakautumien matemaattisia parametreja /4, 6/.

VII.6.1 Korjausajan jakautuma

Korjausajan jakautumasta voidaan yleisesti sanoa, että se on huomattavasti vasemmalle vino. Tämä onkin ymmärrettävää, sillä korjausta-
pahtuma saattaa joskus kestää hyvinkin pitkään, kun taas normaalisti vika saadaan korjatuksi tavanomaisen korjauksen odotusajan ja aktiivisen korjausajan puitteissa.

Korjausaikaa voitaisiin matemaattisesti kuvata pääasiassa kahdella erilaisella esitystavalla. Yksinkertaisin on eksponentiaalinen tiheysfunktio, jonka yhtälö on:

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad (\text{VII.6.2.1})$$

λ = korjausaikojen keskiarvon käänteisluku.

Vastaavasti eksponentiaalijakautuman kertymäfunktio on muotoa

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda x} \quad (\text{VII.6.2.2})$$

Eksponentiaalijakautuman etuna voidaan mainita sen matemaattisen esityksen yksinkertaisuus ja soveltuvuus muihin matemaattisiin laskelmiin (esim. Markovin prosessi). Haittana voidaan pitää sitä, että sen alkupää ei vastaa todellisuutta kovinkaan tarkkaan.

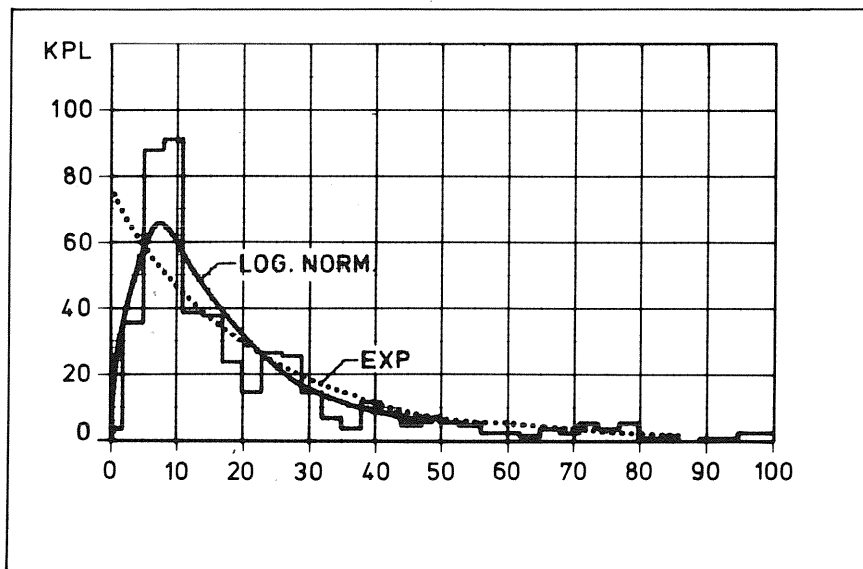
Vesihuoltotekniikassa korjausaikaa kuvaavan jakautuman parempi esitystapa lieneekin logaritmien normaalijakautuma, jonka tiheysfunktio on muotoa /5/.

$$f(x) = \frac{1}{\delta(\log x) \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{[\log x - \bar{x}(\log x)]^2}{2[\delta(\log x)]^2}} \quad (\text{VII.6.2.3})$$

$\delta(\log x)$ = havaintojen logaritmien hajonta

$\bar{x}(\log x)$ = havaintojen logaritmien keskiarvo

Kuvassa 2 on kuvan 3 (kohta 1.1.2.2 s. 11) jakautuma ja sitä vastaava sekä eksponentiaalinen että logaritminen normaalijakautuma.



Kuva 2. Erään korjaustapahtuman keston eksponentiaalinen ja log-normaalinen esitys.

Havaitaan, että varsinkin korjausajan alkutapahtumat kuvautuvat paremmin käytettäessä log-normaalista jakautumaa.

VII.4.6.2 Vian toistuvuuden jakautuma

Vian toistuvuuden jakautuman havaittiin niin ikään olevan huomattavasti vasemmalle vino. Kirjallisuudessa onkin usein esitetty, että toistuvuuden jakautumaa kuvaa eksponentiaalinen jakautuma suhteellisen tarkasti. Tässä yhteydessä havaittiin myös, että eksponentiaalinen jakautumafunktio kuvaa vesihuoltotekniikassa sattuneiden häiriöiden jakautumaa riittävän tarkasti /3/.

Eksponentiaalifunktion λ saa tässä tapauksessa arvon, joka on keskimääräisen toistumisajan tai vikavälin käänteisluku.

PROBABILITY FUNCTIONS

Some one-dimensional discrete distribution functions

Name	Domain	Point Probabilities	Restrictions on Parameters	Mean	Variance	Skewness γ_1	Excess γ_2	Characteristic function	Cumulants
26.1.19 Single point or degenerate	$x=c$ (c a constant)	$p=1$	$-\infty < c < +\infty$	c	0			$e^{c\lambda}$	$\kappa_1 = \lambda, \kappa_r = 0$ for $r > 1$
26.1.20 Binomial	$x=s$, for $s=0, 1, 2, \dots, n$	$\binom{n}{s} p^s (1-p)^{n-s}$	$0 < p < 1$ ($q=1-p$)	np	npq	$\frac{q-p}{\sqrt{npq}}$	$\frac{1-6pq}{npq}$	$(q+pe^{i\lambda})^n$	$\kappa_1 = np$ $\kappa_{r+1} = pq \frac{d^r}{d\lambda^r}$ for $r \geq 1$
26.1.21 Hypergeometric	$x=s$, for $s=0, 1, \dots, \min(n_1, N_1)$	$\frac{\binom{N_1}{s} \binom{N_2}{n-s}}{\binom{N_1+N_2}{n}}$	N_1 and N_2 integers, and $n, N_1+N_2, N_1+N_2, p=N_1/N$ and $q=1-p=N_2/N$	np	$npq \frac{N-n}{N-1}$	$\frac{q-p}{\sqrt{npq}} \frac{N-1}{N-n} \left(\frac{N-2n}{N-2} \right)$	Complicated	$\frac{\binom{N_1}{s}}{\binom{N_1+N_2}{n}} F(-n, -N_1; N_1-n+1; e^{i\lambda})$	Complicated
26.1.22 Poisson	$x=s$, for $s=0, 1, 2, \dots, \infty$	$\frac{e^{-m} m^s}{s!}$	$0 < m < \infty$	m	m	$m^{-1/2}$	m^{-1}	$e^m (e^{i\lambda}-1)$	$\kappa_r = m$ for $r=1, 2, \dots$
26.1.23 Negative binomial	$x=s$, for $s=0, 1, 2, \dots, \infty$	$\binom{n+s-1}{s} p^n (1-p)^s$	$n \geq 0$ and $0 < p < 1$ ($q=1-p$) and $1-p=s/p$	n/p	n/pq	$\frac{0+p}{\sqrt{npq}}$	$\frac{1+6pq}{npq}$	$(Q-Pe^{i\lambda})^{-n}$	$\kappa_1 = n/p$ $\kappa_{r+1} = PQ \frac{d^r}{d\lambda^r}$ for $r \geq 1$
26.1.24 Geometric	$x=s$, for $s=0, 1, 2, \dots, \infty$	$p(1-p)^s$	$0 < p < 1$	$\frac{1-p}{p}$	$\frac{1-p}{p^2}$	$\frac{2-p}{\sqrt{1-p}}$	$0 + \frac{p^2}{1-p}$	$p[1-(1-p)e^{i\lambda}]^{-1}$	$\kappa_1 = \frac{1-p}{p}$ $\kappa_{r+1} = -(1-p) \frac{d^r}{d\lambda^r}$ for $r \geq 1$

PROBABILITY FUNCTIONS

Some one-dimensional continuous distribution functions

	Name	Domain	Probability Density Function $f(x)$	Restrictions on Parameters	Mean	Variance	Skewness γ_1	Excess γ_2	Characteristic function	Cumulants
26.1.25	Error function	$-\infty < x < \infty$	$\frac{h}{\sqrt{\pi}} e^{-h^2 x^2}$	$0 < h < \infty$	0	$\frac{1}{2h^2}$	0	0	$\frac{-h^3}{e^{h^2 x^2}}$	$\kappa_1=0, \kappa_3=\frac{1}{2h^3}$ $\kappa_n=0$ for $n>2$
26.1.26	Normal	$-\infty < x < \infty$	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)^2}$	$-\infty < m < \infty$ $0 < \sigma < \infty$	m	σ^2	0	0	$i m t - \frac{\sigma^2 t^2}{2}$	$\kappa_1=m, \kappa_2=\sigma^2, \kappa_n=0$ for $n>2$
26.1.27	Cauchy	$-\infty < x < \infty$	$\frac{1}{\pi\beta} \frac{1}{1+\left(\frac{x-\alpha}{\beta}\right)^2}$	$-\infty < \alpha < \infty$ $0 < \beta < \infty$	not defined	not defined	not defined	not defined	$e^{i\alpha t - \beta t }$	not defined
26.1.28	Exponential	$\alpha \leq x < \infty$	$\frac{1}{\beta} e^{-\left(\frac{x-\alpha}{\beta}\right)}$	$-\infty < \alpha < \infty$ $0 < \beta < \infty$	$\alpha + \beta$	β^2	2	6	$e^{i\alpha t(1-(it)\beta)^{-1}}$	$\kappa_1=\alpha+\beta, \kappa_n=\beta^n \Gamma(n)$ for $n>1$
26.1.29	Laplace, or double exponential	$-\infty < x < \infty$	$\frac{1}{2\beta} e^{-\left \frac{x-\alpha}{\beta}\right }$	$-\infty < \alpha < \infty$ $0 < \beta < \infty$	α	$2\beta^2$	0	3	$e^{i\alpha t(1+\beta^2 t^2)^{-1}}$	$\kappa_1=\alpha, \kappa_2=2\beta^2$ $\kappa_{n+1}=0, \kappa_n=\frac{(2n)!}{n!} \beta^n$ for $n=1, 2, \dots$
26.1.30	Extreme-Value, ⁴ (Fisher-Tippett Type I or doubly exponential)	$-\infty < x < \infty$	$\frac{1}{\beta} \exp(-y-e^{-y})$ with $y=\frac{x-\alpha}{\beta}$	$-\infty < \alpha < \infty$ $0 < \beta < \infty$	$\alpha + \gamma\beta$	$\frac{(\pi\beta)^2}{6}$	1.3	2.4	$\Gamma(1-(it)\beta)e^{i\alpha t}$	$\kappa_1=\gamma, \kappa_2=\frac{(\pi\beta)^2}{6}$ $\kappa_n=\beta^n \Gamma(n) \sum_{r=1}^{n-1} \frac{1}{r^n}$ for $n>2$
26.1.31	Pearson Type III	$\alpha \leq x < \infty$	$\frac{1}{\beta \Gamma(p)} y^{p-1} e^{-y}$ with $y=\frac{x-\alpha}{\beta}$	$-\infty < \alpha < \infty$ $0 < p < \infty$	$\alpha + p\beta$	$p\beta^2$	$\frac{2}{\sqrt{p}}$	6/p	$e^{i\alpha t(1-(it)\beta)^{-p}}$	$\kappa_1=\alpha+\beta p, \kappa_n=\beta^n p \Gamma(n)$ for $n>1$
26.1.32	Gamma distribution	$0 \leq x < \infty$	$\frac{1}{\Gamma(p)} x^{p-1} e^{-x}$	$0 < p < \infty$	p	p	$\frac{2}{\sqrt{p}}$	6/p	$(1-it)^{-p}$	$\kappa_1=p, \kappa_n=p \Gamma(n)$ for $n>1$
26.1.33	Beta distribution	$0 \leq x \leq 1$	$\frac{1}{B(a,b)} x^{a-1} (1-x)^{b-1}$	$1 \leq a < \infty$ $1 \leq b < \infty$	$\frac{a}{a+b}$	$\frac{ab}{(a+b)(a+b+1)}$	$\frac{2(a-b)}{(a+b+2)}$	See footnote 5.	$M(a, a+ib, it)$	
26.1.34	Rectangular, or uniform	$m - \frac{h}{2} \leq x \leq m + \frac{h}{2}$	$\frac{1}{h}$	$-\infty < m < \infty$ $0 < h < \infty$	m	$\frac{h^2}{12}$	0	-1.2	$\frac{2}{h^2} \sin\left(\frac{M}{2}\right) e^{i m t}$	$\kappa_1=m, \kappa_{n+1}=0$ $\kappa_n=\frac{h^n B_n}{2^n}$ B_n (Bernoulli numbers), $B_1=\frac{1}{6}, B_3=-\frac{1}{30}, \dots$

⁴ γ (Euler's constant) = .57721 56649
⁵ $\gamma_1 = \sqrt{\frac{a+b+1}{ab} \left\{ \frac{3(a+b+1)[2(a+b)+ab(a+b-6)]}{ab(a+b+2)(a+b+3)} - 3 \right\}}$

* See page 11.

Osa 1

Luotettavuustekniikan sanastoa

Tähän sanastoon on koottu luotettavuustutkimuksissa ja laskelmissa käytettäviä sanoja ja käsitteitä määritelmään ja englanninkielisine sekä ruotsinkielisine vastineineen. Vaikka sanat ja määritelmät sinänsä ovatkin yleispäteviä, on sanojen valinta tapahtunut osittain sovelletun elektroniikan tarpeita silmällä pitäen. Lähdeoteoksina on käytetty ensisijaisesti Svenska Elektriska Kommission'in julkaisua SEN 410505, Tillförlitlighetsteknik Ordlista. Englanninkielisiä sanoja on lisäksi otettu IEC:n julkaisusta No. 271 ja sen lisäyksestä No. 1. Niille sanoille, joilla ei ole virallista ruotsinkielistä käännöstä, on Svenska Elektriska Kommission ystävällisesti ilmoittanut epäviralliset, joskin käytössä vakiintuneet käännökset.

Suomennosten laatimisessa on käytetty seuraavia lähdeoteoksia:

P. Jääskeläinen: Automaattisen kaapelinmittauslaitteen luotettavuuden arviointi, diplomityö.

O. Turunen: Luotettavuus elektronikassa, ERT 5/1967.

Oy Yleisradio Ab, Teknillinen selostus No. 8/70.

Sanastossa on pyritty löytämään kaikille sanoille suomenkielinen vastine, vaikka tällaisen sanaston puutteessa tähän mennessä onkin vakiintunut käyttöön useissa tapauksissa vierasperäinen sana. Näitä ovat esimerkiksi sanat primäärivika ja redundanssi, joiden käännökset ovat esivika ja varmennus. Yhdenmukaisuuden vuoksi lienee suomenkielinen sana suositeltavampi.

Määritelmien laatimisessa on ollut apua myös saksankielisestä luotettavuustekniikan sanastosta, joka on julkaistu aikakausjulkaisussa NTZ Heft 1, 1970. Kyseinen sanasto sisältää myös sanojensa englannin-, ranskan-, venäjän- ja espanjankieliset vastineet.

Tilastomatemaattiset termit on tästä sanastosta suurimmaksi osaksi jätetty pois, koska niistä on jo olemassa virallinen standardiehdotus Suomen Standardisoimisliiton taholta nimeltään SSE1, Laadunvalvonta, sanasto ja määritelmät. Julkaisun numero on D/489-68/HH ja se perustuu suositusehdotukseen ISO/DR 982, 1966.

Tämä sanasto on syntynyt Teknillisessä Korkeakoulussa sovelletun elektroniikan lisensiaattikurssin tutkielmatyönä, ja on siten aivan epävirallinen. Toivon sen kuitenkin olevan avuksi luotettavuuskysymysten parissa työskenteleville ja luovan pohjaa virallisen terminologian suunnittelmiselle.

Sanaston käsikirjoituksen ovat lukeet professori Olli Lokki, DI Olof Turunen ja dipl.ins. Pentti Jääskeläinen, joita kiitän hyödyllisistä huomautuksista.

1. Vikakäsite

1.1. Peruskäsitteet

Luotettavuustekniikan sanastoa vika, *failure, fel* jonkin ominaisuuden poikkeaminen asetuista vaatimuksista viallinen yksikkö, *defective unit, felaktig enhet* yksikkö, jossa on yksi tai useampi vika vian luonne, *failure mode, felmod* tietty tapa, millä yksikkö on viallinen; esim. oikosulku, katkos, vahvistuksen muutos jne.

1.2. Jaottelu syyn perusteella

käyttövirhevika, *misuse failure, missbruksfel* aiheutuu epätarkoituksenmukaisesta käytöstä eikä ole yleensä mukana tilastoissa rakennevika, *construction failure, konstruktionsfel* johtuu virheellisestä rakenteesta raaka-ainevika, *material failure, materialfel* johtuu virheellisestä raaka-aineesta valmistusvika, *produce failure, tillverkningsfel* johtuu virheellisestä valmistamisesta vajavaisuusvika, *inherent weakness failure, svaghetsfel* johtuu yksikön vajavaisuudesta eikä käyttövirheestä ja on siten joko rakennevika, raaka-ainevika tai valmistusvika vanhenemisvika, *aging failure, åldringsfel* asteittainen heikkeneminen, joka ilmenee ajan mukana kuten hapettuminen, kuivuminen ja väsyminen ja jonka aiheuttaa esimerkiksi lämpö, valo, radioaktiivinen säteily, värähtely. Vanhenemisvika johtuu epäsuorasti käytöstä, esimerkiksi lämpötilan nousu kiihdyttää vanhenemistä. kulumisvika, *wear-out failure, slitningsfel* asteittainen vika, joka johtuu käytöstä.

1.3. Jaottelu vian laajuuden perusteella

kokonaisvika, *complete failure, totalfel* estää kokonaan yksikön toiminnan osittaisvika, *partial failure, partialfel* vika, joka saa yksikön ylittämään asetetut toleranssit, mutta ei estä täydellisesti yksikön toimintaa

1.4. Jaottelu vian syntymistavan mukaan

äkillinen vika, *sudden failure, plötsligt fel* vika, joka syntyy niin nopeasti, ettei sen kehittymistä voida aikaisemmissa tarkastuksissa havaita katastrofivika, *catastrophic failure, plötsligt totalfel* äkillinen kokonaisvika asteittainen vika, *gradual failure, gradvist fel* vika, joka syntyy niin hitaasti, että sen kehittyminen voidaan ennakoita havaita

rappeutumisvika, *degradation failure, degradationsfel* asteittainen osittaisvika ajoittainen vika, *intermittent failure, intermittent fel* vika, joka ei esiinny jatkuvana, vaan korjautuu itsestään

1.5. Jaottelu toiminnan rajoittamisen perusteella

toiminnan estävä vika, *failure, funktionshinderande fel* vika yksikön sellaisessa osassa, joka estää yksikön toiminnan toimintaa häiritsevää vika, *partial failure, funktionsförsämrande fel* vika yksikön sellaisessa osassa, mikä jossain määrin sallii yksikön toiminnan toiminnan salliva vika, *nuisance failure, funktionsstilltände fel* lähinnä kiusallinen pikkuvika, joka ei estä yksikön toimintaa

1.6. Jaottelu riippuvuuden perusteella

esivika, *primary failure, primärfel* esiintyy yksikön jossain osassa riippumatta kokonaan yksikön muiden osien vioista seurannaisvika, *secondary failure, sekundärfel* esivian aiheuttama vika

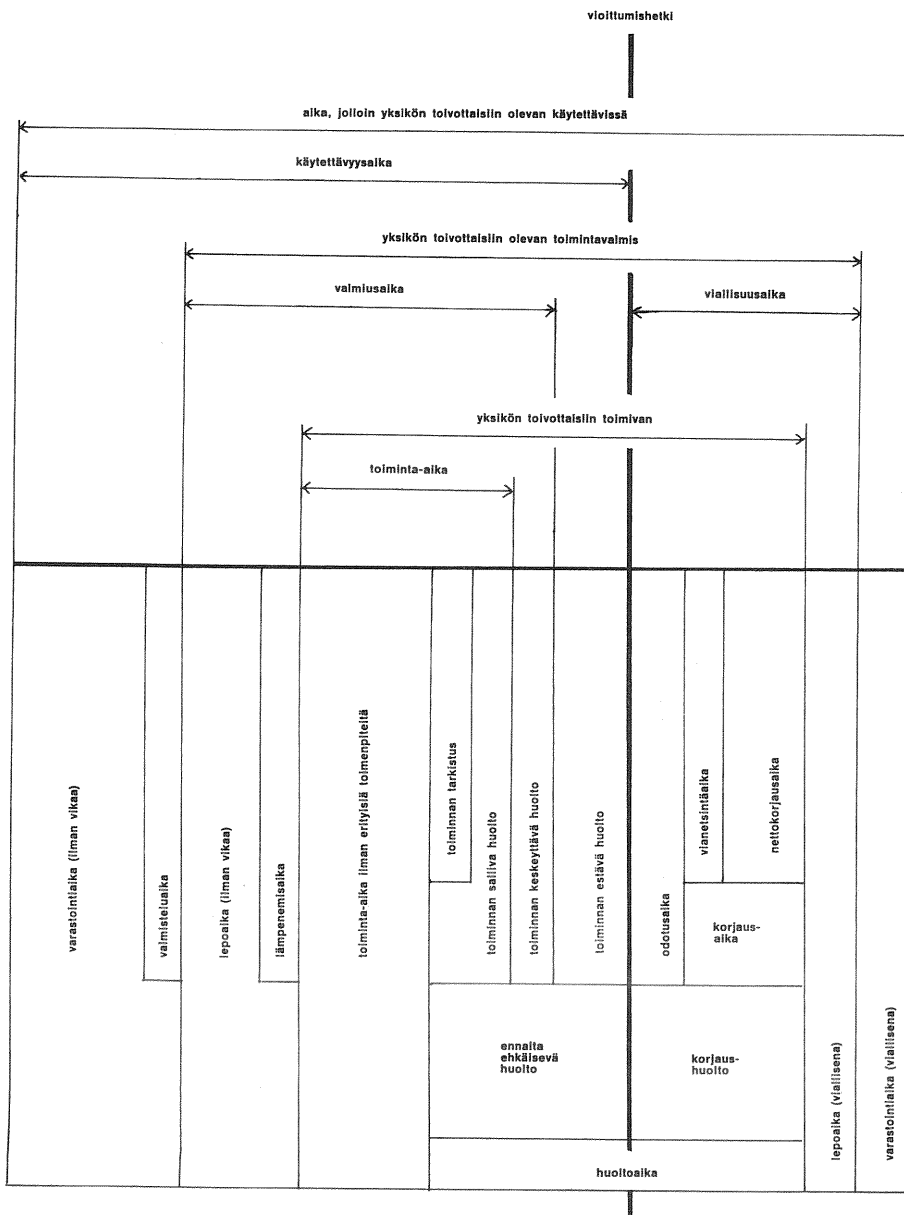
1.7. Jaottelu korjattavuuden perusteella

korjauskelvollinen vika, *repairable failure, reparerbart fel* voidaan korjata vaihtamalla aliyksikkö tai sen osa korjauskelvoton vika, *non-repairable failure, reparerbart fel* ei voida korjata vaihtamalla aliyksikkö tai sen osa korjattu vika, *repaired failure, avhjälp fel* jäljellä oleva vika, —, *kvarståendefel* eliminoitu vika, —, *eliminerad fel* vika, jonka esiintyminen yksikössä on estetty ehkäisevin toimenpitein esimerkiksi rakennemuutoksien

1.8. Jaottelu vian esiintymisajankohdan mukaan

alkujaksovika, *early failure, tidigt fel* esiintyy alkujakson aikana käyttöönottovika, *running-in failure, inkörningsfel* ensiasennuksen, peruskalibroinnin yms. käyttöönoton aikana esiintyvä vika käyttöjaksovika, *failure during constant failure rate period, fel under bästperioden* esiintyy käyttöjakson aikana loppujaksovika, *wear-out failure, sent fel* esiintyy loppujakson aikana

Luotettavuustekniikan sanastoa



Kuva 1. Aikamääritelmää selventävä kaavio.

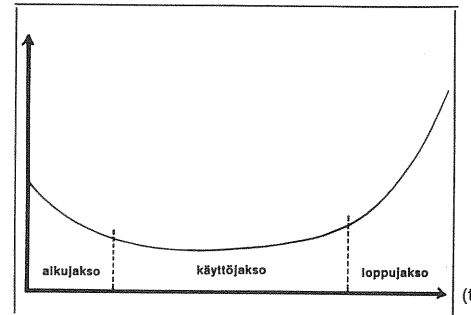
2. Aikakäsitteitä

2.1. Varastointiin ja toimintaan liittyviä aika määritelmää

käytettävyyss aika, *available time*, *brukbarhetstid*
aika, jonka yksikkö on käytettävissä eikä ole viallinen
lepo aika, *shut down time*, *vilotid*
aika, jolloin yksikkö ei ole toiminnassa. Lepoajan aikana voi yksikkö olla viallinenkin ilman että sitä tiedetään.
varastointiaika, *storage time*, *förvaringstid*
lepo aika, jolloin yksikkö ei ole käyttövalmis
valmistelu aika, —, *klargöringstid*
aika, joka kuluu yksikön saattamiseksi käyttövalmiuteen
valmiusaika, *up time*, *klartid*
aika, jolloin yksikkö on valmis käyttöön joko heti tai hyvin lyhyellä viiveellä

lämpenemisaika, *warm-up time*, *uppvärmingstid*
aika, mikä yksiköltä kuluu toimintakykyiseksi tulemiseen käynnistämisen jälkeen
toiminta-aika, *operating time*, *funktionstid*
aika, jonka yksikkö on toiminnassa
kokonaistoiminta-aika, *total operating time*, *total funktionstid*
yhteenlaskettu aika, jonka yksikkö on kaikkiaan ollut toiminnassa
kumuloitu toiminta-aika, *accumulated operating time*, *ackumulerad funktionstid*
kaikkien tarkastelunalaisten samanlaisten yksikköjen yhteenlaskettu toiminta-aika, joka usein ilmoitetaan esim. komponenttintuneina
hyöty aika, *performance time*, *nyttotid*
aika, jonka yksikkö on toiminnassa ja suorittaa määrättyä tehtävää
vanhenusaika, *debugging time*, *inkörningstid*

z(t)



Kuva 2. Vikataajuuden perusteella suoritettu ajan jaottelu.

aika, jolloin yksikköä käsitellään tarkoituksella stabiloida sen toiminta. Suoritetaan kullekin yksikölle vain kerran.
elinikä, *useful life*, *livslängd*
kokonaistoiminta-aika korjauskelvottomaan vikaan asti

2.2. Huoltoon liittyviä alkamääritelmää

huoltoväli, *maintenance interval*, *underhållsintervall*
kahden säännöllisen huollon alkamisajan kohdan väli
huolto aika, *maintenance time*, *underhållstid*
huollon suorittamiseen ja toiminnan tarkistamiseen kuluva aika
viallisuus aika, *down time*, *hinderstid vid fel*
aika, jolloin yksikön toivottavasti olevan toimintakelpoinen, mutta minkä vika estää
vianetsintä aika, *fault location time*, *felsökningsstid*
aika, joka kuluu vian paikallistamiseen
odotusaika, *waiting time*, *väntetid*
aika, jolloin mitään korjaustoimenpiteitä ei voida suorittaa, koska joudutaan odottamaan varaosia, henkilökuntaa, polttoainetta jne.
korjausaika, *repair time*, *reparationstid*
vian etsintään, vian korjaukseen ja toiminnan tarkistamiseen kuluva aika
nettokorjausaika, *fault correction time*, *nettoreparationstid*
aika, joka kuluu paikallistetun vian korjaamiseen

2.3. Vikataajuuden perusteella suoritettu jaottelu

alkujakso, *early failure period*, *begynnelseperiod*
aikainen jakso, jolloin vikataajuus pienenee
käyttöjakso, *constant failure rate period*, *bästperiod*
aika esi- ja loppujakson välillä, jolloin vikataajuus on vakio
loppujakso, *wear-out failure period*, *slutperiod*
jakso, jolloin vikataajuus kasvaa kulumisen ja vanhenemisen perusteella

Jaakko Malmivuo

diplomi-insinööri
Teknillinen korkeakoulu
Sovelletun elektroniikan laboratorio

(jatkuu)

Osa 2

Luotettavuustekniikan sanastoa

3. Luotettavuuden mittaamiseen liittyviä käsitteitä

3.1. Peruskäsitteitä

perusjoukko, *population, population* joukko, josta yritetään saada tietoa tilastollisin keinoin
näyte, *sample, sampel*

osajoukko, joka on otettu perusjoukosta lähempää tutkimista varten tarkoituksena saada tilastollisin menetelmin tietoa perusjoukosta

havaittu arvo, *observed value, observerad värde*

suureen arvo, joka havaitaan annetusta materiaalista annettuna aikavälinä. On ilmoitettava onko havainnot tehty kokeen vaiko käytön aikana. Esim. havaittu keskimääräinen vikaväli, *observed mean time between failures, observerad medeltid mellan fel*.

todellinen arvo, *true value, sant värde*

suureen arvo, joka saadaan koko perusjoukosta annettuna aikavälinä tai koko perusjoukon elinaikana. Todellinen arvo on yleensä tuntematon.

arvioitu arvo, *assessed value, skattad värde*

suureen arvo, joka saadaan olemassa olevan havaintomateriaalin perusteella suoritetuilla laskelmilla

ekstrapoloitu arvo, *extrapolated value, extrapolerat värde*

suureen arvo, joka saadaan olemassa olevien tietojen perusteella suoritettua ekstrapolaatiosta eli arvion laajentamisesta toiseen aikaväliin, käyttö- tai ympäristöolosuhteisiin

ennustettu arvo, *predicted value, predikerat värde*

suureen arvo, joka lasketaan annetuista käyttö- ja ympäristöolosuhteista, rakenne-tiedoista ja aliyksiköiden arvioituista tai ekstrapoloituista arvoista.

3.2. Luotettavuuteen liittyviä perus-funktioita

vikakertymä $F(t)$, *cumulative failure function, felfördelningsfunktion*
todennäköisyys voittumiseen ennen aikaa t

vikatiheys $f(t)$, *failure probability density, felfrekvens*
voittumistodennäköisyys aikavälillä $(t, t+dt)$, eli vikakertymän aikaderivaatta

luotettavuus $R(t)$, *reliability, funktionssannolikheter*

todennäköisyys sille, että yksikkö toimii ilman vikaa ajan t

vikataajuus $z(t)$, *failure rate, felintensitet*

vikatiheyden ja luotettavuuden suhde

keskimääräinen vikataajuus $z(t_1, t_2)$, *mean failure rate, medelfelintensitet*

vikataajuuden keskiarvo annetuissa käyt-

tö- ja ympäristöolosuhteissa annettuna aikavälinä
käytettävyyden $A(t)$, *availability, tillgänglighet*

todennäköisyys sille, että yksikkö mieltä valtaisesti ajankohtana annettuna aikavälinä on vähintään tiettyssä valmiudessa tai tiettyssä toimintakelpoisuudessa annetuissa käyttö- ja ympäristöolosuhteissa ja huoltojärjestelyissä

3.3. Keskimääräisiä aikavälejä

keskimääräinen voittumisaika, *mean time to failure MTTF, medeltid till fel*

yksikön voittumiseen kuluvan ajan odotusarvo annetuissa käyttö- ja ympäristöolosuhteissa. Kertakäyttöön tarkoitettuilla yksiköillä keskimääräinen voittumisaika on sama kuin keskimääräinen elinikä.

keskimääräinen elinikä, *mean life, medel livslängd*

yksikön elinajan odotusarvo annetuissa käyttö- ja ympäristöolosuhteissa

keskimääräinen kulumisaika, *mean wear-out life, medeltid till utslitning*

kulumisvian ilmestymiseen kuluva ajan odotusarvo annetuissa käyttö- ja ympäristöolosuhteissa ja huoltojärjestelyissä

4. Huoltoon liittyviä käsitteitä

4.1. Jaottelu tarkoituserän mukaan

ennalta ehkäisevä huolto, *preventive maintenance, förebyggande underhåll*

huolto, jolla pyritään ehkäisemään vikojen esiintyminen

korjaushuolto, *corrective maintenance, avhjälpande underhåll*

huolto, jossa korjataan ilmennyt vika. Korjaushuollon yhteydessä suoritetaan usein myös ennalta ehkäisevää huoltoa kuten säätöä tai voitelua.

määräaikaishuolto, *scheduled maintenance, regelbundet underhåll*

tiettyyn ajankohtaan, kuten kalenteriaikaan, toiminta-aikaan, toimintajaksoon jne. kiinnitetty huolto

satunnaishuolto, *unscheduled maintenance, oregelbundet underhåll*

huolto, jota ei ole etukäteen sidottu mihinkään ajankohtaan. On yleensä korjaushuoltoa.

4.2. Jaottelu huoltokelpoisuuden perusteella

huollettavuus, *maintainability, underhållsmässighet*

todennäköisyys sille, että viallinen yks-

sikkö saadaan korjatuksi tiettyssä viallisuusajassa

korjattavuus, *repairability, reparerbarhet*

todennäköisyys sille, että viallinen yksikkö saadaan korjatuksi tiettyssä nettokorjausajassa

huoltoystävällisyys, *serviceability, servicebarhet*

luonnehtii huollon suorittamisen helpoutta

5. Muita käsitteitä

5.1. Järjestelmää kuvaavia käsitteitä

sarjarakenne, *series structure, seriestruktur*

järjestelmän rakennemuoto, missä yhden yksikön voittuminen estää koko järjestelmää toimimasta

rinnakkaisrakenne, *parallel structure, parallelstruktur*

järjestelmän rakennemuoto, missä yhden yksikön voittuminen ei estä muita yksiköitä toimimasta

järjestelmän tehokkuus, *system effectiveness, systemeffektivitet*

ilmoittaa missä määrin järjestelmä täyttää asetetut toimintavaatimukset

suunnittelutavoitteiden tarkoituksen mukaisuus, *design adequacy, ändamålsenlighet*

ilmoittaa, missä määrin asetetut suunnittelutavoitteet yksityiskohdissaan vastaavat suunniteltavan yksikön tarkoitettua käyttöä

5.2. Ympäristöä kuvaavia käsitteitä

ympäristö, *environment, miljö*

se osa yksikön toimintapaikasta, jonka fyysiset ja kemialliset olosuhteet vaikuttavat yksikköön

ympäristökeroi, *environmental factor, miljöfaktor*

ympäristön määräämää suure tai ryhmä suureita, jotka yksinään vaikuttavat tiettyihin voittumismekanismeihin ja voidaan siten yleensä koejärjestelyissä erottaa

ympäristön ankaruus, *degree of severity, miljöstränghet*

mitta niille fyysisille ja kemiallisille suureille, jotka ovat luonteenomaisia ympäristölle tai ympäristökertoimelle

5.3. Koejärjestelyihin liittyviä käsitteitä

kiihdytetty koe, *accelerated test, acelererad provning*

koe, jonka rasitustaso on nostettu normaaleja käyttöolosuhteita korkeammaksi

kiihdytyskerroin, *acceleration factor, accelerationsfaktor*

kerroin, jolla kiihdytetyn kokeen aika täytyy kertoa, jotta saataisiin yhtä rasitusta normaalikäyttöaika

vikataajuuden kiihdytyskerroin, *failure rate acceleration factor, accelerationsfaktor avseende felintensitet*

Luotettavuustekniikan sanastoa osa 2

kiihdytetyn kokeen ja normaalikäytön vi-
kataajuuden suhde

askelrasituskoe, *step stress test*, —,
koe, jonka rasiustasoa lisätään askelittain
seulakoe, *screening test*, *tillförlittig-*
hetsgallring

koe, jonka tarkoituksena on poistaa jou-
kosta vialliset yksiköt

5.4. Vioittumismekanismin liittyviä käsitteitä

vioittumismekanismi, *failure*
mechanism, *felmekanism*

fysikaalinen, kemiallinen tai muu pro-
sessi, joka johtaa vikaan

vian syy, *failure cause*, *felorsak*

olosuhde, joka kiihdyttää vioittumisme-
kanismia tai aiheuttaa sen

5.5. Varmennukseen liittyviä käsitteitä

varmennus, *redundancy*, *redundans*
useamman kuin yhden yksikön olemassa-
olo vaaditun toiminnan suorittamiseksi
käyttövarmennus, *active redun-*
dancy, *aktiv redundans* varmentavat yksi-
köt ovat jatkuvasti toiminnassa

vaihtovarmennus, *stand by redun-*
dancy, *stödredundans* varmentava yksik-
kö kytketään toimimaan vasta toiminnas-
sa olleen yksikön vioituttua

sarjavarmennus, *series redun-*
dancy, *serieredundans* toiminta varmen-
netaan sarjassa olevalla yksiköllä. esim.
katkaisu sarjassa olevalla katkaisijalla
rinnakkaisvarmennus, *parallel*
redundancy, *paralleredundans*, toiminta
varmennetaan rinnakkain olevalla yksi-
köllä, esim. kytkeminen rinnakkaisella
kytkimellä. ■

Jaakko Malmivuo

diplomi-insinööri

TKK

Sovelletun elektroniikan laboratorio

Liite

Perusfunktioiden riippuvuus toisistaan

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt}$$

$$R(t) = 1 - F(t)$$

$$z(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

Vikatiheyden jakautumafunktion ollessa eksponenttifunktio:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$$

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

$$z(t) = \lambda$$

Perusfunktioiden dimensiot

$f(t)$ ja $z(t)$ ovat laadultaan: vikaa/10⁶h

$F(t)$, $R(t)$, $z(t_1, t_2)$ ja $A(t)$ ovat laaduttomia

YVY-julkaisusarja

1. Vesihuollon taloudellisuus
2. Vedenkulutuksen vaihtelut
3. Vesijohtoverkon toiminnan luotettavuus

ISBN 951-9250-52-2

KYRIIRI OY
Helsinki 1975