

**Jukka Vepsäläinen**

**Mittaavan kunnossapidon hyödyntäminen keskijänniteverkon häiriöiden vähentämisessä ja elinkaarihallinnassa**

**Sähkötekniikan korkeakoulu**

Diplomityö

Espoo 8.5.2014

**Työnohjaaja:**

DI Osmo Siirto

Helen Sähköverkko Oy

**Työn valvoja:**

Prof. Matti Lehtonen

Aalto-yliopiston sähkötekniikan korkeakoulu



**Aalto-yliopisto**  
Sähkötekniikan  
korkeakoulu

Tekijä:

Jukka Vepsäläinen

Työn nimi:

Mittaavan kunnossapidon hyödyntäminen keskijänniteverkon häiriöiden vähentämisessä ja elinkaarihallinnassa

Sivumäärä: 9 + 73

Päivämäärä: 8.5.2014

Osasto: Sähkötekniikan ja automaation laitos

Professuuri: S3015 Sähköjärjestelmät

Työn valvoja: Professori Matti Lehtonen

Työn ohjaaja: Diplomi-Insinööri Osmo Siirto

Tänä päivänä sähkönjakelun toimitusvarmuuteen kiinnitetään huomattavasti enemmän huomiota kuin aikaisemmin. Sähkön toimitusvarmuudella mitataan asiakkaalle toimitettavan palvelun laatua.

Keskijänniteverkon viat ovat tyypillisesti suurin yksittäinen tekijä asiakkaiden kokemisessa sähkönjakelun häiriöissä kaapeloidussa sähköverkossa. Kaapelivikojen haitat on pyritty minimoimaan verkon rengasmaisella rakenteella. Helen Sähköverkko Oyn verkkoalueella keskijänniteverkon vikojen määrä on pysynyt kohtuullisella tasolla. Uusia menetelmiä halutaan selvittää ja yhtenä vaihtoehtona ovat verkon käytönaikaiset mittaukset.

Uuden mittaustekniikan tuomaa rahallista hyötyä voidaan perustella asiakkaiden kokemuksen keskeytyshaitan pienenemisellä. Johtolähdön KAH-arvo pystytään määrittämään, kun tunnetaan johtolähdöllä oleva asiakasryhmäkohtainen energiankulutus. Suurimman haitan keskeytykset aiheuttavat palvelu- ja teollisuusasiakkaille.

Tässä työssä on keskitytty selvittämään eri mahdollisuuksia toteuttaa verkon tilan valvontaa uusilla menetelmillä ja käytönaikaisen mittaustekniikan hyötyjä sekä kustannuksia verrattuna keskeytyksen aiheuttamaan haittaan.

Työn tuloksena voidaan sanoa, että verkon käytönaikaista mittausta on kannattavaa tehdä niissä osissa verkkoa, joissa asiakkaalle aiheutuu kohtuutonta haittaa lyhyistäkin keskeytyksistä.

Avainsanat: keskijänniteverkko, jakeluverkko, maakaapeliverkko, osittaispurkausmittaus, KAH-arvo, ennakkoiva kunnossapito

AALTO UNIVERSITY  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

ABSTRACT OF THE  
MASTER'S THESIS

Author:  
Jukka Vepsäläinen

Name of the thesis:  
Utilization of condition monitoring in medium voltage cable network  
Number of pages: 9 + 73

Date: 8.5.2014

Department: Department of Electrical Engineering and Automation

Professorship: S3015 Electrical Systems

Supervisor: Professor Matti Lehtonen

Instructor: Master of Science (Tech) Osmo Siirto

Nowadays significantly more attention is paid to the reliability of electricity. Reliability of electricity supply has become significantly a more important way to measure service level of the commodity.

Medium-voltage networks failures are typically the single biggest factor of malfunctions that customer will have in the cabled electricity network.

Cable fault hindrances have been minimized by using annular structure in the network. In Helen Electricity Ltd's network area Medium-voltage network the amount of failures has stayed on a reasonable level. There is willingness to find out new procedures and one option is measuring the network while in usage.

New measurement technology's fiscal benefits can be justified by lowering the risk of interruption in the electricity supply suffered by the customer. Cable outlets KAH-value can be measured if you know the energy consumption of customer groups on the cable outlet. Biggest hindrances in interruption of electricity supply will be to service and industrial customers.

In this thesis there is focus to find out different possibilities to implement new network condition surveillance with new procedures. And the advantages of measuring techniques used when the network is in use compared to the costs and the hindrance caused by interruption in electricity supply. As a result in this work we can say that measuring when the network is in use is worthwhile in those parts of the network where interruption to the supply of electricity causes unreasonable hindrance even in the shortest of interruptions.

Keywords: Medium voltage network, Distribution network, Cable network, Partial Discharge, KAH- value, Proactive maintenance

## Alkulause

Tämä Diplomityö on tehty Helen Sähköverkko Oyssä vuosien 2013–2014 aikana opin-  
näytetyöksi Aalto-yliopiston Sähkötekniikan korkeakoulun Sähkötekniikan ja automaa-  
tion laitokselle.

Diplomi-työn valvojana toimi Professori Matti Lehtonen ja työn ohjaajana DI Osmo  
Siirto Helen Sähköverkko Oystä. Haluan kiittää molempia arvokkaista neuvoista ja oh-  
jauksesta työn aikana.

Eriyiskiitokset kuuluvat myös koko työyhteisöllemme, joka on tukenut ja mahdollista-  
nut opiskeluni Aalto-yliopistossa.

Perheelle ja ystäville kuuluu myös kiitos varauksettomasta tuesta opiskelujen ja diplo-  
mityön kirjoitusvaiheen aikana.

Helsingissä toukokuun 8. päivänä 2014

Jukka Vepsäläinen

## Sisällysluettelo

Alkulause.....	iii
Sisällysluettelo.....	iv
Symboli- ja lyhenneluettelo.....	vii
1 Johdanto.....	1
2 Helen-konserni .....	2
2.1 Helen sähköverkko Oy .....	3
3 Sähkön siirto ja jakelu .....	5
3.1 Siirtoverkko ja suurjännitteinen jakeluverkko .....	5
3.2 Jakeluverkko.....	6
3.2.1 Jakeluverkon yleissuunnittelun ja luotettavuuden perusteet.....	7
4 Sähkönjakelun toimitusvarmuus .....	9
4.1 Jakelukeskeytykset .....	10
4.2 Keskeytysten aiheuttamat kustannukset.....	10
4.3 Verkkoyhtiöiden toimitusvarmuuden mittaaminen.....	11
5 Osittaispurkaukset .....	13
5.1 Sisäisten osittaispurkausten syntyminen vaihtojännitteellä .....	13
5.2 Pintapurkausten syntyminen vaihtojännitteellä.....	14
5.3 Koronapurkaukset .....	15
5.4 Osittaispurkausten paikantaminen.....	15
5.5 Keski­jännitteellä käytettävät kaapelit.....	17
5.5.1 Öljypaperieristeinen keskijännitekaapeli.....	19
5.5.2 Muovieristeiset keskijännitekaapelit.....	19
5.5.3 Eristerakenteen vanheneminen .....	19
5.6 Kaapelivarusteet .....	21
5.6.1 Kaapelijatkokset.....	21

5.6.2	Kaapelipäätteet.....	22
6	Mittaava kunnossapito.....	24
6.1	Aikaan perustuva kunnossapito.....	25
6.2	Kuntoon perustuva kunnossapito .....	26
6.3	Luotettavuuteen perustuva kunnossapito .....	26
6.4	Korjaava kunnossapito .....	26
7	Osittaispurkausmittaukset.....	27
7.1	Käyttökeskeytyksen vaativat osittaispurkausmittaukset .....	27
7.1.1	VLF .....	27
7.1.2	DAC .....	28
7.1.3	Resonanssilaitteisto.....	29
7.2	Käytönaikaiset osittaispurkausmittaukset .....	29
7.2.1	Määräajoin tehtävät käytönaikaiset osittaispurkausmittaukset.....	30
7.2.2	Jatkuvat käytönaikaiset osittaispurkausmittaukset .....	31
8	Häviökerroinmittaukset .....	32
9	Kokemuksia maailmalta .....	33
9.1	Voimakaapeleiden asennuksen jälkeinen testaaminen [14] .....	33
9.2	Osittaispurkausten havaitseminen sähköisiä häiriöitä sisältävissä verkoissa [13] 36	
9.3	Uusia käytännön menetelmiä kaapeliverkkojen kunnonvalvonnassa[15].....	37
9.4	Tanskalaisten kokemuksia sekakaapelijärjestelmästä [12] .....	40
9.5	Keskijännitekaapeliverkon omaisuudenhallinnan parantaminen käyttäen apuna automatisoitua käytönaikaista osittaispurkausmittaustekniikkaa [11] .....	43
9.6	Jatkuva käytönaikainen osittaispurkausmittaus keskijänniteverkossa [32].....	47
9.7	Kokemuksia jatkuva-aikaisista käyttöpaikkamittauksista [33] .....	47
9.8	Yhteenvedo kokemuksista maailmalta.....	49
10	Helen Sähköverkko Oy:n jakeluverkko.....	50

10.1	Jakeluverkon rakenne .....	50
10.2	Helen Sähkönjakeluverkon toimitusvarmuus .....	53
10.3	Vikapaikan erottaminen.....	55
10.3.1	Oikosulkuvian paikantaminen .....	55
10.3.2	Maasulkuvian paikantaminen .....	56
10.4	Vikatilastot jakeluverkoissa.....	57
10.4.1	Viat Helen Sähköverkko Oyn keskijännitekaapeliverkossa .....	58
10.5	Kunnonvalvonnan mittaukset Helen Sähköverkko Oyssä.....	60
11	Kunnonvalvontaa tarvitsevat kaapeliyhteydet.....	62
11.1	Käytönaikaisen osittaispurkausmittauslaitteiston rahallisen hyödyn määrittäminen .....	62
11.1.1	KAH-kustannusten määrittäminen.....	63
11.2	Käytönaikaisista osittaispurkausmittauksista saatava hyöty omaisuudenhallinnassa .....	65
12	Johtopäätökset .....	67
	Lähteet .....	69

## Symboli- ja lyhenneluettelo

### Symbolit

C	Kapasitanssi tai Coulombi
D	Sähkövuo
E	Sähkökentänvoimakkuus
G	Konduktanssi
L	Induktanssi
R	Resistanssi
$U_n$	Nimellisjännite (pääjännite)
$U_0$	Nimellisjännite (vaihejännite)
$Z_0$	Ominaisimpedanssi
$\epsilon_r$	Suhteellinen permittiviteetti
$\epsilon$	Permittiviteetti
$\epsilon_0$	Tyhjiön permittiviteetti

### Lyhenteet

AHXAMK-W	Suomessa yleisesti käytössä oleva keskijännite kaapelityyppi
AMKA	Pienjännitteinen riippukierrejohto
APYAKMM	1960–1980-luvuilla yleisesti käytetty keskijännite kaapelityyppi Suomessa
ASM	Advanced Substation Monitor
CAIDI	Customer Average Interruption Duration Index, keskeytyksen keskipituus
CBM	Condition Based Maintenance
Continuous	Keskeytymätön mittaus
DAC	Damped AC Voltage
Extinction voltage	Sammumisjännite
HFCT	High Frequency Current Transformer



Helen	Helsingin energia (konserni)
HSV	Helen Sähköverkko Oy
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
Inception voltage	Syttymisjännite
KAH	Keskeytyksestä aiheutunut haitta ja KAH-kustannus tai –säästö
KEMA	Luokituslaitos
Monitored	Jatkuva-aikaisesti tallentava
Non-Monitored	Hetkellisesti luettavissa oleva
Off-line	Käyttökeskeytyksen vaativa mittausmenetelmä
On-line	Käytönaikainen mittausmenetelmä
p	Pico
PD <sub>iv</sub>	Syttymisjännite
PD <sub>ev</sub>	Sammumisjännite
PE	Polyeteeni
Periodic	Jaksottainen mittaus
PEX	Ristisilloitettu polyeteeni
PD-OL	Nimitys Keman kehittämälle PD-online mittausyksikölle
PYLKVJ	1930–1960-luvuilla käytetty keskijännitekaapeli Suomessa
RCM	Reliability Centered Maintenance
RMU	Ring Main Unit, keskijännitekojeisto
SAIDI	System Average Interruption Duration Index
SAIFI	System Average Interruption Frequency Index
SFS	Suomen standardisoimisliitto SFS Ry
TANδ	Häviökerroinmittaus

TBM	Time-Based Maintenance
T-CAIDI	Keskeytyksen keskipituus muuntamopiiritasolla
TDR	Time-Domain Reflectometry
T-SAIDI	Keskeytysten keskimääräinen yhteenlaskettu kes- toaika tietyllä aikavälillä
T-SAIFI	Keskeytysten keskimääräinen lukumäärä tietyllä aikavälillä
VLF	Very Low Frequency

# 1 Johdanto

Tänä päivänä sähköjakelun toimitusvarmuuteen kiinnitetään huomattavasti enemmän huomiota kuin aikaisemmin. Sähkön toimitusvarmuudesta on tullut asiakkaille kokoajan merkittävämpi mittari palvelun laatu mielessä. Regulaattorin asettamat vaatimukset sähköverkkoyhtiöiden tuotolle kannustavat parantamaan verkon käyttövarmuutta Uusi sähkömarkkinalaki edellyttää verkkoyhtiöiltä parempaa sähkön toimitusvarmuutta ja asiakkaille maksettavien vakiokorvausten euromääräiset summat niin ikään kasvavat sekä niihin oikeuttavat aikarajat tiukkenevat

Keskijänniteverkon viat ovat tyypillisesti suurin yksittäinen tekijä asiakkaiden kokemisessa sähköjakelun häiriöissä kaapeloidussa sähköverkossa. Kaapelivikojen haitat on pyritty minimoimaan verkon rengasmaisella rakenteella. Helen Sähköverkko Oyn verkkoalueella keskijänniteverkon vikojen määrä on pysynyt kohtuullisella tasolla. Keskeytysaikojen pituutta on pystytty vähentämään esimerkiksi muuntamoautomaatiota lisäämällä ja maasulkuvirran kompensoinnilla. Tästä huolimatta on haluttu etsiä uusia kunnonvalvonnan menetelmiä vikojen ennen aikaiseen havainnointiin. Yhtenä esimerkkinä voidaan pitää verkossa tehtyjä käyttökeskeytyksen vaativia osittaispurkausmittauksia, joissa on pyritty selvittämään verkon käyttökuntoa ja asennuslaatua. Uusina menetelminä on haluttu selvittää mahdollisuuksia verkon käytönaikaisille mittauksille.

Uuden mittaustekniikan tuomaa rahallista hyötyä voidaan perustella asiakkaiden kokemuksen keskeytyshaitan vähenemisenä. Käytönaikaisten mittausten rahallista hyötyä voidaan arvioida selvittämällä yksittäisen johtolähdön vikaantumistodennäköisyyttä rakennevioista aiheutuneissa vikaantumisissa. Säästöä syntyy myös mahdollisten vikapaikkojen suunnitelmallisella korjaamisella. Säästö syntyy varsinaisesta korjauksesta, kun kustannuksia verrataan kiireessä tehtävään akuuttiin viankorjaukseen. Johtolähdön KAH-arvo on mahdollista määrittää, kun tunnetaan johtolähdöllä oleva asiakasryhmäkohtainen energiankulutus. Suurimman haitan keskeytykset aiheuttavat palvelu- ja teollisuusasiakkaille.

Tässä työssä on keskitytty selvittämään eri mahdollisuuksia toteuttaa verkon tilan valvontaa uusilla menetelmillä sekä käytönaikaisen mittaustekniikan hyötyjä ja kustannuksia verrattuna keskeytyksen aiheuttamaan haittaan.

## 2 Helen-konserni

Helen-konserni on liiketoiminnallinen kokonaisuus, jonka rakenteeseen kuuluu useita merkittäviä tytä- tai osakkuusyhtiöitä (kuva 1). Emoyrityksenä konsernissa toimii Helsingin Energia. Sen tytäryhtiöitä ovat sähkönsiirrosta vastaava Helen Sähköverkko Oy, energianmittauspalveluja tuottava Mitox Oy, vesivoimayhtiö Oy Mankala Ab, Kiinteistö Oy Helsingin Sähkötalo ja sähköisen yhdyskuntatekniikan palveluyritys Suomen Energia-urakointi Oy. Lisäksi Helsingin energialla on osakkuusyhtiöitä ja se omistaa voimaosuuksia eri yhtiöistä suoraan sekä Oy Mankala Ab:n kautta [1].



Kuva 1 Helen konsernin konsernirakenne [2]

Helsingin Energia myy sähköenergiaa yli 400 000 asiakkaalle ympäri maata ja on yksi Suomen suurimmista energiayrityksistä. Sähköenergian lisäksi yli 90 % pääkaupungin lämmitystarpeesta täytetään Helsingin Energian toimesta. Sen lisäksi kaukojäähdytys laajenee voimakkaasti Helsingin alueella. Myös energiantuotanto- ja jakelujärjestelmien suunnittelu, projektointi ja kunnossapito ovat osa Helsingin Energian palvelutarjontaa. Helsingin Energia vastaa myös Helsingin kaupungin ulkovalaistuksesta. Kuvassa 2 on esitetty Helsingin Energian liiketoimintaprosessit.



Kuva 2 Helen konsernin organisaatio [2]

## 2.1 Helen sähköverkko Oy

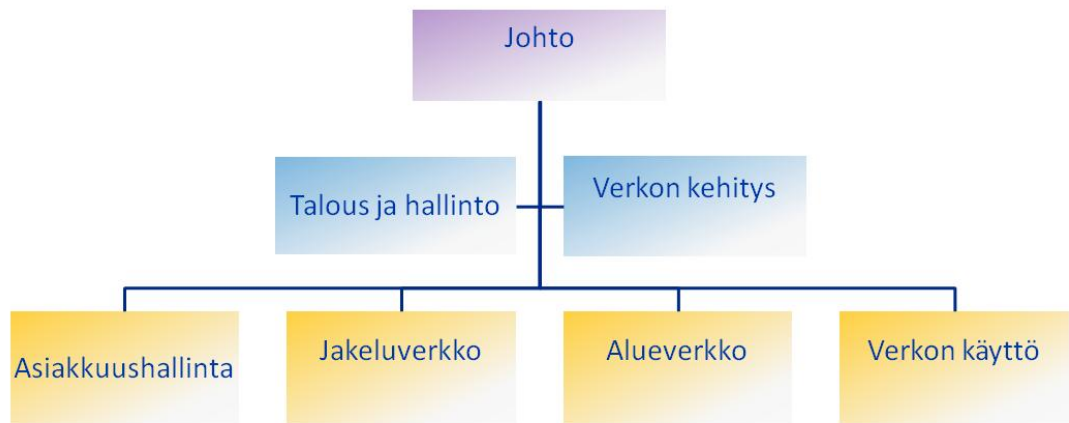
Helen Sähköverkko Oy vastaa sähkön siirto- ja jakelupalveluista Helsingin alueella. Sen strategisena tehtävänä on ylläpitää ja kehittää vastualueensa sähköverkkoa ja tarjota asiakkailleen sekä muille sähkömarkkinaosapuolille hyvälaatuinen verkkopalvelu- ja markkinapaikka. Yhtiö ylläpitää ja kehittää verkkoaan kulutuksen ja tuotannon tarpeita vastaaviksi.

Helen Sähköverkko Oy:n liikevaihto on useampana vuonna ollut yli 100 miljoonaa euroa. Helen konsernin tytäryhtiönä se on yksi konsernin pääliiketoiminta-alueista. Helen Sähköverkko Oy:n merkittävimpiä yhteistyökumppaneita ovat Mitox Oy, verkostourakoitsijat ja kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj.

Helen Sähköverkko Oy aloitti toimintansa 1.10.2006 ja sen palveluksessa on noin 100 henkilöä. Päätoimipaikka sijaitsee Sörnäsissä Sörnäistenkatu 1:ssä. Helen Sähköverkko Oy:n sähköverkko on liittynyt Suomen kantaverkkoon usealla sähköasemalla ja muodostaa kantaverkon kanssa rinnankäyvän verkon. Lisäksi Helen Sähköverkko Oy:n 110 kV suurijännitteiseen jakeluverkkoon on liittynyt paikallista tuotantoa, joka yhdessä kantaverkkoliityntöjen ja rengasmaisesti silmukoidun alueverkon 110 kV verkon kanssa luovat perustan sähkönjakelun käyttövarmuudelle Helsingissä. [3]

Helen Sähköverkko Oyn jakeluverkko käsittää noin 1600 kilometriä 10 tai 20 kilovoltin keskijänniteverkkoa, johon on liitetty noin 2500 muuntamoaa, joista noin 700 asiakasmuuntamoaa. Pienjänniteverkko koostuu noin 4500 kilometristä 0,4 kV linjoja ja noin 7500 jakokeskuksesta.

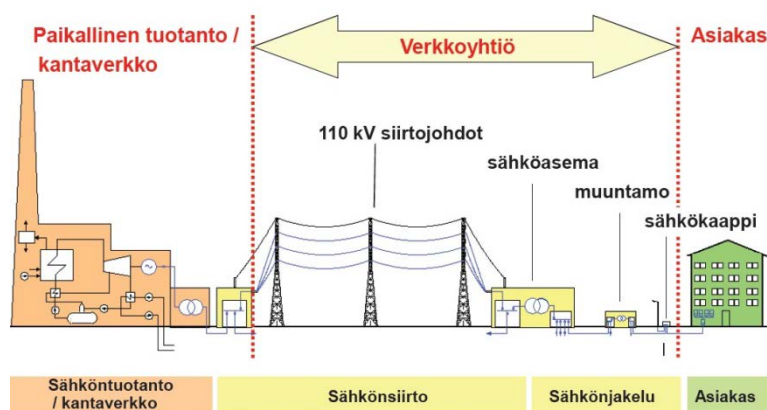
Kuvassa 3 on esitetty Helen Sähköverkko Oyn perusorganisaatio.



**Kuva 3 Helen Sähköverkko Oy:n perusorganisaatiot [3]**

### 3 Sähkön siirto ja jakelu

Sähköverkko koostuu neljästä pääosasta: energian tuotanto, siirto, jakelu ja kulutus. Suomessa sähköä tuotetaan monipuolisesti usealla eri tuotantomuodolla. Suomessa on yli 120 sähköä tuottavaa yritystä ja yli 400 voimalaitosta [4]. Suomen sähköntuotanto on maantieteellisesti varsin hajautettua, mikä osaltaan lisää hankinnan varmuutta.

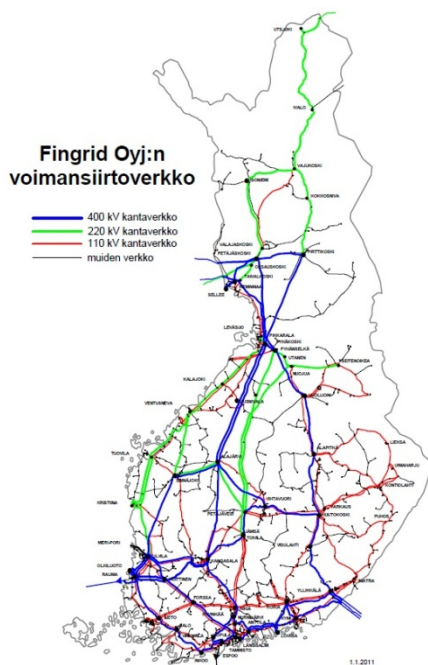


Kuva 4 Sähkövoimajärjestelmän osapuolet ja rajapinnat [3]

#### 3.1 Siirtoverkko ja suurjännitteinen jakeluverkko

Kantaverkoksi kutsutaan pääsääntöisesti sitä osaa sähköverkosta, jonka nimellinen käyttöjännite on vähintään 110 kV. Suomessa yleiset sähkön siirrossa käytetyt jännitetasot ovat 110 kV, 220 kV ja 400 kV. Siirtoverkon johdot rakennetaan useimmiten johtorenkaisiksi, jotka ovat silmukoituja. Tällä tavoin parannetaan verkon käyttövarmuutta, kun syöttöasemat saavat samanaikaisesti sähköä useammasta suunnasta. Silmukoitu rakenne pienentää myös verkon siirtohäviöitä verrattuna säteittäisverkkoon.

Sähkön siirrosta Suomessa vastaa kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj. Fingrid Oyj:n tärkeimmät omistajat ovat Fortum Oyj, Pohjolanvoima – yhtiöt, Suomen valtio ja institutionaaliset sijoittajat.



Kuva 5 Fingrid Oyj:n siirtoverkko [5]

Sitä osaa 110 kV verkosta, jota hallinnoi paikalliset verkkoyhtiöt, kutsutaan suurijännitteiseksi jakeluverkoksi.

### 3.2 Jakeluverkko

Sähkönjakeluverkoksi kutsutaan sitä osaa sähköverkosta, jonka jännite on pienempi kuin 110 kV. Sähkönjakeluverkon tehtävänä on edelleen jakaa sähkönsiirtoverkon kautta tuleva sähkö loppuasiakkaille. Yleisimmin Suomessa käytetyt jakelujännitteet ovat keskijännitteellä 10 tai 20 kV, näistä 20 kV on huomattavasti yleisempi. 10 kV on käytössä enää vain joissain kaupunkien jakeluverkoissa ja teollisuusverkoissa. Pienjännitteellä (0,4 kV) sähköä jaellaan pienjänniteasiakkaille. Sähkönjakelujärjestelmän osia ovat sähköasemat, keskijänniteverkko, jakelumuntamat sekä pienjänniteverkko.

Sähkönjakelujärjestelmän arvo Suomessa on yli 12 mrd. € Suurin osa Suomen keskijännitteisestä jakeluverkosta on avorakenteista ilmajohtoverkkoa. Ainoastaan suurissa kaupungeissa ja taajamissa käytetään pääasiallisesti maakaapeliverkkoa. Pienjännitteellä käytetään vastaavasti AMKA-ilmakaapelia, taajamissa ja kaupungeissa on pääasiassa maakaapeliverkkoa [6 s.11]. Sähkömarkkinalain linjausten johdosta on tulevaisuudessa kaapeliverkon osuus kuitenkin kasvussa.

Jakeluverkkoja käytetään lähes aina säteittäisesti. Säteittäisessä verkossa on häiriöiden rajoittaminen helpompaa, oikosulkuvirrat pienempiä sekä jännitteensäätö ja suojauksen toteuttaminen yksinkertaisempaa kuin silmukoidussa verkossa. Käyttämällä verkkoja rengasmaisesti saataisiin kuitenkin samoja etuja kuin siirtoverkoissa, pienemmät energiahäviöt ja pienempi jännitteenalenemana. Varsinkin asiakastiheydeltään suurissa jakeluverkoissa verkot rakennetaan usein rengasverkoiksi, vaikka verkkojen käyttötapa on pääsääntöisesti säteittäinen. Esimerkiksi Helen Sähköverkko Oy:n keskijänniteverkko on lähes täysin rengasmaisen kaapeliverkko ja suurin osa pienjänniteverkosta on raken-



nettu samalla periaatteella. Näin pystytään asiakkaan häiriötilanteessa kokemaan jännitteetöntä aikaa huomattavasti lyhentämään. Rakentamalla verkko rengasmaisesti voidaan verkon vika- tai huoltotilanteissa vikaantunut tai huoltoa vaativa erotinväli erottaa muusta verkosta ja palauttaa sähkönjakelu asiakkaille. Maaseutuverkoissa kustannusten kasvaminen pakottaa usein verkkomuodon pääsääntöisesti säteittäiseksi verkoksi.

### 3.2.1 Jakeluverkon yleissuunnittelun ja luotettavuuden perusteet

Jakeluverkon päätehtävänä on yhdistää toisiinsa sähkön siirto ja kulutus. Suunniteltaessa jakeluverkkoa pyritään verkosta tekemään mahdollisimman luotettava ja kustannustehokas. Kustannuksia tarkasteltaessa otetaan huomioon verkkojen elinkaaren aikaiset kustannukset. Jakeluverkon suunnittelun päätavoitteet voidaan kiteyttää muutamaan kohtaan.

- Sähkönjakelu ei saa aiheuttaa vaaraa ihmisille eikä omaisuudelle.
- Sähkönjakelun on oltava taloudellisesti kannattavaa. Verkostoon tehtävien investointien on oltava kokonaistaloudellisesti kannattavia ja perusteltavissa.
- Sähkönjakelun on oltava mahdollisimman luotettavaa, niin että vikatilanteet ja sähkönjakelun häiriöt aiheuttavat mahdollisimman vähän haittaa asiakkaille.
- Verkossa käytettävien komponenttien on oltava pitkäikäisiä, luotettavia ja niiden on kestävä verkossa esiintyvät mekaaniset ja sähköiset rasitukset.

Kaupunkiverkoilla on maaseutuverkkoja korkeammat kriteerit verkon korvattavuuden ja sähkön laadun suhteen. Kaupunkiverkot pyritään yleensä rakentamaan silmukoiduksi verkoksi niin, että vikatilanteessa keskeytynyt jakelu pystytään korvaamaan toisella vaihtoehtoisella syöttöreitillä.

Jakeluverkon suunnittelu on luonteeltaan kertatehtävä, jota varsinkin kaupunkiolosuhteissa ohjaa voimakkaasti kaavoitus ja maankäyttö. Kertatehtävällä tarkoitetaan työtä, jonka elinkaari on pitkä ja jonka suunnitteluvaiheessa pyritään ottamaan huomioon tulevaisuuden tarpeet pitkällä aikavälillä. Suunniteltaessa jakeluverkkoa voidaan suunnittelu toteuttaa kahdella päätavalla. Suunniteltaessa jakeluverkkoa se voidaan suunnitella rakennettavaksi vakiokomponenteilla tai jokainen suunnitelma voidaan tarkastella erikseen taloudellisen ja teknisen toimivuuden varmistamiseksi. Vakiokomponenteilla rakennetaan esim. tiheän kuormituksen kaupunkialueita. Kaupunkialueilla verkon käyttövarmuuden ja korvattavuuden parantamiseksi verkko pyritään rakentamaan kauttaaltaan yhtä vahvaksi. Tämä on ristiriidassa verkon taloudellisen suunnittelun kanssa. Suunnitellaan jakeluverkkoa kummalla tavalla tahansa samat suunnittelu ohjaavat reunaehdot tulee pääosin täytyä:

- jännitteenalenema ei saa olla sallittua suurempi
- johtojen terminen kestoisuus ei saa ylittyä
- johtojen tulee olla oikosulkukestoisia
- suojauksen toimivuuteen liittyvien määräysten tulee täytyä
- sähköturvallisuuteen liittyvien määräysten tulee täytyä [6. s.64].

Sähköverkkoon asennettavien komponenttien elinkaari on pitkä, usein 30–50 vuotta. Komponenttien pitkän teknisen käyttöiän takia jakeluverkon pitkän aikavälin suunnittelulla on suuri merkitys onnistuneessa verkkostrategiassa. Pitkän aikavälin suunnittelulla

pyritään selvittämään pääpiirteittäin millä tavoin ja kuinka paljon verkkoon tulisi investoida, jotta se säilyttäisi sille asetetut tavoitteet. Pitkän aikavälin suunnitelma toimii lähtötietona, kun määritellään verkon lyhyemmän aikavälin investointisuunnitelmaa.

Sähköverkon suunnittelu on keskeisessä roolissa, kun ajatellaan verkon luotettavuutta ja käyttövarmuutta. Sähköverkon luotettavuudella tarkoitetaan verkon kykyä toimia verkon erilaisissa kuormitus- tai vikatilanteissa, kun näitä tarkastellaan pitkällä aikavälillä. Käyttövarmuudella taas tarkoitetaan verkon kykyä kestää erilaisia vikoja niin, että niistä ei aiheudu esim. toistuvien vikojen takia suurempaa vikaa esim. verkon romahdusta. Ollakseen luotettava verkon tulee siis olla myös käyttövarma.

Verkon keskeytyksiin voidaan vaikuttaa keskeytysaikoja lyhentävästi verkon topologiaa muuttamalla eli lisäämällä verkkoon silmukoituja pisteitä, joista verkon kytkentätilaa voidaan muuttaa ja valitsemalla verkkoon ennalta tunnettuja ja hyväksi havaittuja komponentteja. Jakorajoilla vaikutetaan myös verkon häviöihin ja keskeytyksen KAH-arvoon. Suojalaitteita ja suojausvyöhykkeitä muuttamalla voidaan keskeytysalueita pienentää. Kaapeloinnilla voidaan myös vaikuttaa verkon käyttövarmuuteen. Sillä pystytään tehokkaasti torjumaan esim. myrskyn aiheuttamat vahingot sähköverkolle. Suomessa noin 90 % asiakkaiden kokemista sähkönjakelun keskeytyksistä johtuu keskijänniteverkon keskeytyksistä [19. s.11].

Järjestelmällisesti tehtävällä sähköverkon kunnonvalvonnalla voidaan viranomais määräysten täyttämisen lisäksi ehkäistä ja ennakoida vikoja ja siten pienentää ja poistaa keskeytyshaittoja. Vikaantumassa olevien komponenttien havaitsemiseksi voidaan käyttää esimerkiksi visuaalisia tarkastuksia, akustisia ja sähkömagneettisia mittauksia, osittaispurkausmittauksia, muuntamovalvontaa ja lämpökuvauksia.

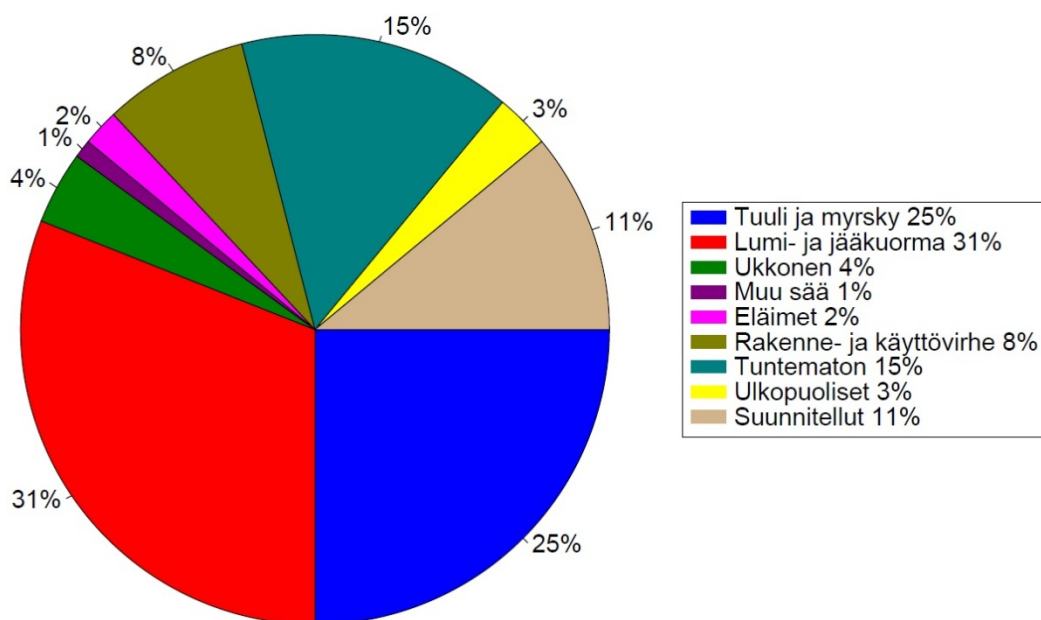
Vikojen aiheuttamien äkillisten keskeytysten haittaa voidaan tehokkaasti vähentää käyttämällä: vikapaikan laskennallista määrittämistä, kauko-ohjattavilla erotinlaitteilla, varayhteyksillä, henkilöstön koulutuksella, muuntamoautomaatiolla ja lisäämällä vianselvityksen resursseja.

Maasulkuvirran kompensoinnilla voidaan myös vähentää keskijänniteverkon aiheuttamien asiakas keskeytysten määrää. Esimerkiksi Helen Sähköverkko Oy:n keskijänniteverkon 20 kV verkossa maasulkuviat edustavat yli 75 % kaikista 20 kV vikakeskeytyksistä ja yli 55 % koko jakeluverkkoa koskevista keskeytyksistä [20.].

## 4 Sähkönjakelun toimitusvarmuus

Verkkoyhtiöt kamppailevat samojen ongelmien kanssa ympäri maailmaa. Kuinka voidaan maksimoida verkon käytettävyys niin, että kunnossapidosta ja käyttökeskeytyksistä aiheutuvat kustannukset pysyisivät mahdollisimman alhaisena ja verkkojen luotettavuus erinomaisella tasolla. Perinteisesti sähkön laadulla on ymmärretty sen fyysikaalisten suureiden pysymistä standardeissa tai muissa yhteisesti sovituissa normeissa määritellyissä raja-arvoissa. Kuitenkin sanalla laatu tarkoitetaan nykyään paljon enemmän. Sähkön toimituksen laatu muodostuu sähkön laadusta ja sähkön toimitukseen liittyvän palvelun laadusta. Sähkön laatu koostuu puolestaan toimitusvarmuudesta ja jännitteen laadusta. Sähkön toimituksen laatuun vaikuttavat sähköverkkoyhtiön koko toiminta: verkon suunnittelu, verkon käyttö ja kunnossapito, suojaus, loistehon kompensointi, liittymäpalvelut, tariffit ja laskutus sekä laadun lisäpalvelut [27.]

Vuoden 2012 tilastojen mukaan suomalaiset ovat kokeneet keskimäärin 7,42 keskeytystä, joiden keskimääräinen kestoaika on ollut noin 1,07 tuntia. Keskeytysmäärät ja ajat vaihtelevat vuosittain. Esimerkiksi laajat myrskyt tai muut luonnonilmiöt voivat aiheuttaa vuosittaisia piikkejä keskeytysaikoihin. Kuvasta 6 on esitetty keskeytysten aiheuttajat Suomessa vuonna 2012.



Kuva 6 Keskeytysajan aiheuttajat Suomessa vuonna 2012 [28]

Tulevaisuudessa voidaan olettaa keskeytysten määrän jakeluverkoissa vähenevän suurten kaapelointihankkeiden myötä. Toisaalta jakeluverkkotekniikan kehittyminen vaikuttaa jakeluvarmuuteen uusien kehittyneiden menetelmien käyttöönoton myötä.

Laatuhäiriöt ja – poikkeamat tulevat jatkossa esille aikaisempaa herkemmin. Asiakkaiden elektroniikkaa sisältävät laitteet ovat tulevaisuudessa entistä herkempiä ja sietävät entistä huonommin verkon hyväksyttävää laatua. Mikrotuotanto ja sen hallinta tuo jakeluverkkoyhtiöille lisää haastetta, kun verkon sähkön laatua yritetään pitää mahdollisim-

man korkealla tasolla. Verkkoyhtiöiden on pystyttävä hallitsemaan ja tarvittaessa rajoittamaan niiden verkkoon tuottamia yliaaltovirtoja.

Kaiken kaikkiaan asiakkaiden odotuksen sähkön laadun suhteen kasvavat. Verkkoyhtiöiden toimintaa ohjaa sähkömarkkinalain verkon kehittämisvelvoite ja Energiaviraston valvonta.

#### **4.1 Jakelukeskeytykset**

Sähkön laadulle määritellään jakelujännitteen ominaisuudet pien- ja keskijänniteverkoilla SFS-EN 50160 standardissa. Suomessa sähköverkkojen jännitteeksi on määritelty nolla- ja vaihejohtimen välillä 230 V. Standardin mukaan 95 % arvoista tulee olla välillä  $U_n \pm 10 \%$ , lisäksi ei voida ylittää arvoja  $U_n + 10 \%$  /  $-15 \%$ . Tämän lisäksi on olemassa paljon tiukemmat arvot hyvälle ja normaalille laadulle. Todennettaessa jännitteen laatua on mittaussajanjakso viikko ja mittaus on suoritettava normaaleissa käyttöolosuhteissa.

Jakelun keskeytymisellä tarkoitetaan tilannetta, jossa jännite on alle 1 % nimellisestä jännitteestä  $U_n$ . Jakelun keskeytys voi pienimmillään koskea vain yhtä asiakasta, mutta voi laajimmillaan koskea koko kantaverkkoja ja siihen liittyneitä jakeluverkkoja.

Jakelukeskeytys katsotaan alkaneen siitä, kun se on tullut verkkoyhtiön tietoon. Keskijänniteverkon ja sitä korkeampi jännitteisten verkkojen osalta lähes poikkeuksetta tämä tieto saadaan käytönvalvonta- tai käytöntukijärjestelmästä. Pienjänniteverkon osalta tieto voi tulla myös asiakkaalta. Keskeytykset voidaan jakaa syntyperänsä mukaan vikakeskeytyksiin ja suunniteltuihin keskeytyksiin. Suunniteltu keskeytys on sähkönjakeluverkossa tehtävä ennalta suunniteltu työ, josta asiakkaalle on ilmoitettu etukäteen. Häiriökeskeytys on vian tai virhekytkennän seurauksena syntynyt keskeytys.

#### **4.2 Keskeytysten aiheuttamat kustannukset**

Asiakkaiden kokemien keskeytysten aiheuttamaan haittaan vaikuttaa keskeytysten lukumäärä, keskeytysten pituus ja toisaalta myös keskeytysten ennakoimattomuus. Asiakkaille näkyvistä keskeytyksistä yli 90 % johtuu keskijänniteverkosta. Loput noin 10 % ovat pääosin pienjänniteverkossa aiheutuneita keskeytyksiä. Keskijännitteellä tapahtuvissa keskeytyksissä keskeytyksen vaikutuspiiriin kuuluvat kaikki suojaavan laitteen takana olevat asiakkaat. Pysyvän vian tapauksessa, vianselvityksen edettyä, pystytään jakelua palauttamaan osalle asiakkaista toisten vielä ollessa keskeytyksen vaikutuksen alaisina. Vikatapauksissa verkon vioittunut osa pyritään erottamaan ehjästä verkosta mahdollisimman nopeasti ja palauttamaan verkon syöttö mahdollisimman monelle asiakkaalle. Kaupunkiverkot ovat usein silmukoituja ja näissä yksittäisen vian aiheuttama keskeytys pystytään korvaamaan vaihtoehtoisilla syöttösuunnilla.

Arvioitaessa keskeytyksen aiheuttamaa haittaa (KAH) asiakaskohtaisesti pitää pystyä huomioimaan erityyppisten asiakasryhmien kokema haitta. Haittavaikutukset ovat erilaisia erityyppisillä asiakasryhmillä. Toisilla asiakasryhmillä vasta pitkät keskeytykset aiheuttavat suuria haittoja, kun taas toisilla jo lyhyt keskeytys voi johtaa suuriin tappioihin tuotannossa. Keskeytymättömän sähkönjakelun merkitys on kasvanut jatkuvasti. Tästä voidaan pitää osoituksena KAH-arvojen kasvua 1990-luvulta lähtien [29. s.5].

Asiakasryhmäkohtaisia valtakunnallisia keskimääräisiä KAH-arvoja voidaan laskea painotettuina keskiarvoina. Laskenta on mahdollista toteuttaa joko energialla painotettuna tai asiakasryhmän asiakasmäärään perustuen. Eri asiakasryhmien valtakunnallisesti käytettävät energiaosuuksilla painotetut KAH arvot on esitetty taulukossa 1.

**Taulukko 1 Valtakunnallisilla energiaosuuksilla painotetut KAH-arvot [29. s.32]**

Asiakasryhmä	Energiaosuus %	Odottamaton		Suunniteltu		PJK €/kW	AJK €/kW
		€/kW	€/kWh	€/kW	€/kWh		
Kotitalous	43	0,36	4,29	0,19	2,21	0,11	0,48
Maatalous	7	0,45	9,38	0,23	4,80	0,20	0,62
Teollisuus	17	3,52	24,45	1,38	11,47	2,19	2,87
Julkinen	12	1,89	15,08	1,33	7,35	1,49	2,34
Palvelu	21	2,65	29,89	0,22	22,82	1,31	2,44
<b>Yhteensä</b>	<b>100</b>	<b>1,57</b>	<b>14,74</b>	<b>0,54</b>	<b>8,91</b>	<b>0,89</b>	<b>1,53</b>

### 4.3 Verkkoyhtiöiden toimitusvarmuuden mittaaminen

Verkkoyhtiöiden toimitusvarmuutta voidaan mitata toimitusvarmuuden yleisesti käytetyillä tunnusluvuilla, tunnusluvut ovat IEEE 1366-2012 standardin mukaisia.

- SAIFI (System Average interruption Frequency Index), keskeytysten keskimääräinen lukumäärä (kpl/asiakas) tietyllä aikavälillä
- SAIDI (System Average interruption Duration Index), keskeytysten keskimääräinen yhteenlaskettu kesto-aika (h/asiakas) tietyllä aikavälillä
- CAIDI (Customer Average interruption Duration Index), keskeytysten keskipituus (h/keskeytys)

Tunnusluvut on määritelty seuraavien yhtälöiden mukaisesti [31. s.26]:

$$SAIFI = \frac{\sum_j n_j}{N_s}, \text{ missä}$$

$n_j$  = asiakkaiden  $j$  kokema keskeytysten määrä,

$N_s$  = asiakkaiden kokonaismäärä

$$SAIDI = \frac{\sum_i \sum_j t_{ij}}{N_s}, \text{ missä}$$

$t_{ij}$  = asiakkaiden  $j$  keskeytyksestä  $i$  aiheutunut aika ilman sähköä

$$CAIDI = \frac{\sum_i \sum_j t_{ij}}{\sum_j N_j}, \text{ missä}$$

$n_j$  = asiakkaan  $j$  kokema keskeytysten määrä tietyllä aikavälillä.

Suomessa Energiavirastolle toimitettavissa keskijänniteverkkoa koskevissa tilastoissa tilastointi on tehty muuntopiiritasolla. Muuntamopiiritason tunnusluvuissa käytetään edellisestä poiketen T-etuliitettä tunnuslukujen nimien edessä (T-SAIFI, T-SAIDI ja T-CAIDI). Näissä tunnusluvuissa ei ole mukana pienjänniteverkon keskeytyksiä. Muuntopiirien tunnusluvut on laskettu seuraavien kaavojen mukaan.

$$T - SAIFI = \frac{\sum_{i=1}^n mpk_i}{mp}, \text{ missä}$$

$mpk_j$  = niiden muuntopiirien lukumäärä, joihin keskeytys  $i$  on vaikuttanut

$mp$  = muuntopiirien kokonaislukumäärä jakelualueella

$$T - SAIDI = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n mpk_{ij} \times h_{ij}}{mp}, \text{ missä}$$

$n$  = keskeytysten määrä

$x$  = kunkin keskeytyksen yhteydessä esiintyvien erilaisten kestoajkojen määrä

$mpk_{ij}$  = muuntopiirien lukumäärä kullakin osa-alueella, jossa keskeytysten kesto oli  $h_{ij}$

$$T - CAIDI = \frac{\sum_{i=1}^n mph_i}{\sum_{i=1}^n mpk_i}, \text{ missä}$$

$mph_i$  = keskeytyksen  $i$  vaikutusalueella olleiden muuntopiirien yhteenlaskettu keskeytysaika

$mpk_i$  = niiden muuntopiirien lukumäärä, joihin keskeytys  $i$  on vaikuttanut.

## 5 Osittaispurkaukset

Osittaispurkaus on paikallinen sähköpurkaus, joka syntyy, kun sähkökentän voimakkuus ylittää paikallisen eristeaineen sähkölujuuden. Osittaispurkaus ei sulje elektrodiväliä ja eroaa näin läpilyönnistä.

Osittaispurkauksia esiintyy niin tasa-, vaihto- kuin syöksyjännitteillä eristeiden rajapinnoilla, kaasuu-, neste- ja kiinteissä eristeissä. Tärkeimmät osittaispurkaustyypit ovat eristerakenteen sisäiset purkaukset, eristeen pintapurkaukset ja koronapurkaukset johtimen pinnalla [9. s.74]. Vaihtojännitteellä purkaukset toistuvat usein jaksoittain.

Osittaispurkaus synnyttää eristeessä elektrodien välille virtapulssin. Virtapulssi johtuu eristyksen sähkökentänjakauman muutoksesta osittaispurkauksen syntyhetkellä. Nopean sähkökentän muutoksen aiheuttaa muutos elektrodien varauksessa. Mittaamalla todettava osittaispurkauspulssi on seurausta tästä varauksen muutoksesta [18. s.22].

Käyttöpaikalla tapahtuvat osittaispurkausmittaukset voidaan jakaa kahteen eri pääryhmään toteutustavan mukaan, käytönaikaisiin (on-line) ja käyttökatkon vaativiin (off-line) mittauksiin. Suomessa ei ole toistaiseksi tehty käytönaikaisia on-line mittauksia suuressa mittakaavassa. Viime aikoina on kuitenkin ollut havaittavissa useiden eri laitevalmistajien esittelevän kaupallisia laitteita ja sovellutuksia osittaispurkausten käytön aikaisten mittausmenetelmien suhteen [21]. Käytönaikaisissa osittaispurkausmittauksissa voidaan mittauksissa käyttää sensoreina sähköasemilla tai muuntamoilla sijaitsevia mittamuuntajia tai mittaukset voidaan toteuttaa käyttäen Rogowskin-kelaan tai HFCT-antureita.

### 5.1 Sisäisten osittaispurkausten syntyminen vaihtojännitteellä

Sähkökentänvoimakkuus  $\bar{E}$  voidaan lausua kaavan 4.1 mukaisesti sähkövuon ja permittiviteetin avulla kaava 4.2.

$$\bar{E} = \frac{\bar{D}}{\varepsilon}, \quad \text{jossa } \bar{D} \text{ on sähkövuon ja } \varepsilon \text{ on permittiviteetti.} \quad (4.1)$$

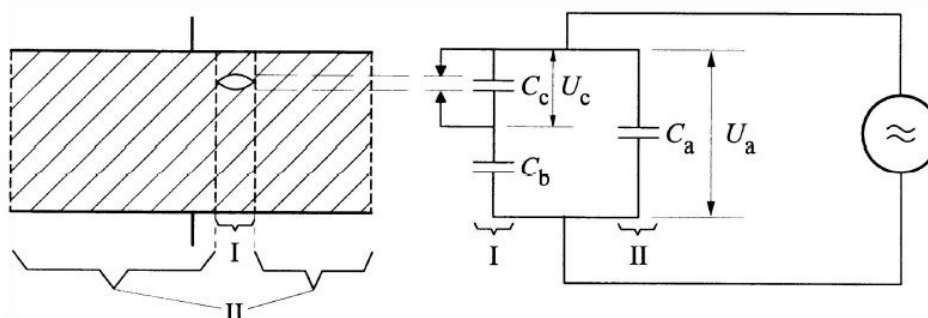
Jokaisella eristeaineella on ominaisuus, joka määrää eristeeseen kohdistuvan sähkökentänvoimakkuuden tämän ominaisuuden mukaisesti. Ominaisuutta kutsutaan eristeaineen permittiviteetiksi  $\varepsilon$ , joka esitetään usein suhteellisenä permittiviteettinä  $\varepsilon_r$ .

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}, \quad \text{jossa } \varepsilon_0 \text{ on tyhjiön permittiviteetti.} \quad (4.2)$$

Suunniteltaessa eristettä eristeen permittiviteetillä on suuri merkitys. Kaavasta 4.1 voidaan päätellä, että eristeen koostuessa useammasta eristeaineesta on suuremman permittiviteetin omaavan eristeen yli vaikuttava sähkökentän voimakkuus pienempi kuin pienemmän permittiviteetin omaavan eristeen.

Sisäiset osittaispurkaukset eli ontelopurkaukset ovat kenties merkittävin osittaispurkausten esiintymismuoto kaapeliverkoissa. Yksinkertaisimmillaan tällainen ilmiö voidaan

kuvata ontelolla, joka on kiinteän eristeineen ympäröimänä. Osittaispurkaus tapahtuu niin nopeasti, että ulkoinen piiri ei kerkeä vaikuttamaan ilmiöön. Rakennetta voidaan kuvata kapasitanssimallilla, jossa  $C_c$  on ontelon,  $C_b$  sen kanssa sarjassa olevan eristyksen ja  $C_a$  eristysrakenteen loppuosan kapasitanssi [9. s.76]. Tätä mallia kutsutaan kolmikapasitanssimalliksi.



**Kuva 7** Kolmikapasitanssimalli [9. s.76]

Osittaispurkaus syttyy, kun ontelon yli vaikuttava sähkökentänvoimakkuus ylittää sen sähkölujuuden. Tästä voi seurata nopea ionisoituminen, jonka aikana syntyy vapaita varauksenkuljettajia. Varauksenkuljettajien voimakas lisääntyminen johtaa lopulta purkaukskanavan syntymiseen ja läpilyöntiin ontelossa. Ontelo on hetken aikaa johtava purkauksen aikana ja sen kentänvoimakkuus romahtaa lähelle nolaa. Kentänvoimakkuuden romahtaminen johtaa myös ionisaation loppumiseen ja purkaus sammuu. Purkaus voi uusiutua, jos sähkökenttä ontelon sisällä uudestaan ylittää kriittisen rajan.

Osittaispurkauksiin liittyy mitattavia suureita, joiden ymmärtäminen jatkoa ajatellen on välttämätöntä. Tärkeimpinä näistä suureista voidaan pitää osittaispurkausten syttymisjännitettä  $PD_{iv}$ , sammumisjännitettä  $PD_{ev}$  ja näennäisvaraustasoa.

Syttymisjännitteellä (inception voltage) tarkoitetaan koejännitettä, jolla ensimmäisen kerran havaitaan toistuvia osittaispurkauksia, kun jännitettä nostetaan asteittain matalammasta jännitteestä korkeampaan jännitteeseen.

Sammumisjännitteellä (extinction voltage) tarkoitetaan jännitettä, jolla havaitut säännölliset osittaispurkaukset loppuvat, kun jännitettä lasketaan asteittain korkeammasta jännitteestä matalampaan jännitteeseen. Sammumisjännite on usein matalampi kuin syttymisjännite.

Näennäisvaraustasolla tarkoitetaan varausta, joka lyhyellä aikavälillä syötettynä koe-kappaleen napoihin antaa saman mittaustuloksen kuin osittaispurkauksen aiheuttama virtapulssi. Näennäisvaraus ilmoitetaan yleensä pikocoulombeina (pC).

## 5.2 Pintapurkausten syntyminen vaihtojännitteellä

Kun eristeen pinnalla syntyy purkaus, johon vaikuttaa suuri eristepinnan suuntainen sähkökenttä, puhutaan pintapurkauksesta. Pintapurkausten syntyä ja ominaisuuksia voidaan tarkastella samoilla tiedoilla kuin sisäisiä purkauksia.



Tärkein ja yleisin pintapurkauksen esiintymismuoto on liukupurkaus. Liukupurkauksessa kahden samansuuntaisen eristeen rajapintaan vaikuttaa suuri pinnan suuntainen jännitekomponentti. Rajapintaa vasten kohtisuoralla jännitekomponentilla on liukupurkausta voimistava vaikutus. Läpivientieristimet ja kaapelipäätteet ovat paikkoja, joissa liukupurkauksia saattaa esiintyä.

Eristeiden rajapinnalla sähkökenttä taipuu, mutta siihen jää myös pinnansuuntainen komponentti. Ilmalla ja kiinteällä eristeaineella on erilainen permittiviteetti, ilman ollessa permittiviteetiltään ja jännitelujuudeltaan pienempi. Ilmassa saattaa syttyä osittaispurkauksia hyvin pienillä jännitteillä, kun verrataan kiinteän eristeen jännitelujuuteen. Jännitteen edelleen noustessa purkaukset pidentyvät liukupurkauksiksi rajapintaa pitkin. Pahimmassa tapauksessa liukupurkaukset muuttavat sähkökentän jakaumaa eristealueella ja johtavat koko eristeketjun ylilyöntiin. Osittaispurkaukset saattavat saada aikaan myös läpilyönnin yleensä eristeen ulkopuolelta ja ne vahingoittavat kiinteää eristeainetta [9. s.80].

### 5.3 Koronapurkaukset

Koronapurkaus on osittaispurkaus, joka esiintyy kaasumaisen eristeaineen ympäröimän elektrodin pinnalla. Tyypillisimmillään koronapurkauksia voi havaita suurjännitteisissä avojohtimissa sateisella säällä. Korona on useimmiten vaarattomampi kuin ilmiö kuin edellä mainitut sisäiset tai liukupurkaukset. Korona purkauksia esiintyy ilmaeristyksissä ja ne eivät ole kaapeliverkoissa näin ollen oleellisia.

### 5.4 Osittaispurkausten paikantaminen

Vaikka osittaispurkaukset tunnettaisiin ja niiden näennäisvaraukset pystyttäisiin laskemaan, on vähintäänkin yhtä tärkeää pystyä määrittämään paikka, jossa osittaispurkausta esiintyy. Osittaispurkausten paikallistaminen voidaan toteuttaa usealla eri tavalla, mutta yleisimmin on käytössä aikatasoon perustuva pulssien aikaeroa mittaava menetelmä.

Keskijännitekaapeli voidaan mallintaa koaksiaalisenä siirtojohtona, jonka ominaisuudet määrittävät etenemiskertoimen  $\gamma(\omega)$  avulla. Etenemiskerroin on vaihekertoimen  $\beta(\omega)$  ja vaimenemiskertoimen  $\alpha(\omega)$  summa. Siirtojohtoteoriassa johtimen resistanssit ( $R$ ), induktanssit ( $L$ ), konduktanssit ( $G$ ) ja kapasitanssit ( $C$ ) ajatellaan tasaisesti koko johdin pituudelle jakautuneiksi differentiaalisen pieniksi johdinosiksi. Tämä voidaan lausua kaavalla 4.3.

$$\gamma(\omega) = \alpha(\omega) + j\beta(\omega) = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (4.3)$$

Vaimenemiskerroin  $\alpha(\omega)$  on taajuudesta riippuva vaimenemiskerroin, jonka mukaan kaapelin häviöt määrittyvät,  $\beta(\omega)$  kertoo pulssin etenemisnopeuden kaapelissa [22. s.19].

Siirtojohdolle voidaan määrittää ominaisimpedanssi  $Z_0$ .

$$Z_0 = \sqrt{\frac{(R + j\omega L)}{(G + j\omega C)}} \quad (4.4)$$

Kulkuaallon etenemisnopeus saadaan kaavasta 4.5.

$$v = \frac{\omega}{\beta} \quad (4.5)$$

Siirtojohtolla on aina myös kulkuaaltoon vaikuttavia häviöitä. Häviöiden vaikutuksesta kulkuaallon energia pienenee. Olettaessa nämä häviöt niin pieniksi, että niillä ei ole merkitystä voidaan etenemisnopeus  $v$  laskea kaavalla 4.6.

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4.6)$$

Aallon etenemisnopeus voidaan lausua myös suhteellisen permittiviteetin ja permeabiliteetin ja valon nopeuden  $c$  avulla.

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (4.7)$$

Osittaispurkauspulssin etenemisnopeus on PEX eristeisessä kaapelissa noin 200 m/ $\mu$ s ja öljypaperieristeisessä kaapelissa noin 160 m/ $\mu$ s [22. s.20].

Osittaispurkausmittauslaitteistoilla pystytään määrittämään osittaispurkauksen paikka melko tarkasti. Paikantaminen perustuu osittaispurkauspulssin ja heijastuneen pulssin mitattuun aikaeroon. Mitattavassa kohteessa syntynyt pulssi etenee syntykohdastaan kahteen suuntaan, kohti mittauspäätä ja vastakkaiseen suuntaan. Pulssin saavuttua auvonaiseen päähän heijastuu se takaisin kokonaisuudessaan. Mittauspäässä havaitaan ensimmäisenä purkauspulssi, joka on lähtenyt suoraan kohti mittauspäätä. Jos mitattava kaapeli ajatellaan suoraksi, jonka kohdassa  $x$  tapahtunut purkaus saavuttaa mittauspään ajassa  $t_1$  kaavan 4.8 mukaisesti.

$$t_1 = \frac{x}{v} \quad (4.8)$$

Purkaukskohdasta  $x$  ensin vastakkaiseen suuntaan lähtenyt pulssi joutuu kulkemaan kaapelin avoimeen päähän ja sieltä takaisin mittauspäähän. Pulssi saavuttaa mittauspään ajanhetkellä  $t_2$ .

$$t_2 = \frac{2l - x}{v} \quad (4.9)$$

Yhdistämällä kaavojen 4.8 ja 4.9 tiedot, voidaan purkauspaikka määrittää pulssien välisen aikaeron avulla.

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2(l - x)}{v} \quad (4.10)$$

Purkauksen paikka saadaan ratkaisemalla  $x$  yhtälöstä 4.10.

$$x = l - \frac{1}{2}v\Delta t \quad (4.11)$$

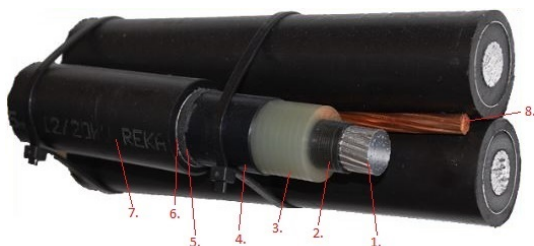
Pulssin etenemisnopeus  $v$  selvitetään monesti ennen varsinaisia mittauksia, mittalaitteiston kalibroinnin yhteydessä. Nopeus saadaan kaavasta 4.12.

$$v = \frac{2l}{\Delta t_{test}} \quad (4.12)$$

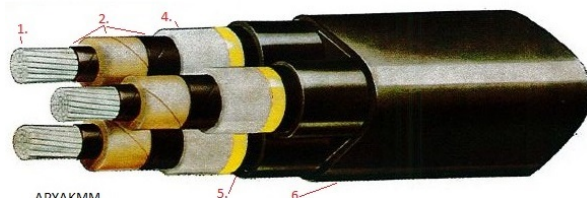
Purkausten paikallistaminen tarkkuuteen vaikuttaa monta eri tekijää. Usein tekijät ovat ns. systemaattisia virheitä kuten mittalaitteiden tarkkuus, kaapelin kokonaispituuden tarkkuus, aikaeron mittaamistarkkuus jne. Mittausten tarkkuuteen vaikuttaa käytännössä mitattavan kaapeliverkon rakenne. Hyvin usein verkko koostuu useasta erityyppisestä kaapelista, joiden aallon etenemisnopeus vaihtelee. Kaapeliverkot sisältävät usein sekä paperi- että muovieristeisiä kaapeleita. Tällöin mittaustulosta voidaan tarkentaa tarkastelemalla jokaista kaapeliosuutta erikseen [18.s.27-30][24.s.16-17].

### 5.5 Keskijännitteellä käytettävät kaapelit

Keskijänniteverkossa käytettävät kaapelit voidaan jakaa eristysmateriaalin mukaisesti kahteen pääryhmään: öljypaperieristeiset kaapelit ja muovikaapelit. Suomessa on käytetty lähes yksinomaan öljypaperieristeisiä kaapeleita keskijänniteverkon kaapeloinnissa aina 1980- luvun loppu puolelle asti. Helsingissä ensimmäiset AHXAMK-W tyyppiset kaapelit on asennettu 1986.



AHXAMK-W  
 1. Johdin, Vesitiivis pyöreä tiivistetty alumiinijohdin  
 2. Johdinsuoja, Puolijohtava muovi  
 3. Eriste, PEX-eriste  
 4. Hohtosuoja, Puolijohtava muovi  
 5. Täyte, Puolijohtava paisuva nauhoitus  
 6. Kosketussuoja, Alumiini-muovilaminaatti  
 7. Vaippa, Säänkestävä PE-muovi  
 8. Keskusköysi, Tiivistetty kuparijohdin.  
 Vaiheet kerrattu keskusköyden ympärille



APYAKMM  
 1. Johdin, Tiivistetty pyöreä alumiiniköysi  
 2. Eriste, Kyllästetty paperi. Mustat puolijohtavat kerrokset eristeen alla ja päällä  
 3. Kyllästys, Valumaton kyllästysöljy  
 4. Vaippa, Alumiinia  
 5. Suoja, Korroosionestokerros ja musta muovivaippa  
 6. Vaippa, Vaipatut johtimet kerrattu yhteen muovitäytteen

**Kuva 8 Suomessa yleisesti käytetyt keskijännitekaapelit PEX-eristeinen AHXAMK-W ja Öljypaperieristeinen APYAKMM.[39, 40]**

Suomessa yleisesti käytetty AHXAMK-W tyyppinen kaapeli on osoittautunut hyväksi valinnaksi. Sen vikataajuus on Helen Sähköverkko Oyn tilastojen mukaan alle 0,2 vikaa asennettua 100 kilometriä kohden. Muissa pohjoismaissa on käytetty keskijännitekaapelin kaapelia, jonka rakenteeseen ei kuulu AHXAMK-W tyyppisestä kaapelista tuttua alumiinilaminaattia. Esimerkiksi Ruotsissa ovat vanhoissa keskijännitekaapeleissa vesipuut aiheuttaneet ongelmia. Ongelmat ovat johtuneet valmistustekniikan puutteista ja kaapelin rakenteesta, jossa ei ole AHXAMK-W tyyppisestä kaapelista tuttua radiaalista vesieristystä. Taulukosta 2 on nähtävissä vikatiheydet asennettu 100 kilometriä kohden. Tilastot ovat vuodelta 1986, jolloin kaapeleiden asennusikä ei vielä ollut kovin korkea.

**Taulukko 2 Vesipuiden aiheuttamat viat vuosien 1965-186 välillä Ruotsin keskijänniteverkoissa[44. s.10]**

Kaapelin asennusvuosi	Vikatiheys/100km
1965-1975	0,53
1975-1981	0,05
1981-	0

### 5.5.1 Öljypaperieristeinen keskijännitekaapeli

Öljypaperi kaapeli on joko paineistettu tai paineistamaton. Öljyllä kyllästetty paperieriste on kiedottu kerroksittain limitettynä johtimen ympärillä niin, että radiaalisuunnassa ei kerrosten välille jää suoraa kanavaa. Eriste kerroksen paksuus on noin 5 mm puhuttaessa keskijännitekaapeleista. Rakenne on sähkötekniisesti epähomogeeninen, koska paperilla ja öljyllä on kummallakin omat permittiviteetit. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että öljyeristeeseen kohdistuu suurempi kentän voimakkuus. Paperikerrosten tehtäväksi jääkin muodostaa öljylle tilaa eristeenä ja estää epäpuhtauksien kulkeutuminen eri öljykerrosten välillä. Toinen merkittävä ominaisuus paperilla on, muodostaa ne mekaaniset ominaisuudet, joita kaapelia käsiteltäessä ei saa ylittää. Myös kaapelin metallivaippa ja korroosiosuoja asettavat omat raja-arvonsa kaapelin käsittelylle. Paperieristeisellä kaapelilla taivutushalkaisija on luokkaa  $25 \times$  *kaapelin halkaisija*. Kaapelia ei saa esimerkiksi taivuttaa niin paljon, että eri paperikerrokset eristeiden sisällä koskettavat toisiaan.

Myös öljypaperikaapeliin voi joutua ilmakuplia, jotka helpottavat osaltaan osittaispurkausten syntyä. Kuitenkin öljypaperieristeisten kaapeleiden osittaispurkauskestävyys on huomattavasti suurempi verrattuna polymeerieristeisiin kaapeleihin. Tämä johtuu siitä, että öljypaperieristys on jossain määrin itsekorjautuva, eli kyllästysmassat ja – öljyt pyrkivät tasoittumaan ja tätä kautta ne pystyvät torjumaan alkavia vikoja [9. s.148–151].

### 5.5.2 Muovieristeiset keskijännitekaapelit

Muovieristeiset kaapelit ovat käytännössä kokonaan syrjäyttäneet öljypaperikaapelit. Kaapeleiden eristerakenteena suurjännitteellä käytetään polyeteeniä (PE) tai ristosilloitettua polyeteeniä (PEX). Ristosilloitetussa polyeteenissä sen makromolekyyliketjut ovat sidottu kemiallisesti toisiinsa. Tällä on saavutettu korkeampi muovin sulamispiste niin, että kaapelia voidaan käyttää korkeammissa käyttölämpötiloissa jatkuvasti  $90^{\circ}\text{C}$  ja lyhytaikaisesti jopa  $130^{\circ}\text{C}$  lämpötiloissa.

Kaapelirakenne koostuu: johtimesta, johtimen pinnalla olevasta puolijohtavasta johtosuojasta, jonka tarkoituksena on muodostaa johtimesta tasainen symmetrinen pinta, pääeristeestä, johon sähkökenttä jakautuu ja pääeristeiden päällä olevasta puolijohtavasta aineesta valmistetusta hohtosuojasta. Suomessa yleisessä käytössä olevassa AHXAMK-W kaapelissa hohtosuojan päällä on paisuvasta puolijohtavasta nauhasta tehty pitkittäinen vesieristys. Vesieristeiden päällä on alumiinilaminaatti, joka muodostaa kaapelin kosketussuojan, radiaalisen vedeneristyksen ja mekaanisen suojan.

Polyeteenin heikkoutena voidaan pitää sen huonompaa kestävyyttä osittaispurkauksia vastaan [9. s.148–149]. Tilastollisesti pohjoismaissa on kuitenkin todettu, että muovieristeisissä kaapeleissa vikaantumistodennäköisyys on vain viidesosa verrattuna öljypaperieristeiseen kaapeliin [35. s.26].

### 5.5.3 Eristerakenteen vanheneminen

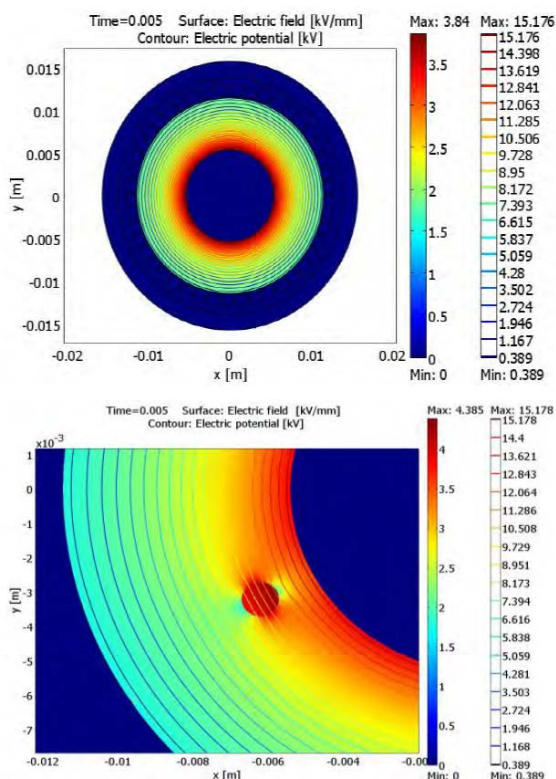
Eristerakenne on suunniteltava tarkasti, jotta se kestäisi myös käytön aikaiset rasitukset niin, että eristysrakenteen sähköiset, termiset ja mekaaniset ominaisuudet eivät merkittävästi heikkene. Eristerakenteen vanhenemisella tarkoitetaan sen ominaisuuksien pa-

lautumatonta muuttumista, joka huonontaa eristeaineen suunniteltua toimintakykyä. Organisisilla aineilla tämä tarkoittaa usein molekyyliketjujen keskimääräisen pituuden pienenemistä ja eristyskyvyn laskemista.

Käyttö- tai ympäristölämpötilalla on vaikutusta eristeaineeseen lämpövanhenemisen kautta. Lämpövanheneminen tapahtuu usein laajalla alueella eristeessä ja on riippuvainen rasitusajasta ja lämpötilasta [9. s.172]. Kemiallisilla muutoksilla ei välttämättä ole suoraa yhteyttä eristeaineen huononemiseen, vaan ne voivat vaikuttaa suoraan esimerkiksi eristeaineen mekaaniseen lujuuteen.

Kaapeleiden ikääntyminen johtuu usein kolmesta eri pääsyystä: kaapelin korkea käyttölämpötila, osittaispurkaukset kaapelieristeessä ja kosteus. Esimerkiksi korkea käyttölämpötila vaikuttaa eristeaineen polymerisaatioon, jolla kuvataan eristeaineen polymeeriketjun keskipituutta. Mitä pidempi polymeeriketjut ovat, sitä paremmat eristeominaisuudet eristeaineella on. Paperieristeisillä kaapeleilla käyttölämpötilan nouseminen taas edesauttaa paperieristeen selluloosan pilkkoutumista, jonka seurauksena syntyy hiilimonoksidia ja hiilidioksidia. Tällöin eristeaineen eristävyys heikkenee.

Osittaispurkaukset esiintyvät eristeaineen koloissa ja aukoissa, aukot tai kolot ovat voineet syntyä esim. termisen kuormituksen ollessa liian suurta tai mekaanisen rasituksen aikana.



**Kuva 9 Sähkökentän jakautuminen XLPE eristeessä ja eristeessä olevan kolon vaikutus sähkökentänjakautumiseen [25].**

Öljypaperikaapelissa öljystä ”kuivuneet” kaapeliosuudet ovat ominaisia alueita osittaispurkausten esiintymiselle. Öljypaperieriste muodostuu limittäin toistensa päälle kiedo-

tuista öljyllä kyllästetyistä paperiliuskoista. Öljyn kadottua eristeestä syntyy pitkittäisiä kanavia paperiliuskojen väliin, joissa osittaispurkauksia esiintyy. Kosteus eristeessä johdetaan usein kaapelin uloimman suojakerroksen rikkoutumisesta. Usein tälle on olemassa jokin ulkopuolinen syy, kuten kaivuvaurion aiheuttama mekaaninen rasitus kaapelille. Vettä voi syntyä myös kaapelin sisälle. Esimerkiksi öljypaperikaapelissa lämmön vaikutuksesta kemiallisen prosessin sivutuotteena syntyy vettä.

Polymeerieristeet vanhenevat usein mekaanisen, kemiallisen tai sähköisen heikkenemisen takia. Polymeerit eivät ole saavuttaneet lopullista kiderakennetta heti valmistuksen jälkeen, vaan lopullinen muotoutuminen tapahtuu ajan kuluessa. Tämä voi altistaa eristerakennetta mikroskooppisen pienten kolojen syntymiselle [9. s.177]

## **5.6 Kaapelivarusteet**

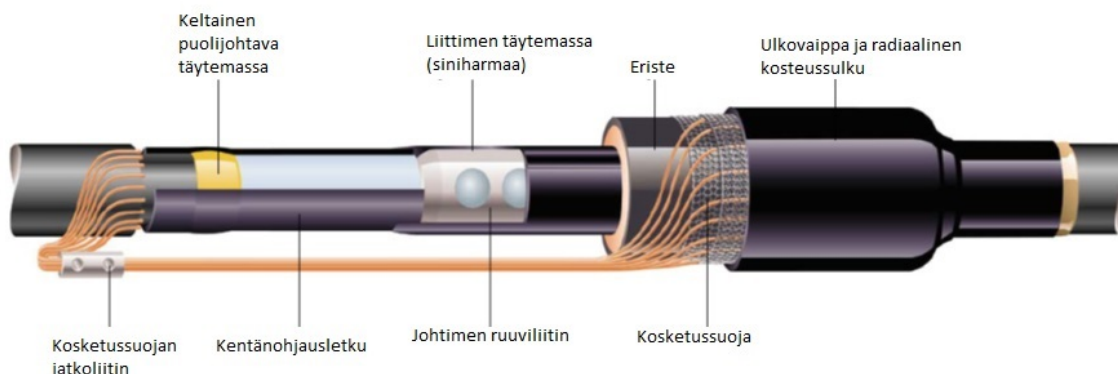
Kaapelivarusteet ovat olennainen ja tärkeä osa kaapeliverkkoa. Asennettaessa uutta kaapeliverkkoa päästään parhaimmillaankin vain noin yhden kilometrin matka ilman kaapelijatkkoa ja joka tapauksessa joudutaan asentamaan ainakin yksi pääte kaapelin terminaaliliityntään. Kaapelivarusteita on olemassa monen erityyppisiä riippuen kaapelin eristysrakenteesta ja kaapelivarusteiden ominaisuuksista. Keskijännitteiset kaapelivarusteet ovat tänä päivänä yleensä muovieristeisiä kylmä- tai lämpökutisteisia kaapelivarusteita. Ne eroavat toisistaan lähinnä valmistukseen käytetyn materiaalin ja asennustekniikan osalta.

Kaapelijatkoksilla pystytään liittämään yhteen useita kaapeleita niin, että syntynyt kaapeliverkko täyttää samat vaatimukset kuin yksinäinen kaapeliosuus. Kaapelipäätteitä tarvitaan kaapeliverkon ydistämiseksi erilaisiin sähkökojeisiin, kuten kytkinlaitoksen kytkinkojeisto tai jakeluverkon haaroituspiste niin, että myös kaapelin päiden sähköiset ominaisuudet ovat hallittuja.

### **5.6.1 Kaapelijatkokset**

Yksittäiset kaapelit ovat kytketty toisiinsa jatkoilla. Jatkojen tulee täyttää samat ominaisuudet kuin niiden yhteen liittämät kaapelit eli kaapeliverkon käyttövarmuus ja luotettavuus tulee koko verkon elinkaaren ajan olla jatkojen osalta samaa tasoa, kuin olemassa olevien kaapeliosuuskien.

Kaapelijatkot koostuvat liittimistä, joilla kaksi erillistä johdinta yhdistetään yhdeksi johtimeksi. Liittimen päälle asennetaan puolijohtavaa ainetta oleva tasoittava kerros, jonka tarkoituksena on tehdä johdin pinnasta tasainen ja yhtenäinen osa varsinaisen eristeen ja johtimen väliltä. Eristeen alapuolella on puolijohtavaa materiaalia oleva kentänohjausletku. Hohtosuojan ja kentänohjausletkun päälle asennetaan varsinainen eristeletku. Eristeen päälle asennetaan usein vielä kosketussuoja, joka yhdistetään kaapelin kosketussuojaan. Viimeisenä osana jatkossa on suojaava vaippa, jossa on radiaalinen kosteusuoja estämässä kosteuden tunkeutuminen jatkoksen sisään. Kuvassa 10 läpileikkaus kaapelijatkosta.



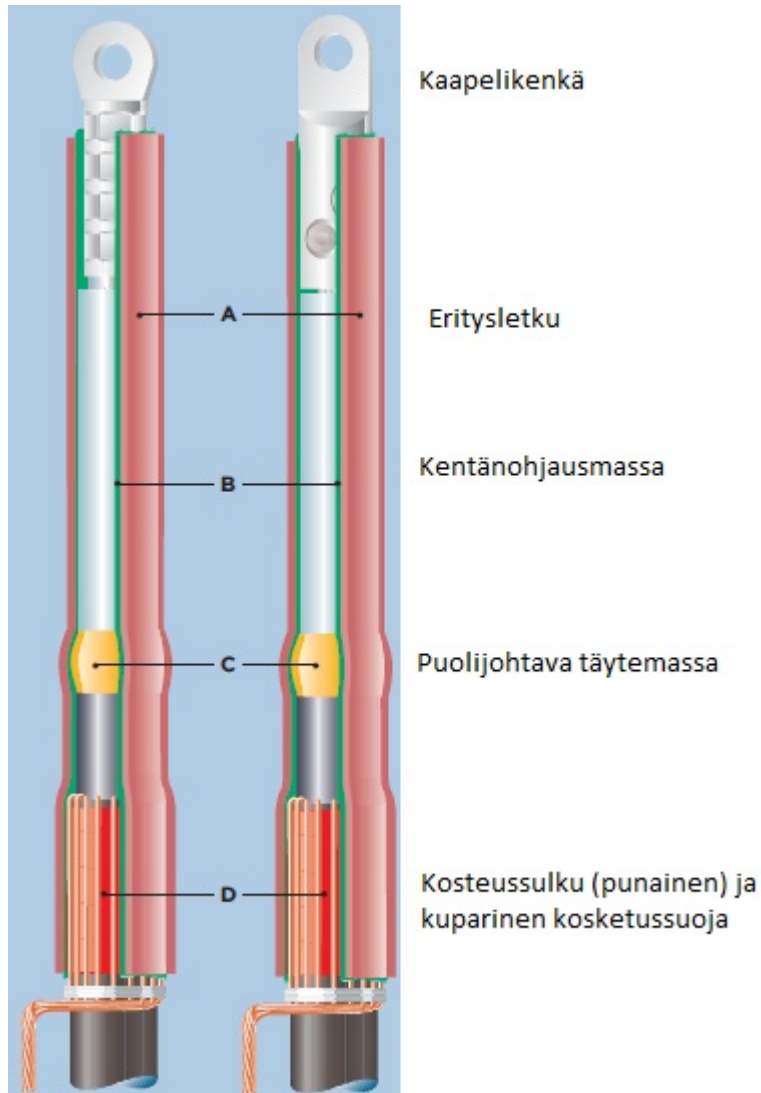
**Kuva 10** Periaatekuva kaapelijatkosta [42]

Kylmäkutistejatkot eroavat lämpökutistejatkoista käytetyn materiaalin ja asennettavuuden osalta, niiden periaatteellinen eristerakenne on kuitenkin vastaava kuin lämpökutisteilla.

### 5.6.2 Kaapelipäätteet

Kaapelipäätteitä tarvitaan, kun kaapelilla halutaan liittyä toiseen sähkökojeeseen. Jotta liittyminen voidaan tehdä, joudutaan liitettävää kaapelia käsittelemään niin, että kaapelijohdin saadaan esille kaapelikengän liittämistä varten. Kohta, jossa liitos tehdään, on ongelmallinen kaapelin päässä vaikuttavan sähkökentän hallitsemiseksi. Kaapelipäätteen kohdalla kaapelin maadoitettu vaippa katkeaa, mutta taas jännitteinen johdin jatkuu vaipan editse. Tästä johtuen syntyy paikallisia kentänvoimakkuushuippuja, joiden hallitseminen on kaapelipäätteen elinkaaren kannalta välttämätöntä. Vallitsevaa sähkökenttää voidaan ohjata esimerkiksi geometrisella kentänohjauksella. Kuvassa 11 on esimerkki kaapelipäätteestä.





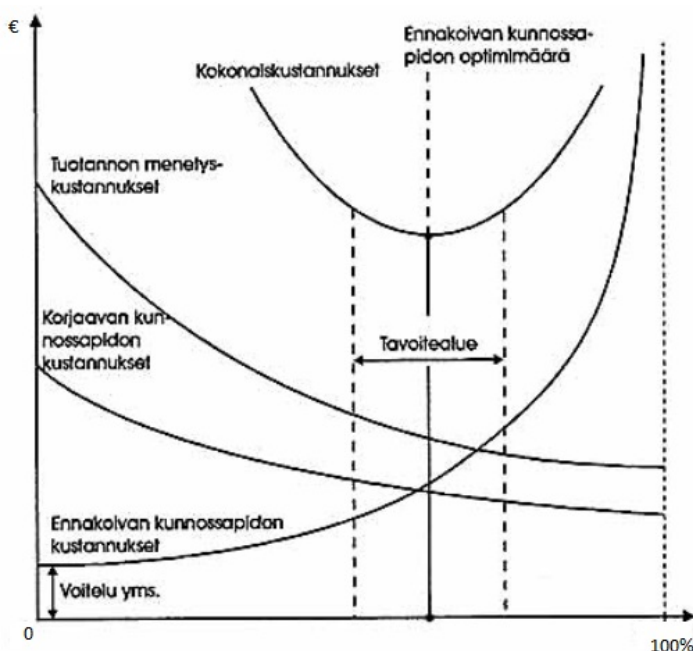
**Kuva 11** Periaatekuva kaapelipäätteestä [41 s.1]

Kuten kaapelijatkoja myös kaapelipäätteitä valmistetaan lämpö- ja kylmäkutisteisina. Lisäksi on olemassa erikseen päätteitä ulko- ja sisäkäyttöön.

## 6 Mittaava kunnossapito

Sähkön laadulla on perinteisesti ymmärretty sen fysikaalisten suureiden pysymistä standardeissa tai suosituksissa määritettyjen raja-arvojen sisällä. Nykyään sähkönlaadulla tarkoitetaan myös sähkön jakelun varmuutta eli jatkuvuuden turvaamista. Perinteisesti jakelun varmuutta on parannettu lisäämällä verkon siirtokapasiteettia. Toisin sanoen verkkoon on lisätty uusia sähköasemia tai vaihtoehtoisia syöttösuuntia eli verkon silmuointia on parannettu.

Toistaiseksi verkkoyhtiöt ovat pohjanneet jakeluverkon kunnossapidossa pitkälti korjaavaan tai käyttöikään perustuvaan kunnossapitoon. Kuitenkin muutokset asiakkaiden odotuksissa, regulaattorien valvonnassa ja alaa säätelevissä laissa on johtamassa ennakoivan kunnossapidon ja sitä kautta analysoivien menetelmien enenevään käyttöön osana kunnossapitostrategioita. Kunnossapidon laiminlyönti tai tehoton toteuttaminen osaltaan nostaa keskeytyksistä aiheutuvia kustannuksia, jolloin verkkoyhtiön tuotto pienenee. Kuvassa 12 on esitetty periaate ennakoivan kunnossapidon ja kokonaiskustannusten teoreettisesta optimoinnista.

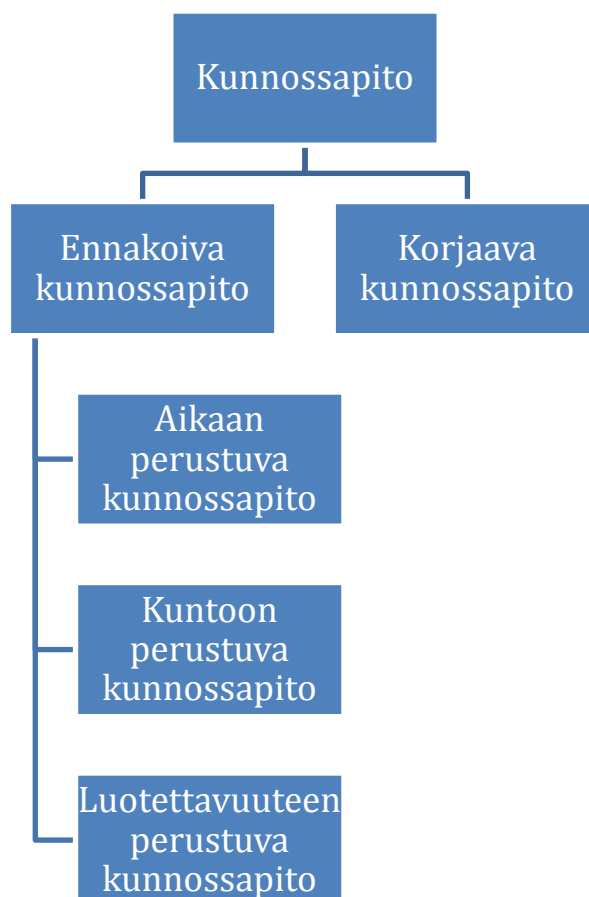


Kuva 12 Ennakoivan kunnossapidon vaikutus kokonaiskustannuksiin [36]

Toisaalta taas ylimitoitettu kunnossapito aiheuttaa ylimääräisiä kustannuksia. Ottamalla käyttöön uusia menetelmiä kunnossapidossa pyritään optimoimaan verkon käyttöikä niin, että käytettävillä panostuksilla saadaan aikaiseksi mahdollisimman hyvä taloudellinen tulos ja verkkokomponenttien käyttövarma elinikä pystytään mahdollisimman hyvin käyttämään hyödyksi.

Sähköverkoille tehtäviä ennakoivan kunnossapidon mittaavia menetelmiä ovat esimerkiksi osittaispurkausmittaukset,  $\tan\delta$ -mittaukset, vaipaneheysmittaukset, lämpökuvaukset jne.

Kuten edellä mainittiin, voidaan kunnossapito jakaa kahteen pääkohtaan: ennakoiva ja korjaava kunnossapito. Ennakoiva kunnossapito voidaan jakaa aikaan, kuntoon ja luotettavuuteen perustuvaan kunnossapitoon kuvan 13 mukaisesti [6].



**Kuva 13 Kunnossapidon strategiat [6]**

Erialaisten kunnossapitostrategioiden tarkoituksena on ehkäistä vikaantumisen kokonaan, havaita vikaantuminen ajoissa ja löytää laitteistojen mahdolliset piilevät viat ennalta.

### **6.1 Aikaan perustuva kunnossapito**

Aikaan perustuvalla kunnossapidolla (TBM, Time-Based Maintenance) tarkoitetaan ennakolta suunnitellun kunnossapito-ohjelman toteuttamista. Siinä tehdään ennakolta sovittuja huoltoja tai tarkastuksia laitteistoille. Kunnossapidon määrävälit voivat perustua käyttökäyttöön tai aikaan, käyttötunteihin tai käyttömääriin tai mahdollisesti johonkin muuhun sovitettuun parametriin. Monesti aikataulut perustuvat laitevalmistajien tai toimittajien antamiin arvioihin laitteiston huoltoväleistä. Monet sähköverkkoyhtiöt tekevät aikaan perustuvaa kunnossapitoa verkolleen. Osaltaan myös lakisääteiset määräaikaistarkastukset voidaan laskea osaksi aikaan perustuvaa kunnossapitoa.

Aikaan perustuvaa kunnossapitoa voidaan pitää melko toimivana ratkaisuna käyttöikänsä pitkäaikaisiin sähkön jakeluverkkojen komponentteihin. Kuitenkin yleensä laittei-

den todellisesta käyttöiästä jää loppupäästä osa hyödyntämättä. Tästä syystä on pyritty löytämään parempia menetelmiä.

## **6.2 Kuntoon perustuva kunnossapito**

Kuntoon perustuvalla kunnossapidolla (CBM Condition Based Maintenance) on luonteenomaista sen perustuminen korjaavan kunnossapidon ja aikaan perustuvan kunnossapidon kokemuksista periytyvään historiatietoon. Kuntoon perustuva kunnossapito keskittyy nimensä mukaisesti laitteen teknisen kunnan arviointiin. Arvioitaessa komponenttien kuntoa voidaan apuna käyttää erilaisia kunnonvalvonnan mittavia ja diagnosoivia menetelmiä. Pyrkimyksenä on saada vähennettyä tuotantoon liittyviä katkoksia ja sitä kautta pyrkiä tekemään myös mittaukset käytönaikaisesti. Tavoitteena on pystyä jatkamaan laitteiston käyttöikää niin pitkälle, kun se käyttövarmuusmielessä on kannattavaa. Tällä tavalla voidaan monesti jatkaa komponentin käyttöikää pidemmälle verrattuna esimerkiksi aikaan perustuvan kunnossapidon menetelmiin.

## **6.3 Luotettavuuteen perustuva kunnossapito**

Luotettavuuteen perustuvassa kunnossapidossa (RCM, Reliability Centered Maintenance) on tarkoituksena luoda kunnossapidon alaiselle komponenteille optimoitu kunnossapito-ohjelma. Olennaista on pystyä tunnistamaan prosessille kriittiset kohteet, jotka ovat elintärkeitä systeemin kannalta. RCM:n läpikäyneet kohteet saavat prosessin tuloksena kohdennetun kunnossapito-ohjelman. Kunnossapito-ohjelma voi olla korjaava, aikaan perustuva tai kuntoon perustuva ohjelma tai näiden yhdistelmä.

## **6.4 Korjaava kunnossapito**

Korjaavassa kunnossapidossa ei nimensä mukaisesti yritetä ehkäistä vikoja edeltäkään, vaan laitteet käytetään elinkaarensa loppuun asti ja korvataan vikaantumisen jälkeen uudella komponentilla. Vaikka nykyään pyritään enenemässä määrin eroon korjaavasta kunnossapidosta, tulee sillä aina olemaan osansa korjausstrategiassa. Yllättävät viat tai luonnon voimien aiheuttamat äkilliset vauriot joudutaan jatkossakin korjaamaan osana korjaavaa kunnossapitoa. Vähentämällä korjaavan kunnossapidon määrää ja siirtymällä kohti ennakoivaa kunnossapitoa voidaan henkilöstö- ja logistisia resursseja siirtää muuhun toimintaa.

## 7 Osittaispurkausmittaukset

Mitattaessa sähköverkkoja voidaan käyttää kahta erilaista perusmittausmenetelmää: käytönaikaista (online) ja käyttökeskeytyksen (offline) vaativaa mittaustekniikkaa. Kummallakin menetelmällä on omat etunsa. Käytönaikaisissa osittaispurkausmittauksissa ei tarvita erillistä jännitelähdettä eristerakenteen jännitekestävyyden testaamiseksi vaan voidaan käyttää olemassa olevaa käyttöjännitettä. Käyttökeskeytyksen vaativassa osittaispurkausmittauksessa joudutaan käyttämään erillistä jännitelähdettä suurjännitteisen testausjännitteen aikaan saamiseksi. Riippuen käytetystä tekniikasta ja mitattavan verkon ominaisuuksista voi mittauslaitteiston fyysinen koko tulla rajoittavaksi tekijäksi. Edellä mainittu ongelma tulee eteen esimerkiksi käytettäessä käyttötaajuisia jännitelähteitä [18. s.31]

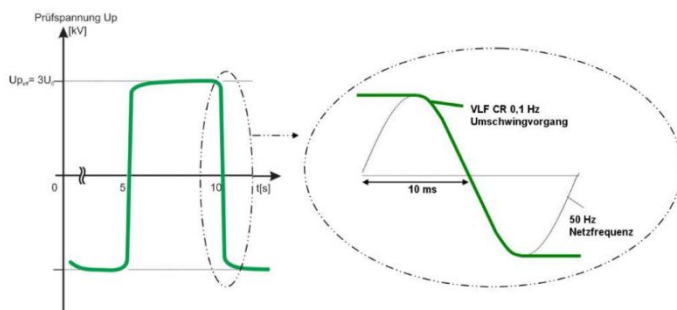
### 7.1 Käyttökeskeytyksen vaativat osittaispurkausmittaukset

Jotta vältettäisiin jännitelähteiden fyysiseen kokoon ja tehon tarpeeseen liittyvät ongelmat on kehitetty useita eri tekniikoihin perustuvia jännitelähteitä. Aikaisemmin käytettiin tasajännitetekniikkaan perustuvia mittausmenetelmiä keskijännitekaapeleiden testaamisessa. Tästä haluttiin luopua sen muovieristeisiä kaapeleita heikentävien ominaisuuksien ja teknisen soveltumattomuuden vuoksi. Tasajännitetekniikalla ei myöskään pystytty havaitsemaan kaikkia vikatyyppejä kuten vesipuut, puhtaat onkalot tai kolot eristeessä. Maailmalla on käytössä kolme hyvin tunnettua menetelmää osittaispurkausmittausten jännitelähteiksi.

#### 7.1.1 VLF

VLFllä (Very Low Frequency) tarkoitetaan nimensä mukaisesti erittäin matalaa taajuutta. Kyseinen menetelmä on kehitetty 1980-luvun loppupuolella, kun tarvittiin uutta teknologiaa muovieristeisten kaapeleiden testaamiseen. Ensimmäiset järjestelmät perustuvat kosinikanttiaalto tekniikkaan. 1990-luvulla kehitettiin tekniikka, jolla voitiin tuottaa sinimuotoista jännitettä. Kumpatkin tekniikat ovat edelleen laajalti käytössä käytettäessä VLF tekniikkaa jännitelähteenä. Nämä kaksi tekniikkaa eroavat toisistaan syntyvän jännitteen aaltomuodon perusteella.

Kosinikantiaalto koostuu jännitelähteestä, tyristorikatkaisijasta ja kondensaattorista. Merkittävin ominaisuus on tehon ”kierrätys” polariteettia vaihdettaessa, tehon kierrätys perustuu resonanssiin. Resonanssiin energiankulutus on saatu alhaiseksi ja kapasitiivisen kuorman kestävyys korkeaksi. Kosinikantiaaltotekniikan käyttäminen osittaispurkaus- tai Tanδ- mittauksissa vaatii esimerkiksi Hamon approksimaation käyttämistä apuna.



**Kuva 14 VLF tekniikalla saatavat jännitemuodot [48]**

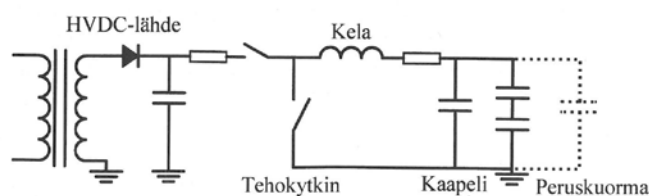
Sinimuotoinen jännitelähde kehitettiin 90-luvun alkupuolella ja se perustuu AC-DC-AC muuttajaan. Käytettäessä sinimuotoista tekniikkaa ei voida käyttää kaapelin käyttökapasitanssiin varautunutta energiaa hyväksi kuten kosinikantiaalto tekniikassa, vaan se joudutaan muuttamaan lämmöksi purkuvastuksessa. Tekniikan hyvänä puolena voidaan pitää sen hyvää soveltuvuutta niin Tanδ kuin osittaispurkausmittauksiin paremmin. Testausjännite poikkeaa taajuudeltaan käyttötaajuisesta jännitteestä 500 tai 600 kertaisesti ollen luokkaa 0,1 Hz. Tämän takia suoria vertauksia käyttötaajuudella esiintyviin poikkeavuuksiin ei voida tehdä.

### 7.1.2 DAC

DAC (Damped Ac Voltage) tarkoittaa vaimenevaa vaihtojännitettä. Sen käyttö perustuu resonanssiin, joka muodostuu kaapelin kapasitanssista ja erikseen kaapelin rinnalle kytkettävästä kelasta, joka yhdessä kaapelin kapasitanssin ja kelan induktanssin kanssa muodostavat värähtelypiiriin, jonka taajuus määräytyy kaavan 4.13 mukaisesti.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4.13)$$

Testausjännitteen taajuus on tyypillisesti luokkaa 50–100 Hz. Laitteiston periaatekytkentä on esitetty kuvassa 15.

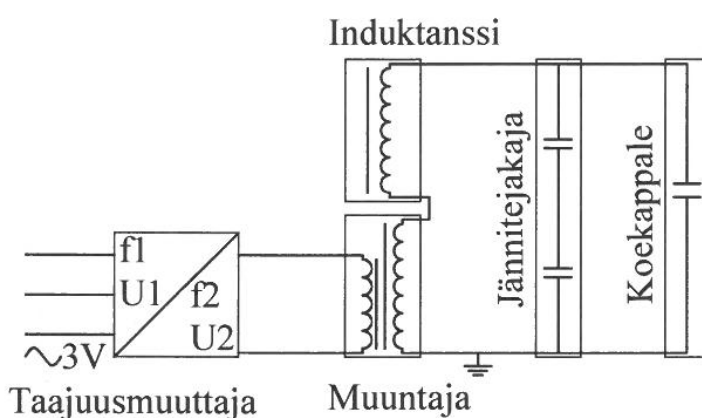


**Kuva 15 Vaimenevan vaihtojännitelaitteiston periaatekuva [18. s.34]**

Kaapeli varataan ennalta asetettuun arvoon tasajännitteellä, lataaminen kestää joitain sekunteja. Näin ollen kaapelia ei turhaa rasiteta tasajännitteellä, koska varsinaista pitkäkestoista tasajänniterasitusta ei synny. Varausjännitteen saavutettua halutun tason kytetään jännitelähde irti testattavasta piiristä ja ulkoinen kuristin kytketään kaapelin rinnalle. Testauspiirin häviöt määrittävät, kuinka nopeasti jännitepulssi vaimenee.

### 7.1.3 Resonanssilaitteisto

Käytettäessä resonanssilaitteistoa mittauspiirin jännitelähteenä, kumotaan mitattavan piirin aiheuttama kapasitiivinen reaktanssi testauspiiriin lisättävällä induktiivisella reaktanssilla. Kela voidaan kytkeä piiriin joko sarjaan tai rinnan, kuitenkin yleisemmäksi tavaksi on muodostunut sarjaankytkentä. Kuvassa 16 on esitetty rinnankytketyn resonanssipiirin periaatekuvat.



Kuva 16 Sarjaresonanssilaitteiston periaatekuva [18. s.33]

Mitattavia kohteita voivat olla kaapelit, kondensaattoriparistot, GIS-laitokset, muuntajat tai isot sähkökoneet. Mittauspiirin taajuus voidaan asetella vastaamaan käyttötaajuutta tai toisaalta voidaan käyttää myös matalampaa tai korkeampaa taajuutta (10-300Hz). Resonanssipiirien yleisistä ominaisuuksista johtuen sen energian tarve on pieni. Teoreettisesti ideaaleilla komponenteilla toteutetussa resonanssipiirissä ei latausjännitteen lisäksi tarvita ulkopuolista energiaa. Todellisuudessa mitattavat komponentit eivät koskaan ole täysin häviöttömiä [26.]

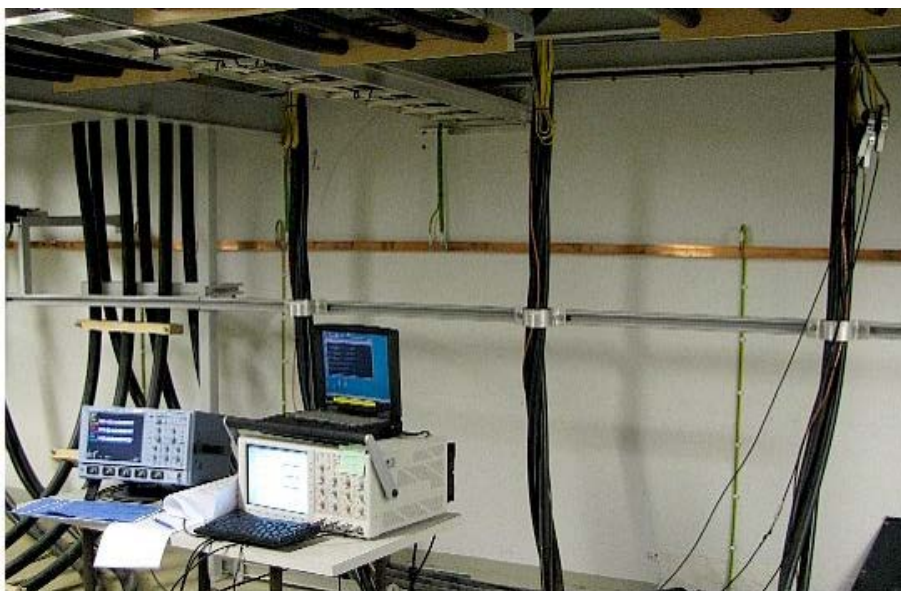
## 7.2 Käytönaikaiset osittaispurkausmittaukset

Käytönaikaiset osittaispurkausmittaukset mahdollistavat osittaispurkausten kehittymisen seuraamisen normaalin käyttöympäristön ja – ominaisuuksien aikana. Käytönaikaisella mittauksella pystytään löytämään sellaiset purkausesiintymät, jotka eivät välttämättä hetkittäisissä mittauksissa tulisi esille. Mittausajan pituus voi vaihdella käytönaikaisissa mittauksissa minuuteista vuosiin. Mittauksen häiriönsietokyvyllä ja tarkkuudella on merkitystä kuinka itseisarvoltaan pienet ja varhaisessa vaiheessa olevat osittaispurkaukset havaitaan.

Vaikka käytönaikaista osittaispurkausmittausta on tutkittu verrattain vähän aikaan, ovat tulokset myönteisiä. Vasta viime vuosina on markkinoille alkanut tulla erilaisia jaksotaiseen tai pidempiaikaiseen käyttöön tarkoitettuja osittaispurkausmittauslaitteistoja.

Osittaispurkauksia voidaan havainnoida useilla eri tekniikoilla kuten: sähköiset mittaukset, elektromagneettiset mittaukset, akustiset mittaukset, lämpökuvaukset, ultravioletti kuvaukset, kemialliset analyysit. Käytönaikaisissa mittauksissa käytetään pääsääntöisesti joko elektromagneettista menetelmää tai akustista menetelmää. Elektromagneettisilla mittauksilla tarkoitetaan elektromagneettisten aaltojen havainnointia antennitekniikkaa ja radiotaajuista spektrianalysointia käyttäen. Akustiset mittaukset on toteutettu käyttäen mikrofonia ultraäänisten purkausten havainnointiin.

Maailmalla on useita sovellutuksia, jotka perustuvat sähkömagneettisten pulssien havainnointiin. Havainnointiin voidaan käyttää antennisensoreita, kaapelin ympärille asennettavia mittausantureita tai kapasitiivisella kytkennällä mitattavaan piiriin liitetyjä jänniteantureita.



**Kuva 17 Käytönaikaisiin osittaispurkausmittauksiin soveltuva laitteisto**

Käytönaikaiset osittaispurkausmittaukset voidaan jakaa edelleen kahteen eri tapaan suorittaa mittauksia: määräajoin tehtävät mittaukset (Periodic) ja jatkuvat mittaukset (Continuous).

### **7.2.1 Määräajoin tehtävät käytönaikaiset osittaispurkausmittaukset**

Määräajoin tehtävillä mittauksilla on tarkoitus kohdistaa mittaukset etukäteen valituille tai tarkkailun alaisena oleville kaapeliosuuksille. Tällaisia tapauksia voivat esimerkiksi olla katkeilevasta maasulusta havainnoinut kaapeliosuus. Mittauslaitteisto voi olla asennettuna paikoilleen tunnista useampaan kuukauteen.



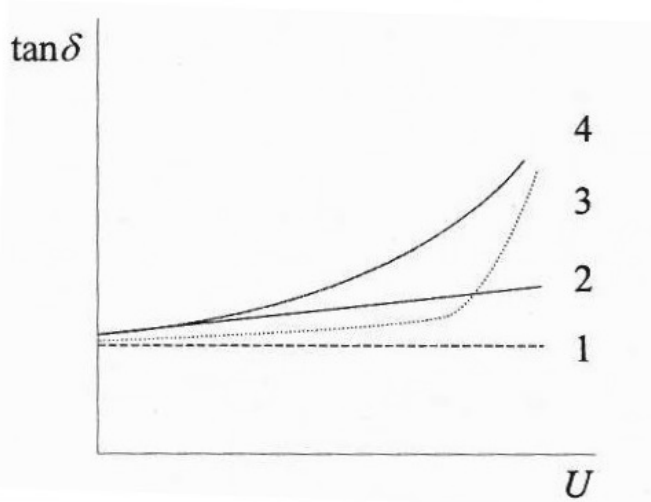
### **7.2.2 Jatkuvat käytönaikaiset osittaispurkausmittaukset**

Jatkuvaan mittaukseen tarkoitettua mittalaitteen asennetaan usein jakelun kannalta kriittiseksi katsottuihin johto-osuuksiin, jossa tallentavaa mittaustekniikkaa halutaan käyttää jatkuva-aikaisesti.

## 8 Häviökerroinmittaukset

Häviökertoimen ( $\tan\delta$  tai Tan Delta) mittaamisella tarkoitetaan kaapelieristeen kunnan mittaamista. Sillä pyritään selvittämään eristeen ikääntymisen aiheuttamaa kulumista eristeaineessa.

$\tan\delta$  mittaus suoritetaan usein jännitteen funktiona. Mittauksissa mittauksiin käytettävällä jännitelähteellä mittausjännite nostetaan ainakin mitattavan laitteiston suurimpaan käyttöjännitteeseen asti. Tarkasteltaessa saatuja tuloksia, kiinnitetään huomiota  $\tan\delta$ -arvoon tietyllä jännitteellä sekä testausjännitteen nostamisen aikana tapahtuvaan muutokseen  $\tan\delta$ -arvossa. Syntyneen käyrän muotoa voidaan käyttää hyväksi määriteltäessä testattavan laitteiston eristeen kuntoa. Kuvassa 18 on esitetty periaatteellinen käyrämuoto esimerkkitapauksille. Käyrä 2. kuvaa hyvässä käyttökunnossa olevaa eristettä, jonka käyrämuoto on lähes vakio jännitteen funktiona esitettynä (vaakasuora). Käyrä 1. on ideaali täydellisen eristeen käyrämuoto. Käyrä 4. esittää voimakkaasti vanhentunutta eristettä, jossa vuotovirta kasvaa voimakkaasti korkeammalla mittausjännitteellä. Käyrän 3.  $\tan\delta$ -arvon voimakas heikkeneminen tietyllä mittausjännitteen arvolla kertoo puolestaan eristeaineen voimakkaasta heikkentymisestä [9. s.182–187].



Kuva 18 Esimerkki kuva Tan delta-arvon muuttumisesta jännitteen funktiona [9. s.186]

Tehtäessä  $\tan\delta$ -mittauksia tulee ottaa huomioon, että eristeen lämpötila vaikuttaa voimakkaasti saataviin mittaustuloksiin.

$\tan\delta$ -mittauksissa voidaan käyttää samoja jännitelähteitä kuin käyttökeskeytyksen vaativissa osittaispurkausmittauksissa. Yleisimmin käytetty jännitelähde on VLF tekniikkaan perustuva tapa. Huomion arvoista on huomata, että  $\tan\delta$ -mittauksella ei suoraan pystytä määrittämään tarkkaa vikapaikkaa, vaan sillä saadaan paremminkin havaintoja kaapelin yleiskunnosta. Usein tarvitaan lisäksi esimerkiksi osittaispurkausmittaus ja vikapaikan tarkempi määrittäminen.

## 9 Kokemuksia maailmalta

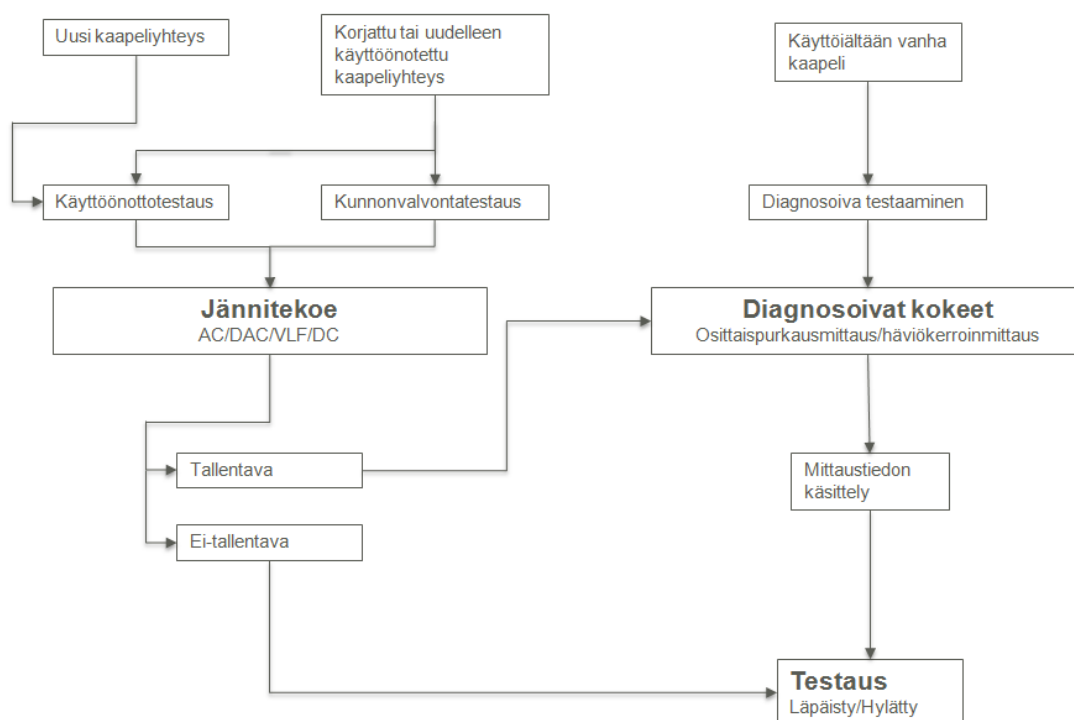
### 9.1 Voimakaapeleiden asennuksen jälkeinen testaaminen [14]

Seitz Instruments Ag on yhdessä verkkoyhtiöiden kanssa kehitellyt menetelmiä verkkojen testaamiseen ja kunnossapitoon. Vaikka sähköverkkoon asennettaville komponenteille tehdään toimittajan toimesta kattavat rutiinitestit ennen kuin niitä asennetaan pysyväksi osaksi sähköverkkoa, on tärkeää varmistua verkon käyttökunnosta heti asennuksen jälkeen. Tämän takia on tärkeää tehdä verkolle myös käyttöpaikkatestaus ennen tai mahdollisimman nopeasti verkon käyttöönoton jälkeen. Käyttöpaikkamittaukset on syytä tehdä ainakin kahdesta eri syystä.

1. Osana käyttöönottomittauksia, jotta voidaan osoittaa, että kaapelieristettä ei ole vahingoitettu kuljetuksen tai asennuksen aikana tai että asennuksessa ei ole tehty virhettä.
2. Osana korjaustoimia, jotta voidaan havaita mahdolliset asennusvirheet ja pystytään varmistumaan aiemmin vioittuneen korvattavan kaapeliosuuden korjauksen onnistumisesta.

Aikaisemmin käytössä on ollut lähinnä kaksi vaihtoehtoista tapaa varmistua asennuslaadusta; kaapelille tehtävät lyhyet tai pitkäaikaiset jännitekokeet, joissa kaapelia rasitetaan käyttöjännitteellä. Kokeiden testausajat vaihtelevat 1 tunnin kokeesta 24 tunnin testaukseen. Kummatkin kokeet perustuvat oletukseen kaapelieristeen vanhentumisesta testin aikana. Testitulokset on joko hyväksytty tai hylätty riippuen testattavan verkon eristeen kunnosta. Yleisesti on tiedossa, että tällaisella ei tallentavalla (non-monitored) mittauksella ei saada mitattavasta kohteesta muita, ehkä myöhemmin hyödynnettäviä tietoja. Kuitenkin jää suuri todennäköisyys verkon osan myöhemmälle hyvinkin nopealle vikaantumiselle. Monesti uudet asennetut kaapelivarusteet ovat todennäköisiä vikapaikkoja.

Tilalle on kehitetty jatkuvaan seurantaan (monitored) ja mittaustulosten analysointiin kykeneviä menetelmiä. Kuvassa 19 on esitetty erilaisia käytettävissä olevia mittaamenetelmiä osana käyttöönotto tai käyttöpaikkamittauksia.



**Kuva 19** Mittaustekniikan hyödyntäminen osana käyttöönottomittauksia tai kunnonvalvonnan mittauksi [14.]

Tallentavalla testauksella voidaan tehdä samanaikaisesti sekä jännitekoete että analysoiva testaus. Osaltaan käytännön syyt ovat myös kasvattaneet käyttöpaikkamittausten suosiota. Tähän on vaikuttanut laitteisto kehitys, joka on johtanut seuraavien ominaisuuksien korostumisiin testauslaitteistoissa

- kevyitä ja kohtalaisen helposti siirrettäviä
- laitteiden koon pienentyminen on helpottanut samalla myös niiden asennettavuutta
- laitteiden vaatima käyttöenergian tarve on pienentynyt
- verrattain pitkien kaapeliosuuksien mittaaminen on mahdollista
- mittausmenetelmät on pystytty standardisoimaan.

Maailmalla on käytössä useita tekniikoita ja testausohjelmistoja, jotka perustuvat kenttäkokemukseen ja lukuisiin mittauksiin. Käytettävällä mittausjännitteellä on kuitenkin merkitystä tuloksia vertailtaessa. Tavallisella sinimuotoisella jännitteellä on ollut vankka jalansija laboratorio-olosuhteissa tehtävissä testauksissa. Pitkä kokemus ja lukuisat mittaustulokset ovat vahvistaneet käsitystä siitä, että sinimuotoisella vaihtojännitteellä voidaan havaita kaikki mahdolliset vianaiheuttajat, jotka liittyvät kaapelieristeisiin. Sinimuotoinen vaihtojännite soveltuu myös osittaispurkausmittauksiin.

Jo yli kaksikymmentä vuotta sitten vaimenevaa vaihtojännitettä (DAC) on ehdotettu vaihtoehtoiseksi menetelmäksi tai korvaamaan jatkuva sinimuotoinen jännite mittaussovelluksissa. Aivan viime vuosina vaimenevasta vaihtojännitteestä on tullut hyväksytty menetelmä kenttämittauksissa kaikilla mahdollisilla kaapelityypeillä myös diagnosoi-

vissa testauksissa. Verrattuna perinteiseen jatkuvaan sinimuotoiseen vaihtojännitteeseen vaimeneva vaihtojännitelaitteisto täyttää kaikki kohdissa a)-d)esitettyt mittalaittevaatimukset.

Vaimenevaa vaihtojännitettä käyttävä tallentava kaapelitestaus mahdollistaa useiden eri suureiden mittaamisen testijännitteiden funktiona. Laajentamalla pelkät eristysvastusmittaukset tai jännitekokeet myös osittaispurkausmittauksiin eri jännitearvoilla tai kes-toajoilla voidaan havaita osittaispurkauskeskittymät kaapelieristeessä. Esimerkiksi nostamalla testausjännite  $1,3xU_0$  saadaan tärkeää tietoa osittaispurkausaktiivisuudesta käyttöjännitettä korkeammalla rasitustasolla. Arvio häviökertoimesta antaa taas tärkeää yleistietoa öljykaapeliverkon käyttökunnosta.

Mittaamisen kannalta kätevän kokoinen laitteisto on aikaisemmin puuttunut markkinoilta. Menetelmä on kehitetty nimenomaan silmällä pitäen kaapeliverkkojen käyttöpaikkamittaukset. Mittausmenetelmä mahdollistaa standardin IEC 60270 mukaisen osittaispurkausmittauksen ja osittaispurkausten paikallistamisen. Järjestelmä koostuu digitaalisesti ohjatusta joustavasta jännitelähteestä, jolla pystytään lataamaan tutkittava verkonoa kapasitiivisesti. Standardin IEC 60840 mukaan testausjännitteen tulee olla sinimuotoista ja taajuuden välillä 30–300 Hz. Verrattaessa vaimenevaa vaihtojännitettä jatkuvaan sinimuotoiseen jännitteeseen on vaimenevan vaihtojännitteen etu siinä, että havaittaessa voimakkaita muutoksia homogeenisessä eristeessä ovat vaimenevan vaihtojännitteen eristerakenteelle aiheuttamat rasitukset huomattavasti jatkuvaa sinimuotoista jännitettä pienemmät.

Mittausmenetelmää ja laitteistoa on testattu esimerkiksi uudessa nimellisjännitteeltään 50 kV:n 12 kilometriä pitkässä XLPE-eristeisessä maakaapeli asennuksessa. Kaapeliosuus testattiin hollantilaisen standardin NEN 3630 mukaisesti. Standardi suosittelee käyttämään vaihtojännitteistä resonanssiin perustuvaa jänniteteoetta 25-200 Hz taajuusalueella aina  $2,5xU_0$  jännitteeseen asti. Käyttöönottomittaukset tehtiin kuitenkin käyttäen vaimenevaa vaihtojännitettä ja diagnosoivia mittaavia menetelmiä. Mittaukset tehtiin yhden tunnin testausajalla käyttäen maksimissaan  $2,5xU_0$  testausjännitettä. Koko testauksen ajan mitattiin myös osittaispurkauksia. Varsinaista läpilyöntiä ei tapahtunut. Myöskään osittaispurkausaktiivisuus eristeessä ei noussut normaalia korkeammalle tasolle (ainoastaan ulkopuolista koronaa pystyttiin havaitsemaan). Pystyttiin päättämään, että myös  $1,7xU_0$  jännitteellä kaapeliyhteys on vapaa osittaispurkauksista ja otettavissa teholliseen käyttöön.

Toinen kohde oli 7,8 km pitkä 132 kV lähes uusi XLPE-eristeinen kaapeliyhteys, jossa oli aikaisemmin ollut kaksi vikaa kaapelin käyttöönoton jälkeen. Yhteys oli läpäissyt käyttöönottomittaukset ja 24 tunnin käyttöjännitekokeen. Kummatkin viat olivat olleet kaapelijatkoksissa ja osoittautuneet asennusvirheiksi. Loput kolmetoista jatkoa tutkittiin tarkemmin käyttäen apuna osittaispurkausmittausta. Kaapeli yhteys testattiin aina  $1,3xU_0$  jännitteeseen asti vaimenevalla vaihtojännitteellä. Mittauksissa havaittiin, että purkaukset syttyivät  $1,2xU_0$  jännitteen jälkeen. Testausjännitteellä  $1,3xU_0$  havaittiin noin 1000 pC purkauksia. Osittaispurkaukset paikallistettiin kahteen jatkuvaan. Voitiin siis osoittaa, että myös nämä jatkokset ovat todennäköisesti väärin asennettuja.

## **9.2 Osittaispurkausten havaitseminen sähköisiä häiriöitä sisäl- tävässä verkoissa [13]**

Signaalinkäsittelytekniikan ja asennustekniikan kehitys on tuonut osittaispurkausmittaukset osaksi jokapäiväistä sähköverkon kunnossapitoa. Aikaisemmin käytönaikaiset osittaispurkaukset ovat olleet hankalia toteuttaa verkon osissa, jotka ovat sisältäneet voimakkaita usein ulkopuolelta aiheutuneita häiriöitä. Tällaisia ovat esim. teollisuusverkot. Ongelmaksi ovat nousseet häiriöt, joiden ominaistajuus on lähellä oikeiden osittaispurkausten aiheuttamien pulssientaajuuksien kanssa. Näiden erottaminen aikaisemmillä menetelmillä on ollut varsin hankalaa. Ollakseen tehokas, on hyvin tärkeää, ettei kiinteästi asennettu osittaispurkausmittauslaitteisto tulkitse häiriöitä osittaispurkauksiksi. IPEC on laite valmistaja, joka on yhdessä verkkoyhtiöiden ja teollisuuslaitosten kanssa kehitellyt osittaispurkausmittauslaitteistoja.

Osittaispurkausten havaitseminen maanalaisessa kaapeliverkossa on monesti monimutkaisempaa kuin muissa sähköverkon komponenteissa, jotka sijaitsevat maan päällä esim. katkaisijat. Tämä johtuu siitä, että osittaispurkauslähde tai esiintymä voi olla usean kilometrin päässä mittausanturista. Havaitsemista saattaa lisäksi häiritä korkeat häiriöpitoisuudet mittauksen kohteena olevassa sähköverkossa, koska häiriöt indusoituvat verkon kaapelimaadoituksiin.

Osittaispurkaukset indusoivat pienen korkeataajuisen virran kaapelimaadoitukseen. Tämä impulssi kulkee maadoituksessa aina sähköasemalle asti. Kaapeleissa näiden signaalien havaitseminen on riippuvainen kaapelimaadoituksesta. Sen tulee olla sähköasemalla erotettu muusta maadoitusverkosta. Käyttämällä HFCT- ilmaisimia (High frequency Current Transformer) voidaan ilmaisimien läpi kulkevat osittaispurkausten aiheuttamat signaalit havaita. HFCT on passiivinen muunnin, jonka muuntamofunktio on vakio noin 5,0 V/A käsittäen melko laajan taajuusalueen aina 50 kHz-20 MHz:n. Osittaispurkauslähteestä lähtenyt signaali havaitaan HFCT- ilmaisimella ja välitetään eteenpäin vahvistimelle ja sieltä edelleen tarkkailulaitteelle käyttäen pienhäviöistä suojattua koaksiaali-kaapelia. Näin pyritään minimoimaan ympäristön aiheuttamat häiriöt mittaukselle.

Monesti häiriösignaalit kulkeutuvat pitkiäkin matkoja kaapelimaadoituksissa tai kaapelilivoissa. Teollisuusympäristössä häiriöitä aiheuttavat mm. elektroniset laitteet, pyörivät koneet, tyristorikatkaisijat jne. Häiriöiden aiheuttamaa haittaa pystytään kuitenkin tänä päivänä ehkäisemään tehokkaasti useilla eri tekniikoilla.

Signaalinkäsittelyssä voidaan käyttää hyödyksi erilaisia suodatustekniikoita kuten ali-, yli-, ja kaistanpäästösuodatusta ja signaalinkäsittelyä. Lähes häiriöttömässä ympäristössä osittaispurkaukset aiheuttavat yleensä aina taustakohinaa korkeampia pulsseja. Käyttämällä tasosuodatusta voidaan havaituista pulsseista poimia vain merkitykselliset tiettyä raja-arvoa suuremmat pulssit. Taajuusikkunoinnilla tai kaistanpäästösuodatuksella voidaan havaita vain tiettyä taajuutta edustavat signaalit. Osittaispurkaukset aiheuttavat yleensä taajuusalueella 0,5 MHz-5 MHz olevan signaalin. Korkealla näytteenottotaajuudella, signaalinkäsittelyllä ja digitaalisella näytteistämällä voidaan osittaispurkausten aiheuttamat signaalit erotella suuresta määrästä mittaustuloksia. Jotta saataisiin tarpeeksi kattava aineisto, on näytteenottotaajuuden oltava vähintään 100 000 000 näytettä sekunnissa.

Vuonna 2009 IPEC asensi kiinteitä mittauslaitteistoja 54:lle 33kV sähköasemalähdölle Taiwanin suurimmalla terästehtaalla. Näiden laitteistojen oli tarkoitus havaita mahdolliset osittaispurkaukset kaapelilähdöillä. Advanced Substation Monitor (ASM) käyttää DeCIFER:n suunnittelemaa algoritmia taustakohinan eliminoimiseksi mittaustuloksista. Kaapeliverkko koostui 33kV XLPE-eristeisestä kaapelista ja GIS-kojeistoista. Kuten monissa muissakin tehdasympäristöissä, myös täällä häiriötasot olivat varsin korkeita.

Mittauksissa havaittiin osittaispurkauksia. Jokainen näyte luokiteltiin kriittisyyden mukaan. Korkeimman arvon saaneet johtolähdöt vaativat nopeita korjaustoimia. Vaikka näytteet sisälsivät runsaasti häiriösignaaleja, pystyttiin algoritmilla suodattamaan merkittävät osittaispurkausten aiheuttamat signaalit massasta. Tarkastelemalla lopputulosta voitiin havaita, että erilaisista menetelmistä datan suodatuksessa oli hyötyä ja merkittäviä tuloksia kyettiin saamaan myös paljon häiriöitä sisältävässä ympäristössä.

Osittaispurkausten sijainnin määrittämiseen käytettiin IPEC:n kehittämää menetelmää. Tällä pystyttiin löytämään osittaispurkausten aiheuttamat signaalit ja niiden heijastumat. Katsomalla aaltomuotoa pystyttiin erottamaan saman toistuvuus. Pulssien aikaerosta voitiin määrittellä purkausten syntypaikka. Paikallistaminen suoritettiin TDR-menetelmän avulla, joka perustuu pulssien väliseen aikaeroon. Kyseisessä kohteessa pystyttiin paikallistamaan purkaukset 0,7% etäisyydelle noin 700 metrisessä kaapelissa. Kaapelijatkoksen tiedettiin sijaitsevan noin viiden metrin päässä mittauspäästä. Myöhemmissä tutkimuksissa jatkoksessa havaittiin asennusvirhe.

### **9.3 Uusia käytännön menetelmiä kaapeliverkkojen kunnonvalvonnassa[15]**

Jakeluverkkojen korvausarvo on noin 60–80% koko verkoston arvosta. Tämän takia on verkostostrategian oltava paras mahdollinen myös kunnossapidon osalta. Strategiaa kehitettäessä on hyvä huomioida seuraavat kolme näkökohtaa:

- Tekniset ja organisaatiolliset näkemykset kuten: käytettävyys, luotettavuus, työturvallisuus, kaapeleiden kuormitettavuus, korjattavuus, kaapeliverkon kriittisyys, vikaantumisen todennäköisyys ja – taajuus, henkilöstön käytettävyys, työvälineet ja varaosat
- Taloudelliset realiteetit: korjauskustannukset, henkilöstökustannukset, käyttökustannukset, välilliset kustannukset -> ansion menetykset, pääomakustannukset ja – varaukset.
- Yhteiskunnalliset näkökohdat ovat myös tärkeitä kuten: yhtiön maine ja sosiaalinen merkitsevyys.

Näiden edellä mainittujen näkökohtien merkitsevyys on kasvanut koko ajan niin regulaattorien, poliittisten päättäjien kuin asiakkaiden keskuudessa.

Keskijänniteverkon kunnossapidolla on vaikutusta verkon vikojen määrään. Alankomaissa on suhteellisen korkea käytettävyys. Keskijänniteverkon vikaantuminen koskee noin 0,25 asiakkaista vuodessa. Tämä vastaa noin 70 minuuttia keskeytysaikana. Vertailun vuoksi suurjännitevioilla vastaavat arvot ovat 0,075 ja 35 minuuttia. Keskijännite vioista noin 60 % kohdistuu paperieristeisiin kaapeleihin ja 40 % muovieristeisiin. Tämä tarkoittaa noin yhtä vikaa per 100 km asennettua kaapelia. Tästäkin huolimatta suur-

jänniteverkon kunnossapidolle on annettu suurempi tärkeysaste kuin jakeluverkolle. Yhä useampi yritys on kuitenkin alkanut käyttämään samoja vaatimuksia keskijänniteverkon kunnonhallinnassa kuin suurjännitteellä – vielä usein hyvällä menestyksellä.

#### Kaapeleiden kunnonvalvonta

Kaapeleiden kuntoa on kuvattu käyttämällä määrällisiä ja laadullisia tekijöitä. Laadulliset tekijät käsittävät tuoteominaisuuksia kuten valmistaja, ikä, tyyppi ja käyttöhistoriallista tietoa kaapelin käyttöasteesta, vikojen määrästä, jatkojen määrästä ja muista aikaisemmista korjauksista. Täydentävät tiedot ovat myös tärkeitä. Näihin voidaan lukea esim. maantieteellinen sijainti. Määrällisiä teknisiä tekijöitä ovat esim. osittaispurkausten esiintyminen, osittaispurkausten syttymis- ja sammumisjännite, häviökerroin, latausjännite ja –virta.

Nämä tiedot tulee olla kuvattuina kaapeleittain tai kaapeliosittain. Kaapelin tärkeys järjestelmän kannalta on myös hyvä ottaa arviointiin mukaan. Yksi hyvä arviointiperuste on toimittamatta jääneen energian määrä.

#### Käytännön esimerkkejä taloudellisista hyödyistä

Kriittisissä kohteissa ja kaapeleissa, joissa on kohonnut vikatiheys, on järkevää tehdä kaapeleille osittaispurkausmittaus ja häviökertoimen määrittäminen. Myös muualla mittaaminen on suositeltavaa. Kummankin suureen mittaamiseen menee aikaa noin 70 minuuttia. Kustannukseltaan tämä vastaa noin 10 metriä uutta kaapelia kaivutöineen. Saadulla tiedolla voidaan tehdä päätöksiä kaapelin uusimisesta tai käyttöön jatkamisesta. Lisäksi voidaan ehkäistä odottamattomia vikoja ja näistä johtuvia häiriöitä. Esimerkkinä käytetään 1945 metriä pitkää keskijännitekaapelia, jossa on ollut useita vikoja ja näistä johtuvia häiriöitä. Kaapelin uusiminen lähes kahden kilometrin matkalta tulisi kalliiksi ja tätä pyritään välttämään. Häviökerroin mittaamalla pystyttiin havaitsemaan, että vaihe kolme oli huonossa kunnossa. Osittaispurkausmittauksilla pystyttiin rajaamaan vanhentunut kaapelieristys. Yhteensä noin 618 metriä kaapelia jouduttiin uusimaan. Kokonaiskustannukset kaapelin uusinnalle mukaan lukien välilliset kustannukset, kuten suoritettujen kunnonvalvonnan mittaukset, olivat noin 68 000 euroa. Koko kaapelin uusiminen olisi tullut maksamaan noin 200 000 euroa. Kaapelin kohdistetulla uusinnalla pystyttiin siis säästämään noin kaksi kolmannesosaa kokonaiskustannuksista. Toinen esimerkki on Berliinistä, joka koostuu 12:sta 10 kV kaapelista, joiden yhteispituus on noin 150 kilometriä käsittäen yli 180 jatkoa ja 72 päätettä. Kaapelit testattiin kaapelivaipan osalta 5 kV DC-jännitteellä, joka paljasti 13 kaapeliyhteyttä, joiden kaapelivaipassa havaittiin vioittumista. Osittaispurkausmittauksella pystyttiin viat paikallistamaan jatkoihin. Näin saatiin jatkot vaihdettua hallitusti, kun niiden asennusaikainen takuu oli vielä voimassa.

#### Millaisilla menetelmillä kaapeliverkkoa tulisi testata

Saksassa on yleinen tapa testata keskijännitekaapeleita noudattaen VDE 0276-HD620 standardia, joka on tarkoitettu takaamaan turvallinen ja luotettava käyttö. Muovieristetyllä kaapelilla tämä tarkoittaa testin läpäisemistä, jossa kaapelia rasitetaan  $3,0 \times U_0$  ja 0,1 Hz taajuisella vaihtojännitteellä 60 minuutin ajan. Testi antaa tulokseksi joko hyväksytty tai hylätty. Vaippatestaus tehdään PE-eristetyille kaapelille 5 kV DC ja PVC



eristetylle kaapelille 3 kV DC jännitteellä. Testaus antaa myös tulokseksi hyväksytyt tai hylätyt.

Joka tapauksessa kaapeliverkonomistajia kiinnostaa, kuinka kauan ja kuinka hyvin kaapeliverkko pystyy suoriutumaan sille annetuista tehtävistä. Yleiskuvallisesti kysymyksen vastaavat parhaiten vaipaneheys ja häviökertoimen määrittäminen.

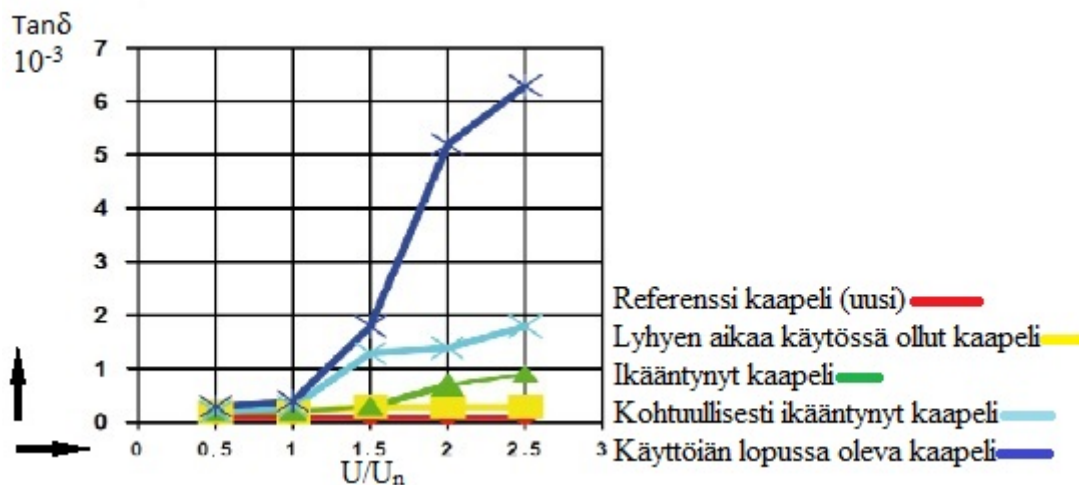
#### Vaipan eheystesti

Testissä testataan kaapelin uloimman sähköisen osan kuntoa. Yleisimmin tämä testi tehdään jännitekokeena tasajännitteellä läpilyöntiin asti ja eristysvastusmittauksena. Eristysmittauksessa kaapeliin varataan tasajännite ja vuorovirta mitataan tietty ajanjakso johdin maadoitettuna. Eristysresistanssi saadaan virrasta ja jännitteestä, kun lopullinen stabiilitila on saavutettu mittausjakson lopussa. Vaippamittauksella varmistetaan verkon luotettavuus ja havaitaan toiminnalliset puutteet eristyksessä, kuten eristeen kostuminen. Varsinainen vikojen sijainti joudutaan selvittämään vaihtoehtoisilla mittausmenetelmillä.

#### Häviökertoimen määrittäminen

Häviökerroin määritellään käyttämällä Fourierin analyysiä. Häviökerroin on riippumaton kaapelin pituudesta ja sillä saadaan yleiskuva kaapelin kunnosta. Mittausmenetelmät eivät myöskään vahingoita mitattavaa kaapelia. Mittauksen toteuttaminen vaatii käyttökeskeytyksen mitattavalle kaapeliosuudelle. Mittaukset tehdään usein useammalla eri käyttöjännitteen monikerralla esim.  $0,5-1,7 \times U_0$ .

Kuvasta 20 voidaan arvioida, miksi mittaukset kannattaa tehdä eri testausjännitteillä.



Kuva 20 Jännitteen vaikutus häviökertoimeen [15.]

Voimakkaasti vanhentunut kaapeli saattaa saada samat arvot jännitteellä  $U_0$  kuin uusi kaapeli. Jännitettä nostettaessa huomataan häviökertoimen voimakas kasvaminen jännitteen funktiona. Tästä voidaan päätellä kaapelissa esiintyvän vesipuita ja sen eristävyys-olevan heikentynyt. Häviökerroinmittauksissa kaapeliin vaikuttavat ulkoiset tekijät tulee saada mahdollisimman lähelle kaapelivalmistajan suosittelemia arvoja. Lisäksi

esimerkiksi kaapelin lämpötilan tulisi olla sama vertailtaessa kaapelista saatuja mitta-arvoja, koska häviökerroin on voimakkaasti lämpötilariippuvainen suure.

Useat mittaukset ympäri Eurooppaa ovat vahvistaneet mittauksen luotettavuutta kaapelin yleiskunnon määrittämisessä.

Sinimuotoinen vaimeneva vaihtojännite on osoittanut toimivuutensa myös häviökertoimen määrittämisessä. Lisäksi sen käyttöä tukee sen soveltuvuus myös muiden mittaavan kunnossapidon sovellusten testausjännitteeksi. Lisäksi 0,1 Hz ja 50Hz nimellistaajuinen jännite ovat hyvin vertailukelpoisia keskenään.

#### Osittaispurkausmittaus

Osittaispurkausmittausta voidaan pitää suositeltuna mittauksena heti kaapeliasennuksen jälkeen asennuslaadun varmistamiseksi ja vanhoilla kaapeleilla kaapelin käyttöiän määrittämiseksi. Avainasemassa tutkittaessa osittaispurkauksia on niiden esiintymistiheys tietyssä sijainnissa, toisin sanoen, mitä enemmän tietyssä kohtaa on purkauksia, sitä huonommassa kunnossa eristys tällä kohtaa on. Osittaispurkausmittaus antaaakin arvokasta tietoa kaapelin kunnosta niin paperi- kuin muovieristeisellä kaapelilla. Tyypillisesti muovieristeen tulisi olla purkauksista täysin vapaa. Paperieristeisessä kaapelissa taas saattaa esiintyä merkittäviä useiden satojen pC purkauksia ja kaapeli on vielä hyvässä käyttökunnossa.

### **9.4 Tanskalaisten kokemuksia sekakaapelijärjestelmästä [12]**

Tanskassa ei saa enää käyttää öljypaperieristeistä kaapelia korvattaessa tai uusittaessa keskijännitteistä kaapeliverkkoa. Tämä on johtanut muovieristeisten kaapeleiden osuuden kasvamiseen ennestään pelkästään paperieristeistä kaapelia sisältävissä sähköverkoissa. Tanskassa on noussut huoli, miten muovi- ja paperieristeisistä keksijännitekaapeleista muodostuva sekaverkko toimii tulevaisuudessa, vaikuttaako sekaverkko esimerkiksi vikamääriin. Tanskassa on jo nyt huomattu vikamäärien kasvua sekaverkoissa. Samanaikaisesti, kun verkkoon asennettujen siirtymäjatkosten määrä on kasvanut, on myös verkossa esiintyvien vikojen määrä ollut kasvussa. Vioilla näyttäisi olevan yhteys lisääntyneeseen siirtymäjatkosten määrään, tätä ajatusta näyttäisi myös tukevan tehdyt osittaispurkausmittaukset verkoissa.

Ensimmäiset muovieristeiset kaapelit ovat asennettu jo 1960-luvun loppu puolella. Siirtyminen öljypaperieristeisestä kaapelista muovieristeiseen on ollut asteittaista ja jotkut jakeluverkkoyhtiöt ovat käyttäneet pelkästään öljypaperieristeistä kaapelia myös uusissa asennuksissa aina 1990-luvulle saakka. Nykyään ei ole sallittua käyttää öljypaperieristeistä kaapelia uusissa asennuksissa. Tämä on johtunut vääjäämättä muovi- ja öljypaperieristeisiä kaapeleita sisältäviin sekaverkkoihin. Öljypaperieristeistä kaapelia voidaan vielä käyttää pienissä korjauksissa esim. viankorjaustöissä. Useat jakeluverkkoyhtiöt pyrkivät välttämään sekaverkkojen syntymistä ja korjauksia on tehty käyttäen öljypaperieristeistä kaapelia. Nykyään korjaukset on lähestulkoon poikkeuksetta tehty käyttäen muovieristeistä kaapelia. Yksi syy tähän on, ettei jakeluverkkoyhtiöillä ole enää käytävissä öljypaperieristeistä kaapelia. Syynä pelkoon käyttää muovieristeistä kaapelia osana aikaisemmin pelkkää öljypaperieristeistä kaapelia sisältävissä verkoissa on juoksevaöljyisessä kaapelissa öljyn vapaan virtauksen estyminen kaapelissa. Eristeöljyn

puuttuminen kaapelieristeestä tai kaapelivarusteesta voi johtaa kaasuonteloiden synty-miseen öljyvuojojen tai lämpölaajenemisen yhteydessä. Lisäksi jotkut jakeluverkkoyh-tiöt ovat ilmaisseet huolensa siirtymäjatkosten ennenaikaisista vikaantumisista.

### Öljypaperieristeinen kaapeli osana sekaverkkoa

Vuosien 2007–2008 välisenä aikana on kerätty tietoa vikaantuneista öljypaperieristeisistä kaapeleista, joiden vikaantumisen syyksi on todettu eristeen vanheneminen. Tiedot on kerätty jakeluverkkoyhtiöiltä. Viat on luokiteltu sekaverkoissa tai puhtaissa öljypape-rieristeisissä verkoissa tapahtuneiksi vioiksi. Kun on verrattu saatuja tuloksia kokonais-määrään, on voitu päätellä vikatiheyden olevan suurempi seka- kuin puhtaassa öljypape-rieristeisessä verkossa. Kuitenkin on hyvä ottaa huomioon joitain yksityiskohtia päätel-miä tehtäessä. Täysin varmoja tietoja vikojen jakautumisesta eri verkkotyypeille ei ole olemassa, tämän takia on mahdotonta arvioida täysin tarkkaa vikatiheyttä. Voidaan olet-taa, että puhtaiden öljypaperieristeisten verkkojen määrä on merkittävästi suurempi kuin sekaverkkojen. Tämä johtaa oletukseen sekaverkkojen korkeammasta vikatiheydestä. Toinen merkittävä yksityiskohta on epävarma tieto siitä, onko eristeöljyn vapaa virtaus kaapelissa estynyt, vai onko virtaus ollut toispuoleinen. Kummatkin tekijät ovat aivan yhtä todennäköisiä, kun ajatellaan sekaverkkoa. Edellä mainituilla ominaisuuksilla on eittämättä myös vaikutusta vikaherkkyyteen.

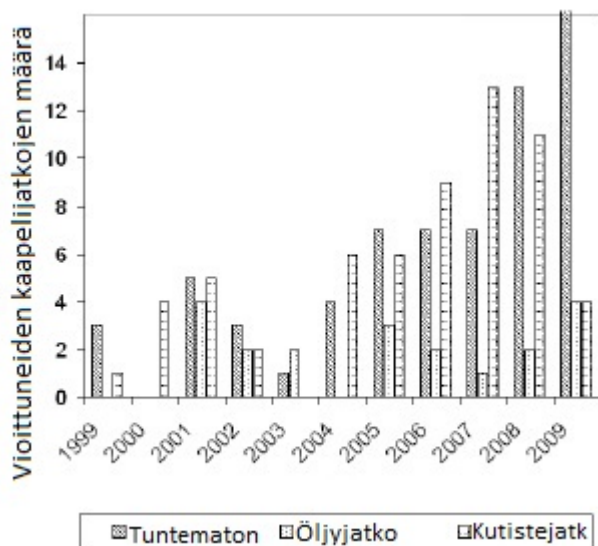
### Käyttökokemuksia siirtymäjatkoista

Verrattaessa vikojen määrää öljypaperieristeisissä kaapeleissa osana sekaverkkoa, ko-konaisvikamäärä on riippuvainen kaapelivarusteiden vikatiheydestä. Joillain tanskalai-silla jakeluverkkoyhtiöillä on ollut havaintoja ennenaikaisesta vikaantumisesta koskien siirtymäjatkoja. Ongelmaa tutkittiin käyttämällä apuna vikatilastoja vuosilta 1999–2009. Vikatilastot kattavat noin 90 % Tanskan kaikista keskijänniteverkoista. Jatkot on jaettu kolmeen eri kategoriaan: paperi-paperijatkot, muovi-muovijatkot ja seka- tai siirtymä-jatkot. Valitettavasti tiedoista ei voi päätellä tarkempia tietoja jatkojen tyypeistä. Sen sijaan voidaan päätellä verkoston kokonaispituus kaapelilajeittain ja vuosittain. Käyttä-mällä tätä tietoa hyväksi yhdessä vikaantuneiden jatkojen määrän kanssa saadaan vi-kaantumissuhteet eri jatkostyyppien välille. Oletuksena on, että siirtymäjatkosten määrä on merkittävästi alhaisempi kuin puhtaiden muovi-muovi- tai paperi-paperijatkojen. Jos vikamäärä puhtaiden muovi- ja siirtymäjatkosten kesken on lähes yhtä suuri, pitäisi vi-kaantumistiheyden olla merkittävästi korkeampi puhtaissa muovijatkoissa kuin siirty-mäjatkoissa. Näin ei kuitenkaan ole, joten vikatiheys siirtymäjatkoissa on merkittävästi korkeampi kuin puhtaissa muovijatkoissa. Vaikeampi on saada selville eroa puhtaiden paperi-paperijatkojen ja siirtymäjatkojen välille. Näyttäisi siltä, että puhtaiden paperijat-kojen kokonaismäärä on korkeampi kuin siirtymäjatkojen. Tämä tukee ajatusta siirtymä-jatkojen korkeammasta vikatiheydestä. Puhtaat paperijatkot ovat käyttöikältään selvästi vanhempia kuin siirtymäjatkot. Tämä osoittaa, että siirtymäjatkot vikaantuvat monesti ennenaikaisesti.

### Käyttökokemuksia erilaisista siirtymäjatkoista

Siirtymäjatkot voidaan jakaa kahteen pääryhmään käytetyn eristystekniikan mukaan: öljyeristeisiin ja muovieristeisiin. Öljyeristeisissä jatkoissa öljy tai vastaava eristysaine toimii eristeenä. Muovieristeisissä jatkoissa kaapeliöljyn pääsy muuhun osaan jatkoa on

estetty ja jatkon eristäminen on tehty muovieristeisen kaapelin tyyliin. Nykyään käytetään pääsääntöisesti muovieristeisiä jatkoja. Kuvassa 21 on voittuneet jatkot esitetty vuosittain jaoteltuina eristystavan mukaan. 48 %:ssa vikatapauksia jatkon eristystekniikka on ollut tiedossa. Näistä 36 % jatkot ovat olleet muovieristeisiä ja ainoastaan 12 % öljyeristeisiä.



Kuva 21 Voittuneet jatkot tyypeittäin jaoteltuina Tanskalaisissa jakeluverkoissa [12]

Tämä johtuu ilmeisesti kahdesta pääsyystä. Vikaantumisen muovieristeisessä siirtymäjatkossa on huomattavasti todennäköisempää kuin öljyjatkossa. Asennettujen muovijatkosten määrä verkossa on merkittävästi suurempi kuin öljyeristeisten jatkosten. Todelliset syyt vikaantumisille löytyvät melko varmasti näistä kahdesta syystä.

Verkkoyhtiöiden on nykyään merkittävä vikatilastoihin myös vikaantumisen aiheuttaja, jos syy on havaittavissa. Muovijatkoissa 43 %:ssa vioista on vian aiheuttajaksi todettu asennusvirhe ja 47 % syytä vikaantumiselle ei ole pystytty yksilöimään. Voidaan olettaa, että myös näistä iso osa on vaurioitunut virheellisen asennuksen tai käsittelyn johdosta.

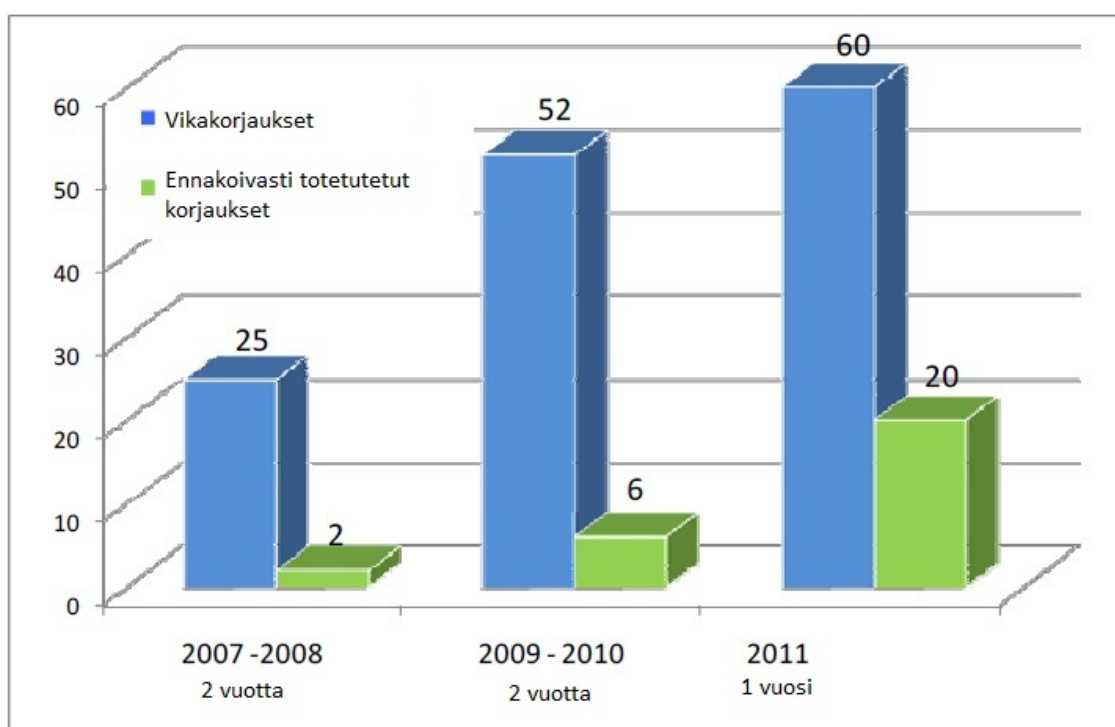
Osittaispurkausmittaukset keskijänniteverkossa

Tanskalaiset verkkoyhtiöt ovat aloittaneet aktiivisen yhteistyön osittaispurkausmittausten osalta. Yhteistyöllä pyritään saamaan aikaiseksi tutkimus, joka pyrkii löytämään yhteyden havaittujen osittaispurkausten ja verkkotyypin väliltä. Osittaispurkausten esiintyminen on pyritty jakamaan kolmeen kategoriaan: paperi-paperijatkot, siirtymäjatkot ja paperikaapelit. [12]

### 9.5 Keskijännitekaapeliverkon omaisuudenhallinnan parantaminen käyttäen apuna automatisoitua käytönaikaista osittaispurkausmittaustekniikkaa [11]

Osittaispurkausten käytönaikainen mittaustekniikka on verrattain uusi menetelmä. Tekniikalla on kuitenkin mahdollista havaita osittaispurkaukset aktiivisesti käytönaikana, sillä pystytään seuraamaan verkon kuntoa reaaliaikaisesti. Tämä omalta osaltaan mahdollistaa myös verkon korjaamisen ja korvaamisen oikea-aikaisilla ja oikein kohdistetuilla toimenpiteillä. Käytönaikaisten osittaispurkausmittauksen edut verrattuna käyttökeskeytyksen vaatimaan tekniikkaan ovat käyttökeskeytymätön mittaus ja tulosten saaminen reaaliaikaisesti.

UK Power Network on kasvattanut merkittävästi käytönaikaisten osittaispurkausmittauslaitteistojen määrää jakeluverkossaan. Kuvasta 22 on nähtävissä kasvaneen valvonnan vaikutus ennakoivassa kunnossapidossa.



Kuva 22 Käytönaikaisen valvonnan vaikutus ennakoivan kunnossapidon määriin UK Power Network:ssä [11]

Yleensä käytönaikaisia osittaispurkausmittauksia on tehty suhteellisen lyhytaikaisesti, johtuen mittauksen hankalasta toteuttamisesta. On kuitenkin huomattu, että lyhytaikainen mittaus ei välttämättä tuo esille kaikkia mitattavana olevan kohteen tapahtumia, vaan pikemminkin sisältää joitain epäkohtia. Ainoastaan tietty ajanjakso saadaan mitattua ja mittauksen oikea-aikaisuus voi heikentyä. Osittaispurkausten aktiivisuus kaapeleissa vaihtelee suuresti riippuen kaapeleiden fyysisistä ominaisuuksista, kuten kuormitus, kaapelin lämpötila jne.

Määräajoin tehtävillä osittaispurkausmittauksilla ei pystytä mittaamaan laajoja verkkoja vaan mittauksia on automatisoitava. UK Power Networks ja IPEC ovat kehittämässä automatisoituja mittausmenetelmiä.

Määräajoin tehtävät osittaispurkausmittaukset

Käytönaikainen käyttöpaikkamittaus ei häiritse kaapelin normaalia käyttöä, vaan mahdollistaa kaapeliyhteyden käytön osana normaalia tehollista verkkoa. Kaapelin ”vikapaikkojen” havainnointi perustuu kaapelitutkaan, joka mittaa kaapelissa kulkevan aallon kuluaikaa. Mittaaminen perustuu aallon kuluaikojen aikaeroon purkauspisteen ja kaapelin loppupäästä heijastuneen aallon suhteen. Seuraavassa on kuvattu, kuinka mittaminen on toteutettu UK Power Networks:ssa.



**Kuva 23 Käytönaikaisen mittauslaitteiston periaatekuva [11]**

Liipaisuyksikkö on sijoitettu kaapelivaipan maadoituksiin asemalla A käyttäen HFCT-anturia (High Frequency Current Transformer). HFCT-anturiin asemalla B on asennettu ohjelmisto, jolla voidaan havaita ja paikallistaa osittaispurkauslähteet mitattavassa verkossa.

Määräajoin tehtävä vikapaikan määrittäminen vaatii paljon työtä. Testaus henkilöstön tulee tarvittaessa pystyä säätämään kummatkin anturit asemilla A ja B. Osittaispurkausten mittaaminen rajoittuukin vain työaikaan. Mittauksista saatavat tulokset voivat vaihdella eri mittauksissa. Tulokset ovat ideaaleja, kun osittaispurkauslähteitä on vain yksi ja taustakohina mittauksessa on matala. Tulosten tulkinta monimutkaistuu, kun havaitaan useita osittaispurkauslähteitä tai kun taustakohina on korkealla tasolla. Näissä tapauksissa mittaustulosten tulkinta vaatii kokemusta ja näkemystä. Tuloksista saattaa jäädä puuttumaan joitain osittaispurkauslähteitä esimerkiksi mittausajankohdan vaihdellussa. Osittaispurkausten esiintyminen voi vaihdella johtuen kuormituksesta tai mittausajankohdasta.

Kokemuksia 80 automatisoidusta jatkuvaan mittaukseen kykenevästä osittaispurkausmittausyksiköstä

UK Power Networks ja IPEC ovat asentaneet kiinteitä mittausyksiköitä sähköasemille ja muuntamoihin. Järjestelmällä mitataan laajaa yli 2000 komponenttia käsittävää verkkoa. Saadut mittaustulokset kerätään keskustietokoneelle. Mittaustulokset on luokiteltu ja esitetty web-pohjaisessa sovelluksessa, jossa niitä voidaan jatkokäsitellä. Jokaiselle mittaustulokselle annetaan riskiarvio perustuen vikaantumisen todennäköisyyteen ja seurausten arviointiin. Vikaantumisen todennäköisyyden arviointi perustuu havaitun osit-

taispurkauksen tyyppiin ja näennäisvarauksen tasoon. Arvioitaessa vikaantumisen aiheuttamia seurauksia käytetään arvioinnin perustana vaikutuspiirissä olevien asiakkaiden kokonaismäärää ja verkkoyhteyden korvattavuutta. Riskiarviota käytetään priorisoitaessa kunnossapitoinvestointien verkkokohteita.

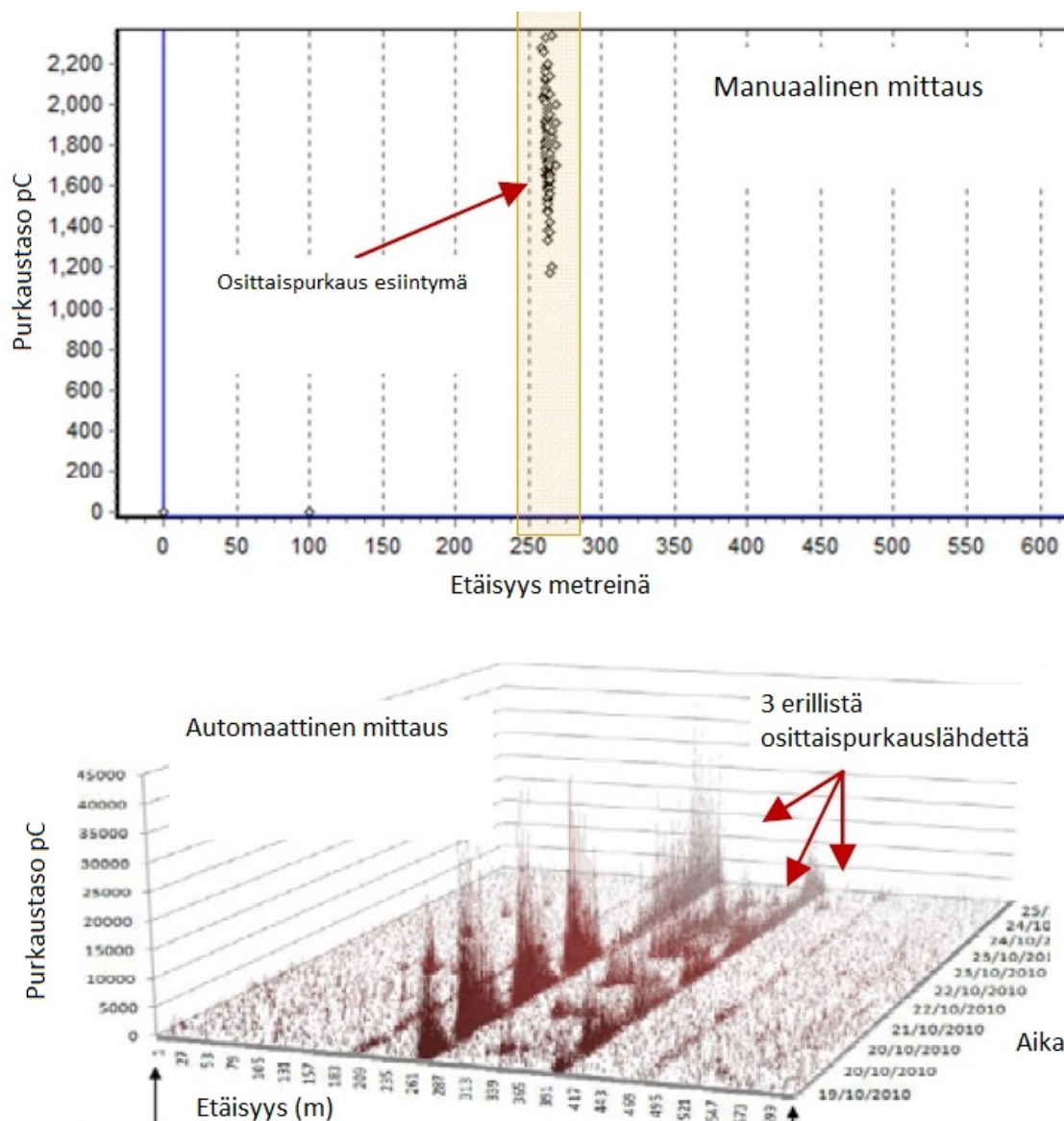
Viime vuosina on asennettu yli 80 manuaaliseen mittaukseen kykenevää mittausyksikköä, joista on tehty seuraavat havainnot saatujen mittausten pohjalta:

- On tärkeää varmistua osittaispurkauslähteiden oikeasta sijainnista.
- Jotkut osittaispurkauslähteet voivat jäädä huomaamatta, jos lähellä on muita osittaispurkauslähteitä
- Jotkut osittaispurkauslähteet eivät aktivoidu kuin tiettyyn aikaan, joten ne vaativat löytyäkseen pidempiaikaisen mittauksen.
- Havaitun merkitsevän osittaispurkauksen ja korvausinvestoinnin välinen aika kannattaa pitää mahdollisimman pienenä.

Edellä mainitut havainnot ja tekniikan kehittyminen ovat hiljalleen mahdollistaneet jatkuvan osittaispurkausten käytönaikaisen mittauksen kehittymisen kohti automatisoitua mittaustekniikkaa.

Teoriassa manuaalinen ja automaattinen osittaispurkausten paikallistaminen on hyvin samanlainen prosessi. Mittausyksiköt ja ohjelmistot täytyy asentaa, kalibroida ja tämän lisäksi mittaustapahtumaa tulee valvoa.

Automaattinen liipaisuysikkö kykenee keräämään tiedon useista lähteistä saman aikaisesti. 3D kuvantaminen mahdollistaa tuhansien yksittäisten mittauspisteiden tallentamisen useiden päivien ajalta. Määräajoin tehtävillä käyttöpaikkamittauksilla kaksi kolmesta osittaispurkauslähteestä jäi havaitsematta. Kuvassa 24 on pyritty havainnollistamaan tätä eroa käytännössä.



Kuva 24 Jatkuvan ja määräajoin tehtävän osittaispurkausmittausten tulosten vertailu [11]

#### Automaattisen paikantamisen kehittyminen

Määräajoin tehtävä osittaispurkausmittaus ja osittaispurkauslähteiden paikantaminen ei pitkällä juoksulla ja laajalla verkolla ole kannattavaa. Esimerkiksi UK Power Networks:llä on kaikki 70 asennettua manuaalista mittausyksikköä laajennettu toimimaan automaattisesti. Tulevaisuudessa voi olla kannattavaa varustaa kaikki uudet sähköase- ja muuntamokojestot integroidulla osittaispurkausmittausyksiköllä.

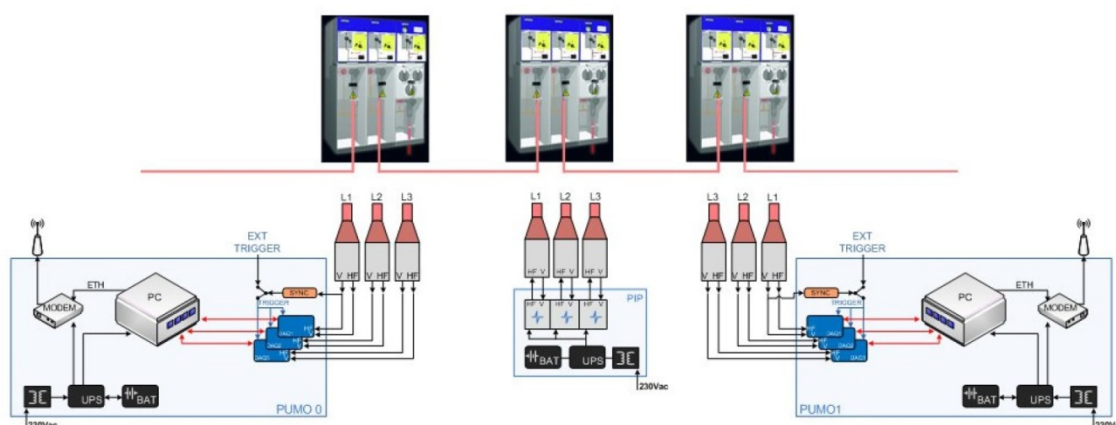


## 9.6 Jatkuva käytönaikainen osittaispurkausmittaus keskijänniteverkossa [32]

Osittaispurkaukset synnyttävät lyhyitä, joitain nanosekunteja kestäviä virtapulsseja. Näiden havaitsemiseen on yleisesti käytetty RF tekniikkaan perustuvia sensoreita, joilla on havainnoitu näennäisvaraus ja verrattu sitä esiintymien sijoittumiseen aaltomuodossa. Selvittämällä esiintymien sijoittuminen, voidaan päätellä purkauksen lähde.

Espanjassa on tutkittu miten jatkuvalla käytönaikaisella osittaispurkausmittauksella voidaan tarkastella verkon kuntoa tyypillisessä jakeluverkossa.

Kuvasta 25 on nähtävissä laitteiston periaatteellinen kytkentä. Mittaukseen käytetään kapasitiivisesti kytkettyjä mittaustureita. Antureilla on mahdollista mitata samanaikaisesti käyttöjännite sekä osittaispurkausten aiheuttamat korkeataajuiset aallot.



Kuva 25 Mittauslaitteiston rakenne [32]

Mittaukset tallennetaan samanaikaisesti kahdesta eri päästä mitattavaa verkkoa. Käytämällä kehittyneitä ohjelmistoja ja tehokkaita teollisuustietokoneita voidaan tallentaa suuret määrät mitattua tietoa. Mitatusta aineistosta poistetaan turhat häiriösignaalit. Tallennettu tieto on tämän jälkeen valmista lähetettäväksi eteenpäin keskustietokoneelle. Kolmannella samalla lailla kapasitiivisesti kytketyllä mittalaitteistolla syötetään mitausyksiköille kalibrointipulsseja.

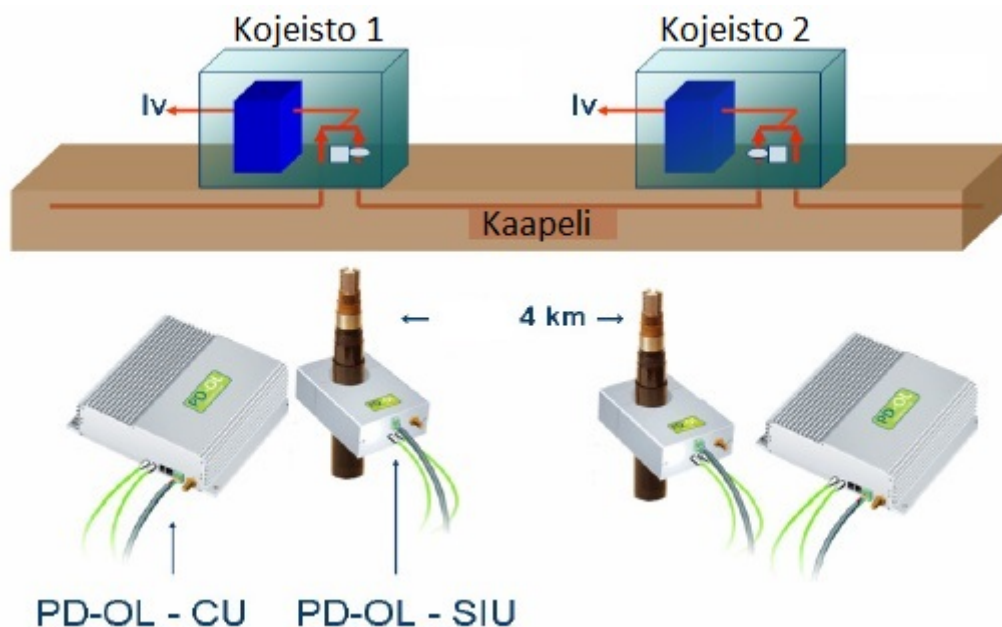
Menetelmällä pystyttiin osoittamaan todeksi arviot osittaispurkausaktiivisuuden vastavuudesta vallitsevaan käyttöjännitteeseen. Mittaamalla jatkuva-aikaisesti verkkoa pystytään tehostamaan vikojen ennaltaehkäisyä ja seuraamaan samalla muuta tilaa.[33]

## 9.7 Kokemuksia jatkuva-aikaisista käyttöpaikkamittauksista [33]

Useat verkkoyhtiöt ovat ilmaisseet tarpeen jatkuva-aikaisille käyttöpaikkamittauksille. Toimittaessa keskijännitteisessä jakeluverkossa on usein riittävä mitata tarkasteltavaa kaapeliosuutta kummastakin päästä. Mitattujen osittaispurkausten paikantaminen perustuu tällöin usein aikaeron mittaamiseen.

Ennen vuotta 2005 ei vastaavanlaisia laitteistoja ollut vielä tarjolla. Suurimpana ongelmana oli eripäissä olevien mitta-antureiden mittausten synkronointi. KEMA esitteli vuonna 2005 kehittämänsä menetelmän PD-OL (Partial Discharge testing On-line with Location).

PD-OL laitteisto koostuu kahdesta erillisestä mittausyksiköstä. Kummatkin mittausyksiköt ovat asennettu omiin päihin mitattavaa verkko-osaa, kuten kuvassa 26 on nähtävissä.



Kuva 26 PD-OL mittauslaitteiston periaatekuva [33]

Kummassakin kaapelin päässä on asennettuna mitta-anturi ja siihen liitetty ohjainyksikkö. Kummankin pään antureilla pystytään mittamaan pulssit kaapelissa ja lähettämään kalibroituisignaali kaapeliin. Anturit voidaan asentaa suoraan kaapelin vaipan ympärille tai kaapelimaadoitusten ympärille. Ohjainyksiköt ovat kytketty mitta-antureihin valokuidulla mittausten aikaisten häiriöiden ehkäisemiseksi. Ohjainyksikkö on pieni tietokone, joka kontrolloi mittaussekvenssiä, tallentaa mittaustiedot ja suorittaa signaalin käsittelyn. Ohjainyksiköt ovat yhteydessä keskustietokoneeseen LAN-modeemi tai GPRS-yhteyden välityksellä.

Koska keskijännitekaapelit ovat usein rengasmaisia verkkoja, jotka ovat yhteydessä seuraavaan kaapeliyhteyteen, tulee mittaukseen valitulle kaapeliosuudelle myös signaaleja varsinaisen mittausalueen ulkopuolelta. Tästä syystä PD-OL laitteistoissa on kaksi synkronoitua mittauspistettä, joiden tallentamia tietoja yhdistelemällä pystytään varmistamaan mitatun tiedon oikeellisuudesta.

Mittauslaitteistoja on asennettu vuosien 2007–2010 välisenä aikana. Asennetuista laitteistoista saatujen tulosten perusteella voidaan sanoa, että laitteistoilla pystytään luotettavasti saamaan tietoa käytönaikaisista tapahtumista, nopeasti alkavat tai kehittyvät viat voidaan havaita ja niihin pystytään puuttumaan ennen kuin ne aiheuttavat häiriöitä säh-

könjakeluun. Mittauksista saaduilla tiedoilla voidaan kuvata verkon kunnan kehitystä. [32] [33]

## 9.8 Yhteenveto kokemuksista maailmalta

Ympäri maailmaa on laajasti tutkittu jakeluverkkojen mittaavaa ja analysoivaa kunnanvalvontaa. Menetelmien kehittyminen 2000-luvulla on ollut voimakasta, mikä on osaltaan vaikuttanut verkkoyhtiöiden kasvavaan mielenkiintoon näitä verrattain uusia menetelmiä kohtaan.

Kaapeleiden käyttökunnan varmistamiseksi on mahdollista käyttää useita erilaisia tekniikoita. Kuvassa 27 on esitetty eri testausmenetelmien käyttömahdollisuuksia kaapeleiden kriittisyysluokan mukaisesti.

Kaapelin kriittisyys	Testausmenetelmä				
	Eristysvastusmittaus	Vaipaneheysmittaus	Jännitekoe	Osittaispurkausmittaus	Hävikertoimen mittaus
Korkea	p	p	v (VLF) <sup>1)</sup>	p (VLF tai DAC)	v (VLF tai DAC)
Normaali	p	p	v <sup>1)</sup>	p (VLF, DAC tai on-line)	
Matala	p	p	p (50 Hz U <sub>0</sub> )	p (on-line)	

Kuva 27 Uusien kaapeliosuuksien testausmenetelmät [21]

<sup>1)</sup> Jos osittaispurkausmittaukset tehdään 1,0-2,0xU<sub>0</sub> ei jännitekoe ole pakollinen

Kehitettäessä vaatimuksia keskijännitekaapeleiden kunnanvalvontaan tarvitaan lähdetiedoksi muutakin kuin pelkästään kaapeleiden ikä ja rakennetieto. Tulevaisuudessa on oltava käytettävissä mahdollisimman paljon tietoa kaapeleiden sisäisistä ja ulkoisista ominaisuuksista. Kun käytössä on erilaista mitattua tietoa kaapeleiden kunnosta, pystytään parhaimmillaan jakeluverkkojen käyttöikä jatkamaan ja vikoja ehkäisemään ennalta. Paperieristeisillä kaapeleilla ennustaminen on tulevaisuudessakin vaikeampaa kuin polymeerisillä kaapeleilla.

Tanδ-mittaukset sekä käytönaikaiset ja käyttökeskeytyksen vaativat osittaispurkausmittaukset ovat varteenotettavia menetelmiä, kun halutaan tarkempaa tietoa verkon käyttökunnosta ylläpidon ja investointisuunnittelun tarpeisiin. Tanδ-mittaus on hyvä menetelmä, kun halutaan yleistietoa kaapelin kunnosta, mutta sen huonona puolena voidaan pitää ulkoisten tekijöiden suurta vaikuttavuutta mittaustuloksiin. Käyttökeskeytyksen vaativat osittaispurkausmittaukset antavat meille jo tarkempaa tietoa kaapelin kunnosta paikkatietoon perustuen, ja sen käyttöä osana joka päiväistä kunnanvalvontaa voidaan pitää jo pitkälti käytäntönä. Vielä on toki olemassa jotain ratkaisemattomia kehityskohdita tekniikan käytössä: kuinka käsitellään kaikkea saatua tietoa, kuinka ja miten nopeasti osittaispurkaukset tarkalleen ottaen kehittyvät. Käytönaikaisten mittausten suurimpana etuna verrattaessa käyttökeskeytyksen vaativiin mittauksiin voidaan pitää mitattavan verkon osan mittaamista niissä vallitsevissa olosuhteissa, jotka todellisuudessa vallitsevat käytönaikana ja käyttökeskeytyksetöntä mittaustajärjestelyä. Lisäksi mittaustuloksista pystytään pitkäaikaisilla mittauksilla saamaan tietoa kaapelin kunnan kehittymisestä. Kaapeliverkon kunnan heikkeneminen voidaan havaita ajoissa ja parhaissa tapauksissa voidaan vikaantumisen aiheuttamat odottamattomat keskeytykset välttää.

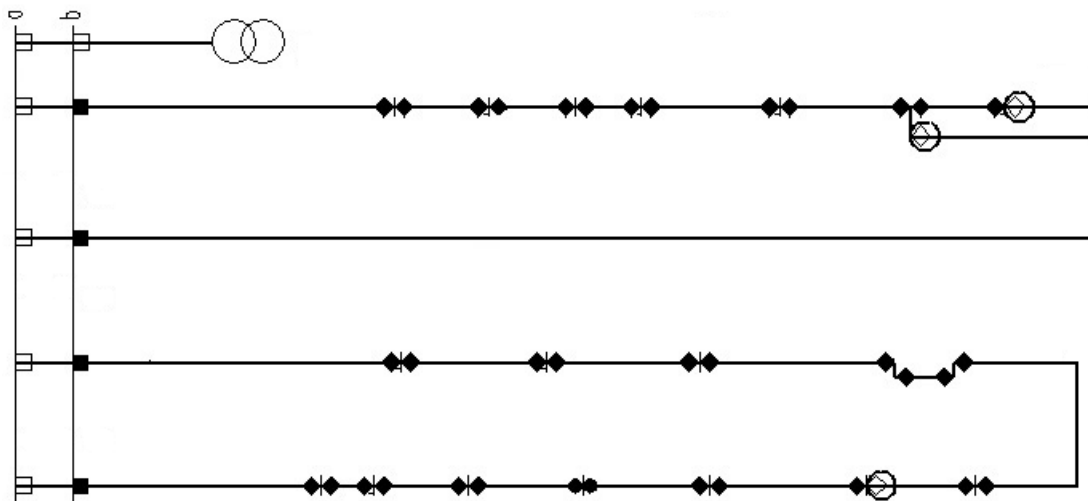
## 10 Helen Sähköverkko Oy:n jakeluverkko

Jakeluverkkoliiketoiminta on luvanvaraista toimintaa Suomessa. Helsingin kaupungin alueella lukuun ottamatta Sipoon liitosaluetta sähkömarkkinalain mukaisena jakeluverkon haltijana toimii Helen Sähköverkko Oy. Sen tehtävä on ylläpitää ja kehittää vastuualueensa sähköverkkoa ja tarjota asiakkaille ja muille sähkömarkkinaosapuolille hyvälaatuinen verkkopalvelu ja edistysellinen markkinapaikka. Helen Sähköverkon jakeluverkko koostuu lähes 6000 kilometristä sähköverkkoa 185 km<sup>2</sup> pinta-alalla. Sähkön kulutus sen toimilupa-alueella on noin 4500 GWh luokkaa ja asiakkaita sillä on noin 360 000 kappaletta.

### 10.1 Jakeluverkon rakenne

Helen sähköverkon keskijännitteinen jakeluverkko on jaettu kahteen eri jännitetasoon. Jännitetasot ovat 10 ja 20 kV joihin on kytketty 1800 omaa ja noin 700 asiakasmuuntamoita.

Helen Sähköverkko Oyn keskijänniteverkko on rakennettu rengasmaiseksi, jota käytetään pääosin säteittäisenä. Rengas muodostuu kahdesta tai useammasta johtolähdöstä ja sähköaseman kiskostojen eri ryhmistä. Sähköasemien sisäiset renkaat on pyritty sähköasemalla kytkemään eri ryhmiin. Sähköasemalla ryhmiä on kahdesta kolmeen kappaletta, niitä syötetään normaalitilanteessa kahdelta eri päämuuntajalta kokoojakiskoittain. Eri ryhmiin kytketyillä keskijännite lähtörengasilla pyritään varmistamaan sähkönjakelun käyttövarmuus päämuuntajan tai sähköaseman kokoojakiskostoihin kohdistuvissa vioissa. Normaalisti sähköaseman kiskostoja syötetään pitkittäisten kiskokatkaisijoiden tai erottimien kautta ns. kiskokäytöllä. Näin ollen normaalitilanteessa johtorengas molemmat johtolähdöt ovat saman päämuuntajan syöttäminä, mikä helpottaa päivittäisten kytkentätoimenpiteiden suorittamista, johtorengaskytkenä voidaan suorittaa saman päämuuntajan syöttöalueella. Rengasverkko voi olla myös kytkettävissä useammasta vaihtoehdoisesta syöttösuunnasta, tällöin puhutaan yleensä silmukoidusta rengasverkosta. Silmukoimalla verkko joko ns. napanuoralla tai tikapuurakenteella pystytään verkon käyttövarmuutta ja korvaavuutta parantamaan entisestään verrattuna perinteiseen kahden syöttösuunnan rengasverkkoon.



Kuva 2 Rengasverkon periaatekuva

Varsinkin kaupunkiverkoissa kaapelointiaste on verrattain korkea ja kaapeliverkon vian korjaaminen hidasta, on verkon rengasmaisella rakenteella merkittävä vaikutus verkon käyttövarmuuteen [6. s.13]

Keskijänniteverkon 10 kV verkko on kokonaan maasta erotettu, kuten myös suurin osa 20 kV verkkoa. 20 kV verkosta Pukinmäen, Tapanilan ja Viikinmäen verkot ovat maadoitettua säädettyä kuristimen kautta maasulkuvirran kompensoimiseksi. Kompensoitua ja 10 kV verkkoa voidaan käyttää maasulkutilanteissa normaalisti niin, että vika ei näy pienjänniteverkossa. 20 kV sähköasemia on 11 ja 10 kV sähköasemia on 11 kappaletta, joissa on yhteensä 476 kappaletta keskijännitejohtolähtöjä.

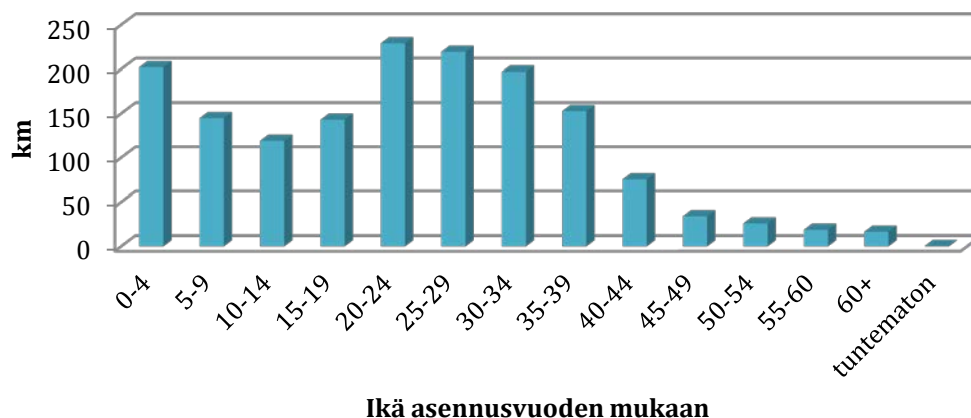
Helen Sähköverkko Oyn keskijänniteverkko koostuu noin 1600 km sähköverkkoa, joka on yli 99 % maakaapeloitu. Ainoat kaapeloimattomat verkko-osat sijoittuvat kaupungin laiduille ja saaristoon, jossa maakaapelointi on pintakallioiden takia epätarkoituksenmukaista. Korkea kaapelointiaste on seurausta Helsingin tiiviistä rakentamisesta ja sähkölaitoksen aikoinaan omaksumasta tavasta toimia, joka on aikojen saatossa osoittautunut oikeaksi ratkaisuksi kaupunkiverkossa. Suuriosa jakeluverkon maakaapelista on tätä nykyä muovieristeistä AHXAMK-W tyyppistä PEX-eristeistä keskijännitemaakaapelia. Jäljellä on vielä runsaasti APYAKMM tyyppistä maakaapelia ja joitain kymmeniä kilometrejä PLKVJ ja PYLKVJ maakaapeleita (Taulukko 3).

Taulukko 3 Helen Sähköverkko Oyn maakaapelilajit kilometreittäin

Kaapelilaji	2009	2010	2011	2012	2013	↙
AXW	722,7	745,5	764,6	804,6	829,4	km
APY	703,7	687,0	678,4	658,4	637,6	km
PYLK/PLKV	112,4	108,5	105,5	97,9	92,2	km

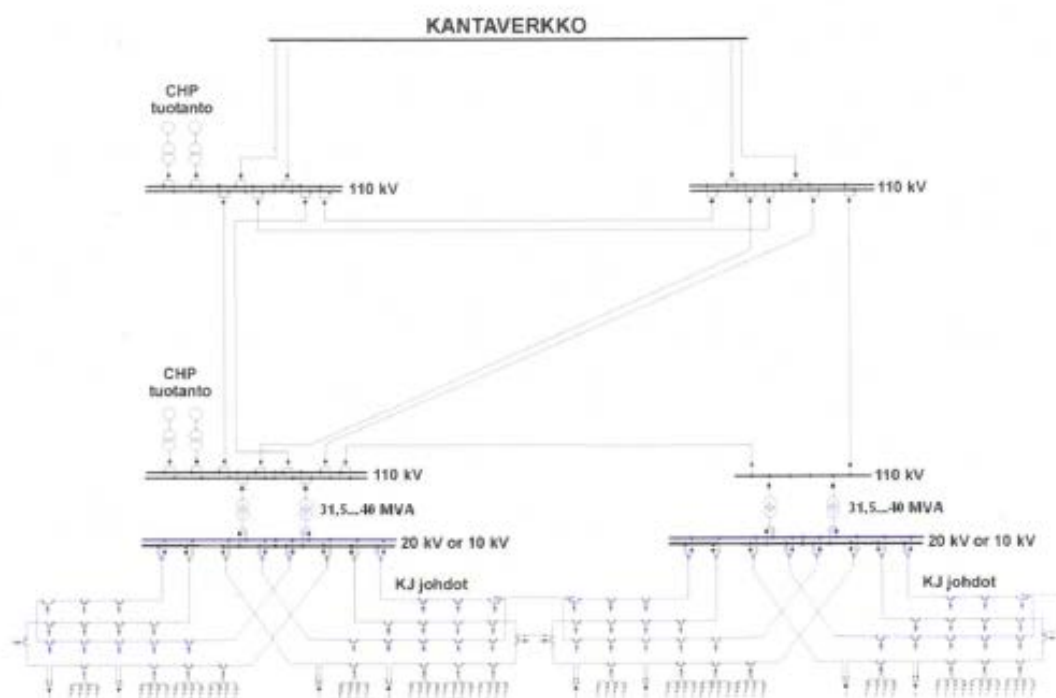
Vanhimmat keskijännitekaapelit on asennettu 1930-luvulla, mutta ylivoimaisesti suurin osa kaapeleista on asennettu 1970-luvun jälkeen.

## Keskijännitekaapeleiden ikäjakauma 12/2013



**Kuva 28 Helen Sähköverkko Oy keskijänniteverkon ikäjakauma**

Jakeluverkkoon on kytketty noin 2500 muuntamoita tai kytkemöitä, joista asiakasmuuntamoita on noin 700 kappaletta ja loput noin 1800 muuntamoita on Helen Sähköverkkoon jakelumuuntamoita. Jakelumuuntamon päälaitteet ovat keskijännitekojeisto, jakelumuuntaja ja pienjännitekeskus. Yksittäisen muuntamon keskijännitekojeistoon saattaa liittyä useita keskijännitekaapeleita kuormarottimella. Muuntajia on tapauskohtaisesti yhdestä kahteen ja ne syöttävät omia pienjännitekojeistojaan, joista on useita pienjännitekaapelilähtöjä. Pienjänniteverkko on pääosin silmukoitu kaapeliverkko, jonka yhteispituus on 4300 kilometriä ja kaapelointiaste yli 93 %. Kuvassa 29 on esitetty sähköverkon perusrakenne.

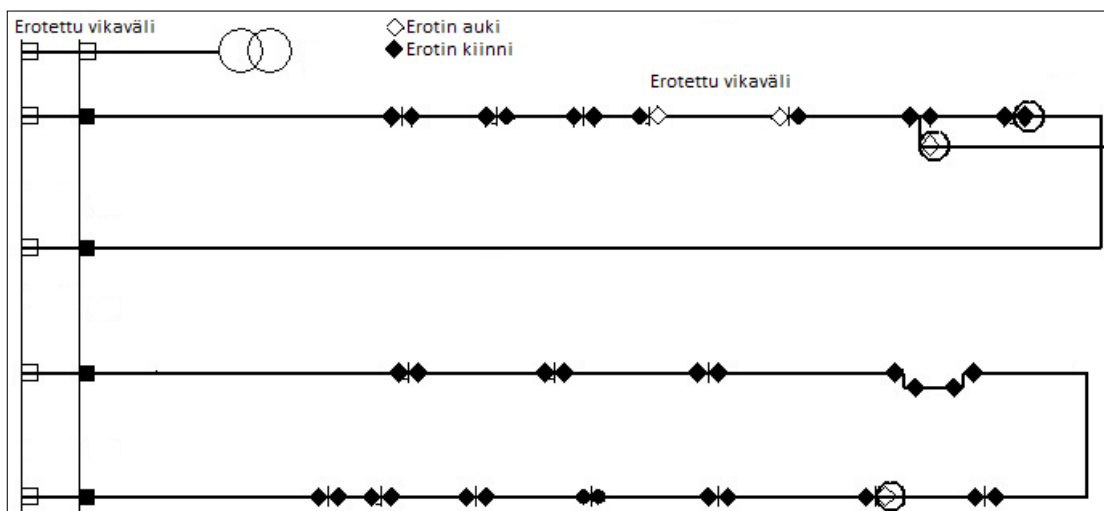


Kuva 29 Sähköverkon perusrakenne Helsingissä [46]

## 10.2 Helen Sähköjakeluverkon toimitusvarmuus

Keskijänniteverkossa tapahtuvat vikakeskeytykset ovat usein merkityksellisimpiä, kun ajatellaan asiakkaiden kokemaan haittaa. Vaikka pienjännitteellä tapahtuvia vikakeskeytyksiä on määrällisesti enemmän, on niiden vaikuttavuus huomattavasti pienempi kuin keskijännitteellä tapahtuneiden vikakeskeytysten. Suurjännitteisessä jakeluverkossa tapahtuvilla vikakeskeytyksillä ei yleensä ole asiakasvaikutuksia, koska verkon rakenne on silmukoitu.

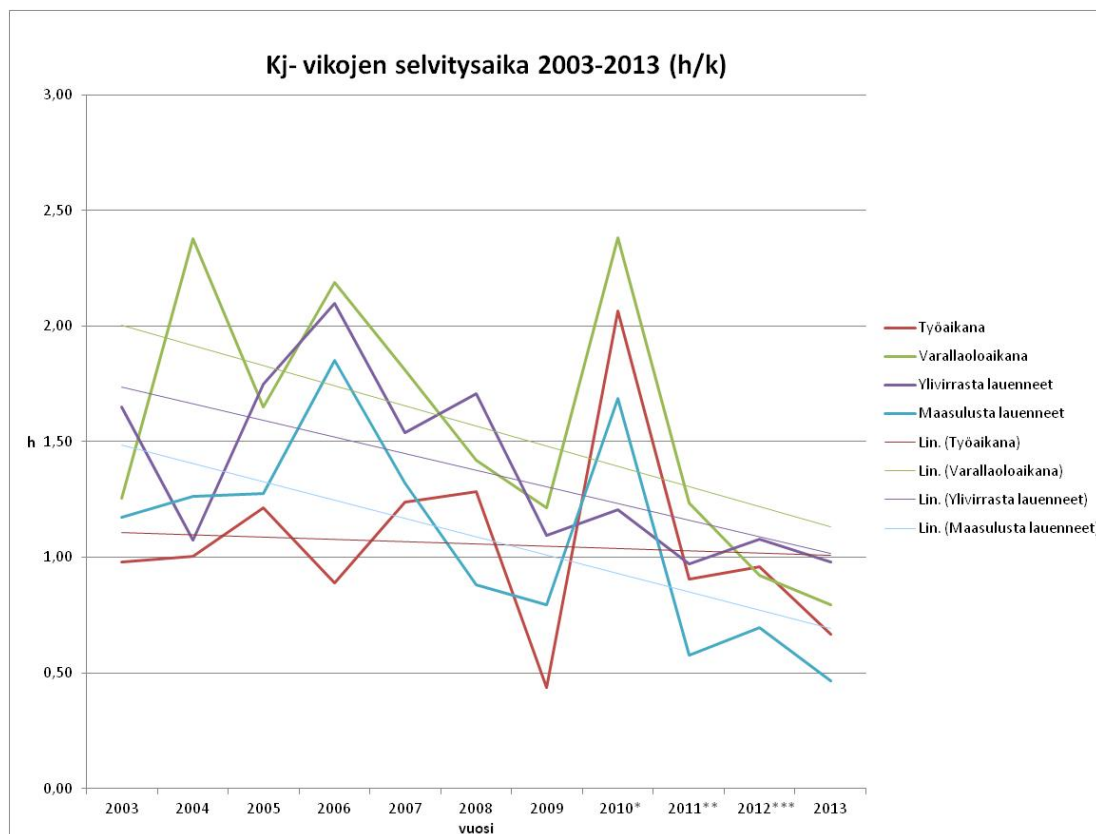
Helen Sähköverkko Oyn keskijännitteisessä jakeluverkossa vuosittainen vikatiheys vaihtelee. Viimeisen kymmenen vuoden keskiarvo on 41 vikaa vuodessa [38]. Kaikki keskijänniteverkon viat eivät kuitenkaan aiheuta varsinaista vikakeskeytystä, johtuen verkon käyttötavasta. Helen Sähköverkko Oyn 10 kV keskijänniteverkkoa voidaan käyttää maasulun aikana niin, että pienjänniteverkon puolella ei vikaa havaita. Myös 20 kV jakeluverkossa on maasulkuvirran kompensointia lisätty ja osaa ko. verkosta voidaan käyttää maasulkujen aikana. Asiakkaille ei vian erotuksesta tule välttämättä näkyvää haittaa, johtuen verkon rengasmaisesta rakenteesta, joka mahdollistaa vioittuneen verkonosan eristämisen yhden erotinpiirin osalta.



**Kuva 30** Esimerkkikuva silmukoidusta jakeluverkosta, josta on vikaantunut erotinväli erotettuna

Keskijänniteverkossa tapahtuvien vikojen vaikutusalue ja vaikuttavuus ovat usein paljon suurempia kuin pienjänniteverkon vioissa, vaikka vikamäärä on pienempi. Asiakkaiden kokemaan keskeytysaikaan vaikuttaa vian sijainti, vikaantumisaika, vikaantumistapa ja jakeluverkon rakenne. Työajan ulkopuolella tapahtuvien vikojen selvittäminen on usein hitaampaa kuin työaikaan. Toisaalta taas kaksoismaasulkujen selvittäminen on hitaampaa kuin maa- tai oikosulkujen selvittäminen.





**Kuva 31 Keskijännitevikojen keskimääräiset selvitysajat 2003–2013**

Kaapeloinnilla voidaan verkon käyttövarmuutta kasvattaa vähentämällä sääolosuhteiden tai eläimien aiheuttamia keskeytyksiä.

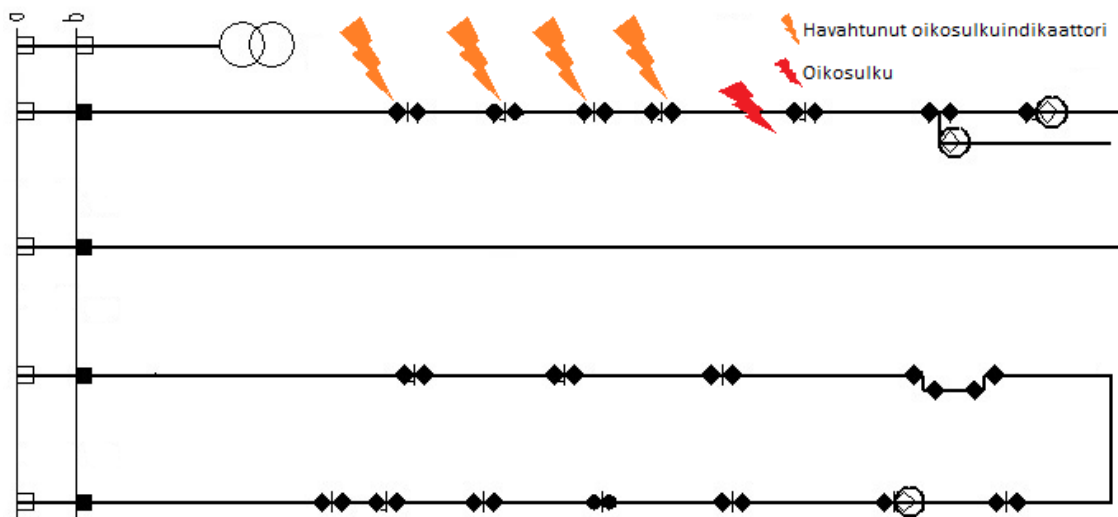
Tarkempia keskeytystunnuslukuja on esitetty liitteessä 1.

### 10.3 Vikapaikan erottaminen

Yksinkertaisimmillaan jakeluverkon suojaus on toteutettu maasulku- ja oikosulkusuo-  
jauksella. Suojareleet saavat mittaustiedon mittamuuntajilta tai sensoreilta. Suojalaitteen  
asetteluarvon ylittyessä suoja havahtuu. Jos suojalaitteen havahtuma ei poistu, antaa  
suojalaite ennalta asetellun aikaviiveen jälkeen laukaisukäskyn suojaavalle katkaisijalle.  
Tieto suojalaitteen havahtumasta ja suojalaitteen laukaisusta välitetään sähköaseman  
ala-asemalta kaukokäyttöä pitkin käyttökeskuksen käytönvalvontajärjestelmään.

#### 10.3.1 Oikosulkuvian paikantaminen

Jakeluverkolla sijaitsevat oikosulkuilmäisimet ovat joko paikallisestiluettavia tai muun-  
tamoautomaation kautta käytöntukijärjestelmästä havaittavissa. Muuntamoautomaatiolla  
varustettujen muuntamoiden osalta voidaan vianpaikannusta nopeuttaa kaukokäytöstä  
saatavilla vikahavahtumilla. Näiden avulla voidaan paikalliskäyttöä tekevää henkilöstöä  
ohjata esirajatulle alueelle tarkastamaan paikallisia havahtumia.  
Oikosulkuindikaattoreita tarkastelemalla voidaan vikapaikka paikallistaa muuntamon tai  
erotinvälin tarkkuudella. Vikaantunut väli erotetaan verkosta ja sähköt palautetaan muil-  
le terveille verkonosille.



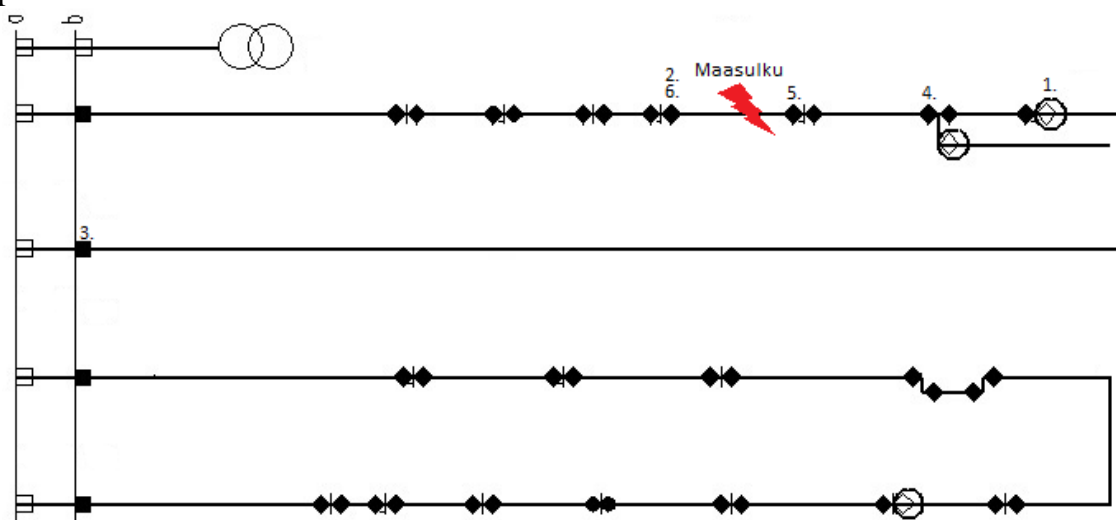
Kuva 32 Oikosulkuvian paikantamisen periaate

### 10.3.2 Maasulkuvian paikantaminen

Helen Sähköverkko Oyssä on jakelualueesta riippuen maasulkusuojaus hälyttävä tai laukaiseva. Hälyttävää maasulkusuojauksia käytetään 10 kV jakeluverkossa ja 20 kV maasulkuvirran kompensointilaitteistolla varustetuissa verkko-osissa. Katkaisijan lauetessa maasulkuhavahtumasta vikaantuneen erotinvälin paikallistaminen suoritetaan kokeilemalla. Kokeilemalla jännitteettömäksi jäänyttä verkkoa puolitetään, eli kuormaerotin avataan sovitusta kohtaa verkkoa, jonka jälkeen sähköaseman syöttävä katkaisija kytketään kiinni. Katkaisijan pysyessä kiinni tiedetään vikavälin olevan aukinaisen kuormaerotin takapuolella. Samaa menetelmää jatketaan verkkoa pidentämällä tai lyhentämällä, niin kauan että vikaantunut kaapeliväli voidaan päätellä ja erottaa. Lopuksi syöttö palautetaan terveille verkon osille.

Hälyttävässä verkossa saman päämuuntajan jakelualueella kytketään johtolähdöt silmukkaan kytkemällä jakorajaerotin kiinni. Vikaantuneen erotinvälin haarukointi aloitetaan avaamalla kuormaerotin toisesta kohtaa verkkoa. Tällöin vianpaikkaa syöttävän johtolähdön maasulkurele havahtuu ja vikapaikan tiedetään olevan tällä puolella auki olevaa kuormaerotinta. Auki oleva erotin suljetaan ja erotuskytkentä tehdään seuraavasta kohtaa verkkoa. Tällä tavalla vikaa siirretään johtolähdöltä toiselle, lopuksi voidaan

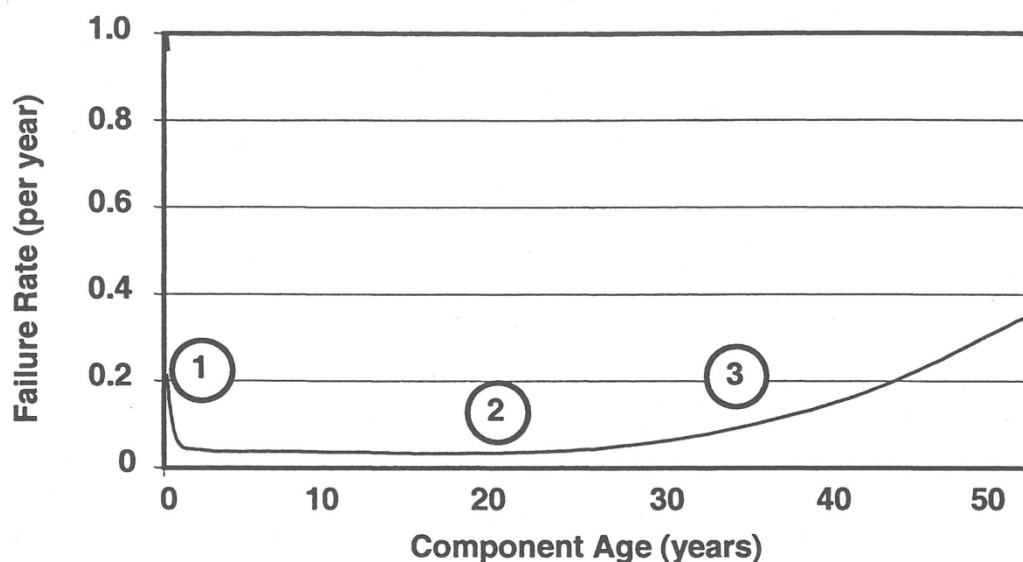
päätellä vialla oleva erotinväli.



**Kuva 33** Maasulkuvian paikantaminen 1. Jakoraja suljetaan. 2. Kuormaerotin avataan. 3. Johtolähdön maasulkurele havahtuu. Kuormaerotin suljetaan. 4. Kuormaerotin avataan. Alkuperäisen johtolähdön maasulkurele havahtuu. Erotin suljetaan. 5. Erotin avataan. Alkuperäisen johtolähdön maasulkurele havahtuu. Vian tiedetään olevan erottimien 5 ja 6 välissä. 6. Kuormaerotin avataan. Maasulkureleiden maasulkuhavahtuma poistuu ja vikaväli on erotettu.

## 10.4 Vikatilastot jakeluverkoissa

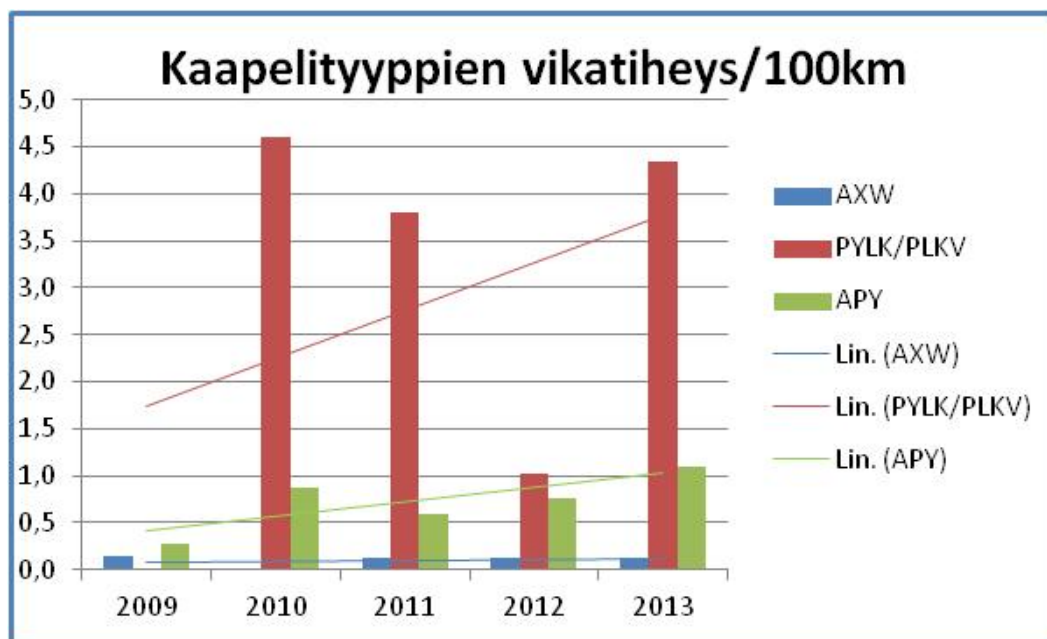
Jakeluverkko koostuu verkkokomponenteista. Yksittäisen verkkokomponentin vikaantumisen voi johtaa vikakeskeytykseen. Järjestelmän luotettavuutta pystytään arvioimaan tuntemalla verkossa esiintyvien komponenttien ominaisuudet ja vikaantumistaajuuudet. Vikaantumiseen vaikuttavia tekijöitä ovat: käyttöolosuhteet, ulkoiset tekijät, komponenttien sisäiset ominaisuudet ja käyttöikä. Komponenttien käyttöiälle on jo pitkään asetettu suositusarvoja, joiden ylittämisen jälkeen komponentin luotettavuus laskee nopeasti. Yleisesti on esitetty komponenttien luotettavuuden noudattavan ns. kylpyamme-käyrää (kuva 34), jossa alussa vikaantumistiheys on aluksi korkea johtuen mahdollisista valmistus- tai asennusvirheistä. Toisessa vaiheessa vikaantumistiheys pysyy matalana komponentin luonnollisen käyttöiän ajan. Kolmannessa vaiheessa vikaantumistiheys alkaa jälleen kasvaa. Tämä johtuu komponentin luonnollisesta vanhenemisesta.



Kuva 34 Komponenttien ikääntymisen vaikutukset vikatiheyteen [37. s269]

#### 10.4.1 Viat Helen Sähköverkko Oyn keskijännitekaapeliverkossa

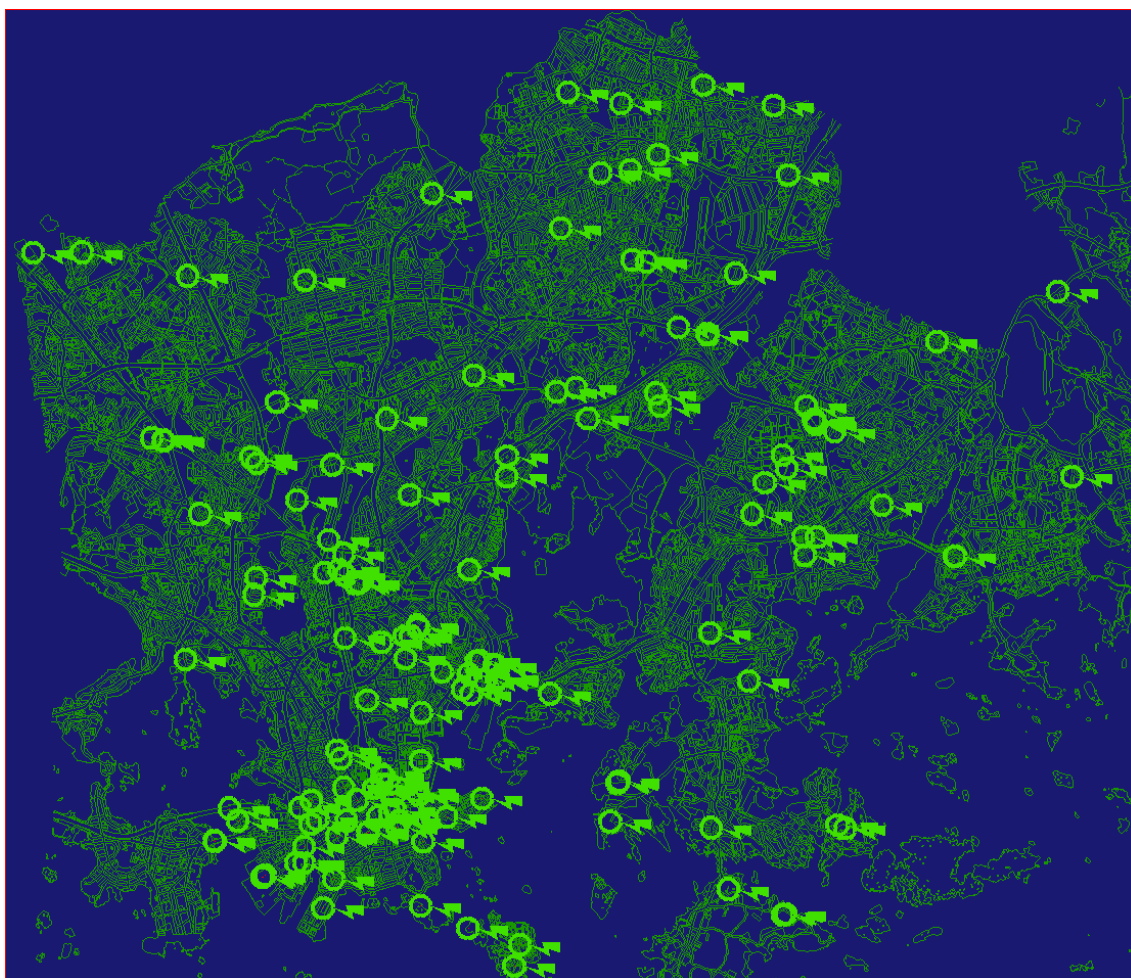
Helen Sähköverkko Oyn keskijänniteverkossa noin puolet vikatapauksista on tapahtunut APYAKMM kaapelissa, joiden asennusvuodet ajoittuvat välille 1967–1986. Noin kolmannes vioista on ollut PLKVJ tai PYLKVJ kaapeleissa, joita on asennettu vuosien 1947–1967 välisenä aikana. AHXAMK-W tyyppisessä kaapelissa vikoja on ollut alle yksi kymmenestä. Suhteutetut vikamäärät eri kaapelityypeissä voidaan nähdä kuvasta 35.



Kuva 35 Asennuspituuteen suhteutetut vikamäärät Helen Sähköverkko Oyn keskijänniteverkossa

APY-kaapeleissa viat ovat jakautuneet tasaisesti 10 ja 20 kV verkkojen kesken. PLKVJ ja PYLKVJ kaapeleissa viat ovat keskittyneet 10 kV verkolle. 10 kV verkossa näiden kaapelityyppien asennusmäärät ovat myös korkeammat kuin 20 kV verkossa. Kokonaisuudessaan viat ovat jakautuneet tasan eri jakelujännitteiden välillä. Suhteellisesti vikoja on kuitenkin enemmän 10 kV verkossa, jonka asennettu kaapelipituus on noin puolet pienempi kuin 20 kV verkon.

Vikaantumisten syynä on usein ollut kaapeleiden käsittely ulkopuolisten toimesta, kun kyseessä on APYAKMM tai AHXAKM-W tyyppinen kaapeli. PLKVJ ja PYLKVJ kaapeleissa vikaantumisen alkusyyntä määrittäminen ei usein ole ollut mahdollista. Voidaan kuitenkin olettaa, että maanrakennustyöt kaapeleiden läheisyydessä nostavat vikaantumistiheyttä. Maanrakennustöissä aiheutetut vauriot voivat aiheuttaa varsinaiseen keskeytykseen johtavan vian vasta vuosien päästä. Kuvasta 36 on nähtävissä vuosien 2009–2014 aikana tapahtuneet keskijänniteverkon viat.



**Kuva 36** Viat keskijännitekaapelivarusteissa 2009-2014

Vikaantuneista kaapelijatkoista noin puolet on ollut APY-APY-jatkoissa. Suurin osa näistä jatkoista on ollut öljytäytteisiä kolmiputki tai torpedojatkvoja. AXW-AXW tyyppiin jatkoihin on vioista kohdistunut noin neljännes. Noin puolet AXW-AXW jatkoissa tapahtuneista vioista on ilmennyt alle viiden vuoden käyttöään jälkeen. Usein on voitu

jälkeenpäin osoittaa vikaantumisen johtuneen virheellisestä asennuksesta. Taulukosta 4 voidaan nähdä jatkosvikamäärät.

**Taulukko 4 Keskijännitejatkosten vikamäärät Helen Sähköverkko Oy:ssä**

Jatkotyyppi	2009	2010	2011	2012	2013	Yhteensä	%
APY-APY	2	5	1	3	2	13	50 %
APY-AXW		1		1	1	3	12 %
AXW-AXW	2		1	2	1	6	23 %
PLK-APY	1				1	2	8 %
PLK-AWX		1	1		0	2	8 %
Ei tiedossa	0	0	0	0	0	0	0 %
	5	7	3	6	5	26	100 %

Keskijännitepääteissä vikoja on ollut samalla tarkastelujaksolla 16 kappaletta. Keski-jännitepääteiden tyypeistä ja asennusvuosista ei ole tarkkaa yksilöivää tietoa olemassa. Lämpökutisteita on kuitenkin asennettu vuodesta 1990- eteenpäin. Suurin osa päätevi-  
oista on tapahtunut 20 kV verkossa. Samalla tavalla kuin kaapelijatkoilla suuri osa ta-  
pahtuneista päätevioista on tapahtunut alle 5 vuotta käytössä olleissa pääteissä. Tästä  
voidaan päätellä, että kyseessä on usein ollut virhe asennuksessa. Taulukossa 5 on esi-  
tetty kaapelipääteviat vuosien 2009–2013 välillä.

**Taulukko 5 Helen Sähköverkko Oyn keskijännitekaapeliviit vuosina 2009-2013**

Pääte	2009	2010	2011	2012	2013	Yhteensä
kj-pääte	1	6	5	1	3	16

## 10.5 Kunnonvalvonnan mittaukset Helen Sähköverkko Oyssä

Helen Sähköverkko Oy on mittauttanut noin 15 % eli noin 250 km keskijännitteistä ja-  
keluverkkoaan vuosien 2004–2014 välisenä aikana. Mittaukset ovat olleet alkuvaiheessa  
osa Aalto Yliopiston tutkimushankkeita. Myöhemmässä vaiheessa mittauksia on tehty  
kaupallisen tarjoajan toimesta. Mittauksia on tehty kahdesta eri syystä. Uusien laajem-  
pien sähköasemahankkeiden yhteydessä on mitattu uusia verkon osia käyttöpaikkamit-  
taus tarkoituksessa, jolloin uudelle käyttöön otetulle kaapelireitille on saatu tehtyä asen-  
nuslaatuvarmentava mittaus ja vertailumittaus myöhemmin tehtäviä mittauksia varten.  
Tämän lisäksi on tehty mittauksia kaapeliyhteyksien kunnonvalvontamielessä. Käyttö-  
paikkamittauksissa on havaittu joitain purkauskeskittymiä uusissa asennetuissa verkko-  
komponenteissa. Purkauksia sisältävät verkkokomponentit on vaihdettu uusiin ja uusin-  
tamittaukset on tehty asennuslaadun ja vaihtotyön onnistumisen varmistamiseksi. Ver-  
kon kunnonvalvonta mittauksissa on havaittu myös verkossa purkauskeskittymiä. Pur-  
kauksia sisältävät verkko-osat on vaihdettu samalla tavalla kuin uusissa kohteissa. Tau-  
lukosta 6 on esitettyä vuonna 2012 tehdyissä varmennusmittauksissa havaitut puutteet  
kaapelivarusteissa.

**Taulukko 6 Vuoden 2012 varmennusmittauksissa havaitut viat kaapelivarusteissa.**

Jatkot ja sekajatkot(PD-mittausten takia poistetut)	AHXAMK-W	Sekajatkot
Kokonaisuus (jatkot* vaiheet*tutkitut ominaisuudet)		
Jatkojen lukumäärä (kaikki vaiheet)	24 kpl	15 kpl
Lämmitys päältä	24 %	6 %
Lämmitys alta	22 %	7 %
Keltainen massa	0 %	0 %
Kaapelin käsittely	16 %	27 %
Päällivaippa	0 %	7 %
Puna- musta kutiste	24 %	13 %
Kentänohjaus	0 %	0 %
Kirkas letku	0 %	27 %
Liitin	0 %	0 %
Muu virhe	14 %	13 %

Mittaustekniikan kehittyminen ja uusien vartenotettavien mittaustekniikoiden kehittyminen on mahdollistamassa nykyisten tapauskohtaisesti käytettyjen mittausten menetelmien ottamisen jokapäiväiseen käyttöön. Helen Sähköverkko Oy:ssä ollaan suunnitelmallisesti ottamassa käyttökeskeytyksen vaativat osittaispurkausmittaukset osaksi verkon jokapäiväistä rakennustoimintaa. Uusista tai vasta kaupallisiksi muodostuneista kunnonvalvonnan tekniikoista käytönaikainen osittaispurkausmittaus on menetelmistä vartenotettavien vaihtoehto, kuten kappaleen 9 johtopäätöksistä käy ilmi.



## 11 Kunnonvalvontaa tarvitsevat kaapeliyhteydet

Kuten edellisessä luvussa mainittiin noudattaa kaapeliyhteyden vaurioiden todennäköisyys kuvassa 34 esitettyä U-muotoista käyrää, jossa heti asennuksen jälkeen ja voimakkaasti ikääntyneet komponentit ovat todennäköisimpiä vikapaikkoja. Asennuksen jälkeen suurimmat vikaantumiseen johtaneet syyt ovat kaapelin vioittaminen kuljetuksen aikana ja kaapelin tai kaapelivarusteiden asennusvirheet. Kaapeliyhteyden ikääntyessä on vaikeampi sanoa, onko vikaantuminen johtunut puhtaasti kaapeliyhteyden komponenttien ikääntymisestä vai ulkoisista vaikutteista. Kaapeliyhteyteen vaikuttaa sen elinajan aikana useita ulkoisia ja sisäisiä eristeen kuntoa heikentäviä syitä. Osittaispurkauksia voidaan kuitenkin pitää osoituksena heikenneestä eristeestä ja kaapeliyhteyden todennäköisemmästä vioittumisesta ennen aikaisesti.

Käytönaikaisilla jatkuvilla tai pitkillä määräaikaisilla mittauksilla pystytään seuraamaan kaapeliyhteyden kunnan heikkenemisen trendiä ja näin ollen poistamaan mahdollinen vikapaikka ennen vikaantumista tai toisaalta suuntaamaan verkkoyhtiön verkkoinvestoinnit vanhenneeseen verkon osaan. Osittaispurkausten paikallistaminen on yksi parhaista ominaisuuksista, joita verkon analysoiva käytönaikainen osittaispurkausmittaus voi tarjota [45. s.72]. Jatkuvilla tai toistuvilla tarpeeksi tiheillä määrävälein tehtävillä käytönaikaisilla osittaispurkausmittauksilla voidaan lisätä verkon käyttövarmuutta ja saada tietoa verkon kunnosta.

Helen Sähköverkko Oyn keskijänniteverkossa vikatiheys on ollut jo pitkään nykyrakenteella niin matala, että kattavaa lähtökohtaista vikastatistiikkaa ei Helsingissä pystytty tekemään. Toisaalta taas vikaherkemmistä PLKJ ja PYLKVJ tyyppiset kaapelit ovat elinkaarensa loppupäässä ja niitä pyritään poistamaan verkosta verkkoinvestointeja kohdentamalla, joten näiden mittaaminen vikaherkyyden takia ei ole perusteltua. Täten mittaukset kannattaa kohdistaa verkon keskeytyskriittisiin tai muuten tärkeisiin verkon osiin.

### **11.1 Käytönaikaisen osittaispurkausmittauslaitteiston rahallisen hyödyn määrittäminen**

Käytönaikaisen osittaispurkausmittauslaitteiston rahallinen hyöty voidaan määrittää erilaisin tavoin. Yhtenä sähköverkkoyhtiöissä yleisesti käytettynä menetelmänä voidaan pitää asiakkaiden kokeman keskimääräisen keskeytysajan lyhentämistä ja samalla pienentää toimittamatta jääneen energian määrää. Parhaassa tapauksessa mittauslaitteistolla voidaan havaita ennakkoon syntyvässä olevat keskeytyksen aiheuttavat viat ja poistaa vikakohta verkosta ennen aikaisesti. Asiakkaan kokema haitta voidaan arvioida määrittämällä haitan rahallinen arvo, KAH-kustannus.

Jakeluverkkoyhtiön tärkein asiakaspalvelu on sähköenergian toimittaminen asiakkaille. Näin tarkasteltuna KAH-kustannus on keskeinen määritettäessä osittaispurkausmittauksilla saatavaa hyötyä.



### 11.1.1 KAH-kustannusten määrittäminen

Keskimäärin Helen Sähköverkko Oyn keskijänniteverkon johtolähdöllä vikaantuminen tapahtuu kaavan 11.2 mukaan joka 30 vuosi. Määritettäessä vikaantumistaajuutta on käytetty hyväksi seuraavia lähtötietoja:

- Helen sähköverkko Oyn vikatilastojen mukaan rakennevika on ollut vikaantumiseen johtavana syynä viimeisen viiden vuoden keskiarvona määriteltynä 40 % ssa keskijänniteverkon vioista. Tästä on saatu vikaantumistiheydelle kerroin 0,4 [47].
- Johtolähtöjen kokonaismäärä on 476 ja keskijänniteverkon vikoja on keskimäärin 41 kappaletta vuodessa.

$$T_{vika} = \frac{1}{\lambda} \times \frac{\text{Johtolähtöjen kokonaismäärä}}{\text{Keskimääräinen vikamäärä}}, \text{ jossa} \quad (11.2)$$

$$\lambda = 0,4.$$

Laskennassa on käytetty edellä mainittujen tietojen lisäksi olettamusta, että keskimääräinen viankesto-aika tippuu 30 minuuttiin. 30 minuutin keskimääräisen häiriön selvitysaikaan on päädytty seuraavien olettamusten pohjalta:

- Helen Sähköverkko Oyn keskijänniteverkosta osa on käyttöjännitteeltään 10 kV verkkoa, jota voidaan maasulkutilanteessa käyttää 2 h ilman asiakkaille näkyvää keskeytystä.
- 20 kV keskijänniteverkkoon lisätään suunnitelmallisesti maasulkuvirran kompensointilaitteistoja, jolloin verkko voidaan käyttää 10 kV maastaserotetun verkon tapaan 2 h maasulussa.
- Muuntamoautomaation lisääminen tulee lyhentämään häiriöiden keskimääräistä kesto-aikaa.

Näin ollen johtolähdön KAH-kustannus on pystytty määrittelemään käyttäen kaavaa 11.1.

$$KAH_{\text{johtolähti}} = (K_e \times P_j \times T_{T-SAIDI} + K_p \times P_j), \text{ missä} \quad (11.1)$$

$$KAH_{\text{johtolähti}} = \text{Johtolähdön KAH-kustannus,}$$

$$K_e = \text{Energian KAH-kustannusparametri (€kWh),}$$

$$K_p = \text{Tehon KAH-kustannusparametri (€kW),}$$

$$P_j = \text{Johtolähdön j kokonaisteho,}$$

$$T_k = \text{Arvio tulevaisuuden häiriön selvitysaikasta (h).}$$

KAH- kustannukset on määritelty niin, että keskijänniteverkko on rakennettu renkaaseen, jolloin vioittunut johtoväli saadaan kokonaan erotettua erottimien avulla. Taulukossa 7 on esitetty 37 suurimman KAH-kustannuksen omaavaa keskijännite sähköasemajohtolähtöä.

Keskeytyksestä aiheutuneen haitan kustannus vaihtelee asiakasryhmittäin, keskeytyspi-tuuden ja ajankohdan mukaan. Lyhyet keskeytykset ovat usein haitattomampia kuin pit-kät, kuitenkin joillain asiakasryhmillä myös lyhyiden keskeytysten aiheuttama haitta on merkittävä. Erityisesti palvelu- ja teollisuusaloilla myös lyhyiden katkojen haitat olivat suuria. Keskeytyksen ajankohdalla on myös vaikutusta. Yleisesti työajan ulkopuolella haitan on koettu olevan vähäisempää kuin työajalla. [29.s.67,82]

Sähkönjakelun kannalta Helsingissä kriittiset asiakkaat ovat keskittyneet tietyille alueil-le, kuten ydinkeskustan palvelualue sekä läntiset ja itäiset teollisuus- ja palvelualueet. Näillä alueilla sähkönjakelun kriittisyys saa korostuneita piirteitä ja verkkoyhtiön kan-nattaakin panostaa näillä alueilla keskeytysajan lyhentämiseen tai ennaltaehkäisyyn.

Voidaan siis todeta, että vikojen ennaltaehkäisystä on eniten hyötyä alueilla, joilla asia-kasryhmät tai asiakkaat kokevat myös lyhyet katkot haitallisiksi. Kaapelireitti tai johto-lähtökohtaista vikaantumistiheyttä ei ole käytetty määriteltäessä keskeytyskriittisiä joh-tolähtöjä, koska Helen sähköverkko Oyn keskijänniteverkon vikamäärät ovat niin matalat, että luotettavaa tilastoa ei ole pystytty tekemään.

**Taulukko 3 Suurimmat KAH-kustannukset sähköasemalähdöillä**

	KJ-lähtö	30 min keskeytysaika	KJ-lähtö2	30 min keskeytysaika3
1	KtE21	103 000,12 €	20 TöE05	58 845,76 €
2	SaE22	92 560,10 €	21 PsD04	57 178,23 €
3	KmE34	87 481,23 €	22 SaE10	53 912,96 €
4	KiK14	86 953,84 €	23 KiK50	52 988,56 €
5	MIE21	85 681,34 €	24 KrE24	51 258,39 €
6	PmPD132	78 560,94 €	25 PvE27	51 048,18 €
7	PsD15	78 441,69 €	26 PsD05	50 873,36 €
8	KtE30	78 233,26 €	27 VIE13	50 176,65 €
9	KtE40	71 180,08 €	28 SaE24	49 745,60 €
10	PsD23	69 736,81 €	29 KtE22	48 502,30 €
11	PmED204	69 531,64 €	30 SuE12	47 203,57 €
12	KiK15	67 356,95 €	31 VIE36	46 168,48 €
13	VIE14	65 001,11 €	32 KnD22	44 697,49 €
14	KtE47	63 496,43 €	33 PmED213	44 525,15 €
15	KrE19	62 435,30 €	34 SuE13	43 951,16 €
16	KrE03	61 751,43 €	35 KiK13	43 919,68 €
17	MIE27	60 693,25 €	36 VmD09	43 663,70 €
18	KmE36	59 199,28 €	37 KtE37	42 667,20 €
19	KrE38	58 945,68 €		

## 11.2 Käytönaikaisista osittaispurkausmittauksista saatava hyöty omaisuudenhallinnassa

Verkon käytönaikaisesta osittaispurkausmittauksesta ja keskeytyksen aiheuttamien verkkovikojen ehkäisystä voidaan omaisuudenhallinnalle tulevaa rahallista hyötyä arvioida vertaamalla mittauslaitteiston pitoajankustannuksia keskimääräiseen yksittäisen keskijännitejohtolähdön vikaantumisaikaan 30 vuotta.

Kustannuslaskennassa on käytetty eräältä laitetoimittajalta saatuja alustavia hintoja yhdelle mittauslaitteistolle.

Mittauslaitteiston hankintahinta on 16 000 € vuosittaiset käyttökustannukset 1 200 € ja korkokanta 5 %. Investoinnin kustannuksia voidaan verrata saatuun hyötyyn, jos vikaantumisen voidaan havaita ajoissa ja vika korjata ilman vikakeskeytystä. Investoinnin kustannukset voidaan laskea käyttäen kaavaa 11.3.

$$K_x = \sum_{t=1}^n \frac{K_t}{(1+i)^t}, \text{ missä} \quad (11.3)$$

$K_x$  = vuosittain syntyneet kokonaiskustannukset diskontattuna nykyarvoon,

$K_t$  = vuosikustannus,

$i$  = korkokanta,

$n$  = aika.

Kokonaiskustannukset kolmeltakymmeneltä vuodelta on nähtävissä taulukosta 8. Kustannuksissa on huomioitu palveluntarjoajan vuosihinta ja laitteiston ylläpidosta Helen Sähköverkko Oy:lle aiheutuvat kustannukset.

Taulukko 4 Kokonaiskustannukset 30 vuoden pitoajalla

Vuosi	Kustannuslaji	€	Vuosi	Kustannuslaji	€
0	Hankintahinta	16 000,00 €	15	Vuosikustannus	779,25 €
0	Aloituskustannukset	1 620,00 €	16	Vuosikustannus	742,14 €
1	Vuosikustannus	1 542,86 €	17	Vuosikustannus	706,80 €
2	Vuosikustannus	1 469,39 €	18	Vuosikustannus	673,14 €
3	Vuosikustannus	1 399,42 €	19	Vuosikustannus	641,09 €
4	Vuosikustannus	1 332,78 €	20	Vuosikustannus	610,56 €
5	Vuosikustannus	1 269,31 €	21	Vuosikustannus	581,49 €
6	Vuosikustannus	1 208,87 €	22	Vuosikustannus	553,80 €
7	Vuosikustannus	1 151,30 €	23	Vuosikustannus	527,43 €
8	Vuosikustannus	1 096,48 €	24	Vuosikustannus	502,31 €
9	Vuosikustannus	1 044,27 €	25	Vuosikustannus	478,39 €
10	Vuosikustannus	994,54 €	26	Vuosikustannus	455,61 €
11	Vuosikustannus	947,18 €	27	Vuosikustannus	433,91 €
12	Vuosikustannus	902,08 €	28	Vuosikustannus	413,25 €
13	Vuosikustannus	859,12 €	29	Vuosikustannus	393,57 €
14	Vuosikustannus	818,21 €	30	Vuosikustannus	374,83 €
			<b>Yhteensä</b>		<b>42 523,37 €</b>

Luvussa 11.1 lasketun keskijännitejohtolähdön KAH-kustannuksen mukaisesti tarkasteltuna Helen Sähköverkko Oyn suurin KAH-kustannus on 103 000 € Näin tarkasteltuna olisi kannattavaa mitata kaiken kaikkiaan 37 keskijännitejohtolähtöä. Mittaus asettaa kuitenkin joitain reunaehtoja toteutuakseen: johtolähdön kaapelipituuden on oltava alle 4 km, muuntamoiden keskijännitekojeistot eivät saa olla haarallisia tai haarautuva johtolähtö on erotettava. Kuitenkin Suurimman KAH-kustannuksen omaavat johtolähdöt olisi kannattavaa varustaa mittauksella. Edellä mainittuihin reunaehtoihin kannattaa kiinnittää huomiota, mikäli investointihanke etenee jatkossa.

## 12 Johtopäätökset

Tässä diplomityössä selvitettiin erilaisia menetelmiä ennakoivan kunnonvalvonnan toteuttamiseksi Helen Sähköverkko Oy:ssä, ja laskettiin kannattavuuslaskentaa jatkuva-aikaisen osittaispurkausmittauksen toteuttamiselle. Mittauksista saatavaa hyötyä pyrittiin selvittämään arvioimalla keskeytyshaitan vähenemistä, kun keskijänniteverkossa esiintyviä vikoja voidaan havaita ennalta ja näin ollen asiakkaiden kokemaa keskeytyshaittaa pystytään ennaltaehkäisemään. Tarkoituksena on ollut esitellä useampia eri tekniikoita, joita tällä hetkellä on markkinoilla tai tulossa markkinoille sekä tutkia niiden soveltuvuutta jakeluverkon kunnonhallintaan. Yhteistä näille kaikille menetelmille on, että niiden avulla voidaan parantaa verkon käyttövarmuutta ja investointien oikea-aikaisuutta. Näkemystä nykyisistä mahdollisuuksista on pyritty kartoittamaan tutkimalla maailmalla kirjoitettuja tutkimusraportteja ja käytettyjä kaupallisia toteutuksia.

Kaapeliverkon ikääntyminen ja sen käytönaikana kokemat sisäiset ja ulkopuoliset rasitukset nopeuttavat kaapelieristeen vanhenemista. Aikaisemmin ei ole ollut hyviä ja kustannustehokkaita menetelmiä kaapeliverkon kunnon määrittämiseksi. Aikaisemmin verkon kuntoa on tutkittu eristysvastusmittauksilla ja jänniterasitustesteillä. Nykyään markkinoilla on jo useita eri tekniikoihin perustuvia mittausmenetelmiä, joista voidaan mainita ainakin  $\tan\delta$ - eli häviökerroinmittaukset, vaipaneheysmittaukset ja online tai offline tekniikkaan perustuvat osittaispurkausmittaukset. Kaikissa edellä mainituissa tekniikoissa on omat hyvät puolensa ja sovelluttamisalueensa.  $\tan\delta$ -mittaukset soveltuvat erityisen hyvin vanhoille öljypaperieristeisille kaapeleille tai muovieristeisten kaapeleiden vesipuiden havaitsemiseen. Sen huonona puolena voidaan pitää, että tarkka vika- paikka jää havaitsematta ja kaapelista saadaan esille vain yleinen kunto. Vaipaneheysmittaus soveltuu kaapelikunnon mittaukseen uusissa asennuksissa, joissa on asennuksen aikana kasvanut riski kaapelivaipan vahingoittumiselle, kuten kaapelia auratessa. Osittaispurkausmittaukset ovat tällä hetkellä kenties eniten verkon kuntoa diagnosoiva mitaustapa. Verkon kunnosta saadaan yksityiskohtaista paikkatietoon sidottua kuntotietoa.

Jo aikaisemmin tehdyissä tutkielmissa on käyttökeskeytyksen vaativat osittaispurkausmittausmenetelmät todettu toimiviksi kaapeleiden kunnon määrittämiseen. Käytönaikaisilla osittaispurkausmittauksilla voidaan verkon tilaa ja kuntoa analysoida jatkuva-aikaisesti. Tarpeeksi kattava mittauslaitteistojen käyttäminen mahdollistaa verkon kunnossapidon tai investointien kohdentamisen kaapeliosuuksille, joissa verkon kunto on merkittävästi heikentynyt. Mittaamalla kaapeliverkon kuntoa voidaan saada selville kaapeleiden kunnon huononeminen hyvissä ajoin ennen kuin varsinainen vikaantuminen tapahtuu. Käyttökeskeytyksen vaativa osittaispurkausmittaus on taas suositeltava mitaustapa otettavaksi osaksi verkon käyttöönottoprosessia ja sen aikana tehtäviä käyttöönottomittauksia. Uusien verkonosien mittauksilla saadaan tietoa uusien asennusten laadusta.

Tekniikan kehittyminen ja siitä seuraava kustannusten lasku ja tulosten tulkintaosaamisen paraneminen puoltavat käytönaikaisen osittaispurkausmittaustekniikan käyttöönottamista. Alkuvaiheessa mittauslaitteistojen sijoittelussa kannattaa keskittyä mittaamaan kriittisiä johtolähtöjä, joissa sähkönjakelun keskeytymisen aiheuttamat haitat ovat merkittävimmät. Tässä työssä tutkittiin käytönaikaisten osittaispurkausmittauslaitteistojen asentamisen kannattavuutta asiakastiheydeltään korkeassa kaupunkiverkossa. Kannatta-

vuotta arvioitiin asiakasryhmien kokeman keskeytyshaittaan ja vikaantumisen todennäköisyyteen pohjautuen. Asiakasryhmäkohtainen keskeytyksestä aiheutunut haitta määriteltiin sähköasemalähtökohtaisesti. Kustannuslaskenta tehtiin käyttäen hyödyksi keskimääräistä vikaantumisen todennäköisyyttä ja siitä johdettua enimmäispitoaika, jonka aikana pystytään asiakashaitta ehkäisemään. Tulokset osoittavat, että edellä mainituilla olettamuksilla verkon analysoivat mittaukset ovat kannattavia ainakin osassa kaupunkiverkkoja. Tulevaisuudessa voidaan olettaa, että kaupunkiverkkojen energiatiheys kasvaa ja asiakkaiden kokema keskeytyksistä aiheutunut haitta kasvaa myös. Samaan aikaan voidaan olettaa mittaustekniikoiden kehittyvän ja hankittavien mittalaitteiden halpenevan. Näin ollen kaapeleiden käytönaikainen kunnonvalvonta tulee eittämättä olemaan tulevaisuudessa merkittävä osa kunnonvalvontaa. Samalla kunnonvalvonnan osuus investointeja ohjaavana tekijänä kasvaa ja verkkoinvestoinneista pystytään hyödyntämään suurempi osa, kun verkon käyttövarma elinikä voidaan tulevaisuudessa hyödyntää paremmin.

Vielä on kuitenkin avoinna joitain kysymyksiä osittaispurkaustekniikan käytössä, joihin tulevaisuudessa tulisi panostaa. Mitä tietoja mittauksista tulisi tallentaa ja mihin tiedot tulisi tallentaa? Miten ja kuinka nopeasti havaitut osittaispurkaukset kehittyvät ja mikä on odotettavissa oleva käyttövarma elinikä osittaispurkauksia sisältävissä verkon osissa? Tulevaisuudessa, kun edellä mainittuihin kysymyksiin saadaan vastauksia, on verkkoyhtiöillä käytettävissä tehokkaita työkaluja omaisuuden hallintaan.

## Lähteet

- [1] Helen konsernin verkkodokumentti. <http://www.helen.fi/vuosi2010/index>. Viitattu 20.3.2013
- [2] Helen konsernin organisaatio, verkkodokumentti. <http://www.helen.fi/yritys/organisaatio>. Viitattu: 20.3.2013.
- [3] Helen Sähköverkko Oy:n intranetsivut. [http://intra/hsv/yritystietoa/hsv\\_asiakirjat\\_organisaatio/forms/allitems.aspx](http://intra/hsv/yritystietoa/hsv_asiakirjat_organisaatio/forms/allitems.aspx). Viitattu 20.3.2013
- [4] Energiateollisuuden verkkodokumentti. [www.energia.fi/fi/sahko/sahkontuotanto](http://www.energia.fi/fi/sahko/sahkontuotanto). Viitattu 20.3.2013
- [5] Fingrid Oyj verkkodokumentti. [http://www.fingrid.fi/portal/suomeksi/yritysinfo/suomen\\_sahkojarjestelma/](http://www.fingrid.fi/portal/suomeksi/yritysinfo/suomen_sahkojarjestelma/). Viitattu 20.03.2013
- [6] Lakervi & Partanen, Sähkönjakelutekniikka, Otatieto 2009
- [7] Elovaara & Haarla, Sähköverkot I, Otatieto 2011
- [8] Elovaara & Haarla, Sähköverkot II, Otatieto 2011
- [9] Palva, Elovaara, Karttunen, Nousiainen & Palva, Suurjännitetekniikka, Otatieto 1996
- [10] Helen Sähköverkko Oy vikapaikkatietojen yhteenveto 2004 – 2010, Pakarinen 2010
- [11] Michel & Eastham, CIRE paper 0479 Improving the management of MV underground cable circuits using automated on-line cable partial discharge mapping, CIRE 2011
- [12] Hansen, CIRE paper 0767 Service experiences in Denmark with mixed medium voltage cable systems consisting of both XLPE and PILC cables technologies, CIRE 2011
- [13] Eastham, Smith & Chen, CIRE paper 1205 Detection and location of PD in MV cables in electrically noisy industrial environments, CIRE 2011
- [14] Gulski, prent, Cichecki, Pots, Vries & Smit, CIRE paper 0166 Modern methods of after-laying testing cables, CIRE 2011
- [15] Gerster, Borlinghaus & Goy, CIRE paper 1023 Integral cable condition assessment, CIRE 2011
- [16] Petzold & Böttcher, CIRE paper 0399 Evaluation of PD measurements on MV cable systems by means of a web database, CIRE 2011
- [17] Altamirano, Andrews, Begovig, del Valle, Harley, Mejia & Parker, Diagnostic testing of underground cable systems, NEETRAC 2010

- [18] Hyvönen, Keskijännitteisten maakaapelijärjestelmien osittaispurkausmittaukset käyttöpaikalla, Tekninen korkeakoulu 2003
- [19] Järventausta, Mäkinen, Kivikko, Sähköverkon kehittämisvelvoitteen arviointi käyttövarmuuden näkökulmasta, Tampereen tekninen korkeakoulu 2005
- [20] Loukkalahti, Keskijänniteverkon maasulkuvirran kompensointijärjestelmähankkeen toteuttaminen, Helen Sähköverkko Oy:n sisäiset dokumentit
- [21] Pakonen, TTYn ja HSVn yhteistyöpalaveriaineisto 6/2013
- [22] Jeroen Veen, On-line Signal Analysis of Partial Discharges in Medium-Voltage Power Cables, Eindhoven : Technische Universiteit Eindhoven, 2005
- [23] Häggman Sven-Gustav, S-72.1110 Signaalit ja järjestelmät TKK kurssimateriaali, TKK,2008
- [24] IEEE, IEEE Guide for partial Discharge Testing of Shielded Power Cable Systems in aField Enviroment, New York, 2006
- [25] Alsharif, Wallace, Hepburn and Zhou, FEM Modelling of electric field and potential Distributions of MV XLPE cables cantaining void defect, School of ENG&Computing Glasgow University, Scotland, UK., 2012
- [26] SlideShare AC Voltage Test System with Resonant Reactor, <http://www.slideshare.net/kennypowerhv/resonant-test-system>, viitattu 20.1.2014
- [27] Heine, Hämäläinen, Korhonen, Loukkalahti, Mikkola, Seitsonen, Sähkön laatu ja sen hallinta Helen Sähköverkko Oy:ssä 2012 (sisäinen dokumentti)
- [28] Keskeytystilastot 2012, Energiateollisuus Ry. 2012
- [29] Silvast, Heine, Lehtonen, Kivikko, Mäkinen, Järventausta, Sähkönjakelun keskeytyksistä aiheutuva haitta, Teknillinen korkeakoulu, Tampereen teknillinen yliopisto, 2005
- [30] Honkapuro, Tahvanainen, Viljakainen, Partanen, Mäkinen, Järventausta, Verho, Keskeytystunnuslukujen referenssiarvojen määrittäminen, Energiavirasto, 2007
- [31] Keskeytystilasto-ohje 2012, Energiateollisuus Ry.2012
- [32] Mulroy, Gilbert, Hurtado, CIRED paper 0714 Continous online monitoring of PD activity in the medium voltage distribution network, CIRED 2013
- [33] Wielen, Steennis, CIRED paper 0070 First field experience of on-line partial discharge monitoring of MV cable system with location, CIRED 2009
- [34] Gargari, Wouters, Wielen, Steennis, Practical experiences with on-line PD monitoring and interpretation for MV cable systems, International Conference on Solid Dielectrics Potsdam 2010
- [35] Ying He, Study and analysis of distribution equipment realibility data, Elforsk rapport 10:33, 2010

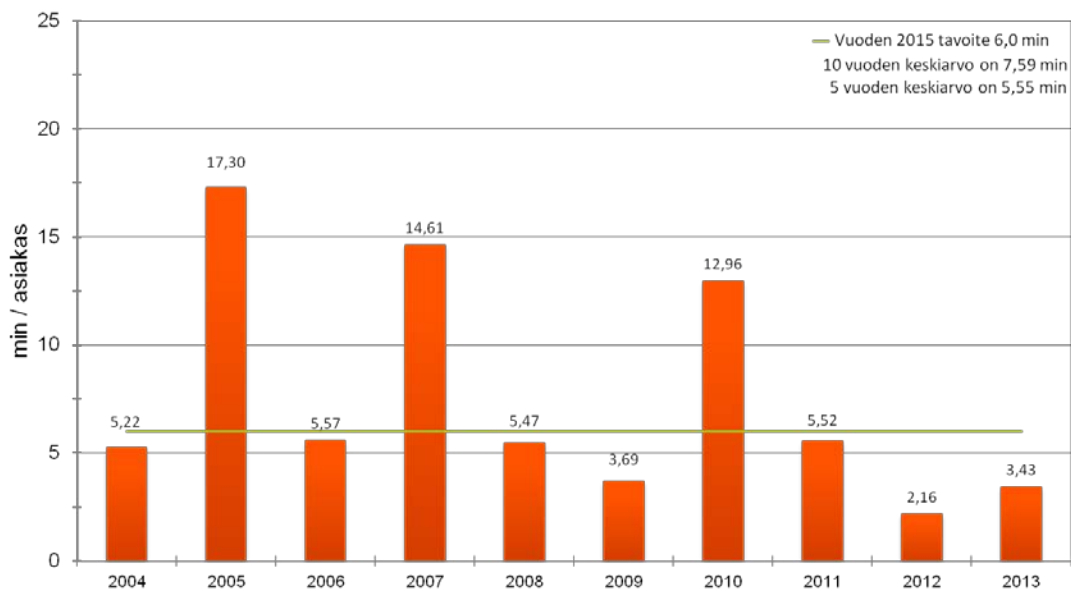


- [36] Opetushallitus verkkodokumentti [http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/perusteet\\_2-1\\_kunnossapidon\\_kasitteet\\_ja\\_maaritelmat.html](http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/perusteet_2-1_kunnossapidon_kasitteet_ja_maaritelmat.html), viitattu 12.01.2014
- [37] Willis H. Lee, Power Distribution Planning Reference Book 2<sup>nd</sup> edition, New York Mark Dekker,2004
- [38] Pakarinen Kirsi, Helen Sähköverkko Oy Häiriö yhteenveto 2013, Helen Sähköverkko Oyn sisäinen dokumentti, 2013
- [39] Kompo2010 verkkodokumentti <http://kompo2010.wikispaces.com/Maakaapeli>, viitattu 12.10.2013
- [40] Oy Nokia AB kaapelitehdas, Voimakaapelit luettelo n:o 3.18
- [41] Tyco Electronics, Raychem heat-shrinkable medium voltage terminations IXSU-F/OXSU-F, 2010
- [42] Honka Jukka, Sähköpostikeskustelut, 2014
- [43] Hyvärinen, Sähköverkon perusrakenne ja toimitusvarmuus 12.10.2006. Helen Sähköverkko Oy:n sisäiset dokumentit, 2006
- [44] Werelius, Development and Application of High Voltage Dielectric Spectroscopy for Diagnosis of Medium Voltage XLPE Cables,KTH Stockholm, 2001
- [45] Bergius, Implementation of on-line partial discharge measurements in medium voltage cable network, Mater of science Thesis Tampere University of Technology, 2011
- [46] Hyvärinen, Sähköverkon perusrakenne ja toimitusvarmuus, Helen Sähköverkko Oy:n sisäiset dokumentit, 2006
- [47] Pakarinen, Porkka, Vepsäläinen, Helen Sähköverkko Oy Häiriö dokumentit 2001-2014, Helen Sähköverkko Oyn sisäinen dokumentti, 2014
- [48] Verkkodokumentti,Petzold, Götz, Putter, Oetjen, Case studies of PD testing using VLF cosine rectangular waveform, SebaKMT,2012, [http://www.pesicc.org/iccwebsite/subcommittees/subcom\\_f/Presentations/2012Fall/CaseStudyofpdTesting.pdf](http://www.pesicc.org/iccwebsite/subcommittees/subcom_f/Presentations/2012Fall/CaseStudyofpdTesting.pdf), viitattu 12.03.2014

## LIITTEET

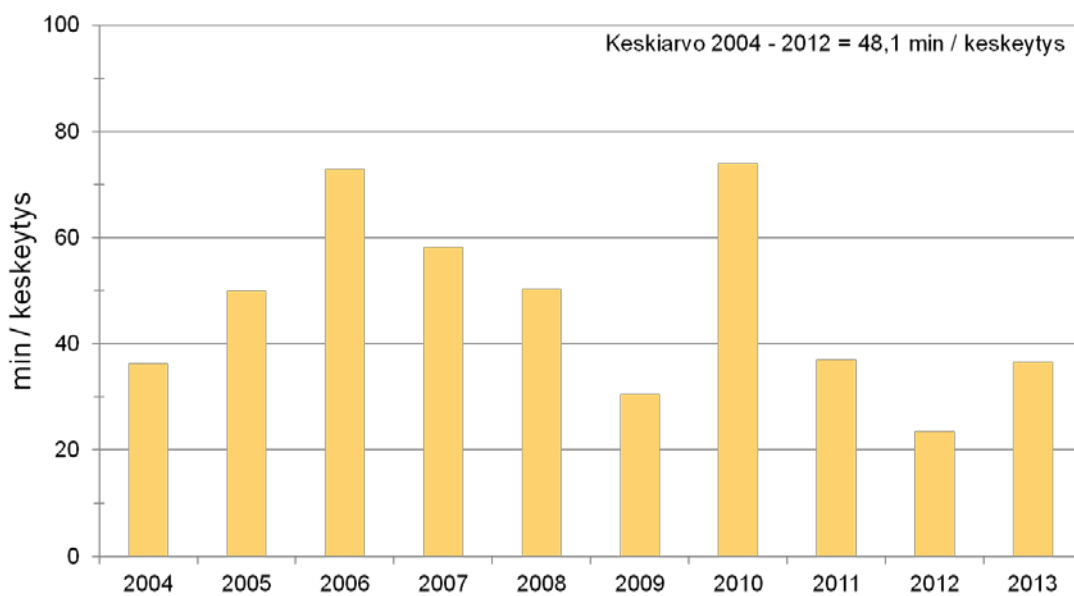
### LIITE 1 Helen Sähköverkko Oyn keskeytystilastot

#### T-Saidi<sub>ep</sub> vuosina 2004 - 2013



Kuva 1 Kj-keskeytysten T-Saidi 2004-2013

#### T -Caidi vuosina 2004 - 2013 (vain viat)



Kuva 2 Kj-keskeytysten T-Caidi 2004-2013