

Käyttöönottomittaukset tuulipuistoissa

Develo[®]
ENERGIA

Tampereen aikuiskoulutuskeskus
25.4.2025
Joonas Lahti

Osaamista tuulivoima-alan asennus- ja ylläpitotöihin



Joonas Lahti

Koulutus

- ✓ Sähkövoimatekniikan insinööri (Metropolia AMK ja Texas Tech University)
- ✓ Sähköasentaja

Työhistoria

- ✓ Develo Energia Oy 5/2023 – Nykyinen (Liiketoimintajohtaja ja osakas)
- ✓ Despro Engineering Oy 6/2022 – 5/2023 (Myyntijohtaja)
- ✓ Eurolaite Oy 5/2019 – 6/2022 (Myyntipäällikkö)
- ✓ Prysmian Group Oy 2/2011 – 5/2019 (Asentaja, Supervisor, Myyntipäällikkö)
- ✓ Novasähkö Oy 6/2008 – 2/2011 (Asentaja)

Muuta

- ✓ IEC Young Professional 2017
- ✓ Cenelec TC20 ja Sesko SK20 standardointityöryhmien jäsen 2017 – 2019
- ✓ Ralos Oy 3/2019 – 8/2020 (omistaja ja hallituksen jäsen)
- ✓ SIL Sähköinsinöörit opiskelijaosaston PJ 2016 ja hallituksen varapuheenjohtaja 2019 – 2021



Palvelut

Develo[®]
ENERGIA

- Tuulivoima- ja sähkövarastoinfrapääurakointi
- Teollisen mittakaavan aurinkovoimaloiden toteutus "avaimet käteen" -periaatteella
- Älykkäät aurinkovoimalat, sähkövarastot ja sähköauton latausjärjestelmät yrityksille.

Develo[®]
KIINTEISTÖT

- Laadukkaiden asuinkerrostalojen ja toimitilojen kehittäjä, rakennuttaja ja omistaja
- Valmistuneet asunnot +1000 kpl
- Työnalla +100 kpl asuntoa
- Valmistuneet toimitilat +3500 m²
- Työnalla toimitiloja +20 000 m²



Sisältö

1. Lyhenteet ja termit
2. Lait, asetukset, standardit ja suositukset
3. Miksi mitataan?
4. Suositus mittauksista
5. Vaipaneheysmittaus
6. Osittaispurkausmittaukset
7. Häviökerroinmittaus
8. Maadoitusverkon mittaukset



Sisältö

- 1. Lyhenteet ja termit**
2. Lait, asetukset, standardit ja suositukset
3. Miksi mitataan?
4. Suositus mittauksista
5. Vaipaneheysmittaus
6. Osittaispurkausmittaukset
7. Häviökerroinmittaus
8. Maadoitusverkon mittaukset



Lyhenteet ja termit

U	3-vaiheisen kaapelijärjestelmän johtimien välinen nimellisjännite eli pääjännite.
U ₀	Kaapelijärjestelmänjohtimen ja maan potentiaalin välinen nimellisjännite.
U _m	Kaapelijärjestelmän suurin sallittu käyttöjännite.
kV	Kilovoltti. 1000 V.
A	Sähkövirran yksikkö ampeeri.
PJ	Pienjännite.
KJ	Keskijännite (tuulipuistoissa 20 ja 33 kV).
SJ	Suurjännite (tuulipuistoissa 110 ja 400 kV).
WTG	Wind Turbine Generator. Yksittäinen tuulivoimala tai -turbiini.
SLD	Single Line Diagram. Yksijohdinkaavio. Pääkaavio.
PD	Partial Discharge. Osittaispurkaus.
TD	Tan Delta. Häviökerroin.
SMF	Single Mode Fiber. Yksimuotokuitu.
MMF	Multi Mode Fiber. Monimuotokuitu.
CB	Cross-Bonding. Kosketussuojien vuorottelu.
SPB	Single Point Bonding. Avoin kosketussuojapiiri.
SB	Solid Bonding. Suljettu kosketussuojapiiri.
SVL	Sheath Voltage Limiter. Vaippajännitesuoja.
PDIV	Partial Discharge Inception Voltage. Purkauksien syttymisjännite.
PDEV	Partial Discharge Extinction Voltage. Purkauksien sammumisjännite.
pC	Pikocoulombi. Coulombi on SI-järjestelmän sähkövarauksen yksikkö.
XLPE	Cross-linked polyethylene. Ristisilloitettu polyeteeni (PEX).
TEV	Transient Earth Voltage. Transienttimaajännite.
HFCT	High Frequency Current Transformer. Korkeataajuus virtamuuntaja.
VLF	Very Low Frequency. Erittäin matala taajuus, 0,01 – 1 Hz (yleensä 0,1 Hz)
RMS	Root Mean Square. Neliöllinen keskiarvo.
U _{rms}	Jännitteen tehollinen arvo.
U _{peak}	Jännitteen huippuarvo.
MWT	Monitored Withstand Test. Monitoroitu jännitekoe (tyypillisesti VLF-jännitteellä).
SDTD	Tan δ stability. Tan δ stabiilius.
ΔTD	Delta Tan δ.
MTD	Mean Tan δ. Häviökertoimen keskiarvo.



Sisältö

1. Lyhenteet ja termit
- 2. Lait, asetukset, standardit ja suositukset**
3. Miksi mitataan?
4. Suositus mittauksista
5. Vaipaneheysmittaus
6. Osittaispurkausmittaukset
7. Häviökerroinmittaus
8. Maadoitusverkon mittaukset



Lait, asetukset, standardit

- ✓ Lait ja asetukset:
 - ✓ Sähköturvallisuuslaki 1135/2016
 - ✓ Valtioneuvoston asetus rakennustyön turvallisuudesta 205/2009
- ✓ Standardit, mm.:
 - ✓ SFS 6002 Sähköturvallisuus
 - ✓ SFS 6001 Suurjännitesähköasennukset
 - ✓ IEC 60229 Electric cables - Tests on extruded oversheaths with a special protective function
 - ✓ IEEE 400 IEEE Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems Rated 5 kV and Above
 - ✓ IEEE 400.2 IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF)(less than 1 Hz)
 - ✓ IEC 60270 High-voltage test techniques - Partial discharge measurements
 - ✓ IEC 60502-2 Cables for rated voltages from 6 kV ($U_m = 7,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV)
 - ✓ IEC 60060-3 High-voltage test techniques - Part 3: Definitions and requirements for on-site testing
 - ✓ HD 620 S2 Distribution cables with extruded insulation for rated voltages from 3,6/6 (7,2) kV up to and including 20,8/36 (42) kV
 - ✓ (HD 621 S1 Medium voltage impregnated paper insulated distribution cables)
- ✓ Suositukset, mm.:
 - ✓ RK1.16 Maakaapeliverkon rakentamisen vaatimukset 0,4 kV - 45 kV
 - ✓ RJ 22.22 Sähkönjakeluverkon maadoitusten suunnittelu, toteutus ja varmistaminen

Sähkölaitteet ja -laitteistot on suunniteltava, rakennettava, valmistettava ja korjattava niin sekä niitä on huollettava ja käytettävä käyttötarkoituksensa mukaisesti niin, että:
1) niistä ei aiheudu kenenkään hengelle, terveydelle tai omaisuudelle vaaraa...

14.3 Asentamisen ja käyttöönoton aikaiset testaukset
Tilaaaja ja toimittaja sopivat keskenään asentamisen ja käyttöönoton aikaisten testien vaatimuksista (menettelytavat ja hyväksymiskriteerit) sekä sovellettavista testausstandardeista.



Sisältö

1. Lyhenteet ja termit
2. Lait, asetukset, standardit ja suositukset
- 3. Miksi mitataan?**
4. Suositus mittauksista
5. Vaipaneheysmittaus
6. Osittaispurkausmittaukset
7. Häviökerroinmittaus
8. Maadoitusverkon mittaukset

Miksi mitataan?

Henkilöturvallisuus

- ✓ Vikaantuvat, väärin suunnitellut ja asennetut laitteet sekä materiaalit saattavat aiheuttaa vaaraa henkilöille.

Asennuksien laatu

- ✓ Asennuksia tehdään työmaalla haastavissa asennusolosuhteissa.
- ✓ Asentajan ammattitaidolla suuri merkitys.
- ✓ Merkittävät korjaus- ja tuotonmenetykset.

Materiaalien laatu

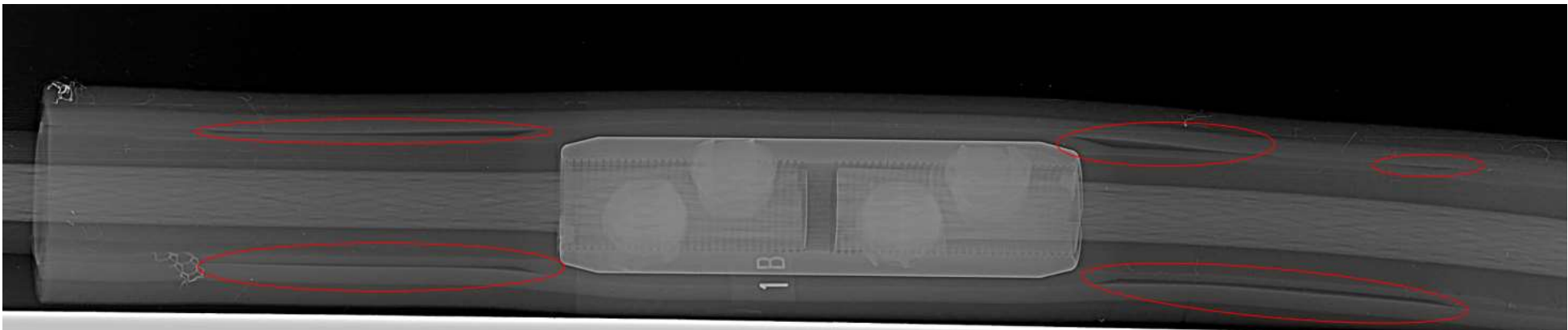
- ✓ Materiaalipoikkeamat saadaan poistettua verkosta ennen käyttöönottoa.
- ✓ Merkittävät korjaus- ja tuotonmenetykset.





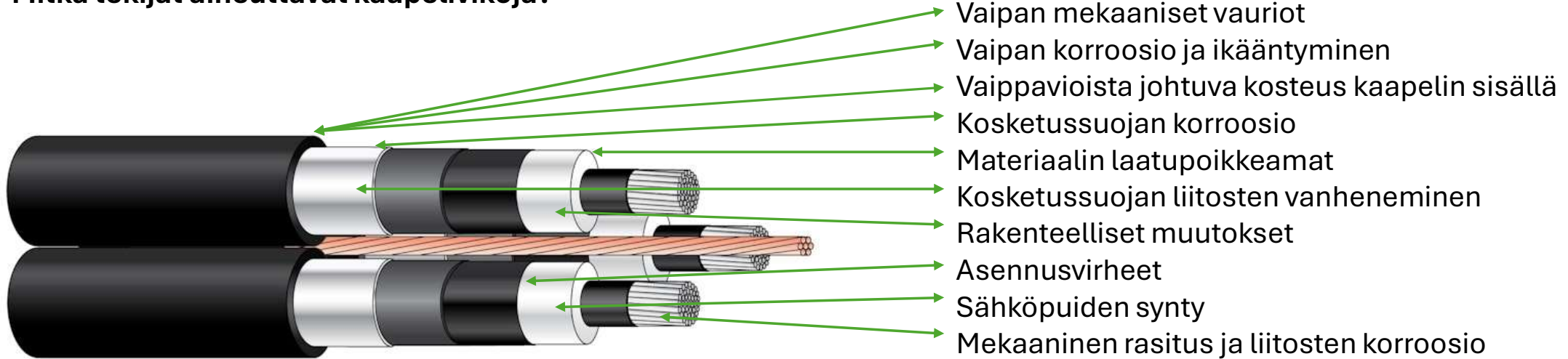
Miksi mitataan?

- Yhden kuukauden tilastoja **käyttöönottomittauksista** suomalaisista tuulipuistoista:
 - Mitatut kaapelit 117 kpl, joiden yhteispituus 180 km.
 - Korjausta vaativia vikoja 43 kpl.
- 1 vika per 3 kaapelia!
→ 1 vika per 4 km kaapelia!
→ Yksittäisen vian aiheuttama suunnittelematon keskeytys saattaa aiheuttaa jopa satojen tuhansien eurojen tuotonmenetykset.

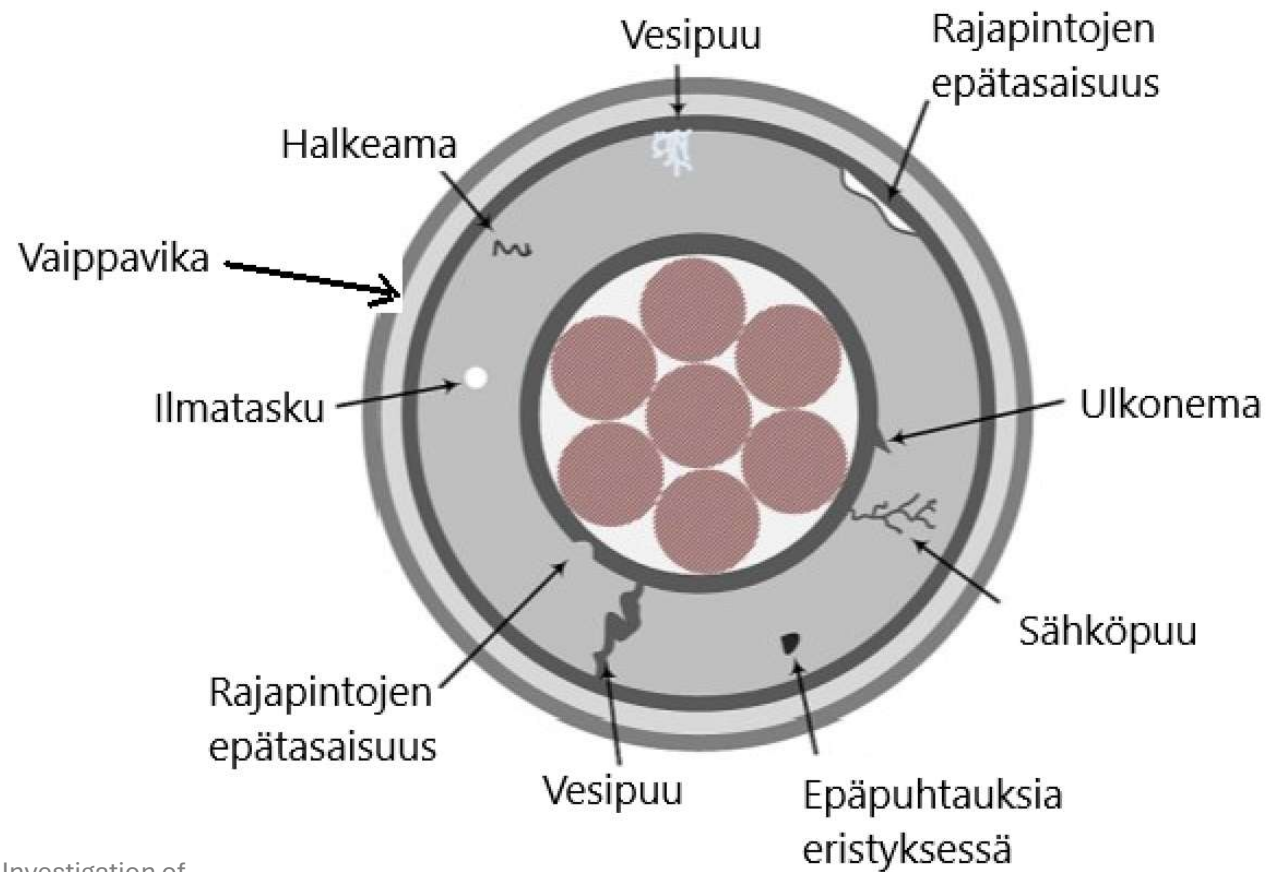


Miksi mitataan?

Mitkä tekijät aiheuttavat kaapelivikoja?



Miksi mitataan? Vikaantumisten syitä:





Miksi mitataan?

Muut kaapelivikojen aiheuttajat:

- ✓ Transienttiylijännitteet (kytkentä- ja ilmastolliset ylijännitteet)
- ✓ Puutteellinen kaapelin kiinnitys ja suojaus
- ✓ Johdineristeen vanheneminen
- ✓ Ylikuormitus
- ✓ Ulkopuoliset vahingoittamiset (tahalliset ja tahattomat)
- ✓ Liian pieni taivutussäde



Sisältö

1. Lyhenteet ja termit
2. Lait, asetukset, standardit ja suositukset
3. Miksi mitataan?
- 4. Suositus mittauksista**
5. Vaipaneheysmittaus
6. Osittaispurkausmittaukset
7. Häviökerroinmittaus
8. Maadoitusverkon mittaukset



Suositus - keskijännitekaapeliverkon käyttöönotto- sekä takuunpäättymis- ja kunnossapitomittauksiin

- ✓ Eri standardien vaatimukset vaihtelevat paljon.
- ✓ Verkonhaltijan vaatimukset huomioitava.
- ✓ Korkeiden tasajännitteiden (DC) käyttö kaapelin johdineristeen mittaamiseen ei ole sallittua (enään).
- ✓ VLF-jännitekoe on monessa standardissa suosittu testi, mutta se ei kerro kaapelijärjestelmän kunnosta muuta kuin sen, että kestääkö se testin ajan testijännitettä. Se saattaa vanhentaa kaapelijärjestelmää. Siksi olisi suositeltavaa suorittaa VLF-jännitekoe aina MWT:n (Monitored Withstand Test) kanssa, jolloin monitoroidaan PD:tä ja TD:tä ja saadaan tarkka kuva kaapelin kunnosta.

2.3 Testing and diagnostics according to standards

Medium-Voltage Cables 6 – 69 kV				
	IEC 60502-2 2014	CENELEC HD 620 – 1996	IEEE 400.2-2013	Example Utility Standard
Commissioning testing	3 x U ₀ 15 min ▪ VLF 0.1 Hz ▪ ACRT 15 min, 20-300 Hz ▪ No-load test, 24 h, 1.0 U ₀ 50/60 Hz ▪ TD/PD recommended ▪ 4 x U ₀ , 15 min, DC	2.0 x U ₀ 60 min ▪ 45-60 Hz 3 x U ₀ 60 min ▪ VLF 0.1 Hz Oversheath testing	Testing 2.2 – 2.8 U ₀ 15 – 60 min ▪ VLF ▪ VLF MWT (TD/PD) Diagnostics max. 2.0 U ₀ ▪ VLF TD ▪ VLF PD	Testing 3 x U ₀ 30/60 min ▪ VLF 0.1 Hz 3 x U ₀ 5 min ▪ VLF + PD
Maintenance testing			Testing 1.8 – 2.2 15 – 60 min ▪ VLF ▪ VLF MWT Diagnostics Max. 1.5 U ₀ ▪ VLF TD ▪ VLF PD	Testing 3 x U ₀ 10 min VLF 0.1 Hz Diagnostics Max. 2.0 U ₀ ▪ VLF TD ▪ VLF PD

Suositus - keskijännitekaapeliverkon käyttöönottomittaukset

1. Vaipaneheysmittaus
2. Osittaispurkausmittaus (offline)
3. Häviökerroinmittaus
4. Maadoitusten jatkuvuuden mittaus

Näillä mittauksilla varmistetaan:

- ✓ Järjestelmän turvallisuudesta
- ✓ Asennuksen laadusta
- ✓ Materiaalien laadusta

→ Saadaan referenssitulokset kaapelijärjestelmästä.



Suositus - keskijännitekaapeliverkon takuunpäättymis- ja kunnossapitomittaukset

1. Vaipaneheysmittaus
2. Osittaispurkausmittaus (offline tai online)
3. Häviökerroinmittaus
4. Maadoitusten jatkuvuuden mittaus

Näillä mittauksilla varmistetaan:

- ✓ Järjestelmän turvallisuudesta
- ✓ Kaapelijärjestelmän kunnosta (normaalista vanhenemisesta).

→ Uusintamittaus tarvittaessa riippuen kaapelijärjestelmän kunnosta.



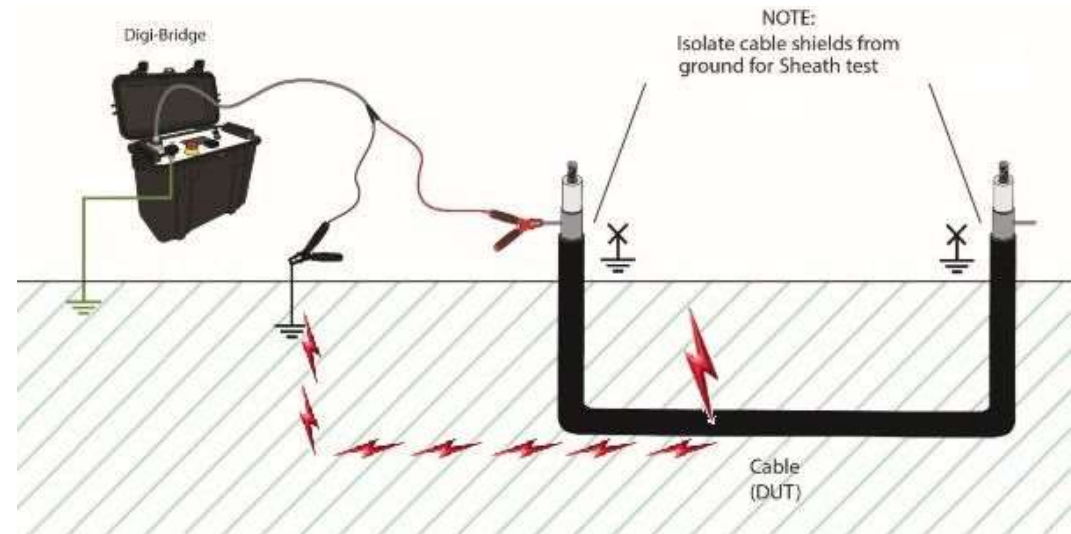


Sisältö

1. Lyhenteet ja termit
2. Lait, asetukset, standardit ja suositukset
3. Miksi mitataan?
4. Suositus mittauksista
- 5. Vaipaneheysmittaus**
6. Osittaispurkausmittaukset
7. Häviökerroinmittaus
8. Maadoitusverkon mittaukset

Vaipaneheysmittaus

- ✓ Vaipaneheysmittauksella varmistetaan, että kaapelin asennuksessa ei ole syntynyt mekaanisia vaurioita tai muita poikkeamia kaapelin ulkovaippaan (myös kaapelivarusteet), jotka saattaisivat vaikuttaa myöhemmin tehtävien mittauksien, kuten esimerkiksi osittaispurkaus- ja häviökerroinmittauksien tuloksiin. Lisäksi alkava vaippavika saattaa aiheuttaa sähkönjakelun/ -siirron keskeytyksen ajan kuluessa.
- ✓ Mittaus toteutetaan IEC 60229 mukaisesti:
 - ✓ Kaapelin kosketussuojan ja ympäröivän maaperän, saattokuparin sekä **mahdollisen kaapelin puolijohtavan vaipan välillä.**
 - ✓ Mittausjännite 4 kV_{DC}/ vaipanpaksuusmillimetri, kuitenkin enintään 10 kV_{DC} → AHXAMK-W(P)-tyypin 20 ja 33 kV kaapeleilla 5-10 kV_{DC}.
 - ✓ Mittauksen kesto on vähintään 1 minuutti.



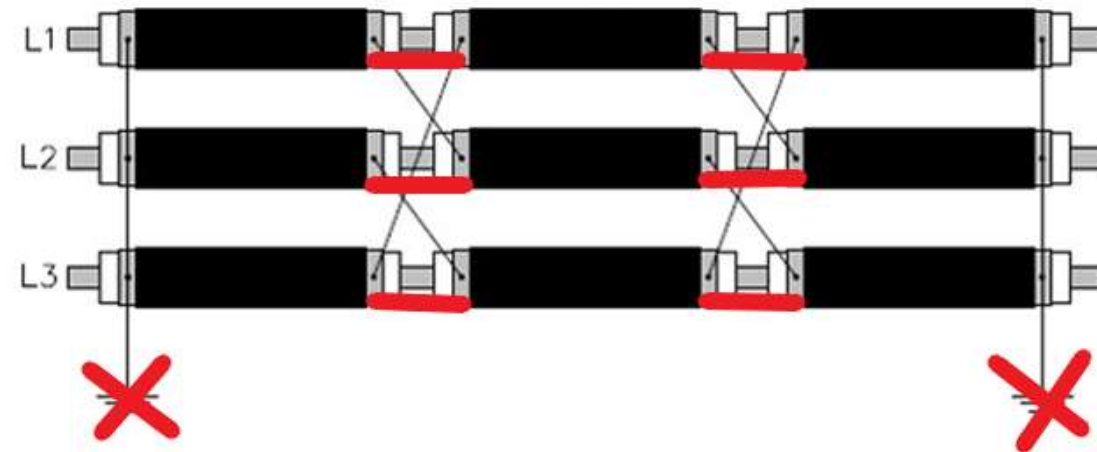
Kuva: <https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7164318326171582464/>

→ Vaipaneheysmittaus on 100 %:sesti luotettava vain, jos kaapelin ulkovaipassa on puolijohtava kerros. Muussa tapauksessa mittaustulos saattaa olla hyvä vaippaviasta huolimatta, jos vikakohtaa ympäröi kuiva huonosti sähköä johtava maa-aines.

Vaipaneheysmittaus

Ennen mittausta:

- ✓ Kaapelijärjestelmän kosketussuojat tulee erottaa maapotentiaalista.
- ✓ Kaapelijärjestelmän mahdollisien link-boksien kytkennät tulee avata, jotta vaipaneheysmittaus voidaan suorittaa vaihekohtaisesti ja mitattavasta piiristä tulee erottaa vaippaylijännitesuojat.
- ✓ Link-boksiin tulevat maadoituskaapelit voidaan yhdistää ohittamalla kosketussuojan vuorottelu, jolloin mittaus voidaan suorittaa koko kaapelijärjestelmän pituudelta. Vaihtoehtoisesti mittaus voidaan suorittaa osapituuksina päätteiden ja link-boksin tai kahden link-boksin väliltä (osapituuksina).

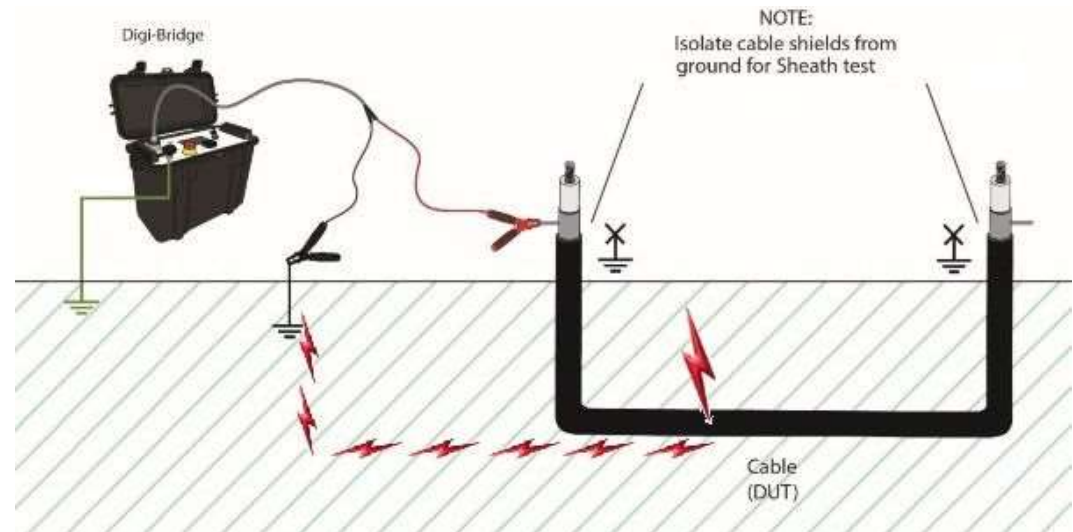




Vaipaneheysmittaus

✓ Mittaustulos on hyväksytty standardin IEC60229 mukaan, jos vaippa kestää mittausjännitteen. Suuriin poikkeamiin mittaustuloksissa eri vaiheiden välillä on kuitenkin syytä kiinnittää huomiota. Lisäksi voidaan soveltaa seuraavaa ohjeistusta suuntaa antavana:

- ✓ Normaali tulos = n. $1 \mu\text{A} / \text{km}$
- ✓ mahdollinen vaippavika $> 10 \mu\text{A} / \text{km}$
- ✓ vaippavika $> 1 \text{mA} / \text{km}$

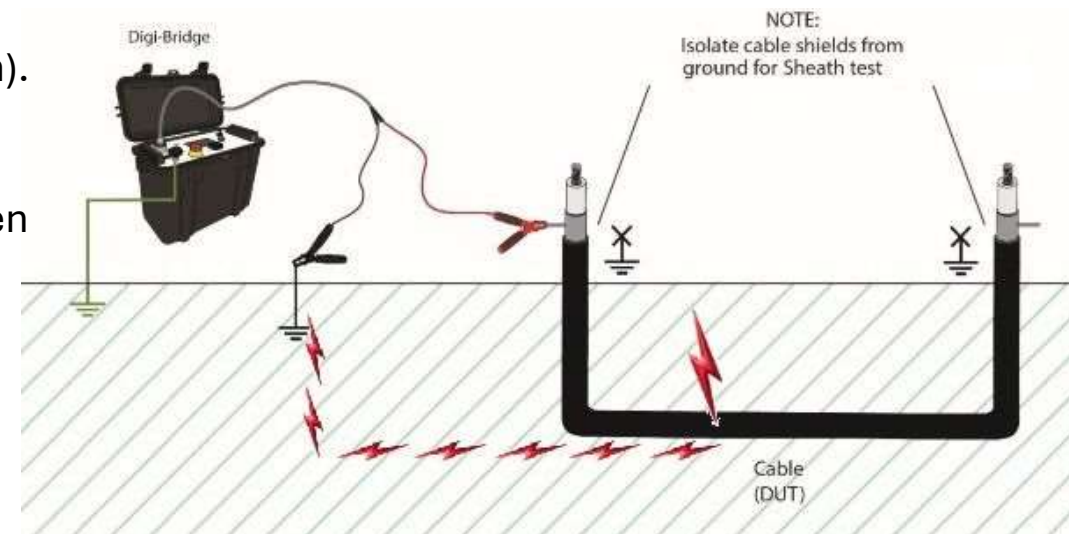


Kuva: <https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7164318326171582464/>

Vaipaneheysmittaus

Todennäköisen vaippavian löydyttyä:

- ✓ On saatu huono, yli viitearvojen oleva tulos ($> 10 \mu\text{A}/\text{km}$).
- ✓ On suositeltavaa paikantaa vaippavika ensin esipaikannuslaitteistolla, joka paikantaa vian yleensä noin muutaman kymmenen metrin tarkkuudella käyttäen vain vähän energiaa (ei polteta, eli kasvateta vikaa tarpeettomasti).
- ✓ Tarkka paikannus on suositeltavaa suorittaa myös matalalla energialla esimerkiksi pulssimuotoisen jännitteen avulla, jolloin vikakohta on löydettävissä askeljännitesauvoilla kaapelireitiltä esipaikannuksen antamasta ympäristöstä.
- ✓ Vaippavika on korjattava asianmukaisesti esimerkiksi eristävällä vulkanoivalla teipillä sekä vetoketjullisella kutisteletkulla.



Kuva: <https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7164318326171582464/>



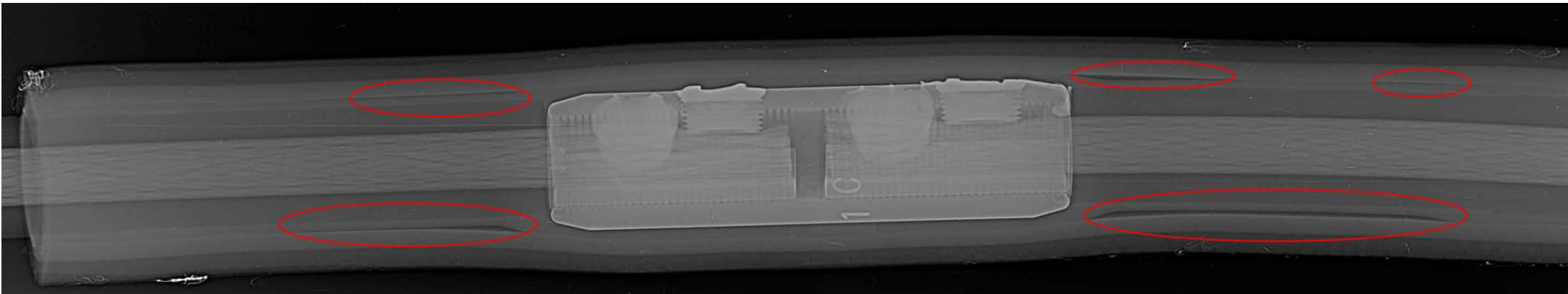
Sisältö

1. Lyhenteet ja termit
2. Lait, asetukset, standardit ja suositukset
3. Miksi mitataan?
4. Suositus mittauksista
5. Vaipaneheysmittaus
- 6. Osittaispurkausmittaukset**
7. Häviökerroinmittaus
8. Maadoitusverkon mittaukset

Osittaispurkausmittaus

Mikä on osittaispurkaus?

- ✓ Osittaispurkaus on sähköpurkaus, joka syntyy, kun sähkökentän voimakkuus ylittää eristeen jännitekestoisuuden.
- ✓ Se on paikallinen purkaus, joka yhdistää kaksi elektrodia vain osittain. Se johtaa ennen pitkää läpilyöntiin.
- ✓ Se voi olla esimerkiksi:
 - ✓ Ilmatasku tai muu eristävää materiaalia paremmin johtava aine kiinteässä eristeaineessa
 - ✓ Ilmatasku tai muu eristävää materiaalia paremmin johtava aine eristävässä nesteessä
 - ✓ Elektrodin pinnalla kaasua vasten (korona)



Kuva: Röntgenkuva kaapelijatkoksesta, jossa on todettu osittaispurkauksia tuulipuiston käyttöönottomittauksissa.



Osittaispurkausmittaus

Mikä on osittaispurkaus?



Kuva: Sähköpuu eristeessä.



Kuva: Pintapurkaus kojeistossa.



Osittaispurkausmittaus

Mikä on osittaispurkaus?

- ✓ Valokaari syntyy oikosulussa, joka voi juontaa juurensa osittaispurkauksesta.
- ✓ Valokaaren lämpötila voi olla jopa 20 000 °C, joka on nelinkertainen auringon pinnan lämpötilaan verrattuna.
- ✓ Valokaaren voima voi olla verrattavissa käsikranaatin aiheuttamaan paineaaltoon.



Kuva: Valokaari kojeistossa.



Osittaispurkausmittaus

Miten osittaispurkauksia voi mitata?

Offline-osittaispurkausmittaus

- ✓ Ulkoisella jännitelähteellä suoritettavia osittaispurkausmittauksia kutsutaan offline-osittaispurkausmittauksiksi. Niillä voidaan syöttää mitattavaan piiriin järjestelmän normaalia käyttöjännitettä korkeampi, yleensä noin $1,5-2,0 \times U_0$ jännite (33 kV jännitetasolla 28,5 – 38,0 kV mittausjännite). Normaalia käyttöjännitettä korkeampi mittausjännite ”herättää” myös ne purkaukset, jotka eivät syty normaalilla käyttöjännitteellä. Tällaisia tilanteita voi olla:
 - ✓ Transienttiylijännitteet, kuten kytkentäylijännitteet ja ilmastolliset ylijännitteet.
 - ✓ Maasulun seurauksena jännitteen nousu ehjissä vaiheissa.

Online-osittaispurkausmittaus

- ✓ Normaalin käytön aikana suoritettavia osittaispurkausmittauksia kutsutaan **online-osittaispurkausmittauksiksi**. Niissä mittausjännite on järjestelmän oma käyttöjännite, eikä käyttökeskeytystä tarvita.



Osittaispurkausmittaus

Offline vs. Online?

	PLUSSAT	MIINUKSET
ONLINE	<ol style="list-style-type: none">1. Ei käyttökatoa.2. Ei vaurioita mitattavaa piiriä.3. Mahdollisuus väliaikaiseen tai jatkuvaan monitorointiin.4. Mittauksien nopeus (jopa 200 kaapelia per pv).5. Mittauksien helppous.6. Edullisemmat laitteet.	<ol style="list-style-type: none">1. Ainoastaan käyttöjännitteellä syttyvät purkaukset voidaan havaita.2. Mittaukset eivät ole täysin vertailukelpoisia, vaan olosuhteet saattavat muuttaa tuloksia.3. Voidaan mitata suurimmalla osalla laitteista vain hyvin lyhyitä matkoja kaapelia (5 – 5000 m).4. Mittaustuloksien haastava tulkinta.
OFFLINE	<ol style="list-style-type: none">1. Normaalia käyttöjännitettä korkeampi jännite herättää paremmin purkauksia.2. Paljon tarkempi kalibroinnin vuoksi.3. Vertailukelpoiset tulokset.4. Purkauksen tarkka paikannus.5. Voi mitata PDIV ja PDEV.6. Voi mitata TD:n samanaikaisesti.	<ol style="list-style-type: none">1. Laitteistojen kallis hankintahinta.2. Mittauksien hitaus (korkeintaan noin 10 mittausta per päivä).3. Käyttökato.



Offline-osittaispurkausmittaus

Miten mittaus suoritetaan? Laitteiston kytkentävideo:





Offline-osittaispurkausmittaus

Miten mittaus suoritetaan? Mittausvideo:



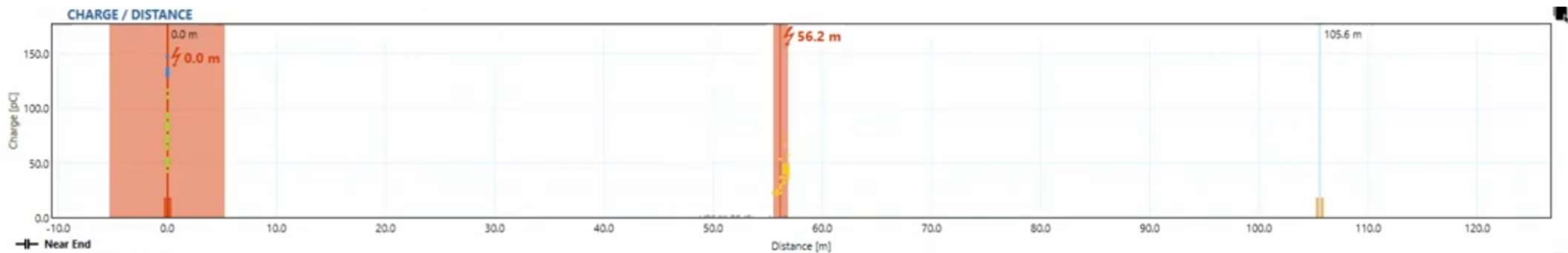
LÄHDE: <https://www.youtube.com/watch?v=TyWQK3sTRT4>



Offline-osittaispurkausmittaus

Tulokset ja suositukset niihin

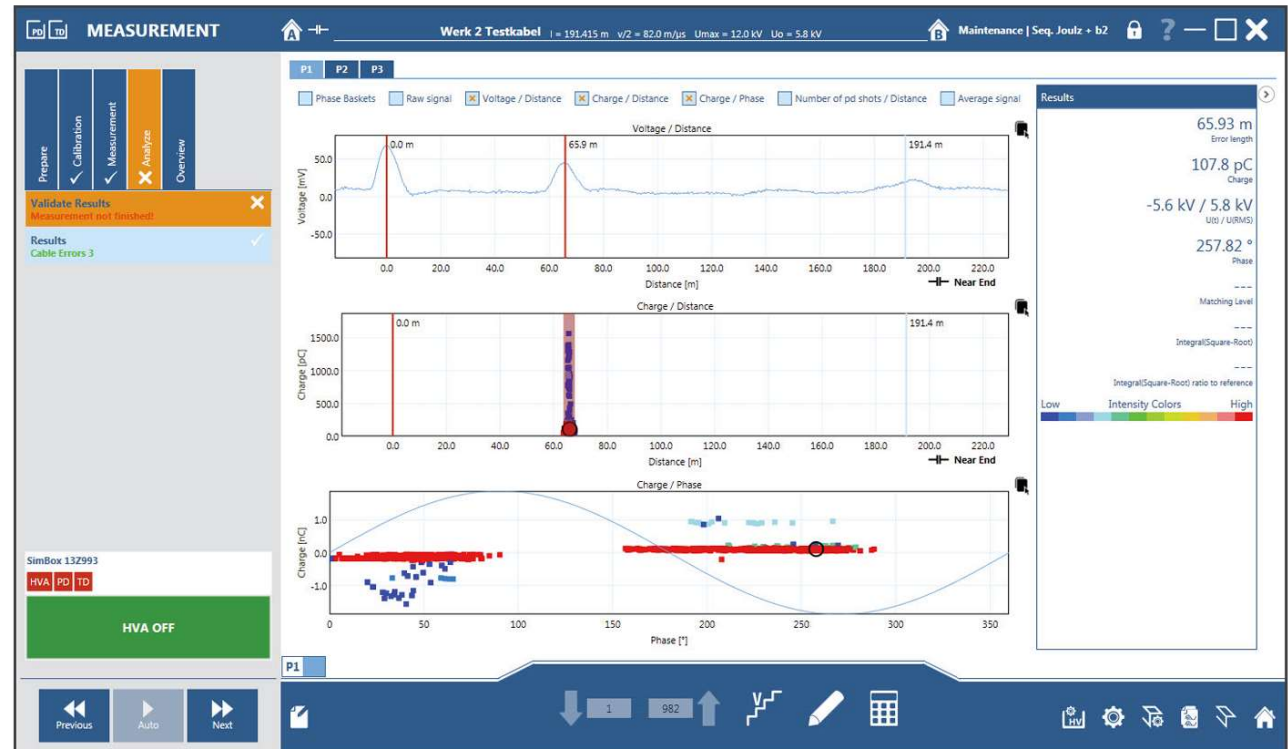
- ✓ Tulokset pC:nä ja mahdolliset purkaukset metreinä mittauspisteestä.
- ✓ Uuden PEX-eristeisen kaapelijärjestelmän sallittu purkaustaso on yleisesti 100 pC mittausjännitteellä 1,7U₀ (33 kV järjestelmässä noin 32,3 kV).
- ✓ Mikäli käytössä olleen PEX-eristeisen kaapelijärjestelmän syttymisjännite on **PD_{IV} > U₀** ja lisäksi:
 - ✓ purkaustaso vähintään 500 pC → suositeltavaa toistaa mittaus kahden vuoden sisällä.
 - ✓ purkaustaso vähintään 2000 pC → suositeltavaa toistaa mittaus vuoden sisällä.





Offline-osittaispurkausmittaus Tulokset ja suositukset niihin

- ✓ Mikäli käytössä olleen PEX-eristeisen kaapelijärjestelmän syttymisjännite on $PD_{IV} < U_0$ ja lisäksi:
 - ✓ Purkaustaso vähintään 500 pC → suositeltavaa toistaa mittaus viimeistään 6 kk sisällä.
 - ✓ Purkaustaso vähintään 2000 pC → suuri vikaantumisriski, komponentti on vaihdetta mahdollisimman pian.
 - ✓ Purkaustaso vähintään 4000 pC → suuri vikaantumisriski, komponentti on vaihdetta välittömästi.



Kuva: <https://b2hv.com/index.php?eID=dumpFile&t=f&f=265&token=5087d5bef44e6a4b644ddfc7ec69f472a4e59c25>



Online-osittaispurkausmittaus

Miten mittaus suoritetaan?

- ✓ Online-osittaispurkausmittauksella tarkoitetaan käytönaikaisia osittaispurkausmittauksia, joissa hyödynnetään järjestelmän omaa käyttöjännitettä. Käyttökeskeytystä ei siis tarvita.
- ✓ Tavanomaisimpia tapoja suorittaa online PD-mittaus:
 - ✓ Akustinen mittaus
 - ✓ TEV-mittaus
 - ✓ Sähkömagneettinen mittaus
 - ✓ HFCT-mittaus (joka 10 km kaapelijärjestelmien mittauksiin)
 - ✓ UHF-mittaus
- ✓ Mittaus voidaan suorittaa yksittäisenä mittauksena esimerkiksi laitteiston käyttöjännitekokeen yhteydessä (ilman kuormaa) tai mittaus voidaan tehdä väliaikaisena tai jatkuvana monitorointina, jolloin kuorman vaihteluiden ja muiden olosuhdevaihteluiden vaikutusta voidaan vertailla.



Video: Online PD-mittaukset Monitran PDS Insight:lla.
<https://www.youtube.com/watch?v=aunpmA--K5U>



Online-osittaispurkausmittaus

Tulokset

- ✓ Online PD-mittauksien tulokset eivät ole vertailukelpoisia eri laitteilla mitattuna. Joskus vaihtelevat olosuhteet (ilmankosteus, kuormitus, jne.) saattavat myös vaikuttaa mittaustuloksiin.
- ✓ Tulokset eivät ole pC muodossa, paitsi joissain kehittyneemmissä mittalaitteissa, joissa pC-tulos perustuu laskennalliseen arvoon. Sitä ei siis voi verrata offline PD-mittauksen tuloksiin.
- ✓ Samanlaisten kaapelijärjestelmien tulosten välillä olevat poikkeavat antavat viitteitä osittaispurkauksista. Kehittyneemmillä mittalaitteilla osittaispurkauslähteet voidaan paikantaa myös käytönaikaisissa mittauksissa, jopa kilometrien mittaisista kaapelijärjestelmistä.



Video: Online PD-mittaukset ja monitorointi Monitran Kronos:lla.
<https://www.youtube.com/watch?v=QbYgvcz18yk>



Sisältö

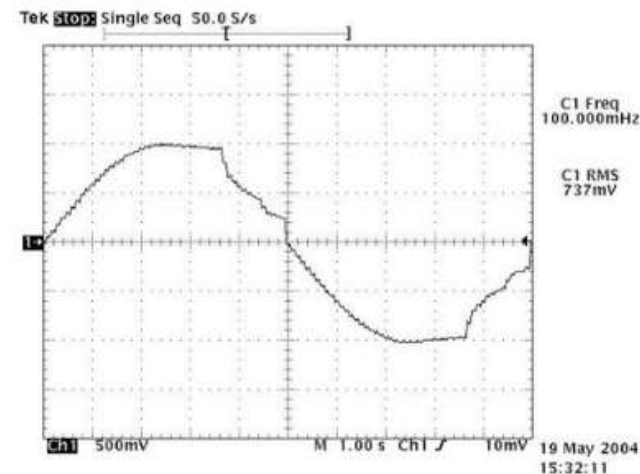
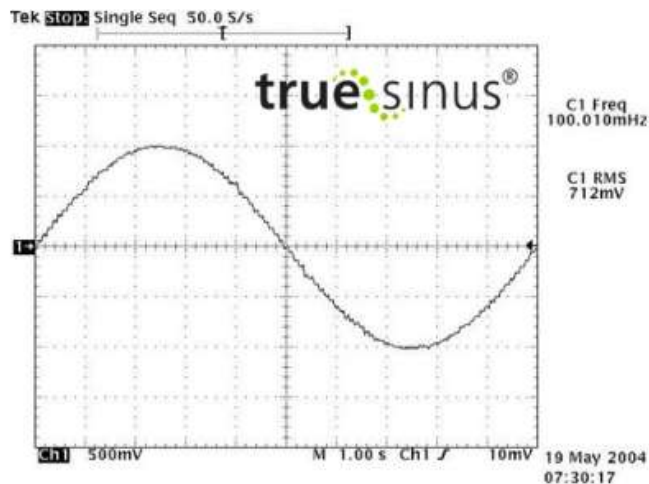
1. Lyhenteet ja termit
2. Lait, asetukset, standardit ja suositukset
3. Miksi mitataan?
4. Suositus mittauksista
5. Vaipaneheysmittaus
6. Osittaispurkausmittaukset
- 7. Häviökerroinmittaus**
8. Maadoitusverkon mittaukset



Häviökerroinmittaus

Mikä on häviökerroin?

- ✓ IEC 60060-3 mukainen VLF (Very Low Frequency) –testisignaali
- ✓ Taajuus, 0,01 – 1 Hz (yleensä 0,1 Hz)
- ✓ Sinimuotoinen symmetrinen jännite, jonka huippuarvon (U_{peak}) suhde RMS –arvoon on $\sqrt{2} \pm 5\%$
- ✓ TD-mittauksissa jännitelähteen särö on oltava hyvin pieni (<0,5%), jotta tulokset ovat riittävän tarkkoja.
- ✓ TD-mittauksella voidaan arvioida kaapelijärjestelmän käyttöikä tarkasti (huomioiden normaali vanhenema).



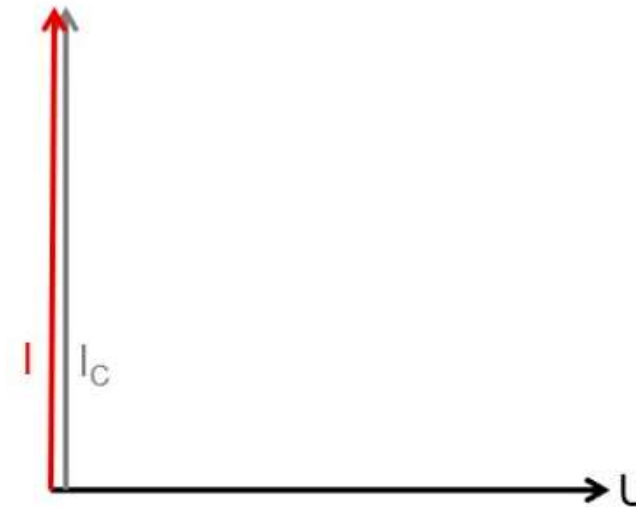
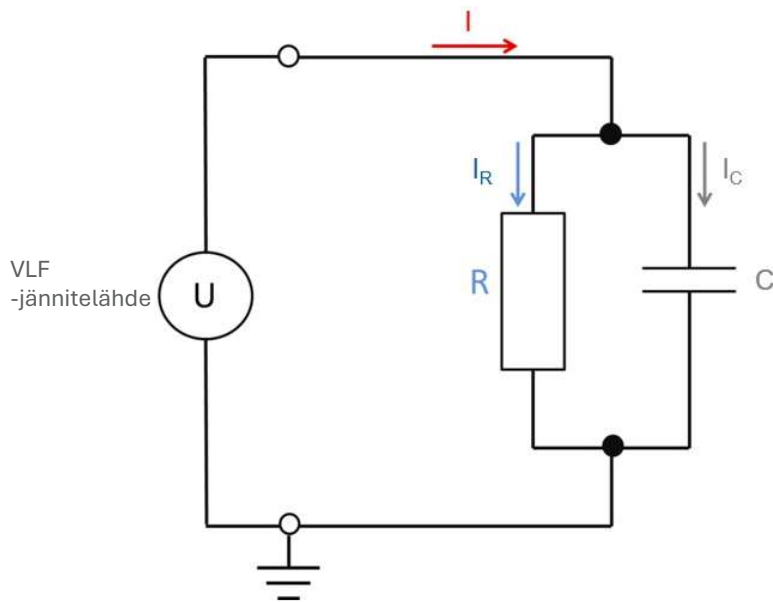
Kuva: <https://www.hvtechnologies.com/benefits-of-truesinus-digital-technology-for-vlf-testing/>



Häviökerroinmittaus

Mikä on häviökerroin?

Ideaalisen kaapelin häviökerroin = kun eristysvastus $R = \infty \rightarrow R = \infty$, $\tan \delta = 0$ (jännitteen suuruus ei vaikuta)



$$\text{Häviökerroin } \tan \delta = \frac{\text{Pätöteho}}{\text{Loisteho}} = \frac{U^2 / R}{U^2 \omega C} = \frac{1}{\omega C R}$$

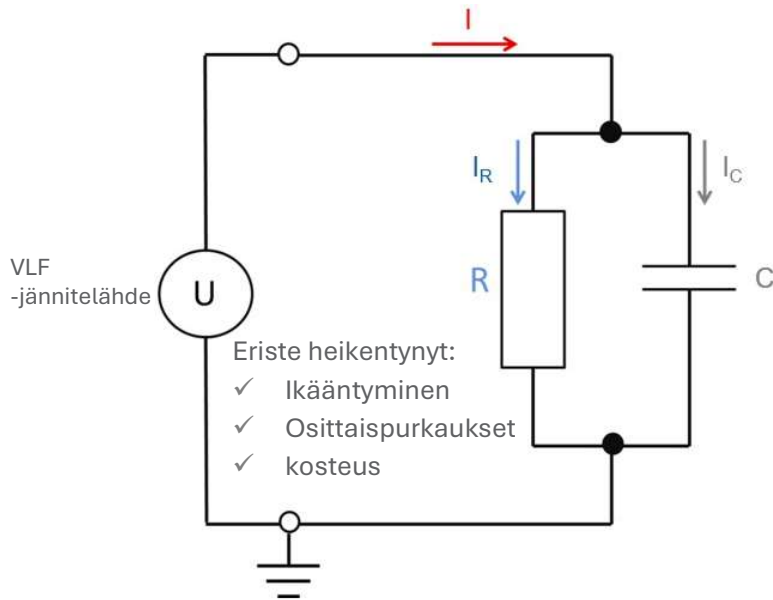
Kulmanopeus $\omega = 2 * \pi * f$



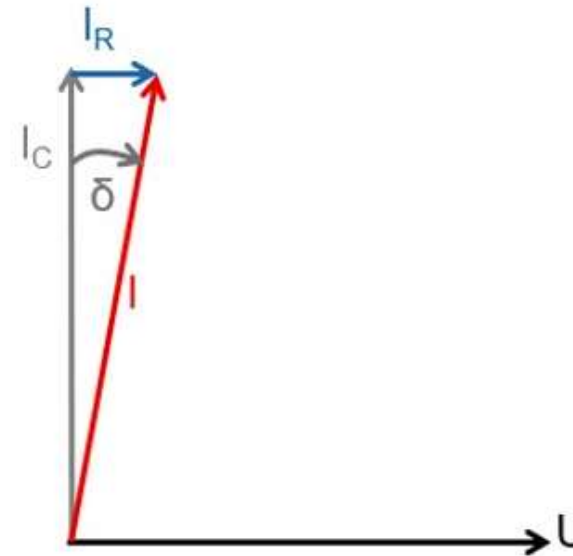
Häviökerroinmittaus

Mikä on häviökerroin?

Todellinen kaapeli: eristysresistanssi ei ole ääretön, mutta on silti korkea ($R \neq \infty$) Myös pieni vuotovirta.



$\tan \delta$ kasvaa, kun eristysvastus pienenee



$$\text{Häviökerroin } \tan \delta = \frac{\text{Pätöteho}}{\text{Loisteho}} = \frac{U^2 / R}{U^2 \omega C} = \frac{1}{\omega C R} \quad \omega = 2 * \pi * f$$

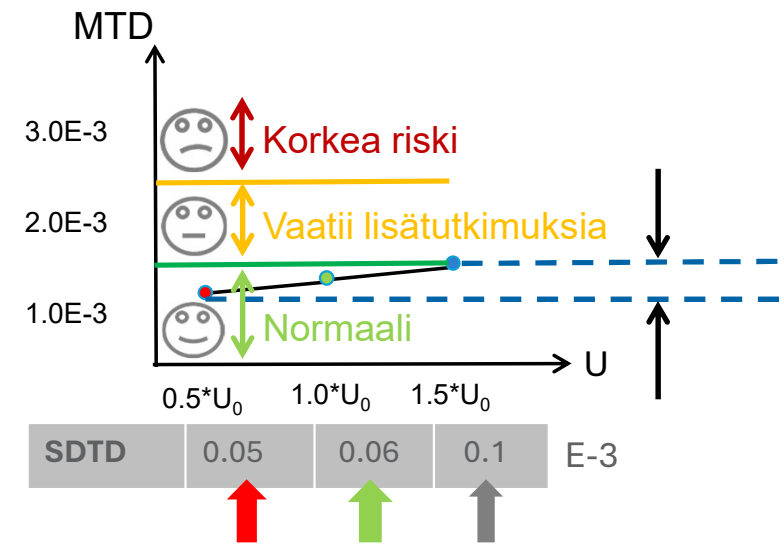
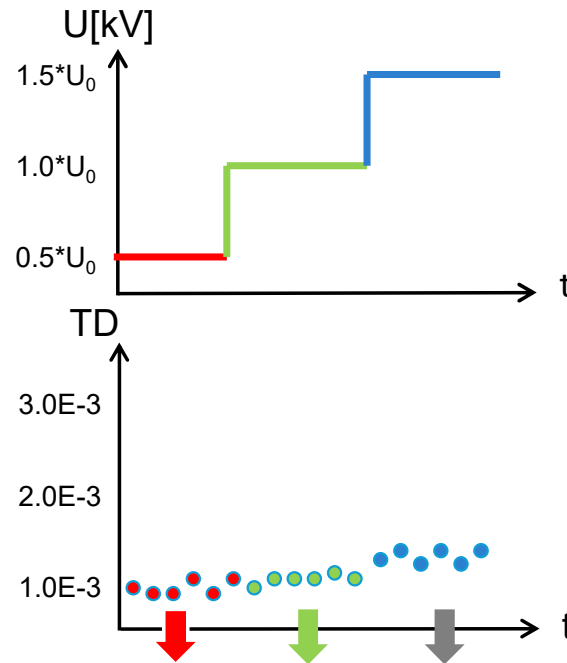
LÄHDE: <https://www.hvtechnologies.com/vlf-tan-delta-testing/>



Häviökerroinmittaus

Miten häviökerrointa mitataan?

- ✓ Mittauksen aikana seurataan kolmea kriteeriä (MTD, SDTD ja ΔTD)
- ✓ 6-10 mittausta per jännitetaso





Häviökerroinmittaus

Mittaustulokset

Kriteeri	Laskenta	Saatava tieto
Tan δ stabiilius (SDTD)	6 – 10 mittauksen keskihajonta	✓ Osittaispurkaukset ✓ Kosteat jatkot
Delta Tan δ (Δ TD)	Häviökertoimen keskiarvon ero jännitteillä $1,5U_0$ ja $0,5U_0$	✓ Vesipuut ✓ Osittaispurkaukset ✓ Höyrystyminen
Häviökertoimen keskiarvo (MTD)	6 – 10 mittauksen keskiarvo jännitteellä U_0	✓ Vesipuut ✓ Ikääntyminen (lämpö- ja kemiallinen vaikutus)



Häviökerroinmittaus

Mittaustulokset

Suositus muokattu IEEE 400.2-2013 standardin taulukosta I.1 mittausjännitteelle 0,5 – 1,5U₀ ja PEX-eristeisille kaapeleille.

Kaapelin kunto	Tan δ stabiilius (SDTD)		Delta Tan δ (Δ TD)		Häviökertoimen keskiarvo (MTD)
Hyvä	< 0,1	ja	< 0,6	ja	< 1,2
Lisätutkimuksia	0,1 – 0,5	tai	0,6 - 1	tai	1,2 – 2,0
Suuri riski	> 0,5		> 0,6 tai > 1		> 2,2

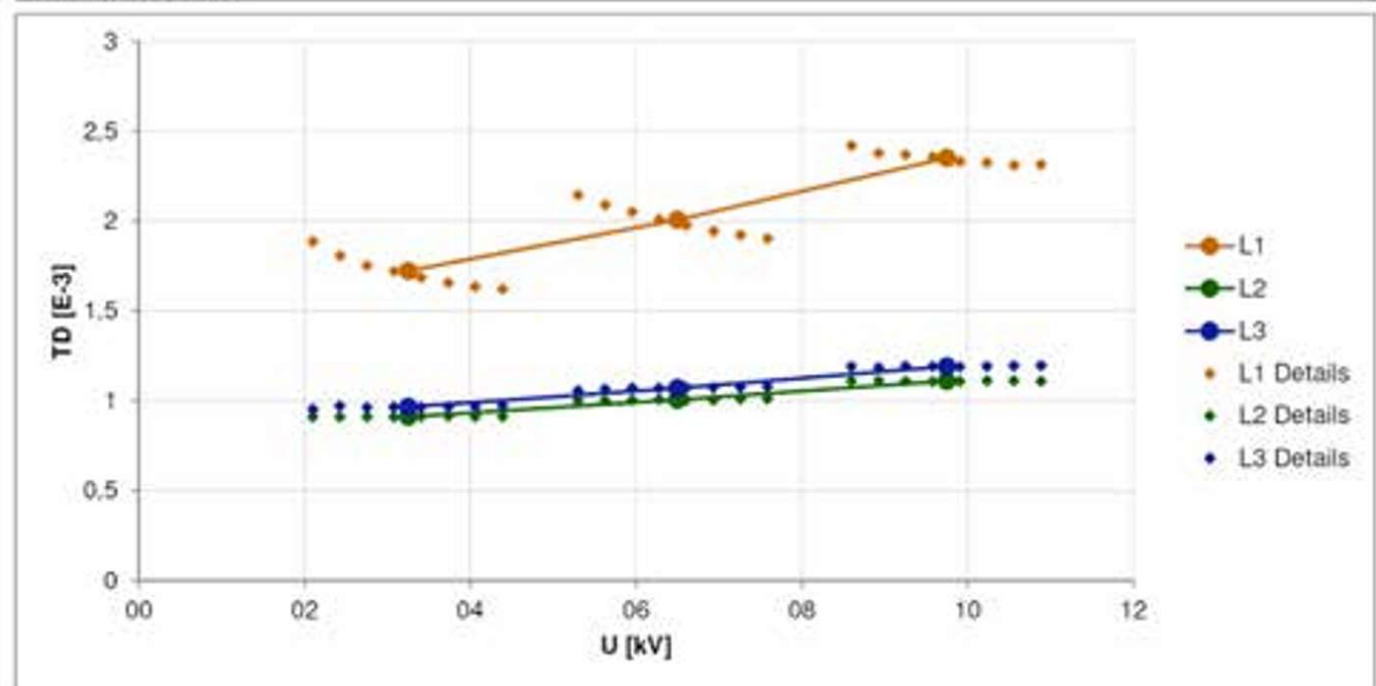


Häviökerroinmittaus

Mittaustulokset

- ✓ L1 jatkoksessa vettä (laskeva trendi)
- ✓ L2 ja L3 ok.

Ramp-up curve



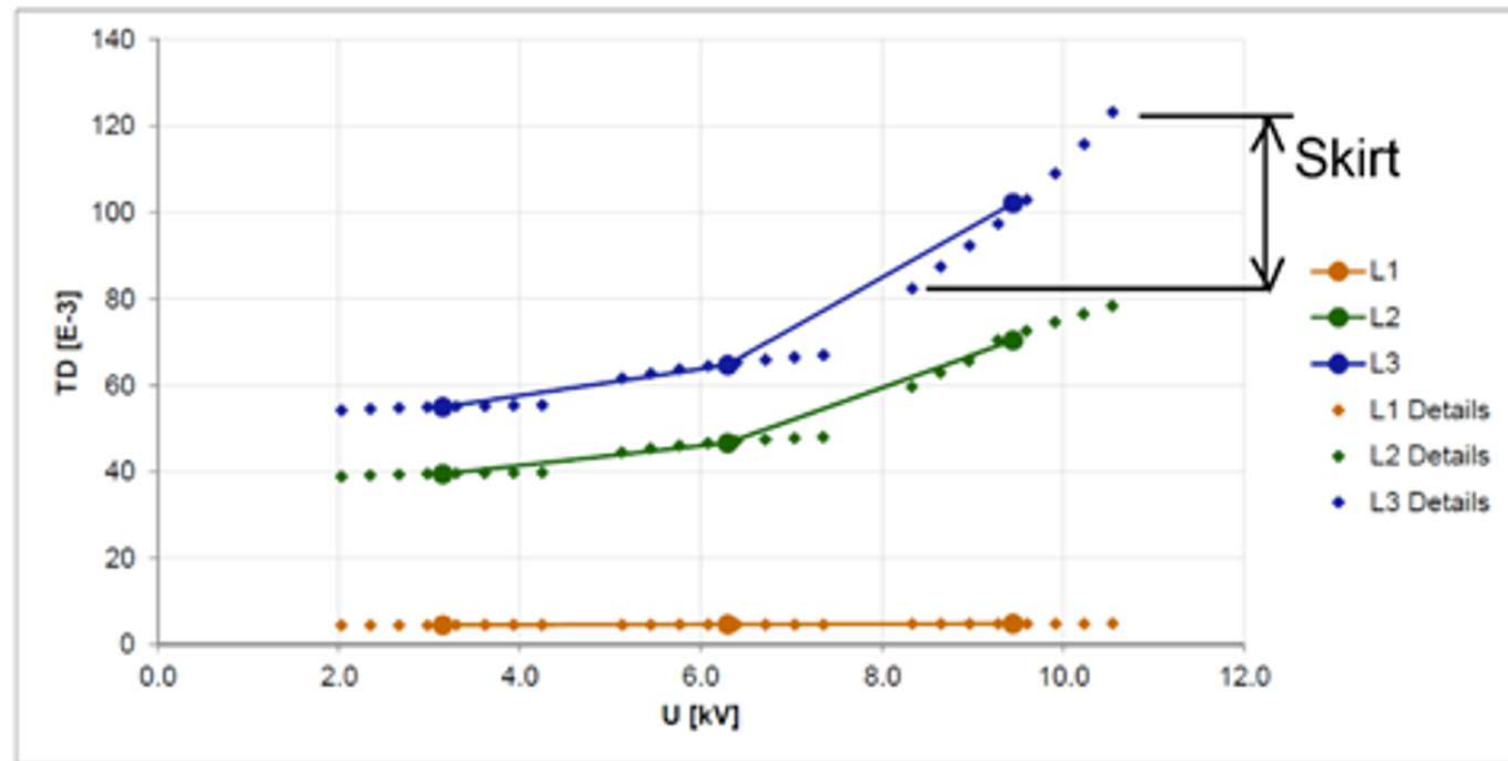


Häviökerroinmittaus

Mittaustulokset

- ✓ L2 ja L3 indikoi sähköpuuta tai ns. liukupurkausta (tracking).
- ✓ L1 ok

Ramp-up curve





Sisältö

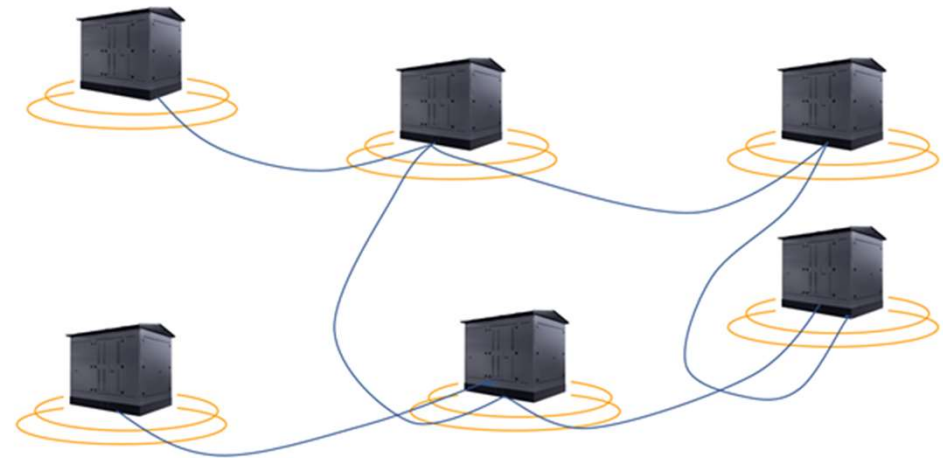
1. Lyhenteet ja termit
2. Lait, asetukset, standardit ja suositukset
3. Miksi mitataan?
4. Suositus mittauksista
5. Vaipaneheysmittaus
6. Osittaispurkausmittaukset
7. Häviökerroinmittaus
- 8. Maadoitusverkon mittaukset**



Maadoitusten jatkuvuuden mittaus

Mitä pitää mitata?

- ✓ Jakeluverkkojen maadoitusjärjestelmät ovat muuttuneet merkittävästi lisääntyneen maakaapeloinnin myötä. Suurjännitestandardi SFS 6001:2018 antaa ohjeistuksen toimintaan tilanteissa, joissa maadoitusjärjestelmä on galvaanisesti liittynyt muihin maadoitusjärjestelmiin.
- ✓ **Standardin SFS 6001:2018 mukaan käyttöönottovaiheessa ja kunnossapitotarkastusten yhteydessä yhteen liittyneiden maadoitusjärjestelmien eheys ja yhteys toisiinsa on varmistettava.**
- ✓ Tällaisen järjestelmän vikatilanteen turvallisuuden varmistaminen tavanomaisilla maadoitusmittaustavoilla voi olla hankalaa. Standardi SFS 6001:2018 viittaa tähän ongelmaan: ”Laajojen yhteen liittyneiden maadoitusten maadoitusresistanssin mittaaminen normaaleilla menettelyillä, esim. käännepistemenetelmällä on käytännössä hankalaa ja antaa epäluotettavan tuloksen”.

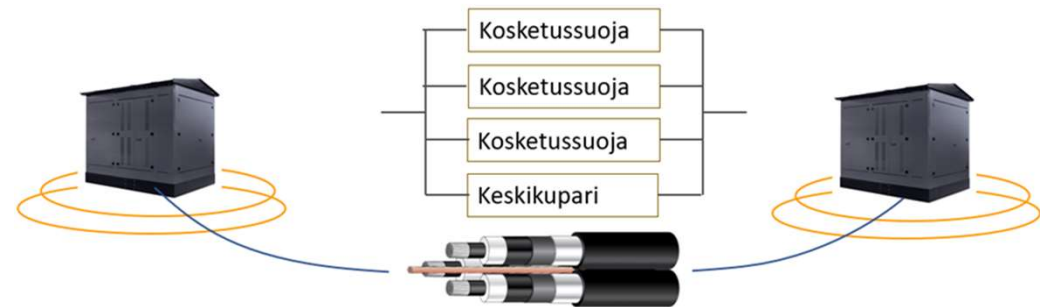




Maadoitusten jatkuvuuden mittaus

Mitä pitää mitata?

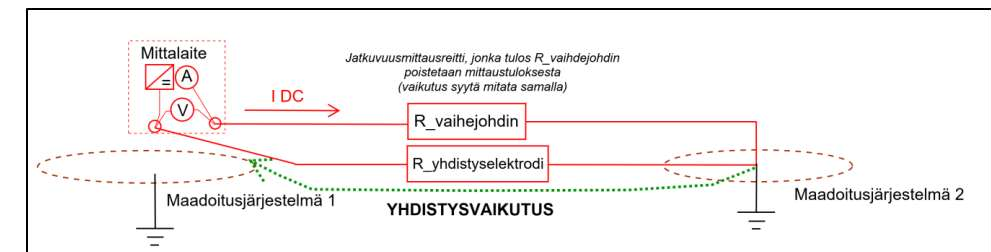
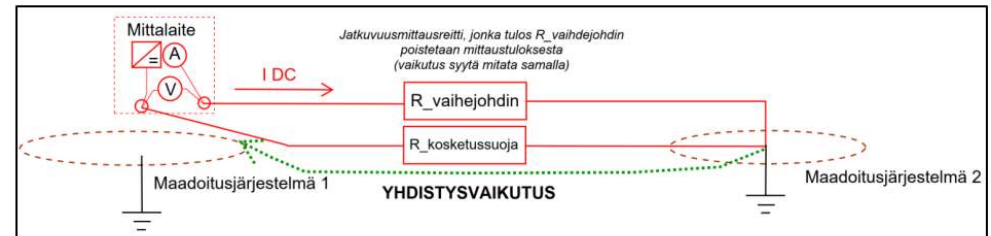
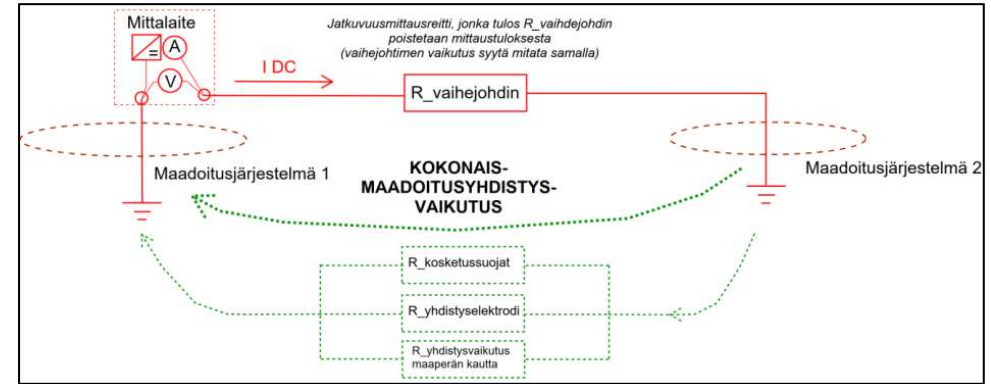
- ✓ Maakaapeliverkossa maadoitukset yhdistyvät kaapelien kosketussuojien, mahdollisen kaapelin keskusköyden ja saattokuparin avulla.
- ✓ Niin kaapelin kosketussuoja kun keskusköysi katkeavat jokaisessa jatkoskohdalla, jonka vuoksi mittauksilla on varmistuttava, että liitokset ovat tehty asianmukaisesti.



Maadoitusten jatkuvuuden mittaus

Miten mitataan?

- ✓ Maadoitusjärjestelmien välisten maadoitusyhdistysjohtimien jatkuvuudet suositellaan mitattavan suurivirtaisella DC-jatkuvuusmittauksella, jonka vähimmäistarkkuus on 1 milliohmi.
- ✓ Suurivirtainen DC-jatkuvuusmittaustapa on käytännössä ainoa teknistaloudellinen mittaustapa varmistaa maadoitusreitit luotettava jatkuvuus.
- ✓ Jatkuvuusmittaus koostuu:
 - ✓ KJ -kaapelireitin kaikkien maadoitusyhdistysjohtimien ja elektrodien yhteinen kokonaisjatkuvuus
 - ✓ KJ -kaapelin kosketussuojan jatkuvuus, jokaisesta vaihejohtimesta
 - ✓ Keskipöydellisen maakaapelin tapauksessa voidaan mitata myös keskipöydän jatkuvuus.
- ✓ Esimerkit mittaustoteutuksista:





Kiitos! Kysymyksiä?

Joonas Lahti
Develo Energia Oy
Joonas.lahti@develo.fi
+358504126169

