



Keskijännitekaapeleiden kunnon arviointi häviökerroin- ja osittaispurkausmittauksilla

Loppuraportti

Pertti Pakonen Pekka Verho
Tampereen teknillinen yliopisto

Juha Keränen
Dekra Industrial Oy

Sami Muranen
Prysmian Finland Oy

26.3.2018

Alkusanat

Tämä on tutkimushankkeen ”Keskijännitekaapeleiden kunnon arviointi häviökerroin- ja osittaispurkausmittauksilla” loppuraportti. Hanke toteutettiin Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) Sähköenergiatekniikan laboratorion, Dekra Industrial Oy:n ja Prysmian Finland Oy:n yhteistyönä. Tutkimushankkeen rahoittivat ST-Pooli ja 12 verkkoyhtiötä: Caruna Oy, Elenia Oy, Helen Sähköverkko Oy, Kymenlaakson Sähköverkko Oy, LE-Sähköverkko Oy, Rovaniemen Verkko Oy, PKS Sähkönsiirto Oy, Savon Voima Verkko Oy, Tampereen Sähköverkko Oy, Turku Energia Sähköverkot Oy, Vakka Suomen Voima Oy ja Vantaan Energia Sähköverkot Oy.

Projektin ohjausryhmään kuuluivat:

Aki Hämmäläinen, Helen Sähköverkko Oy (samalla ST-Poolin edustajana)

Asmo Karvinen, Kymenlaakson Sähköverkko Oy

Harri Salminen, Turku Energia Sähköverkot Oy

Jari Virtanen, Tampereen Sähköverkko Oy

Jouni Karasti, Rovaniemen Verkko Oy

Juho Uurasjärvi, Vakka Suomen Voima Oy

Jukka Leppänen, PKS Sähkönsiirto Oy

Kaapo Lindholm, Vantaan Energia Sähköverkot Oy

Kari Salonen, LE-Sähköverkko Oy

Sirpa Repo, Elenia Oy (31.12.2016 saakka, samalla ST-Poolin edustajana)

Pauliina Salovaara, Elenia Oy (1.1.2017 alkaen)

Rauno Ristimäki, Caruna Oy

Sami Viiliäinen, Savon Voima Verkko Oy

Hankkeen vastuullisena johtajana toimi prof. Pekka Verho TTY:n Sähköenergiatekniikan laboratoriosta ja projektipäällikkönä ja tutkijana TkT Pertti Pakonen.

Hankkeeseen liittyvien häviökerroin- ja osittaispurkausmittausten valmisteluun (kaapelitietojen toimittaminen, mitattavien kaapeleiden valinta, kytkentäsuunnittelu) ja toteuttamiseen (kytkennät ja mittausten valvonta) osallistui kaikkien hanketta rahoittaneiden verkkoyhtiöiden henkilöstöä ja urakoitsijoita. Häviökerroin- ja osittaispurkausmittaukset hankkeessa tekivät:

Juha Keränen, Dekra Industrial Oy

Tuomo Heinonen, Dekra Industrial Oy

Sami Muranen, Prysmian Finland Oy

Jarno Säkkinen, Prysmian Finland Oy

Pertti Pakonen, Tampereen teknillinen yliopisto

Kiitämme kaikkia projektiin osallistuneita hyvästä yhteistyöstä ja välittömästä ja innostavasta työilmapiiristä.

Tampereella 26.03.2018

Pertti Pakonen, TkT

Juha Keränen

Sami Muranen

Pekka Verho, Prof.

Tiivistelmä

Monissa kehittyneissä maissa huomattava osa taajamien keskijännitekaapeliverkoista on saavuttamassa iän, jossa vikojen todennäköisyys kasvaa. Eri kaapelityypeillä ikääntymismekanismit ovat erilaisia ja saman tyyppisten kaapeleidenkin elinikä vaihtelee mm. kaapelin kokemista sähköisistä, termisistä, kemiallisista ja mekaanisista rasituksista sekä asennuksen laadusta ja asennusympäristöstä riippuen. Jos käytettävissä olisi luotettava menetelmä kaapeleiden kunnon mittaamiseen, korvausinvestoinnit voitaisiin tehdä oikea-aikaisemmin kaapelin kuntoon eikä ikään perustuen. Tällä olisi mahdollista sekä saavuttaa kustannussäästöjä verkon kunnossapidossa jatkamalla vielä hyväkuntoisten kaapeleiden elinikää hallitusti, että parantaa toimitusvarmuutta uusimalla ajoissa verkon huonokuntoisimmat kaapelit.

Tässä hankkeessa tutkittiin erityisesti 0,1 Hz taajuudella tehtävän VLF-häviökerroinmittauksen soveltuvuutta keskijännitekaapelijärjestelmien kunnonvalvontaan. Hankkeessa tehtiin häviökerroinmittauksia 100:lle eri ikäiselle keskijännitekaapelijärjestelmälle, joista 32 % oli 10 kV öljypaperieristeisiä APYAKMM-, APAKM- ja PLKVJ-kaapelijärjestelmiä, 35 % 20 kV öljypaperieristeisiä APYAKMM- kaapelijärjestelmiä ja 33 % 20 kV muovieristeisiä AHXAMK-W-kaapelijärjestelmiä.

Häviökerroinmittaustulosten ja kaapeleiden iän välillä ei näyttänyt yleisesti olevan selvää korrelaatiota, mikä puoltaa kaapeleiden kunnon arvioimista nimenomaan mittauksiin perustuen. Mittaustuloksia verrattiin myös standardissa IEEE Std 400.2-2013 annettuihin raja-arvoihin, ja todettiin, että tutkitun otoksen perusteella standardin raja-arvot ovat pääosin melko suuria Suomen olosuhteisiin ja Suomessa käytetyille kaapelityypeille. Ainoana poikkeuksena näytti olevan 20 kV APYAKMM-kaapeleiden häviökertoimen keskihajonta normaalilla käyttöjännitteellä, jonka raja-arvo standardissa näyttäisi olevan liian pieni. Tämä poikkeus saattaa kuitenkin selittyä sillä, että osassa APYAKMM-kaapelijärjestelmien mittauksista ilman suhteellinen kosteus oli melko suuri (> 90 %), mikä saattaa kasvattaa keskihajontaa. Mittaustulosten kertymäfunktioiden perusteella muodostettiin uudet raja-arvoestimaatit, joita voitaisiin käyttää pohjana määriteltäessä raja-arvoja mittaustulosten tulkinnan tueksi ja käytettäväksi verkkoyhtiöiden omaisuudenhallinnassa esimerkiksi kaapeleiden korvausinvestointeja suunniteltaessa. Raja-arvoestimaatteja olisi hyvä tarkentaa myöhemmin, kun mittaustietoa kertyy lisää.

Lisäksi tutkittiin suppeammin myös kojeiston ja mittausolosuhteiden (mm. ilman suhteellinen kosteus) mahdollista vaikutusta mittaustuloksiin. Tulosten pohjalta todettiin, että mittauksissa ja tulosten tulkinnassa on syytä kiinnittää erityistä huomiota sen varmistamiseen, että kojeistojen pintavirrat kaapelin päissä ja/tai sääolosuhteet (erityisesti ilman suuri suhteellinen kosteus) eivät merkittävästi vääristä tuloksia.

Hankkeessa tehtiin myös off-line-osittaispurkausmittaukset kaikille tutkituille kaapeleille ja lisäksi on-line-mittauksia kahdella eri menetelmällä noin 50 kaapelille. On-line-mittauksia tehtiin kaapelin vaihejohtimien ympärille asennettaviin suurtaajuusvirtamuuntajiin perustuvalla HFCT-menetelmällä ja sähkömagneettisen kentän mittaukseen perustuvalla Pry-Cam-menetelmällä. Mittausten tarkoituksena oli kerätä käyttökokemuksia eri mittausmenetelmistä ja vertailla niillä saatavia tuloksia (mm. osittaispurkausten havaitseminen, PRPD-kuvat, osittaispurkausten paikannus ja osittaispurkausten voimakkuus) ja arvioida menetelmien käyttökelpoisuutta kaapeliverkkojen kunnonvalvonta- ja käyttöönottomittauksissa.

Yleisesti ottaen off-line-mittauksissa osittaispurkauksia esiintyi yleisemmin kuin on-line-mittauksissa. Hankkeessa tutkittiin tarkemmin kuusi tapausta, joissa on-line-mittausten mukaan esiintyi purkauksia, ja yhtä poikkeusta lukuun ottamatta kaikkien menetelmien tulokset olivat näissä samansuuntaisia. Esimerkiksi purkausten paikannus onnistui tutkituissa tapauksissa sekä off-line, että HFCT-on-line-mittauksella. HFCT- ja Pry-Cam-mittauksilla saatavat PRPD-kuvat olivat pääsääntöisesti keskenään hyvin samankaltaisia. Osittaispurkausten ja häviökerrointunuslukujen välillä ei havaittu selvää korrelaatiota. Koska kaapelin ja kaapelivarusteiden asennusvirheet usein ilmenevät osittaispurkauksina ja ne eivät useinkaan näy häviökerroinmittauksissa, osittaispurkausmittausta voidaan pitää ensisijaisena menetelmänä kaapeleiden käyttöönottomittauksiin.

Hankkeessa kerätyt mittaustiedot tallennettiin Dekra Industrial Oy:n M-Files-järjestelmään, josta ne ovat hyödynnettävissä myöhemmin verkkoyhtiöissä tehtävien mittausten tukena tai mahdollisissa jatkotutkimuksissa.

Abstract

In many developed countries a considerable part of the medium voltage underground cable networks is coming to an age where the probability of faults increases. There are differences in the aging mechanisms of different cable types and even the lifetime of similar cables varies depending on the electrical, thermal, chemical and mechanical stresses experienced by the cable and depending on the quality and environment of installation. With a reliable method for measuring the condition of cables the replacement of old cables could be made based on the cable condition, not on age. This way, considerable cost savings could be achieved in network investments by extending the lifetime of still well-performing cables and in interruption costs by replacing the most degraded cables in time.

This project focused on studying the suitability of 0.1 Hz VLF tangent delta (also called dissipation factor or loss angle) measurement to condition monitoring of medium voltage underground cable systems. On-site measurements were conducted on 100 three phase cable systems. 32 % of these were 10 kV oil-paper-insulated cable systems of APYAKMM, APAKM and PLKVJ types. 35 % were 20 kV oil-paper-insulated APYAKMM cable systems and 33 % were 20 kV XLPE cable systems of AHXAMK-W type.

Generally, no clear correlation was found between the tangent delta measurement results and the age of the cable systems, which suggests that condition assessment of the cables should be done based on measurements. The measurement results were also compared with the limits given in IEEE Std400.2 – 2013. It was found that according to the studied sample the limits given in the standard are relatively high for Finnish conditions and the cable types used in Finland. An exception was the standard deviation of 20 kV APYAKMM cables, for which the standard limits seemed to be too low. However, this may be explained by the fact that some of the 20 kV APYAKMM cable systems were measured in conditions where the relative humidity of air was relatively high (> 90 %), which may have increased the standard deviation. Based on the cumulative distribution functions of the tangent delta measurement results new estimates for the cable system condition class limits were defined. The estimates could be used as a basis for defining limits for interpreting the tangent delta measurement results and used in asset management for planning the replacement investments of cable systems. It would be useful to adjust the limits later as soon as a more measurement data is acquired.

Additionally, the effect of the switchgear and the measurement conditions (among others, the relative humidity of air) on tangent delta measurements were briefly studied. It was concluded that in tan delta measurements and interpretation of the results special attention should be paid to making sure that the potential surface currents in switchgear at the ends of the cable and e.g. high relative humidity of air do not significantly distort the results.

Off line partial discharge measurements were also conducted on all the 100 cables and additionally, on-line partial discharge measurements were conducted to approx. 50 of them with two different methods. On-line measurements were conducted using HFCTs (high frequency current transformers) installed around the phases of the cables and using Pry-Cam which is based on measuring electromagnetic field in the proximity of the cable. The aim of the measurements was to acquire experience from different methods, to compare the results (among others, the partial discharge detection capability, PRPD patterns, location of the partial discharge source and magnitude of measured partial discharges) obtained with them and to evaluate the usefulness of different methods in condition monitoring and, on the other hand, in commissioning measurements.

Generally, at normal operating voltage, partial discharges were observed more commonly in off-line measurements than in on-line measurements. Six cases, where partial discharges were observed in on-line measurements were studied more carefully and in all cases but one the results were quite similar for all the methods studied. For example, location of the partial discharge source could be accomplished with equal accuracy in both off-line and HFCT on-line measurement. Generally, the PRPD-patterns acquired by HFCT and Pry-Cam measurement were very similar. No clear correlation between the partial discharges and tangent delta measurement results was observed. As installation errors often manifest themselves as partial discharges, which cannot be detected by tangent delta measurements, off-line or on-line partial discharge measurement is recommended as the primary method for commissioning measurements of cable systems.

The measurement data collected in the project was stored at the M-Files system of Dekra-Industrial Oy from where they can be utilized later by the project participants e.g. in the network companies to support the analysis of future measurements or in future research projects.

Sisällysluettelo

Alkusanat	2
Tiivistelmä	4
Abstract	6
1 Johdanto	11
2 Keskijännitekaapelijärjestelmien ikääntyminen ja vikaantuminen	14
2.1 Kaapeleiden vikaantumisen syyt	14
2.2 Suomessa käytössä olevia kaapelityyppejä	16
2.3 Öljypaperikaapeleiden ikääntyminen ja vikaantumismekanismit	17
2.4 Polymeerieristeisten kaapeleiden ikääntyminen ja vikaantumismekanismit	18
2.5 Suomessa käytössä olevia kaapelipäätetyyppejä ja niiden vikaantumismekanismeja	23
2.5.1 Posliinipäätteet	23
2.5.2 Letkupäätteet	24
2.5.3 Esivalmistetut päätteet	25
2.5.4 Lämpö- ja kylmäkutistepäätteet	26
2.6 Kaapelijatkokset ja niiden mahdolliset viat	27
3 Häviökerroin- ja osittaispurkausmittaukset	29
3.1 Häviökerroinmittaus	29
3.1.1 VLF-mittaus	30
3.1.2 DAC-mittaus	31
3.2 Off-line osittaispurkausmittaus	32
3.2.1 DAC-mittaus	34
3.2.2 VLF-mittaus	35
3.3 On-line osittaispurkausmittaus	35
3.3.1 HFCT-mittaus	35
3.3.2 Pry-Cam-mittaus	38
4 Mittaustulosten tulkinta ja raja-arvot	40
4.1 VLF-häviökerroinmittaukset	40
4.1.1 IEEE Std 400.2-2013 raja-arvot ja ohjeistukset	40
4.1.2 Häviökertoimen muutos jännitteen ja ajan funktiona (DTD ja STDEV-arvot)	42

4.1.3	Muut häviökerrointunnusluvut	43
4.1.4	Häviökerrointunnuslukujen ja läpilyöntijännitteen välinen korrelaatio	43
4.2	Osittaispurkausmittaukset	45
5	Mitattavien kaapeleiden valinta	46
5.1	10 kV kaapeleiden asennusvuosijakaumat.....	49
5.2	20 kV kaapeleiden asennusvuosijakaumat.....	49
6	Häviökerroinmittausten tulokset	51
6.1	Kaapelivarusteiden ja kojeiston vaikutus häviökerroinmittausten tulokseen	51
6.2	Häviökertoimet asennusvuosittain.....	53
6.3	Häviökertoimet kaapelipituuden funktiona.....	56
6.4	Häviökertoimet mittausajankohdan ja -olosuhteiden funktiona.....	59
6.5	Häviökertoimen muutokset ja keskihajonnat asennusvuosittain.....	63
6.6	Häviökerrointen kertymäfunktio	66
6.7	Häviökerrointen muutosten ja keskihajontojen kertymäfunktio	71
6.8	Häviökertoimen muutosten epälineaarisuus jännitteen funktiona.....	76
6.9	Häviökerroinmittauksissa huomioitavia tekijöitä.....	79
6.10	Kaapeleiden kuntoluokittelu häviökerroinmittausten perusteella	79
7	Osittaispurkausmittausten tuloksia.....	84
7.1	Kaapeli 24 (20 kV AHXAMK-W, v. 1992, 293 m).....	84
7.2	Kaapeli 32 (10 kV PLKVJ, v. 1964, 722m).....	88
7.3	Kaapeli 34 (10 kV AHXAMK-W, v. 2012, 2080 m).....	90
7.4	Kaapeli 41 (20 kV APYAKMM, v. 1974, 445 m)	94
7.5	Kaapeli 47 (20 kV AHXAMK-W, v. 2001, 460 m)	98
7.6	Kaapeli 82 (20 kV APYAKMT, v. 1971, 525 m)	101
7.7	Kaapeli 88 (20 kV APYAKMM, v.1968, 297 m)	105
7.8	Osittaispurkausmittausmenetelmien vertailu	108
8	Esimerkki kaapelin kunnon arvioinnista	113
8.1	Häviökerroinmittausten tulkinta.....	113
8.2	Osittaispurkausmittausten tulkinta	115
9	Mittausmenetelmien vertailu	119
9.1	Soveltuvuus kaapeleiden kunnonvalvontamittauksiin.....	119
9.2	Soveltuvuus kaapeleiden käyttöönottomittauksiin	120
10	Hankkeessa kerätty mittaustietopankki	123
11	Jatkotutkimustarpeet.....	124
12	Yhteenveto	126
	Lähdeluettelo	129
	Liite A: Häviökerroinmittausten tulokset lukuarvoina	133
	Liite B: Osittaispurkaus- ja häviökerroinmittaustulosten tulkinnat.....	136
	Liite C: Häviökertoimen muutos ja keskihajonta ulkoilman suhteellisen kosteuden funktiona	139
	Liite D: Häviökertoimen muutos ja keskihajonta ulkoilman lämpötilan funktiona	142
	Liite E: HFCT-mittausten tulokset.....	145
	Liite F: Pry-Cam-mittausten tulokset.....	170

1 Johdanto

Monissa kehittyneissä maissa huomattava osa taajamien keskijännitekaapeliverkoista on saavuttamassa iän, jossa vikojen todennäköisyys kasvaa. Suomessa vanhimmat vielä käytössä olevat keskijännitemaakaapelit on asennettu 1940-luvulla ja niissä eristeenä on öljyimpregnoitu paperi. Muovieristeisiä kaapeleita alettiin asentaa Suomessa 1970-luvulla. Omaisuudenhallinnassa kaapeleiden laskennallisena elinikänä pidetään noin 40-50 vuotta, joten 1970-luvulla asennetut muovikaapelitkin alkavat olla jo laskennallisen elinkaarensa loppupäässä, vanhemmista öljypaperieristeisistä kaapeleista puhumattakaan. Kaapeliverkkojen ikääntymisen ja kaapeloinnin lisääntymisen myötä kunnonvalvonnan merkitys on voimakkaasti kasvamassa ja kunnonvalvonta nousikin tärkeäksi tutkimusteemaksi mm. vuonna 2016 toteutetussa Sähkö tutkimuspoolin, Sähköturvallisuuden edistämiskeskuksen ja sähköalan yritysten rahoittamassa Roadmap 2025-hankkeessa [Ano16a].

Eri kaapelityypeillä ikääntymismekanismit ovat erilaisia ja saman tyyppisten kaapeleidenkin elinikä vaihtelee mm. kaapelin kokemista sähköisistä, termisistä, kemiallisista ja mekaanisista rasituksista sekä asennuksen laadusta ja asennusympäristöstä riippuen. Kaapeliverkoissa vikataajuus on yleisesti ottaen pienempi kuin avojohtoverkoissa, mutta toisaalta vikojen paikantaminen ja korjaaminen vie kaapeliverkoissa huomattavasti enemmän aikaa kuin avojohtoverkoissa ja vaatii lisäksi erityislaitteita ja -osaamista. Ennakoimattomien vikojen välttämiseen kaapeliverkoissa kannattaa siis panostaa. Kaapeleiden uusiminen ”varmuuden vuoksi” on kuitenkin kallista ja erityisesti taajamissa kaivuutyöt aiheuttavat haittaa mm. liikenteelle ja muille ympäristön toiminnoille. Toisaalta myös ennakoimattoman kaapelivian aiheuttamat keskeytyskustannukset saattavat varsinkin taajamaverkoissa nousta huomattaviksi. Kunnonvalvonnalla kaapeleiden elinikää on mahdollista jatkaa hallitusti ilman, että toimitusvarmuudesta joudutaan tinkimään. Jos kaapelin kunnon arviointiin on olemassa luotettava menetelmä, voidaan kaapeleiden uusiminen tehdä niiden kuntoon eikä ikään perustuen. Tällöin on mahdollista välttää ennenaikaisia korvausinvestointeja vielä hyväkuntoisissa verkon osissa ja samalla vähentää keskeytyksiä kohdentamalla korvausinvestoinnit verkon huonokuntoisimpiin osiin.

Häviökerroinmittaus on eräs mahdollinen menetelmä kaapelijärjestelmien kunnonvalvontaan ja se soveltuu erityisesti kaapeleiden ja kaapelivarusteiden (päätteet, jatkot) ikääntymisen diagnosointiin, öljypaperieristysten kosteuden ja muovikaapeleiden vesipuiden havaitsemiseen, joihin esimerkiksi osittaispurkausmittaus ei yhtä kattavasti sovellu. Häviökerroinmittauksella saadaan kokonaiskuva

koko mitattavan kaapelijärjestelmän (kaapeli ja kaapelivarusteet) kunnosta, mutta sillä ei pystytä paikantamaan eristysominaisuuksiltaan heikentynyttä kaapeliosuutta. Paikantaminen on mahdollista esimerkiksi osittaispurkausmittauksilla, jos häviökertoimen nousuun liittyy osittaispurkauksia. Tässä mielessä häviökerroin- ja osittaispurkausmittaukset täydentävät hyvin toisiaan. Häviökerroinmittaus tehdään off-line-mittauksena (jännitteettömälle verkosta irti kytketylle kaapelijärjestelmälle). Osittaispurkausmittaus voidaan tehdä joko off-line- tai on-line-mittauksena (käytönaikaisena mittauksena ilman käyttökatkoa). Off-line-häviökerroin- ja osittaispurkausmittaukset on usein mahdollista tehdä samalla laitteistolla. On-line-osittaispurkausmittaus tehdään yleensä kaapelipäätteen kaulalle tai kaapelipäätteen maadoitusjohtimiin asennettavilla avattavilla suurtaajuusvirtamuuntajilla ja osittaispurkausmittauksiin soveltuvalla kädessä pidettävällä tai kannettavalla mittalaitteella.

Laboratoriossa häviökerroinmittaus tehdään yleensä 50 Hz taajuudella, mutta kunnanvalvontamittauksissa kentällä on yleensä käytettävä koejännitteenä joko VLF (very low frequency)- tai DAC (damped alternating current)-testilaitteistolla tuotettua jännitettä, jotta testilaitteiston koko pysyisi kohtuullisena. Ensin mainitussa koejännite on tyypillisesti 0.1 Hz taajuinen sinimuotoinen jännite ja jälkimmäisessä vaimeneva sinimuotoinen jännite, jonka taajuus riippuu testattavan kaapelin pituudesta. VLF-menetelmää pidetään yleisesti luotettavampana ja toistettavampana mm. vakiotaaajuudesta johtuen. VLF-menetelmää koskevassa vuonna 2013 valmistuneessa standardissa IEEE Std 400.2-2013 ”Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF) (less than 1 Hz)” on annettu indikaatiivisia häviökertoimen arvoja Pohjois-Amerikkalaisille vanhoille käytössä olleille PE (polyethylene)-, EPR (ethylene propylene rubber)- ja PILC (paper insulated lead cover)-kaapeleille ja standardin liitteessä vastaavasti uusille XLPE (cross linked polyethylene)- ja EPR-kaapeleille.

Suomessa ja Pohjoismaissa yleisesti käytetyille kaapeleille ja asennustavoille vastaavia arvoja tai kaapeleiden kuntoluokitusta ei toistaiseksi ole olemassa. Aiemmin mainituista syistä tarve kaapeleiden mittaavaan kunnanvalvontaan on kuitenkin verkkoyhtiöissä kasvamassa. Suomessa on myös palveluntarjoaja (Dekra Industrial Oy), joka tekee kaapeleiden häviökerroinmittauksia ja on jo olemassa olevan DAC-laitteiston lisäksi hankkinut myös VLF-mittauslaitteiston, jolla on mahdollista tehdä häviökerroin- ja osittaispurkausmittauksia 0.1 Hz taajuudella.

Tämän tutkimuksen tavoitteena on kerätä mittaustietoa Suomessa eri verkkoyhtiöissä käytössä olevien keskijännitemaakaapelijärjestelmien häviökertoimista ja osittaispurkauksista ja kerätyn mittaustiedon pohjalta muodostaa kaapelijärjestelmille kuntoluokitus verkkoyhtiöissä tehtävien kunnanvalvontamittausten tueksi. Painopiste on häviökerroinmittauksissa ja tutkimuksessa on mitattu VLF-menetelmällä eri verkkoyhtiöiden verkoissa yhteensä noin 100 kaapelijärjestelmää (eri ikäisiä öljypaperi- ja muovikaapeleita). Osalle kaapeleista on tehty lisäksi off-line- ja on-line-osittaispurkausmittaukset kaapeleiden kuntoarvioinnin tarkentamiseksi ja eri mittausten menetelmien vertailemiseksi.

Tutkimus koostuu kirjallisuustutkimuksesta, käytännön mittauksista ja tulosten analysointiosiosta. Kirjallisuustutkimuksen, häviökerroin- ja on-line-HFCT-mittausten tulosten analysoinnin, osittaispurkausmittausmenetelmien vertailun (luvut 7-9) sekä HFCT-mittaukset on tehnyt pääosin Pertti Pakonen Tampereen teknillisen yliopiston Sähköenergiatekniikan laboratoriosta.

Häviökerroin- ja off line-osittaispurkausmittaukset on tehty Dekra Industrial Oy:n Juha Keräsen ja Tuomo Heinosen toimesta ja tulosten analysoinnin niiden osalta mm. liitteen B yhteenvetotaulukkoa ja Dekra Industrial Oy:n M-Files-järjestelmään tallennettuja kaapelikohtaisia raportteja varten on tehnyt Juha Keränen. Pry-Cam-mittaukset on tehty pääosin Prysmian Finland Oy:n Sami Murasen ja Jarno Säkkinen toimesta ja tulosten analysoinnin niiden osalta mm. liitteen B yhteenvetotaulukkoa varten on tehnyt pääosin Sami Muranen. Joitain mittauksia ja tulosten analysointeja on tehnyt myös Juha Keränen Dekra Industrial Oy:stä.

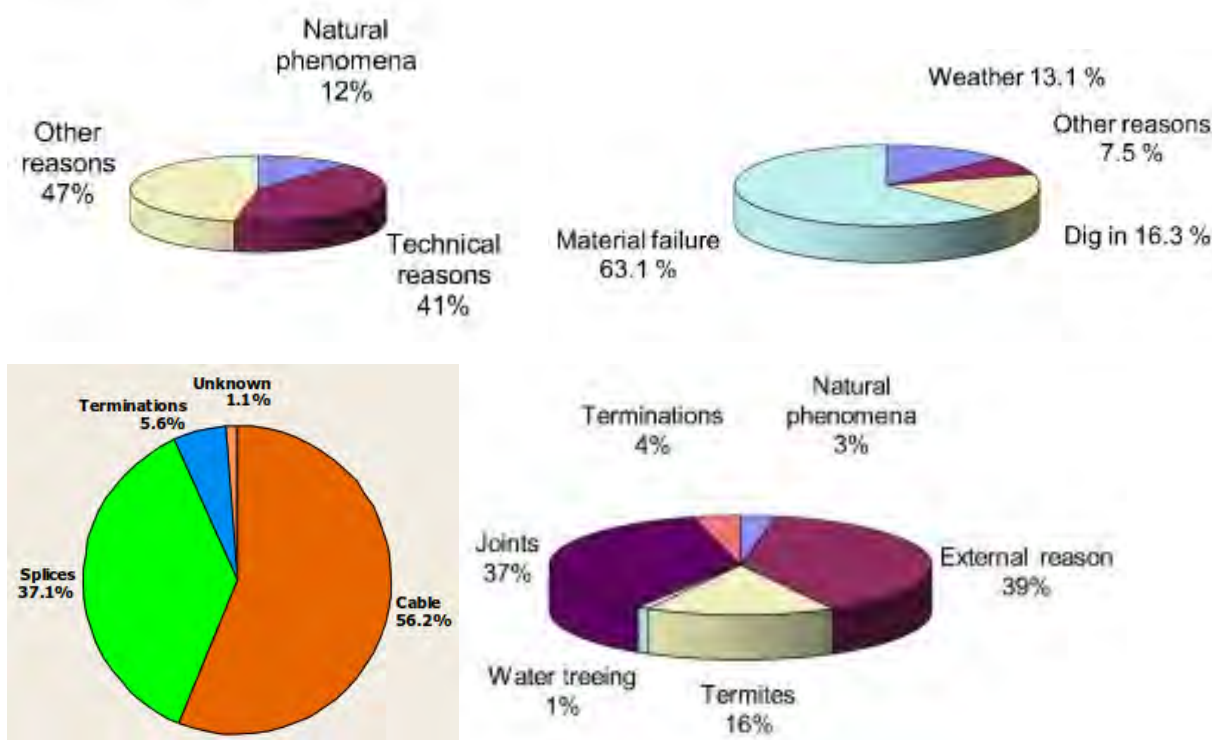
2 Keskijännitekaapelijärjestelmien ikääntyminen ja vikaantuminen

Keskijännitekaapelijärjestelmällä tarkoitetaan tässä kaapelista ja kaapelivarusteista (esim. jatkokset ja päätteet) koostuvaa kokonaisuutta. Monissa kaapeleiden kunnonvalvonta- ja käyttöönottomittauksissa, mukaan lukien tässä tutkimuksessa käytetty häviökerroinmittaus, on vaikeaa tai jopa mahdotonta erottaa kaapelijärjestelmän eri osien vaikutus mittaustulokseen. Käytännön mittauksissa kaapelijärjestelmään on lisäksi mittauksen aikana yleensä kytkettynä osa kaapelin päissä olevista kojeistoista (tyypillisesti erottimien tai katkaisijoiden toinen puoli ja eristysrakenteineen). Tässä luvussa käydään läpi Suomessa käytössä olevia keskijännitekaapelityyppejä ja niissä käytettyjä pääterakenteita, joilla on merkitystä mm. mittausten käytännön toteutuksen kannalta. Lisäksi käsitellään lyhyesti kaapelijatkoksia sekä kaapelijärjestelmien ikääntymiseen ja vikaantumiseen vaikuttavia tekijöitä.

2.1 Kaapeleiden vikaantumisen syyt

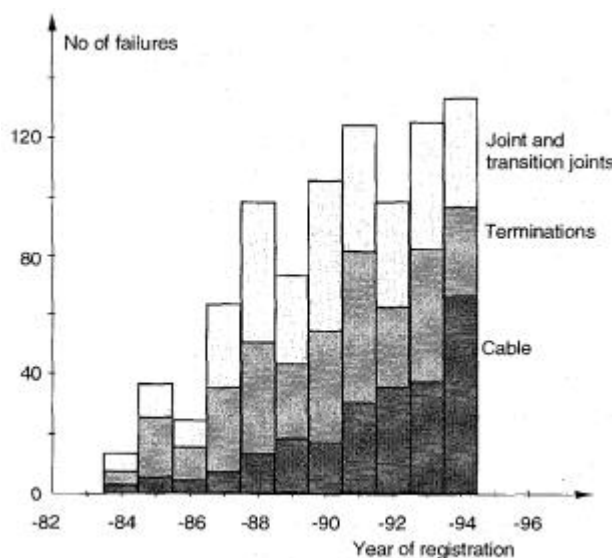
Kaapeleiden vikaantumisen syistä on olemassa melko vähän luotettavaa tutkimustietoa. Yhtenä syynä voi olla se, että keskijännitekaapeleiden vikataajuudet ovat pieniä eikä vikatilastointia ole koettu mielekkääksi. Vikaantumissyiden jakaumaan vaikuttavat varsin monet tekijät ja esimerkiksi maailmanlaajuisesti alueellisia eroja voi syntyä mm. käytetyistä kaapelityypeistä ja varusteista, asennustavoista ja käytännöistä, verkon iästä ja mahdollisesta kunnonvalvonnasta ja asiaan vaikuttavien toimijoiden toimintakulttuureista riippuen.

Yleisesti ottaen yleisin vikaantumisen syy ovat kolmannen osapuolen aiheuttamien vaurioiden (esim. kaivaminen) ohella kaapelijatkokset ja -päätteet. Kuvassa 1.1 on esitetty muutamista tutkimuksista poimittuja esimerkkejä vikaantumissyiden jakautumisesta. Ranskalaisia keskijännitekaapelijärjestelmiä koskevassa tutkimuksessa [Bri99a, Had04a] on todettu, että niissä öljypaperikaapelijärjestelmien vikataajuus on ollut keskimäärin 3,5 vikaa/100 km/vuosi ja XLPE-kaapelijärjestelmien 2,0 vikaa/100 km/vuosi. XLPE-kaapelijärjestelmien vioista 1,0 vikaa/100 km/vuosi on ollut kolmannen osapuolen aiheuttamia, 0,9 vikaa/100 km/vuosi kaapelivarusteiden aiheuttamia ja 0,1 vikaa/100 km/vuosi on ollut itse kaapelissa.



Kuva 2.1. Keskijännitekaapeleiden vikaantumissyitä a) Suomessa [Leh10a] b) Ruotsissa [He11a] c) Pohjois-Amerikassa [Ham16a] d) Macaussa 11 kV XLPE-kaapeliverkossa [You10a].

Pohjoismaista mm. Norjassa ja Ruotsissa on varsinkin vanhimmissa muovikaapeleissa esiintynyt vesipuuongelmia, joiden vuoksi aihepiiriä tutkittiin näissä maissa runsaasti mm. 1990- ja 2000-luvuilla. Kuvassa 1.2 on esitetty kaapelivaurioiden jakauman kehitys Norjassa kaapelin, jatkosten ja päätteiden välillä kymmenen vuoden aikana 1984...1994. Itse kaapelissa esiintyneiden vikojen suuri osuus selittyy suurelta osin juuri näillä vesipuuongelmilla.

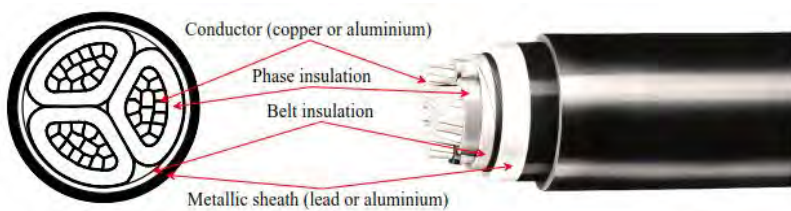


Kuva 2.2. Raportoidut viat Norjan 12 kV ja 24 kV XLPE-kaapeliverkoissa [Far97a].

2.2 Suomessa käytössä olevia kaapelityyppejä

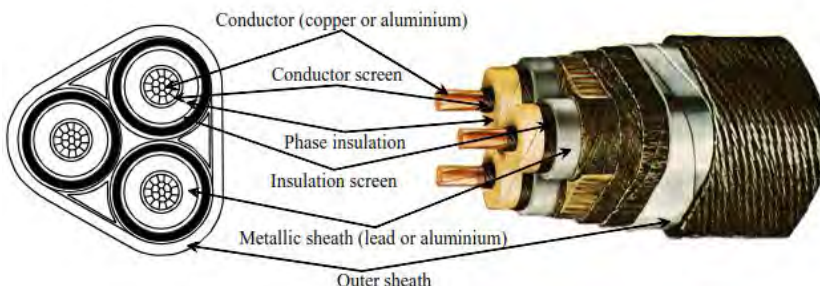
Vanhimmat Suomessa käytössä olevat keskijännitekaapelit ovat pääosin PLKVJ- tai APAKM-tyyppisiä (kuva 2.1). Molemmat ovat ns. vyöeristettyjä kaapeleita eli niissä ei ole vaihekohtaisia kosketussuojia. Vyöeristettyä rakennetta käytettiin maailmalla yleisesti ennen ensimmäistä maailmansotaa aina 25 kV jännitetasolle saakka. Rakenne osoittautui kuitenkin alttiiksi osittaispurkauksille varsinkin suuremmilla jännitteillä ja nykyisin sitä onkin käytössä vain alle 15 kV jännitetasoilla. Tätä suuremmilla jännitteillä alettiin käyttää rakennetta, jossa kunkin vaihejohtimen eristyksen päälle lisättiin kuparista tai muusta metallista tehty maadoitettu kosketussuojakerros. Tällaiset öljypaperieristeiset kaapelit ovat osoittautuneet hyvin pitkäikäisiksi ja maailmalla on käytössä paljon yli 65 vuoden ikäisiä kaapeleita [Bar03a].

Vyöeristetyissä kaapeleissa vaihekohtaisten kosketussuojien puuttuminen on huomioitava erityisesti off-line-kunnonvalvontamittauksissa, joissa koejännite kytketään vain yhteen vaihejohtimeen kerrallaan. Jotta sähkökentät mitattavan vaihejohtimen ympärillä olisivat hallittuja ja tunnettuja, muut kuin mitattava vaihejohdin on maadoitettava. On-line-mittauksissa vaiheiden välillä on luonnostaan verkon pääjännite.



Kuva 2.3. Öljypaperieristeisten APAKM- ja PLKVJ-kaapeleiden rakenne [Hyv08a].

20 kV verkoissa yleisin öljypaperieristeinen kaapeli on muovisella ulkovaipalla varustettu APYAKMM-kaapeli. Tätä kaapelityyppiä käytetään myös 10 kV verkoissa yleisesti. Jonkin verran on käytössä myös juuttiulkovaipalla varustettua APYAKMT-kaapelia. Pääeristyksen rakenne on kuitenkin molemmissa samanlainen eli kaikilla vaihejohtimilla on oma kosketussuoja samaan tapaan kuin esimerkiksi AHXAMK-W-kaapeleilla, mutta kaikki vaihejohtimet ovat kuitenkin AHXAMK-W-kaapeleista poiketen saman ulkovaipan sisällä (kuva 2.4).



Kuva 2.4. PYLKVJ-kaapelin rakenne. APYAKMM-kaapelin rakenne on saman tyyppinen, mutta siinä uloin kerros on muovia [Hyv08a].

Yleisimmät Suomessa käytössä olevat muovikaapelit ovat AHXAMK-W ja AHXAMK-WP. Kaapeli koostuu kolmesta vaipatusta yksivaihekaapelista, jotka on kerrattu kuparisen keskusköyden ympärille. Vaihejohtimet ovat vesitiiviitä pyöreitä tiivistettyjä alumiinijohtimia joiden päälle on puristettu kolmoispuristuksella puolijohtava johdinsuoja, pääeristyskerros ja puolijohtava hohtosuojakerros. Näiden päällä on kosketussuojana alumiini-muovilaminaatti, joka toimii samalla kaapelin poikittaissuuntaisena vesitiivistyksenä. Kosketussuojien päällä olevat vaihevaippakerrokset on tehty mustasta säänkestävästä PE-muovista. AHXAMK-W- ja AHXAMK-WP-kaapeleissa vaiheiden rakenne on samanlainen, mutta AHXAMK-WP-kaapelista puuttuu keskusköysi. AHXAMK-W-kaapeliin ei ole tehty sen valmistuksen aikana isompia muutoksia lukuun ottamatta ulkovaipan materiaalia, joka vaihdettu talvella 1990 HDPE:stä LLDPE:ksi [Mur16a].



Kuva 2.5. AHXAMK-W-kaapelin rakenne [Pry13a].

2.3 Öljypaperikaapeleiden ikääntyminen ja vikaantumismekanismit

Öljypaperieristeisissä kaapeleissa johtimen ja kosketussuojan välinen pääeristys muodostuu johtimen johdinsuojan päälle konsentrisesti kierretyistä öljykyllästetyistä paperinauhoista. Pääasiallinen sähköinen eristysmateriaali on öljy, paperi toimii lähinnä mekaanisena tukirakenteena ja estää mahdollisten epäpuhtauksien siirtymisen kerrosten välillä. Öljypaperikaapelin ikääntymisessä ja vikaantumisessa ovat vallitsevina paljolti samat mekanismit, joita esiintyy esimerkiksi öljypaperieristeisen muuntajien ikääntymisessä eli paperin depolymerisaatio, öljyn kosteuspitoisuuden lisääntyminen ja öljyn vanheneminen. Poikkeuksena on ilman hapen vaikutukset, jotka eivät muuntajista poiketen ole kaapeleiden tapauksessa relevantteja [Mla12a].

Eristyspaperin selluloosakuitujen pituutta kuvataan DP-luvulla, joka kuvaa yhden polymeerimolekyylin sisältämien glukoosiyksiköiden lukumäärää. Uuden eristyspaperin DP-luku on 1100-1300, DP-luku alle 500 tarkoittaa merkittävää termistä vanhenemista ja DP-lukua 200 pidetään eristyspaperin eliniän loppuna ja merkinä paperin mekaanisen lujuuden menetyksestä.

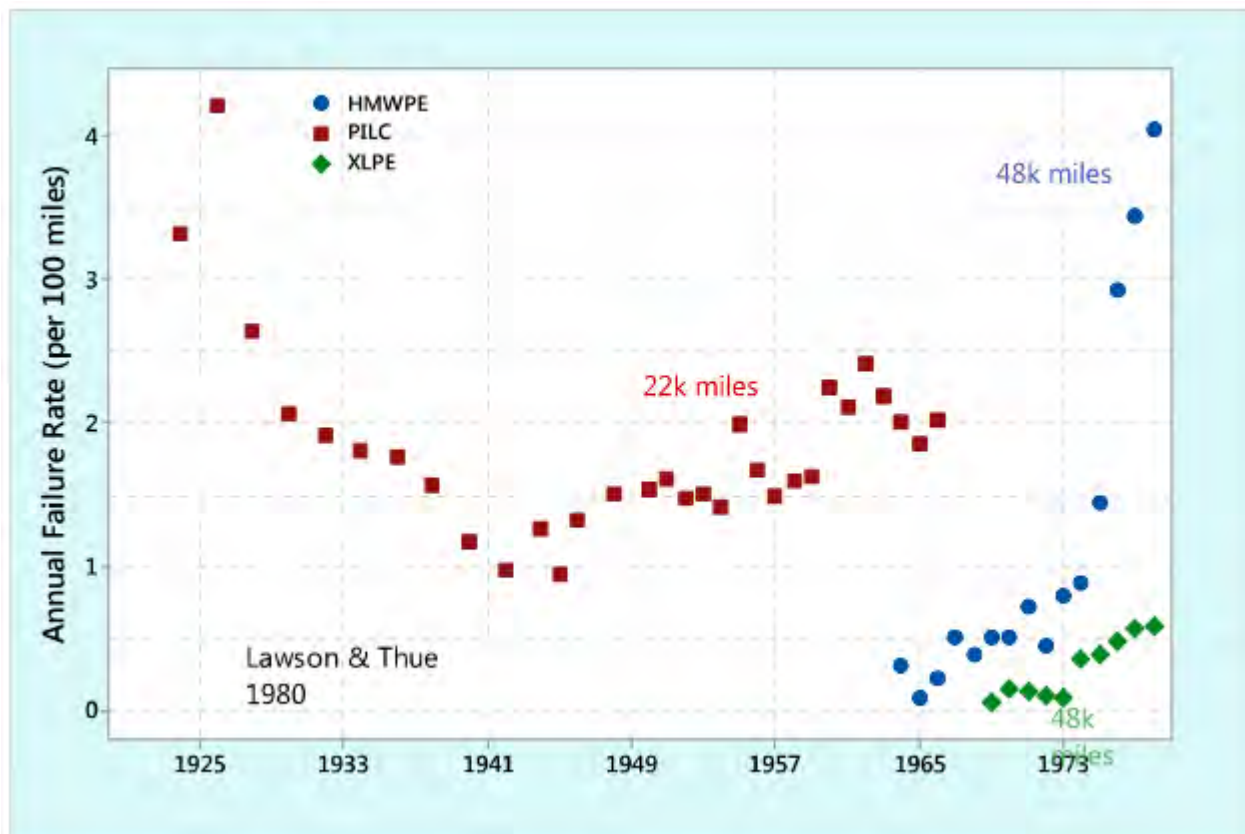
Kosteutta kaapeliin voi päästä kaapelin ulkokuoren vaurioiden kautta, mutta sitä voi syntyä myös sisäisesti. Öljyn ja kaasujen liikkuminen kaapelissa esimerkiksi lämpötilavaihteluiden ja osittaispurkausten vaikutuksesta tekee öljypaperikaapeleiden osittaispurkausdiagnostiikasta haastavaa [Mla12a]. Öljypaperikaapeleiden vikaantumismekanismeja on käsitelty taulukossa 2-1.

Taulukko 2-1. Öljypaperikaapeleiden ikääntymismekanismeja [Ham16a].

Type of Deterioration	Aging Process	Typical Causes	Example
Oil Starvation	<pre> graph TD OM[Oil migration] --> PD[Partial discharge] OM --> LDH[Localized dielectric heating] PD --> PO[Paper oxidation] LDH --> PO PO --> CPC[Changes in paper characteristics] PO --> IDF[Increase in dissipation factor] PO --> DDE[Decrease in dielectric strength] </pre>	Extreme elevation changes, Lead (Pb) breach (cracks and corrosion)	
Thermal	<pre> graph TD AT[Abnormal Temperature] --> PO[Paper Oxidation] AT --> PD[Paper Deterioration] PO --> RPI[Reaction Products (ions)] PD --> RPI RPI --> ID[Insulation Degradation] RPI --> IDF[Increase in dissipation factor] RPI --> DDE[Decrease in dielectric strength] </pre>	Excessive conductor current for a given environment and operating conditions	
Water Ingress	<pre> graph TD WI[Water ingress] --> LDH[Localized or bulk dielectric heating] WI --> ILI[Insulation losses increase] LDH --> PO[Paper oxidation] ILI --> PO PO --> CPC[Changes in paper characteristics] PO --> IDF[Increase in dissipation factor] PO --> DDE[Decrease in dielectric strength] </pre>	Lead (Pb) breach (cracks and corrosion)	

2.4 Polymeerieristeisten kaapeleiden ikääntyminen ja vikaantumismekanismit

Polymeerieristeisten kaapeleiden ikääntymistä ja vikaantumismekanismeja on tutkittu paljon siitä lähtien, kun muovikaapeli kehitettiin Yhdysvalloissa. Varsinkin ensimmäisten sukupolvien kaapeleissa esiintyi paljon vesipuuongelmia ja niitä on tutkittu maailmanlaajuisesti ja pohjoismaissakin paljon mm. Norjassa ja Ruotsissa, joissa muovikaapeleita otettiin laajamittaisesti käyttöön hieman aiemmin kuin esimerkiksi Suomessa. Lawson & Thuen [Law80a] mukaan Yhdysvalloissa vesipuuongelmat nostivat ensimmäisten sukupolvien muovikaapeleiden (HMWPE – high molecular weight polyethylene (thermoplastic) ja XLPE – cross linked polyethylene) vikataajuutta vuosien 1969...1978 välillä voimakkaasti (kuva 2.6). Öljypaperikaapeleiden (PILC – paper insulated) osalta tarkastelujakso on pitempi, ja siinä on nähtävissä tyypillistä kylpyammekäyrän muotoa, jossa alkuvaiheessa vikataajuutta nostavat erilaiset ”lastentaudit” ja loppuvaiheessa kaapeleiden ikääntyminen.



Kuva 2.6. Amerikkalaisten PILC-, HMWPE- ja XLPE-kaapeleiden vikataajuuksia vuosilta 1924-1978 [Ham16a].

Uudemmissa muovikaapeleissa sekä valmistustekniikkaa että kaapeleiden vesitiiveyttä (erityisesti poikittaissuuntaista) on parannettu ja vesipuuongelmat ovat selvästi vähentyneet. Suomessa muovikaapeleita otettiin laajemmassa mitassa käyttöön vasta sen verran myöhemmin, että ensimmäisten sukupolvien ongelmilta on välttytty. Tässä luvussa tarkastellaan lyhyesti muovikaapeleiden rakenteellista kehitystä. Esimerkkinä käytetään mm. norjalaisen kaapelivalmistajan muovikaapeleiden kehitystä ja tarkoituksena on lähinnä taustoittaa muovikaapeleissa muualla maailmassa esiintyneitä ongelmia ja auttaa lukijaa ymmärtämään miksi esimerkiksi samat häviökerrointunnuslukujen raja-arvot eivät välttämättä sovellu käytettäväksi kaikille muovikaapeleille kaikkialla maailmassa. Lisäksi on käsitelty muovikaapeleiden ikääntymiseen ja vikaantumiseen vaikuttavia tekijöitä ja mekanismeja.

Kuvassa 2.7 on esitetty 1990-luvulla käyttöön otetun vesitiiviin muovikaapelirakenteen keskeiset rakenneosat. Muovikaapeleiden kehityskaaren kuluessa pääeristyksessä yleisesti käytettyjä materiaaleja ovat olleet XLPE ja PE ja mm. Yhdysvalloissa EPR-kumi. Ulkovaipoissa on käytetty mm. PE:tä ja polyvinyylikloridia (PVC).



Kuva 2.7. Muovikaapelin rakenne [Rek10a].

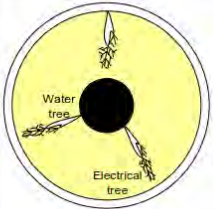
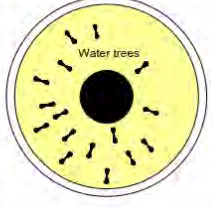
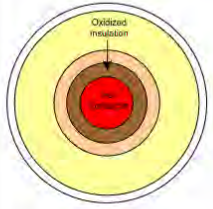
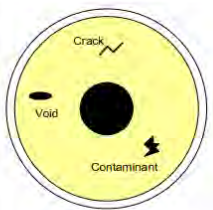
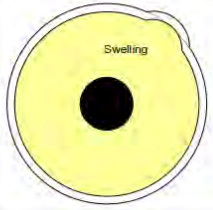
Norjassa Alcatel Kabel AS toi markkinoille ensimmäisen XLPE-kaapelin 1968 ja kymmenen vuotta myöhemmin keski-Norjan Namsokseen rakennetun uuden tehtaan myötä XLPE-kaapeleiden tuotanto ja asennukset alkoivat nopeasti lisääntyä.

Norjalaisissa XLPE-maakaapeleissa johdin on tyypillisesti ollut kerrattua pyöreää alumiinia. Kosteudesta paisuvaa vesitiivistysjauhetta alettiin käyttää (vasta) 1989, koska johtimessa olevan kosteuden tiedetään olevan erittäin haitallista XLPE-kaapeleille. Alusta lähtien norjalaisissa kaapeleissa on käytetty suulakepuristettua johdinsuojaa, jolla on vältetty mm. Yhdysvalloissa ja Japanissa käytetyn nauhasta kierretyn johdinsuojan aiheuttamat ongelmat. Vedetön ristisilloitusprosessi otettiin käyttöön vuonna 1982. Alkuvaiheessa käytettiin maalattua ja nauhasta kierrettyä hohtosuojaa, joka korvattiin suulakepuristetulla revittävällä hohtosuojalla 1978. Nykymuotoinen ei-revittävä hohtosuojarakenne tuli käyttöön 1992. Norjalaisissa 1970- ja 1980-luvun kaapeleissa metallinen kosketussuoja on tehty konsentrisesti kierretyistä kuparilangoista ja vastakkaissuuntaan kierretyistä kuparinauhasta. Uudemmissa vesitiiviissä kaapeleissa on käytetty puolijohtavaa nauhaa yhdessä kosteudesta paisuvan nauhan kanssa konsentristen kuparijohtimien ja alumiinifolion välissä. Kaapelin PE-ulkovaippa on puristettu alumiinifolion päälle. Vanhemmissa kaapeleissa on käytetty PVC:tä vuoteen 1985 saakka, jonka jälkeen ulkovaippa on tehty polyeteenistä (PE). PVC on vesitiiveysominaisuuksiltaan PE:tä huonompi.

Polymeerieristysten vanheneminen voidaan jakaa fysikaaliseen, kemialliseen ja sähköiseen vanhenemiseen. Fysikaaliseen vanhenemiseen vaikuttavat mm. mekaaniset voimat ja termiset rasitukset. Kemiallisessa vanhenemisessä hallitsevana on vapaiden radikaalien aiheuttama polymeeriketjujen pilkkoutuminen. Liikellepanevana voimana tässäkin voi olla termiset rasitukset tai esim. UV-säteilyn tai ionisoivan säteilyn vaikutukset tai mekaaniset rasitukset. Sähkökenttä voi kiihdyttää em. fysikaalisia ja kemiallisia vanhenemisprosesseja ja yhdessä esimerkiksi eristyksessä olevien epäpuhtauksien, onteloiden tms. epähomogeenisuuksien kanssa aiheuttaa paikallisia keskittymiä sähköiseen rasitukseen. Sähköistä vanhenemista ovat myös vesipuiden (water trees) ja sähköpuiden (electrical trees) aiheuttama eristyksen ominaisuuksien heikkeneminen [Dis92a]. Taulukossa 2-2 on esitetty muovikaapeleiden mahdollisia ikääntymismekanismeja. Taulukko on peräisin Yhdysvalloissa tehdystä tutkimuksesta [Ham16a],

eivätkä kaikki mekanismit ole kovin relevantteja Suomessa käytettyjen kaapelirakenteiden tapauksessa. Esimerkiksi liiallinen lämpörasitus tai voimakkaat mekaaniset rasitukset voivat nopeuttaa kaapelieristyksen vanhenemista ja johtaa häviökertoimen kasvuun ja/tai osittaispurkauksien syntymiseen.

Taulukko 2-2. Muovikaapeleiden ikääntymismekanismeja [Ham16a].

Type of Deterioration	Aging Process	Typical Causes	Example
Large Water Trees	<pre> graph LR A[Isolated imperfections] --> B[Large vented water trees] C[Moisture absorption] --> B B --> D[Increase in local electric field and failure from electrical trees formation] E[Decrease in dielectric strength] --> D </pre>	Moisture ingress	
Neutral Corrosion	<pre> graph LR A[Loss of neutral] --> B[Voltage rise at cable surface] B --> C[Cable surface electrical discharges] C --> D[Erosion] D --> E[Decrease in dielectric strength] </pre>	Unjacketed cable in soil Water retained in jacketed cables Sometimes enhanced by chemicals in the soil	
High Density of Small Water Trees	<pre> graph LR A[Many small distributed imperfections] --> B[High density of bow tie water trees] C[Moisture absorption] --> B B --> D[Increase of dissipation factor] D --> E[Decrease in dielectric strength] </pre>	Moisture ingress (external and via conductor)	
Thermal	<pre> graph LR A[Abnormal temperature] --> B[Oxidation] B --> C[Decomposition] C --> D[Evaporation] C --> E[Reaction products ions] E --> F[Increase of dissipation factor] F --> G[Decrease in insulation resistance] G --> H[Decrease in dielectric strength] </pre>	Poor connector installation Incorrect choice of accessory Excessive conductor current for given environmental and operating conditions	
Dry Electrical	<pre> graph LR A[Voids in insulation] --> B[Partial discharge] C[Voids in boundary] --> B D[Protusion] --> E[Partial breakdown] E --> B B --> F[Erosion of insulation] F --> G[Inception and growth of electrical trees] G --> H[Decrease in dielectric strength] </pre>	Manufacturing imperfections (voids, contaminants)	
Chemical	<pre> graph LR A[Oil] --> B[Swelling] C[Chemicals] --> B B --> D[Melting] D --> E[Crack] E --> F[Chemical Trees tree-shaped copper sulfate deposits] F --> G[Increase of dissipation factor] G --> H[Decrease in dielectric strength] </pre>	Petrochemical spills (transformer oil leaks, fertilizers)	

2.5 Suomessa käytössä olevia kaapelipäätetyppejä ja niiden vikaantumismekanismeja

Keskijännitekaapeleissa kaapelipäätteen tehtävänä on

1. hallita sähkökenttä kaapelin hohtosuojan päässä niin, että haitallisia osittaispurkauksia ei esiinny,
2. estää ulkoiset vuotovirrat jännitteisen kaapelikengän ja kaapelin maadoitettujen osien välillä eristeen pintaa pitkin sekä
3. suojata kaapelia sään vaikutuksilta (esim. kosteuden pääsy kaapelin sisään).

Sähkökentän hallinta voidaan toteuttaa ohjaamalla kentän jakaumaa elektrodimuodolla (geometrinen kentänohjaus), materiaalien permittiviteetin avulla tai resistiiviskapasitiivisella ohjauksella [Aro03a].

Keskijännitekaapeleissa on Suomessa käytetty yleisesti kaapelin iästä ja tyypistä riippuen eri valmistajien posliinipäätteitä, letkupäätteitä, erilaisia lämpö- ja kylmäkutistepäätteitä sekä ns. esivalmistettuja päätteitä.

2.5.1 Posliinipäätteet

Posliinipäätteitä on käytetty yleisesti öljy-paperieristeisissä kaapeleissa. Jonkin verran on käytössä myös päätteitä, joissa eristinsä on tehty posliinin sijasta valuhartsista (kuva 2.8). Päätteiden potentiaalisia vikoja ovat öljyvuodot esimerkiksi päätteen alapään tiivisteen kautta. Öljyvuodot voivat aiheuttaa osittaispurkauksia ja pahimmillaan päätteen läpilyönnin. HFCT-tekniikalla tehtävien kunnonvalvontamittausten kannalta posliinipäätteet ovat ongelmallisia, koska niiden kaapelin kosketussuojaan kytketty metallirunko on yleensä kiinnitetty suoraan kojeiston maadoitettuihin metallirakenteisiin. Tästä johtuen HFCT-mittaus joudutaan tekemään kaapelin kosketussuojatun osuuden päältä alueelta, jossa vaihejohtimessa ja kaapelin vaipassa kulkevat polariteetiltaan vastakkaiset osittaispurkausvirtapulssit suurelta osin kumoavat toisensa ja mittauksen herkkyys jää huonommaksi kuin jos mitattaisiin pelkästään vaihejohtimen virtaa.



Kuva 2.8. Posliini- ja valuhartsieristeiset 20 kV kaapelipäätteet.

2.5.2 Letkupäätteet

Letkupäätteitä on käytetty uudemmissa öljy-paperikaapeleissa ennen kuin kutistepäätteet tulivat yleiseen käyttöön. Niissä mahdollinen vika on letkun rikkoutuminen esimerkiksi kiristyspantojen tuntumasta ja siitä aiheutuvat öljyvuodot. Riski letkun rikkoutumiseen on suuri erityisesti, jos päätteitä joudutaan taivuttelemaan tai muuten mekaanisesti rasittamaan. Tämä päätetyyppi on pääsääntöisesti vielä ongelmallisempi HFCT-mittauksen kannalta kuin posliinipääte. Useimmiten letkupäätteet on alapäästään kiinnitetty vyöeristetyissä APAKM- ja PLKVJ-kaapeleissa metalliseen haaroituskappaleeseen, jolloin vaihejohtimet ovat kosketussuojatulta osaltaan niin lähekkäin, että HFCT-antureita ei saa mahtumaan johtimien väliin. Joissain tapauksissa vaihejohtimet ovat pidemmältä matkalta erillään, jolloin HFCT-antureiden asennus onnistuu ongelmitta (kuva 2.9).



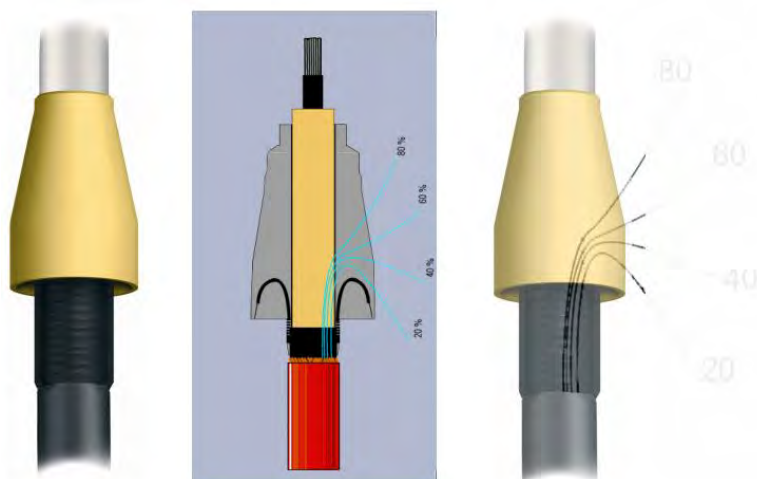
Kuva 2.9. 10 kV letkupäätteitä. Oikeanpuoleinen asennustapa mahdollistaa on-line-osittaispurkausmittaukset HFCT-antureilla, kun vaihejohtimet ovat kosketussuojatulta osuudeltaan riittävän etäällä toisistaan.

2.5.3 Esivalmistetut päätteet

Esivalmistetuissa päätteissä kentänohjaus on integroitu tehtaalla valmiiksi valettuun silikonipäätteeseen, joka asennuksen yhteydessä vedetään kaapelin päälle (kutistamatta). Tällaisia ovat esimerkiksi ABB Kabeldon-päätteet (kuva 2.10), joissa käytetään keilarakenteeseen perustuvaa geometrista kentänohjausta (kuva 2.11).



Kuva 2.10. Esivalmistetut 20 kV kaapelipäätteet (ABB Kabeldon).



Kuva 2.11. Geometrisen kentänohjaus [Ano16a].

2.5.4 Lämpö- ja kylmäkutistepäätteet

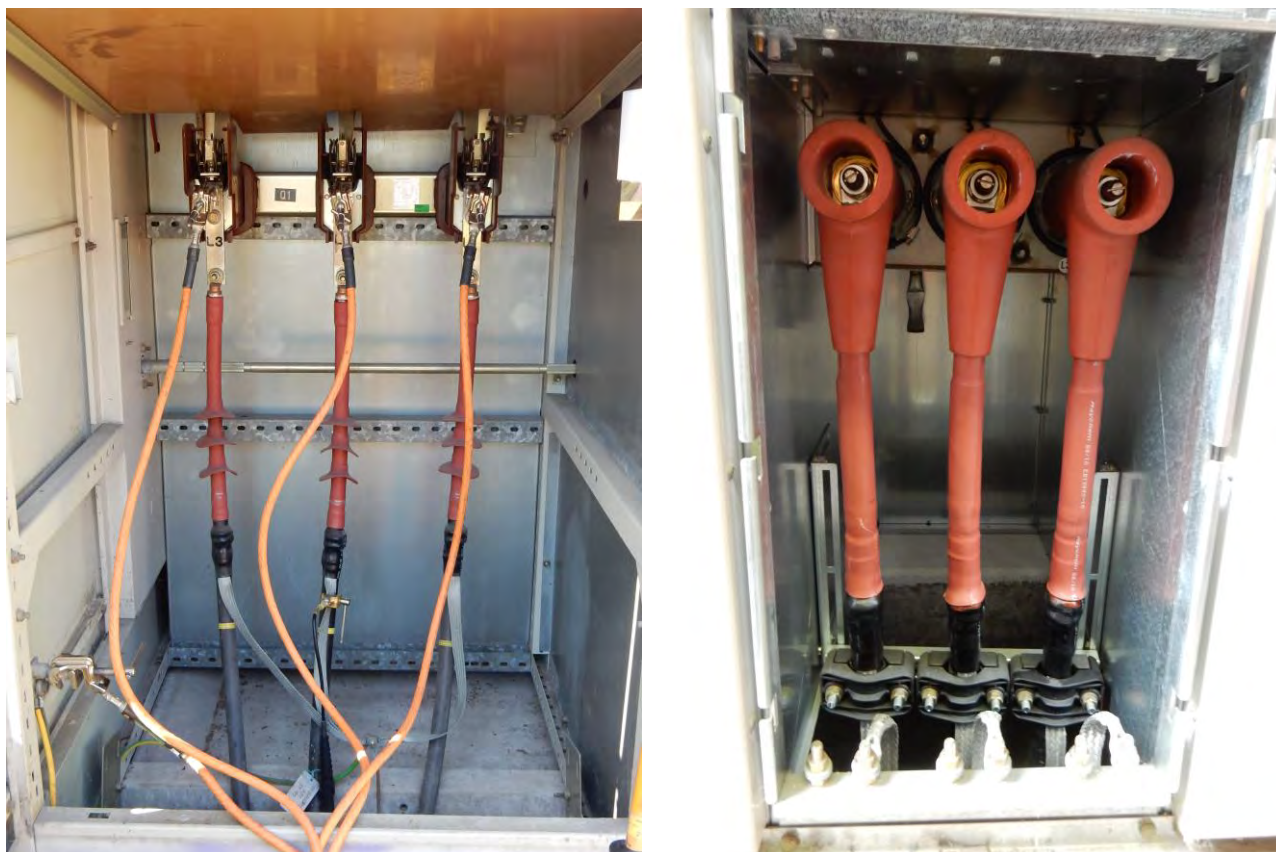
Lämpö- ja kylmäkutistepäätteitä käytetään yleisesti muovikaapeleissa, mutta niitä on jonkin verran myös uudemmissa (tai korjatuissa) öljypaperikaapeleissa. Molempia päätteitä on olemassa useita eri malleja: suorat sisäpäätteet ilman laippoja, suorat ulkopäätteet laipoilla (kuva 2.12 a), kosketussuojaamattomat pistokepäätteet (kuva 2.12 b) ja kosketussuojatut pistokepäätteet.

Lämpökutistepäätteissä voi esiintyä sekä huonosti tehdystä asennuksesta että ikääntymisestä aiheutuvia vikoja. Mahdollisia asennusvirheitä ovat esimerkiksi

- kuoritun hohtosuojan päähän jätetty terävä pykälä ja siitä aiheutuva sähkökentän tihtymä
- hohtosuojasorvin eristykseen jättämän ”pykällyksen” hiomatta jättäminen
- kentänohjausmassan ja/tai -letkun pois jättäminen tai huolimaton asennus
- lämpökutisteen puutteellinen lämmitys, jolloin lämpökutisteen sisäpinnan liima ei vulkanoidu kaapelin pääeristysten pintaan

Kaikki nämä johtavat paikalliseen sähkökentän tihtymään, joka yhdessä rakenteeseen jääneiden pienten ilmaonteloiden kanssa johtaa osittaispurkausten syntymiseen. Kaikissa vaiheissa on tärkeää, että vastakkain tulevat rajapinnat ovat puhtaita ja että niihin ei jää ilmaonteloita. Pitkäaikainen osittaispurkausrasitus voimakkaan sähkökentän alueella johtaa todennäköisesti kaapelieristysten eroosioon ja lopulta läpilyöntiin.

Lämpökutistepäätteissä on esiintynyt varsinkin pienessä kuormassa olevilla maaseutumuuntamoilla kosteissa olosuhteissa pintavirtoja ja -purkauksia, joita päätteiden pitäisi päätevalmistajien mukaan kestää hyvin eli niiden ei pitäisi olla haitallisia. Näitä osittaispurkauksia on tutkittu Aalto-yliopistossa vuonna 2015 tehdyssä diplomityössä [Väk15a].



Kuva 2.12. Lämpökutistettava 20 kV suora pääte ja pistokepääte.

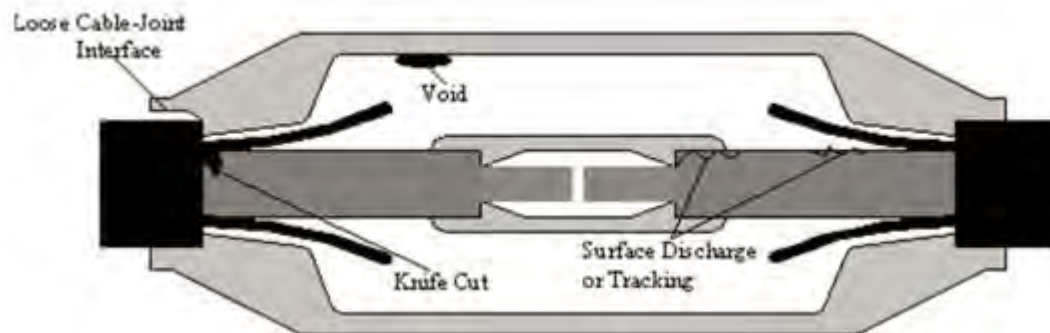
2.6 Kaapelijatkokset ja niiden mahdolliset viat

Kaapelijatkokset ovat päätteiden ohella toinen yleinen kaapelivikojen aiheuttaja. Vanhoissa keskijännitekaapeleissa on käytetty mm. bitumitäytteisiä valurautajatkoksia ja kun taas uudemmissa muovikaapeleissa on käytetty yleisesti erilaisia lämpökutistejatkoksia ja nykyisin on tarjolla myös kylmäkutistejatkoksia.

Keskijännitekaapeleissa kaapelijatkoksen tehtävänä on

1. hallita sähkökenttä kaapelin jatkoskohdassa niin, että haitallisia osittaispurkauksia ei esiinny,
2. estää sisäiset vuotovirrat jännitteisen johtimen ja kaapelin maadoitettujen osien välillä eristeen pintoja pitkin sekä
3. estää maaperän kosteuden pääsy kaapelin sisään.

Kaapelijatkosten rakennetta ja niissä mahdollisesti esiintyviä vikoja on havainnollistettu kuvassa 2.13. Esimerkiksi yleisesti käytetyissä lämpökutistejatkoksissa tyypilliset asennusvirheet ovat samoja, joita käsiteltiin luvussa 2.5.4 lämpö- ja kylmäkutistepäätteiden kohdalla. Niiden korjaaminen jälkikäteen on kuitenkin jatkoksissa vielä työläämpää ja kalliimpaa kuin päätteissä.



Kuva 2.13. Mahdollisia kaapelijatkosten vikoja [Ham16a].

Jatkosten asennusvirheitä ja niiden vaikutusta mm. osittaispurkausten syttymisjännitteeseen on tutkittu mm. vuonna 2016 Enston kanssa yhteistyössä tehdyssä insinöörityössä [Kuu16a].

3 Häviökerroin- ja osittaispurkausmittaukset

Häviökerroinmittauksia on perinteisesti tehty laboratorioympäristössä Schering-siltamittauksena. Osittaispurkausmittauksia on käytetty laboratorioissa tutkimustarkoituksiin ja niitä on tehty myös laitevalmistajien toimesta osana suurjännitelaitteiden tyyppi- ja kappalekokeita. Näissä kokeissa käytettävät mittaus- ja kalibrointimenettelyt on kuvattu standardissa 60270:2000+AMD1:2015 CSV. Tässä luvussa keskitytään kuitenkin lähinnä kaapeleille käyttöpaikalla tehtäviin mittauksiin ja off-line-mittausten osalta tarkastellaan

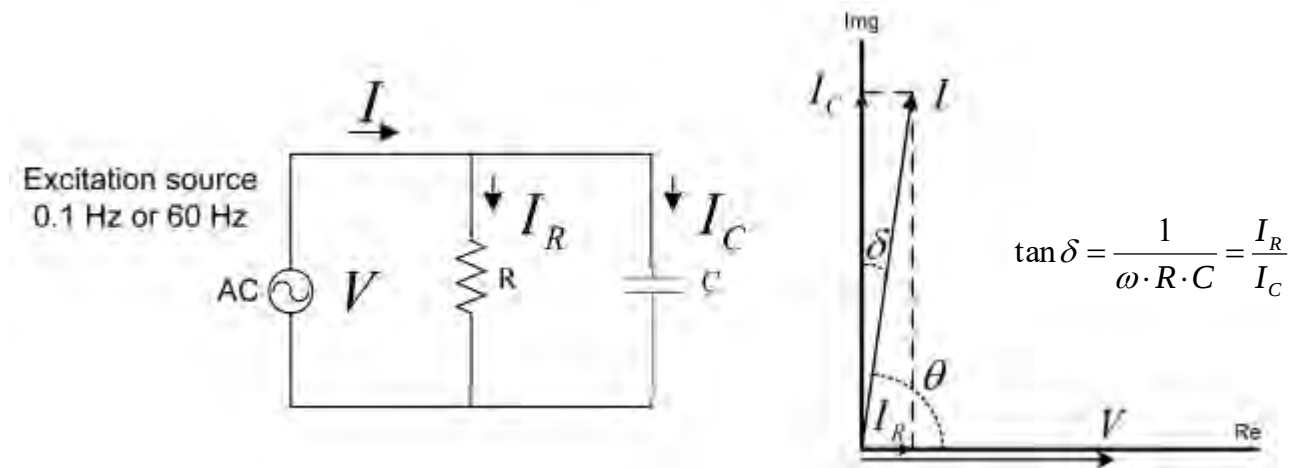
- VLF-häviökerroinmittausta
- DAC-häviökerroinmittausta
- DAC-osittaispurkausmittausta
- VLF-osittaispurkausmittausta

On-line-mittausten osalta käsitellään lähinnä

- HFCT(high frequency current transformer, suurtaajuusvirtamuuntaja)-mittausta ja
- Pry-Cam-mittausta

3.1 Häviökerroinmittaus

Häviökerroinmittauksen tarkoituksena on selvittää kaapelin pääeristyksen läpi virran resistiivisen komponentin suhde kapasitiiviseen komponenttiin kuvan 3.1 mukaisesti. Mittaus tehdään yleensä useammalla jännitteellä ja joka jännitetasolla useampaan kertaan. Tuloksena saadaan tällöin vaihekohtaisten häviökerroinlukemien lisäksi mm. häviökertoimien muutos jännitteen funktiona ja häviökertoimien keskihajonnat eri mittausjännitteillä (tai pelkästään U:lla). Varsinkin muovikaapeleissa resistiivinen virta on hyvin pieni kapasitiiviseen virtaan verrattuna, mikä asettaa haasteita mittalaitteen erottelukyvylle.



Kuva 3.1. Häviökerroinmittauksen sijaiskytkentä ja osoitindigrammi [Ham16a].

Häviökerroinlukemat kuvaavat koko kaapelijärjestelmän kuntoa eli mittauksella ei ole mahdollista esimerkiksi paikantaa huonoa kaapeliosuutta. Samasta syystä esimerkiksi päätteiden ulkoiset pintavirrat ja päätteiden tai jatkosten sisäiset pintavirrat saattavat johtaa suuriin häviökerroinmittaustuloksiin ja varsinkin sisäisten pintavirtojen erottaminen voi olla vaikeaa tai jopa mahdotonta. Suuren häviökertoimen syyllä on kuitenkin merkitystä tuloksen vakavuuden arvioinnin kannalta. Jos suuri häviökerroin aiheutuu hyvin paikallisesta kaapelieristysten heikkenemisestä, tulokseen on syytä suhtautua vakavammin kuin jos kyseessä on koko kaapelin tasainen ikääntyminen. Mm. standardin IEEE Std 400.2-2013 “IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF) (less than 1 Hz)” mukaan kaapelijärjestelmän paikalliseen eristystason heikkenemiseen liittyy usein häviökertoimen suuri keskihajonta [IEEE13a].

3.1.1 VLF-mittaus

VLF-mittauksessa koejännite generoidaan pienitaajuisella (yleensä 0,1 Hz) jännitelähteellä. Tässä tutkimuksessa käytetty Megger VLF Sinus 45 (TDM4540-P-TD-PD)-laitteisto on esitetty kuvassa 3.2. Kuvassa oikealla näkyy myös osittaispurkausmittauksissa käytettävä kytkentäkondensaattori/mittausyksikkö PDS60. VLF-häviökerroinmittauslaitteistoja valmistavat myös mm. itävaltalaiset Baur GmbH ja b2electronic GmbH.

VLF-mittauksen etuna on mm. se, että koejännitteen pienestä taajuudesta johtuen mitattavan eristysten kapasitiivinen virta on pienempi kuin käyttötaajuudella (esim. 50 Hz) ja mittauksen herkkyys on näin ollen parempi (pieni resistiivinen virta on paremmin mitattavissa). Lisäksi koelaitteiston tehontarve on pienempi ja se on mahdollista rakentaa kevyemmäksi ja pienikokoisemmaksi. Varjopuolena on se, että VLF-mittauksella saatavat häviökerrointulokset eivät välttämättä ole vertailukelpoisia suuremmilla taajuuksilla (esim. käyttötaajuudella) mitattujen häviökerrointulosten kanssa [IEEE13a]. Bartnikaksen mukaan erityisesti vanhoissa kaapeleissa häviökerroinmittausten tulosten tulkinnassa on syytä kiinnittää huomiota koejännitteen taajuuteen; VLF-taajuudella tehtyjen mittausten tulokset ovat niissä yleisesti selvästi suurempia kuin käyttötaajuudella tehtyjen mittausten tulokset [Bar03a].



Kuva 3.2. Tutkimushankkeessa käytetty Megger Sinus 45 VLF-häviökerroinmittauslaitteisto (tornin ylempi osa vasemmalla) ja siihen yhdistetty DAC-osittaispurkausmittauslaitteisto (tornin alempi osa vasemmalla ja kytkentäkondensaattori oikealla).

Standardissa IEEE Std 400.2-2013 “IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF) (less than 1 Hz)” kuvataan erittäin pienitaajuisen (VLF) koejännitteen käyttöön perustuvia kaapeleiden kestotestejä, diagnostisia testejä ja mittauksia. Standardissa käsitellään testauksiin liittyviä turvallisuuskäsitteitä, määritellään testausten suoritustapa (mm. koejännitteet) ja annetaan raja-arvoja kaapeleiden kunnan arvioimisen ja jatkotoimenpiteistä päättämisen tueksi.

Standardissa todetaan, että kaikissa kenttämittauksissa hyvä käytäntö on ensin varmistaa, että kaapelipäätteet ovat puhtaat ja ulkoisesti hyvässä kunnossa. Muut kuin testattava vaihe suositellaan maadoitettavaksi. Standardissa suositellut mittausjännitteet ovat $0,5 U_0$, $1,0 U_0$ ja $1,5 U_0$. Kullakin jännitetasolla tulisi tehdä vähintään 6 mittausta, niin että mittausten välissä on 0.1 Hz taajuutta käytettäessä 10 s tauko [IEEE13a].

3.1.2 DAC-mittaus

DAC-mittauksessa koejännitteen aaltomuotona on vaimeneva sinimuotoinen värähtely, jonka taajuus määräytyy testilaitteiston induktanssin ja testattavan kaapelin kapasitanssin perusteella. Laitteiston toimintaperiaatetta käsitellään myöhemmin luvussa 3.2.1.

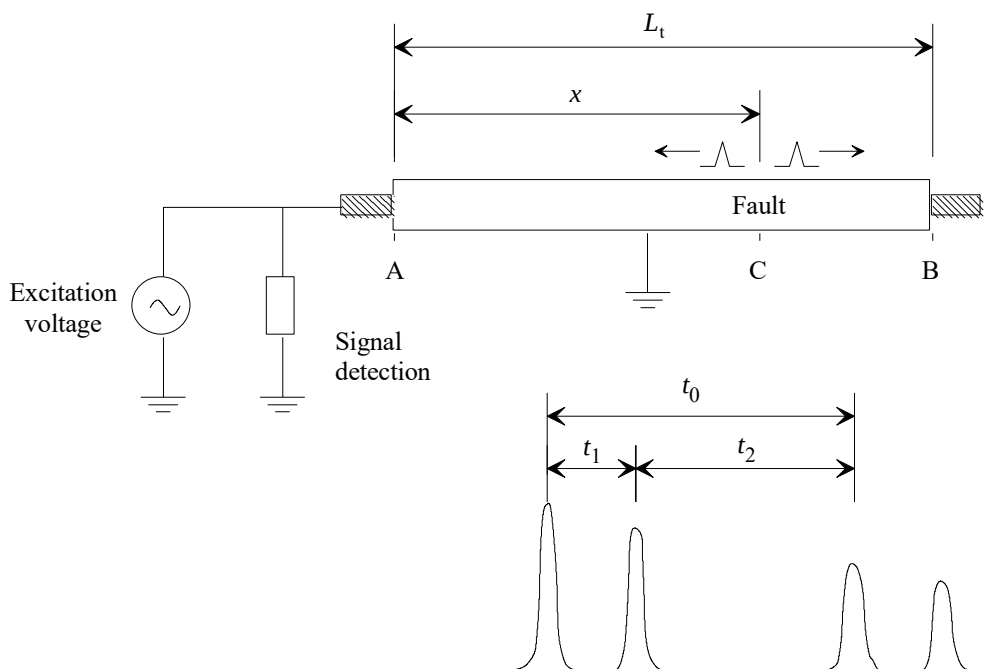
Yleensä DAC-mittauslaitteistoilla on mahdollista tehdä osittaispurkausmittauksen lisäksi myös häviökerroinmittaus, mutta menetelmää ei pidetä yhtä luotettavana kuin VLF-mittauksena. Yhtenä mittaustarkkuutta heikentävänä tekijänä on koejännitteen suurempi taajuus mistä johtuen kapasitiivinen virta kasvaa suhteessa selvästi suuremmaksi kuin esimerkiksi 50 Hz:llä tai VLF-mittauksessa ja näin ollen pienen resistiivisen virran luotettava mittaaminen vaikeutuu entisestään.

Laitteistolla tehtyjen mittausten keskinäistä vertailukelpoisuutta heikentää myös se, että taajuus vaihtelee testattavan kaapelin pituuden mukaan.

3.2 Off-line osittaispurkausmittaus

Osittaispurkausmittaus on yksi yleiskäyttöisimmistä sähköverkkojen kunnonvalvontamenetelmistä. Se soveltuu erilaisten orastavien eristysvikojen ja valmistus- ja asennusvirheiden havaitsemiseen monissa suurjännitelaitteissa mukaan lukien esimerkiksi kaapelijärjestelmät. Sitä voidaan käyttää sekä ikääntyvien laitteiden kunnonvalvontaan että esimerkiksi kaapelijärjestelmien käyttöönottomittauksiin.

Häviökerroinmittauksista poiketen osittaispurkausmittauksella on mahdollista myös paikantaa purkauslähde esimerkiksi kaapelissa. Paikannus perustuu kulkuaikamittaukseen (TDR, time domain reflectometry). Kun kaapelissa tapahtuu osittaispurkaus, se aiheuttaa virta- ja jännitepulssin, joka etenee purkauspaikasta kuvan 3.3 mukaisesti molempiin suuntiin.



Kuva 3.3. Osittaispurkauksen paikannus suoraan mittauspisteeseen tulleen ja kaapelin vastakkaisesta päästä heijastuneen pulssin perusteella.

Purkauspaikan etäisyys x mittauspäästä on mahdollista laskea purkauspaikasta suoraan mittauspisteeseen tulleen ja kaapelin vastakkaisesta päästä heijastuneen pulssin välisen aikaeron t_1 perusteella, kun tunnetaan aallon etenemisnopeus v_p kaapelissa (kaava 3-1).

$$x = L_t - \frac{v_p t_1}{2} \quad (3-1)$$

Jos kaapelin pituus L_t tunnetaan, aallon etenemisnopeus kaapelissa voidaan määrittää esimerkiksi syöttämällä kalibrointipulssi kaapeliin kaapelin päästä ja mittaamalla kaapelin vastakkaisesta päästä heijastuvan pulssin saapumiseen kuluva aika t_1 :

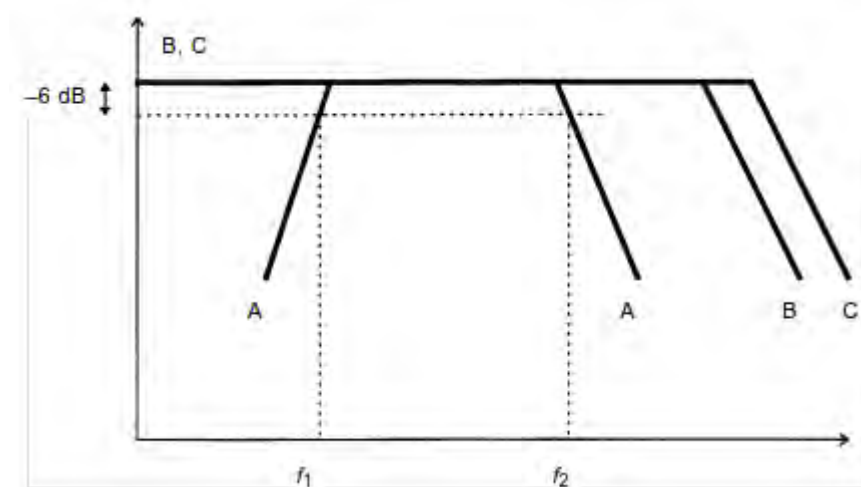
$$v_p = \frac{2L_t}{t_1} \quad (3-2)$$

Jos etenemisnopeutta ei tunneta, voidaan purkauspaikan sijainti laskea mittaamalla myös heijastuspulssin jälkeinen toinen heijastuspulssi (suoraan purkauspaikasta tulleen pulssin heijastuma kaapelin päästä) ja laskemalla paikka näiden kolmen pulssin perusteella kaavasta 3-3.

$$x = \frac{t_2}{t_0} L_t \quad (3-3)$$

Standardi IEC 60270 koskee sähkölaitteissa, komponenteissa tai järjestelmissä tapahtuvia osittaispurkauksia ja niiden mittaamista vaihtojännitteillä 400 Hz asti ja tasajännitteillä. Standardissa määritellään mm. aihepiiriin liittyvä terminologia, mitattavat suureet, mittauspiirit ja analogiset ja digitaaliset mittausmenetelmät ja mittauksen kalibrointimenetelmät sekä vaatimukset kalibroinnissa käytettävälle laitteistolle. Lisäksi annetaan testimenettelyihin liittyviä ohjeita ja ohjeita osittaispurkausten erottelamiseen ulkoisista häiriöistä. Standardi on kirjoitettu lähinnä suurjännitelaitteille tehtaalla tai laboratoriossa tehtävien standardoitujen tyyppi- ja kappalekokeiden näkökulmasta.

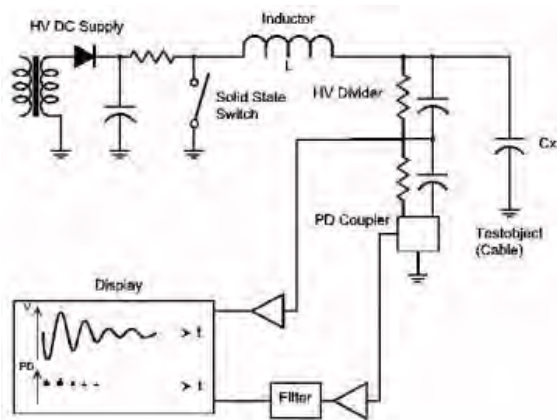
Kentällä tehtävien kunnonvalvontamittausten tukenakin standardi on hyödyllinen ja esimerkiksi osittaispurkausmittauksen kalibroinnin periaatteet on hyvä ymmärtää, jos verrataan kentällä erilaisilla mittalaitteilla tehtyjen mittausten tuloksia tehtaalla tai laboratoriossa tehtyjen mittausten tuloksiin. Kuvassa 3.4 on esitetty edellytykset osittaispurkausmittauksen oikeaoppisen kalibroinnin onnistumiselle. Tästä johtuen esimerkiksi hyvin laajakaistaisia mittausjärjestelmiä (kaistanleveys esim. kymmeniä tai satoja MHz) ei ole mahdollista kalibroida IEC 60270:n mukaisesti.



Kuva 3.4. Edellytys osittaispurkausmittauksen oikeaoppisen kalibroinnin onnistumiselle: mittausjärjestelmän taajuusvasteen suhde (a) osittaispurkaussignaalin (b) ja kalibrointipulssin (c) taajuusspektriin.

3.2.1 DAC-mittaus

DAC-mittauksen etuna esimerkiksi VLF-mittaukseen verrattuna on nopeus ja se, että purkausten sammumisjännite on mahdollista määrittää vaimenevan sinivärähtelyn aikana. DAC-laitteiston toimintaperiaate ilmenee kuvasta 3.5. Testattava kaapeli ladataan resistanssin kautta DC-jännitelähteellä ja puretaan ilmasydämisen kelan kautta, jolloin kaapelin kapasitanssi ja kelan induktanssi muodostavat resonanssipiirin. 50 Hz koejännitteeseen verrattuna etuna on koelaitteiston pienikokoisuus, kun laitteiston ei tarvitse pystyä syöttämään pitkien kaapeleidenkaan tapauksessa suurta kapasitiivista virtaa jatkuvasti. Huonona puolena on se, että värähtelyn taajuus poikkeaa normaalin käyttöjännitteen 50 Hz taajuudesta ja taajuus riippuu kaapelin kapasitanssista.



Kuva 3.5. DAC-mittauslaitteiston periaatekuva [Ano17a].

Osittaispurkausmittaus tehdään koelaitteiston sisältämällä kytkentäkondensaattorilla, mittausimpedanssilla ja osittaispurkausmittalaitteella. Osittaispurkausmittaukseen käytettävä laitteisto on siis samankaltainen kuin IEC60270:n mukaisesti tehtävissä laboratoriomittauksissa, mutta mittauskaistanleveys on usein suurempi.

Standardissa IEEE Std 400.4-2015 “IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Rated 5 kV and Above with Damped Alternating Current (DAC) Voltage” kuvataan vaimenevan vaihtojännitteen käyttöön perustuvia kaapeleiden diagnostisia testejä ja mittauksia. Standardissa muut kuin mitattava vaihe suositellaan maadoitettavaksi. Suurimmat DAC koejännitteet eri jännitetasojen kaapeleille on annettu erikseen käyttöönottotestauksiin ja kunnonvalvontatestauksiin standardin liitteessä A. Kaapeleille, joiden nimellisjännite on 20 kV (pääjännite), suurin DAC-koejännite (vaihe-maa) on kunnonvalvontatestuksissa 28 kVpeak. Koejänniteportaita ei ole standardissa yksikäsitteisesti annettu, mutta todetaan, että ne voidaan määritellä kilovoltteina tai U_0 :n osina, esimerkiksi $0.2 U_0$. Osittaispurkausmittauksen tuloksille standardissa ei ole annettu raja-arvoja.

Tässä tutkimuksessa käytetyn Megger VLF Sinus 45-laitteistoon yhdistetyn PDS60-yksikön näytteenottotaajuus on 125 MS/s (megasamples/s) ja mittauskaistanleveys on valittavissa joko 3 MHz tai 25 MHz. Vaimenevaan sinivärähtelyyn perustuvia mittauslaitteistoja valmistaa myös mm. sveitsiläinen Onsite HV International Ag.

3.2.2 VLF-mittaus

VLF-mittauksessa koejännite synnytetään pienitaajuisella (yleensä 0,1 Hz) jännitelähteellä ja osittaispurkausmittaus tehdään samaan tapaan koelaitteiston sisältämällä kytkentäkondensaattorilla, mittausingpedanssilla ja osittaispurkausmittalaitteella kuin DAC-mittauksessakin. Käytännössä VLF-mittauksen huonona puolena on pienestä koejännitteen taajuudesta johtuva testauksen hitaus ja se, että koejännitteen taajuus poikkeaa verkon normaalin käyttöjännitteen 50 Hz taajuudesta. Diagnostiikkaan riittävän osittaispurkauspulssimäärän kerääminen pienellä koejännitteen taajuudella kestää pitkään.

3.3 On-line osittaispurkausmittaus

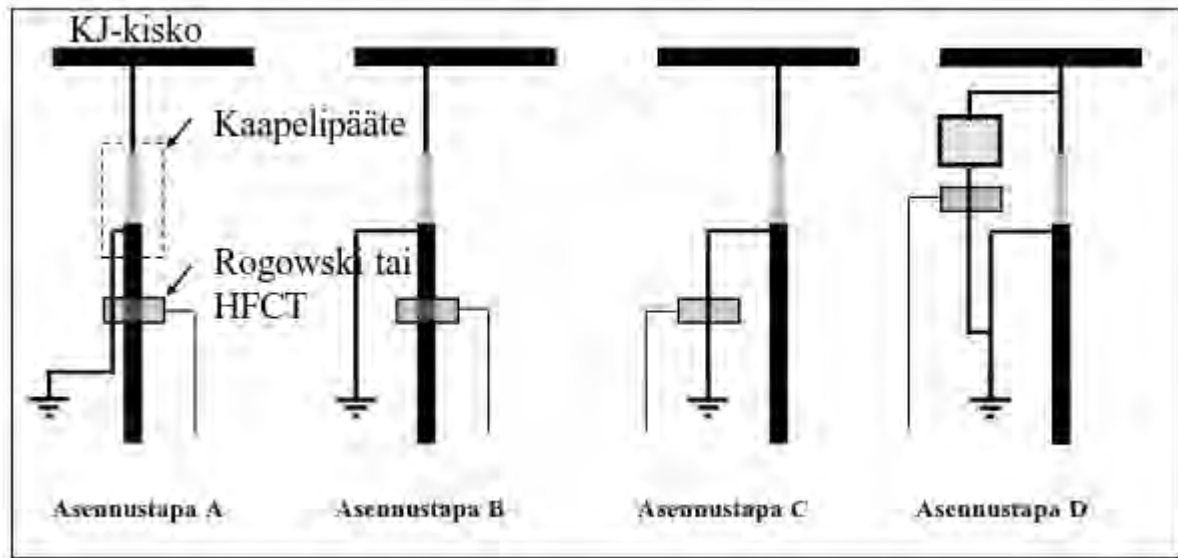
On-line osittaispurkausmittauksella tarkoitetaan sähköverkon normaalin käytön aikana tehtävää osittaispurkausmittausta, jossa kaapeli on normaalisti kytkettynä verkkoon. Menetelmän hyvänä puolena on se, että jos anturit pystytään asentamaan kaapelin ollessa jännitteisenä, käyttökattoa ei tarvita. Menetelmä mahdollistaa näin ollen kaapelin mittaamisen pitempiaikaisestikin normaalin käyttötilanteen aikana, jolloin esimerkiksi kuorman ja kaapelin lämpötilan vaihteluiden vaikutus osittaispurkauksiin tulee huomioitua. Menetelmän rajoituksena on se, että koejännitettä ei yleensä ole mahdollista säätää. Sellaisissa sammutetuissa verkoissa, joissa sammutusta ohjataan tehoelektronikalla, on tosin mahdollista säätää verkon nolajännitettä, mikä mahdollistaa vaihejännitteiden säätämisen esimerkiksi osittaispurkausmittausta varten [Sel13a].

3.3.1 HFCT-mittaus

HFCT (high frequency current transformer) -mittauksessa anturina käytetään kaapelin ympärille tai kaapelipäättteen maadoitusjohtimeen asennettua suurtaajuusvirtamuuntajaa. Mittalaitteena voidaan käyttää oskilloskooppia tai erityisesti tarkoitukseen suunniteltua osittaispurkausmittalaitetta. Moniin laboratoriokäyttöön suunniteltuihin osittaispurkausmittalaitteisiin on saatavilla HFCT-antureita.

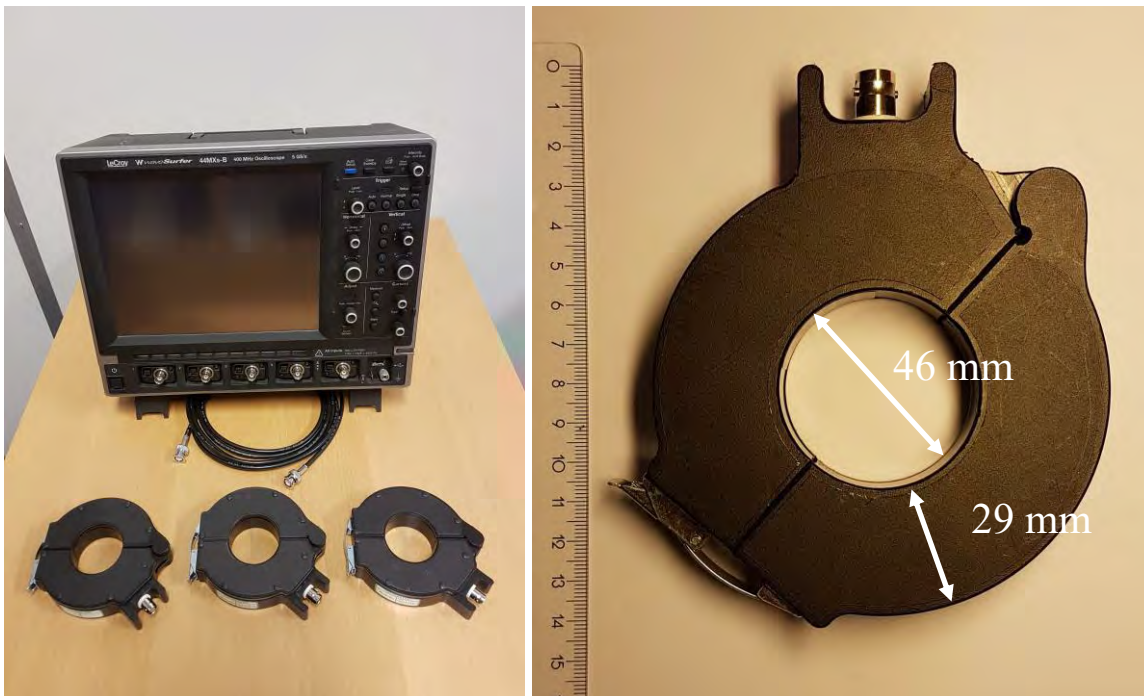
HFCT-mittauksella saavutettava herkkyys ja signaali/kohinasuhde riippuu siitä, miten anturi asennetaan mitattavaan kaapeliin. Kuvassa 3.6 on esitetty vaihtoehtoisia asennustapoja, joiden paremmuusjärjestys on seuraava (paras mittausherakkyys ensin):

1. Asennustapa A (paras herkkyys ja signaali/kohinasuhde)
2. Asennustapa C (alttiimpi häiriöille)
3. Asennustapa D (toimivuus riippuu kytkentäkondensaattorina käytettävän laitteen ominaisuuksista)
4. Asennustapa B (huonoin herkkyys, vaihejohtimessa ja kosketussuojassa kulkevat polariteetiltaan vastakkaiset virrat osin kumoavat toisiaan)



Kuva 3.6. HFCT-antureiden mahdolliset asennustavat.

Markkinoilla olevien HFCT-antureiden herkkyudet ja taajuuskaistat vaihtelevat jonkin verran mm. anturin mekaanisen koon ja sähköisen rakenteen (mm. käämityksen kierrosmäärä ja käytetty ferriittimateriaali) mukaan. Tässä tutkimuksessa käytettyjen kuvissa 3.7...3.8 näkyvien HVPD Ltd:n valmistamien antureiden taajuuskaista on noin 70 kHz...17 MHz. HFCT-antureita valmistetaan useita eri kokoja. Anturin koko vaikuttaa jonkin verran myös anturin sähköisiin ominaisuuksiin, kuten herkkyyteen (kitakooltaan suuremmat anturit ovat epäherkempiä). Kuvassa 3.7 on esitetty myös tässä tutkimuksessa tehdyissä HFCT-mittauksissa käytetty LeCroy WaveSurfer 44 MXs-B-oskilloskooppi.



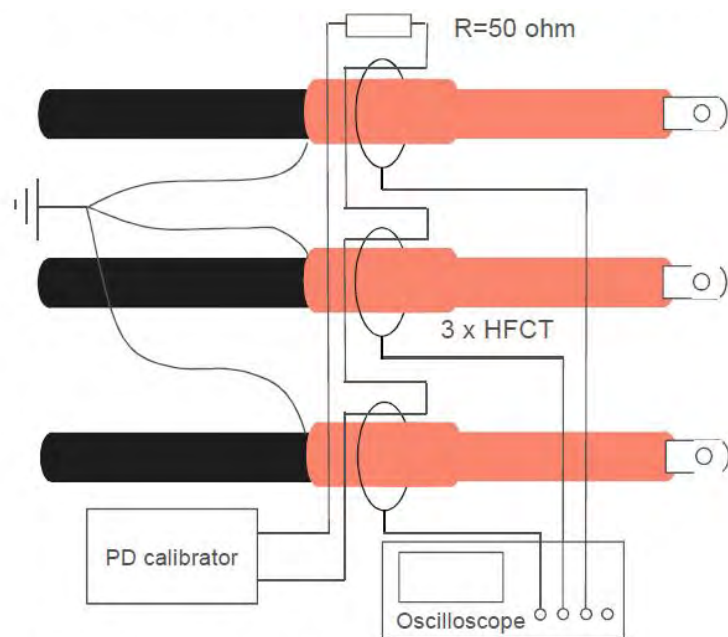
Kuva 3.7. Tutkimushankkeessa käytetty HFCT-mittauslaitteisto.

Mm. osittaispurkaustyyppin tunnistamista varten on olennaista tietää, millä vaihejännitteen vaihekulmilla osittaispurkauksia esiintyy. Myös PRPD (Phase Resolved Partial Discharge)-kuvan muodostaminen edellyttää, että mittaus on synkronoitu verkon 50 Hz jännitteeseen. Tässä raportissa tehdyissä mittauksissa synkronointi tehtiin pienjänniteverkon vaihejännitteeseen, joka oli kaikilla on-line-mitatuilla muuntamoilla saatavissa muuntamon pistorasiasta. Jännite kytkettiin oskilloskoopin kanavaan 4 differentiaaliproben välityksellä. Differentiaaliprobe kytkettiin pistorasiaan aina samoin päin (proben punainen johto vaihejohtimeen ja musta johto nollajohtimeen).

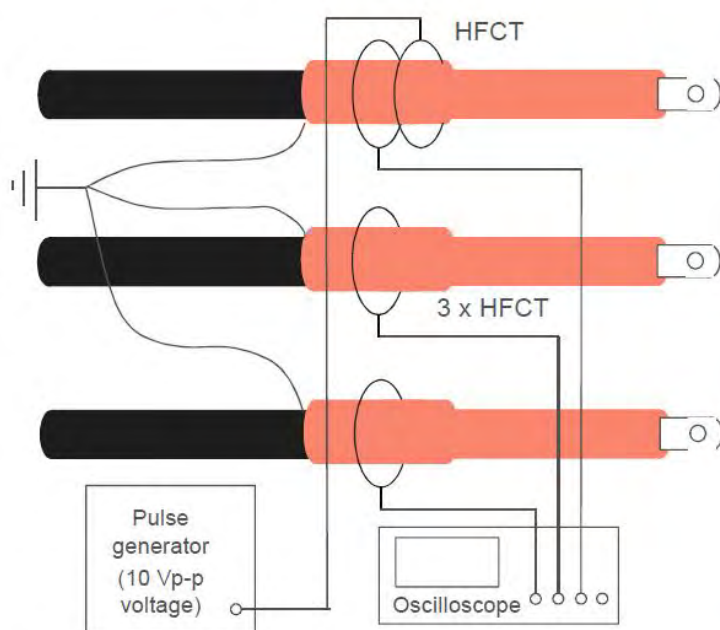


Kuva 3.8. HFCT-anturit asennettuna mitattavan kaapelin vaiheiden ympärille asennustavalla, jolla saavutetaan paras mittausherkkyyks.

HFCT-mittauksen kalibrointi tehdään kuvassa 3.9 esitetyllä menetelmällä. Kalibroinnin avulla oskilloskoopin millivolttilukemat on mahdollista muuntaa picocoulombeiksi (pC). Mitattavalla kaapelilla ei ole merkittävää vaikutusta tällä tavoin tehtävään kalibrointiin, joten sitä ei tarvitse tehdä jokaiselle kaapelille erikseen. Kuvassa 3.10 on esitetty menettely, jolla on mahdollista määrittää pulssin etenemisnopeus kaapelissa, jos kaapelin pituus tiedetään tai vaihtoehtoisesti määrittää kaapelin pituus, jos pulssin etenemisnopeus tunnetaan. Samalla nähdään kuinka paljon pulssi vaimenee kaapelissa edetessään ja millainen heijastus kaapelin toisesta päästä saadaan. Tässä tutkimuksessa tämä mittaus tehtiin kaikille kaapeleille. Mittauksessa käytettiin Siglent SDG2042X-signaaligeneraattoria ja IPEC HFCT 100-50-suurtaajuusvirtamuuntajaa. Virtamuuntajaan syötetyn kantiaaltopulssin nimellinen (signaaligeneraattoriin aseteltu) leveys oli 200 ns ja amplitudi 10 V



Kuva 3.9. HFCT-mittauksen kalibrointi [Pak15a].



Kuva 3.10. Tutkauspulssin syöttö kaapelin suurtaajuusvirtamuuntajalla kaapelin pituuden tai pulssin kulkuajan määrittämiseksi [Pak15a].

3.3.2 Pry-Cam-mittaus

Pry-Cam-mittaus perustuu kaapelissa kulkevan suuritaajuisen osittaispurkausvirran aiheuttaman sähkömagneettisen lähikentän mittaukseen. Varsinainen mittalaite on rakennettu kameraa muistuttavaan koteloon. Se on akkukäyttöinen ja on langattomasti yhteydessä iPadiin, jolla mittalaitteen toimintoja ohjataan ja tuloksia tarkastellaan. Teknisten tietojen mukaan laitteen

näytteenottotaajuus on 200 MS/s ja mittauskaistanleveys 100 MHz [Pry17a]. Mittaus tehdään vaihe kerrallaan asettamalla laite kiinni mitattavaan kaapeliin. Mittauslaitteisto ja esimerkki käytännön mittauksesta puistomuuntamolla on esitetty kuvassa 3.11.



Kuva 3.11. Pry-Cam-laitteisto ja esimerkkikuva käyttötilanteesta.

4 Mittaustulosten tulkinta ja raja-arvot

4.1 VLF-häviökerroinmittaukset

4.1.1 IEEE Std 400.2-2013 raja-arvot ja ohjeistukset

VLF-häviökerroinmittausten tulosten tulkintaan on annettu raja-arvoja mm. standardissa IEEE Std 400.2-2013 "IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF) (less than 1 Hz)". Standardissa on määritelty ja annettu raja-arvot seuraaville häviökerrointa ja sen muutosta jännitteen tai ajan funktiona kuvaavat tunnusluvut:

- TD - mean tangent delta at U_0 – normaalilla käyttöjännitteellä tehtyjen häviökerroinmittausten keskiarvo
- DTD - delta tangent delta (tästä käytetään usein myös nimitystä Tip Up) – häviökertoimen muutos jännitteen noustessa $0,5 U_0$:sta $1,5 U_0$:aan
- TDTS – tangent delta temporal stability – jännitetasolla U_0 tehtyjen häviökerroinmittausten keskihajonta. Tässä tutkimuksessa tätä tunnuslukua on merkitty havainnollisuuden vuoksi kirjainyhdistelmällä STDEV

Taulukossa 4-1 on esitetty PE-pohjaiseen eristykseen perustuvien ja taulukossa 4-2 öljypaperieristeisten kaapeleiden häviökerroinmittausten tulkintaohjeita käytössä olleille kaapelijärjestelmille. Nämä raja-arvot eivät sovellu käytettäväksi uusien kaapeleiden käyttöönottomittauksissa. Uusille kaapelijärjestelmille standardin informatiivisessa liitteessä on annettu alustavia suuntaa antavia raja-arvoja. Taulukoissa tunnusluvut on järjestetty niin, että eristyksen heikkenemiselle herkin tunnusluku (TDTS, tangent delta temporal stability) on taulukon vasemmanpuoleisimmassa sarakkeessa ja vähiten herkkä (TD, tangent delta) oikeanpuoleisimmassa sarakkeessa.

No action required tarkoittaa, että vaikka kaapelijärjestelmän käyttöä voidaan mittauksen jälkeen jatkaa, se voi olla mielekäästä mitata myöhemmin uudelleen häviökertoimen trendiseurannan vuoksi.

Action required tarkoittaa, että kaapelijärjestelmän häviökerrointunnusluvut ovat epätavallisen suuria, mikä voi indikoida eristyksen huonoa kuntoa ja ko. kaapelijärjestelmän uusimista tai

korjaamista tulisi harkita välittömästi mittauksen jälkeen tai lähitulevaisuudessa. Tätä tulosta voidaan myös käyttää käynnistämään kaapelin tarkemmat tutkimukset.

Further study advised tarkoittaa, että kuntoarvioinnin tekeminen edellyttää lisätietoa, kuten ko. kaapelijärjestelmän aiempaa vikahistoriaa tai muiden diagnostisten mittausten tuloksia.

Standardissa todetaan, että erilaisten eristysten, asennustapojen ja kaapelityyppien häviökerrointunnusluvut (TD, DTD ja TDTS) voivat poiketa toisistaan huomattavasti ja sen vuoksi häviökerroinmittauksiin perustuva kunnon arviointi toimii parhaiten, kun mittaustuloksia verrataan saman tyyppisen kaapelijärjestelmän aiempiin mittaustuloksiin.

Tulosten arvioinnissa on hyödyllistä myös vertailla saman kaapelin vaiheita keskenään ja häviökertoimen muuttumista jännitteen funktiona. Häviökertoimen voimakas kasvu (kulmakertoimen kasvu) jännitteen funktiona saattaa viitata esimerkiksi kaapelivarusteiden osittaispurkauksiin jännitteen noustessa. [IEEE13a]. Yleisesti voidaan todeta, että hyväkuntoisen kaapelijärjestelmän häviökertoimien tulisi olla melko stabiileja sekä ajan että jännitteen suhteen [IEEE12a].

Taulukko 4-1. 0,1 Hz koejännitteellä tehtyihin häviökerroinmittauksiin liittyviä raja-arvoja käytössä ikääntyneiden PE-pohjaiseen (PE, XLPE, TRXLPE) eristykseen perustuvien kaapelijärjestelmien kunnon arviointiin [IEEE13a].

Condition assessment	VLF-TD Time Stability (VLF-TDTS) measured by standard deviation at U_0 , $[10^{-3}]$		Differential VLF-TD (VLF-DTD) (difference in mean VLF-TD) between $0.5 U_0$ and $1.5 U_0$ $[10^{-3}]$		Mean VLF-TD at U_0 $[10^{-3}]$
No Action Required	< 0.1	and	< 5	and	< 4
Further Study Advised	0.1 to 0.5	or	5 to 80	or	4 to 50
Action Required	> 0.5	or	> 80	or	> 50

Taulukko 4-2. 0,1 Hz koejännitteellä tehtyihin häviökerroinmittauksiin liittyviä raja-arvoja käytössä ikääntyneiden öljypaperieristykseen perustuvien kaapelijärjestelmien kunnon arviointiin [IEEE13a].

Condition assessment	VLF-TD Time Stability (VLF-TDTS) measured by standard deviation at U_0 $[10^{-3}]$		Differential VLF-TD (VLF-DTD) (difference in mean VLF-TD) between $0.5 U_0$ and $1.5 U_0$ $[10^{-3}]$		Mean VLF-TD at U_0 $[10^{-3}]$
No action required	< 0.1	and	-35 to 10	and	< 85
Further study advised	0.1 to 0.4	or	-35 to -50 or 10 to 100	or	85 to 200
Action required	> 0.4	or	< -50 or > 100	or	> 200

DTD- ja TDTS-arvot eivät ole yhtä riippuvaisia kaapelityypistä kuin TD-arvo ja tässä mielessä ne soveltuvat paremmin esimerkiksi sekakaapelijärjestelmien kunnon arviointiin kuin esimerkiksi puhdas häviökertoimen (TD) keskiarvo.

Standardissa todetaan, että kaikissa kenttämittauksissa hyvä käytäntö on ensin varmistaa, että kaapelipäätteet ovat puhtaat ja ulkoisesti hyvässä kunnossa, mutta siinä ei anneta erityisiä vaatimuksia esimerkiksi ympäristöolosuhteille mittausten aikana. Ilman suhteellisella kosteudella ja lämpötilalla kuitenkin tiedetään olevan vaikutusta häviökerroinmittausten tuloksiin, mutta esimerkiksi kaapelipäätteiden osalta niistä on vaikea löytää julkaisuja.

4.1.2 Häviökertoimen muutos jännitteen ja ajan funktiona (DTD ja STDEV-arvot)

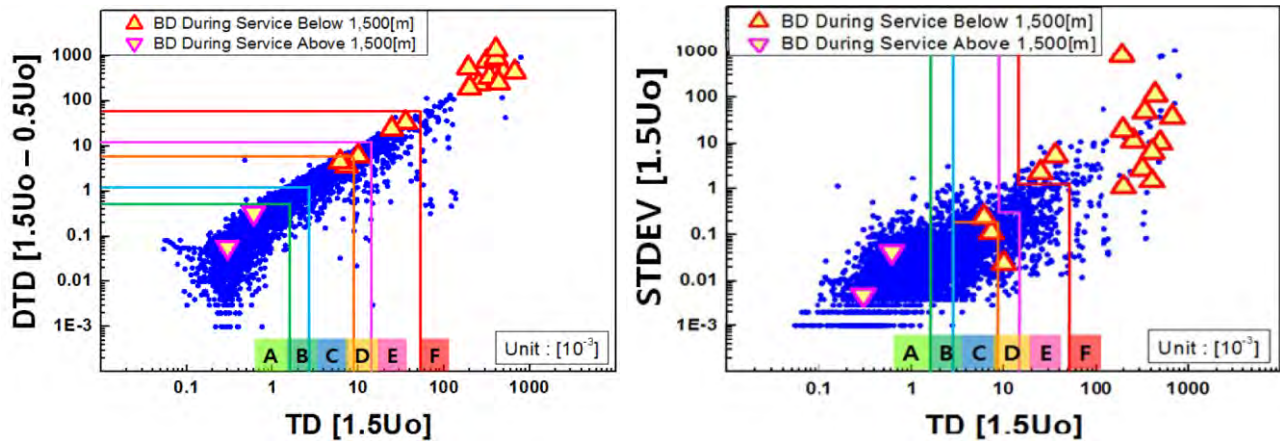
Korealainen KEPCO (Korea Electric Power Company) on tehnyt 0.1 Hz VLF-häviökerroinmittauksia vuodesta 2010 lähtien noin 6 667 km:lle keskijännitekaapelia (pääjännite 22,9 kV). Mittausaineistoa on kertynyt yhteensä noin 14 000 testituloksen verran. Mittausaineiston perusteella kaapeleille on muodostettu taulukon 4-3 mukainen luokittelu. Luokittelu on kaksivaiheinen. Ensimmäisessä vaiheessa verrataan taulukon vasemman puolen mukaisesti TD- ja DTD-arvoja raja-arvoihin niin, että huonompi arvo määrää ”aging level”-luokan. Toisessa vaiheessa tarkastellaan STDEV- ja Skirt-arvoja. Skirt-arvo on suurimman ja pienimmän jännitetasolla $1.5 U_0$ mitatun häviökerroinarvon erotus. Jos hajonta on tavallista suurempi, on todennäköistä, että se johtuu yksittäisistä huonoista kohdista eristyksessä, minkä katsotaan lisäävän eristyksen läpilyöntiriskiä. Tällä perusteella ”aging level” luokitusta heikennetään TD- ja DTD-arvojen antamasta luokituksesta.

Taulukko 4-3. KEPCOn häviökerroinraja-arvot [Kim14a].

Unit : $\times 10^{-3}$

Aging Level	TD	DTD	STDEV	Skirt	Aging Level
	1.5U ₀	1.5U ₀ -0.5U ₀	1.5U ₀	1.5U ₀	
A	≤ 1.0	≤ 0.5			
B	≤ 2.0	≤ 1.2			
C	≤ 6.0	≤ 6.0	≥ 0.2	≥ 0.5	D
D	≤ 10.0	≤ 12.0	≥ 0.3	≥ 1.0	E
E	≤ 27.0	≤ 60.0	≥ 1.4	≥ 4.2	F
F	> 27.0	> 60.0			
1 st Ass.	OR		OR		2 nd Ass.
	AND				

Osassa testatuista kaapeleista on tapahtunut läpilyönti myöhemmin normaalin käytön aikana, läpilyöntitapaukset merkitty kuvan 4.1 kuvaajiin (A-F ovat mittausten perusteella määritellyt kaapeleiden kuntoluokat). Kuten kuvista ilmenee, samalla häviökertoimen arvolla läpilyönnin todennäköisyys näyttäisi olevan suurempi niiden kaapeleiden kohdalla, joiden DTD- tai STDEV-arvo on suurempi [Kim14a].



Kuva 4.1. KEPCOn mittaamien kaapeleiden TD-DTD- ja TD-STDEV-kuvaajat, joihin on merkitty kolmioilla ja kärkikolmioilla alle ja yli 1500 m pitkät kaapelit, jotka ovat vaurioituneet käytön aikana mittausten jälkeen [Kim14a].

4.1.3 Muut häviökerrointunnusluvut

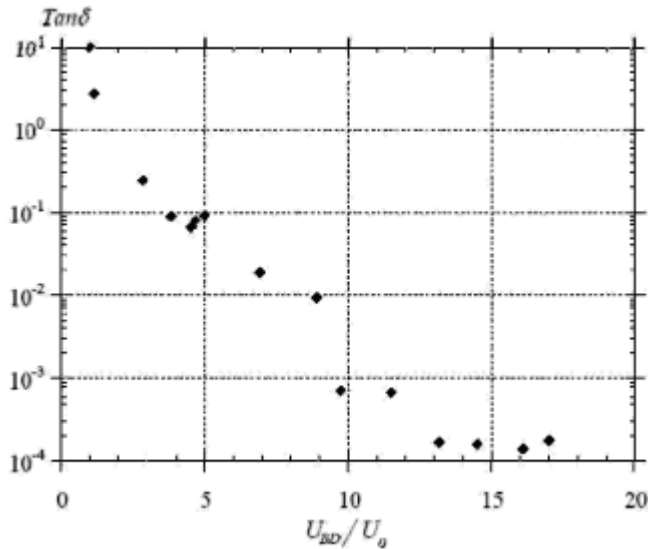
Standardissa IEEE Std400.2-2013 ja edellisessä luvussa esitetyn Skirt-tunnusluvun lisäksi häviökerroinmittausten tulosten tulkintatyökaluksi on esitetty tunnuslukua, joka kuvaaisi häviökertoimen muutoksen epälineaarisuutta jännitteen funktiona. Perkel et al. [Per13a] on antanut tälle tunnusluvulle nimen TUTU (Tip Up of the Tip Up). Tunnusluku lasketaan seuraavasti:

$$TUTU = (TD(1.5U_0) - TD(1.0U_0)) - (TD(1.0U_0) - TD(0.5U_0)) \quad (4-1)$$

TUTU:n arvo 0 kuvaa siis täysin lineaarista jänniteriippuvuutta. Suuri TUTU-arvo tarkoittaa häviökertoimen voimakasta kasvua erityisesti normaalia käyttöjännitettä suuremmilla jännitteillä, mitä voidaan pitää merkinä eristeen vanhenemisesta [Per13a].

4.1.4 Häviökerrointunnuslukujen ja läpilyöntijännitteen välinen korrelaatio

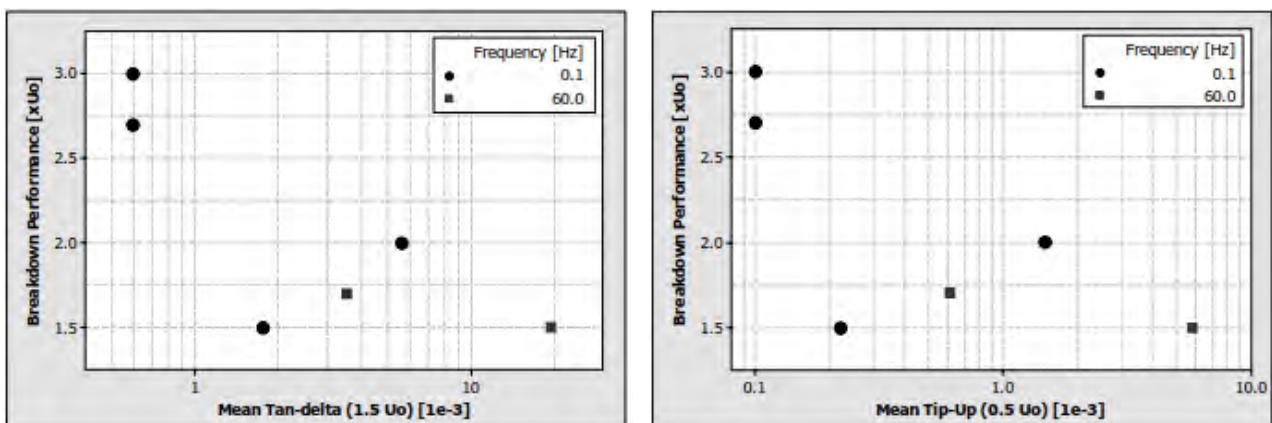
Häviökertoimen ja kaapelin läpilyöntijännitteen välillä on havaittu useissa tutkimuksissa selvä korrelaatio [Yam89a, Wer01a, Hvi05a]. Kuvassa 4.2 on esitetty Wereliuksen raportoimat salamasyöksyjännitteellä mitatut XLPE-eristeisten keskijännitekaapeleiden läpilyöntijännitteet 0,1 Hz taajuudella mitatun häviökertoimen funktiona. Häviökertoimen kasvaessa läpilyöntijännite pienenee.



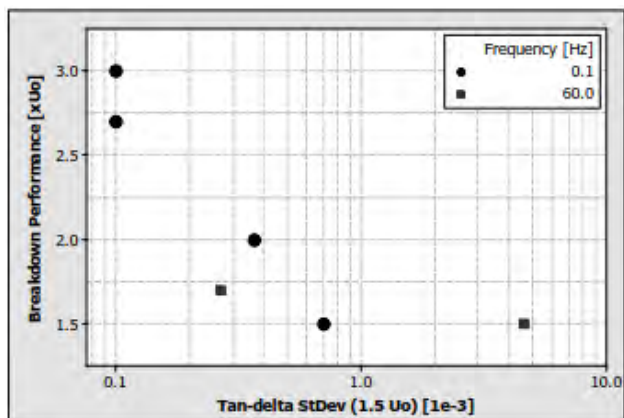
Kuva 4.2. Taajuudella 0.1 Hz mitatun häviökertoimen ja kaapelin läpilyöntijännitteen välinen korrelaatio [Wer01a].

Nykykäsityksen mukaan häviökertoimen muutos jännitteen funktiona ja sen vaihtelu ajan funktiona ovat kuitenkin kunnonvalvontamittauksissa käyttökelpoisempia kaapelin kunnon mittareita. Näiden tunnuslukujen ja kaapelin läpilyöntijännitteen välistä korrelaatiota on toistaiseksi tutkittu melko vähän. Georgia Institute of Technology ja National Electric Energy Testing Research and Applications Center (NEETRAC) ovat tutkineet kuuden keskijännite XLPE-kaapelinäytteen häviökerrointunuslukujen ja läpilyöntijännitteiden välistä korrelaatiota [Her09a]. Kaikki näytteet olivat 25 m pitkiä 15 kV XLPE-kaapelinäytteitä, käyttöönottovuosi 1968 ja ne olivat olleet samassa verkkoyhtiössä samalla alueella ja samanlaisessa kuormassa, joten näytteiden ikääntymisolosuhteiden voidaan olettaa olleen keskenään vertailukelpoisia.

Kuvissa 4.3 ja 4.4 on esitetty kaapelinäytteiden mitattu läpilyöntijännite (normaalin käyttöjännitteen U_0 monikertoina) häviökertoimen keskiarvon, häviökertoimen jänniteriippuvuuden ja häviökertoimen keskihajonnan funktiona. Näytteiden läpilyöntijännitteet määritettiin VLF-jännitteellä nostamalla jännitettä $0,25 U_0$ portain. Kuten kuvista nähdään kaikki häviökerrointunusluvut korreloivat läpilyöntijännitteen kanssa, mutta korrelaatio on paras häviökertoimen keskihajonnalla [Her09a].



Kuva 4.3. Kaapelinäytteiden läpilyöntijännite häviökertoimen keskiarvon ($1,5 U_0$) ja häviökertoimen jänniteriippuvuuden keskiarvon ($0,5 U_0$) funktiona [Her09a].



Kuva 4.4. Kaapelinäytteiden läpilyöntijännite häviökertoimen keskihajonnan ($1,5 U_0$) funktiona [Her09a].

4.2 Osittaispurkausmittaukset

Käyttöpaikalla tehtävien kaapeleiden osittaispurkausmittausten tulosten tulkintaan on olemassa käytännön kokemuksiin perustuvia raja-arvoja ja ohjeistuksia mm. mittalaitetoimittajilla. Taulukossa 4-4 on esitetty englantilaisen HVPD:n ohjeistus muovi- ja öljypaperikaapeleille.

Taulukko 4-4. HVPD:n ohjeelliset raja-arvot muovi- ja öljy-paperieristeisten kaapeleiden käyttöpaikalla tehtäville osittaispurkausmittauksille.

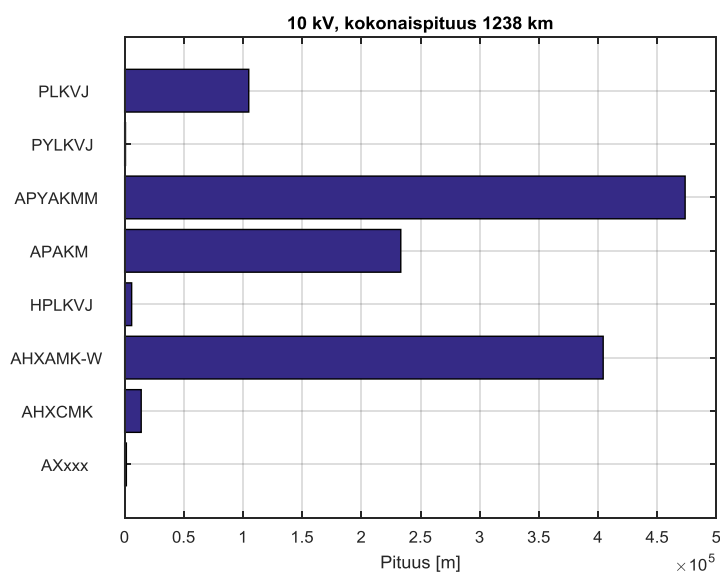
Insulation Condition Assessment	Colour Code	PD in XLPE	PD in PILC
Discharge within acceptable limits	Green	0pC – 250pC	0pC – 2500pC
Some Concern Monitoring recommended	Yellow	250pC – 350pC	2500pC – 5000pC
Some Concern, regular monitoring recommended	Orange	350pC- 500pC	5000pC – 7000pC
Major Concern, Locate PD and then repair or replace	Red	> 500pC	>7000pC

Vertailun vuoksi voidaan mainita, että kaapeleiden ja kaapelivarusteiden tehdaskoestuksissa raja-arvot ovat:

- kaapeleille: purkausten näennäisvarauksen tulee olla $< 5 \text{ pC}$
- kaapelivarusteille: purkausten näennäisvarauksen tulee olla $< 20 \text{ pC}$

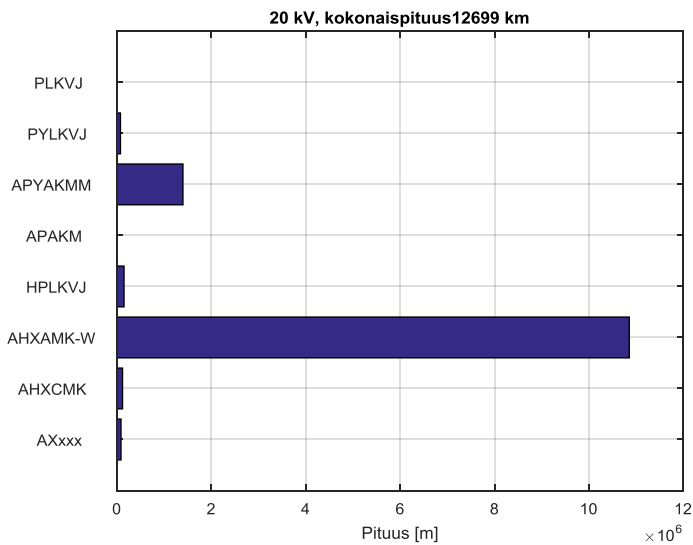
5 Mitattavien kaapeleiden valinta

Kuvassa 5.1 on esitetty tutkimushankkeeseen osallistuneiden verkkoyhtiöiden yhteenlasketut 10 kV kaapelipituudet kaapelityypeittäin. Yhteensä 10 kV kaapeleita on tarkastelussa mukana 1 238 km. Hankkeessa tutkittavaksi valittiin näistä yleisimmät öljypaperikaapelityypit eli APYAKMM, APAKM ja PLKVJ. Yhtä vesistöналituskaapelia lukuun ottamatta AHXAMK-W-kaapeleita ei otettu mitattavaksi, koska ko. kaapelit ovat pääosin 20 kV käyttöjännitteelle tarkoitettuja ja oletettavasti niissä ei 10 kV käyttöjännitteellä vielä tämänhetkisen käyttöikänsä puitteissa olisi havaittavissa ikääntymistä.



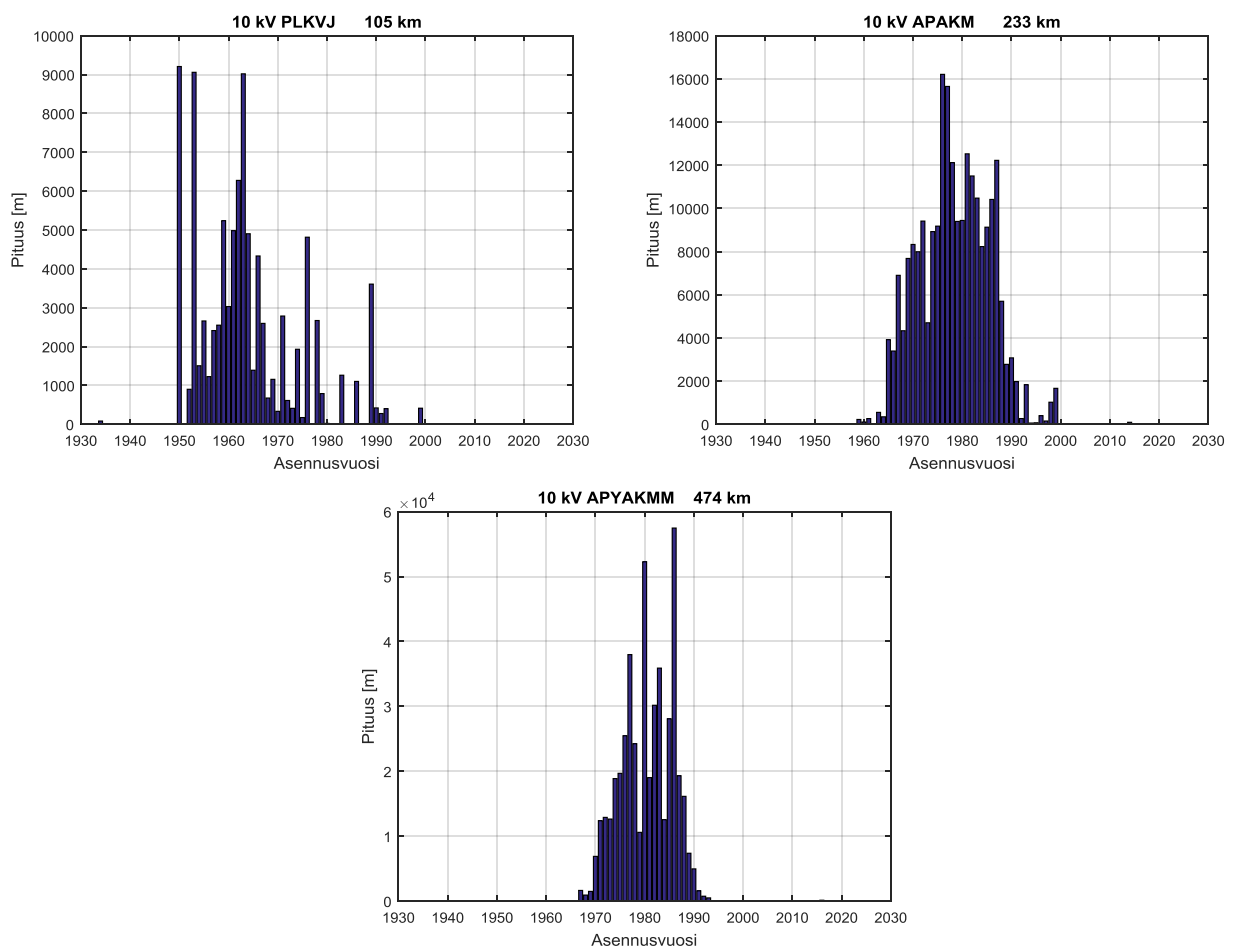
Kuva 5.1. Tutkimushankkeeseen osallistuneiden verkkoyhtiöiden yhteenlasketut 10 kV kaapelipituudet kaapelityypeittäin. 10 kV kaapeleista mitattaviksi valittiin APYAKMM-, APAKM- ja PLKVJ-kaapelit.

Kuvassa 5.2 on esitetty yhdentoista tutkimushankkeeseen osallistuneen verkkoyhtiön yhteenlasketut 20 kV kaapelipituudet kaapelityypeittäin. Yhteensä 20 kV kaapeleita on tarkastelussa mukana 12 699 km. Selvästi eniten on AHXAMK-W-kaapelia, johon on sisällytetty tässä kuvassa myös viime vuosina pääasiassa maaseutuverkkoon asennetut AHXAMK-WP-kaapelit. Toiseksi yleisin kaapelityyppi on APYAKMM. Muita kaapelityyppejä on prosentuaalisesti hyvin pieni osuus. 20 kV kaapeleista mitattavaksi valittiin AHXAMK-W- ja APYAKMM-kaapelit.



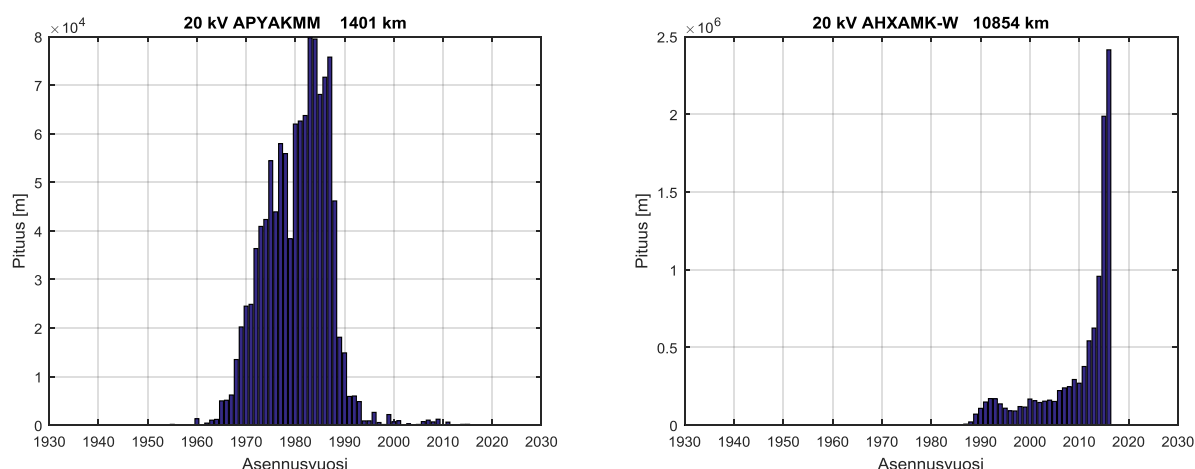
Kuva 5.2. Yhdentoista tutkimushankkeeseen osallistuneen verkkoyhtiön yhteenlasketut 20 kV kaapelipituudet kaapelityypeittäin. 20 kV Kaapeleista mitattaviksi valittiin APYAKMM- ja AHXAMK-W-kaapelit.

Mitattavaksi valituista kaapeleista muodostettiin kuvien 5.3...5.4 mukaiset asennusvuosijakaumat ja niiden perusteella valittiin tasaisin välein tavoitteelliset asennusvuodet, joiden ympäristöstä mitattavat kaapelit pyrittiin pääosin valitsemaan.



Kuva 5.3. 10 kV PLKVJ- APAKM- ja APYAKMM-kaapeleiden asennusvuodet.

20 kV AHXAMK-W/WP-kaapeleiden asennusvuosihistogrammissa näkyy selvästi viime vuosina voimakkaasti lisääntynyt maaseutuverkkojen kaapelointi.



Kuva 5.4. 20 kV APYAKMM- ja AHXAMK-W-kaapeleiden asennusvuodet (jälkimmäinen sisältää myös AHXAMK-WP-kaapelit).

Hankkeen alkupuolella ohjausryhmän kokouksen pohjalta määritellyt alustavat tavoitelukumäärät mitattavaksi valituille kaapeleille ilmenevät taulukosta 5-1. Hankkeen kuluessa valittuihin kaapeleihin tuli jonkin verran viime hetken muutoksia johtuen lähinnä siitä, että kaikkia mitattavaksi suunniteltuja kaapeleita ei kytkentätilanteen tai muiden käytännön syiden vuoksi pystytty mittaussajankohtana mittaamaan ja tilalle jouduttiin valitsemaan korvaava kaapeli. Kaapelivaihdoista johtuen kaikkien kaapeleiden osalta ei päästy aivan tavoiteltuihin asennusvuosijakaumiin, mutta kuten luvuista 5.1.1 ja 5.1.2 ilmenee, jakaumia voi pitää riittävän kattavina ja tasaisina ja siten varsin onnistuneina. Toteutuneet mitattujen kaapeleiden lukumäärät kaapelityypeittäin ilmenevät taulukosta 5-2.

Taulukko 5-1. Mitattavaksi valitut kaapelit ja niiden tavoitteelliset kokonaismäärät ja asennusvuodet.

Jännite-taso [kV]	Kaapelityyppi	Kaapeleiden asennusvuodet	Mitattavia 3-v. kaapeleita [kpl]	Mitattavien kaapeleiden asennusvuodet
10	APYAKMM	1966-1993	15	1967, 1972, 1980, 1988
10	APAKM	1959-1993	9	1970, 1977, 1982, 1990
10	PLKVJ	1950-1980	6	1950, 1960, 1970
20	APYAKMM	1960-1996	26	1966, 1970, 1975, 1980, 1985, 1990
20	AHXAMK-W	1986-	43	1988, 1991, 1996, 2001 (+ joitain 2007, 2011, 2015)
	Yhteensä		99	

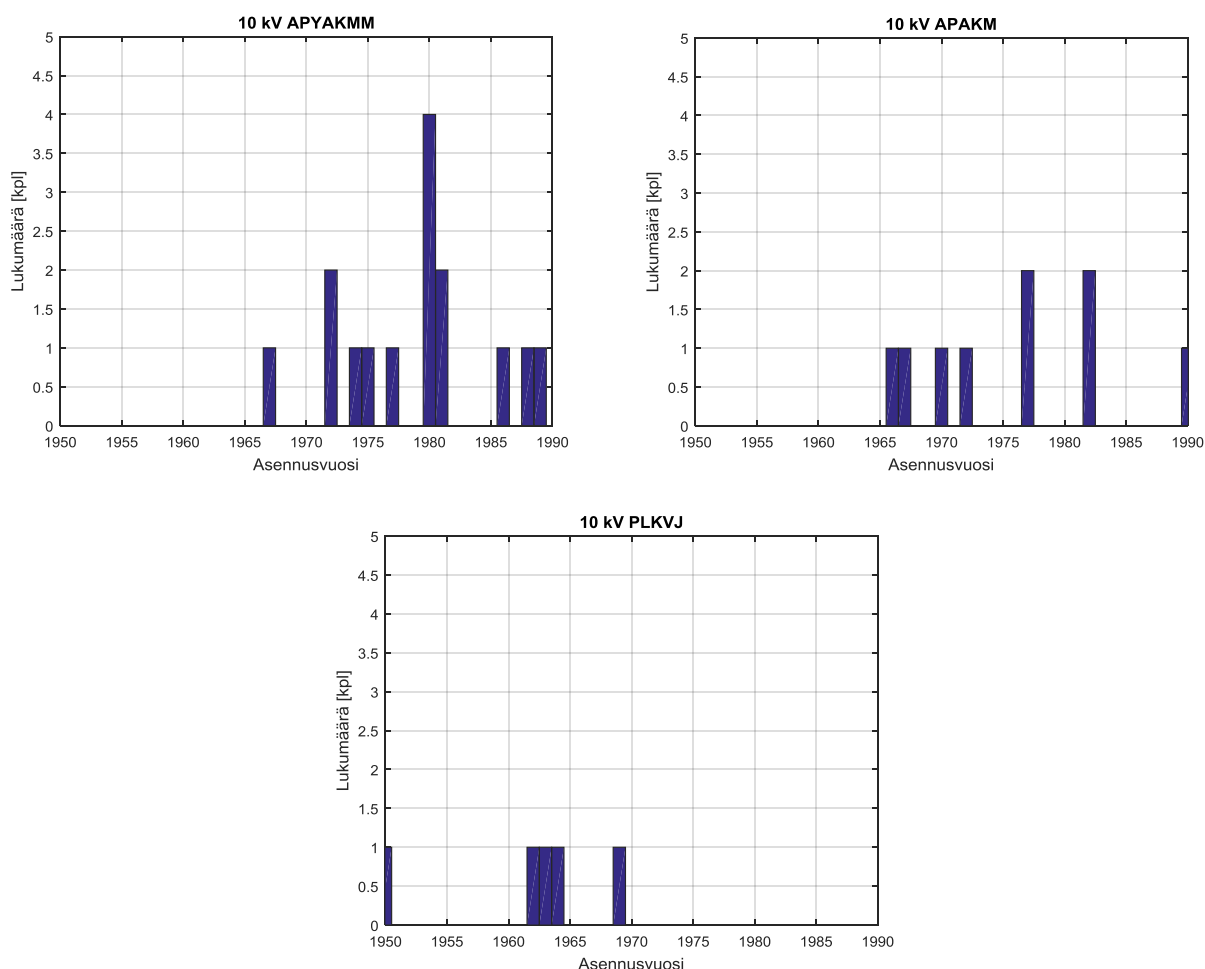
*) suunniteltu mitattavien kaapeleiden kokonaismäärä on 100 kpl

Taulukko 5-2. Toteutuneet mitattujen kaapeleiden kokonaismäärät ja asennusvuodet.

Jännite-taso [kV]	Kaapelityyppi	Kaapeleiden asennusvuodet	Mitatattuja 3-v. kaapeleita [kpl]	Mitatattujen kaapeleiden asennusvuodet
10	APYAKMM	1966-1993	15	1967, 1972, 1974-1975, 1977, 1980-1981, 1986, 1988-1989
10	APAKM	1959-1993	9	1966-1967, 1970, 1972, 1977, 1982, 1990
10	PLKVJ	1950-1980	7	1950, 1955, 1962, 1963, 1964, 1969, 1972
10	AHXAMK-W	2005	1	2012
20	APYAKMM	1960-1996	35	1964...1992
20	AHXAMK-W	1986-	33	1985...2003 (+ joitain 2007, 2011, 2015)
	Yhteensä		100	

5.1 10 kV kaapeleiden asennusvuosijakaumat

Kuvassa 5.5 on esitetty mitattujen 10 kV APYAKMM, APAKM- ja PLKVJ-kaapeleiden asennusvuosijakaumat. Jakaumissa on kaapeleita melko tasaisesti noin viiden vuoden välein niiltä aikaväleiltä, jolloin kaapeleita on Suomessa yleisesti asennettu ja näiden lisäksi on satunnaisia kaapeleita myös välivuosilta.

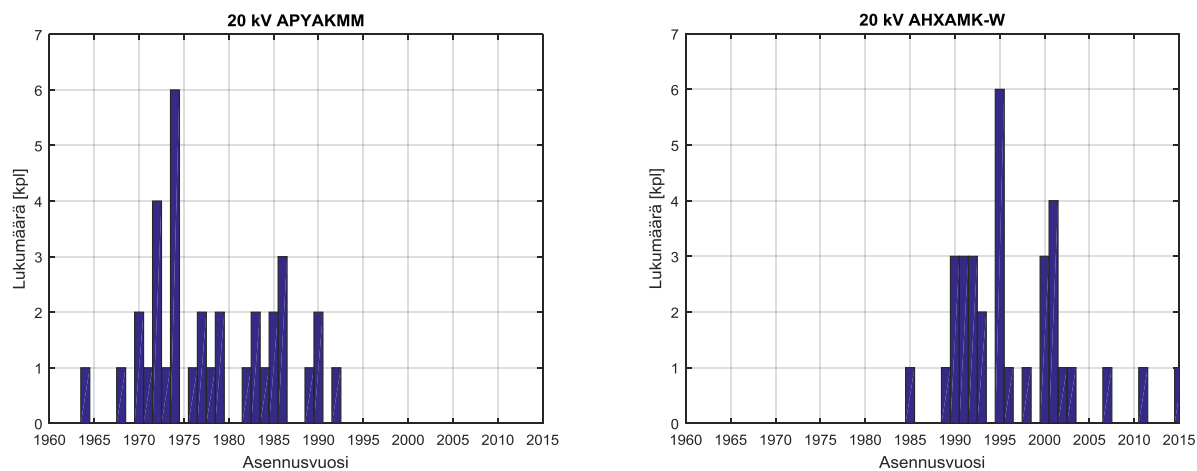


Kuva 5.5. Mitattujen 10 kV kaapeleiden asennusvuosijakaumat.

5.2 20 kV kaapeleiden asennusvuosijakaumat

Kuvassa 5.6 on esitetty mitattujen 20 kV APYAKMM- ja AHXAMK-W-kaapeleiden asennusvuosijakaumat. Myös 20 kV kaapeleiden osalta tavoitteena oli saada mitattavaksi kaapeleita noin viiden vuoden välein niiltä aikaväleiltä, jolloin kaapeleita on Suomessa verkkoon asennettu. Kaapeleita saatiin melko tasaisesti myös tavoiteasennusvuosien ympäriltä ja kokonaisuutena jakaumat ovat varsin tasapainoisia, vaikka 20 kV verkoissa viime hetken kaapelivaihtoja jouduttiin tekemään jonkin verran enemmän kuin 10 kV verkoissa. Sekä APYAKMM- että AHXAMK-W-kaapeleissa painopiste on vain lievästi keskimääräistä vanhemmissa kaapeleissa. AHXAMK-W kaapeleiden osalta alle 10 vuoden ikäisten kaapeleiden laajamittaisempaa mittausta ei

ohjausryhmässä koettu mielekkääksi ja niistä otettiin tarkasteltavaksi vain muutamia yksittäisiä kaapeleita.



Kuva 5.6. Mitattujen 20 kV kaapeleiden asennusvuosijakaumat.

6 Häviökerroinmittausten tulokset

Tässä hankkeessa normaalilla käyttöjännitteellä (U_0) yhteensä 100 kaapelijärjestelmälle tehdyistä häviökerroinmittauksista 17 kpl:ssa normaalilla käyttöjännitteellä mitatut häviökertoimen keskiarvot olivat kaikissa vaiheissa 1×10^{-3} eli pienempiä tai yhtä suuria kuin mittalaitteen herkkyys (pienin mahdollinen näyttämä). Kaikki 17 kaapelijärjestelmää edustivat AHXAMK-W-tyyppiä (16 kpl 20 kV ja 1 kpl 10 kV kaapelijärjestelmä). AHXAMK-W-kaapelijärjestelmiä mitattiin yhteensä 34 kpl, joista 18 kpl:ssa häviökerroin oli suurempi kuin 1×10^{-3} ja näistä viidessä standardin IEEE Std400.2-2013 alempi raja-arvo 4.0×10^{-3} ylittyi.

20 kV öljypaperikaapelijärjestelmiä (APYAKMM) mitattiin yhteensä 35 kpl, ja niistä vain yhden kaapelijärjestelmän kahdessa vaiheessa ylittyi standardin IEEE Std400.2-2013 alempi raja-arvo 85×10^{-3} ja yhdessä vaiheessa ylempi raja-arvo 200×10^{-3} . Mitatuista 10 kV öljypaperikaapelijärjestelmistä (15 kpl APYAKMM, 9 kpl APAKM ja 7 kpl PLKVJ) standardin IEEE Std400.2-2013 alempi raja-arvo 85×10^{-3} ylittyi yhden PLKVJ-kaapelijärjestelmän yhdessä vaiheessa ja toisen PLKVJ-kaapelijärjestelmän kaikissa vaiheissa (näistä kahdessa vaiheessa ylittyi myös ylempi raja-arvo). Viimeksi mainittu kaapeli jätettiin häviökerrointarkastelujen ulkopuolelle, koska oli syytä epäillä, että suuri häviökerroin johtui muusta syystä kuin kaapelijärjestelmän ikääntymisestä (kts luku 6.1).

Standardissa IEEE Std400.2-2013 määritellyn häviökertoimen keskihajontaa kuvaavan tunnusluvun raja-arvojen ylitykset olivat selvästi yleisempiä. Harvinaisimpia olivat häviökertoimen muutosta jännitteen funktiona kuvaavan tunnusluvun raja-arvojen ylitykset. Yhteenveto tuloksista ja kaapeleille standardin IEEE Std400.2-2013 mukaan määritetyistä kuntoluokista on esitetty liitteessä A. Varsinkin mitatuista 20 kV APYAKMM-kaapelijärjestelmistä varsin suuri osa tulisi tällä perusteella luokitelluksi luokkaan ”further study advised”.

6.1 Kaapelivarusteiden ja kojeiston vaikutus häviökerroinmittausten tulokseen

Tutkimuksen ensisijaisena tavoitteena oli kerätä Suomessa käytössä olevista keskijännitekaapeleista riittävän suuri otos häviökerroinmittaustuloksia, jotta voitaisiin muodostaa alustava kaapeleiden kuntoluokitus mittaustulosten tulkinnan tueksi. Jotta mittausten menetelmä olisi käyttökelpoinen erityisesti vanhojen kaapeleiden kunnonvalvonnassa käytettäväksi, mittaus pitäisi pystyä tekemään

niin, että esimerkiksi kaapelipäätteitä ei tarvitse kytkeä irti verkosta tai muuten mekaanisesti aiheuttaa niille ylimääräistä rasitusta. Tästä johtuen mittaukset päätettiin tehdä niin, että kaapelit kytketään irti verkosta ainoastaan erottimella tai katkaisijalla, jolloin esimerkiksi erottimen toinen puoli tukieristimineen on mitattavassa kaapelissa kiinni mittauksen ajan ja kaapelin pääeristysten läpi kulkevan resistiivisen virran lisäksi mahdolliset kaapelin päissä olevien erottimen tukieristimien (resistiiviset) pintavirrat vaikuttavat häviökertoimen mittaustulokseen. Lisäksi mittaustulokseen vaikuttavat myös kaapelipäätteiden sisäiset ja ulkoiset pintavirrat ja kaapelijatkosten sisäiset pintavirrat. Näiden osuutta mitatusta kokonaishäviökertoimesta on vaikea erottaa. Teoriassa kuitenkin näiden virtojen vaikutus kokonaishäviökertoimeen pitäisi olla suurempi lyhyissä kaapeleissa, joissa kapasitanssi ja sen myötä kapasitiivinen virta ovat pienemmät. Kuten luvussa 6.3 esitetyistä tuloksista ilmenee, tässä hankkeessa tutkituissa kaapeleissa tämän suuntaista korrelaatiota oli havaittavissa lähinnä 20 kV APYAKMM-kaapeleiden tapauksessa. Muiden kaapelityyppien osalta tarkastelua tosin vaikeuttaa myös otosten pienuus.

Yhteensä neljässä mittauksessa saatiin suuria yli 100×10^{-3} häviökerroinmittaustuloksia. Nämä kohteet on esitetty alla taulukossa 6-1. Alimman kohteen (kaapeli 79) tapauksessa tehtiin uusintamittaus irrottamalla kaapelin yksi vaihe molemmista päistään kojeistoista. Uusintamittauksessa häviökerroinlukema putosi lähes kymmenenteen osaan alkuperäisestä eli suurin osa resistiivisestä virrasta kulki kojeistoissa. Kaapelin toisen pään kojeisto oli tyyppiä, jossa useammalla verkkoyhtiöllä on esiintynyt pintavirta- ja osittaispurkausongelmaa erityisesti kosteissa olosuhteissa. Pintavirta- ja osittaispurkausongelmaa on tutkittu kojeistovalmistajien toimeksiannosta TTY:llä ja ongelman on todettu liittyvän tietyn erotintyyppin tiettyyn versioon.

Kaapelin 65 tapauksessa yhden vaiheen pääte puhdistettiin isopropyylialkoholia sisältävällä kaapelinpuhdistusliinalla ja mitattiin uudelleen, mutta tällä ei ollut suurta vaikutusta tuloksiin.

Taulukko 6-1. Suurimmat hankkeessa mitatut häviökerroinlukemat.

Kaapeli ID	U ₀ [kV]	Kaapelityyppi	Poikkipinta	Pituus [m]	Asennusvuosi	Häviökerroin 0.5 x U ₀			Häviökerroin 1.0 x U ₀			Häviökerroin 1.5 x U ₀			Delta TD			Stdev			C [nF]		
						$\times 10^{-3}$			$\times 10^{-3}$			$\times 10^{-3}$			$\times 10^{-3}$			$\times 10^{-3}$					
						L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
91	11.6	APYAKMM	185	155	1983	74.1	164.2	67.0	124.5	211.6	138.0	123.6	152.8	117.1	49.5	-11.4	50.1	1.4	16.1	9.0	64.0	63.0	65.0
32	5.8	PLK	25	722	1964	75.5	86.3	78.6	78.4	93.4	81.6	81.5	101.1	84.6	6.0	14.8	6.0	0.2	0.1	0.2	303.0	319.0	324.0
65	5.8	PLKVJ	120	207	1972	209.6	282.0	313.5	176.8	203.5	210.5	128.2	137.3	131.6	-81.4	-144.7	-181.9	9.7	17.9	26.1	75.0	75.0	76.0
79	11.6	AHXAMK-W	185	250	2012	340.5	319.3	277.7	311.9	293.7	269.0	261.0	260.0	240.1	-78.6	-58.7	-37.6	8.6	6.6	5.4	65.0	65.0	64.0
Uusintamittaukset:																							
65	5.8	PLKVJ	120	207	1972			283.3			189.6			110.2			-173.1			32.9			76.0
79	11.6	AHXAMK-W	185	250	2012	37.4			39.0			38.8			1.4			1.1			65.0		

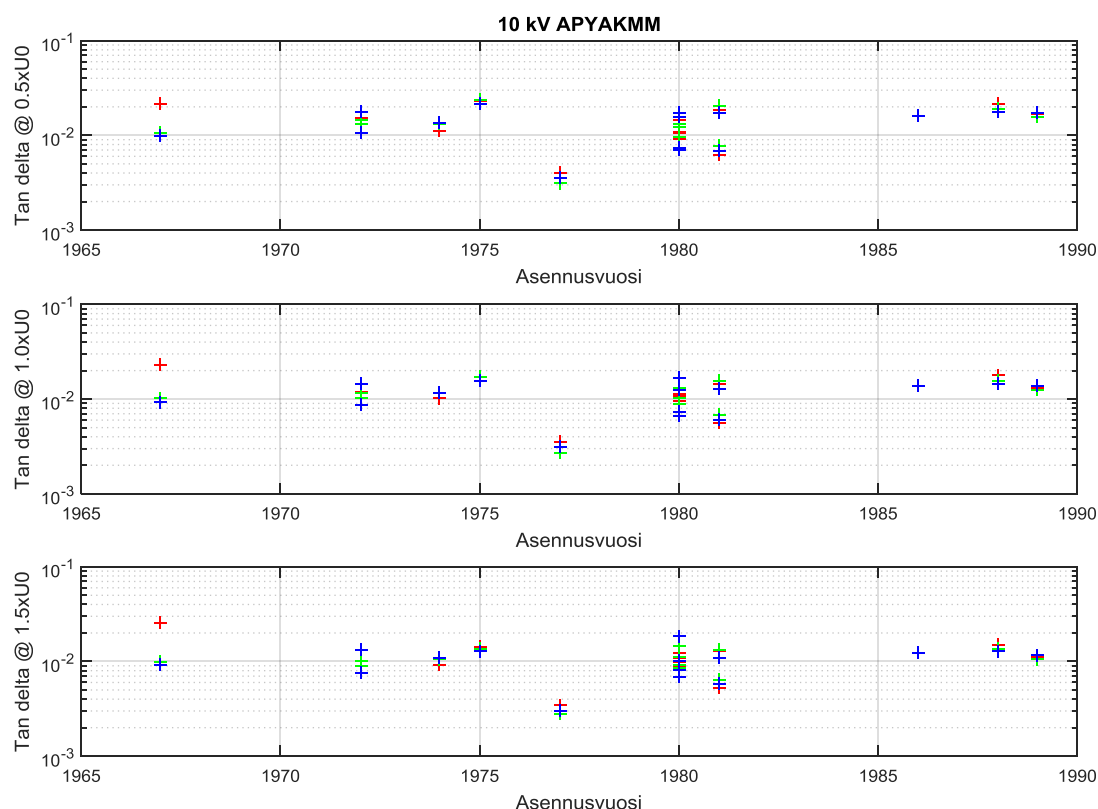
Kaapelit 65 ja 79 on jätetty luvun 6 häviökerrointarkastelujen ulkopuolelle, koska näissä häviökerroin on poikkeuksellisen suuri ja on joko varmistunut tai on syytä epäillä, että suuri häviökerroin johtuu muusta syystä kuin kaapelijärjestelmän ikääntymisestä.

Suuria häviökerrointuloksia arvioitaessa olisikin hyvä pyrkiä tavalla tai toisella varmistamaan, että suuri tulos aiheutuu nimenomaan kaapelijärjestelmästä eikä esimerkiksi kojeistosta.

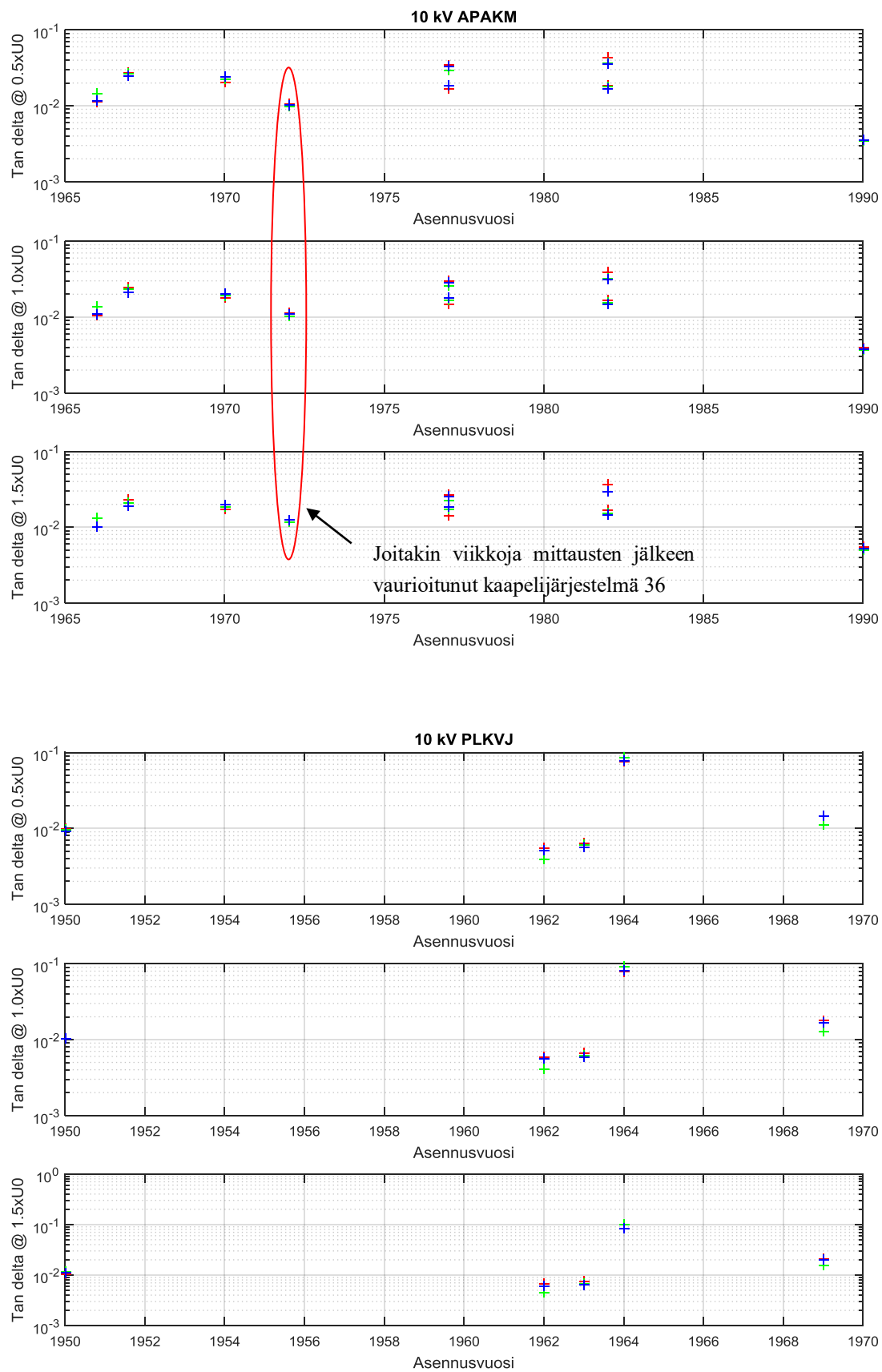
6.2 Häviökertoimet asennusvuosittain

Kuvassa 6.1...6.2 on esitetty mitattujen 10 kV kaapelijärjestelmien häviökerrointen jakaumat asennusvuosittain. 10 kV kaapelijärjestelmien osalta asennusvuoden ja häviökertoimen välillä ei näytä olevan selvää korrelaatiota, mikä toisaalta puoltaa sitä, että kaapeleiden kuntoa tulisi arvioida mittausten eikä kaapelin iän perusteella.

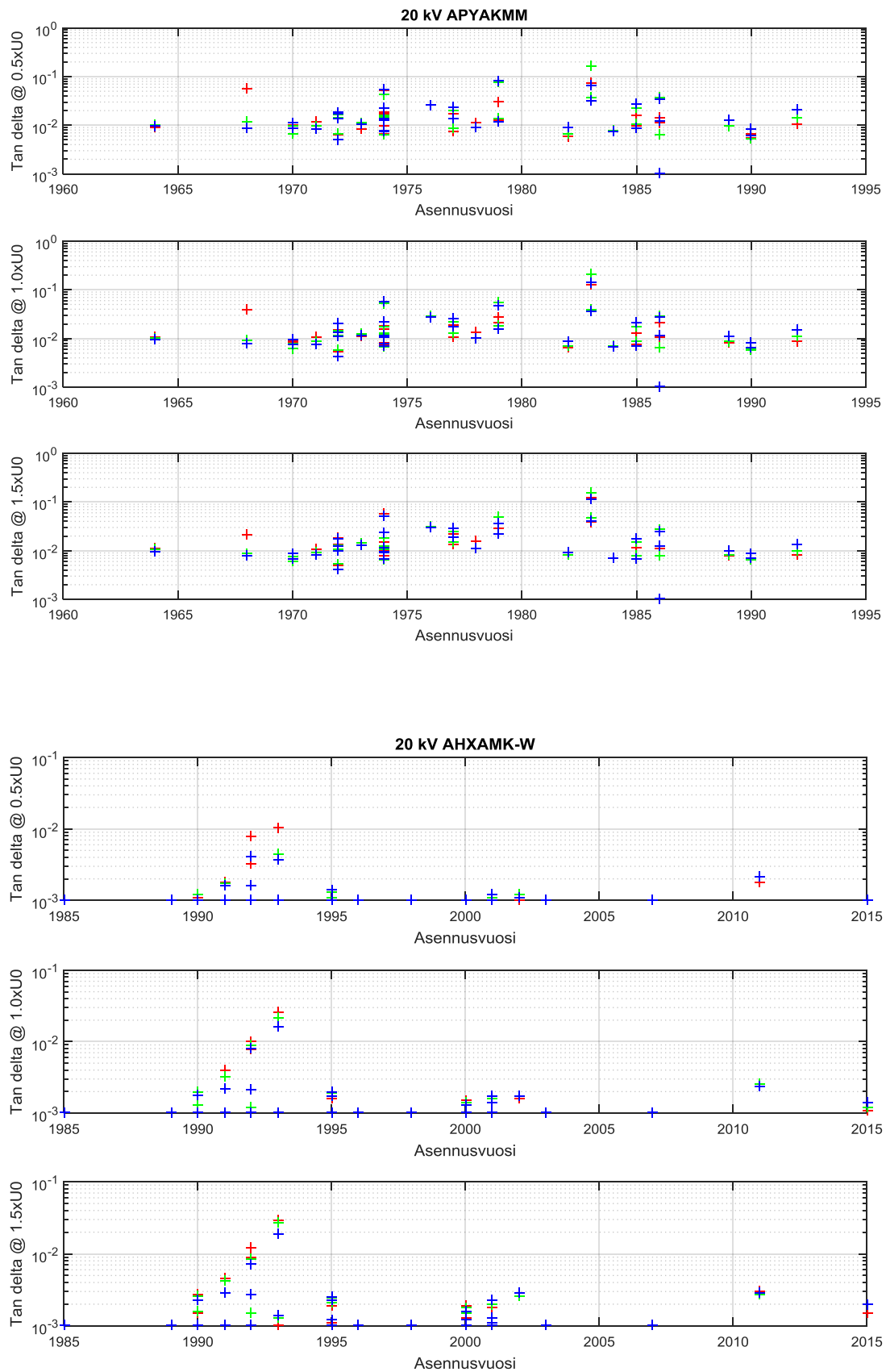
Kuvassa 6.3 on esitetty 20 kV kaapelijärjestelmien häviökertoimet asennusvuosittain. 20 kV:llakaan öljypaperikaapeleiden (APYAKMM) häviökertoimen ja asennusvuoden välillä ei näytä olevan selvää korrelaatiota, mutta vanhojen muovikaapelijärjestelmien (AHXAMK-W) häviökerrointen vaihtelu näyttäisi olevan suurempaa kuin uudempien muovikaapelijärjestelmien. On huomattava, että mittausten perusteella ei pystytä luotettavasti selvittämään mikä on kaapelipäätteiden, jatkosten, kaapeliin mittauksen aikana kytkettynä olleiden komponenttien (erottimien tai katkaisijoiden toinen puoli) ja ympäristöolosuhteiden vaikutus häviökerrointen vaihteluun.



Kuva 6.1. Mitattujen 10 kV APYAKMM-kaapelijärjestelmien häviökertoimet asennusvuosittain.



Kuva 6.2. Mitattujen 10 kV APAKM- ja PLKVJ-kaapelijärjestelmien häviökertoimet asennusvuosittain.

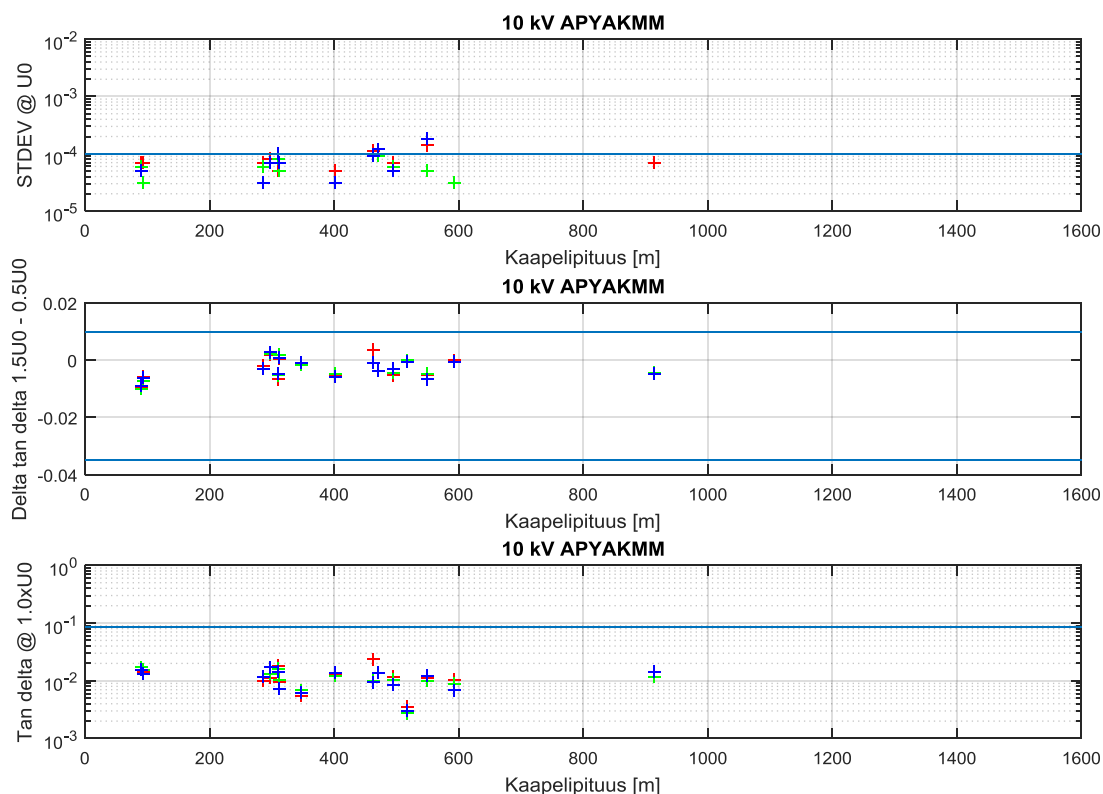


Kuva 6.3. Mitattujen 20 kV APYAKMM- ja AHXAMK-W-kaapelijärjestelmien häviökertoimet asennusvuosittain.

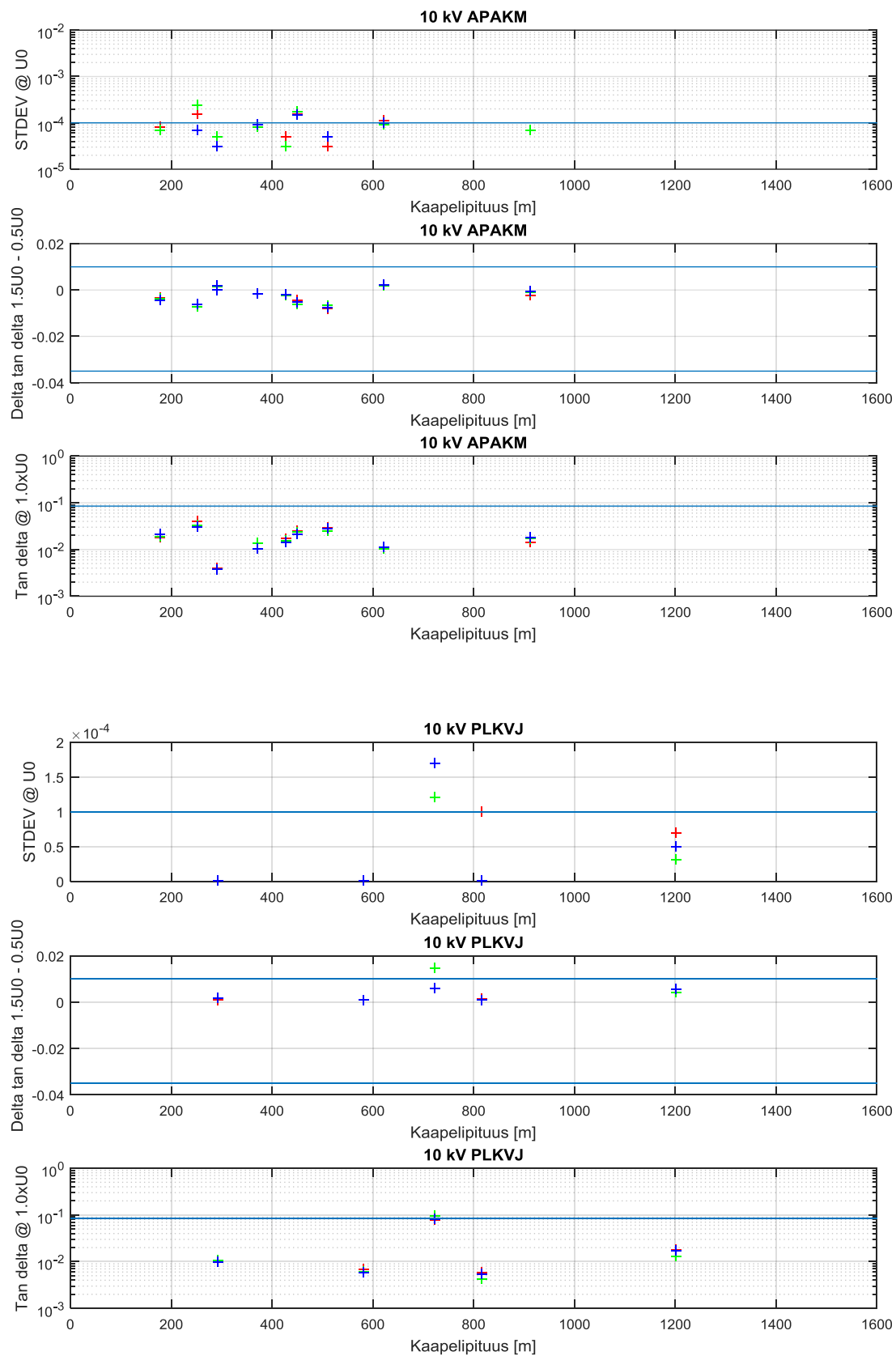
6.3 Häviökertoimet kaapelipituuden funktiona

Kuvissa 6.4...6.5 on esitetty mitattujen 10 kV kaapelijärjestelmien häviökerrointunnusluvut kaapelipituuden funktiona. 10 kV kaapelijärjestelmien osalta kaapelipituuden ja häviökerrointunnuslukujen välillä ei näytä olevan selvää korrelaatiota.

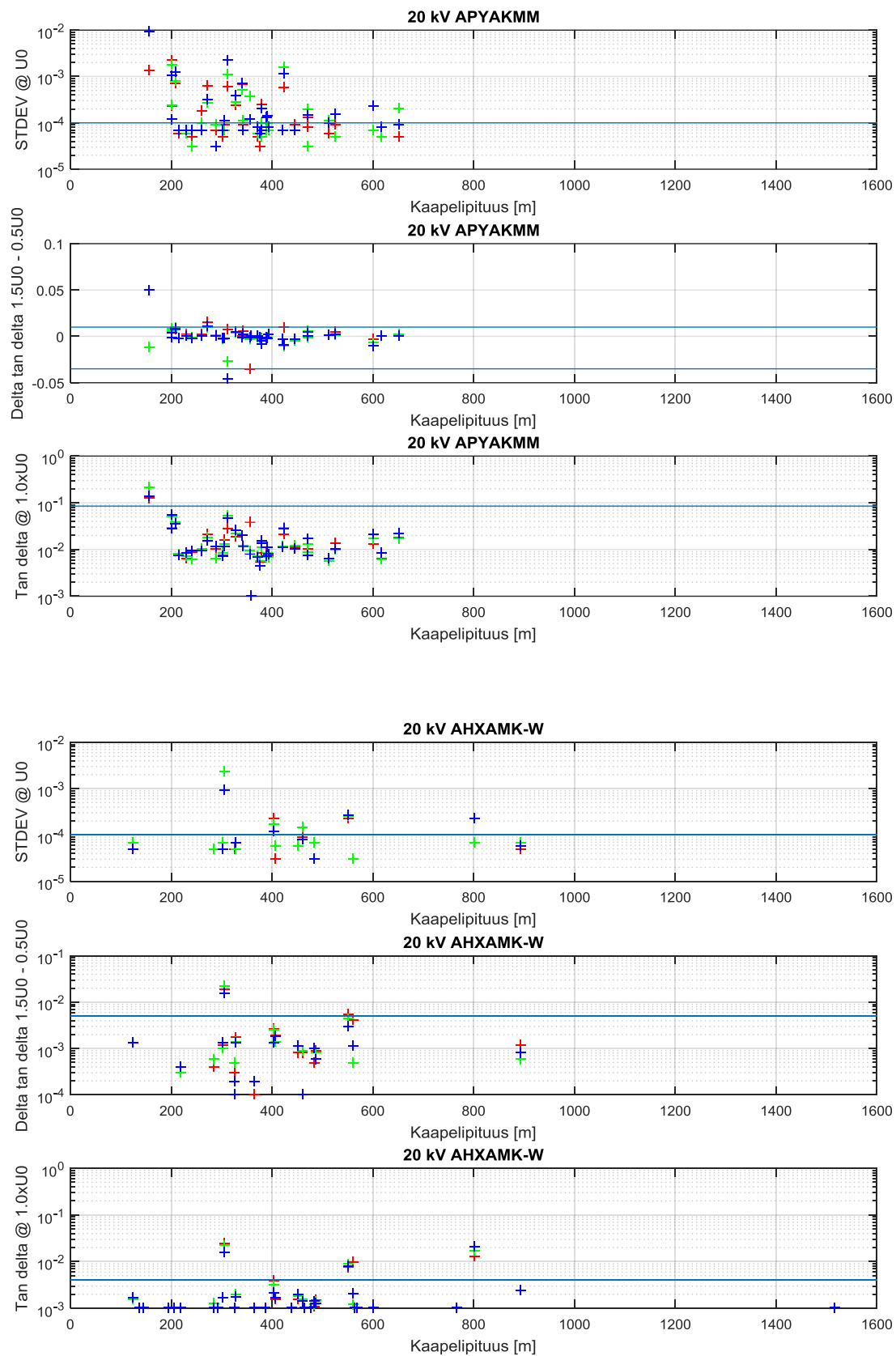
Kuvassa 6.6 on esitetty 20 kV kaapelijärjestelmien häviökertoimet kaapelipituuden funktiona. 20 kV:lla APYAKMM-kaapelijärjestelmien kohdalla näyttäisi olevan jonkinasteista korrelaatiota kaapelipituuden ja varsinkin häviökertoimen keskiarvon ja keskihajonnan välillä. AHXAMK-W-kaapelijärjestelmien kohdalla korrelaatio ei ole aivan niin selvä. Varsinkin AHXAMK-W-kaapelijärjestelmien kohdalla näytemäärä on sen verran pieni, että siitä ei voi vetää kovin pitkälle meneviä johtopäätöksiä. AHXAMK-W-kaapelijärjestelmien kohdalla täytyy huomata, että mittalaitteen häviökertoimen miniminäyttämästä 1×10^{-3} poikkeavia häviökerroin-arvoja esiintyi 20 kV:lla vain 16:ssä kaapelijärjestelmässä 33:stä mitatusta ja vain näissä tapauksissa häviökertoimen keskihajonta ja muutos jännitteen funktiona olivat nolasta poikkeavia.



Kuva 6.4. Mitattujen 10 kV APYAKMM-kaapelijärjestelmien häviökertoimet kaapelipituuden funktiona.



Kuva 6.5. Mitattujen 10 kV APAKM- ja PLKVJ-kaapelijärjestelmien häviökertoimet kaapelipituuden funktiona.



Kuva 6.6. Mitattujen 20 kV APYAKMM- ja AHXAMK-W-kaapelijärjestelmien häviökertoimet kaapelipituuden funktiona.

6.4 Häviökertoimet mittausajankohdan ja -olosuhteiden funktiona

Kuvissa 6.7...6.9 on esitetty mitattujen kaapelijärjestelmien häviökertoimet mittausajankohdan funktiona ja liitteissä C ja D on esitetty häviökertoimet ulkoilman suhteellisen kosteuden ja lämpötilan funktiona. Ilman suhteellisella kosteudella kaapelipäätteiden ympäristössä (muuntamon kennossa) on merkitystä varsinkin, jos se on niin suuri, että kosteuden tiivistyminen päätteen pintaan on mahdollista. Päätteen pintajohtavuus voi tällöin kasvaa, jolloin myös häviökerroin kasvaa resistiivisen virran kasvun myötä. Lyhyillä kaapeleilla vaikutus on kapasitiivisen virran pienuudesta johtuen todennäköisesti suurempi kuin pitkillä kaapeleilla. Vaikutus voi olla merkittävä varsinkin, jos päätteen pinnalla on kosteuden lisäksi epäpuhtauksia. Varsinkin kaapelijärjestelmien osalta ilman suhteellisen kosteuden vaikutuksesta häviökerroinmittausten tuloksiin on vaikea löytää tutkimustietoa. Häviökerroinmittalaitteiden käyttöohjeissa kuitenkin usein suositellaan, että mittausten aikana ilman suhteellisen kosteuden tulisi olla alle 80 %.

Kaapelikohtaiset tiedot ulkoilman suhteellisesta kosteudesta, lämpötilasta ja ilmanpaineesta mittausajankohtana on esitetty tämän raportin liitteen A taulukossa. Tiedot ovat mittauskohdetta lähinnä (pääsääntöisesti samalla paikkakunnalla kuin mittauskohde) olevan Ilmatieteenlaitoksen mittauspisteen mittaustietoja häviökerroinmittauksen aikaleimaa lähinnä olevalta rekisteröintihetkeltä. Ilmatieteenlaitoksen mittaustietojen rekisteröintiaikaväli oli tarkastelluissa kohteissa pääsääntöisesti 10 min. Muuntamon kennossa mittausten aikana vallitsevien olosuhteiden osalta näitä tietoja voidaan pitää häviökerroinmittauksen näkökulmasta suuntaa antavina niiden kaapelijärjestelmien osalta, joissa joko toisessa tai molemmissa päissä on puistomuuntamo. Niiden kaapelijärjestelmien osalta, joissa molemmissa päissä on kiinteistömuuntamo, tiedot eivät ole relevantteja. Todelliseen ilmankosteuteen puistomuuntamoiden kennoissa voivat vaikuttaa monet tekijät (esim. maaperän laatu ja kosteus, muuntajan kuormitusaste ym.) ja korrelaatio ulkoilman suhteellisen kosteuden kanssa voi vaihdella.

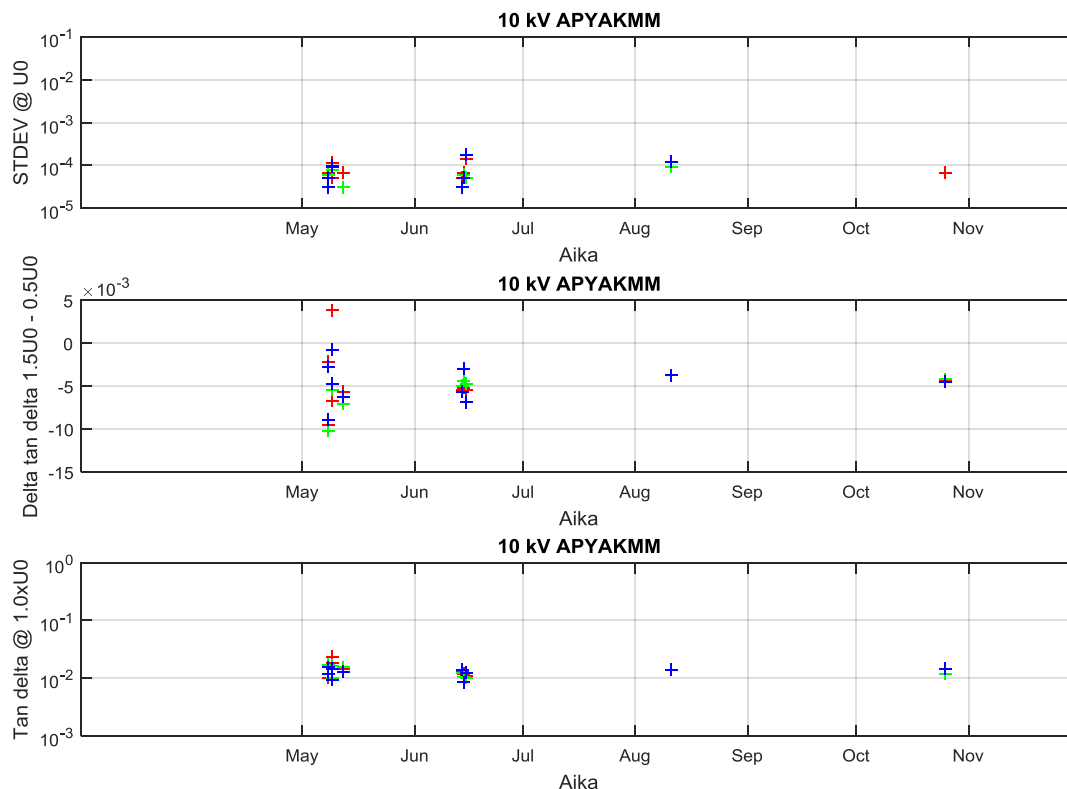
Standardissa IEEE Std400.2-2013 määritellyt häviökerrointunnusluvut (VLF-TDTS = kuvissa STDEV, VLF-DTD ja mean VLF-TD) on esitetty mittausajankohdan funktiona mitattujen 10 kV kaapelijärjestelmien osalta kuvissa 6.7 ja 6.8 ja 20 kV kaapelijärjestelmien osalta kuvassa 6.9. 10 kV kaapelijärjestelmien osalta häviökertoimien ja mittausajankohdan välillä ei näytä olevan selvää korrelaatiota. 20 kV kaapelijärjestelmien tapauksessa loppukesällä ja syksyllä mitattujen kaapelijärjestelmien häviökerrointunnusluvuissa on enemmän vaihtelua kuin keväällä mitatuissa, mutta toisaalta myös mittauksia on lukumääräisesti loppuvuodesta enemmän kuin keväällä.

Liitteissä C ja D on esitetty edellä mainitut häviökerrointunnusluvut ulkoilman suhteellisen kosteuden ja lämpötilan funktiona. Ulkoilman lämpötilalla ja häviökerrointunnusluvuilla ei näytä olevan selvää korrelaatiota minkään tutkitun kaapelijärjestelmän tapauksessa. Tätä voidaan pitää siinä mielessä loogisena tuloksena, että valtaosa kaapelista on maan alla, jossa lämpötila riippuu enemmän muista tekijöistä (esim. kaapelin mahdollinen kuormitus ennen mittauksia) kuin ulkoilman lämpötilasta. Häviökerroinmittausten toistettavuuden kannalta olisi hyvä, että mitattavassa kaapelissa ei kulkisi kaapelia merkittävästi lämmittävää kuormavirtaa ennen mittauksia.

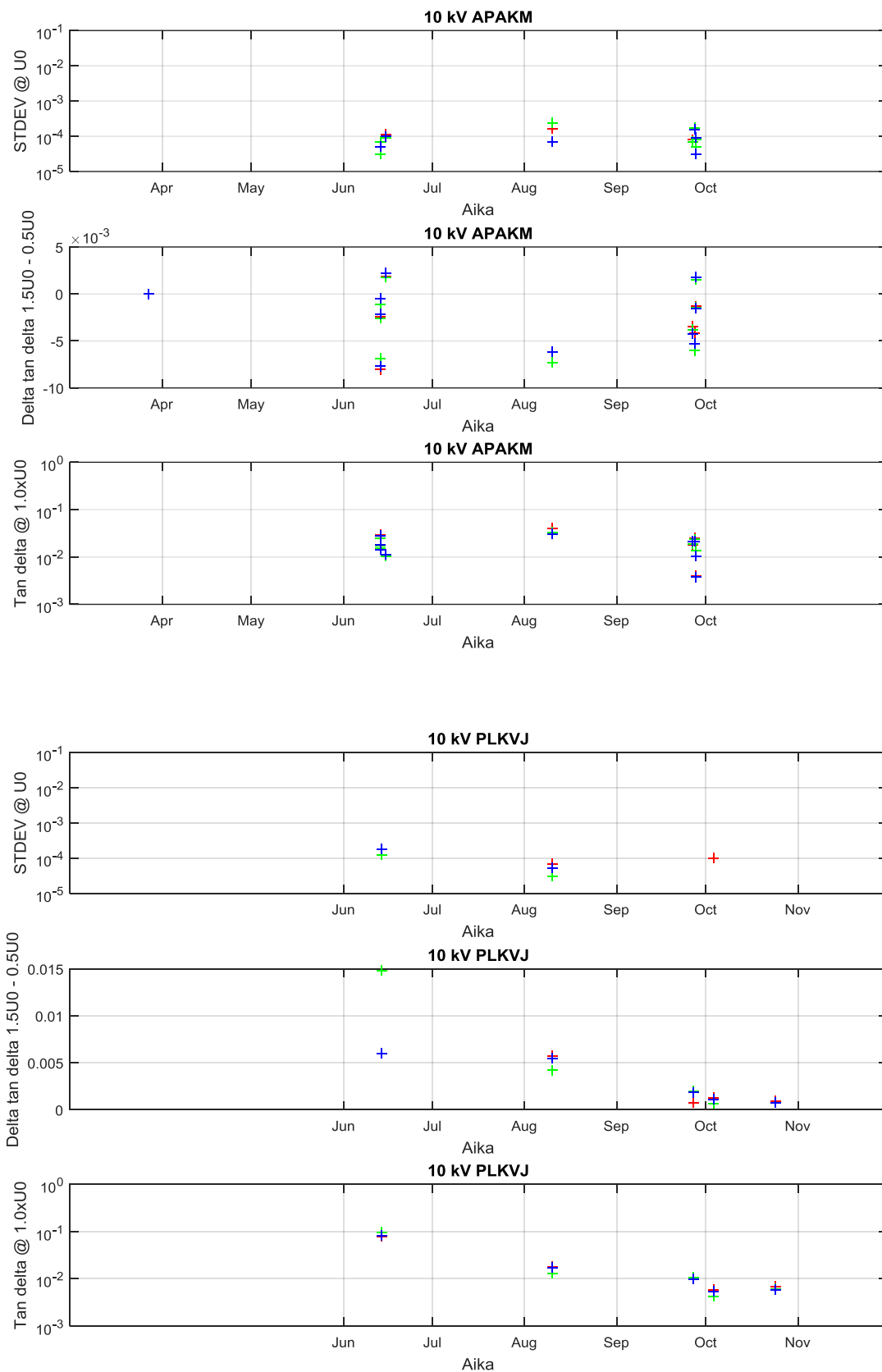
Ilmankosteuden osaltakaan selvää korrelaatiota ei näytä olevan 10 kV kaapelijärjestelmien osalta minkään tunnusluvun tapauksessa. 20 kV APYAKMM-kaapelijärjestelmien osalta häviökertoimen keskihajonnoissa (STDEV @ U0) ja häviökertoimen keskiarvoissa vaihtelu näyttäisi kasvavan, kun ulkoilman suhteellinen kosteus kasvaa suuremmaksi kuin 90 %. AHXAMK-W-kaapelijärjestelmien osalta otos on suurempien ilmankosteuksien osalta liian pieni johtopäätösten tekemiseen.

Mittausaineiston perusteella ei ole mahdollista tehdä kovin pitkälle meneviä johtopäätöksiä ilman kosteuden mahdollisesta vaikutuksesta tuloksiin. Todennäköisesti vaikutus ei pääsääntöisesti ole ollut kovin suuri, koska mittausaineiston perusteella määritetyt raja-arvot ovat lähes poikkeuksetta kaikkien kaapelijärjestelmien kaikkien tunnuslukujen osalta pienempiä kuin standardissa IEEE Std400.2-2013 annetut raja-arvot. Poikkeuksena on 20 kV APYAKMM-kaapelijärjestelmät, joiden osalta sillä voi olla vaikutusta esimerkiksi luvussa 6.10 määritettyihin raja-arvoestimaatteihin.

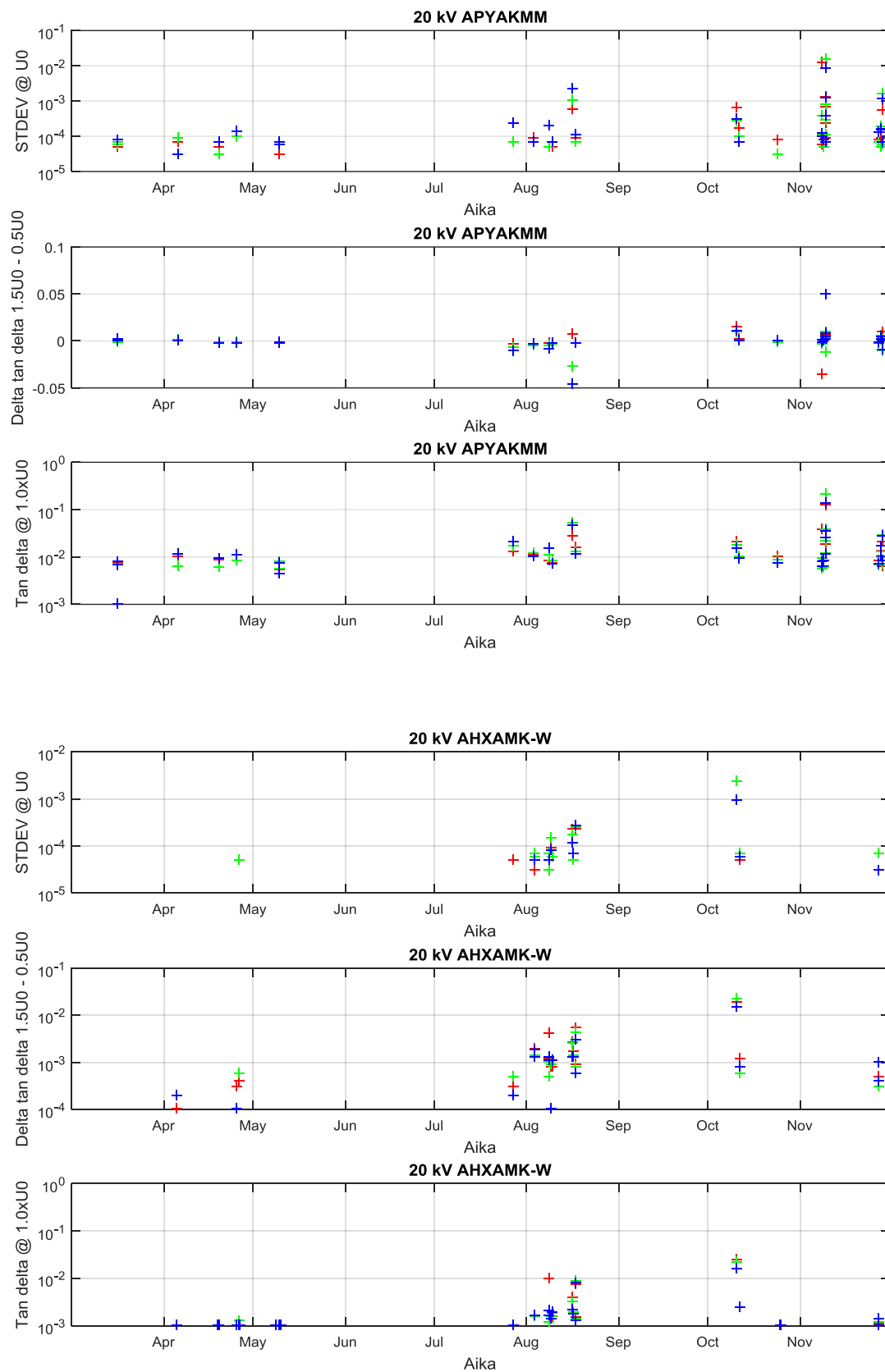
Ilman suhteellisen kosteuden vaikutuksen tutkiminen häviökerroinmittausten tuloksiin ei kuulunut tämän tutkimuksen piiriin, mutta jatkossa siihen on varmasti aiheellista kiinnittää huomiota. Parhaiten vaikutuksia olisi mahdollista tutkia kontrolloiduissa laboratorio-olosuhteissa tekemällä mittauksia esimerkiksi eri tyyppisille päätteille erilaisissa kosteusolosuhteissa. Kenttäolosuhteissa asian tutkiminen voisi onnistua esimerkiksi mittaamalla samaa kaapeliyhteyttä toistuvasti eri olosuhteissa. Tulosten tulkintaa saattaa kuitenkin vaikeuttaa se, että olosuhteet kaapelin molemmissa päissä eivät yleensä ole samat ja ilman kosteuden lisäksi samanaikaisesti voi muuttua muitakin tekijöitä, joilla voi olla vaikutusta tuloksiin.



Kuva 6.7. Mitattujen 10 kV APYAKMM-kaapelijärjestelmien häviökertoimet mittausajankohdan funktiona.



Kuva 6.8. Mitattujen 10 kV APAKM- ja PLKVJ-kaapelijärjestelmien häviökertoimet mittausajankohdan funktiona.



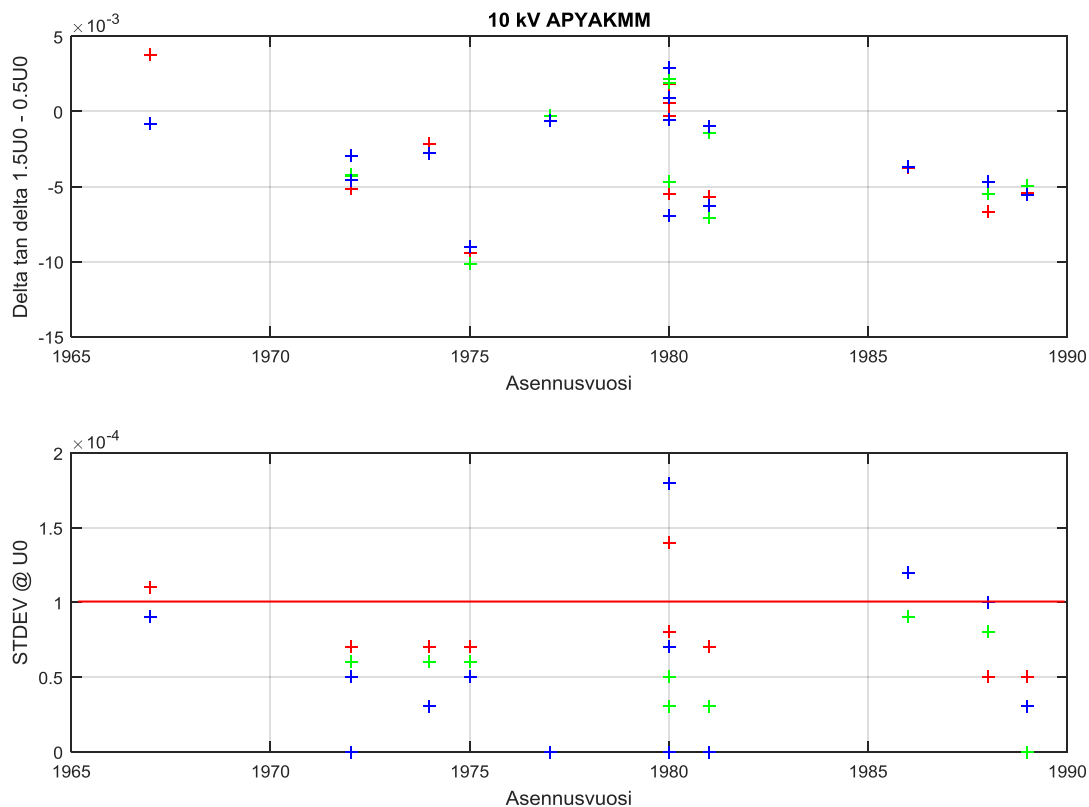
Kuva 6.9. Mitattujen 20 kV APYAKMM- ja AHXAMK-W-kaapelijärjestelmien häviökertoimet mittausajankohdan funktiona.

6.5 Häviökertoimen muutokset ja keskihajonnat asennusvuosittain

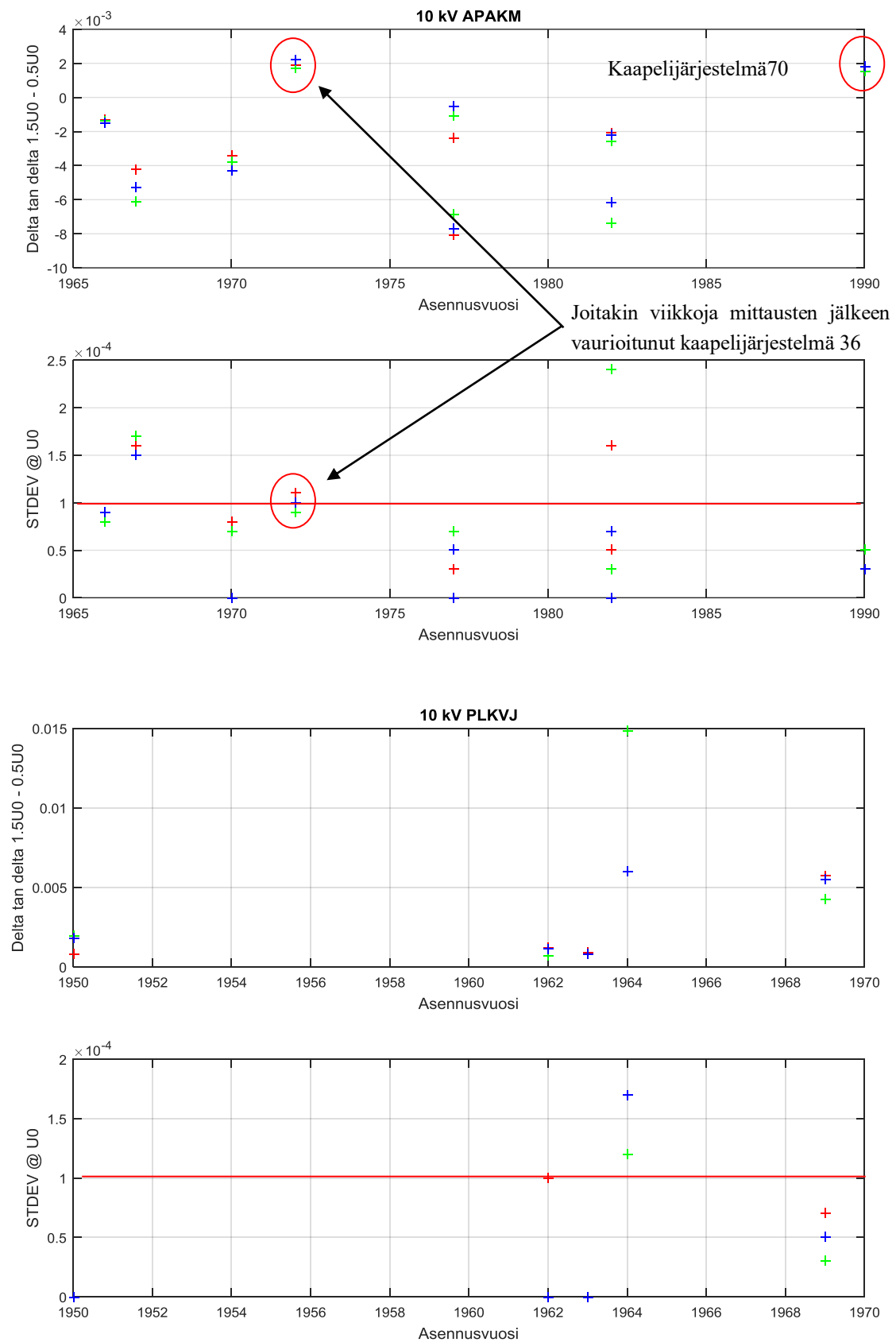
Kuvissa 6.10 ja 6.11 on esitetty mitattujen 10 kV kaapelijärjestelmien häviökertoimien muutokset jännitteen funktiona ja keskihajonnat U_0 :lla asennusvuosittain.

Kuvassa 6.12 on esitetty mitattujen 20 kV kaapelijärjestelmien häviökertoimien muutokset jännitteen funktiona ja keskihajonnat U_0 :lla asennusvuosittain. Eniten korrelaatiota asennusvuoden ja häviökertoimen muutoksen ja keskihajonnan välillä näyttäisi olevan 20 kV AHXAMK-W-kaapelijärjestelmien tapauksessa.

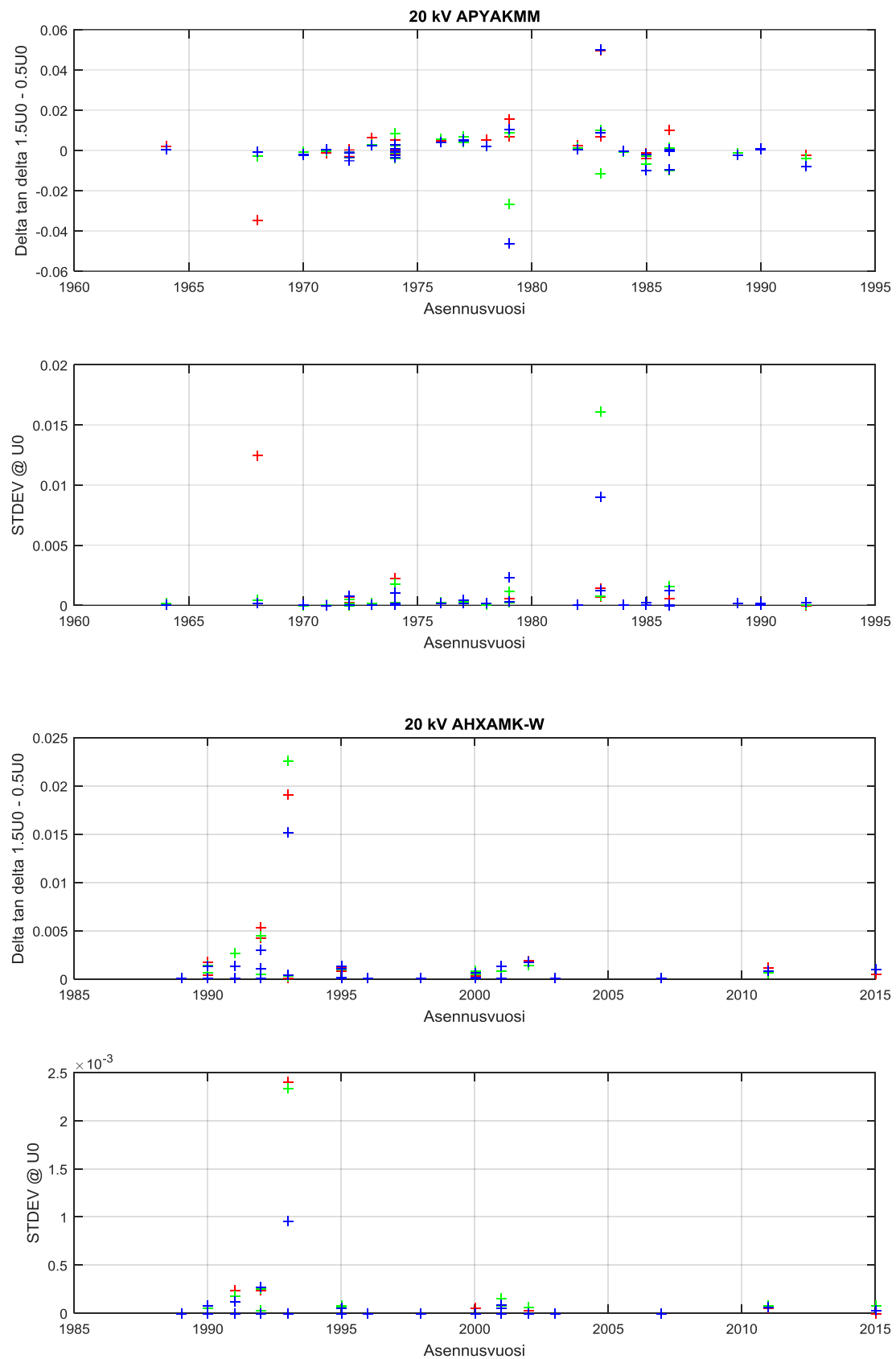
Yleisen käsityksen mukaan mitä suurempi häviökertoimen muutos jännitteen funktiona ja häviökertoimen keskiarvo ovat, sitä pahemmin ikääntynyt kaapelijärjestelmä on [IEEE2013a, Kim14a]. Kuten kuvasta 6.8 nähdään, tämä näyttäisi pitävän hyvin paikkansa mittausten jälkeen vikaantuneen kaapelin 36 tapauksessa, jonka häviökertoimen muutos jännitteen funktiona erottuu selvästi muiden saman tyyppisten kaapeleiden vastaavia arvoja suurempana, vaikkakaan se ei ylitä standardin IEEE Std400.2-2013 raja-arvoa. Vain kaapelin 70 häviökertoimen muutos jännitteen funktiona on suunnilleen saman suuruinen, mutta toisaalta sen häviökertoimen keskihajonta taas on selvästi pienempi, kun kaapelin 36 häviökertoimen keskihajonta sen sijaan ylittää yhden vaiheen osalta standardin raja-arvon 1×10^{-4} .



Kuva 6.10. Mitattujen 10 kV APYAKMM-kaapelijärjestelmien häviökertoimien muutokset jännitteen funktiona ja keskihajonnat U_0 :lla asennusvuosittain.



Kuva 6.11. Mitattujen 10 kV APAKM- ja PLKVJ-kaapelijärjestelmien häviökertoimien muutokset jännitteen funktiona ja keskihajonnat U_0 :lla asennusvuosittain.



Kuva 6.12. Mitattujen 20 kV APYAKMM- ja AHXAMK-W-kaapelijärjestelmien häviökertoimien muutokset jännitteen funktiona ja keskihajonnat U₀:lla asennusvuosittain.

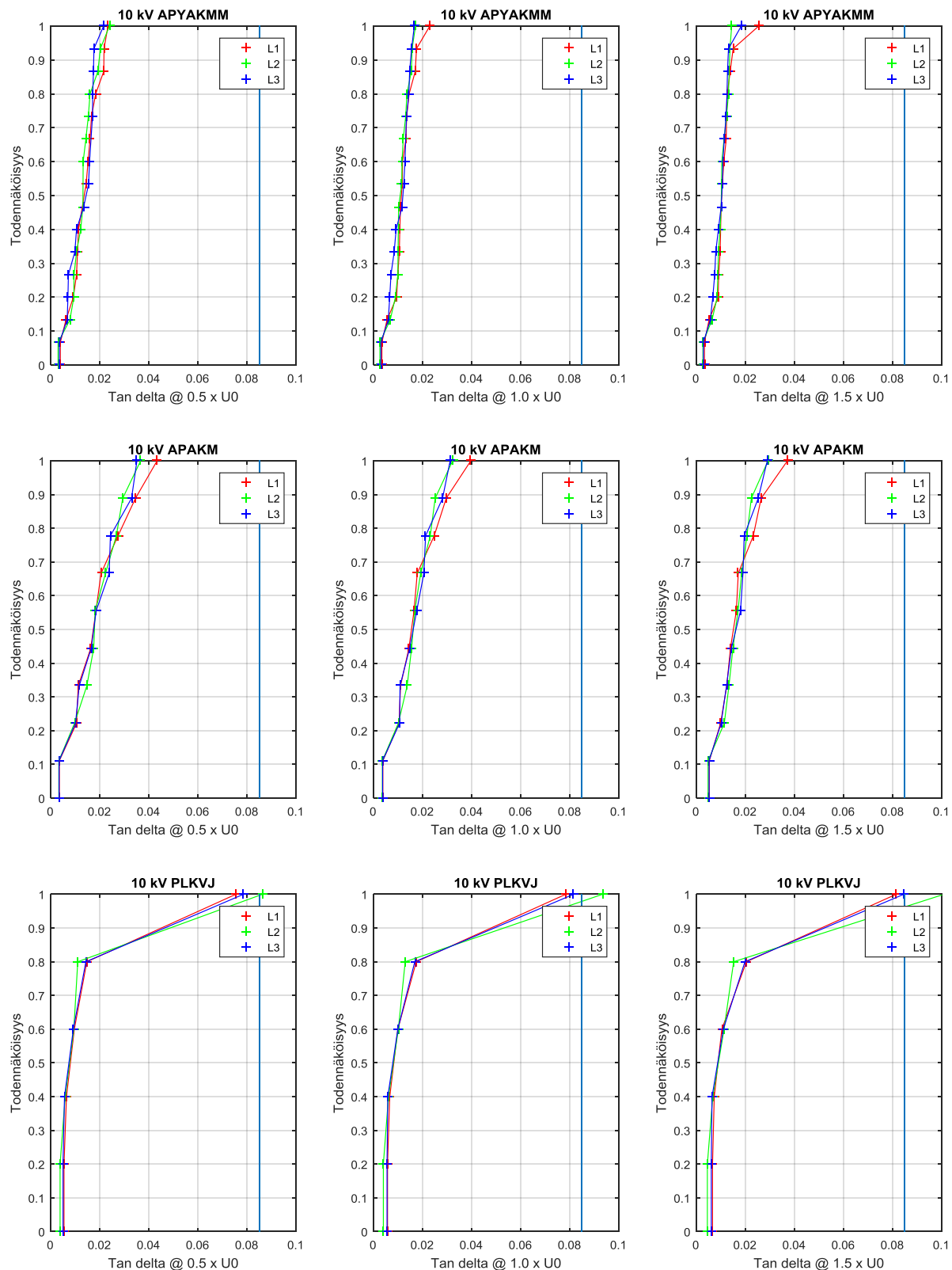
6.6 Häviökerrointen kertymäfunktiot

Kaapelijärjestelmien häviökertoimista muodostettiin kertymäfunktiot, joiden perusteella on luontevinta määritellä raja-arvoja kaapelijärjestelmien kuntoluokille. 10 kV kaapelijärjestelmien kertymäfunktiot on esitetty kuvassa 6.13 vaiheet eriteltyinä ja kuvassa 6.14 kaikkien vaiheiden tulokset yhdistettynä. 20 kV kaapelijärjestelmien osalta tulokset on esitetty vastaavasti kuvissa 6.15 ja 6.16-6.17.

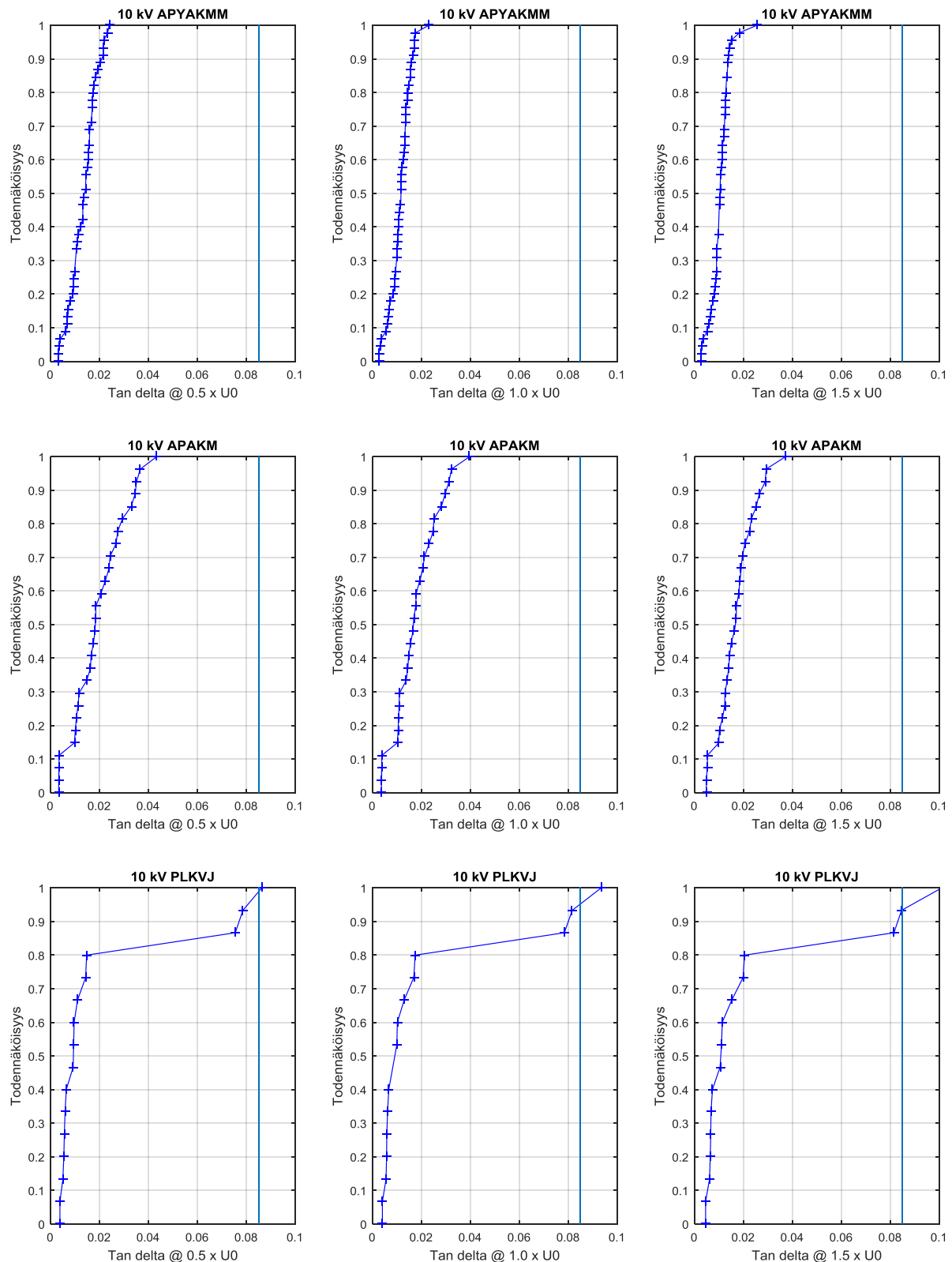
10 kV APYAKMM-kaapelijärjestelmien näytemäärä on sen verran pieni ja kaapelit poikkeuksetta sen verran hyväkuntoisia, että esimerkiksi standardissa IEEE Std400.2-2013 käytetyllä luokitteluperiaatteella eri luokkien välille on vaikea vetää luotettavia raja-arvoja. 10 kV APAKM- ja PLKVJ-kaapelijärjestelmien häviökerroin vaihtelee enemmän, mutta toisaalta näytemäärä on vielä pienempi kuin APYAKMM-kaapelijärjestelmissä.

Periaatteessa APAKM- ja PLKVJ-kaapelijärjestelmiä voisi ehkä tarkastella yhtenä ryhmänäkin, koska molemmat kaapelit ovat rakenteeltaan vyöeristettyjä kaapeleita. Yleisesti ottaen näyttäisi kuitenkin siltä, että standardin IEEE Std400.2-2013 raja-arvot öljypaperikaapeleiden häviökertoimen keskiarvolle ovat Suomen 10 kV verkkoja ajatellen turhan suuria.

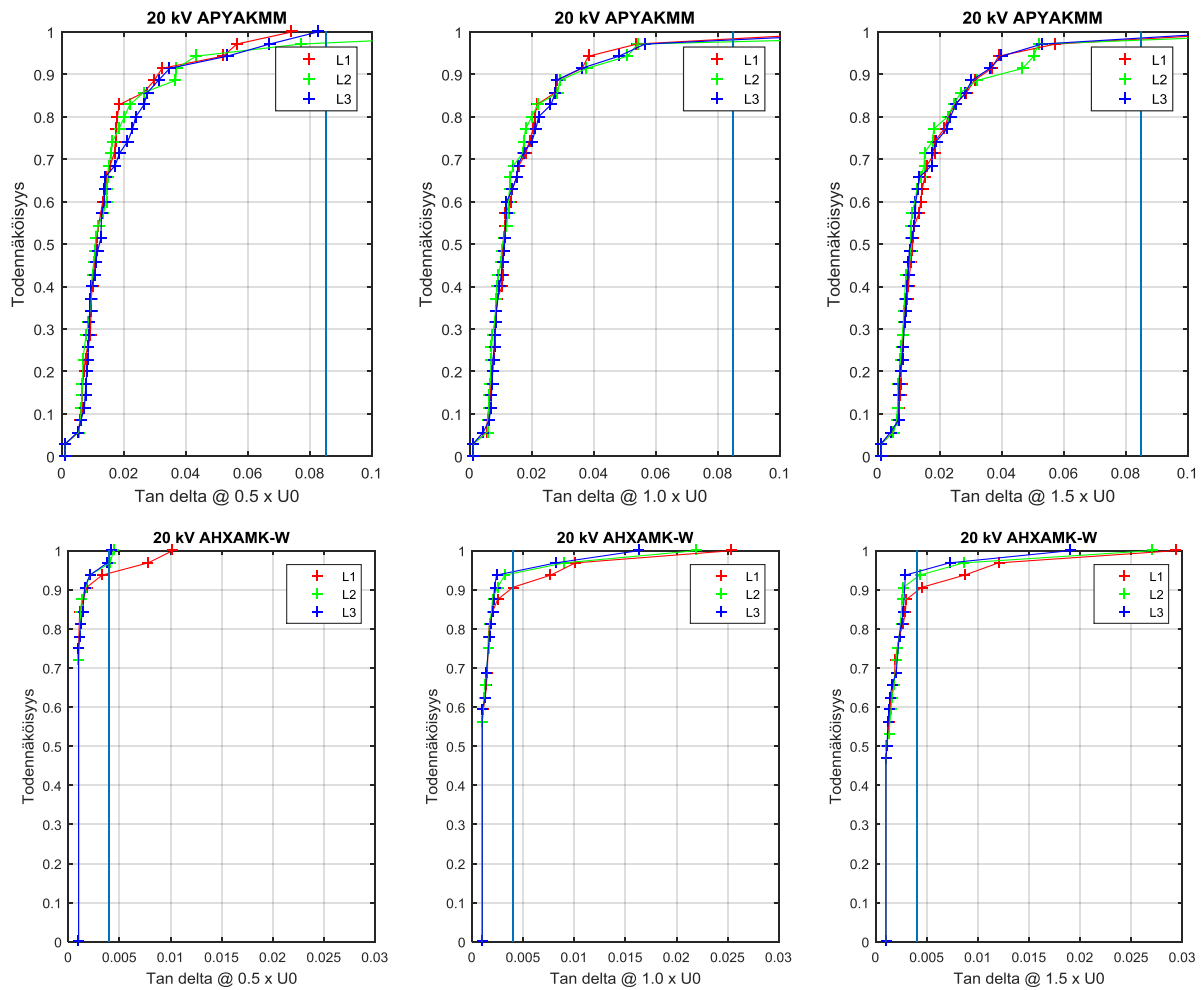
20 kV kaapelijärjestelmissä näytemäärät olivat suurempia ja näyttäisi, että kuntoluokittelun tekemiseen on paremmat edellytykset kuin 10 kV kaapelijärjestelmien kohdalla. Standardin IEEE Std400.2-2013 raja-arvot häviökertoimen keskiarvolle näyttäisivät 20 kV kaapelijärjestelmien osaltakin olevan Suomen olosuhteisiin turhan suuria. Osassa 20 kV kaapeleiden mittauksista ilman suhteellinen kosteus oli varsin suuri ja tämän luvun ja lukujen 6.7...6.8 kertymäfunktio tarkastelut sekä luvun 6.10 raja-arvotarkastelut on sen vuoksi tehty kahdella tavalla: koko otoksesta ja lisäksi suppeammasta otoksesta josta on jätetty pois kaapelijärjestelmät, jotka on mitattu yli 94 % suhteellisessa kosteudessa. Ilman suhteellisen kosteuden ollessa pienempi tai yhtä suuri kuin 94 % sen vaikutus häviökerrointunnukseluihin näyttäisi liitteen C perusteella olleen tehtyihin mittauksiin vielä pieni. Supistetuissa otoksissakin kaapelijärjestelmiä on vielä kohtalaisen runsaasti AHXAMK-W-kaapelijärjestelmiä 26 kpl (78 kpl yksittäisiä vaiheita) ja APYAKMM-kaapelijärjestelmiä 24 kpl (72 kpl yksittäisiä vaiheita).



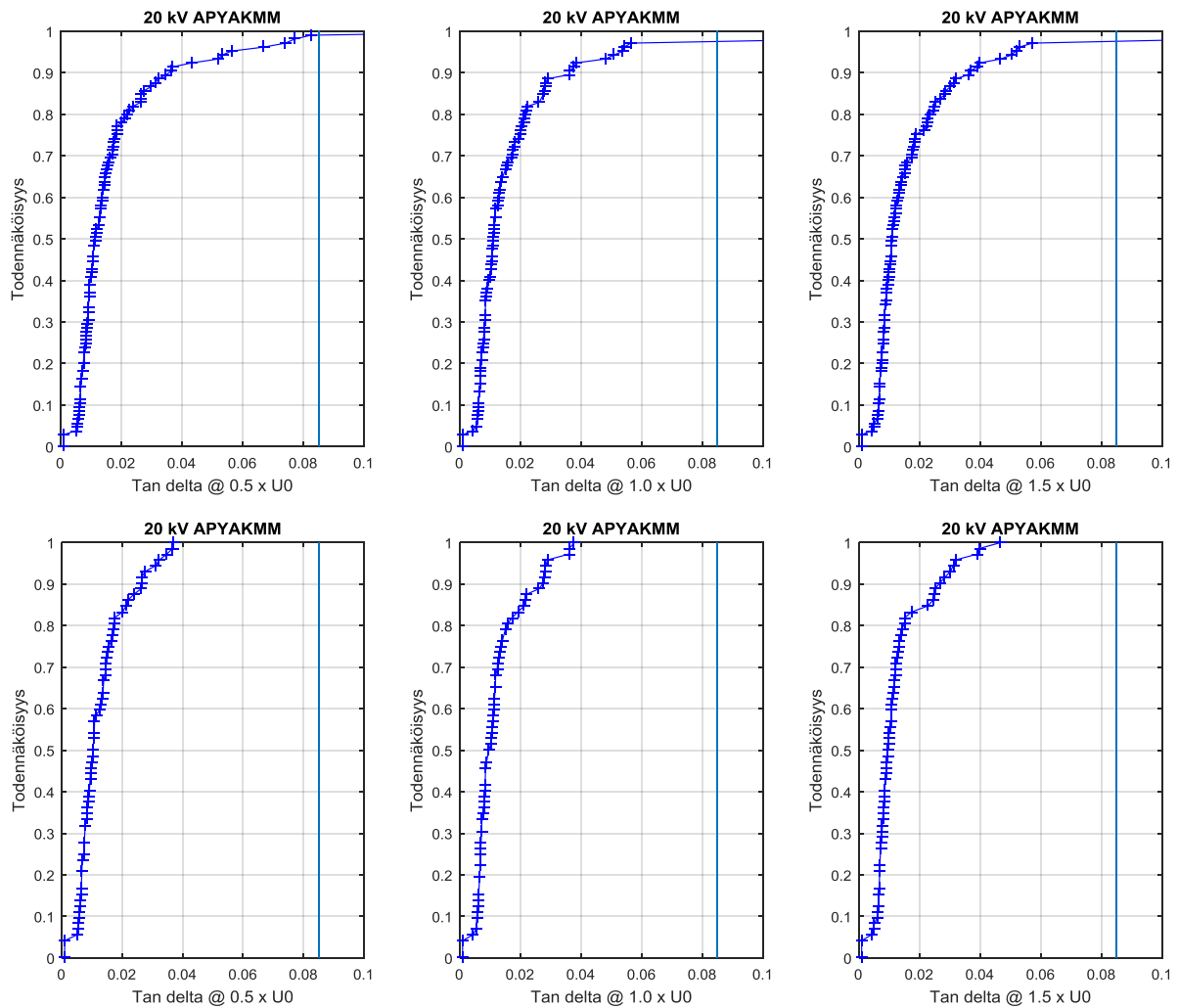
Kuva 6.13. 10 kV kaapelijärjestelmien häviökertoimien kertymäfunktiot vaihekohtaisesti muodostettuna. Sininen pystyviiva on standardin IEEE Std400.2-2013 alempi raja-arvo, jonka ylitys edellyttää kaapeliyhteyden tarkempaa tutkimusta.



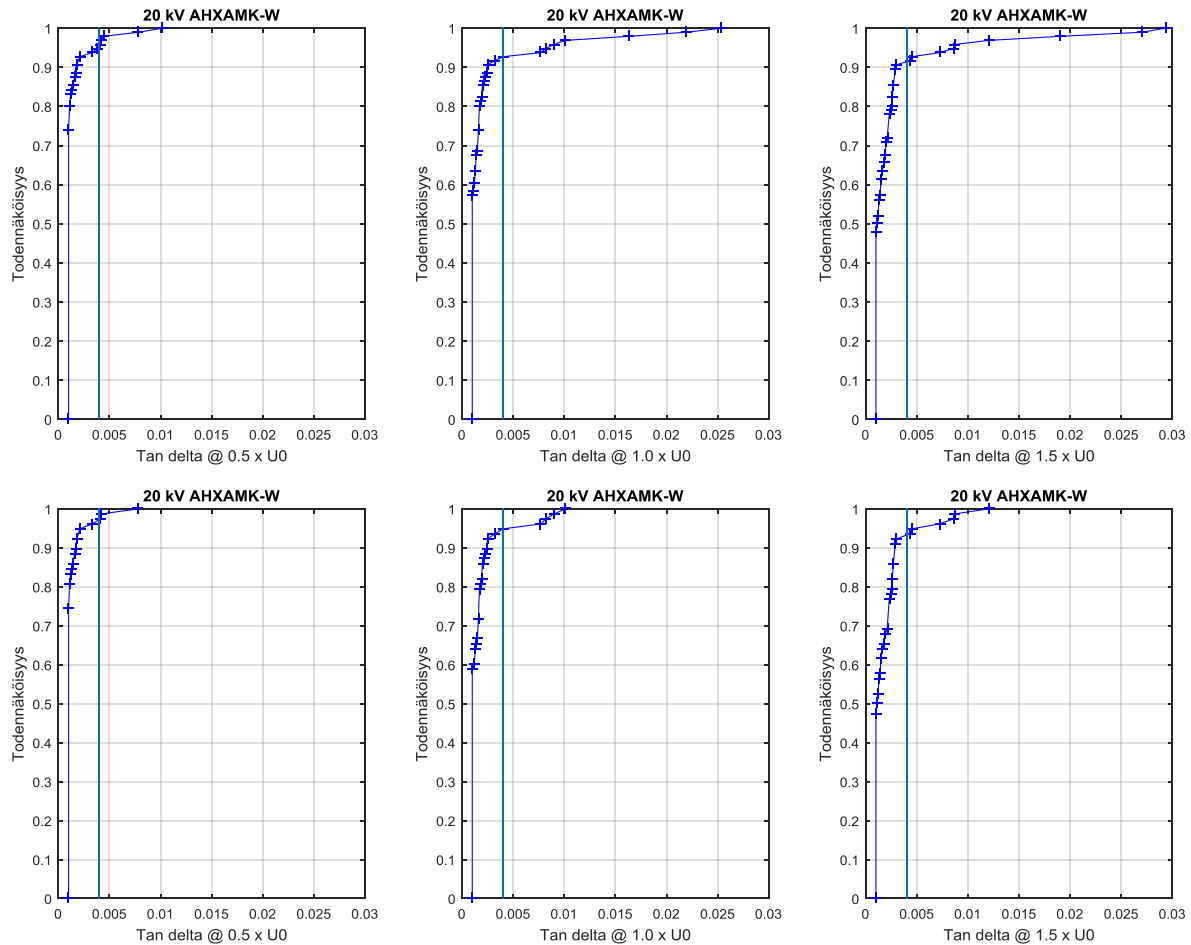
Kuva 6.14. 10 kV kaapelijärjestelmien häviökertoimien kertymäfunktiot kaikkien vaiheiden tulokset yhdistettynä. Sininen pystyviiva on standardin IEEE Std400.2-2013 alempi raja-arvo, jonka ylitys edellyttää kaapeliyhteyden tarkempaa tutkimusta.



Kuva 6.15. 20 kV APYAKMM- ja AHXAMK-W-kaapelijärjestelmien häviökertoimien kertymäfunktiot vaihekohtaisesti muodostettuna. Sininen pystyviiva on standardin IEEE Std400.2-2013 alempi raja-arvo, jonka ylitys edellyttää kaapeliyhteyden tarkempaa tutkimusta.



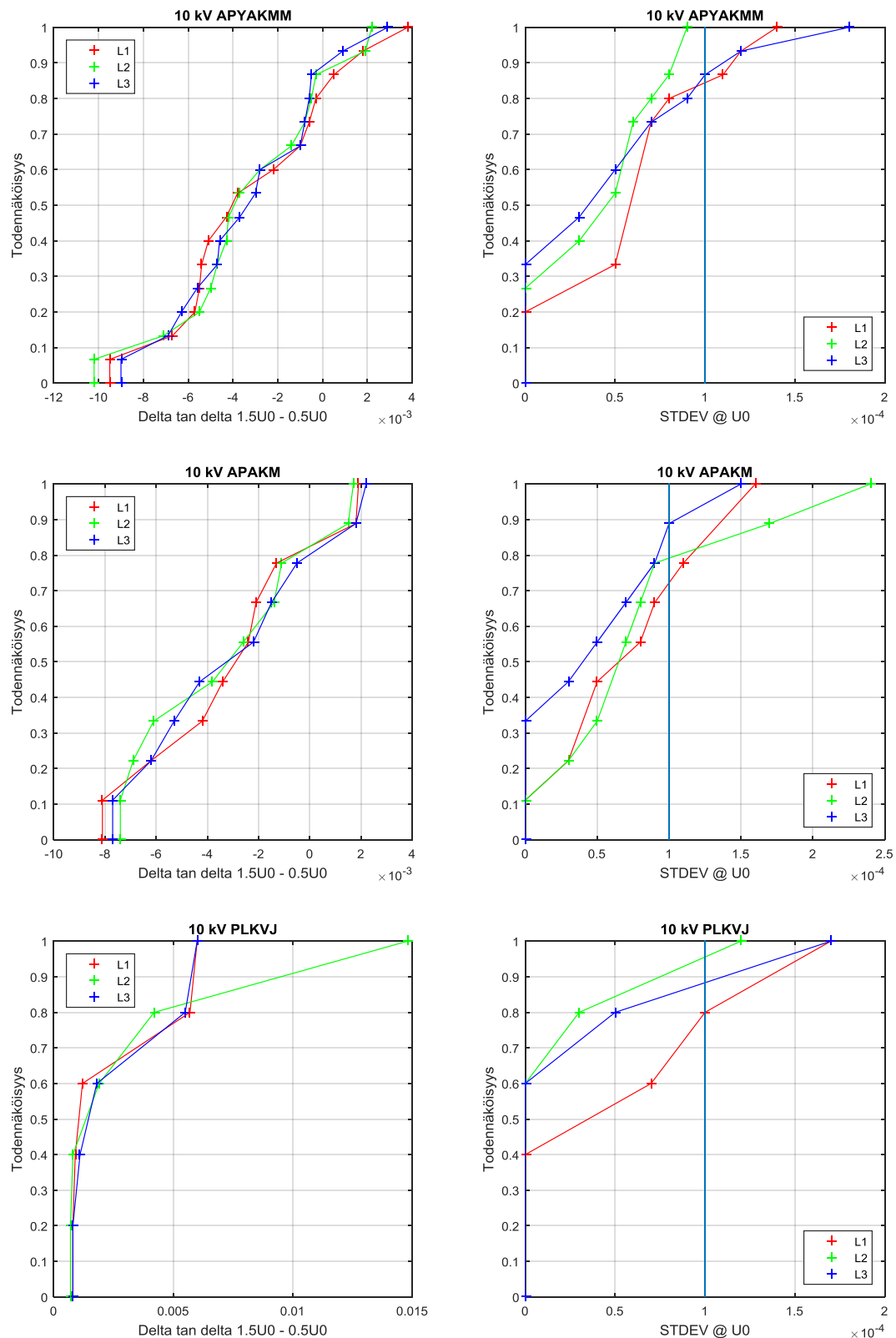
Kuva 6.16. 20 kV APYAKMM-kaapelijärjestelmien häviökertoimien kertymäfunktioit kaikkien vaiheiden tulokset yhdistettynä. Alempien kuvien otoksesta on poistettu kaapelit, joiden mittaustuloksiin ilman suurella suhteellisella kosteudella (> 94 %) on todennäköisesti ollut vaikutusta. Sininen pystyviiva on standardin IEEE Std400.2-2013 alempi raja-arvo, jonka ylitys edellyttää kaapeliyhteyden tarkempaa tutkimusta.



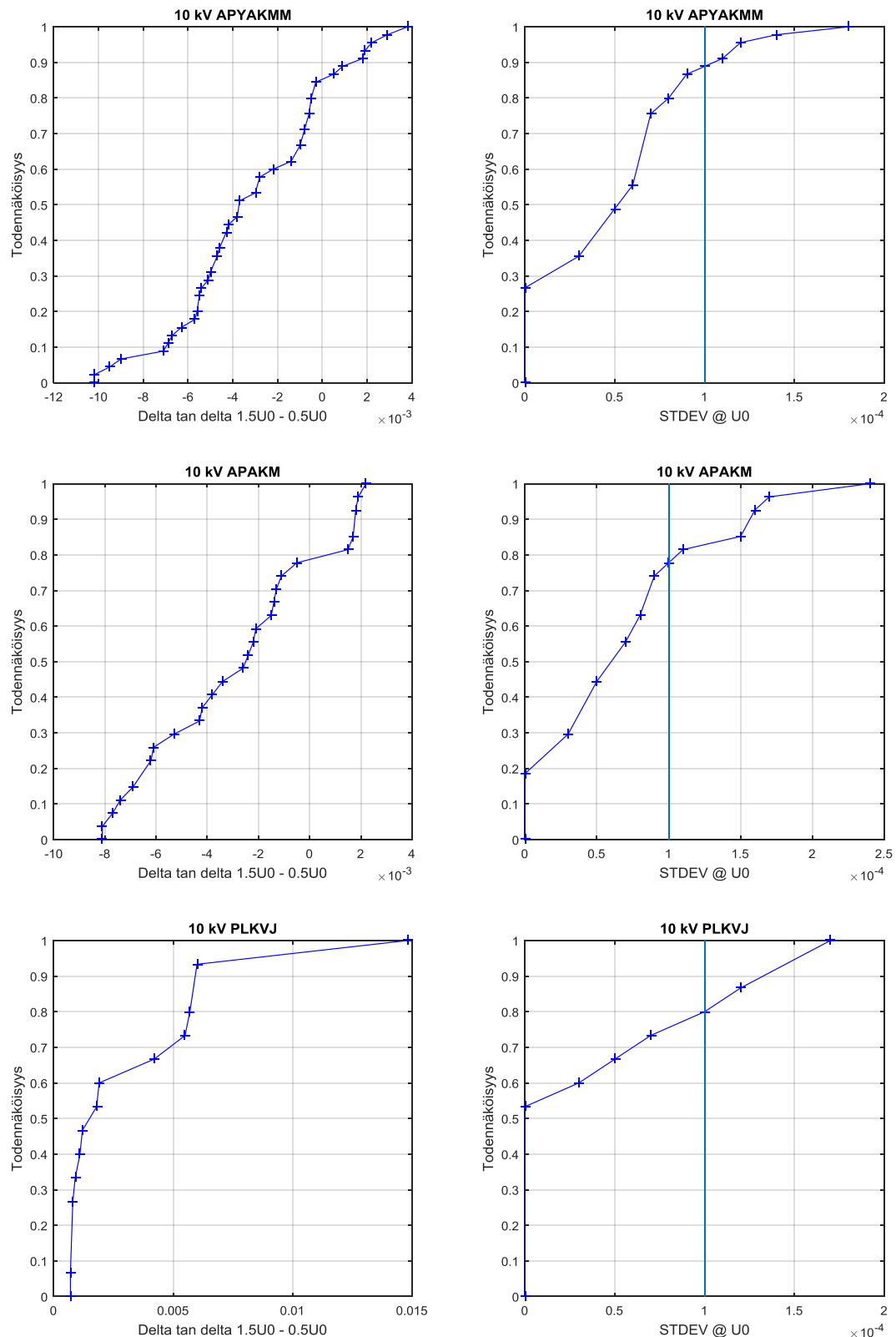
Kuva 6.17. 20 kV AHXAMK-W-kaapelijärjestelmien häviökertoimien kertymäfunktioit kaikkien vaiheiden tulokset yhdistettynä. Alempien kuvien otoksesta on poistettu kaapelit, joiden mittaustuloksiin ilman suurella suhteellisella kosteudella ($> 94\%$) on todennäköisesti ollut vaikutusta. Sininen pystyviiva on standardin IEEE Std400.2-2013 alempi raja-arvo, jonka ylitys edellyttää kaapeliyhityksen tarkempaa tutkimusta.

6.7 Häviökerrointen muutosten ja keskihajontojen kertymäfunktioit

Kuvissa 6.18...6.22 on esitetty kaapelijärjestelmien kertymäfunktioit häviökerrointen muutoksesta jännitteen funktiona ja keskihajonnasta. 10 kV kaapelijärjestelmien kertymäfunktioit on esitetty kuvassa 6.18 vaiheet eriteltyinä ja kuvassa 6.19 kaikkien vaiheiden tulokset yhdistettynä. 20 kV kaapeleiden osalta tulokset on esitetty vastaavasti kuvissa 6.20 ja 6.21...6.22. Kertymäfunktioihin on piirretty myös standardin IEEE Std400-2:2013 raja-arvot silloin kun ne osuvat kuva-alalle. 10 kV kaapelijärjestelmien osalta näyttäisi siltä, että standardin IEEE Std400.2-2013 alempi raja-arvo häviökertoimen muutokselle jännitteen funktiona on Suomen olosuhteita ajatellen liian suuri, mutta häviökertoimen keskihajonnalle melko lähellä oikeaa tai vain hieman liian suuri. Standardin IEEE Std400-2:2013 ylemmät raja-arvot sekä häviökertoimen muutokselle jännitteen funktiona että keskihajonnalle ovat Suomen olosuhteita ajatellen liian suuria. Täytyy kuitenkin muistaa, että otokset ovat 10 kV kaapelijärjestelmien osalta varsin pieniä, ja tästä johtuen niiden osalta ei voida vetää kovin pitkälle meneviä johtopäätöksiä.



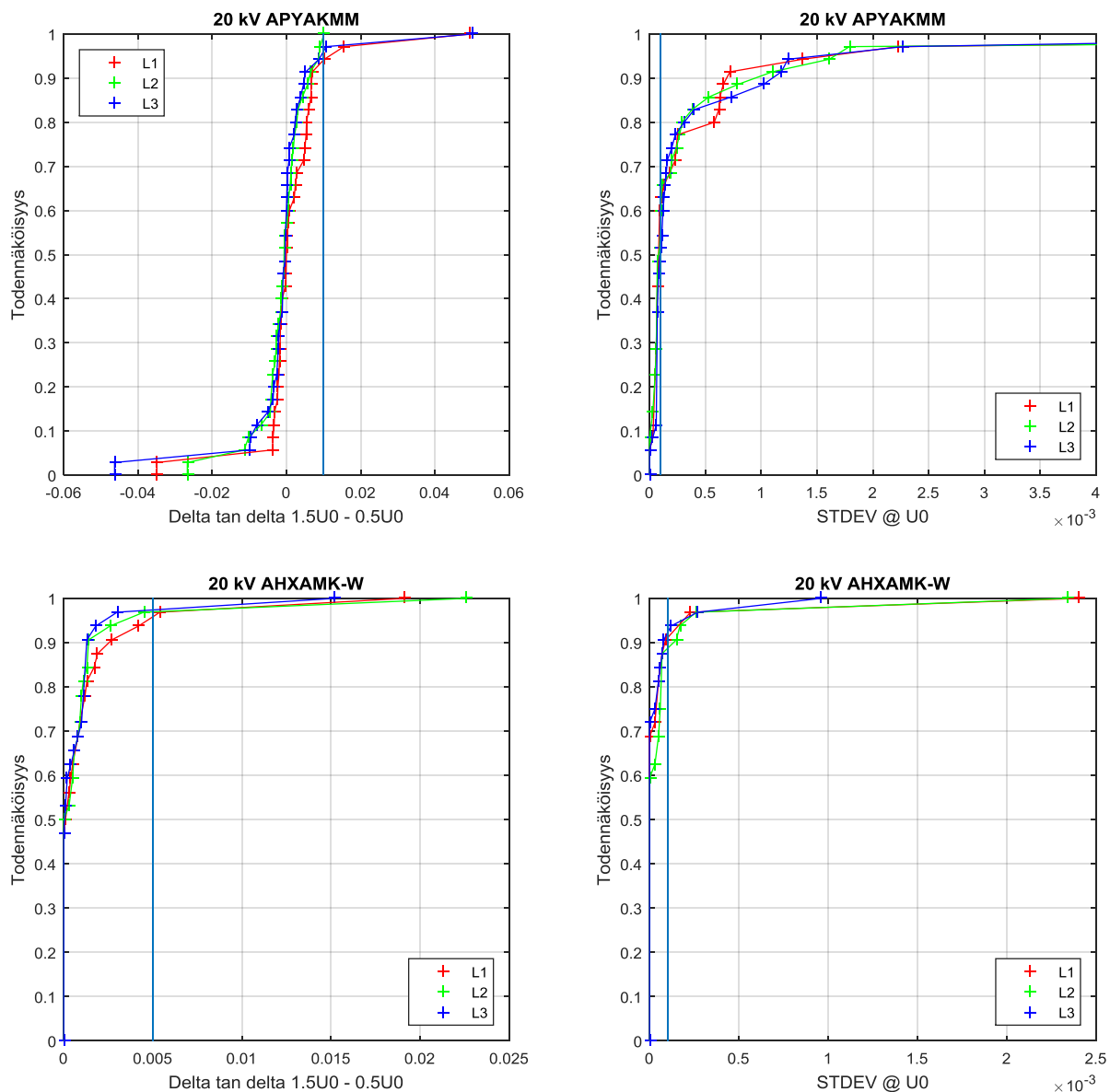
Kuva 6.18. 10 kV kaapelijärjestelmien kertymäfunktiot muodostettuna vaihekohtaisesti häviökertoimien muutoksesta jännitteen funktiona ja häviökertoimien keskihajonnoista. Sininen pystyviiva on standardin IEEE Std400.2-2013 luokan alempi raja-arvo, jonka ylitys edellyttää kaapeliyhteyden tarkempaa tutkimusta (delta tan deltan osalta se on 0.035 ja sen vuoksi se ei näy kuvassa).



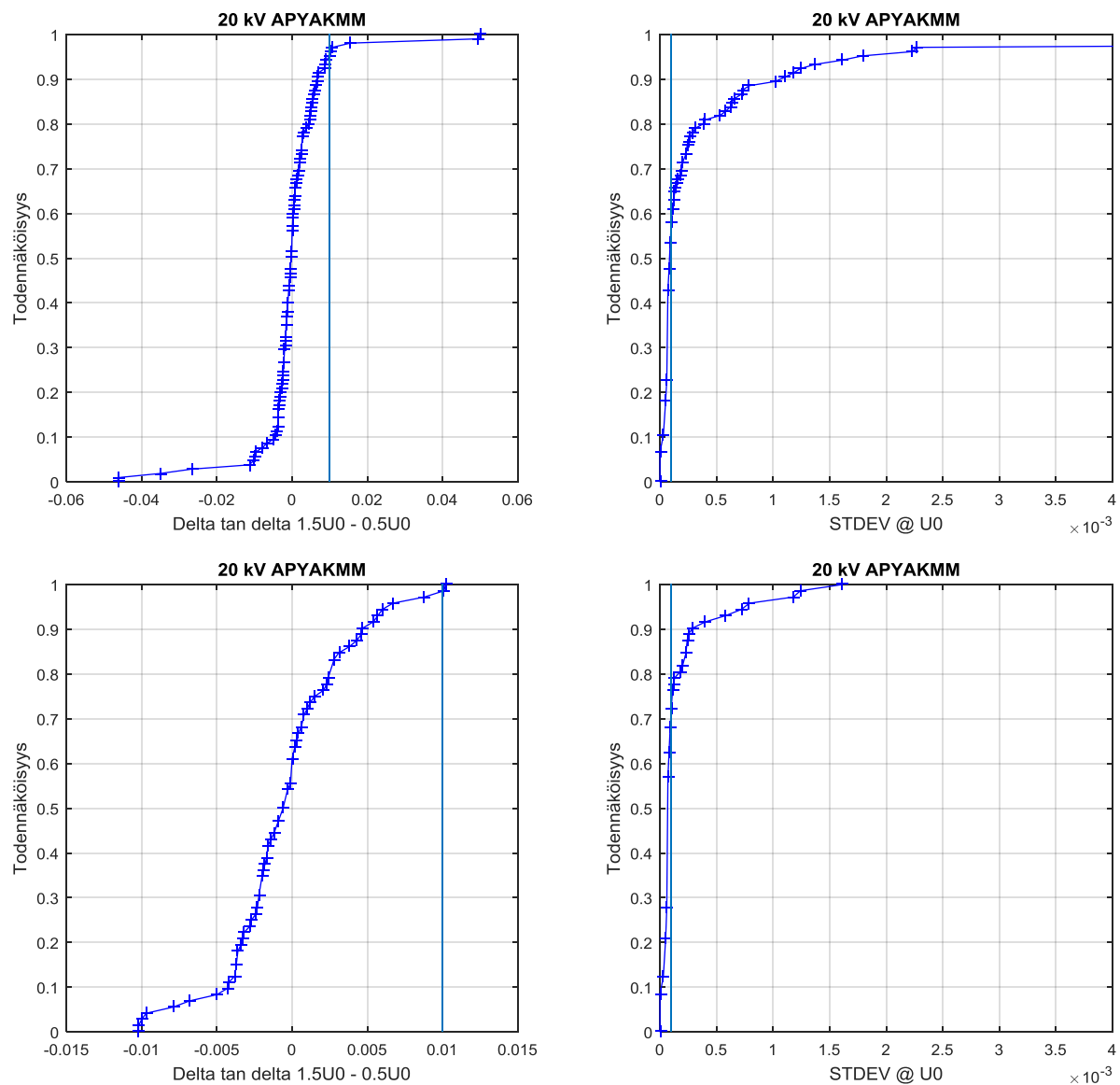
Kuva 6.19. 10 kV kaapelijärjestelmien kertymäfunktiot häviökertoimien muutoksesta jännitteen funktiona ja häviökertoimien keskihajonnoista kaikkien vaiheiden tulokset yhdistettynä. Sininen pystyviiva on standardin IEEE Std400.2-2013 luokan alempi raja-arvo, jonka ylitys edellyttää kaapeliyhteyden tarkempaa tutkimusta (häviökertoimen muutokselle jännitteen funktiona se on 0.035 ja sen vuoksi se ei näy kuvassa).

20 kV kaapelijärjestelmien osalta näyttäisi siltä, että standardin IEEE Std400-2:2013 raja-arvot (sekä alempi että ylempi) häviökertoimen muutokselle jännitteen funktiona ovat sekä öljypaperi- että muovikaapeleiden osalta Suomen olosuhteita ajatellen liian suuria. Häviökertoimen keskihajonnan raja-arvot (sekä alempi että ylempi) näyttäisivät koko otosta tarkasteltaessa olevan 20 kV APYAKMM-kaapelijärjestelmille hieman liian pieniä ja AHXAMK-W-kaapelijärjestelmille taas hieman liian suuria. Jos tarkastellaan supistettua otosta, josta yli 94 % ulkoilman suhteellisessa kosteudessa mitatut kaapelijärjestelmät on jätetty pois, raja-arvot näyttäisivät olevan edelleen 20 kV APYAKMM-kaapelijärjestelmien osalta hieman liian pieniä, joskin pienemmällä erolla kuin koko otoksen tapauksessa.

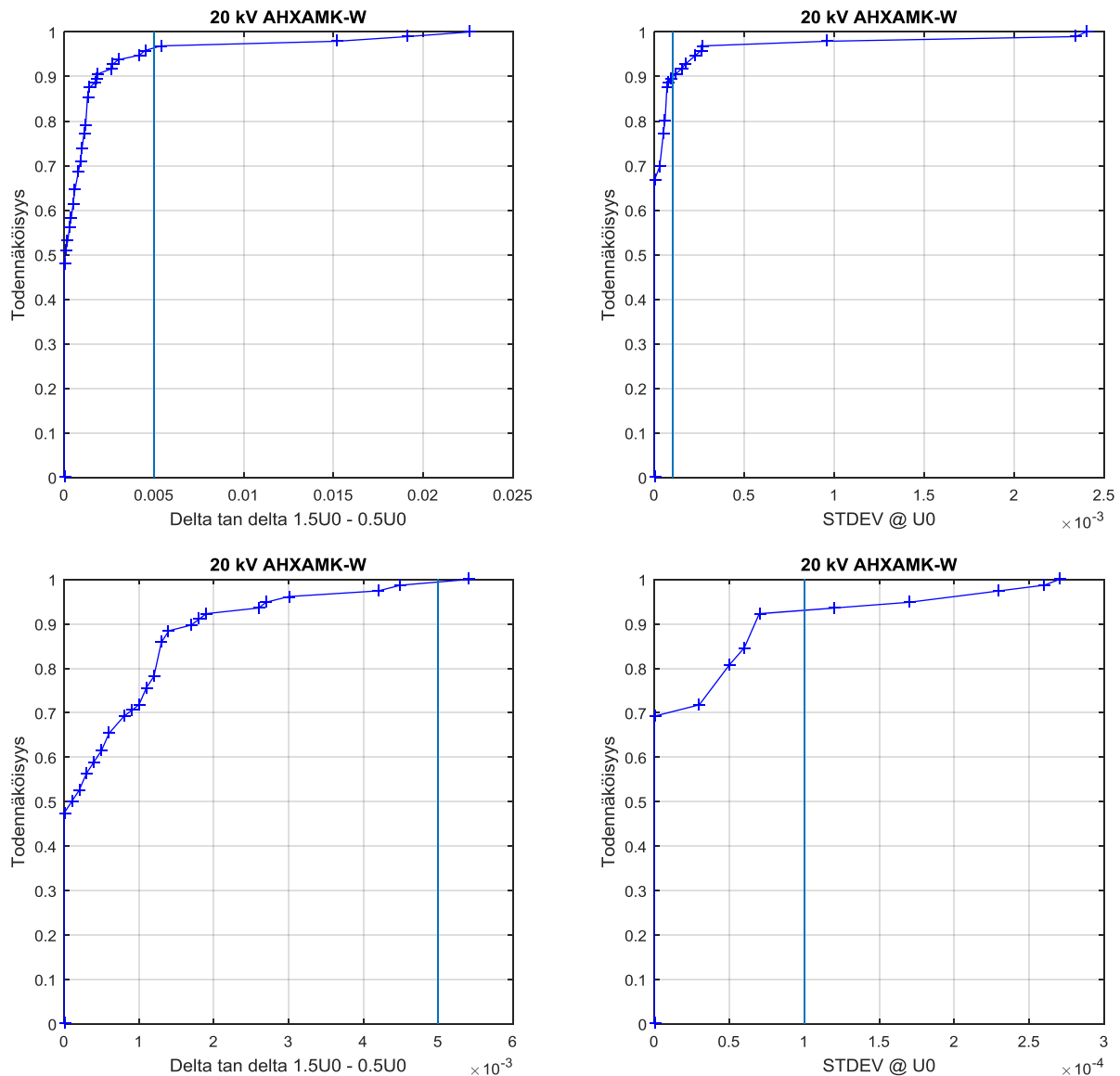
Tämän tutkimuksen otosten perusteella muodostettuja raja-arvoja häviökertoimen muutokselle jännitteen funktiona ja häviökertoimen keskihajonnalle on käsitelty tarkemmin luvussa 6.10.



Kuva 6.20. 20 kV kaapelijärjestelmien kertymäfunktiot muodostettuna vaihekohtaisesti häviökertoimien muutoksesta jännitteen funktiona ja häviökertoimien keskihajonnoista. Sininen pystyviiva kuvissa on standardin IEEE Std400.2-2013 luokan alempi raja-arvo, jonka ylitys edellyttää kaapeliyhteyden tarkempaa tutkimusta.



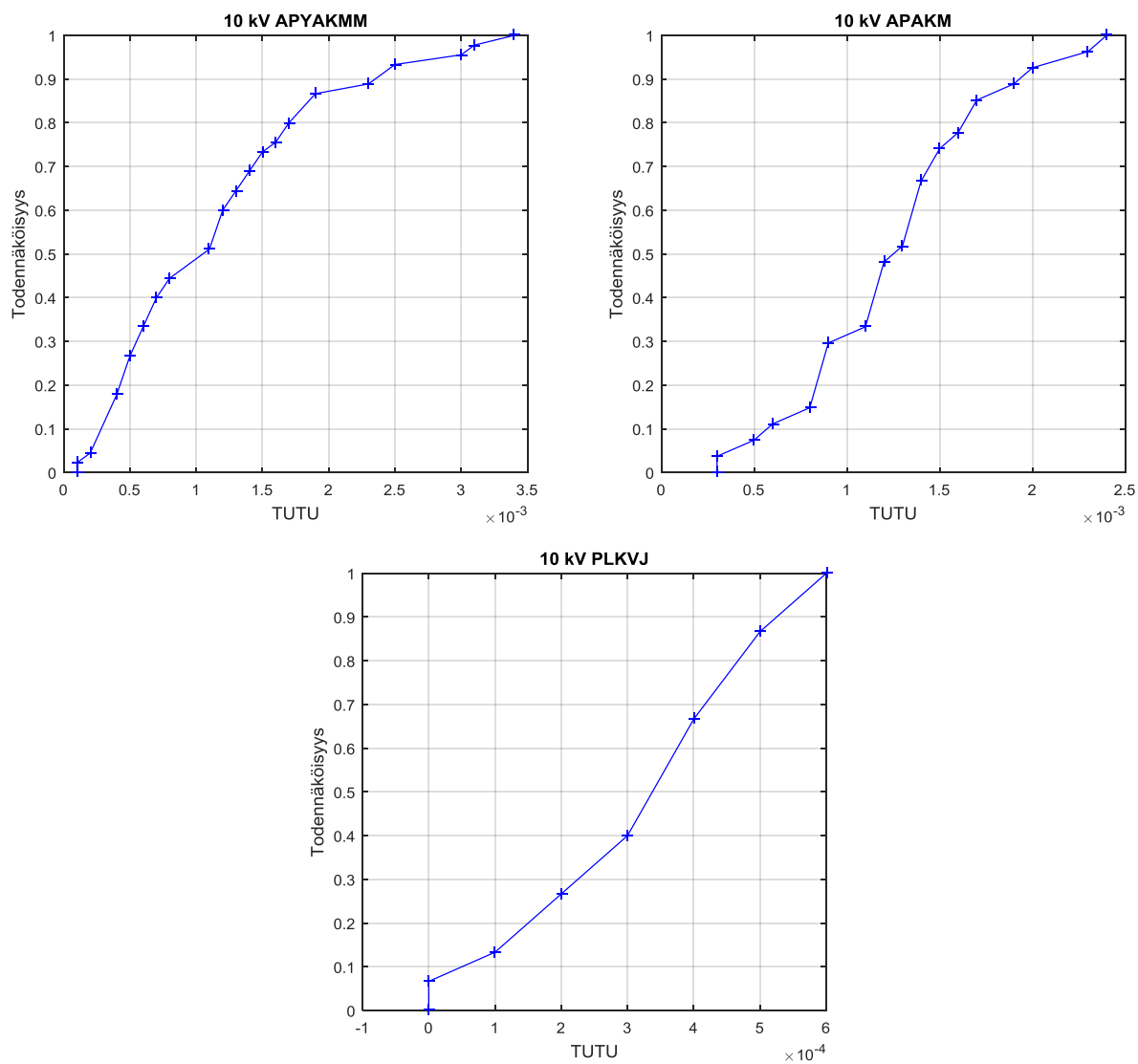
Kuva 6.21. 20 kV APYAKMM-kaapelijärjestelmien kertymäfunktiot häviökerroimien muutoksesta jännitteen funktiona ja häviökerroimien keskihajonnoista kaikkien vaiheiden tulokset yhdistettynä. Alempien kuvien otoksesta on poistettu kaapelit, joiden mittaustuloksiin ilman suurella suhteellisella kosteudella (> 94 %) on todennäköisesti ollut vaikutusta. Sininen pystyviiva kuvissa on standardin IEEE Std400.2-2013 luokan alempi raja-arvo, jonka ylitys edellyttää kaapeliyhteyden tarkempaa tutkimusta.



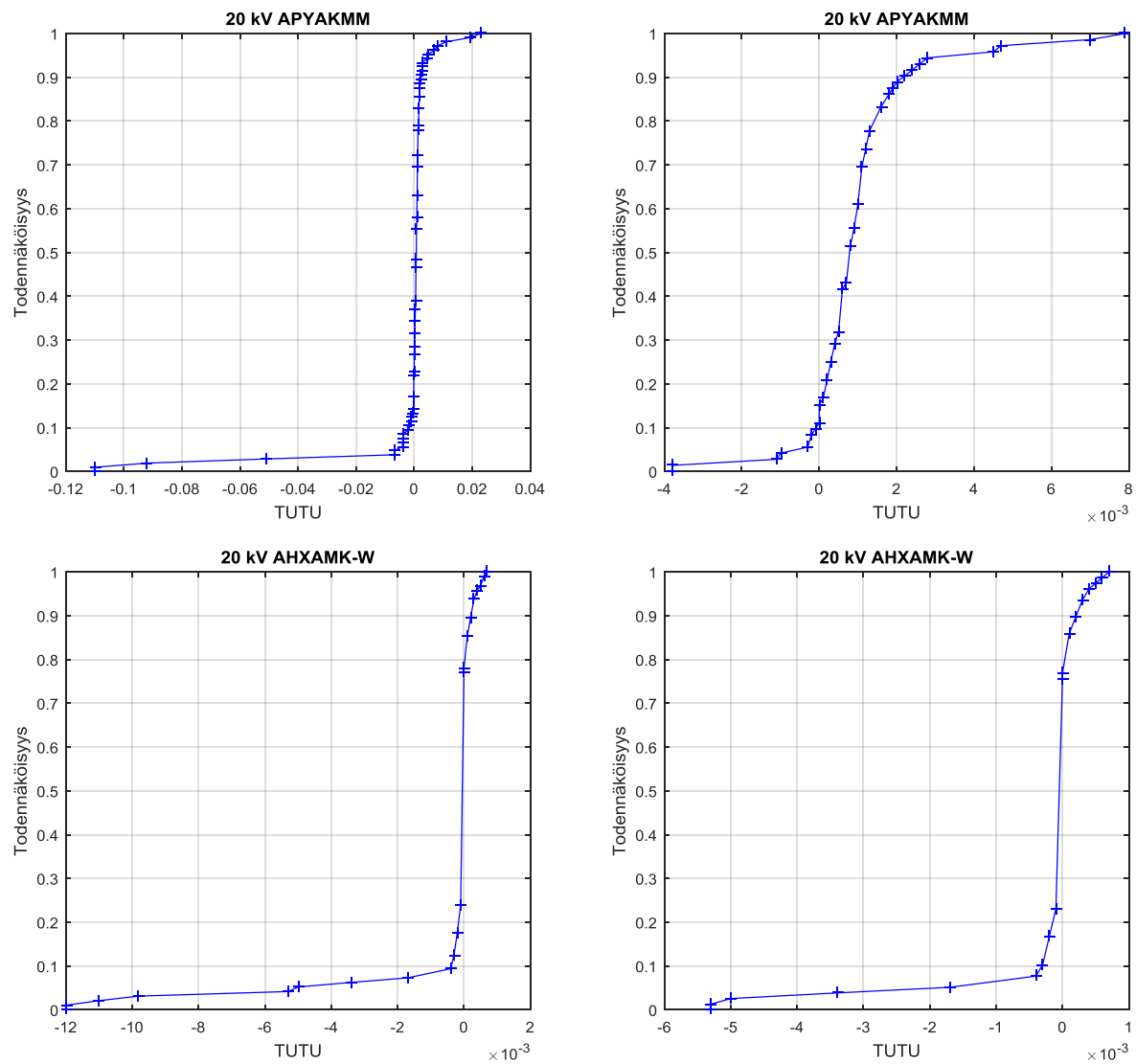
Kuva 6.22. 20 kV AHXAMK-W-kaapelijärjestelmien kertymäfunktiot häviökertoimien muutoksesta jännitteen funktiona ja häviökertoimien keskihajonnoista kaikkien vaiheiden tulokset yhdistettynä. Alempien kuvien otoksesta on poistettu kaapelit, joiden mittaustuloksiin ilman suurella suhteellisella kosteudella (> 94 %) on todennäköisesti ollut vaikutusta. Sininen pystyviiva kuvissa on standardin IEEE Std400.2-2013 luokan alempi raja-arvo, jonka ylitys edellyttää kaapeliyhteyden tarkempaa tutkimusta.

6.8 Häviökertoimen muutosten epälineaarisuus jännitteen funktiona

Häviökertoimen muutoksen epälineaarisuutta jännitteen funktiona kuvaavaa tunnuslukua (TUTU) ei ole määritelty standardissa IEEE Std400.2-2013, mutta myös ne määritettiin tässä hankkeessa kaikkien tutkittujen kaapelijärjestelmien osalta. Tunnusluvusta muodostetut kertymäfunktiot 10 kV kaapelijärjestelmien osalta on esitetty kuvassa 6.23 ja 20 kV kaapelijärjestelmien osalta kuvassa 6.24. Tämän tutkimuksen otosten perusteella muodostettuja raja-arvoja TUTU-tunnusluvulle on käsitelty tarkemmin luvussa 6.10.



Kuva 6.23. 10 kV kaapelijärjestelmien TUTU-tunnusluvun kertymäfunktiot kaikkien vaiheiden tulokset yhdistettynä.



Kuva 6.24. 20 kV kaapelijärjestelmien TUTU-tunnusluvun kertymäfunktioit kaikkien vaiheiden tulokset yhdistettynä. Oikeanpuoleisten kuvien otoksista on poistettu kaapelit, joiden mittaustuloksiin ilman suurella suhteellisella kosteudella ($> 94\%$) on todennäköisesti ollut vaikutusta.

6.9 Häviökerroinmittauksissa huomioitavia tekijöitä

Koska kaikkien tekijöiden vaikutusta häviökerroinmittausten tuloksiin ei täysin tunneta, häviökerroinmittauksista olisi tämän tutkimuksen perusteella hyvä kerätä mahdollisuuksien mukaan mahdollisimman kattavat tiedot mitatusta kaapeliyhteydestä ja mittaustulokseen mahdollisesti vaikuttavista tekijöistä. Jokaisesta mittauskohteesta olisi hyvä kirjata ainakin seuraavat tiedot:

1. muuntamotyytit (kiinteistö-, puisto- tai pylväsmuuntamo) ja kaapelipäätetyypit kaapelin molemmissa päissä
2. jatkosten määrä kaapelissa
3. ilman lämpötila ja suhteellinen kosteus kaapelin molempien päiden kennoissa mittausten aikana (rekisteröinti esimerkiksi riittävän tarkalla kosteus- ja lämpötilaloggerilla)

6.10 Kaapeleiden kuntoluokittelu häviökerroinmittausten perusteella

Vaikka tässä tutkimushankkeessa kerätty mittausaineisto on vielä verrattain suppea, on otos kuitenkin erityisesti 20 kV APYAKMM- ja AHXAMK-W-kaapelijärjestelmien osalta sekä niiden ikäjakaumien, pituuksien, päätettyypien että maantieteellisten sijaintien osalta varsin kattava ja mittaustuloksista muodostettujen kertymäfunktioiden muoto hyvä. Mittaustietojen perusteella määritettiin kaapeleille kolmiportainen kuntoluokittelu samalla periaatteella, jota on käytetty standardin IEEE Std400.2-2013 raja-arvojen määrittämisessä. Kuntoluokittelu on esitetty taulukossa 6-2. Luokkien A-B väliseksi raja-arvoksi on otettu kertymäfunktion 80 % prosenttipiste ja luokkien B-C väliseksi raja-arvoksi on otettu kertymäfunktion 95 % prosenttipiste.

Taulukko 6-2. Tässä tutkimuksessa käytetty kaapelijärjestelmien kuntoluokittelu.

A	Kaapelijärjestelmä on hyväkuntoinen eikä edellytä toimenpiteitä
B	Kaapelijärjestelmä edellyttää tarkempaa tutkimusta. Järjestelmän kunnon arviointi edellyttää lisätietoa esimerkiksi kaapeliyhteyden aiemmasta vikahistoriasta, lisämittauksia muilla diagnostiikkamenetelmillä ja/tai tarkempaa trendiseurantaa.
C	Kaapelijärjestelmä vaatii toimenpiteitä. Häviökerroinlukemat ovat poikkeuksellisen suuria, mikä saattaa olla merkki kaapelieristyksen tai kaapelivarusteiden huonosta kunnosta ja näiden korvaamista uudella tai korjaamista on syytä harkita heti testauksen jälkeen tai lähitulevaisuudessa.

Jos kaapelijärjestelmä mittaustulosten perusteella sijoittuu kuntoluokkaan B tai C on ennen muita toimenpiteitä syytä varmistaa, ettei suurten häviökerroinmittaustulosten syynä ole esimerkiksi

kojeiston pintavirrat, suuri ilman suhteellinen kosteus kaapelin toisen tai molempien päiden kennoissa tai kaapelipääteiden pintojen epäpuhtaudet ja/tai kosteus.

Mittaustietojen perusteella määritetyt kuntoluokkien raja-arvoestimaatit eri kaapelityypeille on esitetty taulukoissa 6-3...6-7 sarakkeessa ”Kaapelihanke”. Taulukoissa on esitetty vertailun vuoksi myös standardissa IEEE Std400.2-2013 annetut raja-arvot niille tunnusluvuille, joille rajat arvot on standardissa määritelty. Otosten pienuudesta johtuen sinisellä pohjalla esitettyjä tämän hankkeen mittausten perusteella määritettyjä raja-arvoja voitaneen pitää 20 kV kaapelijärjestelmien osalta suuntaa antavina. Sen sijaan 10 kV kaapelijärjestelmien osalta ne ovat vielä melko epäluotettavia erityisesti keltaisella pohjalla esitettyjen lukuarvojen osalta, mutta nekin on kuitenkin tässä esitetty vertailun vuoksi. Kun mittaustietoa kertyy lisää, raja-arvomäärittelyä olisi mahdollista (ja syytä) tarkentaa kaikkienkin kaapelijärjestelmien osalta.

Taulukko 6-3. Kuntoluokkien raja-arvoestimaatit 20 kV AHXAMK-W-kaapelijärjestelmien häviökerroinmittauksille koko otoksesta (33 kolmivaihekaapelijärjestelmää) laskettuna.

Kuntoarvio	VLF häviökertoimen keskihajonta (VLF-TDTS) jännitteellä U_0 [10^{-3}]			VLF häviökertoimen muutos (VLF-DTD) jännitteiden $0.5 U_0$ ja $1.5 U_0$ välillä [10^{-3}]			VLF häviökertoimien keskiarvo (VLF-TD) jännitteellä U_0 [10^{-3}]			TUTU [10^{-3}]	
20 kV AHXAMK-W	IEEE Std400.2-2013	Kaapeli-hanke		IEEE Std400.2-2013	Kaapeli-hanke		IEEE Std400.2-2013	Kaapeli-hanke		IEEE Std400.2-2013	Kaapeli-hanke
Ei edellytä toimenpiteitä	< 0.1	< 0.062	ja	< 5	< 1.2	ja	< 4	< 1.9	ja		-0.15...0.05
Edellyttää tarkempaa tutkimusta	0.1...0.5	0.062...0.23	tai	5...80	1.2...4.2	tai	4...50	1.9...13.5	tai		0.05...0.5
Vaatii toimenpiteitä	> 0.5	> 0.23	tai	> 80	> 4.2	tai	> 50	> 13.5	tai		> 0.55

Taulukko 6-4. Kuntoluokkien raja-arvoestimaatit 20 kV AHXAMK-W-kaapelijärjestelmien häviökerroinmittauksille laskettuna suppeammasta otoksesta (26 kolmivaihekaapelijärjestelmää), josta on jätetty pois kaapelijärjestelmät, jotka on mitattu ulkoilman suhteellisen kosteuden ollessa yli 94 %.

Kuntoarvio	VLF häviökertoimen keskihajonta (VLF-TDTS) jännitteellä U_0 [10^{-3}]			VLF häviökertoimen muutos (VLF-DTD) jännitteiden $0.5 U_0$ ja $1.5 U_0$ välillä [10^{-3}]			VLF häviökertoimien keskiarvo (VLF-TD) jännitteellä U_0 [10^{-3}]			TUTU [10^{-3}]	
20 kV AHXAMK-W	IEEE Std400.2-2013	Kaapeli-hanke		IEEE Std400.2-2013	Kaapeli-hanke		IEEE Std400.2-2013	Kaapeli-hanke		IEEE Std400.2-2013	Kaapeli-hanke
Ei edellytä toimenpiteitä	< 0.1	< 0.048	ja	< 5	< 1.2	ja	< 4	< 1.7	ja		-0.15...0.03
Edellyttää tarkempaa tutkimusta	0.1...0.5	0.048...0.17	tai	5...80	1.2...2.7	tai	4...50	1.7...4.5	tai		-1.9...-0.15 tai 0.03...0.35
Vaatii toimenpiteitä	> 0.5	> 0.17	tai	> 80	> 2.7	tai	> 50	> 4.5	tai		< -1.9 tai > 0.35

Taulukko 6-5. Kuntoluokkien raja-arvoestimaatit 20 kV APYAKMM-kaapelijärjestelmien häviökerroinmittauksille koko otoksesta (35 kolmivaihekaapelijärjestelmää) laskettuna.

Kuntoarvio	VLF häviökertoimen keskihajonta (VLF-TDTS) jännitteellä U_0 [10^{-3}]			VLF häviökertoimen muutos (VLF-DTD) jännitteiden $0.5 U_0$ ja $1.5 U_0$ välillä [10^{-3}]			VLF häviökertoimien keskiarvo (VLF-TD) jännitteellä U_0 [10^{-3}]			TUTU [10^{-3}]	
20 kV APYAKMM	IEEE Std400.2-2013	Kaapeli-hanke		IEEE Std400.2-2013	Kaapeli-hanke		IEEE Std400.2-2013	Kaapeli-hanke		IEEE Std400.2-2013	Kaapeli-hanke
Ei edellytä toimenpiteitä	< 0.1	< 0.4	ja	-35...10	-2.7...4.5	ja	< 85	< 22	ja	-	-0.2...1.4
Edellyttää tarkempaa tutkimusta	0.1...0.4	0.4...1.8	tai	-50...-35 tai 10...100	-10...-2.7 tai 4.5...10	tai	85...200	22...54	tai	-	1.4...4.7
Vaatii toimenpiteitä	> 0.4	> 1.8	tai	< -50 tai > 100	< -10 tai > 10	tai	> 200	>54	tai	-	> 4.7

Taulukko 6-6. Kuntoluokkien raja-arvoestimaatit 20 kV APYAKMM-kaapelijärjestelmien häviökerroinmittauksille laskettuna suppeammasta otoksesta (24 kolmivaihekaapelijärjestelmää), josta on jätetty pois kaapelijärjestelmät, jotka on mitattu ulkoilman suhteellisen kosteuden ollessa yli 94 %.

Kuntoarvio	VLF häviökertoimen keskihajonta (VLF-TDTS) jännitteellä U_0 [10^{-3}]			VLF häviökertoimen muutos (VLF-DTD) jännitteiden $0.5 U_0$ ja $1.5 U_0$ välillä [10^{-3}]			VLF häviökertoimien keskiarvo (VLF-TD) jännitteellä U_0 [10^{-3}]			TUTU [10^{-3}]	
20 kV APYAKMM	IEEE Std400.2-2013	Kaapeli-hanke		IEEE Std400.2-2013	Kaapeli-hanke		IEEE Std400.2-2013	Kaapeli-hanke		IEEE Std400.2-2013	Kaapeli-hanke
Ei edellytä toimenpiteitä	< 0.1	< 0.15	ja	-35...10	-3.4...2.5	ja	< 85	< 15	ja	-	0.2...1.4
Edellyttää tarkempaa tutkimusta	0.1...0.4	0.15...0.75	tai	-50...-35 tai 10...100	-8.5...-3.4 tai 2.5...6.3	tai	85...200	15...29	tai	-	1.4...3.5
Vaatii toimenpiteitä	> 0.4	> 0.75	tai	< -50 tai > 100	< -8.5 tai > 6.3	tai	> 200	>29	tai	-	< -0.6 tai > 3.5

Mitattujen otosten perusteella näyttäisi siltä, että standardin IEEE Std400.2-2013 raja-arvot ovat Suomessa käytössä oleville kaapeleille pääsääntöisesti tarpeettoman suuria. Poikkeuksena on 20 kV APYAKMM-kaapelijärjestelmille lasketut TDTS-raja-arvot, jotka ovat molempien tarkasteltujen otosten osalta suurempia kuin standardissa määritellyt raja-arvot. On syytä kuitenkin huomata, että tarkastellut otoskoot ovat kaapelityyppiä kohden kuitenkin vielä sen verran pieniä, että jättämällä esimerkiksi 20 kV APYAKMM-kaapeleiden tapauksessa supistetusta otoksesta pois vielä 3-4 häviökerrointunnusluviltaan suurinta kaapelia tämän tutkimuksen raja-arvot olisivat asettuneet standardin IEEE Std400.2-2013 tasolle tai hieman sen alle. Erityisesti 20 kV APYAKMM-kaapelijärjestelmän koko otoksen osalta on ilmeistä, että kosteimmilla ilmoilla tehdyissä mittauksissa ympäristöolosuhteilla on todennäköisesti ollut vaikutusta mittaustuloksiin.

Taulukko 6-7. Kuntoluokkien raja-arvoestimaatit 10 kV APYAKMM-kaapelijärjestelmien häviökerroinmittauksille.

Kuntoarvio	VLF häviökertoimen keskihajonta (VLF-TDTS) jännitteellä U_0 [10^{-3}]			VLF häviökertoimen muutos (VLF-DTD) jännitteiden $0.5 U_0$ ja $1.5 U_0$ välillä [10^{-3}]			VLF häviökertoimien keskiarvo (VLF-TD) jännitteellä U_0 [10^{-3}]			TUTU [10^{-3}]	
10 kV APYAKMM	IEEE Std400.2-2013	Kaapeli-hanke		IEEE Std400.2-2013	Kaapeli-hanke		IEEE Std400.2-2013	Kaapeli-hanke		IEEE Std400.2-2013	Kaapeli-hanke
Ei edellytä toimenpiteitä	< 0.1	< 0.08	ja	-35...10	-5.6...-0.5	ja	< 85	< 15	ja	-	< 1.7
Edellyttää tarkempaa tutkimusta	0.1...0.4	0.08...0.12	tai	-50...-35 tai 10...100	-9.4...-5.6 tai -0.5...2.1	tai	85...200	15...18	tai	-	1.7...2.9
Vaatii toimenpiteitä	> 0.4	> 0.12	tai	< -50 tai > 100	< -9.4 tai > 2.1	tai	> 200	> 18	tai	-	> 2.9

Taulukko 6-8. Kuntoluokkien raja-arvoestimaatit 10 kV APAKM-kaapelijärjestelmien häviökerroinmittauksille.

Kuntoarvio	VLF häviökertoimen keskihajonta (VLF-TDTS) jännitteellä U_0 [10^{-3}]			VLF häviökertoimen muutos (VLF-DTD) jännitteiden $0.5 U_0$ ja $1.5 U_0$ välillä [10^{-3}]			VLF häviökertoimien keskiarvo (VLF-TD) jännitteellä U_0 [10^{-3}]			TUTU [10^{-3}]	
10 kV APAKM	IEEE Std400.2-2013	Kaapeli-hanke		IEEE Std400.2-2013	Kaapeli-hanke		IEEE Std400.2-2013	Kaapeli-hanke		IEEE Std400.2-2013	Kaapeli-hanke
Ei edellytä toimenpiteitä	< 0.1	< 0.11	ja	-35...10	-6.4...7	ja	< 85	< 25	ja	-	< 1.6
Edellyttää tarkempaa tutkimusta	0.1...0.4	0.11...0.17	tai	-50...-35 tai 10...100	-8...-6.4 tai 7...19	tai	85...200	25...32	tai	-	1.6...2.2
Vaatii toimenpiteitä	> 0.4	> 0.17	tai	< -50 tai > 100	< -8 tai > 19	tai	> 200	> 32	tai	-	> 2.2

Taulukko 6-9. Kuntoluokkien raja-arvoestimaatit 10 kV PLKVJ-kaapelijärjestelmien häviökerroinmittauksille.

Kuntoarvio	VLF häviökertoimen keskihajonta (VLF-TDTS) jännitteellä U_0 [10^{-3}]			VLF häviökertoimen muutos (VLF-DTD) jännitteiden $0.5 U_0$ ja $1.5 U_0$ välillä [10^{-3}]			VLF häviökertoimien keskiarvo (VLF-TD) jännitteellä U_0 [10^{-3}]			TUTU [10^{-3}]	
10 kV PLKVJ	IEEE Std400.2-2013	Kaapeli-hanke		IEEE Std400.2-2013	Kaapeli-hanke		IEEE Std400.2-2013	Kaapeli-hanke		IEEE Std400.2-2013	Kaapeli-hanke
Ei edellytä toimenpiteitä	< 0.1	< 0.1	ja	-35...10	5.7	ja	< 85	< 25	ja	-	< 4.7
Edellyttää tarkempaa tutkimusta	0.1...0.4	0.1...0.15	tai	-50...-35 tai 10...100	5.7...8.2	tai	85...200	25...32	tai	-	4.7...5.6
Vaatii toimenpiteitä	> 0.4	> 0.15	tai	< -50 tai > 100	> 8.2	tai	> 200	> 32	tai	-	> 5.6

Kaikkien tässä tutkimuksessa mitattujen kolmivaihekaapeleiden kuntoluokat määritettynä standardin IEEE Std400.2-2013 raja-arvojen mukaan on esitetty häviökerroinmittaustulosten ohella liitteessä A. Further study advised-luokkaan kuuluvat kaapelit on liitteessä A esitetty keltaisella pohjalla ja raja-arvon ylittävät tulokset oranssilla pohjalla. Se että ko. luokkaan kuuluvia kaapeleita on listassa prosentuaalisesti suhteellisen paljon varsinkin 20 kV APYAKMM-kaapeleiden tapauksessa, johtuu siitä, että ko. luokkaan luokittelun perusteeksi tässä taulukossa riittää se, että

yksi raja-arvo ylittyy yhdessä kolmivaihekaapelin vaiheessa, kun taas esimerkiksi luvun 6 raja-arvotarkasteluissa kolmivaihekaapeleiden vaiheita käsitellään erillisinä kaapeleina. Action required-luokkaan kuuluvat kaapelit on esitetty taulukossa punaisella pohjalla ja raja-arvon ylittävät tulokset tummanpunaisella. Näistä ainakin kaapeleiden 65 ja 79 tapauksessa on joko todettu tai on syytä epäillä suuren häviökertoimen johtuvan muusta kuin itse kaapelijärjestelmästä.

7 Osittaispurkausmittausten tuloksia

Yhteensä 53 kaapelijärjestelmälle tehtiin tässä tutkimuksessa sekä off-line-osittaispurkausmittaukset DAC-menetelmällä että on-line-osittaispurkausmittaukset HFCT- ja/tai Pry-Cam-menetelmällä. Tässä luvussa tarkastellaan menetelmien antamia tuloksia muutaman esimerkkitapauksen valossa. Raportin liitteeseen B on lisäksi koottu taulukko, jossa on esitetty kaikkien mitattujen kaapeleiden diagnoositulokset kaikilla 2-4 mittausmenetelmällä, joita eri kaapeleiden tapauksessa on sovellettu (off-line-häviökerroinmittaus, off-line-PD, on-line-PD HFCT-menetelmällä ja on-line-PD Pry-Cam-menetelmällä). Off-line-osittaispurkausmittaukset tehtiin jännitteillä $0,3 U_0$, $0,5 U_0$, $0,7 U_0$, $1,0 U_0$, $1,3 U_0$, $1,5 U_0$ ja $1,7 U_0$ ja on-line-mittaukset normaalilla käyttöjännitteellä U_0 .

Purkauspulssien sijoittumista vaihejännitteeseen ei tässä yhteydessä tarkasteltu, koska on-line-mittausten osalta synkronointisignaalin ja keskijännitepuolen vaihejännitteiden välisistä kulmaeroista ei ollut aina varmuutta. HFCT-mittauksessa synkronointijännite otettiin tässä raportissa käsiteltyjen mittausten osalta pienjännitepuolelta muuntamon pistorasialta, johon differentiaalimitappää kytkettiin aina samoin päin (musta johdin rasian nollajohtimeen ja punainen vaihejohtimeen). Pry-Cam-mittauksissa käytettiin pääsääntöisesti joko kennon valoon tai pj-johdon aiheuttamaan magneettikenttään perustuvaa synkronointia.

7.1 *Kaapeli 24 (20 kV AHXAMK-W, v. 1992, 293 m)*

Kaapeli 24 oli vuonna 1992 asennettu 293 m pitkä AHXAMK-W 3x240+70 20 kV -kaapeli, jossa oli mittauspäässä pistokepäätteet ja kaasueristeinen kojeisto. Off-line-mittauksessa osittaispurkaukset syttyivät kaikissa vaiheissa U_0 :lla ja paikantuivat pääosin aivan kaapelin alkupäähän (mittauspäähän, kuva 7.1). U_0 :lla osittaispurkausten näennäisvaraukset olivat vaiheissa L1, L2 ja L3 noin 7,7 nC, 8,4 nC ja 4,5 nC.

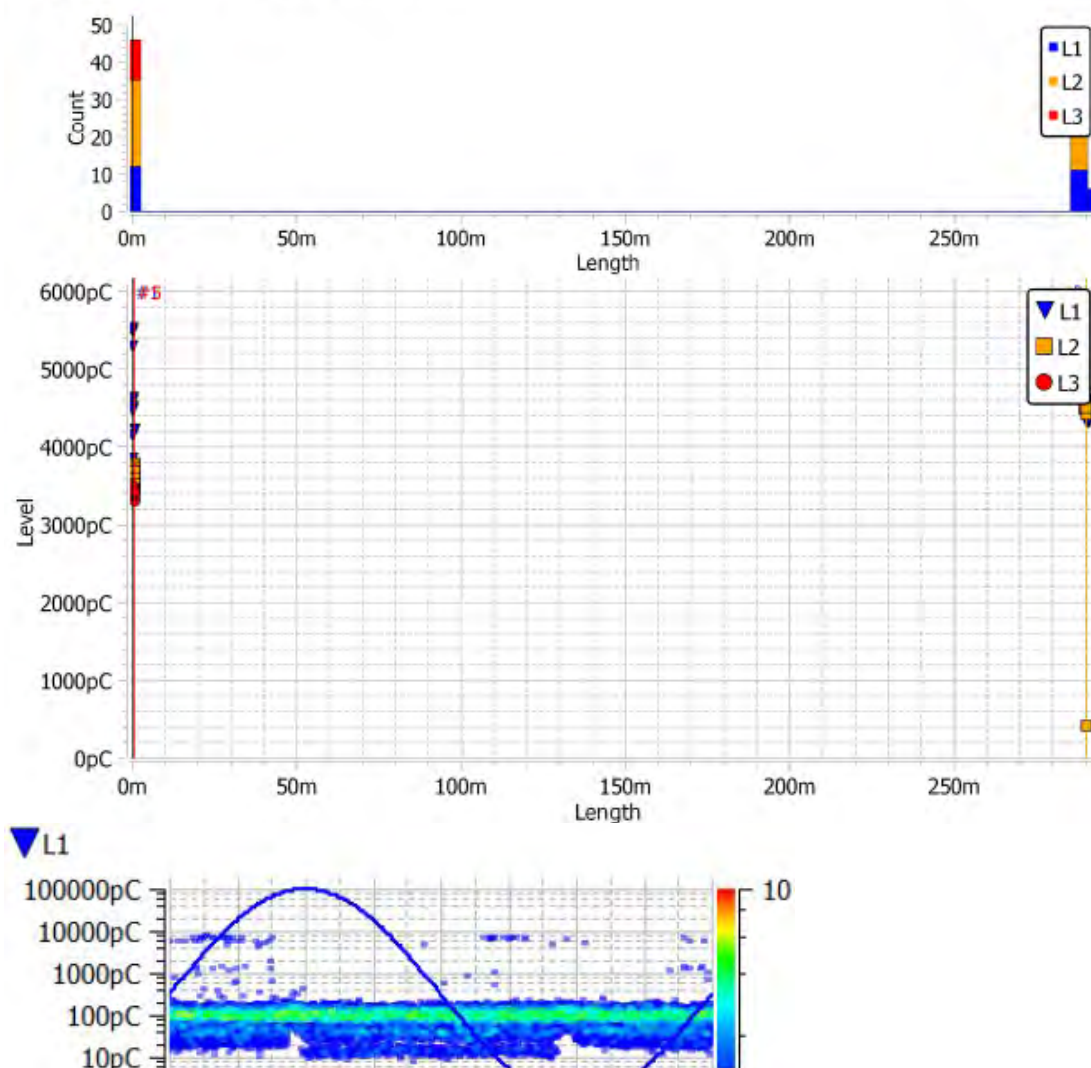
Taulukko 7-1. Osittaispurkausten syttymisjännitteet ja näennäisvaraukset kaapelin 24 off-line-mittauksessa.

IEC Table

	L1	L2	L3
Disturbance level [pC]	18	23	20
PDIV [kV rms]	11,6	11,6	11,6
PDEV [kV rms]	-	-	-
PD max [pC] (PDIV)	7875	8422	4482
PD max [pC] (U ₀)	7875	11487	4564
PD Level [pC] (U ₀)	7721	8422	4482
PD max [pC] (1.7*U ₀)	7677	8590	7754
PD Level [pC] (1.7*U ₀)	7576	8474	7728
PD max [pC] (2*U ₀)	-	-	-
PD Level [pC] (2*U ₀)	-	-	-
Frequency [Hz]	394	394	394
Operating Mode	DAC-	DAC-	DAC-

PD-Mapping

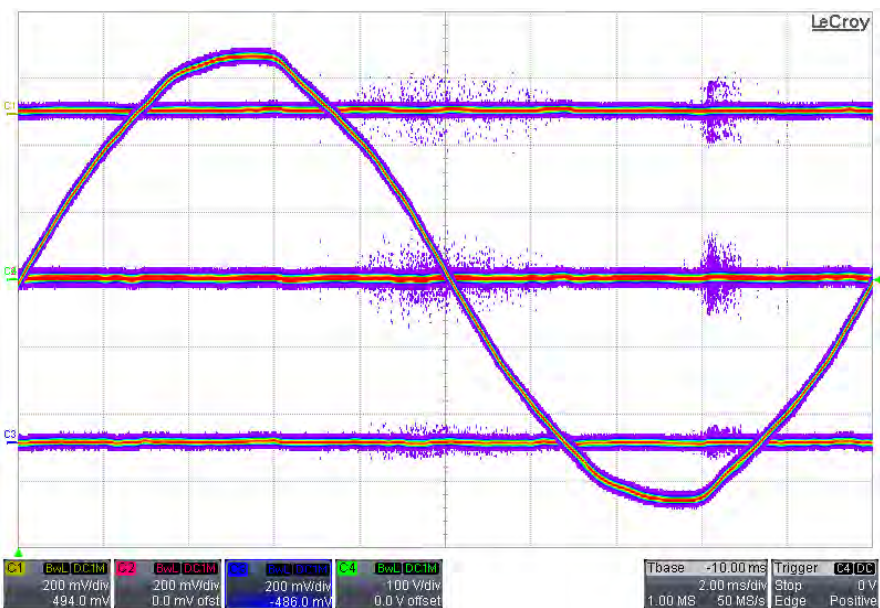
Mapping for $0 \leq U \leq 1 U_0$ (All Phases)



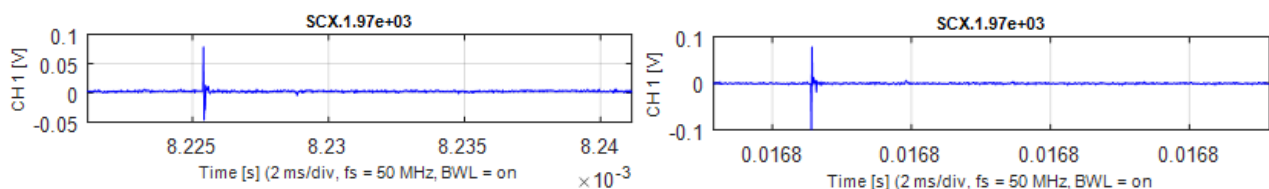
Kuva 7.1. Off-line-mittauksen paikannustulokset jännitetasoon U_0 asti ja PRPD-kuva vaiheen L1 purkauksista (kaikki koejännitetasot yhdistettynä).

HFCT-osittaispurkausmittauksissa kaapelissa havaittiin osittaispurkauksia vaiheessa L1 (kuva 7.2). Osittaispurkauspulssit olivat harvinaisen teräviä. Pulssien nousuaika oli todennäköisesti alle 20 ns, koska 50 MHz näytteenottotaajuudellakin pulssi näytti vielä laskostuvan. Pulssien terävyydestä johtuen myös heijastus kaapelin vastakkaisesta päästä oli heikko (suuret taajuudet vaimenevat muovikaapelissakin melko nopeasti), mutta kuitenkin riittävä paikannukseen (kuva 7.3). Purkaukset paikantuivat aivan kaapelin alkupäähän ja niiden näennäisvaraus oli noin 1020 pC.

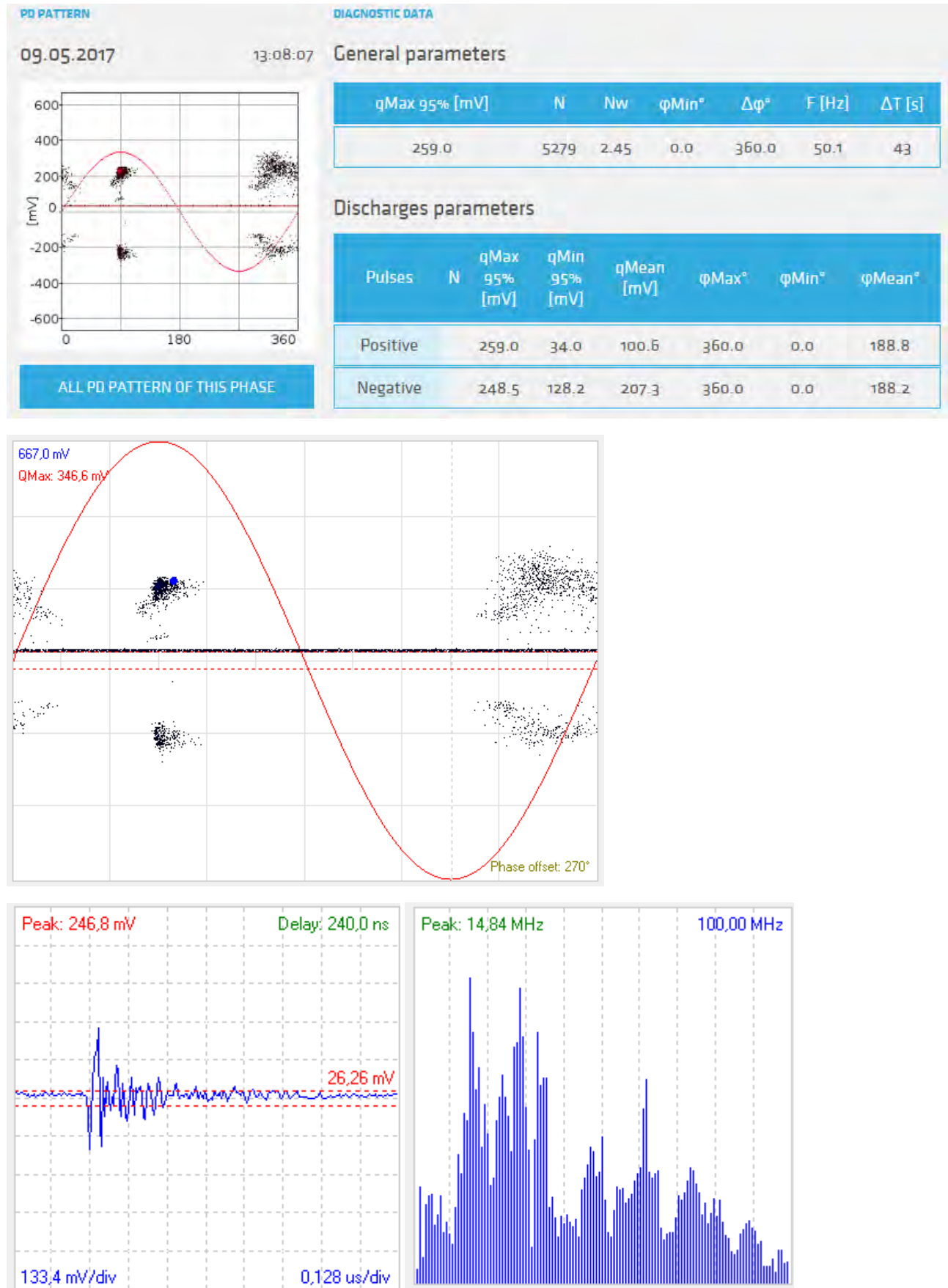
Pry-Cam-mittauksessa havaittiin osittaispurkauksia vaiheessa L1. Myös tässä mittauksessa pulssit olivat varsin teräviä ja taajuusspektri laaja (kuva 7.4).

Pvm	9.5.2017	
klo	16:05	
Kaapelityyppi	AHXAMK-W	
Poikkipinta [mm2]	3 x 240+50	
Pituus [m]	293	
Asennusvuosi	1992	
Päätetyyppi	Pistoke	
Käyttöjännite [kV]	20	
Taustahäiriö- taso [pC]	220	
Purkausten näennäisvaraus [pC]	1020	
Tiedostot	PD: 2926-2124, 2128-2522, Pulssitutkaus: 2125-2127	
Diagnoosi	Vaiheessa L1 molemmilla puolijaksoilla näennäisvaraukseltaan noin 1020 pC purkauksia	

Kuva 7.2. HFCT-mittaustulos kaapelista 24.



Kuva 7.3. Esimerkit vaiheesta L1 (CH1) mitatuista positiivisesta ja negatiivisesta osittaispurkauspulssista. Kuvissa näkyy heikosti myös kaapelin päästä heijastunut pulssi.



Kuva 7.4. Kaapelin 24 vaiheen L1 Pry-Cam-mittaustulokset. Pulssimuotokuva ja taajuusspektri ovat PRPD-kuvassa sinisellä pisteellä merkitystä pulssista.

Tässä tapauksessa off-line-mittaus ja HFCT-on-line-mittaus antoivat vaiheen L1 osalta muuten samankaltaiset tulokset, mutta purkausten näennäisvaraus oli off-line-mittauksessa suurempi. HFCT- ja Pry-Cam-mittauksissa ei havaittu purkauksia vaiheissa L2 ja L3. Vaiheen L1 osalta HFCT- ja Pry-Cam-mittauksilla saadut PRPD-sormenjäljet olivat hyvin saman tyyppiset. Off-line-mittauksissa pulssimäärä on sen verran pieni, että PRPD-kuvan vertailu on-line-mittauksiin ei ole mielekäästä.

7.2 Kaapeli 32 (10 kV PLKVJ, v. 1964, 722m)

Kaapeli 32 oli vuonna 1964 asennettu 722 m pitkä PLKVJ 3x25 10 kV -kaapeli, jossa oli mittauspäässä lämpökutistepäätteet ja ilmaeristeinen kojeisto. Off-line-mittauksessa osittaispurkaukset syttyivät vaiheessa L1 U_0 :lla, kahden muun vaiheen osalta selvää syttymisjännitettä pystytty määrittämään. U_0 :lla osittaispurkausten näennäisvaraus oli vaiheissa L1, L2 ja L3 vajaa 30 pC, vajaa 40 pC ja noin 200 pC (taulukko 7-2). Off-line mittausta häiritsi poikkeuksellisen suuri taustahäiriötaso ja todennäköisesti siitä johtuen myöskään purkauksen paikannus ei onnistunut.

HFCT-osittaispurkausmittauksissa kaapelissa havaittiin melko harvaan toistuvia osittaispurkauksia vaiheessa L2 molemmilla puolijaksoilla (kuva 7.6). Kuvassa purkaukset näkyvät selvästi myös naapurivaiheissa, mutta yksittäisiä pulsseja ja niiden kytkeytymistä naapurivaiheisiin tarkastelemalla purkauslähde oli paikannettavissa vaiheeseen L2. Purkauksia ei esiintynyt läheskään kaikilla verkkojaksoilla. Osittaispurkauspulssit olivat myös harvinaisen teräviä. Pulssien nousuaika oli todennäköisesti alle 20 ns, koska 50 MHz näytteenottotaajuudellakin pulssi näytti vielä laskostuvan. Pulssien terävyydestä ja öljypaperikaapelille tyypillisestä suurehkosta vaimennuksesta johtuen heijastuspulssia ei ollut havaittavissa. Pulssien terävyydestä ja heijastusten puuttumisesta päätellen purkaus oli todennäköisesti mittauspäässä. Positiivisten osittaispurkauspulssien näennäisvaraus oli noin 560 pC ja negatiivisten pulssien noin 880 pC.

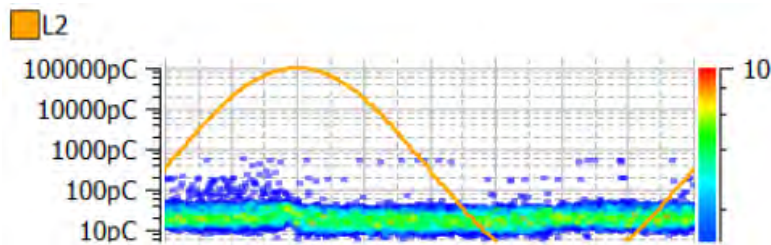
Pry-Cam-mittauksessa havaittiin purkauksia vaiheessa L2 molemmilla puolijaksoilla. Positiivisten pulssien kertymäfunktion 95 % kvantiili oli noin 80 mV ja negatiivisten noin 93 mV (kuva 7.7).

Tässä tapauksessa on-line-mittaukset antoivat keskenään varsin samankaltaiset tulokset. HFCT-mittauksella myös purkauksen sijainti saatiin arvioitua pulssimuodon ja heijastuksen puuttumisen perusteella. Off-line-mittaus antoi tässä tapauksessa on-line-mittauksiin verrattuna hieman ristiriitaisia tuloksia mahdollisesti suuresta häiriötasosta johtuen. Saattaa myös olla, että vaiheen L2 harvaan toistuvat purkaukset eivät ehtineet off-line-mittauksen lyhytkestoisella DAC-jännitteellä syttyä.

Taulukko 7-2. Osittaispurkausten syttymisjännitteet ja näennäisvaraukset kaapelin 32 off-line-mittauksessa.

IEC Table

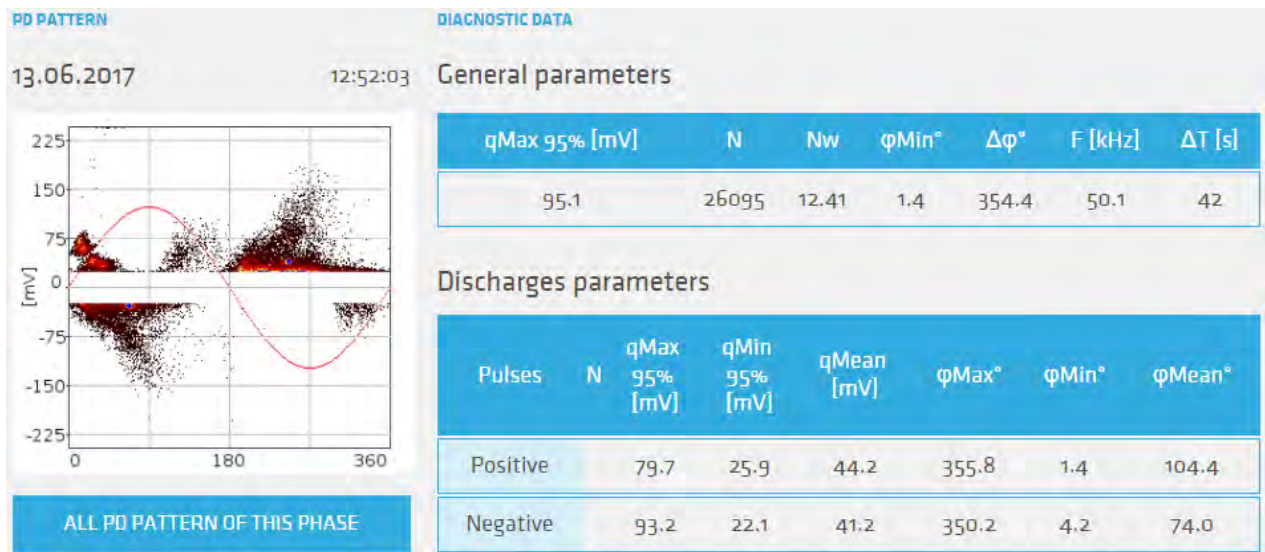
	L1	L2	L3
Disturbance level [pC]	483	549	554
PDIV [kV rms]	5,8	-	-
PDEV [kV rms]	-	-	-
PD max [pC] (PDIV)	469	-	-
PD max [pC] (Uo)	27	161	529
PD Level [pC] (Uo)	26	39	203
PD max [pC] (1.7*Uo)	1097	627	753
PD Level [pC] (1.7*Uo)	738	465	608
PD max [pC] (2*Uo)	-	-	-
PD Level [pC] (2*Uo)	-	-	-
Frequency [Hz]	324	320	320
Operating Mode	DAC-	DAC-	DAC-



Kuva 7.5. Off-line-mittauksen PRPD-kuva vaiheen L2 purkauksista (kaikki koejännitetasot yhdistettynä).

Pvm	13.6.2017	
klo	15:53	
Kaapelityyppi	PLKVJ	
Poikkipinta [mm ²]	3 x 25	
Pituus [m]	722	
Asennusvuosi	1964	
Päätetyyppi	Lämpökutiste	
Käyttöjännite [kV]	10	
Taustahäiriötaso [pC]	70	
Purkausten näennäisvaraus [pC]	880 / 560	
Tiedostot	PD: 1-104 (100 mV/div), 109-467, 533-700, Pulssitutkaus: 105-107	
Diagnoosi	Vaiheessa L2 purkauksia molemmilla puolijaksoilla näennäisvaraukset noin 880 pC ja 560 pC	

Kuva 7.6. HFCT-mittaustulos kaapelista 32.



Kuva 7.7. Kaapelin 32 vaiheen L2 Pry-Cam-mittaustulos.

7.3 Kaapeli 34 (10 kV AHXAMK-W, v. 2012, 2080 m)

Kaapeli 34 oli vuonna 2012 asennettu 2080 m pitkä AHXAMK-W 3x300+70 20 kV -kaapeli, jonka käyttöjännite oli 10 kV ja jossa oli mittauspäässä (sähköasemalla) lämpökutistepäätteet ja ilmaeristeinen kojeisto. Off-line-mittauksessa osittaispurkaukset syttyivät vaiheessa L1 1,0 U_0 :lla ja vaiheissa L2 ja L3 1,3 U_0 :lla. Koejännitteellä U_0 melko harvalukuiset purkaukset paikantuivat kaapelin mittauspäähän ja jatkokseen 1,75 km mittauspäältä (kuva 7.8). U_0 :lla osittaispurkausten näennäisvaraus oli vaiheessa L1 noin 390 pC. Normaaliala käyttöjännitettä suuremmilla jännitetasoilla tehdyissä mittauksissa purkaukset paikantuivat pääosin jatkoksiin noin 1,75 km, noin 430 m ja noin 880 m mittauspäältä.

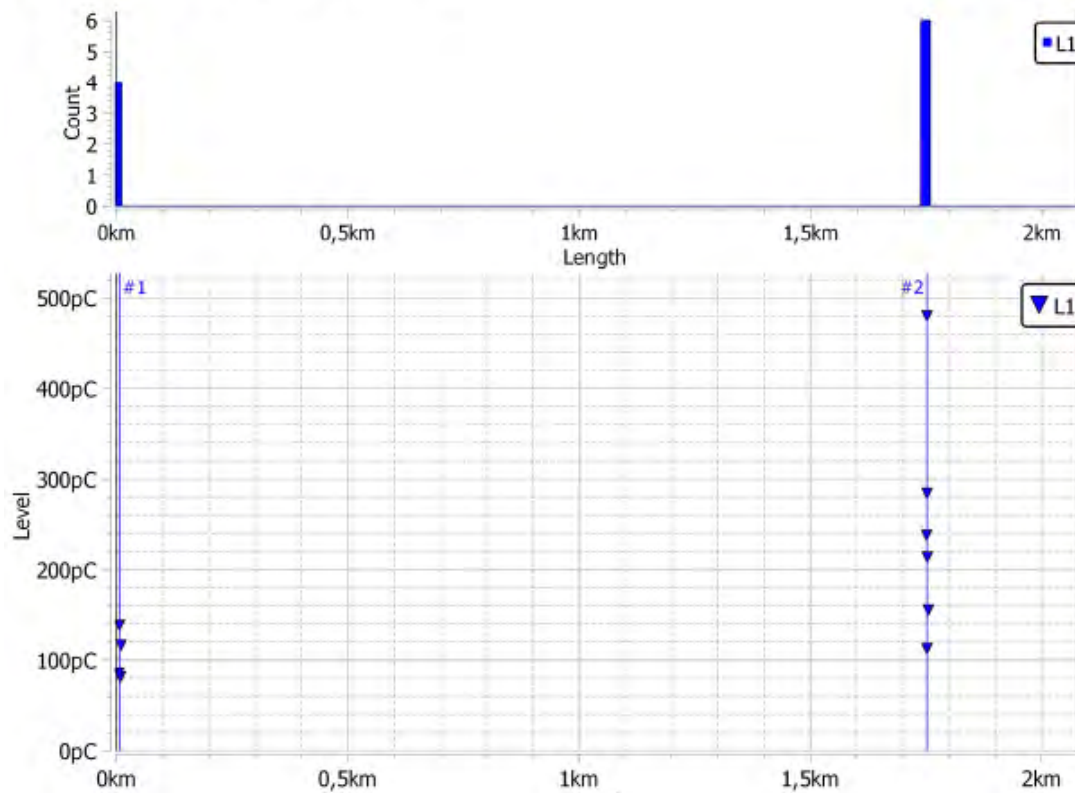
Taulukko 7-3. Osittaispurkausten syttymisjännitteet ja näennäisvaraukset kaapelin 34 off-line-mittauksessa.

IEC Table

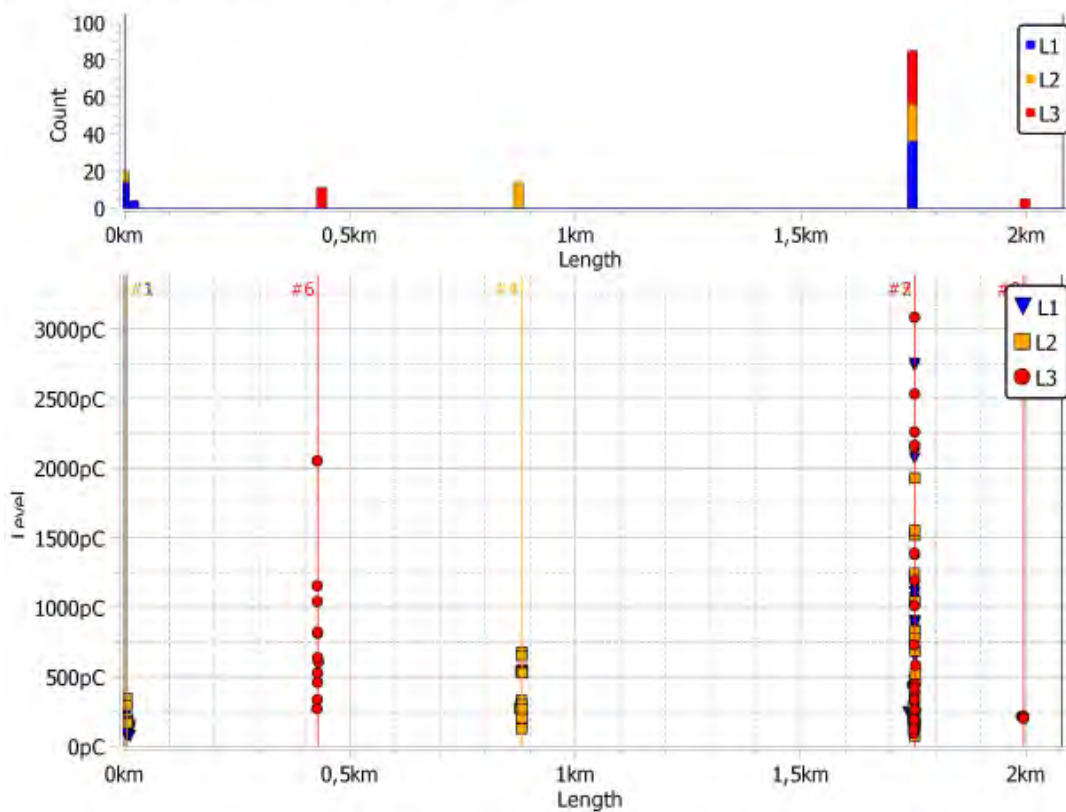
	L1	L2	L3
Disturbance level [pC]	63	68	69
PDIV [kV rms]	5,8	7,5	7,5
PDEV [kV rms]	-	-	-
PD max [pC] (PDIV)	325	1085	413
PD max [pC] (U_0)	622	73	77
PD Level [pC] (U_0)	389	72	64
PD max [pC] ($1.7 \cdot U_0$)	5473	4007	6449
PD Level [pC] ($1.7 \cdot U_0$)	5460	3259	5712
PD max [pC] ($2 \cdot U_0$)	-	-	-
PD Level [pC] ($2 \cdot U_0$)	-	-	-
Frequency [Hz]	224	224	224
Operating Mode	DAC-	DAC-	DAC-

PD-Mapping

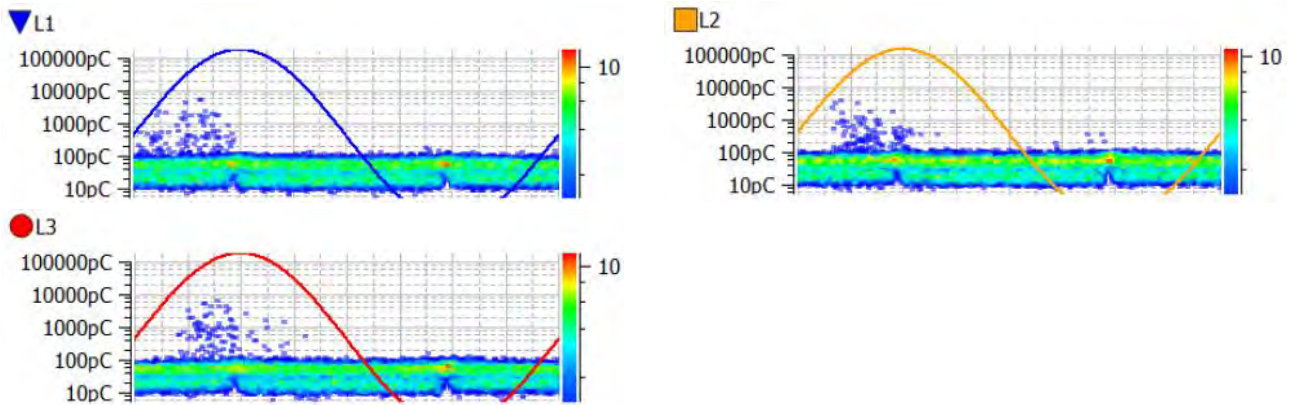
Mapping for $0 \leq U \leq 1 U_0$ (All Phases)



Mapping for $0 \leq U \leq 1.8 U_0$ max (All Phases)



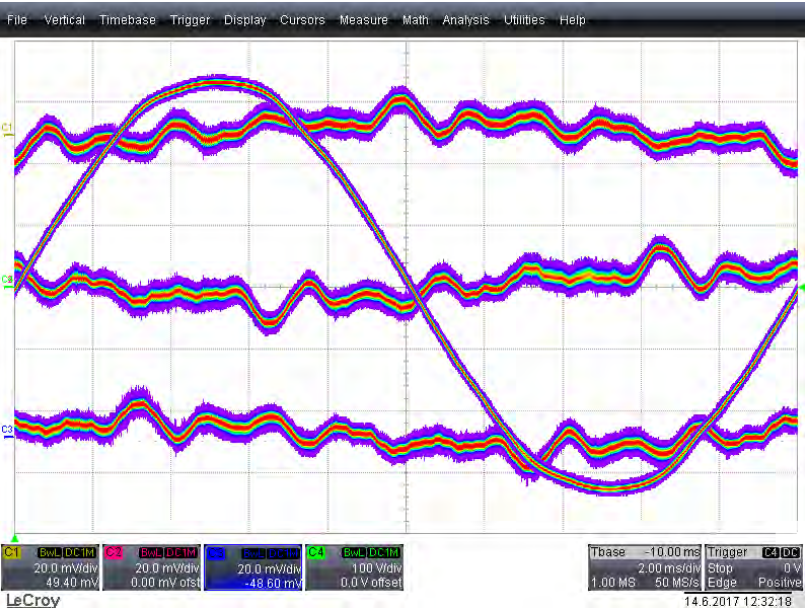
Kuva 7.8. Off-line-mittauksen paikannustulokset a) jännitetasoon $1,0 U_0$ ja b) jännitetasoon $1,8 U_0$ asti.



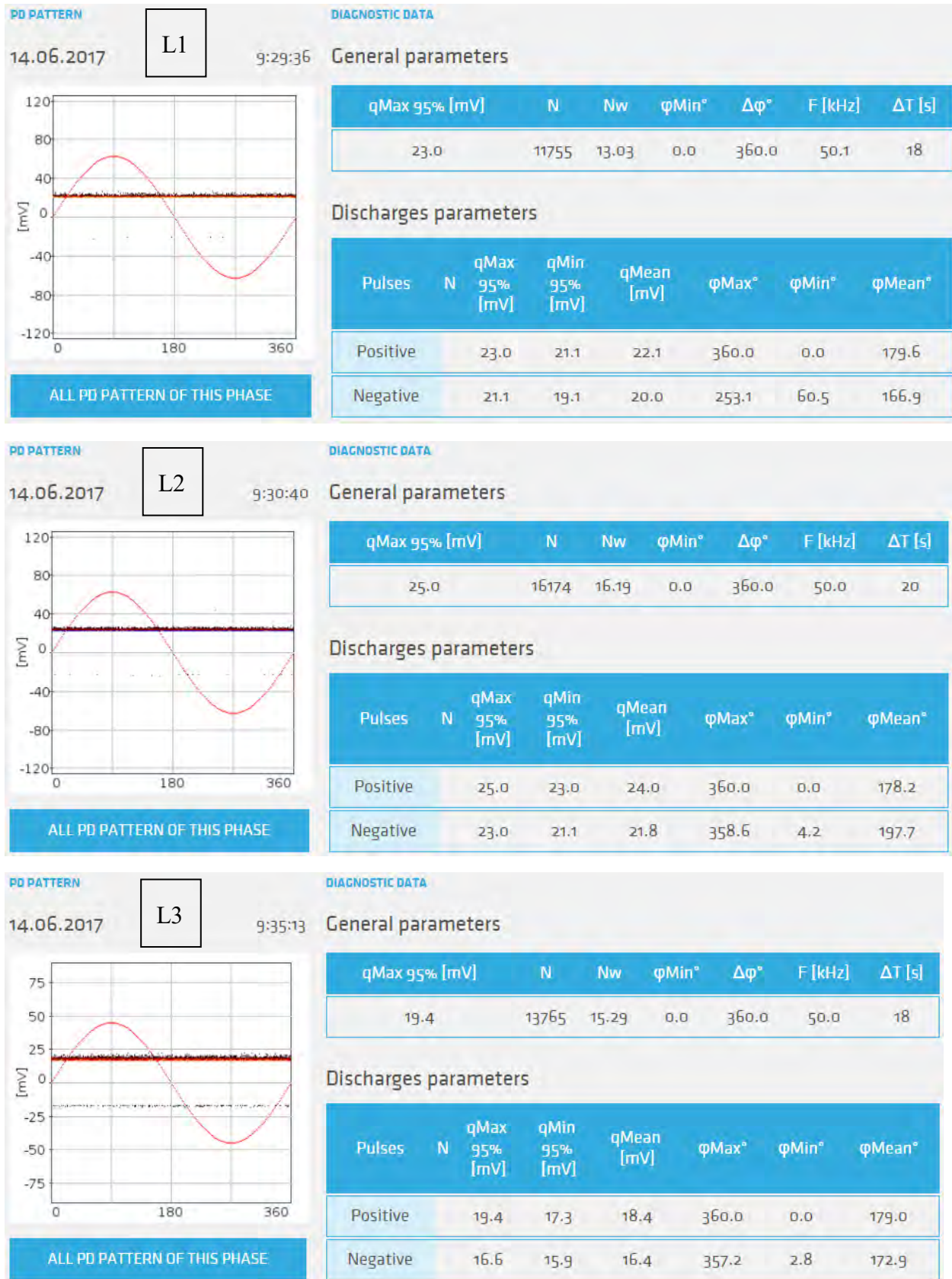
Kuva 7.9. Off-line-mittauksen PRPD-kuvat vaiheiden L1, L2 ja L3 purkauksista (kaikki koejännitetasot yhdistettynä).

HFCT-osittaispurkausmittauksissa ja Pry-Cam-mittauksissa kaapelissa ei havaittu purkauksia (kuvat 7.10 ja 7.11).

Tässä tapauksessa off-line-mittauksessa näkyi kaapelin päissä normaalilla käyttöjännitteellä purkauksia, joita HFCT- ja Pry-Cam-mittauksissa ei näkynyt.

Pvm	14.6.2017	
klo	12:32	
Kaapelityyppi	AHXAMK-W	
Poikkipinta [mm ²]	3 x 300	
Pituus [m]	2080	
Asennusvuosi	2012	
Päätetyyppi	Lämpökutiste	
Käyttöjännite [kV]	10	
Taustahäiriötaso [pC]	35	
Purkausten näennäisvaraus [pC]	-	
Tiedostot	PD: 985-1184 (20 mV/div), 1185-1389 (10 mV/div), Pulssitutkaus: 1391-1393, 1000 pC cal: 981-982	
Diagnoosi	Ei taustahäiriötason ylittäviä purkauksia	

Kuva 7.10. HFCT-mittaustulos kaapelista 34.



Kuva 7.11. Kaapelin 34 vaiheiden L1, L2 ja L3 Pry-Cam-mittaustulokset.

7.4 Kaapeli 41 (20 kV APYAKMM, v. 1974, 445 m)

Kaapeli 41 oli vuonna 1974 asennettu 445 m pitkä APYAKMM 3x185 20 kV -kaapeli, jossa oli mittauspäässä pistokepäätteet ja kaasueristeinen kojeisto. Off-line-mittauksessa osittaispurkaukset syttyivät vaiheissa L1 ja L3 jo $0,7 U_0$:lla ja vaiheessa L2 $1,0 U_0$:lla mutta tällä jännitetasolla niitä ei vielä saatu paikannettua. U_0 :lla osittaispurkausten näennäisvaraus oli vaiheessa L1 vajaa 2,9 nC, vaiheessa L2 noin 2,4 nC ja vaiheessa L3 noin 2,6 nC. Normaalia käyttöjännitettä suuremmilla jännitetasoilla tehdyissä mittauksissa purkaukset paikantuivat pääosin kaapelin mittauspäähän (kuva 7.12).

HFCT-osittaispurkausmittauksissa kaapelissa havaittiin osittaispurkauksia vaiheissa L1 ja L3 (kuva 7.13). HFCT-mittauksen mukaan purkaukset paikantuivat vaiheessa L1 kaapelin mittauspäähän ja vaiheessa L3 kaapelin vastakkaiseen päähän. Osittaispurkausten näennäisvaraus oli suurimmillaan vaiheessa L1 noin 220 pC ja vaiheessa L3 noin 470 pC (kuvat 7.14...7.16).

Pry-Cam-mittauksessa kaapelissa havaittiin heikohkoja osittaispurkauksia vaiheessa L3 (kuva 7.17).

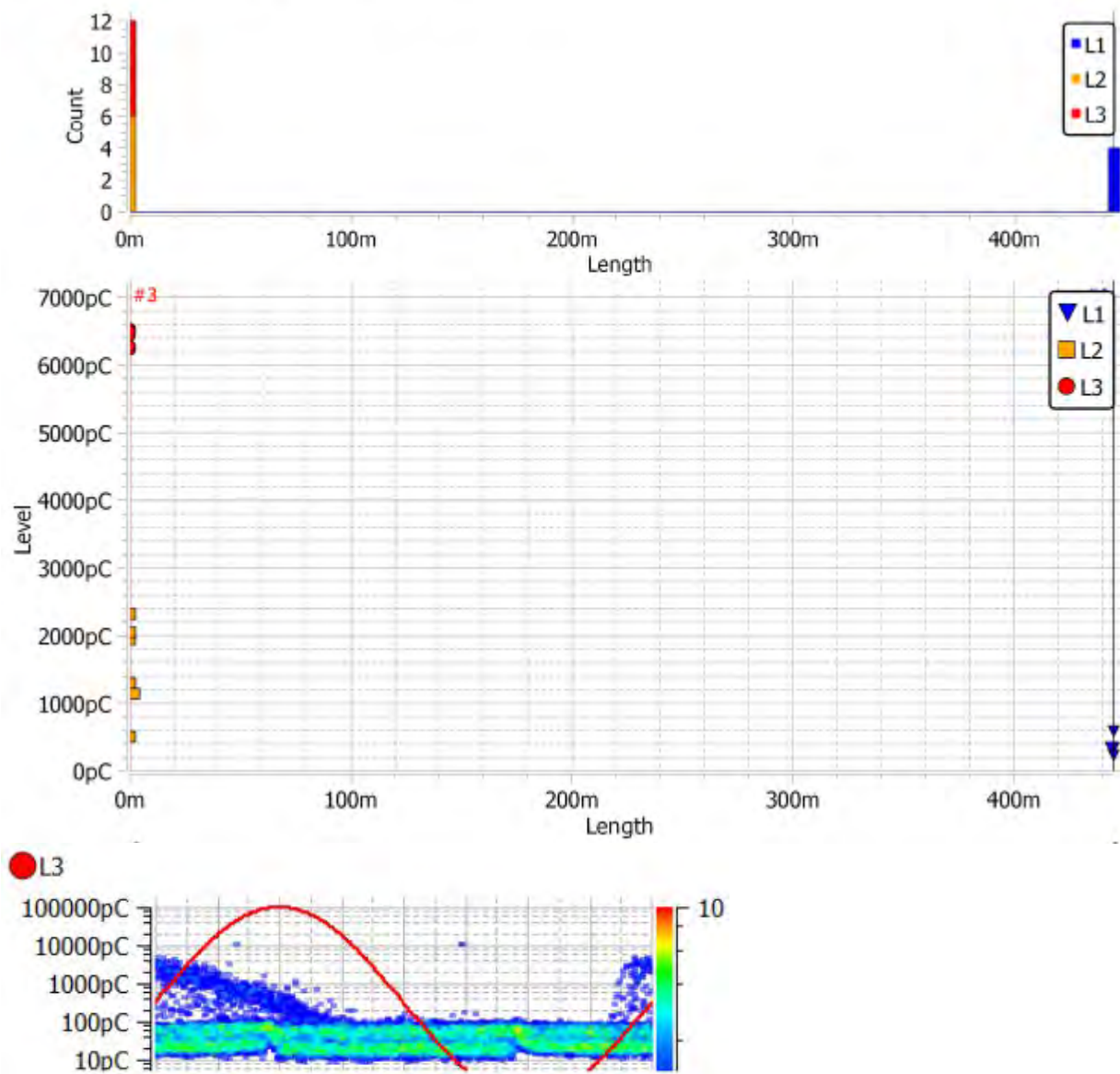
Tässä tapauksessa off-line-mittaus ja HFCT-on-line-mittaus antoivat vaiheiden L1 ja L3 osalta samankaltaiset tulokset. Pry-Cam-mittauksessa purkauksia havaittiin vain vaiheessa L3. Off-line mittauksessa näkyi purkauksia myös vaiheessa L2, joita ei on-line-mittauksissa ollut havaittavissa.

Taulukko 7-4. Osittaispurkausten syttymisjännitteet ja näennäisvaraukset kaapelin 41 off-line-mittauksessa.

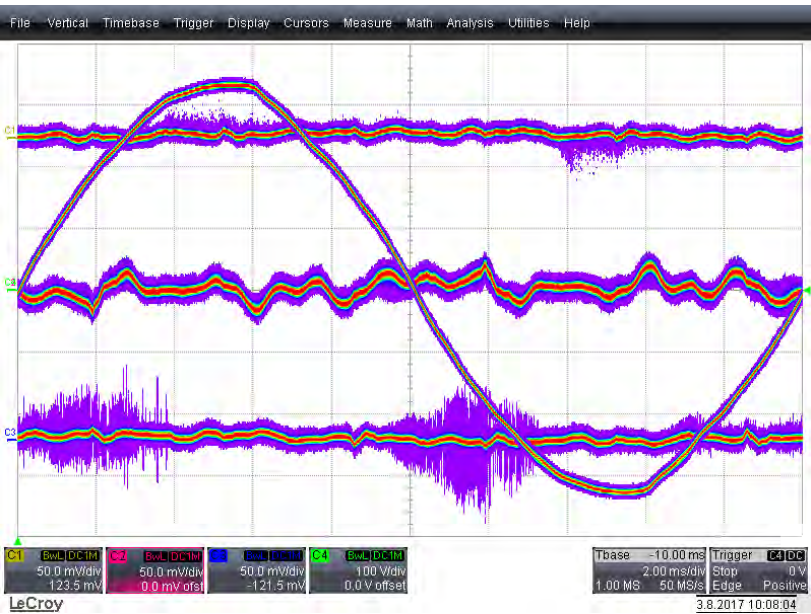
IEC Table

	L1	L2	L3
Disturbance level [pC]	35	39	43
PDIV [kV rms]	8,1	11,6	8,1
PDEV [kV rms]	-	-	-
PD max [pC] (PDIV)	283	2437	752
PD max [pC] (U_0)	3601	2740	3697
PD Level [pC] (U_0)	2875	2437	2638
PD max [pC] ($1.7 \cdot U_0$)	11689	6533	11879
PD Level [pC] ($1.7 \cdot U_0$)	11425	4911	11604
PD max [pC] ($2 \cdot U_0$)	-	-	-
PD Level [pC] ($2 \cdot U_0$)	-	-	-
Frequency [Hz]	336	336	337
Operating Mode	DAC-	DAC-	DAC-

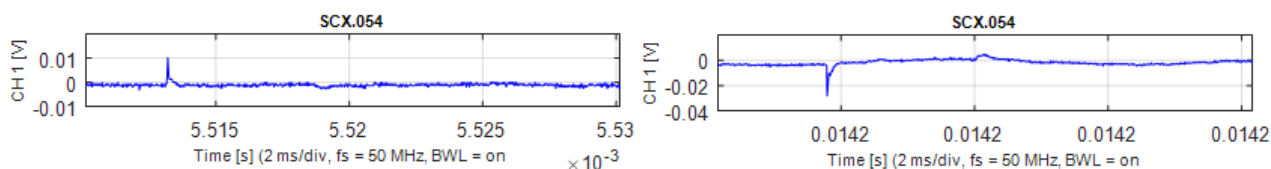
Mapping for $0 \leq U \leq 1.8 U_0 \text{ max}$ (All Phases)



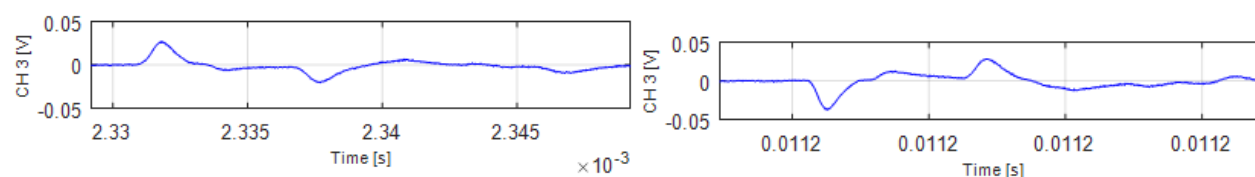
Kuva 7.12. Off-line-mittauksen paikannustulokset jännitetasoon $1,8 U_0$ asti ja PRPD-kuva vaiheen L3 purkauksista (kaikki koejännitetasot yhdistettynä).

Pvm	3.8.2017	
klo	10:08	
Kaapelityyppi	APYAKMM	
Poikkipinta [mm2]	3 x 185	
Pituus [m]	445	
Asennusvuosi	1974	
Päätetyyppi	Pistoke	
Käyttöjännite [kV]	20	
Taustahäiriö- taso [pC]	70	
Purkausten näennäisvaraus [pC]	140/220 (L1), 470/280 (L3)	
Tiedostot	PD: 1-207, 211-512 (20 mV/div), 514-663 (L2 10 mV/div), Pulssitutkaus: 209-210	
Diagnoosi	Vaiheissa L1 ja L3 purkauksia molemmilla puolijaksoilla näennäisvaraukset vaiheessa L1 140 pC ja 220 pC, vaiheissa 470 pC ja 280 pC	

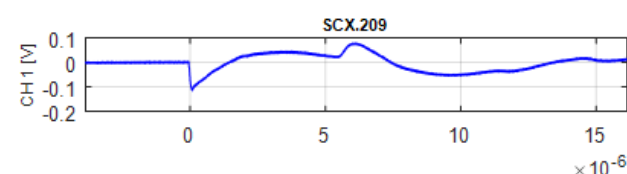
Kuva 7.13. HFCT-mittaustulos kaapelista 41.



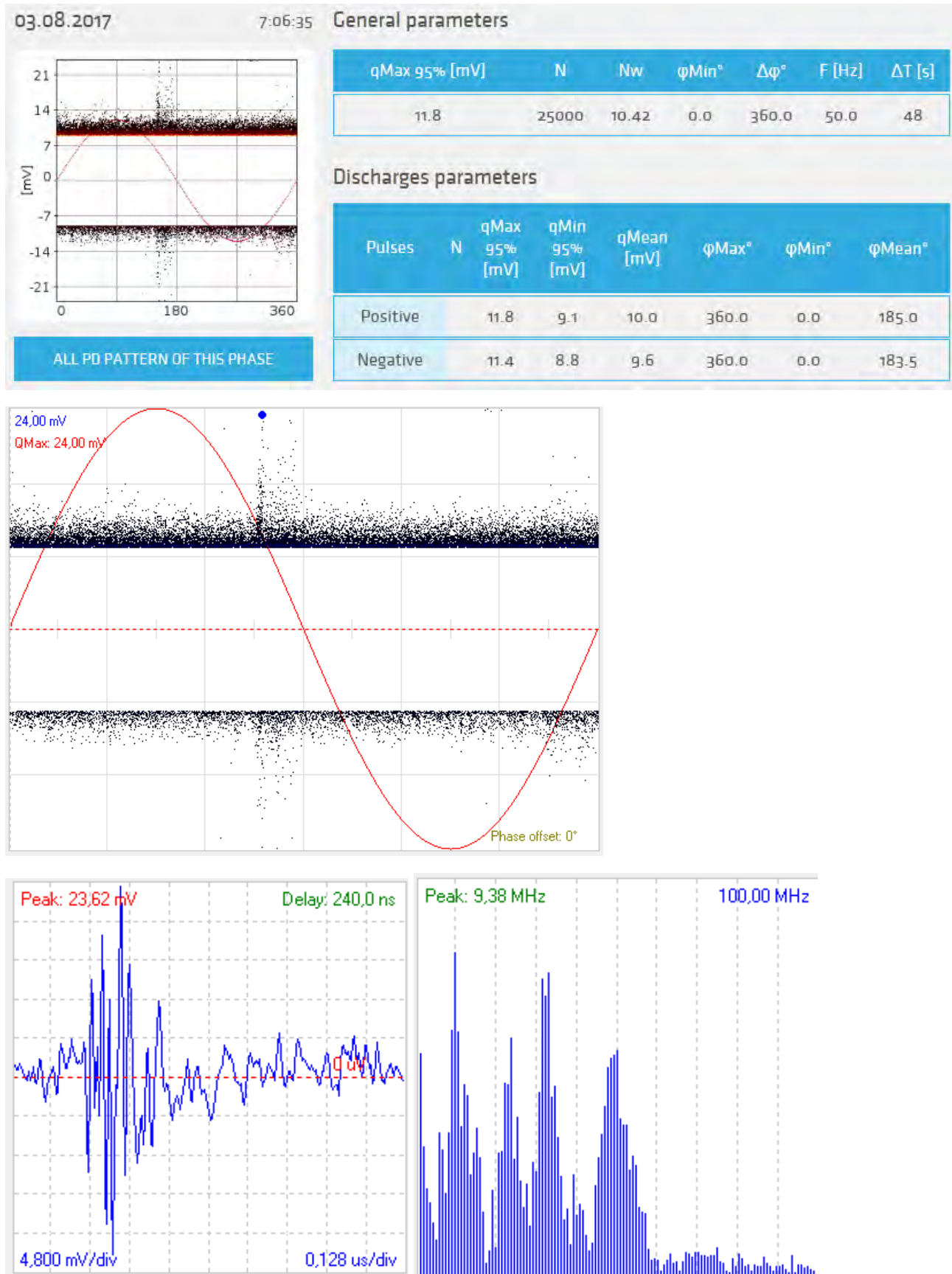
Kuva 7.14. Esimerkit vaiheesta L1 (CH1) mitatuista positiivisesta ja negatiivisesta osittaispurkauspulssista. Kuvissa näkyy myös kaapelin päästä heijastunut pulssi.



Kuva 7.15. Esimerkit vaiheesta L3 (CH3) mitatuista positiivisesta ja negatiivisesta osittaispurkauspulssista. Kuvissa näkyy myös kaapelin päästä heijastunut pulssi.



Kuva 7.16. Kaapelin päästä signaaligeneraattorilla ja HFCT:llä kaapeliin syötetty tutkauspulssi ja sen heijastus. Pulssin syöttöön käytetty virtamuuntaja oli mittausvirtamuuntajasta katsottuna kojeiston puolella, ja tästä johtuen kaapeliin syötetyn pulssin ja kaapelin päästä heijastuneen pulssin polariteetit ovat vastakkaiset.



Kuva 7.17. Kaapelin 41 vaiheen L1 Pry-Cam-mittaustulos. Pulssimuotokuva ja taajuusspektri ovat PRPD-kuvassa sinisellä pisteellä merkitystä pulssista.

7.5 Kaapeli 47 (20 kV AHXAMK-W, v. 2001, 460 m)

Kaapeli 47 oli vuonna 2001 asennettu 460 m pitkä AHXAMK-W 3x185+35 20 kV -kaapeli, jossa oli mittauspäässä pistokepäätteet ja kaasueristeinen kojeisto. Kaapeliyhteydessä on jatkos n. 210 m päässä mittauspisteestä. Off-line-mittauksessa osittaispurkaukset syttyivät vaiheessa L3 1,0 U_0 :lla, vaiheessa L1 1,3 U_0 :lla ja vaiheessa L1 1,5 U_0 :lla. Purkaukset paikantuivat mittauspäästä katsottuna kaapelin vastakkaiseen päähän, jossa oli ilmaeristeinen kojeisto lämpökutistepäätteillä. U_0 :lla osittaispurkausten näennäisvaraus oli vaiheessa L3 noin 2300 pC.

HFCT-osittaispurkausmittauksissa kaapelissa ei havaittu purkauksia, mutta tämä saattoi johtua siitä, että asennustavasta johtuen kaapelin kosketussuojat maadoittuivat, anturin asennuskohdan yläpuolelta kojeiston rakenteisiin ja mittausherkkyys jäi sen vuoksi heikoksi (kts. luku 3.3.1, HFCT-antureiden asennustapa B).

Pry-Cam-mittauksessa kaapelin mittauspäässä havaittiin osittaispurkauksia vaiheessa L3, osittaispurkaustaso oli noin 30 mV. Pulssit ovat melko teräviä ja taajuusspektri laaja (kuvat 7.20...7.23). Toisesta päästä (ilmaeristeinen kojeisto) mitattaessa ei havaittu purkauksia. Purkauksen arvioitiin olevan todennäköisimmin mittauspään kaasueristeisen kojeiston pistokepäätteessä.

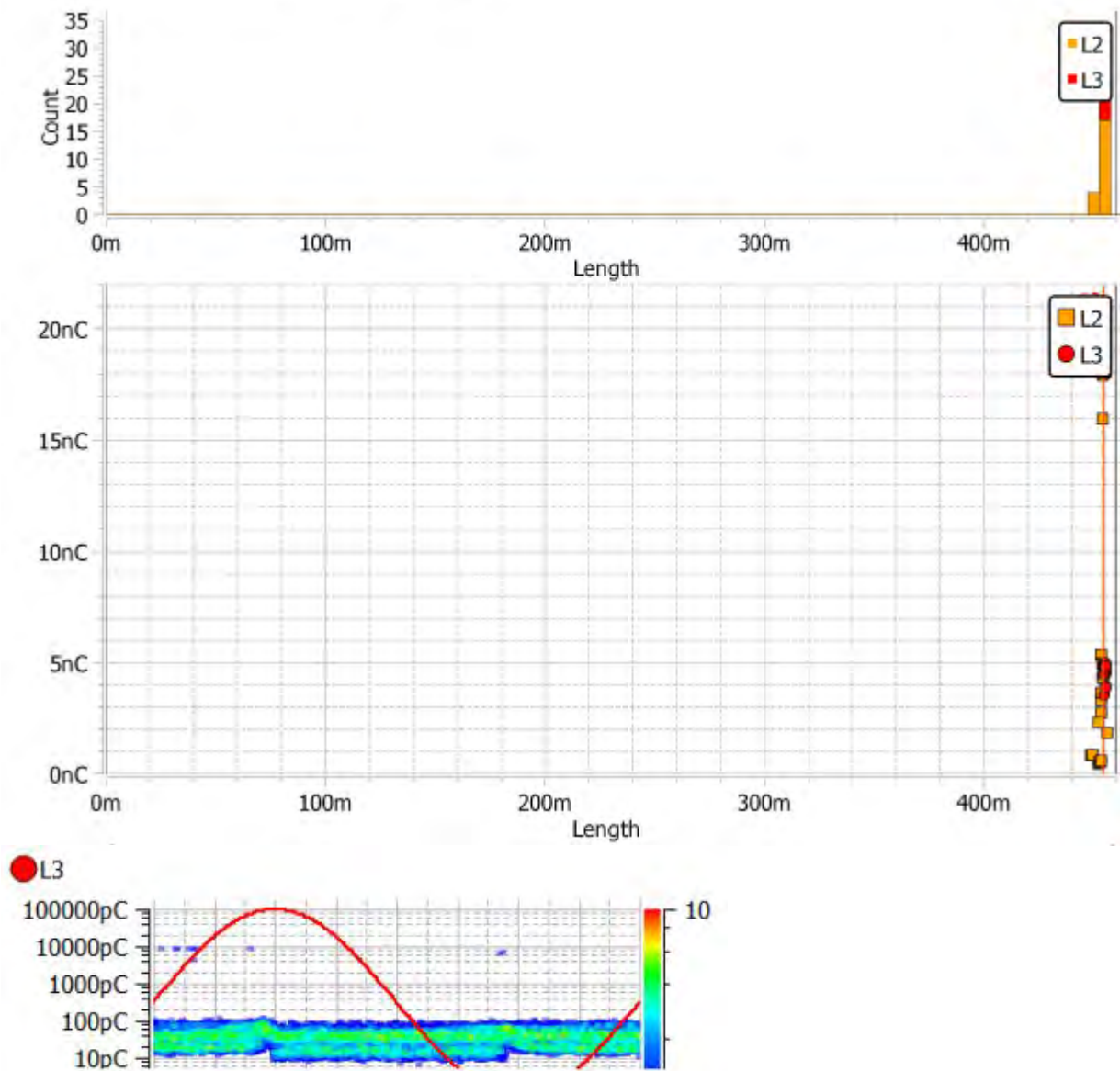
Tässä tapauksessa eri menetelmät antoivat kaapelijärjestelmän osittaispurkauksista melko ristiriitaisia tuloksia.

Taulukko 7-5. Osittaispurkausten syttymisjännitteet ja näennäisvaraukset kaapelin 47 off-line-mittauksessa.

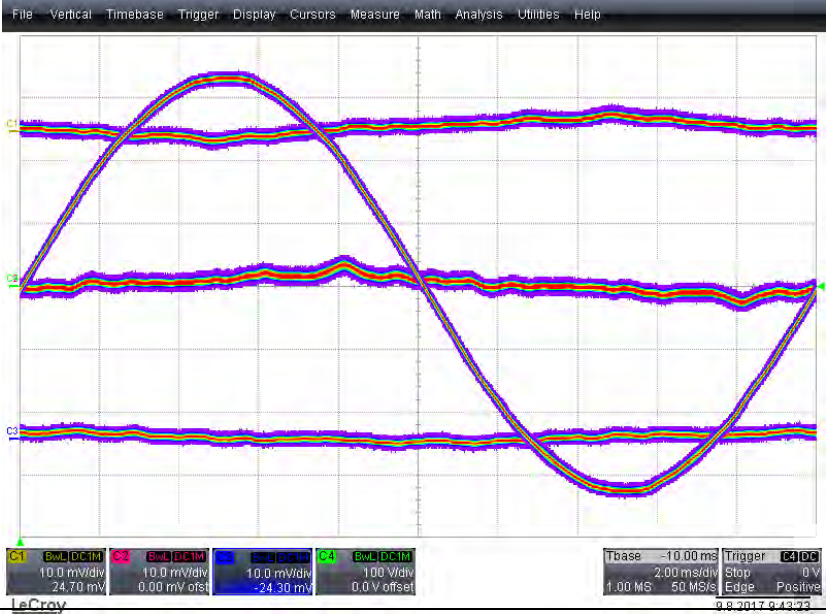
IEC Table

	L1	L2	L3
Disturbance level [pC]	17	18	15
PDIV [kV rms]	15,1	17,4	11,6
PDEV [kV rms]	-	-	-
PD max [pC] (PDIV)	89	88	8613
PD max [pC] (U_0)	48	55	8725
PD Level [pC] (U_0)	44	48	2329
PD max [pC] ($1.7 \cdot U_0$)	81	61035	9507
PD Level [pC] ($1.7 \cdot U_0$)	56	50039	9196
PD max [pC] ($2 \cdot U_0$)	-	-	-
PD Level [pC] ($2 \cdot U_0$)	-	-	-
Frequency [Hz]	365	366	366
Operating Mode	DAC-	DAC-	DAC-

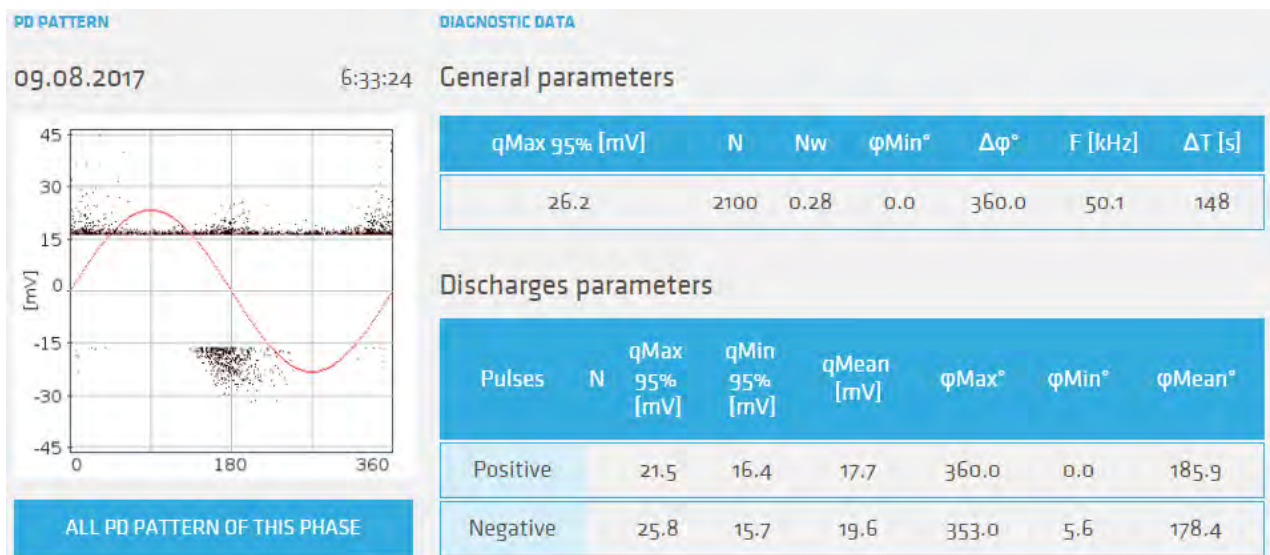
Mapping for $0 \leq U \leq 1.7 U_0 \text{ max}$ (All Phases)



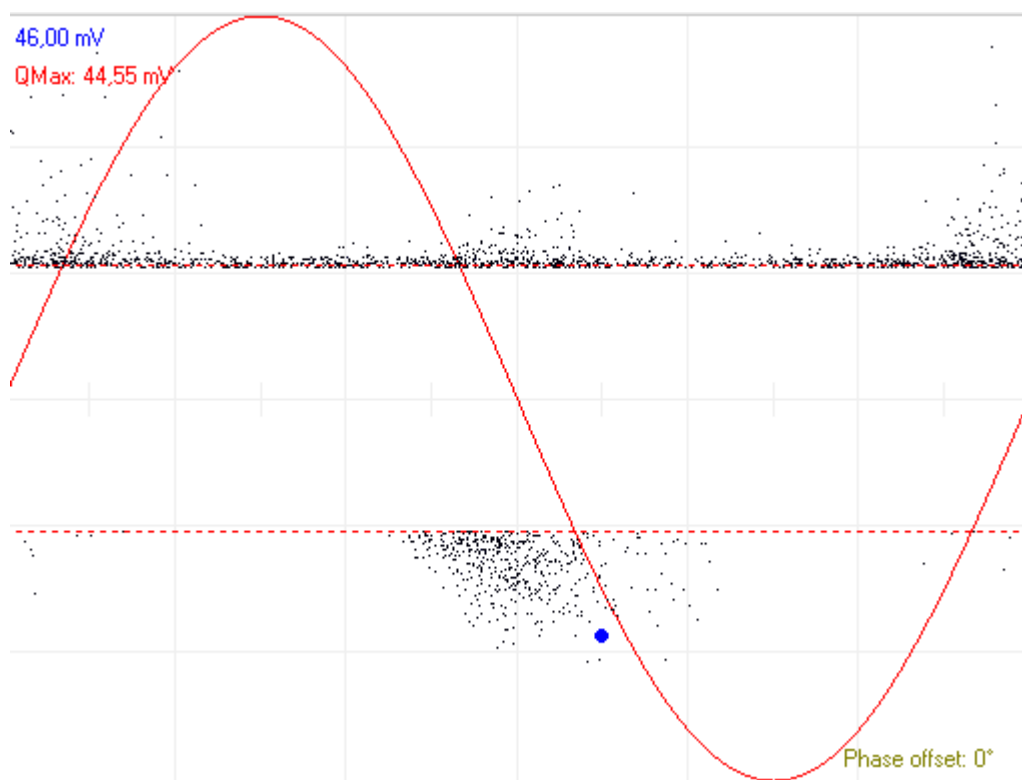
Kuva 7.18. Off-line-mittauksen paikannustulokset jännitetasoon $1,7 U_0$ asti ja PRPD-kuva vaiheen L3 purkauksista (kaikki koejännitetasot yhdistettynä).

Pvm	9.8.2017	
klo	9:43	
Kaapelityyppi	AHXAMK-W	
Poikkipinta [mm ²]	3 x 185+35	
Pituus [m]	460	
Asennusvuosi	2001	
Päätetyyppi	Pistoke	
Käyttöjännite [kV]	20	
Taustahäiriö- taso [pC]	10	
Purkausten näennäisvaraus [pC]	-	
Tiedostot	PD: 1008-1251, Pulssitutkaus: 1252-1253	
Diagnoosi	Ei taustahäiriötason ylittäviä purkauksia, Antureiden asennustavasta johtuen mittausherkkyyys huono (asennustapa B)	

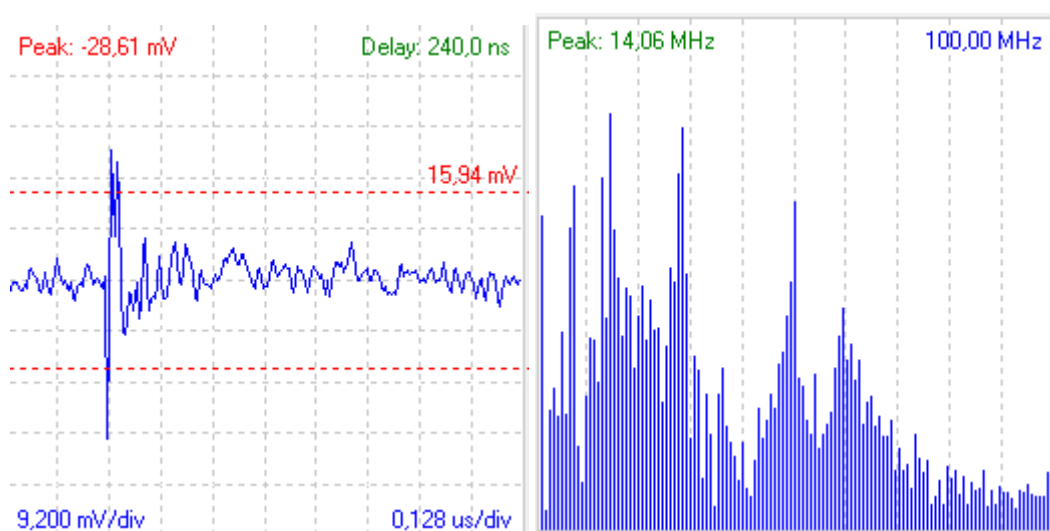
Kuva 7.19. HFCT-mittaustulos kaapelista 47.



Kuva 7.20. Kaapelin 47 vaiheen L3 Pry-Cam-mittaustulos.



Kuva 7.21. Kaapelista 47 Pry-Camilla mitattu osittaispurkaukuvio (PRPD-kuvio).



Kuva 7.22. Esimerkki Pry-Camilla kaapelista 47 mitatusta yksittäisestä (PRPD-kuvassa sinisellä pisteellä merkitystä) osittaispurkauspulssista ja sen taajuusspektristä.

7.6 Kaapeli 82 (20 kV APYAKMT, v. 1971, 525 m)

Kaapeli 82 oli vuonna 1971 asennettu 525 m pitkä APYAKMT/APYAKMM 3x120 20 kV -kaapeli, jossa on verkkotietojen mukaan yhteensä 10 jatkosta. Jatkosten sijainnit ja kaapelityypit ilmenevät taulukosta 7-1. Off-line-osittaispurkausmittauksen mukaan purkaukset paikantuivat kaapelin mittauspäähän (kaapelin päähän tai ensimmäiseen jatkokseen). Suurin mittauspäästä mitattu

osittaispurkaus oli näennäisvaraukseltaan noin 23,6 nC, mutta valtaosa purkauksista oli alle 1000 pC.

On-line-osittaispurkausmittauksissa kaapelissa havaittiin osittaispurkauksia vaiheessa L3. HFCT-mittauksen mukaan purkaukset paikantuivat kaapelin mittauspäähän. Suoraan purkauspaikasta tulleen ja kaapelin päästä heijastuneen pulssin polariteettien perusteella näyttäisi ainakin tarkastelluissa tapauksissa siltä, että purkaus sijaitsisi HFCT-antureista kaapeliin päin, jolloin todennäköisin paikka olisi ensimmäinen jatkos aivan muuntamon vieressä (8 m kaapelin päästä). Osittaispurkausten näennäisvaraus oli suurimmillaan noin 960 pC.

Pry-Cam-mittauksessa havaittiin purkauksia vaiheessa L3 ja purkausten voimakkuus oli suurimmillaan noin 32 mV.

Kaapelin 82 tapauksessa kaikki mittaukset antoivat varsin samansuuntaisen mittaustuloksen. Pry-Cam-mittauksessa purkausten suuruus ilmoitetaan millivoltteina ja tässä tapauksessa näennäisvaraus picocoulombeina näytti olevan yli 30-kertainen millivoltilukemaan verrattuna.

Taulukko 7-6. Kaapelin 82 jatkosten sijainnit.

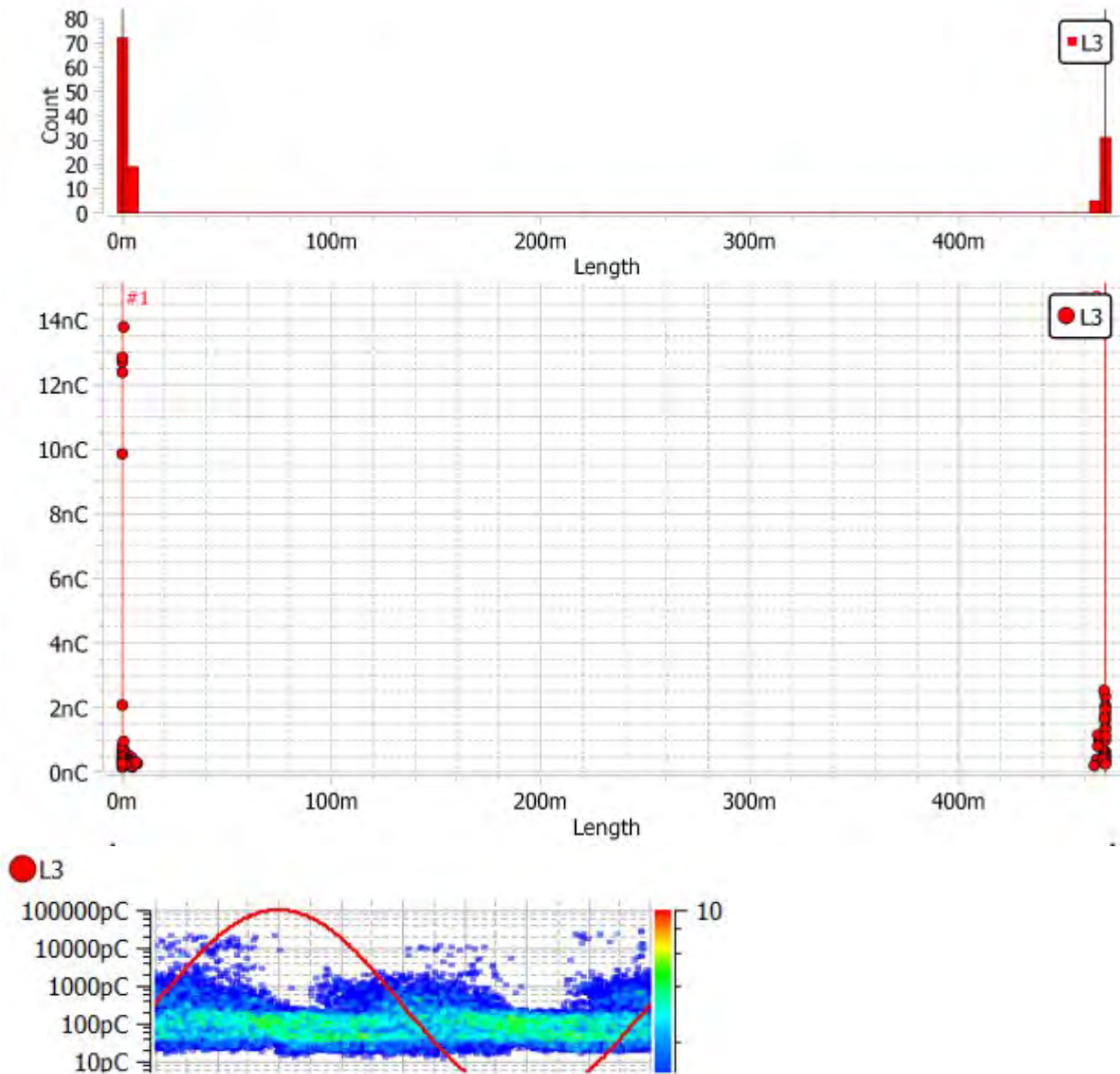
Kaapelityyppi / as. wosi		20A120PT / 1971	Kaapelityyppi
			jatkon jälkeen
Jatkosten sijainnit	1.	8 m	20A120PT / 1996
(et. Mittauspäästä / tyyppi)	2.	39 m	20A120PT / 1971
	3.	43 m	20A120PT/1971
	4.	185 m	20A120PT/1971
	5.	265 m	20A120PT/1971
	6.	303 m	20A120PT/2008
	7.	310 m	20A120PT/2008
	8.	315 m	20A120PT/2008
	9.	322 m	20A120PT/2008
	10.	338 m	20A120PT / 20APY120 / 2005

Taulukko 7-7. Osittaispurkausten syttymisjännitteet ja näennäisvaraukset kaapelin 82 off-line-mittauksessa.

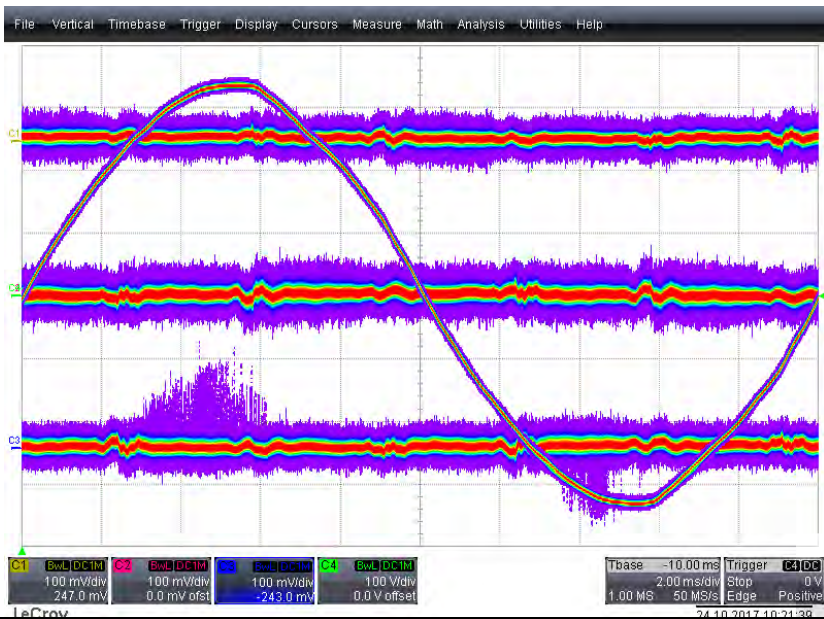
IEC Table

	L1	L2	L3
Disturbance level [pC]	34	30	23
PDIV [kV rms]	8,1	8,1	5,8
PDEV [kV rms]	-	-	-
PD max [pC] (PDIV)	1328	921	11723
PD max [pC] (Uo)	4590	2116	23561
PD Level [pC] (Uo)	3187	2068	22588
PD max [pC] (1.7*Uo)	4968	5644	29538
PD Level [pC] (1.7*Uo)	4239	2872	23840
PD max [pC] (2*Uo)	-	-	-
PD Level [pC] (2*Uo)	-	-	-
Frequency [Hz]	344	344	343
Operating Mode	DAC-	DAC-	DAC-

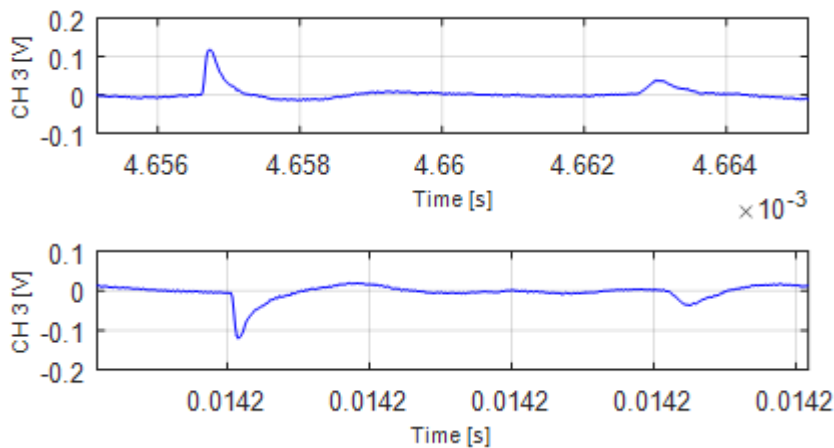
Mapping for $0 \leq U \leq 1 U_0$ (L3)



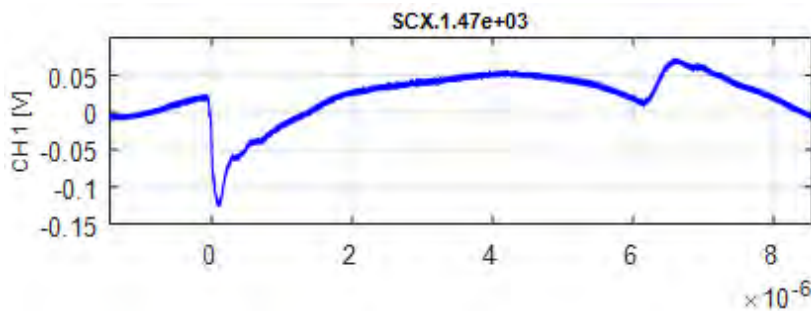
Kuva 7.23. Off-line-mittauksen paikannustulokset jännitetasoon U_0 asti ja PRPD-kuva vaiheen L3 purkauksista (kaikki koejännitetasot yhdistettynä).

Pvm	24.10.2017	
klo	10:21	
Kaapelityyppi	APYAKMT	
Poikkipinta [mm ²]	3 x 120	
Pituus [m]	525	
Asennusvuosi	1971	
Päätetyyppi	Pistoke	
Käyttöjännite [kV]	20	
Taustahäiriö- taso [pC]	300	
Purkausten näennäisvaraus [pC]	980 / 860	
Tiedostot	PD: 3-1217, 1219-1355, 1522-1578, Pulssitutkaus: 1460-1521	
Diagnoosi	Purkauksia vaiheessa L3 molemmilla puolijaksoilla, purkausten näennäisvaraukset noin 980 pC ja 860 pC	

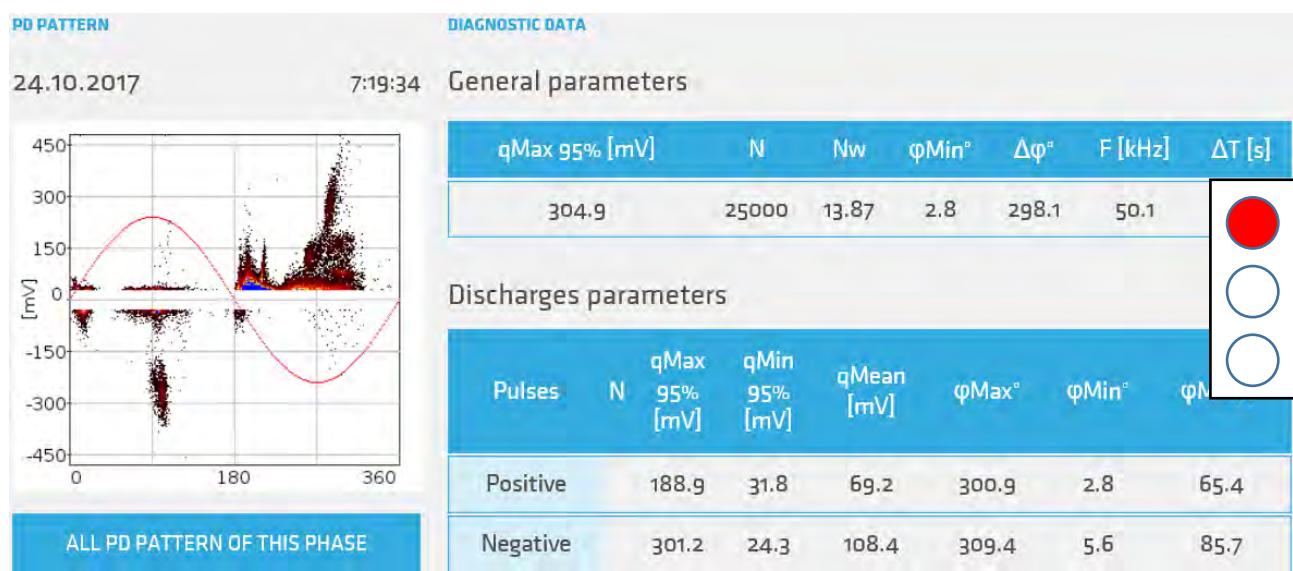
Kuva 7.24. HFCT-mittaus tulos kaapelista 82.



Kuva 7.25. Esimerkki vaiheesta L3 mitatusta positiivisesta ja negatiivisesta osittaispurkauspulssista. Kuvissa näkyy sekä suoraan purkauspaikasta mittauspisteeseen tullut pulssi että kaapelin päästä heijastunut pulssi.



Kuva 7.26. Kaapelin päästä signaaligeneraattorilla ja HFCT:llä kaapeliin syötetty tutkimuspulssi ja sen heijastus. Pulssin syöttöön käytetty virtamuuntaja oli mittausvirtamuuntajasta katsottuna kojeiston puolella, ja tästä johtuen kaapeliin syötetyn pulssin ja kaapelin päästä heijastuneen pulssin polariteetit ovat vastakkaiset.



Kuva 7.27. Pry-Cam-mittaustulos kaapelin 82 vaiheesta L3.

7.7 Kaapeli 88 (20 kV APYAKMM, v.1968, 297 m)

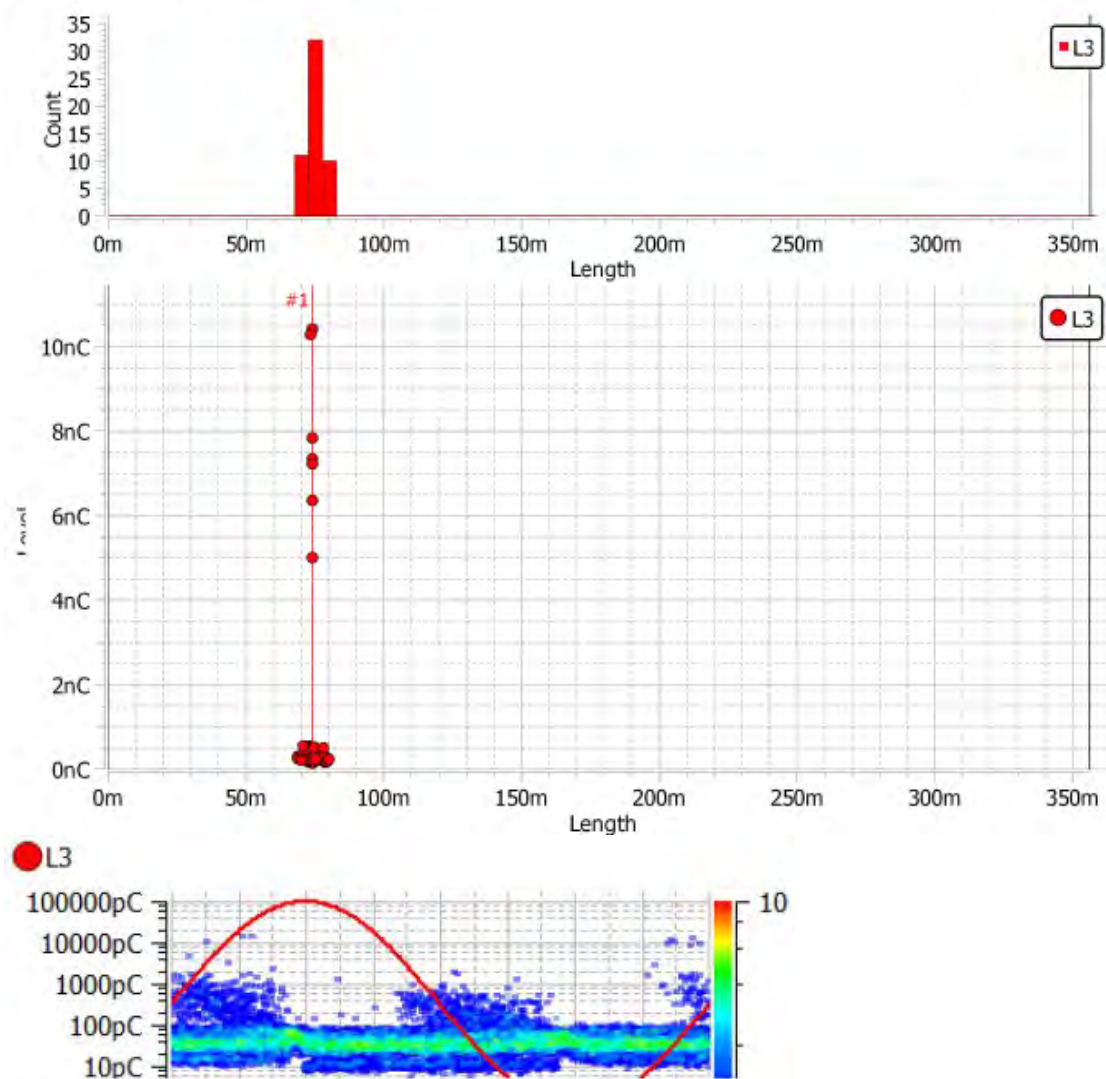
Kaapeli 88 oli vuonna 1968 asennettu 297 m pitkä APYAKMM 3x70 20 kV -kaapeli, jossa oli mittauspäässä pistokepäätteet ja kaasueristeinen kojeisto. Off-line-mittauksessa osittaispurkaukset syttyivät vaiheessa L3 jo $0,7 U_0$:lla, vaiheessa L1 $1,5 U_0$:lla ja vaiheessa L2 $1,7 U_0$:lla. Purkaukset paikantuivat noin 70-80 metrin päähän mittauspäästä. Kohdassa ei ollut verkkotietojärjestelmään dokumentoitua jatkoa, mutta kaapelin ikä huomioiden on mahdollista, että siinä on dokumentoimaton jatko. Purkauskohta sijoittui lähelle kohtaa, jossa kaapeli alittaa rautatien. U_0 :lla osittaispurkauksen näennäisvaraus oli suurimmillaan yli 15 000 pC, mutta valtaosa purkauksista oli kuitenkin alle 500 pC.

Taulukko 7-8. Osittaispurkausten syttymisjännitteet ja näennäisvaraukset kaapelin 88 off-line-mittauksessa.

IEC Table

	L1	L2	L3
Disturbance level [pC]	19	18	16
PDIV [kV rms]	15,1	17,4	8,1
PDEV [kV rms]	-	-	-
PD max [pC] (PDIV)	682	610	15042
PD max [pC] (U ₀)	371	93	11840
PD Level [pC] (U ₀)	348	72	10284
PD max [pC] (1.7*U ₀)	6281	1310	13542
PD Level [pC] (1.7*U ₀)	5146	1212	12832
PD max [pC] (2*U ₀)	-	-	-
PD Level [pC] (2*U ₀)	-	-	-
Frequency [Hz]	390	390	390
Operating Mode	DAC-	DAC-	DAC-

Mapping for $0 \leq U \leq 1 U_0$ (All Phases)



Kuva 7.28. Off-line-mittauksen paikannustulokset jännitetasoon U_0 asti ja PRPD-kuva vaiheen L3 purkauksista (kaikki koejännitetasot yhdistettynä).

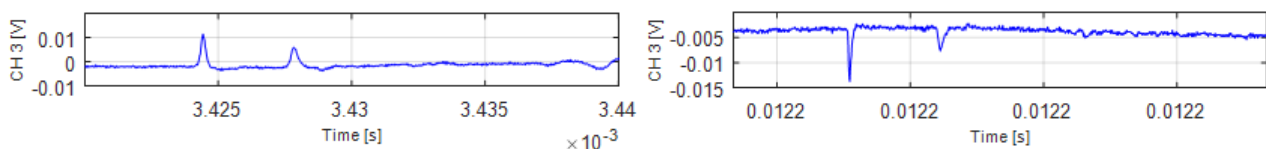
HFCT-osittaispurkausmittauksissa kaapelissa havaittiin osittaispurkauksia vaiheessa L3 molemmilla puolijaksoilla. HFCT-mittauksen mukaan purkaukset paikantuivat suunnilleen samaan kohtaan (noin 60 m mittauspäästä) kuin off-line-mittauksessakin. Positiivisten osittaispurkauspulssien näennäisvaraus oli noin 165 pC ja negatiivisten pulssien nopin 130 pC.

Pry-Cam-mittauksessa havaittiin purkauksia vaiheessa L3 molemmilla puolijaksoilla. Positiivisten pulssien kertymäfunktion 95 % kvantiili oli suurimmillaan noin 35 mV ja negatiivisten noin 27 mV.

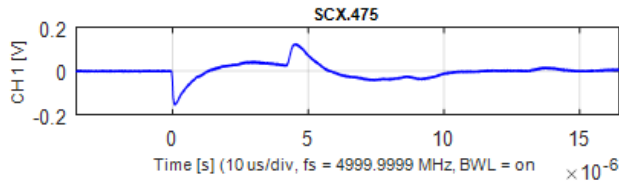
Tässä tapauksessa kaikki mittaukset antoivat hyvin samankaltaisia tuloksia. Off-line-mittauksissa varsinkin suurimmat mitatut purkaukset olivat näennäisvaraukseltaan selvästi suurempia kuin HFCT-mittauksessa, mutta toisaalta suurin osa paikannetuista pulsseista oli samaa suuruusluokkaa.

Pvm	8.11.2017		
klo	10:15		
Kaapelityyppi	APYAKMM		
Poikkipinta [mm2]	3 x 70		
Pituus [m]	297		
Asennusvuosi	1968		
Päätytyyppi	Pistoke		
Käyttöjännite [kV]	20		
Taustahäiriö- taso [pC]	40		
Purkausten näennäisvaraus [pC]	165/130		
Tiedostot	PD: 2-218, 221-450, 451-508, Pulssitutkaus: 451-511		
Diagnoosi	Purkauksia vaiheessa L3 molemmilla puolijaksoilla, purkausten näennäisvaraukset noin 165 pC ja 130 pC, lisäksi tehoelektronikan aiheuttamia häiriöitä		

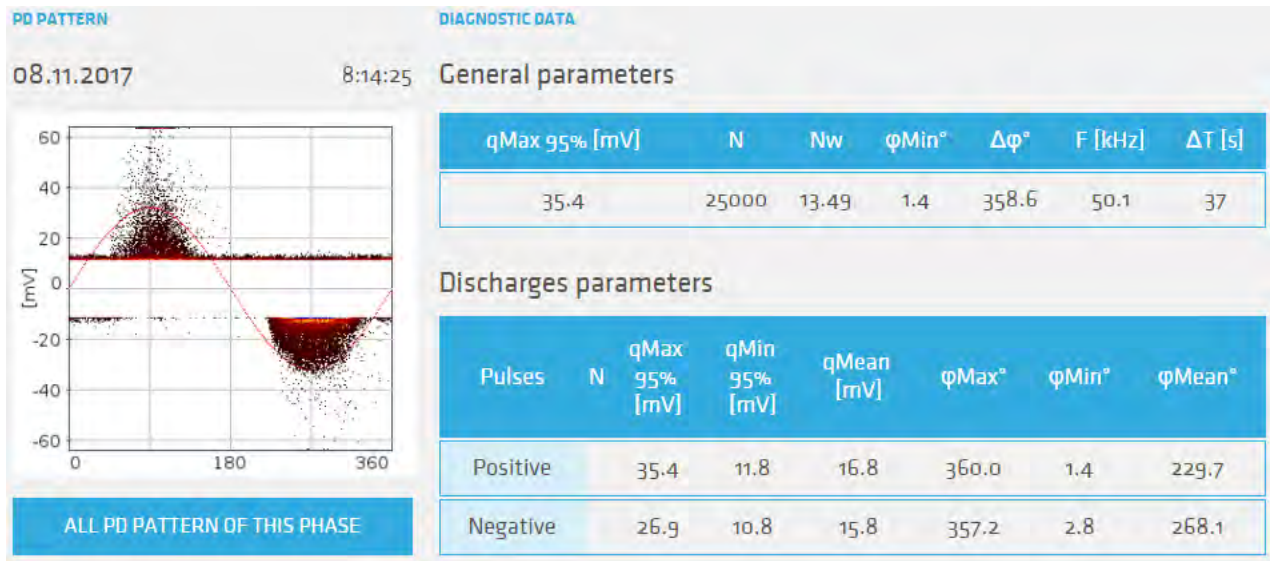
Kuva 7.29. HFCT-mittaustulos kaapelista 88.



Kuva 7.30. Esimerkki vaiheesta L3 mitatusta positiivisesta ja negatiivisesta osittaispurkauspulssista. Kuvissa näkyy sekä suoraan purkauspaikasta mittauspisteeseen tullut pulssi että kaapelin päästä heijastunut pulssi (noin 3,4 μ s suoraan tulleen pulssin jälkeen). Näiden välissä näkyy lisäksi heijastuspulssi, joka on todennäköisesti peräisin muuntamolta vastakkaiseen suuntaan lähtevästä kaapelista.



Kuva 7.31. Kaapelin päästä signaaligeneraattorilla ja HFCT:llä kaapeliin syötetty tutkimuspulssi ja sen heijastus. Pulssin syöttöön käytetty virtamuuntaja oli mittausvirtamuuntajasta katsottuna kojeiston puolella, ja tästä johtuen kaapeliin syötetyn pulssin ja kaapelin päästä heijastuneen pulssin polariteetit ovat vastakkaiset.



Kuva 7.32. Pry-Cam-mittaustulos kaapelin 88 vaiheesta L3.

7.8 Osittaispurkausmittausmenetelmien vertailu

Hankkeen kuluessa tehdyistä mittauksista kertyneiden käytännön kokemusten ja aiemmin tässä luvussa tarkasteltujen mittausesimerkkien perusteella kaikilla tutkituilla menetelmillä on omat hyvät ja huonot puolensa sekä ominaispiirteensä. Yhteenveto havainnoista on koottu taulukkoon 7-9.

PRPD-kuvien ja mitattujen näennäisvarausten osalta tutkittu otos oli niin pieni, että sen perusteella ei voi tehdä kovin pitkälle meneviä johtopäätöksiä. Yleisesti ottaen molemmat on-line-mittaukset kuitenkin antoivat varsin yhteneviä PRPD-kuvia mitatuista kaapelijärjestelmistä. Off-line-mittauksessa pulssimäärät ovat selvästi pienempiä ja laite yhdistää kaikkien jännitetasojen mittaukset samaan kuvaan mikä vaikeuttaa vertailua. Myös verkon normaalista 50 Hz taajuudesta poikkeava mittaustaajuus saattaa jonkin verran vaikuttaa PRPD-kuvien vertailukelpoisuuteen.

Yleisesti ottaen off-line-mittauksissa esiintyi purkauksia yleisemmin kuin on-line-mittauksissa tämä ilmenee myös liitteen B taulukoista) ja aina esimerkiksi mittalaitteen automaattisesti tekemä paikannus ei ollut täysin luotettava. Joissain mittauksissa off-line-mittauksessa havaittiin suurehkojakin osittaispurkauksia normaalilla käyttöjännitteellä, mutta on-line-mittauksissa purkauksia ei kuitenkaan ollut havaittavissa. Tässä mielessä on tärkeää, että mittaustulokset tulkitsee asiantunteva henkilö, jolla on kokemusta mittauksesta ja tulosten tulkinnasta.

Taulukko 7-9. Osittaispurkausmittausmenetelmien vertailu.

Ominaisuus	Mittausmenetelmä		
	Off-line DAC	HFCT-mittaus	Pry-Cam
Verkon häiriöiden vaikutus mittaukseen	yleensä vähäisempi kuin on-line-mittauksissa	yleensä suurempi kuin off-line-mittauksissa	yleensä suurempi kuin off-line-mittauksissa
Osittaispurkausten paikannus	onnistuu automaattisesti metrien tai kymmenien metrien tarkkuudella, manuaalinen verifiointi mahdollista mittausdatoista	- onnistuu manuaalisesti mittausdatoista metrien tai kymmenien metrien tarkkuudella, kaupallisesti tarjolla myös automaattisia paikannusalgoritmeja sisältäviä laitteita - lisäensoreilla mahdollista tehdä kulkuaikeihin perustuvaa erottelua kaapelissa ja kojeistossa tapahtuvien purkausten välillä	- ei onnistu Pry-Cam portable-laitteella (karkeasti ehkä arvioitavissa tekemällä mittaus kaapelin molemmista päistä ja tarkastelemalla pulssin taajuusspektriä) - mahdollista kaapelin molempiin päihin asennettavilla GPS-synkronoiduilla Pry-Cam Grids- tai Dlog-laitteilla
Osittaispurkausten näennäisvarausnäyttämän kalibroituavuus	hyvä, periaatteessa tehtävissä IEC 60270:n mukaisesti	melko hyvä, onnistuu syöttämällä IEC60270:n mukaisella kalibraattorilla kalibrointipulssi virtamuuntajan läpi	purkausten suuruus ilmoitetaan millivolteina, kalibrointi mahdollista syöttämällä kalibraattorilla jännitteettömään kaapeliin kalibrointipulssi (vaatii katkon) ja asettamalla mV-pC-suhde
Orastavien eristysvikojen havaitsemisherkkyys ja diagnostiikan kattavuus	- mahdollisuus havaita pienempiä vikoja kuin on-line-mittauksella, koska koejännite on säädettävissä normaalia käyttöjännitettä suuremmaksi - säädettävän koejännitteen vuoksi on mahdollista määrittää mm. purkausten syttymisjännite	- mittaus vain normaalilla käyttöjännitteellä => orastavia vikoja ei havaita niin aikaisessa vaiheessa kuin suuremmilla koejännitteillä - mahdollisuus tehdä mittauksia käytönaikaisena ja nähdä esim. kuormitusilanteiden vaihtelun vaikutus osittaispurkauksiin	- mittaus vain normaalilla käyttöjännitteellä => orastavia vikoja ei havaita niin aikaisessa vaiheessa kuin suuremmilla koejännitteillä - mahdollisuus tehdä mittauksia käytönaikaisena ja nähdä esim. kuormitusilanteiden vaihtelun vaikutus osittaispurkauksiin

Ominaisuus	Mittausmenetelmä		
	Off-line DAC	HFCT-mittaus	Pry-Cam
PRPD-mittauksen yksityiskohtaisuus ja vertailukelpoisuus laboratoriomittauksiin	• koejännitteen lyhytkestoisuudesta ja vaimenemisesta johtuen pulsseja kertyy vähän • tästä sekä koejännitteen poikkeavasta taajuudesta johtuen ei ole välttämättä täysin vertailukelpoinen 50 Hz vakiojännitteellä tehtäviin mittauksiin	• mittaus normaalilla 50 Hz käyttöjännitteellä => pulsseja kertyy paljon ja PRPD-kuva on yksityiskohtainen • verkon häiriöt voivat vääristää PRPD-kuvaa • muuten PRPD-kuva verrattavissa esim. laboratoriomittauksiin (mittauskaistanleveyden mahdolliset erot huomioiden)	• mittaus normaalilla 50 Hz käyttöjännitteellä => pulsseja kertyy paljon ja PRPD-kuva on yksityiskohtainen • verkon häiriöt voivat vääristää PRPD-kuvaa • amplitudisteikko millivolteina (mahdollista asettaa mV-pC suhde) • muuten PRPD-kuva verrattavissa esim. laboratoriomittauksiin (mittauskaistanleveyden mahdolliset erot huomioiden)
Mittauksen kesto aika	• kolmen vaiheen mittaus arviolta noin 40-60 min (ml. antureiden ja mittajohtojen kytkennät)	• kolmen vaiheen mittaus arviolta noin 20-30 min (ml. antureiden ja mittajohtojen kytkennät)	• kolmen vaiheen mittaus arviolta noin 10-15 min
Mittausta rajoittavat tekijät	• työskentelysuojalevy tulee pystyvä asentamaan mitattavaan kennoon • laitteisto on peräkärjessä, kärry saatava alle 50 m päähän kennosta, jotta mittauskaapeli riittää	• anturit voidaan asentaa vain kaapelin kosketussuojatulle osuudelle • jos kaapelissa on suoraan kennon maadoitettuihin rakenteisiin kiinnitetyt posliinipäätteet, mittausherakkeus jää huonoksi • jos kaapelissa on ns. letkupäätteet, mittaus ei välttämättä onnistu (kts. luku 2)	• tutkituissa kohteissa ei ilmennyt mitattausta rajoittavia tekijöitä

Mittausten kesto aika on taulukossa arvioitu yksittäisen kolmivaihekaapelin mittaukselle lähtien saapumisesta mittauskohteeseen, jossa verkon kytkentäjärjestelyt on valmiiksi tehty niin, että kaapeli on jännitteetön ja otettavissa jännitteiseksi erotinta tai katkaisijaa ohjaamalla. Jos samalla muuntamalla tai sähköasemalla tehdään useampia mittauksia, mittauksiin kuluva aika kaapelia

kohden lyhenee kaikkien menetelmien tapauksessa jonkin verran, koska esimerkiksi mittaускаapeleiden vetämiseen ja mittauslaitteiston käyttöönottoon kuluu vähemmän aikaa mittausta kohden.



Kuva 7.33. Peräkärriyn asennettu off-line-osittaispurkausmittauslaitteisto (kuvassa oikealla).



Kuva 7.34. HFCT-mittauslaitteisto henkilöauton tavaratilassa (oskilloskooppi, differentiaalimittapää 50 Hz vaihejännitteen mittaamista varten (pj-rasiasta) ja signaaligeneraattori kaapelin pulssituksesta varten).



Kuva 7.35. Pry-Cam-mittauslaitteisto (kennossa eristyssauvan päässä Pry-Cam portable ja kädessä mittausohjelmistolla varustettu iPad).

8 Esimerkki kaapelin kunnon arvioinnista

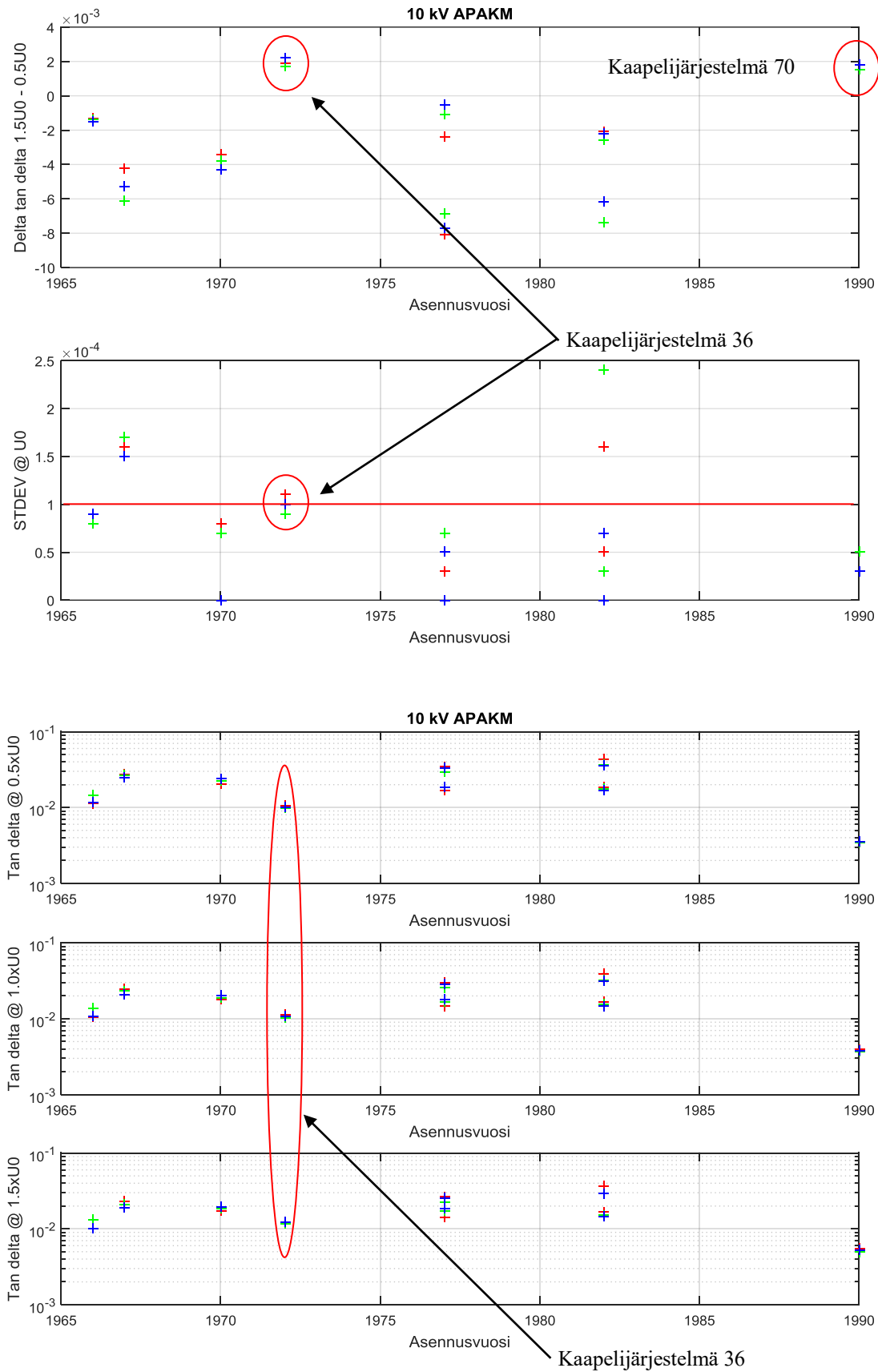
Yksi hankkeen puitteissa mitatuista kaapeleista vikaantui muutamia viikkoja mittausten jälkeen. Kyseessä oli APAKM 3x120 10 kV -kaapeli (kaapelijärjestelmä 36). Off-line-häviökerroin- ja osittaispurkausmittaukset tehtiin kaapelille 15.6.2017 ja kaapeli rikkoutui myöhemmin kesällä 2017. Vikapaikka oli noin 32 m mittauspäästä kaapelin vaiheessa L1. Oikosulkuvirta vaiheessa L1 oli 590 A ja vaiheessa L2 490 A. Tässä luvussa käydään läpi tekijöitä, joihin kaapelin kunnon arvioinnissa kannattaa kiinnittää huomiota ja tarkastellaan, millainen tämän vikaantuneen kaapelin kunto näiden tekijöiden valossa oli suhteessa standardin IEEE Std400-2-2013 raja-arvoihin ja muihin hankkeessa mitattuihin kaapeleihin.

Kaapelin kunnon arvioinnissa huomiota kannattaa kiinnittää mm. seuraaviin tekijöihin (tekijät tai tunnuslukujen arvot ja niiden erot vaiheiden välillä):

1. Häviökertoimen keskihajonta normaalilla käyttöjännitteellä
2. Häviökertoimen muutos jännitteen funktiona
3. Häviökerroin normaalilla käyttöjännitteellä
4. Häviökertoimen muutoksen muuttuminen (TUTU-tunnusluku) jännitteen funktiona
5. Osittaispurkausten syttymis- ja sammumisjännite
6. Osittaispurkausten suuruus ja toistotaajuus
7. Osittaispurkausten suuruuden ja toistotaajuuden muuttuminen jännitteen funktiona
8. Osittaispurkausten sijainti (päänteessä, jatkoksessa vai itse kaapelissa, pistemäinen vai pitkälle matkalle jakautunut)

8.1 Häviökerroinmittausten tulkinta

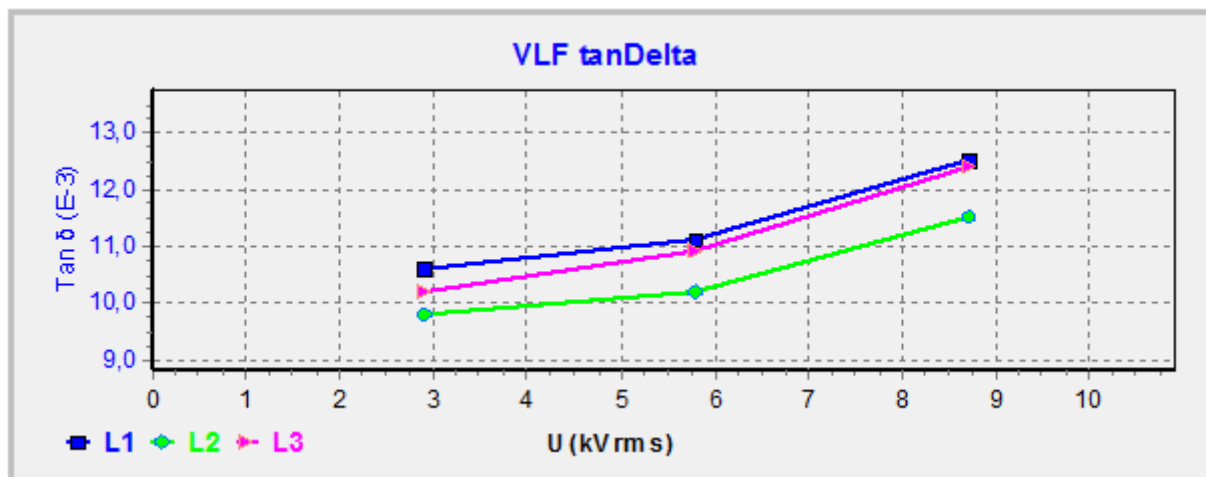
Kuten kuvasta 8.1 ilmenee kaapelijärjestelmän 36 häviökertoimen muutos jännitteen funktiona ($1.5U_0-0.5U_0$) ei ylitä standardin IEEE Std400.2-2013 alemmaa raja arvoa 10×10^{-3} , mutta se on kaapelijärjestelmän 70 ohella selvästi suurin mitatuista 10 kV APAKM-kaapelijärjestelmien häviökertoimen muutos jännitteen funktiona kaikkien kolmen vaiheen osalta.



Kuva 8.1. Mittausten jälkeen käytön aikana vikaantuneen kaapelijärjestelmän 36 häviökerroimittausten (TD, DTD ja TDTS) tulokset verrattuna muihin mitattuihin 10 kV APAKM kaapeleihin (L1 – punainen, L2 – vihreä, L3 – sininen).

Sen sijaan kaapelijärjestelmän STDEV-arvo ylittää standardin IEEE Std400.2-2013 alemman raja arvon 0.1×10^{-3} vaiheen L1 osalta. Kahdesta muusta APAKM-kaapelijärjestelmästä on tosin mitattu hieman suurempiakin arvoja.

Kaapelijärjestelmän 36 TD-arvo ei ole lähelläkään standardin IEEE Std400.2-2013 raja arvoa 85×10^{-3} ja muihinkin APAKM-kaapeleihin verrattuna se on keskimääräistä pienempi. Kuvassa 8.2 on esitetty kaapelijärjestelmän 36 eri vaiheiden häviökertoimet jännitteen funktiona.



Kuva 8.2. Kaapelijärjestelmän 36 häviökerroinmittauksen tulokset.

Taulukko 8-1. Kaapelijärjestelmän 36 häviökerroinmittauksen tulokset.

Phase:	L1	L2	L3
Voltage Uo:	5.8 kV	5.8 kV	5.8 kV
Frequency:	0.1 Hz	0.1 Hz	0.1 Hz
Capacitance:	226 nF	224 nF	224 nF
Avg. TD Uo: [E-3]	11.1	10.2	10.9
Delta TD [E-3]:	1.9	1.7	2.2
StdDev TD Uo: [E-3]	0.11	0.09	0.10
Avg. TD (0.50Uo .. 1.50Uo): [E-3]	10.6; 11.1; 12.5	9.8; 10.2; 11.5	10.2; 10.9; 12.4
Result:	further study advised	no action required	no action required
Evaluation criterion:	IEEE400.2(1.5U0)		
Insulation type:	PILC		

Yhteenvedona häviökerroinmittauksista voidaan todeta, että kaapelijärjestelmän 36 osalta ikääntymistä ja läpilyöntiriskin kasvua parhaiten kuvaavat STDEV- ja DTD-arvot olivat mittauksissa selvästi koholla ja häviökerroin kuvaajan muoto jännitteen funktiona on myös tyypillinen ikääntyneelle kaapelille, jonka vikaantumisriski on kohonnut.

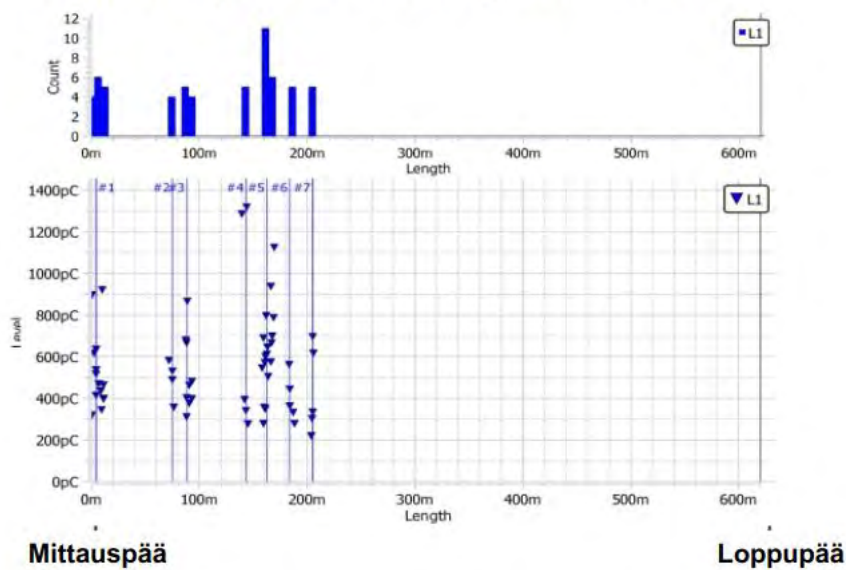
8.2 Osittaispurkausmittausten tulkinta

Kaapelijärjestelmälle tehtiin myös off-line-osittaispurkausmittaukset, joiden perusteella se arvioitiin huonokuntoiseksi. Purkauksen syttymisjännitteet olivat kaikissa vaiheissa $0,7 U_0$, joten purkauksia on kaapelijärjestelmässä normaalilla käyttöjännitteellä jatkuvasti. Syttymisjännitteen ollessa näin

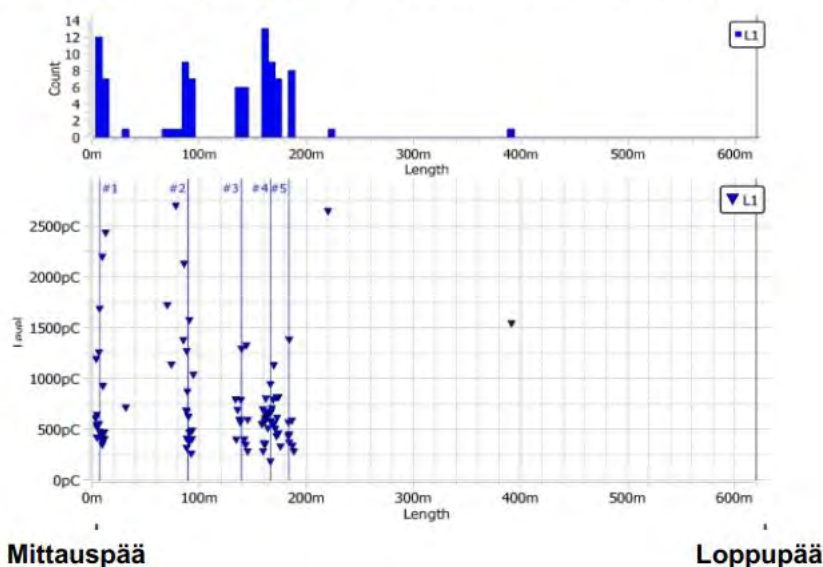
pieni purkausten sammumisjännitteellä ei ole suurta käytännön merkitystä eikä sitä tässä tapauksessa erikseen mitattu.

Kuvassa 8.3 on esitetty kaapelijärjestelmän 36 vaiheen L1 osittaispurkausmittausten tulokset normaalilla käyttöjännitteellä U_0 ja suurimmalla koejännitteellä $1.7 U_0$. Vastaavat tulokset vaiheiden L2 ja L3 osalta mitattuna normaalilla käyttöjännitteellä U_0 on esitetty kuvissa 8.4...8.5. Vaiheen L3 osalta osittaispurkausten voimakkuus ylittää normaalilla käyttöjännitteellä luvussa 4.2 mainitun kaapelijärjestelmien kuntoluokittelun alimman raja-arvon 2500 pC ja sillä perusteella kaapelijärjestelmän seurantamittaukset olisivat suositeltavia.

Purkausten sijainti vaiheessa L1 jännitteellä U_0 .

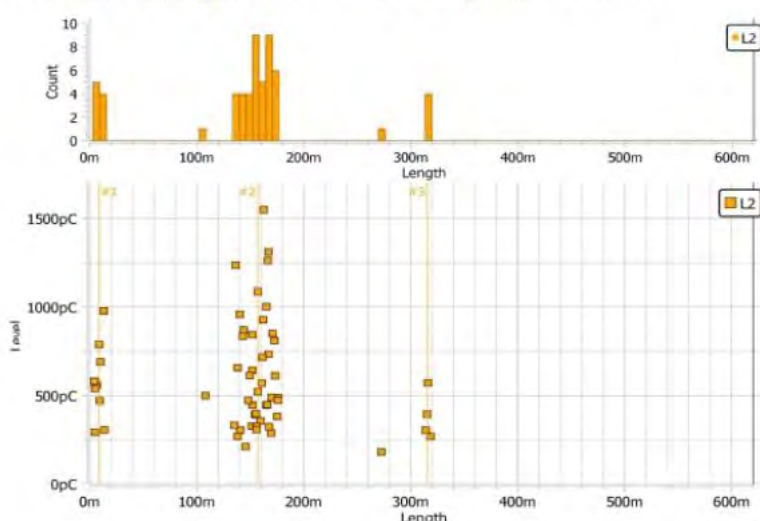


Purkausten sijainti vaiheessa L1 jännitteellä $1.7 \cdot U_0$.



Kuva 8.3. Kaapelijärjestelmän 36 osittaispurkausmittausten tulokset vaiheen L1 osalta koejännitteillä U_0 ja $1.7 U_0$.

Purkausten sijainti vaiheessa L2 jännitteellä U_0 .

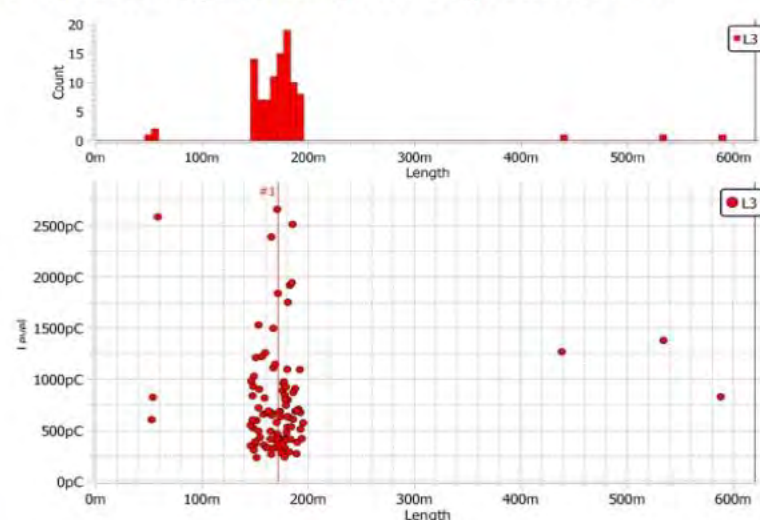


Mittauspää

Loppupää

Kuva 8.4. Kaapelijärjestelmän 36 osittaispurkausmittauksen tulokset vaiheen L2 osalta koejännitteellä U_0 .

Purkausten sijainti vaiheessa L3 jännitteellä U_0 .



Mittauspää

Loppupää

Kuva 8.5. Kaapelijärjestelmän 36 osittaispurkausmittauksen tulokset vaiheen L3 osalta koejännitteellä U_0 .

Mittauksen mukaan kaapelissa esiintyy purkauksia lähinnä sen alkupäässä ja useammassa kohtaa. Ne keskittyvät kuitenkin muutamaan kohtaan (mahdollisesti jatkoksia), minkä vuoksi niitä voidaan pitää haitallisempina kuin siinä tapauksessa, jos purkauksia esiintyisi satunnaisesti esimerkiksi koko kaapelin matkalla. Pääosin ne eivät osu aivan vikapaikkaan vaan hieman sen etupuolelle (vikapaikan ja kaapelin mittauspään väliin). Paikannuksen tarkkuus ei välttämättä ole parhaimmillaan aivan kaapelin alkupäässä, koska suoraan vikapaikasta tulleen ja kaapelin päästä heijastuneen pulssin kulkemassa matkassa on suuri ero ja pidemmän matkan kulkenut heijastuspulssi pyöristyy (dispersio) ja vaimenee kaapelissa kulkiessaan huomattavasti enemmän

kuin suoraan tullut pulssi. Kun mittalaitteen algoritmi tekee paikannuksen käytännön syistä pulssien huippujen perusteella, syntyy varsinkin kaapelin alkupään paikannuksiin helposti virhettä. Tämä korostuu erityisesti öljypaperieristeisissä kaapeleissa, joissa vaimennus on suurempi kuin XLPE-eristeisissä kaapeleissa.

Osittaispurkausmittausten perusteella huonoimmassa kunnossa näyttäisivät olevan kaapelin vaiheet L1 ja L3 ja kokonaisuutena (häviökerroinmittausten tulokset mukaan lukien) vaihe L1.

9 Mittausmenetelmien vertailu

9.1 *Soveltuvuus kaapeleiden kunnonvalvontamittauksiin*

Tässä hankkeessa tehtyjen mittausten perusteella VLF-häviökerroinmittaus näyttäisi soveltuvan kaapelijärjestelmien kunnonvalvontamittauksiin yhtenä menetelmänä esimerkiksi osittaispurkausmittauksen rinnalla. Menetelmällä saadaan kaapelijärjestelmästä tietoa, jota osittaispurkausmittauksella ei saada. Esimerkiksi muovikaapeleiden vesipuut ja kosteus öljypaperikaapelissa eivät alkuvaiheessa näy osittaispurkausmittauksessa välttämättä mitenkään, mutta ne yleensä näkyvät häviökerroinmittauksessa. Kehittyessään pidemmälle vesipuut usein johtavat myös osittaispurkausten syntyyn, jonka jälkeen orastava vikapaikka on myös paikannettavissa osittaispurkausmittauksilla.

Suomessa käytettyjen kaapelirakenteiden näkökulmasta häviökerroinmittaus on ehkä parhaimmillaan öljypaperikaapelijärjestelmien kunnonvalvonnassa. Suomessa käytetyissä muovikaapelirakenteissa esimerkiksi vesipuuongelmia ei ole tiettävästi esiintynyt ja tällöin häviökerroinmittaus todennäköisesti kuvaa enemmän kaapelivarusteiden kuin itse kaapelin kuntoa. Muovikaapelin luontaisesti pienistä häviöistä johtuen mittaus on myös herkempi ympäristötekijöiden vaikutuksille. Osittaispurkausmittaus soveltuu sekä öljypaperi- että muovikaapelijärjestelmille, mutta muovikaapelijärjestelmien tapauksessa tulosten tulkinta on ehkä hieman helpompaa. Ehjissä muovikaapelijärjestelmissä merkittäviä osittaispurkauksia ei saisi esiintyä ja alkaneet sisäiset osittaispurkaukset eivät pääsääntöisesti korjaannu itsestään. Öljypaperikaapelissa esimerkiksi lämpötilavaihteluiden aiheuttama öljyn liikkuminen voi aiheuttaa vaihteluita osittaispurkauksissa ja jopa osittaispurkauspaikkojen ”itsekorjautumista”.

Käytännössä häviökerroinmittaustulosten tulkintaa vaikeuttaa se, että suuren häviökertoimen aiheuttajan selvittäminen ja paikantaminen on menetelmällä vaikeaa. Esimerkiksi päätteiden pintakosteuden, likaisuuden tai kojeiston aiheuttama häviökertoimen kasvu on mahdollista tunnistaa kuivaamalla tai puhdistamalla päätteet ja irrottamalla ne kojeistosta. Kaapelissa ja jatkoksissa esimerkiksi huonon osuuden paikantaminen ei menetelmällä kuitenkaan onnistu. Menetelmällä saadaan kaapelista mitattua häviökertoimeen ja sen vaihteluun (jännitteen ja ajan funktiona) liittyviä

tunnuslukuja, joiden perusteella kaapeleita on mahdollista omaisuudenhallinnassa laittaa esimerkiksi kiireellisyysjärjestykseen uusimisen suhteen.

Hankkeessa tutkittiin myös käyttökätkön aikana (off-line) vaimenevalla sinimuotoisella testijännitteellä (DAC – damped AC) tehtäviä osittaispurkausmittauksia ja käytön aikana (on-line) tehtäviä HFCT (high frequency current transformer)-mittauksia ja Pry-Cam-mittauksia. Yleisesti ottaen DAC-menetelmällä tehdyissä mittauksissa näkyi normaalilla käyttöjännitteelläkin yleisemmin purkauksia kuin kummallakaan on-line-mittausmenetelmällä. HFCT-mittaus ja Pry-Cam antoivat pääsääntöisesti varsin samankaltaisia tuloksia, tosin joissain tapauksissa Pry-Camilla näkyi purkauksia, joita HFCT-mittauksessa ei näkynyt. Näyttäisi siltä, että erityisesti DAC-menetelmän off-line-mittauksien tulkinen vaatii asiantuntemusta, ja mittalaitteen purkauksiksi tulkitsemia pulsseja on syytä käydä manuaalisesti läpi, jotta pystytään varmistamaan, että kyse on todellisista osittaispurkauksista kaapelissa.

HFCT-mittauksen etuna on se, että purkaukset ovat pääsääntöisesti paikannettavissa samalla periaatteella, jota käytetään off-line-mittauksessakin. Huonona puolena esimerkiksi Pry-Cam mittaukseen verrattuna on se, että virtamuuntajien asennus ei välttämättä kaikissa kohteissa onnistu käytön aikana ja joissain kohteissa se ei välttämättä ole mahdollista lainkaan (kts. luku 2).

Pry-Cam laitteiston etuna on nopeus ja verrattain helppo käytettävyys. Mittaus myös onnistuu käytännössä aina, jos vain kaapelit tai päätteet ovat tilassa, jossa Pry-Camin pystyy eristysauvalla laittamaan niiden kylkeen. Esimerkiksi kaapelipäätteiden rakenteella ja asennustavalla ei tässä ole merkitystä. Puutteena esimerkiksi HFCT-mittaukseen verrattuna on se, että purkausta ei pystytä paikantamaan (ellei ole käytössä samanaikaisesti kahta Pry-Cam-laitteistoa kaapelin molemmissa päissä ja GPS-synkronointia niiden välillä). Tämä saattaa vaikeuttaa purkauksen haitallisuuden ja lähteen (tuleeko purkaus mitattavasta kaapelista vai esim. kojeistosta) arviointia. Laite ei myöskään sovellu kovin pitkien kaapeleiden mittaamiseen.

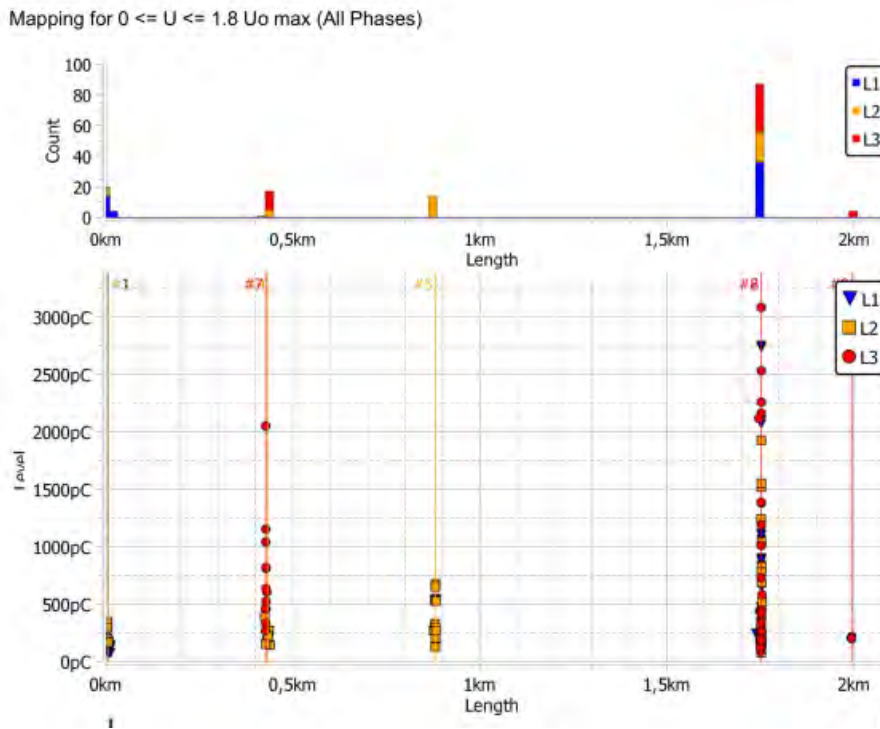
9.2 *Soveltuvuus kaapeleiden käyttöönottomittauksiin*

Kaapeleiden käyttöönottomittausten tarkoituksena on varmistaa, että kaapeli on ehjä ja sen varusteet on oikein asennettu. Kaapelipäätteiden ja -jatkosten asennusvirheet (kts. luku 2) aiheuttavat usein osittaispurkauksia, jotka tulisi pystyä käyttöönottomittauksilla havaitsemaan. Yleisesti ottaen tässä hankkeessa tehtyjen VLF-häviökerroin sekä DAC- ja on-line-osittaispurkausmittausten osalta näytti siltä, että häviökertoimella ja osittaispurkauksilla ei ole selvää korrelaatiota.

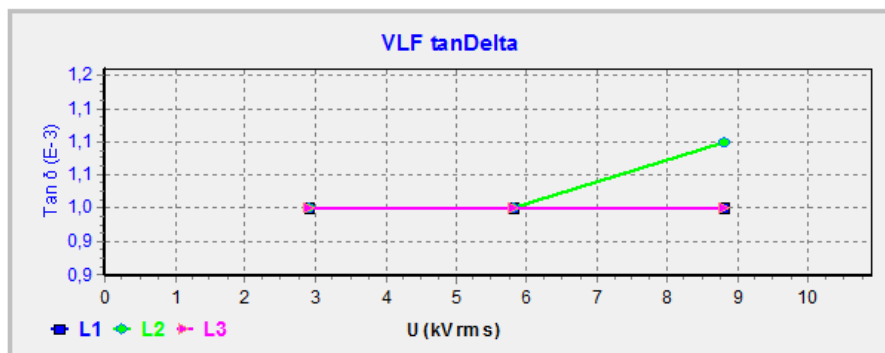
Öljypaperikaapeleissa häviökertoimet ovat sen verran suuria, että varsinkaan toistotaajuudeltaan pienekköiden osittaispurkausten energia ei näytä näkyvän kaapelin resistiivisen virran ja sitä kautta häviökertoimen oleellisenä kasvuna. Mittauksissa ei havaittu muovikaapeleidenkaan kohdalla selvää korrelaatiota osittaispurkausten ja häviökertoimen välillä. Osittaispurkauksia esiintyi myös kaapeleissa, joissa häviökerroin oli 1×10^{-3} , joka oli tässä hankkeessa häviökerroinmittalaitteena käytetyn Megger TDS40:n mittaalueen alaraja. Tämä saattaa osaltaan selittää sitä, että osittaispurkaukset eivät häviökertoimessa näy. Toisaalta pienet häviökertoimen muutokset tämän rajan alapuolella saattaisivat johtua monesta muustakin tekijästä ja voi olla kyseenalaista olisiko

häviökerroinmittaus herkemällä laitteistollakaan yksinään käyttökelpoinen asennuksen laadun mittari. Esimerkiksi huonosti tehdyt kaapelipäätteet ja jatkokset on helpompi havaita ja paikantaa osittaispurkausmittauksella.

Esimerkiksi kaapeliyhteyden 34 (AHXAMK-W v. 2012) jatkoksissa ja päätteissä mitattiin off-line osittaispurkausmittauksessa korkeat purkaustasot (kuva 9.1), mutta häviökerroin (kuva 9.2) on matala.



Kuva 9.1. Kaapelin 34 purkaukset etäisyyden funktiona



Kuva 9.2. Kaapelin 34 häviökerroin jännitteen funktiona

Mittaustulosten perusteella näyttää siltä, että häviökerroinmittaus soveltuu huonosti keskijännitteisten kaapelijärjestelmien käyttöönottomittauksiin. Suositeltava menetelmä käyttöönottomittauksiin on osittaispurkausmittaus joko off-line- tai on-line-mittauksena. Off-line-mittaukset kannattaa pyrkiä ajoittamaan ennen kaapeliyhteyden käyttöönottoa, jotta säästytään ylimääräisiltä kytkennöiltä. Vähemmän tärkeiden kaapeliyhteyksien tapauksessa on-line-mittaus joko HFCT- tai Pry-Cam-menetelmällä voisi olla nopeudestaan ja helposta toteutettavuudestaan

johtuen mielekäs menetelmä. Pry-Cam on helppokäyttöisyytensä vuoksi parhaimmillaan lyhyehköjen kaapeliyhteyksien osittaispurkauksien nopeassa esikartoituksessa. Puutteena on se, että purkausta ei pystytä sillä paikantamaan. Off-line-mittaus soveltunee parhaiten tärkeimpien kaapeliyhteyksien mittaukseen, koska sillä saavutetaan paras herkkyys. Häiriöt ovat vähäisempiä ja mittaus on mahdollista tehdä normaalia käyttöjännitettä suuremmalla jännitteellä, jolloin pienemmät viatkin tulevat esille.

10 Hankkeessa kerätty mittaustietopankki

Hankkeessa kerätyt mittaustiedot on tallennettu Dekra Industrial Oy:n M-Files-tietojärjestelmään, josta löytyy mittauksista seuraavat mittaustiedot (ns. raakadatana):

1. Kaapelikohtaiset off-line-VLF-häviökerroinmittaustiedot
 - a. Excel-tiedostoina
 - b. pdf-tiedostoina
2. Kaapelikohtaiset off-line-osittaispurkausmittaustiedot Dekran DAC-mittauksista
3. Kaapelikohtaiset on-line-osittaispurkausmittaustiedot TTY:n HFCT-mittauksista

Lisäksi samasta tietojärjestelmästä löytyy seuraavat normaaleilla toimisto-ohjelmilla tarkasteltavat yhteenvetoreportit

1. Dekra Industrial Oy:n tekemät kaapelikohtaiset pdf-raportit off-line-osittaispurkaus- ja häviökerroinmittausten päätuloksista
2. Prysmian Finland Oy:n tekemät kaapelikohtaiset pdf-raportit Pry-Cam-mittausten päätuloksista (on-line-osittaispurkausmittaus)
3. TTY:n tekemät kaapelikohtaiset pdf-raportit HFCT-mittausten päätuloksista (on-line-osittaispurkausmittaus)
4. TTY:n tekemä Excel-yhteenvetotaulukko häviökerroinmittausten tuloksista
5. Dekra Industrial Oy:n, TTY:n ja Prysmian Finland Oy:n tekemä yhteenvetotaulukko eri kaapeleiden diagnoosituloksista.

Hankkeen tulosaineistoon (johon mittaustietopankkikin kuuluu) on ei-yksinomainen käyttöoikeus kaikilla hankkeen sopimusosapuolilla, mukaan lukien ST-Poolin osapuolet ja heidän edustamansa tahot. Käyttöoikeuksista on sovittu hankkeen tutkimussopimuksessa.

11 Jatkotutkimustarpeet

Maaseutuverkkojen kaapelointia tehdään parhaillaan nopeaan tahtiin ja sen vuoksi olisi otollinen ajankohta miettiä esimerkiksi kaapeleiden käyttöönoton yhteydessä tehtävää

- kaapelijärjestelmän komponenttien (kaapeli, päätteet ja jatkokset) dokumentointia
- asennustapaan ja asentajiin liittyvää dokumentointia
- käyttöönoton yhteydessä tehtäviä mittauksia ja niiden dokumentointia
 - vaipaneheysmittaus
 - osittaispurkausmittaukset
 - häviökerroinmittaus

Mittausten osalta olisi syytä miettiä mitä vaatimuksia em. mittauksille asetetaan esimerkiksi toteutuksen ja raja-arvojen osalta ja sitä, miten mittaustulokset dokumentoidaan, jotta niistä olisi mahdollisimman paljon hyötyä jatkossa esimerkiksi omaisuudenhallinnassa.

Verkkotietojärjestelmiä olisi myös hyvä saada kehitettyä siihen suuntaan, että ne tukisivat paremmin kunnonvalvontadatan tallennusta ja käsittelyä.

Tässä hankkeessa painopiste oli VLF-häviökerroinmittauksissa ja niiden tulosten tulkinnan kehittämisessä. Tavoitteena oli kerätä mittaustietopankki sadan kolmivaihekaapelin häviökerroinarvoista, jonka perusteella olisi mahdollista arvioida mm. standardin IEEE Std400.2-2013 raja-arvojen soveltuvuutta Suomen oloihin. Mittausten ohessa saatiin myös käyttökokemuksia mittaustilanteista ja mittausten käytännön toteutukseen liittyvistä näkökohdista. Yhtenä mahdollisena jatkotutkimuskohteena nousi esille ilman kosteuden (ja lämpötilan) vaikutus häviökerroinmittausten tuloksiin keskijännitekaapeleiden tapauksessa.

Hankkeen kuluessa kertyi mittaustietoa myös häviökerroinmitattujen kaapeleiden osittaispurkauksista off-line- ja on-line-menetelmillä mitattuna. Näitä mittaustietoja olisi mahdollista käyttää pohjana tarkasteltaessa osittaispurkausmittausten tuloksille asetettavia raja-arvoja. Osittaispurkauksia esiintyi sen verran pienessä osassa mitatuista kaapeleista, että lisämittausten tekeminen olisi kuitenkin todennäköisesti aiheellista. Samasta syystä osittaispurkausmittausmenetelmien vertailun osalta oli mahdollisuus vain melko suppeaan tarkasteluun ja lisämittauksilla eri menetelmien ominaisuuksista ja tulosten vertailukelpoisuudesta

olisi mahdollista saada lisätietoa. Lisämittauksiin olisi hyvä valikoida sellaisia kaapeleita, joissa on tunnistettu jollakin menetelmällä selkeitä purkauskohtia. Näille kaapeleille voitaisiin sitten toistaa vertailumittaukset eri menetelmillä.

On-line-mittausten osalta kerätty mittausdata mahdollistaisi myös esimerkiksi häiriösuodatukseen ja purkausten automaattiseen paikannukseen liittyvien menetelmien kehittämisen.

12 Yhteenveto

Tutkimushankkeen tavoitteena oli kerätä häviökerroinmittaustietoa Suomessa käytössä olevista kaapelijärjestelmistä kunnonvalvontamittausten tulosten tulkinnan tueksi. Lisäksi tavoitteena oli tehdä osalle kaapeleista osittaispurkausmittauksia off-line-menetelmällä ja kahdella eri on-line-mittausmenetelmällä, jotta saataisiin käyttökokemuksia eri menetelmistä ja voitaisiin verrata niiden soveltuvuutta keskijännitekaapelijärjestelmien käyttöönotto- ja kunnonvalvontamittauksiin. Häviökerroin- ja off-line-osittaispurkausmittauksia tehtiin yhteensä noin 100 kaapelille ja on-line-osittaispurkausmittaukset tehtiin noin 50 kaapelille.

Hankkeessa mitattiin sekä eri ikäisiä 10 kV ja 20 kV öljypaperi- että muovikaapeleita eri verkkoyhtiöiden verkoissa. 10 kV verkoissa mitattiin yhteensä 15 kpl APYAKMM-kaapelijärjestelmiä, 9 kpl APAKM-kaapelijärjestelmiä ja 7 kpl PLKVJ-kaapelijärjestelmiä. 20 kV verkoissa mitattiin yhteensä 35 kpl APYAKMM-kaapelijärjestelmiä ja 33 kpl AHXAMK-W-kaapelijärjestelmiä.

Mittaustuloksia verrattiin standardissa IEEE Std400.2-2013 lähinnä pohjois-Amerikassa käytössä oleville kaapelijärjestelmille annettuihin häviökerrointunnuslukujen raja-arvoihin. Standardissa on annettu raja-arvot erikseen sekä muovikaapeli- että öljypaperikaapelijärjestelmien häviökerrointen keskiarvoille, häviökertoimen muutokselle jännitteen funktiona ja häviökertoimen keskihajonnalle. Mittaustulosten perusteella pääosa mitatuista kaapelijärjestelmistä oli hyvässä kunnossa eli ne sijoittuivat standardin luokittelussa parhaaseen ryhmään, jossa mittaustulosten perusteella kaapelijärjestelmille ei ole tarpeen tehdä jatkotoimenpiteitä (esimerkiksi tarkempaa tutkimusta tai korjausta). Tutkituista 31 10 kV kaapelijärjestelmästä 9 olisi edellyttänyt tarkempaa tutkimusta ja yksi ylitti korjaustoimenpiderajan, tosin ylitys saattoi johtua myös esim. kojeiston pintavirroista. Tutkituista 69 kpl 20 kV kaapelijärjestelmistä 25 olisi edellyttänyt tarkempaa tutkimusta ja 2 kpl ylitti korjaustoimenpiderajan, mutta näistäkin ainakin toisessa suurten häviökerrointunnuslukujen aiheuttajaksi paljastui kojeisto.

Tulosten perusteella myös korrelaatio kaapelin iän (asennusvuoden) ja häviökerrointunnuslukujen välillä oli heikko. Kaapelin kuntoa ei siis pysty päättelemään asennusvuoden perusteella ja tässäkin mielessä kunnonvalvontamittauksille näyttäisi olevan tarvetta.

Tämän hankkeen puitteissa kerätyistä häviökerroinmittaustuloksista muodostettiin kaapelityypeittäin kertymäfunktiot, joiden perusteella tarkasteltiin, millaisiksi rajat-arvot hankkeen

mittausotosten perusteella muodostuisivat. Pääsääntöisesti raja-arvot jäivät standardin IEEE Std400.2-2013 raja-arvoja alemmiksi. Ainoan poikkeuksen muodosti APYAKMM-kaapeleiden häviökertoimen keskihajonta, joka mittausotoksen perusteella määritettynä olisi korkeampi kuin em. standardissa. Tämä poikkeus saattaa kuitenkin selittyä sillä, että osassa APYAKMM-kaapelijärjestelmien mittauksista ilman suhteellinen kosteus oli melko suuri ($> 90 \%$), mikä saattaa kasvattaa keskihajontaa. Standardissa määriteltyjen tunnuslukujen lisäksi laskettiin raja-arvot häviökertoimen muutoksen epälineaarisuutta jännitteen funktiona kuvaavalle tunnusluvulle (TUTU).

Erityisesti 20 kV APYAKMM-kaapeleita mitattiin useita myös olosuhteissa, joissa ilman suhteellinen kosteus oli suuri. Mittaustulosten perusteella näyttäisi siltä, että ilmankosteudella todennäköisesti on vaikutusta mittaustuloksiin ainakin, jos ilman suhteellinen kosteus on suurempi kuin 90 %. Mittalaitteiden käyttöohjeissa suositellaan, että mittauksia tehtäessä ilman suhteellinen kosteus olisi alle 80 %. Mittauksia on syytä välttää varsinkin loppukesän, syksyn ja talven kosteimmilla ilmoilla, jos kaapelijärjestelmän toisessa tai molemmissa päissä on puistomuuntamo tai ainakin tulee mittauksin varmistaa, että ilman suhteellinen kosteus kennoissa on riittävän pieni eikä kondensoitumista tapahdu. Ilman suhteellisen kosteuden ja lämpötilan mittaus kaapelin molempien päiden kennoista riittävän luotettavalla mittarilla olisi häviökerroinmittausten yhteydessä suositeltava käytäntö. Mittausten toistettavuutta voidaan parantaa myös huolehtimalla siitä, että kaapelin lämpötila ei eri mittauksissa merkittävästi vaihtele (kaapeli on esimerkiksi ilman kuormaa ennen mittauksia).

Häviökerroinmittausten tulosten tarkempaa analysointia ajatellen olisi hyvä, jos mittalaite tallentaisi standardissa määriteltyjen tunnuslukujen lisäksi jälkikäsitteilyä varten myös yksittäisten häviökerroinmittausten tulokset mittausten keskiarvojen ja -hajontojen lisäksi. Esimerkiksi tässä tutkimuksessa käytetyssä laitteessa tätä mahdollisuutta ei ollut.

Hankkeessa tehtiin myös osittaispurkausmittauksia yhteensä noin 50 kaapelille off-line-DAC-mittausten lisäksi on-line-menetelmällä. Useimmissa tapauksissa on-line-mittaukset tehtiin sekä HFCT-antureilla että Pry-Cam-laitteistolla, jolloin oli mahdollista vertailla eri menetelmillä saatavia tuloksia. Pääosassa mittauksista eri menetelmillä saatiin hyvin samansuuntaisia tuloksia. Ne kuusi tapausta, joissa mitattavassa kaapelijärjestelmässä esiintyi on-line-mittauksissakin purkauksia, tutkittiin tarkemmin. Vain yhdessä tapauksessa tulokset olivat keskenään hieman ristiriidassa, muissa tulokset olivat hyvin samansuuntaisia. Yleisesti ottaen off-line-mittauksissa esiintyi yleisemmin purkauksia kuin on-line-mittauksissa ja aina esimerkiksi mittalaitteen automaattisesti tekemä paikannus ei ollut täysin luotettava. Joissain mittauksissa off-line-mittauksessa havaittiin suurehkojakin osittaispurkauksia normaalilla käyttöjännitteellä, mutta on-line-mittauksissa purkauksia ei kuitenkaan ollut havaittavissa. Tässä mielessä on tärkeää, että mittaustulokset tulkitsee asiantunteva henkilö, jolla on kokemusta mittauksesta ja tulosten tulkinnasta.

Mittaustulosten perusteella arvioitiin myös eri mittausmenetelmien soveltuvuutta kaapeleiden käyttöönotto- ja kunnanvalvontamittauksiin. Käyttöönottomittauksilla pyritään varmistamaan, että asennettu kaapeli on ehjä ja kaapelivarusteet ovat oikein ja huolellisesti asennetut. Asennusvirheet usein aiheuttavat osittaispurkauksia, jotka myöhemmin johtavat kaapeliyhteyden vaurioitumiseen. Tulosten perusteella näyttäisi siltä, että kaapelijärjestelmissä esiintyvät osittaispurkaukset eivät

välttämättä näy häviökerroinmittauksissa mitenkään. Tästä johtuen häviökerroinmittaus soveltuu huonosti kaapelijärjestelmien käyttöönottomittauksiin. Suositeltava ensisijainen menetelmä käyttöönottomittauksiin on osittaispurkausmittaus joko off-line- tai on-line menetelmällä. Off-line-menetelmällä todennäköisesti pystytään havaitsemaan pienemmät asennusvirheet, koska on mahdollista käyttää suurempaa koejännitettä ja häiriötaso on pääsääntöisesti niissä pienempi kuin on-line-mittauksissa. On-line-menetelmät puolustavat paikkaansa kevyempänä, hieman helppokäyttöisempänä ja nopeampana menetelmänä ja olisivat ehkä kustannustehokkaampi vaihtoehto kaapeleille, jotka eivät esimerkiksi keskeytyskustannusten vuoksi ole korkeimmalle priorisoituja. Osittaispurkausten paikantaminen onnistui tutkituissa tapauksissa sekä off-line-menetelmällä että on-line-HFCT-menetelmällä.

Hankkeessa kerätyt mittaustiedot tallennettiin Dekra Industrial Oy:n M-Files-järjestelmään, josta ne ovat hyödynnettävissä myöhemmin verkkoyhtiöissä tehtävien mittausten tukena tai mahdollisissa jatkotutkimuksissa. Ns. raakadata tallennettiin off-line-häviökerroinmittauksista, off-line-osittaispurkausmittauksista ja HFCT-antureilla tehdyistä on-line-osittaispurkausmittauksista.

Lähdeluettelo

- [Ano16a] Roadmap 2025 - Sähkömarkkina- ja verkkovisio 2035 & Roadmap 2025.
- [Ano16a] ABB MV Cable accessories, Products & Technical Presentation, kalvosarja, ABB CA, 2016.
[http://www02.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/0d5d9f975e292672c1257f760013e66d/\\$file/ABB+MV+CA+Products++Technical+presentation-ver1.pdf](http://www02.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/0d5d9f975e292672c1257f760013e66d/$file/ABB+MV+CA+Products++Technical+presentation-ver1.pdf), viitattu 20.12.2017.
- [Ano17a] Oscillating Wave Test System OWTS - Compact Partial Discharge Fault Location System for On-site Diagnosis of Medium Voltage Power Cables, Diagnostics Ltd.
http://www.insulationdiagnostics.com/download/tettex/OWTS_gen_E.pdf, viitattu 15.12.2017.
- [Aro03a] M. Aro, J. Elovaara, M. Karttunen, K. Nousiainen, V. Palva, Suurjännitetekniikka, Oy Yliopistokustannus/Otatieto, 2003. 520 s.
- [Bar03a] R. Bartnikas, K. D. Srivastava, Power and Communication Cables – Theory and Applications, IEEE Press, Piscataway NJ, United States, 2003. 880 p.
- [Bri99a] T. Brincourt, V. Regaudie, Evaluation of different diagnostic methods for the French underground MV network, JICABLE99. p. 451
- [Cic08a] P. Cichecki, R. A. Jongen, E. Gulski, J. J. Smit, B. Quak, F. Petzold, F. de Vries, Statistical Approach in Power Cables Diagnostic Data Analysis, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 15, No. 6, December 2008. pp.1559-1569.
- [Dis92a] L. A. Dissado, J. C. Fothergill, Electrical degradation and breakdown in polymers, Peter Peregrinus Ltd., London, UK, 1992. 601 p.
- [Far97a] H. Faremo, J.T. Benjaminsen, P.B. Larsen, A. Tunheim, Service Experience for XLPE Cables Installed in Norway - From Graphite Painted Insulation Screens to Axially and Radially Water Tight Cable Constructions, CIRED 1997. 5 p.
- [Had04a] A. Haddad, D. Warne (editors), Advances in High Voltage Engineering, IEE Power and Energy Series 40, London, UK, 2004. 647 p.

-
- [Ham16a] N. Hampton, Chapter 2: Medium Voltage Cable System Issues, CDFI Handbook, Cable Diagnostic Focused Initiative (CDFI), Phase II, February 2016. 29 p.
 - [He11a] Y. He, A. Nilsson, F. Carlsson, Failure Causes of Distribution Network Components, CIRED 2011, Frankfurt 6-9 June 2011.
 - [Her09a] J. C. Hernández-Mejía, J. Perkel, R. Harley, N. Hampton & R. Hartlein, Correlation between Tan δ Diagnostic Measurements and Breakdown Performance at VLF for MV XLPE Cables, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 16, No. 1; February 2009.
 - [Her16a] J. C. Hernández-Mejía, Chapter 6, Dissipation factor (Tan δ), CDFI Handbook, Cable Diagnostic Focused Initiative (CDFI), Phase II, February 2016.
 - [Hvi05a] S. Hvidsten, B. Holmgren, L. Adeen, and J. Wetterstrom, “Condition Assessment of 12 and 24 kV XLPE Cables Installed During the 80s. Results from a Joint Norwegian/Swedish Research Project”, IEEE Electr. Insul. Mag., Vol. 21, No. 6, pp. 17-23, 2005.
 - [IEC15a] IEC 60270:2000+AMD1:2015, High-voltage test techniques – Partial discharge measurements, International Electrotechnical Commission IEC, Switzerland, 2015. 226 p.
 - [IEEE12a] IEEE Std400 – 2012, IEEE Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems Rated 5 kV and Above, IEEE Power and Energy Society, USA 2012. 43 p.
 - [IEEE13a] IEEE Std400.2 – 2013, IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF) (less than 1 Hz), IEEE Power and Energy Society, USA 2013. 62 p.
 - [IEEE15a] IEEE Std400.4 – 2015, IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Rated 5 kV and Above with Damped Alternating Current (DAC) Voltage, IEEE Power and Energy Society, USA 2015. 60 p.
 - [Kim14a] D. Kim, Y. Cho & S. Kim, A Study on Three Dimensional Assessment of the Aging Condition of Polymeric Medium Voltage Cables Applying Very Low Frequency (VLF) tan δ Diagnostic, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 21, No. 3; June 2014.
 - [Kuu16a] O. Kuusisto, The Effects of Installation-Based Defects in Medium Voltage Cable Joints, Insinööriyö, Metropolia University of Applied Sciences, 2016. 79 p.
 - [Law80a] J. H. Lawson, W. A. Thue, Summary of service failure of high voltage extruded dielectric insulated cables in the United States, Proceedings of 1980 IEEE International Conference on Electrical Insulation. pp.100-104.
 - [Leh10a] M., Lehtonen, Fault rates of different types of medium voltage power lines in different environments, Electric Power Quality and Supply Reliability Conference 2010 (PQ 2010), pp. 197-202, 16-18 June, 2010.

- [Mur16a] Sami Murasen sähköpostitse 17.11.2016 välittämä tieto Risto Kivisaareltä (Prysmian Finland Oy).
- [Mla12a] I. Mladenovic, Ch. Weindl, Dielectric material, Chapter 11, Empiric Approach for Criteria Determination of Remaining Lifetime Estimation of MV PILC Cables, Intech, 2017. Ladattavissa osoitteesta <https://www.intechopen.com/books/dielectric-material>
- [Pak15a] P. Pakonen, B. Siddiqui, A. Hilden, Proposal for condition monitoring method for cable network, Deliverable 2.3.24, SGEM (Smart Grids and Energy Markets) project, Tampere 2015.
<http://sgemfinalreport.fi/files/D2.3.24%20Proposal%20for%20condition%20monitoring%20method%20for%20cable%20network.pdf>
- [Per13a] J. Perkel, Y. Del Valle, R. N. Hampton, J.C Hernández-Mejía, J. Densley, Interpretation of Dielectric Loss Data on Service Aged Polyethylene Based Power Cable Systems using VLF Test Methods, IEEE transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 20, No. 5, October 2013. pp. 1699-1711.
- [Pry17a] Pry-Cam – Breakthrough technology for condition assessment and asset management, Prysmian Group. 16 p. <https://pry-cam.com/php/dl.php?id=196&md=2463>
- [Seb11a] OWTS Expert Seminar Theory III: Decision making/ maintenance planning, kalvosarja, SebaKMT, 2011. 50 p.
- [Seb11b] Recommendation for commissioning testing of medium voltage cables, kalvosarja, SebaKMT, 2011. 15 p.
- [Sil12a] M. A. Silaghi (ed.), Dielectric material, Intech 2012. (Chapter 11: I. Mladenovic & Ch. Weindl, Empiric Approach for Criteria Determination of Remaining Lifetime Estimation of MV PILC Cables, available at <https://www.intechopen.com/books/dielectric-material/empiric-approach-for-criteria-determination-of-remaining-lifetime-estimation-of-mv-pilc-cables>)
- [Väk15a] K. Väkeväinen, Surface Discharge Phenomena in Medium Voltage Terminations, M. Sc. Thesis, Aalto University, 2015. 54 p.
- [Wer01a] P. Werelius, Development and Application of High Voltage Dielectric Spectroscopy for Diagnosis of Medium Voltage XLPE Cables, Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden 2001.
- [Yam89a] S. Yamaguchi, S. Soda, N. Takada, Development of a New Type Insulation Diagnostic Method for Hot-Line XLPE Cables, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 4, pp. 1513-1520, 1989.
- [You10a] S.S.M. Young, L. K. K. Sun, “Application of time & condition based cable maintenance strategy and diagnostic test in Macau”, CEPsi 2010 Taipei 24-28 October.

Liite A: Häviökerroinmittausten tulokset lukuarvoina

Taulukoissa A-1 ja A-2 on esitetty kahdella eri tavalla järjestettynä kaapelikohtaiset häviökerroinmittausten tulokset, mittausten ajankohta (päivämäärä ja aika) sekä kaapelikohtaiset tiedot ulkoilman suhteellisesta kosteudesta, lämpötilasta ja ilmanpaineesta mittausajankohtana.

Säätilatiedot ovat mittauskohdetta lähinnä olevan Ilmatieteen laitoksen mittauspisteen mittaustietoja häviökerroinmittauksen aikaleimaa lähinnä olevalta rekisteröintihetkeltä. Ilmatieteen laitoksen mittaustietojen rekisteröintiväli oli tarkastelluissa kohteissa pääsääntöisesti 10 min. Muuntamon kennossa mittausten aikana vallitsevien olosuhteiden osalta näitä tietoja voidaan pitää lähinnä suuntaa antavina puistomuuntamoiden osalta. Kiinteistömuuntamoiden osalta tiedot eivät todennäköisesti ole relevantteja. Todellinen ilmankosteus puistomuuntamoiden kennoissakin riippuu monista tekijöistä (maaperän laatu ja kosteus, muuntajan kuormitusaste ym.) ja korrelaatio vallitsevan ulkoilman suhteellisen kosteuden kanssa voi vaihdella.

Taulukon oikeanpuoleisimmissa sarakkeissa on esitetty kunkin kolmivaihekaapelin eri vaiheiden häviökertoimien keskihajonnoista, muutoksista jännitteen funktiona ja keskiarvoista suurin lukema, jonka perusteella kaapeli on luokiteltu standardin IEEE Std400.2-2013 raja-arvojen mukaan. No action required-luokkaan kuuluvat kaapelit ovat listassa värittömällä pohjalla. Further study advised-luokkaan kuuluvat kaapelit on listassa esitetty keltaisella pohjalla ja raja-arvon ylittävät tulokset oranssilla pohjalla. Se, että ko. luokkaan kuuluvia kaapeleita on listassa prosentuaalisesti suhteellisen paljon varsinkin 20 kV APYAKMM-kaapeleiden tapauksessa, johtuu siitä, että ko. luokkaan luokittelun perusteeksi tässä taulukossa riittää se, että yksi raja-arvo ylittyy yhdessä kolmivaihekaapelin vaiheessa, kun taas esimerkiksi luvun 6 raja-arvotarkasteluissa kolmivaihekaapeleiden vaiheita käsitellään erillisinä kaapeleina. Action required-luokkaan kuuluvat kaapelit on esitetty taulukossa punaisella pohjalla. Näistä ainakin kaapeleiden 65 ja 79 tapauksessa on joko todettu tai on syytä epäillä suuren häviökertoimen johtuvan muusta kuin itse kaapelijärjestelmästä.

	Kaapelijärjestelmä kuuluu standardin IEEE Std400.2-2013 mukaan luokkaan Further study advised	
	Raja arvo ylittää standardin IEEE Std400.2-2013 luokan Further study advised raja-arvon	
	Kaapelijärjestelmä kuuluu standardin IEEE Std400.2-2013 mukaan luokkaan Action required	
	Raja arvo ylittää standardin IEEE Std400.2-2013 luokan Action required raja-arvon	

Taulukko A-2. Kaapelijärjestelmien häviökerroinmittaustulokset mittausajankohdan mukaan järjestettynä.

KaapelID	UO[V]	Kaapeltyyppi	Palkkipinta	Pituus [m]	Asennusvuosi	Häviökerto										Lämpötila										Pvm	klo	Lämpötila [degC]	Ilman suhtellinen kosteus [%]	Ilman paine [hPa]	Säteily [10 ³]	Delta TD [10 ³]	Mean TD @ UO [10 ³]															
						0.5 x UO [10 ³]					1.0 x UO [10 ³]					1.5 x UO [10 ³]					Delta TD [10 ³]													Stdev [10 ³]					C [nF]					TUTU [10 ³]				
						L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2									L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2
2	11.6	APYAKMM	120	392.3	1974	6.7	6.3	7.3	7.6	6.9	7.9	9.5	9.1	9.3	2.8	2.8	2.8	0.07	0.07	0.08	142	141	143	1.0	1.6	0.8	16-Mar-2017	9:34:22	3.1	73	1005.9	0.00	2.8	7.9														
3	11.6	APYAKMM	120	357	1986	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	82	82	82	0.0	0.0	0.0	16-Mar-2017	11:22:56	4.9	64	1007.3	0.00	0.0	10.0														
4	11.6	APYAKMM	120	370.6	1984	7.5	7.8	7.5	6.8	7.1	6.8	7.2	7.2	7.2	-0.3	-0.6	-0.3	0.05	0.06	0.08	130	130	130	1.1	0.8	1.1	16-Mar-2017	13:30:33	6.9	53	1008.3	0.08	-0.3	7.1														
5	11.6	AHKAKMK-W	185	344.3	1995	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	39	39	39	0.0	0.0	0.0	05-Apr-2017	7:44:15	3.5	92	1008.6	0.00	0.0	1.0														
6	11.6	AHKAKMK-W	185	166.6	1995	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	1.2	0.1	0.0	0.2	0.00	0.00	0.00	96	98	99	0.1	0.0	0.2	05-Apr-2017	8:50:06	3.6	92	1007.6	0.00	0.2	1.0														
7	11.6	APYAKMM	120	288.4	1986	11.3	6.5	12.6	10.7	6.6	11.8	11.2	7.7	12.3	-0.1	1.2	-0.3	0.07	0.09	0.03	107	108	108	1.1	1.0	1.3	05-Apr-2017	11:37:51	3.7	94	1003.6	0.09	1.2	11.8														
8	11.6	AHKAKMK-W	185	477.2	1991	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	127	126	126	0.0	0.0	0.0	19-Apr-2017	7:54:35	-2.4	71	1035.2	0.00	1.0	1.0														
9	11.6	APYAKMM	120	239.9	1970	10.2	6.7	10.9	8.9	6.1	9.6	8.5	6.1	8.7	-1.7	-0.6	-2.2	0.05	0.03	0.07	76	78	77	0.9	0.6	0.4	19-Apr-2017	9:16:29	1.7	60	1033.5	0.07	-0.6	9.6														
10	11.6	AHKAKMK-W	185	766.5	2000	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	202	201	202	0.0	0.0	0.0	19-Apr-2017	12:42:11	2.9	41	1033.7	0.00	0.0	1.0														
11	11.6	APYAKMM	185	391	1989	9.4	9.8	12.8	8.3	8.6	11.1	7.8	8.4	10.2	-1.6	-1.4	-2.6	0.10	0.10	0.14	159	160	160	0.6	1.0	0.8	25-Apr-2017	7:48:35	2.9	98	996.1	0.14	-1.4	11.1														
12	11.6	AHKAKMK-W	185	569	1996	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	150	153	151	0.0	0.0	0.0	25-Apr-2017	9:38:11	2.4	96	996.3	0.00	0.0	1.0														
13	11.6	AHKAKMK-W	185	326	2001	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.3	1.0	1.1	0.3	0.0	0.1	0.00	0.00																													

Liite B: Osittaispurkaus- ja häviökerroinmittaustulosten tulkinnat

Taulukoissa B-2 ja B-3 on esitetty osittaispurkaus- ja häviökerroinmittausten tulosten tulkinnat värikoodilla taulukon B-1 mukaisesti. Kaikki tulosten tulkinnat ovat ao. mittauksen (häviökerroin, off-line-osittaispurkaus-, HFCT- ja Pry-Cam-mittaus) tulosten perusteella tehtyjä kokonaisvaltaisia asiantuntija-arvioita kaapelin kunnosta. Häviökerroinmittausten perusteella tehdyt arviot perustuvat suurelta osin standardin IEEE Std400.2-2013 raja-arvoihin. Osittaispurkausmittausten osalta standardoituja raja-arvoja ei ole olemassa ja arvio perustuu mm. luvussa 8 osittaispurkausmittausten osalta esitettyihin arviointikriteereihin.

Taulukko B-0-1. Mittaustulosten tulkinnat.

	Ei edellytä toimenpiteitä
	Edellyttää takempaa tutkimuksia ja/tai seurantaa
	Edellyttää toimenpiteitä

Taulukko B-2. Osittaispurkaus- ja häviökerroinmittausten tulosten tulkinnat.

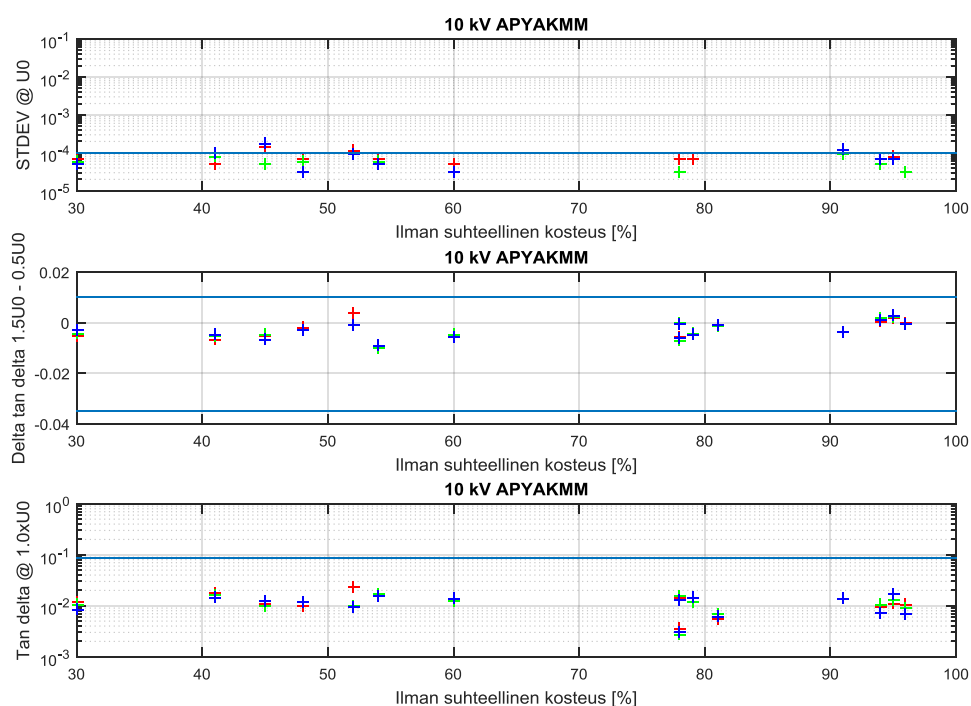
Kaapeli ID	U0 [kV]	Kaapelityyppi	Pituus [m]	Asennusvuosi	Pvm	klo	Mittaustulos			
							TD	Off-line PD	HFCT	Pry-Cam
34	5.8	AHXAMK-W	2080	2012	14-Jun-2017	10:53:05				
29	5.8	APAKM	510	1977	13-Jun-2017	9:30:42				
30	5.8	APAKM	911	1977	13-Jun-2017	8:55:42				
31	5.8	APAKM	427	1982	13-Jun-2017	11:43:38				
36	5.8	APAKM	620	1972	15-Jun-2017	8:09:29				
50	5.8	APAKM	250	1982	10-Aug-2017	8:02:20				
66	5.8	APAKM	177	1970	26-Sep_2017	11:52:32				
68	5.8	APAKM	449	1967	27-Sep_2017	7:38:23				
69	5.8	APAKM	370	1966	27-Sep_2017	10:14:57				
70	5.8	APAKM	291	1990	27-Sep_2017	11:50:26				
17	5.8	APYAKMM	90	1975	8-May-2017	8:04:10				
18	5.8	APYAKMM	286	1974	8-May-2017	9:22:20				
20	5.8	APYAKMM	504	1967	9-May-2017	7:15:46				
21	5.8	APYAKMM	309	1988	9-May-2017	8:45:14				
28	5.8	APYAKMM	93	1981	12-May-2017	6:45:49				
33	5.8	APYAKMM	400	1989	14-Jun-2017	7:39:30				
35	5.8	APYAKMM	495	1972	14-Jun-2017	13:19:12				
37	5.8	APYAKMM	549	1980	15-Jun-2017	9:10:16				
52	5.8	APYAKMM	470	1986	10-Aug-2017	13:29:37				
72	5.8	APYAKMM	516	1977	3-Oct_2017	9:50:56				
73	5.8	APYAKMM	346	1981	3-Oct_2017	13:35:52				
74	5.8	APYAKMM	593	1980	4-Oct_2017	7:17:56				
75	5.8	APYAKMM	297	1980	4-Oct_2017	9:35:01				
76	5.8	APYAKMM	311	1980	4-Oct_2017	11:43:56				
86	5.8	APYAKMM	914	1972	25-Oct-2017	9:55:06				
32	5.8	PLKVJ	722	1964	13-Jun-2017	14:23:17				
51	5.8	PLKVJ	1200	1969	10-Aug-2017	9:32:14				
65	5.8	PLKVJ	207	1972	26-Sep_2017	9:00:43				
67	5.8	PLKVJ	293	1950	26-Sep_2017	14:48:48				
71	5.8	PLKVJ	816	1962	3-Oct_2017	8:24:31				
83	5.8	PLKVJ	581	1963	24-Oct-2017	11:53:14				
84	5.8	PLKVJ	1550	1955	24-Oct-2017					
5	11.6	AHXAMK-W	144.6	1995	05-Apr-2017	7:44:15				
6	11.6	AHXAMK-W	364.3	1995	05-Apr-2017	8:50:06				
8	11.6	AHXAMK-W	477.2	1991	19-Apr-2017	7:54:35				
10	11.6	AHXAMK-W	766.5	2000	19-Apr-2017	12:42:11				
12	11.6	AHXAMK-W	569	1996	25-Apr-2017	9:38:11				
13	11.6	AHXAMK-W	326	2001	25-Apr-2017	13:32:17				
14	11.6	AHXAMK-W	284	1990	26-Apr-2017	8:01:17				
15	11.6	AHXAMK-W	438	2001	26-Apr-2017	9:38:31				
16	11.6	AHXAMK-W	385	1991	26-Apr-2017	12:10:04				
19	11.6	AHXAMK-W	206	1998	8-May-2017	11:31:06				
24	11.6	AHXAMK-W	293	1992	9-May-2017	14:08:27				
25	11.6	AHXAMK-W	1517	2007	10-May-2017	7:54:24				
26	11.6	AHXAMK-W	136	2003	10-May-2017	9:00:49				
27	11.6	AHXAMK-W	195	1995	10-May-2017	10:50:47				
38	11.6	AHXAMK-W	800	1990	27-Jul-2017	8:30:32				
40	11.6	AHXAMK-W	326	2000	27-Jul-2017	13:29:53				
42	11.6	AHXAMK-W	122	2001	3-Aug-2017	10:41:14				
43	11.6	AHXAMK-W	406	2002	3-Aug-2017	13:26:16				
45	11.6	AHXAMK-W	560	1992	8-Aug-2017	10:28:20				

Taulukko B-3. Osittaispurkaus- ja häviökerroinmittausten tulosten tulkinat (jatkoa edelliseen taulukkoon).

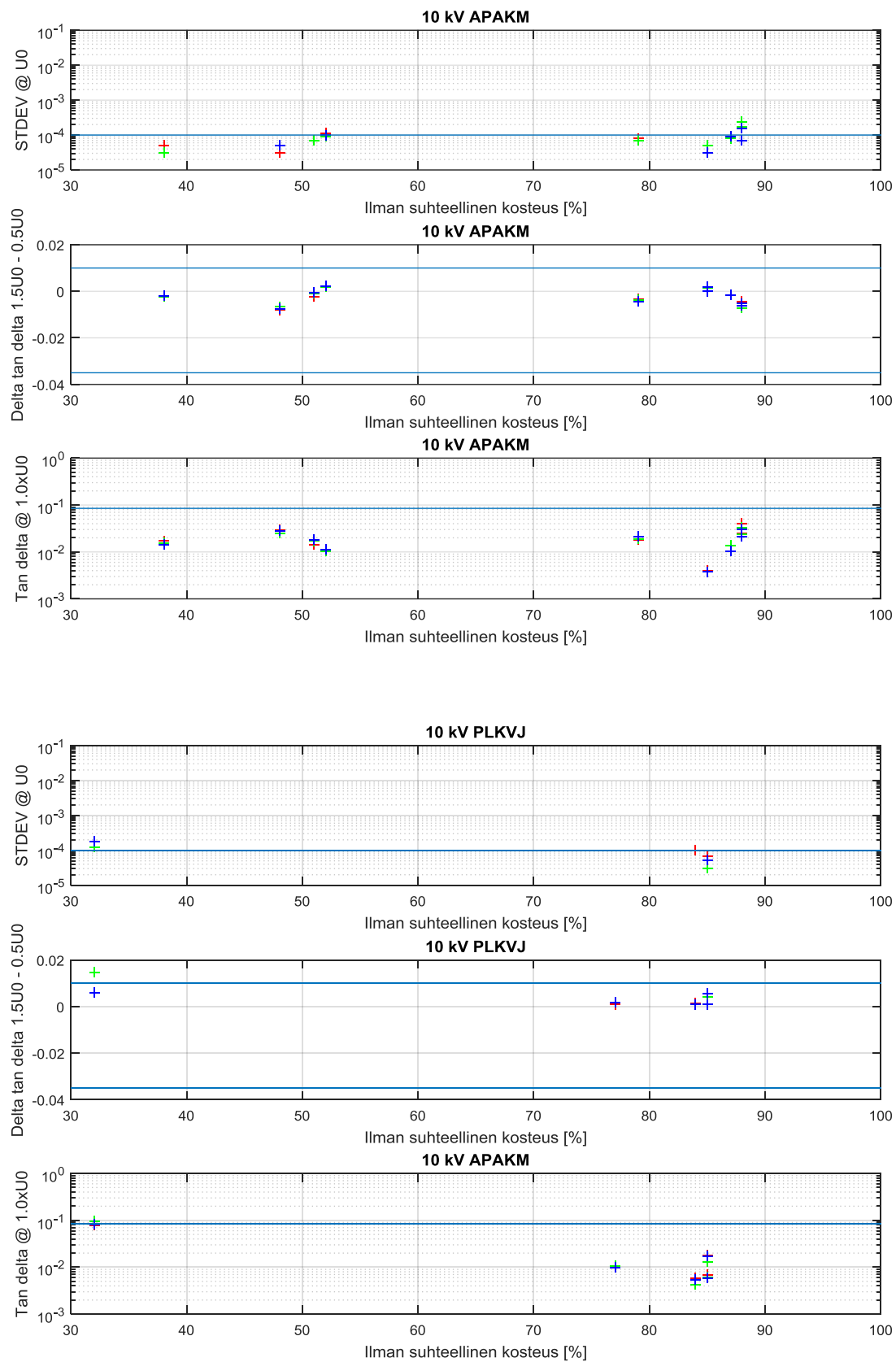
Kaapeli ID	U0 [kV]	Kaapelityyppi	Pituus [m]	Asennusvuosi	Pvm	klo	Mittaustulos			
							TD	Off-line PD	HFCT	Pry-Cam
46	11.6	AHXAMK-W	300	1995	8-Aug-2017	14:21:28				
47	11.6	AHXAMK-W	460	2001	9-Aug-2017	7:13:41				
49	11.6	AHXAMK-W	450	1995	9-Aug-2017	13:11:16				
54	11.6	AHXAMK-W	403	1991	16-Aug-2017	11:00:02				
55	11.6	AHXAMK-W	328	1990	16-Aug-2017	14:06:16				
56	11.6	AHXAMK-W	552	1992	17-Aug-2017	8:33:57				
58	11.6	AHXAMK-W	485	2000	17-Aug-2017	13:43:02				
77	11.6	AHXAMK-W	305	1993	10-Oct-2017	10:00:33				
79	11.6	AHXAMK-W	250	2012	11-Oct-2017	8:39:12				
81	11.6	AHXAMK-W	892	2011	11-Oct-2017	13:48:53				
85	11.6	AHXAMK-W	565	1995	25-Oct-2017	8:13:55				
87	11.6	AHXAMK-W	465	1989	25-Oct-2017	12:31:25				
96	11.6	AHXAMK-W	218	1993	27-Nov-2017	10:10:15				
98	11.6	AHXAMK-W	484	2015	27-Nov-2017	14:28:15				
2	11.6	APYAKMM	392.3	1974	16-Mar-2017	9:34:22				
3	11.6	APYAKMM	357	1986	16-Mar-2017	11:22:56				
4	11.6	APYAKMM	370.6	1984	16-Mar-2017	13:30:33				
7	11.6	APYAKMM	288.4	1986	05-Apr-2017	11:37:51				
9	11.6	APYAKMM	239.4	1970	19-Apr-2017	9:16:29				
11	11.6	APYAKMM	391	1989	25-Apr-2017	7:48:35				
22	11.6	APYAKMM	374	1972	9-May-2017	11:32:07				
23	11.6	APYAKMM	214	1970	9-May-2017	12:41:20				
39	11.6	APYAKMM	600	1985	27-Jul-2017	10:33:49				
41	11.6	APYAKMM	445	1974	3-Aug-2017	8:26:41				
44	11.6	APYAKMM	380	1992	8-Aug-2017	8:54:51				
48	11.6	APYAKMM	300	1985	9-Aug-2017	10:15:20				
53	11.6	APYAKMM	311	1979	16-Aug-2017	7:41:25				
57	11.6	APYAKMM	305	1974	17-Aug-2017	10:00:56				
59	11.6	APYAKMM	200	1974	12-Sep_2017	8:55:44				
60	11.6	APYAKMM	650	1974	12-Sep_2017	10:22:37				
61	11.6	APYAKMM	200	1976	12-Sep_2017	12:36:21				
62	11.6	APYAKMM	340	1972	13-Sep_2017	8:09:19				
63	11.6	APYAKMM	380	1972	13-Sep_2017	10:14:53				
64	11.6	APYAKMM	420	1972	13-Sep_2017	12:57:19				
78	11.6	APYAKMM	270	1979	10-Oct-2017	13:37:42				
80	11.6	APYAKMM	260	1964	11-Oct-2017	10:43:18				
82	11.6	APYAKMT	525	1971	24-Oct-2017	8:32:47				
88	11.6	APYAKMM	356	1968	08-Nov-2017	9:47:12				
89	11.6	APYAKMM	513	1990	08-Nov-2017	12:56:23				
90	11.6	APYAKMM	617	1990	08-Nov-2017	15:30:26				
91	11.6	APYAKMM	155	1983	09-Nov-2017	8:25:09				
92	11.6	APYAKMM	328	1977	09-Nov-2017	11:29:01				
93	11.6	APYAKMM	342	1973	09-Nov-2017	13:41:02				
94	11.6	APYAKMM	207	1983	09-Nov-2017	16:19:47				
97	11.6	APYAKMM	389	1974	27-Nov-2017	11:37:03				
99	11.6	APYAKMM	471	1977	28-Nov-2017	9:11:06				
100	11.6	APYAKMM	526	1978	28-Nov-2017	9:43:01				
101	11.6	APYAKMM	423	1986	28-Nov-2017	13:40:18				
102	11.6	APYAKMM	229	1982	28-Nov-2017	14:57:40				

Liite C: Häviökertoimen muutos ja keskihajonta ulkoilman suhteellisen kosteuden funktiona

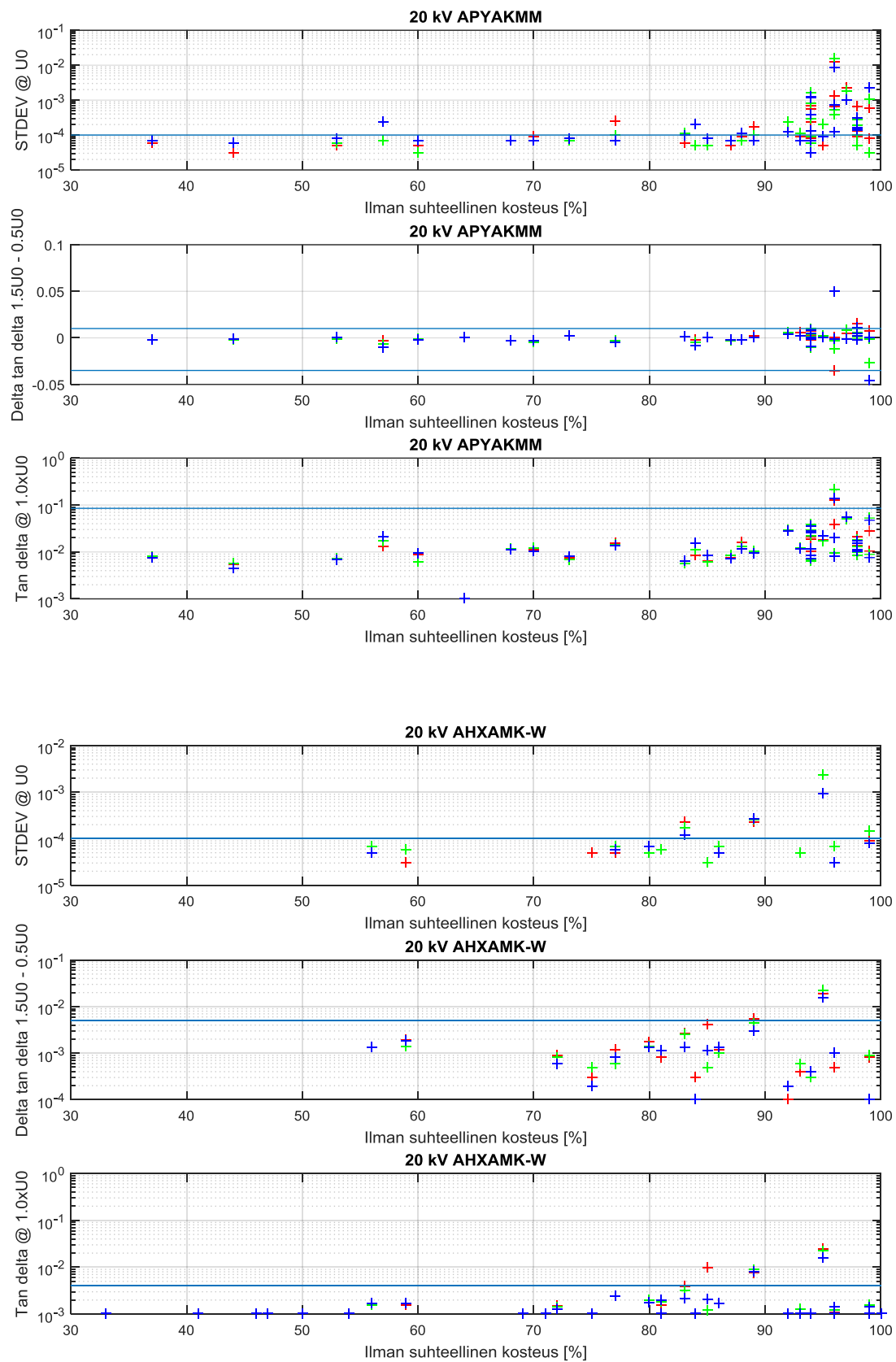
Kuvissa C.1...C.5 on esitetty ulkoilman suhteellisen kosteuden funktiona mitattujen kaapelijärjestelmien häviökertoimien keskihajonta normaalilla käyttöjännitteellä U_0 , häviökertoimen muutos jännitteen noustessa $0,5 U_0$:sta $1,5 U_0$:aan sekä häviökertoimen keskiarvo normaalilla käyttöjännitteellä U_0 . On huomattava, että suhteellisen kosteuden mittaustieto on peräisin mittauskohdetta lähinnä (pääsääntöisesti samalla paikkakunnalla kuin mittauskohde) olevan Ilmatieteen laitoksen mittauspisteestä ja sitä voidaan puistomuuntamoihin toisesta tai molemmista päistään päättyvien kaapelijärjestelmien tapauksessa pitää suuntaa antavana tietona, mutta molemmista päistään kiinteistömuuntamoihin päättyvien kaapelijärjestelmien tapauksessa se ei ole kovin relevantti tieto. Standardin IEEE Std400.2-2013 raja-arvot on merkitty kuviin vaakasuoralla sinisellä viivalla.



Kuva C.1. 10 kV APYAKMM-kaapelijärjestelmien häviökertoimet ulkoilman suhteellisen kosteuden funktiona.



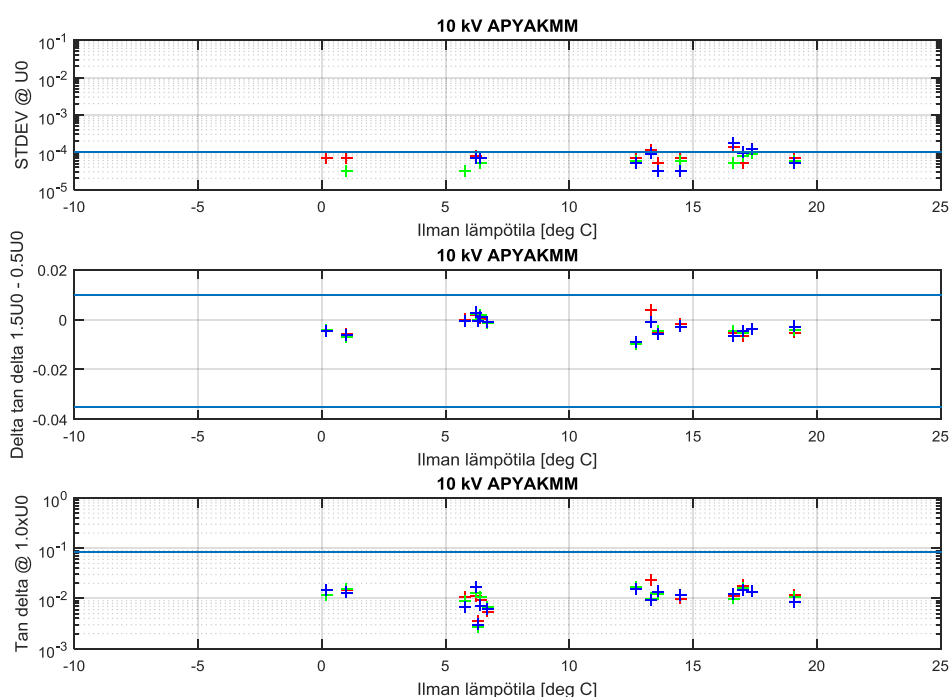
Kuva C.2. 10 kV APAKM- ja PLKVJ-kaapelijärjestelmien häviökertoimet ulkoilman suhteellisen kosteuden funktiona.



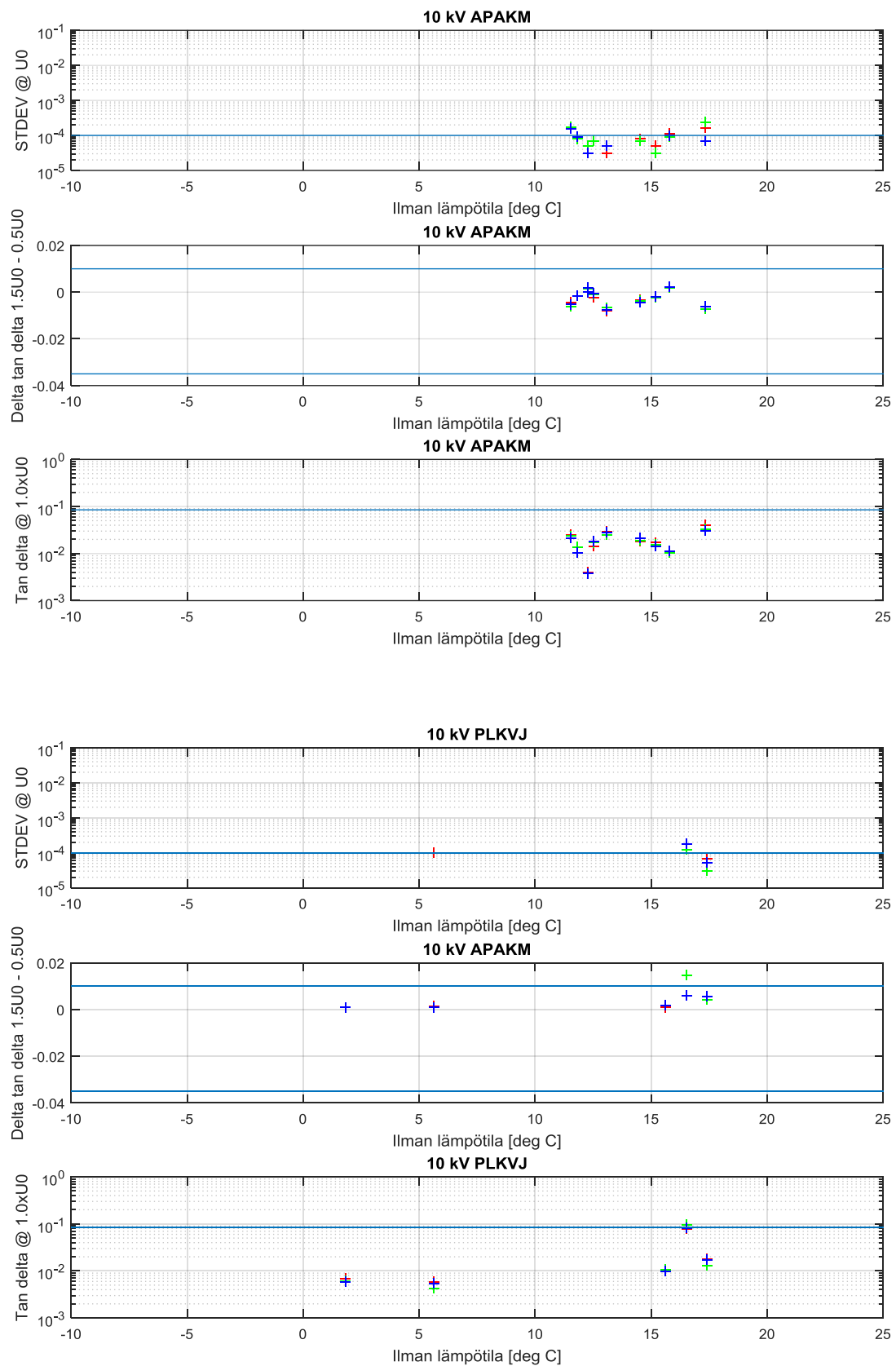
Kuva C.3. 20 kV APYAKMM- ja AHXAMK-W-kaapelijärjestelmien häviökertoimet ulkoilman suhteellisen kosteuden funktiona.

Liite D: Häviökertoimen muutos ja keskihajonta ulkoilman lämpötilan funktiona

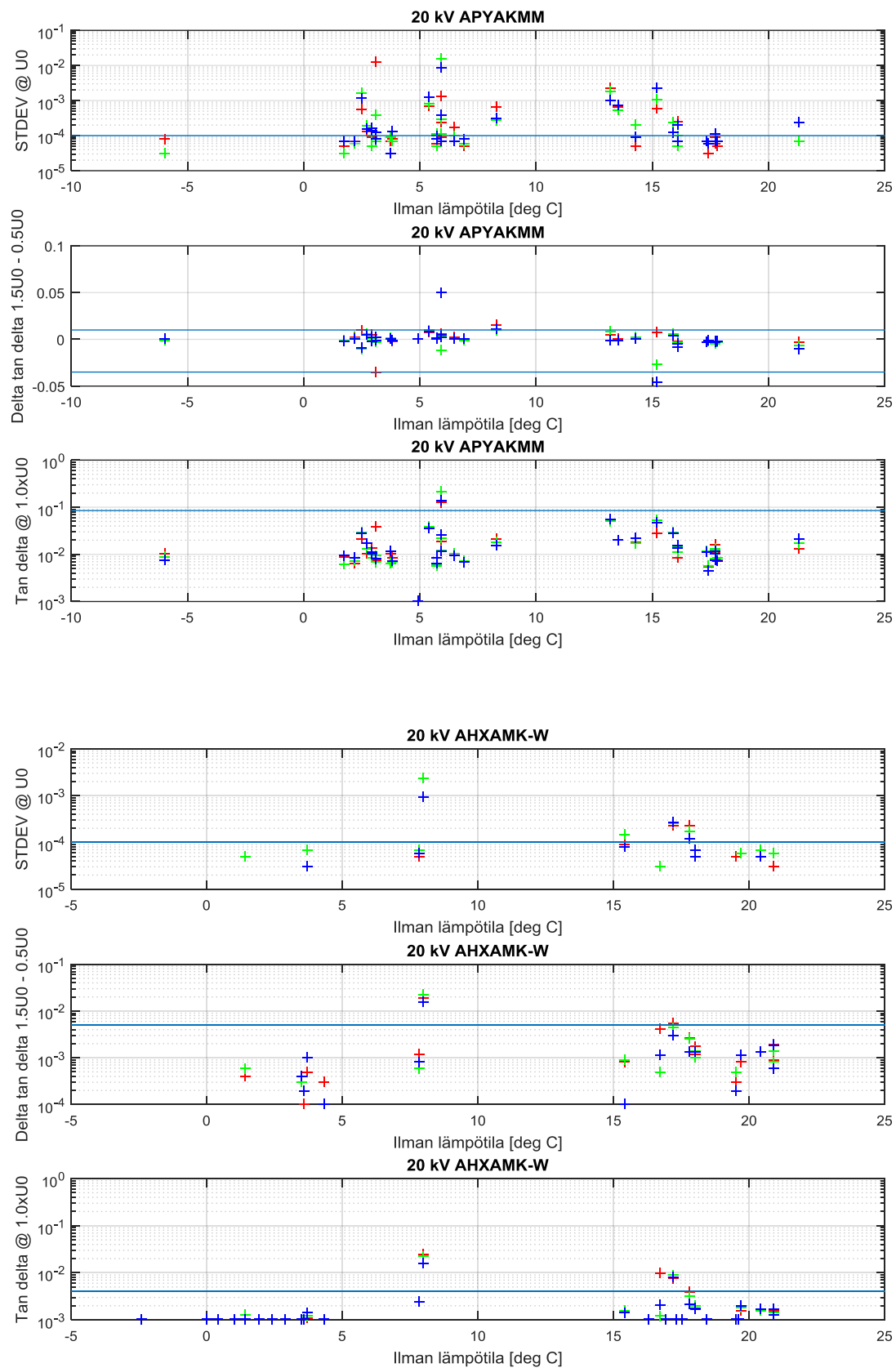
Kuvissa D.1...D.5 on esitetty ulkoilman suhteellisen kosteuden funktiona mitattujen kaapelijärjestelmien häviökertoimien keskihajonta normaalilla käyttöjännitteellä U_0 , häviökertoimen muutos jännitteen noustessa $0,5 U_0$:sta $1,5 U_0$:aan sekä häviökertoimen keskiarvo normaalilla käyttöjännitteellä U_0 . On huomattava, että suhteellisen kosteuden mittaustieto on peräisin mittauskohdetta lähinnä (pääsääntöisesti samalla paikkakunnalla kuin mittauskohde) olevan Ilmatieteen laitoksen mittauspisteestä ja sitä voidaan puistomuuntamoihin toisesta tai molemmista päästään päättyvien kaapelijärjestelmien tapauksessa pitää suuntaa antavana tietona, mutta molemmista päästään kiinteistömuuntamoihin päättyvien kaapelijärjestelmien tapauksessa se ei ole relevantti tieto. Standardin IEEE Std400.2-2013 raja-arvot on merkitty kuviin vaakasuoralla sinisellä viivalla.



Kuva D.1. 10 kV APYAKMM-kaapelijärjestelmien häviökertoimet ulkoilman lämpötilan funktiona.



Kuva D.2. 10 kV APAKM- ja PLKVJ-kaapelijärjestelmien häviökertoimet ulkoilman suhteellisen kosteuden funktiona.



Kuva D.3. 20 kV APYAKMM- ja AHXAMK-W-kaapelijärjestelmien häviökertoimet ulkoilman lämpötilan funktiona.

Liite E: HFCT-mittausten tulokset

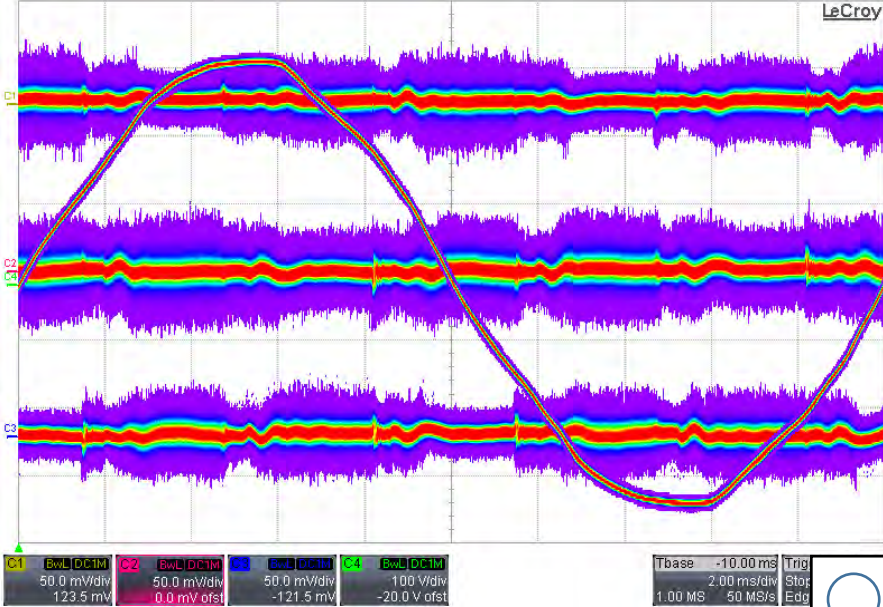
Tässä liitteessä on esitetty TTY:n tekemien HFCT-mittausten tulokset. Kaikista tehdyistä mittauksista on esitetty PRPD-kuvat, taustahäiriötaso ja osittaispurkaustasot niissä vaiheissa, joissa niitä esiintyi sekä tiedostojen numerot, joista ns. raakadata löytyy. Tarkempi analyysi mittauksista, joissa purkauksia havaittiin, on esitetty luvussa 7. Taustahäiriötaso on ilmoitettu sen vaiheen osalta, jossa häiriöt ovat suurimmat tai vaihtoehtoisesti, jos mittauksessa on havaittu osittaispurkauksia, sen vaiheen osalta, jossa purkauksia esiintyi.

Kaapelityyppi	Muuntamovälin pääasiallinen kaapelityyppi (muuntamovälillä voi olla lyhyitä osuuksia muutakin kaapelia esim. välin päissä)
Poikkipinta	Kaapelin pääasiallinen poikkipinta muuntamovälillä (muuntamovälillä voi olla lyhyitä osuuksia muutakin poikkipintaa)
Pituus	Kaapeli kokonaispituus
Päätetyyppi	Päätetyyppi kaapelin mittauspäässä

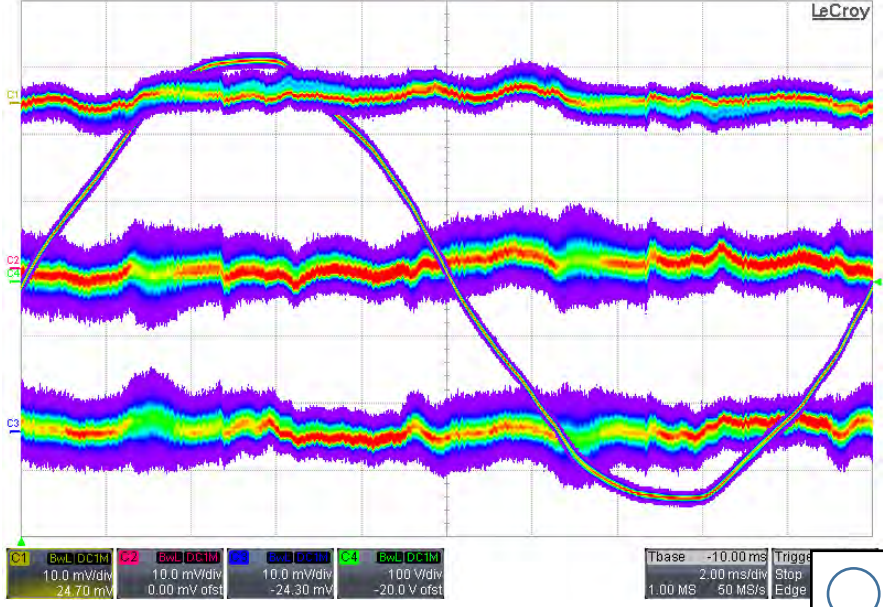
Kunkin kaapelin mittaustuloksen yhteydessä on lisäksi “liikennevalot” osoittamassa HFCT-mittauksen perusteella tehtyä diagnoosia:

vihreä	= ei edellytä toimenpiteitä
keltainen	= tarkempi tutkimus ja/tai seuranta suositeltavaa
punainen	= edellyttää toimenpiteitä

Kaapeli 3

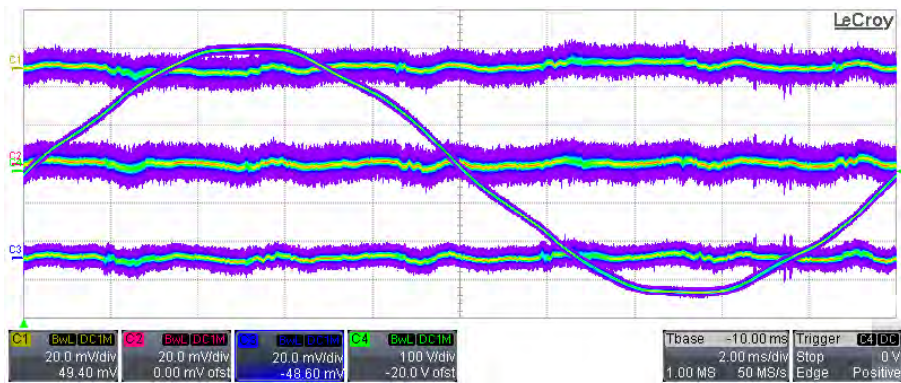
Pvm	16.3.2017	
klo	13:02	
Kaapelityyppi	APYAKMM	
Poikkipinta [mm2]	3 x 120	
Pituus [m]	357	
Asennusvuosi	1986	
Päätetyyppi	Posliini	
Käyttöjännite [kV]	20	
Taustahäiriö- taso [pC]	300	
Purkausten näennäisvaraus [pC]	-	
Tiedostot	PD: 431-586, Pulssitukaus: 587	
Diagnoosi	Ei taustahäiriötason ylittäviä osittaispurkauksia	

Kaapeli 4

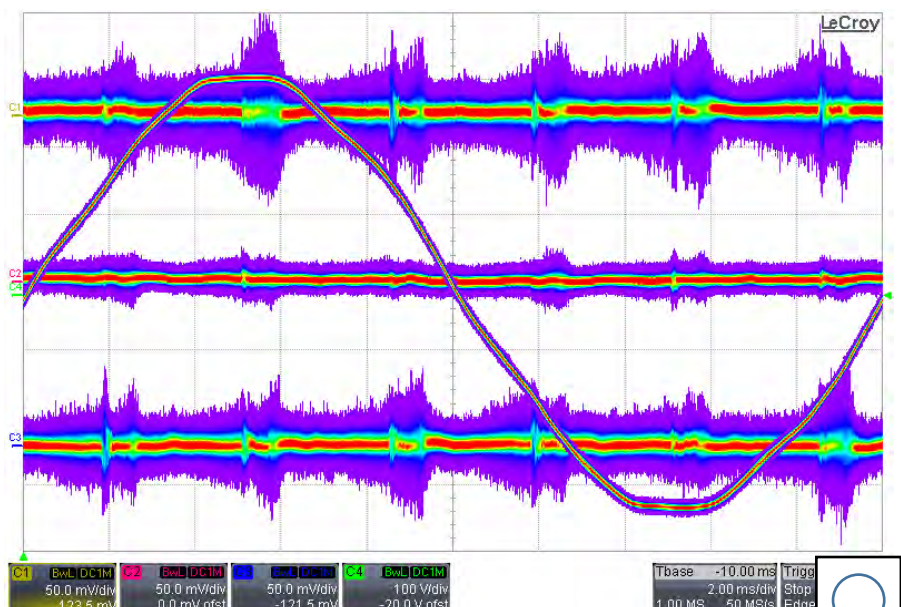
Pvm	16.3.2017	
klo	14:36	
Kaapelityyppi	APYAKMM	
Poikkipinta [mm2]	3 x 120	
Pituus [m]	371	
Asennusvuosi	1984	
Päätetyyppi	Posliini	
Käyttöjännite [kV]	20	
Taustahäiriö- taso [pC]	50	
Purkausten näennäisvaraus [pC]	-	
Tiedostot	PD: 590-930	
Diagnoosi	Ei taustahäiriötason ylittäviä osittaispurkauksia	

Kaapeli 5

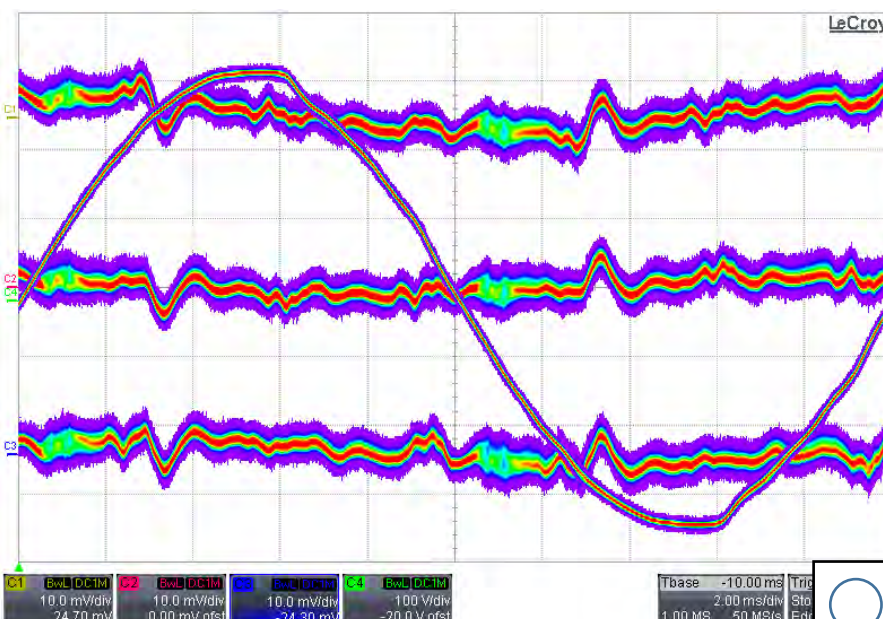
Pvm	5.4.2017
klo	9:42
Kaapelityyppi	AHXAMK-W
Poikkipinta [mm ²]	3 x 185+35
Pituus [m]	145
Asennusvuosi	1995
Päätetyyppi	Pistoke
Käyttöjännite [kV]	20
Taustahäiriötaso [pC]	80
Purkausten näennäisvaraus [pC]	-
Tiedostot	PD: 5-205, Pulssitukaus: 5-6 (.tiff)
Diagnoosi	Ei taustahäiriötason ylittäviä osittaispurkauksia



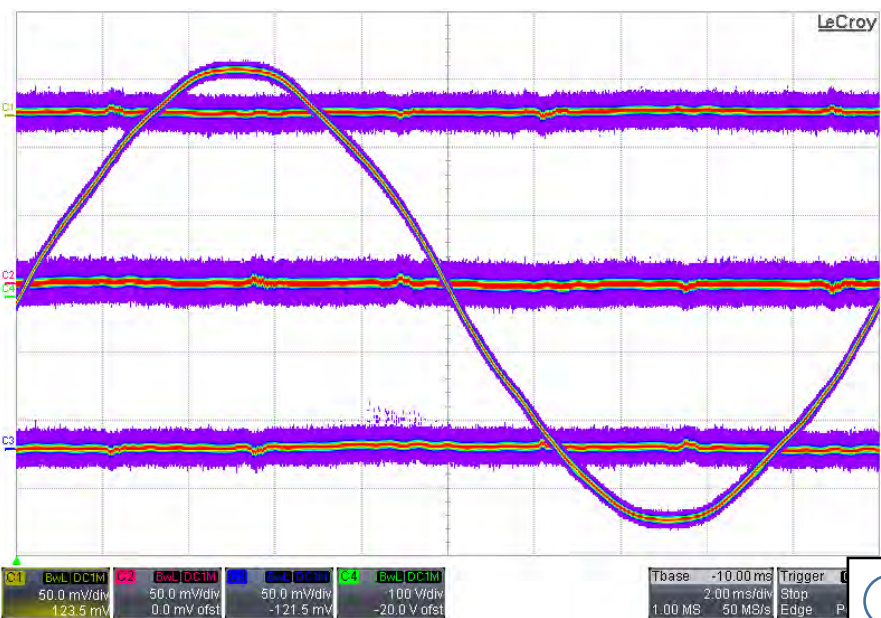
Kaapeli 6

Pvm	5.4.2017	
klo	11:05	
Kaapelityyppi	AHXAMK-W	
Poikkipinta [mm2]	3 x 185+35	
Pituus [m]	364	
Asennusvuosi	1995	
Päätetyyppi	Pistoke	
Käyttöjännite [kV]	20	
Taustahäiriö- taso [pC]	500	
Purkausten näennäisvaraus [pC]	-	
Tiedostot	PD: 209-408, 409-506, 613-710, Pulssitukaus: 507	
Diagnoosi	Melko voimakkaita tehoelektroniikkalaitteiden aiheuttamia häiriöitä, Ei taustahäiriötason ylittäviä osittaispurkauksia	

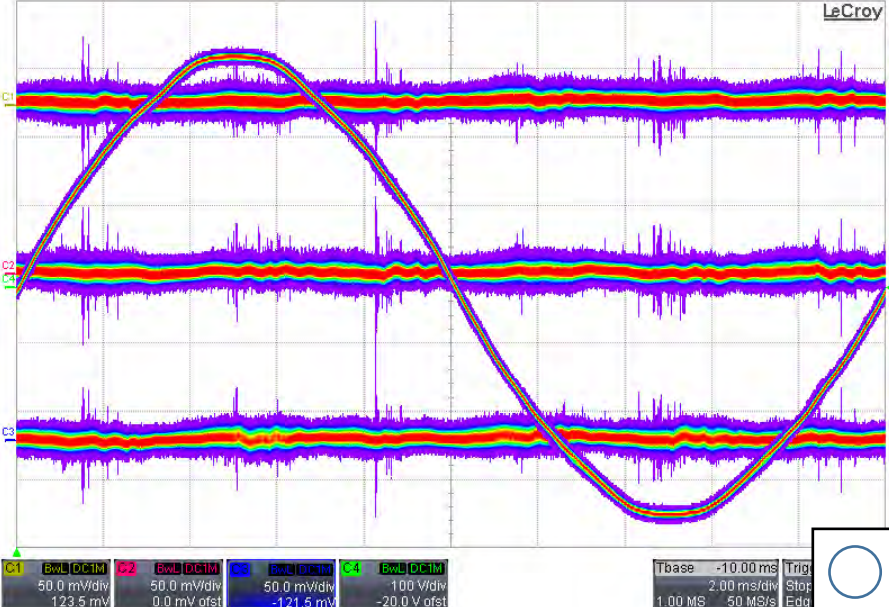
Kaapeli 11

Pvm	25.4.2017	
klo	9:42	
Kaapelityyppi	APYAKMM	
Poikkipinta [mm2]	3 x 185	
Pituus [m]	391	
Asennusvuosi	1989	
Päätetyyppi	Posliini	
Käyttöjännite [kV]	20	
Taustahäiriö- taso [pC]	30	
Purkausten näennäisvaraus [pC]	-	
Tiedostot	PD: 4-108, 109-209, 210-599, Pulssitutkaus: 0-1	
Diagnoosi	Ei taustahäiriötason ylittäviä osittaispurkauksia	

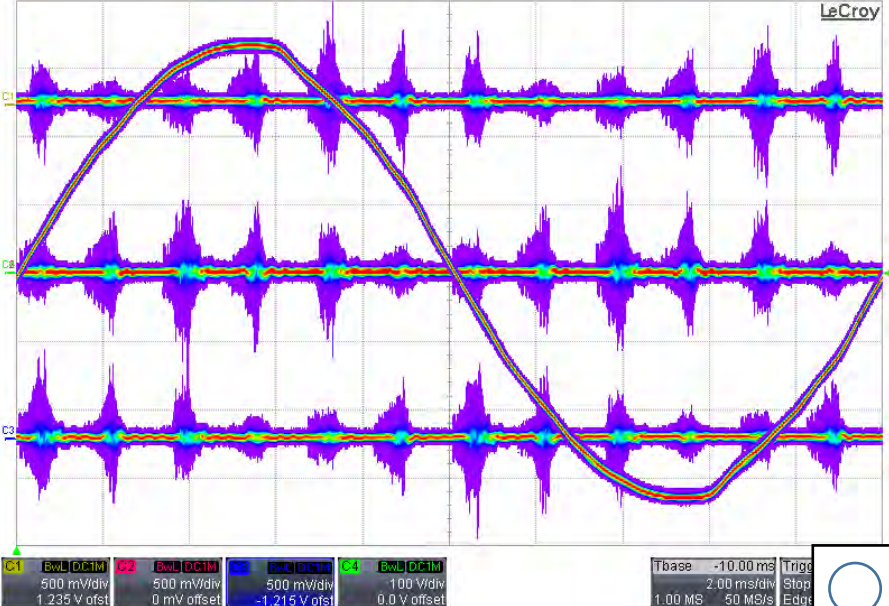
Kaapeli 12

Pvm	25.4.2017	
klo	12:28	
Kaapelityyppi	AHXAMK-W	
Poikkipinta [mm2]	3 x 185+35	
Pituus [m]	569	
Asennusvuosi	1996	
Päätetyyppi	Pistoke	
Käyttöjännite [kV]	20	
Taustahäiriö- taso [pC]	110	
Purkausten näennäisvaraus [pC]	240	
Tiedostot	PD: 602-711, 712-1013, 1020-1320, Pulssitutkaus: 1014-1016	
Diagnoosi	Aluksi vaiheessa L3 toisella puolijaksolla näennäisvaraukseltaan noin 240 pC purkauksia, sammuiivat kuitenkin melko pian	

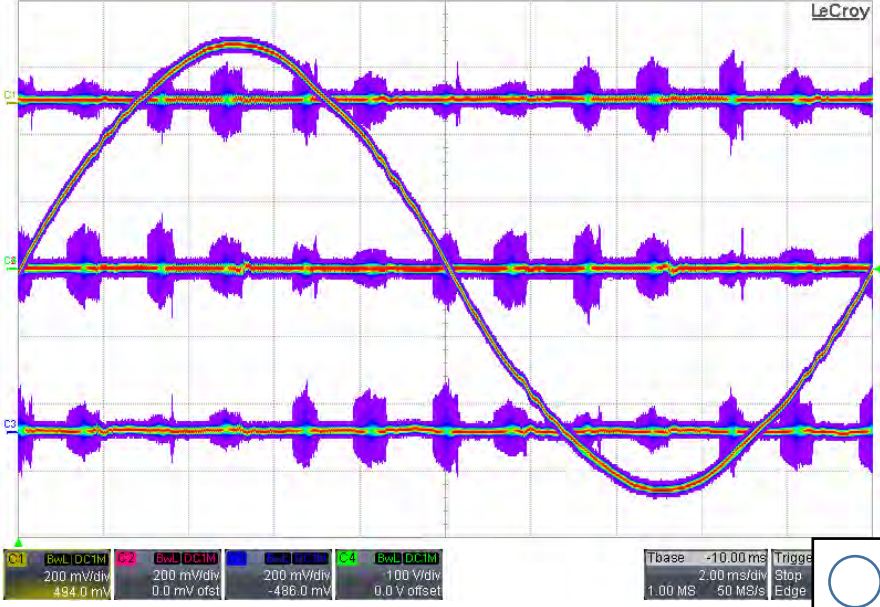
Kaapeli 13

Pvm	25.4.2017	
klo	16:03	
Kaapelityyppi	AHXAMK-W	
Poikkipinta [mm2]	3 x 185+35	
Pituus [m]	326	
Asennusvuosi	2001	
Päätetyyppi	Pistoke	
Käyttöjännite [kV]	20	
Taustahäiriö- taso [pC]	430	
Purkausten näennäisvaraus [pC]	-	
Tiedostot	PD: 1329-1430, 1431-1627, 1628-1834, 1840-1949, Pulssitutkaus: 1835	
Diagnoosi	Melko voimakkaita tehoelektroniikkalaitteiden aiheuttamia häiriöitä, Ei taustahäiriötason ylittäviä osittaispurkauksia	

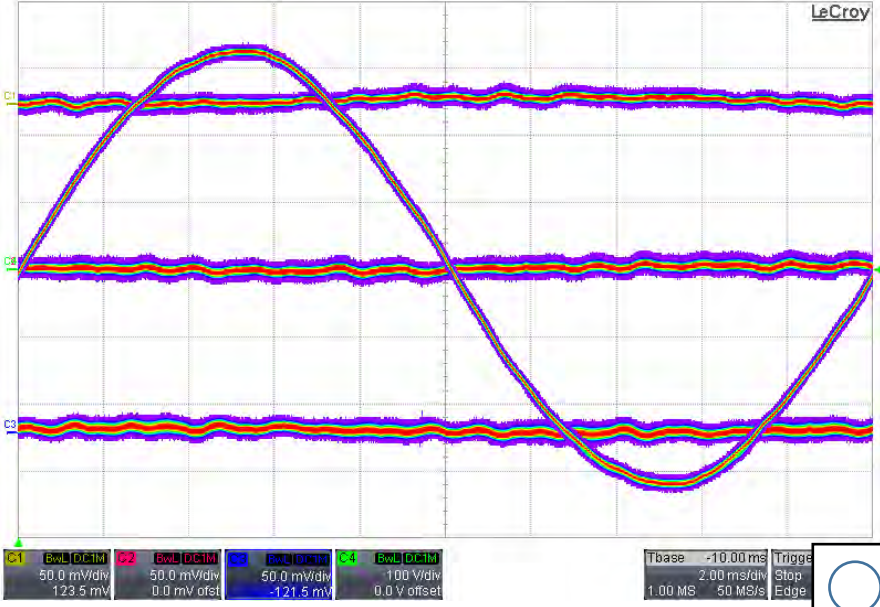
Kaapeli 20

Pvm	9.5.2017	
klo	8:54	
Kaapelityyppi	APYAKMM	
Poikkipinta [mm2]	3 x 240	
Pituus [m]	504	
Asennusvuosi	1967	
Päätetyyppi	Lämpökutiste	
Käyttöjännite [kV]	10	
Taustahäiriö- taso [pC]	500	
Purkausten näennäisvaraus [pC]	3850	
Tiedostot	PD: 3-112, 113-226, 227-417, 420-600, 602-731, Pulssitutkaus: 418-419	
Diagnoosi	Voimakkaita tehoelektroniikkalaitteiden aiheuttamia häiriöitä, Ei taustahäiriötason ylittäviä osittaispurkauksia	

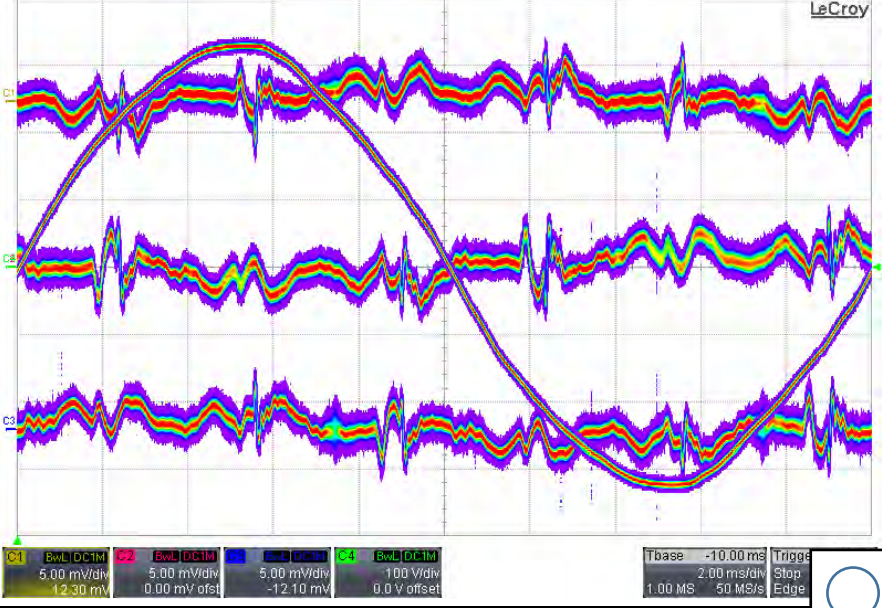
Kaapeli 21

Pvm	9.5.2017	
klo	10:40	
Kaapelityyppi	APYAKMM	
Poikkipinta [mm ²]	3 x 240	
Pituus [m]	309	
Asennusvuosi	1988	
Päätetyyppi	Letku	
Käyttöjännite [kV]	10	
Taustahäiriötaso [pC]	1030	
Purkausten näennäisvaraus [pC]	-	
Tiedostot	PD: 734-933, 934-1033, 1036-1136, Pulssitutkaus: 1034-1035	
Diagnoosi	Voimakkaita tehoelektroniikkalaitteiden aiheuttamia häiriöitä, Ei taustahäiriötason ylittäviä osittaispurkauksia	

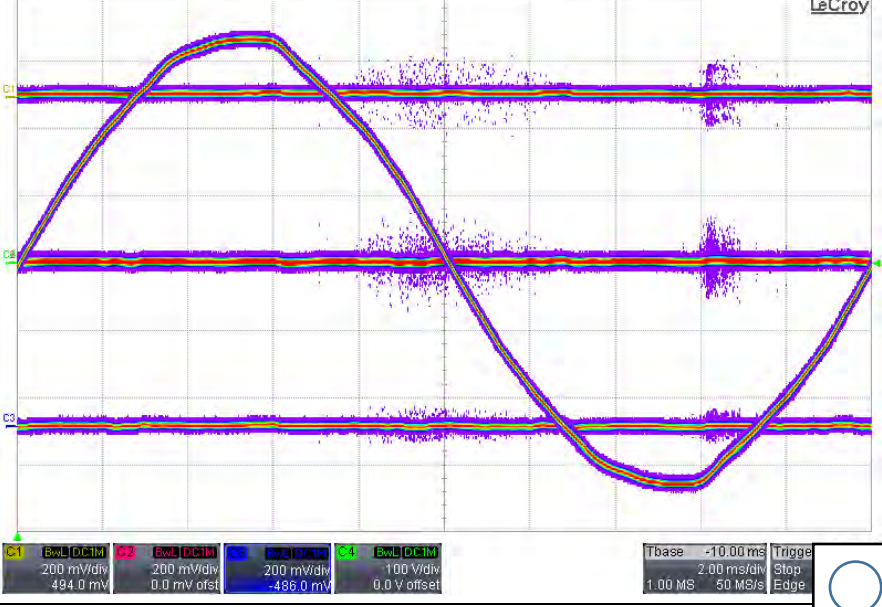
Kaapeli 22

Pvm	9.5.2017	
klo	13:06	
Kaapelityyppi	APYAKMM	
Poikkipinta [mm2]	3 x 185	
Pituus [m]	374	
Asennusvuosi	1972	
Päätetyyppi	Pistoke	
Käyttöjännite [kV]	20	
Taustahäiriötaso [pC]	60	
Purkausten näennäisvaraus [pC]	-	
Tiedostot	PD: 1141-1253, 1253-1431	
Diagnoosi	Ei taustahäiriötason ylittäviä osittaispurkauksia	

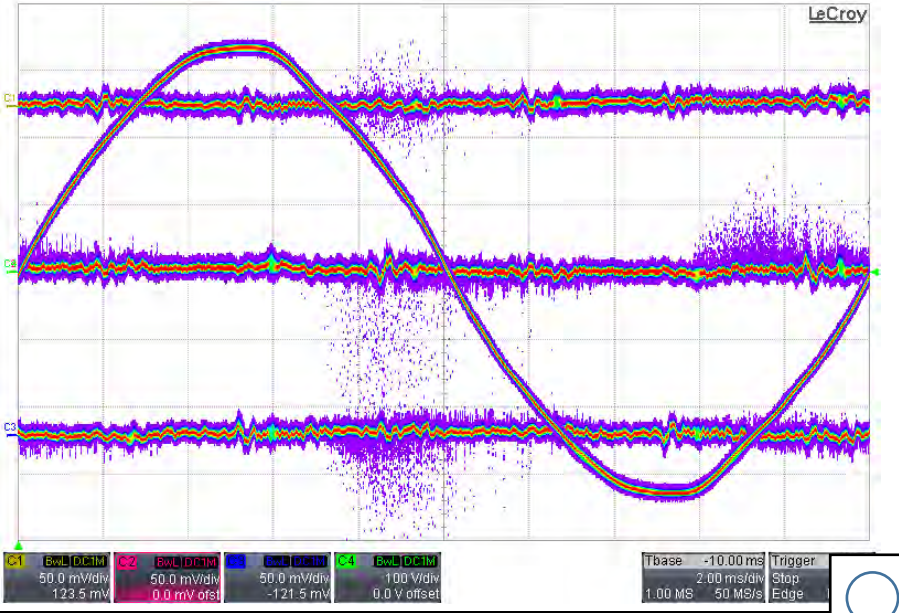
Kaapeli 23

Pvm	9.5.2017	
klo	14:30	
Kaapelityyppi	APYAKMM	
Poikkipinta [mm ²]	3 x 185	
Pituus [m]	214	
Asennusvuosi	1970	
Päätetyyppi	Pistoke	
Käyttöjännite [kV]	20	
Taustahäiriö- taso [pC]	11	
Purkausten näennäisvaraus [pC]	50	C1 BWL DC1M 5.00 mV/div 12.30 mV C2 BWL DC1M 5.00 mV/div 0.00 mV ofst C3 BWL DC1M 5.00 mV/div -12.10 mV C4 BWL DC1M 100 V/div 0.0 V offset Tbase -10.00 ms Trigg 2.00 ms/div Stop 1.00 MS 50 MS/s Edge ☐ ☐ ☒
Tiedostot	PD: 1432-1619, 1620-1732, Pulssitutkaus: 1733-1734	
Diagnoosi	Vaiheessa L3 toisella puolijaksolla näennäisvaraukseltaan noin 50 pC ajoittaisia purkauksia	

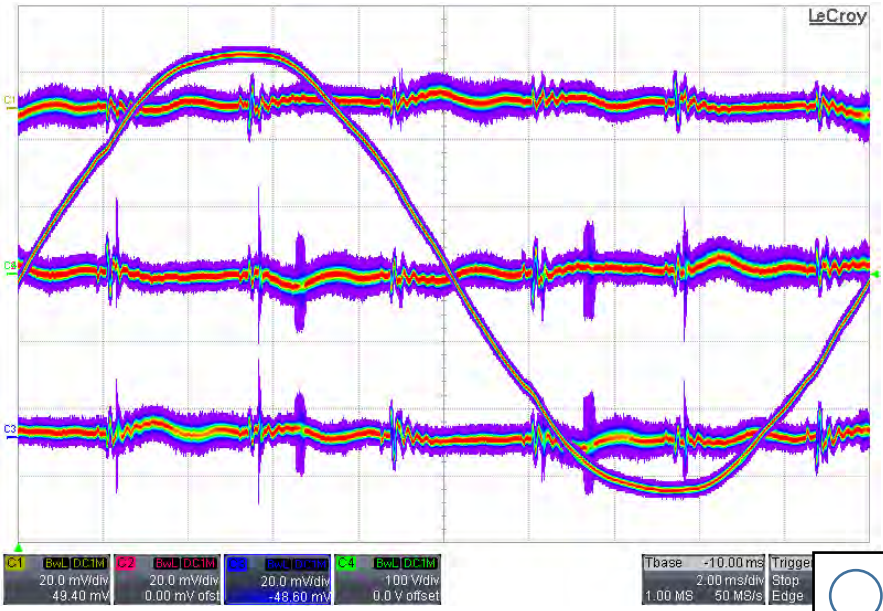
Kaapeli 24

Pvm	9.5.2017	
klo	16:05	
Kaapelityyppi	AHXAMK-W	
Poikkipinta [mm ²]	3 x 240+50	
Pituus [m]	293	
Asennusvuosi	1992	
Päätetyyppi	Pistoke	
Käyttöjännite [kV]	20	
Taustahäiriö- taso [pC]	220	
Purkausten näennäisvaraus [pC]	1020	C1 BWL DC1M 200 mV/div 494.0 mV C2 BWL DC1M 200 mV/div 0.0 mV ofst C3 BWL DC1M 200 mV/div -486.0 mV C4 BWL DC1M 100 V/div 0.0 V offset Tbase -10.00 ms Trigg 2.00 ms/div Stop 1.00 MS 50 MS/s Edge ☐ ☒ ☐
Tiedostot	PD: 1926-2123, 2128-2521, Pulssitutkaus: 2125-2127	
Diagnoosi	Vaiheessa L1 molemmilla puolijaksoilla näennäisvaraukseltaan noin 1020 pC purkauksia	

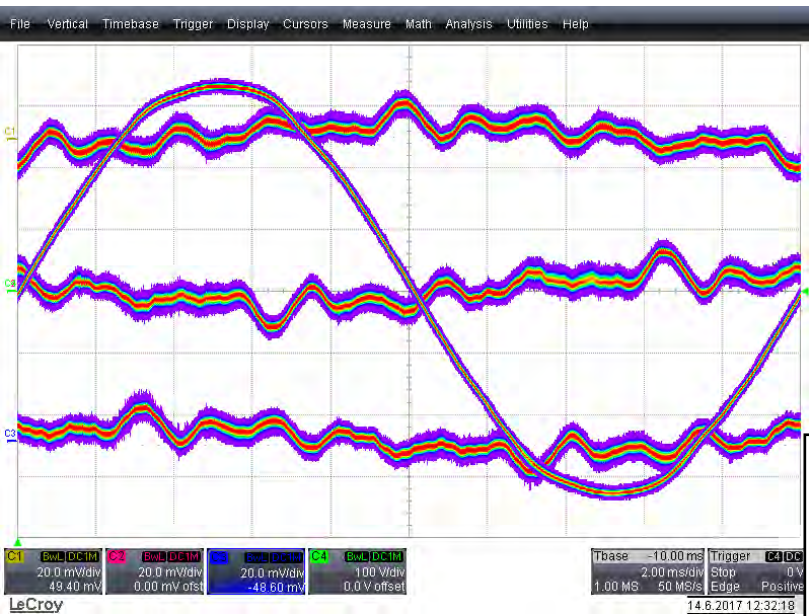
Kaapeli 32

Pvm	13.6.2017	
klo	15:53	
Kaapelityyppi	PLKVJ	
Poikkipinta [mm ²]	3 x 25	
Pituus [m]	722	
Asennusvuosi	1964	
Päätetyyppi	Lämpökutiste	
Käyttöjännite [kV]	10	
Taustahäiriötaso [pC]	70	
Purkausten näennäisvaraus [pC]	880 / 560	C1: 50.0 mV/div, 123.5 mV C2: 50.0 mV/div, 0.0 mV ofst C3: 50.0 mV/div, -121.5 mV C4: 100 V/div, 0.0 V offset Tbase: -10.00 ms Trigger: 2.00 ms/div Stop: 1.00 MS 50 MS/s Edge ○ ● ○
Tiedostot	PD: 1-104 (100 mV/div), 109-467, 533-701, Pulssitutkaus: 105-107	
Diagnoosi	Vaiheessa L2 purkauksia molemmilla puolijaksoilla näennäisvaraukset noin 880 pC ja 560 pC	

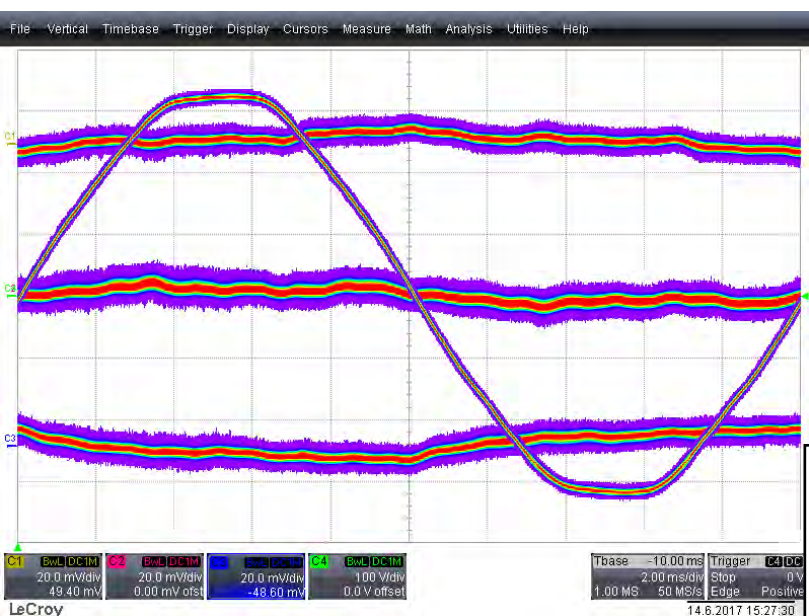
Kaapeli 33

Pvm	14.6.2017	
klo	9:46	
Kaapelityyppi	APYAKMM	
Poikkipinta [mm ²]	3 x 185	
Pituus [m]	400	
Asennusvuosi	1989	
Päätetyyppi	Letku	
Käyttöjännite [kV]	10	
Taustahäiriötaso [pC]	45	
Purkausten näennäisvaraus [pC]	-	C1: 20.0 mV/div, 49.40 mV C2: 20.0 mV/div, 0.00 mV ofst C3: 20.0 mV/div, -48.60 mV C4: 100 V/div, 0.0 V offset Tbase: -10.00 ms Trigger: 2.00 ms/div Stop: 1.00 MS 50 MS/s Edge ○ ○ ●
Tiedostot	PD: 705-884 (50 mV/div), 885-980 (20 mV/div), Pulssitutkaus: 702-703	
Diagnoosi	Ei taustahäiriötason ylittäviä purkauksia	

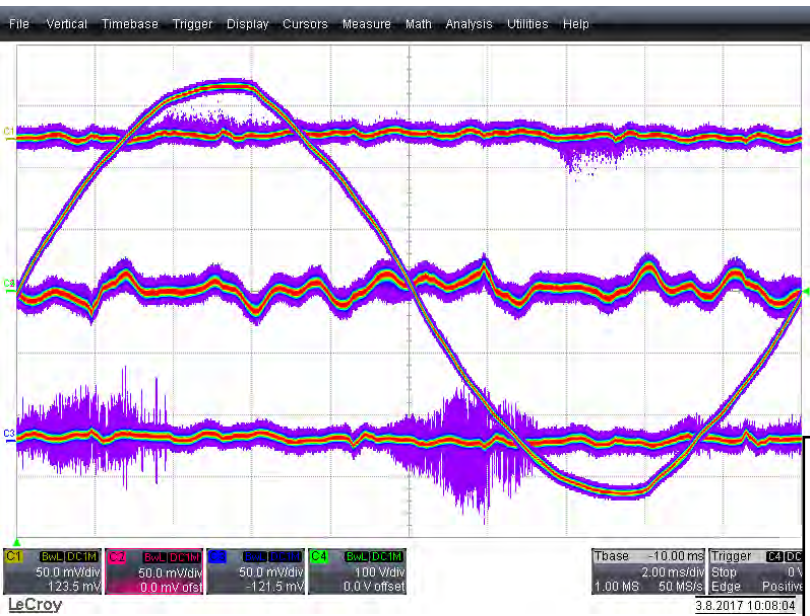
Kaapeli 34

Pvm	14.6.2017	
klo	12:32	
Kaapelityyppi	AHXAMK-W	
Poikkipinta [mm ²]	3 x 300	
Pituus [m]	2080	
Asennusvuosi	2012	
Päätetyyppi	Lämpökutiste	
Käyttöjännite [kV]	10	
Taustahäiriö- taso [pC]	35	
Purkausten näennäisvaraus [pC]	-	
Tiedostot	PD: 985-1184 (20 mV/div), 1185-1389 (10 mV/div), Pulssitukaus: 1391-1393, 1000 pC cal: 981-981	
Diagnoosi	Ei taustahäiriötason ylittäviä purkauksia	

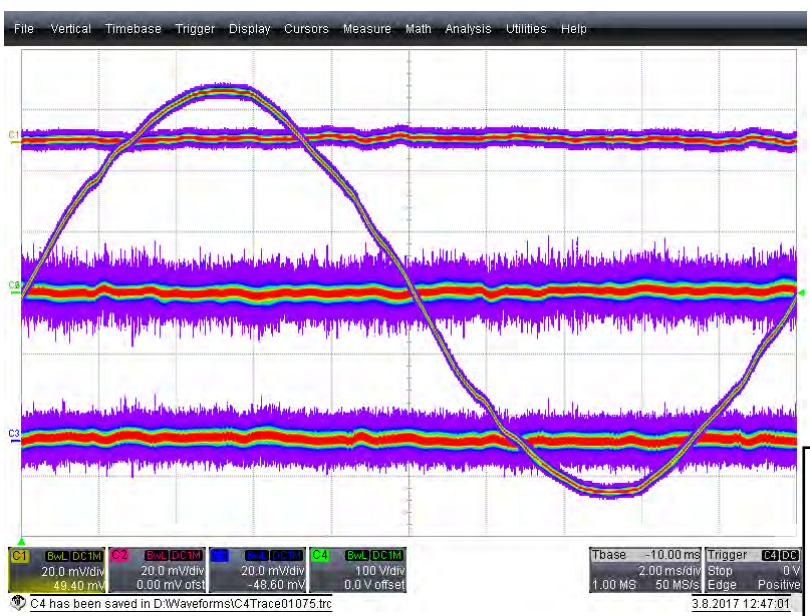
Kaapeli 35

Pvm	14.6.2017	
klo	15:27	
Kaapelityyppi	APYAKMM	
Poikkipinta [mm ²]	3 x 185	
Pituus [m]	495	
Asennusvuosi	1972	
Päätetyyppi	Posliini	
Käyttöjännite [kV]	10	
Taustahäiriö- taso [pC]	45	
Purkausten näennäisvaraus [pC]	-	
Tiedostot	PD: 1396-1696, Pulssitukaus: 1697-1698	
Diagnoosi	Ei taustahäiriötason ylittäviä purkauksia	

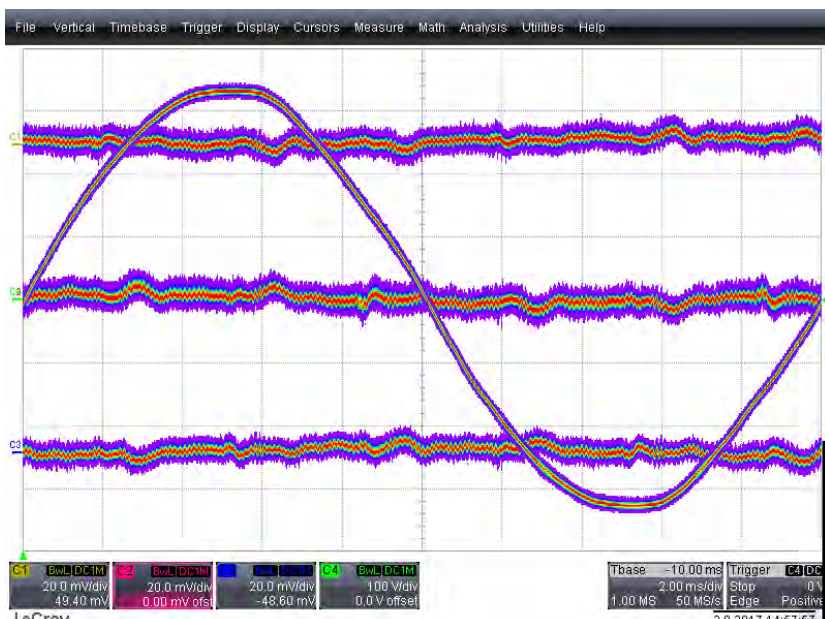
Kaapeli 41

Pvm	3.8.2017	
klo	10:08	
Kaapelityyppi	APYAKMM	
Poikkipinta [mm ²]	3 x 185	
Pituus [m]	445	
Asennusvuosi	1974	
Päätetyyppi	Pistoke	
Käyttöjännite [kV]	20	
Taustahäiriö- taso [pC]	70	
Purkausten näennäisvaraus [pC]	140/220 (L1), 470/280 (L3)	
Tiedostot	PD: 1-207, 211-512 (20 mV/div), 514-663 (L2 10 mV/div), Pulssitutkaus: 209-210	
Diagnoosi	Vaiheissa L1 ja L3 purkauksia molemmilla puolijakoilla näennäisvaraukset vaiheessa L1 140 pC ja 220 pC, vaiheessa 470 pC ja 280 pC	

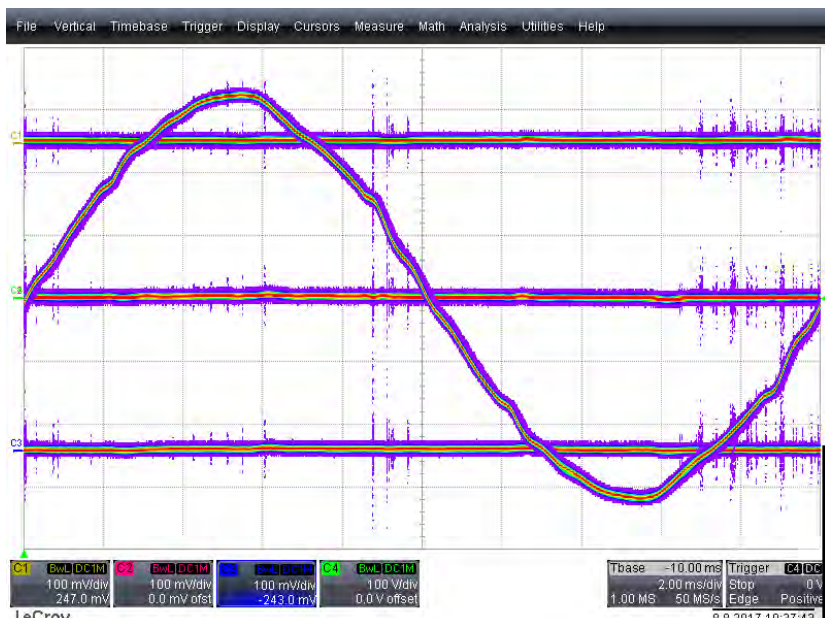
Kaapeli 42

Pvm	3.8.2017	
klo	12:47	
Kaapelityyppi	AHXAMK-W	
Poikkipinta [mm ²]	3 x 240+50	
Pituus [m]	122	
Asennusvuosi	2001	
Päätetyyppi	Pistoke	
Käyttöjännite [kV]	20	
Taustahäiriötaso [pC]	90	
Purkausten näennäisvaraus [pC]	-	
Tiedostot	PD: 666-871, 874-1075, Pulssitutkaus: 872-873, 1000 pC cal: 664	
Diagnoosi	Ei taustahäiriötason ylittäviä purkauksia	

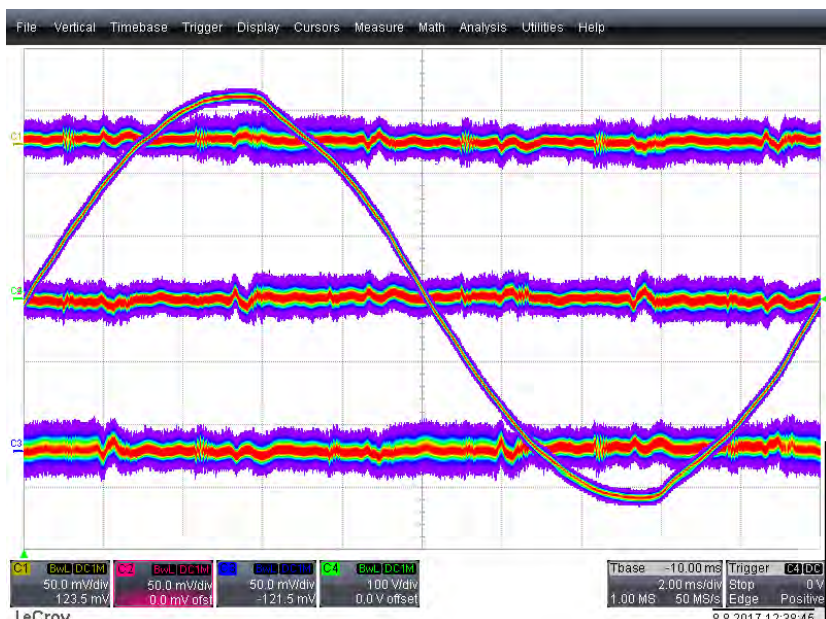
Kaapeli 43

Pvm	3.8.2017		
klo	14:57		
Kaapelityyppi	AHXAMK-W		
Poikkipinta [mm ²]	3 x 185+35		
Pituus [m]	406		
Asennusvuosi	2002		
Päätetyyppi	Lämpökutiste		
Käyttöjännite [kV]	20		
Taustahäiriötaso [pC]	40		
Purkausten näennäisvaraus [pC]	-		
Tiedostot	PD: 1077-1271, 1277-1378, Pulssitutkaus: 1272-1274		
Diagnoosi	Ei taustahäiriötason ylittäviä purkauksia		

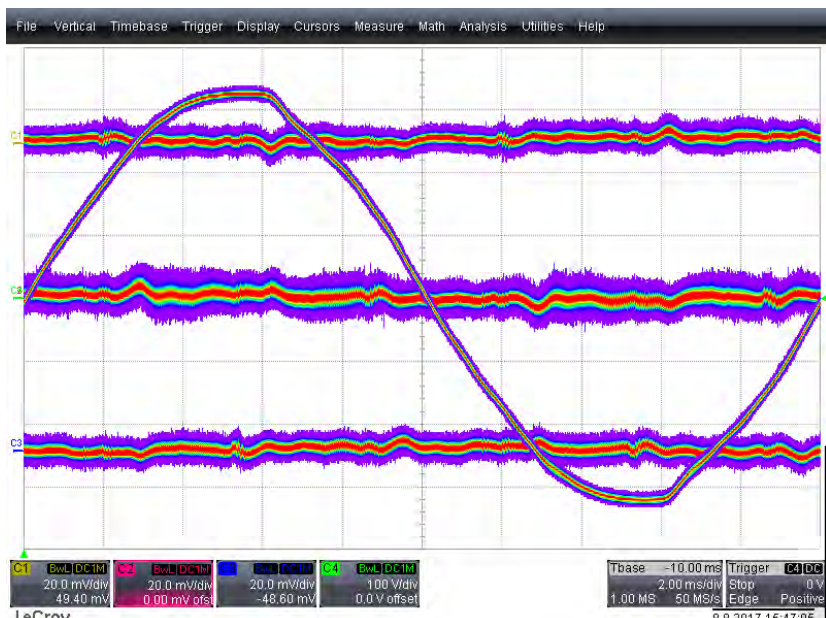
Kaapeli 44

Pvm	8.8.2017		
klo	10:37		
Kaapelityyppi	APYAKMM		
Poikkipinta [mm2]	3 x 120		
Pituus [m]	380		
Asennusvuosi	1992		
Päätetyyppi	Posliini		
Käyttöjännite [kV]	20		
Taustahäiriö- taso [pC]	110		
Purkausten näennäisvaraus [pC]	-		
Tiedostot	PD: 2-411, Pulssitutkaus: 414-415		
Diagnoosi	Häiriöpulsseja kaikissa vaiheissa, Ei taustahäiriötason ylittäviä purkauksia		

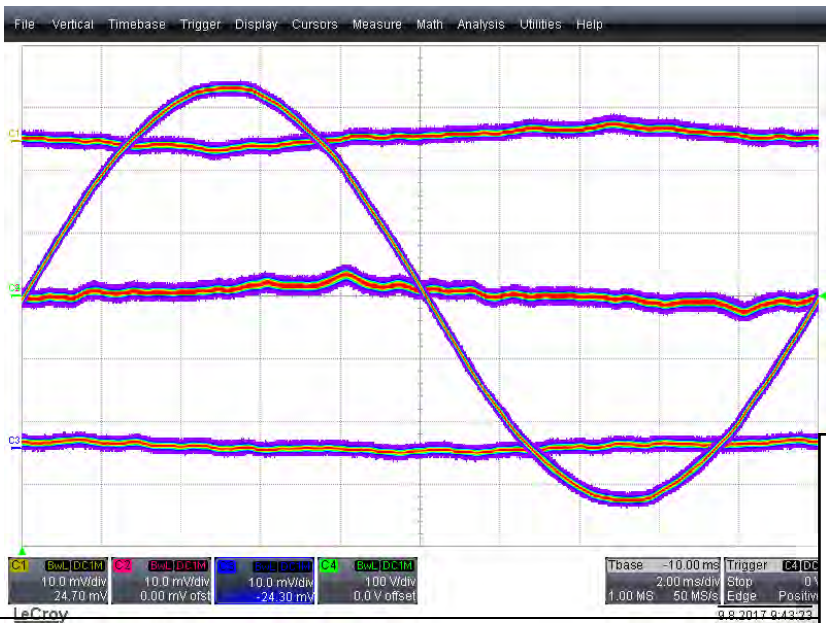
Kaapeli 45

Pvm	8.8.2017	
klo	12:38	
Kaapelityyppi	AHXAMK-W	
Poikkipinta [mm ²]	3 x 185+35	
Pituus [m]	560	
Asennusvuosi	1992	
Päätetyyppi	Kabeldon	
Käyttöjännite [kV]	20	
Taustahäiriö- taso [pC]	150	
Purkausten näennäisvaraus [pC]	-	
Tiedostot	PD: 419-651, Pulssitutkaus: 653-654	
Diagnoosi	Ei taustahäiriötason ylittäviä purkauksia	

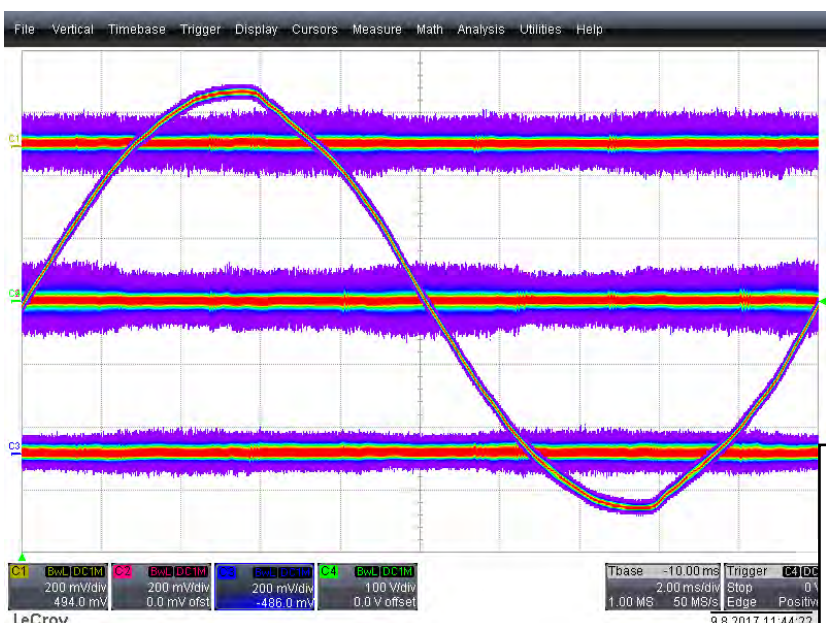
Kaapeli 46

Pvm	8.8.2017		
klo	15:47		
Kaapelityyppi	AHXAMK-W		
Poikkipinta [mm2]	3 x 185+35		
Pituus [m]	300		
Asennusvuosi	1995		
Päätetyyppi	Lämpökutiste		
Käyttöjännite [kV]	20		
Taustahäiriö- taso [pC]	60		
Purkausten näennäisvaraus [pC]	-		
Tiedostot	PD: 656-872, Pulssitutkaus: 1004-1005		
Diagnoosi	Ei taustahäiriötason ylittäviä purkauksia		

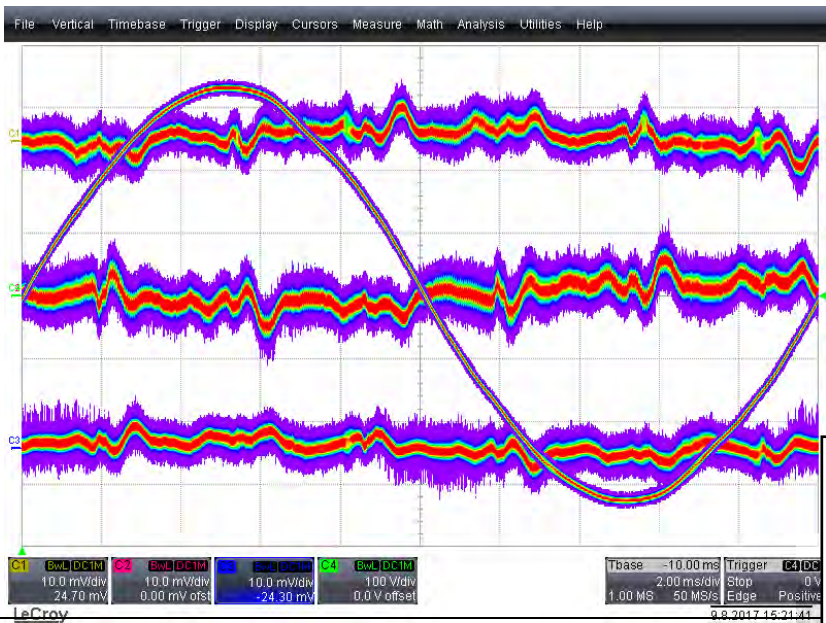
Kaapeli 47

Pvm	9.8.2017	
klo	9:43	
Kaapelityyppi	AHXAMK-W	
Poikkipinta [mm ²]	3 x 185+35	
Pituus [m]	460	
Asennusvuosi	2001	
Päätetyyppi	Pistoke	
Käyttöjännite [kV]	20	
Taustahäiriö- taso [pC]	10	
Purkausten näennäisvaraus [pC]	-	
Tiedostot	PD: 1008-1251, Pulssitutkaus: 1253	
Diagnoosi	Ei taustahäiriötason ylittäviä purkauksia, Antureiden asennustavasta johtuen mittausherkeyty huono (asennustapa B)	

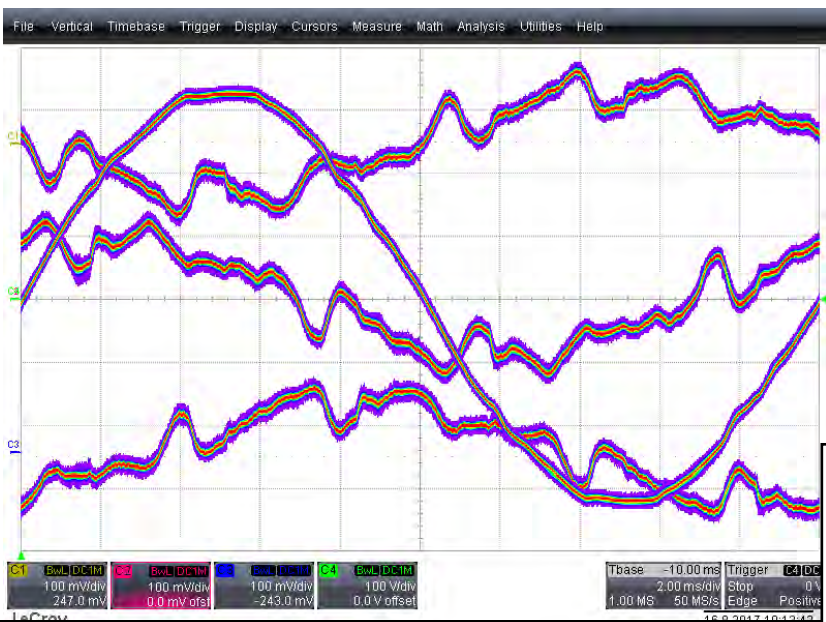
Kaapeli 48

Pvm	9.8.2017	
klo	11:44	
Kaapelityyppi	APYAKMM	
Poikkipinta [mm ²]	3 x 120	
Pituus [m]	300	
Asennusvuosi	1985	
Päätetyyppi	Lämpökutiste	
Käyttöjännite [kV]	20	
Taustahäiriö- taso [pC]	900	
Purkausten näennäisvaraus [pC]	-	
Tiedostot	PD: 1256-1556, Pulssitutkaus: 1557-1558	
Diagnoosi	Ei taustahäiriötason ylittäviä purkauksia	

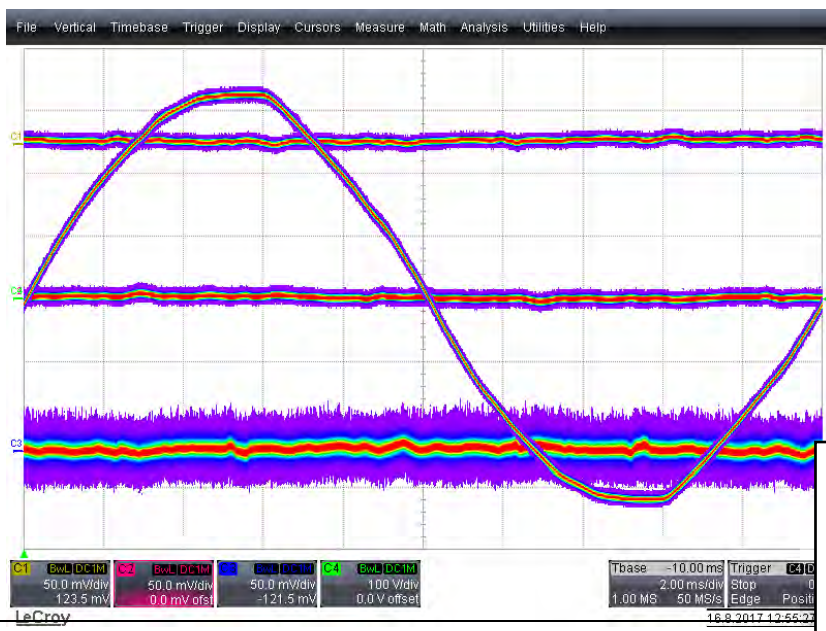
Kaapeli 49

Pvm	9.8.2017		
klo	15:19		
Kaapelityyppi	AHXAMK-W		
Poikkipinta [mm ²]	3 x 185+35		
Pituus [m]	450		
Asennusvuosi	1995		
Päätetyyppi	Pistoke		
Käyttöjännite [kV]	20		
Taustahäiriö- taso [pC]	50		
Purkausten näennäisvaraus [pC]	-		
Tiedostot	PD: 1563-1802, 1803-1852, 2010-2201, Pulssitutkaus: 2008-2009		
Diagnoosi	Ei taustahäiriötason ylittäviä purkauksia		

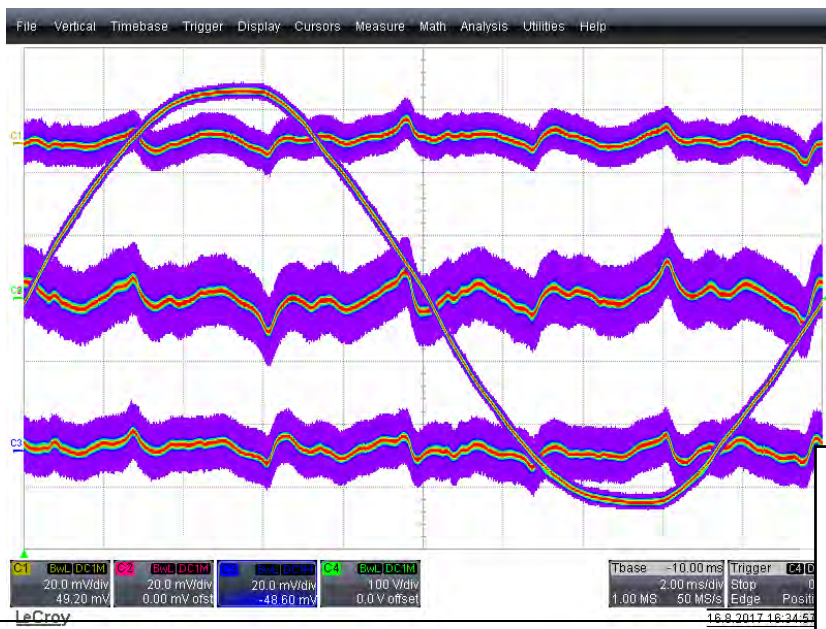
Kaapeli 53

Pvm	16.8.2017	
klo	10:13	
Kaapelityyppi	APYAKMM	
Poikkipinta [mm ²]	3 x 120	
Pituus [m]	311	
Asennusvuosi	1979	
Päätetyyppi	Pistoke	
Käyttöjännite [kV]	20	
Taustahäiriö- taso [pC]	110	
Purkausten näennäisvaraus [pC]	-	
Tiedostot	PD: 2-266, 268-401, Pulssitutkaus: 402-403	
Diagnoosi	Ei taustahäiriötason ylittäviä purkauksia	

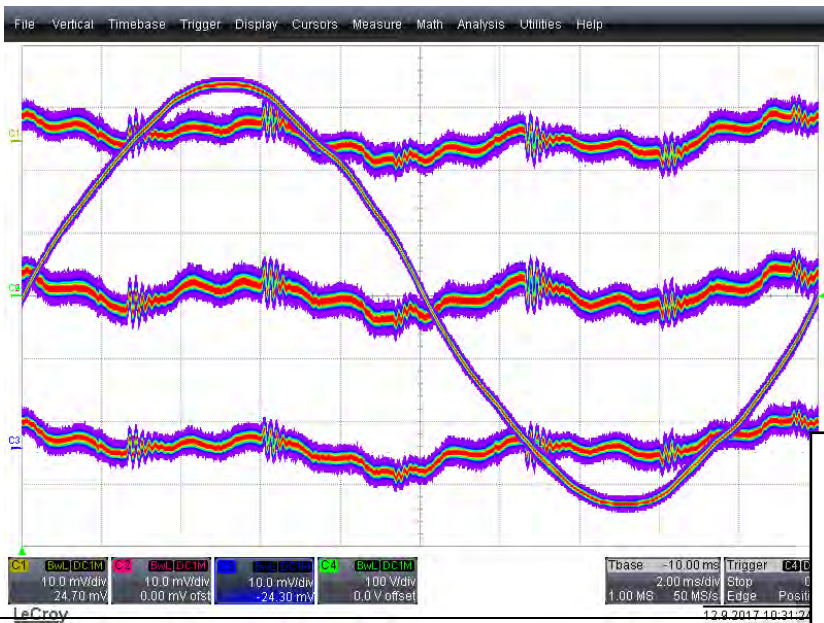
Kaapeli 54

Pvm	16.8.2017		
klo	12:55		
Kaapelityyppi	AHXAMK-W		
Poikkipinta [mm ²]	3 x 185+35		
Pituus [m]	403		
Asennusvuosi	1991		
Päätetyyppi	Pistoke		
Käyttöjännite [kV]	20		
Taustahäiriö- taso [pC]	100		
Purkausten näennäisvaraus [pC]	-		
Tiedostot	PD: 406-620, 625-771, Pulssitutkaus: 772-773		
Diagnoosi	Ei taustahäiriötason ylittäviä purkauksia		

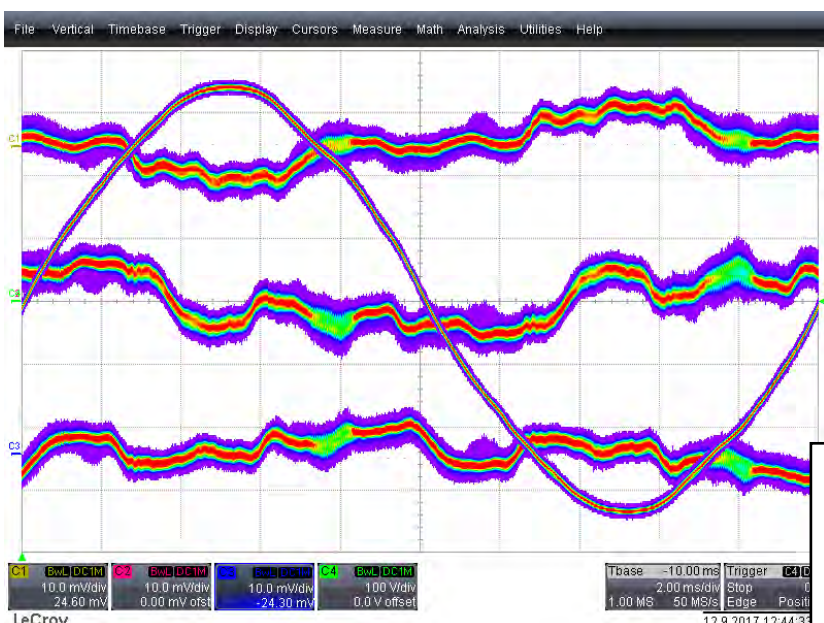
Kaapeli 55

Pvm	16.8.2017		
klo	16:34		
Kaapelityyppi	AHXAMK-W		
Poikkipinta [mm ²]	3 x 185+35		
Pituus [m]	328		
Asennusvuosi	1990		
Päätetyyppi	Kabeldon		
Käyttöjännite [kV]	20		
Taustahäiriö- taso [pC]	90		
Purkausten näennäisvaraus [pC]	-		
Tiedostot	PD: 776-983, 985-1188, 1189-1282		
Diagnoosi	Ei taustahäiriötason ylittäviä purkauksia		

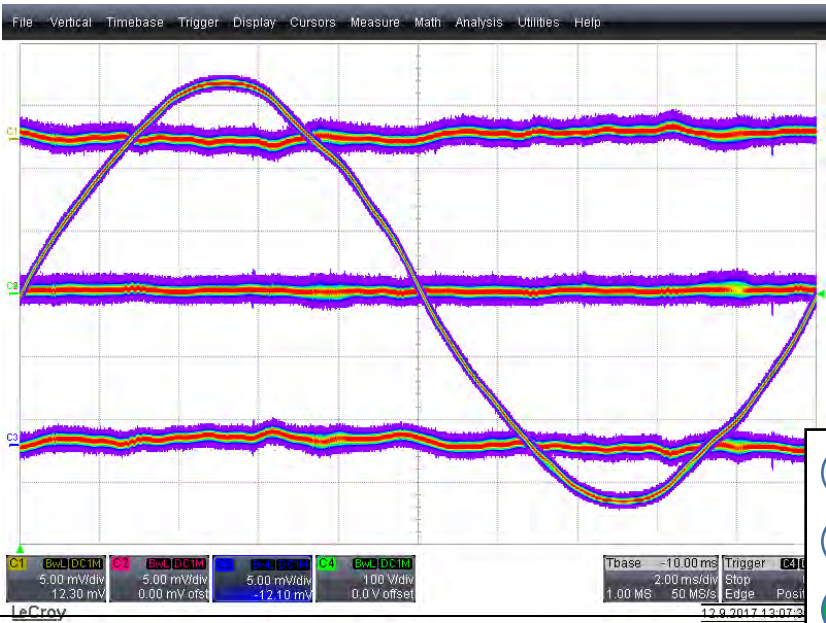
Kaapeli 59

Pvm	12.9.2017		
klo	10:31		
Kaapelityyppi	APYAKMM		
Poikkipinta [mm ²]	3 x 120		
Pituus [m]	200		
Asennusvuosi	1974		
Päätetyyppi	Epoksi		
Käyttöjännite [kV]	20		
Taustahäiriötaso [pC]	17		
Purkausten näennäisvaraus [pC]	-		
Tiedostot	PD: 2-368, Pulssitukaus: 402-404		
Diagnoosi	Ei taustahäiriötason ylittäviä purkauksia		

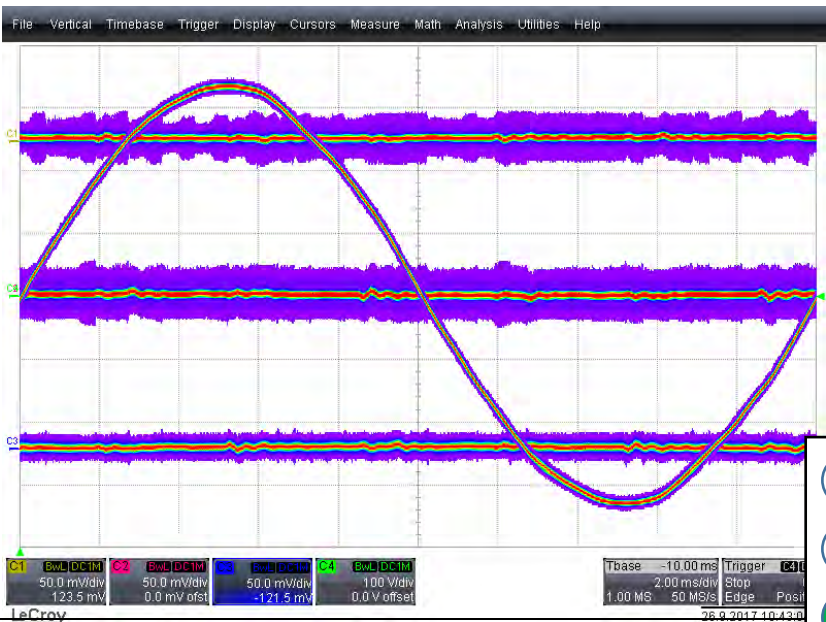
Kaapeli 60

Pvm	12.9.2017	
klo	12:44	
Kaapelityyppi	APYAKMM	
Poikkipinta [mm2]	3 x 120	
Pituus [m]	650	
Asennusvuosi	1974	
Päätetyyppi	Epoksi	
Käyttöjännite [kV]	20	
Taustahäiriö- taso [pC]	28	
Purkausten näennäisvaraus [pC]	-	
Tiedostot	PD: 407-609, 610-742, Pulssitukaus: 743-746	
Diagnoosi	Ei taustahäiriötason ylittäviä purkauksia	

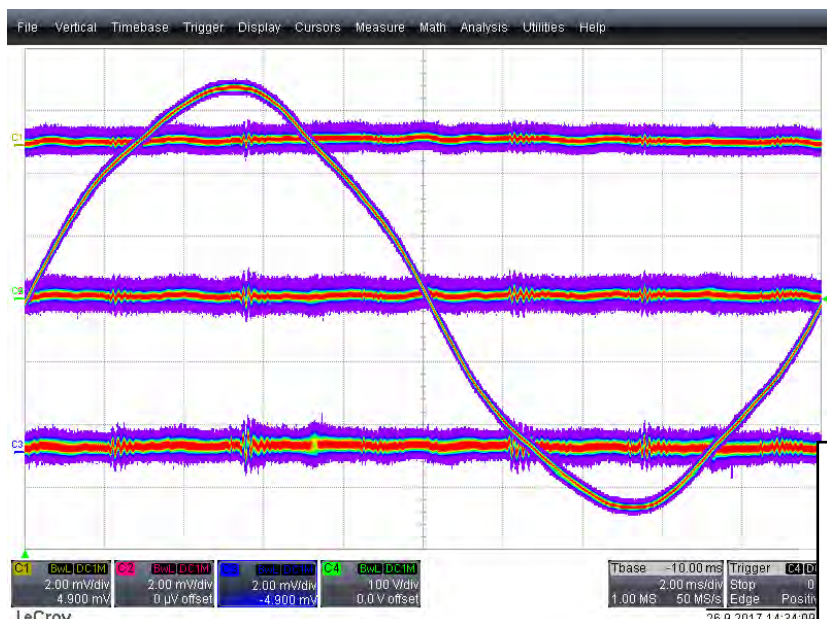
Kaapeli 61

Pvm	12.9.2017	
klo	13:07	
Kaapelityyppi	APYAKMM	
Poikkipinta [mm ²]	3 x 120	
Pituus [m]	200	
Asennusvuosi	1976	
Päätetyyppi	Epoksi	
Käyttöjännite [kV]	20	
Taustahäiriötaso [pC]	10	
Purkausten näennäisvaraus [pC]	-	
Tiedostot	PD: 749-1053, 1054-1252, Pulssitutkaus: 1253-1254, 1000 pC cal: 1255	
Diagnoosi	Ei taustahäiriötason ylittäviä purkauksia	

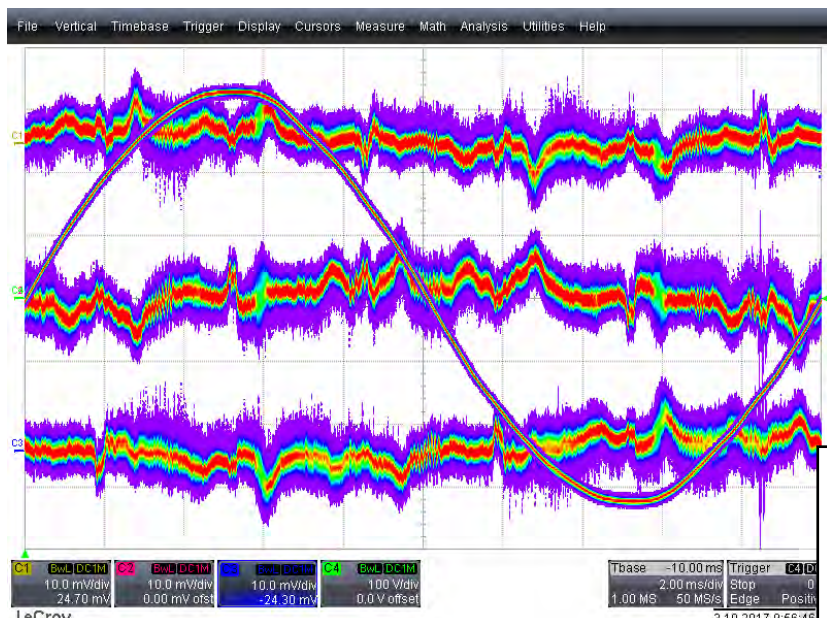
Kaapeli 65

Pvm	26.9.2017	
klo	10:43	
Kaapelityyppi	PLKVJ	
Poikkipinta [mm ²]	3 x 120	
Pituus [m]	207	
Asennusvuosi	1972	
Päätetyyppi	Pistoke	
Käyttöjännite [kV]	10	
Taustahäiriötaso [pC]	170	
Purkausten näennäisvaraus [pC]	-	
Tiedostot	PD: 1-294, 297-452, Pulssitutkaus: 296-297	
Diagnoosi	Ei taustahäiriötason ylittäviä purkauksia	

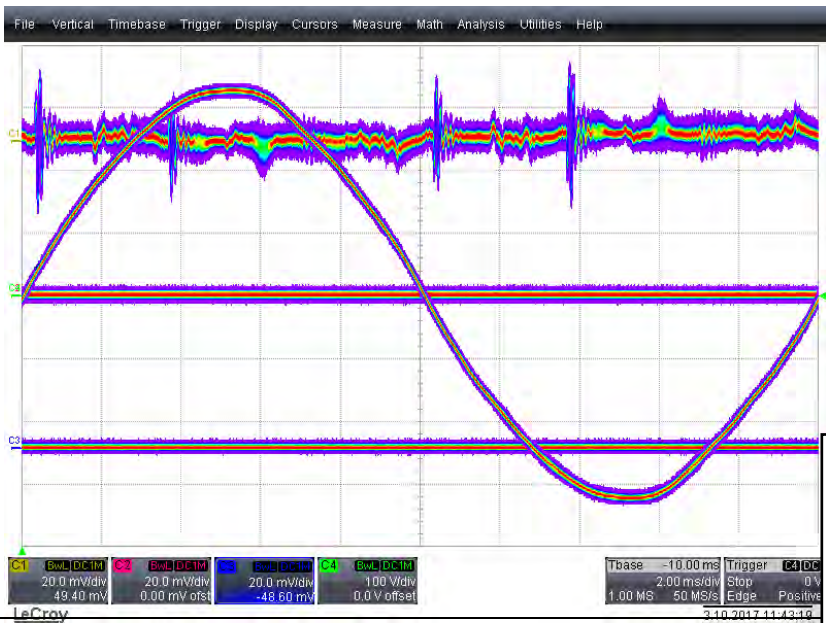
Kaapeli 67

Pvm	26.9.2017	
klo	14:34	
Kaapelityyppi	PLKVJ	
Poikkipinta [mm2]	3 x 70	
Pituus [m]	293	
Asennusvuosi	1950	
Päätetyyppi	Pistoke	
Käyttöjännite [kV]	10	
Taustahäiriö- taso [pC]	10	
Purkausten näennäisvaraus [pC]	-	
Tiedostot	PD: 455-784, 786-951, Pulssitutkaus: 952-953	
Diagnoosi	Ei taustahäiriötason ylittäviä purkauksia	

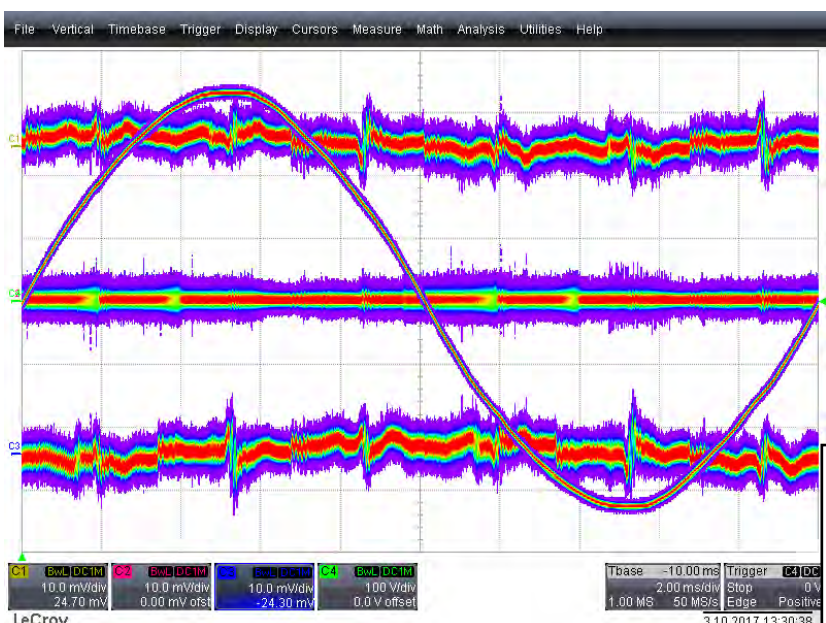
Kaapeli 71

Pvm	3.10.2017	
klo	9:56	
Kaapelityyppi	PLKVJ	
Poikkipinta [mm ²]	3 x 95	
Pituus [m]	816	
Asennusvuosi	1962	
Päätetyyppi	Lämpökutiste	
Käyttöjännite [kV]	10	
Taustahäiriö- taso [pC]	55	
Purkausten näennäisvaraus [pC]	85-130	
Tiedostot	PD: 2-522, 525-928, Pulssitutkaus: 929-931	
Diagnoosi	Purkauksia kaikissa vaiheissa, purkausten näennäisvaraus noin 85-130 pC	

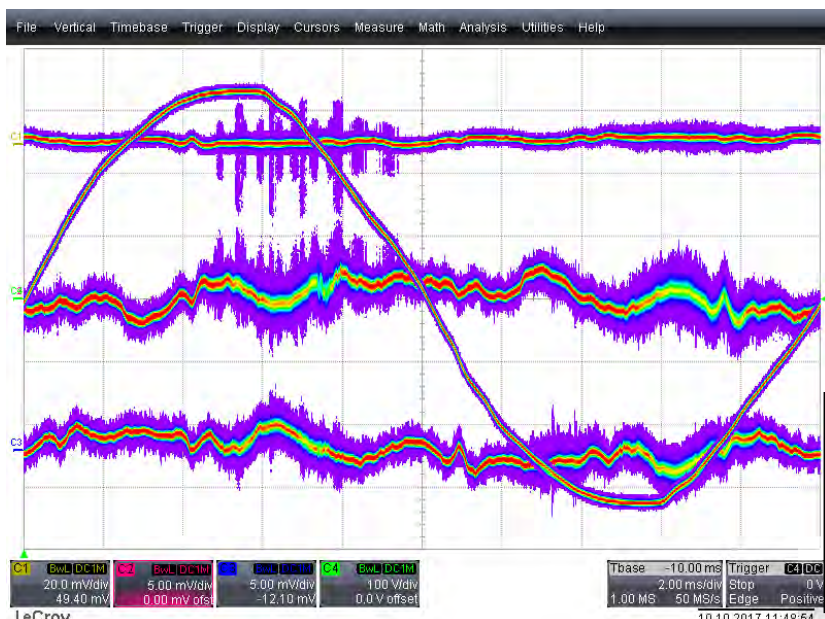
Kaapeli 72

Pvm	3.10.2017	
klo	11:43	
Kaapelityyppi	APYAKMM	
Poikkipinta [mm ²]	3 x 185	
Pituus [m]	516	
Asennusvuosi	1977	
Päätetyyppi	Letku	
Käyttöjännite [kV]	10	
Taustahäiriötaso [pC]	45	
Purkausten näennäisvaraus [pC]	-	
Tiedostot	PD: 934-1221, 1222-1624, Pulssitutkaus: 1625-1626	
Diagnoosi	Mittausanturi saatiin vain vaiheeseen L1, Ei taustahäiriötason ylittäviä purkauksia	

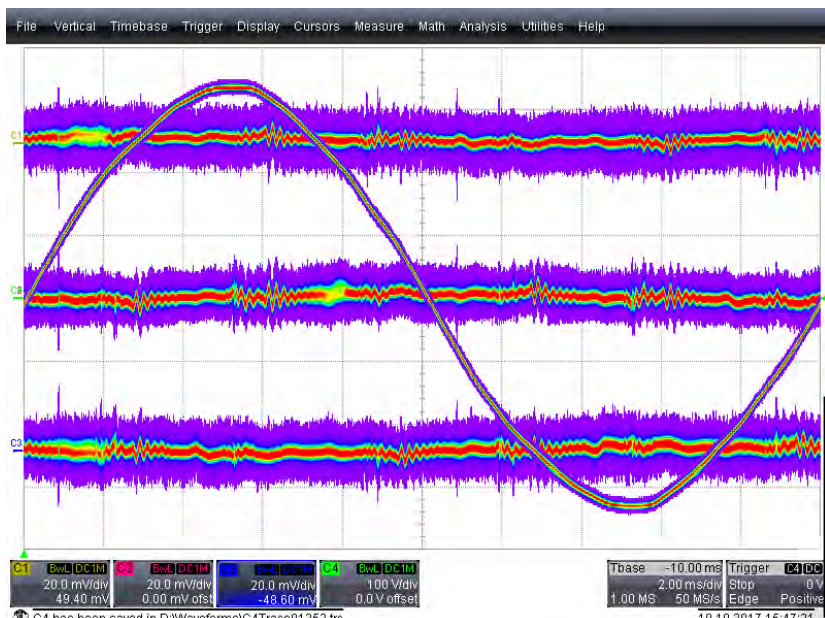
Kaapeli 73

Pvm	3.10.2017		
klo	13:30		
Kaapelityyppi	APYAKMM		
Poikkipinta [mm ²]	3 x 185		
Pituus [m]	346		
Asennusvuosi	1981		
Päätetyyppi	Lämpökutiste		
Käyttöjännite [kV]	10		
Taustahäiriö- taso [pC]	35		
Purkausten näennäisvaraus [pC]	-		
Tiedostot	PD: 1629-2022, Pulssitutkaus: 2023-2025		
Diagnoosi	Ei taustahäiriötason ylittäviä purkauksia		

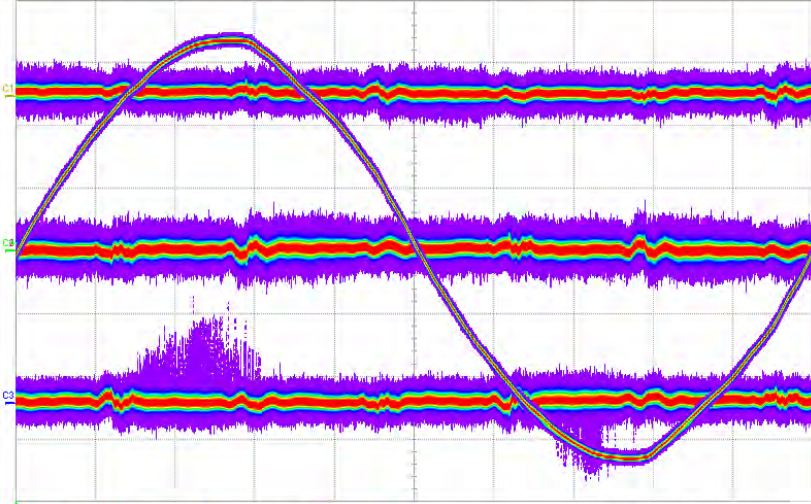
Kaapeli 77

Pvm	10.10.2017		
klo			
Kaapelityyppi	AHXAMK-W		
Poikkipinta [mm ²]	3 x 120		
Pituus [m]	305		
Asennusvuosi	1993		
Päätetyyppi	Pistoke		
Käyttöjännite [kV]	20		
Taustahäiriö- taso [pC]	50		
Purkausten näennäisvaraus [pC]	-		
Tiedostot	PD: 2-302, 304-642 658-960, Pulssitutkaus: 961-963		
Diagnoosi	Ei taustahäiriötason ylittäviä purkauksia		

Kaapeli 78

Pvm	10.10.2017		
klo			
Kaapelityyppi	APYAKMM		
Poikkipinta [mm ²]	3 x 70		
Pituus [m]	270		
Asennusvuosi	1979		
Päätetyyppi	Lämpökutiste		
Käyttöjännite [kV]	20		
Taustahäiriö- taso [pC]	85		
Purkausten näennäisvaraus [pC]	-		
Tiedostot	PD: 966-1351, 1353-1690, Pulssitutkaus: 1691-1694		
Diagnoosi	Ei taustahäiriötason ylittäviä purkauksia		

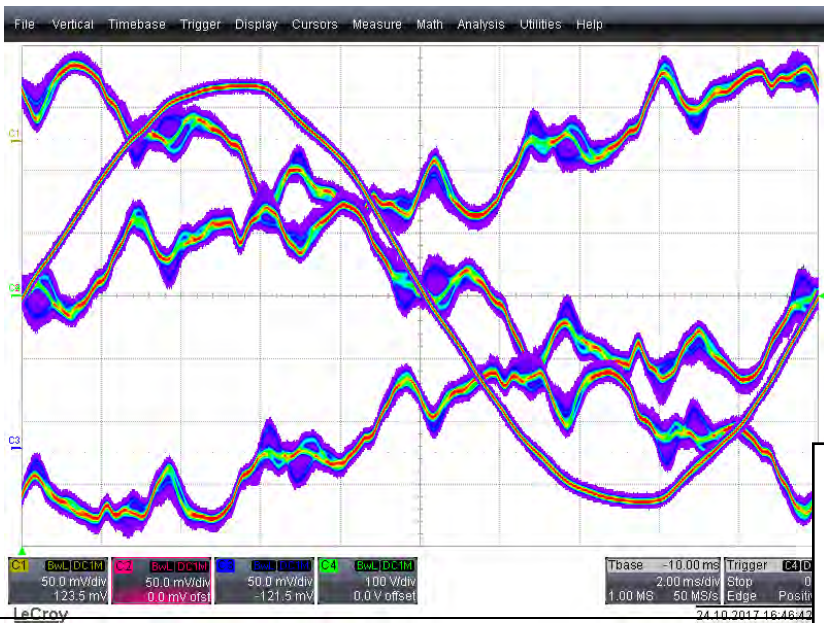
Kaapeli 82

Pvm	24.10.2017	FileVerticalTimebaseTriggerDisplayCursorsMeasureMathAnalysisUtilitiesHelp  C1BWLDC:IM100 mV/div247.0 mV100 mV/div0.0 mV offset C2BWLDC:IM100 mV/div0.0 mV offset C3BWLDC:IM100 mV/div-243.0 mV100 mV/div0.0 V offset C4BWLDC:IM100 mV/div100 mV/div0.0 V offset Tbase-10.00 ms2.00 ms/divStop0%1.00 MS50 MS/sEdgePositive 24.10.2017 10:21:39 PD: 3-1217, 1219-1355, 1522-1578, Pulssitutkaus: 1457-1459, 1460-1578	
klo	10:21		
Kaapelityyppi	APYAKMT		
Poikkipinta [mm ²]	3 x 120		
Pituus [m]	525		
Asennusvuosi	1971		
Päätetyyppi	Pistoke		
Käyttöjännite [kV]	20		
Taustahäiriötaso [pC]	300		
Purkausten näennäisvaraus [pC]	980 / 860		
Tiedostot	PD: 3-1217, 1219-1355, 1522-1578, Pulssitutkaus: 1457-1459, 1460-1578		
Diagnoosi	Purkauksia vaiheessa L3 molemmilla puolijaksoilla, purkausten näennäisvaraukset noin 980 pC ja 860 pC		

Kaapeli 83

Pvm	24.10.2017	
klo	14:12	
Kaapelityyppi	PLKVJ	
Poikkipinta [mm2]	3 x 150	
Pituus [m]	581	
Asennusvuosi	1963	
Päätetyyppi	Pistoke	
Käyttöjännite [kV]	10	
Taustahäiriö- taso [pC]	130	
Purkausten näennäisvaraus [pC]	235	
Tiedostot	PD: 1629-2008, Pulssitutkaus: 2009-2113	
Diagnoosi	Purkauksia vaiheessa L1 molemmilla puolijaksoilla, purkausten näennäisvaraukset noin 235 pC	

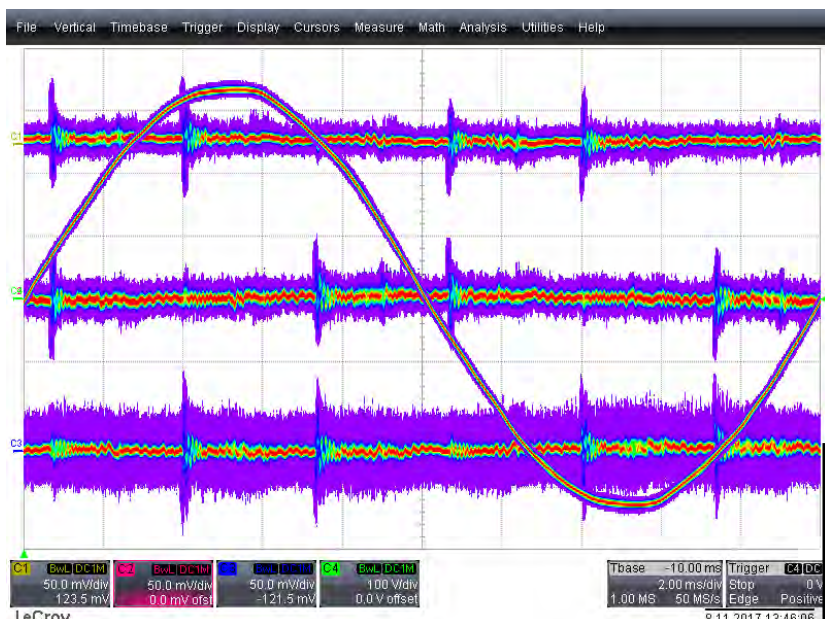
Kaapeli 84

Pvm	24.10.2017	
klo	16:46	
Kaapelityyppi	PLKVJ	
Poikkipinta [mm2]	3 x 240	
Pituus [m]	1550	
Asennusvuosi	1955	
Päätetyyppi	Pistoke	
Käyttöjännite [kV]	10	
Taustahäiriö- taso [pC]	85	
Purkausten näennäisvaraus [pC]	-	
Tiedostot	PD: 2301-2940, Pulssitutkaus: 2941-2991	
Diagnoosi	Ei taustahäiriötason ylittäviä purkauksia	

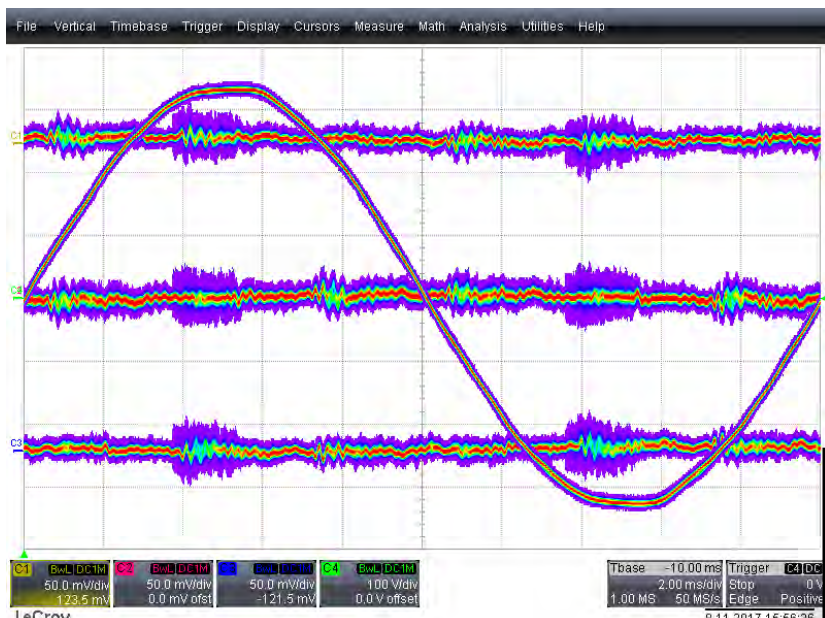
Kaapeli 88

Pvm	8.11.2017		
klo	10:15		
Kaapelityyppi	APYAKMM		
Poikkipinta [mm2]	3 x 70		
Pituus [m]	356		
Asennusvuosi	1968		
Päätetyyppi	Pistoke		
Käyttöjännite [kV]	20		
Taustahäiriö- taso [pC]	40		
Purkausten näennäisvaraus [pC]	165/130		
Tiedostot	PD: 2-218, 221-450, Pulssitutkaus: 451-510, 511		
Diagnoosi	Purkauksia vaiheessa L3 molemmilla puolijaksoilla, purkausten näennäisvaraukset noin 165 pC ja 130 pC, lisäksi tehoelektronikan aiheuttamia häiriöitä		

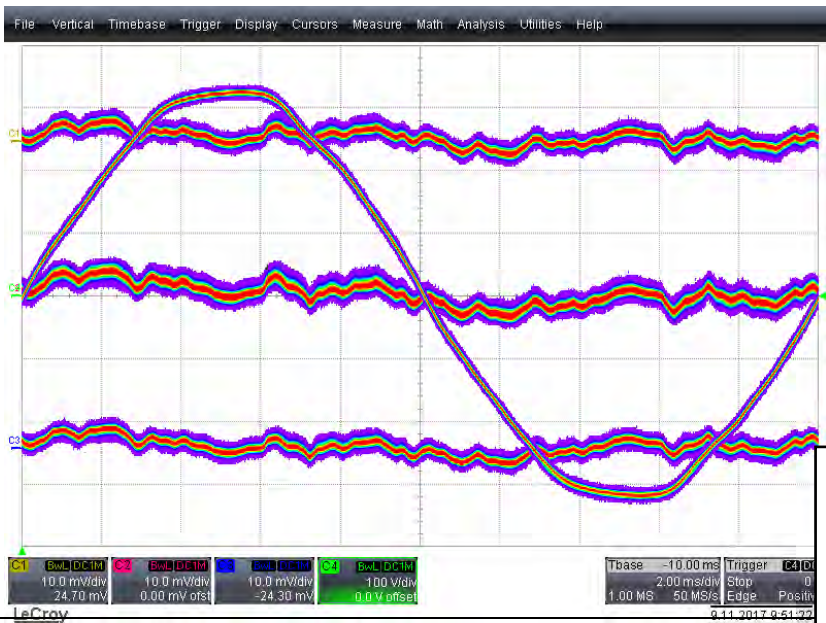
Kaapeli 89

Pvm	8.11.2017	
klo	13:46	
Kaapelityyppi	APYAKMM	
Poikkipinta [mm ²]	3 x 70	
Pituus [m]	513	
Asennusvuosi	1990	
Päätetyyppi	Lämpökutiste	
Käyttöjännite [kV]	20	
Taustahäiriötaso [pC]	160	
Purkausten näennäisvaraus [pC]	-	
Tiedostot	PD: 514-841, Pulssitutkaus: 844-942, 943	
Diagnoosi	Ei taustahäiriötason ylittäviä purkauksia	

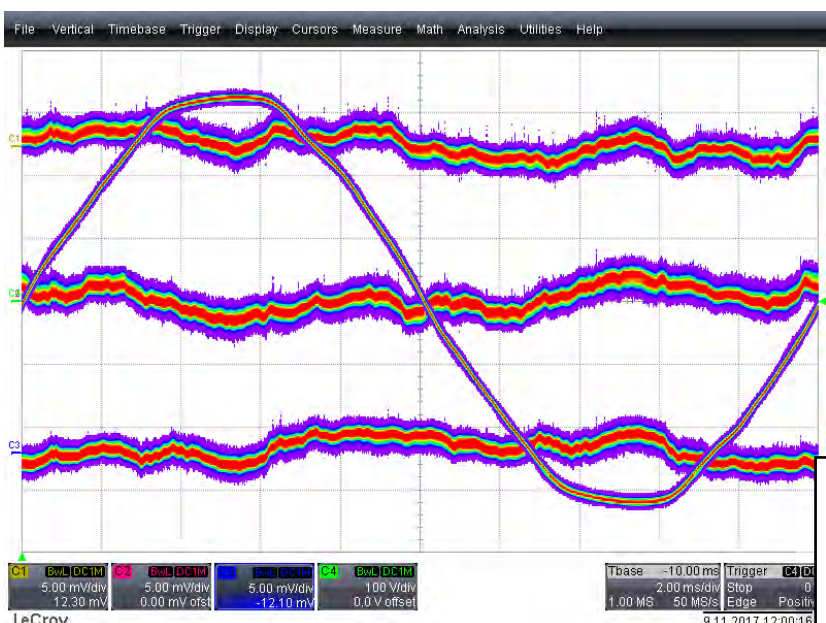
Kaapeli 90

Pvm	8.11.2017	
klo	15:56	
Kaapelityyppi	APYAKMM	
Poikkipinta [mm ²]	3 x 70	
Pituus [m]	617	
Asennusvuosi	1990	
Päätetyyppi	Lämpökutiste	
Käyttöjännite [kV]	20	
Taustahäiriö- taso [pC]	100	
Purkausten näennäisvaraus [pC]	-	
Tiedostot	PD: 946-1280, Pulssitutkaus: 1283-1352	
Diagnoosi	Ei taustahäiriötason ylittäviä purkauksia	

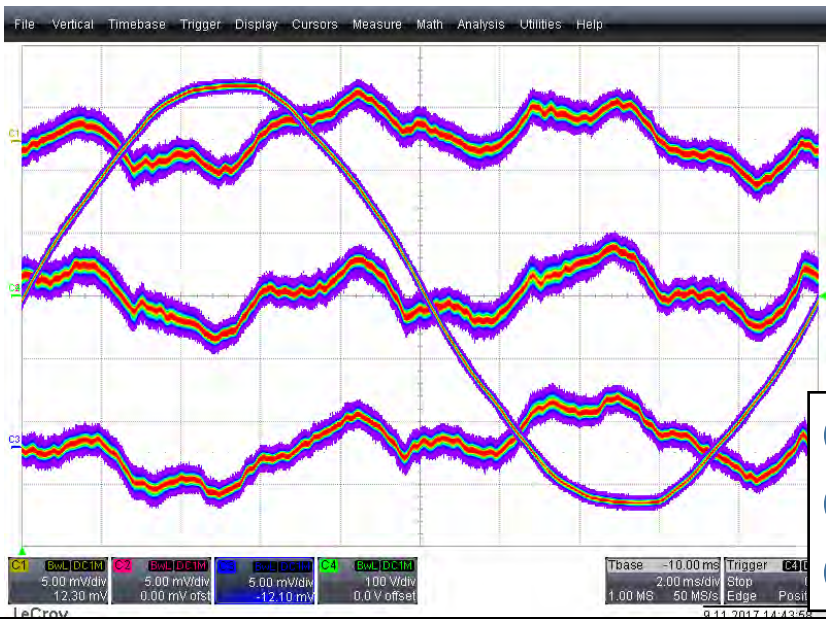
Kaapeli 91

Pvm	9.11.2017		
klo	9:51		
Kaapelityyppi	APYAKMM		
Poikkipinta [mm2]	3 x 185		
Pituus [m]	155		
Asennusvuosi	1983		
Päätetyyppi	Posliini		
Käyttöjännite [kV]	20		
Taustahäiriö- taso [pC]	17		
Purkausten näennäisvaraus [pC]	-		
Tiedostot	PD: 1355-1670, Pulssitutkaus: 1671-1733, 1734		
Diagnoosi	Ei taustahäiriötason ylittäviä purkauksia		

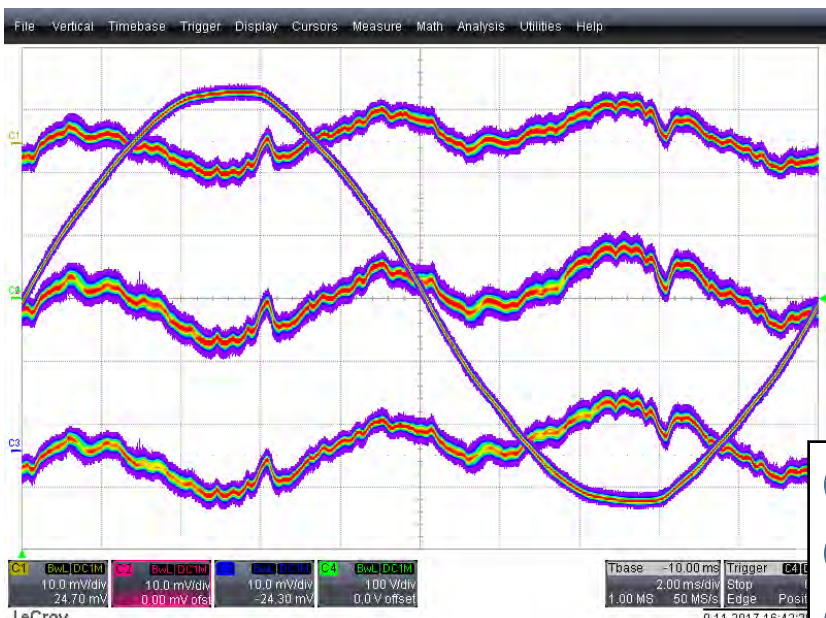
Kaapeli 92

Pvm	9.11.2017		
klo	12:00		
Kaapelityyppi	APYAKMM		
Poikkipinta [mm ²]	3 x 120		
Pituus [m]	328		
Asennusvuosi	1977		
Päätetyyppi	Posliini		
Käyttöjännite [kV]	20		
Taustahäiriö- taso [pC]	13		
Purkausten näennäisvaraus [pC]	-		
Tiedostot	PD: 1737-2060, Pulssitutkaus: 2062-2127		
Diagnoosi	Ei taustahäiriötason ylittäviä purkauksia		

Kaapeli 93

Pvm	9.11.2017	
klo	14:43	
Kaapelityyppi	APYAKMM	
Poikkipinta [mm ²]	3 x 185	
Pituus [m]	342	
Asennusvuosi	1973	
Päätetyyppi	Posliini	
Käyttöjännite [kV]	20	
Taustahäiriö- taso [pC]	10	
Purkausten näennäisvaraus [pC]	-	
Tiedostot	PD: 2130-2232, 2233-2593, Pulssitutkaus: 2594-2648	
Diagnoosi	Ei taustahäiriötason ylittäviä purkauksia	

Kaapeli 94

Pvm	9.11.2017	
klo	16:42	
Kaapelityyppi	APYAKMM	
Poikkipinta [mm2]	3 x 185	
Pituus [m]	207	
Asennusvuosi	1983	
Päätetyyppi	Posliini	
Käyttöjännite [kV]	20	
Taustahäiriötaso [pC]	14	
Purkausten näennäisvaraus [pC]	-	
Tiedostot	PD: 2652-2979, Pulssitutkaus: 2980-3063, 3064	
Diagnoosi	Ei taustahäiriötason ylittäviä purkauksia	

Liite F: Pry-Cam-mittausten tulokset

Tässä liitteessä on esitetty Prysmian Finland Oy:n ja Dekra Industrial Oy:n tekemien HFCT-mittausten tulokset. Kaikista tehdyistä mittauksista on esitetty PRPD-kuvat ja mittalaitteen laskemat osittaispurkaustunnusluvut. Tunnuslukujen merkitys selviää alla olevasta taulukosta.

qMax 95 %	Upper value in the amplitude range where the 95 percentile of the total measured charges falls.
N	Total number of acquired pulses.
Nw	Number of pulses per synchronization wave period (usually [50Hz] ⁻¹ , [60Hz] ⁻¹).
φMin°	Minimum inception phase angle.
Δφ °	Total phase interval.
qMin 95 %	Lower limit of the amplitude range where the 95percentile of the total measured charges falls.
qMean	Mean value of the measured charges.
φMin	Mean inception phase angle.

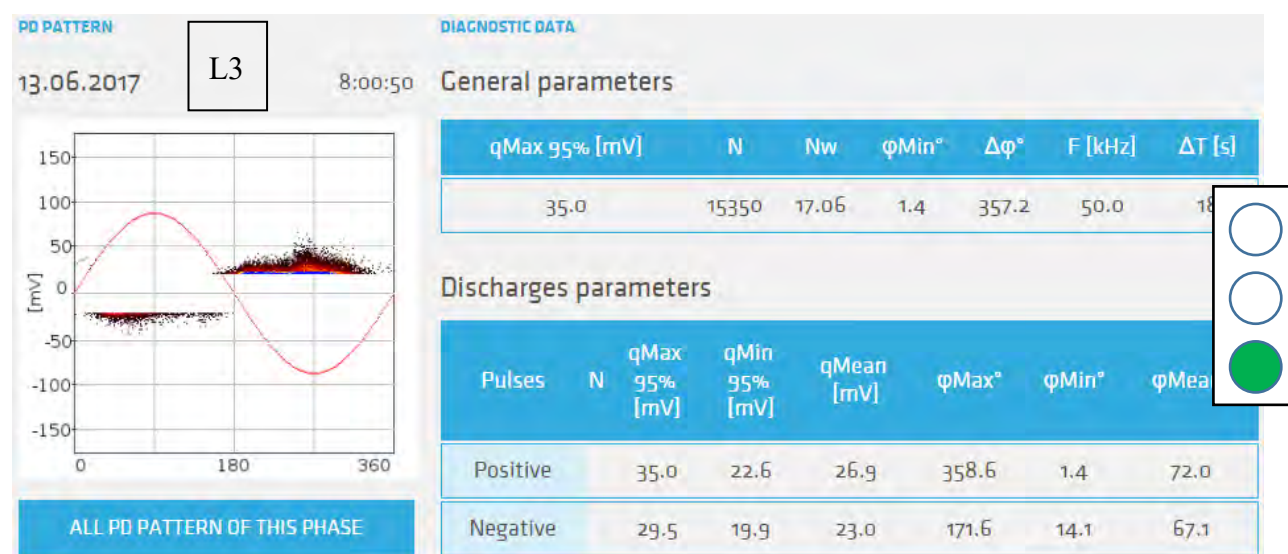
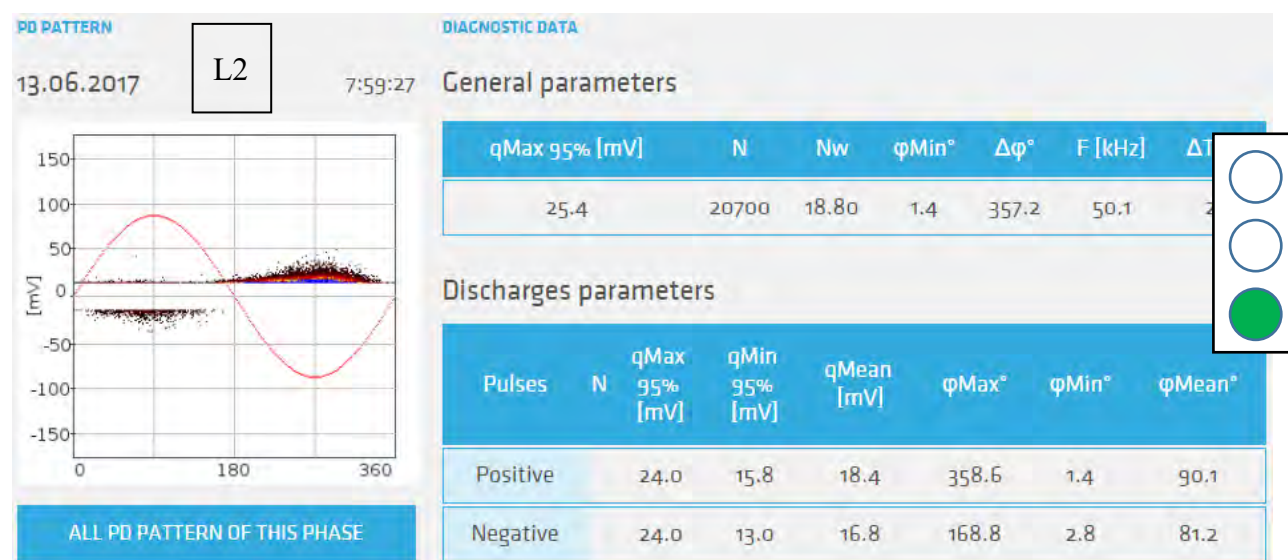
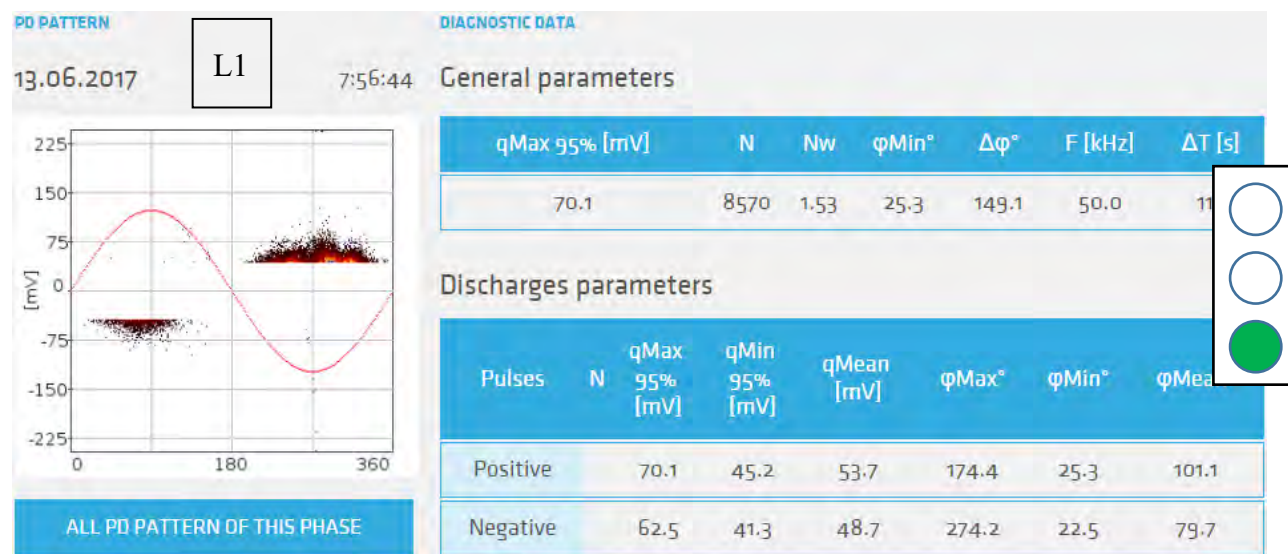
Kunkin mittaustuloksen yhteydessä on lisäksi “liikennevalot” osoittamassa Pry-Cam-mittauksen perusteella tehtyä diagnoosia:

vihreä = ei edellytä toimenpiteitä

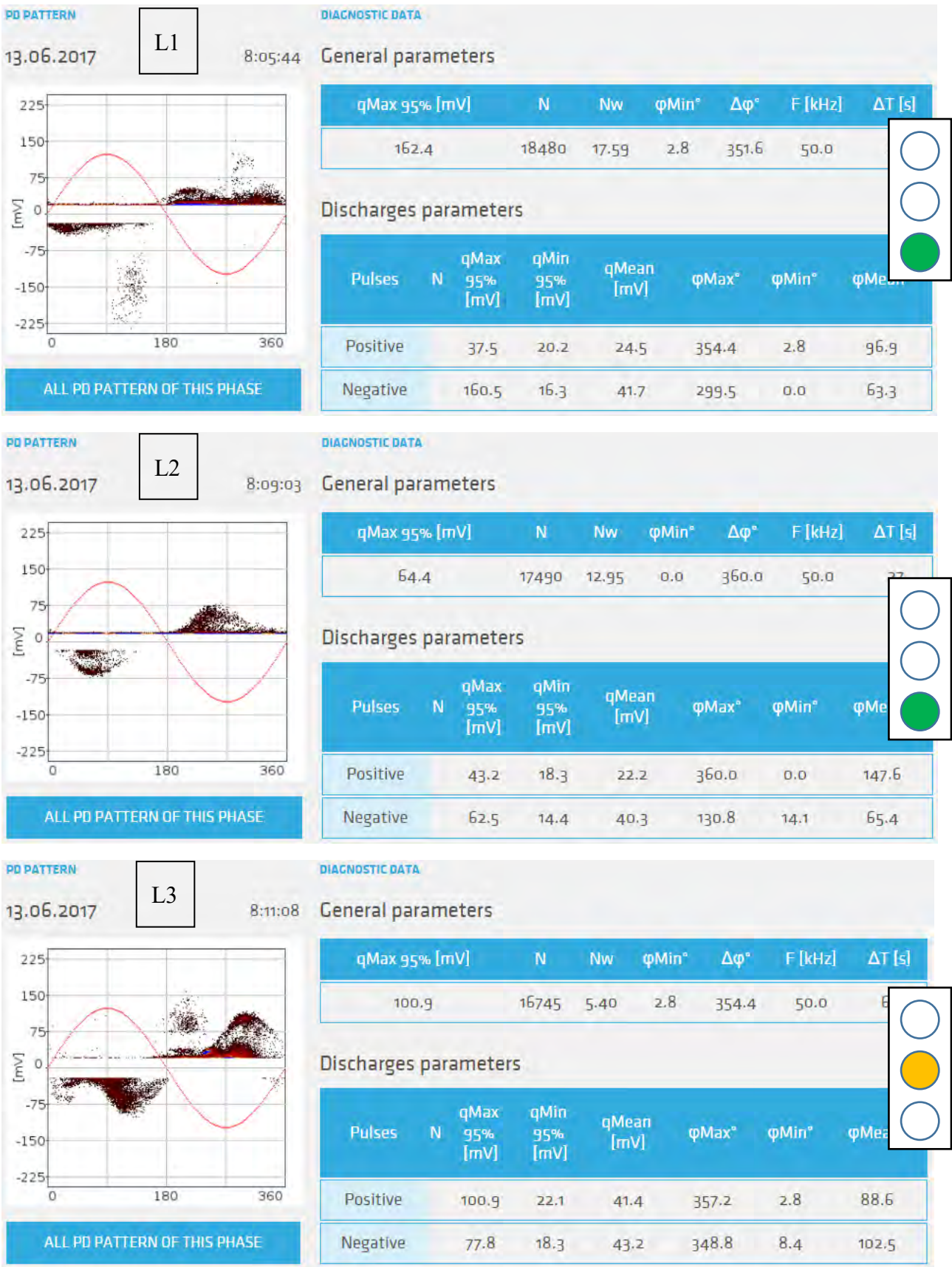
keltainen = tarkempi tutkimus ja/tai seuranta suositeltavaa

punainen = edellyttää toimenpiteitä

Pry-Cam MITTAUS 29



Pry-Cam MITTAUS 30

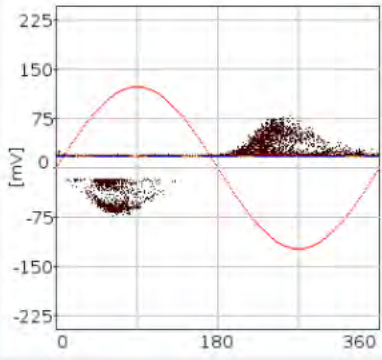


PD PATTERN

13.06.2017

L2

8:09:03



ALL PD PATTERN OF THIS PHASE

DIAGNOSTIC DATA

General parameters

qMax 95% [mV]	N	Nw	ϕ_{Min}°	$\Delta\phi^{\circ}$	F [kHz]	ΔT [s]
64.4	17490	12.95	0.0	360.0	50.0	27

Discharges parameters

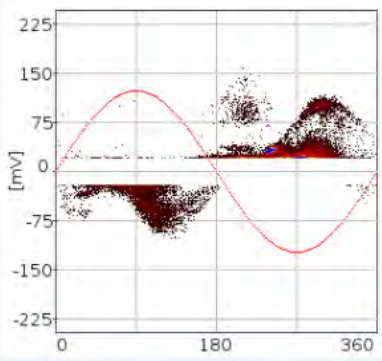
Pulses	N	qMax 95% [mV]	qMin 95% [mV]	qMean [mV]	ϕ_{Max}°	ϕ_{Min}°	ϕ_{Mean}°
Positive	43.2	18.3	22.2	360.0	0.0	147.6	
Negative	62.5	14.4	40.3	130.8	14.1	65.4	

PD PATTERN

13.06.2017

L3

8:11:08



ALL PD PATTERN OF THIS PHASE

DIAGNOSTIC DATA

General parameters

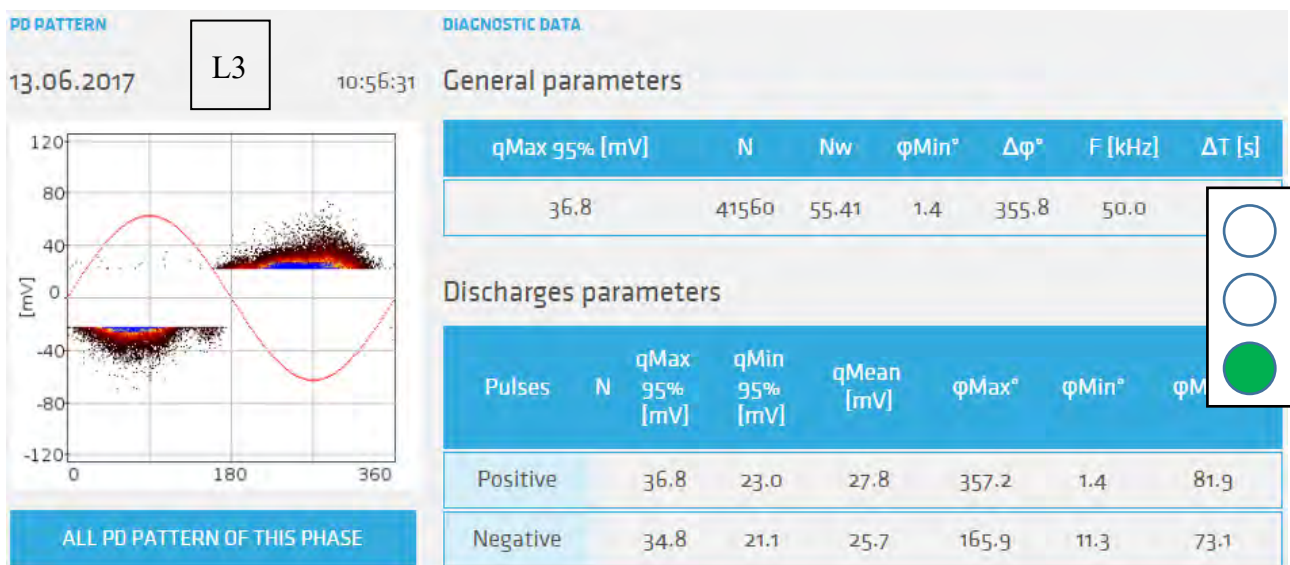
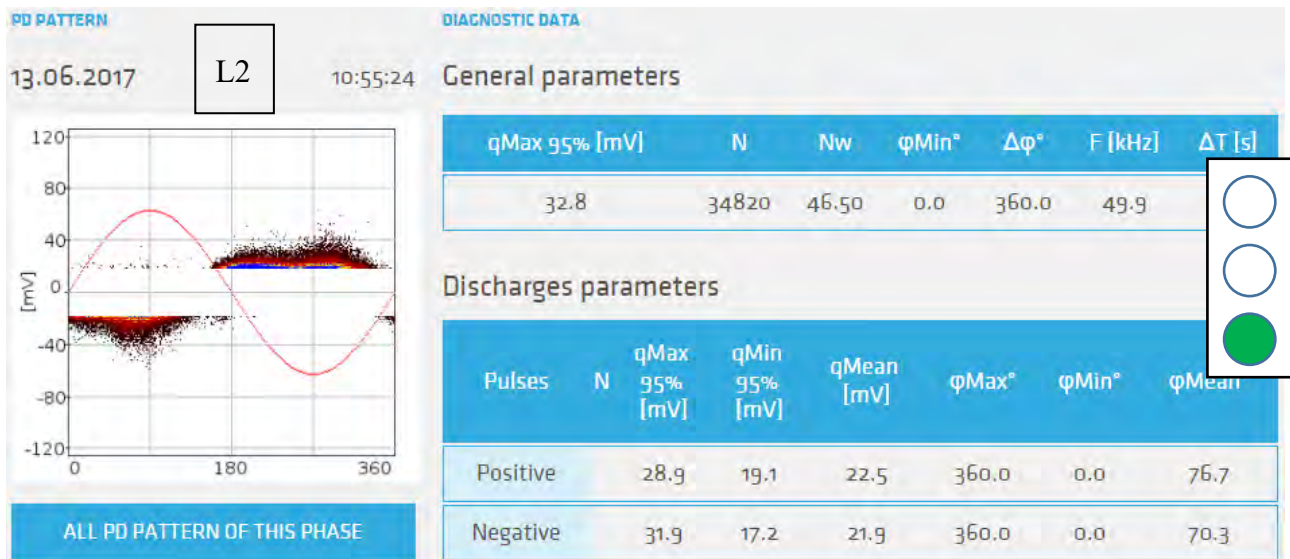
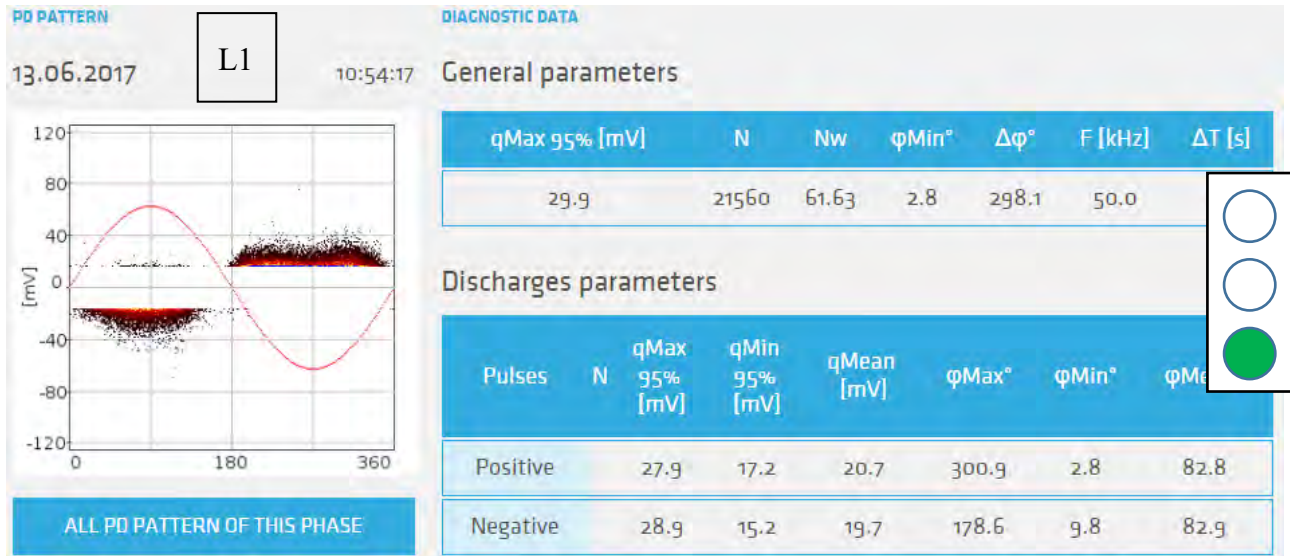
qMax 95% [mV]	N	Nw	ϕ_{Min}°	$\Delta\phi^{\circ}$	F [kHz]	ΔT [s]
100.9	16745	5.40	2.8	354.4	50.0	8

Discharges parameters

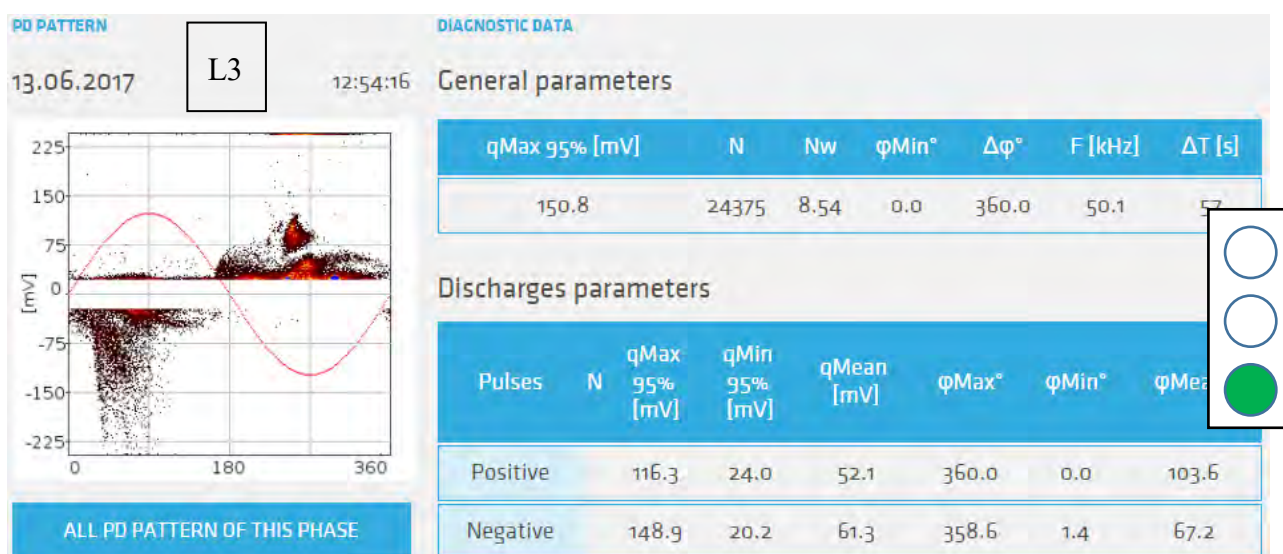
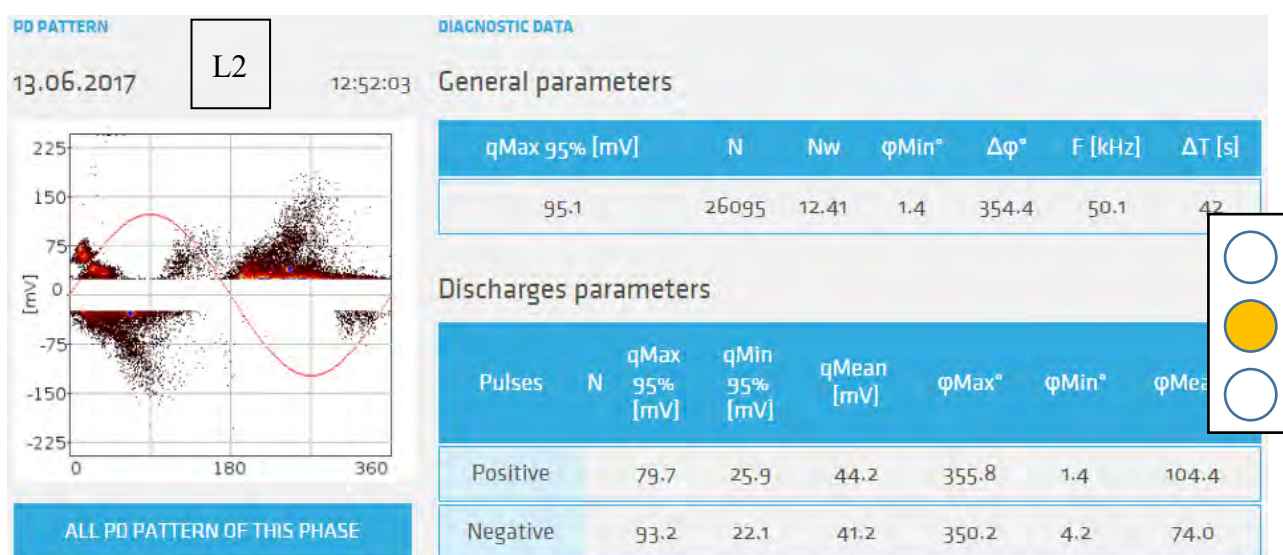
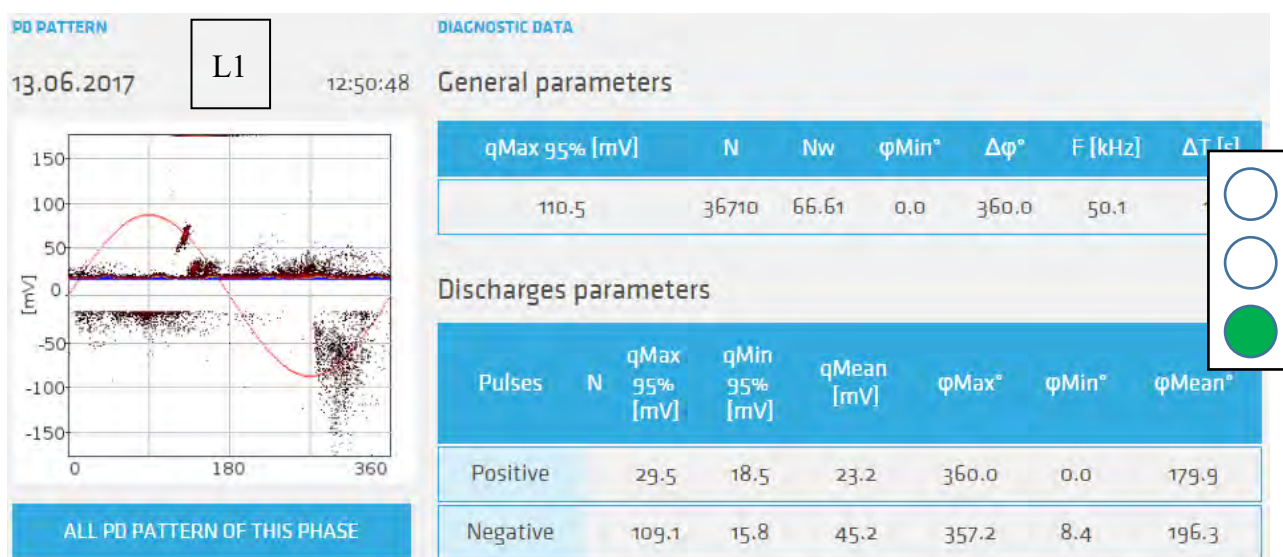
Pulses	N	qMax 95% [mV]	qMin 95% [mV]	qMean [mV]	ϕ_{Max}°	ϕ_{Min}°	ϕ_{Mean}°
Positive	100.9	22.1	41.4	357.2	2.8	88.6	
Negative	77.8	18.3	43.2	348.8	8.4	102.5	

Signal status icons:

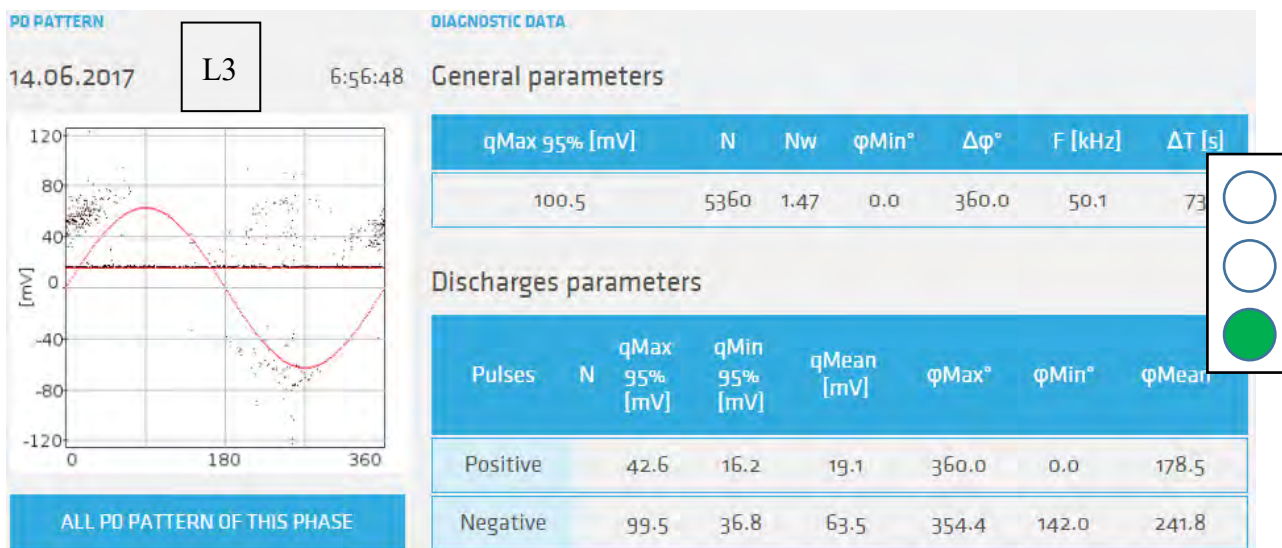
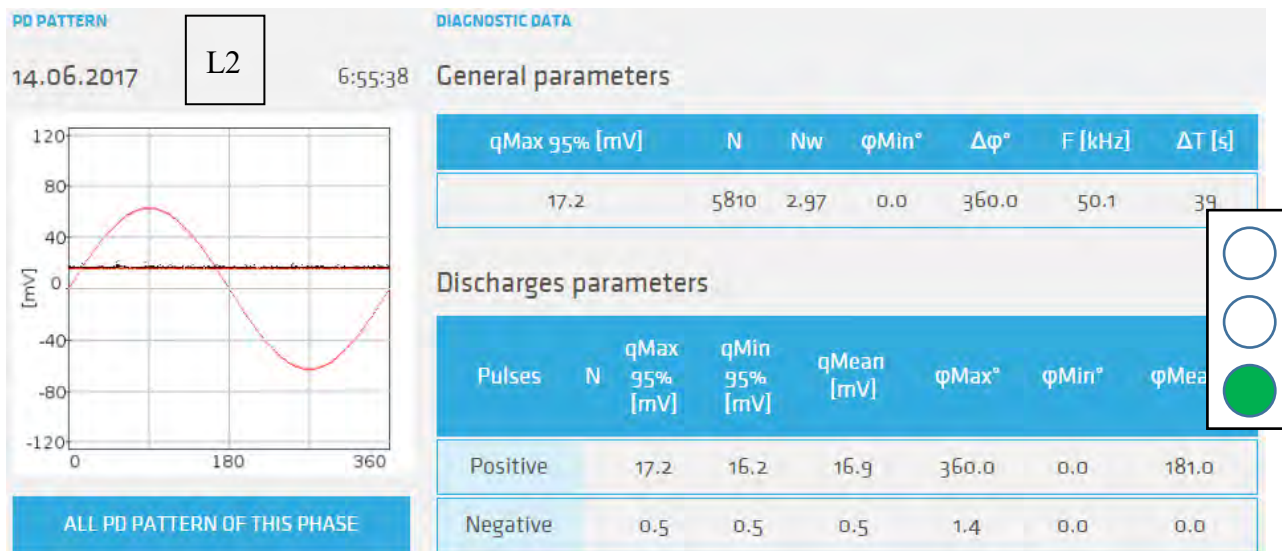
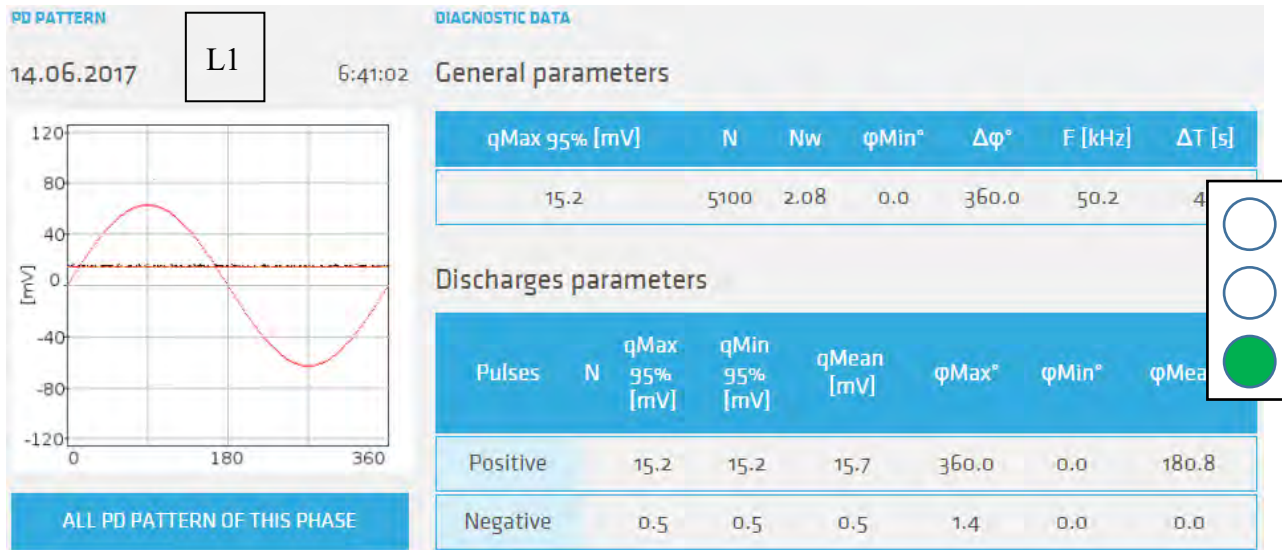
Pry-Cam MITTAUS 31



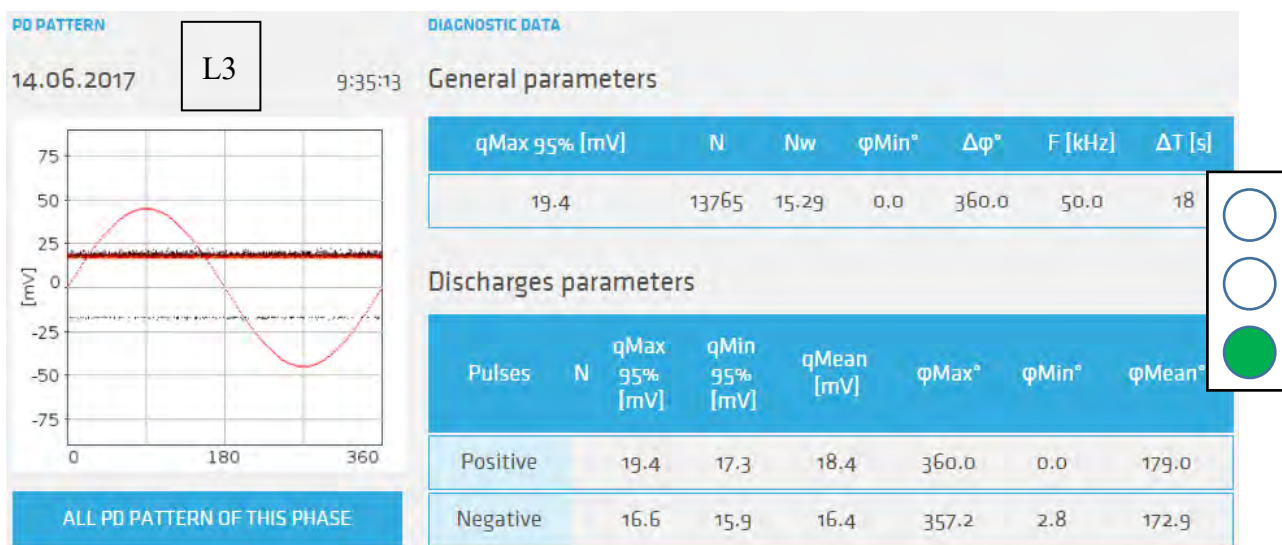
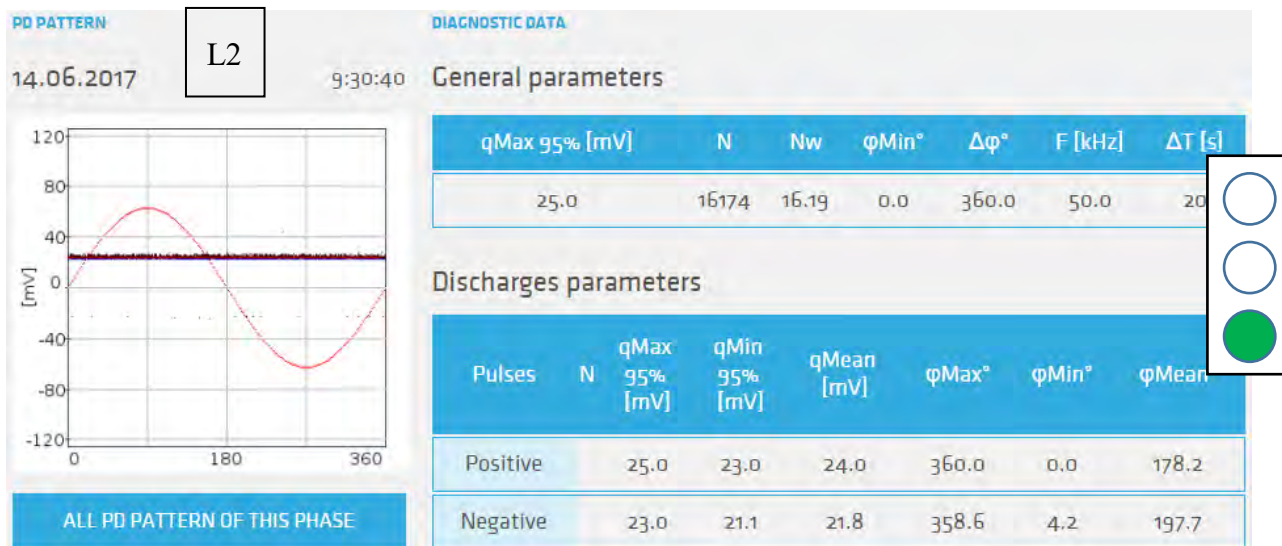
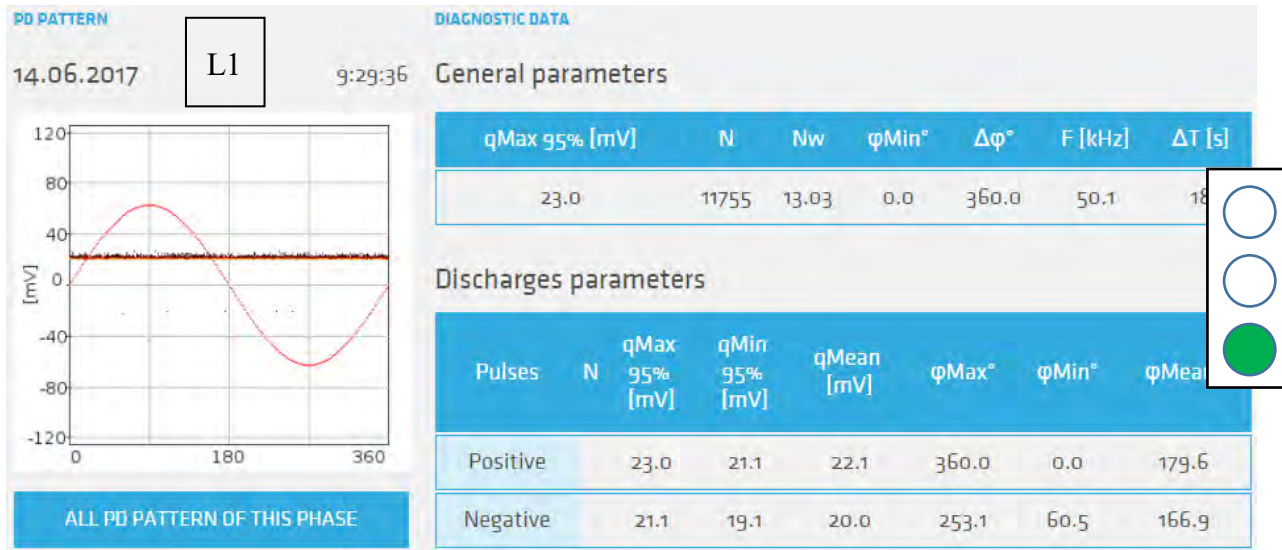
Pry-Cam MITTAUS 32



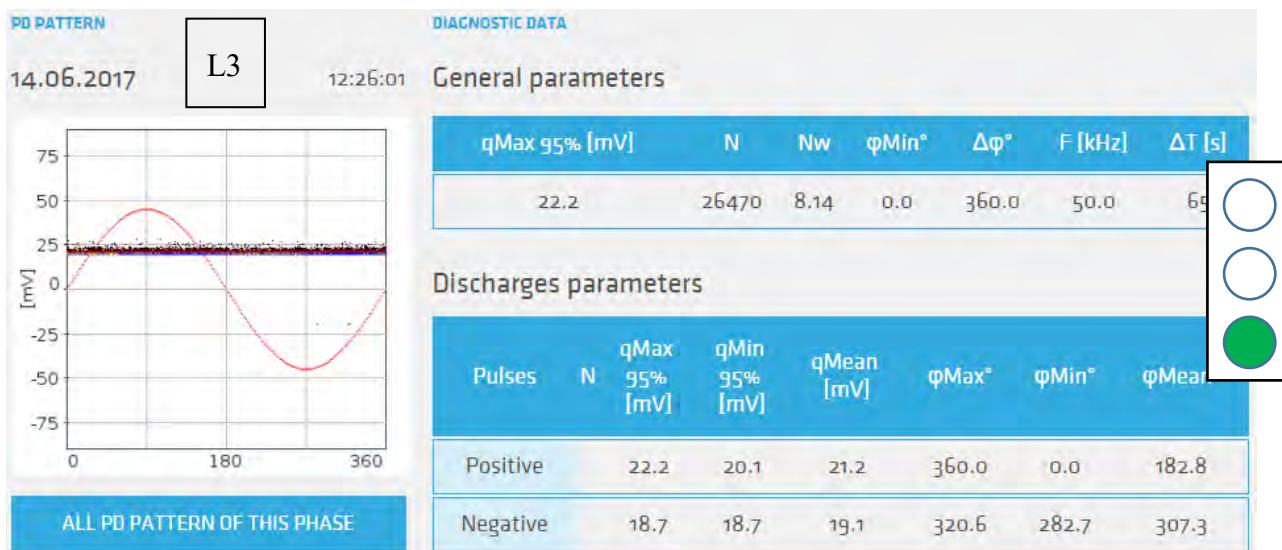
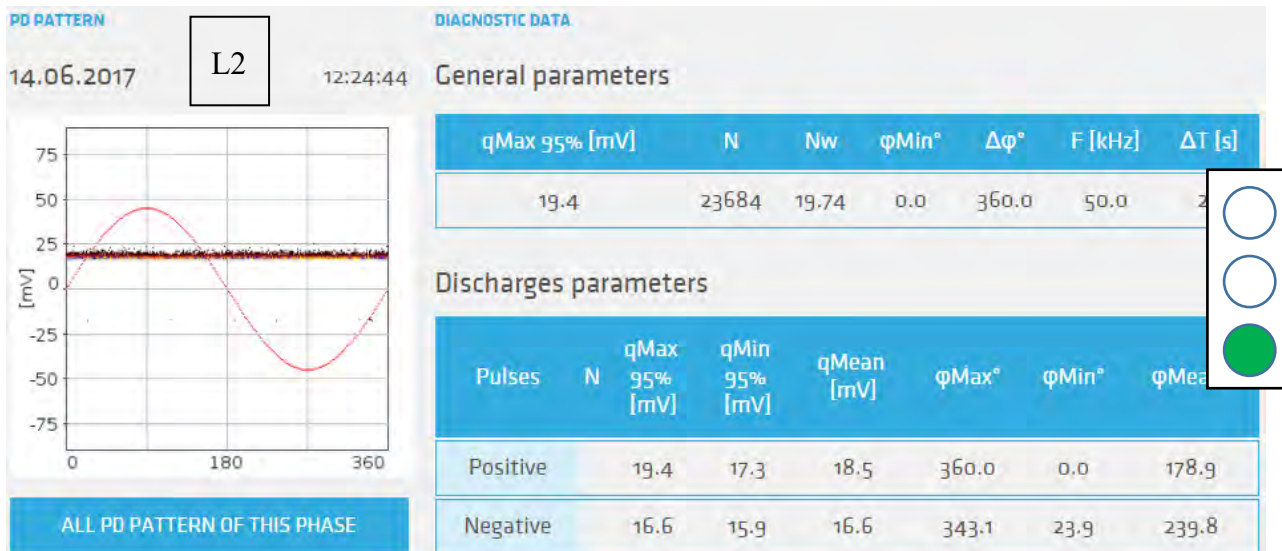
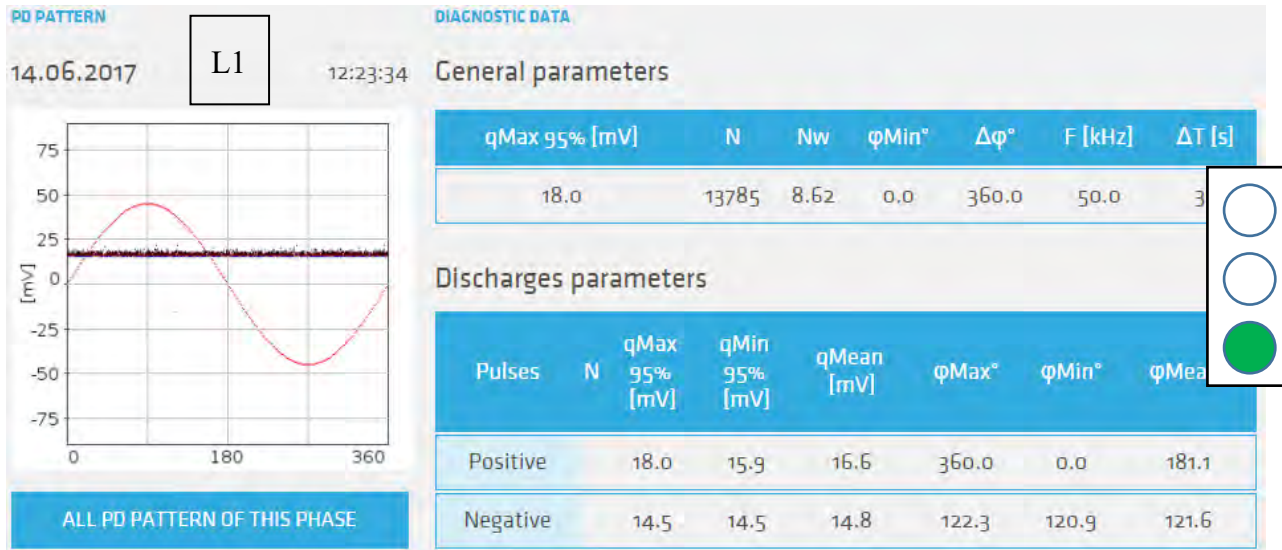
Pry-Cam MITTAUS 33



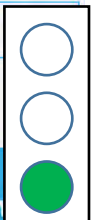
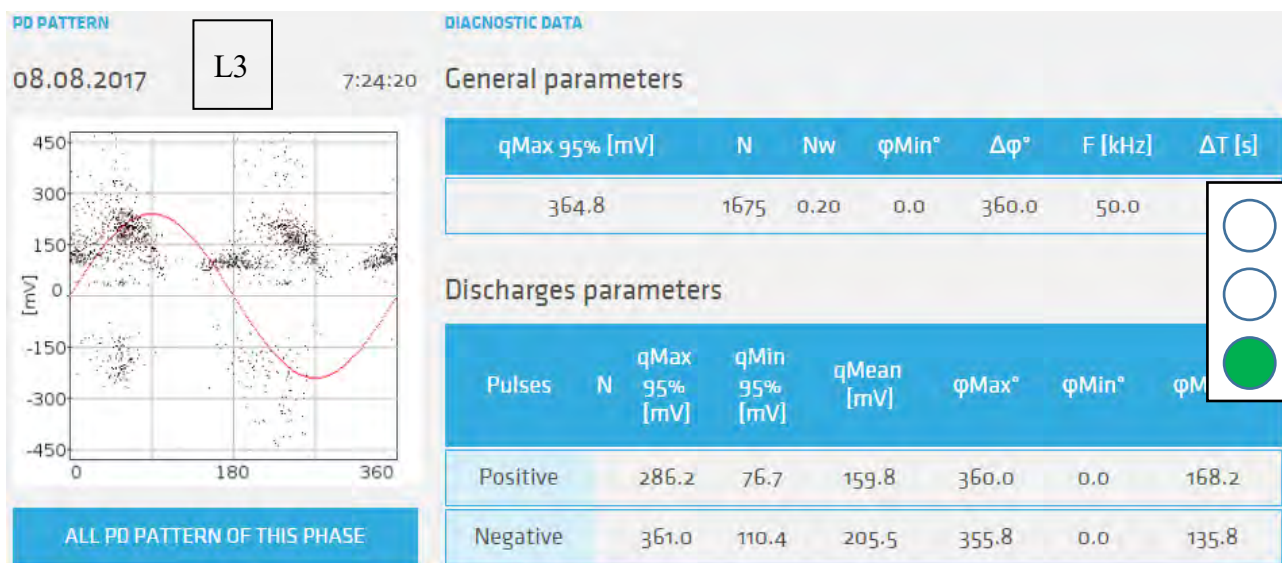
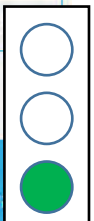
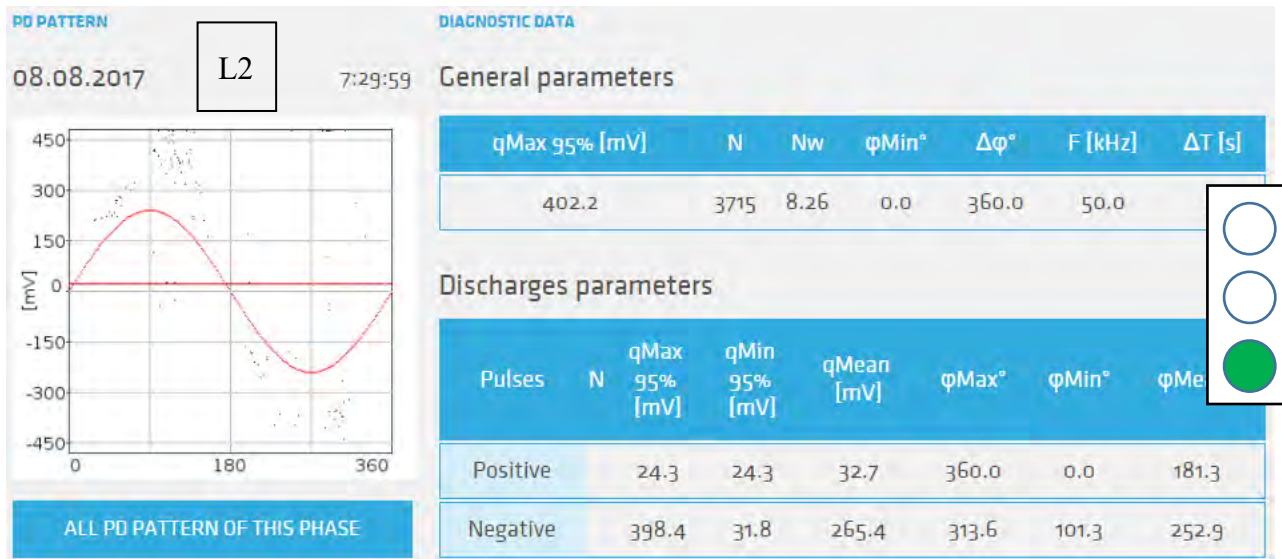
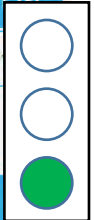
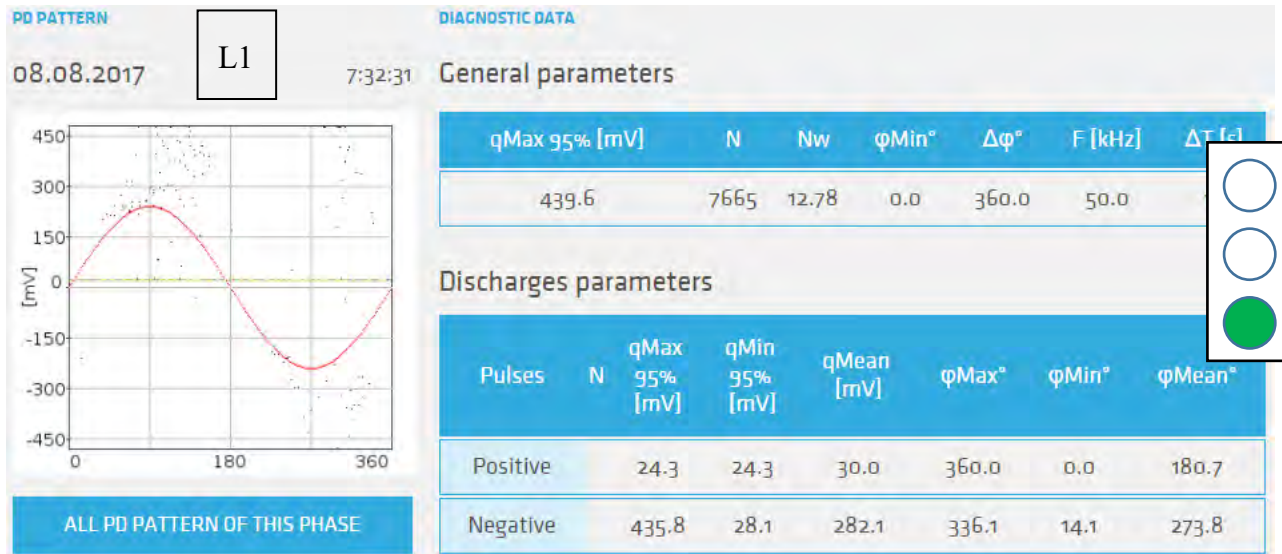
Pry-Cam MITTAUS 34



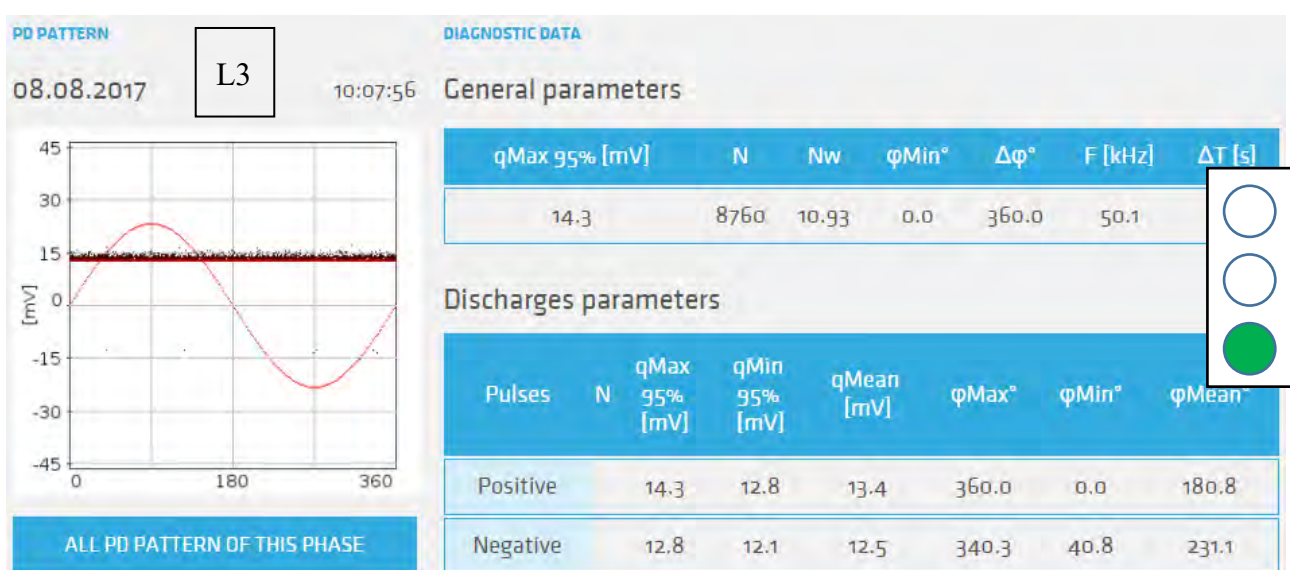
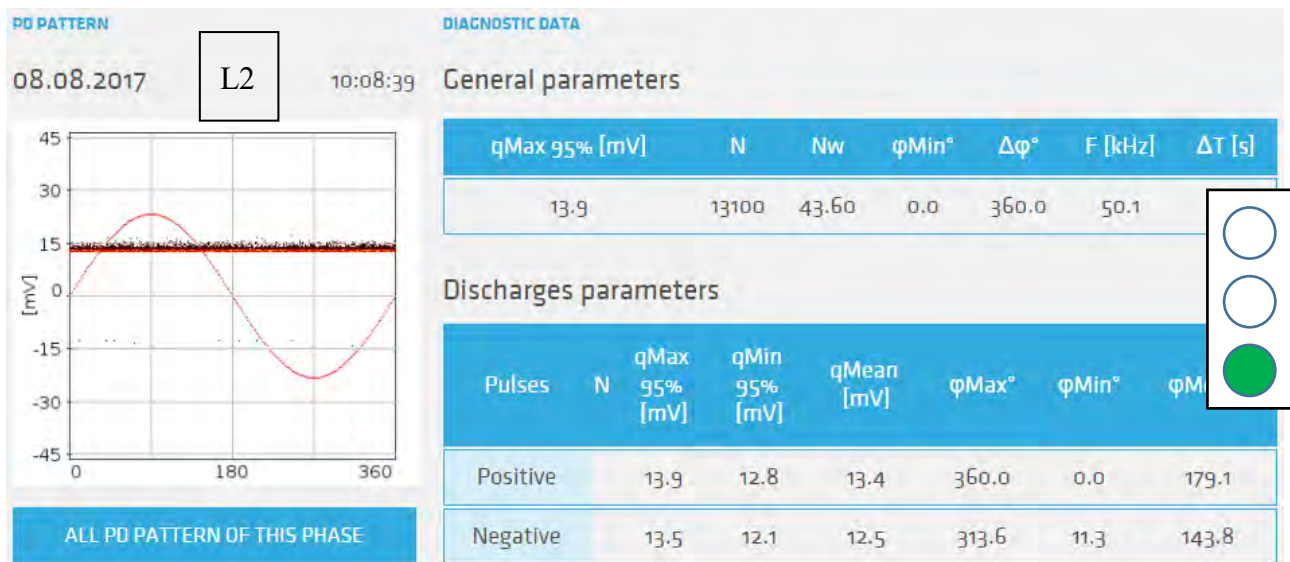
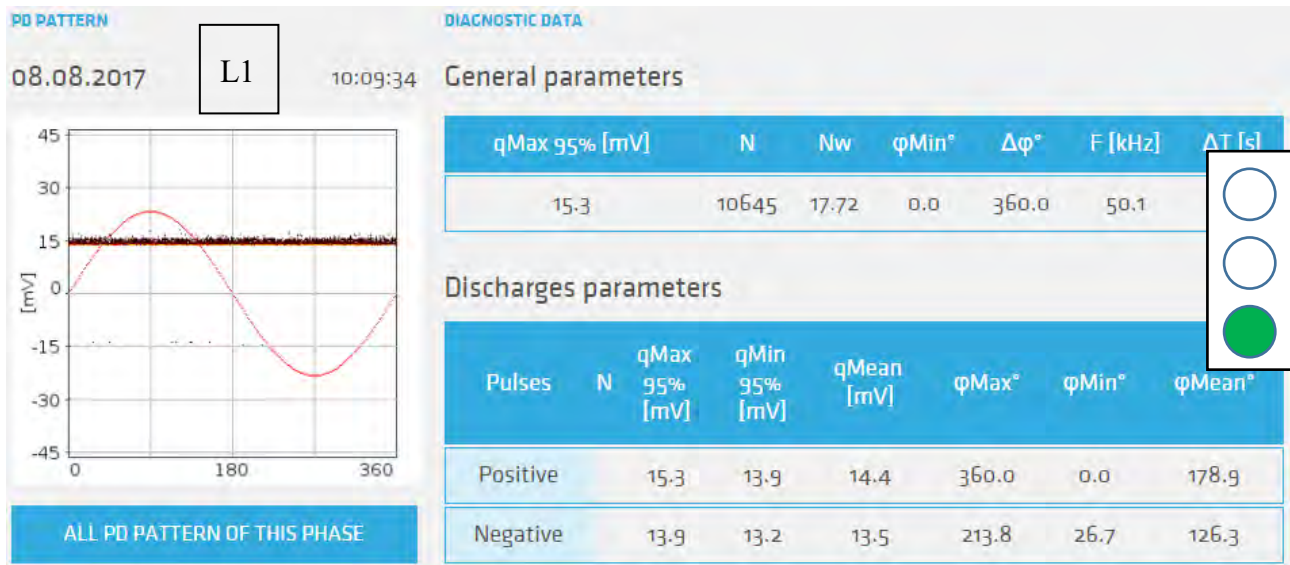
Pry-Cam MITTAUS 35



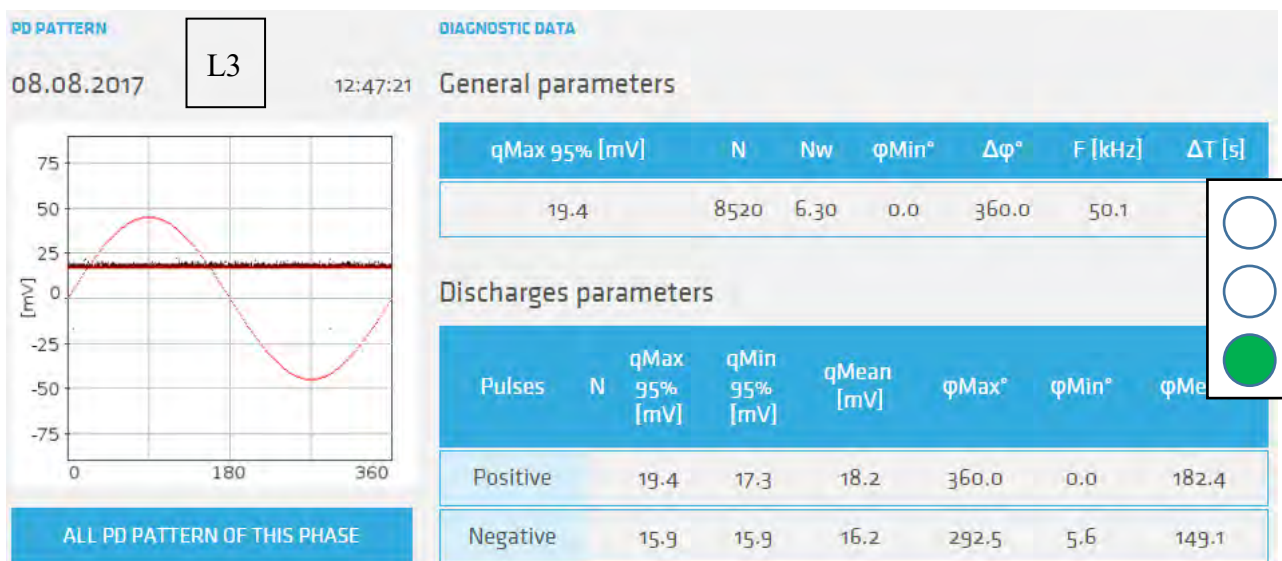
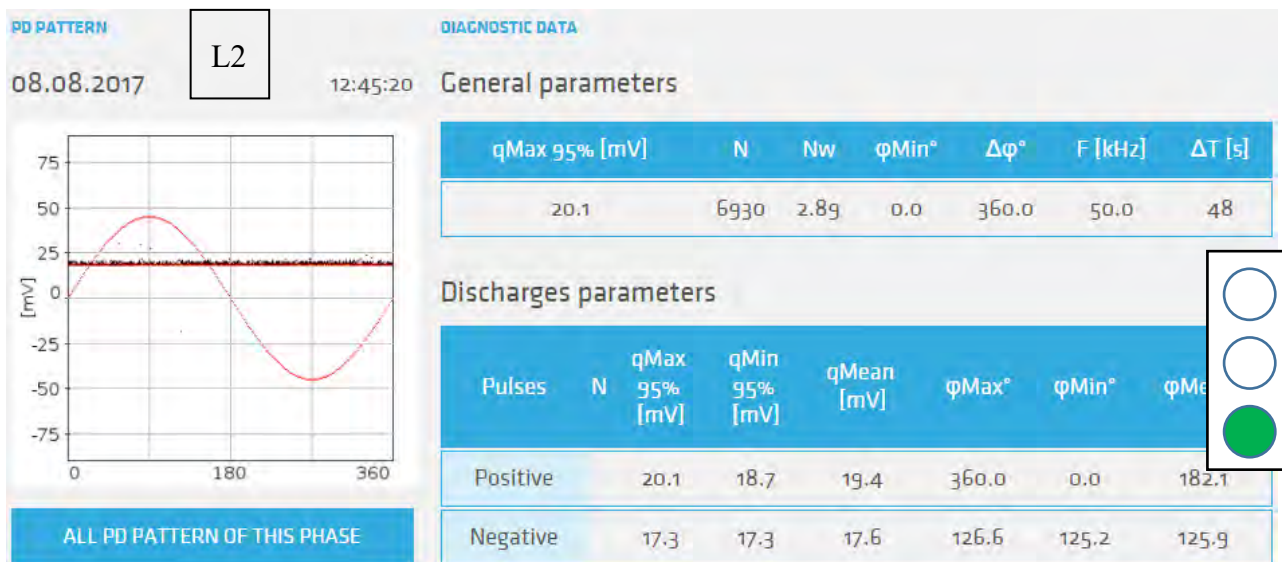
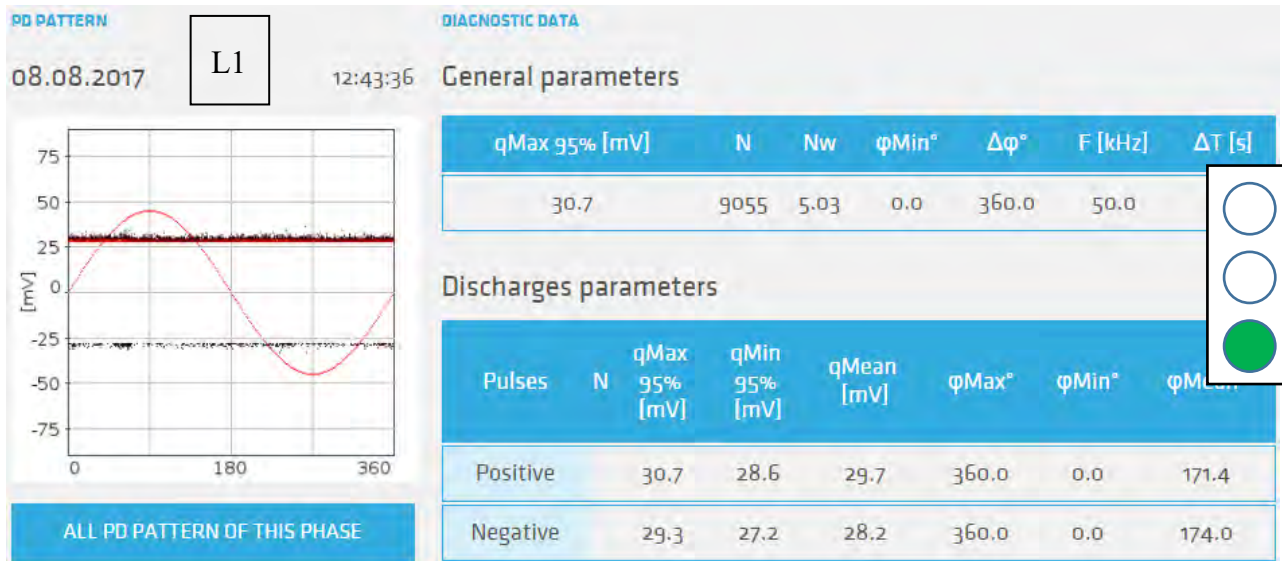
Pry-Cam MITTAUS 44



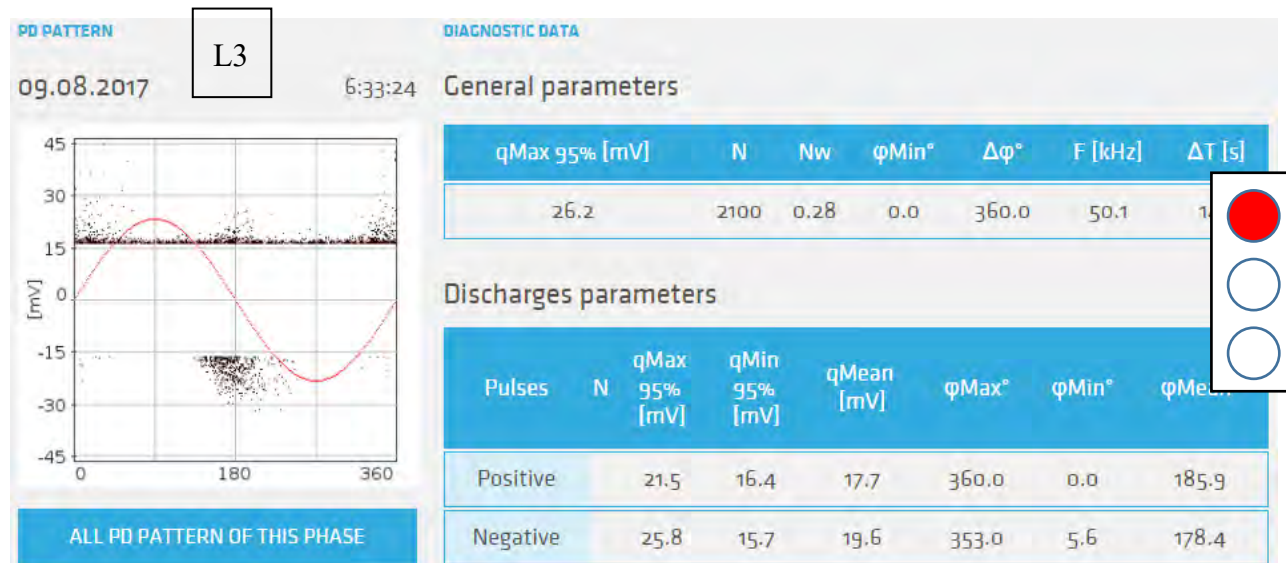
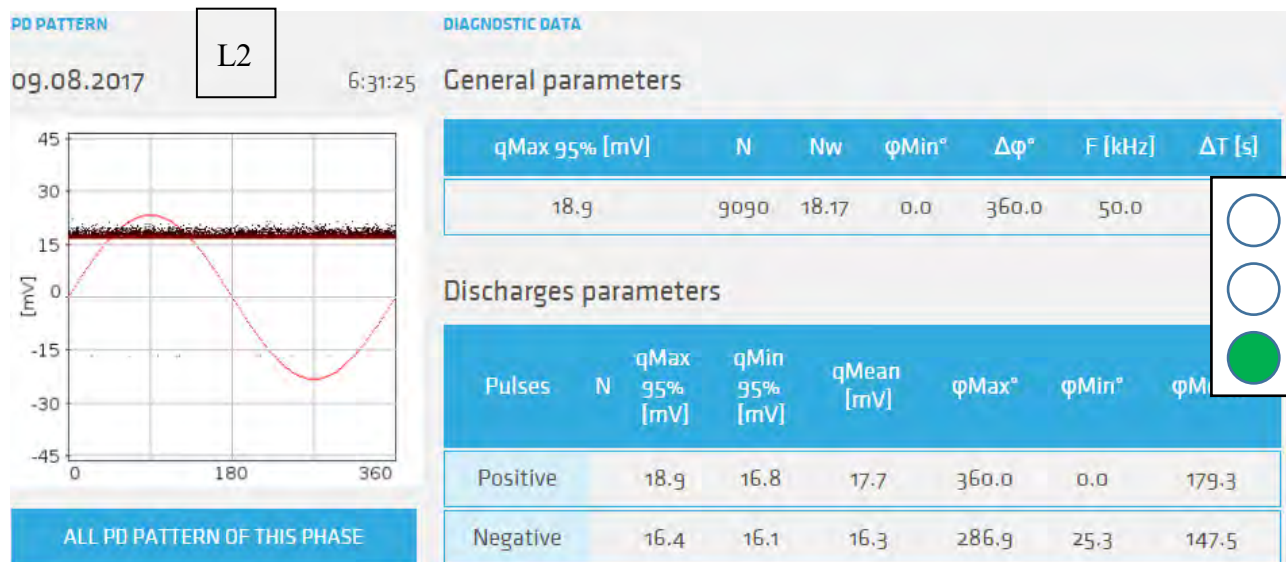
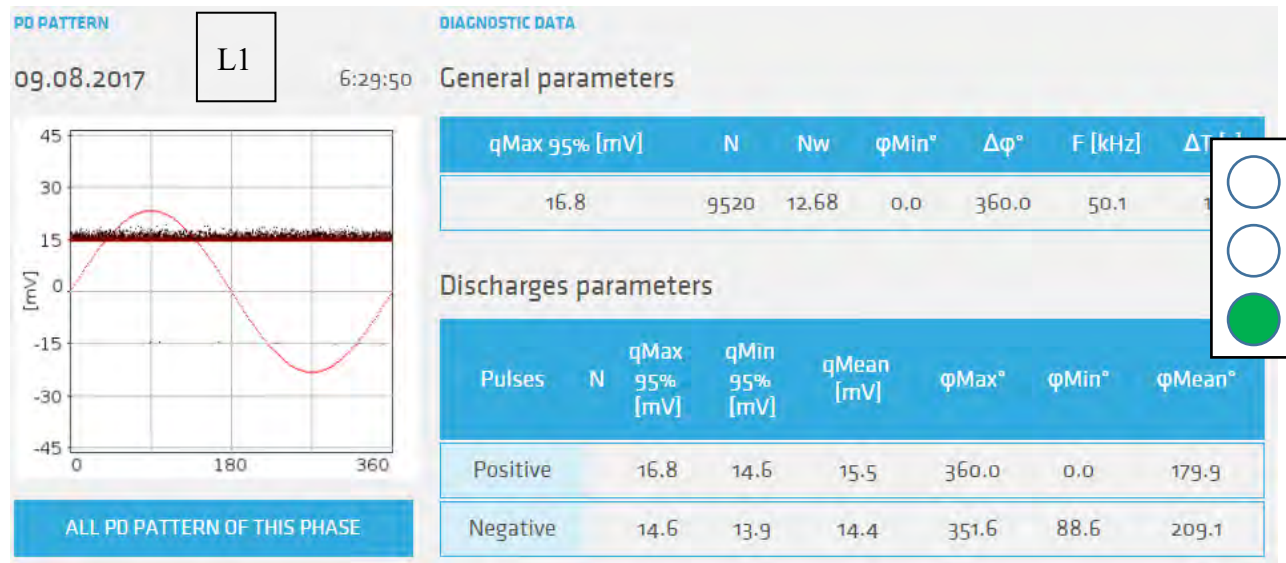
Pry-Cam MITTAUS 45



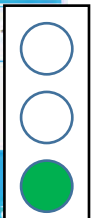
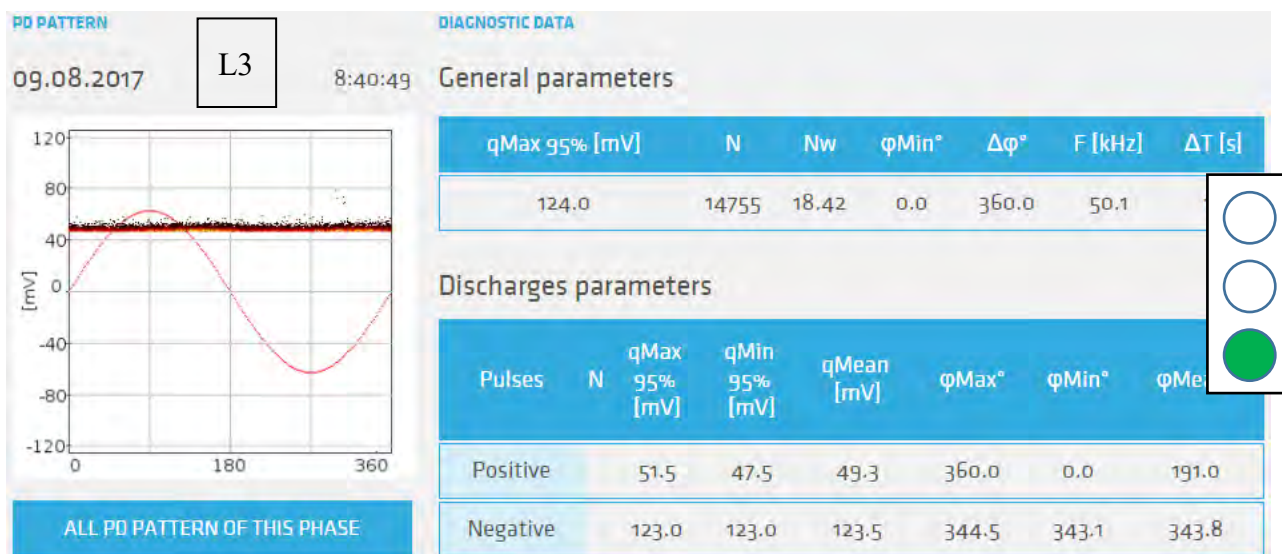
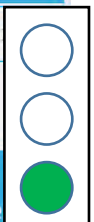
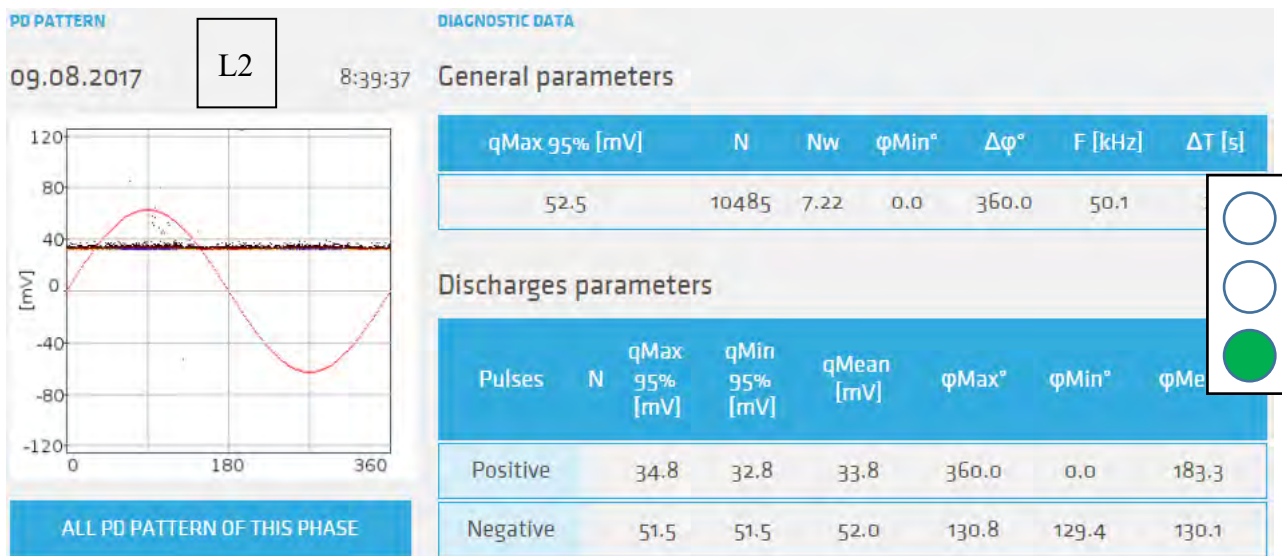
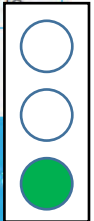
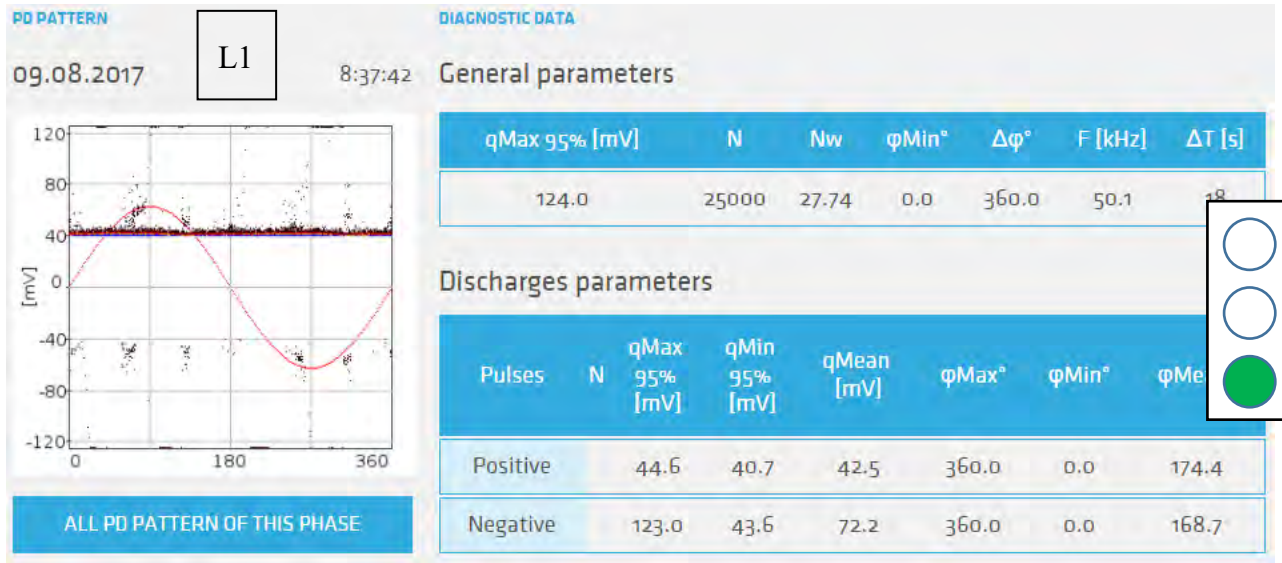
Pry-Cam MITTAUS 46



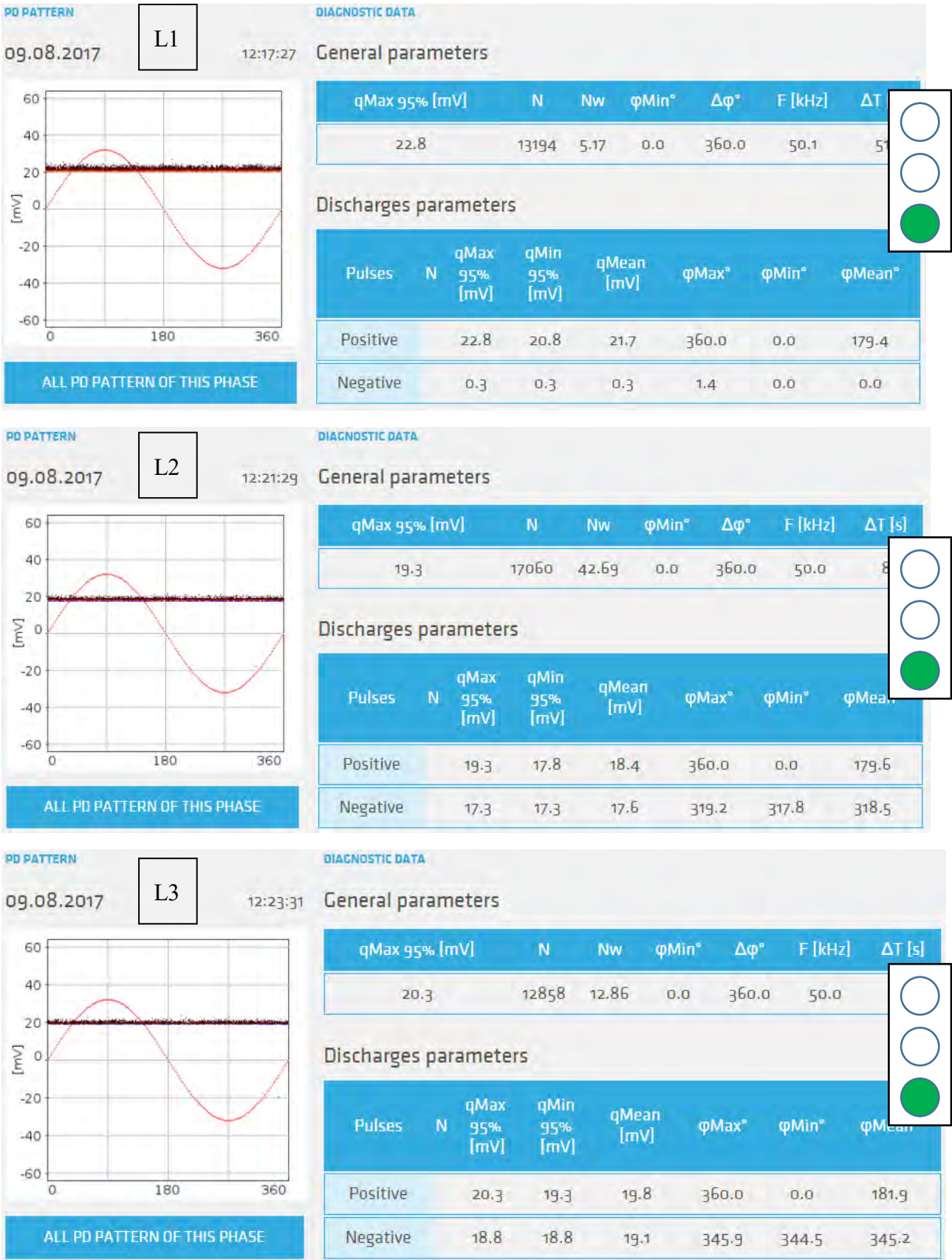
Pry-Cam MITTAUS 47



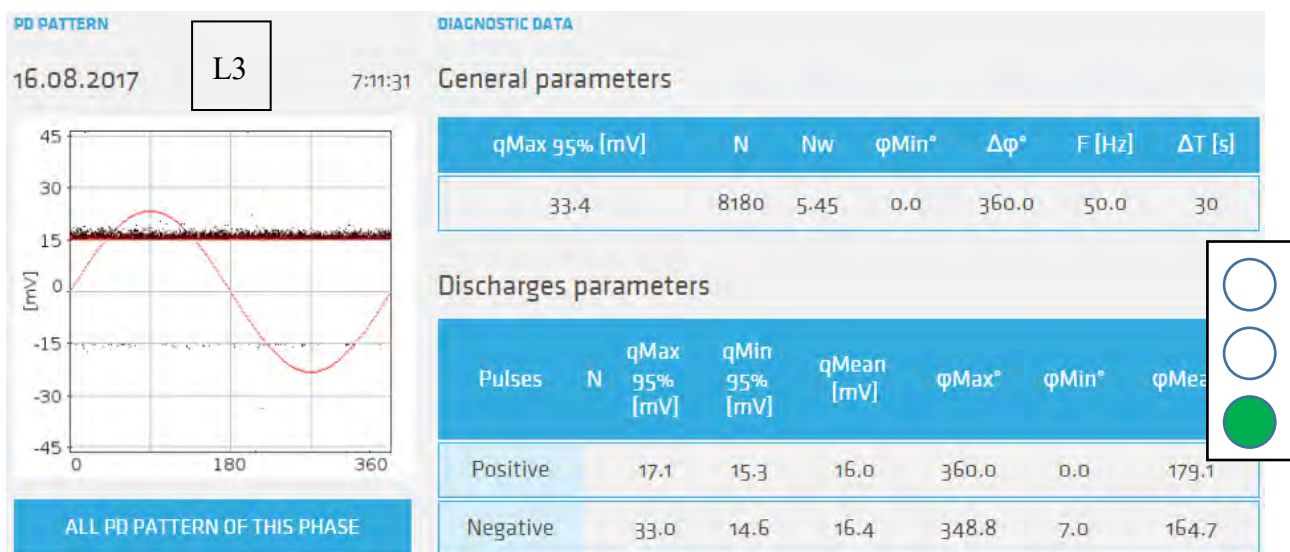
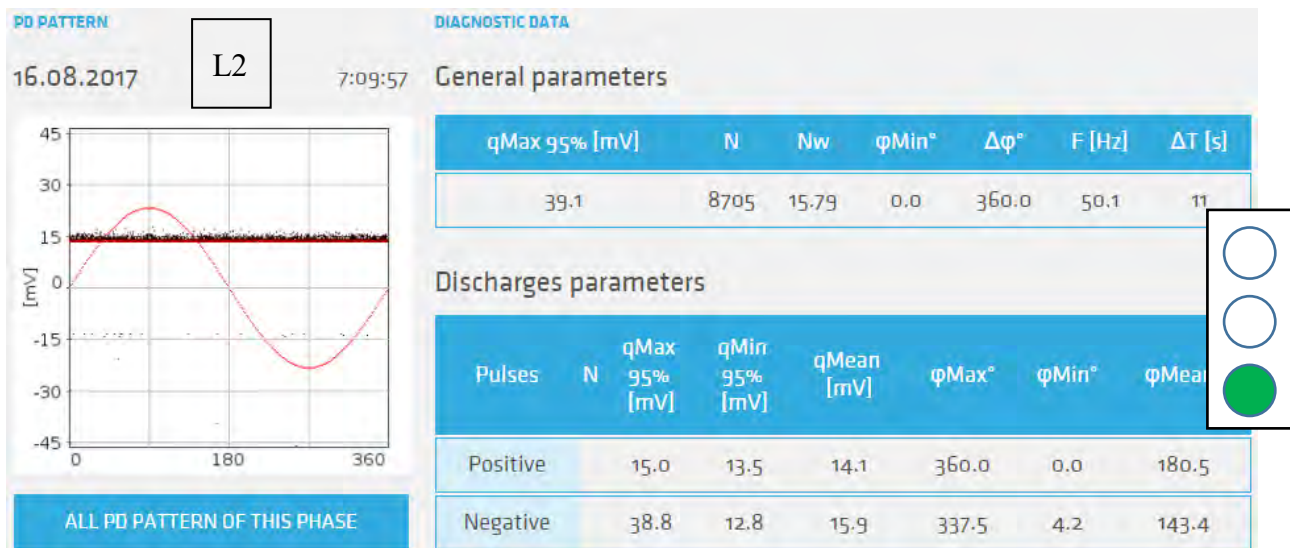
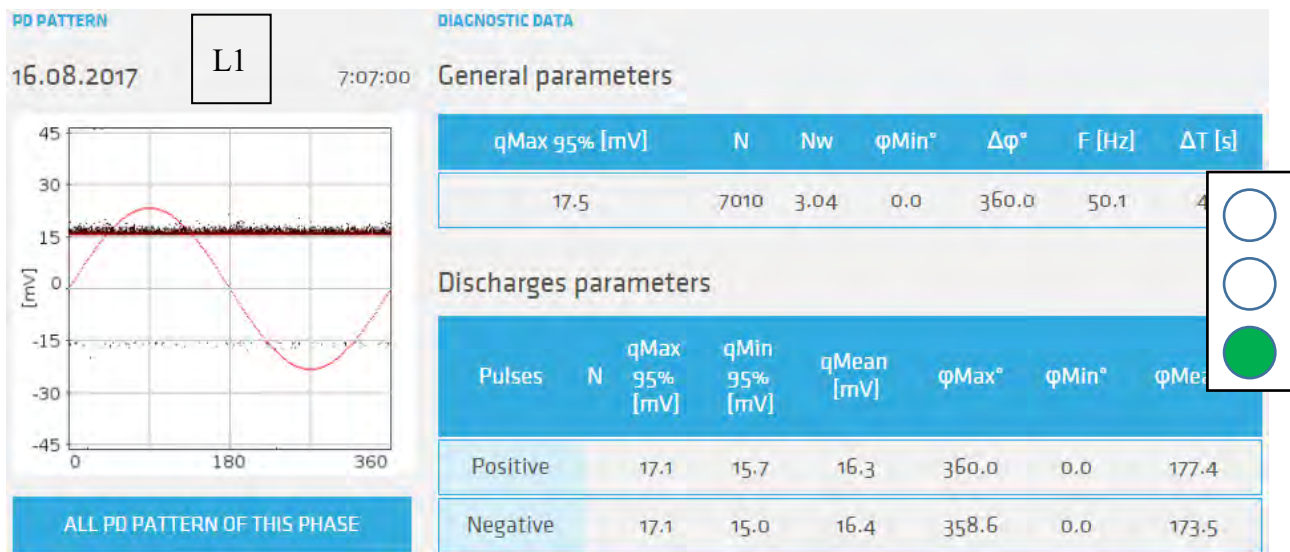
Pry-Cam MITTAUS 48



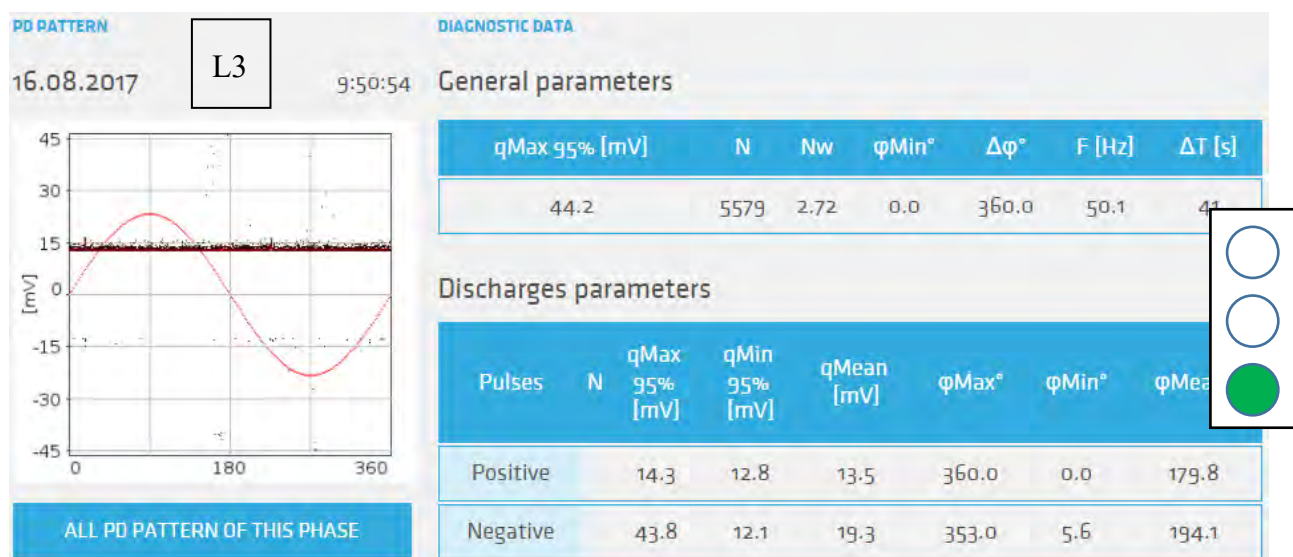
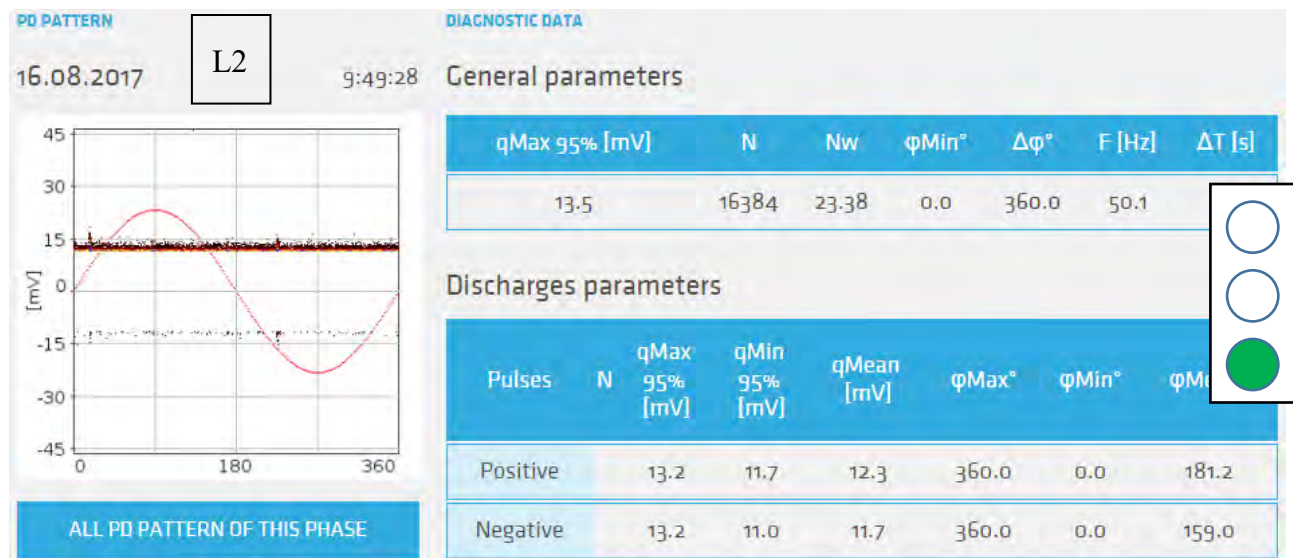
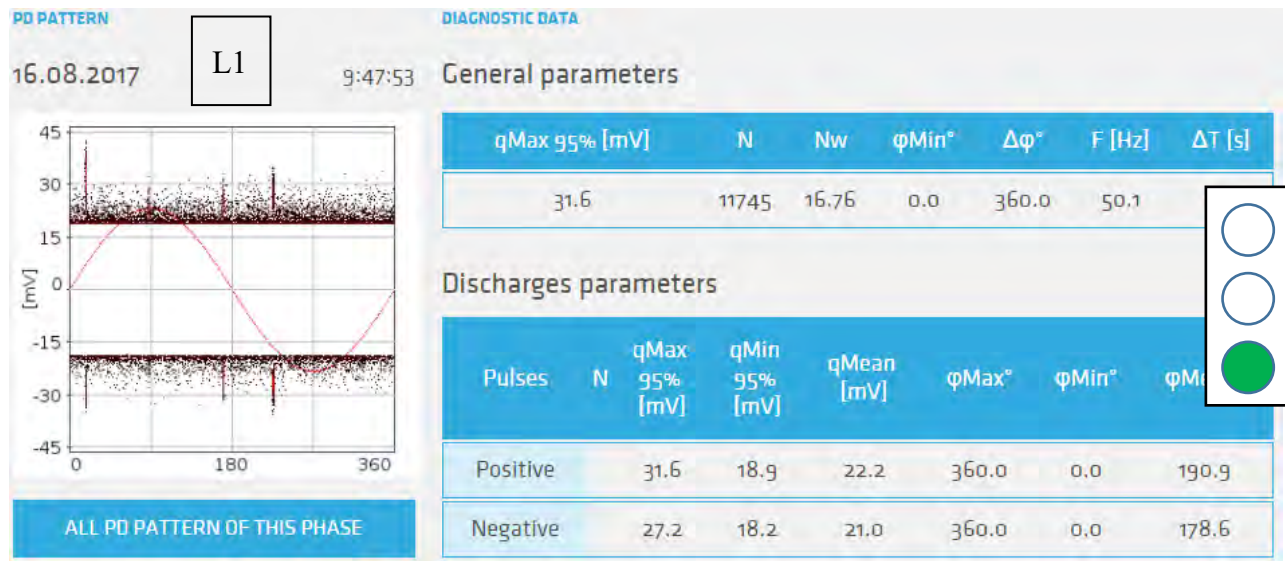
Pry-Cam MITTAUS 49



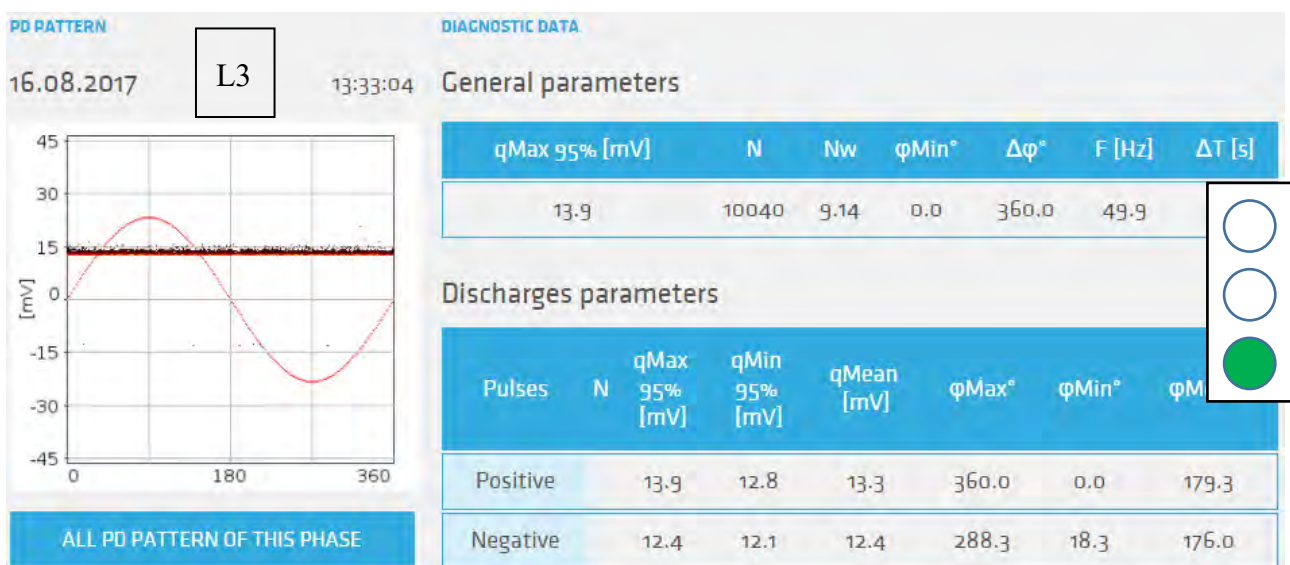
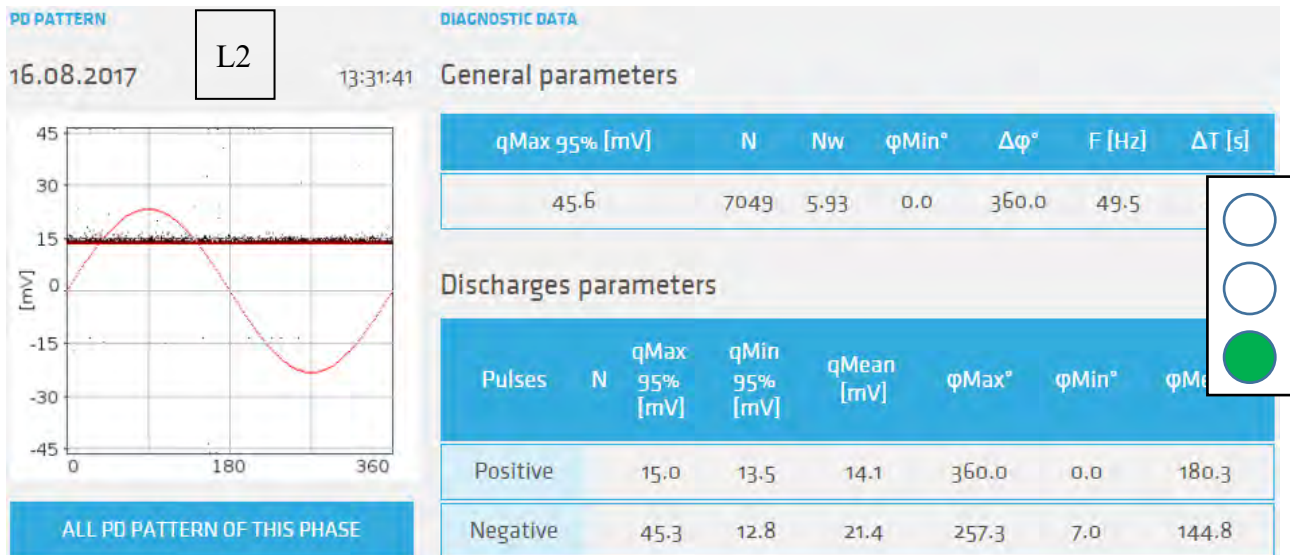
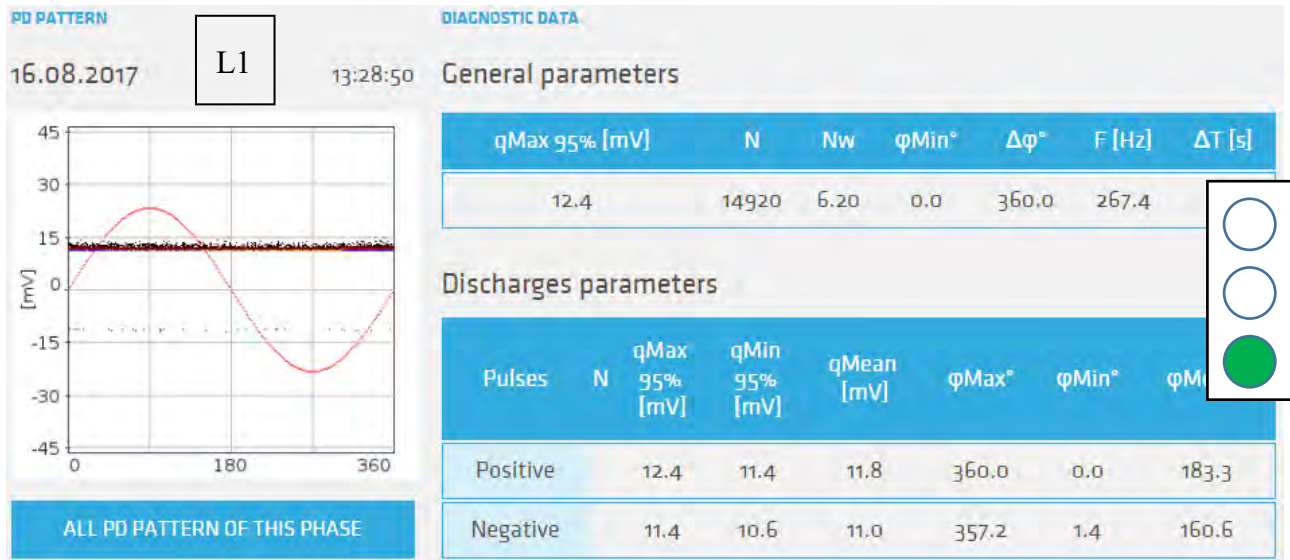
Pry-Cam MITTAUS 53



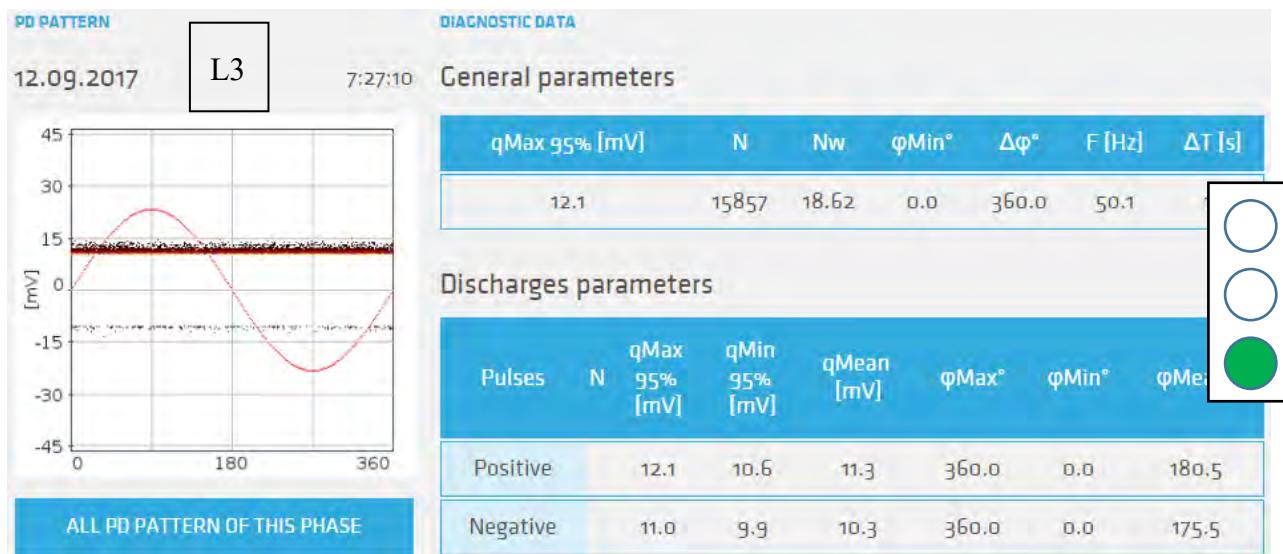
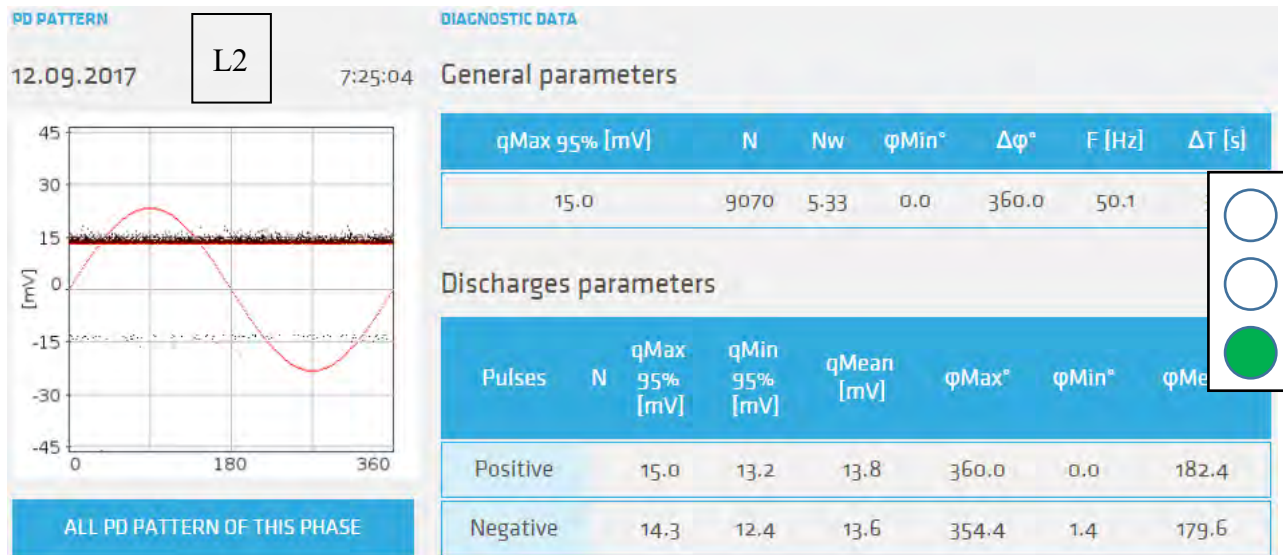
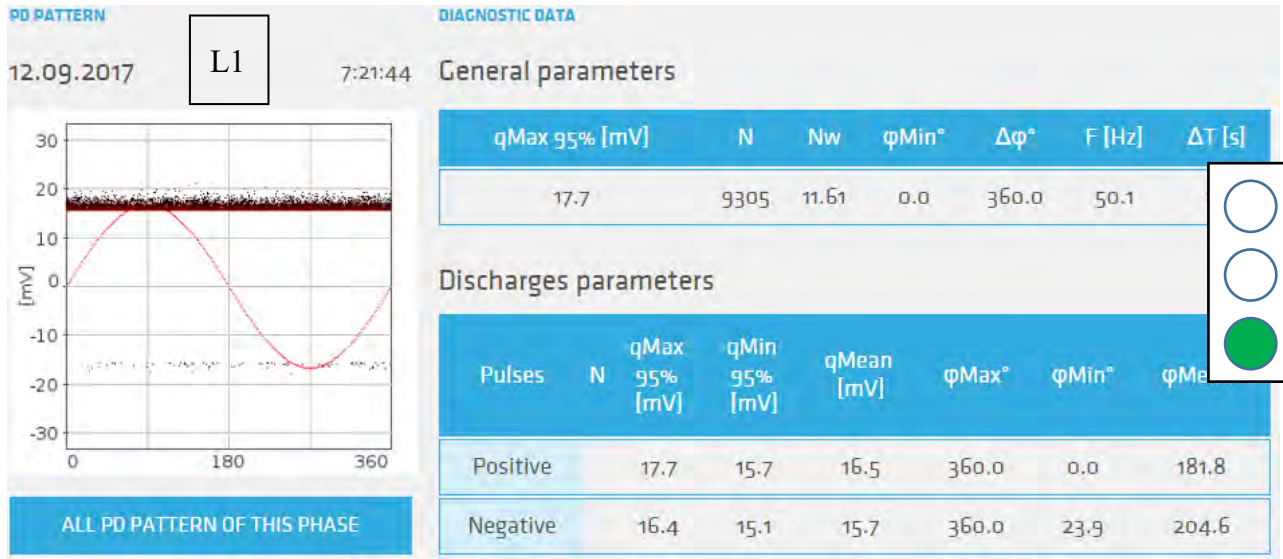
Pry-Cam MITTAUS 54



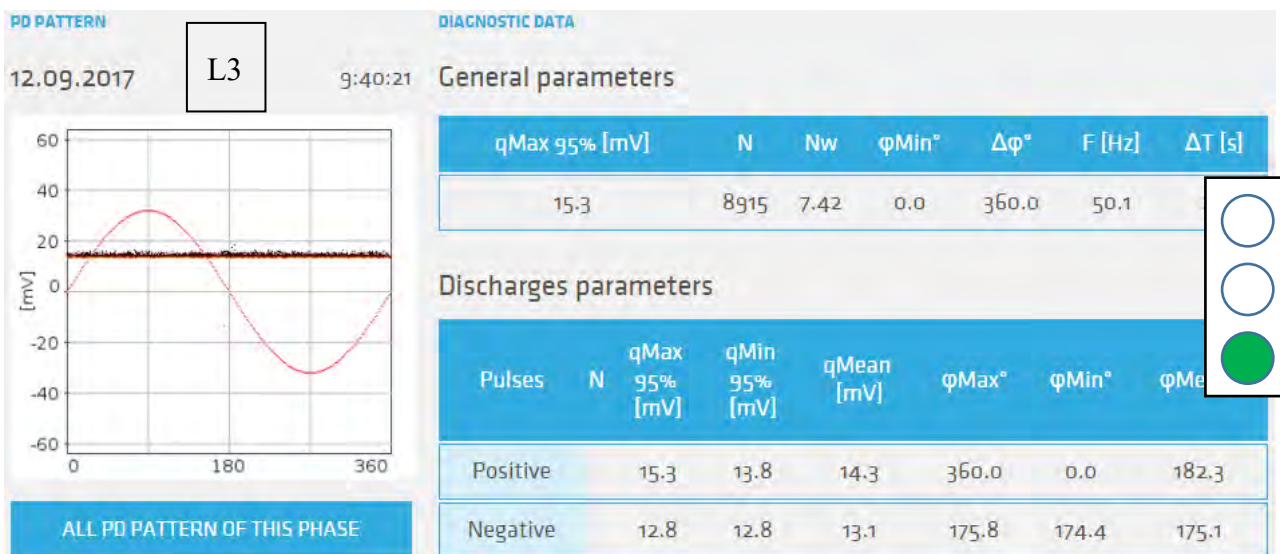
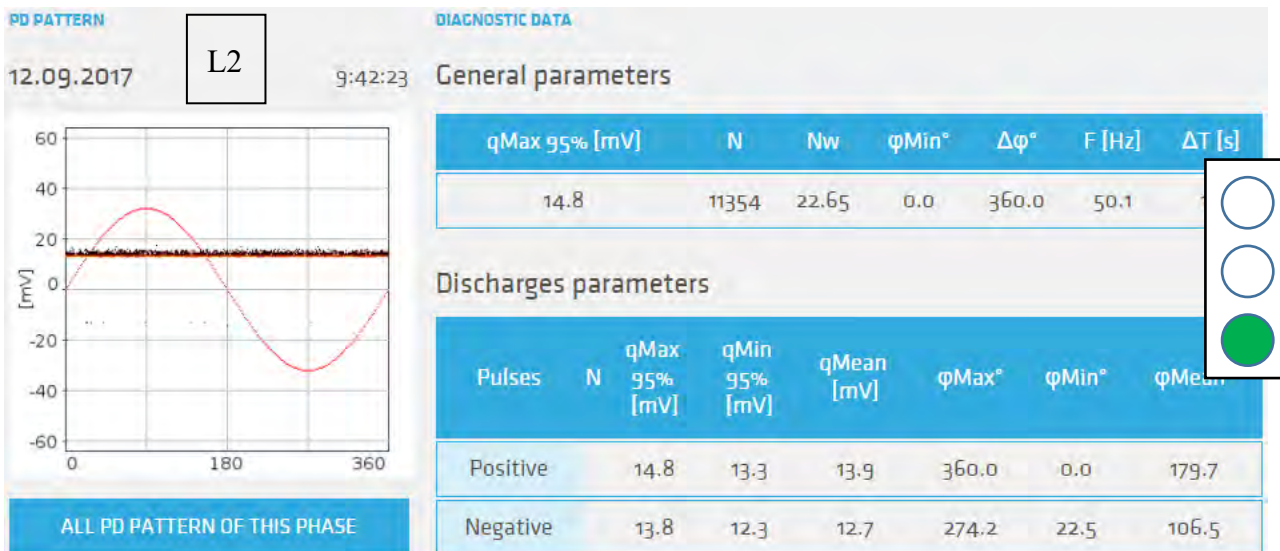
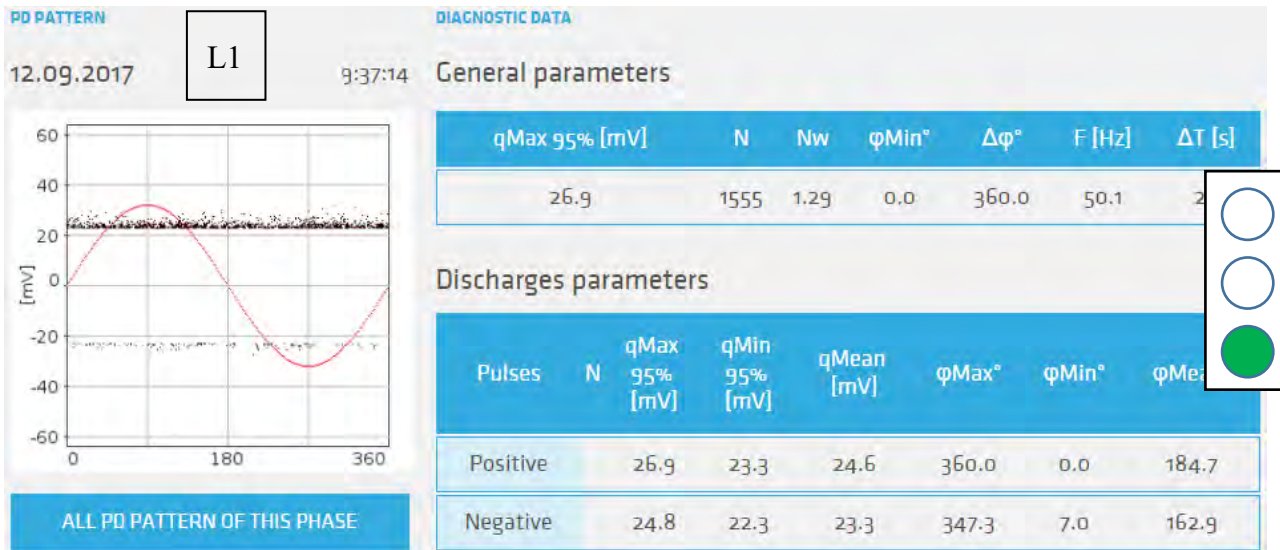
Pry-Cam MITTAUS 55



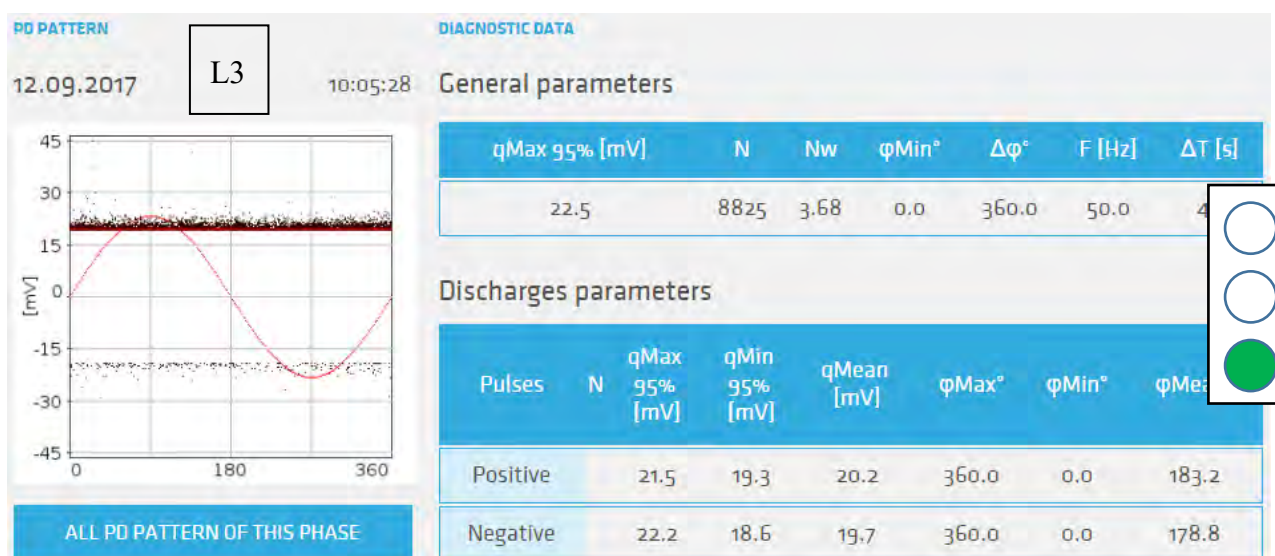
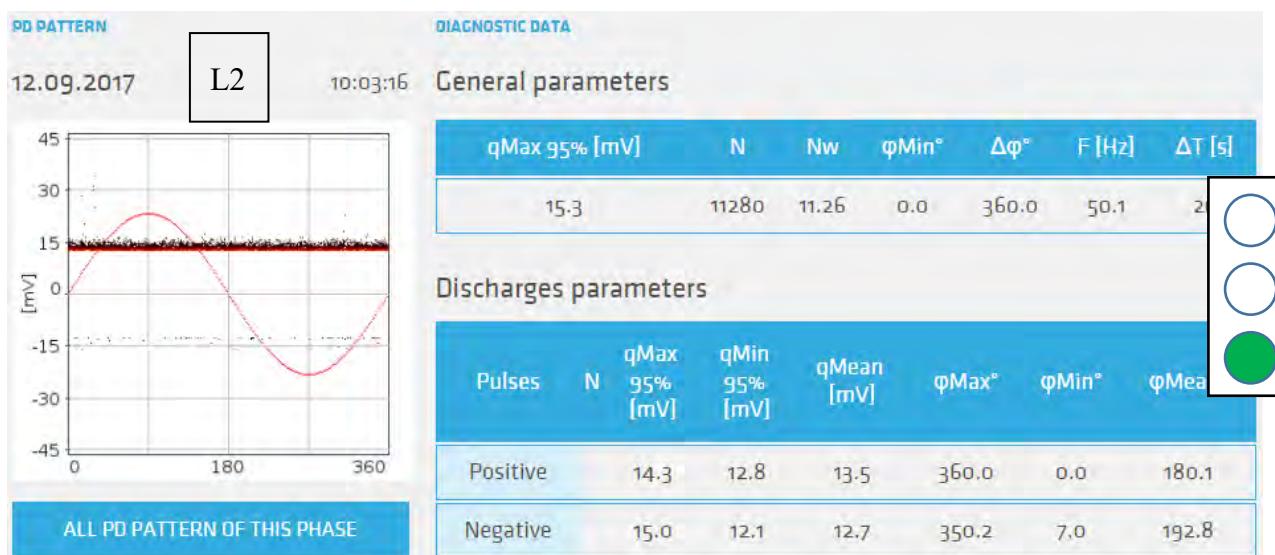
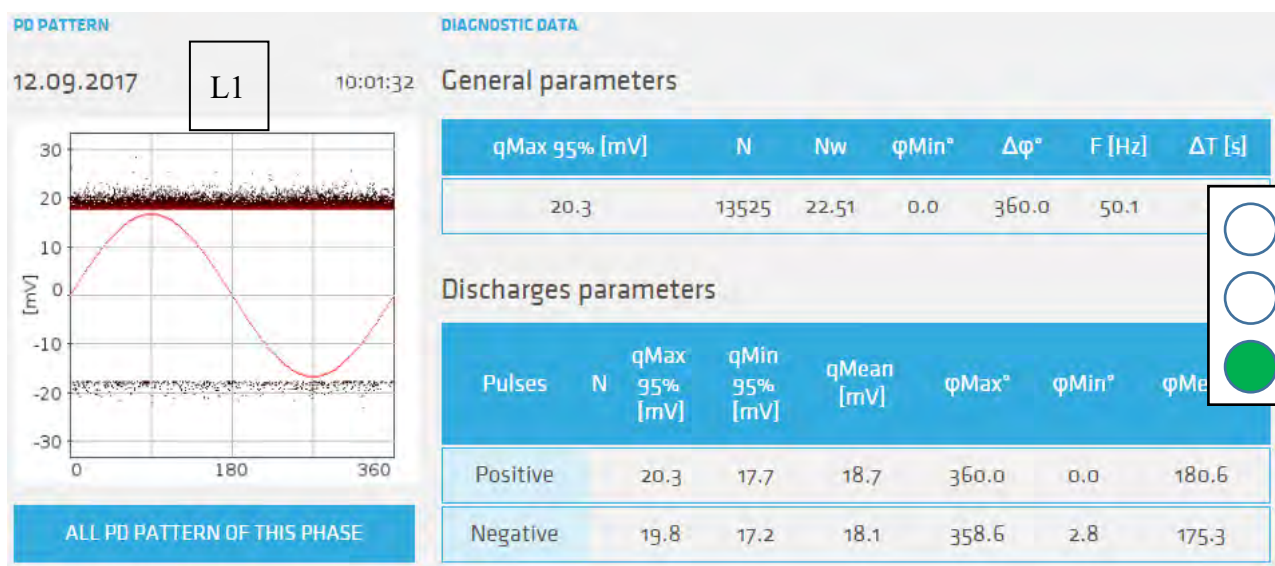
Pry-Cam MITTAUS 59



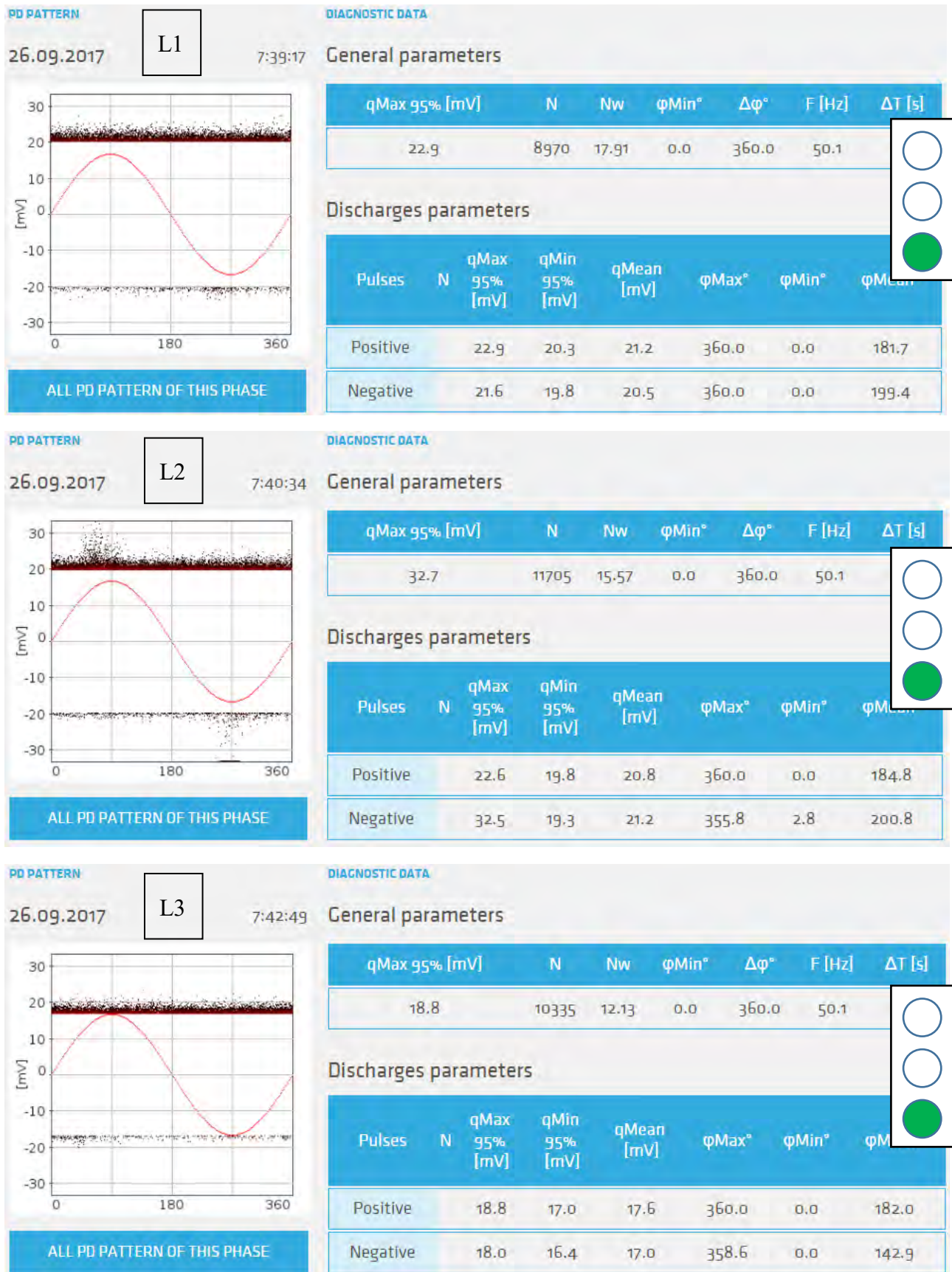
Pry-Cam MITTAUS 60



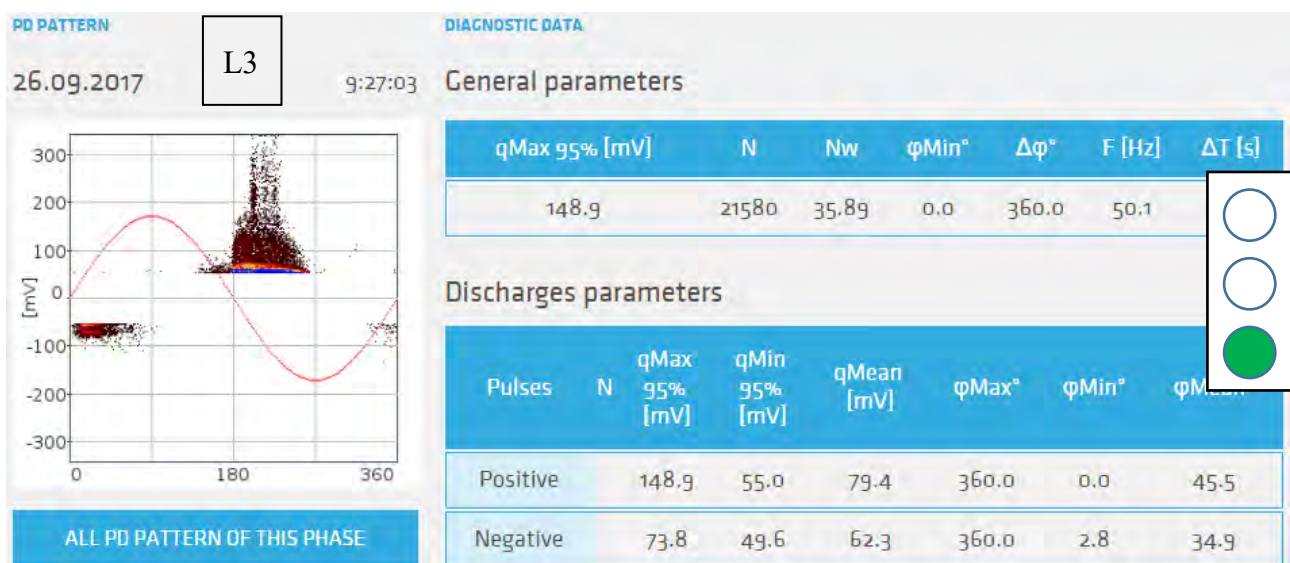
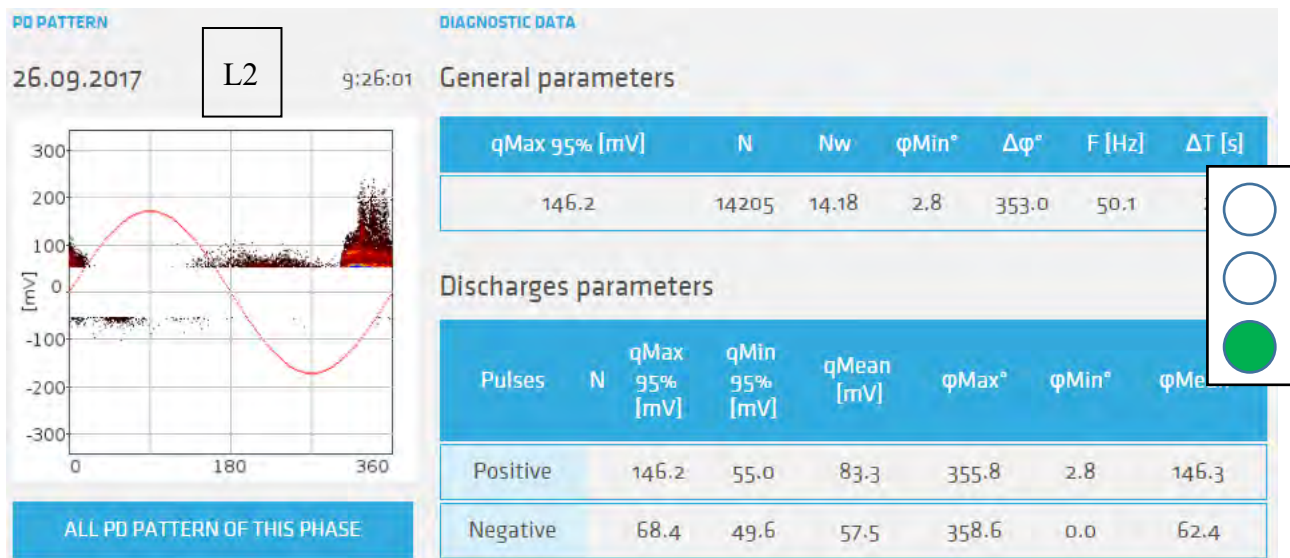
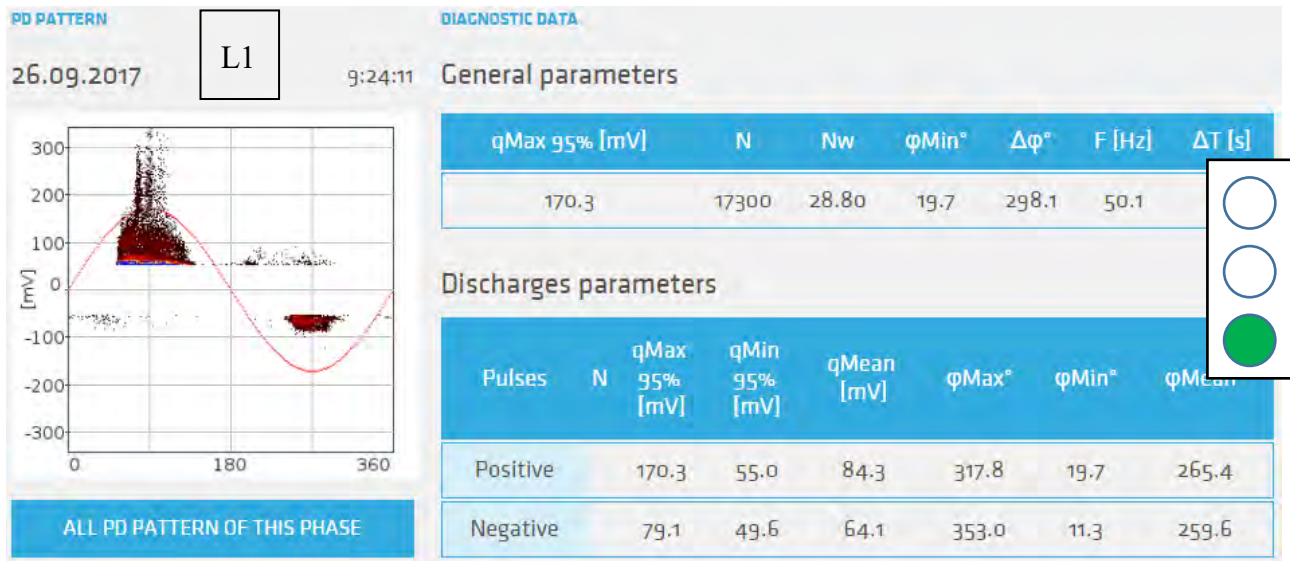
Pry-Cam MITTAUS 61



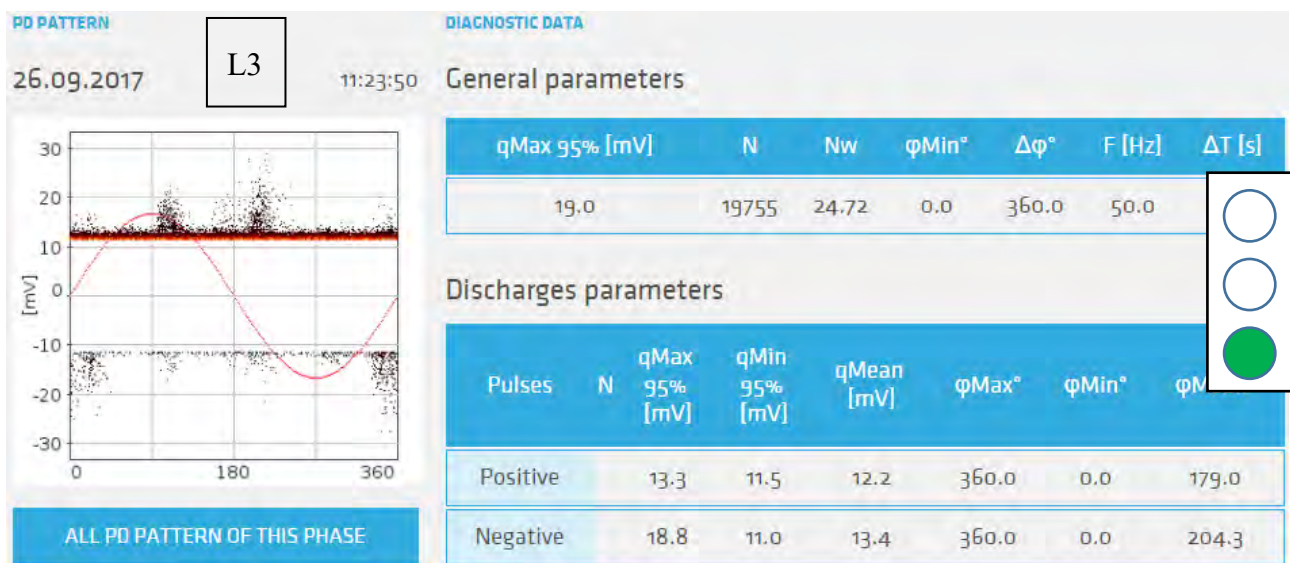
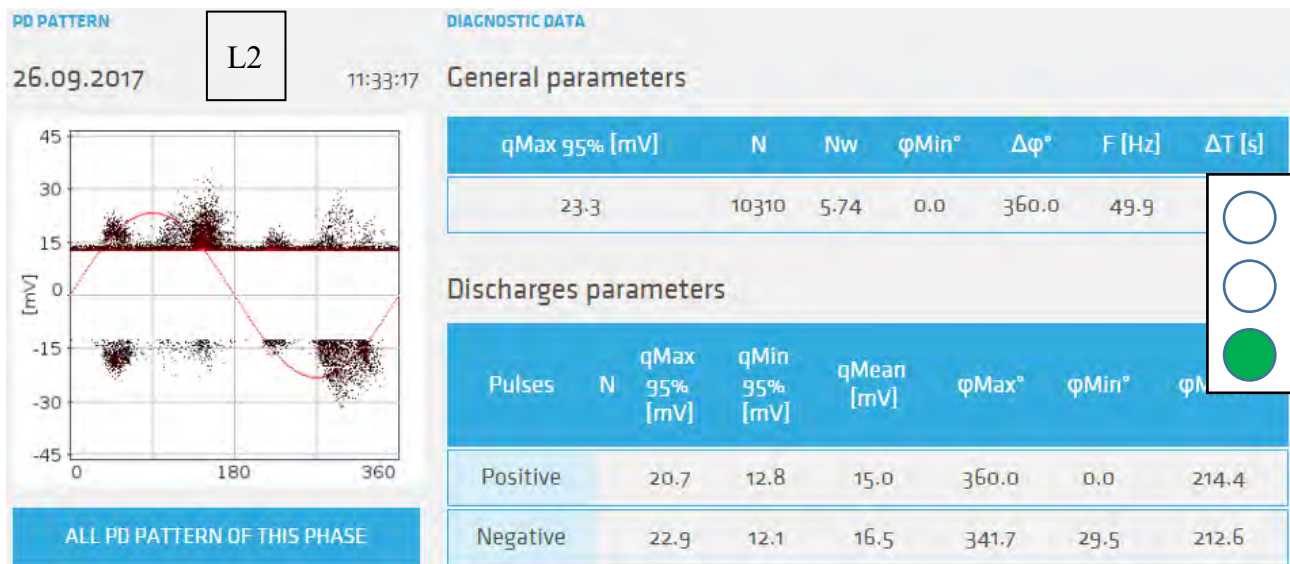
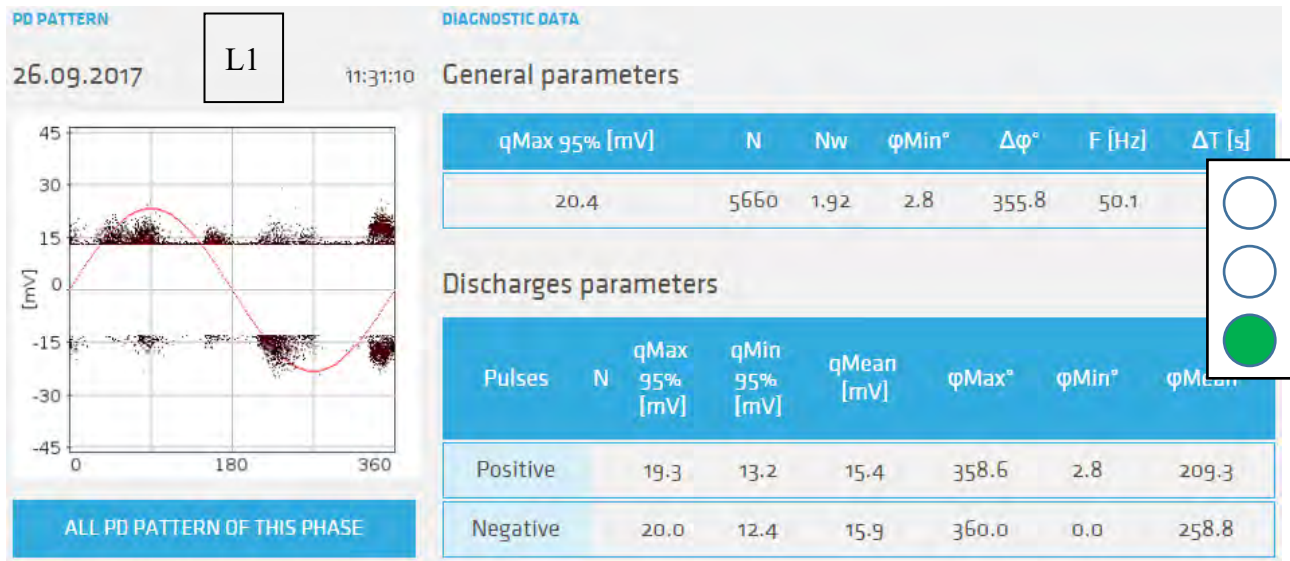
Pry-Cam MITTAUS 65



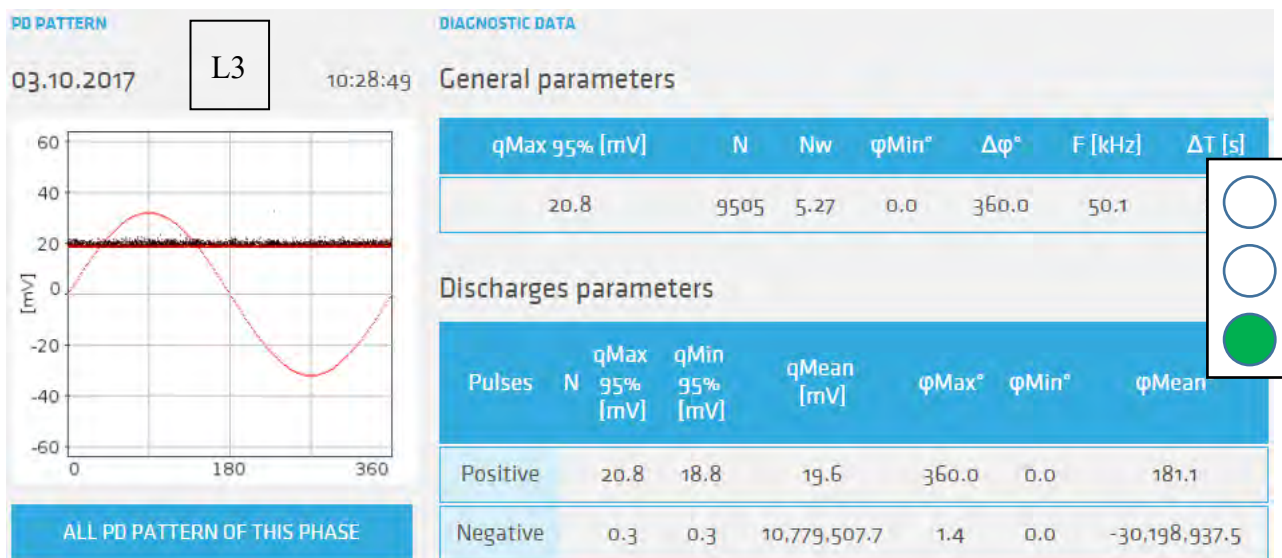
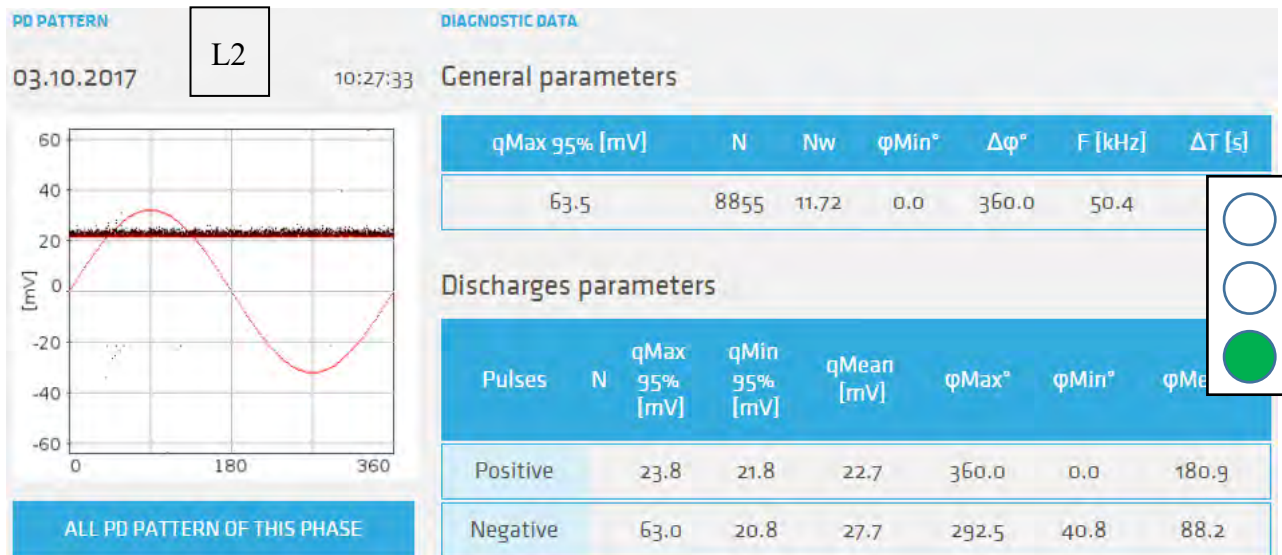
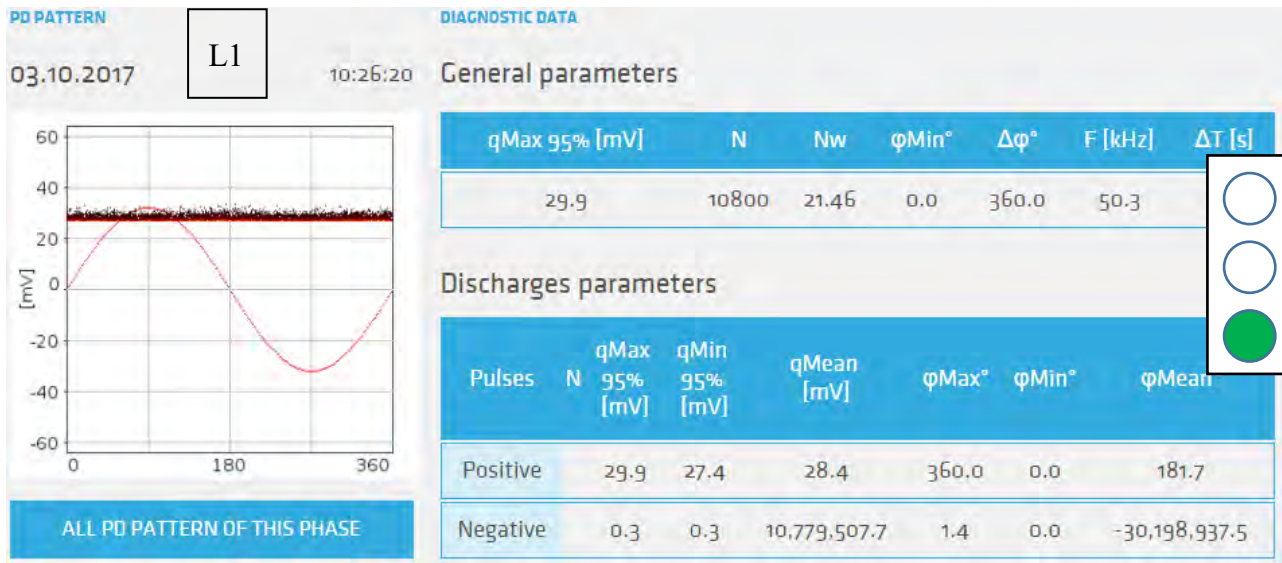
Pry-Cam MITTAUS 66



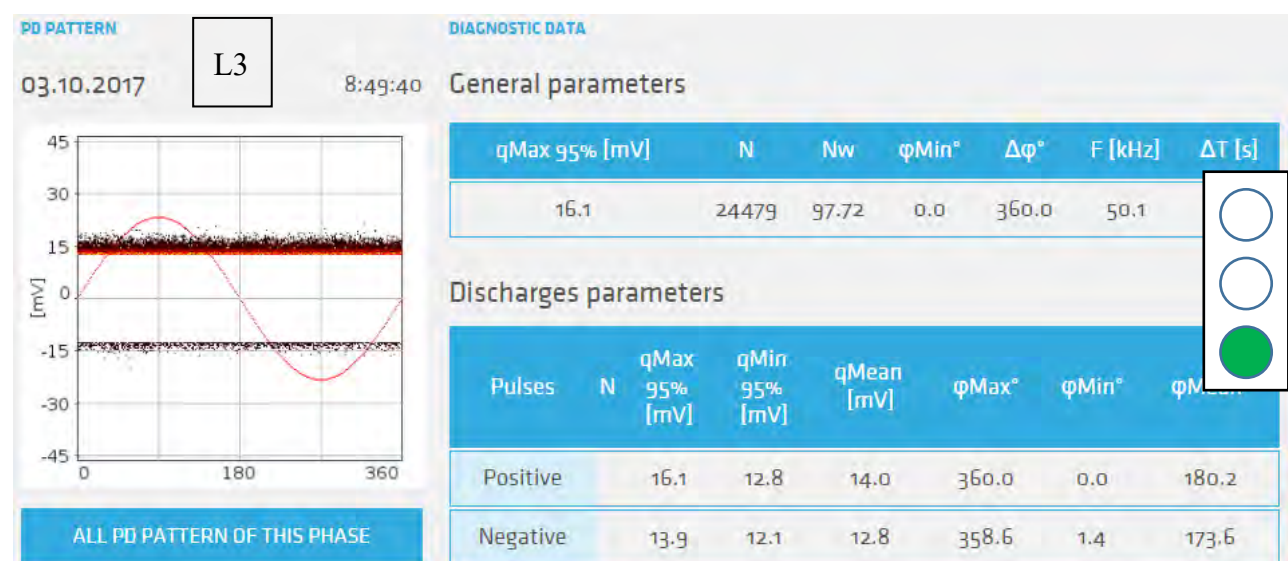
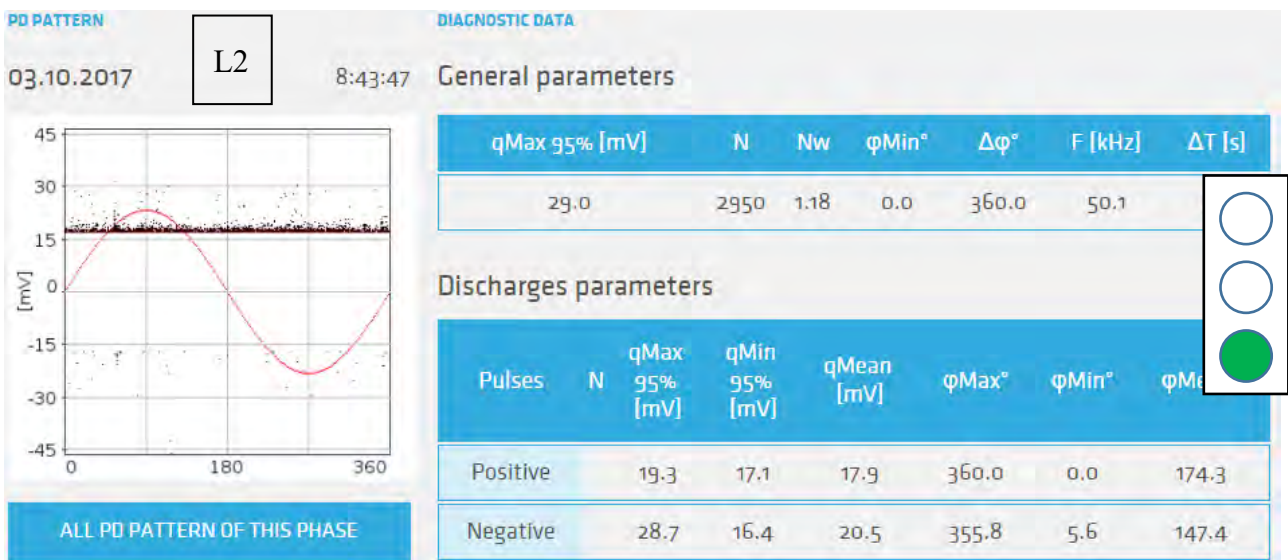
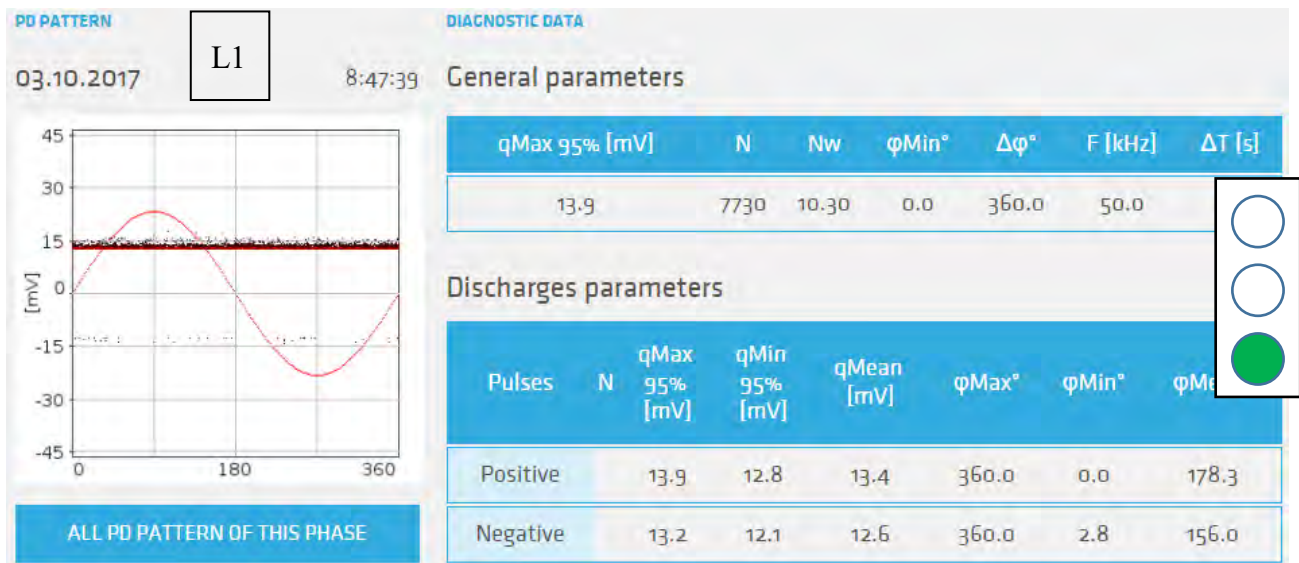
Pry-Cam MITTAUS 67



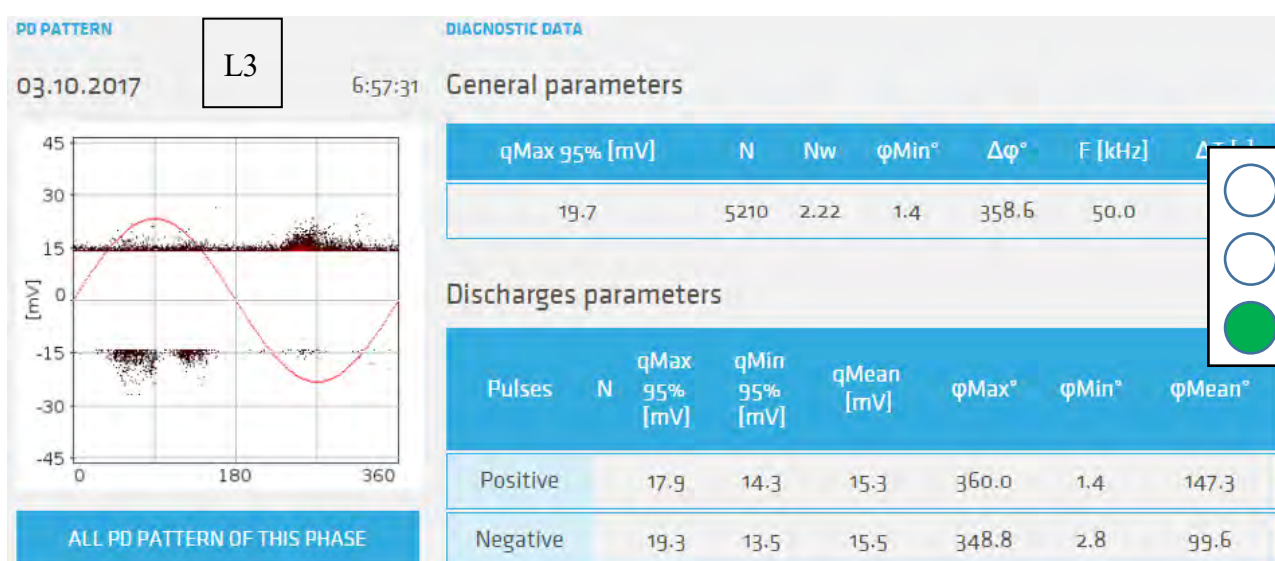
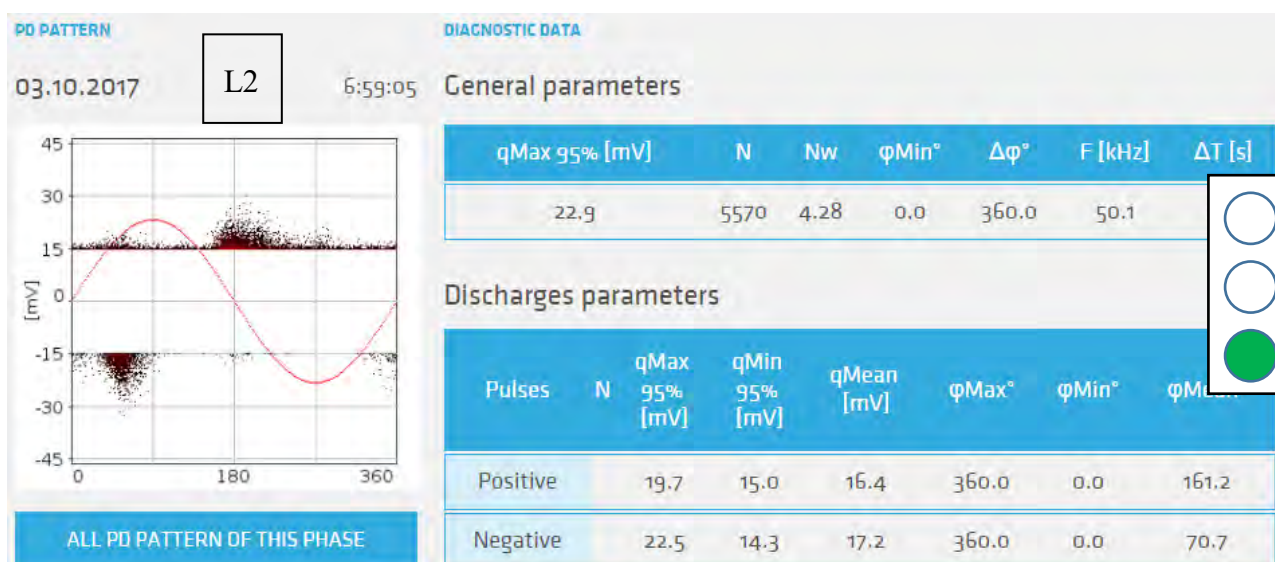
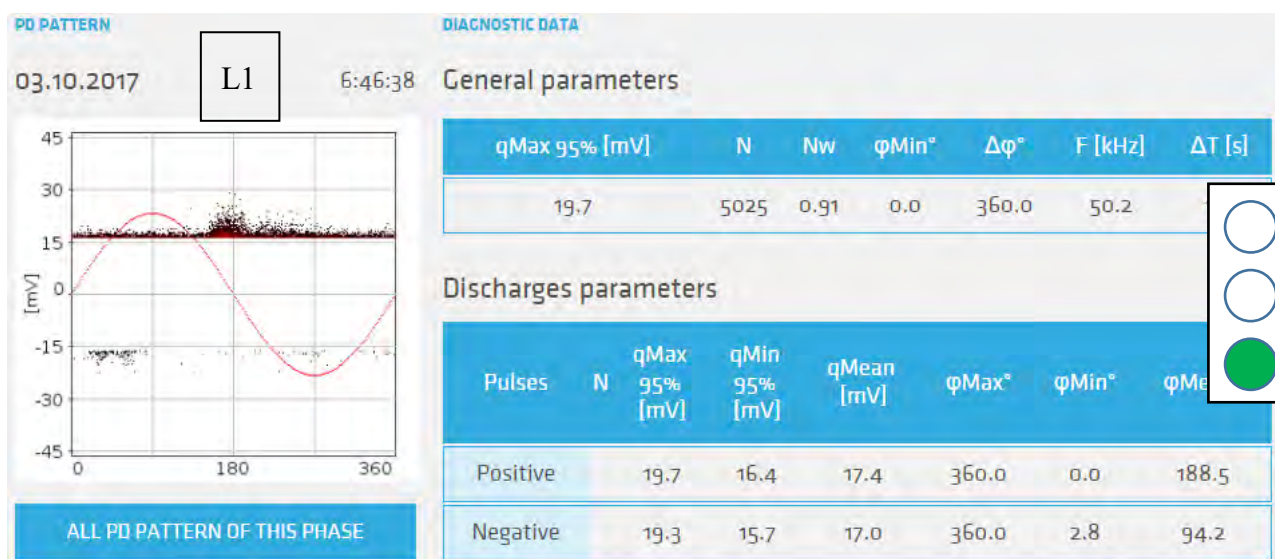
Pry-Cam MITTAUS 73



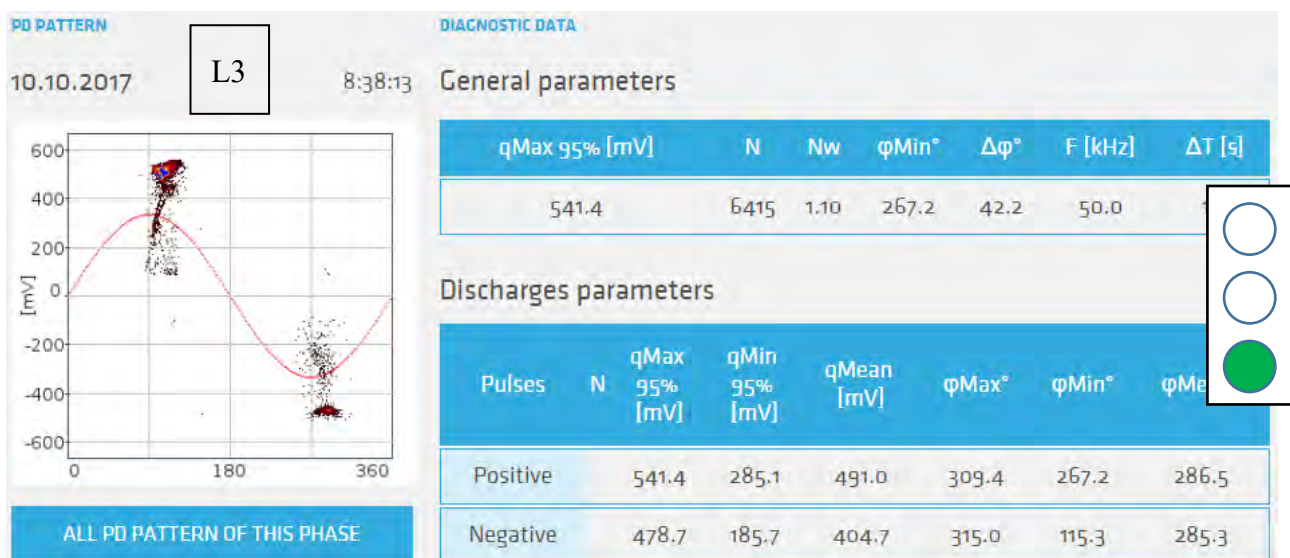
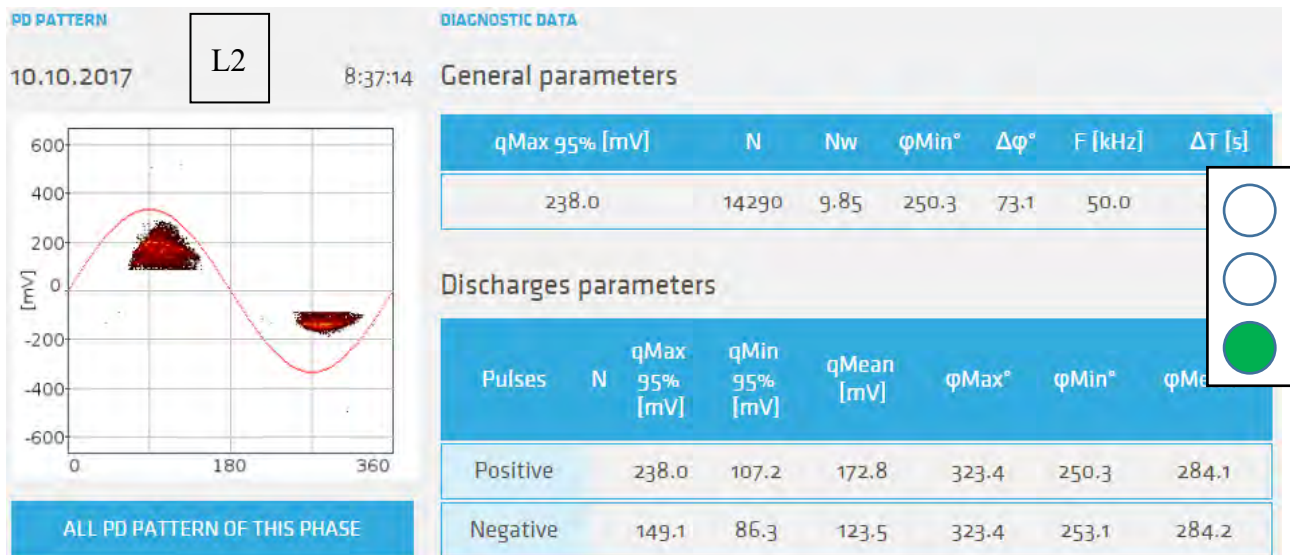
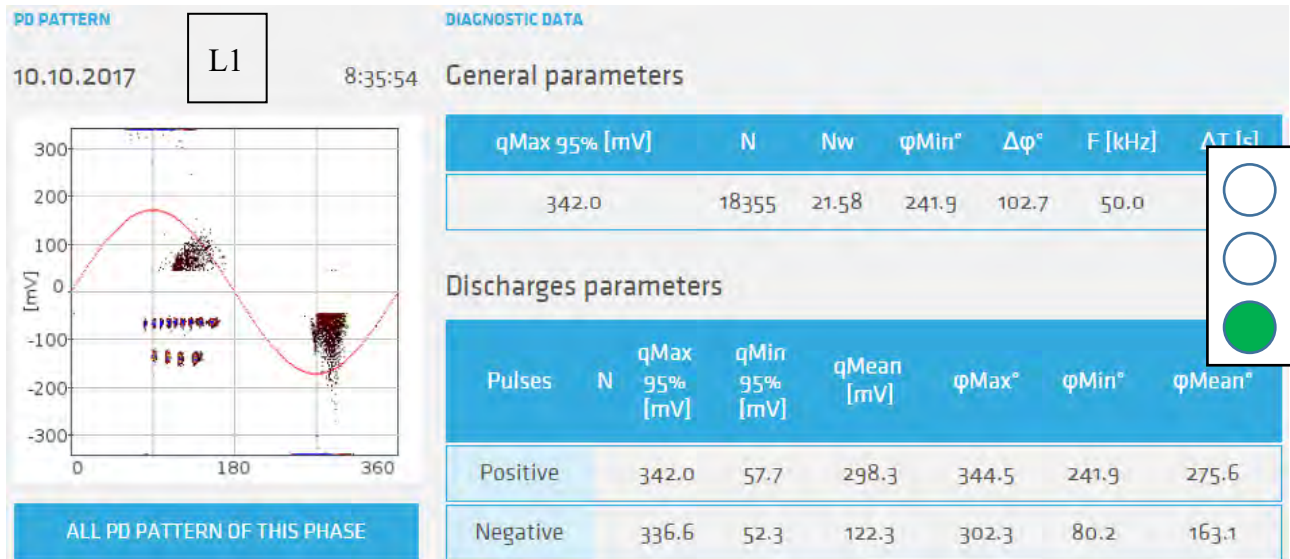
Pry-Cam MITTAUS 72



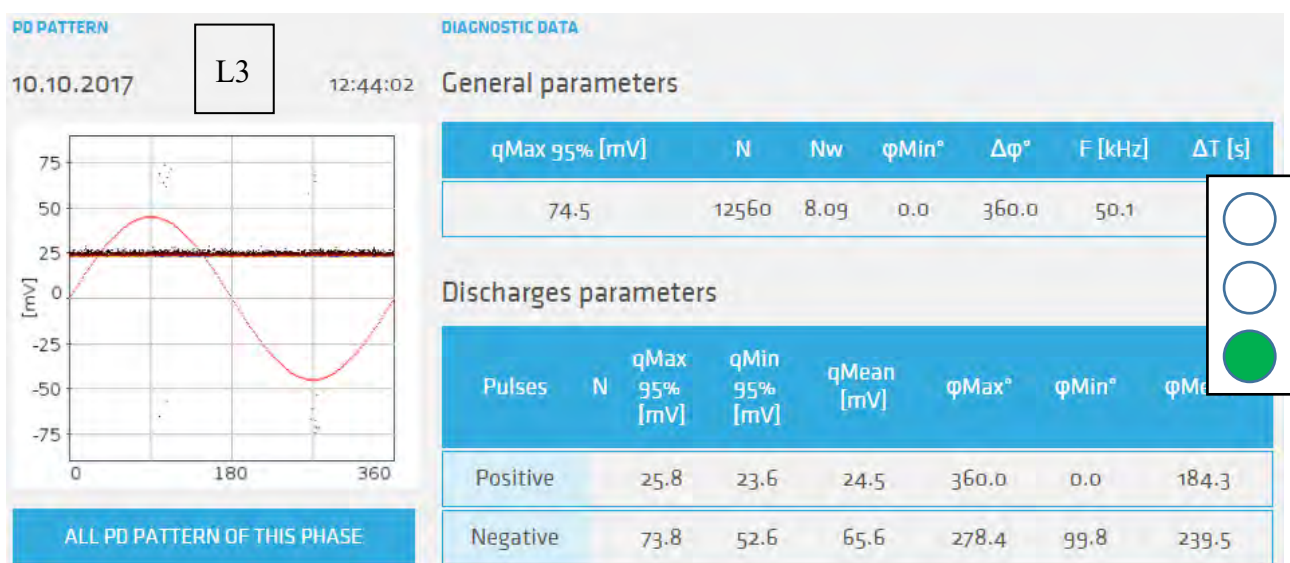
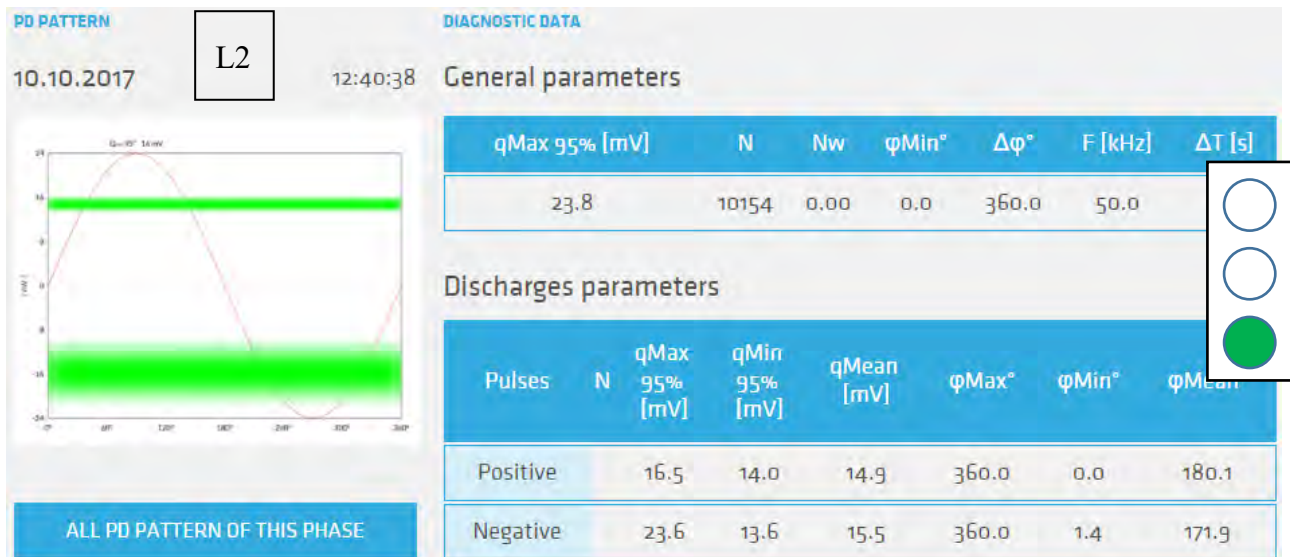
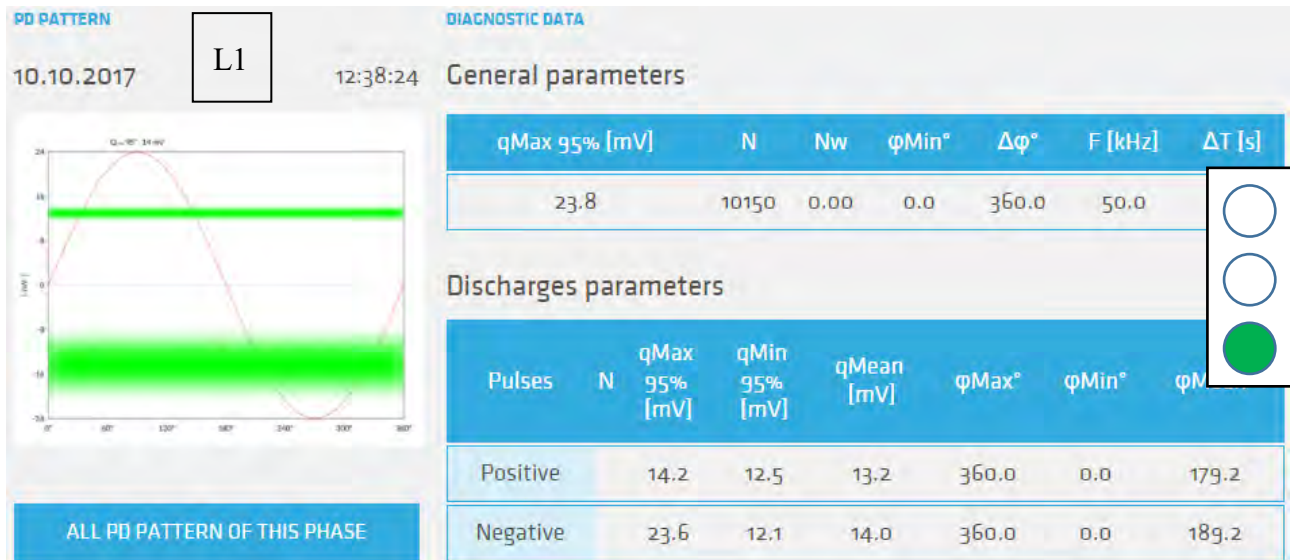
Pry-Cam MITTAUS 71



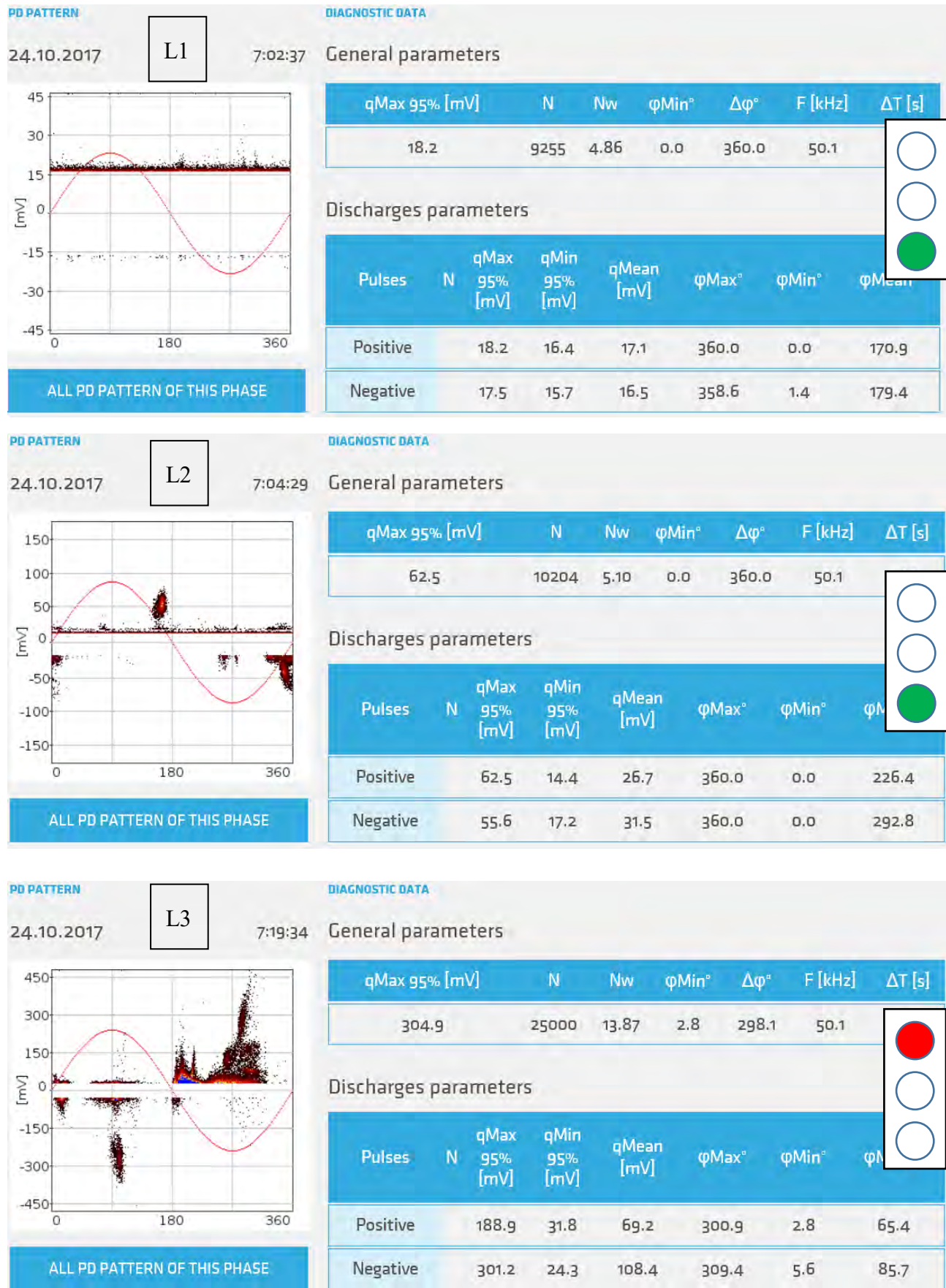
Pry-Cam MITTAUS 77



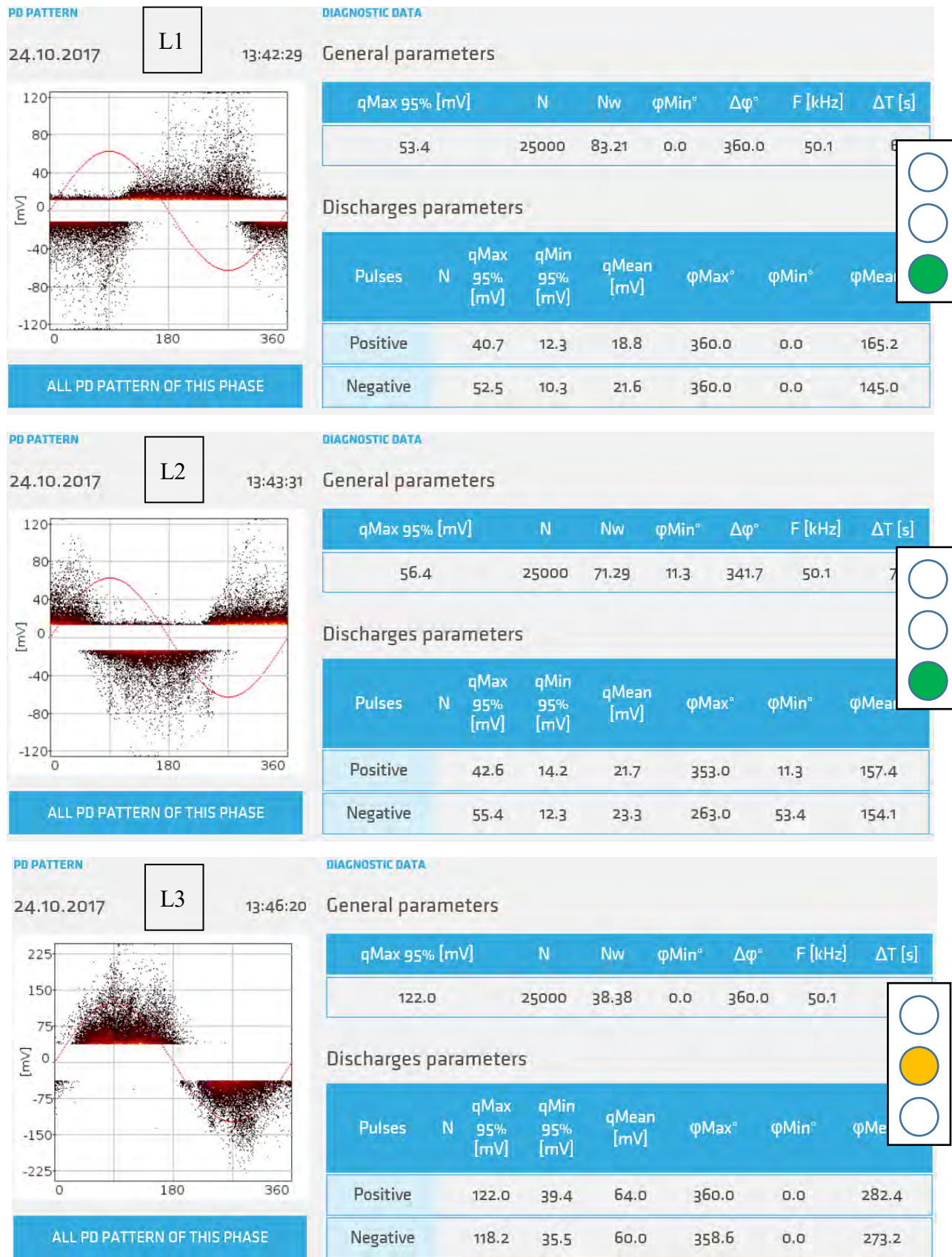
Pry-Cam MITTAUS 78



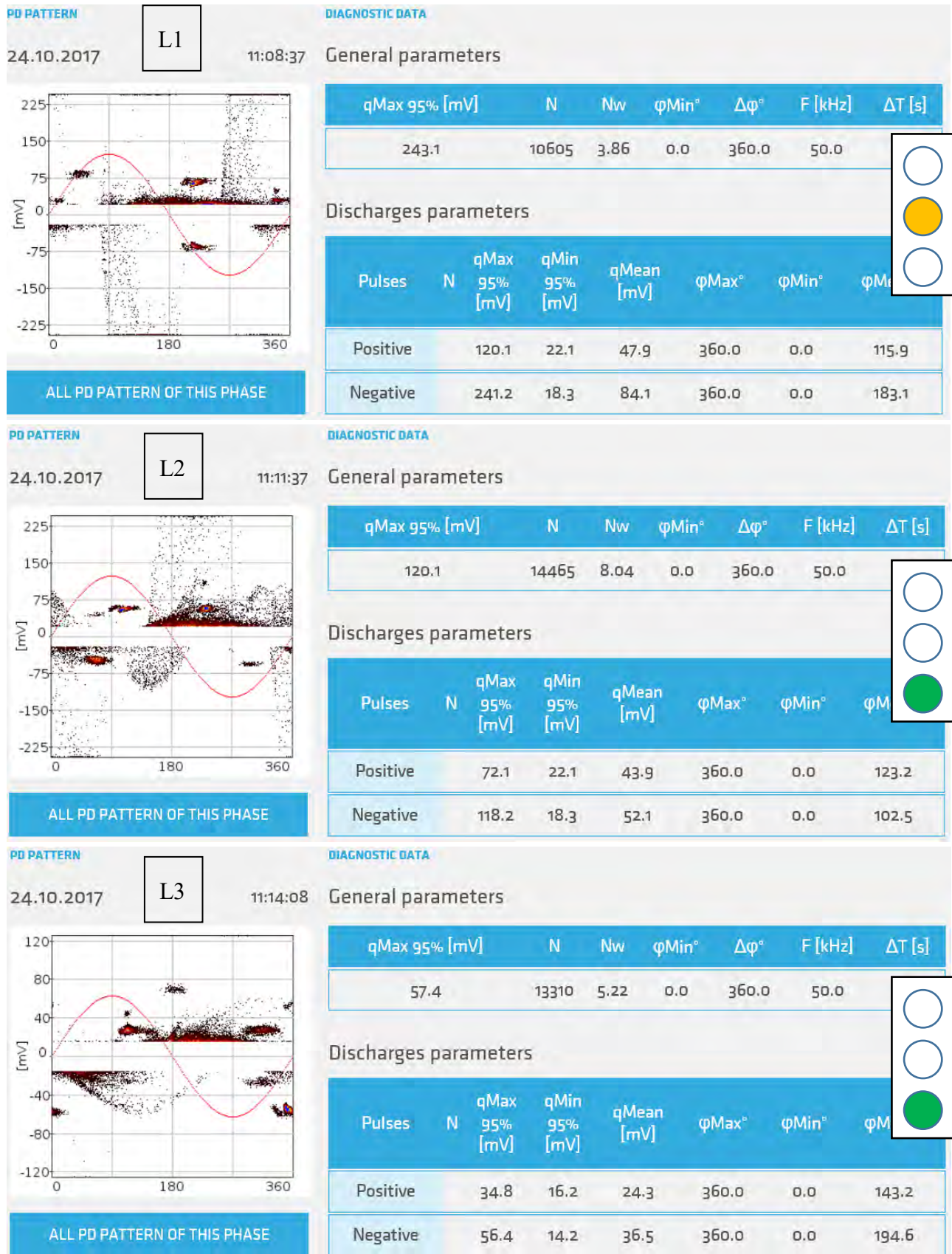
Pry-Cam MITTAUS 82



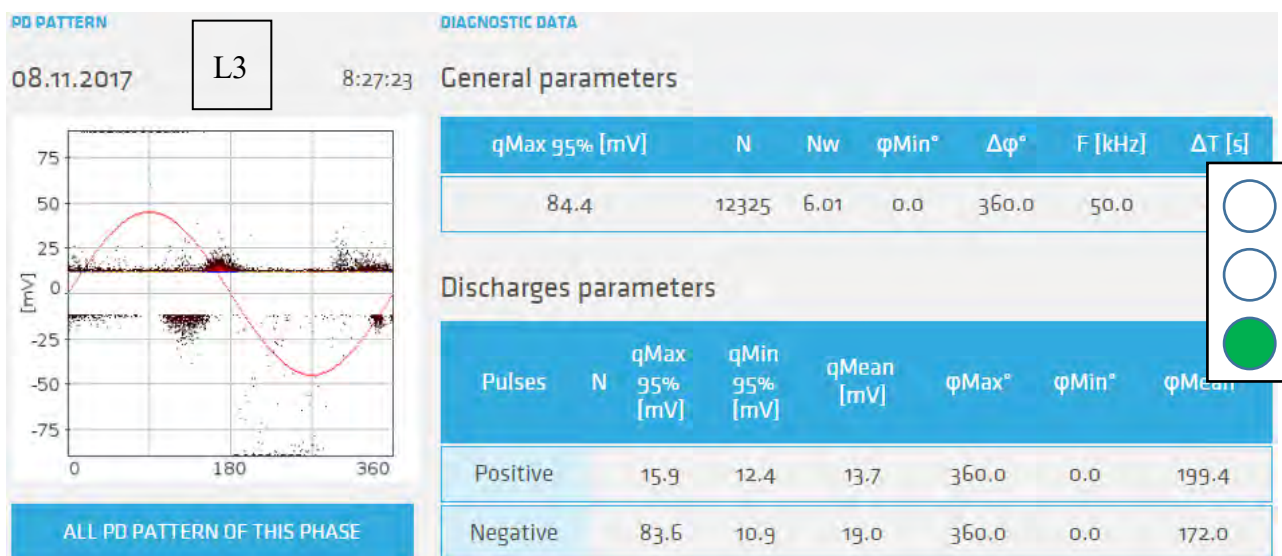
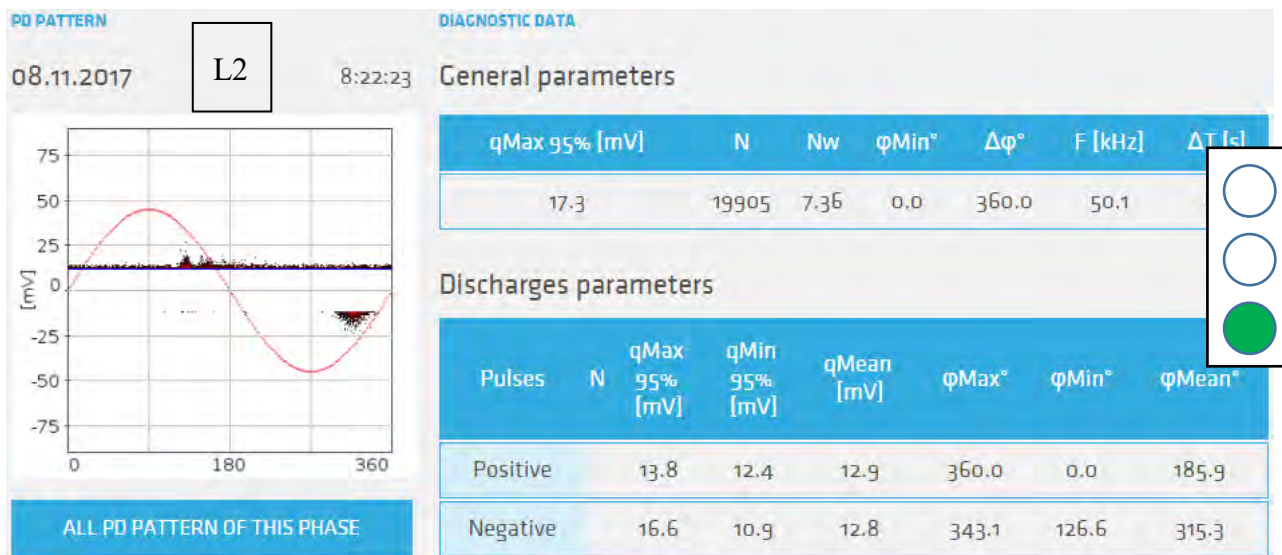
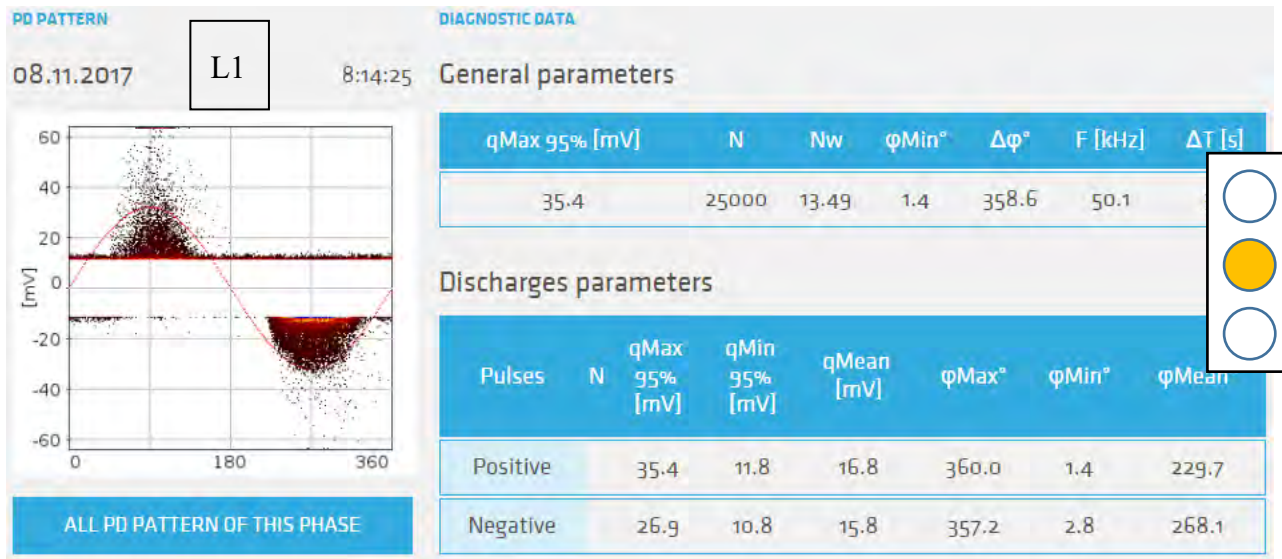
Pry-Cam MITTAUS 83



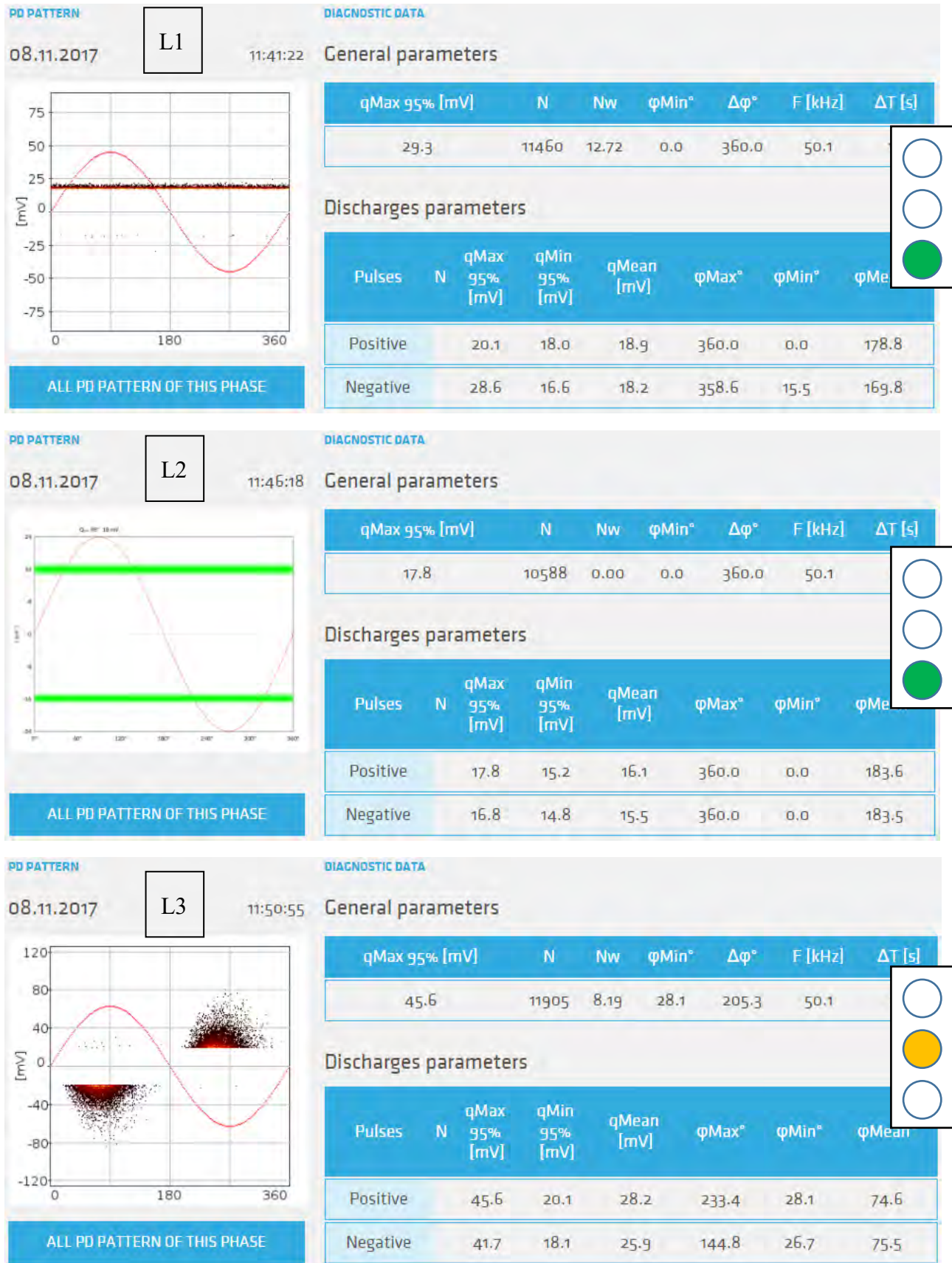
Pry-Cam MITTAUS 84



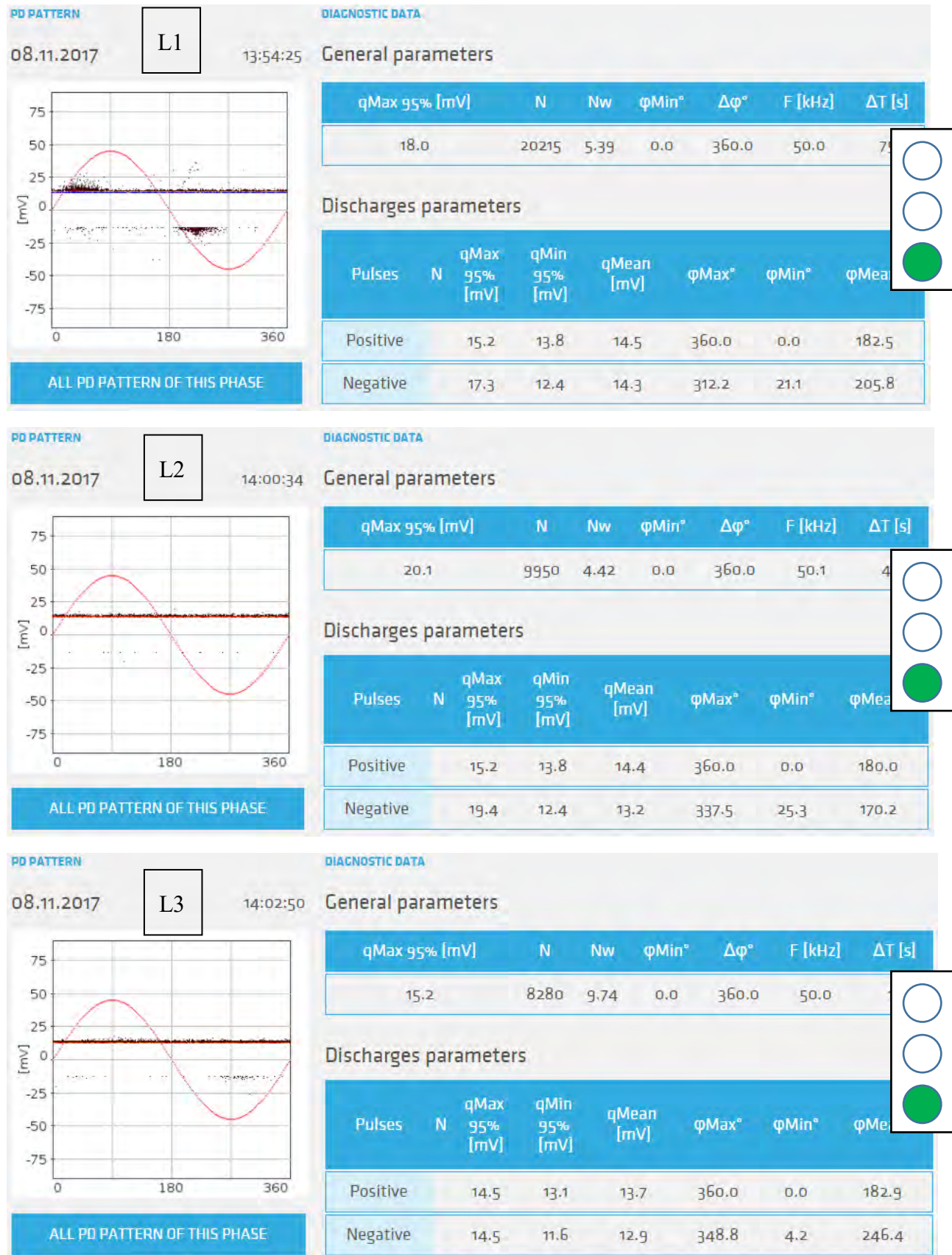
Pry-Cam MITTAUS 88



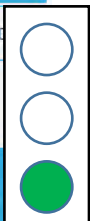
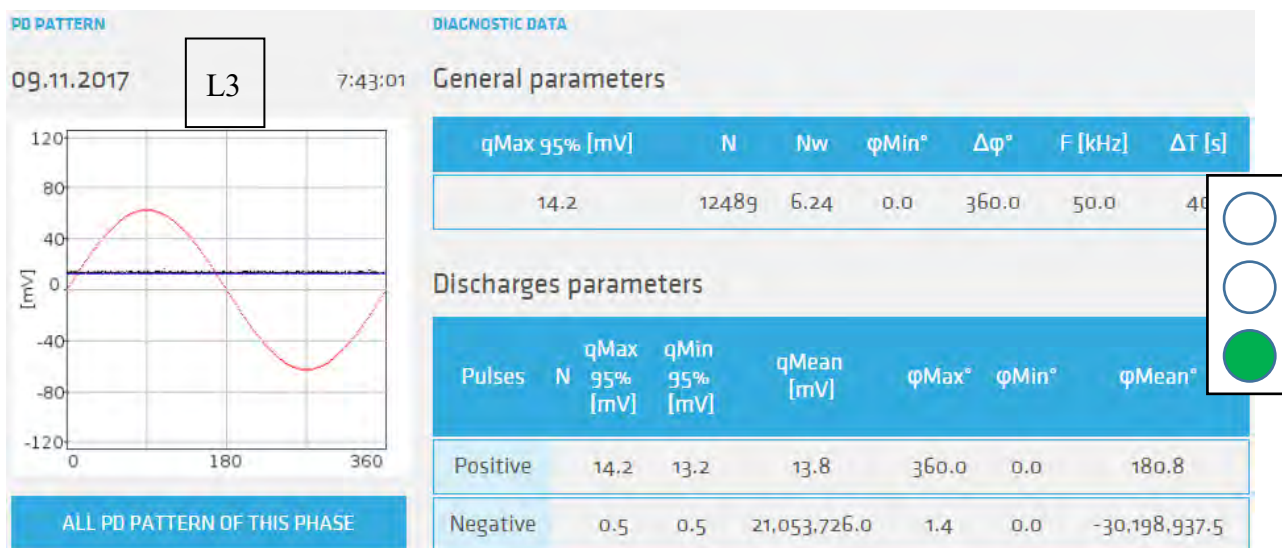
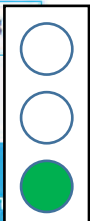
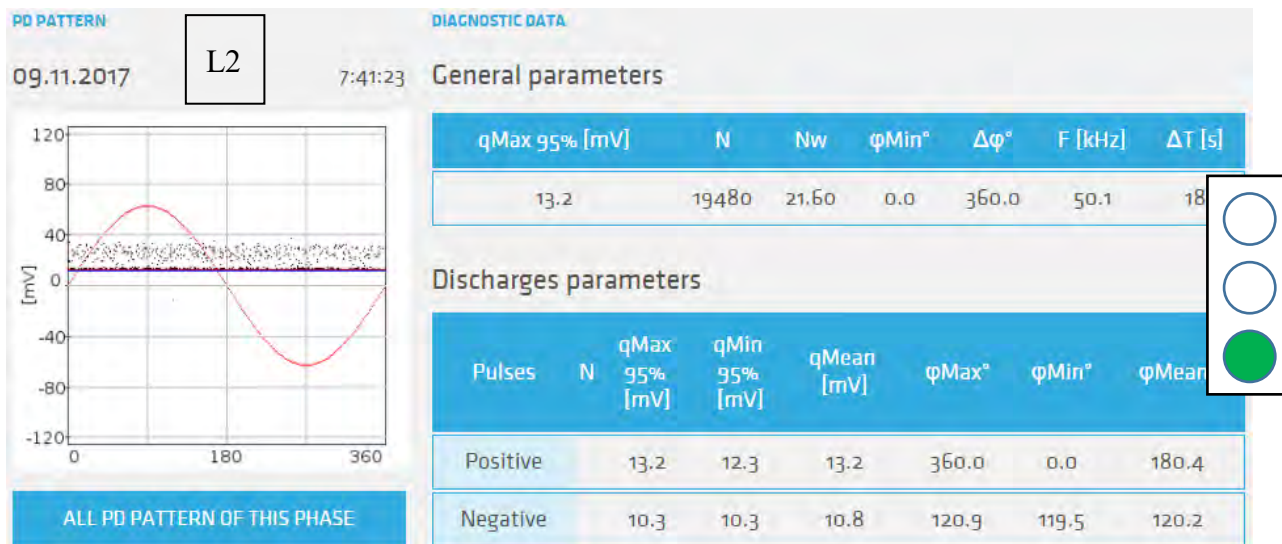
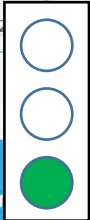
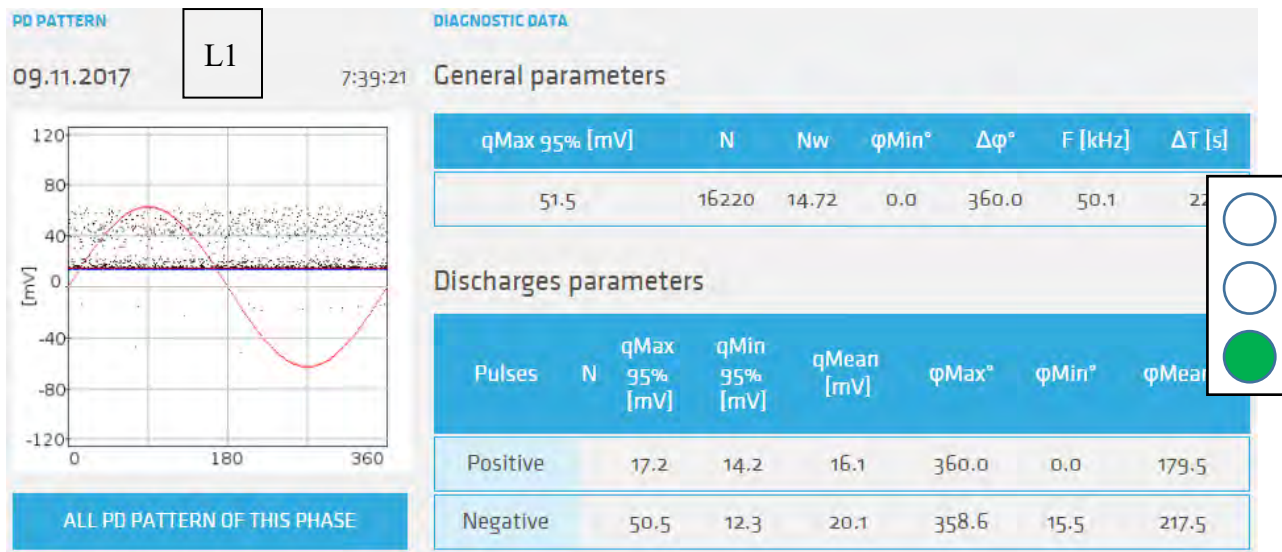
Pry-Cam MITTAUS 89



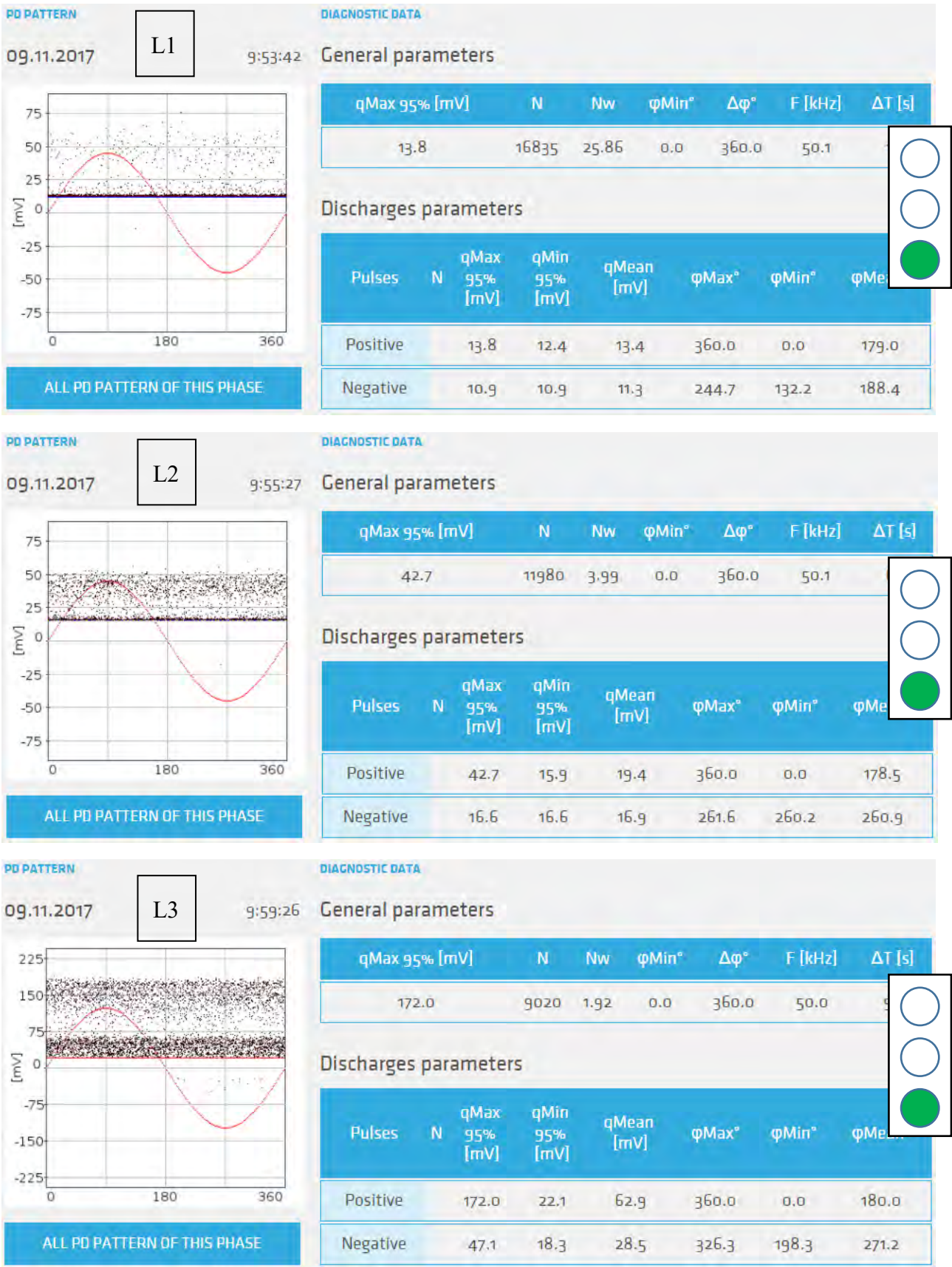
Pry-Cam MITTAUS 90



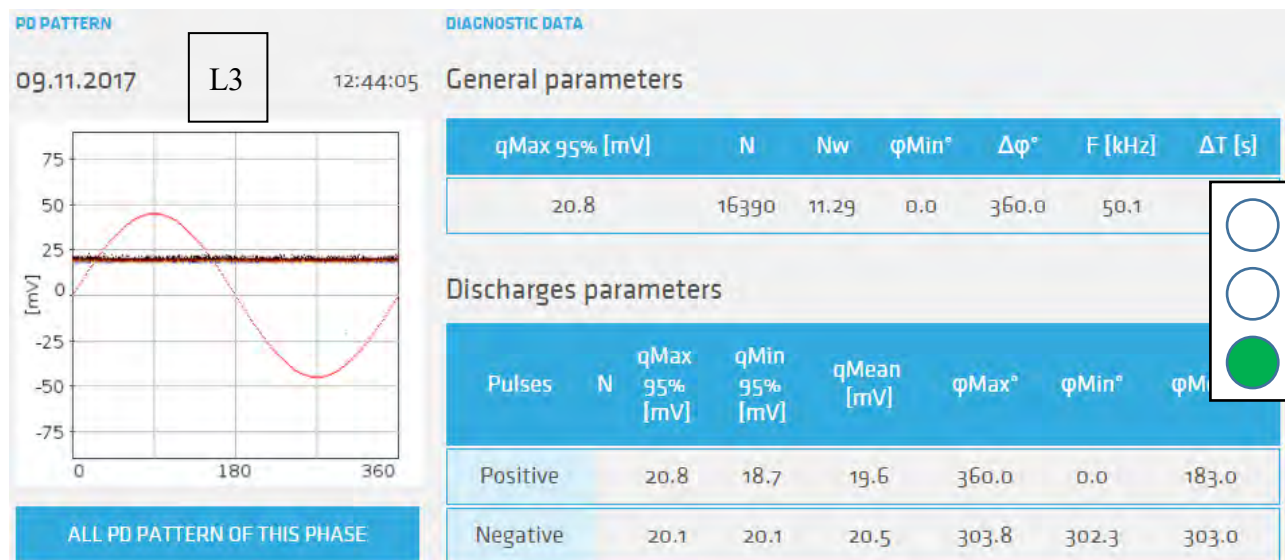
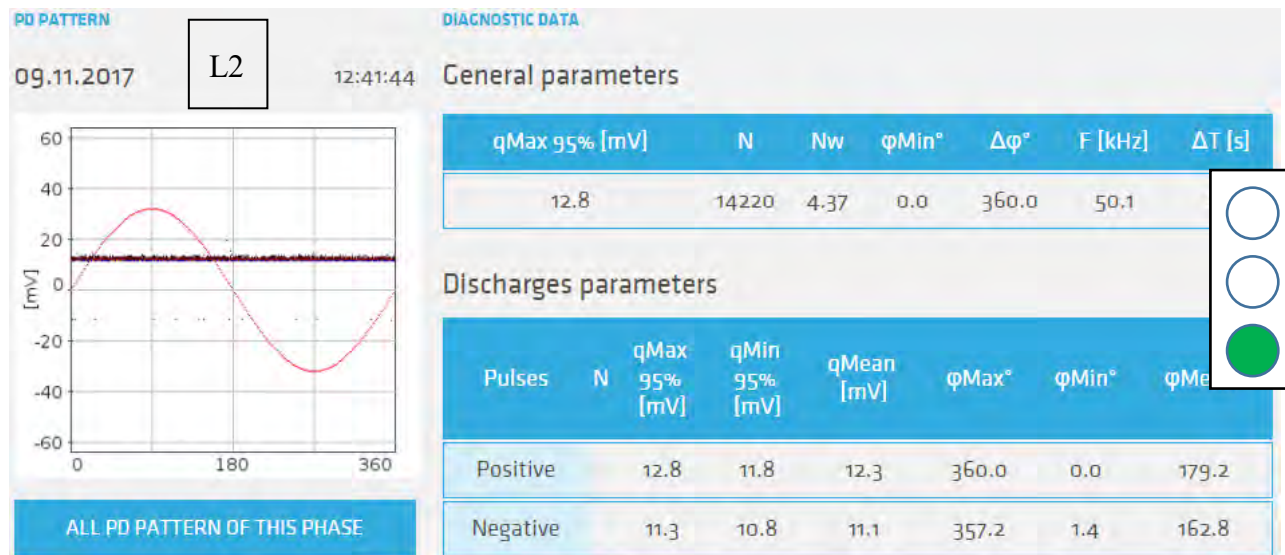
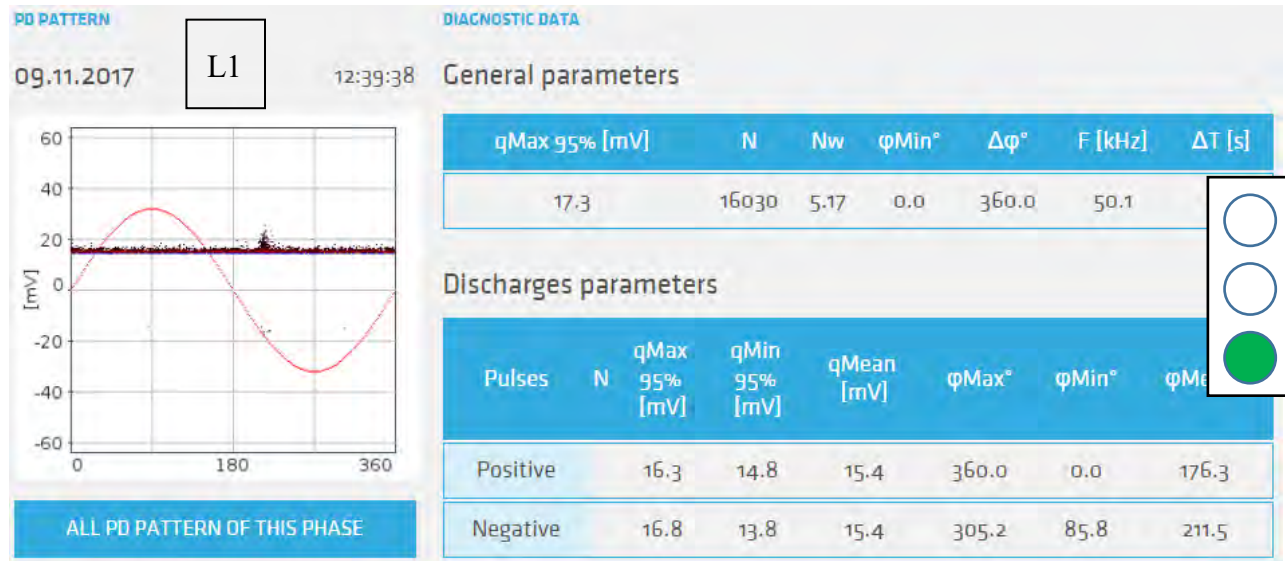
Pry-Cam MITTAUS 91



Pry-Cam MITTAUS 92



Pry-Cam MITTAUS 93



Pry-Cam MITTAUS 94

