

Elenia Oy

## **DIGITAALISEN KUNNONVALVONNAN KEHITTÄMINEN**

Loppuraportti

## SISÄLLYSLUETTELO

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet .....	3
1 JOHDANTO .....	4
1.1 Projektin henkilöstö .....	4
2 ASIAKAS .....	4
3 PROJEKTIN TARKOITUS JA LÄHTÖKOHDAT .....	4
4 NOISELESS ÄÄNIKAMERA .....	5
4.1 Sähköverkon kunnonvalvonta akustisella kameralla .....	5
4.2 Purkaustyypit .....	5
4.2.1 Korona-purkaukset (Discharge into air) .....	5
4.2.1 Osittaispurkaukset (Discharge on surface or inside component) .....	6
4.2.2 Kelluvat purkaukset (Discharge between components) .....	7
4.3 Äänikameralla tutkitut kohteet .....	8
4.3.1 Puistomuuntamot .....	8
4.3.2 Pylväsmuuntamot .....	11
4.3.3 Erotinasemat .....	12
4.3.4 Sähköasemat .....	12
4.3.5 Pienjännitekeskukset ja jakokaapit .....	15
4.4 Taloudellinen arviointi .....	15
4.5 Yhteenveto Noiseless-kamerasta .....	16
5 DRONE PJ-ILMAJOHTOVERKON KUNNONVALVONNASSA .....	17
5.1 PJ-ilmajohdoverkon kunnonvalvonnan nykytila .....	17
5.1.1 Yleistä tarkastuksista .....	17
5.1.2 Tarkastuksessa tehtävät havainnot .....	18
5.1.3 Havaintotiheydet .....	19
5.1.4 Lentotarkastukset .....	19
5.2 Dronen hyödyntäminen määräaikaistarkastuksissa .....	20
5.2.1 Droneteknologia .....	21
5.2.2 Sensoritekhnologia .....	23
5.2.3 Dronella tehtävät kunnossapitohavainnot .....	24
5.2.4 Kerätyn materiaalin analysointi .....	25
5.3 Maastotyöskentely ja kerätty materiaali .....	26
5.3.1 Laitteisto .....	26
5.3.2 Laserkeilaus .....	28
5.3.3 Valokuvaus .....	30
5.3.4 Yleistä lentotoiminnasta .....	32
5.4 Taloudellinen arviointi .....	34
5.5 Yhteenveto dronella tehtävistä PJ-tarkastuksista .....	35
6 YHTEENVETO .....	36

## KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

AGL	Above Ground Level, maanpinnan yläpuolella, ilmailussa käytettävä termi
AMC	Airspace Management Cell, ilmatilan hallintayksikkö
BVLOS	Beyond Visual Line Of Sight, näköyhteydetön lentotoiminta
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor, digitaalikameroiden valoherkissä kennoissa käytetty mikropiiritekniikka
GNSS	Global Navigation Satellite System, satelliitteihin perustuva paikannusjärjestelmä, esim. GPS (Global Positioning System)
IMU	Inertial Measurement Unit, liikemittausyksikkö, jonkin kohteen liikkeen ja siten sijainnin määrittämiseen tarkoitettu, kiihtyvyyssantureita ja gyroskooppeja sisältävä mittausyksikkö
ISO	digitaalikameran valoherkän kennon herkkyysasetus
KJ	keskijännite
LIDAR	Light Detection And Ranging, laserkeilauksesta käytetty lyhenne
PJ	pienjännite
RGB-kamera	Red, Green, Blue; tavallinen näkyvän valon valokuvakamera
SJ	suurjännite
UV-kamera	Ultraviolettikamera, ultraviolettisäteilyyn perustuva kamera
VLOS	Visual Line Of Sight, näköyhteyteen perustuva lentotoiminta
VTOL	vertical take-off and landing, pystysuoraan nousu- ja laskeutumiskykyinen drone

## 1 JOHDANTO

Erilaisten digitaalisten ratkaisujen käyttöönotto yrityksissä on kasvanut viime vuosina merkittäväällä vauhdilla teknologian kehittyessä entistä käyttökelpoisemmaksi. Digitaalisilla ratkaisuilla tavoitellaan useimmiten kustannussäästöjä nykyisiä prosesseja tehostamalla, mutta voidaan digitalisaation avulla tuottaa asiakkaille myös kokonaan uusia palveluja tai tuotteita. Digitaalinen kunnonvalvonta uusien tiedonkeruu- ja tiedon analysointimenetelmien avulla on herättänyt kasvavaa kiinnostusta varsinkin teollisuudessa, jossa tavoitellaan nykyään yhä enemmän ennakoivaa ja tarpeeseen perustuvaa kunnossapitoa perinteisen aikaan tai käyttötunteihin perustuvan kunnossapidon sijaan. Digitaalisen kunnonvalvonnan avulla voidaan tehostaa kunnossapitoa keräämällä ja analysoimalla kunnossapidon tueksi tarvittavaa tietoa entistä tehokkaammin ja sitä kautta parantaa myös omaisuudenhallintaa suorittamalla tarvittavat toimenpiteet ennen kuin vakavia vaurioita ehtii tapahtua.

### 1.1 Projektin henkilöstö

Toimittajan (Rejlers Finland Oy) projektipäällikkönä toimii palvelupäällikkö Lasse Kankainen. Toimittajan asiantuntijoina ovat lisäksi palvelupäällikkö Joni Ahonen, asiantuntija Eeva Walden, asiantuntija Niko Räsänen sekä suunnitteluinsinööri Vesa Naukkarinen.

Asiakkaan (Elenia Oy) yhteyshenkilönä Noiseless-tutkimuksen osalta toimii Henri Niemi ja droneselvityksen osalta Jari Aalto.

## 2 ASIAKAS

Elenia Oy on vuonna 2012 liiketoimintakaupan myötä toimintansa aloittanut Suomen toiseksi suurin sähköverkkoyhtiö. Verkkoyhtiön jakelualue sijaitsee Kanta- ja Päijät-Hämeessä, Pirkanmaalla, Keski-Suomessa sekä Etelä- ja Pohjois-Pohjanmaalla, joiden alueella sillä on yhteensä noin 430 000 asiakasta. Sähköverkkoa yhtiöllä on yhteensä noin 71 800 kilometriä, josta pienjänniteverkkoa on noin 43 400 kilometriä.

## 3 PROJEKTIN TARKOITUS JA LÄHTÖKOHDAT

Digitaalisen kunnonvalvonnan kehittämisen tarkoituksena on selvittää 1. Noiseless-äänikameran hyödyntämistä sähköverkon liitosten kunnonvalvonnassa sekä 2. dronen hyödyntämistä pienjännitteisen (PJ) ilmajohtoverkon kunnonvalvonnassa. Projekti sisältää Noiseless kameran osalta kenttämittaukset ja niiden tulosten raportoinnin ja dronen osalta tilanteen teoreettisen tarkastelun sekä koelennot, lennoilla kerätyn materiaalin analysoinnin ja tulosten raportoinnin.

## 4 NOISELESS ÄÄNIKAMERA

### 4.1 Sähköverkon kunnonvalvonta akustisella kameralla

Tässä projektissa tutkittiin Noiseless Acousticsin valmistaman akustisen kameran soveltuvuutta sähköverkon kunnonvalvontaan. Kuvauksia tehtiin neljänä eri päivänä: 21.3., 22.3., 7.5., 16.5. ja 27.5.2019.

Akustinen kamera erottelee eri suunnista tulevia ääniä useiden mikrofoniin avulla. Kamera paikantaa poikkeavat äänet, tunnistaa osittaispurkaukset ja muodostaa niistä valokuvan. Erillinen pilvipalvelimella pyörivä analysointiohjelmisto, yhdessä asiantuntijoiden tekemän manuaalisen data-analyysin kanssa, tekevät tähän dataan perustuen Discharge prediction -kuvaajan äänestä, jonka perusteella määrittyy purkauksen tyyppi. Näitä erilaisia purkaustyyppisiä kuvataan jäljempänä.



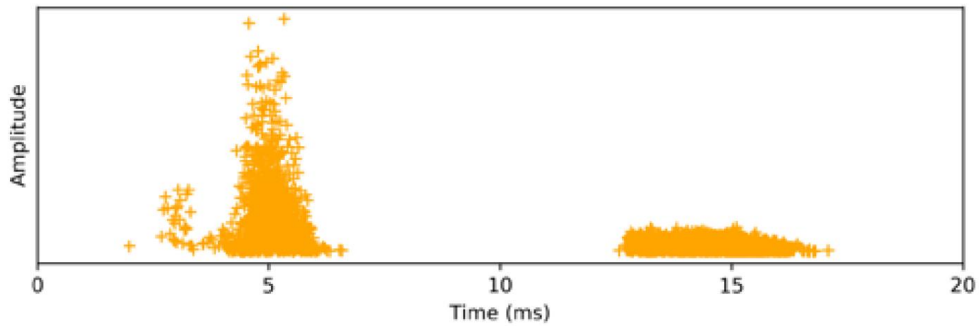
Kuva 4.1. Akustinen äänikamera.

Osittaispurkausten olemassaolosta voidaan ennustaa laitteistojen vikaantuminen, koska purkaukset ovat merkki heikentyneestä eristeestä tai muusta mahdollisesti vikaantumiseen johtavasta rakenneviasta. Osittaispurkaukset voivat tapahtua minkä tahansa tyyppisessä eristimessä: kiinteässä, ilmassa, kaasussa, tyhjiössä tai nesteessä.

### 4.2 Purkaustyytit

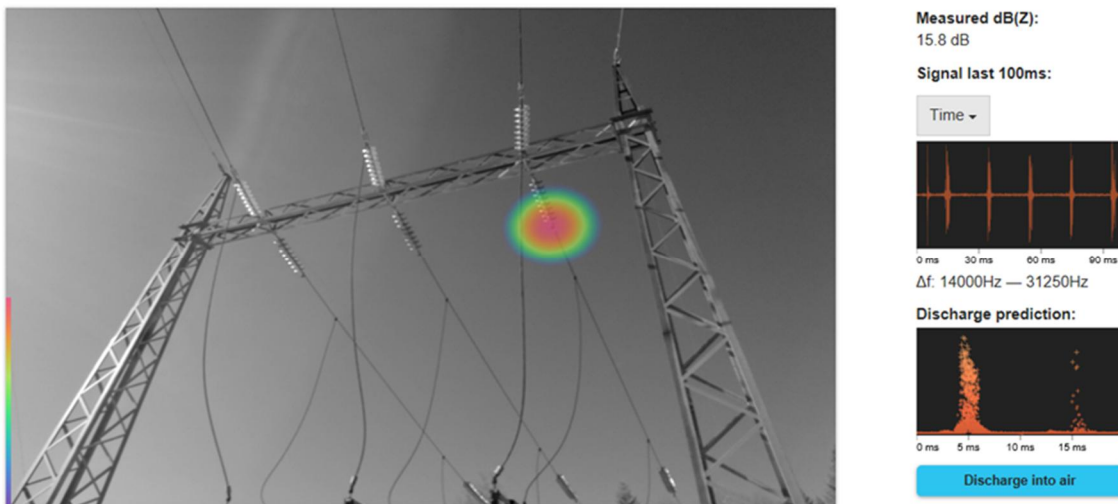
#### 4.2.1 Korona-purkaukset (Discharge into air)

Korona-purkaukset tapahtuvat, kun sähkökentän lujuus on riittävän suuri ilmaa ionisoivaksi. Vaihtojännitteellä koronat esiintyvät jännitteen puolijaksojen huippujen kohdalla. Tyypillisesti koronaa havaitaan jännitteen negatiivisen puolisyklin avulla, mutta jos sähkökentän voimakkuus on riittävän korkea, koronaa voidaan havaita myös positiivisen puoliskon aikana. Analysointiohjelman Discharge prediction -kuvaajassa näkyy tällöin voimakkaampi pulssi negatiivisen jakson huipun aikana.



Kuva 4.2. Koronapurkauksen mallikuva.

Koronapurkauksia esiintyy enimmäkseen haljenneissa tai likaisissa eristelautasissa, avojohtojen säikeissä ja terävissä kärjissä. Koronapurkauksia lisää erityisesti sade ja huurre/kuura. Kuvassa normaali koronapurkaus Kuljun sähköaseman 110 kV:n portaalin eristinlautasissa.



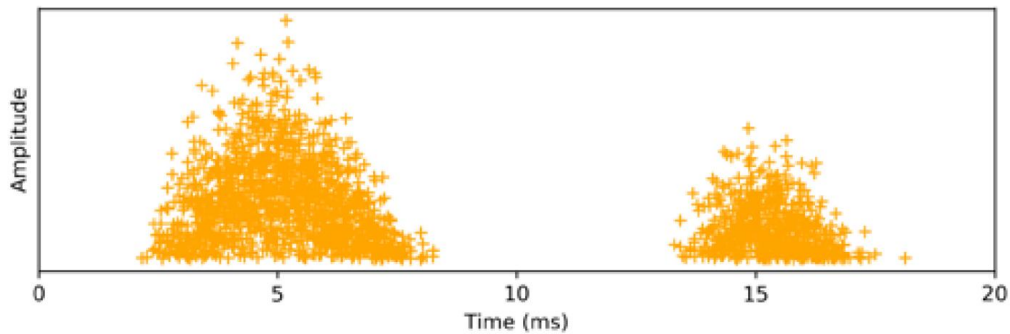
Kuva 4.3. Kuljun Sähköasemalla koronapurkaus (22.3.2019, +4 °C, 35 %).

Koronat lisäävät häviöitä ja häiritsevät radioamatöörien verkkoa. Koronapurkaukset eivät ole niin vahingollisia kuin sisäiset osittaispurkaukset, mutta ne heikentävät eristettä

#### 4.2.1 Osittaispurkaukset (Discharge on surface or inside component)

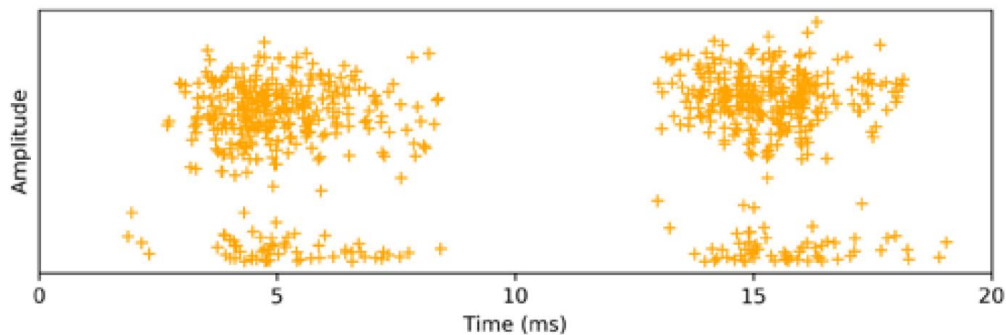
Kriittisimpiä osittaispurkauksia ovat eristysmateriaalien sisällä tai pinnalla olevat purkaukset. Pinnallisilla ja sisäisillä purkauksilla on analysointiohjelmassa hyvin samankaltaiset Discharge prediction -kuvaajat, joten ne luokitellaan samaan luokkaan. Sisäiset purkaukset tapahtuvat yleensä syvällä eristemateriaalin sisällä, jolloin ne eivät tuota riittävästi ääntä äänikameran kuultavaksi. Mikäli sisäinen osittaispurkaus tapahtuu lähellä pintaa, se saattaa lähettää ääntä, jonka kamera voi paikallistaa. Useimmiten kyseessä on kuitenkin pintapurkaus.

Analysointiohjelman Discharge prediction -kuvaajassa pinnallisilla osittaispurkauksilla on kaksi kolmion muotoisia ja symmetristä pisteryhmää.



Kuva 4.4. Mallikuva pinnallisesta osittaispurkauksesta.

Sisäisen osittaispurkauksen tapauksessa analysointiohjelman Discharge prediction -kuvaajan pisteryhmien tulisi olla suurin piirtein saman kokoisia ja symmetrisiä.

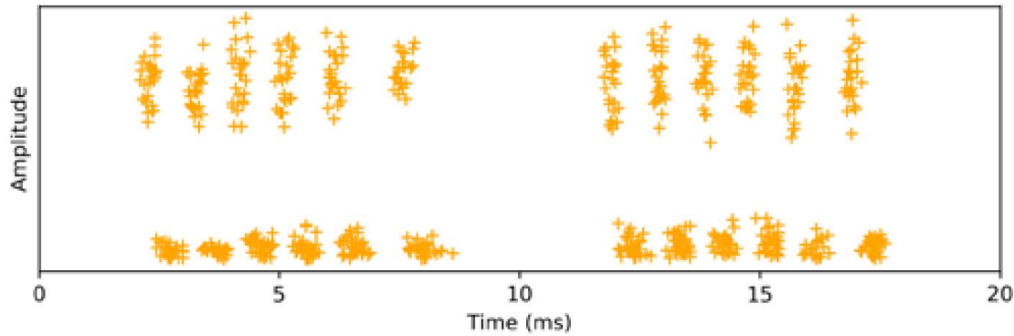


Kuva 4.5. Mallikuva sisäisestä osittaispurkauksesta.

#### 4.2.2 Kelluvat purkaukset (Discharge between components)

Kelluva purkaus tapahtuu johtimen ja kelluvassa potentiaalissa (ei maadoitettu) olevan metalliesineen välillä. Purkaus tapahtuu, kun kahden kohteen välinen potentiaaliero kasvaa tarpeeksi suureksi aiheuttaen kipinöintiä. Kelluvat purkaukset voivat johtua eri osien välisestä huonosta kosketuksesta, esimerkiksi likaisten kosketuspintojen takia. Kelluvat purkaukset saattavat olla vaarattomia, mutta ne voivat olla myös merkki vaurioituneista osista. Tällainen purkaus tulisi tarkastaa tarkemmin.

Analysointiohjelman Discharge prediction -kuvaajassa kelluvat purkaukset näkyvät useina pisteryhminä (pulsseina). Kuvatuista kohteista ei löytynyt yhtään kelluvaa purkausta.



Kuva 4.6. Mallikuva kelluvasta purkauksesta.

### 4.3 Äänikameralla tutkitut kohteet

Mittausten tarkoituksena oli kerätä kokemuksia eri tyyppisistä kohteista ja tutkia kameran soveltuvuutta osittaispurkausten havaitsemiseen sekä arvioida menetelmän käyttökelpoisuutta sähköverkkojen kunnonvalvontamittauksissa.

Tutkimuksessa pyrittiin seuraamaan hyvin suppealla tasolla, kuinka lämpötila ja ilman suhteellinen kosteus vaikuttaa kameran toimintaan mittaustuloksiin. Arvot otettiin Forecan paikallisista sää tiedoista. Kameraa ei voi käyttää vesisateella, koska se ei ole vesitiivis. Kostealla kelillä ja kuuralla koronapurkaukset voimistuvat, jolloin vaimeammat osittaispurkaukset saattavat jäädä niiden takia kameralta kuulematta. Korkeapaine ja tyyni keli parantavat äänien kuuluvuutta. Optimaalisin keli mittauksille olisi todennäköisimmin aurinkoinen pakkaspäivä, jolloin ylimääräiset luonnonäänet eivät häiritsisi mittauksia, mutta äänet kantautuisivat hyvin.

#### 4.3.1 Puistomuuntamot

Puistomuuntamoista kuvattiin muuntajakoppi ulkoa, keskijännitepuoli, muuntajatila ja pienjännitepuoli. Kohteita oli kahdeksan kappaletta ja niiden tiedot on esitetty taulukossa 4.1.

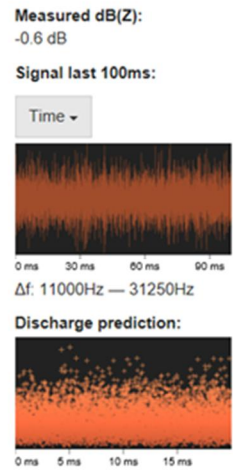
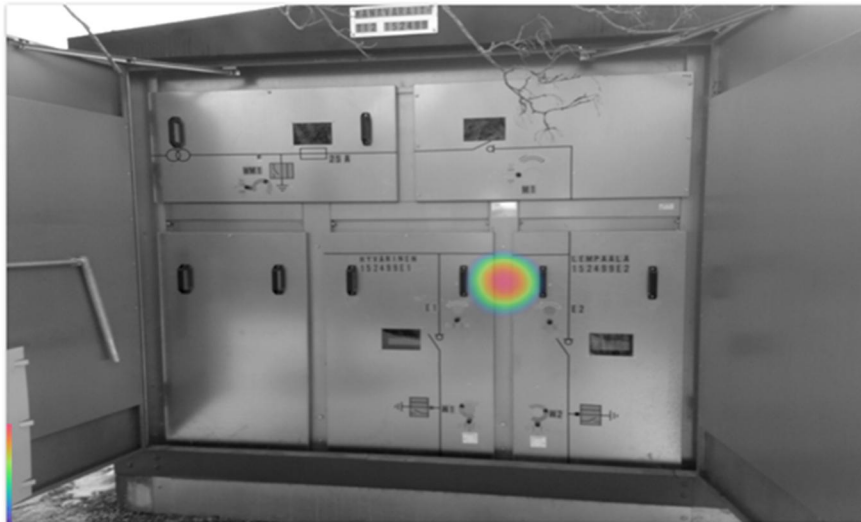
Taulukko 4.1. Kuvattujen puistomuuntamoiden tiedot.

Tunnus	Tyyppi	Valmistaja	Käyttöönotto-päiväys	Muuntajakone (kVA)	Kj-kojeiston eristeaine
102921	Puistomuuntamo sj-erottimilla	ABB	29.8.2006	500	ilma
102994	Puistomuuntamo sj-erottimilla	Strömberg Oy	1.1.1994	315	ilma
152499	Puistomuuntamo (2+1)	ABB	4.8.2011	315	ilma
102989	Puistomuuntamo (3+1)	Strömberg	1.10.1990	500	ilma
156920	Puistomuuntamo (2+1)	Harju Elekter	14.7.2016	315	SF6
153252	Puistomuuntamo (0+0)	KL-Industri Ab	14.3.2012	50	ilma

Teoriassa puistomuuntamoihin soveltuisi hyvin äänikameralla tehtävät akustiset mittaukset, koska niitä pystytään tekemään sähköt päällä aiheuttamatta katkoa asiakkaille. Käytännössä kuitenkin äänikameralla tuntui olevan vaikeuksia kuulla uusien muuntamoiden koteloitujen suojarakenteiden

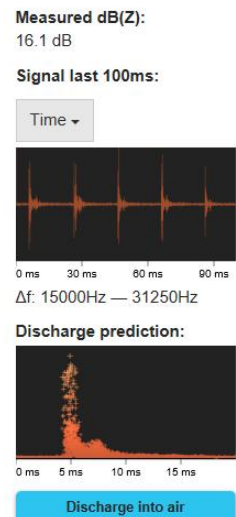
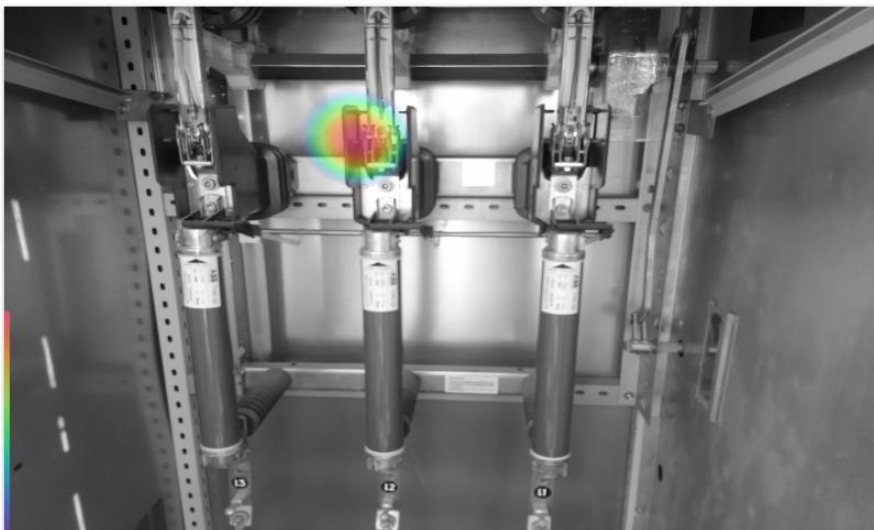


taakse. Vähäisetkin äänet heijastuivat metallipinnoista, eikä äänilähteen sijainnista oikein saanut selvää.



Kuva 4.7. Kanavanraitti 2 puistomuuntamon kj-kojeisto (21.3.2019, 0 °C, 31%).

Avorakenteisten vanhempien muuntamoiden kunnonvalvontaan kamera sopii, mutta purkausten merkitystä ja vakavuutta tulisi tutkia tarkemmin. Esimerkiksi alla olevan kuvan tilanne todennäköisesti muuttuisi, jos erotinta ohjattaisiin uudelleen auki ja kiinni.



Kuva 4.8. Kuokatinmäki puistomuuntamon sulake-erotin (21.3.2019, 5 °C, 44%).

Leinikkien muuntamossa oli havaittavissa kaikkina kuvauspäivinä purkauksia läpiviennin juuressa (kuva 4.9). Analysointiohjelman Discharge prediction -kuvaaja näyttää vähän kelluvan purkaus tyyppiseltä. Kohde olisi hyvä puhdistaa (jännitteettömänä) ja mahdollisesti kuvata sen jälkeen uudestaan.



Kuva 4.9. Osittaispurkaus läpiviennin juuressa (7.5.2019, 7 °C, 65 %).

Puistomuuntamoissa virheellisesti asennetut kj-kaapelipäätteet voivat aiheuttaa vikoja. Osittaispurkausten ehkäisyn kannalta päätteiden teossa on tärkeää huolehtia puhtaudesta ja siitä, että eristeen pinta on hiottu huolella tasaiseksi eikä ole jäänyt ilmataskuja. Tämän tutkimuksen perusteella jäi edelleen epäselväksi pystyisikö kameralla paikantamaan tekovirheen päätteessä. Mikäli päätteiden tarkastus onnistuisi, sitä pystyisi hyödyntämään esimerkiksi takuutarkastuksissa, jolloin vialliseen päätteeseen on jo kerennyt muodostumaan purkauskanavia (sähköpuita).

KJ-kaapelipäätteiden kunnonvalvonnan tutkimukseen olisi hyvä olla kohteita, joissa osittaispurkauksia on jo havaittu muilla menetelmillä. Etenkin sellaisia kohteita olisi hyvä olla ollut, joissa osittaispurkauksia on havaittu lähellä normaalia käyttöjännitettä ja päätteet olisivat näkyvillä. Tällöin ehkä saataisiin selville, miten syvällä eristinaineen sisällä tapahtuvaa purkausta tulisi kuunnella (sen voimakkuus, taajuus ym.).

## 4.3.2 Pylväsmuuntamot

Pylväsmuuntajia kuvattiin viisi kappaletta, muuntamoiden tiedot on esitetty taulukossa 4.2.

Taulukko 4.2. Kuvattujen pylväsmuuntamoiden tiedot.

Tunnus	Tyyppi	Valmistaja	Käyttöönotto-päiväys	Muuntajakone (kVA)
103132	2-pylväsmuuntamo	oma valmiste	01.01.1998	100
103141	2-pylväsmuuntamo	oma valmiste	01.11.1992	30
X2209C15	2-pylväsmuuntamo	oma valmiste	1.1.1973	100
104992	2-pylväsmuuntamo	oma valmiste	1.1.1973	100
104993	2-pylväsmuuntamo	oma valmiste	1.1.1973	100

Kahdesta vaijerierotintyyppisestä pylväsmuuntamosta löytyi merkkejä osittaispurkauksista.



Kuva 4.10. Osittaispurkaus vaijerierotintimella varustetussa pylväsmuuntamossa (16.5.2019).

Kuvasta on vaikea päätellä, onko äänilähde eristin, erotin, kipinäväli vai jokin muu, joten purkauksen tyyppiä on vaikea päätellä. Kuvassa ei näy koronaa, koska molemmat vaiheet näyttävät symmetriseltä, mutta kuvasta ei saa selville tarkkaan mistä ääni tulee eli vaikea sanoa purkauksen tyyppiä tarkkaan. Kuvia kannattaisi ottaa aina useampia eri puolelta kohdetta.

### 4.3.3 Erotinasemat

Erotinasemia kuvattiin neljä kappaletta, niiden tiedot on esitetty taulukossa 4.3.

Taulukko 4.3. Kuvattujen erotinasemien tiedot.

Tunnus	Tyyppi	Valmistaja	Käyttöönotto-päiväys
X1710B62	KJ-erotin verkossa	Stömberg Oy	1.1.1981
251994	KJ-erotin piiskoilla verkossa	ABB	14.3.2012
X1710B70	KJ-kuormanerotin verkossa	Pohjoismainen Sähkö Oy	1.1.1983
200212	KJ-kuormanerotin verkossa	ABB	1.1.2007

Kyynärmäen erotinasemalta löytyi vaimeita purkauksia samasta kohdasta kaikkina kuvauspäivinä. Kyseessä saattoi olla rikkinäinen/likainen eristinlautanen. Muilta erotinasemilta ei löytynyt mitään, joten ne voidaan tältä osin todeta olevan kunnossa.



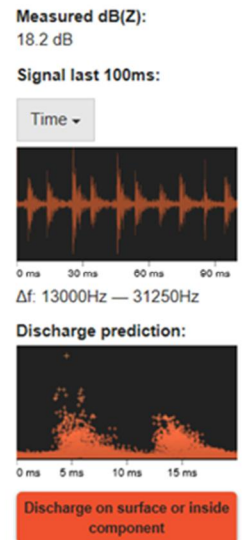
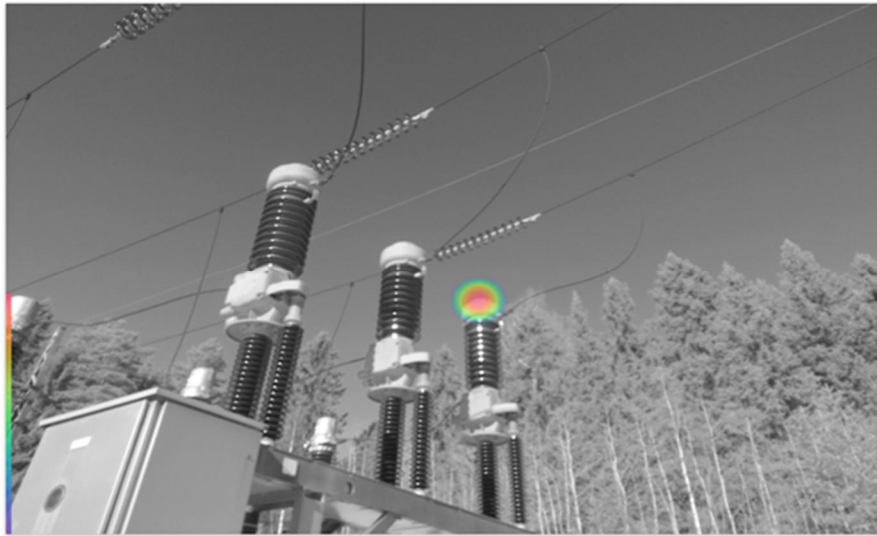
Kuva 4.11. Vaimea purkaus Kyynärmäen erotinasemalla (7.5.2019, 9 °C, 35 %).

### 4.3.4 Sähköasemat

Sähköasemia kuvattiin viisi kappaletta, kuvatut sähköasemat on listattu alla.

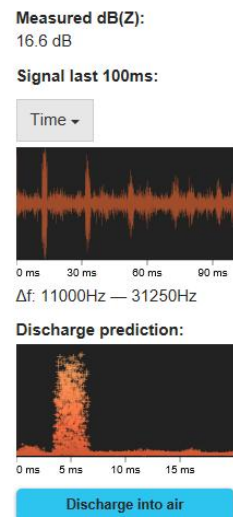
- Kuljun sähköasema
- Toijalan sähköasema
- Viiala sähköasema
- Haavisto sähköasema
- Lempäälä sähköasema

Sähköasemalaitteiden kunnonvalvontaan sopisi hyvin osittaispurkausmittaukset äänikameralla. Osittaispurkausmittaukset voisi ottaa käyttöön nykyisten lämpökuvauksen ja kunnossapitotarkastusten rinnalle osaksi normaalia kunnossapitoa.



Kuva 4.12. Kuljun Sähköasema (22.3.2019, 4 °C, 35 %).

Kuvassa 4.12 Kuljun sähköaseman ulkokentällä 110 kV:n katkaisijan päässä näkyi pintapurkauksia maaliskuun mittauksissa. Samassa kohteessa toukokuussa tehdyissä kuvauksissa purkaukset olivat vaimeampia. Purkausten voimakkuuteen saattaa vaikuttaa lämpötilan ja kuuran lisäksi kuormitustilanne, joka maaliskuussa pakkasyön jälkeen oli huomattavasti suurempi, kuin toukokuussa. Seuraavassa huollossa olisi hyvä tarkastaa katkaisijan öljymäärä, puhdistaa pinnat ja mahdollisesti vielä kuvata kohde uudelleen äänikameralla.



Kuva 4.13. Koronapurkausta Viialan sähköasemalla ylijännitesuojan päässä (27.5.2019, 10 °C, 73 %).

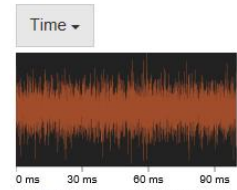
Sähköasemarakennusten sisällä laitteistot olivat koteloituja, joten äänikamera ei löytänyt oikein mitään.





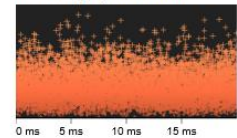
Measured dB(Z):  
-0.7 dB

Signal last 100ms:



Δf: 11000Hz — 31250Hz

Discharge prediction:



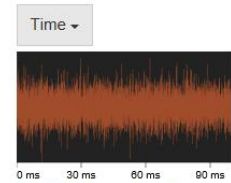
Kuva 4.14. Toijalan sähköasema 20 kV:n kojeisto.

Sähköaseman keskijännitekojeistosta laskevat kaapelit kaapelikellariin (kuva 4.15). Kaapelikellari on potentiaalinen tutkimuskohde KJ-kaapeleiden kunnan arviointiin, koska kaapeleita on jouduttu taivuttamaan ja käsittelemään tilassa. Toijalan aseman kaapelitilasta ei löytynyt merkkejä osittaispurkauksista.



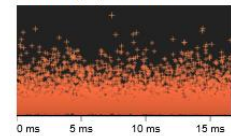
Measured dB(Z):  
6.5 dB

Signal last 100ms:



Δf: 11000Hz — 31250Hz

Discharge prediction:



Kuva 4.15. Toijalan sähköasema kaapelitila.

### 4.3.5 Pienjännitekeskukset ja jakokaapit

Pienjännitepuolelta kuvattiin muuntamoiden PJ-keskukset, kaapelilähdöt, jonovarokkeet sekä jakokaappi ulkoa. Keskuksia ja jakokaappeja oli yhteensä 9 kappaletta (taulukko 4.4).

Taulukko 4.4. Mitatut pienjännitekeskukset ja jakokaapit

Tunnus	Tyyppi	Valmistaja	Käyttöönotto-päiväys
553018	PJ-jakokaappi verkossa	ABB	29.08.2006
501246	PJ-jakokaappi verkossa	Strömberg Oy	01.02.1994
550296	PJ-jakokaappi verkossa	ABB	11.11.2003
102921	Pj-keskus	ABB	29.8.2006
102994	Pj-keskus	Strömberg Oy	1.1.1994
152499	Pj-keskus	ABB	4.8.2011
102989	Pj-keskus	Strömberg	1.10.1990
156920	Pj-keskus	Harju Elekter	14.7.2016
153252	Pj-keskus	KL-Industri Ab	14.3.2012

Pienjännitepuolen mittauksiin soveltuu paremmin lämpö- kuin äänikamera. Äänikamera vaatii selvästi korkeamman jännitteen toimiakseen oikein, eikä kamera kuule koteloitujen rakenteiden taakse.

## 4.4 Taloudellinen arviointi

Sähkökatkoja aiheuttavat luonnonilmiöt, ulkopuolisten toiminta ja tekniset viat. Akustisella äänikameralla on mahdollista saada paikallistettua asennus- ja materiaalivirheistä sekä komponenttien ikääntymisestä johtuvia vikoja. Äänikameralla ei pysty korvaamaan käyttöönnotto-, takuu-, kunnossapito-, määräaika- tai varmennustarkastuksia, mutta sillä voidaan parantaa tarkastusten laatua.

Äänikameran taloudellista hyötyä on vaikea arvioida, koska vaikuttavia asioita on useita:

- akustisen kameran hinta ja luotettavuus,
- tarkastuksiin äänikuvausten vuoksi kuluva lisäaika,
- vikaantuneiden komponenttien määrä suhteessa kokonaismäärään (esim. kaapelipääteiden asennusvirheistä johtuvat viat),
- komponentin vikaantumisten vaikutukset (viankorjauksen kustannukset, keskeytyksestä aiheutunut haitta, maine) ja
- takuukorjauksen piiriin kuuluvat äänikameralla havaitut asennusvirheet.

Erittäin kriittisiä laitteita (esim. sähköaseman komponentit) tarkastaessa äänikameran "takaisinmaksuaika" voi muuttua todella lyhyeksi, jos komponentin vikaantuminen pystytään estämään ennalta.

#### 4.5 Yhteenveto Noiseless-kamerasta

Tässä tutkimuksessa tehty otos oli melko pieni, että sen perusteella ei voida tehdä täysin varmoja johtopäätöksiä. Yleisesti ottaen mittaukset kuitenkin antoivat kuvan kameran soveltuvuudesta käyttökohteisiin ja sen käsityksen, että suuremmilla jännitteillä poikkeava äänilähde kyllä löytyy, jos sellainen on olemassa.

Jatkotutkimuksissa tulisi seurata verkossa olevia erityyppisiä mahdollisia vikakohteita, jotta vian kehityksestä ja vakavuudesta saisi parempaa käsitystä. Lisätutkimuksien tarkoituksena olisi selvittää minkä tyyppiset havainnot tulisi korjata heti ja mitkä voivat odottaa seuraavaa huoltoa. Myös muilla menetelmillä tehtyjä havaintoja olisi hyvä tarkkailla äänikameralla eri menetelmien vertailemiseksi.

Projektista kertyneiden käytännön kokemusten ja saatujen tulosten perusteella voi kuitenkin sanoa, että akustisella kameralla on omat hyvät ja huonot puolensa sekä mahdollisuus kehittyä toimivaksi ja näppäräksi työkaluksi KJ- ja SJ-verkon kunnonvalvontaan. Järjestelmän parhaita puolia oli se, että laitteen ohjelmisto analysoi mittaustulokset nopeasti ja laite antaa alustavan tulkinnan purkaustyyppistä automaattisesti. Tämä helpottaa huomattavasti käyttäjää. Haasteina äänikameralle ovat koteloidut rakenteet ja pienjännitteiset laitteistot. Lisäksi erilaisten mittaustulosten luokittelu heti korjattaviin ja vain seurattaviin kohteisiin vaatii lisää mittaustuloksia, kohteiden seuranta ja jatkotutkimuksia.

Kaapeloitujen sähköverkkojen määrän kasvaessa tulisi kunnonvalvontaan löytää juuri tämän tyyppisiä helppokäyttöisiä työkaluja, joita pystyisi käyttämään jännitteisessä verkossa.



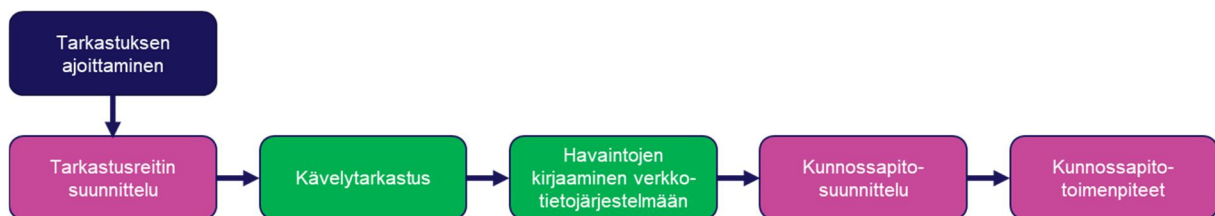
## 5 DRONE PJ-ILMAJOHTOVERKON KUNNONVALVONNASSA

### 5.1 PJ-ilmajohdoverkon kunnonvalvonnan nykytila

Kunnonvalvonta koostuu pääasiassa verkon komponenteille tehtävistä erilaisista silmämääräisistä ja mittalaittein suoritetuista tarkastuksista. Elenia on Jakeluverkon tarkastusohjeessaan (18.2.2019) määrittellyt kunnossapitotarkastusten tavoitteet seuraavasti: ”Tarkastuksen tavoitteena on henkilö- ja ympäristöturvallisuuden varmistaminen, käyttövarmuuden ylläpito, häiriöiden ennaltaehkäiseminen sekä verkkotietojen dokumentoinnin varmistaminen. Kerättyä kunnossapitotietoa käytetään investointihankkeiden päätöksentekoon.” Tarkastuksilla on siis merkittävä rooli sähköjakelun toimivuuden ja turvallisen toiminnan mahdollistajana sekä toiminnan kehittämisen pohjana.

#### 5.1.1 Yleistä tarkastuksista

Pienjännitteisen ilmajohdoverkon kunnonvalvontaa suoritetaan perinteisesti maasta tehtävänä jalkapartiointina, jonka periaatteellinen prosessikaavio on esitetty kuvassa 5.1. Pienjännitteiset ilmajohdot tarkastetaan Elenia Oy:n verkkoalueella 8 vuoden välein ja tarkastukset on jaettu sähköasema-alueisiin, jolloin yhden sähköaseman syöttämä pienjänniteverkko tarkastetaan yhdellä kertaa. Jakeluverkon tarkastusohjeen mukaan tarkastajalta vaaditaan työhön soveltuvaa ammattitaitoa ja lisäksi hänet perehdytetään tarkastustyöhön. Tarkastustyössä noudatetaan Tukes S10 mukaisia standardeja, alan turvallisuusmääräyksiä, yleisiä hyviä käytäntöjä sekä tilaajan määrittelemiä työmääräyksiä ja -ohjeistuksia.



Kuva 5.1. PJ-ilmajohdon perinteisen kunnossapitotarkastuksen prosessi. Sinisellä pohjalla tarkastusprosessin käynnistävä toiminta, pinkillä toimistolla tehtävät toimet ja vihreällä kenttätyöskentelyn osuus.

Tarkastajan tekemät havainnot voidaan jakaa karkeasti kahteen ryhmään: välittömiä toimenpiteitä vaativiin havaintoihin ja ei välitöntä toimintaa vaativiin havaintoihin. Välittömiä toimenpiteitä vaativia havaintoja ovat muun muassa sellaiset viat, joista voi seurata hengen, terveyden tai omaisuuden vaara tai sähköjakelun keskeytys. Tällaisista vioista on ilmoitettava viipymättä Elenia Oy:n vikapuhelinpalveluun. Vikapuhelinpalveluun ilmoitetaan välittömästi myös sähkötapaturmat ja läheltä-piti-tapaukset ja nämä kirjataan lisäksi Quentic-järjestelmään. Ei välitöntä toimintaa vaativat havainnot kirjataan pääsääntöisesti suoraan verkkotietojärjestelmään. (Jakeluverkon tarkastusohje)

Tarkastustyö tulee suhteuttaa eri aikoina ja eri alueilla käytössä olleisiin rakennestandardeihin, -ratkaisuihin ja -tapoihin, mutta kaikki vaaraa aiheuttavat rakenneratkaisut tulee kuitenkin ilmoittaa. Tarkastustyössä tulee lisäksi huomioida verkon normaali ikääntyminen

havaintojen ilmoittamisessa. Vaaraa aiheuttavat rakenteet ilmoitetaan kuitenkin kaikilta osin myös ikääntyneen verkon osalta. Tarkastustyön yhteydessä tarkastajan on mahdollista tehdä pienimuotoisia korjaustoimenpiteitä havaittujen poikkeamien korjaamiseksi, esimerkiksi puutteellisia merkintöjä korjaamalla. (Jakeluverkon tarkastusohje)

PJ-ilmajohtoverkon tarkastuksiin kuuluvat pylväiden, johtimien ja johdon välittömän ympäristön tarkastaminen. Välitön ympäristö tarkoittaa aluetta johdon ympärillä, josta esimerkiksi puu voi kaatuessaan yltää johtoon. Pylväille tehdään lahoisuustarkastus kaivaen vain D2-kyllästäjämerkinnällä merkityille pylväille. Pylväiden tarkastamisessa työhöjeena käytetään soveltuvin osin verkostosuosituksia ”RJ 33:09 puupylväiden lahoisuustarkastus ja lujuuden määrittäminen” sekä ”TA 2:96 johdon ja johtoalueen tarkastus”. (Jakeluverkon tarkastusohje)

PJ-pylväiden ohella tarkastetaan pylväiden harukset. Haruksista tarkastetaan myös harussyöpymät erityisesti kohteissa, joissa harusvirtapiiriä ei ole katkaistu sekä paikoissa, joissa maadoitusköysiä tai maadoituskenttä on eristämättömän haruksen läheisyydessä ja lisäksi maaperä on sähköä johtavaa. (Jakeluverkon tarkastusohje)

Pylvästarkastuksessa varmennetaan lisäksi verkkotietojärjestelmän dokumentointi ja pylvään sijaintitieto korjataan, mikäli tieto poikkeaa yli 20 metriä tai jos kohde on toisella puolella tietä. Lisäksi tarkastetaan johtolajit sekä puuttuvat välisulakkeet, maadoitukset jne. huomioidaan ja korjataan verkkotietojärjestelmään. Kahdeksan vuoden välein suoritettavaan PJ-tarkastukseen ei kuulu muuntajien tarkastaminen, vaan ne tarkastetaan neljän vuoden välein tehtävässä ilmakuvausrytmissä. Lisäksi on olemassa erityiskohteita, joiden läheisyydessä olevat sähkölaitteistot tarkastetaan ja valokuvataan vuoden välein. Tällaisia erityiskohteita ovat esimerkiksi koulualueet, urheilu- ja leirialueet, vilkasliikenteiset vesiväylät ja luokan 1 pohjavesialueet. (Jakeluverkon tarkastusohje)

### 5.1.2 Tarkastuksessa tehtävät havainnot

Verkosta tehdyt havainnot, jotka on välittömästi ilmoitettava Elenia vikapuhelinpalveluun ovat mm.:

- linjalle kaatunut puu
- vino pylvä, jonka seurauksena etäisyysvaatimukset eivät täyty
- kaikki terveyden ja omaisuuden vaarantavat havainnot, esim. ilmajohto käsin kosketeltavissa tai ilmajohto estää liikenteen tiealueella

PJ-pylvästarkastuksessa tarkastettavia asioita ovat:

- pylväs - nauha
- pylväs - varsi
- pylväs - yleiskunto
- pylväs - yläpää
- pylväs - maadoitus
- pylväs - johtoaukko
- PJ-pylväs - harustus
- pylväs - merkinnät
- pylväs - varusteet
- pylväs - johdotus

Raivaustarpeen arvioinnissa hyödynnetään verkkotietojärjestelmästä löytyvää tietoa tarkastettavan alueen seuraavasta raivausajankohdasta, jonka perusteella oksimis- ja raivaustarvehavainnot tehdään. Vaaralliset reunapuut raportoidaan kuitenkin aina.

Pylvään vinouden määrittämisessä arvioidaan kallistuman aikajänne. Jos turvaetäisyydet kallistumasta huolimatta tulevat täyttymään seuraavaan tarkastusajankohtaan saakka, katsotaan pylvään olevan kunnossa.

Erityistä huomioita havaintojen tekemiseen on kiinnitettävä kohteisiin, joiden läheisyydessä maallikot voivat työskennellä. Tällaisia riskipaikkoja ovat tyypillisesti piha-alueet, varastot johtoalueilla, huoltoasemien pihoilla olevat rakenteet, mainostaulut, tiealueet ja rakennustyömaat. Mikäli havaitaan kohteita, joissa vähimmäisetäisyydet eivät täyty, on siitä ilmoitettava välittömästi toimeksiantajalle ja tarvittaessa järjestettävä varoitus kohteeseen.

### **5.1.3 Havaintotiheydet**

Vuonna 2017 tarkastetun Viialan sähköaseman alueen PJ-verkko käsittää yhteensä noin 3800 PJ-pylvästä, joka vastaa noin 220 kilometriä ilmajohtoa. Tarkastuksessa tehtyjen havaintojen perusteella analysoitiin PJ-verkosta yleisimmin löytyviä vikoja. Yleisimmin tehdyt havainnot liittyivät pylväiden kuntoon tai asennukseen sekä raivaustarpeeseen. Joitakin havaintoja tehtiin myös pylväiden haruksista sekä maadoituksista. Edellä mainitut seikat ovat siten myös ilmasta tehtävän tarkastuksen oleelliset tarkastelukohteet.

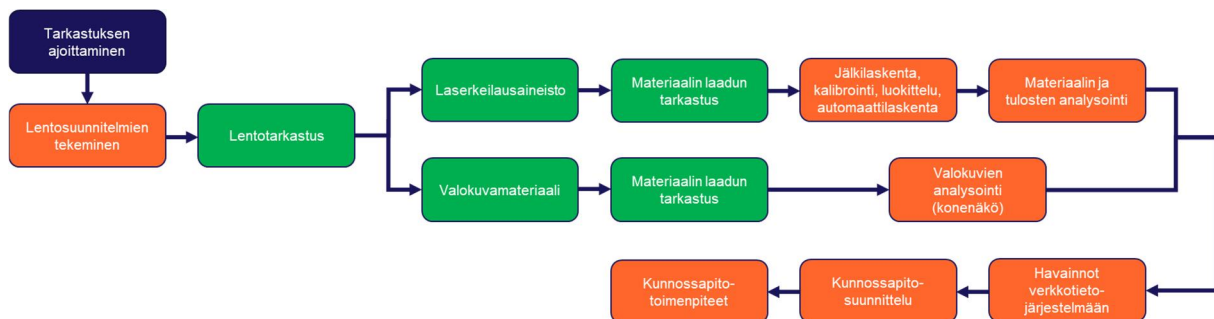
### **5.1.4 Lentotarkastukset**

Voimassaolevassa jakeluverkon tarkastusohjeessa on lentotarkastus määritetty helikopterilla tai pienoislentokoneella suoritettavaksi jakelu- tai alueverkon tarkastukseksi tai häiriötilanteen aikaiseksi vikojen etsinnäksi. Tarkastuslennoista on ohjeen mukaisesti ilmoitettava asiakkaille, joita lennot saattavat häiritä ja tämän voidaan hyvin katsoa koskevan myös miehittämätöntä ilmailua ja sen avulla tapahtuvaa tarkastustoimintaa. Tarkastuslennot on pyrittävä suorittamaan siten, ettei maatilojen eläimille aiheuteta turhaa häiriötä ja varsinkin turkistarhojen lähistöllä lentämistä on

vältettävä etenkin poikimisaikaan 15.4.–30.6. Tarkastuslentoja varten pylväissä on oltava risteämämerkinnät, joissa esiintyvät puutteet on huomioitava ja kirjattava. 20 kV linjoissa risteämämerkinnät on toteutettu nauhoilla ja 110 kV linjoissa ylöspäin osoittavilla nuolilla risteämää edeltävissä pylväissä.

## 5.2 Dronen hyödyntäminen määräaikaistarkastuksissa

Tässä projektissa muodostamamme näkemyksen mukaisesti droneilla toteutettava PJ-ilmajohtoverkon kunnonvalvonta tulisi koostumaan kuvan 5.2 mukaisista osista. Ensimmäisenä määritellään jokaiselle verkon osalle tarkastuksen sykli ja ajankohdat, kuten perinteisessä kävelytarkastuksessakin. Tämän jälkeen aiemmasta poiketen suunnitellaan lentoreitit muuntopiireittäin tavoitteena, että koko muuntopiiri pystytään kattamaan yhdellä lennolla. Lentosuunnitelman tekemisessä hyödynnetään Maanmittauslaitoksen tai vastaavaa korkeusmallia maanpinnan muodoista, pylväiden sijaintitietoja sekä tarvittaessa Maanmittauslaitoksen laserkeilausaineistoa alueen puuston korkeuden määrittämiseen. Lennonsuunnittelussa varmistetaan lisäksi lentokenttien ja muiden lentotoimintaan käytettyjen alueiden kuten helikopterikenttien sijainti sekä mahdolliset lentokielto- ja -rajoitusalueet. Ennen lennonsuunnittelua on lisäksi jo hyvä olla ilmatilavaraus tehtynä, koska se täytyy tehdä viimeistään 8 viikkoa ennen aiottua BVLOS-lentoa. Ilmatilavaraus on aktivoitava lentoa edeltävänä päivänä klo 12:00 mennessä.



Kuva 5.2. PJ-ilmajohtoverkon kunnossapitoprosessi droneja hyödyntäen.

Huolellisen lentosuunnittelun jälkeen voidaan siirtyä maastoon lentosuunnitelmaan merkityn kotipisteen läheisyyteen. Maastossa tehdään viimeinen tarkastus lentosuunnitelman lentokorkeuteen, ja -nopeuteen sekä muihin parametreihin ympäristön olosuhteiden mukaisesti. Tämän jälkeen ilma-alus voidaan lähettää lentotehtävälle tiedonkeruusensorit aktivoituina, jonka se suorittaa autonomisesti operaattorin seurattuna lennon etenemistä. Onnistuneesti suoritettua lentoa jälkeen tehdään alustava tarkistus kerätyille materiaalille, jotta se vastaa asetettuja vaatimuksia. Jos data ei ole vaatimusten mukaista, voidaan suorittaa uusi lento samalle reitille ja jos data on kunnossa, voidaan siirtyä seuraavaan kohteeseen suorittamaan samat toimenpiteet. Muita maastossa suoritettavia tehtäviä ovat ympäristön olosuhteiden jatkuva tarkkailu, lentopäiväkirjan täyttäminen ja akkujen varaustilan (jännitteen) seuranta, mikäli käytetään akkukäyttöistä dronea.

Maastossa suoritetun lentopäivän jälkeen kerätty materiaali prosessoidaan ja analysoidaan toimistolla. Laserkeilausaineisto vaatii oman jälkilaskennan, kalibroinnin sekä luokittelun ja sille voidaan lisäksi tehdä joitakin automaattilaskentatoimenpiteitä, jonka jälkeen loput havainnot tehdään manuaalisesti. Valokuvamateriaali ei sen sijaan vaadi lennon jälkeen prosessointia, jos kuvissa vain on sijaintitieto liitettyä. Valokuvien analysoinnissa tavoitteena tulisi olla konenäön hyödyntäminen suuren datamassa analysoinnissa, jonka jälkeen sen tekemät havainnot ja sen merkitsemät epävarmat tilanteet tarkastetaan ihmisen toimesta. Molemmista materiaaleista tehdyt havainnot kirjataan tässä yhteydessä suoraan verkkotietojärjestelmään. Tässä pyrkimyksenä tulisi olla, että havainnot kirjautuisivat materiaalin analysointiin käytetystä järjestelmästä suoraan rajapinnan kautta verkkotietojärjestelmään. Toinen mahdollisuus on, että havainnot kirjataan manuaalisesti verkkotietojärjestelmän kautta.

### 5.2.1 Droneteknologia

Ammattikäyttöön tarkoitettuja miehittämättömiä ilma-aluksia nimitetään tässä yhteydessä termillä drone. Harrastuskäyttöön tarkoitetuista erilaisista kauko-ohjattavista miehittämättömistä ilma-aluksista puhuttaessa sen sijaan käytetään yleisesti termiä lennokki, jolloin näiden kahden välille voidaan muodostaa riittävä ero. Erilaiset dronet voidaan jakaa karkeasti kahteen eri kategoriaan: yksi- tai moniroottoriin helikopteria muistuttaviin dronekoptereihin sekä kiinteäsiipisiin lentokonetta muistuttaviin liidokkeihin. Dronekopterit ovat usein pientä helikopteria muistuttavia tai neljästä tai useammasta roottorista koostuvia ilma-aluksia (kuva 5.3).



Kuva 5.3. Kaksi erilaista dronekopteria, a) yksiroottorinen helikopteria muistuttava ja b) moniroottorinen dronekopteri. Kuvat: [www.skylineuav.com.au](http://www.skylineuav.com.au), [www.dji.com](http://www.dji.com).

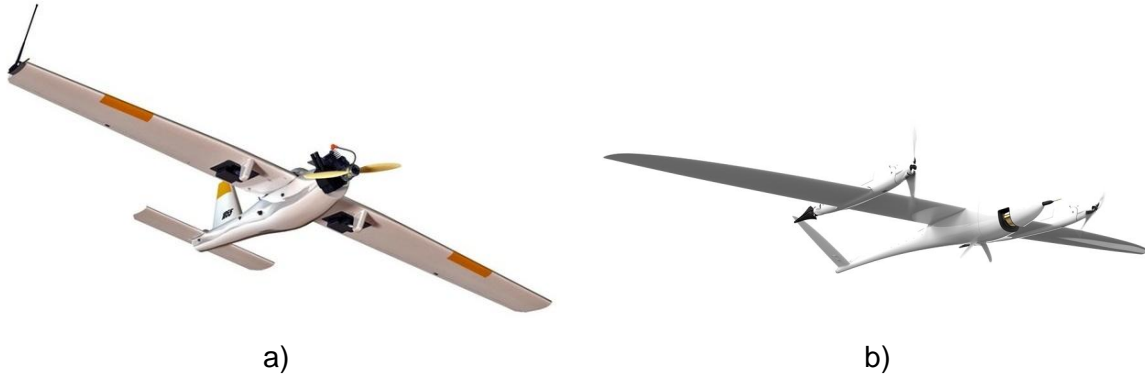
Dronekopterien hyviksi ominaisuuksiksi voidaan lukea niiden monipuoliset lento-ominaisuudet. Ne tarvitsevat lentoonlähtöön vain vähän tilaa, niiden lentonopeutta voidaan säätää monipuolisesti ja ne tekevät tarvittaessa jyrkkiäkin käännöksiä lennon aikana. Lentonopeuden säätö varsinkin valokuvaustarkoituksessa on tärkeää, sillä dronekoptereilla voidaan esimerkiksi pysähtyä leijumaan paikoilleen tarkan kuvan ottamista varten ja suunnata kamera juuri haluttuun suuntaan. Vastaavasti kopterit voivat enimmillään saavuttaa jopa 70 kilometrin tuntinopeuden.

Voimanlähteinä kevyemmät dronekopterit käyttävät yleisesti sähköä, joka tuotetaan sähkömoottoreille akustosta. Multikopterien tapauksessa moottorien ohjaukset vaativat sähköä, sillä polttomoottorien säätökyky ei riitä dronekopterin vaatimukseen. Helikopteria muistuttavat dronekopterit on kuitenkin usein varustettu polttomoottorilla, joka tuottaa roottorin tarvitseman voiman. Akkukäyttöisten dronekopterien heikkoutena voidaan pitää niiden melko vaatimatonta toiminta-aikaa ja -matkaa sekä heikkoa hyötykuorman kantokykyä, jotka ovat suurimmillaan luokkaa 1 tunti, 30 km ja 3 kg. Polttomoottorikäyttöisillä dronekoptereilla vastaavat luvut voivat olla luokkaa muutamia tunteja, jopa satoja kilometrejä ja 20 kg, joka tarkoittaa varsinkin toiminta-ajan osalta huomattavasti parempaa kustannustehokkuutta laajojen alueiden tarkastuksissa. Nykyään on kuitenkin markkinoille tullut ja tulossa myös hybridiratkaisuja, joissa sähkökäyttöisten dronekopterien toiminta-aikaa jatketaan lennon aikana polttomoottorin ja generaattorin avulla akustoon tuotettavalla sähköllä. Näin voidaan ratkaisusta riippuen päästä lähelle polttomoottorikäyttöisten dronekopterien toiminta-aikoja.

Kiinteäsiipiset liidokit dronekoptereista poiketen vaativat usein merkittävän tilan kiitoradalle nousua ja laskeutumista varten, joka rajoittaa niiden käyttömahdollisuuksia ja mitä siten voidaan pitää niiden heikkoutena. Liidokkien hyviin ominaisuuksiin sen sijaan kuuluu niiden erinomainen polttoainetaloudellisuus lennon aikana, joka on aerodynaamisesti muotoiltujen siipien aikaansaaman nosteen ansiota. Aerodynamiikan vaatimukset kuitenkin aiheuttavat sen, että kiinteäsiipisten liidokkien minimilentonopeus on pidettävä riittävän suurena ja se on usein luokkaa 70–80 km/h. Tämä luo haasteita tarkkaan valokuvaukseen esimerkiksi kunnossapitotarkastusten osalta, sillä liidokin ja siten kameran liike luo kuvaan merkittävästi epäterävyyttä lentokorkeuden ollessa matala ja se lisääntyy voimakkaasti suljinaikaa kasvattaessa.

Liidokkien voimanlähteenä käytetään sekä akkuja, että polttomoottoreita. Akkuja käytetään yleensä pienemmissä laitteissa, joiden toiminta-ajat jäävät akkukäyttöisten dronekopterien tasolle (max 1 h), mutta suurempi lentonopeus tarkoittaa usein moninkertaista kymmenien kilometrien toimintamatkaa. Erillistä hyötykuormaa akkukäyttöisissä liidokeissa ei tosin yleensä voida kantaa (kamera usein integroitu liidokkiin) tai se rajoittuu korkeintaan 1,5 kilogrammaan. Polttomoottorikäyttöisten liidokkien (kuva 5.4 a)) toiminta-ajat ja -matkat ovat sen sijaan aivan eri tasolla edellisiin verrattuna, sillä ne voivat pysyä ilmassa useita tunteja ja niiden toimintamatka voi olla satoja kilometrejä. Lisäksi niiden hyötykuorma voi olla jopa 20 kilogrammaa. Uutena eräänlaisena hybridiratkaisuna nykyään on saatavilla myös niin sanottuja VTOL-liidokkeja (vertical take-off and landing, kuva 5.4 b)), jotka kykenevät nimensä mukaisesti nousemaan ja laskeutumaan sähkömoottorien avulla pystysuorasti kuten dronekopterit, mutta lennon aikana ne toimivat kuten aerodynaamiset liidokit. Tällaisilla akkukäyttöisillä laitteilla voidaan saavuttaa jopa 1,5 tunnin toiminta-aika, lähes sadan kilometrin toimintamatka ja jopa 2 kilogramman hyötykuorma. Vastaavia VTOL-liidokkeja on varustettu myös

hybridijärjestelmällä, joka kasvattaa niiden toiminta-ajan ja -matkan lähes polttomoottoriliidokkien tasolle.



Kuva 5.4. Kaksi erilaista kiinteäsiipistä dronea, a) perinteinen ja b) VTOL kiinteäsiipinen drone. Kuvat: [www.avartek.fi](http://www.avartek.fi), <https://www.quantum-systems.com/>.

### 5.2.2 Sensoriteknologia

Nykyään keski- ja suurjännitteisten sähkölinjojen määräaikaistarkastuksissa hyödynnetään yleisesti valokuvausta (RGB-kamera, Red-Green-Blue) ja laserkeilausta (LIDAR, Light Detection and Ranging) vikojen havainnointiin ja raivaustarpeen analysointiin helikopterin avulla. Tavallisen RGB-kameran avulla otetuista kuvista voidaan tehdä eri sähköverkon komponenttien silmämääräistä tarkastusta jälkikäteen. Vaatimukset kuvien tarkkuudelle ovat melko suuret, sillä esimerkiksi säievikojen erottaminen vaatii kuvilta korkeaa erottelukykyä (alle 0,5 cm/px) ja terävyyttä. Nykyaikaiset järjestelmäkamerat kuitenkin mahdollistavat hyvin tarkkojen ja terävien kuvien ottamisen myös lentävästä kohteesta, kun varustetaan kamera riittävän valovoimaisella optiikalla, jolloin kameran suljinaika pysyy pienenä ja näin ollen kameran liike ei muodosta ongelmaa kuvan terävyydelle.

Laserkeilausta käytetään pääasiassa vain raivaustarpeen ja riskipuuston kartoittamiseen johtokadulta ja sen läheisyydestä. Laserkeilain lähettää ympärilleen useita lasersäteitä ja mittaa ympäristössä olevista kohteista takaisin heijastuvien säteiden heijastumiseen kuluva aika. Tämän perusteella laserkeilain määrittää kohteen sijainnin kolmiulotteisessa avaruudessa itseensä nähden. Koska laserkeilain on helikopterissa koko ajan liikkeessä, tulee keilaimen reaaliaikainen sijainti määrittää joka hetki, jotta määritetyt kohteet voidaan sitoa johonkin tunnettuun koordinaatistoon. Keilaimen sijainnin määrittämiseen käytetään GNSS-vastaanottimia (Global Navigation Satellite System) sekä IMU-yksiköitä (Inertial Measurement Unit), jotka määrittävät keilaimen sijainnin satelliittien (GNSS) ja laitteen sisäisten kiihtyvyyssensorien, gyroskooppien ja magnetometrien tietoihin (IMU) perustuvan laskennan avulla. Laskennan avulla saadaan muodostettua miljoonista yksittäisistä pisteistä koostuva kolmiulotteinen pistepilvi todellisesta ympäristöstä. Pistepilvestä voidaan tämän jälkeen poimia johtimet ja tehdä etäisyyslaskentaa automaattisesti tarkoitukseen



kehitettyillä ohjelmistoilla, joiden avulla raivaustarve tai linjalle kaatumisvaarassa olevat puut voidaan määrittää.

RGB-kameran ja laserkeilaimen lisäksi erilaisten vikojen havainnointiin on käytetty myös lämpö- ja UV-kameroita esimerkiksi vaurioituneiden liitosten havainnointiin. Lämpökameran avulla voidaan havaita kohteita, joiden lämpötila on muuta ympäristöä selvästi korkeampi, joka voi olla merkki vaurioituneesta liitoksesta. UV-kameran toiminta sen sijaan perustuu suurjännitteellä esiintyvän korona-ilmiön ja tätä kautta viallisten komponenttien tai liitosten havainnointiin. Yksi mielenkiintoinen sensoriteknologia, jota ei kuitenkaan juurikaan ole voimajohtojen tarkastuksissa käytetty on hyperspektrikamera, joka pystyy analysoimaan myös näkyvän valon ulkopuolisia aallonpituuksia. Tämän perusteella sillä kerätyistä kuvista voidaan havaita huomattavasti enemmän asioita kuin tavallisen RGB-kameran kuvista. Hyperspektrikameraa on muissa sovelluksissa käytetty esimerkiksi kasvillisuuden terveyden seurantaan, puuston tutkimiseen, elintarvikkeiden tuoreuden määrittämiseen, muovien lajitteluun sekä vesien tutkimukseen.

Teknologian kehitys on mahdollistanut sensorien koon pienentämisen ja siten näitä sensoreita voidaan nykyään kiinnittää myös miehittämättömiin ilma-aluksiin.

### 5.2.3 Dronella tehtävät kunnossapitohavainnot

Alla olevaan listaan on sinisellä merkitty tarkistettavat asiat, jotka on havaittavissa RGB-kameralla, vihreällä asiat, jotka voidaan sovelletusti tarkastaa joko kameralla tai laserkeilaimella ja oranssilla asiat, jotka ovat haasteellisia tarkastaa kummallakaan sensorilla. Valokuvista tehtävien havaintojen onnistuminen on suurelta osin kiinni pylvään sijainnista, toisin sanoen maaston peitteisyydestä.

PJ-pylvästarkastuksessa tarkastettavia asioita ovat:

- pylväs - nauha
- pylväs - varsi
- pylväs - yleiskunto
- pylväs - yläpää
- pylväs - maadoitus
- pylväs - johtoaukko
- PJ-pylväs - harustus
- pylväs - merkinnät
- pylväs - varusteet
- pylväs – johdotus

Maadoitusten tarkastaminen on hyvin haastavaa ilmasta käsin. Joitakin rikkoutumisia voidaan luultavasti havaita ilmasta otetusta valokuvasta, mutta suurin osa puutteista jää todennäköisesti huomaamatta. Tämä ei kuitenkaan ole välttämättä ongelma, sillä verkolle tehdään erikseen maadoitusmittaukset sekä lahoisuustarkastukset, joiden aikana edellä mainitut asiat voidaan tarkastaa. Myös harusten tarkastaminen on varsinkin maassa heinikon tai muun kasvillisuuden



seassa olevan alaosan kohdalta haastavaa ja monesti se jää ainakin valokuvissa näkymättömiin. Valokuvista ja myös laserkeilausaineistosta voidaan kuitenkin havaita, mikäli harus on rikkoutunut siten, että harus on löysällä tai poikki, joten ainakin vakavat vauriot on mahdollista havaita myös ilmasta tehtävässä tarkastuksessa. Aiemmin mainittua haruksen syöpymisen tarkastusta on kuitenkin hyvin vaikea ilmasta käsin havaita.

#### 5.2.4 Kerätyn materiaalin analysointi

RGB-kameralla kerättyä materiaalia ei yleensä tarvitse tiedonkeruun jälkeen erikseen käsitellä vaan kameras muistikortilta saatavat kuvat ovat valmiita tarkastusta varten. Kuviin on usein jo kuvanottovaiheessa lisätty GPS-tieto, joka kertoo mistä kuva on otettu, jonka perusteella voidaan määrittää kuvassa näkyvä pylväs. Tätä analysointia voidaan lisäksi helpottaa, jos pystytään määrittelemään kuvan tiedoista kuvanottosuunta, johon tarvitaan kuvien jälkikäsitelyä.

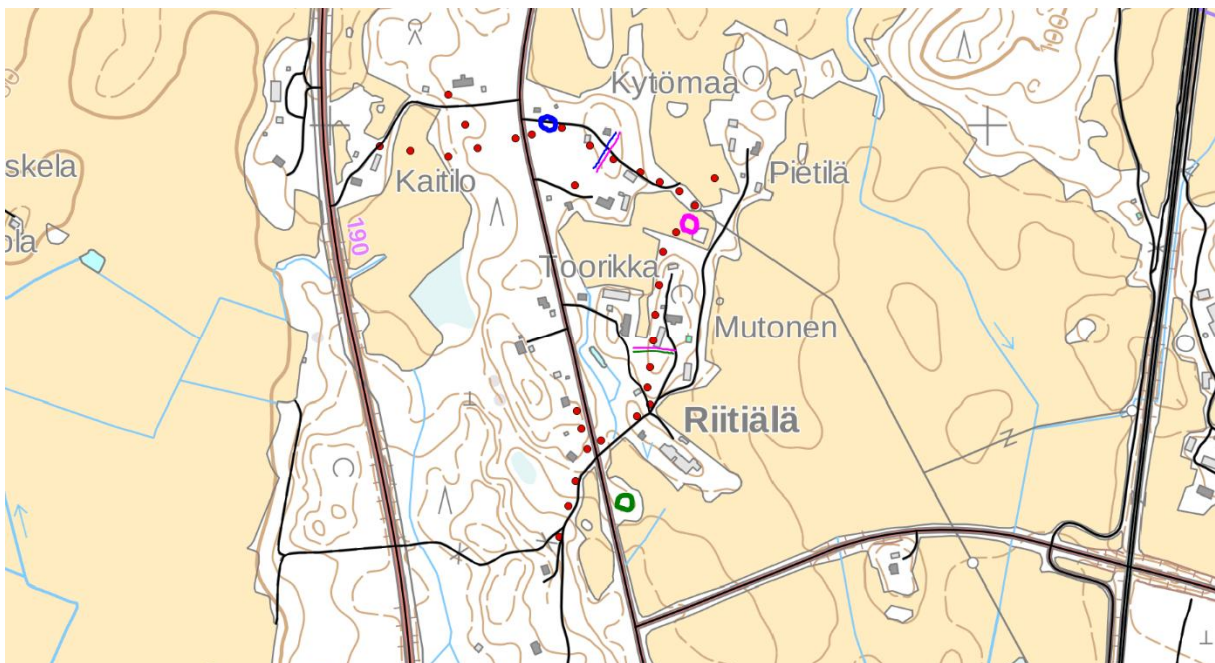
Analyysin alkuvaiheessa pistepilvestä luokitellaan usein maanpintaa, matalaa kasvillisuutta, rakennuksia ja korkeaa kasvillisuutta kuvaavat pisteet omiin luokkiinsa. Tämän jälkeen aineistosta voidaan alkaa luokitella myös pylväät ja johtimet varsinaisten havaintojen tekoa varten. Pisteiden luokittelussa voidaan käyttää osaksi automaattisia toimintoja, mutta osa luokittelusta tapahtuu suurelta osin manuaalisesti. Jos luokitteluun kuitenkin on olemassa hyvät työkalut, sujuu se varsin nopeasti.

Kerättyä materiaalia, sekä valokuvia, että pistepilveä voidaan analysoida manuaalisesti, sekä ainakin osittain automaattisesti. Valokuvien manuaalinen analysointi tarkoittaa valokuvien läpikäymistä kuva kavalta ihmisen toimesta, joka tekee valokuvista nähtävät havainnot ja merkitsee ne esimerkiksi suoraan verkkotietojärjestelmään. Automaatiota tarkastukseen voidaan sen sijaan valokuvien tapauksessa lisätä hyödyntämällä konenäköä ja kuvantunnistusta. Konenäkö voidaan esimerkiksi opettaa havaitsemaan kaikki pylväät ja luokitella pylväät esimerkiksi kategorioihin "kunnossa" ja "viallinen". Kuvantunnistusta voidaan hyödyntää myös tekemään valokuvista automaattisia suurenoksia esimerkiksi koko pylväästä, sekä pylvään ala- ja yläosasta, joka nopeuttaisi kuvien läpikäyntiä manuaalisesti.

Pistepilveä voidaan myös käsitellä manuaalisesti selaamalla, joko luokiteltua tai luokittelematonta pistepilveä pylväs pylväältä ja jänneväli jänneväliltä. Luokitellusta materiaalista tarkastuksen tekeminen on myös manuaalisesti huomattavasti nopeampaa ja käyttäjäystävällisempää ja periaatteessa luokittelun aikana voidaan jo tehdä joitakin havaintoja. Automaatiikan avulla sen sijaan voidaan helposti määrittää muun muassa jokaisen pylvään maanpäällinen korkeus, jokaisella jännevälillä olevan johtimen lyhin etäisyys maahan sekä johtimelle riskinä oleva kasiviilisuus ja muut kohteet.

### 5.3 Maastotyöskentely ja kerätty materiaali

Projektin maasto-osuus suoritettiin Akaan kunnassa Mutosen muuntopiirissä Riitiäläntien ja Mutosentien läheisyydessä kolmessa osassa. Muuntopiirin verkkopituus on yhteensä 1,7 km ja pylviäitä on yhteensä 39 kpl. Lennettyä PJ-linjaa oli 1,35 km ja PJ-pylväitä 32 kpl. Kuvassa 5.2 on esitettyä lentotarkastuksen kohteena olleet PJ-pylväät sekä yksi pylväsmuuntamon pylväs punaisilla pisteillä. Lennot suoritettiin näköyhteyden perustuvana lentona (VLOS), sillä ilmatilavarausta ei aikataulujen vuoksi pystytty hakemaan ja yhtenä tavoitteena oli testata käytännössä näköyhteyden perustuvan lentotoiminnan sujuvuutta. Näköyhteyden säilyttämiseksi droneen lennot suoritettiin kolmesta eri lähtöpisteestä, jotka on merkitty kuvaan sinisellä, pinkillä ja vihreällä ympyrällä. Kuvaan on lisäksi merkitty karkeasti eri lentojen risteämäkohdat poikkiviivoituksella.



Kuva 5.5. Lentoalue, kartoitetut pylviäitä sekä lentojen lähtöpisteet ja lentoreittien rajat.

#### 5.3.1 Laitteisto

Laitteistona käytettiin kahta erilaista dronekoetteria, joissa toisessa hyötykuormana oli laserkeilain ja toisessa tavallinen RGB-kamera. Laserkeilainta kantava drone oli GeoDrone X4L V5.0 (kuva 5.3). Se on ammattikäyttöön tarkoitettu kartoituskoetteri, johon voidaan kiinnittää joustavasti erilaisia sensoreita, se voi kantaa noin 2,5 kilon hyötykuorman, voi operoida jopa 15 m/s puhaltavassa tuulessa sekä omaa noin 20 minuutin toiminta-ajan laserkeilaimen kanssa. Toiminta-aika selvästi kevyemmän kameran kanssa on enimmillään noin 45 minuuttia. Laserkeilaimena käytettiin YellowScan Surveyor -keilainta, johon on integroitu Velodyne VLP-16 (Puck) -laserkeilain sekä Applanixin APX-15 GNSS-IMU -yksikkö. Laserkeilainyksikkö on itsenäisesti toimiva sensoripaketti, joka sisältää oman akun ja tiedontallennuslaitteen, eikä siis siten vaadi kantolaitteelta virransyöttöä

tai muuta ohjaussignaalia. Laserkeilaimen osalta suositeltava lentokorkeus on enintään 60 metriä ja lentonopeus enintään 8 m/s. Teoreettisesti laserkeilain tallentaa 300 000 pistettä/s, mutta koska kyseessä on pystysuoraan asennettu 360-astetta pyörivä keilain, on sen keilauskulmaa rajoitettu ja käytännön tallennusnopeus on näin ollen noin 100 000 pistettä/s.



Kuva 5.6. Laserkeilaukseen käytetty GeoDrone ja YellowScan-laserkeilain-GNSS-IMU-yhdistelmä.

RGB-kameralla varustettu kopteri oli DJI Phantom 4 Pro (kuva 5.7), joka on hyvin yleinen pääasiassa videokuvaustarkoituksessa käytetty dronekopteri. Phantom on neliroottorinen akkukäyttöinen drone, kuten laserkeilauksessa käytetty GeoDronekin. Hyötykuormana on droneen gimbaalin eli kameran asentoa säätelevän kiinnikkeen avulla integroitu tavallinen 1" CMOS-kennolla varustettu RGB-kamera. Se pystyy kuvaamaan 4K-videota 60 fps nopeudella ja sillä voi ottaa 20 Mpix still-kuvia nopeimmillaan kahden sekunnin intervallikuvauksella. Kameran kuvakulma on 85 astetta ja polttoväli 8,8 mm, jonka 35 mm kinovastaavuus on 24 mm, kyseessä on siis laajakulmainen linssi. Aukkoa voi säätää välillä f2.8–f11. Dronekopterissa on kameroihin ja infrapunaan perustuva törmäyksenestojärjestelmä ja sillä voidaan teoreettisesti lentää jopa 10 m/s puhaltavassa tuulessa.





Kuva 5.7. Valokuvaukseen käytetty DJI Phantom 4 Pro.

### 5.3.2 Laserkeilaus

Lentokorkeutena lennoilla käytettiin 50 metriä ja 40 metriä sekä lentonopeutena 4 m/s ja 6 m/s ja maanpinnan korkeusmallina käytettiin Maanmittauslaitoksen korkeusmallia, jonka mukaisesti kopteri pystyi säilyttämään koko lennon ajan vakikorkeuden maanpintaan nähden maastonmuodoista huolimatta. 50 metrissä suoritettujen lentojen jälkeen havaittiin, että laserkeilaimella ei saada juuri ollenkaan osumia PJ-ilmajohdoista, jolloin päätettiin pudottaa lentokorkeutta, kun huomattiin, että puuston korkeus mahdollistaa edelleen turvallisen lentotoiminnan. 40 metrin korkeudesta 4 m/s nopeudella saatiin hyvin osumia myös johtimista ja siten myös muun pistepilviaineiston pistetiheys parani keilausetaisyyden pienentyessä. Laserkeilauksen todettiin onnistuvan myös kasvillisuudeltaan hyvin tiheässä ympäristössä ja se ei myöskään ole altis ympäristön valaistusolosuhteiden muutoksille. Laserkeilausta voi siis periaatteessa suorittaa myös yöllä.

Pistepilviaineistosta voidaan siis tällä lentokorkeudella havaita sekä pylviä että johtimet ja täten tehdä esimerkiksi seuraavat päätelmät pistepilviaineistoon perustuen:

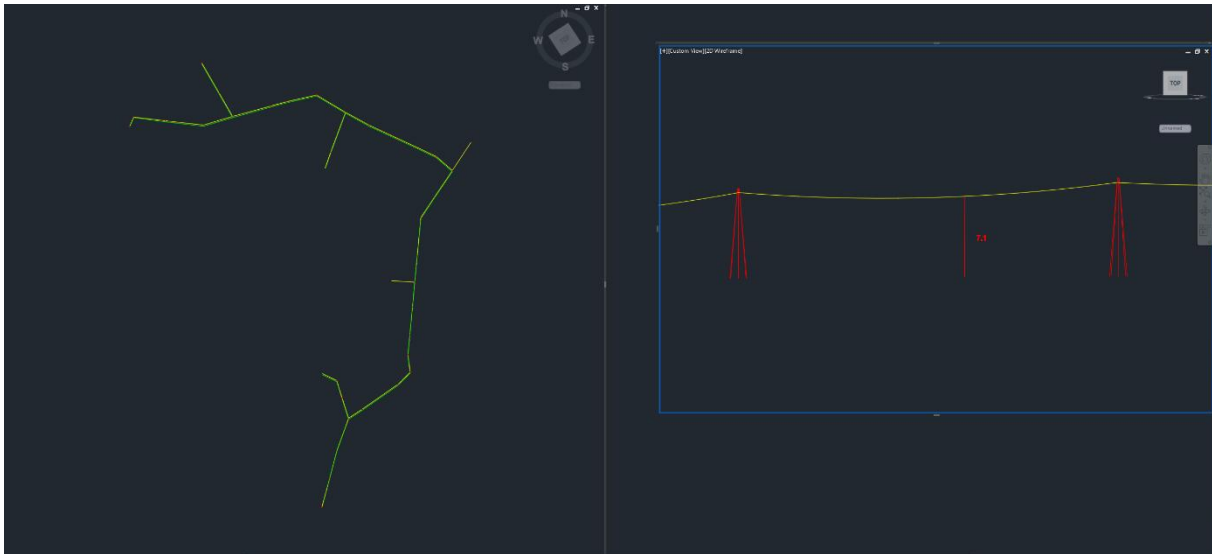
- pylvään suoruuden määrittäminen
- johtimen minimietäisyys maanpinnasta pylväsvälillä
- johtimen etäisyys muista kohteista
- raivaustarpeen määrittäminen
- yksittäisten riskipuiden määrittäminen

Alla on esitetty esimerkkikuva (kuva 5.8) pistepilvestä tehdystä leikkauksesta, josta voidaan havaita ilmajohto, pylväs, pylvästuki sekä haruseristimet. Testeissä käytetyllä laserkeilaimella ja lentokorkeudella itse harusvajereita ei kuitenkaan pystytty pääsääntöisesti havaitsemaan.

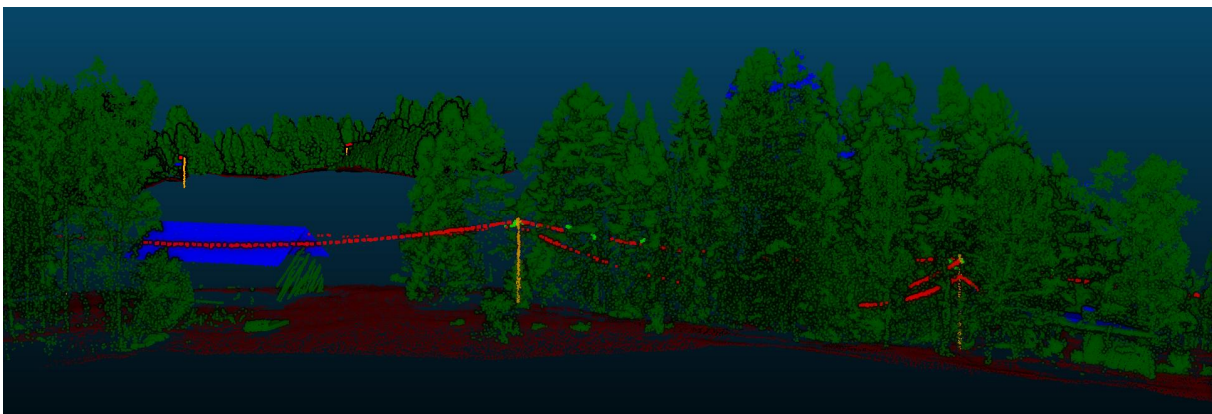


Kuva 5.8. Pistepilvestä tehty leikkauskuva, johon merkitty punaisilla ympyröillä haruseristimet ja punaisella suorakaiteella pylvästukirauta.

Raakaa pistepilveä voidaan siis käsitellä manuaalisesti silmämääräisesti tarkastelemalla tai yksittäisiä mittoja kiinnostavista kohteista ottamalla. Pistepilven luettavuuden parantamiseksi ja automaattisten toimintojen mahdollistamiseksi pistepilvi on kuitenkin luokiteltava. Luokittelu tapahtuu osittain automaattisesti, mutta osa luokittelusta täytyy PJ-ilmajohdon osalta tehdä manuaalisesti. Automaattisessa luokittelussa ohjelmisto päätelee pistepilviaineistosta käyttäjän antamien parametrien mukaisesti esimerkiksi maanpintaa, matalaa aluskasvillisuutta, korkeaa kasvillisuutta ja rakennusten kattoja edustavat pisteet omiin luokkiinsa. Manuaalisesti pistepilvestä voidaan tämän jälkeen luokitella pylväitä ja johtimia edustavat pisteet ”maalaamalla”. Luokittelun ansiosta pistepilviaineistolle voidaan suorittaa automaattisia laskentatoimenpiteitä, jotka esimerkiksi määrittävät jokaiselle jänneväliille johtimen lyhimmän etäisyyden maanpintaan (kuva 5.9), johtimen läheisyydessä olevat oksat tai johtimelle kaatumisvaarassa olevat puut. Jälkimmäisiä tosin löytyy PJ-ilmajohdon osalta niin paljon, ettei niitä ole mielekäästä erikseen analysoida. Luokkia voidaan myös värjätä halutuilla väreillä silmämääräisen tulkinnan helpottamiseksi (kuva 5.10).



Kuva 5.9. Pistepilviaineiston avulla digitoitu PJ-ilmajohtoverkko vasemmalla ja pistepilvianalyysin avulla määritetty johtimen lyhin etäisyys maanpintaan yhden jännevälin sivuprofiilinäkymässä.



Kuva 5.10. Luokiteltu pistepilviaineisto, jossa punaisella PJ-ilmajohtot, oranssilla pylväät, sinisellä rakennukset, ruskealla maanpinta, vaalean vihreällä johtimen läheisyydessä (< 0,5 m) oleva kasvillisuus ja tumman vihreällä muu kasvillisuus.

### 5.3.3 Valokuvaus

Lentokorkeutena käytettiin 35 metriä, sillä lentoa pystyttiin seuraamaan koko ajan näköyhteyden lisäksi livekuvan avulla ja näin varmistaa turvallinen lentotoiminta. Korkeusmallina käytettiin lennonsuunnitteluohjelmiston maanpinnan korkeusmallia, jonka tarkkuus oli etukäteen varmistettu vertaamalla reittipisteiden korkeustietoja Maanmittauslaitoksen korkeusmallin tietoihin. Valokuvia otettiin erilaisilla asetuksilla 2 sekunnin intervallikuvausta ja 4 m/s lentonopeutta käyttäen. Kuvausasetuksissa muunneltiin kameran kallistuskulmaa, kameran valoherkkyyttä eli ISO-arvoa, tarkennusasetuksia sekä valotusaikaa. Lisäksi tehtiin manuaaliohjauksessa valokuvaus kahdelle pylvälle lentokorkeuksilla 15 m–40 m, viiden metrin välein.

Kuvamateriaalia tutkimalla voidaan havaita, että 35 metrin lentokorkeus on kuvaustarkoituksessa nyt käytetyllä kameralla ja optiikalla liian suuri. Kuvien laatu olisi PJ-ilmajohtojen komponenttien tarkastukseen riittävä lentokorkeuden ollessa alle 20 metriä nyt käytetyllä kamera-optiikka-



yhdistelmällä. Tämä on kuitenkin liian pieni etäisyys, sillä korkeimmat puut ovat helposti 25 metrin korkuisia eikä siten lentotoimintaa voida suorittaa 20 metrin korkeudessa turvallisesti. Asian voi ratkaista panostamalla käytettävään optiikkaan ja kameraan joka mahdollistaa tällaisen optiikan käytön. Käytetyssä dronekooperissa on kiinteä kamera, eikä siinä ole vaihdettavaa objektiivia, joten siltä osin käytetty dronekooperi ei sovellu laajamittaisiin tarkastuskuvauksiin. Sillä voidaan toki tehdä tarkastuslentoja, jotka eivät vaadi kuvilta merkittävää tarkkuutta, kuten oksien tai linjalle kaatuneiden puiden etsiminen tai vaihtoehtoisesti pistemäiset tarkastukset, joissa kooperilla voidaan manuaaliohjauksessa lentää turvallisesti lähemmäs haluttua kohdetta.



a)



b)

Kuva 5.11. Phantom 4 Pro dronekooperin kameralla otettu kuva a) 35 metrin korkeudesta 50 asteen kallistuskulmassa 2 sekunnin intervallikuvauksella ja b) siitä tehty suurennos.



a)



b)

Kuva 5.12. Phantom 4 Pro dronekooperin kameralla otettu kuva a) 20 metrin korkeudesta 40 asteen kallistuskulmalla ja b) siitä tehty suurennos.

Valokuvaamisessa valon merkitys on hyvin suuri ja sen vuoksi valovoimaisen optiikan merkitys on erittäin suuri. Valovoimainen optiikka ja mielellään täyden koon kennolla varustettu kamera

mahdollistavat lyhyiden suljinaikojen (alle 1/1000 s) käyttämisen, mikä on edellytys tarkoille kuville, kun niitä otetaan liikkuvasta kohteesta. Kameran kuvaresoluutiona yleinen 24 Mpix on todennäköisesti oikean optiikan kanssa riittävä, mutta 42 Mpix:n kenno mahdollistaisi todennäköisesti enemmän, eikä vaatisi objektiivilta niin suurta polttoväliä. Objektiivin sopivana polttovälinä voitaneen pitää 35 mm–70 mm, käytetystä kamerasta ja lentokorkeudesta riippuen.

Valokuvan valottuminen on merkittävässä osassa kuvien tulkittavuuden osalta. PJ-ilmajohto on valokuvauksen osalta monella tavalla hyvin haastava kohde, sillä välillä on hyvin synkkää ja välillä hyvin valoisaa, jolloin on vaarana, että kuvat valottuvat väärin meitä kiinnostavan kohdan osalta, jolloin se näkyy joko liian tummana (alivalottunut) tai liian kirkkaana ja jopa ”läpi palaneena” (ylivalottunut). Valokuvaaminen on hyvin herkkä myös vallitsevalle säätilalle, paras keli valokuvaukseen olisi pilvipoutainen sää. Lisäksi PJ-ilmajohto kulkee usein metsän sisässä, jolloin sitä on valokuvista hyvin vaikeaa havaita. Käytännössä todettiin, että itse johtimen voi kuvista havaita vielä melko metsäiselläkin osuudella, mutta pylväiden havaitseminen metsän keskeltä on käytännössä mahdotonta.

Teoriassa ilmasta otetut valokuvat ovat aina hyvin samankaltaisia, joissa johto kulkee kuvan keskellä ylhäältä alas ja pylväs näkyy aina kuvan sivusuuntaisessa keskilinjassa. Riittävän laadukkaiden ja näköesteettömien kuvien analysointi automaattisesti kuvantunnistuksen avulla olisi siis ainakin teoriassa mahdollista. Esimerkiksi keskijännitteellä tilanne on kuvien laadun osalta huomattavasti parempi ja siten myös mahdollisuudet kuvien analysointiin paremmat.

#### **5.3.4 Yleistä lentotoiminnasta**

Trafin (nykyinen Traficom) määräyksen OPS M1-32 (2018) mukaan miehittämätön ilma-aluksen kanssa tehtävä toiminta täytyy olla näköyhteyteen perustuvaa. Tästä syystä lentotoimintaa suoritettiin näköyhteyteen perustuvana lentona (VLOS). Saman määräyksen mukaan lentotoimintaa voidaan harjoittaa alle 150 metrin korkeudessa maan tai veden pinnasta, pois lukien lentokenttien lähialueet, lentopaikan lentotiedostusvyöhykkeet tai radiovyöhykkeet, joissa lentokorkeus on asetettu määräyksessä tarkemmat vaatimukset. Lennot suoritettiin edellä mainittujen alueiden ulkopuolella eikä 150 metrin korkeusrajaa tarvittu ylittää. Käytettyjen sensorien vuoksi jouduttiin käyttämään hyvin matalia lentokorkeuksia (<50 m), jonka johdosta varsinkin peitteisistä maastonkohdista operoitaessa dronekohterin maksimietäisyys jouduttiin pitämään käytännössä alle 300 metrissä näköyhteyden säilyttämiseksi. Tästä syystä kokonaista muuntopiiriä ei voitu lentää yhdellä kertaa vaan se täytyi pilkkoa kolmeen osaan, vaikka dronekohterien toiminta-ajat olisivat mahdollistaneet koko muuntopiirin kartoittamisen yhdellä lennolla. Tästä syystä sähköverkkojen kartoitustoiminta näköyhteyteen perustuvana ei ole kokemusten mukaan tehokasta.

Määräyksen mukaisista ehdoista näköyhteyden ja lentokorkeuksien osalta on kuitenkin mahdollista saada poikkeus Traficomille tehtävän tilapäisen ilmatilavarauksen (Tempo-D, tilapäinen vaara-alue)



avulla. Näköyhteydettömän lentotoiminnan mahdollistavan ilmatilavaruksen avulla toimintaa on mahdollista tehostaa merkittävästi. Ilmatilavaraus on tehtävä Traficomille vähintään 8 viikkoa ennen aiottua lentotehtävää sähköisessä asiointipalvelussa tai lomakkeella LU3632. Ilmatilavarauksessa on määriteltävä ilmatilavaruksen alue, jolloin on suositeltavaa jakaa verkkoalue osiin, jotka vastaavat kooltaan noin yhden lentotyöpäivän aikana kartoitettavaa aluetta. Alueet määritellään kulmapisteiden koordinaattien avulla ja liitteenä lähetetään karttakuva alueesta. Tämän lisäksi on määriteltävä ilmatilan ala- ja yläraja, jotka voidaan ilmoittaa myös maanpintaan perustuen (AGL, Above Ground Level). 150 metriä maanpinnan yläpuolella on sähköverkon tarkastuksien osalta riittävä korkeus, jolloin lupamenettely jää Traficomien osalta samalla kevyemmäksi. Traficomille on lisäksi lähetettävä kirjalliset asiakirjat toimintakuvauksesta, turvallisuusarvioinnista ja toimintaohjeistuksesta ennen lentojen aloittamista. Tietyissä tapauksissa myös ilmatilan hallintayksikkö (AMC, Airspace Management Cell) voi perustaa tilapäisen vaara-alueen enintään kaksi viikkoa kestäväälle BVLOS-toiminnalle viimeistään 2 arkipäivää ennen lentotoimintaa klo 12:00 mennessä tehdyn hakemuksen mukaan.

BVLOS-operointi lisää lentotoiminnan toteutettavuuden joustoa myös operointipaikan (lentoonlähtöpaikka) valinnan osalta, jolloin ei tarvitse huolehtia näköyhteyden säilyttämisestä, vaan dronekooperi voidaan lähettää lentotehtävälle lähes mistä tahansa, missä vain on riittävästi tilaa kooperin nousemiseen. Tämä helpottaa ja nopeuttaa selvästi myös toimistolla tehtävää lennonsuunnittelua, koska niin tarkkaa tietoa maastosta ei enää tarvita.

Maastoltaan erilaisten ympäristöjen vaikutuksia arvioitiin saatujen kenttäkokemusten valossa. Verkon sijainnin mukaan ympäristöjä ei dronetarkastuksen näkökulmasta voi kovinkaan hyvin jakaa esimerkiksi metsä, pelto, taajama jakoon, sillä jokaisessa näissä esiintyy todennäköisesti jonkun verran dronetarkastusta eniten häiritsevää linjaa peittävää puustoa. Muutoin maastonmuodot tai maaston laatu eivät vaikuta dronetarkastukseen, sillä drone voi operoida ilmassa tehokkaasti maastosta ja maastonmuodoista riippumatta, mikä on yksi sen selkeistä eduista. Lisäksi pääsyyltään haastavat kohteet kuten saaret ovat dronetarkastukselle otollisia kohteita, kun henkilöt voivat suorittaa tarkastuksia menemättä itse kohteelle. Myöskään rakennukset eivät itsessään rajoita lentotoimintaa, mutta lentotoiminta asutuskeskuksen tiheästi asuttujen alueiden päällä lentoonlähtömassaltaan yli 7 kg:n dronella on ilman erillistä poikkeuslupaa kiellettyä (Trafi OPS M1-32 2018). Nyt käytetyt laitteistot jäivät selvästi tämän painorajan alle, mutta tehdessä tarkastustoimintaa tehokkaasti, olisi laserkeilaimen lisäksi samaan droneen kiinnitettävä vähintään yksi, mieluiten kaksi järjestelmäkameraa, jolloin 7 kg:n lentoonlähtömassa todennäköisesti ylitetään. Myös yli 3 kg, mutta alle 7 kg painavien dronejen osalta tiheesti asutun osan yläpuolella lentäminen vaatii kirjallisen toimintakuvauksen, turvallisuusarvioinnin ja toiminta-ohjeistuksen, jotka on esitettävä pyydettyä.

Lennonsuunnittelussa hyödynnettiin laserkeilauksen osalta Elenialta saatuja pylväiden sijaintitietoja referenssinä lentoreittiä suunnitellessa ja valokuvauksen osalta suoraan reittipisteinä. Koska pylväiden sijainteja ei voinut laserkeilauksessa suoraan hyödyntää lentoreitin reittipisteinä, tuli reitti piirtää kartalle manuaalisesti referenssipisteitä apuna käyttäen. Tämä hiukan hankaloitti reitin suunnittelua, mutta laserkeilaus onnistui kuitenkin oikein hyvin. Laserkeilain ei nimittäin ole kovin tarkka keilaimen sijainnille suhteessa sähkölinjaan, sillä lasersäteet läpäisevät kasvustoa melko hyvin. Toisaalta on suositeltua, että lennettäessä sama reitti edestakaisin, samalla kohtaa olevat lentolinjat eivät ole päällekkäin, vaan kulkisivat esim. 5–10 metriä toistensa vierellä, jolloin saavutetaan parempi pistepilven peitto. Jos kuitenkin suoritetaan yhdensuuntaisia lentoja, olisi lentolinjan hyvä kulkea melko lähellä linjan keskilinjaa. Yhdensuuntaisilla lennoilla olisi mahdollista lyhentää lentoa kuluvaan aikaan ja samalla pistepilviaineiston analysoinnissa kalibrointiin käytettyä aikaa. Valokuvauksen osalta sijaintitieto on kuitenkin varsinkin PJ-ilmajohdon osalta hyvin tärkeä, sillä johtokatu on hyvin kapea, jolloin kuvaa ottaessa kameran tulisi olla hyvin lähellä ilmajohdon keskilinjaa. Tämä onnistui kuitenkin hyvin myös nyt käytetyllä suhteellisen edullisella ja GPS-tarkkuudeltaan keskinkertaisella laitteella ja johdon keskilinja seurasi kuvien keskikohtaa hyvin tarkasti.

#### **5.4 Taloudellinen arviointi**

Dronella suoritettavalla PJ-ilmajohtojen ilmatarkastustoiminnalla olisi tavoitteena korvata perinteinen maasta tehtävä kävelytarkastus. Tarkastustoiminnalle on tällöin pääasiassa kaksi vaatimusta: 1. sen täytyy tuottaa kaikki välttämättömät havainnot sekä 2. sen täytyy olla kustannustehokas ja näitä tekijöitä tulee verrata perinteisen tarkastuksen tuottamiin tuloksiin ja sen aiheuttamiin kustannuksiin. Raportissa on aiemmin kerrottu mitä testeissä käytettävällä laitteistolla on mahdollista havainnoida ja millaisia rajoituksia siihen liittyy. Taloudellisen tarkastelun osalta kuitenkin oletetaan, että tarkastustoiminta dronella on teknisesti mahdollista eli dronen avulla olisi mahdollista kerätä välttämättömät havainnot PJ-ilmajohtoverkosta.

Laskelmissa on hyödynnetty nyt kenttäkokeiden testialueena olleen muuntopiirin tietoja ja lentotoiminnasta kertyneitä kokemuksia. Tarkastettu muuntopiiri koostui 39 pylvästä ja sen pituus oli noin 1,7 km. Jos oletetaan, että voidaan toimia näköyhteyden ulkopuolella olisi yhdensuuntaisen lentoreitin pituus tämän muuntopiirin osalta noin 3,1 km ja lentoaika siten noin 9 minuuttia lentonopeudella 6 m/s. Kokonaisajaksi yhden muuntopiirin tarkastamiseen on arvioitu noin 35 minuuttia sisältäen valmistelut ja kaluston pakkaamisen ennen seuraavaan kohteeseen siirtymistä. Kohteiden välimatkan on arvioitu olevan karkeasti 10 minuuttia. Tällöin 7 tunnin tehokkaan työajan aikana (10 tunnin työpäivästä vähennetty matkat ensimmäiselle kohteelle ja takaisin toimistolle sekä lounastauko) dronella pystyttäisiin tarkastamaan 9 esimerkkinä ollutta muuntopiiriä. Tällä ajalla kerätyn pistepilvimateriaalin analysointiin arvioidaan kuluvan yksi työpäivä

(8 h) ja valokuvamateriaalin analysointiin myös yksi päivä toimistolla. Kokonaisajankäyttö 9 muuntopiirin tarkastamiseen ja havaintojen tekoon on siis karkeasti 26 tuntia. Materiaalin analysoinnin ja verkkotietojärjestelmään tehtävien kirjausten tehokkuuden osalta ajankäyttö on hyvin riippuvainen käytetyistä työkaluista ja -menetelmistä sekä työntekijän osaamisesta.

Kävelytarkastukseen ajankäyttöä arvioitiin olettamalla tarkastusnopeudeksi noin 8 pylvästä tunnissa. Tällöin samaisen 7 tunnin tehokkaan työpäivän aikana kävelytarkastaja pystyy tarkastamaan 56 pylvästä, jolloin 9 muuntopiirin tarkastamiseen kuluu kävellen noin 44 tuntia. Kävelytarkastukseen kuluva aika on siis noin 18 tuntia enemmän, joka vastaa noin 70 % dronetarkastukseen kuluva ajasta. On kuitenkin hyvä huomata, että dronetarkastukseen liittyy huomattavasti enemmän epävarmuuksia kuin kävelytarkastukseen. Dronella kerätyn kuvamateriaalin laatu voi olla vaihteleva ja tarkastustoiminta on hyvin riippuvaista teknologiasta ja vallitsevasta säätilasta. Todennäköisesti dronetarkastuksella ei myöskään voida tehdä kaikkia haluttuja havaintoja, vaan ainakin osa tarkastuksista, kuten maadoitusten tarkastaminen tulisi edelleen tehdä paikan päällä käyden. Dronetarkastuksen osalta tulisikin tarkastella, mikä on riittävä luotettavuus havaintojen tekemiseen eli millä todennäköisyydellä halutut havainnot tulisi tehdä ja voidaanko hyväksyä, että osa havainnoista jää mahdollisesti tekemättä.

## **5.5 Yhteenveto dronella tehtävistä PJ-tarkastuksista**

Teknologia tarjoaa jo tällä hetkellä hyvät mahdollisuudet sähköverkkojen kartoittamiseen ilmasta käsin miehittämättömiä ilma-aluksia hyödyntäen. Lennonsuunnittelu droneille voidaan tehdä verkkotietojärjestelmästä löytyvää informaatiota joko suoraan tai referenssinä hyödyntäen toimistolla, joka selvästi pienentää maastossa käytettävää aikaa. Lennonsuunnittelu toimistolla jouhevoittaa muutenkin toimintaa maastossa, kun maastohenkilöstön ei tarvitse muuta kuin ladata oikea lentosuunnitelma, tarkastaa reitin oikeellisuus ja kotipisteen sijainti ja ladata suunnitelma droneen toteutettavaksi. Dronen käytöllä on myös työturvallisuuteen liittyviä etuja, kun maastohenkilöstön ei tarvitse liikkua haastavissa maastoissa, joissa esimerkiksi kompastuminen voi aiheuttaa loukkaantumisia tai ainakin tilapäisen työkyvyttömyyden.

Käytettyjen sensoreiden osalta laserkeilauksen todettiin soveltuvan myös nyt käytetyllä, tähän tarkoitukseen ei kaikkein optimaalisimmalla laserkeilaimella nykyään vallitsevassa tyyppillisessä PJ-ilmajohdon ympäristössä. Vaatimuksena keilaukseen löydettiin vain riittävän matala lentokorkeus ja rajallinen lentonopeus. Valokuvauksen todettiin olevan huomattavasti laserkeilausta haastavampaa, todettakoon kuitenkin, että käytetty valokuvauslaitteisto oli tarkoitukseen nähden hyvin vaatimaton. Valokuvaukselle suurimmat haasteet esittävät turvallisen lentotoiminnan kannalta riittävän lentokorkeuden ylläpitäminen sekä ilmajohtojen kulkeminen keskellä kasvustoa.

## 6 YHTEENVETO

Yhteenvetona voidaan hyvin todeta, että uusissa teknologioissa on suuri potentiaali tämän hetkisten toimintojen tehostamiseen ja laadun parantamiseen. Toisaalta täytyy kuitenkin todeta, että uusissa teknologioissa on myös omat haasteensa.

Noiselessin äänikameran osalta käytötapa olisi nykyisten tarkastustoimintojen, ensisijaisesti takuutarkastusten ja määräaikaistarkastusten yhteydessä toteutettava lisätoiminta. Sillä ei itsessään pystytä korvaamaan mitään tämän hetkistä tarkastusta, mutta sillä voidaan selkeästi tuoda tarkastuksiin lisää mittaamiseen perustuvaa kunnonvalvontaa esimerkiksi sähköasemien, muuntamoiden, erotinasemien ja kaapelipäätteiden tarkastuksiin. Tutkimusten mukaan laite toimii parhaiten suurjännitteellä, mutta sitä voidaan käyttää myös keskijännitekomponenttien tutkimiseen. Pienjännitteisten komponenttien tutkimiseen lämpökamera on todennäköisesti parempi vaihtoehto ainakin tällä hetkellä. On mahdollista, että laitteella havaitaan esimerkiksi takuuajan puitteissa korjausta tarvitseva komponentti tai joitakin piileviä vikoja, jotka voisivat tulevaisuudessa aiheuttaa jopa hyvinkin kalliin vikakeskeytyksen. Näin ollen laitteella on mahdollista saavuttaa säästöjä, vaikka laitteen käyttö lisääkin hieman tarkastuksiin kuluva aikaa. On kuitenkin huomioitava, että laitteen luotettavuuden osalta tulisi tehdä tässä tehtyjä kokeiluja enemmän systemaattista testausta, sillä laitteen toimivuudesta ja luotettavuudesta ei tämän tutkimuksen osalta saatu täyttä varmuutta. Laitteen kehityksen osalta sähköverkon kunnossapitotarkastuksien näkökulmasta olisi lisäksi erittäin hyvä, jos laitteeseen olisi integroituna myös lämpökamera. Tällöin kaikki tarvittavat kuvaukset voisi suorittaa saman aikaisesti ja tarkastaja välttyisi monen laitteen kantamiselta.

Droneteknologia itsessään alkaa olla melko hyvin vakiintunutta ja toimivaa, mutta toimintamallit ja droneissa käytettävät sensorit kehittyvät koko ajan. Itse lentotoiminta on näköyhteyteen perustuvana hyvin kevyttä ilman erillisiä lupamuodollisuuksia, mutta sen tehokkuus on hyvin rajoitettu Suomen metsäisillä alueilla. Näköyhteyden ulkopuolella harjoitettavaan lentotoimintaan pitää sen sijaan hakea erikseen lupa, mutta myös se on tehty Traficomien puolesta melko kevyeksi, luvan hakemiseen täytyy vain varata riittävästi aikaa. Laserkeilauksen osalta teknologia on vielä kehitysvaiheessa, mutta markkinoilla alkaa jo olla melko hyvin tarkoitukseen sopivia laitteistoja, joiden hinnat ovat kuitenkin vielä melko korkeita. Valokuvaus ilmasta on hyvin vakiintunutta ja siihen on saatavilla hyviä laitteita. Droneen kiinnitettävää laitekokonaisuutta rajoittaa vain tällä hetkellä paljon dronen kantokyky sekä toiminta-aika, mutta myös tähän on tullut ja tulossa ratkaisuja esimerkiksi hybriditekniikan myötä. Teknologian puolesta dronella tehtävät tarkastukset ovat siis mahdollisia jo nyt, mutta etenkin pienjännitteisen ilmajohtoverkon ominaisuudet rajoittavat sen käytännön toimivuutta peitteisen kasvuston johdosta. Teoriassa olisi siis mahdollista, että dronella voitaisiin saada kustannussäästöjä PJ-ilmajohtoverkon kunnossapitotarkastuksissa, mutta siihen liittyy useita epävarmuustekijöitä, joista merkittävimpana tarvittavien havaintojen tekemisen epävarmuus

peitteisessä maastossa. Dronella on kuitenkin muita PJ-tarkastuksia kiinnostavimpia käyttökohteita, joita ovat esimerkiksi keski- ja suurjänniteilmajohtojen häiriö- ja kunnossapitotarkastukset sekä esimerkiksi sähköasemien ja voimajohtojen kartoitukset suunnittelutoiminnan tukemiseksi.