

# DRONELÄMPÖKUVAUS ENERGIA-ALALLA

Lahti Energia Oy

## Tiivistelmä

Tekijä Paajanen, Vilppu	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK Sivumäärä 59	Valmistumisaika Kevät 2019
Työn nimi <b>Dronelämpökuvaus energia-alalla</b> Lahti Energia Oy		
Tutkinto Energia- ja ympäristötekniikka, Insinööri (AMK)		
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyössä perehdyttiin dronelämpökuvauksen sovelluksiin energia-alalla ja niiden hyödyntämiseen Lahti Energia Oy:n liiketoiminnassa. Lämpökamerakuvaamisella pyritään luomaan kustannussäästöjä Lahden kaukolämpöverkon vuotojen tarkkaan ja nopeaan paikallistamiseen. Tärkeää oli myös löytää muita potentiaalisia käyttökohteita lämpökameralla varustetulle dronelle. Lisäksi työssä esiteltiin dronelaitteistojen kustannuksia ja lentotyöhön vaadittavia muita resursseja sekä lainsäädäntöä.</p> <p>Työssä käytettiin kvalitatiivisia tutkimusmenetelmiä dronekuvaamisen tehokkuuden ja toimivuuden selvittämiseen. Dronelämpökuvaamisen asiantuntijoita ja palveluntarjoajia haastateltiin osana tutkimuksia ja dronelämpökuvausta verrattiin kaukolämpöverkon muihin käytössä oleviin vuodonpaikannusmenetelmiin. Opinnäytetyön kirjallinen teoriaosuus sekä aikaisemmat tutkimustulokset tukivat päätelmien muodostumista. Kokemusten perusteella muodostettiin arvio laitteistoihin investoimisen kannattavuudesta. Työssä hyödynnettiin pääosin elektronisia lähteitä aihealueen luonteesta johtuen.</p> <p>Dronelämpökuvaamisesta saatiin tuoretta tietoa alalla toimivilta ammattilaisilta. Käytökokemusten perusteella kuvausmenetelmä osoittautui tarkaksi ja tehokkaaksi vaihtoehdoksi kaukolämpöverkkojen kuvaamisessa. Myös muissa sovelluksissa, kuten aurinkopaneelien ja sähköverkkojen tarkastuksissa, on saatu hyviä tuloksia. Lentotyön kustannukset selvitettiin ja arvioitiin niiden olevan pienemmät kuin lentotyöllä saavutettava hyöty. Traficomien asettamiin määräyksiin miehittämättömästä ilmailusta perehdyttiin ja työhön listattiin tärkeimmät vaatimukset lentotyötoiminnalle. Lähitulevaisuudessa Euroopan Unionin lainsäädäntö tulee vaikuttamaan myös Suomen miehittämättömään ilmailuun tiukentuneilla säädöksillä.</p>		
Asiasanat Lämpökamerakuvaaminen, kaukolämpö, drone, kartoitus, reitinsuunnittelu		

## Abstract

Author Paajanen, Vilppu	Type of publication Bachelor's thesis	Published Spring 2019
	Number of pages 60	
<b>Drone thermal imaging applications in energy business</b> Lahti Energia Ltd.		
Name of Degree Bachelor's Degree Programme in Energy and Environmental Engineering		
Abstract <p>The thesis investigated thermal imaging applications with unmanned aerial vehicles (UAV) in the field of energy business. The main reason for this assignment was to find reasonable arguments why Lahti Energia Ltd, the commissioner should invest on drone technology and use it in inspecting district heating network. It was also desirable to find other applications in the same industry to reduce the expenses of precious equipments. The thesis was also about listing all the resources and expenses that working with the drones include.</p> <p>Qualitative research methods were used to investigate the efficiency and effectiveness of drone inspections. The experts and service producers of drone thermal imaging were interviewed as part of the study, and the method was compared to other already existing leakage detection methods in the district heating network. The conclusion of making the investment was based on theoretical information, previous researches and user experiences.</p> <p>Lots of up-to-date information was gathered from the drone industry professionals. Based on the experiences and researches, drone thermal imaging was accurate and efficient solution to find leaks from the district heating network. Drone thermal imaging is also being used globally on solar panel and power grid inspections. The most important regulations on UAV's were listed, although the EU legislation will also affect Finland's unmanned aviation in the near future. The conclusion was that the investment would be profitable and worth making.</p>		
Keywords Thermal imaging, drone, district heating, mapping, mission planning		

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	1
2	KAUKOLÄMPÖVERKKO JA SEN VUODOT .....	2
2.1	Kaukolämmön toimintaperiaate.....	2
2.2	Lahti Energian kaukolämpöverkko .....	3
2.3	Kaukolämpövuodot ja niiden paikantaminen .....	3
2.4	Kaukolämpöverkon helikopterikuvaaminen .....	6
3	KAUKOLÄMPÖVERKON KUVAAMINEN DRONELLA .....	7
3.1	Yleistä.....	7
3.2	Lämpökuvaamisessa huomioitavat asiat.....	7
3.3	Dronekuvaamisen hyvät puolet.....	8
3.4	Dronekuvaamisen huonot puolet .....	9
3.5	Kokemukset ja saadut tulokset .....	10
4	MUUT ENERGIA-ALAN KUVAUSKOHTEET .....	13
4.1	Dronet yritysten liiketoiminnassa.....	13
4.2	Polttoainekasojen ilmakehuus.....	13
4.3	Sähkölinojen ja muuntajien ilmakehuus.....	15
4.4	Aurinkopaneelien dronekuvaus.....	16
5	YRITYSKÄYTTÖÖN SOVELTUVAT DRONET .....	18
5.1	Yleistä.....	18
5.2	DJI Matrice 210 .....	19
5.3	DJI Inspire .....	21
5.4	DJI Mavic 2 Enterprise Dual .....	22
5.5	Yuneec H520.....	24
6	OHJELMISTOT JA RADIO-OHJAIMET .....	26
6.1	Radio-ohjaimet .....	26
6.2	DJI:n hallintaohjelmistot.....	28
6.3	Pix4D-kartoitusohjelmisto .....	31
6.4	Reittien suunnittelu .....	32
7	LÄMPÖKAMERATEKNIikka JA LÄMPÖKUVAT .....	34
7.1	Yleistä.....	34
7.2	Lämpökameroiden resoluutio.....	34
7.3	Lämpökameran herkkyys ja radiometrisyysominaisuudet .....	35
7.4	Lämpökameraratkaisut droneihin.....	36

8	KUVAUSPALVELUJEN KUSTANNUS VERRATTUNA OMAAN TUOTANTOON.....	40
8.1	Palveluiden tarjonta .....	40
8.2	MultiCopter Servicen kuvauspalvelut .....	40
8.3	Valmiiden dronekokoonten hinnat .....	41
8.4	Ohjelmistolisenssit .....	42
8.5	Vakuutukset.....	43
8.6	Koulutukset.....	44
8.7	Muut kustannukset.....	45
9	UAV-KUVAUKSEN LAINSÄÄDÄNTÖ .....	46
9.1	Määräys kauko-ohjatun ilma-aluksen lennättämiseen .....	46
9.2	Lentotyötoiminnan vaatimukset.....	48
9.3	Lainsäädännön tulevaisuus .....	50
10	YHTEENVETO .....	51
	LÄHTEET .....	53

## 1 JOHDANTO

Miehittämätön ilmailu on ollut räjähdysmäisesti kasvava ala viimeisen viiden vuoden aikana. Aluksi dronejen, eli miehittämättömien ilma-alusten käyttö painottui yksityisten kuluttajien omaan harrastekäyttöön, mutta teknologian kehittyessä eri alojen yritykset ovat ottaneet kuvauskopterit mukaan osaksi yritystoimintaansa. Droneilla arvioidaan saavutettavan lähivuosina yli 127 miljardin vuotuinen markkina-arvo globaalisti. Suurimmat hyödyt saavutetaan rakennus- ja energia-alalla, maanviljelyssä, metsäteollisuudessa sekä median ja viihteen aloilla. (PriceWaterhouseCoopers 2017.)

Tämän opinnäytetyön toimeksiantajana toimii Lahti Energia Oy. Työn tarkoituksena on löytää riittävät perustelut droneteknologian hyödyntämiseen Lahti Energian liiketoiminnassa. Ensisijainen soveltamisala on kaukolämpöverkon tarkastaminen lämpökameralla varustetulla dronella. Menetelmän avulla toivotaan, että kaukolämpövuodot löytyvät nopeasti ja tarkasti mahdollistaen kustannussäästöjen luomisen pitkällä aikavälillä. Lämpökameralla varustetut dronelaitteistot ovat kuitenkin kalliita ja lentotyö vaatii paljon muitakin resursseja. On siis tutkittava, onko Lahti Energian kuvaustarpeet riittävän laajat kattamaan investoinnin tuomat kustannukset.

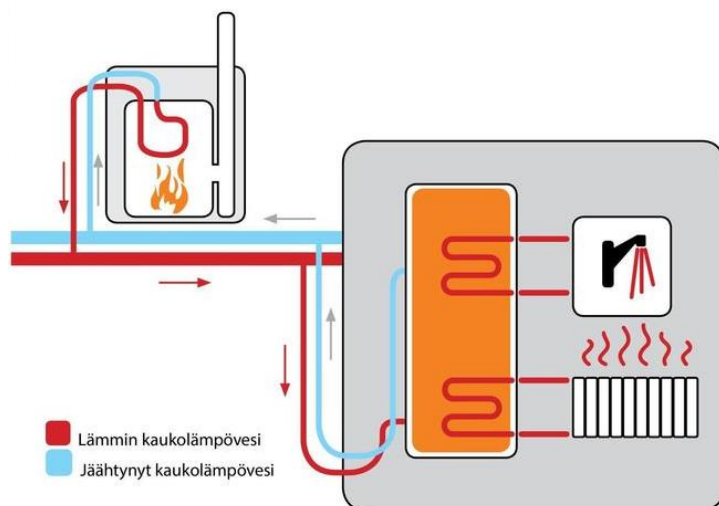
Tämän työn lähestymistapa droneteknologian monipuoliseen kokonaisuuteen on pyritty pitämään mahdollisimman selkeänä, jotta alaan perehtymätönkin ymmärtää asiasisällön hyvin. Tämä työ mahdollistaa lukijalle helpon kokonaiskuvan luomisen droneilla tehtävästä lentotyöstä. Työssä tutkitaan dronekuvaamisen käyttökohteita ja mahdollisuuksia energia-alalla, kuvauslaitteiden ominaisuuksia ja hintoja, lentotyön kustannusrakenteita sekä lentämiseen liittyvää lainsäädäntöä. Työssä on haastateltu alalla jo toimivia henkilöitä ja apuna on käytetty tuoreita tutkimustuloksia. Tämä opinnäytetyö on esiselvitys, jonka perusteella voidaan helposti tehdä jatkotutkimuksia tai investointeja droneteknologiaan.

Alkuperäisten suunnitelmien mukainen koelento lämpökameradronella oli rajattava työn ulkopuolelle, koska keliolosuhteet vuodenajasta riippuen eivät olleet otolliset ja tulokset olisivat olleet virheellisiä. Lisäksi reittiensuunnittelu- ja kartoitusohjelmistojen tarkempi tutkiminen olisi vienyt työn sisältöä liian spesifiksi, ja ne täytyi jättää pois.

## 2 KAUKOLÄMPÖVERKKO JA SEN VUODOT

### 2.1 Kaukolämmön toimintaperiaate

Kaukolämpö on ollut suomalaisten kotien ja kiinteistöjen lämmitysmuotona jo 1950-luvulta lähtien. Tällä hetkellä noin puolet suomen asukkaista asuvat kaukolämmitetyssä talossa. (Energiateollisuus ry 2019a.) Kaukolämpöverkon energiatehokkuus on aivan omaa luokkaansa silloin, kun paikkakunnan asukastiheys on suuri ja lämpöä tuotetaan esimerkiksi sähkön tai jonkin muun prosessin sivutuotteena (Lahti Energia 2019). Yhtenä osana kaukolämpöverkon toimintavarmuutta on siirtolinjojen huoltaminen ja ylläpitäminen. Siksi onkin hyvin tärkeää, että mahdolliset vuodot putkistoissa havaitaan ja korjataan mahdollisimman nopeasti suurempien energiahäviöiden ja materiaalivahinkojen ehkäisemiseksi (Energiateollisuus ry 2006, 347 - 359). Tässä luvussa käsitellään Lahti Energia Oy:n kaukolämpöverkon rakennetta ja kaukolämpövuotojen vuodonvalvontamenetelmiä, mukaan lukien ilmakehuvausta lämpökameralla.



Kuva: Kaukolämmön toimintaperiaate. Lähde: Energiateollisuus ry.

Kuva 1. Kaukolämmön toimintaperiaate (Energiateollisuus ry 2018)

Kaukolämpöverkko perustuu kuvan 1 mukaisesti kuumen veden kiertoon suljetussa ja eristetyssä putkiverkostossa, joka kulkee noin metrin syvyydessä maan alla. Kaukolämpövedtä johdetaan asiakkaille kaksiputkisessa järjestelmässä, joista toinen on menoputki ja toinen on paluuputki. Kuumen menoputken lämpöenergiaa otetaan talteen asiakkaan

lämmönsiirtimessä, ja viilentynyt kaukolämpövesi jatkaa matkaansa takaisin paluuputkeen. Viilentynyttä vettä lämmitetään uudelleen voimalaitoksissa tai lämpökeskuksissa, josta se johdetaan takaisin menoputkeen. (Energiateollisuus ry 2019b.) Näiden kahden putken paine-ero pyritään pitämään vähintään 0,6 bar suuruisena, jotta kaukolämpöveden virtaus pysyy yllä. Jotta vesi virtaisi kaikille asiakkaille, on kaukolämpöverkon paine-ero oltava riittävä myös linjan päässä. Siksi kaukolämpöverkon paine-eroa ja virtausta joudutaan nostamaan myös välipumppaamoilla. (Energiateollisuus ry 2006, 340.)

## 2.2 Lahti Energian kaukolämpöverkko

Lahti Energian kaukolämpöverkon kokonaispituus on noin 700 kilometriä, ja se ylettyy Hollolasta aina Nastolaan asti, lämmittäen 90 prosenttia lahtelaisten kodeista. Lisäksi Lahti Energialla on kaksi erillisverkkoa Vääksyssä ja Taivaanrannan asuinalueella. (Lahti Energia 2019a.) Kaukolämpöä tuotetaan Kymijärvi II- ja Kymijärvi III -voimalaitoksissa, joiden yhteenlaskettu kaukolämpöteho on noin 280 megawattia. Lahti Energia on luopunut kokonaan kivihiilen käytöstä uusimman biovoimalaitoksen valmistuttua ja Kymijärvi I -kivihiililaitoksen poistuttua käytöstä. Tämä muutos vähentää lämmöntuotannon hiilidioksidipäästöjä noin 600 000 tonnia vuosittain. (Lahti Energia 2019b.)

Lahti Energian kaukolämpöverkoston putkikoot vaihtelevat suurista, yli puolen metrin halkaisijaltaan olevista runkolinjoista aina pieniin kahden senttimetrin halkaisijaltaan oleviin talohaaroihin. Nykyään putkiverkko rakennetaan Mpuk-rakenteilla, joissa teräksinen virtausputki on eristetty polyeteenisuojakuorella (Energiateollisuus ry 2013). Mpuk-rakenteen lämmöneristävyys on todella hyvä ja lämpöhäviöt pitkilläkin siirtoväleillä pysyvät pieninä. Lahti Energian kaukolämpöverkossa on vielä paljon vanhoja kanavarakenteita, kuten betonisia kaukolämpökanavia, jotka on yleensä eristetty mineraalivillalla. Vanhat kanavarakenteet pyritään uusimaan Mpuk-linjoiksi peruskorjausten yhteydessä toimintavarmuuden ja energiatehokkuuden parantamiseksi.

## 2.3 Kaukolämpövuodot ja niiden paikantaminen

Aika-ajoin kaukolämpöverkkoon muodostuu vuotoja. Yleisin syy vuodoille on virtausputkien syöpyminen, joka johtuu yleensä epätiiviestä suojakuoren liitoksesta. Korroosiota pääsee tapahtumaan, kun kosteus on kosketuksissa virtausputkien kanssa. Vuotokohteet ovat yleensä kaivojen läpivienneissä ja muissa vaikeasti eristettävissä kohdissa.



Korroosio aiheuttaa pistemäisen reiän virtausputkeen, ja kovassa paineessa oleva kaukolämpövesi vuotaa ulos verkosta, aiheuttaen taloudellisia kustannuksia hukkaenergian ja korjaustöiden muodossa. Lisäksi vuotava putki saattaa kastella linjan eristeitä pitkältikin matkalta, ja putkea joudutaan uusimaan laajemmalla alueella. (Energiateollisuus ry 2006, 360-363.)

Vuodot vaihtelevat kooltaan yleensä muutamasta kuutiometristä jopa sataan kuutiometriin päivässä. Kimi Siltalan (2017) opinnäytetyön mukaan kaukolämpövuotojen kustannukset ovat pyöreästi kuusi euroa vuotanutta vesikuutiota kohden. Kustannuksiin vaikuttaa merkittävästi kaukolämpöveden lämpöenergian määrä. Talven lämmityskaudella putkistossa kiertää paljon kuumempi vesi kuin kesällä, joten vuodon kustannuksetkin ovat korkeammat. Kymmenen kuutiota päivässä vuotava kaukolämpöputki aiheuttaa noin kahden tuhannen euron kustannukset kuukaudessa. Tämän kokoisen vuodon havaitseminen voi olla mahdotonta, jos hukkavesi katoaa suoraan maaperään eikä muodosta lämpösäteilyä maan pinnalle. Puolestaan jopa sata kuutiota päivässä vuotava iso vuoto muodostaa saman suuruiset tappiot jo kolmessa päivässä.



Kuva 2. Mahdollinen kaukolämpövuoto on sulattanut lumet jalkakäytävältä (Tikkamäki 2016)

Kaukolämpövuodot havaitaan usein silmämääräisesti. Vuotovedet kulkeutuvat yleensä virtausputken suoja-kuoren välissä lähimpään tarkastuskaivoon tai valuvat maaperään. Suuremmat vuodot voidaan havaita maaperästä ympäristöä lämpimämpänä tai kuivempänä

alueena, kuten kuvassa 2. Joskus vesi saattaa kertyä ojanpohjiin tai salaojiin. Kaukolämpövesi on värjätty vihreällä UV-valoa heijastavalla väriaineella, jotta se olisi helpompi erottaa tavallisesta sadevedestä. Höyryävä vesi ojassa, ympäristöään nopeammin sulanut lumi tai kuiva asfalttialue kostealla kelillä saattavat viestiä kaukolämpövuodosta.

Kaukolämpövuotojen paikantamiseen käytetään myös erilaisia vuodonvalvontajärjestelmiä, jotka hälyttävät esimerkiksi vedenpinnan nousuista kaukolämpökaivoissa. Älykkäillä venttiileillä voidaan mitata verkoston paine-eroja ja lämpötiloja, ja Mpuk-linjoihin voidaan asentaa kupariset vuodonilmaisinslangat, joiden avulla vuotoa voidaan selvittää tarkasti ja nopeasti. Silti suurin osa vuotohavainnoista saadaan ulkopuolisten ilmoituksista, jotka perustuvat silmämääräiseen havainnointiin.

Silmämääräiseen vuotojen havainnoimiseen tarvitaan yleensä lämpötilan poikkeavuuden indikaattori, kuten sulanut lumi tai kuivunut sadevesi, jotta vuotoalue erottuisi selkeästi ympäröivästä maaperästä. Parhaimmat ajankohdat havainnoimiseen ovat keväällä ja syksyllä eli silloin, kun maaperä on selvästi viileämpi kuin vuotokohdassa. Kaukolämmön vuotojen paikantamisessa käytetään myös lämpökameroita, jos kelit eivät muuten ole optimaaliset vuotojen havaitsemiseksi paljaalla silmällä.



Kuva 3. Lämpökamerakuvassa potentiaalinen vuotokohta näkyy selvästi (Siltala 2017)

Yllä olevassa kuvassa 3 on samasta kohdasta otetut lämpökamerakuva sekä normaali valokuva. Oikeanpuoleisesta kuvasta on mahdoton erottaa kuumaa vuotokohtaa, koska asfaltti on läpikotaisin kuiva. Lämpökamerakuva kuitenkin osoittaa selvästi kuumemman kohdan maaperässä, jossa on mahdollinen kaukolämpövuoto.

## 2.4 Kaukolämpöverkon helikopterikuvaaminen

Kaukolämpöverkkojen vuotoja on paikannettu lämpökameralla varustetuilla helikoptereilla jo useamman vuoden. Suomesta löytyy muutamia yrityksiä, kuten MultiCopter Service Oy sekä Uudenmaan Lämpökuvaus Oy, jotka ovat erikoistuneet juuri kaukolämpöverkon il-makuvaamiseen. Jo useampana vuonna Lahti Energia on ostanut kaukolämpöverkon heli-kopterikuvauksia, joista on saatu hyviäkin tuloksia aikaan. Helikopterikuvauksen etuna on isojen alueiden todella nopea tutkiminen. Helikopterilla kuvatessa suuret nopeudet ja ku-vauskorkeus aiheuttaa kuvanlaadun heikkenemistä. (Kovanen 2019.)

Helikopterikuvausten jälkeen kuvamateriaalia tutkittiin ja huomattiin, että kuvanlaatu on melko huonoa ja moni lämpöhavainto osoittautui virheelliseksi. Lisäksi helikoptereilla ei pystytä lentämään riittävän alhaalla ja tarpeeksi hitaasti, jotta kuvanlaatu olisi parempi. Helikopterilennoista aiheutuu myös jonkin verran melua, ja parhaimman tuloksen aikaan-saamiseksi lennot tulisi suorittaa aamuyöstä. Tämä vuodonpaikannusmenetelmä ei myös-kään ole kovin edullista, sillä helikopterilentämisen kustannukset ovat todella korkeat (Visa 2019). Siksi kuvauksista saatavat hyödyt tulisi sovittaa kaukolämpövuodoista aiheu-tuviin kustannuksiin, jotta palvelun käyttäminen olisi järkevää.

### 3 KAUKOLÄMPÖVERKON KUVAAMINEN DRONELLA

#### 3.1 Yleistä

Dronella tarkoitetaan miehittämätöntä ilma-alusta, jota voidaan ohjata radio-ohjaimen avulla. Droneja voidaan varustella erilaisilla kameroilla tai ilmaisimilla, joilla saadaan kerättyä haluttua dataa ilmasta käsin. (Traficom 2019a). Droneteknologia kehittyy jatkuvasti, ja laitteistojen hinnat ovat tulleet alkuajoista alaspäin. Se on mahdollistanut harraste- ja ammattilientäjien määrän räjähdysmäisen kasvun ja sovelluksien käyttämisen eri alojen energia- ja kustannustehokkuuden parantamiseen. Lämpökamerakuvaamista dronella voidaan käyttää myös uutena vuodonpaikannusmenetelmänä, jolla on saatu paljon potentiaalisia tuloksia aikaiseksi. Dronekuvaaminen on verrattavissa helikopterilla suoritettavaan ilmakuvaukseen, mutta on huomattavasti monipuolisempi ja halvempi ratkaisu energia-alan kuvaustarpeille.

#### 3.2 Lämpökuvaamisessa huomioitavat asiat

Parhaimman mahdollisen kuvaustuloksen aikaansaamiseksi on huomioitava monia eri asioita. Lämpökameran kanssa toimiessa keliolosuhteet, valoisuus, kuvauskulma, lämpötila, kuvausetäisyys, ympäristötekijät ja liikenne ovat suuressa osassa onnistuneen ja tarkan kuvaustuloksen aikaansaamiseksi. Dronella lennettäessä on syytä pitää huolta myös turvallisuudesta.

Lämpökamerakuvaukset dronella tulisi aina suorittaa yöllä tai aikaisin aamulla. Auringon lämpösäteily saattaa heijastua kuvattavilta pinnoilta ja vääristää mittaustulosta jopa sadoilla asteilla. Samanlaista virhettä voi tehdä myös kuumana hohkavat savupiiput tai muut lämmönlähteet heijastumisen osuessa kameraan. Heijastumisten ehkäisemiseksi kuvauskulma on oltava mahdollisimman kohtisuora pintaan nähden. Jos kuvausetäisyys on todella pieni ja kuvauskulma täysin kohtisuora, saattaa itse lämpökamerakin muodostaa säteilyn heijastumista (FLIR 2016). Päiväsaikaan mittaustuloksia häiritsevät tai voivat häiritä ajoneuvot. Tyhjäkäynnille jätetty auto lämmittää asfalttia niin, että lämmintä kohtaa voidaan luulla kaukolämpövuodoksi. Yöllä tai aikaisin aamulla kuvattaessa häiriötekijät saadaan kaikista tehokkaimmin vältettyä. Myös keliolosuhteiden täytyy olla optimaaliset lämpökamerakuvaamiseen edustavien tulosten saamiseksi. Kaukolämmön päällä oleva lumi- peite tai auringon kuumentama asfaltti saattaa peittää vuodosta aiheutuvan lämpösäteilyn. Lämpökamerakuvausten ajankohdan täytyy ajoittua syksyyn tai kevääseen, jolloin lämpötilaerot ovat parhaiten havaittavissa. (Vanhatalo 2018a.) Alla olevassa kuvassa 4 on

esitetty lämpökamerakuvausta häiritseviä säteilylähteitä, jotka heijastuvat kuvattavan kohteen pinnasta, vääristäen mittausta.

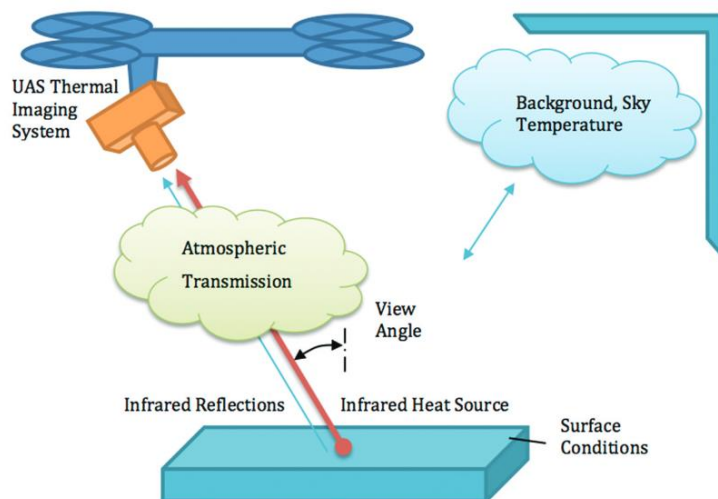


Figure 1: Remote UAS Thermal Imaging System needs to address unique radiometric temperature challenges.

#### Kuva 4. Lämpökuvaukusta väärentävät tekijät (FLIR 2016)

Dronella lennettäessä kuvauskorkeus määrittää lämpökuvan tarkkuuden. Mitä lähempänä kaukolämpöverkkoa pystytään lentämään, sitä tarkempaa kuvaa pystytään luomaan. Yhden pikselin muodostama alue on siis pienempi ja informaatiota on enemmän (Workswell 2019). Kuvaustarkkuuden parantuessa lentoaika puolestaan kasvaa. Matalalla lennettäessä kohde on kuvattava paljon tiheämmin kuin korkealla lennettäessä. On siis valittava, halutaanko mieluummin hyvälaatuista lämpökuvaa matalalta, vaiko hieman epätarkempaa materiaalia korkealta, joka saadaan kuvattua nopeammin. Kuvauskorkeutta valittaessa kannattaa myös huomioida ympäristön esteet, kuten kerrostalot ja korkeat puut. Turvallisinta on kuvata sellaiselta korkeudelta, jossa törmäysonnettomuuksia ei pääse syntymään. Tyypillisimmät kuvauskorkeudet ovat 20-50 metriä maanpinnasta.

### 3.3 Dronekuvaamisen hyvät puolet

Lämpökamerakuvaaminen dronella on edullinen ja tarkka vuodonpaikannusmenetelmä helikopterikuvaamiseen verrattuna. Yrityskäyttöön suunnitellut dronet ovat massoiltaan melko pieniä, yhdestä viiteen kilogrammaan, ja täten turvallisia lennätettäväksi esimerkiksi

asutuskeskusten läheisyydessä, jossa suurin osa kaukolämpöverkkoa yleensä kulkee. Dronemarkkinoita johtavien yritysten tekniikka on jo niin kehittynyttä, että laitteiden lentäminen onnistuu helposti aloittelijaltakin. Droneilla lentämiseen ei tällä hetkellä vaadita minikäänlaista pakollista koulutusta, mutta suosion kasvaessa tähän saattaa tulla muutoksia. Lentotyöhön liittyvistä määräyksistä tarkemmin luvussa kymmenen. Tässä työssä esitettyjen lämpökameralla varustettujen dronejen hinnat alkavat 3000 eurosta ja nousevat miltei 30 000 euroon. Toki kalliimpia dronelaitteistojakin on olemassa, mutta ne ovat lähinnä puolustusvoimien tarpeisiin soveltuvia, eivätkä ole saatavilla vapailta markkinoilla valmiina paketteina

Helikopteriin verrattuna dronen kuvausvalmius ja liikuteltavuus paikasta toiseen on täysin erilainen. Jos lämpökuvaustarve on kiireellinen esimerkiksi ison kaukolämpövuodon takia, voidaan kuvaukseen ryhtyä muutamassa minuutissa. Ilmasta käsin mahdolliset vuotokohdat on helppo paikantaa vaikeakulkuisiltakin alueilta, kuten pelloilla tai metsissä kulkevilta siirtolinjoilta. Lennot voidaan jopa suunnitella nopeasti etukäteen, ja nappia painamalla drone osaa lentää automaattisesti kaukolämpöverkon läpi ja palata lähtöpaikkaan keräten samalla kaiken tarvittavan informaation lennolta. Drone kulkee helposti kantolaukussa kuvauspaikalle ja mahtuu vaivatta henkilöauton kyytiin.

Kuvamateriaalin laatu saadaan dronella tarkemmaksi kuin helikopterilla, sillä etäisyys kuvauskohteeseen voidaan pitää paljon pienempänä. Pienten alueiden kartoitus voidaan tehdä todella tarkasti, ja ongelmakohtiin on helppo palata tarkempaa tutkimusta varten. Äkilliset lentoreitin muutokset eivät onnistu yhtä helposti helikopterilla. Dronejen lämpökameroiden resoluutio on jo todella tarkkaa, ja kolmiakselinen kuvanvakaaja pitää kameran täysin paikallaan, vaikka drone itsessään heiluisi tuulessa. (Workswell 2019.)

### 3.4 Dronekuvaamisen huonot puolet

Dronejen lentoaika on noin 25 minuuttia riippuen hyötykuorman määrästä ja akkujen tehosta, eikä pitkien välimatkojen lämpökuvauksiin yleensä riitä yksi akku. Kuvaustoiminta on siis keskeytettävä akunvaihdon ajaksi, jonka jälkeen kuvaustoimintaa voidaan kuitenkin jatkaa saman tien. Kuvaaminen suoritetaan yleensä yhdestä sijainnista, jolloin virtaa kuluu turhaan myös paluumatkaan, jos alue on jo menomatalla kuvattu. Droneissa käytettävien litiumpolymeeriakkujen teho laskee ja lentoaika lyhenee käytön yhteydessä, joten akkujen säännöllinen uusiminen on tärkeää.

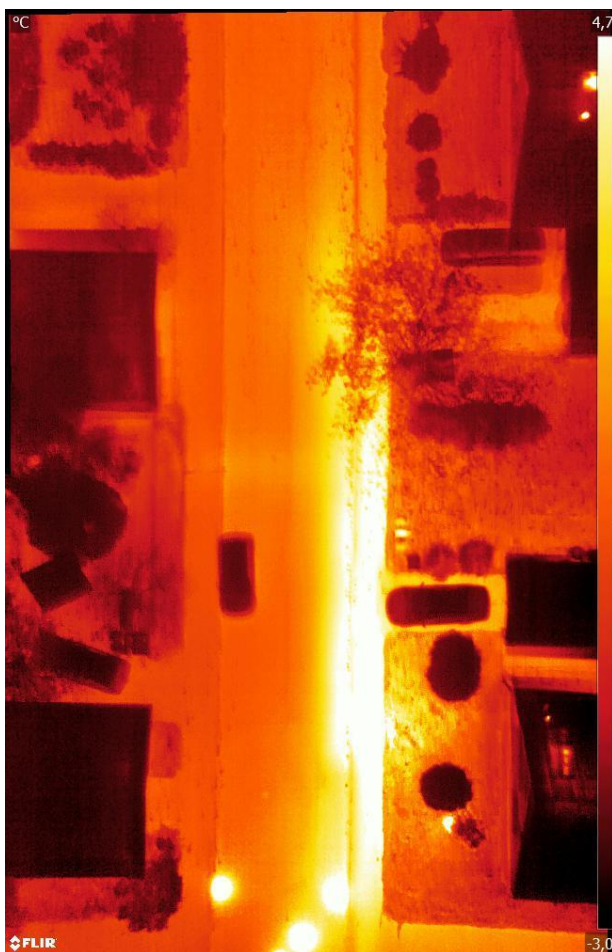
Normaaleissa määräyksien mukaisissa olosuhteissa kuvauskooperiin tulisi säilyttää aina näköyhteys, joten etäisyys dronen ja lentäjän välillä ei voi olla kovinkaan suuri. Näköyhteyden ulkopuolella tapahtuvaan kuvaustoimintaan on käytettävä tähystäjää, jolla on näköyhteys kooperiin. Kuvaajan ja tähystäjän välillä on tällöin oltava jonkinlainen viestintäyhteys, kuten radiopuhelimet. Tapauskohtaisia poikkeuslupia on mahdollista hakea liikenne- ja viestintäministeriö Traficomista. (Traficom 2019b.) Lainsäädäntö määrittää jonkin verran rajoitteita miehittämättömään ilmailuun, ja niistä kerrotaan tarkemmin luvussa yhdeksän.

Vaikka droneteknologia on kehittynyttä ja turvallisuuteen on panostettu todella paljon, ei onnettomuuksilta ole voitu välttyä. Lentäjän toiminnasta riippumatta elektroniikkaan saattaa tulla toimintahäiriöitä. Lentotilanne saattaa äkkiä muuttua dramaattiseksi, jos yhteys droneen katkeaa ja laitteisto syöksyy maahan. Lentolaitteiston kattavat vakuutukset voivat olla todella kalliita, sillä kokemattomalle lentäjälle onnettomuudet ovat melko yleisiä vielä tänä päivänäkin ja lämpökameroilla varustettujen dronejen hinnat suhteellisen kalliita. Turvallisuudesta kannattaa huolehtia, ja laitteisto on tarkastettava ja huollettava riittävän usein, jotta ongelmilta välttyttäisiin parhaimman mukaan. Huollot ja korjaukset tulisi suorittaa ammattilaisen toimesta, ja se puolestaan lisää dronen käyttökustannuksia.

Dronekuvauksen suunnitteluun, lentämiseen ja kuvaamiseen sekä kuvamateriaalin analysointiin tarvitaan paljon työtunteja. Koko Lahden kaukolämpöverkon kuvaamiseen dronella saattaa yhdellä dronella kulua kuukausia, jos kuvamateriaali kerätään ja analysoidaan perusteellisesti. Dronekuvaus soveltuu paremmin pienempien alueiden tarkempaan tutkimiseen, jossa epäillään mahdollista kaukolämpövuotoa tai jos tarkka vuotokohta ei ole vielä selvillä. Kaukolämpöverkon kuvauspalveluiden kustannuksista on tarkemmin tietoa alaluvussa 8.1.

### 3.5 Kokemukset ja saadut tulokset

Dronekuvaamista on käytetty kaukolämmön kuvaamisessa jo muutaman vuoden. Aiheesta on tehty tutkimuksia ja pilottihankkeita, joissa on huomattu droneteknologian potentiaali kaukolämmön tarkastuksissa. MultiCopter Service Oy:n ja Tampereen Sähkölaitos Oy:n teettämässä hankkeessa vuonna 2016 löydettiin kaukolämpövuoto dronekuvausten yhteydessä (Vanhatalo 2016).

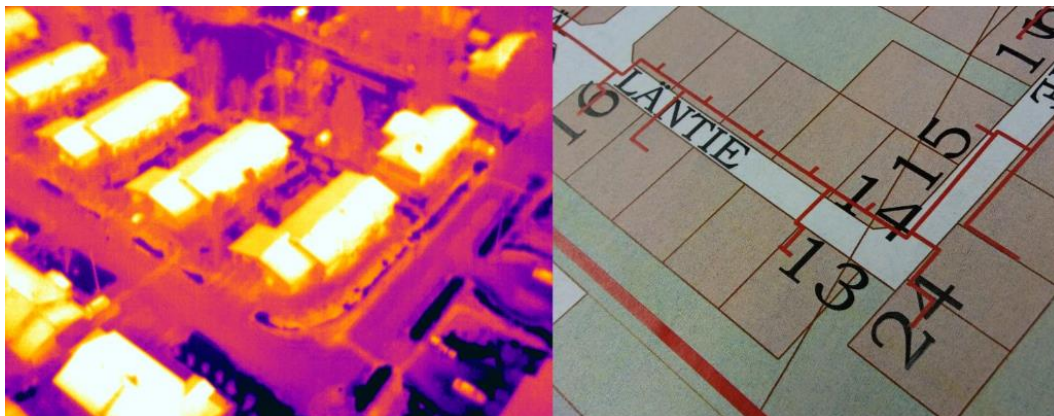


Kuva 5. Dronella löydetty kaukolämpövuoto (Vanhatalo 2016)

Turku Energia Oy on ottanut käyttöönsä lämpökameralla varustetun dronen osaksi kaukolämpöverkon tarkastuksia. Lentotoiminnasta vastaavan Juho Vennamon (2019) mukaan kaukolämpövuotoja on löydetty dronen avulla lähinnä vaikeakulkuisilta siirtolinjoilta. Kaupunkiolosuhteissa vuodot huomataan yleensä asiakkaiden tai ohikulkijoiden silmämääräisillä havainnoineilla, eikä lentämistä kaupungissa ole koettu yhtä hyödylliseksi. Drone on tuonut yritykselle paljon lisäarvoa kaukolämmön tarkastuksien lisäksi myös muun kuvamateriaalin tuotossa, kuten työmaiden tarkastuksissa. Tulevaisuudessa tarkoituksena on soveltaa lämpökamerakuvausta myös polttoainekasojen ja sähköverkon tutkimuksiin. Turku Energian käyttämä drone on Yuneec Typhoon H, jossa on 160x120 resoluution lämpö- ja hämäräkuvauskamera.



Vuonna 2017 Kannuksen kaukolämpöverkkoa kuvattiin Centria-ammattikorkeakoulun dronella Kimi Siltalan (2017) toimesta. Tutkimusta tehtiin edistyksellisellä, noin 20 000 euron arvoisella lämpökameradronella. Maan alla kulkeva kaukolämpöverkko oli helppo paikantaa saadusta kuvamateriaalista, ja mahdolliset vuotokohtat oli helppo löytää. Jopa korkealta kuvattuna asuinalueen putkilinjastot on helppo havaita (kuva 6).



Kuva 6. Kaukolämpöverkko ilmasta kuvattuna (Siltala 2017)

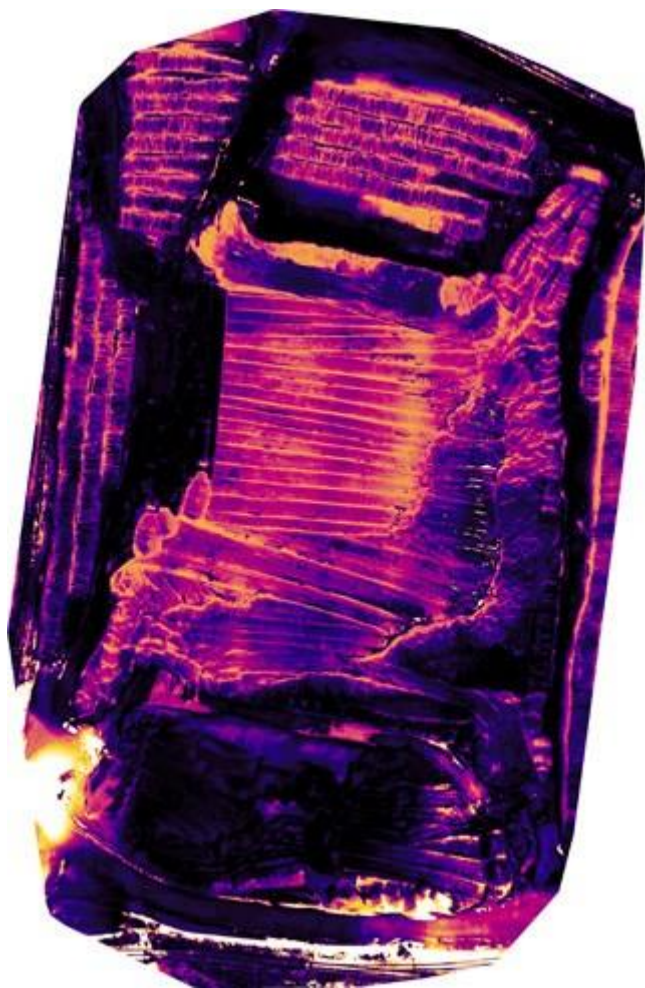
## 4 MUUT ENERGIA-ALAN KUVAUSKOHTEET

### 4.1 Dronet yritysten liiketoiminnassa

Ilmakuvauksella mahdollistetaan monia energiatehokkaita ja ennaltaehkäiseviä sovelluksia tekniikan aloilla. UAV-kuvauksella (Unmanned Aerial Vehicle) saadaan nopeasti tilan tietoa alueesta ja sen mahdollisista ongelmakohtista, parannetaan työturvallisuutta ja voidaan saada aikaan suuria kustannussäästöjä verrattuna aikaisempiin toimintamenetelmiin. Käyttökohteita ilmakuvauksen hyödyntämiselle on useita, ja potentiaalia uusien kuvaustarpeiden löytämiseen on paljon. Tässä kappaleessa esitellään muita potentiaalisia kuvauskohteita kaukolämmön lisäksi, joita Lahti Energia voi hyödyntää energiatehokkuuden ja turvallisuuden parantamiseksi.

### 4.2 Polttoainekasojen ilmakuvaukset

Energia- ja jätelaitoksissa sekä puuteollisuudessa tapahtuu aika ajoin polttoainekasojen tulipaloja. Orgaaniset ja suhteellisen kuivat polttoaineet, kuten hakekasat ja muut energiajätekasat, ovat herkkiä syttymään itsestään palamaan. Lahoamis- ja mätänemisprosessit yhdessä kovan paineen kanssa voivat nostattaa lämpötilaa vaarallisen korkeaksi kasojen sisällä. Kun riittävän korkea lämpötila kohtaa kasan happirikkaan ulkopinnan, voivat polttoainekasat syttyä ilmiliekkeihin silmänräpäyksessä. (Juuti 2018.) Tämä voi johtua mikroorganismien aiheuttamasta luonnollisesta lahoamis- ja mätänemisprosessista, joka polttoainekasojen sisällä yleensä vallitsee. Vaikka kasa ei syttyisikään palamaan, sen energiasisältö pienenee huomattavasti hitaan palamisen prosessissa. (Mäntynen 2018, 24.) Siksi kasojen lämpötiloja tulisi seurata turvallisuuden ja energiatehokkuuden kannalta aktiivisesti. Yhtenä potentiaalisena keinona voidaan käyttää lämpökamerakuvausta dronella.



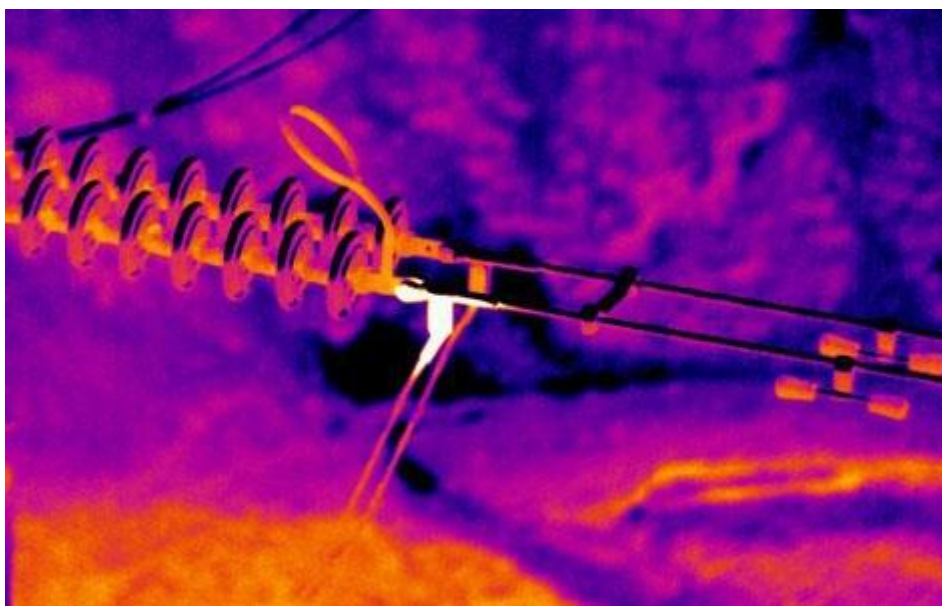
Kuva 7. Lämpökuvakartta polttoainekasoista (MultiCopter Service 2019)

MultiCopter Service on dronepalveluita tarjoava yritys, joka on suorittanut tilavuusmittauksien ja massalaskelmien lisäksi myös lämpökuvauksia polttoainekasoille. Yllä olevassa kuvassa (kuva 2) lämpökuvista on luotu koko polttoaineiden läjitysalueen kattava lämpökartta, josta kuumia alueita voidaan tutkia tarkemmin. Lämpötilaseuranta voidaan tehdä viikoittain, jolloin nähdään kasojen lämpötilakehitys ja mahdolliset riskikohdat. (MultiCopter Service 2019.)

### 4.3 Sähkölinojen ja muuntajien ilmakeuvas

Sähköverkko on elintärkeässä asemassa nyky-yhteiskunnassa, ja sen toimintavarmuuden eteen tehdään jatkuvasti töitä. Suomessa sähköverkkoa on yhteensä noin 400 000 kilometriä ja käyttäjiä on yli kolme miljoonaa. Sähköverkkoa uusitaan jatkuvasti ja ilmajohdoista siirrytään pikkuhiljaa maakaapelointiin. Näin pyritään luomaan verkosta toimintavarmempi ja varmistetaan sähkökatkosten enimmäispituuden pysyminen lyhyenä. Verkon uudelleen rakentaminen on kuitenkin kallista, joten suuri osa kaapeloinnista kulkee vielä ilmassa. (Energiateollisuus ry 2019c.)

Sähköverkko jakautuu koko Suomen kattavasta kantaverkosta pienemmän jännitteen verkkoihin ja muuntamoita tarvitaan verkkojen rajapinnassa (Energiateollisuus ry 2019d). Sähköverkkojen komponentit ovat säässä kuluvia osia, jotka voivat aiheuttaa suuria virtahäviöitä tai jopa sähkökatkoksia. Siirtolinjojen ympäröivä kasvusto saattaa aiheuttaa myös ongelmia, ja raivaustarpeiden kartoittaminen on myös yhtenä osana sähköverkon toimivuutta. Verkon säännöllisillä tarkastuksilla ongelmiin voidaan puuttua ajoissa eikä tappioita ehdi syntyä. (Vanha 2012, 23-28.) Lämpökamerakuvaamisella dronella voidaan luoda mittavat säästöt sähköverkon huoltokustannuksiin, kun sitä verrataan vaikeakulkuisen linjan läpi käymistä jalkaisin tehtävään työhön. Dronella voidaan myös helposti ja ennen kaikkea turvallisesti muodostaa 3D-kartoitus suurjännitelinjojen raivaustarpeista. Sähköverkkojen laserkeilausta on tehty helikoptereilla jo pitkään, ja se onkin erittäin nopea ja tehokas tarkastusmenetelmä isojen alueiden kartoitukseen. Laserkeilauksella tarkoitetaan kolmiulotteisen pistepilven muodostamista tiheästi lähetettyjen lasersäteiden avulla. 3D-karttojen ja pistepilvien avulla voidaan suunnitella sähkölinojen hakkuutarpeita. Helikopterilennot ovat suhteellisen kalliita toteuttaa, ja sähköyhtiöiden on harkittava tarkkaan niiden käyttämistä. Helikopterikuvaus tuottaa materiaalia nopeasti, mutta yksityiskohtiin on vaikeampi puuttua. (Rovdrone 2019.)

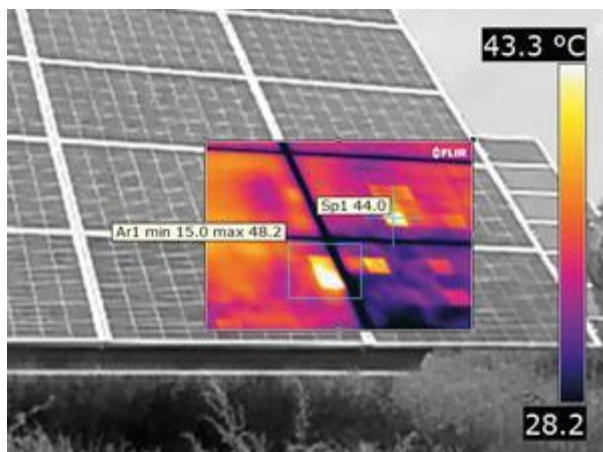


Kuva 8. Vioittunut komponentti sähkölinjan rakenteessa (Heli Aviation Florida 2017)

Sähkölinjojen dronekuvaamiseen liittyy myös muutamia ongelmakohtia. Sähkömagneettinen säteily suurjänniteverkossa saattaa sekoittaa dronen paikantamisjärjestelmää, jolloin sen ohjaaminen vaikeutuu (Atkinson 2017). Normaalitilanteissa miehittämätön ilmailu tulisi suorittaa aina näköyhteyteen perustuvana, joten pitkien linjavälien kuvaaminen voi olla haastavaa. Tällaisissa tilanteissa tulisi olla apuna tähystäjä, ja toiminnalle on haettava erityislupaa. (Ilmailumääräys OPS M1-32/2017.) Lisäksi dronekuvauksen onnistuminen on riippuvainen vallitsevista sääolosuhteista. Kaikkia droneja ei voida lennättää vesissa- teessa, eikä varsinkaan kovassa tuulessa.

#### 4.4 Aurinkopaneelien dronekuvaus

Aurinkopaneelien lämpökamerakuvausta pystytään käyttämään yhtenä osana aurinkovoim- maloiden kunnossapitotarkastuksia. Aurinkopaneelissa esiintyvä lämpötilan vaihtelu saat- taan kertoa viasta. Epäkunnossa olevan aurinkokennon tai koko paneeliketjun pintalämpö- tila on yleensä korkeampi kuin normaalisti. (Lyytikäinen 2018, 16-18.) Sähköntuotanto saattaa laskea huomattavasti ja pahimmassa tapauksessa vioittuneet komponentit sytyttä- vät tulipalon. Lämpökameralla pienetkin viat voidaan huomata ajoissa, ennen kuin vioittu- neet paneelit aiheuttavat isompia vikoja järjestelmään (Heijsman 2014).



Kuva 9. Vioittunut aurinkopaneeli (Heijsman 2014)

Kuvassa 9 voidaan havaita aurinkopaneelin yksittäisten solujen lämpötilapoikkeamat, jotka kertovat viasta. Tämän paneelin sähköntuotto on heikentynyt ja vaatii huoltotoimenpiteitä.

Aurinkopaneeleita sijoitetaan usein kiinteistöjen katoille tai seinustoille, jotta tuotantoteho olisi mahdollisimman suuri ja tilankäyttö tehokasta. Aurinkopaneelien kunnan tarkastaminen vaatii turvallisen pääsyn katolle ja kunnossapito voi olla haastavaa. Lämpökamerakuvaus dronella helpottaa tarkastuksia huomattavasti, sillä kuvattavaan kohteeseen päästään nopeasti ja turvallisesti. Lisäksi korkealta kuvattuna vikojen paikantaminen ja yleiskuvan saaminen on huomattavasti helpompaa.

Lemkem Oy:n aurinkoenergiavastaava Jyri Kelin kertoo, että dronekuvausta ei ole vielä käytetty osana heidän järjestelmien kunnossapitoa, mutta voisi helpottaa työtä merkittävästi. Lemkemin aurinkovoimaloita löytyy Päijät-Hämeestä useita, ja dronekuvauksen toimivuutta osana tarkastuksia voitaisiin testata esimerkiksi Vääksyn liikuntahallin katolla sijaitsevalla 25 kW:n aurinkovoimalalla. (Kelin 2019.)

## 5 YRITYSKÄYTTÖÖN SOVELTUVAT DRONET

### 5.1 Yleistä

Dronemarkkinoita johtava yritys DJI on suunnitellut yksityisten harrastedronejen lisäksi ammattilaiskäyttöön soveltuvan DJI Enterprise -malliston, jota pystytään varustamaan moniin eri käyttötarkoituksiin. Niihin voidaan kiinnittää esimerkiksi lisäakkuja, akun lämmittämiä, lisävaloja, erilaisia kameroita eri optiikoilla, mikrofoneja ja kaiuttimia tai vaikkapa tavara-laatikoita, joiden sisältö voidaan pudottaa haluttuun kohteeseen. Yrityskäyttöön suunniteltujen ilma-alusten koko kasvaa merkittävästi sen mukaan, miten paljon se jaksaa nostaa hyötykuormaa. Isoimmat dronet ovat halkaisijaltaan reilusti yli toista metriä ja jaksavat nostaa useita kiloja ylimääräistä painoa, kun taas pienimmät ovat kämmenen kokoisia ja mahtuvat ahtaisiin paikkoihin. Eri kokoluokkien droneilla on omat hyvät ja huonot puolensa.

Tässä luvussa käsitellään kolmea DJI:n lämpökameralla varustettavaa dronemallia, sekä vertailun vuoksi toisen suosituksen valmistajan, Yuneecin yhtä lämpökuvaamiseen tarkoitettua dronemallia. Kaikki esitetyt dronepaketit ovat saatavilla täysin lentovalmiina paketeina, ja näillä aluksilla lentäminen on tehty mahdollisimman helpoksi ja turvalliseksi.

## 5.2 DJI Matrice 210

Matrice 210 on ammattikäyttöön suunniteltu drone, joka kestää kovimmissakin sääolosuhteissa kuvaamisen. Se on veden- ja pakkasenkestävä, joten vesisateessa tai -20 pakkasasteessa kuvaaminen onnistuu helposti. Matricen älykäs akkujärjestelmä pitää virtalähteet optimaalisessa lämpötilassa kovassakin pakkasessa, jotta lentoaika olisi mahdollisimman pitkä. Tällä dronella maksimilentoaika on noin puoli tuntia, riippuen lisävarusteista. Matrice 210 voidaan varustaa kahdella erillisellä pääkameralla, esimerkiksi yleiskameralla ja lämpökameralla. Kameroissa on kolmiakseliset moottoroidut gimbaalit, jotka vakauttavat kameras kuvamaan tiettyyn kohteeseen, vaikka itse drone heiluisi rajustikin tuulessa. Gimbaalin avulla kameroita voidaan myös ohjata sulavaliikkeisesti. Kaksi erillistä kameraa mahdollistavat dronen helpon ja turvallisen lentämisen samalla, kun lämpökameraa ohjataan toiselta näytöltä avustajan toimesta. (Dji 2019a.) Pelkällä lämpökameralla lentäminen on huomattavasti haastavampaa. Tämä dronekokonaisuus on yksi kalleimmista ja parhaimmista ammattilaiskäyttöön suunnitelluista paketeista Suomessa. Lisätietoja Matrice 210:stä seuraavan sivun taulukossa 1.



Kuva 10. DJI Matrice 210 varustettu kahdella erillisellä kameralla (Dronefly 2019a)



Taulukko 1. Matrice 210 -dronen tekniset tiedot (Dji 2019f)

## M210 -sarja

<b>Mitat (Käyttövalmiina)</b>	(887×880×378 mm)
<b>Mitat (Kasaan taitettuna)</b>	(716×220×236 mm)
<b>Akkujen määrä</b>	2
<b>Paino (TB50-akuilla)</b>	3.80 kg
<b>Paino (TB55-tehoakuilla)</b>	4.53 kg
<b>Maksimi nostovoima</b>	6.14 kg
<b>Maksimi hyötykuorma (2xTB50)</b>	2.34kg
<b>Maksimi hyötykuorma (2xTB55)</b>	1.61kg
<b>Leijumistarkkuus (P-mode with GPS)</b>	Vertikaalinen: ±0.5m (tai ±0.1m, Downward Vision) Horisontaalinen: ±1.5m (tai ±0.3m, Downward Vision)
<b>Maksiminopeus</b>	82.8km/h
<b>Maksimitoimintakorkeus (merenpinnan yläpuolella)</b>	3000 m
<b>Maksimi tuulenoisuus lennättäessä</b>	12 m/s
<b>Maksimi lentoaika (TB50 akuilla, ilman kuormaa)</b>	27min
<b>Maksimi lentoaika (TB55 akuilla, ilman kuormaa)</b>	38min
<b>Maksimi lentoaika (TB50 akuilla, maksimikuormalla)</b>	13min
<b>Maksimi lentoaika (TB55 akuilla, maksimikuormalla)</b>	24min
<b>Toimintalämpötila</b>	-20° to 45° C
<b>Akut</b>	TB50: 4280mAh itsestään lämmittyvä
	TB55: 7660mAh itsestään lämmittyvä

### 5.3 DJI Inspire

DJI Inspire on aavistuksen yksinkertaisempi ja pienempi drone Matriceen verrattuna. Ominaisuuksiltaan se ei ole niin kattava, eikä se ole yhtä hyvin muunneltavissa erilaisiin käyttötarkoituksiin. Inspireen on mahdollista asentaa vain yksi gimbaalilla varustettu kamera, kuten Zenmuse XT -lämpökamera. Lentäminen on huomattavasti haastavampaa pelkällä lämpökameralla. Inspire on kevyempi, lentää lyhyemmän ajan yhdellä latauksella eikä pysty nostamaan niin paljon hyötykuormaa kuin Matrice 210. (Dji 2019b.) Tämän dronen etuina ovat yksinkertaisuus, nopea lentoonlähtövalmius, edullisempi hinta sekä kolmen kilon paino, joka mahdollistaa lentämisen tiheiden asutusalueiden yllä ilman erillisiä turvallisuussuunnitelmia ja lupia, joita Traficom vaatii dronen massan ollessa yli 3 kg.



Kuva 11. DJI Inspire 1 (Dji 2014)

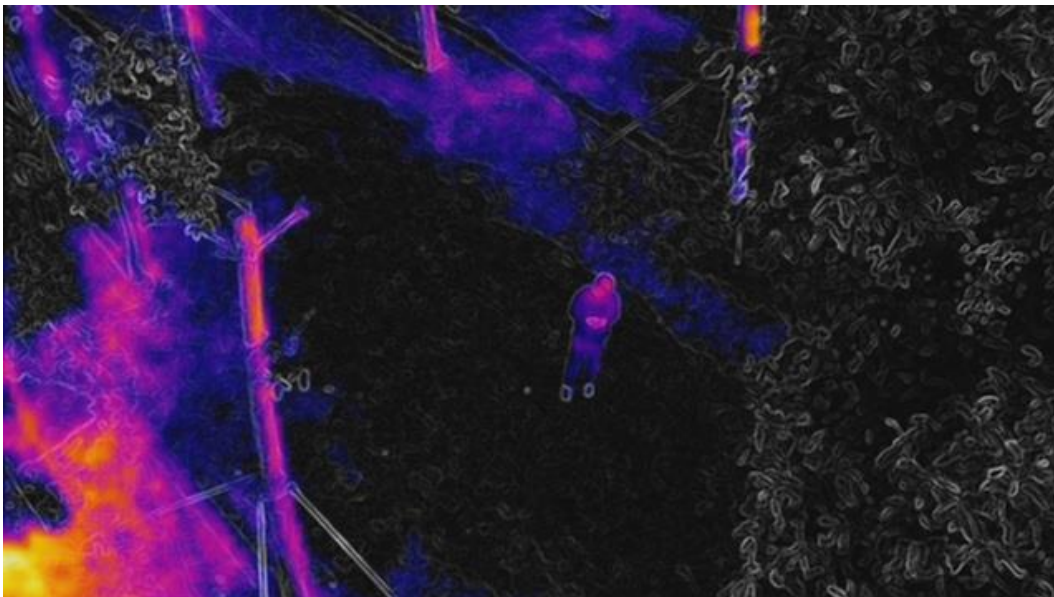
Taulukko 2. Inspire 1 dronen tekniset tiedot (Dji 2019g)

## Inspire 1

<b>Paino</b>	2845 g propellien ja akun kanssa
	3060 g propellien, akun ja kameran kanssa
<b>Leijumistarkkuus</b>	Vertikaalinen: $\pm 0.5$ m Horisontaalinen: $\pm 2.5$ m
<b>Maksimi kallistukulma</b>	35°
<b>Maksimi nousunopeus</b>	5 m/s
<b>Maksimi laskeutumisnopeus</b>	4 m/s
<b>Maksiminopeus</b>	79km/h, ei tuulta
<b>Maksimi toimintakorkeus</b>	2500 m
	4500m erikoispropelleilla
<b>Maksimi tuulenopeus lennettäessä</b>	10 m/s
<b>Maksimi lentoaika</b>	Noin 18 min
<b>Toimintalämpötila</b>	-10° to 40° C
<b>Halkaisija propellien kanssa</b>	581 mm
<b>Maksimi lentopaino</b>	3500 g
<b>Akku</b>	TB 47: 4500mAh älyakku

## 5.4 DJI Mavic 2 Enterprise Dual

DJI julkaisi vuoden 2018 lopussa suositusta Mavic-sarjasta uuden mallin, joka on suunniteltu yritys- ja ammattikäyttöön. Mavic 2 Enterprise Dual on todella pienikokoinen drone muihin ammattidroneihin verrattuna, sillä se on kokoontaitettuna kämmenen kokoinen laite. Enterprise Dual -mallissa on yleiskamera ja lämpökamera samassa gimbaalissa, mutta tämän lämpökameran tarkkuus ei ole läheskään niin hyvä kuin isomman luokan droneihin on saatavilla. Yhdistelmäkamera pystyy kuitenkin tuottamaan niin sanottua yhdistelmäkuva, jossa lämpökuvaan lisätään tasojen ja objektien ääriviivat, jotta lentäminen olisi helpompaa ja muotoja pystytään erottamaan. Tämän dronen etuja ovat todella helppo kuljetettavuus ja nopea lentovalmius. Se pääsee kokonsa puolesta todella ahtaisiin paikkoihin ja sillä on suhteellisen pitkä lentoaika. Lisäksi se on näistä kolmesta DJI:n vaihtoehtoista ehdottomasti halvin ja helpoin ratkaisu, jos lämpökuvan ei tarvitse olla huippulaatua. (Dji 2019c.)



Kuva 12. DJI Mavic Enterprise Dualin lämpökamerakuva (Willoughby 2019)

Mavic 2 Enterprise Dual osaa muodostaa helposti hahmotettavan lämpökamerakuvan yhdistämällä visuaalisen kuvan ja lämpökuvan niin sanotuksi MSX-kuvaksi. Yllä olevasta kuvasta (Kuva 12) on helppo hahmottaa ympäröivä kasvusto, joka ei anna selvää lämpökuvaa. Itse lämpokuva on todella suttuinen, johtuen pienestä lämpökameraresoluutiosta. Jotta kuvattavasta kohteesta saataisiin tarkempaa tietoa, on kuvausetaisyysien oltava mahdollisimman pienet. (Willoughby 2019.)



Kuva 13. DJI Mavic Enterprise Dual (Dronefly 2019b)

Taulukko 3. DJI Mavic Enterprise Dual dronen tekniset tiedot (Dji 2019h)

## Mavic 2 Enterprise Dual

<b>Lentopaino (ilman lisäosia)</b>	899g
<b>Mitat</b>	Taitettuna : 214×91×84 mm Lentovalmiina: 322×242×84 mm
<b>Halkaisija</b>	354 mm
<b>Maksimi nousunopeus</b>	5 m/s (S-mode) 4 m/s (P-mode)
<b>Maksimi laskeutumisnopeus</b>	3 m/s (S-mode) 3 m/s (P-mode)
<b>Maksiminopeus</b>	72 kph (S-mode) 50 kph (P-mode)
<b>Maksimi toimintakorkeus</b>	6000 m
<b>Maksimi lentoaika</b>	31 min (at a consistent speed of 25 kph)
<b>Maksimi leijumisaika</b>	29 min
<b>Maksimi tuulenopeus lennettäessä</b>	10m/s
<b>Toimintalämpötila</b>	-10°C to 40°C
<b>Leijumistarkkuus</b>	Vertikaalinen: ±0.1 m (Vision Positioning) ±0.5m (GPS Positioning) Horisontaalinen: ±0.3m (Vision Positioning) ±1.5m (GPS Positioning)
<b>Akku</b>	3850mAh Automaattinen itsestään lämmittyvä älyakku
<b>Lämpökameran sensoritarkkuus</b>	160x120 pikseliä

### 5.5 Yuneec H520

DJI:n koptereiden lisäksi otin vertailuun suosituksen kiinalaisen droneyrityksen, Yuneecin ammattilaiskäyttöön tarkoitetun H520-mallin. Hintatasoltaan Yuneecin dronet ovat paljon edullisempia kuin DJI:n mallit, eivätkä häviä ominaisuuksiltaan paljoakaan markkinajohtajalle. H520-malli on ammattilaisten käyttöön suunniteltu heksakopteri, ja siihen on mahdollista kiinnittää korkearesoluutioinen tuplakamera, jossa on visuaalinen kamera sekä lämpökamera samassa gimbaalissa. (Yuneec 2019a.) Yuneecin laitteiden ohjausjärjestelmä ei ole aivan yhtä tarkka kuin DJI:n ja jotkin toiminnot ovat toteutettu hieman eri tavalla.

Siksi kokeneemmankin lentäjän, joka on lentänyt muilla droneilla on perehdyttävä kyseiseen ohjainlaitteeseen perusteellisesti ennen ensimmäistä lentoa. Yuneec H520 -järjestelmän hinta on kuitenkin reilusti yli puolet halvempi Matrice 210:n verrattuna, joten on ymmärrettävää joidenkin ominaisuuksien olevan heikompia.



Kuva 14. Yuneec H520 heksakopteri (Yuneec 2019c)

Taulukko 4. Yuneec H520 dronen tekniset tiedot (Yuneec 2019c)

## Yuneec H520

<b>Mitat</b>	520 x 455 x 295 mm
<b>Lentoaika</b>	CGOET per H520): 25 Min / E90: 25 Min / E50: 28 Min
<b>Paino (Sisältäen akun, ei gimbaalia)</b>	1633 g
<b>Akku</b>	5250mAh 15,2V LiPo
<b>Laturi</b>	SC4000-4H
<b>Kauko-ohjain</b>	ST16S
<b>Maksimilentokorkeus</b>	500 m
<b>Maksiminopeus</b>	61km/h
<b>Suurin pyörimisnopeus</b>	120°/s
<b>Suurin kääntökulma</b>	35°
<b>Maksimi nousunopeus</b>	7 m/s
<b>Maksimi laskeutumisnopeus</b>	6 m/s

## 6 OHJELMISTOT JA RADIO-OHJAIMET

### 6.1 Radio-ohjaimet

UAV- kuvauksessa käytettävät ohjelmistot ja applikaatiot voidaan jakaa käyttötarkoituksen mukaan eri osa-alueisiin. Tärkeimpänä osa-alueena voidaan pitää ohjausohjelmistoja, joilla dronen lentoa ja kuvausta voidaan hallita yhdessä radio-ohjaimen kanssa. Dronelle voidaan myös suunnitella lentoreittejä ja kuvausalueita etukäteen kartoitusohjelmilla, jotta lennosta saadaan automaattisesti kerättyä kaikki tarvittava data. Kartoitusohjelmistoilla voidaan myös muodostaa kuvasta alueesta 3D-karttoja ja analysoida niistä mitä moninaisimpia asioita, kuten kasvuston terveyttä, maakasojen tilavuuksia ja alueiden lämpötiloja.

Eri dronevalmistajilla on yleensä omat hallintaohjelmistot, jotka toimivat vain kyseisen valmistajan laitteilla. Esimerkiksi DJI:n droneja voidaan hallita vain DJI:n omilla sovelluksilla, kun taas Yuneecin dronet toimivat omillaan. Luvussa 7.3 esitelty suunnittelu- ja kartoitusohjelmisto Pix4D toimii molempien valmistajien laitteilla.

Droneja lennetään erillisillä radio-ohjaimilla, joihin on yleensä kytketty Android- tai iOS-käyttöjärjestelmällä toimiva mobiililaitte. Radio-ohjaimen videolinkki muodostaa kuvan tabletin tai puhelimen näytölle, josta lentoa voidaan seurata reaaliaikaisesti. Valmiiden dronepakettien mukana tulee aina mallikohtainen radio-ohjain, jonka ominaisuudet vaihtelevat dronejen mukaan.

DJI:n ammattilaisdroneihin voidaan ostaa lisävarusteina edistyksellinen radio-ohjain ja oma näyttölaite (kuva 15), joka toimii täydellisesti pakkasessakin ja näkyy suorassa aurin-gonpaisteessa kirkkaasti. Radio-ohjaimen nappulat ja säätimet ovat muokattavissa omaan käyttötarkoitukseen parhaiten soveltuvaksi. Droneen voidaan linkittää jopa kaksi ohjainta, jotta lentäjän ei tarvitse keskittyä kameran liikkeisiin. (Dronefactory 2019b)



Kuva 15. Lisävarusteina saatavat DJI:n Crystalsky-näyttölaite sekä Cendence radio-ohjain (Inspirepilots 2017)



Kuva 16. Mavic 2 -dronen yksinkertainen ja pienikokoinen radio-ohjain, johon on yhdistetty puhelin (Heliguy 2019)



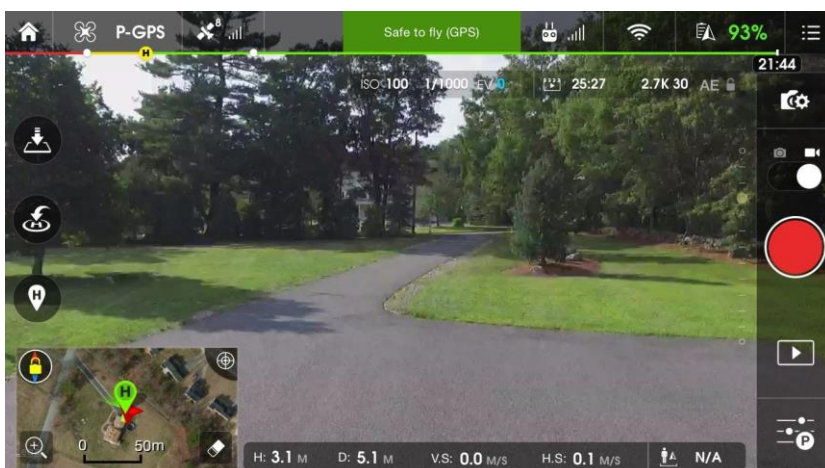
Yuneec H520 -dronen radio-ohjaimen on integroitu oma näyttölaite, josta lentoa seurataan. Ohjain on isokokoinen ja sisältää monia erikseen ohjelmoitavia säätimiä ja kytkimiä. Myös Yuneecin droneen voidaan linkittää kaksi ohjainta lentäjälle ja kuvaajalle. (Yuneec 2019e.)



Kuva 17. Yuneec ST16S radio-ohjain (Yuneec 2019e)

## 6.2 DJI:n hallintaohjelmistot

Käytännössä kaikkia DJI:n valmistamia droneja ohjataan DJI GO -nimisellä mobiiliapplikaatiolla sekä erillisellä radio-ohjaimella, joka on yhdistetty mobiililaitteeseen. DJI GO -sovelluksella on pyritty yksinkertaistamaan ja helpottamaan lentämistä ja kuvaamista käyttäjystävällisempään suuntaan. Applikaatio toimii kaikissa puhelimissa ja tableteissa, joissa on Android- tai iOS-käyttöjärjestelmä. (Dji 2019d.)



Kuva 18. DJI GO -sovelluksen perusnäkö (Phillips 2015)

DJI GO:n perusnäytössä näkyy dronen lähettämä videokuva, sekä paljon lentämiseen ja kuvaamiseen liittyvää informaatiota. Vasemmassa alareunassa näkyy dronen sijainti ja suunta kartalla, jotta lentäminen olisi turvallisempaa ja helpompaa. Tästä lentonäkymästä päästään eri valikkoihin oikeasta yläreunasta, josta voidaan muokata lento- ja kuvausteknisiä asetuksia. (Phillips 2015.)



Kuva 19. ActiveTrack-ominaisuus DJI GO -sovelluksessa (Phillips 2015)

DJI GO:ssa voidaan hallita laitteen sekä kameran asetuksia todella monipuolisesti. Uudempiin DJI:n droneihin on lisätty älykkään kuvaamisen työkaluja, joilla voidaan seurata liikkuvia kohteita automaattisesti ja antaa dronelle käskyjä vaikkapa käsimerkeillä.

(Dronefactory 2019.) Kuvassa (Kuva 19) DJI:n drone on asetettu Active Track -asetukselle, jolla dronen tekoäly tunnistaa rajatusta alueesta objektin, ja seuraa sen liikkeitä tämän liikkussa eteenpäin.

DJI GO:n perusversiossa on paljon ominaisuuksia, joita ei ammattikäytössä välttämättä tarvita. Esimerkiksi kaukolämpöverkkoa kuvattaessa ei ole olennaista käyttää älykkäitä seuraustoimintoja, ja turhat valikot sekoittavat näkymää turhaan. Siksi DJI on suunnitellut yrityskäyttöön hieman yksinkertaistetumman hallintaohjelman, josta on jätetty pois älykkään kuvauksen toiminnot sekä muut ammattikäyttöön turhat ominaisuudet. Sen nimi on DJI Pilot.

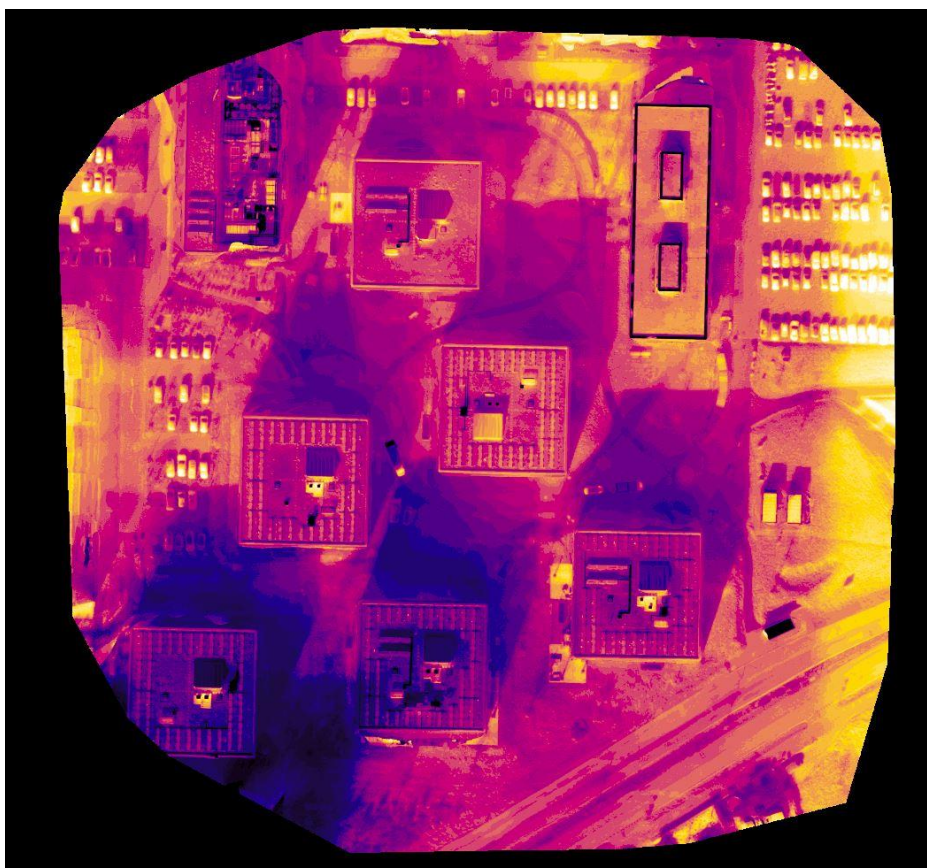


Kuva 20. DJI Pilot -sovelluksen käyttöä tulipalon kuvaamisessa (Dji 2019c)

Ylhäällä näkyvässä kuvassa (Kuva 20) on DJI Pilot -sovellus, jolla kuvataan MSX-lämpökamerakuvaa. Siinä on yhdistetty RGB- ja lämpökamerakuvan tiedot yhteen kuvaan helpottamaan kuvan analysoimista ja alueiden hahmottamista. DJI Pilot ei perusnäkömältään eroa juurikaan GO:sta, mutta se sisältää paljon ainutlaatuisia asetuksia esimerkiksi lämpökamerakuvan käsittelyyn, joita ei GO-sovelluksesta löydy. DJI Pilotista löytyy myös lennonsuunnittelutoiminto, jossa voidaan määrittää automaattinen lento- ja kuvaussuunnitelma ennen kuin kone on edes ilmassa. Kun suunnitelma on valmis, se voidaan toteuttaa ilman, että lentäjän tarvitsee edes koskea ohjaimiin. Kerätty data voidaan viedä kartoitusohjelmistoon, jossa siitä tehdään 3D-mallinnos. (Dji 2019c.)

### 6.3 Pix4D-kartoitusohjelmisto

Pix4D on helppokäyttöinen lentoreittien suunnittelu- sekä kartoitusohjelmisto, joka on täysin yhteensopiva DJI:n ja Yuneecin dronejen kanssa. Ohjelmalla voidaan muodostaa ortokuvia ja 3D-malleja dronella kuvatusta alueesta. Pix4D on luotu helpottamaan ja lyhentämään kentällä tapahtuvaa kuvausaikaa sekä toimistolla tapahtuvaa kuvankäsittelyä. Älykällä reitinsuunnittelulla dronea ei tarvitse käytännössä lentää itse laisinkaan, vaan drone tekee kaiken itsenäisesti. Ennalta määrätty alue kartalta voidaan kuvata läpi nappia painamalla, ja kaikki ortokuvaan vaadittavat kuvat tallentuvat automaattisesti lennon aikana. Lopuksi kuvat siirretään muistikortilta palvelimelle, joka muodostaa alueesta todentuntuisen 3D-kartan. Karttoja voidaan muodostaa myös lämpökamerakuvista. (Pix4D 2018.)



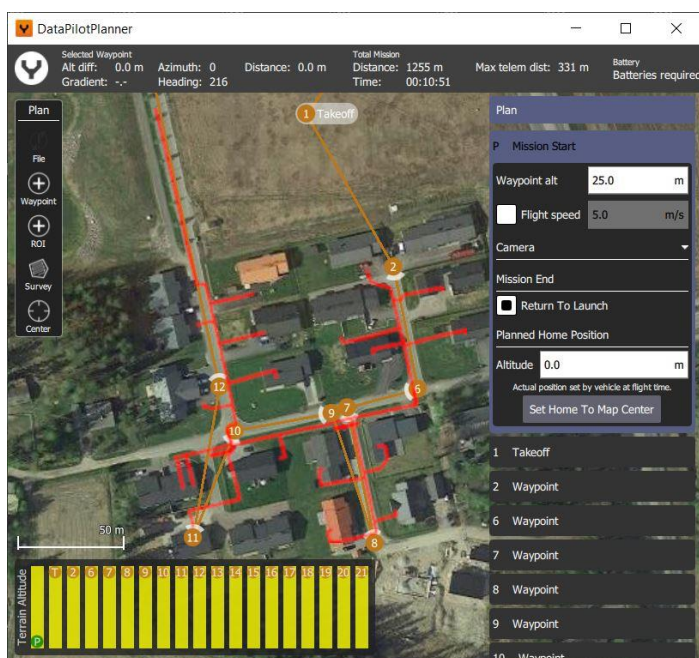
Kuva 21. Pix4D:llä muodostettu lämpökuvakartta (Pix4D 2019a)

Yllä olevassa kuvassa (Kuva 21) on muodostettu lämpökartta 152 yksittäisestä kuvasta Pix4D:n kartoitusohjelmalla. Lämpökamerakuvat on kuvattu DJI Inspire 1 -dronella ja Zenmuse XT -lämpökameralla. (Pix4D 2019a.)

## 6.4 Reittien suunnittelu

Mahdollisimman tehokkaan kuvaustuloksen aikaansaamiseksi lentoreitit on hyvä suunnitella etukäteen. Lentosuunnitelmalla voidaan varmistaa, että haluttu alue tai esimerkiksi kaukolämpöverkon osa tulee varmasti kuvattua niiltä osin kuin on tarpeellista. Suunnittelu voidaan tehdä etukäteen tietokoneella piirtämällä lentoreitit, joiden kautta drone automaattisesti lentää. Apuna on hyvä käyttää putkiverkoston kuvia, jotta kuvaus osuu varmasti kohdalleen. Lentoreitin suunnitteluohjelmistoja on olemassa useita, osa ilmaisia ja osa maksuttomia.

Tässä työssä tutkin Yuneecin kehittämää reitinsuunnitteluohjelmistoa nimeltään DataPilotPlanner, joka on ladattavissa tietokoneelle ilmaiseksi. Tarkoituksena oli muodostaa ennalta määrätty lentoreitti kaukolämpöverkon yläpuolella. Tietokoneella tehdyt suunnitelmat voidaan ladata dronen kauko-ohjaimen siirtämällä reittitiedosto suoraan muistikortilta ohjaimen. Reitin suunnittelussa käytin apuna Lahden kaukolämpöverkon kuvaa, jonka perusteella lentoreitti on määritetty. (Yunec 2019f.)



Kuva 22. Verkostokuvan mukaan määritetty valmis lentosuunnitelma (Yunec 2019f)

Lentoreitti koostuu niin sanotuista suuntapisteistä (waypoints), joiden kautta drone kulkee. Jokaiselle pisteelle voidaan määrittää omat lentokorkeudet, kameran kuvaussuunnat ja lentonopeudet. Tässä tapauksessa määritin lentokorkeudeksi 25 metriä ja kameran suuntaamaan suoraan alaspäin. Drone on määritetty ottamaan kuvia joka kymmenes metri koko lennon ajan. Lähtö- ja paluupisteet ovat määritetty turvalliseen sijaintiin keskelle peltoa. Sovellus kertoo projektin lentoajaksi noin 11 minuuttia ja kokonaislentomatkaksi 1255 metriä. Havainnekuvassa (Kuva 22) suunnitteluohjelman päälle on havainnollistettu kaukolämpöverkon kuva, joka näkyy punaisina viivoina. Lentoreitti, joka näkyy oranssina viivana ei seuraa täsmällisesti jokaista talohaaraa, sillä kuvauskorkeus riittää kattamaan koko verkon ilman turhaa mutkittelua yksittäisissä haarakohdissa. Kun suunnitelma on valmis, se voidaan tallentaa ja siirtää radio-ohjaimen lentoa varten. Valmis kuvamateriaali voidaan tämän jälkeen ladata esimerkiksi Pix4D-kartoitusohjelmaan, jolla voidaan muodostaa yhtenäinen ja helposti analysoitava kartta alueesta.

## 7 LÄMPÖKAMERATEKNIikka JA LÄMPÖKUVAT

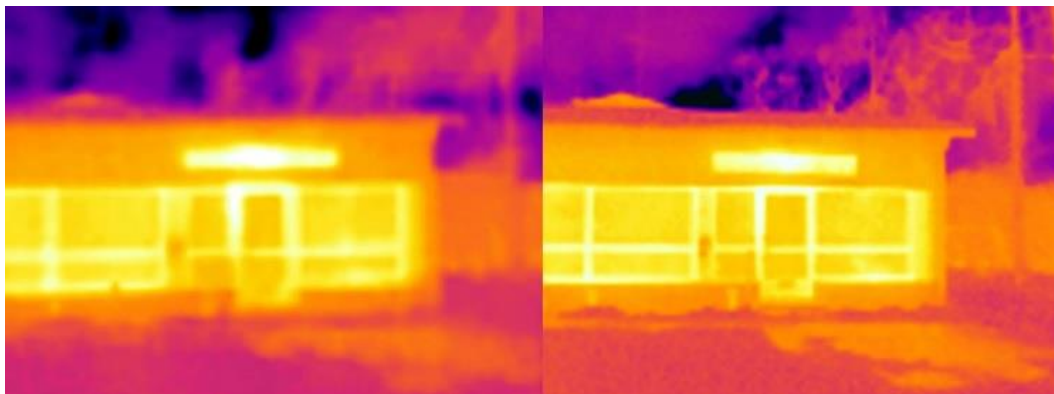
### 7.1 Yleistä

Lämpökamerakuvaus perustuu lämpösäteilyn mittaamiseen kiinteiden aineiden pinnoilta. Alle 500 -asteisten kappaleiden lämpösäteily on pääosin infrapunasäteilyä, jonka aallonpituus on hiukan pidempi kuin näkyvän valon aallonpituus. Tämän vuoksi lämpösäteilyä ei pystytä havaitsemaan paljaalla silmällä, ja avuksi on otettava infrapunasäteilyä mittaava kamera. Lämpökamerassa on ilmaisimia, jotka vastaanottavat infrapunasäteilyä ja muodostavat siitä lämpötila-arvoja. Näistä arvoista muodostetaan digitaalisesti lämpökuva, jossa eri lämpöiset alueet ilmaistaan eri väreillä. Lämpökameroiden resoluutiossa ei olla päästy lähellekään perinteisten digitaalisten valokuvien tasoa, johtuen säteilyilmaisimien tekniikan eroavaisuudesta. Lisäksi lämpökameratekniikasta puhuttaessa tärkeitä tekijöitä resoluution lisäksi ovat kameran herkkyys ja radiometrisyysominaisuudet. (Infradex Oy 2018a.)

### 7.2 Lämpökameroiden resoluutio

Resoluutio lämpökameroissa kertoo lämpötilan mittauspisteiden määrän. Jokaisella pikselillä on oma ilmaisimensa, joka antaa lämpötila-arvon. Yksinkertaisimmat ja halvimmat lämpökamerat ovat resoluutioltaan luokkaa 80x60, kun taas ammattikäyttöön suunnitellut, kalliimmat kamerat tuottavat 640x480 tai jopa 1024x768 pikselin kuvia. Resoluutiolla on todella iso merkitys mittaustulokseen varsinkin silloin, kun kuvattava kohde on kauempana. (Infradex Oy 2018b.) Droneihin saatavat lämpökamerat ovat resoluutioltaan välillä 160x120 – 640x512.

Infradex Oy on tehnyt resoluutiovertailun FLIR-lämpökameroilla vuonna 2016. Yrityksen laatimasta kuvasarjasta (kuvat 14 ja 15) näkee selvästi, kuinka paljon resoluutio vaikuttaa kuvan tulkitsemiseen ja lämpötilaerojen havaitsemiseen.



Kuva 23. Resoluutiot 80x60 ja 120x90 (Infradex Oy 2016)



Kuva 24. Resoluutiot 480x380 ja 1024x768 (Infradex Oy 2016)

### 7.3 Lämpökameran herkkyys ja radiometrisyysominaisuudet

Resoluution lisäksi kuvan tarkkuuteen vaikuttaa lämpötilaherkkyys. Se tarkoittaa pienintä lämpötilan muutosta, jonka kamera pystyy havaitsemaan. Jos kameran herkkyys on huono, ei suuri resoluutiokaan erota pikseleitä toisistaan, vaan piirtää ne saman värisenä alueena. (Infradex Oy 2018b.)



Jotkin lämpökamerat pystyvät tallentamaan kuvan lisäksi myös radiometriset tiedot, eli jokaisen pikselin lämpötilatiedot myöhempää analysointia varten. Tiedostomuotoja on monia, joihin lämpötilatietoja voidaan tallentaa, mutta kaikki ohjelmat eivät niitä osaa hyödyntää. Esimerkiksi .jpg-formaattiin on mahdollista tallentaa radiometristä tietoa, mutta vain FLIR:n omat ohjelmistot osaavat tulkita niitä. Muita radiometrisiä tiedostomuotoja voivat olla esimerkiksi .tiff-, .sit-, .iri- ja .fts-formaatit. (Goodman 2006.)

#### 7.4 Lämpökameraratkaisut droneihin

Dronevalmistajat DJI ja Yuneec tekevät yhteistyötä FLIR:n kanssa, joka on erikoistunut lämpökamerakuvaukseen kaikilla mahdollisilla aloilla aina talonmiehen lämpökamerasta puolustusvoimien massiivisiin asejärjestelmiin. Nykyajan tekniikka on tuonut tullessaan pienikokoiset lämpökamerat ja tehokkaat dronet, joten lämpökuvaus onnistuu ilmasta käsin helposti dronella. FLIR on kehittänyt Zenmuse XT ja XT2 -kamerat, jotka ovat yhteensopivia DJI:n yritysdronejen kanssa. Yuneecin lämpökameramallisto E10t on hieman halvempi, mutta ominaisuuksiltaan ylittää DJI:n kameroiden tasolle. Korkearesoluutioiset lämpökamerat droneihin ovat painoluokaltaan 200-300 grammaa, eivätkä ne poikkea visuaalisten kameroiden mitoista juurikaan. Kameroiden kompakti tekniikka mahdollistaa noin puolen tunnin kuvausajan dronella.

##### **Zenmuse XT**

Zenmuse XT -kamera on dronen gimbaaliin lukittava lämpökamera, jonka resoluutio on mallista riippuen joko 336x256 tai 640x512. Se pystyy tallentamaan kamera- ja videokuvaa 30Hz taajuudella. Kameraan on mahdollista valita erilaisia optiikoita erilaisiin käyttötarkoituksiin. Tämä kamera on yhteensopiva Matrice- ja Inspire 1 -sarjan droneihin. (Dji 2019d.)

Taulukko 5. Zenmuse XT tekniset tiedot (Dji 2019i)



Kuva 25. Zenmuse XT lämpökamera (FLIR 2018a)

## Zenmuse XT

<b>Mitat</b>	103mm x 74mm x 102mm
<b>Paino</b>	270g
<b>Resoluutio</b>	640 x 512 tai 336 x 256
<b>Herkkyys (NEΔT)</b>	<50 mK at f/1.0
<b>Mittaava lämpötilaväli</b>	-40° to 550°C
<b>Pistemittaus</b>	4x4 pikseliä keskeltä
<b>Tallennustila</b>	Micro SD kortti
<b>Kuvaformaatit</b>	JPEG, TIFF
<b>Videoformaatti</b>	MP4
<b>Digitaalinen zoomi</b>	2X, 4X, 8X
<b>Toimintalämpötila</b>	-10° to 40 °C
<b>Linssivaihtoehdot</b>	6.8mm, 7.5mm, 9mm, 13mm, 19mm

### Zenmuse XT2

Zenmuse XT2 eroaa siinä määrin, että siihen on lisätty 4K -kuvaa tuottava kamera samaan pakettiin. Sen myötä lentäminen ja eri asioiden tarkastelu samanaikaisesti helpottuu huomattavasti. FLIR:n patentoitu MSX-tekniikka pystyy yhdistämään näiden kahden kamerasuunnan kuvan älykkääksi lämpökuvaksi, josta on helppo tunnistaa kohteita. Tämän tyyppisen tuplakameran haittapuolena on se, että molemmat kamerat kuvaavat aina samaan suuntaan, eikä toisella kameralla pysty tarkastelemaan muualle samanaikaisesti. XT2 -malli on yhteensopiva Matrice-sarjan dronejen kanssa. (Dji 2019e.)

Taulukko 6. Zenmuse XT2 tekniset tiedot (Dji 2019j)



Kuva 26. Zenmuse XT2 lämpökamera (FLIR 2018b)

## Zenmuse XT2

Mitat	118mm x 112mm x 125mm
Resoluutio	640x512 tai 336 x 256
Herkkyys (NE $\Delta$ T)	<50mK at f/1.0
Mittaava lämpötilaväli	-40° to 550°C
Tallennustila	Micro SD kortti
Kuvaformaatit	JPEG, TIFF, R-JPEG
Videoformaatit	MOV, MP4
Visuaalisen kameran videoresoluutio	4k Ultra HD: 3840x2160
Linssivaihtoehdot	9mm, 13mm, 19mm, 25mm

## Yuneec E10T

Yuneec H520 -dronelle suunniteltu E10T on korkearesoluutioinen kamera, jossa yhdistyy lämpökamera ja hämäräkuvaukseen soveltuva visuaalinen kamera. Tässä kamerassa on myös kolmiakselinen gimbaali vakauttamassa kuvausta. (Yuneec 2019b.) Hintaluokaltaan se on huomattavasti edullisempi kuin markkinajohtaja DJI:n Zenmuse XT ja XT2, vaikka kameran herkkyys ja resoluutio on samaa luokkaa. 640x512 -resoluutioinen malli tulee markkinoille toukokuussa. Suomessa Yuneecin tuotteita jälleenmyy Hobbylinna Oy.

Taulukko 7. Yuneec e10T kameran tekniset tiedot (Yuneec 2019d)



Kuva 27. Yuneec e10T lämpökamera (Yuneec 2019b)

### Yuneec e10T

Paino	370 g
Mitat	123 x 81 x 140 mm
Sensori	CMOS 1/2,8" 2MP 23mm F2,8
Yhteensopivat mallit	H520
Kuvaussektorit	Tilt : +15° to -90°; Pan : 360° Limitless
Lämpökameran resoluutio	320 x 256 or 640 x 512
Videoresoluutio	FHD (1920x1080) / H264 (NTSC) 24/25/30/48/60
Kuvaresuutio	1945X1097 2MP
Kuvaformaatit	JPG, TIFF
Videoformaatti	MP4
Toimintalämpötila	-10° - 40°C
Frame rate	<9Hz
Herkkyys	< 50 mK, @f/1.0
Pistemittaus	3x3 pikseliä

## 8 KUVAUSPALVELUJEN KUSTANNUS VERRATTUNA OMAAN TUOTANTOON

### 8.1 Palveluiden tarjonta

Suomessa on jo muutamia yrityksiä, jotka ovat ottaneet lämpökamerakuvaamisen osaksi ilmakehuvauspalveluitaan. Ala on uusi, eikä kilpailua ole juuri kerennyt syntyä. Tämän kaltaisen asiantuntijapalvelun ostaminen on vielä melko harvinaista suhteellisen kalliin hinnan vuoksi. Työssä kysyttiin kolmelta eri lämpökuvaustryökseltä tarjousta puolen päivän mittaisesta kuvausprojektista, jossa kuvattaisiin omakotitaloalueen kaukolämpöverkkoa. Projektiin sisältyisi myös kuvamateriaalin jälkiprosessointi ja ammattilaisen analysointi potentiaalisista vuotokohdista. Saamani tarjoukset pyörivät noin tuhannen euron paikkeilla, mikä tuntuu varsin kalliilta parin tunnin kuvaustyöstä ja analysoinnista. Tässä luvussa tarkoituksena onkin verrata ulkopuolisten kuvauspalvelujen kustannuksia itse tuotettuun lämpökamerakuvaan. Kustannusten lisäksi pitää myös arvioida työn laatua ja tehokkuutta sekä työhön vaadittavia muita resursseja.

### 8.2 MultiCopter Servicen kuvauspalvelut

MultiCopter service MCS Oy on toiminut ilmailualalla jo 80-luvusta lähtien. Vuonna 2012 yritys siirtyi miehittämättömän ilmailun ja robotiikan pariin. MCS toteuttaa monenlaisia teollisuuden ilmakehuvauspalveluita, mainosvideokuvauksia ja lämpökamerakuvauksia. Henkilöstö koostuu alalle koulutetuista ammattilaisista useamman vuoden kokemuksella. Yrityksen kuvauskalustoon kuuluu tällä hetkellä neljä miehittämätöntä ilma-alusta erilaisilla kuvausominaisuuksilla, sekä kaksi törmäyksen kestäväää lentorobottia, joilla voidaan kuvata todella ahtaissa ja pimeissä paikoissa, esimerkiksi voimalaitoskattiloissa. (Vanhatalo 2019.)

MultiCopter Servicen hinnat kaukolämpöverkon kuvauksessa perustuu kilometrihinnoitteluun. Tässä esimerkkitapauksessa, jossa tarjous koski omakotitaloalueen noin puolen päivän mittaista projektia, hinnoittelu laskettiin viiden kilometrin pituiselle kaukolämpöverkolle. Kuvien analysoinnin suorittaa sertifioitu lämpökuvaaaja, joka on suorittanut ITC-lämpökuvaukoulutuksen. Kuvauspalvelun hintaan lisätään matka- ja kilometrikorvaukset, jotka tässä tapauksessa ovat noin 20 prosenttia koko palvelun hinnasta.

### 8.3 Valmiiden dronokokoonpanojen hinnat

Suurimmat kustannukset lentotyöhön muodostavat dronelaitteistot. Tässä julkisessa versiossa esitetyt hinnat ovat suurpiirteisiä, ja alla esitetyt taulukot sisältävät jonkin verran kuvauksessa tarpeellisia lisälaitteita, kuten vara-akkuja ja kantolaukkuja. Kattavin laitekoko- naisuuden tarjous löytyy Matrice 210 -mallista, jota Suomen Dji:n jälleenmyyjät kasaavat. Ilman lisävarusteita lentäminen onnistuu, mutta niillä voidaan tehostaa työntekoa huomattavasti.

#### Matrice 210

Taulukko 8. M 210 dronen täydellinen laitekokoisuus

<b>Matrice M210</b> Sis. Cendence radion, Crystalsky 7,85” näyttölaitteen, akkulaturin, täydellisen runkotoimituksen kasattuna
<b>6x Matrice TB55 tehoakku</b>
<b>DJI X4S 4K Videokamera</b>
<b>Akkujen lisälaturi + 180W virtalähde</b>
<b>Zenmuse XT lämpökamera 640x512</b>
<b>HPRC suojalaukku</b>
<b>2x Cendence &amp; Crystalsky lisäakku</b>
<b>Potkurivaraosat</b>
<b>Z30 Zoom kamera 30x optinen zoomaus</b>

Dronejärjestelmä yhteensä:

n. 25 000€ alv. 24%

#### Inspire 1

Taulukko 9. Inspire 1 -dronejärjestelmän hinnasto (Verkkokauppa.com Oyj 2019)

<b>Inspire 1 2.0</b> Sisältää X3-kameran X3-gimbalilla, 16 GB microSD-muistikortin, radio-ohjaimen, akun, laturin, potkurit, ohjeet.
<b>2x TB48 tehoakku</b>
<b>Zenmuse XT lämpökamera 640x512</b>

Dronejärjestelmä yhteensä:

n. 13 000€ alv. 24%

## Mavic Enterprise

Taulukko 10. Mavic 2 Enterprise Dual hinnasto (Hobbylinna Oy 2019a)

<b>Mavic 2 Enterprise Dual</b> Sis. Lämpökameran ja visuaalisen kameran, pe- lastustoiminnan lisävarusteet (valonheitin, kaiutin, strobovalo), radio-ohjaimen, potkurit, akun, virtalähteen ja ohjeet.
<b>2x lisäakku, intelligent flight battery</b>

**Dronejärjestelmä yhteensä:**

**n. 3200€ alv. 24%**

## Yuneec H520

Taulukko 11. Yuneec H520 hinnasto (Hobbylinna Oy 2019b)

<b>Yuneec H520</b> Sis. ST16S -radio-ohjaimen, 2x akkuja, latu- rit, potkurit
<b>E10Tv 640x512 kaksoiskamera</b>
<b>2x vara-akut</b>

**Dronejärjestelmä yhteensä:**

**n. 10 000€ alv. 24%**

## 8.4 Ohjelmistolisenssit

Dronelaitteiston lisäksi kuvamateriaalin tehokas analysointi on tärkeässä osassa kuvaustyötä. Hyviä kartoitus- ja analysointiohjelmistoja on useita, mutta melkein kaikki ovat maksullisia. Tunnetuimmat kartoitusohjelmat ovat Pix4D ja DroneDeploy, ja ne ovat monipuolisia ja helppokäyttöisiä. Ohjelmista voidaan ladata kaksi viikkoa kestävä kokeiluversiot, joiden sisältö on yleensä rajoitettua. Säännöllinen kuvaustyö vaatii pakosti kartoitusohjelmiston lisenssin ostamista, jos kuvamateriaalista halutaan ottaa kaikki hyöty irti.

Pix4D-kartoitusohjelmiston lisenssi maksaa noin 220 euroa kuukaudessa. Sovelluksen voi ostaa myös kertamaksulla neljän tuhannen euron hintaan, ja se kattaa ohjelmiston päivityksen ja teknisen tuen vuodeksi eteenpäin. (Pix4D 2019b.) DroneDeploy tarjoaa yrityskäyttöön soveltuvaa kartoitusohjelmiston lisenssiä 250 euron kuukausihintaan, ja sisältää

todella paljon erilaisia työkaluja kuvien prosessointiin (Dronedeploy 2019). DroneDeploy tukee vain DJI:n dronemalleja, kun taas Pix4D on yhteensopiva myös Yuneecin dronejen kanssa.

## 8.5 Vakuutukset

UAV-laitteiden vuosikustannuksia lisäävät jonkin verran myös vakuutukset. Traficom on määrännyt Euroopan parlamentin asettamaa ilmailun vakuutusasetusta käytettäväksi myös kaikissa lentotyötä tekevissä droneissa. Vastuuvakuutuksen on katettava vähintään 750 000€ kolmansien osapuolten vahingoista, joita lentotyö on aiheuttanut. (EY N:o 785/2004.) Tällä hetkellä dronevakuutuksia tarjoavia vakuutusyhtiöitä on Suomessa vähän ja vakuutusmaksut voivat vaihdella paljon.

### **IF:n dronevakuutus**

Suomalaisista vakuutusyhtiöistä If johtaa dronevakuutusten markkinoinnissa ja myymisessä. Hakutulokset sanoille ”drone” ja ”vakuutus” antaa lähinnä uutisia, blogikirjoituksia ja foorumeita, joissa keskustellaan dronevakuutuksista. If on ainoa suomalainen vakuutusyhtiö, joka markkinoi kotisivuillaan ilmailun vakuutusasetuksen mukaista vastuuvakuutusta droneille. Twelve Videotuotannon kopterikuski Teemu Kiiskinen (2017) kartoitti edullisimpia vastuuvakuutuksia oman yrityksensä kahteen kuvausdroneen myös Ifiltä. Tarjous Suomen kattavalle vakuutukselle oli noin 170€ tuhannen euron omavastuusuudella, mutta vaikuttavina tekijöinä Ifillä olivat yrityksen liikevaihto ja toimiala.

Kysyessäni hinta-arviota yhden noin kolme kiloa painavan dronen vastuuvakuutuksesta sain sähköpostiini lisäkysymyksiä yrityksen osoitteista, Y-tunnuksesta, liikevaihdosta ja toimialoista. Tästä voi päätellä, että videotuotantoyritykseen verrattuna moninkertaisen liikevaihdon omaava Lahti Energia, jonka osaaminen ei ole ilmakuvauksessa, saattaa joutua maksamaan vakuutuksesta jonkin verran enemmän kuin 170€ vuodessa.

### **Driessen Insurance**

Driessen Insurance on hollantilainen kansainvälisiin dronevakuutuksiin erikoistunut yritys, joka tarjoaa myös täyskaskoja itse dronelle. Driessen Insurance on myös DJI:n suomalaisen jälleenmyyjän, Dronefactoryn yhteistyökumppani. (Dronefactory 2019a.) Vastuuvakuutuksen hinnaksi muodostuu noin 300 euroa vuodessa, mutta se kattaa lentotyön melkein kaikissa maissa. Lisäksi omavastuusuus on vain 250€, joka on huomattavasti



pienempi kuin If:n vakuutuksessa. Itse dronen vahinkovakuutukset riippuvat paljon koonpanon hinnasta ja lentokokemuksesta, joiden mukaan tarjousta haetaan. (Kiiskinen 2017.)

## 8.6 Koulutukset

Vaikka lentotyöhön ei vaadita pakollista koulutusta, ovat useat alalla toimivat yritykset panostaneet kouluttautumiseen turvallisuuden ja tehokkuuden parantamiseksi. Lentotyöpalveluita tarjoavat yritykset myös saavat luotettavuutta asiakkailtaan asianmukaisen koulutuksen avulla. Kouluttautuminen antaa myös edellytykset turvalliseen lentämiseen ja mahdollisesti oikeuttaa dronen vastuuvakuutuksien alennuksiin.

Insta ILS Oy on luotettava miehittämättömän ilmailun koulutuksia tarjoava yritys, jonka palveluita käyttää myös Suomen viranomaistahot. Koulutustarjonta on hyvin kattavaa sisältäen verkko-opetusta ja yrityksen toiminnalle räätälöityjä perehdytyskoulutuspäiviä. Yhden ihmisen verkkokurssi maksaa 582,80 euroa, joka sisältää verkko-opetuksen. Kurssikokonaisuus, joka sisältää neljälle ihmiselle verkkokurssit ja perehdytyskoulutuspäivän maksaa 5580 euroa. Suoritettua kurssista myönnetään kurssitodistus ja koulutusmateriaali on avoinna kuusi kuukautta. (Insta ILS Oy 2019.)

Lämpökameratekniikkaan keskittyvä Infradex Oy (2019) järjestää kansainvälisesti sertifioitua ITC-level 1 lämpökuvauskurssia suomenkielisenä toteutuksena. Koulutuksessa opiskellaan lämpökamerakuvauksen perusteita ja kuvamateriaalin analysointia, sekä tehdään käytännön harjoituksia lämpökamerakuvaukseen liittyen. Kurssi kestää viisi päivää ja maksaa 1890 euroa (alv. 0€).

## 8.7 Muut kustannukset

Lämpökamerakuvaus dronella vaatii paljon työtunteja varsinkin lentotyön alkuvaiheessa, kun työtehtäviin ei ole syntynyt rutiineja ja toimintaohjeet ovat vielä työn alla. Aikaa kuluu turvallisten toimintasuunnitelmien ja ohjeistuksien laatimiseen, lentoreittien suunnitteluun, itse lentämiseen, lentojen dokumentointiin sekä kuvamateriaalin käsittelemiseen ja analysointiin. Kuvaustyöhön kuluva aika on vaikea määrittellä, mutta toiminnalla voidaan työllistää helposti yksi tai kaksi työntekijää täyspäiväisesti, jos dronella päätetään tarkastaa Lahti Energian energiaverkkoja, voimalaitoksia, polttoainekasoja ja rakennuksia.

Jos lentotyötä ei ole mahdollista suorittaa Traficomien asettamien määräysten mukaisesti tai jos jokin asetettu raja-arvo ylittyy, on kyseiselle lentotyölle mahdollista hakea poikkeuslupaa. Lupa on aina tapauskohtainen ja se myönnetään puoleksi vuodeksi kerrallaan. Lupa maksaa 150 euroa. Maksettavaa saattaa muodostua jonkin verran myös kuvauskaluston huolloista ja korjauksista. Ammattilainen saattaa veloittaa korjaus- ja huoltotöistä jopa sata euroa tunnilta, johon lisätään vielä varaosien hinnat. Isompi kolarointi voi johtaa jopa tuhansien eurojen lisäkustannuksiin.

## 9 UAV-KUVAUKSEN LAINSÄÄDÄNTÖ

### 9.1 Määräys kauko-ohjatun ilma-aluksen lennättämiseen

UAV-laitteiden suosio on kasvanut viime vuosina räjähdysmäisesti. Samalla laitteiden tekniset ominaisuudet ovat kehittyneet hurjasti eteenpäin, mikä mahdollistaa suurienkin massojen nostattamisen taivaalle. Dronet voivat olla vaarallisia, jos niitä ei osata lennättää asianmukaisella tavalla. Suomessa miehittämättömien ilma-alusten lainsäädännöstä vastaa liikenne- ja viestintävirasto Traficom. Jotta onnettomuuksilta vältyttäisiin, on jokaisen dronelentäjän noudatettava Traficomien ohjeistuksia.

Suuren suosion takia UAV-laitteille määrättiin uusi lainsäädäntö, joka tuli voimaan vuoden 2017 alusta. Tämä Traficomien ilmailumääräys OPS MI-32 kauko-ohjatuista ilma-aluksista kattaa laajasti dronen lennättämiseen liittyvät ohjeistukset ja asetukset. OPS MI-32 -määräys perustuu ilmailulakiin 864/2014, ilmailun vakuutusasetuksiin, yksityisyyden suojaan, sekä moniin muihin asetuksiin. Koska lainsäädäntö on melko uusi, sen toimivuus jatkuvasti kasvavalla alalla saattaa jäädä jälkeen. Siksi Traficom kehottaa ilmoittamaan kaikista epäkohdista, onnettomuuksista ja läheltä piti -tilanteista erillisellä lomakkeella. (Traficom 2019a.)

Alla olevaan listaan on poimittu yleiset lentämistä koskevat säännöt Traficomien ilmailumääräyksestä (OPS MI-32/2017):

- Lennot on toteutettava niin, että vaara ulkopuolisille ihmisille ja rakennuksille on mahdollisimman pieni.
- Kauko-ohjaajan on hallittava ilma-alusta turvallisesti ja osattava toimia hätä- ja poikkeustilanteissa. Lentäjän on oltava vähintään 18-vuotias.
- Ilma-aluksen massa saa olla enintään 25kg.
- Dronen lennättäminen väkijoukon päällä on kiellettyä.
- Lentäminen asutuskeskusten yllä on sallittua alle 3kg painoisella dronella.
- Lentäminen tulee olla suoraan näköyhteyteen perustuvaa toimintaa. Jos lentäjällä ei ole näköyhteyttä ilma-alukseen, on käytettävä avustajaa. Lisäohjeistus löydettävissä ilmailumääräyksestä OPS M1-32.
- Lentokorkeuden on oltava alle 150m maan tai veden pinnasta.
- Lentämisellä ei saa häiritä muiden yksityisyyttä.
- Lentäminen on ehdottomasti kielletty lentoasemien läheisyydessä.

## 9.2 Lentotyötoiminnan vaatimukset

Lentotyötoiminnaksi lasketaan kaikki droneilla tehtävä työ, joka ei ole harrastus- tai urheilutoimintaa. Dronella tehtävään työhön liittyy muutamia minimivaatimuksia, jotka on oltava kunnossa ennen kuin koneella voidaan nousta ensimmäisen kerran ilmaan.

- Toimijailmoitus
  - Traficomille tehtävä ilmoitus, johon kirjataan tiedot yrityksestä/omistajasta, lentoaluksesta, lentotyötoiminnan luonteesta, lentoalueesta, alueen luonteesta ja turvallisuudesta. Rekisteröinti maksaa 20 euroa, ja se pitää uusia vuosittain.
- Vastuuvakuutus
  - Lentotyötä tehtäessä dronessa on oltava vähintään vastuuvakuutus, joka kattaa kolmansien osapuolien vahingot.
- Aluksen merkitseminen
  - Droneen on aina merkittävä lentotoiminnasta vastaavan omistajan yhteystiedot esimerkiksi runkoon kiinnitettävällä tarralla.
- Lentopäiväkirja
  - Suoritetuista lennoista on pidettävä päiväkirjaa, josta ilmenee lennon perustiedot, kuten lennon sijainti ja kesto, päivämäärä ja lentäjät. Lentopäiväkirjan tietoja on säilytettävä vähintään kolme vuotta. Tarkemmat ohjeet päiväkirjaan Traficomien ilmailumääräyksestä OPS M1-32/2017.
- Vahinkoraportti
  - Jos lentotyön yhteydessä sattuu onnettomuus tai läheltä piti tilanne, on siitä laadittava vahinkoraportti Traficomille. Raporttien tarkoituksena on oppia mahdollisista ongelmista ja välttää niitä tulevaisuudessa. (Traficom 2019b.)

Lentotyötoimintaan liittyy myös muita lisävaatimuksia, jos lentäminen tapahtuu tiheästi asuttujen asuinalueiden tai suuren väkijoukon läheisyydessä. Jos lentotoiminta ylittää annettuja raja-arvoja ja perussääntöjä, tulee toiminnalle hakea poikkeuslupaa. Tämä vaatii tapauskohtaisia selvityksiä ja turvallisuusohjeita toiminnalle. Lupa maksaa 150€, ja se on voimassa aina kuusi kuukautta kerrallaan.

Lentäminen tiheästi asutulla alueella:

- Dronen suurin sallittu massa on 3kg ja lentäjän on oltava tutustunut alueeseen etukäteen ja takaa turvallisen työskentelyn toimivalla laitteella.

**tai**

- Dronen suurin sallittu massa on 7kg.
- Toiminnanharjoittajan on laadittava kirjallinen toimintakuvaus, turvallisuusarviointi sekä toimintaohjeet lentoja varten.
- Hätätilanteessa ilma-alus on pystyttävä tuomaan alas siten, että sen kohdistama vaara rakennuksiin ja ulkopuolisiin ihmisiin on mahdollisimman pieni.

### 9.3 Lainsäädännön tulevaisuus

Tällä hetkellä miehittämättömien ilma-alusten toimintaa Suomessa säännellään noin kahdeksan sivun mittaisella Traficomien määräyksellä. Lentotyötoimintaa on saanut suorittaa melko vapaasti ilman kouluttautumista tai ylimääräistä kirjallista työtä. Odotettavissa on lainsäädännön tiukentumista, sillä EU on laatinut laajan 130-sivuisen lakiesityksen miehittämättömistä ilma-aluksista vuonna 2017. Lakiuudistusten takana ovat useat ilmatilaloukkaukset ja vaaratilanteet, joita droneilla on saatu aikaan. (Lehto 2017.) Lakiesitys on edennyt päätösvaiheeseen, joka saadaan luultavasti päätettyä vuonna 2019.

Lakiesityksessä on kerrottu hyvin tarkasti uusia rajoitteita lentämiselle. Tulevaisuudessa maksimi lentokorkeus saattaa olla vain 120 metriä, eikä dronella saa lentää kovempaa kuin 3m/s ulkopuolisten ihmisten läheisyydessä. Lisäksi esityksessä on painotettu lentäjien kouluttautumisen tärkeyttä turvallisuuden takaamiseksi. Tulevaisuudessa isoille droneille saatetaan vaatia omaa lentolupakirjaa. (European Aviation Safety Agency 2018.) Tulevaa EU:n lainsäädäntöä tullaan luultavasti noudattamaan Suomessa niiltä osin, kuin se on tarpeellista. Jos ohjeistusta on liikaa, lentäjät eivät ota sitä omakseen. Lisäksi monet ohjeistukset ovat tulkinnan varaisia, eikä niiden valvomiseen ole näillä näkymin tarpeeksi resursseja Suomessa.

## 10 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön keskeisin tarkoitus oli selvittää lämpökameralla varustetun dronen hyötyjä kaukolämpöverkon kuvauksessa, sekä löytää myös muita potentiaalisia käyttökohteita dronekuvaamiselle energia-alalla, jotta investoinnilla saavutettava hyöty olisi mahdollisimman suuri. Kaikkien tehtyjen esiselvityksien ja tutkimusten tavoitteena oli löytää riittävät perustelut sille, onko lämpökameralla varustettuun droneen investoiminen kannattavaa Lahti Energialle. Työssä on otettu myös kantaa siihen, kannattaako dronelämpökuvauksia ostaa palveluna ulkopuoliselta yritykseltä.

Viimeisen kahden vuoden aikana lämpökamerakuvaamista dronella on tutkittu paljon. Haastatteluiden ja tutkimusten perusteella on helppo sanoa, että droneteknologia on mahdollistanut monien eri työtehtävien tehokkuuden parantumisen ja on antanut hyviä tuloksia energia-alan sovelluksissa. Kuvamateriaalin käsittely ja analysoiminen on tehty todella helpoksi ja tehokkaaksi, ja voi mahdollistaa mittavienkin säästöjen luomisen. Lämpökuvauspalvelut sen sijaan osoittautuivat yllättävän kalliiksi, ja niiden käyttö tulisi olla tarkasti harkittua.

Tässä työssä esitettyjen tulosten perusteella ehdotetaan, että Lahti Energia ottaisi droneteknologian käyttöönsä osana kaukolämpöverkon tarkastuksia sekä muita sovelluksia, joissa lämpökamerakuvaamista voidaan hyödyntää. Saavutettavat hyödyt voivat olla paljon suuremmat kuin lentotyöstä aiheutuvat kustannukset. Dronea voidaan käyttää myös esimerkiksi työmaiden massalaskelmissa ja mainosmateriaalin tuotannossa, joten todellinen arvo yritykselle ei rajaudu vain kaukolämpöverkon kuvaamiseen.

Tulokset osoittavat, että laitteiston on oltava riittävän tarkka, koska kuvausetaisyydet ovat suhteellisen pitkät ja lämpötilaerot pieniä. Suositeltava dronehankinta olisi Yuneecin H520-malli, jossa on 640x512-resoluutioinen kaksoiskamera. Tämän dronen hinta-laatusuhde on selvästi paras ja ylläpitäminen on halvempaa verrattuna DJI:n Matrice 210:n. Yuneecin lentoonlähtömassa on noin kaksi kiloa, eikä se vaadi kirjallisten toimintakuvauksien, turvallisuusarviointien tai toimintaohjeiden laatimista massan ollessa yli kolme kiloa. Vallitseva trendi osoittaa, että teknologian kehitys jatkaa vahvaa kulkuaan. Sen takia laitteistoon ei kannata investoida isoja summia, sillä se saattaa vanhentua jo parissa vuodessa. Dronen käyttöön tulisi kouluttaa kaksi ihmistä, jotka huolehtivat



reittiensuunnittelusta, lentämisestä, datankäsittelystä ja laitteen huoltamisesta. Näin drone pysyy parhaiten kunnossa ja lentotoiminnasta vastaavien työtehokkuus paranee.

Tästä aiheesta olisi hyvä tehdä jatkotutkimuksia, varsinkin jos Lahti Energia investoi drone-tekniikkaan. Jatkotutkimusten aiheita voisivat olla esimerkiksi koelennot energia-alan kohteissa, droneohjelmistojen käyttöohjeistus ja lentotyön turvallisuus- ja toimintaohjeistukset.

## LÄHTEET

- Atkinson, D. 2017. Benefits of RTK. Blogi [viitattu 1.4.2019]. Saatavissa: <https://www.heli-guy.com/blog/2017/10/04/benefits-of-rtk/>
- Dji 2019i. Zenmuse XT – Specs [viitattu 13.2.2019]. Saatavissa: <https://www.dji.com/fi/zenmuse-xt/specs>
- Dji 2019j. Zenmuse XT2 – Specs [viitattu 13.2.2019]. Saatavissa: <https://www.dji.com/zenmuse-xt2/specs>
- Dji. 2014. Announcing the DJI Inspire 1 Drone [viitattu 12.12.2018]. Saatavissa: <https://www.dji.com/newsroom/news/announcing-the-dji-inspire-1>
- Dji 2019a. Matrice 200 series [viitattu: 12.2.2019]. Saatavissa: <https://www.dji.com/fi/matrice-200-series>
- Dji 2019b. Inspire 1 – Creativity unleashed [viitattu: 12.2.2019]. Saatavissa: <https://www.dji.com/fi/inspire-1/info#specs>
- Dji 2019c. Mavic 2 Enterprise – Built to empower. Destined to serve [viitattu 16.2.2019]. Saatavissa: <https://www.dji.com/fi/mavic-2-enterprise>
- Dji 2019d. Zenmuse XT – Unlock the possibilities of sight [viitattu 16.2.2019]. Saatavissa: <https://www.dji.com/fi/zenmuse-xt>
- Dji 2019e. Zenmuse XT2 – Dual vision. Superior intelligence [viitattu 16.2.2019]. Saatavissa: <https://www.dji.com/fi/zenmuse-xt2>
- Dji 2019f. Matrice 200 series specs [viitattu 12.2.2019]. Saatavissa: <https://www.dji.com/fi/matrice-200-series/info#specs>
- Dji 2019g. Inspire 1 specs [viitattu 12.2.2019]. Saatavissa: <https://www.dji.com/fi/inspire-1/info#specs>
- Dji 2019h. Mavic 2 Enterprise specs [viitattu 12.2.2019]. Saatavissa: <https://www.dji.com/fi/mavic-2-enterprise/info#specs>
- DroneDeploy. 2019. Unlock the power of drone data [viitattu 5.4.2019]. Saatavissa: <https://www.dronedeploy.com/pricing.html>
- Dronefactory. 2017. DJI GO 4 applikaatio [viitattu 17.1.2019]. Saatavissa: <https://www.dronefactory.fi/aplikaatiot>

Dronefactory 2019a. Prodrone konsepti [viitattu 2.3.2019]. Saatavissa: <https://www.dronefactory.fi/prodrone>

Dronefactory 2019b. Cendence Radio [viitattu 2.4.2019]. Saatavissa: <https://www.dronefactory.fi/cendence>

Dronefly 2019a. DJI Matrice 210 V2 Drone [viitattu 13.1.2019]. Saatavissa: <https://www.dronefly.com/dji-matrice-210.html>

Dronefly 2019b. DJI Mavic 2 Enterprise Dual Drone [viitattu 13.1.2019]. Saatavissa: <https://www.dronefly.com/dji-mavic-2-enterprise-dual-drone.html>

Energiateollisuus ry, Koskelainen, L., Saarela, R. & Sipilä, K. 2006. Kaukolämmön käsikirja. Helsinki: Kirjapaino Libris Oy.

Energiateollisuus ry 2013. Kaukolämpöjohtojen suunnittelu- ja rakentamishjeet. Suositus L11/2013 [viitattu 2.4.2019]. Saatavissa: [https://energia.fi/files/825/SuositusL11\\_2013\\_Kl-johtojen\\_suunnittelu\\_ja\\_rakentamishjeet.pdf](https://energia.fi/files/825/SuositusL11_2013_Kl-johtojen_suunnittelu_ja_rakentamishjeet.pdf)

Energiateollisuus ry 2018. Ohjeita kaukolämpörakentajalle. Oulun Energia [viitattu 16.12.2018]. Saatavissa: <https://docplayer.fi/1287051-Ohjeita-kaukolamporakentajalle.html>

Energiateollisuus ry 2019a. Miksi kaukolämpö? [viitattu 13.1.2019]. Saatavissa: <https://kaukolampo.fi/miksi-kaukolampo/>

Energiateollisuus ry 2019b. Miten kaukolämpö toimii? [viitattu 13.1.2019]. Saatavissa: <https://kaukolampo.fi/miten-kaukolampo-toimii/>

Energiateollisuus ry 2019c. Energiaverkot Suomen selkärankana. [viitattu 1.3.2019]. Saatavissa: [https://energia.fi/perustietoa\\_energia-alasta/energiaverkot](https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiaverkot)

Energiateollisuus ry 2019d. Sähköverkkojen rakenne. [viitattu 1.3.2019]. Saatavissa: [https://energia.fi/perustietoa\\_energia-alasta/energiaverkot/sahkoverkot](https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiaverkot/sahkoverkot)

European Aviation Safety Agency 2018. Introduction of a regulatory framework for the operation of unmanned aircraft systems in the 'open' and 'specific' categories. Opinion [viitattu 21.3.2019]. Saatavissa: <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/Opinion%20No%2001-2018.pdf>

EY N:o 785/2004. Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus lentoliikenteen harjoittajia ja ilma-alusten käyttäjiä koskevista vakuutusvaatimuksista [viitattu 7.3.2019]. Saatavissa:

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:02004R0785-20100408&from=EN>

FLIR 2016. Radiometric temperature measurements [viitattu 2.4.2019]. Saatavissa: [https://dl.djicdn.com/downloads/zenmuse\\_xt/en/sUAS\\_Radiometry\\_Technical\\_Note.pdf](https://dl.djicdn.com/downloads/zenmuse_xt/en/sUAS_Radiometry_Technical_Note.pdf)

FLIR 2018a. Zenmuse XT Premium Aerial Thermal Imaging [viitattu 14.12.2018]. Saatavissa: <https://www.flir.eu/products/zenmuse-xt-premium-aerial-thermal-imaging/>

FLIR 2018b. DJI Zenmuse XT2 [viitattu 14.12.2018]. Saatavissa: <https://www.flir.eu/products/zenmuse-xt2/>

Goodman, M. 2006. Understanding Proprietary Infrared Images [viitattu 11.3.2019]. Saatavissa: <https://www.irinfo.org/04-01-2006-colbert/>

Heijnsman, R. 2014. Inspectin solar panels with thermal imaging. Maintworld [viitattu 21.2.2019]. Saatavissa: <https://www.maintworld.com/Asset-Management/Inspecting-solar-panels-with-thermal-imaging>

Heli Aviation Florida 2017. Powerline & Pipeline [viitattu 1.4.2019]. Saatavissa: <https://heliaf.com/powerline-inspections/>

Heliguy 2019. How to link the Mavic 2 remote controller [viitattu 2.4.2019]. Saatavissa: <https://www.heliguy.com/blog/how-to-link-the-mavic-2-remote-controller/>

Hobbylinna Oy 2019a. DJI Mavic Enterprise Dual [viitattu 18.3.2019]. Saatavissa: <https://www.hobbylinna.fi/tuote/dji-mavic-enterprise-dual/B480302/>

Hobbylinna Oy 2019b. VS: Yhteydenotto pyyntö. Sähköpostiviesti. Vastaanottaja Paajanen, V. Lähetetty 20.2.2019.

Ilmailumääräys OPS M1-32 2017. Kauko-ohjatun ilma-aluksen ja lennokin käyttäminen ilmailuun. Liikenteen turvallisuusvirasto Trafi [viitattu 10.12.2018]. Saatavissa: [https://arkisto.trafi.fi/filebank/a/1544017881/36449b3e46367e0de0a247f2f68fefa1/32674-OPS\\_M1-32\\_2018\\_fi\\_korjattu.pdf](https://arkisto.trafi.fi/filebank/a/1544017881/36449b3e46367e0de0a247f2f68fefa1/32674-OPS_M1-32_2018_fi_korjattu.pdf)

Infradex Oy 2016. Resoluutio vertailu [viitattu 14.12.2018]. Saatavissa: <https://www.infradex.com/wp-content/uploads/2016/08/Resoluutio-vertailu.pdf>

Infradex Oy 2018a. Lämpösäteily ja infrapuna [viitattu 2.12.2018]. Saatavissa: <https://www.infradex.com/lamposateily-ja-lampokamera/>

Infradex Oy 2018b. Webinaari: Kuinka valitsen lämpökameran [viitattu 2.12.2018]. Saatavissa: <https://www.youtube.com/watch?v=OVxLR5-pJ2A&t=2060s>

Infradex Oy 2019. ITC Level 1 koulutus [viitattu 5.4.2019]. Saatavissa: <https://www.infradex.com/itc-level-1/>

Inspirepilots 2017. DJI Cendence Remote Controller [viitattu 2.4.2019]. Saatavissa: <https://inspirepilots.com/threads/dji-cendence-remote-controller.17666/>

Insta ILS Oy 2019. UAS-ratkaisujen perehdytykset ja koulutukset [viitattu 8.4.2019]. Saatavissa: <http://airhow.fi/fi/koulutus/>

Juuti, T. 2018. Hakekasa syttyi palamaan Äänekoskella – ”Sama kasa oli tullessa noin viikko sitten”. Keski-suomalainen [viitattu 2.21.2019]. Saatavissa: <https://www.ksml.fi/kotimaa/Hakekasa-syttyi-palamaan-%C3%84%C3%A4nekoskella-%E2%80%93-Sama-kasa-oli-tullessa-noin-viikko-sitten/1286316>

Kiiskinen, T. 2017. Ilmakuvauskohterin vastuuvakuutuksen metsästys. Twelve videotuotanto [viitattu 2.2.2019]. Saatavissa: <https://www.twelve.fi/kuvauskalusto/ilmakuvauskohterin-vastuuvakuutuksen-metsastys/>

Kovanen, J. 2019. Käyttöpäällikkö. Lahti Energia Oy. Palaveri 19.3.2019.

Lahti Energia 2019a. Valitse ekologinen kaukolämpö! [viitattu 7.3.2019]. Saatavissa: [https://www.lahtienergia.fi/fi/lampo/miksi-kaukolampo/?gclid=EAlaIQobChMIkrTaneOT4QIVwoGyCh0wBwoiEAAYASAAEgKoCfd\\_BwE](https://www.lahtienergia.fi/fi/lampo/miksi-kaukolampo/?gclid=EAlaIQobChMIkrTaneOT4QIVwoGyCh0wBwoiEAAYASAAEgKoCfd_BwE)

Lahti Energia 2019b. Kymijärvi III - Biolaitoshanke [viitattu 13.1.2019]. Saatavissa: <https://www.lahtienergia.fi/fi/lahti-energia/energian-tuotanto/kymijarvi-iii>

Lehto, T. 2017. Lennokkien määräykset tiukentuvat Suomessakin – EU valmistelee droneille uusia rajoituksia. Tekniikka&Talous [viitattu 21.3.2019]. Saatavissa: [https://www.tekniikkatalous.fi/talous\\_uutiset/lennokkien-maaraykset-tiukentuvat-suomessakin-eu-valmistelee-droneille-uusia-rajoituksia-6663835](https://www.tekniikkatalous.fi/talous_uutiset/lennokkien-maaraykset-tiukentuvat-suomessakin-eu-valmistelee-droneille-uusia-rajoituksia-6663835)

Lindberg, J. 2018. VS: Tarjous. Dronefactory. Sähköpostiviesti. Vastaanottaja Lyytinen, I. Lähetetty 28.6.2018.

Lyytikäinen, M. 2018. Lämpökamerakuvausten hyödyntäminen aurinkovoimalan kuntotarkastelussa. Opinnäytetyö [viitattu 2.3.2019]. Saatavissa: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/158227/Markus\\_Lyytikainen.pdf?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/158227/Markus_Lyytikainen.pdf?sequence=1)

Multicopter Service 2019. Tilavuusmittaukset ja massalaskelmat [viitattu 25.2.2019]. Saatavissa: <https://helikopteri-ilmakuvaus.fi/teollisuuden-drone-palvelut/tilavuusmittaukset-ja-massalaskelmat-2/>

Mäntynen, S. 2018. Metsähake polttoaineena. Kandidaatintyö [viitattu 2.21.2019]. Saatavissa: [http://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/158615/kandidaatintyo\\_mantynen\\_santeri.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/158615/kandidaatintyo_mantynen_santeri.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Phillips, A. 2015. A look inside the DJI GO App. [viitattu 17.1.2019]. Saatavissa: <https://dronelife.com/2015/09/15/a-look-inside-the-dji-go-app/>

Pix4D 2018. Pix4Dmapper – The leading photogrammetry software for professional drone mapping [viitattu 28.12.2018]. Saatavissa: <https://www.pix4d.com/product/pix4dmapper-photogrammetry-software>

Pix4D 2019a. Example projects [viitattu 13.1.2019]. Saatavissa: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/360000235126-Example-projects#label12>

Pix4D 2019b. Pix4DMapper – The leading photogrammetry software for professional drone mapping [viitattu 5.4.2019]. Saatavissa: <https://cloud.pix4d.com/store/>

PricewaterhouseCoopers 2017. Welcome to the era of drone-powered solutions: a valuable source of new revenue streams for telecoms operators [viitattu 10.4.2019]. Saatavissa: <https://www.pwc.com/gx/en/communications/pdf/communications-review-july-2017.pdf>

Rovdrone 2019. Power line/cable inspections. [viitattu 12.1.2019]. Saatavissa: <http://rovdrone.eu/drone-en/industrial-inspections/power-linecable-inspections/>

Siltala, K. 2017. Kaukolämpöputkiston vuotojen paikantaminen lämpökamerakuvauksella [viitattu 28.2.2019]. Saatavissa: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/126232/siltala\\_kimi.pdf?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/126232/siltala_kimi.pdf?sequence=1)

Tikkamäki, M. 2016. Ooksää nähny märkiä plänttejä maassa? Son kaukolämpövuato! Yle Uutiset [viitattu 8.3.2019]. Saatavissa: <https://yle.fi/uutiset/3-8617557>

Traficom 2019a. Miehittämätön ilmailu. Liikenne- ja viestintäministeriö Traficom. [viitattu 2.2.2019]. Saatavissa: <https://www.droneinfo.fi/fi/lentotyö>

Traficom 2019b. RPAS Lentotyötoiminta. Liikenne- ja viestintäministeriö Traficom. [viitattu 2.2.2019]. Saatavissa: [https://www.droneinfo.fi/fi/lentotyö/rpas\\_lentotyö](https://www.droneinfo.fi/fi/lentotyö/rpas_lentotyö)

Vanha, H. 2012. Sähköverkon tarkastukset. Opinnäytetyö [viitattu 16.3.2019]. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/42163/opinnayte.henrivanha.pdf?sequence=1>

Vanhatalo, P. 2016. MCS ja Tampereen Sähkölaitos Oy pilotoi [viitattu 3.4.2019]. Saatavissa: <https://helikopteri-ilmakuvaus.fi/2016/11/21/lampokuvat-dronella/>

Vanhatalo, P. 2018a. Yrittäjä. MultiCopter Service MCS Oy. Haastattelu 4.12.2018.

Vanhatalo, P. 2018b. VS: Lämpökuvaustarjous. MultiCopter Service Oy. Sähköpostiviesti. Vastaanottaja Paajanen, V. Lähetetty 11.12.2018.

Vanhatalo, P. 2019. Yritys – Multicopter Service MCS Oy [viitattu 20.2.2019]. Saatavissa: <https://helikopteri-ilmakuvaus.fi/teollisuuden-tarkastukset/>

Vennamo, J. 2019. Työnjärjestelijä, Turku Energia Oy. Haastattelu 2.2.2019.

Verkkokauppa.com Oyj. 2019. DJI Inspire V2.0 -nelikopteri [viitattu 18.3.2019]. Saatavissa: <https://www.verkkokauppa.com/fi/product/0954/grcsk/DJI-Inspire-1-V2-0-nelikopteri-kotiinkuljetus-kaupan-paalle?list=OZCYkR9XPsg9Xkl39Xvi09XTHjZpEWI-NeASK9H9C0hV4kcg>

Visa, P. 2019. Helikopterilentäminen on ilmailun kuninkuuslaji! Turun Seudun Helikopterilentäjät Ry. Blogi [viitattu 13.3.2019]. Saatavissa: <http://www.helikopteri.net/lentaminen.html>

Workswell 2019. FOV Calculator [viitattu 3.4.2019]. Saatavissa: <https://www.workswell-thermal-camera.com/field-of-view-calculator/>

Yuneec 2019a. H520 – Commercial aerial solution. [viitattu 16.2.2019]. Saatavissa: <https://us.yuneec.com/comm-en-h520-overview>

Yuneec 2019b. E10T FLIR Lämpökamera H520 heksakopterille [viitattu 16.2.2019]. Saatavissa: [https://www.yuneec.com/fi\\_FI/lisatarvikkeet/kamerat/e10t/yleiskatsaus.html](https://www.yuneec.com/fi_FI/lisatarvikkeet/kamerat/e10t/yleiskatsaus.html)

Yuneec 2019c. H520 - Tekniset tiedot [viitattu 13.1.2019]. Saatavissa: [https://www.yuneec.com/fi\\_FI/kameradronet/h520/tekniset-tiedot.html](https://www.yuneec.com/fi_FI/kameradronet/h520/tekniset-tiedot.html)

Yuneec 2019d. e10T – Tekniset tiedot [viitattu 13.2.2019]. Saatavissa: [https://www.yuneec.com/fi\\_FI/lisatarvikkeet/kamerat/e10t/tekniset-tiedot.html](https://www.yuneec.com/fi_FI/lisatarvikkeet/kamerat/e10t/tekniset-tiedot.html)

Yuneec 2019e. ST16S Ohjaimet [viitattu 2.4.2019]. Saatavissa: [https://www.yuneec.com/fi\\_FI/lisatarvikkeet/ohjaimet/st16s-h520/yleiskatsaus.html](https://www.yuneec.com/fi_FI/lisatarvikkeet/ohjaimet/st16s-h520/yleiskatsaus.html)

Yuneeec 2019f. DataPilotPlanner. Sovellus [viitattu 2.4.2019]. Saatavissa:

<https://us.yuneeec.com/commercial-de-downloads-h520>