

Paavo Malinen

# DRONEN HYÖDYNTÄMINEN GEOSUUNNITTELUN LÄHTÖTIETOJEN HANKINNASSA

Kandidaatintyö  
Rakennetun ympäristön tiedekunta  
Toukokuu 2024

# TIIVISTELMÄ

Paavo Malinen: Dronen hyödyntäminen geosuunnittelun lähtötietojen hankinnassa,  
Utilising Drones for Geotechnical Design Data Acquisition  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Rakennustekniikka  
Toukokuu 2024

---

Drone on laitteena mullistanut maailmaa. Tässä tutkimuksessa tarkastellaan dronen käytön mahdollisuuksia geosuunnitteluun tarvittavien lähtötietojen hankinnassa. Tarkoituksena on selvittää kirjallisuuden ja aiempien tutkimusten avulla erilaisia tapoja hyödyntää dronea erilaisissa geoteknisissä mittauksissa ja kartoituksissa. Dronen hyödyntämisen mahdollisuuksia on tutkittu laajasti, sillä dronella suoritettavat mittaukset ja kartoitukset ovat usein aikaisempia menetelmiä kustannustehokkaampia ja nopeampia. Ongelmaksi droneille tulee kuitenkin niiden rajallinen kannettavan hyötykuorman suuruus, joka määrittää pitkälti millaista laitteistoa niiden kanssa kyetään käyttämään.

Tutkimuksen alussa esitellään erilaisia droneja ja niiden soveltuvuutta erilaisiin tehtäviin. Työn alussa käydään läpi lisäksi dronen lennättämiseen liittyvää lainsäädäntöä, lentoturvallisuutta ja yksityisyydensuojaa. Työssä tutkittavia mittausmenetelmiä ovat fotogrammetria, LiDAR, sähkömagneettinen mittaus ja lämpökamerakuvaus. Mittausmenetelmistä tutkittiin niiden soveltuvuutta dronepohjaiseen toimintaan sekä niiden mittauksen tarkkuutta dronepohjaisesti toteutettuna. Tarkastelun kohteena toimivat fotogrammetrialla muodostettavat 3D-mallit, LiDAR:illa muodostettavat digitaaliset maasto- ja pintamallit, sähkömagneettisen mittauksen soveltuvuus maaperän, kallioperän ja pohjavesien tutkimiseen sekä lämpökamerakuvaus hyödyntäminen pohjaveden suotautumisen tutkimisessa.

Kirjallisuuden perusteella huomattiin, että dronella tehdyt sähkömagneettiset mittaukset osoittautuivat kustannustehokkaiksi ja nopeiksi menetelmiksi alustaviin maaperä-, kallioperä- ja pohjavesitutkimuksiin. Dronella tehtävillä sähkömagneettisilla mittauksilla kyetään tutkimaan kalliopinnan sijaintia, laatua, maaperän kerroksellisuutta ja pohjavesialueiden rajoja sekä pohjaveden pinnan sijaintia. Lisäksi huomattiin, että sähkömagneettisten mittausten dataa tulkitsemalla voidaan tehdä alustavia maalajiarvioita. Lämpökamerakuvaus todettiin myös hyödylliseksi ja toimivaksi menetelmäksi pohjaveden suotautumisen tutkimisessa. Tutkimuksessa todettiin myös, että fotogrammetrialla muodostetut 3D-mallit ja LiDAR:illa muodostetut korkeusmallit ovat hyödyllisiä osia tietomallien muodostamisprosessissa.

Avainsanat: Drone, geosuunnittelu, fotogrammetria, LiDAR, sähkömagneettinen mittaus, lämpökamerakuvaus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. DRONET JA NIIDEN KÄYTTÖ .....	2
2.1 Lennättämisen lainsäädäntö .....	3
2.2 Lentoturvallisuus.....	6
2.3 Yksityisyys .....	7
3. MITTAUSTEKNOLOGIAT .....	8
3.1 Fotogrammetria .....	8
3.2 LiDAR.....	12
3.3 Geofysikaaliset tutkimusmenetelmät.....	14
3.3.1 Sähkömagneettinen mittaus.....	15
3.3.2 Lämpökamerakuvaus.....	18
4. DATASTA TUOTETTAVAT AINEISTOT .....	19
4.1 3D-mallit .....	19
4.2 Korkeusmallit.....	20
4.3 Kartat.....	22
4.4 Kuvat .....	23
4.5 Poikkileikkausprofiilit.....	24
5. DRONELLA SAATAVAT LÄHTÖTIEDOT GEOSUUNNITTELUUN.....	26
5.1 Alustavat maaperätutkimukset.....	27
5.2 Pohjavesitutkimukset .....	28
5.3 Mallintaminen .....	30
6. YHTEENVETO.....	32
LÄHTEET .....	34

## LYHENTEET

UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i> , miehittämätön ilma-alus
UAS	<i>Unmanned Aerial System</i> , miehittämätön ilma-alusjärjestelmä
EASA	<i>European Aviation Safety Agency</i> , Euroopan unionin lentoturvallisuusvirasto
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i> , Maailmanlaajuinen satelliittinavigointijärjestelmä
RTK	<i>Real Time Kinematic</i> , reaaliaikainen kinemaattinen mittaus
PPK	<i>Post Processed Kinematic</i> , jälkikäsitelty kinemaattinen mittaus
GCP	<i>Ground Control Point</i> , GCP-piste
LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i> , laserkeilaus
VLOS	<i>Visual Line of Sight</i> , suora näköyhteys
GDPR	<i>General Data Protection Regulation</i> , yleinen tietosuojasetus
DGPS	<i>Differential Global Positioning System</i> , differentiaalinen GPS
GPS	<i>Global Positioning System</i> , maailmanlaajuinen paikallistamisjärjestelmä
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i> , inertiamittausyksikkö
DEM	<i>Digital Elevation Model</i> , digitaalinen korkeusmalli
DSM	<i>Digital Surface Model</i> , digitaalinen pintamalli
DTM	<i>Digital Terrain Model</i> , digitaalinen maastomalli
CAD	<i>Computer Assisted Detection</i> , tietokoneavusteinen suunnittelu

# 1. JOHDANTO

Drone on laitteena mullistanut maailmaa. Droneille, kuten muillekin miehittämättömille ilma-aluksille on kehitetty paljon kaupallisia käyttökohteita ja niitä kehitetään edelleen. Nykyään droneja hyödynnetään yksityiskäytön lisäksi esimerkiksi sotilaskäyttöön. Droneilla pystytään tekemään monia asioita aikaisempia menetelmiä nopeammin ja edullisemmin, mikä on osaltaan syynä niiden kasvaneeseen suosioon. Dronejen etuna on myös niiden helppo lentoreittien ohjelmoitavuus, joka mahdollistaa niiden autonomisen lentämisen. Autonomisen lentämisen avulla niiden käyttäminen esimerkiksi alueiden kartoitukseen ja mittauksiin on helppoa. Useat menetelmät vaativat lisäksi tarkkoja etenemisnopeuksia ja etäisyyksiä mitattavista kohteista, mutta se ei ole droneille ongelma.

Tutkimuksen tavoitteena on ottaa selvää, millä kaikilla tavoilla dronea voidaan hyödyntää geosuunnittelun lähtötietojen hankinnassa. Selvitetään millaisia mittauksia droneilla voidaan tehdä ja millaisia mahdollisia malleja hankitusta datasta kyetään tuottamaan. Työssä tarkastellaan myös näiden mittausten ja mallien käyttökelpoisuutta mittaustarkkuuden kannalta. Tutkimuskysymyksiä ovat:

- Millaisia mittauksia droneilla voidaan tehdä?
- Millaisia malleja ja mittaustuloksia mittausten menetelmillä saadaan?
- Miten tehokkaasti tuotettuja mittaustuloksia ja malleja voidaan hyödyntää juuri geosuunnitteluun?
- Kuinka tarkkoja droneilla tehdyt mittaukset ovat?

Työssä keskitytään tarkastelemaan pääasiassa fotogrammetrian avulla muodostettavia 3D-malleja, LiDAR-mittauksella ja fotogrammetrialla muodostettavia korkeusmalleja sekä geofysikaalisia mittausten menetelmiä, joilla voidaan tehdä alustavia maaperä- ja pohjavesitutkimuksia. Työssä tarkastellaan lisäksi lämpökamerakuvauksen soveltuvuutta pohjaveden suotautumiseen. Dronea käytettäessä paikkatiedon yhdistäminen sillä hankittuun dataan on yksi sen suurimmista eduista. Tämä tuo mukanaan myös haasteita, sillä usein tuotetun aineiston käyttökelpoisuus on suoraan riippuvainen onnistuneesta paikkatiedon yhdistämisestä kerättyyn dataan. Dronen käytön yhdistämistä erilaisiin tutkimus- ja mittausten menetelmiin on tutkittu lähivuosina paljon. Dronejen käyttöä ja soveltuvuutta on tarkasteltu suomalaisissa opinnäytetöissä aiemmin muun muassa korjauskentämisen ja infrarakentamisen työsuunnittelun näkökulmista.

## 2. DRONET JA NIIDEN KÄYTTÖ

”Drone”-nimitystä käytetään yleisesti miehittämättömistä ilma-aluksista (UAV) tai miehittämättömistä ilma-alusjärjestelmistä (UAS). Käsitteillä tarkoitetaan siis ilma-aluksia, joita kyetään ohjaamaan automaattisesti, itsenäisesti tai kauko-ohjaajalla. (Traficom 2023a) Myös tässä tutkimuksessa miehittämättömistä ilma-aluksista käytetään nimitystä drone.

Droneja on pääasiassa kahta tyyppiä. On olemassa moniroottorisia sekä kiinteäsiipisiä droneja. Moniroottoriset dronet ovat hieman helikopterin kaltaisia ja hyvin tyypillisiä droneja miehittämättömässä ilmailussa. Ne koostuvat useista moottoreista ja potkuista. Yksi tunnetuimmista malleista on kuvassa 1 esitetty perinteinen nelimoottorinen drone, jossa kukin moottori on oman vartensa päässä. Kiinteäsiipiset dronet ovat enemmän lentokoneiden kaltaisia. Useimmin ne on varustettu yhdellä tai useammalla moottorilla ja niiden ohjaus perustuu siivekkeiden, sivu- ja korkeusperäsimen, laippojen tai muiden vastaavien liikkuvien ohjainpintojen käyttöön. Esimerkkitapaus kiinteäsiipisestä dronestä on esitetty kuvassa 2. Myös näiden dronetyyppien yhdistelmiä on olemassa ja niitä kutsutaan hybrididroneiksi. (Traficom 2023a)



**Kuva 1.** Perinteinen nelimoottorinen drone (Nagel 2023).



**Kuva 2.** Kiinteäsiipinen drone yhdellä moottorilla (Nagel 2023).

Nämä dronetyypit eroavat oleellisesti toisistaan myös niiden käyttötapojen perusteella. Kiinteäsiipisiä droneja käytetään enemmän laajojen alueiden mittauksiin ja kartoituksiin, kun taas moniroottorisia droneja käytetään enemmän valo- ja videokuvaukseen. Moniroottorisilla droneilla pystytään myös leijumaan paikallaan, kun taas kiinteäsiipisillä droneilla se ei ole mahdollista. Kiinteäsiipisillä droneilla vaaditaan tarpeeksi suuria etenemisnopeuksia, jotta siipi kykenee tuottamaan tarvittavan määrän nostovoimaa. Eroavuuksia droneissa on myös niiden painoissa. Dronet voivat painaa grammoista aina tuhansiin kilogrammoihin asti. (Traficom 2023a)

Droneja ohjataan radiolähtetimen avulla. Radiolähtetin on jatkuvassa yhteydessä droneen, jolloin sillä voidaan hallita sen ohjaus-, kamera- ja muita toimintoja. Monissa droneissa on myös sisäänrakennettu kotiinpaluutoiminto, jolla se palaa asetettuun kotipaikkaansa yhteyden katketessa. Droneissa voi olla myös esimerkiksi etätunnistusmahdollisuus, jolla viranomaiset ja tunnistusovellukset saavat tarvittavat tiedot dronesta ja lennättäjästä. Tietyntilaisissa droneissa tulee myös olla paikkatietoisuustoiminto, joka antaa lennättäjälle tietoa ilmatilan rajoista suhteessa dronen lentokorkeuteen ja sijaintiin. (Traficom 2023a)

## 2.1 Lennättämisen lainsäädäntö

Euroopan lentoturvallisuusviraston EASA:n julkaisemat uudet EU:n droneja koskevat määräykset ja säädökset astuivat voimaan vuoden 2020 loppupuolella (EASA 2022). Näiden uusien EU-määräysten on tarkoitus ylläpitää turvallisuutta ja helpottaa dronejen käytön nopeaa kehitystä. Uusien määräysten mukaan dronejen lennättäminen jaetaan kolmeen toimintakategoriaan. Nämä kategoriat ovat avoin, erityinen ja sertifioitu. Lennätyskategorioiden lisäksi dronet on jaettu uusien määräysten mukaisesti C-luokkiin. (Traficom 2023e)

Dronejen C-luokitus koostuu luokista C0–C4. C0-luokiteltujen dronejen suurin sallittu nopeus on 19 m/s, ja ne painavat alle 250 g. C0-luokitellun dronen lennättäjälle ei ole koulutusvaatimusta eikä vähimmäisikärajaa. Näillä droneilla saa niiden kevyen painon takia lentää yksittäisten ihmisten yli, mutta ei väkijoukkojen yli. C1-luokiteltujen dronejen suurin sallittu lentonopeus on myös 19 m/s ja suurin sallittu paino 900 g. Drone saa painaa yli 900 g vain, jos sen suurimmalla nopeudella tapahtuvan törmäyksen energia ei ylitä 80 J. Lisäksi dronen on oltava sähkökäyttöinen. C1-luokitelluilla droneilla ei saa lentää ulkopuolisten ihmisten yläpuolella eikä väkijoukkojen yli. C2-luokiteltujen dronejen suurin sallittu lentopaino on 4 kg ja sen on oltava sähkökäyttöinen. Näillä droneilla ei myöskään saa lentää väkijoukkojen yli ja ihmisiin on oltava vähintään 30 m vaakasuuntainen etäisyys. C3-luokitelluilla droneilla suurin sallittu lentopaino on 25 kg ja suurin sallittu ominaismitta on 3 m. Niillä ei saa lentää ihmisten lähellä tai yläpuolella, ja ne vaativat 150 m etäisyyden asuin-, liike-, teollisuus- ja virkistysalueisiin. Dronen täytyy olla myös sähkökäyttöinen. C4-luokiteltujen dronejen ero C3-luokiteltuihin droneihin on se, että niiden käyttövoimaa ei ole rajattu ja lisäksi niillä ei myöskään saa olla automaattiohjausjärjestelmää. Droneissa, jotka ovat C1-, C2- ja C3-luokiteltuja, tulee lisäksi olla voimassa uusien vaatimusten mukaiset etätunnistustoiminnot ja paikkatietoisuusjärjestelmä. (Traficom 2023e) Kootut tiedot dronejen C-luokituksista on esitelty taulukossa 1.

**Taulukko 1.** C-luokiteltujen dronejen tärkeimmät ominaisuudet (Traficom 2023e).

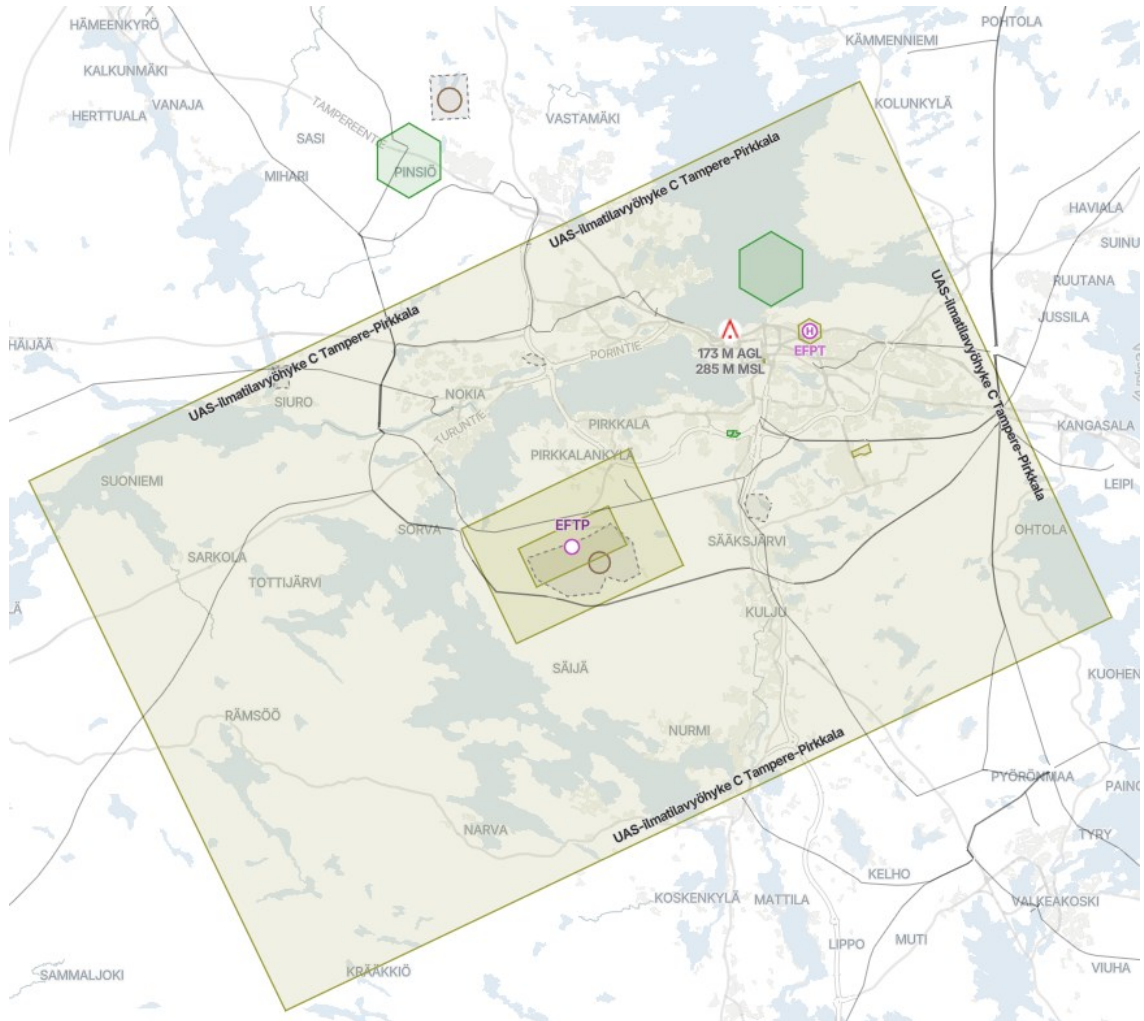
C-merkintä	C0	C1	C2	C3	C4
Paino	alle 250 g	alle 900 g	alle 4 kg	alle 25 kg	alle 25 kg
Käyttövoima	–	Sähkö	Sähkö	Sähkö	Ei rajattu
Nopeus	alle 19 m/s	alle 19 m/s	–	–	–
Etätunnistus	–	Kyllä	Kyllä	Kyllä	–
Palaa kotiin toiminto	–	Kyllä	Kyllä	Kyllä	–
Lentokorkeuden rajoitin	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	–
Autopilotti	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kielletty

Dronejen lennättäminen avoimessa kategoriassa jakautuu tarkemmin vielä kolmeen alakategoriaan A1, A2 ja A3. A1-kategoriassa saa lentää ensisijaisesti C0- ja C1-luokitelluilla droneilla. Alakategoriassa A2 saa lentää ainoastaan C2-luokitelluilla droneilla. Lisäksi tässä kategoriassa lentäminen vaatii lennättäjältä lisätietoa meteorologiasta, dronen suorituskyvystä ja ylilennettävän alueen erottamisesta. A3-alakategoriassa lennetään C2-, C3- tai C4-luokitelluilla droneilla. Lisäksi tässä kategoriassa voidaan lentää yksityisesti rakennetuilla droneilla, joita ei ole C-luokiteltu, ja droneilla, jotka olivat käytössä ennen EU-asetuksen voimaantuloa. Avoimessa kategoriassa lentämisen suurin sallittu korkeus on 120 m ja lennättämisen täytyy aina perustua suoraan näköyhteyteen (VLOS). (Traficom 2023e)

Lennättäessä dronea yli 25 kg lentopainon ja yli 120 m korkeudessa kuuluu lento erityiseen tai sertifioituun toimintakategoriaan. Sama pätee lennättäessä dronea ihmisten läheisyydessä. (Traficom 2023b) Toimintakategoria on sertifioitu, jos toimintaan kuuluu lisäksi ihmisten kuljettamista tai vaarallisten aineiden kuljettamista (Traficom 2023c).

Dronen painon ylittäessä 250 g vaaditaan lennättäjältä aina 12 vuoden vähimmäisikä. Lisäksi vaaditaan rekisteröityminen dronen operaattoriksi SkyNavX-palvelussa, jota ylläpitää Fintraffic. Rekisteröityminen vaaditaan painoluokasta huolimatta myös, jos drone on varustettu anturilla, joka soveltuu henkilötietojen tallentamiseen. Tällaisiksi lasketaan esimerkiksi kameralliset dronet. Operaattorin on lisäksi päästävä läpi vaadituista koikeista ja kyettävä lennättäessä esittämään kauko-ohjaajan todistus. Operaattorin rekisteritunnuksen on oltava merkittynä droneen. (Traficom 2023e)

Suomessa on lisäksi useita ilmailulta kiellettyjä alueita, joissa dronen lennättäminen kiellettyä tai se vaatii erityisluvan. Alueista käytetään nimitystä UAS-ilmatilavyöhykkeet. Tällaisia vyöhykkeitä on perustettu muun muassa lentoliikenteen suojaamiseksi lentoasemien ja helikopterilentopaikkojen yhteyteen. UAS-ilmatilavyöhykkeitä on perustettu myös erilaisten tärkeiden kohteiden kuten puolustusvoimien alueiden, vankiloiden, poliisilaitosten ja hallinnollisten rakennusten kuten suurlähetystöjen sekä eduskunnan ympärille. Perustetut alueet voivat olla pysyviä tai tilapäisiä. Tarkat tiedot alueista päivitetään visuaaliseen muotoon Flyk-sivustolle. Jokainen lennättäjä on vastuussa ottaa selvää alueen rajoituksista ennen toiminnan aloittamista. (Traficom 2022) Esimerkki UAS-ilmatilavyöhykkeistä on esitetty kuvassa 3.



**Kuva 3.** Kuvankaappaus Flyk-palvelusta Tampereen seudulta. (Flyk 2024)

Kuvassa 3 on esitetty kuvankaappaus Tampereen alueella sijaitsevista UAS-ilmatilavyöhykkeistä. Kuvassa suurimpana näkyy UAS-ilmatilavyöhyke C Tampere-Pirkkala, joka on perustettu Tampere-Pirkkalan lentoaseman ympärille. Alue on moniosainen ja niiden tarkennetut säännöt löytyvät osa-alueita klikkaamalla. Kuvan oikeassa yläreunassa näkyy myös Tampereen yliopistollisen keskussairaalan UAS-ilmatilavyöhyke, joka perustuu helikopteripaikan turvalliseen toimintaan. (Flyk 2024)

## 2.2 Lentoturvallisuus

Ennen lennättämisen aloittamista on huomioitava monia asioita, kuten ilmatilarajoitukset ja laitteiden kunto. Laitteiston tarkastamisessa on otettava huomioon myös mahdolliset kiinnitettävät hyötykuormat, kuten esimerkiksi sensorit tai ulkoiset kamerat. Hyötykuormien tulee olla kiinnitettynä siten, että dronen painopiste ei muutu eikä dronesta putoa mitään lennon aikana. (Traficom 2023d)

Sää vaikuttaa merkittävästi lentoturvallisuuteen. Voimakas tuuli voi vaikuttaa kriittisesti varsinkin kevyiden dronejen lennättämiseen ja voi aiheuttaa dronen hallinnan menettämisen. Tuulella lennättäessä tarvitaan suurempaa moottoritehoa, mikä johtaa myös akkujen varauksen nopeampaan kulumiseen. Tuulen lisäksi sade tuo mukanaan omat ongelmansa, sillä moni drone ei kestä sadetta. Jos kosteus pääsee dronen rungon sisälle se voi aiheuttaa ongelmia ohjauskomponenteille tai käytettävään laitteistoon. Lisäksi sateen ja esimerkiksi sumun tuomat näköhaitat ovat vaarallisia lennättämisen kannalta, sillä avoimen kategorian toiminnassa näköyhteyttä droneen ei saa menettää. Myös pakkasen vaikuttaa negatiivisesti esimerkiksi akkujen toimintaan. Pakkasella on myös huomioitava mahdollinen jään muodostuminen dronen potkureihin tai siipiin. Laittevalmistajat ilmoittavat yleensä laitteillaan suurimman sallitun tuulennopeuden ja säänkestävyyden. (Traficom 2023d)

Lentoturvallisuuteen vaikuttaa myös oleellisesti lennättäjän kunto. Alkoholien ja huumausainien käytön alaisena ei koskaan saa lennättää dronea. Lisäksi lennättäjän viireystilan on oltava kunnossa, sillä väsyneisyys ja stressi voivat vaikuttaa negatiivisesti lennättäjän aisteihin ja päätöksentekoon. (Traficom 2023b)

## 2.3 Yksityisyys

Drone kykenee tuottamaan erilaista tietomateriaalia, jonka käyttöä rajoittaa EU:n yleinen tietosuojasetus (GDPR). Asetuksen tarkoituksena on suojata kaikkien henkilötietoja väärinkäytöltä ja varmistaa, että saatuja henkilötietoja käytetään oikein. Henkilötiedoiksi lasketaan sellaiset tiedot, joiden avulla henkilö voidaan tunnistaa suoraan tai välillisesti. Tällaisia tietoja ovat esimerkiksi nimi, kotiosoite, ajoneuvon rekisterinumero, valokuvat, äänitteet, paikkatieto ja jotkut yhteystiedot. Droneilla henkilötietoja voidaan tallentaa pääasiassa kameralla ja äänitteillä. (Traficom 2023f)

Hyvä tapa välttää GDPR-periaatteiden rikkomista dronella kuvatessa on lentää tarpeeksi korkealla, sillä tietosuojasetus on voimassa vain tallennettaessa tunnistettavia henkilöitä tai henkilötietoja. Kaupallisessa käytössä julkaistavaan materiaaliin tulee saada tunnistettavilta henkilöiltä lupa. Julkisilla paikoilla kuvaaminen on pääsääntöisesti sallittua, mutta julkisrauhan suojaamissa paikoissa olevia henkilöitä ei saa kuvata. Tämä koskee esimerkiksi työpaikalla sisätiloissa työskentelevien ihmisten kuvaamista ilman lupaa. Myöskään yksityisiä koteja ja piha-alueita ei saa kuvata niin, että kuvista voidaan tunnistaa henkilöitä. Materiaalin hankkija on aina vastuussa siitä, että hänen käyttämänsä materiaali ei riko yleistä tietosuojasetusta. (Traficom 2023f)

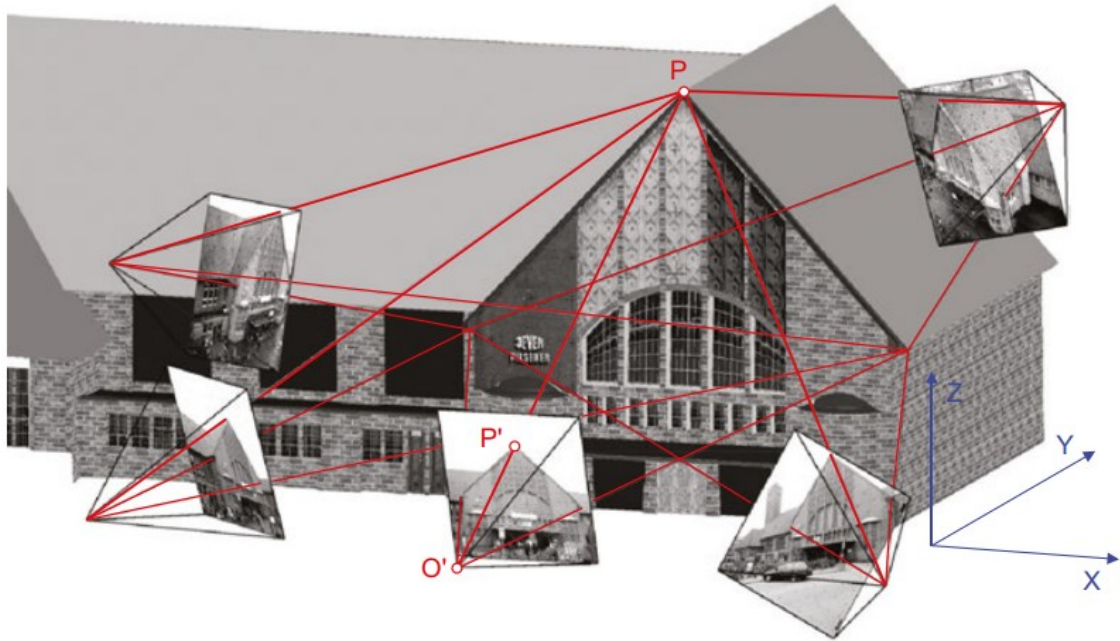
## 3. MITTAUSTEKNOLOGIAT

Droneilla voidaan tehdä useita eri mittauksia, mikä perustuu dronejen kykyyn kuljettaa erilaisia mittauslaitteita. Droneilla tehdyt mittaukset ovat usein nopeampia verrattuna aikaisempiin menetelmiin, sillä droneilla pystytään kartoittamaan laajoja alueita lyhyessä ajassa. Dronejen tuomia etuja ovat myös niiden kehittyneet autonomiset lentotoiminnot, mitkä helpottavat kartoituksia ja vähentävät inhimillisiä virheitä. Suuri etu droneilla tehdyissä mittauksissa on myös paikkatiedon samanaikainen kerääminen, jonka avulla kerätty data voidaan sitoa maastoon. Droneilla tehdyt mittaukset ovat yleensä myös aikaisempia menetelmiä, kuten helikopteripohjaisia mittauksia edullisempia.

### 3.1 Fotogrammetria

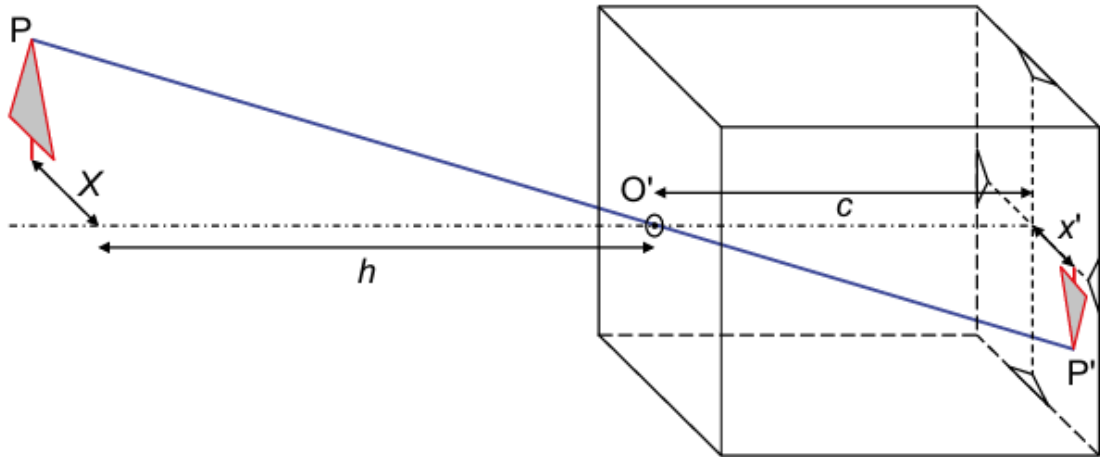
Fotogrammetrian pääasiallista tarkoitusta voidaan kuvailla yhdellä lauseella. Luhmann et al. (2020, s.2) toteavat kirjassaan, että fotogrammetrian primäärinen funktio on objektin kolmiulotteinen rekonstruktio digitaaliseen tai graafiseen muotoon. Kun kolmiulotteisesta objektista otetaan kaksiulotteinen kuva, häviää siinä mukana informaatiota esimerkiksi objektin kääntöpuolesta. Tietoa häviää myös kohdista, joissa kuvaa ei pystytä tulkitsemaan kontrastin tai objektin koon takia. Fotogrammetrialla kyetään vastaamaan tähän pulmaan. (Luhmann et al. 2020, s. 2–3)

Fotogrammetria on kolmiulotteinen mittaustekniikka, joka perustuu keskusprojektiokuvantamiseen. Objektin piste pystytään sijoittamaan kolmiulotteiseen koordinaatistoon kuvan 4 mukaisesti edellyttäen, että sama piste näkyy vähintään kahdesta eri kuvakulmasta otetusta kuvasta. Kahden kuvan avulla muodostettavaa fotogrammetriaa sanotaan stereofotogrammetriaksi ja useamman kuvan avulla muodostettavaa fotogrammetriaa monikuva fotogrammetriaksi. (Luhmann et al. 2020, s. 7)



**Kuva 4.** Fotogrammetrian toimintaperiaate (Luhmann et al. 2020, s. 8).

Keskusprojektiokuvantaminen perustuu ideaan, jossa objektin jokainen piste pystytään mallintamaan kuvan projektiokeskuksen kautta kulkevien säteiden kautta. Teorian ymmärtämistä helpotetaan kuvassa 5 näkyvän niin sanotun neulanreikäkameran toimintaperiaatteella. Jokainen kuvapiste  $P'$  ja kameran perspektiivikeskus  $O'$  määrittävät niiden kautta spatiaalisesti kulkevalla säteellä objektin pisteen  $P$ . Kolmiulotteista mallinnusta edellyttää myös, että kameran kuvausgeometria ja kuvausjärjestelmän sijainti objektiin nähden tiedetään. Kuitenkin on huomioitava, että oikea kamera ei toimi täydellisesti neulanreikäkameramallin mukaan, jossa kaikki säteet kulkevat perspektiivikeskuksen kautta. Oikeassa kamerassa monimutkainen objektiivi ja kameran sisäiset muuttujat tuovat omat ongelmansa, minkä takia fotogrammetriassa käytettävät kamerat vaativat tarkkaa kalibrointia. (Luhmann et al. 2020, s. 7–8)



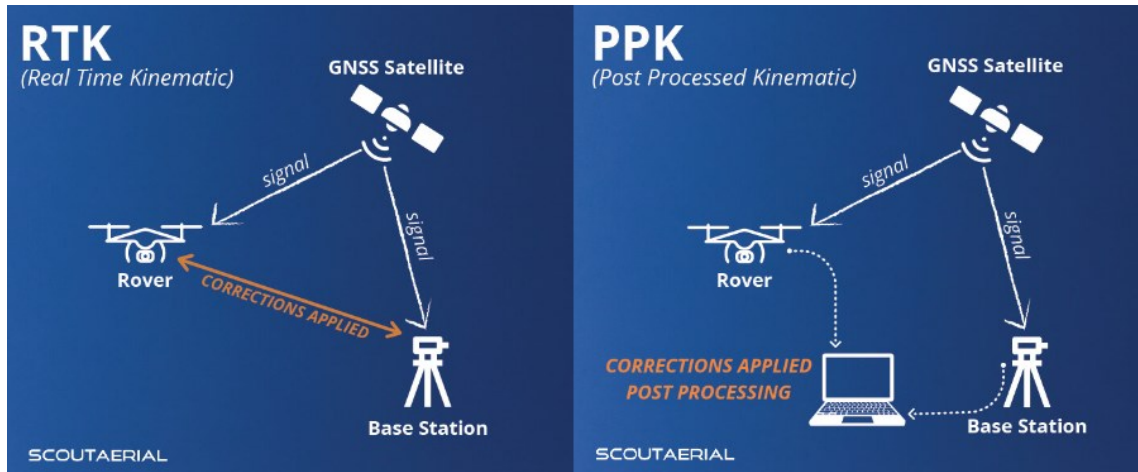
**Kuva 5.** Neulanreikäkameran toimintaperiaate (Luhmann et al. 2020, s. 8).

Eri kuvista muodostuneet sädeniput voidaan koota ja prosessoida helposti selkeiden kiintopisteiden valitsemisen ja automaattisen kuvion tunnistuksen avulla. Automaatiota hyödyntävät ohjelmat pyrkivät tunnistamaan pistejoukoista yhteneviä ominaisuuksia, kuten objektien reunoja, kuvioita tai pisteitä, joilla on korkea kontrasti ympäristöönsä verrattuna. Tehtävään on olemassa monia erilaisia algoritmeja, mutta ne kaikki perustuvat samankaltaiseen periaatteeseen, jossa kuvista etsitään pikselitasolla tarpeeksi ympäristöstään eroavia pisteitä tietyn rajauksen sisällä ja niitä verrataan muihin kuviin. (Luhmann et al. 2020, s. 378–392)

Lopullinen pistepilvi muodostetaan niin sanotun blokkitasoituksen avulla (englanniksi *bundle adjustment*, *bundle triangulation* tai *bundle block adjustment*), joka matemaattisena prosessina kokoaa eri kuvista muodostuneet sädeniput yhdeksi kolmiulotteiseksi pistepilveksi. Blokkitasoitus perustuu aiemmin esiteltyyn keskusprojektiokuvantamisen periaatteisiin. Luhmann et al. (2020, s. 25) mukaan blokkitasoituksen merkitys fotogrammetriassa piilee siinä, miten se ei aseta minkäänlaisia rajoituksia kameroiden positiioille tai orientaatioille. Myöskään kamerasisäisellä orientaatiolla ei ole merkitystä, sillä se voidaan olettaa tuntemattomaksi muuttujaksi. Tämä vapaus on pitkälti syynä sille, miksi fotogrammetriassa voidaan käyttää lähes mitä tahansa kameraa. (Luhmann et al. 2020, s. 25–26, 349–350)

Dronella tehtävässä fotogrammetriassa kamerasijainti saadaan selville GNSS (Global Navigation Satellite System) satelliittipaikannuksen avulla. Dronen tarkka sijainti voidaan määrittää kuvassa 6 näkyvillä tavoilla. RTK eli *Real Time Kinematic* mittausmenetelmässä droneen sisäänrakennettu vastaanotin on jatkuvassa yhteydessä satelliittiin ja tukiasemaan, jolloin dronen korjattu sijainti määrittyy lähes reaaliajassa. Mittaustapa

vaatii ennakkotietona tukiaseman tarkan sijainnin. Menetelmän huono puoli on sen haavoittuvuus yhteysongelmille, jotka voivat johtua esimerkiksi rakennuksista tai kasvillisuudesta. Toinen tapa on PPK eli *Post Processed Kinematic* mittausmenetelmä, jossa sijainnin korjaus toteutetaan jälkikäteen yhdistämällä aikaleimattua sijaintidataa dronesta ja aikaleimattuja korjauksia tukiasemasta. (Scout Aerial 2020).



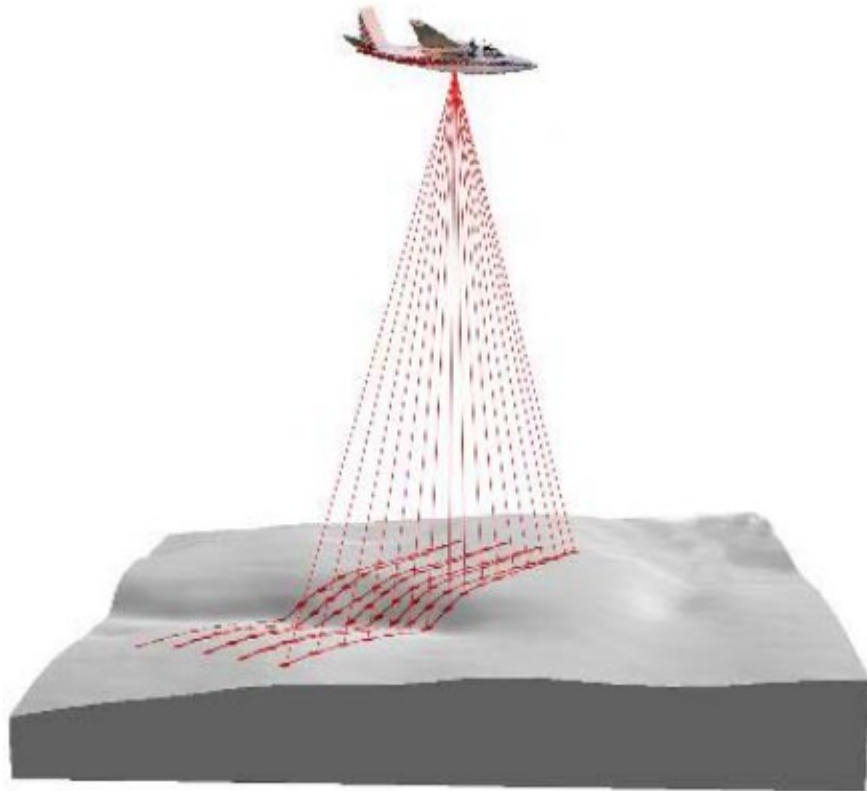
**Kuva 6.** RTK- ja PPK-mittauksen toimintaperiaate (Scout Aerial 2020).

Kartoitusten tarkkuuden parantamiseksi käytetään lisäksi GCP-pisteitä (*Ground Control Points*). Ne ovat selkeästi maastoon merkittyjä pisteitä, joiden tarkat koordinaatit ovat tiedossa. Pisteiden tulee näkyä kuvissa, jolloin ne auttavat ohjelmistoja sitomaan kuvista tarkan ja mahdollisimman todellisuutta kuvaavan mallin. (DroneDeploy 2024)

GCP-pisteiden määrän ja sijoittelun lisäksi fotogrammetrian tarkkuuteen vaikuttaa moni muukin asia. Lentokorkeus vaikuttaa kuvien resoluutioon, sillä mitä korkeammalla lennetään, sitä epätarkempia kuvista tulee. Maaston laadulla on myös merkitystä, sillä esimerkiksi kasvillisuus ja heijastavat pinnat luovat kuviin helposti häiriöitä. Myös todella monimutkainen ja topografisesti vaihteleva maasto voi olla ongelmallinen muodostuvien katvealueiden takia. Fotogrammetriassa voidaan mallintaa vain kuvattuja asioita, joten myös katvealueiden tulee näkyä tarpeeksi useassa kuvassa mallinnuksen onnistumiseksi. Myös kuvien oikea valotus on tärkeää. (Scout Aerial 2021a). Aurinkoinen keli voi aiheuttaa kuviin heijastumia ja lisäksi objektien taakse varjoja. Molemmat voivat aiheuttaa malliin häiriöitä. Siksi ulkona tehty fotogrammetria on järkevää toteuttaa esimerkiksi pilvisellä säällä. Laitteiden jälleenmyyjät ilmoittavat droneen sopivalla laitteistolla tehtävän fotogrammetrian tarkkuudeksi jopa noin 1 cm vaakasuunnassa (x, y) ja noin 2–3 cm pystysuunnassa (z) (Vectornav 2024a).

## 3.2 LiDAR

LiDAR (*Light Detection and Ranging*) eli laserkeilaus on kaukokartoitusmenetelmä, joka hyödyntää valonsäteitä maanpinnan ja objektien sijainnin määrittämiseen. LiDAR perustuu nopeasti ammuttuihin lasersäteisiin, jotka kimpoavat takaisin osuessaan eri pintoihin. Lähettäjä kykenee myös vastaanottamaan kimmonneet säteet ja laskee niiden perusteella pintojen etäisyyden lähettimestä. Usean ammutun laserin ja usean lasketun etäisyyden perusteella kyetään muodostamaan pisteistä kattava korkeusmalli. LiDAR:in toimintaperiaatetta havainnollistetaan kuvassa 7. (Scout Aerial 2020b)

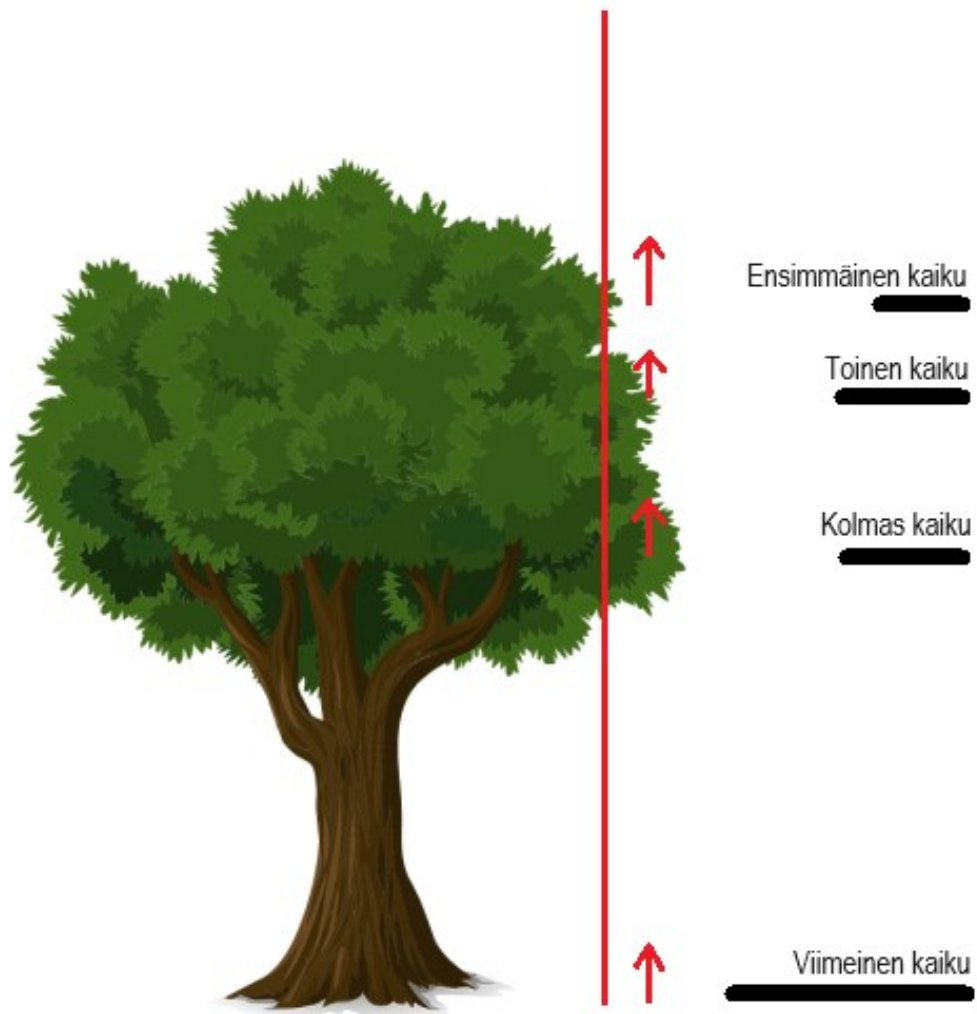


**Kuva 7.** LiDAR-järjestelmän toimintaperiaate (Scout Aerial 2020b).

Ilmasta käsin toimiva LiDAR-järjestelmä koostuu tietyistä peruskomponenteista. Näitä komponentteja ovat laserkeilain, etäisyyden mittausyksikkö sekä ohjaus-, valvonta- ja tallennusyksikkö. Järjestelmän tallennusyksikön toimintaa tukevat differentiaalinen GPS-järjestelmä (DGPS) ja inertian mittausyksikkö (IMU), joiden tehtävänä on tuottaa tarkkaa sijainti ja orientaatio tietoa liikkuvasta systeemistä ja laserin suuntauksesta. Lopullisen pistepilven muodostuminen perustuu DGPS- ja IMU-datan ja tuotettujen laserpisteiden yhdistämiseen, jolloin jokaiselle pisteelle voidaan määrittää tarkat koordinaatit. Ilmasta

toteutettuna menetelmässä lasereille käytetään yleisimmin 1000–1600 nm aallonpituuksia. (Dong & Chen 2018, s. 19)

LiDAR:in suurimpana etuna voidaan pitää sen kykyä läpäistä kasvustoa. Tämä tarkoittaa sitä, että maanpinnan muodot kyetään taltioimaan hyvinkin tiheän kasvuston alta. Kasvuston läpäisyn mahdollistavat useiden ohuiden lasersäteiden määrä, useat tulokulmat ja laserin läpäisyenergia. Lasersäteet kuitenkin tuottavat kaikuja myös kasvustosta ja täten myös kasvusto kyetään mallintamaan. Lasersäteet käyttäytyvät kasvustossa kuvassa 8 esitetyllä tavalla, jossa näkyy kuinka yksi lasersäde voi läpäistä kasvustoa ja antaa useitakin kaikuja. (Dong & Chen 2018, s. 10–12, 20)



**Kuva 8.** Lasersäteen palautuminen kasvustosta.

LiDAR:in toisena merkittävänä etuna pidetään sen riippumattomuutta valaistuksesta. LiDAR-dataa voidaan siis kerätä sekä päivisin valoisalla, että öisin pimeällä. LiDAR-datan keräämistä hankaloittavia tekijöitä ovat sanka sumu, savu, sade ja lumisade. Myös mahdolliset pilvet lasersysteemin ja objektin välissä haittaavat mittauksia. Yhdistävänä

tekijänä näille haittatekijöille ovat ilmassa olevat partikkelit ilmassa, jotka heikentävät lasersäteitä ja aiheuttavat mahdollisesti myös turhia kaikuja. Myös tuuli aiheuttaa haittaa, sillä sen aiheuttama liike kasvustossa ja puustossa vaikeuttaa niiden todenmukaista mallintamista. Kasvuston liike voi myös hankaloittaa maanpinnan muotojen taltiointia. (Dong & Chen 2018, s. 12)

LiDAR mittauksen pääasialliset virheet koostuvat laserista johtuvista virheistä, systeemin sijainti- ja suuntaustiedon virheistä sekä pisteiden suodatusvirheistä. Laserista johtuvat virheet muodostuvat tyypillisesti laserin lähestyessä jyrkkiä korkeuden muutoksia kapeassa kulmassa. Tällaisia virheiden paikkoja ovat esimerkiksi ojien tai rinteiden reunat. Sijainti- ja suuntaustiedon virheitä aiheuttaa systeemin DGPS ja IMU yksiköistä ja niiden lähtötietojen virheistä. Sijainti- ja suuntaustiedon virheet näkyvät koordinaattivirheinä tuotettujen ja ennalta määritettyjen pisteiden välillä. Suodatusvirheitä aiheuttaa muun muassa laserpisteiden epätäydellisessä tai liiallisessa poistossa. Lisäksi virheitä voi tulla vääristä lukemista erilaisilta heijastuspinnoilta kuten vedestä. (Dong & Chen 2018, s. 22)

LiDAR-mittauksen tarkkuuteen vaikuttaa myös lentokorkeus ja lähetettyjen laserimpulssien määrä. Lähetettyjen laserimpulssien määrä vaikuttaa pistepilven tiheyteen ja lentokorkeus puolestaan kasvattaa impulssien hajontaa. Laitteiden jälleenmyyjät ilmoittavat droneen sopivalla laitteistolla tehtävän LiDAR-mittauksen kartoitustarkkuudeksi jopa noin 1 cm vaakasuoraa (x, y) tarkkuutta ja noin 2 cm pystysuoraa (z) tarkkuutta. (Vectornav 2024b)

### 3.3 Geofysikaaliset tutkimusmenetelmät

Geofysikaalisia menetelmiä käytetään esimerkiksi geologisiin kartoitukseen, malmien etsintään, pohjavesikartoituksiin ja muihin geoteknisiin tutkimuksiin. Ilmasta käsin tehtynä menetelmien etuna on esteiden kuten esimerkiksi järvien, jokien ja soiden helppo ylittäminen. Verrattuna miehittyihin lentoihin dronen etuna ovat mittauksen edullisuus, helpokäyttöisyys ja ympäristöystävällisyys. Tällä hetkellä varsinkin magneettisuuteen perustuvia mittauksia pystytään tekemään jo rutiininomaisesti droneilla. Ongelmaksi droneilla muodostuu kuitenkin niiden rajallinen hyötykuorman suuruus. Tämän seurauksena joihinkin mittauksiin on kehitetty menetelmiä, missä vain osa laitteistosta kulkee dronen mukana ja osa on maan pinnalla. (Pirttijärvi et al. 2022)

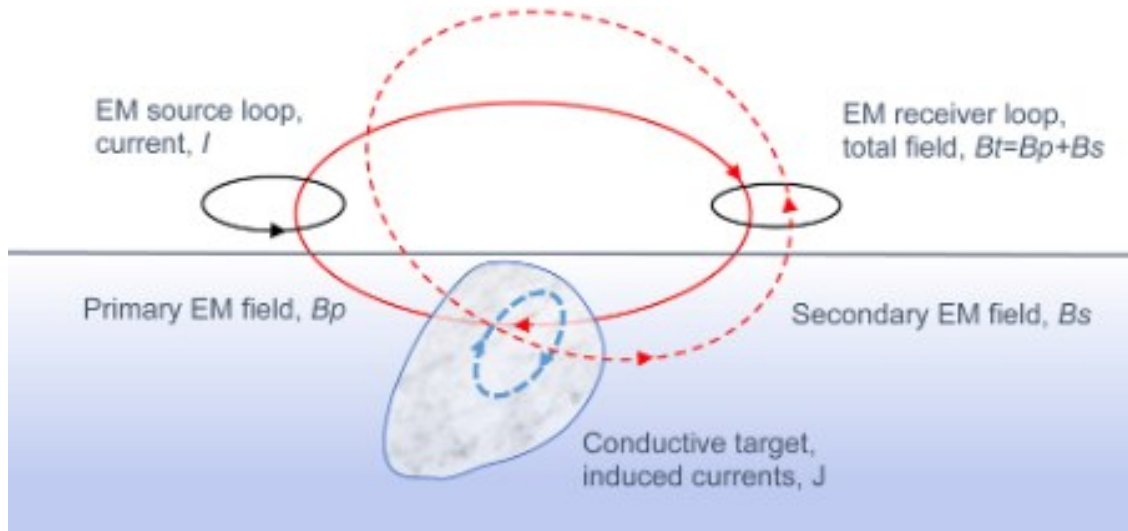
Geofysikaalisiin tutkimuksiin lukeutuvia mittauksia ovat seismiset, magneettiset, gravimetriset, sähköiset ja sähkömagneettiset mittaukset. Näiden mittauksen avulla saadaan tietoa maanalaisen materiaalin rakenteesta ja koostumuksesta epäsuorasti eli rikko-

matta mitattavaa kohdetta. Mittauksissa mitataan fysikaalisten voimakenttien kuten sähköpotentiaalin tai magneettikentän voimakkuuden muutoksia. Voimakentät voivat olla luonnollista alkuperää, kuten esimerkiksi magneetti- ja gravimetrinen kenttä, tai ne voivat olla ihmisen tuottamia esimerkiksi sähkömagneettisista tai seismisistä lähteistä. Muutokset mitatuissa voimakentissä johtuvat maanalaisten materiaalien petrofysikaalisten ominaisuuksien kuten sähkönjohtavuuden, magneettisuuden, tiheyden tai seismisten aaltojen etenemisnopeuksien muutoksista, jotka puolestaan johtuvat maanalaisten mineraalien ja materiaalien sisällön ja rakenteen muutoksista. Voimakenttien muutoksia kartoittamalla on siis mahdollista kartoittaa maan sisällä olevien geologisten materiaalien muutoksia etänä. (Pirttijärvi et al. 2022)

### **3.3.1 Sähkömagneettinen mittaus**

Sähkömagneettiset mittaukset perustuvat mittauslaitteiston luoman sähkömagneettisen kentän ja maaperään indusoituneiden sähkövirtojen muodostamien sähkömagneettikenttien muutosten mittaamiseen. Muutokset johtuvat maaperän petrofysikaalisten ominaisuuksien muutoksista. Näitä ominaisuuksia ovat dielektrinen permittiivisyys, magneettinen permeabiliteetti tai sähkönjohtavuus. Geosuunnittelun kannalta mittauksen hyödyllisiä sovelluksia ovat alustavat tutkimukset maalajien sijainneista ja kerrostumista. Nämä selvitykset onnistuvat tarkastelemalla maaperän petrofysikaalisten ominaisuuksien muutoksia ja niiden rajapintoja maaperässä. (Pirttijärvi et al. 2022)

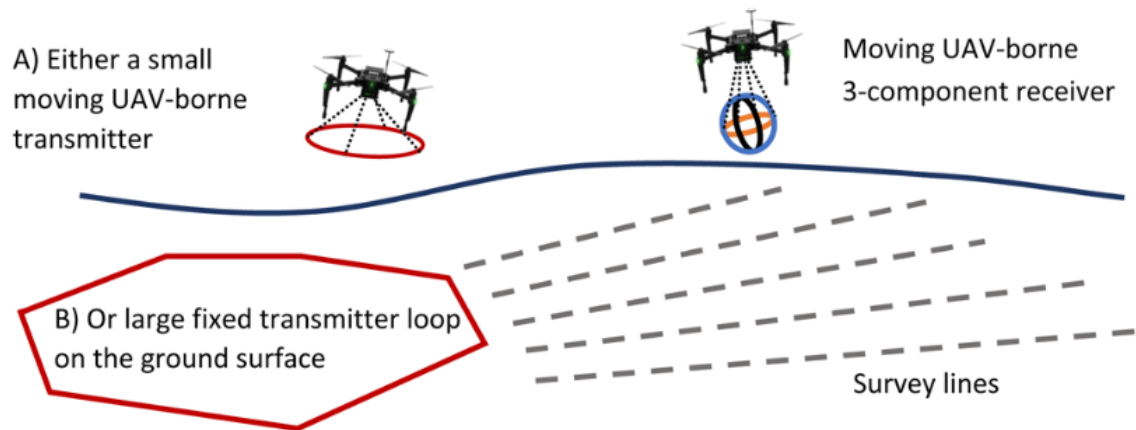
Sähkömagneettisten mittaukset toimintaperiaate on esitetty tarkemmin kuvassa 9. Mittaus lähtee liikkeelle kuvassa vasemmalla näkyvästä sähkömagneettisesta lähteestä, jossa kiertävä sähkövirta luo ympärilleen tumman punaisella näkyvän muuttuvan primäärisen magneettikentän. Syntynyt magneettikenttä indusoi sähkövirran sähkönjohteesseen, joka näkyy kuvassa sinisellä katkoviivalla. Syntynyt sähkövirta taas puolestaan luo ympärilleen oman sekundaarisen magneettikenttensä, joka on merkitty kuvaan punaisella katkoviivalla. Kuvan oikeassa reunassa näkyvä sähkömagneettinen vastaanotin mittaa näiden magneettikenttien muutosta. (Pirttijärvi et al. 2022)



**Kuva 9.** Sähkömagneettisen mittauksen periaate (Pirttijärvi et al. 2022).

Yleisimmin mittauksessa vahvimmat reaktiot saadaan erilaisissa muutoskohdissa esimerkiksi selkeiden maalajimuutosten kohdalla. Tämä johtuu muun muassa siitä, että maalajien muutoskohdissa on yleensä muutoksia vesipitoisuudessa, fyysisessä rakenteessa ja kemiallisessa koostumuksessa. (Jol 2009, s. 187) Johtavassa väliaineessa tapahtuvan sähkömagneettisten kenttien vaimenemisen vuoksi sähkömagneettinen kenttä voi tunkeutua sitä syvemmälle maahan, mitä matalampi taajuus on, kunnes sen amplitudi vaimenee niin paljon, että indusoitujen virtojen sekundäärikenttää ei voida erottaa kohinasta. (Pirttijärvi et al. 2022) Tutkimussyvyyteen vaikuttavat myös maaperän sähköiset ominaisuudet. Mittauksen tutkimussyvyys pienenee huomattavasti varsinkin hyvin sähköä johtavassa maaperässä johtuen signaalin vaimenemisesta. Sähkönjohtavuutta lisää maaperän veden määrä, suolaisuus ja savipitoisuus. Epäedullisimmissa tilanteissa tutkimussyvyys voi olla jopa alle 0,25 m, kun maaperän sähkönjohtavuus on huipputasolla ja lisäksi muut maaperän sähkökemialliset ominaisuudet ovat mittaukselle epäedulliset. Kuivilla ja hiekkaisilla maaperillä tutkimussyvyys on noin 5–30 m, kun niiden savipitoisuus on alle 15 %. (Jol 2009, s. 180–181)

Sähkömagneettinen mittaus voidaan toteuttaa droneilla kahdella eri tavalla, joiden periaate on esitetty kuvassa 10. Ensimmäinen tapa on toteuttaa mittaus kahdella dronella, joista toinen kuljettaa lähetintä ja toinen vastaanotinta. Toinen tapa puolestaan hyödyntää maassa olevaa suurempaa kiinteää lähetintä ja dronella kuljetettavaa vastaanotinta. Tapojen välillä on suuria eroja muun muassa tutkimussyvytydessä ja siinä millaisessa maastossa niitä kannattaa hyödyntää. (Pirttijärvi et al. 2022)



**Kuva 10.** Sähkömagneettinen mittaus dronella (Pirttijärvi et al. 2022).

Suuren ja kiinteään lähetinsilmukan vaikuttavin etu on sen ison pinta-alan kasvattama magneettinen dipolimomentti, joka puolestaan vaikuttaa suoraan tutkimussyvyyteen. Haasteita kiinteälle ja suurelle lähetinsilmukalle on sen sijainnin valinta, sillä sen sijainti suhteessa maanalaisiin johtimiin on suunniteltava huolellisesti. Lisäksi mittaukset on mahdollisesti toistettava käyttäen eri lähettimen sijaintia, jotta tarkasteltava alue voidaan kartoittaa toisesta suunnasta. Kiinteä lähetein ei myöskään sovellu hyvin alustaviin tutkimuksiin, joissa maaperää ei tunneta ollenkaan ja lisäksi sen asentaminen on huomattavasti enemmän aikaa vievää verrattuna dronella liikutettavaan lähettimeen. Dronella liikutettavan lähettimen ja vastaanottimen toteutustavan etuja ovat sen soveltuminen alustaviin tutkimuksiin, sillä toimintatavan käyttöönotto on nopeaa ja lisäksi sillä voidaan helposti väistää mahdollisia maastonesteitä kuten jokia tai soita. Kahden dronen toimintamallissa niiden välistä lentoetäisyyttä säätämällä kyetään vaikuttamaan tutkimussyvyyteen tietyn tutkimusalueen sähkönjohtavuuden ja resistiivisyyden mukaisesti. Huonoja puolia tässä toteutustavassa on kiinteään lähettimeen verrattuna heikompi tutkimussyvyys varsinkin silloin, kun joudutaan toimimaan puiden latvuston yläpuolella. (Pirttijärvi et al. 2022)

Sähkömagneettisen mittauksen tarkkuutta on tutkittu muun muassa maakerrosrajojen sijaintien eroavaisuuksissa sähkömagneettisen mittausten antamien tulosten ja kaivamalla tai porausnäytteillä saatujen todellisten sijaintien välillä. Tarkkuuteen liittyviä mittauksia on tehty aina maanpinnasta yli neljään metriin saakka. Eri tarkasteluissa maakerrosten sijaintien tai paksuuksien virheiden keskiarvot vaihtelivat noin muutamista senttimetreistä lähelle 20 senttimetriä. (Jol 2009, s. 187)

### 3.3.2 Lämpökamerakuvaus

Maaperään ja geosuunnitteluun liittyvää lämpökamerakuvausta käytetään yleisimmin pohjaveteen liittyvissä tutkimuksissa. Pohjavedellä on hyvin tunnistettavissa oleva lämpöjälki, sillä sen lämpötila säilyy suhteellisen vakiona ympäri vuoden verrattuna pintaveden tai maanpintoihin, joiden lämpötila vaihtelee vuorokausi- ja vuodenaikavaihteluiden mukaan. Korkeammilla leveysasteilla pohjaveden lämpötila on suhteellisen viileä verrattuna ilman lämpötilaan kesällä ja suhteellisen lämmin talvella. Viime aikoina on noussut uutta kiinnostusta lämpökamerakuvien hyödyntämiseen hydrologisessa tutkimuksessa. Tämä johtuu lämpötilaan liittyvän ymmärryksen lisääntymisestä ekohydrologiassa ja edullisten lämpötilamittauslaitteiden kehittymisestä. (Mundy et al. 2017 s. 160)

Viimeaikaisissa tutkimuksissa on keskitytty käyttämään lämpökuvia pohjaveden lähteiden havaitsemiseen ja suotautumiskohtien laadulliseen kuvaamiseen. On tutkittu esimerkiksi lämpökamerakuvien käyttöä vaihtelevasti vedestä kyllästyneiden alueiden sijainnin ja yhteyksien tunnistamiseen haastavassa rinteiden ja purojen muodostamassa systeemissä. Eräässä tutkimuksessa osoitettiin myös, että lämpökamerakuvia voidaan käyttää puropenkereen suotautumiskohdan pohjavedenpinnan sijainnin paikantamiseen. Samassa tutkimuksessa huomattiin myös, että lämpökamerakuvista kyetään erottamaan eri voimakkuuksisia pohjaveden purkautumisalueita suotautumiskohdan rajalla. Lisäksi eräässä tutkimuksessa havaittiin, että lämpökamerakuvista saadaan tarkempaa tietoa eroavaisuuksista erilaisten pohjaveden purkautumistapojen välillä, mikä osoittaa, että pohjaveden virtaus on epäyhtenäisempää ja heterogeenisempää kuin yleisesti mallinnetaan. (Mundy et al. 2017 s. 160–161)

Lämpökameroiden toiminta perustuu niiden havaitsemaan infrapunasäteilyyn, jota kaikki objektit lähettävät, jos niiden lämpötila on yli absoluuttisen nollapisteen. Tätä säteilyä voidaan kutsua myös lämpösäteilyksi. (Gade & Moeslund 2014, s. 245) Yleensä lämpökameroissa korkeamman lämpötilan kohteet, jotka säteilevät eniten lämpösäteilyä, näkyvät muusta maastosta poikkeavalla värillä. Yleisiä väriyhdistelmiä lämpökameroissa ovat väriskaala mustasta valkoiseen tai sinisestä ja punaiseen, jossa kylmimmät kohteet näkyvät sinisellä ja kuumimmat kohteet punaisella.

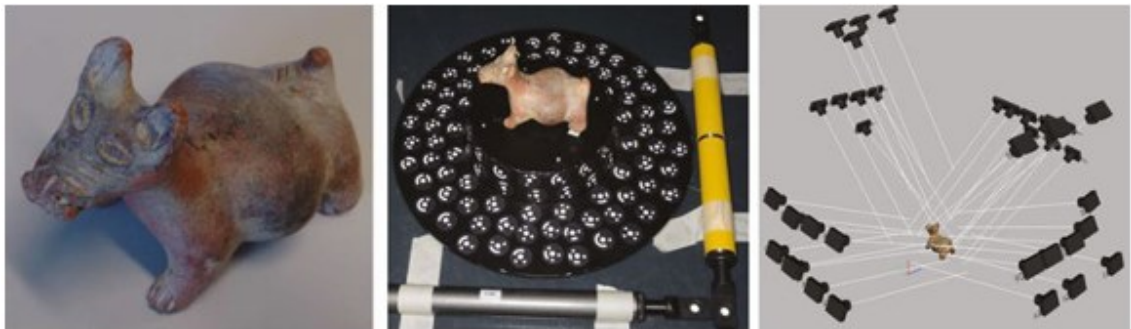
Droneilla toimiessa lämpökamerakuvaus toimii hyvin yksinkertaisesti. Riittää, että droneen asennetaan lämpökamera ja kohteesta otetaan kuvia lämpökameralla. Tässä mitaustavassa on siis vain tärkeää saada haluttu alue näkymään kuvassa, jotta aluetta voidaan analysoida sen lähettämän lämpösäteilyn perusteella. On kuitenkin tärkeää ottaa huomioon mihin vuorokauden aikaan kuvaus tehdään, sillä auringon lämmittävällä vaikutuksella voi olla vaikutusta lopputulokseen.

## 4. DATASTA TUOTETTAVAT AINEISTOT

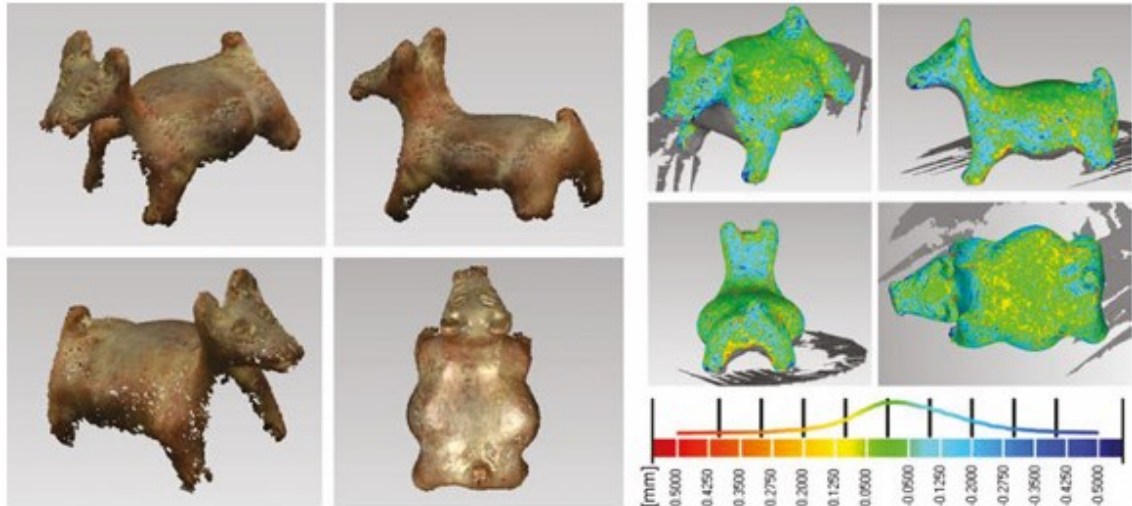
Dronejen keräämä data voidaan esittää monipuolisesti eri aineistotyylejä hyödyntäen, mikä mahdollistaa havaintojen tarkemman analyysin ja ymmärtämisen. Esimerkiksi visuaaliset aineistot, kuten valokuvat, tarjoavat havainnollisen kuvan kohteesta, mikä auttaa visuaalisten muutosten havaitsemisessa ajan kuluessa. Lisäksi aineistot kuten lämpökartat ja korkeusmallit tarjoavat tarkempaa kvantitatiivista tietoa, jonka avulla voidaan tehdä analyysejä esimerkiksi lämpötilan vaihteluista tai maaston korkeuseroista.

### 4.1 3D-mallit

Fotogrammetrian avulla voidaan muodostaa kolmiulotteisia malleja tarkasteltavista kohteista. Tämä teknologia on tullut entistä tärkeämmäksi rakennusteollisuudessa sen tuottamien tarkkojen ja kattavien tietojen vuoksi. Kuvassa 11 on esitetty esimerkkikohte, josta muodostetaan 3D-malli fotogrammetrian avulla. Kuvasta nähdään vasemmalta edeten kuvattava kohde, lähtöasetelma ja havainnollistava kuva kuvien ottamisesta. Kuvassa 12 on esitetty lopputulos esimerkkikohteen 3D-mallista.



**Kuva 11.** Testikohteen mallinnustilanne (Luhmann et al. 2020, s. 536).



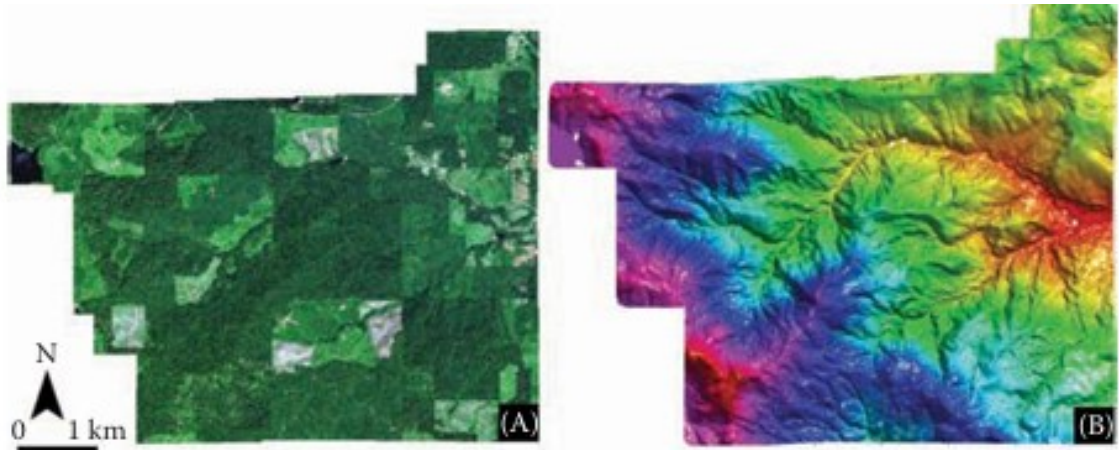
**Kuva 12.** Fotogrammetrialla muodostettu 3D-malli (vasen) ja mittauksen datapistteet (oikea) (Luhmann et al. 2020, s. 537).

Kuvissa 11 ja 12 esitetty malli on muodostettu yksittäisestä ja pienestä objektista, mutta suuremmalla skaalalla toteutettuna 3D-mallit ovat hyödyllisiä myös rakennushankkeissa. Tällöin mallinnettuja kohteita tai alueita kyetään tarkastelemaan helpommin eri suunnista, mikä auttaa merkittävästi suunnittelussa.

## 4.2 Korkeusmallit

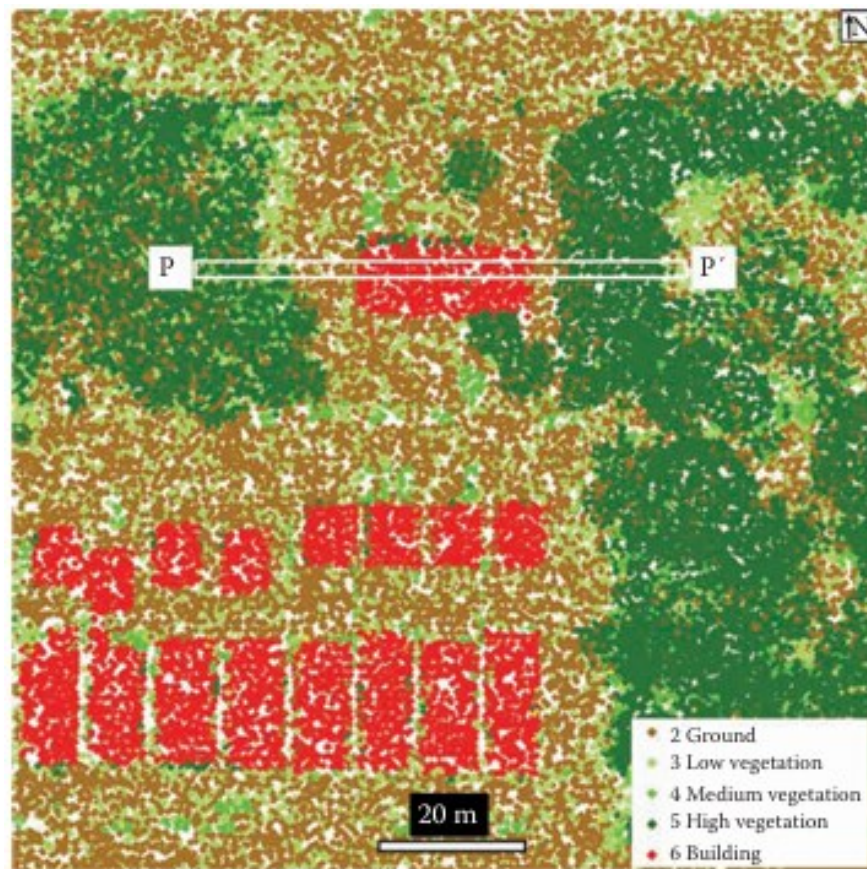
Korkeusmalleja muodostetaan pääasiassa LiDAR:illa ja niiden yleisin esitysmuoto on digitaalinen korkeusmalli (DEM). DEM mallien yleisimpiä tuotteita ovat puolestaan digitaalinen maastomalli (DTM) ja digitaalinen pintamalli (DSM). Digitaalinen maastomalli ja digitaalinen pintamalli eroavat toisistaan siinä, mitä niissä näytetään skannatusta alueesta. Digitaalisessa maastomallissa näkyy vain alueen maastonmuodot, kun taas digitaalisessa pintamallissa näkyy maastonmuotojen lisäksi esimerkiksi puustoa ja rakennuksia. (Dong & Chen 2018, s. 49)

LiDAR:illa muodostettujen mallien pisteet jaotellaan yleensä värikoodeilla niiden korkeusaseman mukaan, mikä helpottaa korkeuserojen hahmottamista. Alla olevassa kuvassa 13 on esitetty laajamittainen digitaalinen maastomalli, jonka muodostamiseksi alkuperäisestä mittauspisteaineistosta on poistettu kasvuston ja rakennuksien tuomat kaiut, jolloin malliin jää vain kuvaus maanpinnasta.

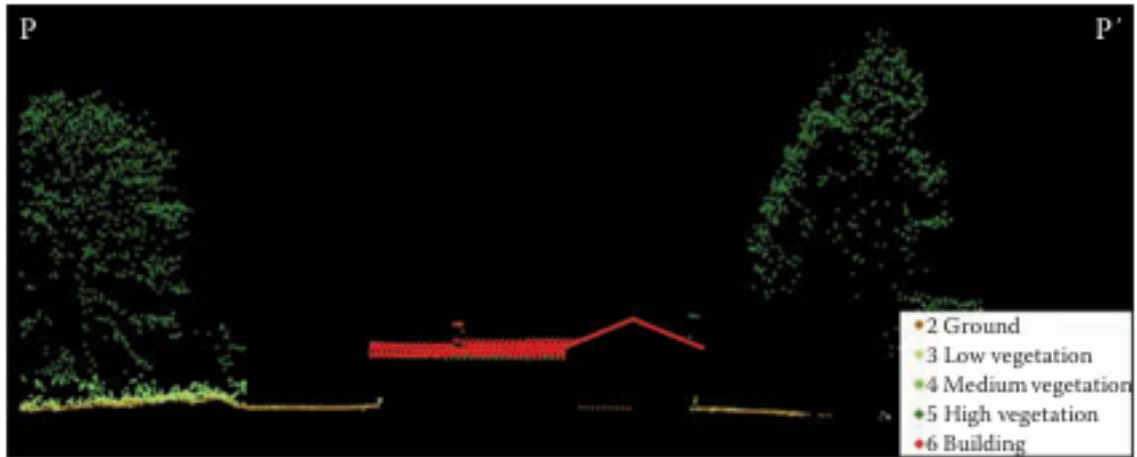


**Kuva 13.** Alueen ilmakuvat (vasen) ja LiDAR:illa muodostettu digitaalinen maastomalli (oikea) (Dong & Chen 2018, s. 12).

Korkeusmalleissa värijaottelua voidaan käyttää myös pisteiden jaotteluun kaiun antaneiden objektien mukaan. Kuvassa 14 on esitetty eräs LiDAR-aineisto, johon on tehty väriluokittelu. Joskus voi olla myös hyödyllistä tarkastella digitaalisia korkeusmalleja leikkauksien avulla. Kuvaan 14 on lisäksi merkitty poikkileikkaus, jota tarkastellaan kuvassa 15.



**Kuva 14.** Väriluokiteltu LiDAR-aineisto (Dong & Chen 2018, s. 47).



**Kuva 15.** *P– P' poikkileikkaus kuvasta 14 (Dong & Chen 2018, s. 47).*

Myös fotogrammetrialla voidaan muodostaa digitaalisia korkeusmalleja. Fotogrammetrialla muodostetut korkeusmallit ovat kuitenkin epäkäytännöllisiä kasvuston kohdalla, sillä fotogrammetrisesti kerätyt datapisteet eivät läpäise kasvustoa, jolloin maanpinnan taltiointi tiheän kasvuston alta ei onnistu. Tästä esimerkkinä kuvassa 16 esitetty poikkileikkaus fotogrammetrialla muodostetusta digitaalisesta maastomallista. (Luhmann et al. 2020, s. 707)



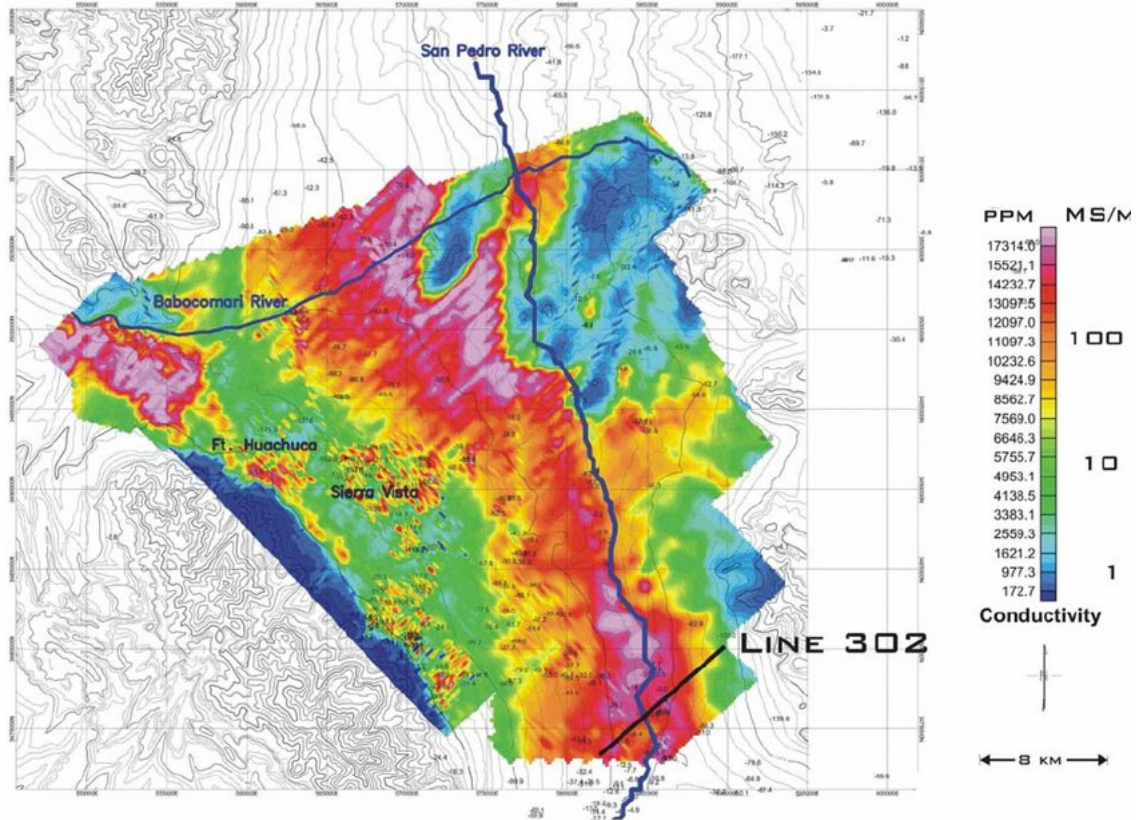
**Kuva 16.** *Poikkileikkaus fotogrammetrialla muodostetusta digitaalisesta maastomallista, jossa näkyy myös kasvusto (Luhmann et al. 2020, s. 707).*

Jotta fotogrammetrialla muodostetuista digitaalisista maastomalleista kuten kuvan 16 maastomallista saataisiin käyttökelpoisia, tulee niistä poistaa kasvusto. Tämä tapahtuu poistamalla pisteet kasvustojen kohdalta, jonka jälkeen poistettujen alueiden maanpinnan korko interpoloidaan ympäröivän maaston avulla. (Luhmann et al. 2020, s. 708)

### 4.3 Kartat

Mittaustulosten esittäminen karttamuodossa on yleensä kätevää käsitellessä suurempia alueita. Karttamuotoisissa aineistoissa suurin hyöty on kuitenkin helppo tiedon paikkaan sitominen. Karttamuotoisista aineistoista on myös helppo tehdä alueellisia päätelmiä riip-

puen kartassa esitetyistä tiedoista. Kuvassa 17 on esitetty sähkömagneettisella mittauksella tehty sähkönjohtavuuskartta. Kartassa on kuvattu erään laakson maaperän sähkönjohtavuutta ja pyritty paikantamaan laakson pohjavesialueet. Kuvassa parhaiten sähköä johtavat alueet on merkitty lämpimillä väreillä noudattaen kuvan oikeassa reunassa näkyvää asteikkoa.



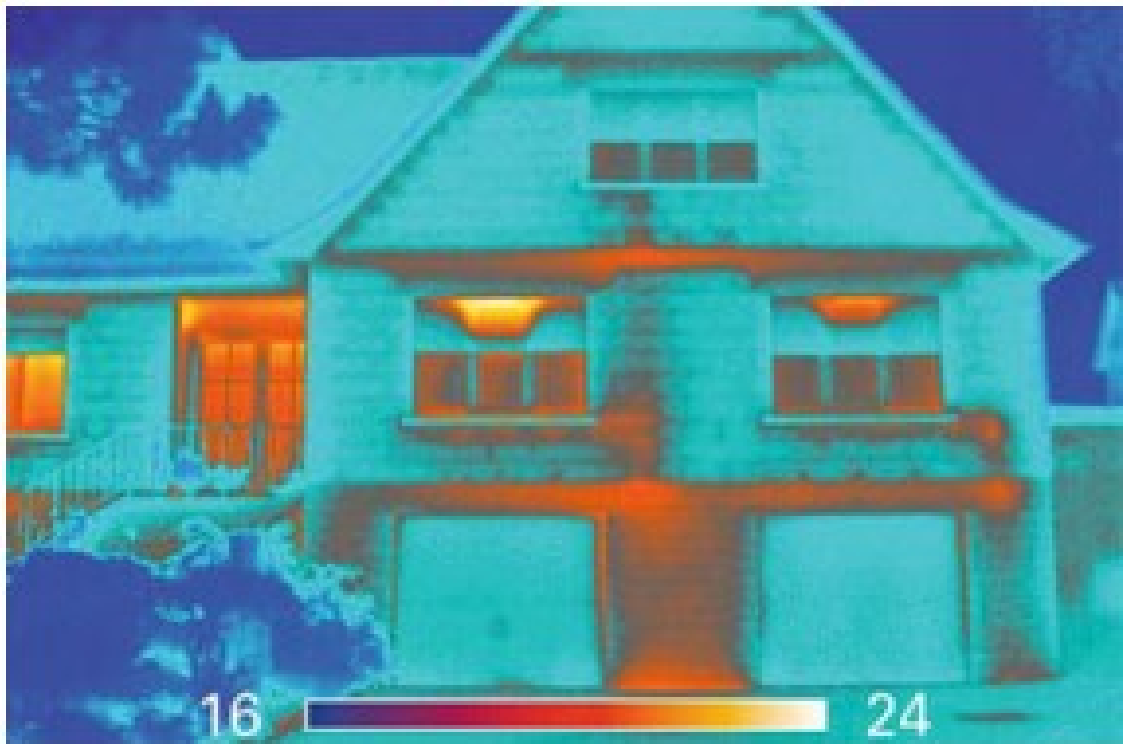
**Kuva 17.** Ilmasta tehdyn sähkömagneettisen mittauksen sähkönjohtavuuskartta San Pedron laaksosta (Wynn 2002, s. 8).

Karttamuotoisiin aineistoihin voidaan liittää lukuisia eri tietoja. Karttamuotoisia aineistoja muodostetaan usein muun muassa mineraalikartoituksista tai muista geofysikaalisilla menetelmillä tehdyistä tutkimuksista. Karttamuotoisia aineistoja voidaan tuottaa myös esimerkiksi lämpökameralla saaduista tiedoista, jolloin pystytään tarkastella suuremman alueen lämpötilan vaihtelua.

#### 4.4 Kuvat

Kuvamuotoisia aineistoja voidaan tuottaa sekä normaaleilla kameroilla tai lämpökameroilla. Kuvamuotoisia aineistoja käytetään varsinkin lämpökameralla toimiessa. Kuvassa 18 on esitetty esimerkki lämpökamerakuvasta. Kuvassa tarkastellaan talon lämpöhä-

viötä ja voidaan selkeästi havaita niiden olevan suurimmillaan ovien ja ikkunoiden ympärillä. Kuvan alareunassa annettu lämpötilan väriskaala auttaa myös kuvan hahmottamisessa.

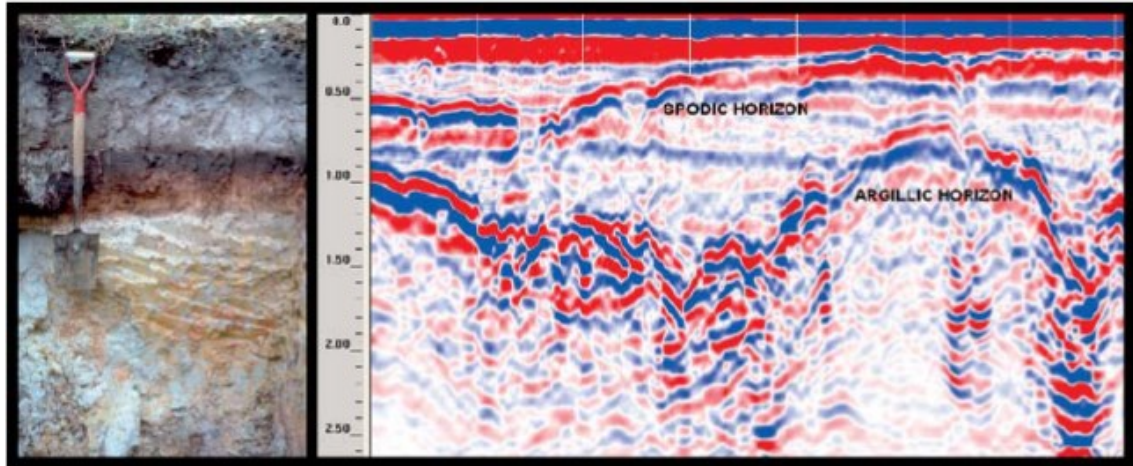


**Kuva 18.** Lämpökamerakuva talon julkisivusta (Gade & Moeslund 2014, s. 251).

Droneilla tuotettuja normaaleja ilmakuvia käytetään rakentamisessa esimerkiksi työvaiheiden seurantaan. Suurilta työmailta voidaan ottaa kuvia tietyin väliajoin, jolloin esimerkiksi tilaaja voi seurata työmaan etenemistä käymättä paikan päällä. Normaaleja ilmakuvia voidaan käyttää laajalti myös muihin tarkoituksiin esimerkiksi pohjana erilaisille työmaasuunnitelmille tai piirustuksille.

#### 4.5 Poikkileikkausprofiilit

Poikkileikkausprofiilit ovat tapa mallintaa syvyys suunnassa muuttuvia ominaisuuksia kuten esimerkiksi sähkömagneettisten mittausten tuloksia. Sähkömagneettisten mittausten poikkileikkausprofiileista voidaan tarkastella esimerkiksi kerroksellisuutta. Kuvassa 19 on esitetty esimerkki sähkömagneettisen mittauksen profiilimuotoisesta esityksestä.



**Kuva 19.** Poikkileikkausprofiili sähkömagneettisesta mittauksesta ja kuva maaleikkauksesta (Jol 2009, s.188).

Poikkileikkausprofiileja voidaan muodostaa myös erilaisten pistepilvien, kuten luvussa 4.2 esitettyjen korkeusmallien leikkauksista. Poikkileikkausprofiilien suurimpana etuna voidaan pitää sitä, että niillä päästään tarkastelemaan mainittuja kohteita eri näkökulmasta, mikä tarjoaa mainituissa käyttökohteissa lisäinformaatiota syvyysuunnassa.

## 5. DRONELLA SAATAVAT LÄHTÖTIEDOT GEO-SUUNNITTELUUN

Geoteknisissä tutkimuksissa on tuotettava riittävästi tietoja rakennuspaikan ja sen ympäristön pohja- ja pohjavesiolosuhteista, jotta saadaan kokonaisvaltainen kuva oleellisista maapohjan ominaisuuksista ja voidaan luotettavasti arvioida mitoituslaskelmissa käytettävien maaparametrien ominaisarvoja ja niiden vaihtelua. Geoteknisen tiedon huolellinen kerääminen, tallentaminen ja tulkinta tulee tehdä aina. Kerättäviin tietoihin kuuluu esimerkiksi tiedot paikan geologiasta, morfologiasta, seismisyydestä, hydrologiasta ja historiasta. (RIL207-2017, s. 69–70)

Pohjatutkimuksissa selvittävät lähtötiedot ovat eri hankkeiden välillä hyvin samankaltaisia, mutta vaihtelevat kuitenkin laajuuden ja vaaditun tarkkuuden mukaan (TPO-83 1983, s. 23; KUPO-92 1992, s. 10). Taulukossa 2 on esitetty muutamissa erilaisissa hanketyypeissä selvittettäviä pohjatutkimustietoja jaoteltuna rakennuskohteen ja rakennuskohteen maaperän mukaan.

**Taulukko 2.** Pohjatutkimuksissa selvittävät seikat eri hankkeissa (muokattu lähteistä TPO-83 1983, s. 23; KUPO-92 1992, s. 10).

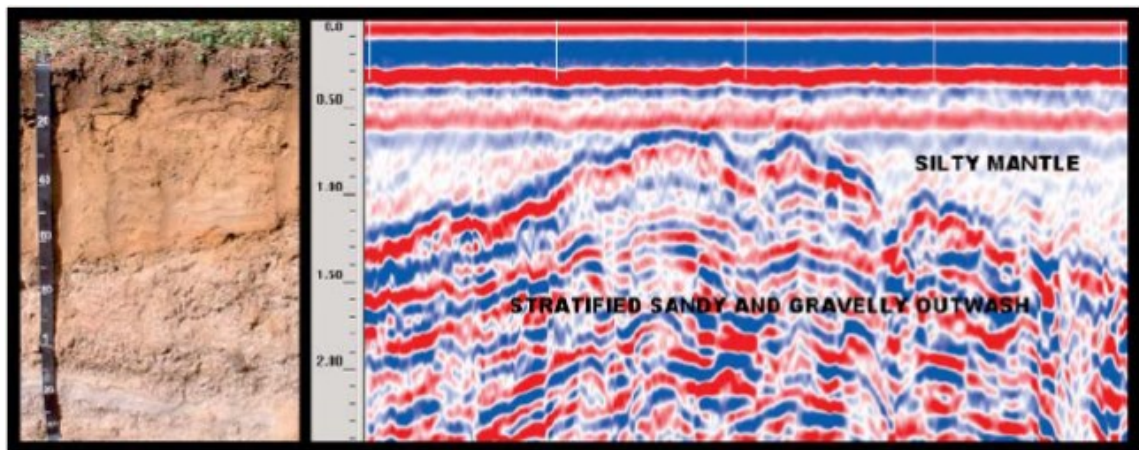
Selvitettävä asia	Rakennukset			Putkijohtolinjat			Kadut		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Maalajit	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Kerrosrajat	●	●	●	●	◐	○	●	●	●
Humus/turvekerr. paksuus	●	●	●	●	○	○	●	●	●
Kuivakuorikerr. paksuus	●			●			●		
Pohjaveden pinta	●	●	◐	●	●		●	●	◐
Maakerrosten tiiviys	●	●	●	●	●	◐	●	●	◐
Maakerr. kokoonpurist.om.	●	◐	◐	●			●		
Maakerr. lujuusomin.	●	●	◐	●	○		●	◐	
Maakerr. routivuus	●	●	●	◐	◐	◐	●	●	●
Maakerr. vedenläpäisevyys	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	
Kallion pinnan sijainti	◐	◐	●	◐	◐	◐	◐	◐	●
Kallion laatu	◐	◐	◐						◐
I	Hienorakenteisten ja eloperäisten maakerrosten alue (savi, siltti, lieju, turve)								
II	Karkearakenteisten maakerrosten alue (hiekkä, sora, moreeni)								
III	Kallioinen alue, kallion pinta lähellä perustamissyvyyttä								
●	Selvitys aina tarpeen								
◐	Selvitys joskus tarpeen								
○	Likimääräinen selvitys								

Nykyään tarvitaan paljon myös mallinnukseen liittyviä lähtötietoja. Lähtötietoja tarvitaan erilaisten tieto- ja suunnittelumallien rakentamista varten. Tällaisia tietoja ovat esimerkiksi maanpinnan korkeusasema sekä tiedot alueella olevista rakenteista kuten rakennuksista ja kulkureiteistä. Suunnittelualueesta pyritään siis saamaan mahdollisimman todenmukainen kuva suunnittelutyötä varten.

Geoteknisen tutkimusten sisältö ja määrä tulee lisäksi sovittaa tiettyyn suunnittelun vaiheeseen ja geotekniseen luokkaan. Geotekniset luokat GL1, GL2 ja GL3 ovat suunnittelutehtävien vaativuusluokkia ja tarkoittavat järjestyksessä tavanomaista, vaativaa ja poikkeuksellisen vaativaa suunnittelutehtävää. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että kaikki suunnittelutehtävät eivät vaadi yhtä laajoja ja perinpohjaisia tutkimuksia, minkä takia alustava geotekninen luokka valitaan jo ennen maaperätutkimuksia. (RIL207-2017, s. 32, 71)

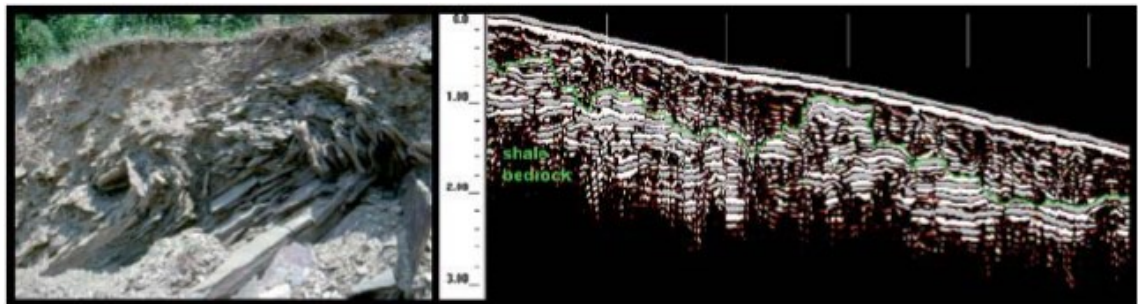
## 5.1 Alustavat maaperätutkimukset

Alustavia maaperätutkimuksia voidaan käyttää esimerkiksi rakennuspaikan yleisen sopevuuden arviointiin, vaihtoehtoisten sijoituspaikkojen vertailemiseen, suunniteltujen töiden aiheuttamien muutosten arviointiin ja mahdollisten maanottoalueiden selvittämiseen (RIL207-2017, s. 72). Droneilla tehtävillä sähkömagneettisilla mittauksilla voidaan tehdä suuntaa antavia arvioita alueen maalajeista, kerrosrajoista ja kallioperän sijainnista (Jol 2009, s.187–190). Kuvissa 20 ja 21 on esitetty esimerkit sähkömagneettisten mittausten poikkileikkausprofiileista. Kuvien 20 ja 21 sähkömagneettiset mittaukset eivät ole droneilla tehtyjä, mutta ne edustavat kuitenkin sähkömagneettisilla mittauksilla saatavaa dataa.



**Kuva 20.** Oikealla poikkileikkausprofiili sähkömagneettisesta mittauksesta ja vasemmalla kuva maaleikkauksesta (Jol 2009, s.189).

Kuvasta 20 nähdään, miten maakerrosrajat erottuvat sähkömagneettisissa mittauksissa. Kyseisestä kuvasta nähdään selkeästi silttisen pintakerrostuman ja syvemmällä olevan kerrostuneen hiekkaisen ja soraisen huuhtoutuman vaihdos. Alustavia arvioita maalajeista voidaan tehdä saatujen tulosten perusteella. Esimerkiksi veden virtauksen lajittelemat maalajit tunnistetaan mittaustuloksista selkeinä vaakasuuntaisina muotoina, jotka viittaavat kerroksellisuuteen. Moreenit tunnistetaan mittaustuloksista epämääräisistä muodoista ja runsaista pistemäisistä anomaliaista, joita syntyy kivistä ja lohkarista. Myös kerroksellisuuden puuttuminen viittaa moreeneihin. Homogeeniset maakerrokset, kuten kuvan 20 silttikerros, näkyvät tuloksissa hyvin vähäisinä anomaliaina. (Jol 2009, s.189) Myös maaperän sähkönjohtavuuden arvot voivat auttaa maalajarvioiden tekemisessä, sillä korkeampi vesipitoisuus maalajissa johtaa korkeampiin sähkönjohtavuuden arvoihin.



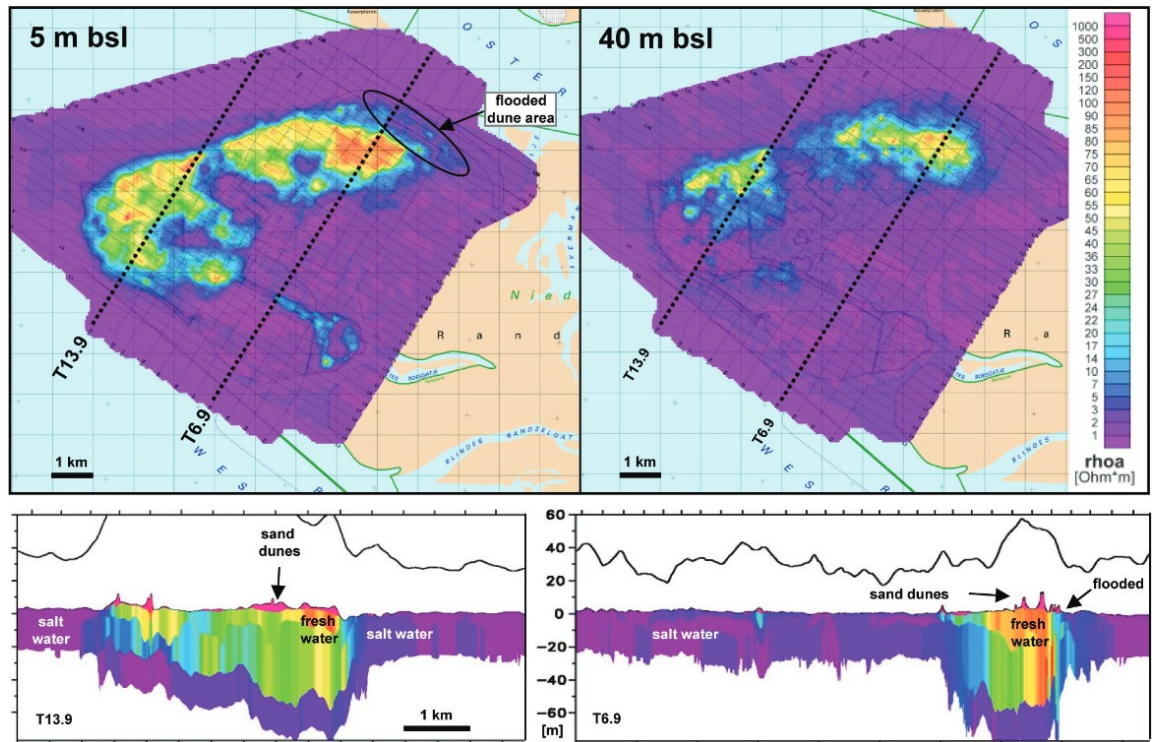
**Kuva 21.** Poikkileikkausprofiili sähkömagneettisesta mittauksesta ja kuva maaleikkauksesta (Jol 2009, s.190).

Kuvassa 21 on esitetty samankaltainen sähkömagneettisesta mittauksesta saatu poikkileikkausprofiili. Tässä kuvassa tarkastellaan kuitenkin liuskeisen kallion pinnan sijaintia, mikä on merkitty kuvaan vihreällä korostuksella. Kallion pinnan sijainnin tutkiminen sähkömagneettisilla mittauksilla on nopeampaa varsinkin alueilla, joissa maaperän kivisyys ja epäsäännöllinen tai rapautunut kallioperä tuottavat ongelmia perinteisille menetelmille. Sähkömagneettisia mittauksia voidaan käyttää muun muassa myös kallion laadun muutosten, kallion ruhjevyyhykkeiden ja kallion onkaloiden tutkimiseen. (Jol 2009, s.189)

## 5.2 Pohjavesitutkimukset

Droneilla tehtävät sähkömagneettiset mittaukset soveltuvat pohjavesitutkimuksiin, sillä mittaamalla maaperän sähkönjohtavuutta voidaan selvittää sekä pohjaveden pinnan taso, että pohjavesialueiden rajat. Tämä perustuu aiemmin luvussa 3.3.1 todettuun faktaan, minkä mukaan vesi kasvattaa maa-aineksen sähkönjohtavuutta. Myös lämpökamerakuvauksesta voi olla hyötyä erilaisissa tutkimustilanteissa liittyen pohjaveden käyttäytymiseen.

Hyvä esimerkki ilmasta käsin tehdystä sähkömagneettisesta pohjavesitutkimuksesta on eräältä saarelta Saksasta, missä tutkittiin monimutkaisesta meriveden ja makean veden sekaista pohjavesialuetta. Tämän tutkimuksen sähkömagneettisen mittauksen tuloksia on esitetty kuvassa 22. Tutkimus tehtiin helikopteripohjaisella mittaustulotteistolla, joka on toimintaperiaatteeltaan hyvin samankaltainen työssä esitellyn kahden dronen ratkaisun kanssa. Kuvassa 22 näkyvissä mittaustuloksissa on käytetty sähköjohtavuuden mittaamiseen sen käänteisarvoa eli resistiivisyyttä. (Siemon et al. 2009, s. 629–639)



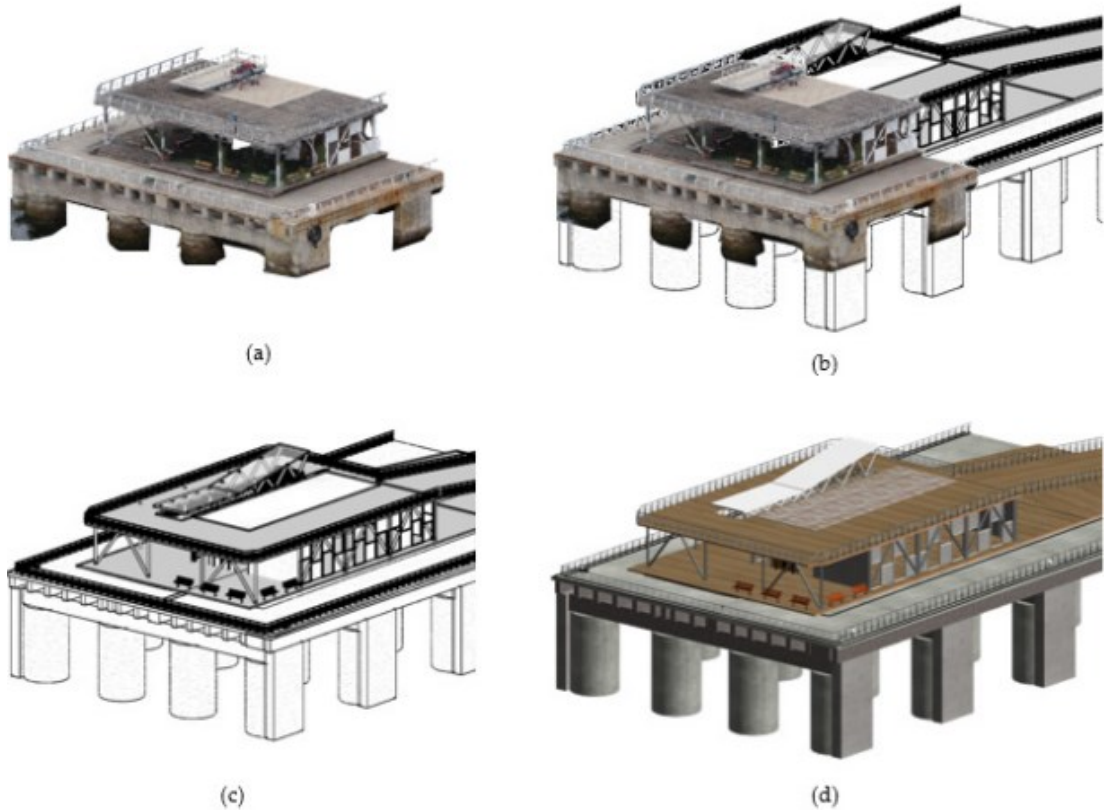
**Kuva 22.** Resistiivisyyskartat kahdelta eri syvyydeltä (yläpuoli) sekä linjojen T13.9 ja T6.9 poikkileikkaukset (alapuoli) (Siemon et al. 2009, s. 638).

Tutkimuksessa meriveden ja makean veden alueet kyetään määrittämään tarkasti, sillä näiden vesien sähköjohtavuudessa on eroja. Makealla vedellä sähköjohtavuus on alle 180 mS/m ja sen resistiivisyys on suurempi kuin 5.6  $\Omega\text{m}$ . Meriveden sähköjohtavuus on suurempi kuin makealla vedellä ja resistiivisyys pienempi kuin makealla vedellä. Meriveden sähköjohtavuusominaisuudet vaihtelevat sen suolapitoisuuden mukaan. Meriveden suolapitoisuus kasvattaa sen kykyä johtaa sähköä. Tulee kuitenkin ottaa huomioon, että kyseessä on vedellä kyllästyneiden maa-ainesten mittausta. Kyseisellä alueella makealla vedellä kyllästyneiden maamassojen resistiivisyyden tulee olla yli 22.2  $\Omega\text{m}$ . Makean pohjaveden alueet näkyvätkin kuvassa 22 siis turkoosilla ja siitä lämpimämmillä sävyillä. (Siemon et al. 2009, s. 638)

Pohjaveden käyttäytymistä ja suotautumista voidaan tutkia myös droneen kiinnitettävien lämpökamerojen avulla. Lämpökameran käyttö soveltuu esimerkiksi kallioseinämien tutkimiseen, missä talvella lämpökuvista voidaan tunnistaa aktiivisen pohjaveden virtauksen ja jään kasvun alueet. Kesällä pohjaveden virtauksista voidaan erottaa myös suotautumisnopeudet. Lämpökuvien käyttöä rajoittavat kuitenkin erilaiset tekijät, kuten säteilyn ja lämpötilan vuorokausivaihtelut sekä kalliopinnan heterogeenisuus. (Mundy et al. 2017 s. 160) Muita vastaavia sovellusmahdollisuuksia ovat esimerkiksi kaivannot. Kaivannoista voidaan tutkia esimerkiksi pohjaveden mahdollista suotautumista kaivannon pohjalle.

### **5.3 Mallintaminen**

Fotogrammetria on yksi keskeisistä tekniikoista, joka mahdollistaa 3D-mallien muodostamisen valokuvista. Kun drone lentää tietyn alueen yli ja ottaa kuvia eri kulmista, näistä kuvista voidaan muodostaa tarkkoja kolmiulotteisia malleja. Tarkemmin fotogrammetriaa on käyty läpi luvussa 3.1. Fotogrammetrialla voidaan tuottaa tietomalleihin esimerkiksi suunnittelualueen rakennusten ja katujen tarkat sijainnit ja ulkomuodot (Luhmann et al. 2020, s. 706). Kuvassa 23 on esitetty prosessi erään rakenteen tuonnista rakennustietomalliksi. Prosessi lähtee liikkeelle rakenteesta fotogrammetrialla muodostetusta kolmiulotteisesta pistepilvestä, jonka pohjalta tehdään CAD-piirustukset. Myöhemmin CAD-piirustusten pohjalta voidaan muodostaa lopullinen rakennustietomalli. (Jofré-Briceño et al. 2021, s. 13–14)



**Kuva 23.** Fotogrammetrian avulla luotu rakennustietomalli. (a) Fotogrammetrialla muodostettu 3D-pistepilvi, (b) CAD-piirustusten muodostaminen pistepilven avulla, (c) valmis CAD-piirustus ja (d) Valmis rakennustietomalli. (Jofré-Briceño et al. 2021, s. 14)

Esimerkin kohde on rakenteellisilta tiedoiltaan hyvin monimutkainen, mutta kaikissa hankkeissa rakennuksia tai rakenteita ei välttämättä tarvitse mallintaa samalla tarkkuudella. Esimerkiksi väylähankkeisiin voi riittää vain rakennusten tarkat sijainnit ja ulkomuodot, jotta niiden ympärille voidaan suunnitella väyliä.

Toinen tärkeä tekniikka dronella kerättyjen suunnittelutietojen hyödyntämisessä on LiDAR. LiDAR käyttää lasersäteitä mittaamaan etäisyyksiä ja luo erittäin tarkkoja pintamalleja. Tarkemmin sen toimintaa on käsitelty luvussa 3.2. LiDAR-datan avulla voidaan luoda tarkkoja digitaalisia maasto- ja pintamalleja, joita esiteltiin tarkemmin jo luvussa 4.2. LiDAR-tiedot ovat erityisen hyödyllisiä suunnittelussa, sillä sen tarjoamia digitaalisia maasto- ja pintamalleja voidaan käyttää pohjina tietomallien rakentamisessa (Queiroz et al. 2023, s. 1–4).

Ilmakuvilla on myös merkittävä rooli suunnittelumallien rakentamisessa. Ilmakuvista voidaan saada visuaalista tietoa alueen yleisestä koostumuksesta, rakennusten sijainnista, koosta ja vesistöistä sekä kasvillisuudesta. Kun ilmakuvien antamaa informaatiota yhdistetään fotogrammetria- ja LiDAR-datan kanssa, saadaan kokonaisvaltainen kuva alueesta.

## 6. YHTEENVETO

Dronejen käytön ansiosta laajojen alueiden kartoitus on nopeaa ja hankalakuiset paikat kuten esimerkiksi joet, suot ja jyrkät maastonmuodot eivät haittaa tutkimuksia. Dronejen käyttö on usein myös edullisempaa aikaisempiin menetelmiin verrattuna. Droneen yhdistetty teknologia mahdollistaa samanaikaisen paikkatiedon liittämisen kerättyyn aineistoon. Lisäksi dronejen autonomiset lentotoiminnot ja ohjelmoitavat lentoreitit kerääminen helpottavat mittauksen suorittamista sekä vähentävät inhimillisiä virheitä. Dronejen heikkouksia ovat niiden alttius sääilmiöille kuten sateelle, tuulelle ja pakkaselle. Myös monet mittausmenetelmät ovat alttiita sääilmiöiden tuomille haitoille. Lisäksi dronejen rajallinen hyötykuorman suuruus vaikuttaa oleellisesti siihen, millaista lisälaitteistoa droneilla käytetään hyödyntämään.

Taulukkoon 3 on koottu dronella saatavat geoteknisen suunnittelun lähtötiedot, selvitystapa ja selvityksen taso. Selvitettävät lähtötiedot on jaettu karkeasti kahteen osaan; tutkimuksiin ja mallinnukseen liittyviin lähtötietoihin.

**Taulukko 3.** Yhteenvetotaulukko dronella selvitettävistä geoteknisistä lähtötiedoista.

Droneilla selvitettävät lähtötiedot	Selvitystapa	Selvityksen taso
Tutkimustiedot		
Maalajit	Sähkömagneettinen mittaus	○
Kerrosrajat	Sähkömagneettinen mittaus	◐
Kerrosaksuudet	Sähkömagneettinen mittaus	◐
Pohjavesialueiden rajat	Sähkömagneettinen mittaus	◐
Pohjaveden korkeus	Sähkömagneettinen mittaus	◐
Pohjaveden suotautuminen	Lämpökamerakuvaus	◐
Kallion pinnan sijainti	Sähkömagneettinen mittaus	◐
Kallion laatu	Sähkömagneettinen mittaus	◐
Mallinnustiedot		
Korkeusmallit	LiDAR / Fotogrammetria	●
3D-mallit	Fotogrammetria	●
Ilmakuvat	Kamera	◐
○ Arvio ◐ Suuntaa antava tieto ● Tarkka tieto (2–3 cm tarkkuus)		

Tutkimusosion lähtötiedot ovat pääasiassa suuntaa antavia, sillä tutkimuksiin liittyvät mittaukset eivät aina kykene tuottamaan tarpeeksi tarkkaa ja luotettavaa tietoa. Sähkömagneettista mittausta voidaan pitää suuntaa antavana, sillä sen tuottaman tiedon tarkkuus ja kattavuus vaihtelee kohteen maaperän ja käytetyn laitteiston ominaisuuksien mukaan. Sähkömagneettisella mittauksella tehdyt maalajiselvitykset ovat aina tuotetun datan perusteella tehtyjä arvioita. Sähkömagneettisen mittauksen keskivirhe tutkittaessa syvyys-suuntaisia rajapintoja, kuten esimerkiksi maakerrosrajoja, voi liikkua kymmenissä senttimetreissä. Lämpökameralla tutkittavaa pohjaveden suotautumista voidaan pitää suuntaa antavana tietona, sillä tieto on enemmän informatiivista kuin laadullista. Tämä tarkoittaa sitä, että lämpökameralla ei pystytä pohjaveden suotautumiskohtien havaitsemisen lisäksi määrittämään tarkkaa tietoa esimerkiksi pohjaveden suotautumisen nopeudesta tai määrästä.

Mallinnukseen liittyviä lähtötietoja voidaan pitää luotettavina, johtuen niillä saavutettavasta mittaustarkkuudesta. Sekä fotogrammetrialla, että LiDAR:illa voidaan päästä jopa 2–3 cm tarkkuuteen. Ilmakuvista saatavaa tietoa voidaan pitää suuntaa antavana. Ilmakuvista saatavaan tietoon vaikuttaa oleellisesti kuvien tarkkuus, johon puolestaan vaikuttavat monet tekijät, kuten esimerkiksi kameran resoluutio ja kuvauskorkeus.

## LÄHTEET

- Dong, P. & Chen, Q. (2018). LiDAR Remote Sensing and Applications. CRC Press (Taylor & Francis Group), Boca Raton. 200 p.
- DroneDeploy (2024). Ground Control Points (GCPs). Päivitetty 1/2024. Saatavissa (viitattu 17.2.2024): <https://help.dronedeploy.com/hc/en-us/articles/1500004965282>
- EASA (2022). Easy Access Rules for Unmanned Aircraft Systems (Regulations (EU) 2019/947 and 2019/945). EASA Pro. Päivitetty 28.9.2022. Saatavissa (viitattu 3.2.2024): <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/easy-access-rules/easy-access-rules-unmanned-aircraft-systems-regulations-eu>
- Flyk (2024). Dronekartta. Päivitetty 4.2.2024. Saatavissa (viitattu 4.2.2024): <https://flyk.com/map?drone&lang>
- Gade, R. & Moeslund, T. B. (2014) Thermal cameras and applications: a survey. Machine vision and applications. Vol.25(1), pp.245–262.
- Jofré-Briceño, C., Muñoz-La Rivera, F., Atencio, E. & Herrera, R. F. (2021). Implementation of Facility Management for Port Infrastructure through the Use of UAVs, Photogrammetry and BIM. Sensors (Basel, Switzerland). Vol.21(19), pp.6686.
- Jol, Harry. M. (2009). Ground penetrating radar theory and applications. Elsevier Science, Amsterdam. 545 p.
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S. & Boehm, J. (2020). Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging. 3rd Edition. De Gruyter, Berlin/Boston. 822 p.
- Mundy, E., Gleeson, T., Roberts, M., Baraer, M. & McKenzie, J. M. (2017). Thermal Imagery of Groundwater Seeps: Possibilities and Limitations. Ground water. Vol.55(2), pp.160–170.
- Nagel, L. (2023). Types of Drones and UAVs. Tyto Robotics. Päivitetty 13.9.2023. Saatavissa (viitattu 24.2.2024): <https://www.tytorobotics.com/blogs/articles/types-of-drones>
- Pirttijärvi, M., Saartenoja, A. & Korkeakangas P. (2022). Drone-Based Electromagnetic Survey System for Geophysical Applications. Open research Europe. Vol. 2, pp. 3.
- Queiroz, D., Placido, M., Silva, R. & Vital, W. (2023). Influence of Topographic Data in the Development of Railway Projects Using BIM. Journal of transportation engineering, Part A. Vol.146(6), pp.10.

RIL207-2017 (2017). Geotekninen suunnittelu. Eurokoodin EN 1997-1 suunnitteluohje. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, Helsinki. 246 s.

Scout Aerial (2020). RTK and PPK Drone Surveys. Scout Aerial Australia. Päivitetty 13.7.2020. Saatavissa (viitattu 17.2.2024): <https://www.scoutaerial.com.au/rtk-and-ppk-drone-surveys/>

Scout Aerial (2021a). Accuracy of drone data. Scout Aerial Australia. Päivitetty 14.5.2021. Saatavissa (viitattu 17.2.2024): <https://www.scoutaerial.com.au/accuracy-of-drone-data/>

Scout Aerial (2021b). Strengths and limitations of LiDAR. Scout Aerial Australia. Päivitetty 16.9.2021. Saatavissa (viitattu 17.2.2024): <https://www.scoutaerial.com.au/article-lidar/>

Siemon, B., Christiansen, A. V. & Auken, E. (2009). A review of helicopter-borne electromagnetic methods for groundwater exploration. Near surface geophysics. Vol.7(5–6), pp.629–646.

Suomen geoteknillinen yhdistys ry. (1983). TPO-83 Talonrakennuksen pohjatutkimusohjeet. Rakennustieto Oy, Helsinki. 82 s.

Suomen geoteknillinen yhdistys ry. (1992). KUPO-92 Kunnallistekniikan pohjatutkimusohjeet. Rakennustieto Oy, Helsinki. 65 s.

Traficom (2022). Missä ei saa lennättää. Droneinfo. Päivitetty 29.4.2022. Saatavissa (viitattu 3.2.2024): <https://www.droneinfo.fi/fi/missa-ei-saa-lennattaa>

Traficom (2023a). Drone ja sen toiminnot – miehittämättömien ilma-alusjärjestelmien yleistuntemus. Droneinfo. Päivitetty 25.4.2023. Saatavissa (viitattu 31.1.2024): <https://www.droneinfo.fi/fi/koulutusmateriaali/drone-ja-sen-toiminnot-miehittamattomien-ilma-alusjarjestelmien-yleistuntemus>

Traficom (2023b). Kuinka ihmiset toimivat - ihmisen suorituskyvyn rajoitukset. Droneinfo. Päivitetty 25.4.2023. Saatavissa (viitattu 10.2.2024): <https://www.droneinfo.fi/fi/koulutusmateriaali/kuinka-ihmiset-toimivat-ihmisen-suorituskyvyn-rajoitukset>

Traficom (2023c). Luvanvarainen toiminta Eriytyinen-kategoriassa. Droneinfo. Päivitetty 8.12.2023. Saatavissa (viitattu 3.2.2024): <https://www.droneinfo.fi/fi/luvanvarainen-toiminta-erityinen-kategoriassa>

Traficom (2023d). Miten sää vaikuttaa lentoon – Sääoppi. Droneinfo. Päivitetty 25.4.2023. Saatavissa (viitattu 10.2.2024): <https://www.droneinfo.fi/fi/koulutusmateriaali/miten-saa-vaikuttaa-lentoon-saaoppi>

Traficom (2023e). Mitä sääntöjä on ilmassa? – ilmailun säädökset. Droneinfo. Päivitetty 25.4.2023. Saatavissa (viitattu 3.2.2024): <https://www.droneinfo.fi/fi/koulutusmateriaali/mita-saantoja-ilmassa-ilmailun-saadokset>

Traficom (2023f). Yksityisyys ja tietosuoja. Droneinfo. Päivitetty 25.4.2023. Saatavissa (viitattu 25.2.2024): <https://www.droneinfo.fi/fi/koulutusmateriaali/yksityisyys-ja-tietosuoja>

Vectornav (2024a). Aerial Photogrammetry. Saatavissa (viitattu 29.4.2024): <https://www.vectornav.com/applications/aerial-photogrammetry>

Vectornav (2024b). LIDAR Mapping. Saatavissa (viitattu 29.4.2024): <https://www.vectornav.com/applications/lidar-mapping>

Wynn, J. (2002). Evaluating groundwater in arid lands using airborne magnetic/EM methods: An example in the Southwestern U.S. and Northern Mexico. *Leading edge*. Vol.21(1), pp. 62–64.