

# ILMALASERKEILAIN TEN KEHITYS

Ville Kouva

Opinnäytetyö  
Tekniikka ja liikenne  
Maanmittaustekniikka  
Insinööri (AMK)

2017

Tekniikka ja liikenne  
Maanmittaustekniikka  
Insinööri (AMK)

---

<b>Tekijä</b>	Ville Kouva	<b>Vuosi</b>	2017
<b>Ohjaaja</b>	Pasi Laurila		
<b>Työn nimi</b>	Ilmalaserkeilainten kehitys		
<b>Sivu- ja liitesivumäärä</b>	42		

---

Tämä opinnäytetyö käsittelee ilmalaserkeilainten kehitystä. Työn tarkoituksena oli selvittää, miten keilaintekniikka on mennyt eteenpäin vuosien saatossa ja mitkä ovat olleet tärkeitä kehitysaskelia. Työn tarkoituksena on perehdyttää lukija ilmalaserkeilainten tekniikan kehitysvaiheisiin. Työssä käydään läpi yleisesti ilmalaserkeilausta, sen historiaa ensimmäisistä malleista ja niiden kehitykseen johtaneista vaiheista tämän päivän uusimpiin malleihin.

Tutkimusaineisto työhön on kerätty kirjallisuudesta, verkkolehdistä ja artikkeleista sekä laitteiden teknisten tietojen esitteistä. Suurin osa tiedoista on laitevalmistajien ilmoittamien laitteiden teknisistä tiedoista, joiden pohjalta eri laitteiden vertailu on tehty.

Ilmalaserkeilaus on kustannustehokkain ja nopein tapa pistepilvitiedon keräämiseen laajoilta alueilta. Kaupalliset ilmalaserkeilaimet tulivat markkinoille 1990-luvulla jonka jälkeen niiden kehitys on ollut nopeaa ja käyttökohteiden määrä on kasvanut sitä mukaa, kun teknologian kehitys on sen mahdollistanut. Uusimmat ilmalaserkeilaimet kilpailevat tarkkuudessa jo maalaserkeilaimien kanssa. Laitteiden tehokkuus ja tarkkuus on parantunut samalla, kun laitekoot ovat pienentyneet. Viime vuosina ilmalaserkeilaimet ovat siirtyneet pienentyneen kokonsa vuoksi helikoptereista ja lentokoneista myös miehittämättömiin ilma-aluksiin.

**Avainsanat** ilmalaserkeilain, korkeusmalli, laserpulssi, pulssintoistotaajuus, divergenssi

School of Technology,  
Communication and Transport  
Land Surveying  
Bachelor of Engineering

---

<b>Author</b>	Ville Kouva	Year	2017
<b>Supervisor</b>	Pasi Laurila		
<b>Subject of thesis</b>	Development of Airborne Laser Scanners		
<b>Number of pages</b>	42		

---

The topic of this thesis was about development of airborne laser scanners. The objective was to explain how airborne laser scanner technology has developed over the years and to list the important stages in the development. The purpose was to familiarize the reader with the development phases of the airborne laser scanner technology. General information and history from the first systems to latest state of the art laser scanners were discussed.

The research material in this thesis was collected from a literature, articles and technical brochures. Most of the information was from manufacturer's product brochures that were used for the equipment comparison.

Airborne laser scanning is the most cost-effective and fastest way to collect point cloud data from large areas. Commercial airborne laser scanners came to the market in the 1990s. Since then there has been a rapid development in the technology and an increase in applications as the new technology has made it possible. Today the latest scanners compete with accuracy with the terrestrial laser scanners. The efficiency and accuracy of the devices have improved while the equipment sizes have decreased. Over the last few years due to the decreased equipment size the airborne laser scanners have come available in an unmanned aerial systems in addition to airplanes and helicopters.

**Key words**                      airborne laser scanner, elevation model, laser pulse, pulse repetition frequency, divergence

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	6
2	HISTORIA.....	7
3	ILMALASERKEILAUS .....	9
4	ILMALASERKEILAIN.....	10
5	OMINAISUUKSIA .....	11
5.1	Parametreja .....	11
5.2	Toistotaajuus .....	12
5.3	Kulmaresoluutio ja kulmatarkkuus .....	13
5.4	Pistetiheys .....	13
5.5	Tarkkuus.....	14
5.6	Virrankulutus.....	15
5.7	Keilauskuvat.....	16
5.8	Divergenssi & laserjalanjälki .....	17
5.9	Lentokorkeus .....	19
6	KEHITYS .....	20
6.1	Monikanavalaser.....	20
6.2	Monipistemittaus.....	21
6.3	Hydrografiset keilaimet .....	22
6.4	Täyden aallon muodon keilaimet .....	23
6.5	Keilaimien turvaluokitukset .....	24
7	ILMALASERKEILAUKSEN KÄYTTÖKOHTTEET .....	26
8	ILMALASERKEILAIMIA .....	28
8.1	Optech ALTM-1020 .....	28
8.2	Optech ALTM 1225.....	29
8.3	Leica ALS-60 .....	30
8.4	Riegl LQM-560.....	30
8.5	Optech Titan .....	31
8.6	Optech CZMIL Nova .....	32
8.7	Riegl VQ-1560i .....	33
8.8	Leica SPL-100 .....	35

9 LENNOKKILASERKEILAIMET .....	36
9.1 Riegl VUX-1 .....	36
9.2 Riegl MINIVUX-1UAV .....	37
9.3 Riegl BDF-1 .....	38
10POHDINTA.....	39
11LÄHTEET .....	40

## 1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön aiheena on ilmalaserkeilainten kehitys. Ilmalaserkeilauksesta on runsaasti tietoa ja siihen liittyen on tehty opinnäytetöitä, mutta ilmalaserkeilainten kehityksestä ei juurikaan ole tietoa. Aihetta lähestytään tekniikan kehityksen näkökulmasta hyödyntäen alan kirjallisuutta, artikkeleita sekä laitteiden tuoteselosteita valmistajien sivuilta. Tässä työssä on tarkoituksena perehtyä keilauslaitteistoon ja niiden ominaisuuksiin ja tehdä tiivistetty kuvaus niiden kehityksestä ensimmäisistä kaupallisista keilaimista nykyaikaisiin uusimman teknologian laitteisiin.

Työn pääpaino on kaupallisissa ilmalaserkeilaimissa, jotka ilmestyivät markkinoilla 1990-luvulla. Tätä edeltävissä luvuissa kerron lyhyesti ilmalaserkeilaintekniikan historiasta ennen kaupallisia laitteita. Lisäksi käyn läpi yleisellä tasolla ilmalaserkeilausta, jotta asiaan perehtymätön lukija saa alustavan tietopohjan aiheesta.

Työssä selvitetään, kuinka varhaisista laseretäisyysmittareista kehittyi senttien tarkkuudella miljoonia pisteitä sekunnissa mittaavia ilmalaserkeilaimia. Työssä esitellään tekniikan eri kehitysvaiheita eri vuosilta ja vertaillaan erilaisten keilaimien ominaisuuksia. Tiedot ovat valmistajien ilmoittamia testiolosuhteissa saatuja tuloksia eivätkä ne välttämättä toteudu kaikissa mittausolosuhteissa.

## 2 HISTORIA

Tässä opinnäytetyössä käsittelen kaupallisia ilmalaserkeilaimia 1990-luvulta tähän päivään. Sitä edeltäviä vaiheita jotka mahdollistivat ilmalaserkeilainten kehityksen, käsittelen lyhyesti.

Varhaisin variaatio nykyisestä LIDAR-tekniikasta (Light Detection and Ranging) kehittyi luonnossa noin miljoona vuotta sitten. Lepakko käyttää kaikuluotausta puuttuvan näköaistinsa sijaan. Saadakseen kolmiulotteisen kuvan ympäristöstään lepakko lähettää ääniaaltoja, joiden palatessa kohteesta se saa kuvan ympäristöstään. Tämä tunnetaan nykyään nimellä SONAR (Sound Navigation and Ranging). (Lidar-UK.)

Ihmiset alkoivat kehittää samantapaista tekniikkaa 1900-luvulla. Vuonna 1904 kehitetty telemobiloskooppi oli ensimmäinen tutkan (Radio detection and ranging) muoto. Tutkalla on sama toimintaperiaate kuin Lidar-tekniikalla. Erona tutka mittaa ympäristöä radioaalloilla ja LIDAR-tekniikka laserilla. Teleoskiloskoopissa on antenni, vastaanotin ja lähetin. Sen alkuperäinen tarkoitus oli laivoissa muiden alusten havainnoiminen törmäysten estämiseksi. Pian kuitenkin huomattiin, että radioaalloilla voidaan mitata etäisyyksiä, kun tiedetään radioaallon suunta ja lasketaan aallon lähtö- ja paluu-aika. (Lidar-UK.)

Tärkein ilmalaserkeilauksen mahdollistava keksintö oli 1960-luvun alussa ensimmäisen toimivan laserin kehitys. Laser oli tuolloin jo käyttökelpoinen menetelmä etäisyyksien mittaamiseen. Vuonna 1969 Neil Armstrong jätti ensimmäisellä miehitetyllä kuulennolla vuonna 1969 kuun pinnalle peilin. Tutkijat heijastivat maasta lasersäteen kuunpinnalla olevaan peiliin ja laskivat sen paluuajan perusteella maan ja kuun etäisyyden.

Lentokoneesta käsin laseretäisyysmittauksella tehtyä maanpinnan profilointia on tehty jo vuonna 1965. Lasermenetelmää käytettiin myös lentokoneen korkeuden määrittämiseen. Etäisyysmittarit kehittyivät tasaisesti 1970- ja 1980-luvuilla. Rajoittava tekijä laserprofiloinnissa oli sen vain yhteen kohtaan osoittava kulma.

Korkeusmalli saatiin vain siltä linjalta mihin yksittäinen lasersäde osui. Jos laajempi alue haluttiin mallintaa, yllentojen määrä täytyi olla suuri. Laserprofilointi oli siis jo tuolloin kelvollinen tekniikka kapeiden väylien korkeusmallintamiseen. (Shan & Toth 2008, 2–3.)

1990-luvulle tultaessa ilmalaserkeilausteknologia kehittyi nopeaa vauhtia suoran georeferoinnin mahdollistaessa sen. GPS-järjestelmän kehityttyä täyteen muotoonsa ja lentokoneen kallistusta mittavan inertiaaliyksikön kehitys mahdollistivat korkeuspisteiden koordinaattien määrittämisen. 1990-luvulla markkinoille tulivat ensimmäiset kaupalliset ilmalaserkeilaimet. (Shan & Toth 2008, 2–3.)

Laserin osoittaessa pystysuoraan alaspäin lentokoneesta, voitiin puhua laserprofiloinnista tai etäisyysmittauksesta. Kun laserprofilointiin lisättiin pyörivä peili, saatiin laseretäisyysmittarista laserkeilain. Näin pystyttiin yhden mittauslinjan sijaan saamaan keilauskuvioita, joilla voitiin mitata maastonpiirteitä laajemmin. (Shan & Toth 2008, 7.)



### 3 ILMALASERKEILAUS

Ilmalaserkeilaus (Airborne laser scanning, ALS) on kaukokartoituksen muoto, joka perustuu LIDAR-tekniikkaan. Ilmalaserkeilausta käytetään muun muassa pinnan muotojen, kasvillisuuden, kaupunkialueiden, jään ja infrastruktuurin mallintamiseen. Tekniikka perustuu keilaimen lähettämiin laserpulsseihin, joiden kulkuajan perusteella lasketaan kohteen ja keilaimen välinen etäisyys. Keilain pyyhkäisee laserpulsseja maata kohti ja kun keilaimen asento ja paikka ovat tarkasti tiedossa, mitattu etäisyys voidaan muuttaa korkeudeksi. (Lehtonen 2013, 7.)

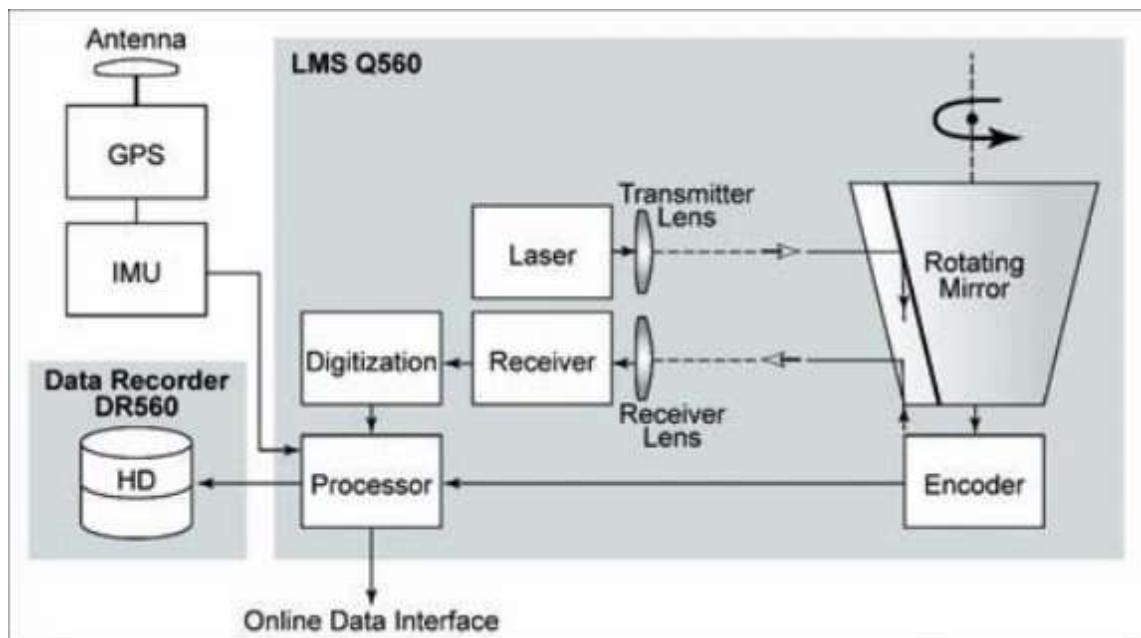
Ilmalaserkeilauksessa etäisyyden mittaus tapahtuu joko pulssin kulkuajan perusteella tai mittaamalla jatkuvan lasersäteen vaihe-eroa. Pulssimenetelmällä keilain lähettää laserpulssin kohteeseen, mistä se heijastuu takaisin ja palaa keilaimen vastaanottimeen. Kohteen etäisyys mitataan valonnopeuden ja kuljetun ajan perusteella. Vaihe-eroa mittaava keilain mittaa etäisyyttä vertaamalla lähtevän ja takaisin palaavan lasersäteen vaihe-eroa. (Shan & Toth 2008, 5.)

Ilmalaserkeilauksella suoritettujen korkeusmallituotannon edut ovat huomattavat. Tuottavuudeltaan prosessi on jopa kaksi tai kolme kertaa tehokkaampi kuin fotogrammetrinen korkeusmallituotanto. Lisäksi laserkeilauksella saavutetaan merkittävä työmäärän säästö. Tuottavuuden ylivoimaisuus johtuu siitä että keilauksessa hyödynnetään automaatiota. (Lehtonen 2013, 7.) Laserkeilaus ei myöskään aktiivisena tekniikkana ole riippuvainen ulkoisista säteilylähteistä, kuten auringosta, joten se voidaan suorittaa myös pimeällä (Järvenpää 2013, 2).

#### 4 ILMALASERKEILAIN

Perinteinen ilmalaserkeilainjärjestelmä koostuu neljästä pääkomponentista (Kuvio 1). Järjestelmä koostuu laserkeilaimesta, sijaintia mittaavasta GPS-järjestelmästä, koneen kallistusta ja kulmaa mittaavasta inertiaaliyksiköstä (Inertial Measurement Unit, IMU) sekä tietokoneesta. Laserkeilain, GPS ja inertiaaliyksikkö tuottavat tarkan sijainnin kullekin pulssille ja tietokone tallentaa saadun pistepilviaineiston. (Kelly & Tommaso 2015, 15.)

Ilmalaserkeilain voi olla kiinnitettynä lentokoneeseen, helikopteriin tai miehittämättömään ilma-alukseen. Useimmat ilmalaserkeilaimet toimivat 1064 ja 1550 nanometrin aallonpituksilla lähi-infrapuna-aalloilla, jotka ovat turvallisia suurillakin tehoilla. Veden alle keilaavat hydrografiset keilaimet toimivat pääasiassa 550 nanometrin vihreällä laserilla lähi-infrapunan huonon vedenläpäisykyvyn vuoksi. Punainen laser absorboituu vedenpinnasta. (Mücke 2008, 6.)



Kuvio 1. Ilmalaserkeilausjärjestelmän komponentit Optech LMS Q560 -keilaimessa (Petrie 2011, 35)

## 5 OMINAISUUKSIA

### 5.1 Parametreja

Ilmalaserkeilainten parametreissä on suuria eroja, ja niissä on tapahtunut huomattavaa kehitystä ensimmäisten kaupallisten ilmalaserkeilaimien käyttöönotosta tähän päivään. Keilainten fyysisiä parametrejä ovat muun muassa pulssin-toistotaajuus, kulmatarkkuus, mittausetäisyys eli lentokorkeus, paino, korkeustarkkuus ja pulssin aallonpituus. Parametrit ovat keilaimien valmistajien poikkeavilla periaatteella määrittelemiä arvoja. (Joala 2006, 4.)

Taulukkoon 1 olen tehnyt listausta ilmalaserkeilainten tyypillisistä parametreista. Taulukko on kerätty vertailemalla eri keilaimien teknisten tietojen esitteitä.

Taulukko 1. Ilmalaserkeilainten tyypillisiä parametreja

Pulssin aallonpituus	532 Nm, 1064Nm, 1550 Nm
Keilain divergenssi	0,2-0,7 Mrad
Keilauskulma	20-360
Keilaimen toistotaajuus	5-2000 kHz
Pistetiheys	0,2-100 pst/m <sup>2</sup>
Keilauskuvio (peili)	Oskilloiva peili, pyörivä peili, polygonipeili, kuitupeili
Keilaimen paino	20-100 kg (lennokit 0.5-3kg)
Pulssien määrä ilmassa	1-20
Kulmaresoluutio	0.01-0.001°
Kulmatarkkuus	0.05-0.005°
Lentokorkeus	100-5000 m
Korkeustarkkuus	20-150mm
Tasotarkkuus	10-100 mm
Virrankulutus	60-1000w
IMU kallistustarkkuus	0.04°-0.0025°
Suuntatarkkuus	0.05°-0.005°

## 5.2 Toistotaajuus

Pulssin toistotaajuus (Pulse Repetition Frequency) tarkoittaa lähetettyjen laserpulssien määrä sekunnissa. Pulssitaajuuden yksikkö on hertsi. Maksimi pulssintoistotaajuuksissa on tapahtunut suurta kehitystä viime vuosina. Aikaisimmat ilmalaserkeilaimet lähettivät pulsseja 5 kilohertsin taajuudella. Nykyisillä malleilla päästään jo 2 megahertsiin.

Pulssintoistotaajuus on tärkeä parametri LIDAR-tekniikassa, sillä toistotaajuudella on suurin merkitys saatuun pistetiheyteen. Korkealla pistetiheydellä on huomattavia etuja. mitä suurempi pistetiheys on, sitä parempaa ja tarkempaa tietoa siitä saadaan. Pulssintoistotaajuuksien kasvu on johtanut suurempiin pistetiheyksiin, mikä on mahdollistanut uusien käyttökohteiden käyttöönoton. (Csanyi & Toth 2006, 2). Pulssintoistotaajuus on tärkein ominaisuus määritettäessä lentokorkeutta ja nopeutta. Suurempi pulssintoistotaajuus mahdollistaa suuremman lentonopeuden säilytettäessä sama pistetiheys, jolloin kustannustehokkuus paranee. (Sirota & Roth 2017.)

Taulukkoon 2 olen listannut eri keilaimien pulssintoistotaajuuksia eri vuosilta.

Taulukko 2. Ilmalaserkeilaimien pulssintoistotaajuuksien vertailua

Malli	Toistotaajuus
Optech ALTM 1020 (1993)	5 kHz
Optech ALTM 1225 (1997)	25Khz
Optech ALTM 3070	70Khz
Optech ALTM 3100 (2004)	100KHz
Leica ALS 50-II (2006)	150KHz
Optech LMS-Q560 (2007)	240KHz
Optech Gemini (2008)	167KHz
Leica ALS-60 (2008)	200KHz
Leica ALS-70 (2011)	500KHz
Optech Titan (2014)	900Khz
Rieg VQ-1560i(2016)	2MHz

### 5.3 Kulmaresoluutio ja kulmatarkkuus

Keilaimen kulmatarkkuuteen vaikuttavia parametreja ovat kulmatarkkuus ja kulmaresoluutio. Kulmatarkkuudella tarkoitetaan tarkkuutta, jolla tiedetään lasersäteen lähtösuunta. Kahden vierekkäisen laserpulssin välisen kulman tarkkuuden kertoo kulmaresoluutio. Kulmatarkkuus vaikuttaa sijaintitarkkuuden lisäksi myös korkeustarkkuuteen. Tarkimmillaan kulmatarkkuus ilmalaserkeilaimissa on  $0,001^\circ$ . Kulmatarkkuus on yleensä luokkaa  $0,0024-0,01$ . (Vosselman & Maas 2010, 4.) Taulukkoon 3 olen listannut eri keilaimien kulmaresoluutioita sekä kulmatarkkuuksia.

Taulukko 3. Eri keilaimien kulmaresoluutioita ja kulmatarkkuuksia

Malli	Kulmaresoluutio	Kulmatarkkuus
Optech ALTM 1020	$0.01^\circ$	$0.05^\circ$
Riegl LMS-Q680i	$0.001^\circ$	$0.002^\circ$
Riegl VQ-880-G	$0.001^\circ$	$0.002^\circ$
Riegl VQ-1560i	$0.001^\circ$	$0.006^\circ$
Riegl Vux-1	$0.001^\circ$	$0.006^\circ$

### 5.4 Pistetiheys

Pistetiheys (Point Density) kertoo mitattujen pisteiden määrän tietyllä alueella, yleensä neliömetrillä. Pistetiheys määrittää korkeusmallin resoluution. Pistetiheys on tyypillisesti  $0,06-25$  pistettä neliömetrillä riippuen siitä mitä pistepilvestä halutaan määrittää ja havaita. Mitä enemmän pisteitä on neliömetrillä, saadaan parempi erotuskyky joka mahdollistaa yksittäisten kohteiden tulkinnan. (Cronvall, Kråknås & Turkka 2012, 13.)

Harvalla pistetiheydellä (0.5–1 pst/m<sup>2</sup>) kerätään tavallisesti pistepilveä suurten alueiden korkeusmalleihin. Alhainen pistetiheys (1-2 pst/m<sup>2</sup>), jossa pisteväli on tavallisesti 0.7–1 metriä, on riittävä tulvakartoituksiin. Keskiverto (2–5 pst/m<sup>2</sup>) on usein kompromissi pistetiheyden ja kustannustehokkuuden välillä. Tämä pistetiheys on sopiva useimpiin käyttökohteisiin mutta voi olla liian harva kaupunkien ja rakennusten mallintamiseen. Korkean tiheyden pistepilvet (5–10pst/m<sup>2</sup>) ovat yleisiä 3d-kaupunkimallinnuksessa. Niiden pistetiheys on yleensä riittävä mallintamaan rakennusten perusmuodot yksityiskohtaisesti. Tästä korkeammat +10 pst/m<sup>2</sup> pistepilvet soveltuvat muun muassa rakennuksiin missä halutaan saada näkyviin kaikista pienimmätkin yksityiskohdat. (Rohrbach 2015a.)

Ensimmäiset kaupalliset ilmalaserkeilaimet mittasivat korkeusmalleja alle yhden pisteen neliötiheydellä. Nykyisillä keilaimilla pulssintoistotaajuuksien moninkertaistuttua päästään poikkeuksetta yli 10 pisteen neliötiheyteen. Kuviossa 2 on esimerkki Riegl VQ-1560i-keilaimella saaduista pistetiheyksistä.

Average Point Density	2 pts/m <sup>2</sup>	8 pts/m <sup>2</sup>	20 pts/m <sup>2</sup>	60 pts/m <sup>2</sup>
Flight Altitude	6000 ft 1830 m	4500 ft 1370 m	3300 ft 1000 m	1150 ft 351 m
Ground Speed	315 kn	210 kn	115 kn	110 kn
Swath Width	2040 m	1540 m	1130 m	400 m
Productivity	960 km <sup>2</sup> /h	480 km <sup>2</sup> /h	192 km <sup>2</sup> /h	64 km <sup>2</sup> /h
Measurement Rate <sup>2)</sup>	660 000 meas./sec	1.33 mill meas./sec	1.33 mill meas./sec	1.33 mill meas./sec
Camera GSD <sup>3)4)</sup>	168 mm	126 mm	92 mm	32 mm
Camera Trigger Intervall <sup>4)</sup>	3.6 sec	4.1 sec	5.4 sec	2.0 sec

Kuvio 2. Riegl VQ-1560i keilaimella mitattuja pistetiheyksiä (Riegl 2015)

## 5.5 Tarkkuus

Ilmalaserkeilauksella saavutettava tarkkuus on yleensä parempi kuin 10 cm. Tarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä on muun muassa pulssitiheys, lentonopeus- ja korkeus, koneen asennon ja sijainnin määrittämisen tarkkuus, keilauskulma sekä mitattavan kohteen ominaisuudet. (Cronvall ym. 2012, 14.)

Ilmalaserkeilainten tarkkuus on parantunut noin kymmenyksen kahdessa kymmenessä vuodessa. Suurimmalla osalla uusista keilaimista valmistajan ilmoittama tarkkuus on 10-20 mm, kun se ensimmäisissä malleissa oli 100–200mm luokkaa. Taulukkoon 4 olen listannut eri keilaimien valmistajien ilmoittamia korkeustarkkuuksia.

Taulukko 4. Ilmalaserkeilainten korkeustarkkuuksia

Optech ALTM 1020	150mm
Optech Titan (2014)	50-100mm
Leica ALS-50	80-240mm
Leica ALS-60	50 mm
Riegl VQ-480i	20 mm
Riegl LMS-Q560	20 mm
Optech LMS Q-680i	20mm
Riegl LMS-Q780	20mm
Riegl VQ-1560i	20mm
Riegl VUX-1	10mm

## 5.6 Virrankulutus

Mitä enemmän energiaa käytetään laserpulssiin, sitä voimakkaampana pulssi voidaan vastaanottaa keilaimeen. Pulssintoistotaajuuksien kasvaessa kasvaa myös virrankulutus ja lämmöntuotanto. Virrankulutuksen optimointi jatkuvasti kasvavalle pulssintoistotaajuudelle on keilaintekniikan jatkuva haaste. Tarkkuuden ja pulssintoistotaajuuksien kasvaessa laitevalmistajat ovat keskittyneet pienentämään virrankulutusta, lämmöntuotantoa, pienentämään laitteiden kokoa ja parantamaan silmäturvallisuutta. (Sirota & Roth 2017.)

Taulukkoon 5 olen listannut eri ilmalaserkeilainten virrankulutuksia.

Taulukko 5. Eri ilmalaserkeilaimien virrankulutuksia

Optech Altm 1020 5kHz (1993)	420 w
Optech Altm Orion 300 kHz (2011)	300w

Optech Altm Gemini 167 kHz (2008)	980 w
Leica ALS-60 200 kHz (2008)	910w
Optech Titan 900 kHz (2014)	800 w
Riegl 1560i 2000 kHz (2016)	250w
Riegl miniVUX 100 kHz (UAV) (2016)	60w

## 5.7 Keilauskuviot

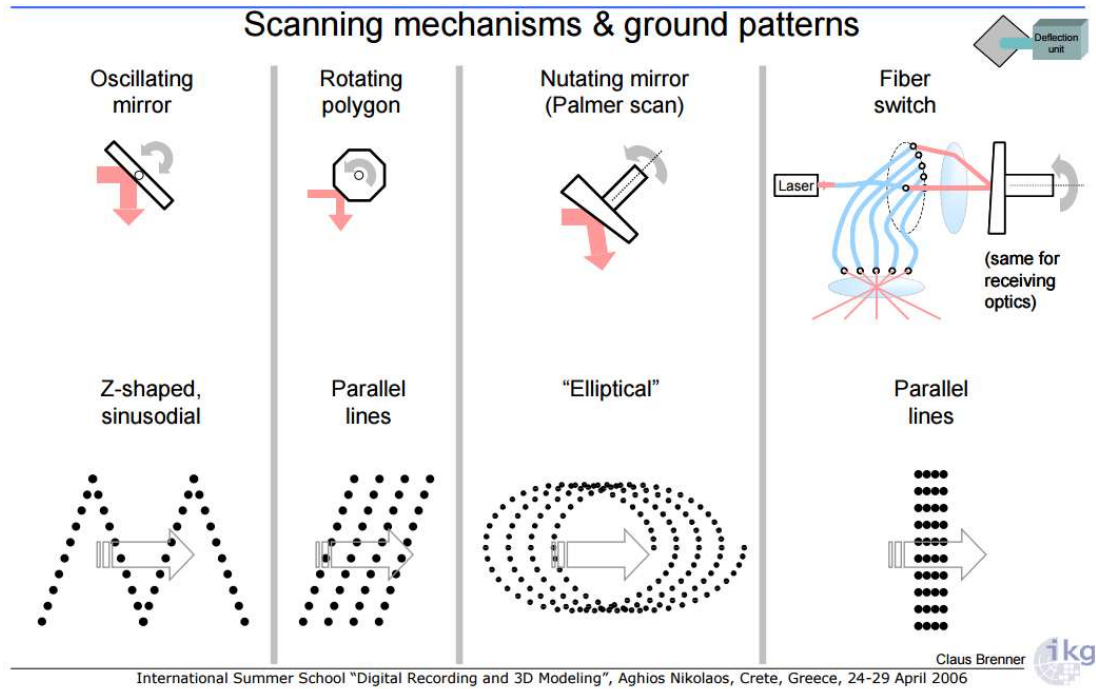
Varhaisimmat pinnan muotoa mallintavat laserit suuntasivat säteen lentokoneesta suoraan maata kohti yhdessä asennossa. Näin ollen mittaustuloksena saatiin hyvin kapea väylä mitattua maanpinnan muotoa. Kun laserprofilointiin liisättiin liikkuva peili, etäisyysmittarista saatiin laserkeilain. Seuraavassa on esitelty yleisimmät ilmalaserkeilaimien keilauskuviot. Kuviossa 3 on havainnollistettuna eri keilainkuvioita.

Oskilloiva heiluva peili on yleinen nykyaikaisissa keilaimissa käytetty peili. Oskilloiva peili muodostaa siksakin muotoista keilauskuviota jossa kuvion reunapisteiden läheisyydessä pistetiheys on suuri ja keskellä väljempi. Oskilloivaa peiliä voidaan käyttää yleisesti 100–6000 metrin lentokorkeuksilta. (Vosselman & Maas 2010, 18.)

Pyörivällä polygonpeilillä saadaan keilauskuviona rinnakkain lentosuuntaa kohden viistoja linjoja. (Vosselman & Maas 2010, 19.)

Palmer-skannerilla keilauskuvioksi saadaan ellipsoidin muotoinen ympyrä. Palmer-menetelmä keilaa edestakaisella pyörivällä liikkeellä saman kohdan uudestaan joten se ei jätä suuria varjo-alueita. Palmer-skannereiden pääasiallinen käyttö on maasta käytettävillä terrestialisilla keilaimilla. (Vosselman & Maas 2010, 18.)



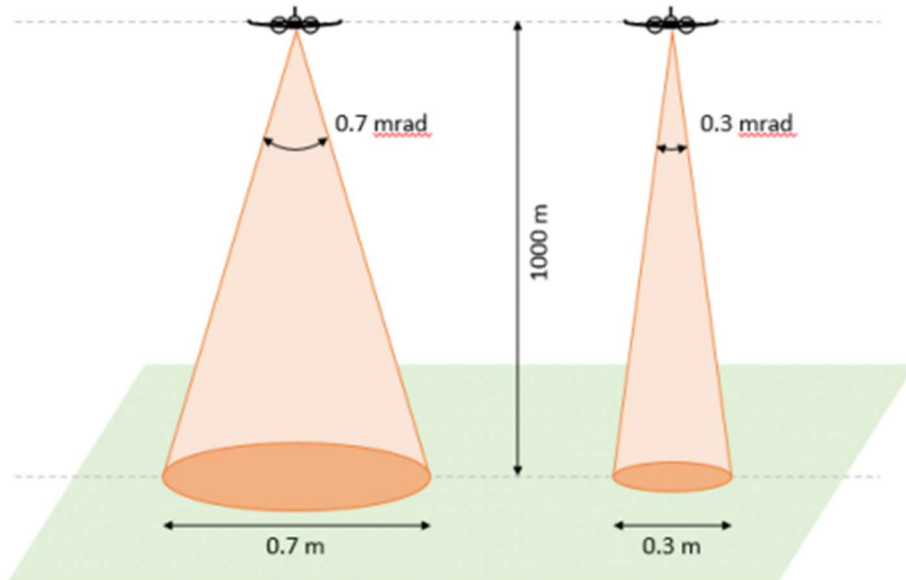


Kuvio 3. Laserkeilauspeilikuviot (Brenner 2006, 10)

## 5.8 Divergenssi & laserjalanjälki

Lähtiessään keilaimesta lasersäde on pistemäinen mutta alkaa hajaantua edetessään. Lasersäde hajaantuu sitä enemmän mitä pidempi sen kulkema matka on. Lasersäteen hajaantumista kutsutaan divergenssiksi ja sen suuruus ilmoitetaan kulman arvona radiaaneina. Ilmalaserkeilaimien divergenssi on yleensä 0,1-1 milliradiaanin välillä. Laajentunutta lasersädettä joka osuu maahan, kutsutaan laserjalanjäljeksi. (Järvenpää 2014, 9.)

Lasersäteen ollessa 0.3 mrad ja lentokorkeus kilometrin, lasersäteen halkaisija maahan osuessa on 30 cm kuten kuviossa 4 on esitetty. Lasersäteen divergenssillä on merkittävä rooli mitatun pisteen xy-tarkkuudessa, sillä havainto voi tulla mistä kohti tahansa tältä keskimäärin ruokalautasen levyiseltä alueelta, johon hajaantunut lasersäde lopulta osuu. Virhemahdollisuus xy-suunnassa on siis laserjalanjäljen säteen suuruinen.



Kuvio 4. Laserdivergenssi havainnekuva (Rohrbach, 2017b)

Laajentunut laserjalanjälki voi olla hyödyllinen pienten kohteiden, kuten voimalinjojen havainnoinnissa. Suurempi heijastettu alue auttaa myös varmistamaan että osa laserpulssista läpäisee puuston. (Rohrbach, 2017b)

Kaikki kaupalliset ilmalaserkeilaimet ovat pienen laserjalanjäljen keilaimia ja niiden divergensseissä ei ole tapahtunut suurta harppausta. Taulukkoon (Taulukko6) olen listannut eri keilainvalmistajien ilmoittamia divergenssejä.

Taulukko 6. Eri keilainten divergenssejä

Malli	Divergenssi
Optech Altm 3100(2004)	Dual 0,3 & 0,8 mrad
Riegl LMS-Q580	0.2 mrad
Optech Gemini(2007)	<0,25 mrad
Optech LMS-Q680i	0,5 mrad
Optech Titan	0,25 mrad, 0,7 mrad vihreä laser
Riegl VQ-780i	0.18 mrad
Riegl VQ-1560i(2016)	<0.25 mrad
Riegl Vux-1	0.5 mrad

## 5.9 Lentokorkeus

Keilausten lentokorkeudet ovat kasvaneet muiden parametrien myötä. Keilainten lisääntynyt teho, kyky käsitellä useampaa yhtäaikaista pulssia ja suuremmat pulssintoistotaajuudet ovat mahdollistaneet suurien pistepilvitiheyksien mittaamisen ylemmiltä lentokorkeuksilta (Vosselman & Maas 2010, 27). Taulukkoon 7 on listattu eri keilaimien toimintakorkeuksia.

Taulukko 7. Eri mallien toimintakorkeuksia

Malli	Lentokorkeus
Optech Altm 1020	330-1000m
Optech Altm 1025	410-2000
Optech Altm 3100(2004)	60-3500m
Leica ALS-60	200-5000m
Optech Gemini(2007)	150-4000m
Optech Titan (2014)	300-2000m 300-600m (merenpohja)
Riegl VQ-1560i	100-4700m(
Riegl VQ-780i (2017)	100-5000m

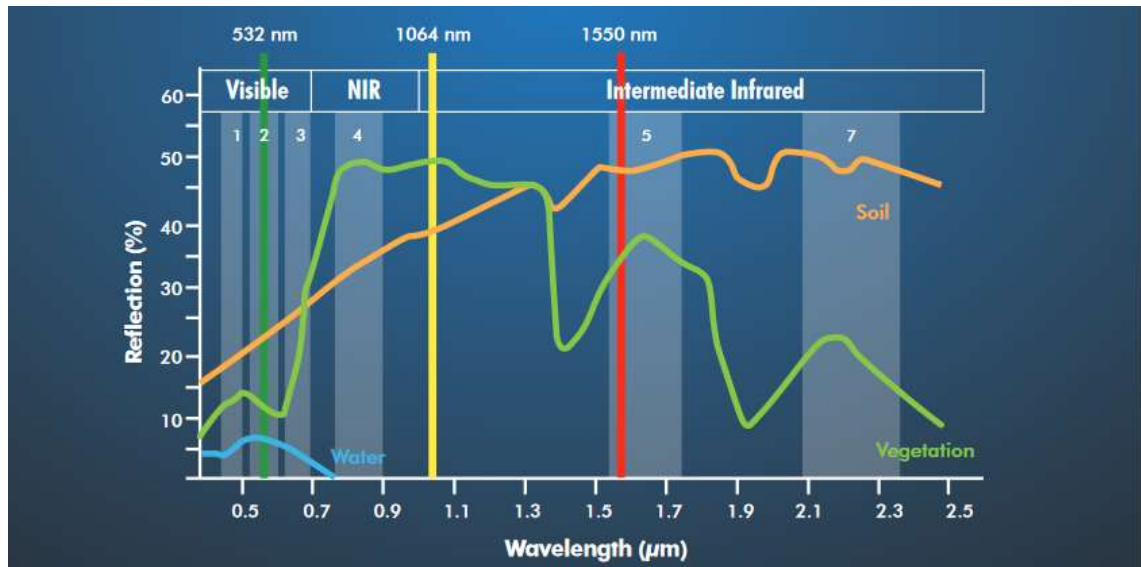
## 6 KEHITYS

### 6.1 Monikanavalaser

Ensimmäinen monikanavalaser Optech Titan julkaistiin vuonna 2014, minkä jälkeen ne ovat yleistyneet. Tekniikka & Talous vertasi monikanavalaserien keksimistä mustavalkotelevisioista väritelevisioihin siirtymiseen. Ensimmäiset kaupalliset ilmalaserkeilaimet kartoittivat ympäristöä yhdellä kanavalla ja aallonpituudella. Monikanavalaser kartoittaa ympäristöään useammalla aallonpituudella, jolloin samasta kohteesta saadaan paluusignaali useammalla kanavalla, ja näin ollen enemmän informaatiota. Periaatetta voidaan verrata digitaalikameraan joka tallentaa kullekin kuvapisteelle väriarvot. (Uro, Kaartinen, Hyyppä, Matikainen & Kukko 2017.)

Monikanavalaserin eri kanavat antavat tietoa kohteiden heijastusominaisuuksista eri aallonpituuksilla, sillä eri mitattavilla kohteilla on eri takaisinheijastuskyky laserille. Käytettävän laserin taajuus vaikuttaa takaisin heijastuvuuteen (Kuvio 5; Uro ym. 2017). Kasvillisuutta ja puustoa keilattaessa paras takaisinheijastus saadaan 1064 nanometrin aallonpituudella kun taas maaperää, rakennuksia ja muita kovempia materiaaleja keilatessa 1550 heijastuu parhaiten takaisin.

Uudemmat hydrografiset keilaimet ovat monikanavalasereita jotka keräävät yhtäaikaisesti korkeustietoa maalta ja mittaa pohjan syvyyttä, mikä mahdollistaa ilmalaserkeilauksen ja veden syvyyden mittaamisen yhdistämisen. Hydrografiselle keilaimella keilatessa lähi-infrapunaser heijastuu takaisin lentokoneeseen maan ja veden pinnasta, samalla kun vihreä 532 Nm laser kulkee veden läpi pohjaan asti. Kaksi yhtäaikaista pulssia mahdollistavat siis veden pohjan sekä rannikon keilaamisen samanaikaisesti.



Kuvio 5. Optech Titan monikanavalaserilla mitattu kohteiden takaisinheijastuvuutta kolmella eri aallonpituudella. ( Teledyne Optech 2015)

## 6.2 Monipistemittaus

Ensimmäiset ilmalaserkeilaimet kykenivät lähettämään ja vastaanottamaan vain yhden laserpulssin kerrallaan. Keilaimen täytyi odottaa edellisen pulssin paluu ennen kuin seuraava pulssi voitiin lähettää. Ongelmaksi muodostui laserpulssin odottamiseen kuluva aika pulssintoistotaajuukisen ja lentokorkeuksien kasvaessa, sillä nykyaikaiset keilaimet pystyvät lähettämään jopa miljoonaa pulssia sekunnissa. (Järvenpää 2014, 4.)

Lennettäessä 1000 metrin korkeudessa jokainen yksittäinen pulssi suunnattuna nadiria (90 asteen kulmassa maahan) kohti kulkee 2000 metrin matkan palatesaan takaisin keilaimen vastaanottimeen. Tällöin pulssin kulkema aika (Time Of Flight, TOF) on 6,7 mikrosekuntia. Mikäli lähetetään ja vastaanotetaan yksi pulssi kerrallaan 1000 metrin korkeudelta, maksimi toistotaajuus voi olla 150 000 Hz. (Petrie, 2011, 35.)

Monta ilmassa yhtäaikaaisesti olevaa pulssia käsittelevän teknologian kehitys oli ratkaisu tähän ongelmaan. Leican ilmalaserkeilaimissa tekniikkaa kutsutaan nimellä multiple pulses in the air, Optechin malleissa continuous multipulse ja Rieglin

keilaimissa Multiple time around. Huolimatta valmistajien eri nimistä tälle teknille, periaate on sama. Keilaimen ei tarvitse odottaa edellisen pulssin paluuta vaan voi lähettää useampaa pulssia ilmassa samanaikaisesti, mikä mahdollistaa suuremmat toistotaajuudet. (Petrie 2011, 35). Taulukkoon 8 olen listannut eri keilaimien yhtäaikaaisesti käsiteltävien pulssien määriä.

Taulukko 8. Eri keilaimien yhtäaikaaisesti käsiteltävien pulssien määrä

Malli	Yhtäaikaista pulssia
Optech ALTM 1020	1
Riegl Q-780	10
Riegl VQ-1560i	20
Riegl VQ-780i	25

### 6.3 Hydrografiset keilaimet

Ilmalaserkeilainteknologian kehityksessä tärkeä askel oli hydrografisten keilainten kehitys. Tämä tekniikka mahdollistaa pistepilviaineistojen keräämisen veden pohjasta matalikoilla. Topografisten keilainten punainen laser absorboituu täysin veteen. Hydrografiset keilaimet sen sijaan käyttävät vihreän valon 532 nanometrin laseria joka läpäisee veden. Nykyaikaiset hydrografiset keilaimet monikanava-keilaimia jotka toimivat sekä vihreällä että punaisella laserilla kuten taulukossa x on esitetty. (Bakula 2015, 26.) Kuviossa 6 on listattuna eri hydrografisten keilaimien ominaisuuksia.

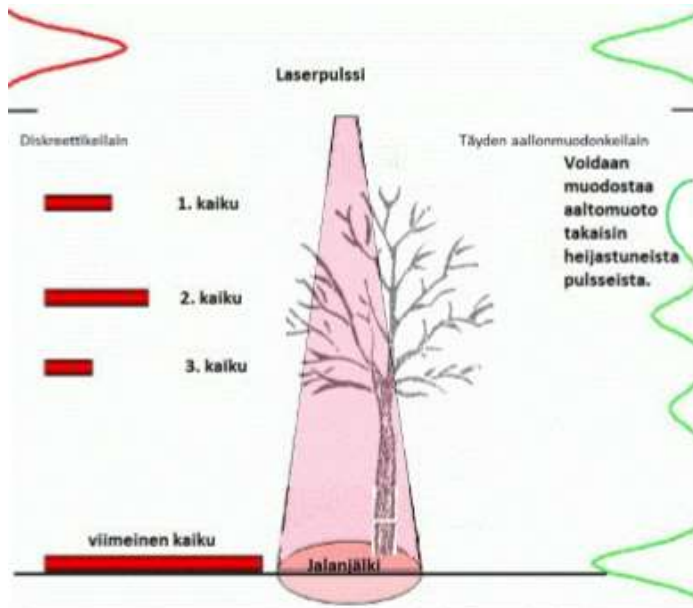
Scanner	Wavelength	Scan rate	Depth range [Secchi]
Optech Aquarius	532 nm	70 kHz	1,0
Optech CZMIL	532 nm	70 kHz (10 kHz)	3,0
Riegl LMS VQ-820-G	532 nm	200 kHz 200 kHz	1,5
Riegl LMS VQ-880-G	532 nm	550 kHz	1,5
Leica Chiroptera II	1064 nm 532 nm	500 kHz 35 kHz	- 1,0
Optech Titan	1550 nm 1064 nm 532 nm	15-300 kHz 15-300 kHz 15-300 kHz	- - 1,0
Leica Hawk Eye III	1064 nm 532 nm 532 nm	500 Hz 35 kHz 10 kHz	- 1,5 3,0

Kuvio 6. Hydrografisten ilmalaserkeilaimien ominaisuuksia (Bakula 2015, 26)

#### 6.4 Täyden aallon muodon keilaimet

Ilmalaserkeilaimet voidaan jakaa kahteen luokkaan: diskreetteihin ja täyden aallonmuodon laitteisiin. Suurin osa keilaimista toimii analogisella pohjalla jolloin saadaan yksi tai useampi mittaustulos lähtevää pulssia kohden. Täyden aallonmuodon keilaimilla mittaustulos saadaan tarkemmaksi ja kohteen ominaisuuksista voidaan määrittää muutakin kuin x-,y- ja z-koordinaatit, sillä täyden aallonmuodon keilain tallentaa yksittäisten paluukaikujen sijaan koko pulssin aallonmuodon. (Geocenter 2012.)

Ensimmäinen kaupallinen täyden aallonmuodon ilmalaserkeilain oli Rieglin vuonna 2004 esittelemä LMS-Q560, jonka jälkeen ne ovat yleistyneet. Täyden aallonmuodon keilaimilla mittaustulokselle saadaan lisää arvoa ja ne saadaan tarkemmiksi. Kuviossa 7 on havainnollistettu diskreetin ja täyden aallonmuodon ero.



Kuvio 7. Diskreettikielaimen ja täyden aallonmuodon kelaimen ero (Narinen 2014, 18)

### 6.5 Keilaimien turvaluokitukset

Laserlaitteille ovat turvallisuusluokat niiden aiheuttamien terveystarkien perusteella. Vähiten haitallinen on luokka 1, jonka laserit ovat heikkotehoisia ja ne toimivat UV-säteilyyn, näkyvän valon ja infrapunasäteilyyn aallonpituuksilla. Luokan 1 laserin suurin sallittu säteilyteho on 0,39 milliwattia. Luokan 2 laserit ovat myös pienitehoisia ja toimivat aallonpituuksilla 400-700 nm. Luokan 2 suurin sallittu säteilyteho on 1 Mw. Luokan 3B suurin sallittu säteilyteho on 500 Mw. Luokan 4 laser ylittää luokan 3B emissiorajat eikä sillä ole ylärajaa voimakkuudelle. Luokan 4 laserit ovat haitallisimpia silmille ja voivat aiheuttaa vaurioita jopa heijastuksesta. (Jokela, Ylianttila, Visuri & Hietanen 2009.)

Laserturvallisuuden parantaminen on ollut tärkeä osa ilmalaserkeilainten kehitystä ja valmistajat pyrkivät tekemään keilaimista mahdollisimman turvallisia tehoon nähden. Taulukossa 9 olen listannut eri keilaimien laserturvallisuusluokituksia.



Taulukko 9. Keilaimien laserturvallisuusluokituksia

Optech ALTM 1020	Luokka 4
Riegl VQ-480i	Luokka 1
Optech Altm Gemini	Luokka 4
Optech Titan	Luokka 4
Riegl VQ-1560i	Luokka 3B
Riegl miniVUX-1	Luokka 1
Riegl VQ-780i	Luokka 4

## 7 ILMALASERKEILAUKSEN KÄYTTÖKOHTEET

Ilmalaserkeilauksella on nykyään runsaasti eri käyttökohteita suurten alueiden topografisista korkealta suoritetuista kartoituksista pienien kohteiden mallinnukseen. Seuraavassa esiteltynä muutama esimerkki ilmalaserkeilauksen sovelluskohteista.

**Korkeusmalli** (Digital Elevation Model, DEM) mallintaa maastossa korkeutta xy-koordinaattien lisäksi. Korkeusmallia käytetään kaikkialla, muun muassa teissä, rakentamisessa ja silloissa. LIDAR-tekniikka on tehnyt korkeusmallintamisen helpoksi ja tarkaksi. Ennen LIDAR-tekniikkaa korkeusmallinnuksessa käytettiin fotogrammetriaa. (Grindgis 2015.)

LIDAR-tekniikka on laajalti käytetty **metsien hallinnoimisessa ja suunnittelussa**. Sitä käytetään mittaamaan puuston korkeutta, rakennetta, tiheyttä, puulajien tulkinnassa ja arvioinnissa. (Grindgis 2015.)

**Tulvamallinnus** tarjoaa tarkkaa tietoa vesistöistä. Parin metrin muutos veden pinnassa voi aiheuttaa suuria tuhoja. Ilmalaserkeilaamalla korkean resoluution pintamalleja joista ja muista vesistöistä. Niillä voidaan joko kartoittaa tulvia tai niitä voidaan käyttää tulvien tuhojen ehkäisyn suunnitteluun. (Grindgis 2015.)

**Kartoituksessa** ilmalaserkeilausta käytetään lisäämään graafista arvoa karttoihin. Ilmakuvaus ja korkeuspintamalli yhdistämällä saadaan kolmiulotteinen korkeusnäkyvä maanpinnasta joka helpottaa teiden siltojen ja rakennusten suunnittelua. (Grindgis 2015.)

Ilmalaserkeilausaineisto **rannikolla** maanpinnasta yhdistettynä meren pohjan pintaan auttaa tutkijoita analysoimaan muun muassa eroosion vaikutuksia ja aaltojen muodostumista (Grindgis 2015).

Lidar-tekniikka on ollut merkittävässä roolissa **arkeologiassa**. Lidar-tekniikalla voidaan havaita mikrotopografiaa mikä helpottaa arkeologisten kohteiden havainnointia. (Grindgis 2015.)

Ilmalaserkeilaamalla voidaan **3D-mallintaa** kokonaisia kaupunkeja. Muun muassa Suomessa maanmittauslaitoksen tavoitteena on laserkeilata koko maa. (Grindgis 2015.)

Ilmalaserkeilausta hyödynnetään **kaivoksilla** monissa tehtävissä. Sitä käytetään muun muassa mittaamaan eri maalajien määriä ja tilavuuksia. (Grindgis 2015.)

Lidar-pistepilvi auttaa tieinsinöörejä **väylien suunnittelussa** ja ymmärtämisessä. Tekniikan ollessa hyvin tarkka, sillä voidaan mallintaa tien leveyksiä, pituuksia ja korkeutta. (Grindgis 2015.)

## 8 ILMALASERKEILAIMIA

### 8.1 Optech ALTM-1020

Ensimmäisimpiin kaupallisiin ilmalaserkeilaimiin kuuluu Optechin vuonna 1993 markkinoille tuoma ALTM-sarjan (Airborne Laser Terrain Mapper, ALTM) ensimmäinen keilain ALTM-1020 (Kuvio 8). Ennen mallin julkaisua Optech oli ollut mukana lukuisissa projekteissa kehittämässä laseretäisyysmittareita ja keilaintekniikkaa. (Shan & Toth 2008, 47.)

Optech ALTM-1020 toimii 1047 nanometrin aallonpituudella ja maksimi pulssintoistonopeudella 5 KHz. Minimi keilauskorkeus on 330 metriä ja maksimi 1000 metriä. Divergenssi on samaa luokkaa kuin nykyaikaisilla keilaimilla 0,25 mrad. Keilaimen paras saavutettu korkeustarkkuus on 15 senttimetriä. Keilaimella on painoa 45 kiloa ja mitat ovat 60x60x65. ALTM-malleja on tämän jälkeen tuotu markkinoille useita. Malli on käytettävissä joko lentokoneesta tai helikopterista. (Carter & Strestha 1997, 6.)



Kuvio 8. Optech ALTM 1020-ilmalaserkeilausjärjestelmä (Carter & Shrestha 1997, 4)

## 8.2 Optech ALTM 1225

Optech ALTM-1020 seuraaja ALTM-1225 esiteltiin vuonna 1999. Edeltäjänsä verrattuna pulssintoistotaajuus on viisinkertaistettu 5 kilohertsistä 25 kilohertsiin. Lentokorkeus on noussut kasvaneen pulssintoistotaajuuden myötä 1000 metristä 2000 metriin keilauskulman ollessa sama  $20^\circ$ . Divergenssi on edeltäjänsä nähden tarkentunut 0,25 milliradiaanista 0,2 milliradiaaniin. Optech ALTM 1225 ei vielä tallentanut pulssin aallonmuotoa mutta sillä voitiin ottaa vastaan pulssin ensimmäinen ja viimeinen kaiku. (Gutierrez, Gibeaut, Smyth, Hepner & Andrews. 2001, 185.)

### 8.3 Leica ALS-60

Leican vuonna 2008 esittelemä ALS-sarjan malli. ALS-60 (Kuvio 9) on korkean suorituskyvyn ilmalaserkeilain. Pulssintoistotaajuus on 200 kHz ja virrankulutus 900 wattia joka antaa paljon tehoa yksittäisille pulsseille. Toimintakorkeus on 200-5000 metriä. Tarkkuudeksi Leica on ilmoittanut 5 cm. Laaja keilauskulma 75 astetta antaa laajan keiluskuvion. Divergenssi 0.22 mrad. (Leica 2008.)



Kuvio 9. Leica ALS-60 Ilmalaserkeilain (Leica 2008)

### 8.4 Riegl LQM-560

RIEGLIN vuonna 2004 esittelemä LQM-560 (Kuvio 10) on ensimmäinen täyden aallonmuodon ilmalaserkeilain. Keilaimessa on 1550 nm aallonpituudella ja 240 kHz pulssintoistotaajuudella toimiva kanava. Toimintakorkeus keilaimella on 450-1800 metrin välillä topografisessa keilaamisessa. Keilauskulma on 60 astetta ja peilinä toimii pyörivä polygonipeili. (Riegl 2010.)



Kuvio 10. Riegl LMS-Q560 Ilmalaserkeilain (Riegl 2010)

### 8.5 Optech Titan

Vuonna 2014 julkaistu Optech Titan (Kuvio 11) on ensimmäinen kaupallinen monispektrinen kolmen kanavan täyden aallonmuodon lasersakanneri. Titanissa on kaksi infrapunakanavaa, 1550 nm infrapunalaser, 1064 nm lähi-infrapunalaser sekä 532 nm vihreän laserin kanava, jolla voi keilata vedenpohjaa 15 metriin syvyyteen. Toimintakorkeus näille kolmelle kanavalle 300–2000 metriä topografisissa mittauksessa ja 300–600 metriä hydrografisessa mittauksessa. Valmistajan tuoteselosteen mukainen korkeustarkkuus on 5–10 cm ja horisontaalinen tarkkuus  $1/7500 \times$  lentokorkeus eli kilometrin korkeudesta 13 cm. Divergenssi infrapuna ja lähi-infrapunakanaville on 0.35 mrad ja 0.70 vihreän laserin kanavalle. Tehokas pulssintoistotaajuus on 900 KHz (300kHz per kanava). (Teledyne Optech 2015.)



Kuvio 11. Optech Titan ilmalaserkeilausjärjestelmä ( Teledyne Optech 2015)

#### 8.6 Optech CZMIL Nova

Optech CZMIL Nova (Kuvio 12) on hydrografisista keilaimista tämän hetken huipputumalli. Sen lisäksi että CZMIL on suorituskykyisin hydrografinen keilain, se myös kartoittaa syvimmälle 80 metriin pitäessä samalla suuren lentokorkeuden. Edeltäjiinsä verrattuna CZMIL Nova on helppokäyttöisempi, pienempikokoinen energiatehokkaampi. Keilaimen on yhdistettynä hyperspektrinen kuvausjärjestelmä sekä kamera. (Teledyne Optech 2011.)





Kuvio 12. Optech CZMIL Nova hydrografinen ilmalaserkeilain (Teledyne Optech 2011)

### 8.7 Riegl VQ-1560i

Tämän hetken kaupallisten laserilmakeilainten lippulaiva on 2016 julkaistu Riegl VQ-1650i. Riegl VQ-1650i (Kuvio 13) on huipputehokas ja nopea keilain, jonka käyttöalue ulottuu 4700 metriin. Laitteessa on kaksi laseria, jotka voivat olla samaa tai eri aallonpituutta, integroituna yhteen tehokkaan GNSS-IMU-laitteiston kanssa. (Geocenter b.)

Laitteen saavuttama pistetiheys on huippuluokkaa. Lentokorkeudesta ja nopeudesta riippuen tyypillisesti 2-60 pistettä/m<sup>2</sup>, mutta helikopteriasennuksissa ja matalalta lennettäessä päästään vielä suurempiin mittaustiheyksiin kuten 100 pistettä/m<sup>2</sup>. (Geocenter b.)

V-sarjan laitteissa on sisäänrakennettuna ainutlaatuinen kaikujen digitointi ja reaaliaikainen aallonmuodon analyysi, jotka mahdollistavat monipistemittauksen ja

käytön huonoissakin näköolosuhteissa. Uutuutena keilaimessa on Rieglin kehittämä SmartWaveform-algoritmi, joka tallentaa lisää pisteitä erikseen määritetyillä kriteereillä. Myös täyden aallonmuodon tallennus on mahdollista. (Geocenter b.)

Monipistemittauksessa on saavutettu huima 20 yhtäaikaista ilmassa olevien pulssien mittausta. Keilaimen pulssintoistotaajuus on 2 MHz ja efektiivinen mittaussnopeus on 1,33 MHz skannauskulman ollessa 60°. Kojeen skannausmekanismi toimii nopeasti pyörivä monitahkoinen peili, jolla saadaan yhdensuuntaisia ja suoria pisteprofiileja. (Geocenter b.)



Kuvio 13. Riegl VQ-1560i-Ilmalaserskanneri (Geocenter b)

## 8.8 Leica SPL-100

Leican vuonna 2017 esittelemä SPL-100 (Kuvio 14) on ensimmäinen kaupallinen yksittäisen fotonin tekniikkaa käyttävä ilmalaserkeilain. Single photon-tekniikan on luvattu olevan 30 kertaa tehokkaampi kuin perinteisen ilmalaserkeilaimien.

Yksittäisen fotonin tekniikka kehitettiin alun perin satelliiteista tehtävään etäisyysmittaukseen. Yksittäisen fotonin laserkeilain sisältää laserin jakajan joka jakaa jokaisen laserpulssin sataan pienempään pulssiin. Jokaisen sadan pulssin kuluaika lasketaan erikseen. Yksittäiseen pulssiin käytetty energia on huomattavasti pienempi kuin tavanomaisella laserkeilaimella. Leica SPL-100 lähettää 60 000 pulssia sekunnissa. Kun jokainen pulssi jaetaan sataan pienempään pulssiin, nousee pulssien määrä 6 000 000 pulssiin sekunnissa, mikä on huomattavasti muita laserkeilaimia korkeampi. (Sirota & Roth 2017.)



Kuvio 14. Leica SPL-100 Single Photon Lidar (Leica)

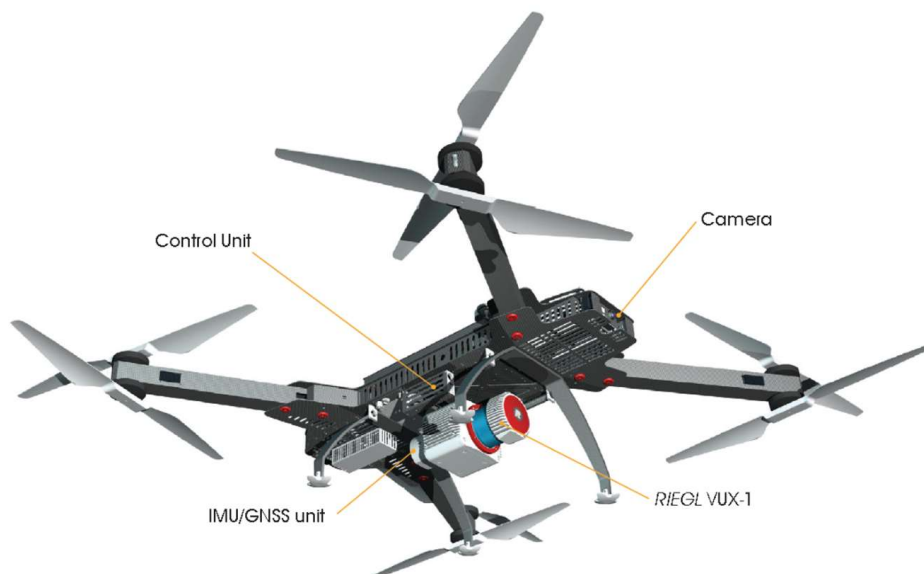
## 9 LENNOKKILASERKEILAIMET

### 9.1 Riegl VUX-1

Riegl esitteli ensimmäisen täydellisen UAS-kopterin vuonna 2014. Keilaimena toimii maailman ensimmäinen kartoitustason tarkkuuden saavuttama, 3,5 kilon painoinen VUX-1 (Kuvio 15) lennokkiskanneri ja alustana Riegl Ricopter-helikopteri. Ilmalaserkeilain järjestelmänä toimii VUX-SYS, joka on ilmalaserkeilainjärjestelmä lennokin kanssa. Järjestelmään kuuluu GNSS-vastaanotin, IMU-yksikkö sekä kamera. (Geocenter c.)

Riegl VUX-1 ilmalaserkeilaimen ominaisuuden kokoon nähden ovat huippuluokkaa. Keilaimen pulssintoistotaajuus on 500 KHz keilaten 200 poikkileikkauksen sekuntivauhtia. Tarkkuudeksi on ilmoitettu 10 millimetriä. (RIEGL 2017a.)

Tyypillisiä sovelluskohteita VUX-1 ilmalaserkeilaimelle on maatalous ja metsien hallinta, arkeologia, väyläkartoitus, rakennustyömaat, voimalinjojen kartoitus, kaupunkialueiden kartoitus sekä louhokset. (RIEGL 2017a.)



Kuvio 15. RIEGL VUX-1 ilmalaserkeilausjärjestelmä Riegl Ricopteriin asennettuna (Geocenter 2015)

## 9.2 Riegl MINIVUX-1UAV

Rieglin vuoden 2016 uutuuksena miniVUX-1UAV (Kuvio 16) on suunnattu lähtötason mittauslaitteeksi miehittämättömään lennokokiskannaukseen. MiniVUX-1 on tämän hetken pienikokoinen kartoitustason UAV-skanneri. Keilaimella on painoa vain 1,6 kg ja soveltuu monipuolisesti kaikenlaisiin lennoikkeihin kuten kiinteisiin tai multiroottorilaitteisiin. (Geocenter.)

Skannerin keilauskulma on täydellinen 360° ja se hyödyntää Rieglin patentoitua, digitaalista reaaliaikaista aallonmuodon analysointia. Skanneri mittaa 100 skannauksen mittausnopeudella toistotaajuuden ollessa 100 kHz. Monipistemittaus tuottaa enimmillään 5 kaikkia lähetettyä pulssia kohden. Keilaimen minimietäisyys kohteeseen on 3 metriä ja maksimi 250 metriä joten miniVUX-1 ei sovellu laajojen alueiden kartoitukseen. Paras saavutettava tarkkuus on 15 mm pysty- ja 10 mm vaakasuunnassa. MiniVUX-keilaimessa on tämän hetken pienin virrankulutus 16 w. (Geocenter a.)



Kuvio 16. Riegl miniVUX-1UAV (Geocenter a)

### 9.3 Riegl BDF-1

Riegl BDF-1 (Kuvio 17) on vuonna 2016 esitelty miehittämättömään ilma-alukseen asennettava hydrografinen laserkeilain. BDF-1 sopii matalien rantaviivojen ja sisävesien profilointiin. Riegl Bathycopteriin asennettuna painoja järjestelmällä on painoa 25 kiloa (kuva x). Toimintakorkeus keilaimella on 10-40 metriä vedenpinnan yläpuolella ja keilaussyvyys 1.5 Secchiä. Korkeustarkkuudeksi keilaimelle on ilmoitettu 20mm. Maksimi pulssintoistotaajuus on 4 kHz ja toiminta-aika 30 minuuttia. (Riegl 2017b.)



Kuvio 17. Riegl BDF-1 asennettuna Riegl Bathycopteriin. (Riegl 2017b)

## 10 POHDINTA

Työssä on käyty pääpiirteittäin läpi ilmalaserkeilaimien kehitys varhaisimmista malleista sekä niitä edeltävistä vaiheista tämän hetken uusimpiin kaupallisiin malleihin. Kaupalliset ilmalaserkeilaimet tulivat markkinoille 1990-luvulla ja ovat yleistyneet sen jälkeen. Ennen keilaintekniikkaa laseretäisyysmittausta käytettiin maanpinnan profilointiin. Nykyään käyttökohteita on lukuisia ja niitä tulee jatkuvasti lisää keilaimien kehittyessä.

Ensimmäisten kaupallisten ilmalaserkeilaimien tultua markkinoille, niiden kehitys on mennyt vauhdilla eteenpäin. Ilmalaserkeilaus on osoittautunut tehokkaaksi menetelmäksi kerätä pistepilvitietoa ja sen tarkkuudella voidaan jo kilpailla maalaaserkeilaimien kanssa.

Kahden vuosikymmenen aikana kaupallisten ilmalaserkeilaimien pulssintoistotaajuudet ovat monikymmenkertaistuneet, lentokorkeudet kasvaneet, tarkkuus parantunut ja virrankulutus pienentynyt. Laitteiden kokojen pienennyttyä keilaimia voidaan käyttää nykyään miehittämättömissä lennokeissa. Uuden yksittäisen fotonin tekniikan myötä keilaustehokkuus saadaan moninkertaiseksi edeltäviin malleihin verrattuna. Tulevaisuudessa kehitys tulee jatkumaan ja sitä mukaa sovel-luskohteiden määrä lisääntyy ja tekniikka tulee yleistymään maanmittauksen alalla.

## 11 LÄHTEET

Bakula, K. 2015. Multispectral airborne laser scanning – a new trend in the development of lidar technology. Warsaw University of Technology. Department of Photogrammetry. Viitattu 20.8.2017 [http://ptfit.sgp.geodezja.org.pl/wydawnictwa/vol27\\_2015/afkit.2015.002.pdf](http://ptfit.sgp.geodezja.org.pl/wydawnictwa/vol27_2015/afkit.2015.002.pdf).

Brenner, C. 2006. Aerial laser scanning. International Summer School “Digital Recording and 3D Modeling”, Aghios Nikolaos, Crete, Greece. Verkkodokumentti. University of Hannover. Viitattu 12.4.2017 [http://www.ikg.uni-hannover.de/fileadmin/ikg/staff/publications/sonstige\\_Beitraege/Brenner\\_tutorialSommerSchool2006.pdf](http://www.ikg.uni-hannover.de/fileadmin/ikg/staff/publications/sonstige_Beitraege/Brenner_tutorialSommerSchool2006.pdf).

Carter, W, E. & Shrestha, R, M. 1997. Airborne laser swath mapping: Instant snapshots of our hanging beaches. Gainesville. University of Florida. Viitattu 3.8.2017 [https://www.researchgate.net/publication/252228294\\_Airborne\\_laser\\_swath\\_mapping\\_Instant\\_snapshots\\_of\\_our\\_changing\\_beaches](https://www.researchgate.net/publication/252228294_Airborne_laser_swath_mapping_Instant_snapshots_of_our_changing_beaches).

Cronvall, T. Kråknäs, P. & Turkka, T. 2012. Laserkeilauksen käyttö liikennetunneleiden kunnossapidon hallinnassa. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 41/2012. Viitattu 10.9.2017 [https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf3/lts\\_2012-41\\_laserkeilauksen\\_kaytto\\_web.pdf](https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf3/lts_2012-41_laserkeilauksen_kaytto_web.pdf).

Csanyi, N. & Toth, C. K. 2006. Lidar data accuracy: The impact of pulse repetition rate. Viitattu 2.7.2017 <http://www.asprs.org/a/publications/proceedings/fall2006/0009.pdf>.

Geocenter a. RIEGL miniVUX-1UAV skannerin tiedot. Viitattu 20.8.2017 <http://www.geocenter.fi/riegl/riegl-minivux-1ha/>.

–b. RIEGL VQ-1560i -ilmalaserskannerin tiedot. Viitattu 14.10.2017 <http://www.geocenter.fi/riegl/riegl-vq-1560i/>.

–c. RIEGL VUX-1 lennökkiskannerin tiedot. Viitattu 1.8.2017 <http://www.geocenter.fi/riegl/riegl-vux->.

Geocenter 2012. Todellisuutta mallintamassa. Täysi aallonmuoto. Viitattu 5.5.2017 <http://www.geocenter.fi/blogi/taysi-aallonmuoto/>.

Geocenter 2015. RIEGL VUX-SYSin tiedot. Viitattu 1.10.2017 <http://www.geocenter.fi/riegl/riegl-vux-sys/>.

Grindgis 2015. LIDAR Data 50 applications and uses – It is important. Viitattu 9.9.2017 <http://grindgis.com/data/lidar-data-50-applications>.

Gutierrez, R. Gibeaut, J, C. Smyth, R, C. Hepner, T, L. Andrews, J, R. 2001. Precise airborne lidar surveying for coastal research and geohazards applications. Viitattu 10.8.2017 <http://www.isprs.org/proceedings/XXXIV/3-W4/pdf/Gutierrez.pdf>.



Joala, V. 2006. Laserkeilauksen perusteita ja mittauksen suunnittelu. Espoo: Leica Nilomark Oy. Viitattu 2.6.2017 <http://docplayer.fi/7209674-Laserkeilauksen-perusteita-ja-mittauksen-suunnittelu.html>.

Jokela, K. Ylianttila, L. Visuri, R. & Hietanen, M. 2009. Laserturvallisuus. Viitattu 2.10.2017 <https://www.stuk.fi/documents/12547/494524/ultravioletti-ja-lasers%C3%A4teily-kirja-luku-3.pdf/bb313c90-f7bc-4ddd-8604-a2fa0ccec43c>.

Järvenpää, J. 2014. Ilmalaseraineiston korkeuden vertaaminen olemassa olevaan kiintopisteverkkoon. Metropolia ammattikorkeakoulu. Tekniikan ja liikenteen ala. Opinnäytetyö.

Kelly, M. & Tommaso, S.D. 2015. Mapping forests with LiDAR provides flexible, accurate data with many uses. California Agriculture. Viitattu 7.8.2017 <https://cloudfront.escholarship.org/dist/prd/content/qt5710j85j/qt5710j85j.pdf?v=lg>.

Lehtonen, P. 2013. Suomalainen laserkeilaus on maailman huippua. Maan käyttö 3/2013, 6-10.

Leica. Leica SPL100 Single Photon LIDAR Sensor. Viitattu 2.10.2017 <https://leica-geosystems.com/products/airborne-systems/lidar-sensors/leica-spl100>.

Leica 2008. Leica ALS60. Airborne Laser Scanner Product Specifications. Viitattu 3.6.2017 [http://w3.leica-geosystems.com/downloads123/zz/airborne/als60/product-specification/ALS60\\_ProductSpecs\\_en.pdf](http://w3.leica-geosystems.com/downloads123/zz/airborne/als60/product-specification/ALS60_ProductSpecs_en.pdf).

Lidar-UK. A brief history of lidar. Viitattu 8.10.2017 <http://www.lidar-uk.com/a-brief-history-of-lidar/>.

Mücke, W. 2008. Analysis of full-waveform airborne laser scanning data for the improvement of dtm generation. Diplomateerbeit. Institut für photogrammetrie und fernerkundung, Technische universität Wien. Viitattu 10.10.2017 [https://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat\\_170289.pdf](https://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_170289.pdf).

Narinen, M. 2014. Maanmittauslaitoksen laserkeilausaineiston hyödyntäminen yhdyskuntatekniikassa. Oulun ammattikorkeakoulu. Tekniikan ja liikenteen ala. Opinnäytetyö. Viitattu 2.10.2017 [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/73975/narinen\\_mika.pdf?sequence=4&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/73975/narinen_mika.pdf?sequence=4&isAllowed=y).

Petrie, G. 2011. Current developments in the technology. Airborne topographic laser scanners. Viitattu 1.7.2017 [http://petriefied.info/Petrie\\_Airborne\\_Topographic\\_Laser\\_Scanners\\_GEO\\_1\\_2011.pdf](http://petriefied.info/Petrie_Airborne_Topographic_Laser_Scanners_GEO_1_2011.pdf).

Riegl 2010. Airborne Laser Scanner for Full Waveform Analysis. LMS-Q56. Viitattu 1.8.2017 [http://www.riegl.com/uploads/tx\\_pxpriegldownloads/10\\_DataSheet\\_Q560\\_20-09-2010\\_01.pdf](http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/10_DataSheet_Q560_20-09-2010_01.pdf).

Riegl 2015. Datasheet Riegl VQ-1560i. Viitattu 2.10.2017 [http://www.riegl.com/uploads/tx\\_pxpriegldownloads/RIEGL\\_VQ-1560i\\_DataSheet\\_2017-09-04.pdf](http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/RIEGL_VQ-1560i_DataSheet_2017-09-04.pdf).

Riegl 2017a. Datasheet VUX-1UAV. Viitattu 5.9.2017  
[http://www.riegl.com/uploads/tx\\_pxpriegldownloads/RIEGL\\_VUX-1UAV\\_Datasheet\\_2017-09-01\\_01.pdf](http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/RIEGL_VUX-1UAV_Datasheet_2017-09-01_01.pdf).

–2017b. Infosheet Riegl Bathycopter. Viitattu 5.9.2017 [http://www.riegl.com/uploads/tx\\_pxpriegldownloads/BathyCopter\\_Brochure\\_2017-09-08.pdf](http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/BathyCopter_Brochure_2017-09-08.pdf).

Rohrbach, F. 2015a. Point Density and Point Spacing. 14.10.2015. Viitattu 1.9.2017. <http://felix.rohrba.ch/en/2015/point-density-and-point-spacing/>.

–2015b. Lidar Footprint Diameter. 13.11.2015. Viitattu 1.9.2017 <http://felix.rohrba.ch/en/2015/lidar-footprint-diameter/>.

Shan, J. & Toth, C. K. 2008. Topographic laser ranging and scanning: Principles and Processing. Boca Raton: CRC Press.

Sirota, M. & Roth, R. 2017. The evolution of lidar. GIM-international 14.2.2107. Viitattu 7.10.2017 <https://www.gim-international.com/content/article/the-evolution-of-lidar>.

Teledyne Optech 2011. The Solution for Airborne Hydrography. CZEMI nova. Viitattu 2.5.2017 <http://www.teledyneoptech.com/wp-content/uploads/CZMIL-Nova-Brochure-151111-WEB.pdf>.

Teledyne Optech 2015. Optech Titan Multispectral Lidar System. High Precision Environmental mapping. Viitattu 14.8.2017 <http://www.teledyneoptech.com/wp-content/uploads/Titan-Specsheet-150515-WEB.pdf>.

Uro, T. Kaartinen, H. Hyyppä, J. Matikainen, L & Kukko, A. 2017. 3D-karttatuotanto siirtyy vihdoon mustavalkomaailmasta väri-tv-aikaan. Lupaa yhteiskunnalle merkittäviä säästöjä. Tekniikka & Talous 31.8.2017 Viitattu 9.9.2017 <http://www.tekniikkatalous.fi/teknologiamurrokset/3d-karttatuotanto-siirtyy-vihdoin-mustavalkomaailmasta-vari-tv-aikaan-lupaa-yhteiskunnalle-merkittavia-saastoja-6673032>.

Vosselman, G. Maas, H, G. 2010. Airborne and terrestrial laser scanning. Boca Raton. CRC Press.



