

Opinnäytetyö (AMK)

Elektroniikka

Tietoliikennejärjestelmät

2016

Erkka Torvinen

LASERETÄISYYSMITTAUKSEN KEHITTÄMINEN INVENTOINTIMITTAUKSESSA



OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Elektroniikka | Tietoliikennejärjestelmät

2016 | 36

TkL Juha Nikkanen

Erkka Torvinen

LASERETÄISYYSMITTAUKSEN KEHITTÄMINEN INVENTOINTIMITTAUKSESSA

Inventointimittauksissa käytettävät laseretäisyysmittausmenetelmät kehittyvät jatkuvasti. Näin ollen eri lasermittalaitteiden käytön mahdollisuuksia ja rajoitteita on tarpeellista tutkia säännöllisin väliajoin. Tässä opinnäytetyössä tutkittiin laseretäisyysmittauksen perusteita, toimintaperiaatetta, käyttöä ja mittausmenetelmien eroja rakennuksen inventointimittauksessa. Työssä tutkittiin pinnallisesti myös 2D-inventointimallin muodostamiseen tarvittavaa mittatietomallia.

Työssä perehdyttiin lasermittaukseen kirjallisuuden, haastattelun ja suoritettujen mittausten avulla. Mittauksena suoritettiin rakennuksen inventointimittaus kolmella erilaisella laseretäisyysmittalaitteella. Mittauksien tuloksia käsiteltiin ja verrattiin toisiinsa. Lisäksi niiden avulla luotiin mittatietomalli, jota käytettiin lopullisen inventointimallin luomiseen.

Työn tuloksena saatiin tunnistettua mittauksessa olevia mahdollisuuksia ja rajoitteita. Nämä antavat tulevaisuuden suuntaa mittalaitteiden käyttöön inventointimittauksessa. Lisäksi löydettiin uusia tapoja mittaustuloksien käsittelyn tehostamiseksi joidenkin mittalaitteiden osalta.

ASIASANAT:

Laseretäisyysmittaus, lasermittaus, laser, inventointimittaus, tietomallinnus.

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Electronics, Communication systems

2016 | 36

Lic.Sc. (Tech.) Juha Nikkanen

Erkka Torvinen

DEVELOPING A METHOD OF LASER DISTANCE MEASUREMENT FOR BUILDING MEASUREMENTS

Laser distance measurement systems used in construction measurements are evolving continuously. For this reason, it is necessary to periodically review the possibilities and limitations of using different laser measuring devices. This thesis studies the basic principles of laser distance measuring and differences in construction laser measurement devices and methods. This thesis also provides a general introduction to measurement information modeling.

The thesis work was carried out by studying the literature on the subject, interviewing and performing the distance measurements and comparing their results. Measurements were carried out by measuring a small storage building with three different laser distance measuring devices. The measuring results were processed and compared with each other. A custom measurement information model for the final 2D-model was also created on the basis of the results.

The investigations and measurements of this thesis provide a guide how to measure buildings in the future and new ways to improve the outcome of the measurement results for some of the measuring devices.

KEYWORDS:

Laser distance measuring, laser measuring, laser scanning, laser ranging, laser, construction measuring, information modeling.

SISÄLTÖ

KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO	VII
1 JOHDANTO	1
2 LASERVALON MUODOSTUMINEN	2
2.1 Stimuloitu emissio	2
2.2 Laserin rakenne ja toiminta	3
2.3 Laseroitava materiaali	5
3 LASERVALON ETENEMINEN	7
3.1 Sähkömagneettinen säteily	7
3.2 Sironna	10
3.3 Diffraktio	10
3.4 Divergenssi	11
3.5 Heijastuminen	12
3.6 Taittuminen ja absorptio	12
3.7 Vaimeneminen	13
4 LASERETÄISYYSMITTALAITTEEN TOIMINTAPERIAATE	14
4.1 Modulaatiot	14
4.2 Lasersäteen kulkuajan mittaus	16
4.3 Vaihe-eromittaus	17
4.4 Lasersignaalin lähetys ja vastaanotto	18
5 INVENTOINTIMITTAUS JA MITTALAITTEET	20
5.1 Inventointimittaus	20
5.2 2D-mittatietomallin muodostaminen	21
5.3 Inventointimittauksessa käytettävät mittalaitteet	22
5.3.1 Lasermitta	22
5.3.2 Lasertakymetri	23
5.3.3 Laserkeilain	26
6 MITTAUSTYÖ JA TULOKSET	28
6.1 Lasermitalla mittaus	28
6.2 Takymetrimittaus	29

6.3 Laserkeilaus	30
6.4 Mittalaitteiden ja tulosten vertailu	32
7 YHTEENVETO	34
LÄHTEET	35

LIITTEET

Liite 1. Laserin spektri.

KUVAT

Kuva 1. Esimerkkikuva Bohrin atomimallista, jossa fotoneita hajoaa ja syntyy.[7]	2
Kuva 2. Esimerkkikuva optisesta vahvistimesta, jossa keskellä laseroituva materiaali ja peilit.[1]	4
Kuva 3. Esimerkkikuva laserin peilien sijoituksesta, jossa peilien väli (L) on kahden aallonpituuden mittainen, aallonpituuden puolikkaita (q) on 4 kpl, ja aallon nollakohdat sijoittuvat peilien kohdalle.[1]	4
Kuva 4. Erilaisia malleja Nd-seostetuista lasereista, joissa pumppaus on toteutettu laseriodilla.[2]	5
Kuva 5. Puolijohdelaserin perusrakenne, jossa kasvatettuina kerroksina p- ja n-tyyppin puolijohteita.[2]	6
Kuva 6. Esimerkkikuva synteettisestä Nd:YAG-kristallista.[5]	6
Kuva 7. Esimerkkikuva sähkömagneettisesta aallosta, jossa sen kenttäkomponentit ovat sähkökenttä E ja magneettikenttä M .[11]	7
Kuva 8. Esimerkkikuva ajanfunktiona värähtelevästä sinimuotoisesta aallosta, jossa jakson aika (T), sekä vaihekulmat eri kohdissa asteina ja radiaaneina.[10]	8
Kuva 9. Esimerkkikuvassa lasersäteilyn spektri noin 500–3000 nm:n väliseltä aallonpituusalueelta.[12]	9
Kuva 10. Esimerkkikuva diffraktiosta pienessä aukossa. Diffraktio synnyttää minimi- ja maksimikohtia diffraktiokuvioon, jotka näkyvät kuvassa renkaina.[1]	11
Kuva 11. Esimerkkikuva puolijohdelaserin divergenssistä, jossa säde on elliptinen.[1]	11
Kuva 12. Esimerkkikuva aallonpituuden vaikutuksesta heijastavuuteen eri aineilla.[14]	12
Kuva 13. Esimerkkikuva puolijohdelaserin modulaatio-ominaisuuskäyrästä.[18]	14
Kuva 14. Esimerkkikuva PAM-modulaatiosta.[17]	15
Kuva 15. Esimerkkikuva AM- ja FM-modulaatiosta.[17]	16
Kuva 16. Esimerkkikuva TOF-menetelmään perustuvasta etäisyysmittauksesta.[2]	16
Kuva 17. Esimerkkikuva jatkuva-aaltoisen laserin vaihe-eromittauksen periaatteesta.[2]	17
Kuva 18. Esimerkkikuva vaihe-eromittauksen signaalinkäsittelystä, joka on toteutettu heterodyne-tekniikalla.[19]	19
Kuva 19. Esimerkkikuva luonnoksesta, jossa inventointimittauksien avulla piirretty julkisivu-, pohja- ja leikkauskuvat.[22]	21
Kuva 20. Esimerkkikuva Leica Disto A3 -laseretäisyysmittalaitteesta.	22

Kuva 21. Kuvassa Nikon NPL-350 -lasertakymetri kolmijalan päällä. Takymetriin on kytketty Husky FS/2 -maastonmittaustietokone keskellä. Oikealla olevassa kuvassa prisma, jossa säädettävä teleskooppisauva.	24
Kuva 22. Kuvassa lohkokaavio NPL-350 -takymetrin tiedonsiirrosta ja omakotitalon mittaustuloksista muodostetusta pistepilvestä. Keltaiset viivat kuvaavat tontin rajoja.[22]	25
Kuva 23. Tiilisen piharakennuksen mittausnäkyvät kuvattu mittausspaikalla.	28
Kuva 24. Kuvat rakennuksen sisältä, jossa vasemmalla puupilarit ja palkit. Oikealla mitatut ovet ja epätasainen lattia.	29
Kuva 25. Esimerkkikuva NPL-350 -takymetrillä ja mittaussuunnitelmasta, jossa mittaussuunnitelma on sinisellä viivalla rajattuna piharakennus. Punaiset pallot ovat takymetrin mittaussuunnitelma paikkoja. Sininen pallo oikeassa yläkulmassa on korkeuskiintopiste.[29]	29
Kuva 26. Kuvassa DWG-2D-mittatietomalli, joka sisältää NPL-350 -takymetrillä mitatun pistepilven. Rakennukset on hahmoteltu viivoilla, suurennoksessa mitatut pisteet ovat viivojen kohdalla, niiden nimet vihreällä tekstillä ja z-kerkeus merenpinnasta on merkitty punaisilla numeroilla.[22]	30
Kuva 27. Esimerkkikuva mittaustyössä käytetystä Riegl VZ-1000 laserkeilaimesta ja mittaussuunnitelmasta, jossa mittaussuunnitelma sinisellä viivalla rajattuna piharakennus. Keilaimen asemointikohdat 1, 2 ja 3.[29]	31
Kuva 28. Esimerkkikuva laserkeilauksessa saaduista pistepilvestä.	31

KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO

AM	Amplitude Modulation, amplitudimodulaatio.
APD	Avalanche Photo Diode, syöksypurkaus diodi, laservaloa vastaanottava puolijohde.
ASCII	American Standard Code for Information Interchange, tiedonsiirtoon käytettävä standardi.
BJT	Bipolar Junction Transistor, bipolaaritransistori.
CAD	Computer Aided Design, tietokoneavusteinen suunnittelu.
DFB	Distributed Feedback laser, säädettävä diodilaser.
DXF	Drawing Interchange Format, tiedostomuoto CAD-ohjelmien väliseen tiedonsiirtoon.
FM	Frequency Modulation, taajuusmodulaatio.
FSL	Free Space Loss, vapaan tilan vaimennus.
GaAs	Galliumarsenidi, seostettu puolijohde.
GPS	Global Positioning System, maailmanlaajuinen paikannusjärjestelmä.
LADAR	Laser Detection And Ranging, laser kaukokartoitus, laserilla toimiva etäisyydenmäärityslaite.
LAN	Local Area Network, lähiverkko.
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, valon vahvistaminen stimuloitun emission avulla.
LIDAR	Light Detection And Ranging, optinen kaukokartoitus, optinen etäisyydenmäärityslaite.
N2000	Valtakunnallinen korkeusjärjestelmä.
PAM	Pulse Amplitude Modulation, pulssiampitudimodulaatio.
PIN	p-type intrinsic n-type, p- ja n-tyypin itseispuolijohde, laservaloa vastaanottava puolijohde.
TOF	Time of Flight, lähetetyn laserpulssin lentoajan mittausta.
TDC	Time to Digital Converter, aika-digitaalimuunnin.
TAC	Time to Amplitud Converter, aika-amplitudimuunnin.
USB	Universal Serial Bus, tiedonsiirto-standardi.
WLAN	Wireless Local Area Network, langaton lähiverkko.
YAG	Yttrium Alumiini Granaatti, seostettu synteettinen kristalli.

1 JOHDANTO

Rakennusmittauksissa käytettävät laseretäisyysmittausmenetelmät kehittyvät jatkuvasti. Näin ollen eri lasermittalaitteiden käytön mahdollisuuksia on tarpeellista tutkia säännöllisin väliajoin. Tämä opinnäytetyö on tehty yhteistyössä Digi-Viiva Oy:n kanssa. Digi-Viiva Oy suorittaa rakennuksien inventointimittauksia kolmella lasermittausmenetelmällä: takymetrillä, keilaimella ja lasermitalla. Yritys tuottaa mittaustuloksista laadukkaita rakennusten 2D- sekä 3D-tietomalleja korjaus- ja uudisrakentamisen tarpeisiin.

Tämän opinnäytetyön tarkoitus on saada tunnistettua mittausmenetelmien tarpeita, mahdollisuuksia ja rajoitteita. Nämä antavat suuntaa mittalaitteiden käyttöön inventointimittauksessa. Lisäksi työn tarkoitus on löytää uusia tapoja mittaustuloksien käsittelyn tehostamiseksi.

Kirjoissa Laser Measurement Technology Fundamentals and Applications [1] ja Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing [2] on kattavasti kuvattu lasermittaukseen liittyvät fysiikan ilmiöt. Erinomaisia laseretäisyysmittaukseen liittyviä töitä ovat esimerkiksi Aki Liimataisen opinnäyte Rakennusten 3D-mittaus ja pistepilvenprosessointi jatkosuunnittelua varten [3] sekä Juho Simosen diplomityö Maalaserkeilaus infrarakentamisen mittauksissa [4]. Töissä on kattavasti kuvattu rakennusteknisiä mittauksia, tietomallinnusta ja niihin vaikuttavia tekijöitä. Myös hyviä tutkimuksia löytyy aiheesta, kuten Design of a time-of-flight range-finder [5]. Nämä kirjat, insinöörityöt ja tutkimukset ovat pääosin antaneet suunnan työn teoriaosuuteen.

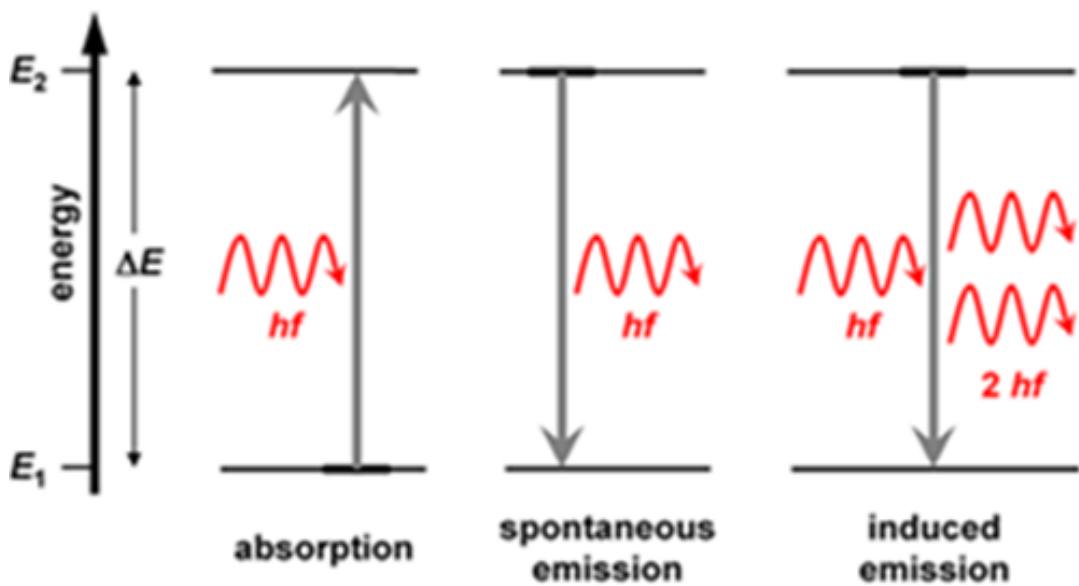
Työn alussa perehdytään laservalon ominaisuuksiin ja etenemiseen. Luvuissa 4 ja 5 käsitellään laseretäisyysmittalaitteissa käytettävät keskeiset toimintaperiaatteet ja rakenteet sekä perehdytään pintapuoleisesti inventointimittaukseen ja siinä käytettäviin mittalaitteisiin. Työn lopussa käydään lyhyesti läpi suoritettut mittaukset, vertaillaan pintapuolisesti käytettyjä mittalaitteita ja niillä saatuja tuloksia sekä käydään läpi työn keskeiset saavutukset.

2 LASERVALON MUODOSTUMINEN

Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) on optinen vahvistin ja sen toiminta perustuu valon vahvistamiseen säteilyn stimuloitun emission avulla. Vahvistus syntyy atomin energiatilojen vaihteluista, joissa fotonit toimivat avainasemassa sähkömagneettisen säteilyn ja aineen vuorovaikutuksessa. Laserin rakenteessa laservalon syntymiseen edellytyksenä on kolme pääosaa laseroitava materiaali, energianlähde ja peilit, joiden välissä fotonit liikkuvat. Tässä luvussa käsitellään laservalon syntymistä, laserin rakennetta ja etäisyysmittalaitteissa käytettyjä laseroituvan aineen materiaaleja.[1,6]

2.1 Stimuloitu emissio

Laserissa atomin energiatilojen vaihtelut synnytetään sähkömagneettisella säteilyllä stimuloimalla. Tavoitteena tällä on saavuttaa stimuloitu emissio. Atomin energiatilan vaihtelussa atomissa olevat elektronit siirtyvät korkeampaan energiatilaan, kun niihin absorboituu fotonin energia. Tämä energia ($E = hf$), jossa (h) on Planckin vakio ja (f) on sähkömagneettisen aallon taajuus, vapautuu yleensä fotonina (hf) tai fotoneina ($2 hf$), kun atomi palautuu lähtötilaan (kuva 1). Näitä energiatilan vaihteluita kuvataan stimuloitun absorption, spontaanin ja stimuloitun emission avulla.[6]



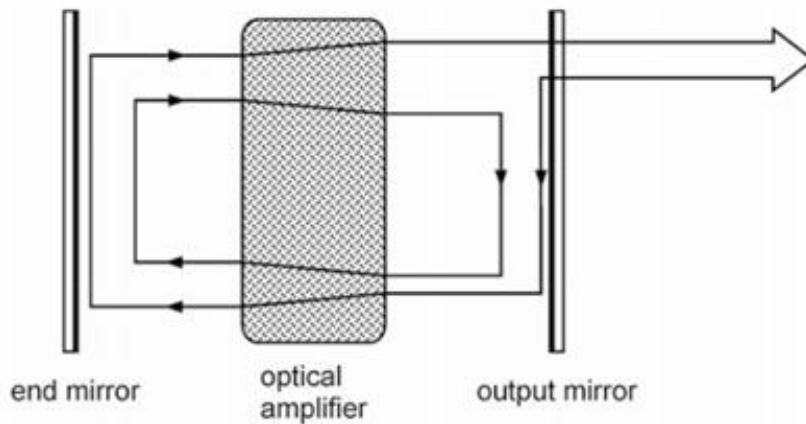
Kuva 1. Esimerkkikuva Bohrin atomimallista, jossa fotoneita hajoo ja syntyy.[7]

- Stimuloidussa absorptiossa ulkoista energiaa siirtyy fotonina hf perustilassa olevaan atomiin (E_1), jonka seurauksena sen energiatila muuttuu korkeammaksi (E_2), kuten kuvassa 1 absorptioon.
- Spontaanissa emissiossa absorboitunut energia vapautuu fotonina, kun atomin energiatila palautuu takaisin lähtötasolle (E_1), kuten kuvassa 1 keskellä. Näin syntyy yleensä satunnaisesti suuntautunutta valoa.
- Stimuloidussa emissiossa jo korkeammalla energiatasolla oleva atomi kohtaa saman energian omaavan fotonin. Tämän seurauksena syntyy resonanssi ilmiö, jonka jälkeen atomin energiatila alenee ja se vapauttaa kaksi identtistä fotonia ($2 hf$), kuten kuvassa 1 oikeassa reunassa.

Stimuloidussa emissiossa syntyvää ilmiötä kutsutaan laseroitumiseksi. Laseroitumisessa valo vahvistuu ja syntyy koherenttia, sekä monokromaattista laservaloa. Monokromaattisessa laservalossa on vain yhtä aallonpituutta ja fotonit etenevät saman suuntaisina, niillä on sama vaihe sekä polarisaatio.[6]

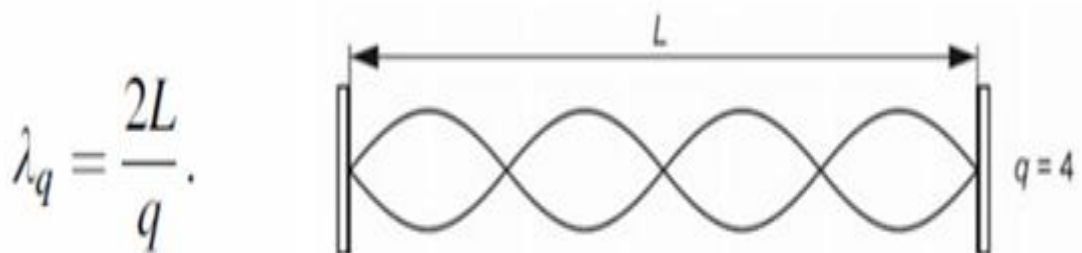
2.2 Laserin rakenne ja toiminta

Laser on optinen vahvistin, jonka perusrakenne koostuu kahdesta peilistä, joiden välissä on laseroituvaa materiaalia (kuva 2). Peilien välissä olevaa laseroituvaa materiaalia stimuloidaan ulkoisella energialla. Stimuloinnissa käytettyä energianlähdettä kutsutaan pumpuksi. Energianlähteenä voi olla toinen laser tai puolijohteissa tasavirta. Ulkoisen energian vaikutuksesta fotonit liikkuvat laseroituvassa materiaalissa, heijastuvat peileistä takaisin ja osuvat atomeihin uudestaan. Tällöin alemmassa energiatilassa olevat atomit nousevat taas ylemmälle tasolle ja jo ylemmällä tasolla olevat vapauttavat taas kaksi fotonia. Kiertotilaa ylläpidetään pumppausta jatkamalla, jonka seurauksena peilien välinen tila, niin sanottu kaviteetti, täyttyy fotoneista. Peileistä toinen heijastaa kaiken valon takaisin ja toinen osittain, noin 99 %:a heijastava peili, alkaa vuotamaan ulos laservaloa kuten kuvassa 2.[6,1,2]



Kuva 2. Esimerkkikuva optisesta vahvistimesta, jossa keskellä laseroitava materiaali ja peilit.[1]

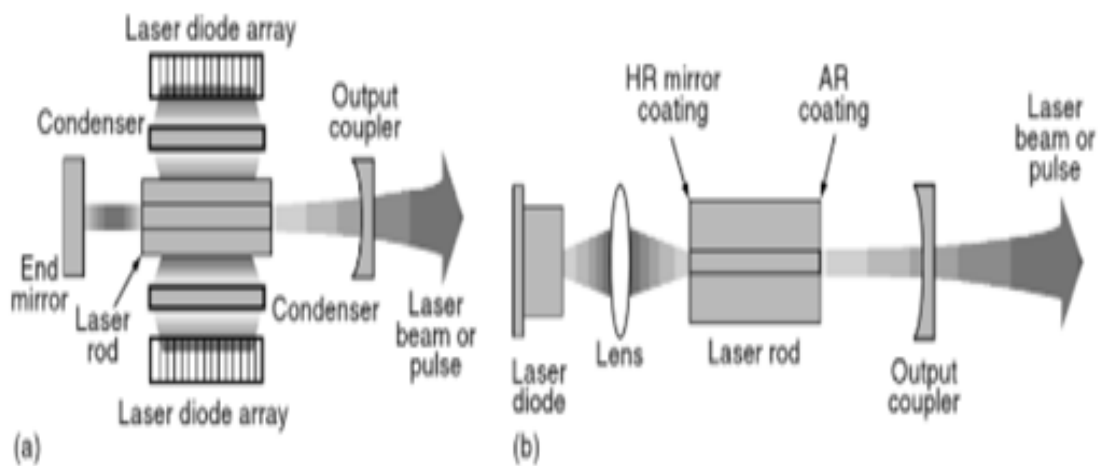
Peilien välinen etäisyys on oltava oikeassa suhteessa lähetettävään aallonpituuteen. Peilit voidaan sijoittaa kaikkiin lähetettävän aallonpituuden puolikkaan monikertojen kohdille (kuva 3). Peilien väliin saadaan näin syntymään seisova aaltoliike, jonka nollakohdat sijoittuvat peilien kohdalle. Peilien kohdilla aaltojen summautuessa, aallot ovat mahdollisimman samanvaiheisia ja ne vahvistavat toisiaan. Näin aaltojen heijastumisessa syntyvät häviöt saadaan mahdollisimman pieneksi. Laseroitumisen edellytyksenä on myös kääteismiehitys (populaatioinversio), joka tarkoittaa energiatasoltaan korkeampien atomien suurempaa määrää laseroituvassa aineessa. Tilan seurauksena takaisin heijastuneiden foneiden on todennäköisempää osua jo virittyneisiin atomeihin.[1,2]



Kuva 3. Esimerkkikuva laserin peilien sijoituksesta, jossa peilien väli (L) on kahden aallonpituuden mittainen, aallonpituuden puolikkaita (q) on 4 kpl, ja aallon nollakohdat sijoittuvat peilien kohdalle.[1]

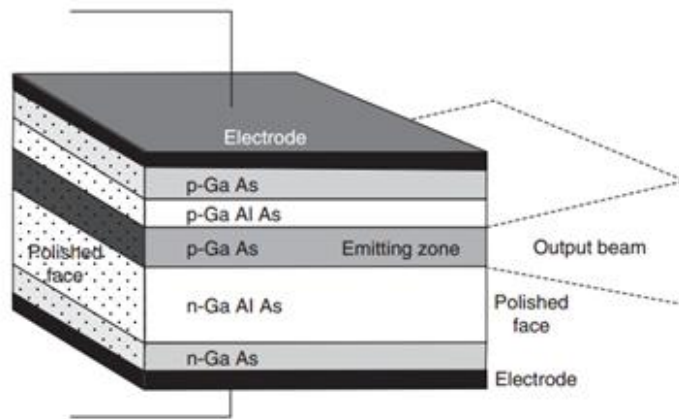
2.3 Laseroituva materiaali

Laseroituvan materiaalin rakenne on oltava oikeanlainen, jotta populaatioinversio olisi mahdollinen. Laseretäisyysmittalaitteissa käytetään yleisesti kahdenlaista laseroituvaa materiaalia, jolla tämä tila saavutetaan. Näitä ovat puolijohdemateriaali GaAs (Galliumarsenidi) tai seostettu synteettinen kristalli YAG (yttrium alumiini granaatti). Näihin materiaaleihin seostetaan muita aineita, jotta päästään haluttuihin ominaisuuksiin. Seostamisella vaikutetaan lähetettävään aallonpituuteen ja signaalin tehoon.[2]



Kuva 4. Erilaisia malleja Nd-seostetuista lasereista, joissa pumppaus on toteutettu laseriodilla.[2]

GaAs-puolijohdemateriaalia käytetään laserdiodeissa. Valmistaminen tapahtuu etsaamalla eli syövyttämällä, ja kasvattamalla ainekerroksia päällekkäin. Seosteena on yleensä alumiinia (Al), indiumia (In) tai fosforia (P). Laseriodin toiminta perustuu pn-liitokseen, jossa stimuloitu emissio synnytetään tasavirralla pumppaamalla. Niitä käytetään energiapumppuina muissa lasereissa ja mm. lyhyillä noin 0,15–150 m:n etäisyyksillä lasermitoissa aallonpituuksilla 620–690 nm:ä [23]. Tämä punainen näkyvä aallonpituusalue saadaan muodostettua InGaAlP-seostetulla (Indium Gallium Alumiini Fosfori) puolijohdeella (liite 1).[1,2]



Kuva 5. Puolijohdelaserin perusrakenne, jossa kasvatettuina kerroksina p- ja n-tyyppin puolijohteita.[2]

YAG kristalleja valmistetaan kasvattamalla ja ne ovat yleensä pyörötangon muotoisia, kuva 6. Etäisyysmittalaitteissa käytettyihin kristalleihin on tyypillisesti seostettu 1 % neodyymiä (Nd:YAG). Se soveltuu pulssi- ja jatkuva-aaltoisiin lasereihin, mutta sen valmistaminen on monimutkaista ja kallista. Sen toiminta perustuu ulkopuolelta pumpatun laservalon vahvistamiseen. Nd:YAG:lla saadaan muodostettua eri seosteilla esimerkiksi 1046 ja 1645 nm:n aallonpituuksia. Pienempien aallonpituuksien muodostaminen on myös mahdollista, käyttämällä taajuuden tuplaus tekniikoita, jotka puolittavat aallonpituuden. Kristallin etuna on erittäin tehokas ja tasainen pulssi. Laseretäisyysmittalaitteissa tehokkaalla ja tasaisella pulssilla kyetään muodostamaan pitkä kantama. YAG-laseria käytetään enimmäkseen kartoitus ja pinnanmuotoja mittaavissa etäisyysmittalaitteissa sekä lentokonekeilaimissa.[2]



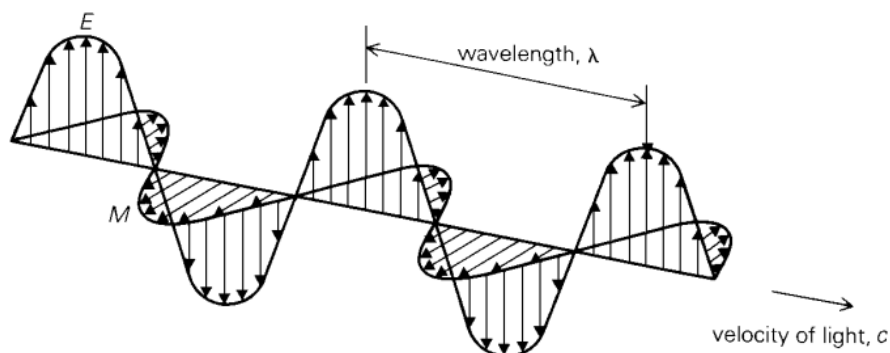
Kuva 6. Esimerkkikuva synteettisestä Nd:YAG-kristallista.[5]

3 LASERVALON ETENEMINEN

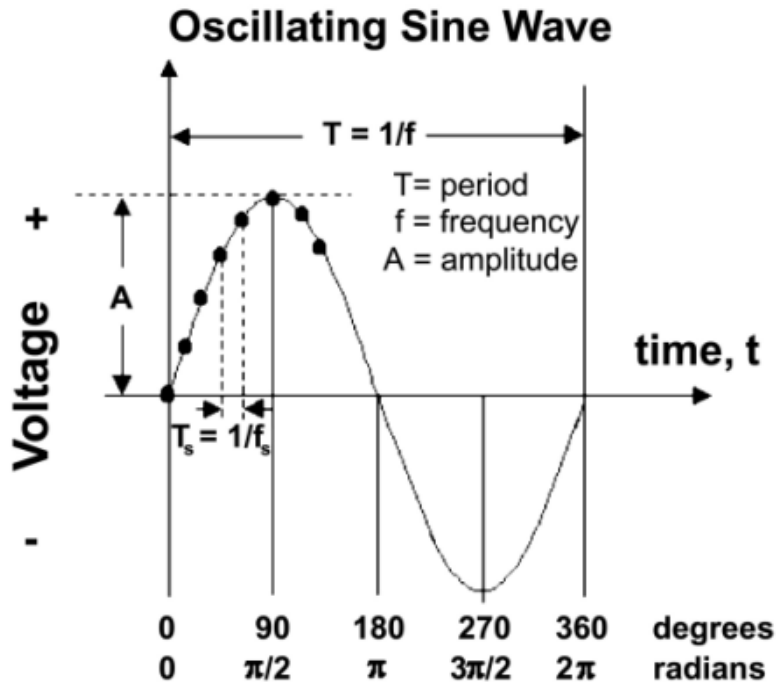
Laseretäisyysmittalaitteissa lähetetään lasersäde, joka vastaanotetaan heijastuksen kautta. Lasermittauksessa on ymmärrettävä miten olosuhteet ja ympäristö vaikuttavat mittaustuloksiin. Tämä edellyttää laservalon ominaisuuksien tuntemista. Laservalon edetessä sähkömagneettisena aaltona ja sen etenemiseen vaikuttaa aallonpituus, lähetetyn valon muoto ja teho. Sähkömagneettisen säteilyn osuessa aineiden rajapintoihin tapahtuu mm. sirontaa, heijastumista, taittumista ja absorptiota. Nämä ilmiöt tapahtuvat laservalon osuessa ilmassa oleviin molekyyliin, pölyhiukkasiin ja mitattavaan pintaan. Tämä luku kuvaa laservalon etenemistä ja sen sähkömagneettisia ominaisuuksia.[1,6]

3.1 Sähkömagneettinen säteily

Laservalo niin kuin kaikki muukin jaksollinen sähkömagneettinen säteily koostuu sinimuotoisesti ajan funktiona värähtelevistä sähkökenttä- (E) ja magneettikenttä (M) komponenteista. Kentät ovat toisiinsa nähden kohtisuorassa, ja kohtisuorassa kulkusuuntaan (c) nähden (kuva 7). Sinimuotoinen sähkömagneettinen säteily etenee tyhjiössä valon nopeudella ja kaikki aine hidastaa sen etenemisnopeutta. Lasersäteilyllä on polarisaatio, joka kuvaa aallon sähkökenttäkomponentin (E) värähtelyn suuntaa. Sähkökenttää käytetään polarisaation suunnan vertailuun, koska se on suurempi magneettikenttäkomponenttiin verrattuna ja näin ollen on helpommin havaittavissa. Laservalo on ideaalisena lineaarisesti polarisoitunutta monistuvien identtisten fotonien vuoksi.[1,2]



Kuva 7. Esimerkkikuva sähkömagneettisesta aallosta, jossa sen kenttäkomponentit ovat sähkökenttä E ja magneettikenttä M . [11]



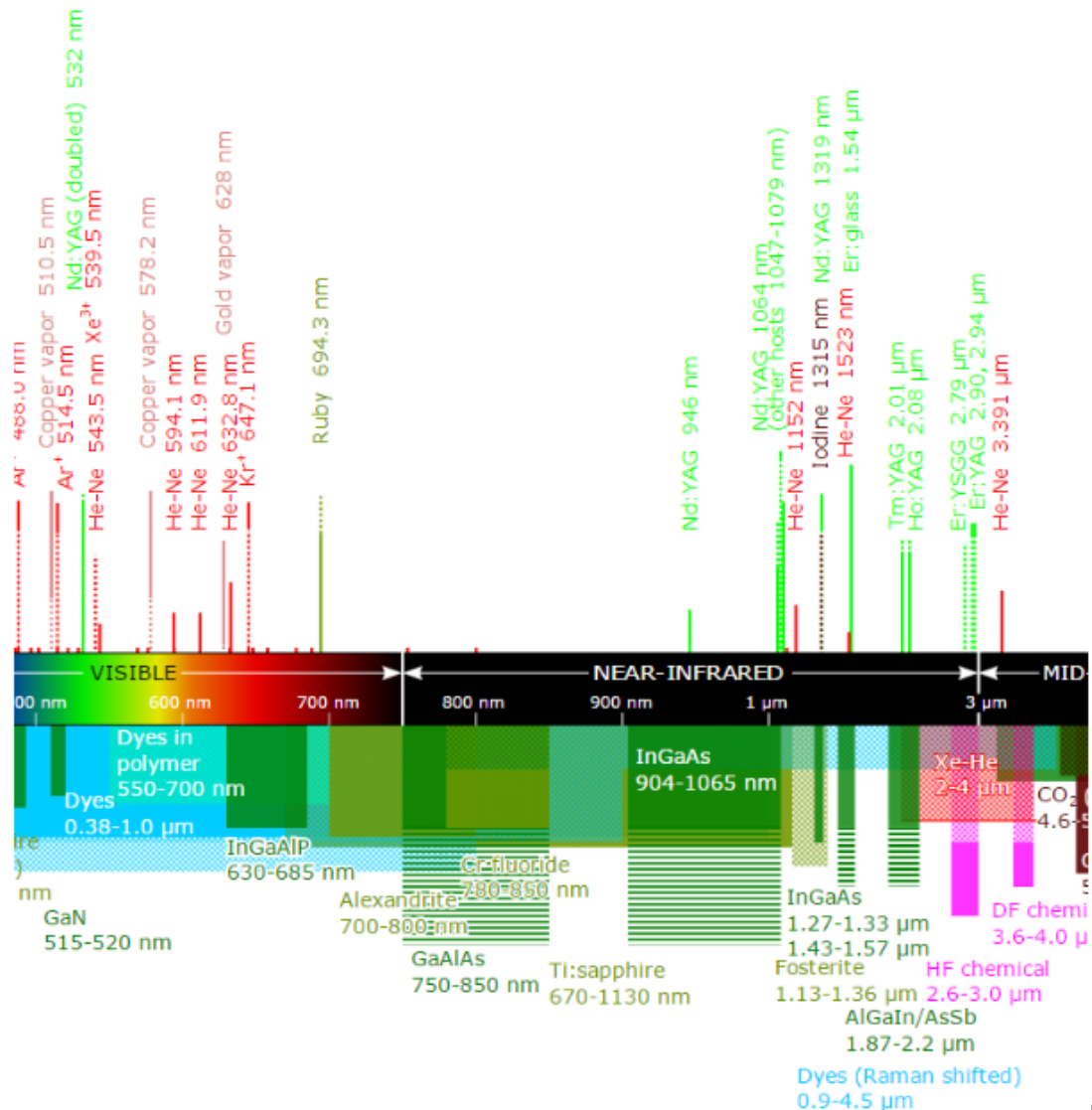
Kuva 8. Esimerkkikuva ajanfunktiona värähtelevästä sinimuotoisesta aallosta, jossa jakson aika (T), sekä vaihekulmat eri kohdissa asteina ja radiaaneina.[10]

Sinimuotoisella sähkökentällä on amplitudi (A), jakson aika (T) värähtelyn taajuus (f) ja vaihe, kuten kuvassa 8. Amplitudi on aallon maksimi arvo eri ajanhetkinä. Taajuus (f) osoittaa sinimuotoisen toistuvan värähtelyn määrää aikayksikköä (T) kohden. Aallon vaihe kuvaa kohtaa, jossa aallon amplitudi on eri ajanhetkellä, ja se ilmoitetaan yleensä asteina tai radiaaneina (kuva 8).

Lasersäteilyllä on aallonpituus (λ), joka tarkoittaa jaksollisen sinimuotoisen aallon yhden jakson (T) aikana kuljettua matkaa, kuten kuvassa 7.[10]. Kaikki eri värähtelytaajuudet muodostavat yhdessä sähkömagneettisen säteilyn spektrin. Tämä spektri voidaan esittää usealla tavalla (kuva 9). Lasersäteilyn spektri esitetään yleensä tehona, aallonpituuden funktiona, ja se sijoittuu yleensä noin 0,1–10 μm :n aallonpituuksien väliselle alueelle (liite 1). Aallonpituus määrää, miten sähkömagneettinen säteily voi edetä aineessa ja miten se käyttäytyy aineiden rajapinnoissa.[2]

Laseretäisyysmittalaitteissa aallonpituudet ovat vihreän ja lähi-infrapun välisellä alueella. Alue sijoittuu noin 500–1600 nm:n aallonpituuksien välille. Yleensä lasermitassa käytettävät aallonpituudet sijoittuvat 600–700 nm:n välille ja mittausetäisyys on tällöin noin 0,15–200 m. Takymetreissä ja keilaimissa käytetään

noin 900–1600 nm:n välistä aallonpituus aluetta. Mittausetäisyys vaihtelee näillä mittalaitteilla noin 1,6–1400 m:n välillä.[14,23,24,28]



Kuva 9. Esimerkkikuvassa lasersäteilyn spektri noin 500–3000 nm:n väliseltä aallonpituusalueelta.[12]

Lasereissa käytettävät alle 1400 nm:n aallonpituudet voivat olla väärin käytettynä vahingollisia silmille. Aallonpituuden pienentyessä ja tehon kasvaessa lasersäteilyn vaarallisuus kasvaa. Laserin aallonpituudet on jaettu turvallisuusluokkiin, kuten lähteessä [13]. Luokat ilmoitetaan numeroina tai numeron ja kirjaimen yhdistelminä. Laserluokissa numero suurenee, kun säteilyn vaarallisuus kasvaa. Etäisyysmittauksessa käytettävissä lasereissa käytetään 1. ja 2. luokan lasereita. 1. luokan lasereita on normaaliolosuhteissa turvallista käyttää. Niiden vaarallisuus

kasvaa, jos säteilyä katsotaan suurentavalla optiikalla, kuten kiikareilla. Laserluokassa 2 säteily on normaaliolosuhteissa turvallista, jos säteilyn altistuksen kesto silmässä ei ylitä 0,25 s:a.[13]

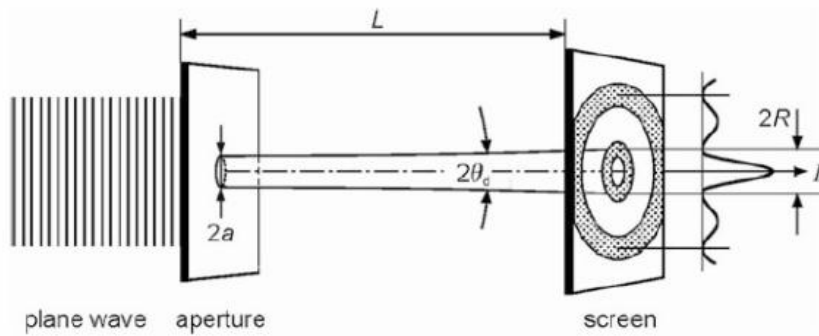
3.2 Sironta

Sirontaa syntyy, kun laservalo osuu aineeseen, vuorovaikuttaa aineen kanssa ja muuttaa suuntaansa. Laseretäisyysmittauksissa sirontaa esiintyy mittaussäälimatalla ilmakehässä, ja mittausskohteena olevassa pinnassa. Laservalon osuessa ilmakehässä oleviin molekyyliin, hiukkasiin ja partikkeleihin, sen sähkökenttä vuorovaikuttaa molekyylin tai partikkelin kanssa. Ilmakehässä tapahtuvaa sirontaa on muun muassa Rayleigh sironta, jossa partikkeli tai vaikutuksen alainen hiukkanen on paljon pienempi kuin käytettävä aallonpituus.

Mittausskohteena olevaan pintaan osuva laservalo synnyttää myös sirontaa, joka johtuu lähinnä heijastuspinnan muodosta tai karkeudesta. Tällöin valo heijastuu satunnaisesti pinnan mikroskooppisen pienistä koloista ja nyppylöistä, jonka seurauksena laservaloa leviää satunnaisesti eri suuntiin. Tämän tyyppinen satunnaisen sironnan määrä kasvaa pinnankarkeuden kasvaessa.[1]

3.3 Diffraktio

Diffraktiota eli taipumista syntyy esimerkiksi silloin, kun laservalo kulkee laservaloa tuottavan komponentin aallonpituutta pienemmän ulostuloaukon läpi. Aalto taipuu ulostullessaan aukon reunan taakse ja alkaa hajaantumaan (kuva 10). Diffraktio voidaan selittää Huygensin periaatteen avulla, jossa jokainen aaltorintaman piste on uuden aallon lähtöpiste. Kun aallot osuvat toisiinsa, toiset vahvistavat toisia ja toiset kumoavat toisensa. Tämän seurauksena syntyy aallon intensiteetin minimi- ja maksimikohtia diffraktiokuvioon (kuva 10). Taipumisen määrä vaikuttaa ulostulevan aallon etenemismuotoon ja divergenssin suuruuteen.[1]

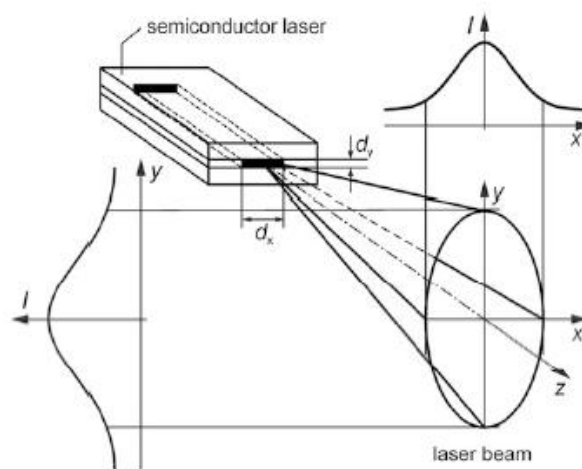


Kuva 10. Esimerkkikuva diffraktiosta pienessä aukossa. Diffraktio synnyttää minimi- ja maksimikohtia diffraktiokuvioon, jotka näkyvät kuvassa renkaina.[1]

3.4 Divergenssi

Divergenssi kuvaa miten sähkömagneettinen aalto edetessään hajaantuu ympäristöön (kuva 11). Laservalossa divergenssi ilmenee halkaisijan suurenemisena etäisyyden funktiona. Tällöin myös valon diffraktiokuvio ja sen teho skaalautuu pituuden funktiona (kuva 10). Divergenssin ollessa pieni, säteilyn teho keskittyy pienelle pinta-alalle ja takaisin heijastuva säde on hyvin havaittavissa. Laservalon divergenssi on erittäin alhainen verrattuna esimerkiksi hehkulamppuun, jossa lamppu säteilee lähes kaikkialle. Tästä syystä laservalon valokeila on kapea ja tarkasti kohdistettavissa.

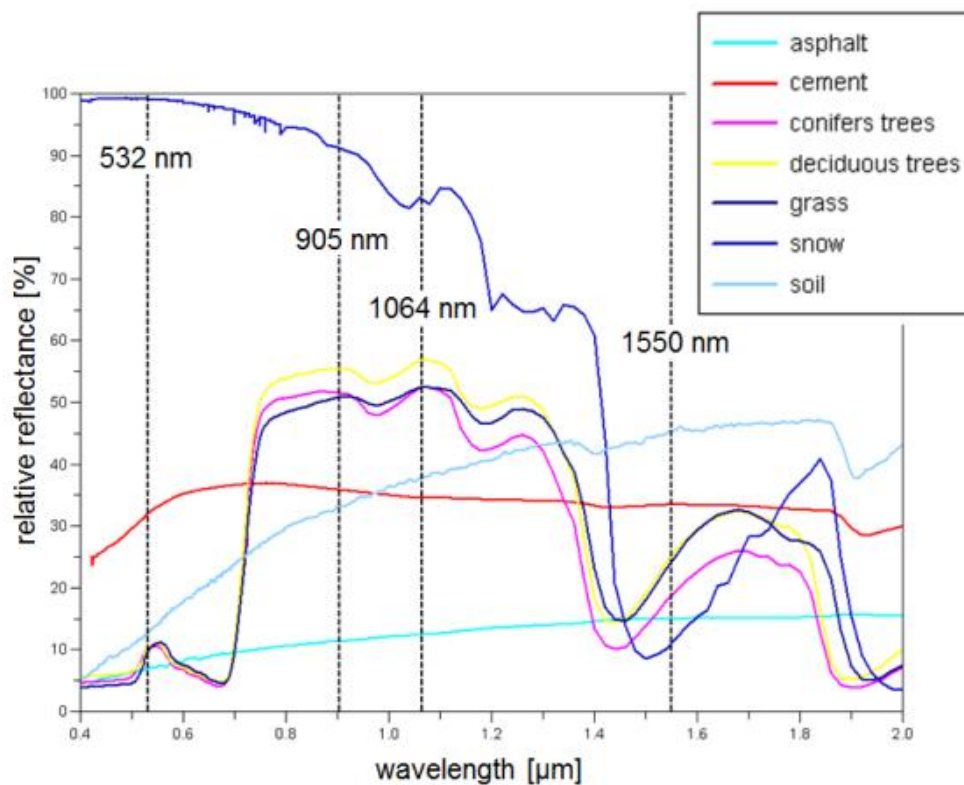
Puolijohdelaserin valmistusmenetelmästä johtuen, säteen ulostuloaukko on yleensä epäsymmetrinen. Epäsymmetrisuus lisää aukossa syntyvää diffraktiota ja näin ollen kasvattaa divergenssiä. Epäsymmetrisuus korjataan erilaisten linssien avulla, joilla muun muassa divergenssiä saadaan vähennettyä.[1]



Kuva 11. Esimerkkikuva puolijohdelaserin divergenssistä, jossa säde on elliptinen.[1]

3.5 Heijastuminen

Heijastumista tapahtuu, kun laservalo osuu eri aineiden rajapintoihin. Heijastumiseen vaikuttavat muun muassa heijastavan pinnan materiaali, mittaussignaalin aallonpituus, pinnanmuoto sekä mittauskulma. Ideaalisen tasaisesta pinnasta laservalo heijastuu kuvan 12 mukaisesti. Heijastuspinnan epätasaisuuden kasvaessa satunnaisten heijastumien määrä kasvaa, kuten kappaleessa 3.2. Tällöin osa laservalosta heijastuu satunnaiseen suuntaan ja takaisinheijastuvan säteilyn määrä pienenee.[1] Aallonpituus vaikuttaa heijastuvan laservalon määrään eri aineilla eri tavalla (kuva 12).[14]

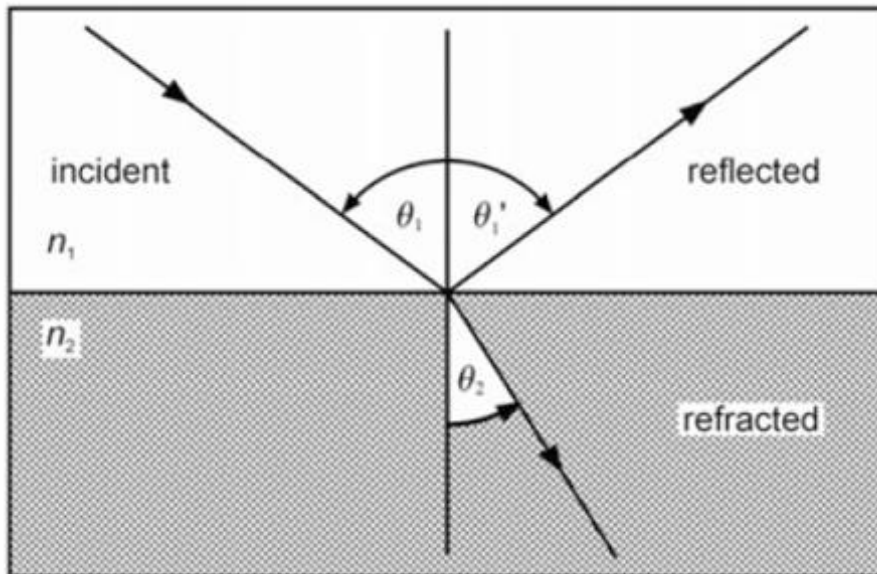


Kuva 12. Esimerkkikuva aallonpituuden vaikutuksesta heijastavuuteen eri aineilla.[14]

3.6 Taittuminen ja absorptio

Laservalon osuessa aineiden rajapintaan osa valosta läpäisee pinnan ja siirtyy aineesta toiseen. Siirtyessään aineeseen osa valosta taittuu ja osa absorboituu aineeseen. Laservalon taittuessa kuvan 12 mukaisesti, sen nopeus ja kulma muuttuvat aineiden erilaisista taitekertoimista johtuen. Taittumiskulman suuruuteen vaikuttavat aallonpituus sekä aineiden taitekertoimet. Absorboituessa aineeseen valo voi muuttua

lämmöksi ja siirtyä esimerkiksi lämpösäteilynä pois aineesta [6]. Laseretäisyysmittauksissa taittumisen ja absorptioon määrä mittaussäilymatkalla ja mittaussäilykohteena olevassa pinnassa on vähäistä.[1]



Kuva 12. Esimerkkikuva heijastumisesta ja taitumisesta.[1]

3.7 Vaimeneminen

Sähkömagneettisen aallon teho vaimenee ilmakehässä. Vaimennusta aiheuttaa muun muassa laservalon leviäminen ympäristöön, sen osuminen ilmakehässä oleviin molekyyleihin, partikkeleihin sekä kohteena olevaan pintaan [1,15]. Ympäristöön leviämistä kutsutaan vapaan tilan vaimennukseksi FSL (Free Space Loss) [15]. Osumien seurauksena laservaloa muun muassa siroaa, absorboituu ja uudelleen ohjautuu satunnaiseen suuntaan. Näiden seurauksena vastaanotetun signaalin teho on heikentynyt merkittävästi lähetettyyn signaaliin verrattuna.

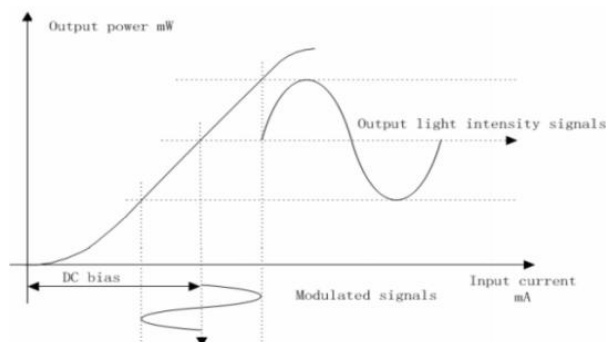
Ilmakehässä tapahtuvan vaimenemisen vaikutusta saadaan pienennettyä kasvattamalla aallonpituutta. Vaimennuksen määrä pienenee tällöin etenkin Rayleightin sironnan osalta, joka vaikuttaa aallonpituuden ollessa reilusti pienempi kuin vaikutuksen kohteena olevat partikkelit ja molekyylit.[1] Näin ollen kasvattamalla aallonpituutta lähetetyn signaalin tehon tarvetta voidaan pienentää tai mittaus etäisyyttä pidentää. Optisissa kuiduissa esiintyy myös suurena vaimennuksen aiheuttajana Rayleightin sirontaa, joka johtuu kuidun rakenteen epäpuhtauksista [30].

4 LASERETÄISYYSMITTALAITTEEN TOIMINTAPERIAATE

LIDAR (Light Detection And Ranging) on optinen etäisyydenmäärityslaite, josta käytetään myös nimeä LADAR (Laser Detection And Ranging). Laseretäisyysmittalaitteiden toiminta perustuu laservalon sähkömagneettisten ominaisuuksien mittaamiseen. Pääasiassa käytetään mittaussuunnitelmia: TOF (Time of Flight) eli laserpulssin edestakaisen kulkuajan mittausta ja CW (Continuous Wave) eli jatkuva-aaltoista vaihe-ero mittausta. Mittausmenetelmissä laserin optista tehoa moduloidaan käyttäen erilaisia modulaatiotekniikoita. Mittauksen tarkkuus on mm. riippuvainen mittaussuunnitelmasta ja mittalaitteiden komponenttien tarkkuudesta. Lasermittalaitteiden rakenne on sidoksissa laitteessa käytettävään mittaussuunnitelmaan. Mittalaitteen perusrakenteeseen kuuluu aina laserlähetin ja vastaanottavana komponenttina fotodiodi. Tässä luvussa perehdytään pintapuoleisesti etäisyysmittalaitteissa käytettäviin modulaatioihin ja mittaussuunnitelmiin. Luku käsittelee myös lasersignaalin lähetystä, vastaanottoa ja niissä käytettäviä komponentteja.[16]

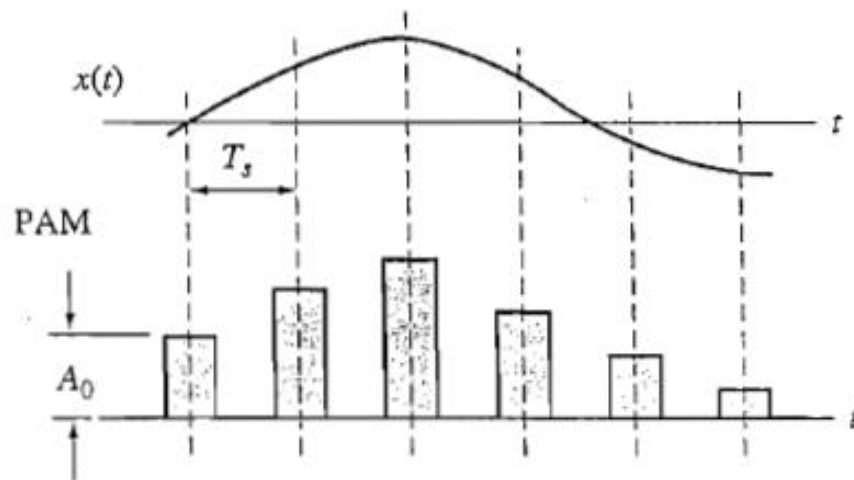
4.1 Modulaatiot

Modulaatiolla tarkoitetaan lähettimessä kanta-aaltona toimivan laservalon yhdistämistä esimerkiksi sinimuotoiseen viestisignaaliin. Vastaavasti käänteinen operaatio demodulointi tehdään vastaanotimessa, jossa viestin tulkitsemiseksi viestisignaali erotetaan kanta-aallosta. Laserlähettimissä käytettäviä modulaatioita kutsutaan intensiteettimodulaatioiksi. Intensiteettimodulaatiossa kanta-aaltona toimivan laservalon optinen teho vaihtelee moduloivan sinisignaalin tahdissa, kuten kuvassa 13.[17]



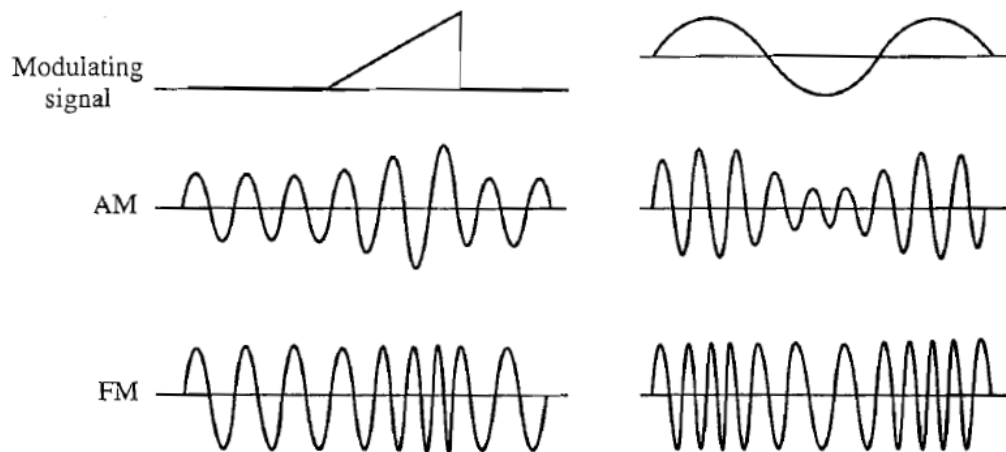
Kuva 13. Esimerkkikuva puolijohdelaserin modulaatio-ominaisuuskäyrästä.[18]

Modulaatiolajeja on useita, mutta laseretäisyysmittalaitteissa käytetään enimmäkseen pulssimodulaatiota, AM-modulaatiota (Amplitude Modulation) tai FM-modulaatiota (Frequency Modulation), kuvat 14 ja 15. Modulaatiolaji vaihtelee käytettävien mittalaitteiden mittauseriaatteen mukaisesti. Pulssimodulaatiossa voidaan muodostaa pulssi yksinkertaisesti kytkemällä laserlähettintä päälle ja pois. Käytännössä laserlähettimissä tämä voidaan tehdä käyttämällä PAM-modulaatiota (Pulse Amplitude Modulation) (kuva 14). PAM-modulaatiossa laserin optisen tehon amplitudi nostetaan tarvittavalle tasolle halutun pituiseksi ajaksi.[16,17]



Kuva 14. Esimerkkikuva PAM-modulaatiosta.[17]

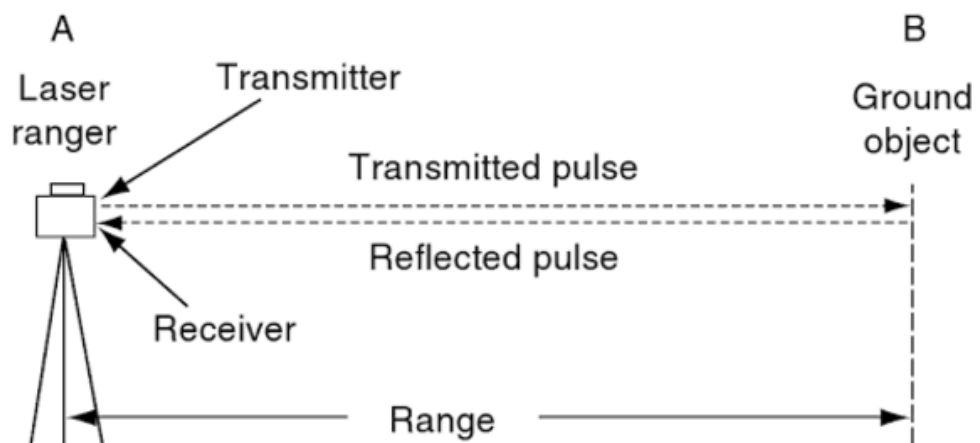
AM- ja FM-modulaatioita käytetään jatkuva-aaltoisen kanta-aallon moduloinneissa (kuva 15). AM-modulaatiossa kanta-aallon amplitudia vaihdellaan moduloivan signaalin tahdissa. Mittaussignaali ($x(t)$) kulkee verhoikäyrässä, kuten kuvassa 14. Verhoikäyrässä voidaan lähettää yksittäinen pulssi tai muuttaa verhoikäyrän aallonpituutta moduloivan signaalin avulla.[17] FM-modulaatiossa eli taajuusmodulaatiossa kanta-aallon taajuus muuttuu, ja näin muuttuu myös aallonpituus moduloivan signaalin mukaisesti, kuten kuvassa 15. Käytännössä taajuusmodulaatio voidaan toteuttaa usealla eri laserilla tai muuttamalla säädettävän laserin aallonpituutta. Se voidaan myös toteuttaa käyttämällä edellä mainittua AM-modulaatiota ja muuttamalla sen verhoikäyrän aallonpituutta.[1,16,17]



Kuva 15. Esimerkkikuva AM- ja FM-modulaatiosta.[17]

4.2 Lasersäteen kulkuajan mittaus

TOF-menetelmässä lähetetään tehokas ja lyhyt laserpulsssi mitattavalla etäisyydellä olevaan kohteeseen, josta säteily heijastuu takaisin. Lähetetyn ja vastaanotetun laserpulssin edestakainen kulku-aika (t) mitataan tarkasti. Valonnopeuden (c) ja kulkuajan (t) avulla saadaan laskettua mitattu etäisyys s kaavalla ($s=(c*t)/2$), jossa (s) on etäisyys, (c) on valonnopeus ja (t) on edestakainen kulku-aika.[2]

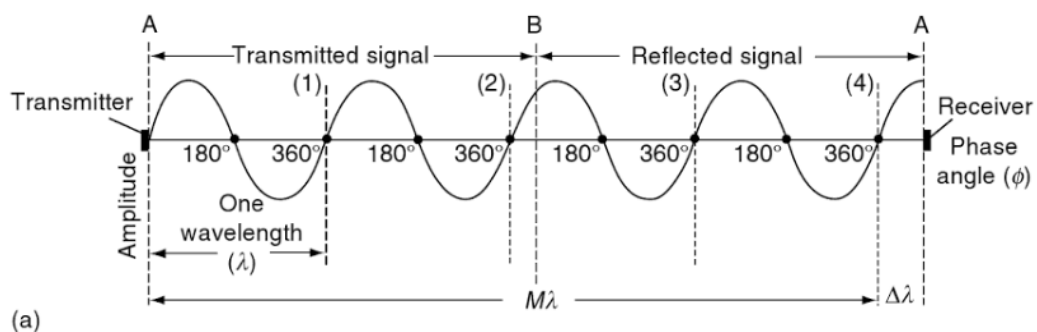


Kuva 16. Esimerkkikuva TOF-menetelmään perustuvasta etäisyysmittauksesta.[2]

TOF-menetelmää käytetään sen nopeuden vuoksi suurimmassa osassa rakennusmittauksissa käytettävissä lasermittalaitteissa. Mittausmenetelmän etuna on laserlähettimen ja vastaanottimen yksinkertainen rakenne sekä pitkä mittausetäisyys. Haittapuolena on mittatarkkuuden heikentyminen pitkillä etäisyyksillä noin 1–10 cm. Lyhyillä etäisyyksillä kuten 1–100 m:ä päästään kuitenkin joidenkin mm:en tarkkuuteen. Mittaustuloksen tarkkuus on suoraan sidoksissa mittauskomponenttien tarkkuuteen. Käytännössä lyhyillä etäisyyksillä mm:n tarkkuus edellyttää ajanmittauskomponentilta noin 7 ps:n tarkkuuden. Tarkkuutta saadaan myös parannettua mittaamalla useita näytteitä ja keskiarvoistamalla ne.[19],[2,16,18,19]

4.3 Vaihe-eromittaus

Vaihe-eromittauksessa lähetetään pulssin sijasta jatkuva moduloitu CW-lasersignaali. Lähetetyn moduloivan ja vastaanotetun demoduloitun signaalin vaihe-erokulma mitataan tarkasti digitaalisella pulssilaskentamenetelmällä. Vaihe-erokulman avulla saadaan laskettua osa-aallonpituuden suuruus. Etäisyys saadaan laskettua moduloivan signaalin osa-aallonpituuden ja kokonaisten aallonpituuksien avulla (kuva 17). Etäisyys voidaan mitata usealla eri aallonpituudella muuttamalla modulaatiotaajuutta. Laskennallisista menetelmistä usealla erilaisella aallonpituudella käytetään määrittämään kokonaisten aallonpituuksien määrä, ja lopullinen vaihe-ero.[2,16,19] Vaihe-eromittauksella päästään alle mm:n tarkkuuteen. Useiden aallonpituuksien mittaamisella haittapuolena on mittauksen hitaus sekä lyhyempi mittausetäisyys verrattuna TOF-menetelmään. Menetelmä vaatii myös monimutkaisemman signaalinkäsittelyn, ks. luku 4.4.[16,19]



Kuva 17. Esimerkkikuva jatkuva-aaltoisen laserin vaihe-eromittauksen periaatteesta.[2]

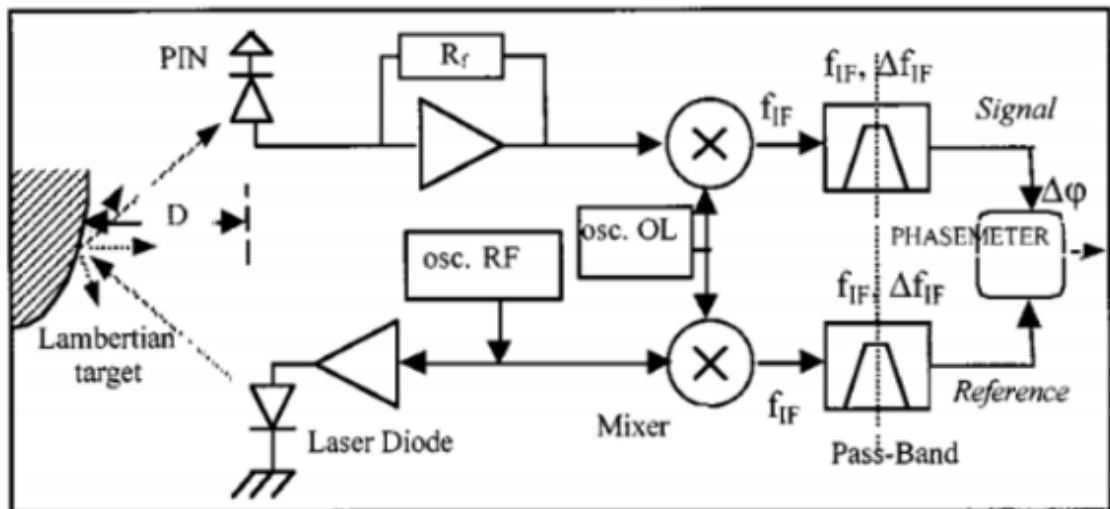
4.4 Lasersignaalin lähetys ja vastaanotto

Mittaussignaalin lähettäminen tapahtuu laserdiodilla, jossa on kollimointilinssit, seostettu YAG-kristallitanko tai molemmat [2]. Komponentissa voi olla integroituna tai ulkoisena laserin optista tehoa tarkkaileva fotodiodi, joka on takaisinkytketty mm. lämpötilan säätelyyn, tehon tasaisuuden ja tarkkuuden parantamiseksi. Lähettimissä aallonpituudet syntyvät laseroituvassa materiaalissa, joten jokaiselle aallonpituudelle on oltava oma materiaali ja näin ollen oma lähetin, ks. luku 2.3. On myös olemassa säädettäviä lasereita, kuten esimerkiksi DFB-lasereita (Distributed Feedback laser), joiden kavitteetissa on useampia peilejä sarjassa ja ne säätävät jakson aikaa muuttamalla [9].

Pulssin vastaanotto tapahtuu fotodiodilla, jolla voidaan ottaa vastaan laaja aallonpituusalue. Fotodiodina käytetään yleensä APD:tä tai PIN-diodia, joiden -3 dB:n vastaanottokaista on noin $f_{-3\text{dB}}=1-2$ GHz:ä.[16] APD eroaa PIN-diodista vastaanottoherkkyyden ja kohinan suuruudella. APD:llä kyetään saamaan noin 50-200 kertaa parempi herkkyys verrattuna PIN-diodiin. Varjopuolena tälle on mm. suuren herkkyuden nostama lisäkohinan määrä ja reilusti korkeampi käyttöjännite 50 -200 V:a.[16]

TOF-menetelmässä ajanotto käynnistetään laserpulssin lähetyksestä ja pysäytetään takaisin heijastuneella pulssilla[19]. Laserin pulssi voidaan yksinkertaisimmillaan muodostaa BJT-transistori (Bipolar Junction Transistor), jolla kyetään luomaan riittävän tehokas ja lyhyt pulssi. Aika voidaan mitata esimerkiksi laskemalla kellopulsseja TDC Time to Digital Converterin avulla tai käyttämällä TAC Time to Amplitud Converteria.[16]

Vaihe-eroon perustuvassa menetelmässä voidaan käyttää mitaussignaalin käsittelyyn heterodyne-tekniikalla toimivaa rakennetta, kuten kuvassa 18. Heterodyne-tekniikalla kyetään mittaamaan vaihesiirtoa etäisyyden funktiona ja optista tehoa voidaan moduloida jatkuvalla taajuudella, joka tuotetaan pääoskilaattorilla (kuva 18). Vaiheensiirto lasketaan välitaajuudesta ja mitattu etäisyys saadaan laskettua vaiheensiirrosta.[19]



Kuva 18. Esimerkkikuva vaihe-eromittauksen signaalinkäsittelystä, joka on toteutettu heterodyne-tekniikalla.[19]

Vastaanottimissa alhaisinta signaalitehoa, jota kyetään tulkitsemaan, kutsutaan herkkyudeksi. Muun muassa lähetetyn signaalin teho, matkalla tapahtuvat vaimennukset ja vastaanottimen herkkyys määrittävät laseretäisyysmittalaitteiden mittausetäisyyden. Optisessa tiedonsiirrossa nämä ominaisuudet määrittävät niin sanotun linkkibudjetin.[15]

5 INVENTOINTIMITTAUS JA MITTALAITTEET

Inventointimittauksen tavoite on saada ajantasaista mittatietoa rakennuksen mittaushetkellä olevasta tilasta. Inventointi- ja mittatietomallin rakenne vaihtelee tapauskohtaisesti. Mittatietomallin rakenteeseen vaikuttaa oleellisesti mittalaitteen valinta. Tämä luku käsittelee inventointimittausta, mittatietomallin muodostamista ja mittauksessa käytettäviä mittalaitteita.[20,21]

5.1 Inventointimittaus

Inventointimittauksilla tarkoitetaan valmiiden rakennusten tai rakennelmien todentamismittauksia. Mittaukset tehdään rakennusten korjaus- ja muutostarpeiden kartoittamisen helpottamiseksi. Yleensä niitä tehdään vanhoihin rakennuksiin, joista ei ole ajantasaisia rakennuspiirustuksia. Mittauksilla selvitetään rakenteiden tila ja niille ajan kuluessa tapahtuneet rakenteelliset muutokset. Näitä voivat olla esimerkiksi huoneistojen sisäiset väliseinien muutokset tai rakennuksen rakenteiden painumisen aiheuttamat muutokset.

Rakennuspiirustuksia voidaan päivittää osittaisella inventointimittauksella, jos ne ovat muuten ajantasalla. Yleensä joudutaan kuitenkin tekemään kokonaisvaltainen inventointimittaus paikkaansa pitävien mittatietojen saamiseksi. Tämä johtuu puuttuvista tiedoista ja eriävistä mittatarkkuuksista yms.

Mittaustuloksista luodaan mittatietomalli, jota käytetään pohjana lopullisen inventointimallin suunnittelussa. Mittatietomallin tarkkuus ja laajuus määräytyy tarvittavan inventointimallin tavoitteiden perusteella. Mittatietomallin rakenne määräytyy pääosin käytettävän mittalaitteen mukaan ja se voi olla muodoltaan 2- tai 3-ulotteinen kuva tai pistepilvi.

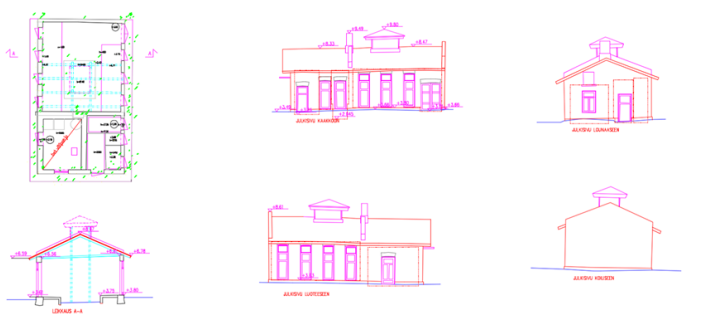
Lopullinen digitaalisessa muodossa oleva inventointimalli luodaan mittatietomallista, materiaali- ja rakennetiedoista sekä valokuvista. Yleensä lopullinen tietomalli on 2D-rakennuspiirustukset, 3D-mallinnus rakennuksesta tai molemmat. Inventointimallin avulla voidaan esimerkiksi arvioida korjauksen ja rakentamisen kustannuksia ja tarvittavia materiaaleja. Sen avulla voidaan tehokkaasti myös ennaltaehkäistä rakentamisvaiheessa syntyviä virheitä.[20,21]

5.2 2D-mittatietomallin muodostaminen

Rakennuksen 2D-inventointiomalli koostuu julkisivu-, pohja- ja leikkauskuvista. 2D-inventointimalli on yleensä suunniteltu käyttämällä AutoCad-, ArchiCAD- tai vastaavia ohjelmistoja. Kuvien muodostamiseen tarvitaan mittatietomalli, joka yleensä mitataan käyttämällä useampaa erilaista etäisyysmittalaitetta. Mittaukset voidaan jakaa sisätiloissa ja ulkona tapahtuviin mittauksiin.

Ulkotiloissa mitataan rakennuksen ympärillä oleva maasto ja seinien ja katon rakenteet. Maastosta mitataan muodot kuten teiden ja viheralueiden muoto sekä pensaiden ja puiden sijainti. Rakennuksesta pyritään saada mitattua ulkoseinien muodot ja pituudet sekä ikkunat ja ovet. Katoista pyritään saamaan muoto, kaikki hormit, savupiiput yms. Ulkopuolelta mitataan myös sisätilojen lattioiden korkeuksia ja muutamia yhteisiä kiintopisteitä. Ulkona laajemmat mittaukset tehdään käyttäen lasertakymetriä, laserkeilainta tai molempia, ks. luku 5.3. Tällöin mitatut alueet ja rakenteet saadaan suoraan sisällytettyä koordinaatistoon.

Sisätiloissa mitataan huoneet ja niiden sijainti toisiinsa nähden. Huoneista mitataan tapauskohtaisesti esimerkiksi seinien paksuudet, ovet, ikkunat, LVI-kalusteet ja kiintokalusteet kuten keittiöt. Rakennuksissa olevien kapeiden käytävien, pienten huoneiden ja mittalaitteiden pienimmän mittausetäisyyden vuoksi sisätilojen mittaus tapahtuu lähes aina käyttämällä lasermittaa. Poikkeuksena ovat suuret ja korkeat tilat, kaarevat pinnat tai paljon yksityiskohtia sisältävät kohteet kuten taideveistosseinät. Sisätiloissa ja ulkona tehtyjen mittausten tulokset yhdistetään toisiinsa käyttämällä yhteisiä ennalta suunniteltuja kiintopisteitä. Yhdistämistä ennen eri mittalaitteiden mittaustulokset on muokattava mittalaitteiden ohjelmistoilla yhteensopivaan muotoon.[20,21]



Kuva 19. Esimerkkikuva luonnoksesta, jossa inventointimittaustuloksien avulla piirretty julkisivu-, pohja- ja leikkauskuvat.[22]

5.3 Inventointimittauksessa käytettävät mittalaitteet

Tässä työssä käytettiin kolmea erilaista laseretäisyysmittalaitetta. Tämä luku käsittelee lyhyesti ja pintapuoleisesti inventointimittauksessa käytettyä Leica Disto A3 -lasermittaa, Nikon NPL-350 -pulsasilasertakymetriä ja Rigel VZ-1000 -laserkeilainta.

5.3.1 Lasermitta

Lasermittalla tarkoitetaan kämmenellä käytettävää lasermittalaitetta, jolla mitataan yksittäisiä mittoja. Mittaus tapahtuu asettamalla mittalaite mitattavien pintojen väliin esimerkiksi huoneen seinälle ja kohdistamalla laserosoitin haluttuun kohtaan. Mittauksessa on huomioitava mittalaitteen kohtisuoruus sekä pysty- että vaakasuunnassa. Huonolla kohdistamisella voi tulla useiden mm:en virhe. Paremmilla ominaisuuksilla varustetuissa lasermittoissa on kulman tunnistava anturi, jonka avulla mittalaite voi korjata kulmista johtuvan virheen mittaustulokseen. Tästä ei ole kuitenkaan hyötyä, jos seinät ovat vinoja. Mittauksen edetessä onkin arvioitava tarkkuutta sekä silmämääräisesti seinien vinoutta. Mittausasetuksissa voidaan valita laitteen mittaussento, joka lisää tai vähentää mittalaitteen oman pituuden mittaustuloksesta, kuten kuvassa 20.[3,20,23]



Kuva 20. Esimerkkikuva Leica Disto A3 -laseretäisyysmittalaitteesta.

Mittaustulos sisältää yleensä vain etäisyystiedon eikä esimerkiksi koordinaatistoa kuten takymetrissä tai keilaimessa. Tästä johtuen on mitattava järjestelmällisesti niin, että mitat voidaan jälkeinpäin sitoa toisiinsa. On olemassa myös kämmenlasermittoja, joilla kyetään mittaamaan kolmiulotteisia mittoja. Tällöin mittalaite on yleensä kiinnitettävä

erilliseen kolmijalkaan mittauksen ajaksi. Mittalaitteesta riippuen mittaustiedot voidaan tallentaa, joko sähköisesti tietokoneeseen tai käsin kirjoittamalla. Yleensä pienissä kohteissa mittaustulokset kirjoitetaan pdf-tiedostolla tai paperilla olevaan rakennuksen pohjakuvaan, julkisivukuvaan tai mittaushuoneesta otettuihin valokuviin. Nämä kuvat ja mitat yhdessä toimivat alustavana mittatietomallina. Mittaustulokset on mahdollista myös saada suoraan digitaaliseen muotoon käyttämällä esimerkiksi Leica DISTO™ D810 -mittalaitetta ja Leica DISTO –sketchsovellusta, kuten lähteessä [25]. [3,20,23,25]

Digitaalisen tietomallin luominen tapahtuu alustavasta mittatietomallista piirtämällä suoraan valmiiksi tuotteeksi. Tuote on yleensä 2D-kuva, joka on piirretty AutoCadilla tai vastaavilla suunnitteluohjelmistoilla. Mittausmenetelmän etuna on yksinkertaisten rakenteiden tehokas mittaussnopeus ja kohtalainen mittatarkkuus. Esimerkiksi nelikulmaisen huoneen sisämitat saadaan nopeasti mitattua. Menetelmässä on kuitenkin huonoja puolia, kuten pyöreiden ja kaarevien pintojen mittaamisen vaikeus. Kaarevien tai muuten muodokkaiden pintojen mittaaminen ilman koordinaatiston apua on lähes mahdotonta hyvän lopputuloksen saavuttamiseksi. Mittausvirheen kertautuminen mittausten edetessä huoneiden välillä myös muodostuu ongelmaksi. Tämä johtuu seinien toleranssieroista, rakenteiden vinouksista ja pinnankarkeuksista yms. Virheitä syntyy myös inhimillisillä erehdyksillä. Väärällä asetuksella mitattaessa voi mittalaitteen oman pituuden suuruinen virhe jäädä huomaamatta. [3,20,23]

5.3.2 Lasertakymetri

Lasertakymetri on mittalaite, jolla mitataan pisteitä kolmiulotteiseen koordinaatistoon. Pisteiden koordinaatit muodostetaan mittaamalla etäisyys, kääntösäde ja pystykulma. Pisteiden koordinaattien muodostaminen, sekä pistepilvien yhdistämiseen liittyvä matemaattiseen taustaan voi perehtyä esimerkiksi lähteestä [4]. Pisteistä muodostuu pistepilvi, jossa voi olla pisteitä sadoista tuhansiin. Takymetrioiden tehokkuus perustuu mittauksesta saatavaan oleelliseen mittaustietoon, joka ei sisällä mitään tarpeetonta informaatiota. Lisäksi data on valmiiksi lähes oikeassa muodossa.

Takymetreissä käytetään yleensä erillistä maastonmittaustietokonetta, joka on kytketty takymetriin langattomalla yhteydellä tai tiedonsiirtokaapelilla. Mittalaitteen ominaisuuksista riippuen mittausta voidaan suorittaa usealla tavalla. Mittaus voi tapahtua manuaalisesti esimerkiksi tähyttämällä takymetrissä olevan optiikan läpi, ja tämän jälkeen suuntaamalla ja tarkentamalla laitteen optiikka haluttuun mittauspisteeseen.

Toinen tapa on käyttää näkyvää laserkohdistinta kuten lasermitassa, mutta kohdistuspiste ei välttämättä erotu pitkän matkan päästä ja kirkkaassa päivänvalossa. Kolmas tapa on käyttää prismaa, niin sanottua tutkaheijastinta, joka voi olla säädettävän kepin päässä kuten kuvassa 21 oikealla.



Kuva 21. Kuvassa Nikon NPL-350 -lasertakymetri kolmijalan päällä. Takymetriin on kytketty Husky FS/2 -maastonmittaustietokone keskellä. Oikealla olevassa kuvassa prisma, jossa säädettävä teleskooppisauva.

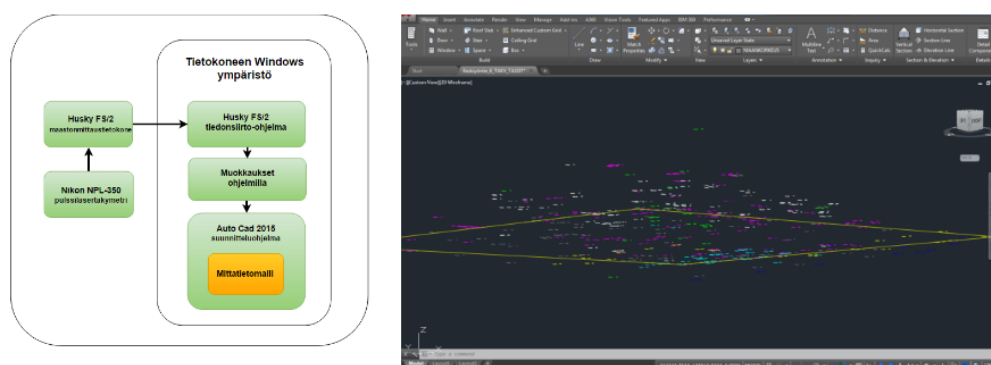
NPL-350 -takymetri toimii maastonmittaustietokoneelle niin sanottuna orjalaitteena (kuva 21). Se mittaa pisteen ja lähettää koordinaatit MM-tietokoneelle. Maastonmittaustietokone suorittaa pisteiden tallennuksen ja muun laskennan kuten lähtökorkeuden ja orientoinnin laskemisen. Lähtökorkeus voidaan mm. määrittää mittaamalla N2000-koordinaattijärjestelmän korkeuskiintopiste tai tarkkuus GPS:llä (Global Positioning System).

Laitteen asemointi uuteen sijaintiin edellyttää orientoinnin, jolla laitteen uusi sijainti määritetään koordinaatistoon. Tämä tehdään liitospisteiden avulla, jotka on määritetty ennen siirtoa mittaamalla tarkalla mittausasetuksella. Liitospisteet merkitään esimerkiksi tähystarroilla tai muulla tavalla, jotta ne voidaan jälkepäin havaita. Liitospisteitä on oltava vähintään 2 kappaletta ja niiden on sijaittava näköetäisyydellä uudessa asemointipaikassa. Yleensä mittauksessa pyritään mahdollisimman vähäisillä mittalaitteen siirroilla saamaan riittävät mittaustulokset. Ideaalitulanteessa nelikulmisen rakennuksen ulkoseinät on mahdollista mitata kahdella mittalaitteen asemointipisteellä. Tällöin mittalaite asemoidaan rakennuksen vastakkaisille kulmille, jotta saadaan

mitattua kaksi ulkoseinää yhdellä asemoinnilla. Käytännössä muut rakennukset, liikenne ja kasvillisuus estävät suoran näköyhteyden useasta kohtaa rakennusta, minkä seurauksena joudutaan tekemään useampia siirtoja.[3,20,24]

NPL-350 -takymetri on tarkoitettu pienimuotoisten mittauskohteiden kuten korkeusasemien, tonttien ja julkisivujen mittaukseen. Takymetrissä käytettävän lähi-infrapuna alueella olevan laservalon aallonpituus on 870 nm:ä. Tämä aallonpituus sijoittuu laserluokkaan 1, ja sen käyttö on turvallista normaaleissa olosuhteissa. Mittausnäky on panoraama tyyppinen, jossa pystyasennossa mittauskulmat ovat (+30 / -30) vaakatasoon nähden. NPL-350 -takymetrissä mittausetäisyys voi olla ilman prismaa lähimmillään 1,6 m:ä ja enimmillään noin 100 m:ä. Mittatarkkuus on +/- 3 tai 5 mm:ä riippuen mittausasetuksista, joka on erinomainen kyseisiin mittauksiin.[20,24]

Tiedonsiirto laitteiden välillä tapahtuu erillisten tiedonsiirtokaapelien välityksellä. Takymetristä tulevat koordinaatit tallentuvat maastonmittaustietokoneeseen, jossa oleva maastonmittausohjelma suorittaa kaikki laskelmat orientointien ja korkeuserojen suhteen. Mittauksen valmistuttua, maastonmittausohjelman avulla valmis mittaustulostiedosto muutetaan ASCII (American Standard Code for Information Interchange) muotoon. Tiedosto siirretään tämän jälkeen Windows-ympäristöön Husky FS/2 -tiedonsiirto-ohjelmalla. Tiedoston sisältöä muokataan usealla ohjelmalla, joiden lopputuloksena tiedostomuoto muuttuu DXF-muotoon. DXF-tiedosto on Autodeskin kehittämä tiedostomuoto CAD-ohjelmien väliseen tiedonsiirtoon. Valmis mittatietomalli voidaan tämän jälkeen avata AutoCad-ohjelmassa ja aloittaa inventointimallin suunnittelu.[20,24]



Kuva 22. Kuvassa lohkokaavio NPL-350 -takymetrin tiedonsiirrosta ja omakotitalon mittaustuloksista muodostetusta pistepilvestä. Keltaiset viivat kuvaavat tontin rajoja.[22]

5.3.3 Laserkeilain

Laserkeilaimilla mitataan kolmiulotteiseen koordinaatistoon pisteitä ja koordinaatit saadaan muodostettua kuten takymetrilläkin. Mittaus perustuu yleensä edellä mainittuun TOF-periaatteeseen. VZ-1000 -laserkeilaimessa käytetään täydennäällön mittausmenetelmää. Menetelmässä yhden pisteen mittauksella saadaan mitattua useita pisteitä eri etäisyyksiltä. Mittauksessa voidaan vastaanottaa useita peräkkäisiä heijastuksia, joita voi tulla esimerkiksi kasvillisuuden läpi mitatessa.

Mittausnäky on panoraama tyyppinen, jossa vaakatasoon nähden mittaus kulmat ovat (+60 / -40). Mittalaitteessa käytetään neljää mittausnopeutta. Nopeimmillaan mittalaite mittaa 122000 kHz:n taajuudella. Tällöin mittauspisteitä voi kertyä jopa miljoonia pisteitä sekunnissa. Minimi mittausetäisyys on 2,5 m:ä ja maksimi mittausetäisyys riippuu käytettävästä mittaustaajuudesta ja mittauspinnan heijastavuudesta. Heijastavuuden ollessa 90 %:a mittausetäisyys on 1400 m:ä. Mittaustarkkuus kokonaisuudessaan on 8 mm:ä 100 m:n etäisyydellä.[26,27,28]

Toisin kuin takymetrissä laserkeilaimen muodostamassa yhdessä pistepilvessä voi olla useita kymmeniä miljoonia pisteitä. Laserkeilain mittaa automaattisesti kaiken mittausetäisyydellä olevasta ympäristöstä ennalta määritettyjen asetusten mukaisesti. Tämä minimoi inhimillisen virheen mittauksessa. Mittalaite ei kykene huomioimaan mittauksen aikana muuttuvaa ympäristöä, kuten autoja ja jalankulkijoita. Nämä voivat aiheuttaa katvealueita mittaustuloksiin. Katvealueisiin on kiinnitettävä huomiota mittausta suunniteltaessa ja tehtävä useampia mittauksia tarpeen mukaan.

Laitteen siirtäminen ei vaadi erillistä orientointia mittaustaikalla, kuten takymetrissä. Pistepilven sijainti ja suunta tallentuu sisäisen GPS:än ja kompassin avulla. Tämä mahdollistaa karkean pistepilvien sijoittelun mittaustyön jälkeen. Kaikki mitatut pistepilvet saadaan yhdistettyä mittauksen jälkeen yhdeksi suureksi pistepilveksi käyttämällä RiSCAN PRO -ohjelmistoa. Ohjelmiston avulla pistepilvet voidaan yhdistää mm. käyttämällä keilatuista tähyksistä saatuja liitospisteitä tai käyttämällä verkkotasoitusta, kuten lähteessä [27].

Keilaimessa on järjestelmäkamera, joka kuvaa ympäristön keilausalueelta. Näin pistepilvessä oleville pisteille tulee myös oikeat värit. Tiheällä pistevälillä keilatun kohteen pistepilvi on kuin virtuaalinen kolmiulotteinen tila, jossa voi liikkua hiiren avulla, kuten kuvassa 28.

Tiedonsiirto keilaimen ja tietokoneen välillä tapahtuu USB-muistitikun, LAN- tai WLAN-yhteyden avulla. USB-muisti on nopein tapa saada tiedostot siirrettyä. Tällöin keilain voi olla toisella mittauspaikalla käytössä, kun aikaisemman mittauspaikan tietoja käsitellään.[20, 26,27]

6 MITTAUSTYÖ JA TULOKSET

Työn kohteena oli 1900-luvun vaihteessa rakennettu tiilinen piharakennus (kuva 23). Rakennukseen oli tarkoitus tehdä käyttötarkoituksen muutos, jossa varastotila muutetaan asunnoksi. Rakennukseen oli tehtävä tämän vuoksi kattava inventointimittaus, jossa rakennuksen päämitat ja mahdolliset poikkeavuudet, kuten painuminen ja seinien vinous, tulee esille. Inventointimallin tavoite muodostaa ajantasaiset 2D-rakennuslupapiirustukset. Rakennus mitattiin ensin sisältä lasermitalla, jonka jälkeen ulkopuolelta lasertakymetrillä ja laserkeilaamalla. Mittaus suoritettiin kaikilla kolmella menetelmällä, jotta niitä kyettäisiin vertailemaan toisiinsa. Tämä luku käsittelee tehtyä mittauustyötä sekä työstä saatuja mittaustuloksia.



Kuva 23. Tiilisen piharakennuksen mittausnäkyvät kuvattu mittausspaikalla.

6.1 Lasermitalla mittaus

Rakennus mitattiin sisäpuolelta Leica DISTO A3 -lasermitalla. Mittaustulokset kirjoitettiin rakennuksesta kuvattuihin pdf-valokuviin. Huoneista mitattiin päämitat, korkeudet ja seinien paksuudet. Huoneista mitattiin myös kaikkien ovien koko ja niiden sijainti valittuun kiintopisteeseen nähden, jotta mittaustuloksista kyettäisiin myöhemmin muodostamaan rakennuksen pohjakuva suunnitteluohjelmien avulla. Lisäksi sisäpuolella oli kantavia puupilareita, joiden sijainti ja koko mitattiin. Silmämääräisesti tutkittuna rakennuksen sisällä päätyseinän pinnan suoruuden vaihtelu oli +/-30 mm:ä, joissakin kohdissa jopa +/- 50 mm:ä. Rakennuksen lattia oli myös epätasainen, ja siinä oli tasoeroja. Sisältä otetut korkeusmitat ovat näin ollen suuntaa-antavia ja mittatarkkuus on +/- 25 mm:ä. Mittaukseen kului aikaa noin 2 tuntia.



Kuva 24. Kuvat rakennuksen sisältä, jossa vasemmalla puupilarit ja palkit. Oikealla mitatut ovet ja epätasainen lattia.

6.2 Takymetrimittaus

Takymetrimittauksessa käytettiin NPL-350 –pulsilasertakymetriä, jolla mitataan tähyttämällä optiikan läpi, kuten edellä kappaleessa 5.3.2. Työ aloitettiin määrittämällä korkeuden lähtötasoksi N2000-koordinaattijärjestelmän korkeuskiintopiste. Korkeuskiintopiste sijaitsi tienristeyksessä talonkulmalla (kuva 25). Korkeuskiintopiste mitattiin Annankadulta punaisen pallon kohdalta (kuva 25).

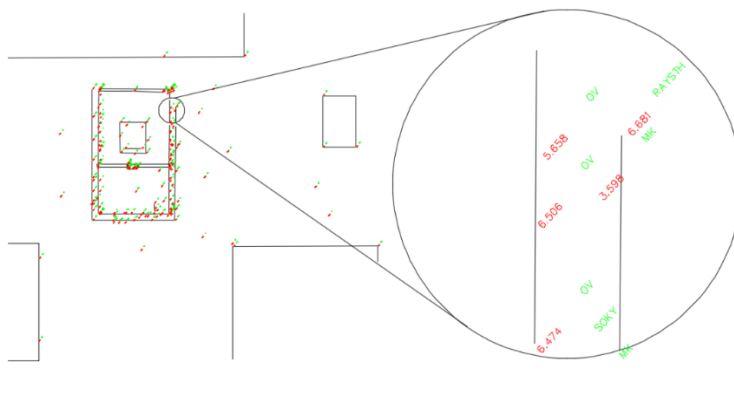


Kuva 25. Esimerkkikuva NPL-350 -takymetristä ja mittausalueesta, jossa mittauskohde on sinisellä viivalla rajattuna piharakennus. Punaiset pallot ovat takymetrin mittausasemointi paikkoja. Sininen pallo oikeassa yläkulmassa on korkeuskiintopiste.[29]

Rakennuksen mittaus aloitettiin rakennuksen nurkalta kohdasta 1 ja suoritettiin kahdella mittausasemapaikalla (kuva 25). Rakennuksesta mitattiin korkeuksia, sokkeli, seinien runkolinjat, kattorakenteet ja piippu. Muutamia pisteitä mitattiin myös rakennuksen sisältä seinistä ja latioista. Maankorkeuksia mitattiin prismalla sokkelin

vierestä rakennuksen keskeltä ja nurkilta sekä muutamista paikoista noin 2 m:n etäisyydeltä rakennuksesta. Seinistä mitattiin pisteitä kahdelta korkeudelta ja useasta kohtaa, jotta niiden vinous ja kaarevuus kyetään todentamaan myöhemmin. Rakennuksesta mitattiin kaikki tärkeät korkeusasemat, jotta rakenteiden vinoudet tulisivat esille inventointimallissa.

Mittalaitteelle suoritettiin orientointi, ja laite asetoitiin paikkaan 2. Tämän jälkeen yhdenmukaiset mittaukset suoritettiin toiselle puolelle rakennusta. Mittaukseen kului aikaa noin 2 tuntia, josta korkeuden määrittämiseen kului noin 15 min. Mittaukseen asemointipaikoissa käytettiin yhteensä aikaa noin 80 min ja loput ajasta kului mittauksen valmisteluihin. Tuloksena saatiin asc-tiedosto, joka sisälsi 174 pistettä ja orientointitietoja. Tiedoston sisältöä muokattiin usealla eri ohjelmalla ennen AutoCad-kuvaan siirtämistä (kuva 26).



Kuva 26. Kuvassa DWG-2D-mittatietomalli, joka sisältää NPL-350 -takymerialla mitatun pistepilven. Rakennukset on hahmoteltu viivoilla, suurennoksessa mitatut pisteet ovat viivojen kohdalla, niiden nimet vihreällä tekstillä ja z-korkeus merenpinnasta on merkitty punaisilla numeroilla.[22]

6.3 Laserkeilaus

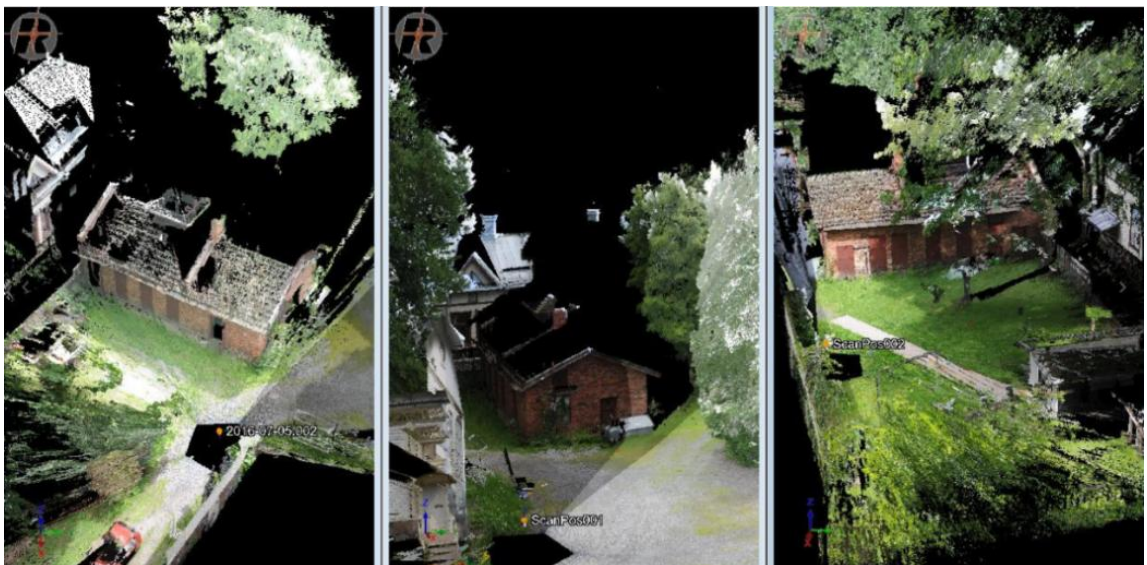
Laserkeilaus suoritettiin Riegl VZ-1000 -laserkeilaimella kolmella asemoinnilla, kuten kuvassa 27. Mittausasetuksista valittiin resoluutioksi 100 mm @ 100 m. Lisäksi käytössä oli laitteen sisäinen GPS-asemointi, jolla laitteen muodostamat pistepilvet voidaan mittaustyön jälkeen sijoittaa lähes oikeille paikoilleen. Mittauksessa ei käytetty tähyksiä eikä ulkoista tarkempaa GPS-antennia. Mittalaitteessa oli järjestelmäkamera, joka kuvasi ympäristön 5:llä kuvalla, jokaisessa asemointikohdassa. Mittausdata tallennettiin USB-muistitikulle myöhemmän käsittelyn helpottamiseksi. Mittaukseen

kului aikaa noin 60 min, joista keilauksiin kului noin 45 min ja loput 15 min laitteen valmisteluihin sekä aseointeihin.



Kuva 27. Esimerkkikuva mittauksessa käytetystä Riegl VZ-1000 laserkeilaimesta ja mittausalueesta, jossa mittauskohteena sinisellä viivalla rajattuna piharakennus. Keilaimen aseointikohdat 1, 2 ja 3.[29]

Mittausdata siirrettiin RiSCAN-ohjelmistoon, jonka avulla muodostettiin kaikkien kolmen mittausaseman pistepilvet. Tämän jälkeen pistepilviin lisättiin oikeat värit. Pistettä oli useita miljoonia yhdessä pistepilvessä. Pistepilviin lisättiin värit, mutta ajan puutteen vuoksi pistepilviä ei kuitenkaan käsitelty enempää, vaan ne toimivat sellaisenaan mittatietomallina.



Kuva 28. Esimerkkikuva laserkeilauksessa saaduista pistepilvistä.

6.4 Mittalaitteiden ja tulosten vertailu

Mittauspäivä osoittautui puolipilviseksi ja lämpimäksi, eikä säästä johtuvia häiriötekijöitä ilmennyt. Mittaukset onnistuivat suunnitelmien mukaisesti. Lasermittan käyttö oli helppoa, mittalaite oli kevyt ja sopiva käteen. Välillä tuntui kuitenkin siltä, että mitatessa ja kirjoittaessa tuloksia ylös olisi voinut olla ainakin yksi lisäkäsikäytössä.

Lasertakymetrin asemointi oli helppoa eikä se eronnut kovinkaan paljon keilaimen asemoinnista. Mittalaitteen käyttö oli kuitenkin huomattavasti vaativampaa ja vaati keskittymistä. Mittaus oli siitä huolimatta kohtalaisen nopeaa. Keilaimen asemoidessa huomattavin asia oli keilaimen massa, joka oli noin kaksinkertainen takymetriin verrattuna. Keilaimen tulisi olla mahdollisimman kevyt ja pienikokoinen, koska rakennusten sisällä joudutaan tekemään siirtoja moninkertaisesti enemmän kuin ulkona. Keilaimella mittaaminen oli hieman turhauttavaa, koska oli odoteltava mittaussyklin loppumista. Mittalaitteiden valinnassa piti myös huomioida, mitä voidaan mitata. Sisätilat voidaan mitata kaikilla kolmella menetelmällä, edellyttäen ettei minimietäisyys tule ongelmaksi. Laserkeilaimessa min. etäisyys oli 2,5 m:ä ja takymetrissä 1,6 m:ä, jonka vuoksi rakennus päätettiin jättää mittaamatta sisäpuolelta mittalaitteilla.

Laserkeilaus oli ehdottomasti nopein tapa saada runsaasti mittaustuloksia. Siitä huolimatta mittausten menetelmien välillä ei kokonaisuudessaan ajallisesti ollut kovinkaan suurta eroa kyseisen kokoisen rakennuksen mittauksessa. Mittaukseen kulunut aika tulee merkittäväksi tekijäksi vasta rakennuksen koon ja monimutkaisuuden kasvaessa.

Pistepilvistä tuli erittäin yksityiskohtaisia ja värien lisäys pistepilviin paransi huomattavasti rakennuksen muodon hahmottamista RiSCAN Pro -ohjelmassa. Rakennuksen seinien kohdalla pisteväliksi tuli noin 5 mm:ä, joka on riittävä, jotta saadaan kaikki mitat suoraan leikkauskuvista. Pistepilvien välillä ei ollut suuria eroja pisteiden välimatkassa ja tarkkuudessa seinien kohdalla.

Takymetrillä mittaustulokset saatiin kohtalaisen nopeasti valmiiseen muotoon pisteiden vähäisen määrän vuoksi. Mittalaitteen mittausinformaation muokkausta voidaan kuitenkin vielä parantaa. Tämä voidaan tehdä esimerkiksi käyttämällä avoimien ohjelmistojen tarjoamia mahdollisuuksia. Rakennuksen runko oli mitattu takymetrillä kahdelta korkeudelta, josta ilmeni rakennuksen vinous. Rakennus oli noin 50 mm:ä vinossa vasemmalle päätyseinään katsoen (kuva 23) keskellä. Rakennuksen

kattorakenteissa oli myös paikoittain vinoutta ja rakennus oli painunut toisesta päästä jonkin verran (kuva 19).

Lasermitalla saadut tulokset olivat sellaisenaan valmiit jatkosuunnitteluun, jossa ne yhdistettiin takymetrillä saatuihin tuloksiin. Yhdistetyt mitat sopivat yhteen, eikä mittaustulosten tarkkuudessa ollut huomattavaa eroa mittalaitteiden välillä.

Mittauksien perusteella voidaan todeta, että pienimuotoisten ja keskisuurien inventointimittauksien tehokkuus syntyy oikeiden mittalaitteiden valinnasta. Näillä kyetään luomaan joustavuutta ja porrastusta mittauksiin. Tämän avulla saadaan oleellisen mittaustiedon määrä optimoitua. Tehokkuus perustuu osaltaan myös mittaustuloksista muodostuvan mittatietomallin valmiusasteeseen. Mittatietomallin rakenne tulisi olla jatkokäsittelyn kannalta mahdollisimman valmis. Ideaalisena mittatietomalli olisi valmiiksi inventointimalli. Tämä ei ole tällä hetkellä kuitenkaan mahdollista. Mittauksen tulisi myös tapahtua samalla, kun kävelee rakennuksen ympäri ja kaikkien huoneiden läpi. Tämän tyyppisiä laserkeilausmittalaitteita on jo olemassa, joskin niiden tarkkuus ei ole vielä riittävällä tasolla. Inventointimallin näkökulmasta pistepilvien käsittelyyn pitäisi saada oikeanlaisia suodattimia, joilla tarvittavat mittaustiedot kyetään saamaan automaattisesti.

7 YHTEENVETO

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin laseretäisyysmittausta kokonaisuutena. Työssä perehdyttiin lasermittauksen teoriaan ja selvitettiin laservalon käyttäytymistä etäisyysmittauksessa. Laseretäisyysmittausta tutkittiin myös inventointimittauksen näkökulmasta, tutkimalla sen perusteita ja tekemällä mittauksia.

Työ aloitettiin tutkimalla laservalon ominaisuuksia ja mittalaitteen toimintaperiaatetta, minkä jälkeen perehdyttiin pintapuoleisesti inventointimittaukseen ja siitä saatavaan mittatietomalliin. Tämän jälkeen suoritettiin pienen piharakennuksen inventointimittaus lasermitalla, takymetrillä ja keilaamalla. Mittalaitteita ja niistä saatuja tuloksia vertailtiin toisiinsa. Tuloksista muodostettiin myös mittatietomallit jatkosuunnittelua varten.

Työn keskeisin tavoite oli saada laaja näkemys laseretäisyysmittaukseen vaikuttavista tekijöistä ja löytää sitä kautta keinoja mittaus- ja suunnittelutoiminnan kehittämiseen. Työssä onnistuttiin muodostamaan kokonaiskuva laseretäisyysmittauksesta. Tämän avulla voidaan arvioida, minkälainen mittalaitteen tulisi olla, miten sen tulisi toimia ja miten mittausta ja sen avulla muodostettua mittatietomallia voidaan parantaa.

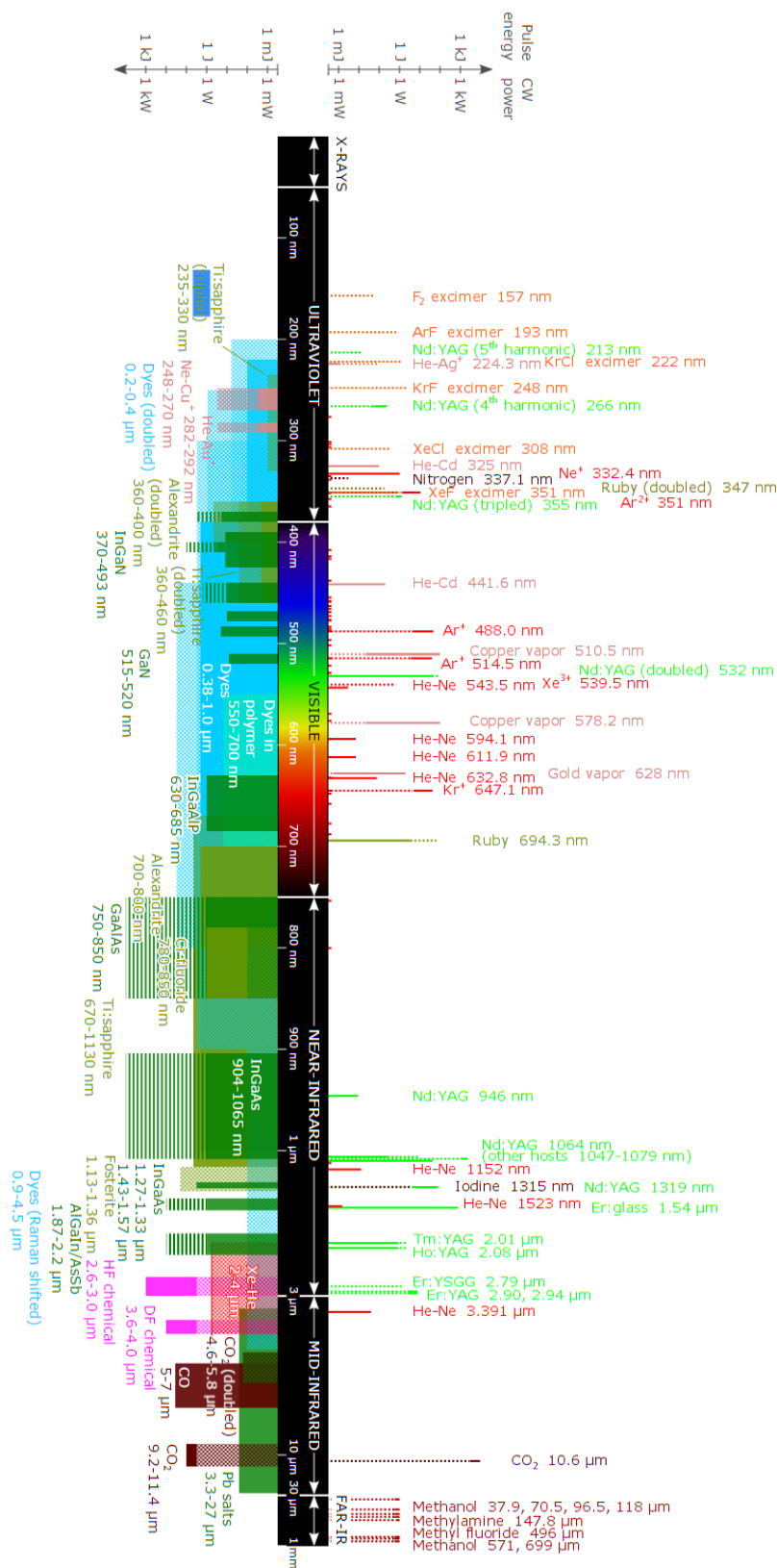
Digi-Viiva Oy:lle työ antaa valmiudet kehittää jo käytössä olevien mittalaitteiden käyttöä ja niiden mittatietojen käsittelyä. Digi-Viiva Oy:lle tullaan tekemään erillinen yksityiskohtainen raportti työn kautta löydetyistä ideoista. Ideat koskevat jo käytössä olevia mittalaitteita ja niiden käyttöä sekä uusien mittalaitteiden hankintaa.

LÄHTEET

- [1] Donges, A. & Noll, R. 2014. Laser Measurement Technology: Fundamentals and Applications. Springer.
- [2] Shan, J. & Toth, C. K. 2008. Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing. CRC Press.
- [3] Liimatainen, A. 2010. Rakennusten 3D-mittaus ja pistepilven prosessointi jatko suunnittelua varten. Saatavilla: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2010122018778> (luettu 20.11.2016)
- [4] Simonen, J. 2012. Maalaserkeilaus infrarakentamisen mittauksissa. Saatavilla: http://personal.inet.fi/koti/jsimonen/dippa/dippa_jsimonen.pdf (luettu 20.11.2016)
- [5] HuaMeng Chu, McNeill M. D. & Williams, L. 1999. Design of a time-of-flight range-finder. Frontiers in Education Conference
- [6] Laserphysics. Saatavilla: http://samples.sainsburysebooks.co.uk/9780470409701_sample_389098.pdf (luettu 1.10.2016)
- [7] Remote sensing using lasers. Saatavilla <http://www.seos-project.eu/modules/laser-rs/laser-rs-c02-p05.html> (luettu 5.10.2016)
- [8] Nd:YAG-kristallit. Saatavilla: <http://www.crysol.com/Nd:YAG.html> (luettu 16.10.2016)
- [9] Coldren, L. A, Corzine, S. W. & Mashanovitch, M. L. 2012. Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits. John Wiley & Sons.
- [10] Signals. Saatavilla: <http://wiki.wpi.edu/robotics/Signals> (luettu 15.10.2016)
- [11] Kuva sähkömagneettisesta säteilystä. Saatavilla: <http://www.wamis.org/agm/pubs/agm8/Paper-2.pdf> (luettu 3.10.2016)
- [12] Kuva laser wavelength. Saatavilla: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/48/Commercial_laser_lines.svg (luettu 12.10.2016)
- [13] Laserluokat. Saatavilla: <http://www.stuk.fi/aiheet/laserit/laserluokat>. (luettu 5.10.2016)
- [14] Multi-wavelength airborne laser scanning. Saatavilla: http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegl/downloads/Presentation_ILMF2011_RIEGL_Multiwavelength_ALS_01.ppt. (luettu 13.11.2016)
- [15] Wireless Communication and Networks. Saatavilla: <https://haseebsohail.files.wordpress.com/2014/02/wireless-communication-and-networks-2nd-edition-william-stallings.pdf> (luettu 20.11.2016)
- [16] Pulsed time-of-flight laser range finder techniques for fast, high precision measurement applications. Saatavilla: <http://jultika oulu.fi/files/isbn9514272625.pdf> (luettu 16.10.2016)
- [17] Carlson, A. B., Crilly, P.B. & Rutledge, J.C. 2002. Communication Systems: An Introduction to Signals and Noise in Electrical Communication. 4th ed. McGraw-Hill.

- [18] JianJun, T. X. Jian, X & ShaoJun, H. XianBo, S. 2013. Research on Key Technology for Phase-Shift Laser Range Finder. IEEE 11th International Conference on Dependable, Autonomic and Secure Computing.
- [19] Laser ranging: a critical review of usual techniques for distance measurement. Saatavilla: <http://www.utdallas.edu/~aiken/LASERCLASS/laserprinlipels.pdf> (luettu 10.10.2016)
- [20] Waara, M. Haastattelu, 20.8.2016.
- [21] Arvorakennusten korjaushankkeet ja tuotemallintaminen.pdf. Saatavilla: http://arkit.tkk.fi/senaatti/images/Arvorakennusten_korjaushankkeet_ja_tuotemallintaminen.pdf (luettu 12.11.2016)
- [22] Digi-Viiva Oy. 2016. Tietomalliarkisto.
- [23] Leica Disto A3 manual. Saatavilla: http://www.upc.edu/sct/documents_equipment/d_68_id-483.pdf (luettu 16.11.2016)
- [24] Nikon NPL-302 Series Instruction Manual. Saatavilla: <http://accurate.kiwi/pdf/Nikon%20NPL-302%20Series%20Instruction%20Manual.pdf> (luettu 25.11.2016)
- [25] Leica Geosystems. Saatavilla: <http://www.leica-geosystems.fi> (luettu 25.11.2016)
- [26] VZ-1000 skannerin tiedot. Saatavilla: <http://www.geocenter.fi/riegl/laserskannerit/riegl-vz-1000/> (luettu 13.11.2016)
- [27] Rekonen, T. 2014. Riegl VZ-400 -laserskannerin ja skannaus-aineiston käsittelyohjelmiston käyttöohjeet. Saatavilla: <http://www.theseus.fi/handle/10024/76423>
- [28] VZ-1000 Technical data. Saatavilla: http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegl/downloads/DataSheet_VZ-1000_2015-03-24.pdf (luettu 25.11.2016)
- [29] Maastokartta. Saatavilla: <http://opaskartta.turku.fi/> (Luettu 26.11.2016)
- [30] Jonh M. Senior & M. Yousif Jamro. 2009. Optical Fiber Communications Principles and Practice. 3 ht ed. Pearson Education, Saatavilla: <https://eceagmr.files.wordpress.com/2014/09/optical-fiber-communications-principles-and-pr.pdf> (luettu 27.11.2016)

Liite1 Laserin spektri



[9]