

Opinnäytetyö (AMK)

Konetekniikan koulutus

2023

Kristian Suominen

# Laserkeilauksen hyödyntäminen kaukolämpölaitoksen putkistosuunnittelun validoinnissa

– Työtapatutkimus Valmet Technologies Oy:lle



Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Konetekniikan koulutus

2023 | 42 sivua + raportti 23 sivua + raportin liitteet 45 sivua

Kristian Suominen

# Laserkeilauksen hyödyntäminen kaukolämpölaitoksen putkistosuunnittelun validoinnissa

- Työtapatutkimus Valmet Technologies Oy:lle

Opinnäytetyö suoritettiin toimeksiantona, jonka tavoitteena oli selvittää laserkeilauksen soveltuvuus kaukolämpölaitoksen, tai muun vastaavan laitoksen putkistosuunnittelun validoinnissa. Juurisyy tarpeelle suorittaa validointi on lujuuslaskennan ja todellisuuden välinen eroavaisuus tai poikkeama, joka implikoi, että lujuuslaskenta ei ole totuudenmukainen, tai rakenteessa tai prosessissa on ongelma. Molemmat ovat tilanteita, joihin täytyy reagoida, ja laserkeilauksen tuottama pistepilvi on nopea tapa saada paljon dataa, jonka perusteella voidaan muodostaa päätelmiä ja miettiä ratkaisuja.

Opinnäytetyö käsittelee kaukolämpölaitoksen ja putkistosuunnittelun teoriaa pintapuolisesti, sekä perehtyy laserkeilauksen laitteisiin ja käytäntöihin. Lopussa käsitellään keilauksen tuottamia pistepilviä ja niistä johdettavia tuloksia. Tarkempi tulosten tulkinta ja päätelmät on kuitenkin eriytetty omaan itsenäiseen raporttiin, joka on luovutettu toimeksiantajalle, eikä luottamuksellisuuden vuoksi ole tämän opinnäytetyön liitteenä.

Asiasanat:

Kaukolämpölaitos, laserkeilaus, putkistosuunnittelu, lämpölaajeneminen

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Degree programme in Mechanical Engineering

2023 | 42 pages + report 23 pages + report attachments 45 pages

Kristian Suominen

## Utilization of laser scanning in district heating plant pipe design validation

- Work method study for Valmet Technologies Oy

The bachelor's thesis was completed as part of an assignment, with the goal to find out the applicability of laser scanning in validating the piping design of a district heating plant, or other similar plant. The need to perform validation is based on a discrepancy or deviation between the strength analysis and reality, which implies that the strength analysis is not accurate, or there is a problem either in the structure itself or in the process which the plant operates by. Both are situations that need to be reacted to, and the point cloud produced by laser scanning is a quick way to get a lot of data, based on which conclusions can be made and preliminary solutions formed around.

The bachelor's thesis starts with the theory of district heating plant and piping design on surface level and familiarizes the reader with the equipment and practices of laser scanning. Last chapters deal with the point clouds produced by laser scanning and the results derived from them are discussed. However, a more precise report interpreting the results and conclusions has been separated into an independent report, which has been handed over to the client, and is not attached to this thesis due to confidentiality.

Keywords:

District heat plant, laser scanning, piping design, thermal expansion

# Sisältö

<b>Käytetyt lyhenteet tai sanasto</b>	<b>6</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>7</b>
<b>2 Kaukolämpölaitos</b>	<b>9</b>
2.1 Kaukolämpöverkon toimintaperiaate	10
2.2 Höyrykattilan toimintaperiaate	11
2.3 Seinäjoen kaukolämpölaitos	12
<b>3 Putkistosuunnittelu</b>	<b>13</b>
3.1 Iteratiivinen suunnittelu	13
3.2 Lähtökohdat	13
3.2.1 Esisuunnittelu	14
3.2.2 Layout-suunnittelu	14
3.2.3 Prosessisuunnittelu	14
3.3 Putkistosuunnittelu	15
3.3.1 Kannakesuunnittelu	16
3.3.2 Detaljisuunnittelu	17
3.3.3 Joustavuustarkastelu	18
3.3.4 As-built	21
<b>Laserkeilaus</b>	<b>22</b>
3.4 Toimintaperiaate	22
3.5 Laitteet	24
3.6 Keilaustapahtuma	28
<b>4 Mittaus ja tulokset</b>	<b>36</b>
4.1 Tulokset laserkeilauksista	36
4.2 Tulosten vertaus	38
<b>5 Loppuraportti ja tulevaisuus</b>	<b>40</b>
<b>Lähteet</b>	<b>41</b>

## Kuvat

Kuva 1. Kaukolämpövoimalaitoksen periaatekaavio (Huhtinen ym. 1994).	9
Kuva 2. Kaukolämpöveden kierto (Helsingin seudun ympäristöpalvelut HSY 2023).	10
Kuva 3. Höyrykattilan toimintaperiaate (Huhtinen ym. 1994).	11
Kuva 4. Membraaniseinän leikkauskuvanto.	12
Kuva 5. E3D Kuvakaappaus, Primääri ja sekundäärikannakointi	17
Kuva 6. Levyrakenteen siirtymäkuva. (Lähteenmäki 2006, 1.14)	19
Kuva 7. Siirtymäkuva Seinäjoen lämpölaitoksen joustavuustarkastelusta	20
Kuva 8. Havainnekuva pulssilaserin toiminnasta.	23
Kuva 9. Havainnekuva vaihe-erosta mittauksessa.	24
Kuva 10. Pistepilven muodostuma perinteisessä ilmakuvauksessa.	25
Kuva 11. Kupolimaisesti mittaavan maalaserkeilaimen kattavuus.	26
Kuva 12. Takymetri, Leica PinPoint R400.	27
Kuva 13. Tähystarra takymetrin optiikan läpi katsottuna.	27
Kuva 14. Tähystarra paikka- ja laitostietoineen.	28
Kuva 15. Laserkeilaimen tähys.	29
Kuva 16. Seinäjoen Energian kaukolämpölaitoksen pistepilvi, ulkoa.	31
Kuva 17. Pistepilven ääripisteet sisätilassa.	32
Kuva 18. Katvealueen muodostuma ulkotiloissa.	33
Kuva 19. Havainnekuva tangenttikulman vaikutuksesta.	34
Kuva 20. Navis Typhoon -näkymä primäärikannakkeen tarkastelusta.	36
Kuva 21. As-designed verrattuna as-built malliin pistepilvessä.	37
Kuva 22. Cyclone 3DR vertaus primäärikannakkeesta.	38

## Käytetyt lyhenteet tai sanasto

As-built	Englantia, suomennettuna ”kuten rakennettu”
Asemapiste	Piste, josta yksittäinen laser- tai takymetrimittaus suoritetaan
BFB	Bubbling Fluidized Bed, leijupeti
CW	Continuous Wave, jatkuva-aalto
FEM	Finite Element Method, elementtimenetelmä
Layout	Suunnitelma, sijoittelu, asettelu, sommittelu
LiDAR	Light Detection and Ranging, valotutka (National Ocean Service, 2021)
MW	Megawatti, tehon yksikkö
MWth	Megawatt thermal, tuotetun lämpöenergian yksikkö
PI-Kaavio	Putkitus- ja instrumentointikaavio

# 1 Johdanto

## Toimeksiantaja

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Valmet Technologies Oy, jossa opinnäytetyön laatija on aloittanut työsuhteen loppukeväällä 2022.

”Valmet on maailman johtava prosessiteknologian, automaatoratkaisujen ja palvelujen toimittaja ja kehittäjä sellu-, paperi- ja energiateollisuudelle.” (Valmet 2023)

Valmet toimittaa energiateollisuuden alalla esimerkiksi leijukattiloita, kaasuttimia, voimalaitoksia, ympäristönsuojelujärjestelmiä sekä elinkaaripalveluita. (Valmet 2023).

## Toimeksianto

Opinnäytetyön aiheena oli työtapatutkimus, jossa selvitettiin laserkeilauksen sopivuutta validointimenetelmä tilanteeseen, jossa putkiston joustavuustarkastelun tuloksia halutaan verrata toteumaan laitoksessa.

Työn tuloksena syntynyt erillinen toimeksiantajalle luovutettu raportti ottaa erillisen data review -tilaisuuden pohjalta kantaa siihen, onko tämä työtapana optimaalinen ratkaisu tutkimuskysymykseen.

## Toteutus

Aihe oli opinnäytetyön laatijalle haastava ja työelämäläheinen projekti, jonka tuloksia hyödynnetään yrityksen omien prosessien kehittämisessä. Aihe valikoitui sen haastavuuden sekä ajankohtaisuuden vuoksi.

Työtapatutkimukselle oli aito tarve, sekä alustava pohjatyö sille oli jo tehty. Laserkeilaus ei varsinaisesti ole uutta tekniikkaa, mutta sen kiihtyvä kehitys etenkin viimeisinä vuosikymmeninä mahdollistaa sen hyödyntämisen kohteissa

ja projekteissa, joissa sitä ei tavanomaisesti ole aikaisemmin käytetty. Pohjatiedon mukaan tämän kaltaista työtapaa, jossa pistepilviä käytetään laitoksen putkien lämpösiirtymien tarkasteluun ei ole aikaisemmin tehty, joka lisäsi oman haasteen ja mielenkiinnon työhön.

Lähdekirjallisuuden ollen muuten varsin hyvin saatavilla, havaittiin työn kulun aikana joitain poikkeamia kirjallisuuden ja käytännön välillä. Työvaiheiden kulku ja kuvaus on joissain kirjoissa hyvin yritysکوhtainen, jolloin sen soveltuvuus yleispäteväksi pohjatiedoksi kaikkeen laitossuunnitteluun on kyseenalainen. Tämä on pyritty huomioimaan opinnäytetyössä lisäämällä aihetta käsittelevien kappaleiden yhteyteen tietoa siitä, kuinka prosessin kulku ja lähtötiedot toimivat tässä opinnäytetyössä ja Valmetilla.

Opinnäytetyössä perehdytään ensin kaukolämpölaitoksien sekä höyrykattiloiden toimintaperiaatteisiin pintapuolisesti. Tätä seuraa laajempi osuus putkistosuunnittelua, jossa perehdytään sen pohjatietoihin, työvaiheisiin ja terminologiaan. Lopuksi perehdytään itse laserkeilaukseen prosessina, siihen liittyvään kalustoon ja tuloksena syntyvän pistepilven eri aspekteihin. Näistä muodostetaan lopuksi lyhyt yhteenveto, kuinka tuloksia syntyi tässä toimeksiannossa ja kuinka niitä hyödynnettiin tutkimuskysymykseen vastaamisessa. Lopputuotteena toimeksiantajalle laadittiin raportti, joka toimi opinnäytetyön lopputuotteena, ja jossa työn ja mittauksen tuloksiin perehdytään syvällisemmin, sekä tehdään lopulliset päätelmät. Raportti on vain toimeksiantajan käyttöön, eikä sitä siksi ole tämän opinnäytetyön liitteenä.

## **Kiitokset**

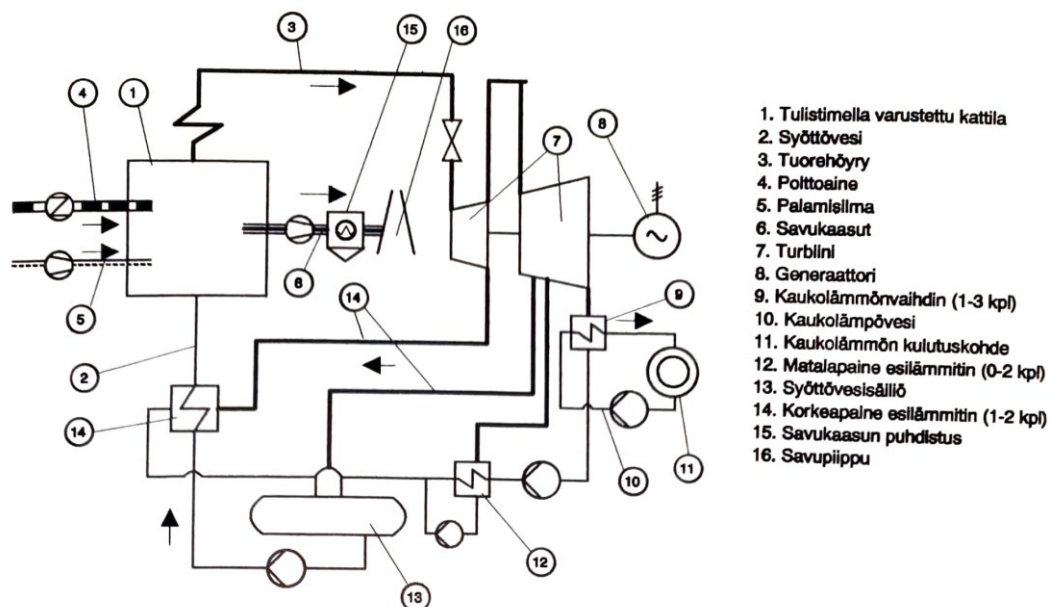
Haluan kiittää mielenkiintoisesta ja haastavasta toimeksiannosta, sekä opinnäytetyön ohjauksesta Kalle Salstetta, joka osoitti henkilökohtaista mielenkiintoa työtä ja sen etenemistä kohtaan. Lisäksi haluan kiittää Jyri Kuitusta laadukkaasta pohjatyöstä ja avusta, kun sitä tarvitsin. Lopuksi haluan kiittää perhettäni, joka on tukenut minua läpi haastavan korkeakoulutaipaleen, aina hakuvaiheesta viimeisille metreille ja maaliviivaan asti. Kiitos.



## 2 Kaukolämpölaitos

Kaukolämpölaitos koostuu useasta muuttujasta ja parametristä, joihin kaikkiin ei paneuduta tässä opinnäytetyössä. Laitos voi esimerkiksi tuottaa sivutuotteena tulistetun höyryn avulla generaattorilla sähköä, jolloin puhutaan kaukolämpövoimalaitoksesta. Kaukolämpöä voidaan tuottaa myös isoilla lämmönvaihtimilla esimerkiksi laitoksessa, jossa lämpöä syntyy jonkin prosessin sivutuotteena. Esimerkiksi metalliteollisuudessa hukkalämmön talteenotto on eräs metodi saada laitoksen kokonaishyötysuhdetta suuremmaksi.

Kaukolämpövoimalaitoksia käytetään verkossa kiertävän veden lämmön ylläpitämiseksi, sekä sähkön tuotantoon. Sähköä tuottavasta kaukolämpövoimalaitoksesta voidaan käyttää myös termiä vastapainevoimalaitos turbiinin jälkeisen vastapaineen vuoksi. (Huhtinen ym. 1994, 13.)



Kuva 1. Kaukolämpövoimalaitoksen periaatekaavio (Huhtinen ym. 1994).

## 2.1 Kaukolämpöverkon toimintaperiaate

Yksinkertaistetusti kaukolämpöverkko muodostuu kaukolämpövoimalaitoksesta tai lämpökeskuksesta, kaukolämpöputkistosta jossa lämmitetty ja jäähtynyt vesi kiertävät omissa putkissaan ja kaukolämmönjakokeskuksesta jossa verkossa kiertävä kuuma vesi lämmittää esimerkiksi asuinrakennuksen patteri- ja käyttöveden lämmönsiirtimen, eli lämmönvaihtimen avulla. Lämmönvaihtimesta jäähtynyt vesi palaa kaukolämpöverkon kiertoon, jossa se lämmitetään uudelleen. Järjestelmä on suljettu, jolloin verkossa oleva vesi ei sekoitu käyttöveden kanssa. (Gebwell, 2023.)



Kuva 2. Kaukolämpöveden kierto  
(Helsingin seudun ympäristöpalvelut HSY 2023).

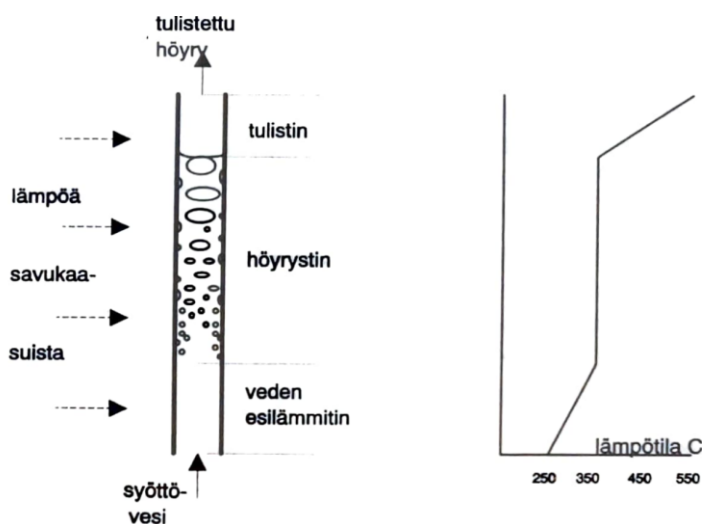
Lämpökeskuksessa vesi lämmitetään polttamalla esimerkiksi metsähaketta, teollisuuden puutähteitä, maakaasua, kivihiiltä tai turvetta. Erilaisten polttoaineiden lisäksi veden lämmittämiseen voidaan hyödyntää teollisuudessa syntyviä hukkalämpöjä, jotka muuten lauhdutettaisiin ilman sivuhyötyä. (Energiateollisuus ry, 2023.)

Hukkalämpöä voi syntyä esimerkiksi metalli- ja prosessiteollisuuden sivutuotteena. Lämmönvaihtimen avulla laitoksessa syntynyt lämpö saadaan otettua talteen ja siirrettyä kaukolämpöputkistossa kiertävään veteen.

## 2.2 Hörykattilan toimintaperiaate

Hörykattila on keskeinen osa lämpökeskusta tai kaukolämpölaitosta. Kattilan toimintaperiaatteita ja polttoainevariantteja on useita, ja nykyään trendi on uusiutuvien energiamuotojen suuntainen.

Hörykattilan funktio on lämmittää sen tulipesän seinissä kiertävää vettä savukaasuista siirtyvällä lämpöenergialla. Syöttövesi saapuu osana suljettua järjestelmää ensin esilämmittimelle, joka on ensimmäinen lämmönsiirrin, josta lämpöenergiaa siirtyy syöttöveteen. (Huhtinen ym. 1994, 7.)

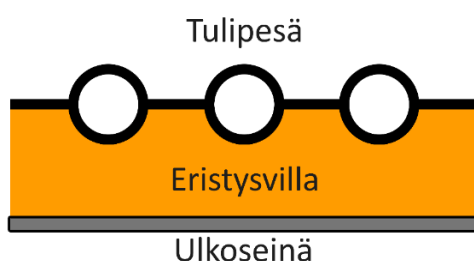


Kuva 3. Hörykattilan toimintaperiaate (Huhtinen ym. 1994).

Veden lämmitettyä höyrystyslämpötilaan sen kiertoa jatketaan vielä tulistimien läpi, jossa vesihöyry kuumennetaan sen höyrystyslämpötilaa korkeampaan lämpötilaan, eli tulistetaan. Itse veden lämmittäminen, kuumentaminen höyrystymispisteeseen sekä sitä seuraava tulistaminen kaikki vaativat energiaa, jota tuotetaan hörykattilassa polttamalla esimerkiksi hiiltä, turvetta tai maakaasua. Voimalaitosten hörykattiloiden tyypillinen käyttölämpötila on noin 450–550 °C. (Huhtinen ym. 1994, 7.)

Höyrykattilan sisäseinä muodostuu levystä ja putkista koostuvasta hitsauskokoonpanosta, joissa höyrystettävä vesi kiertää. Tämän tyyppistä seinärakennetta kutsutaan membraaniseinäksi.

Rakenteen ideana on samanaikaisesti lämmittää putkissa kulkevaa vettä höyrystymislämpötilaan, sekä ylläpitää seinän lämpötila turvallisella tasolla, toimien eräänlaisena isona lämmönvaihtimena. Tulipesän savukaasut lämmittävät vettä ja vesi puolestaan estää putkia ja seinärakenteita kuumenemasta liikaa.



Kuva 4. Membraaniseinän leikkauskuvanto.

Lopputuotteena syntyvä tulistettu höyry hyödynnetään laitostyyppistä riippuen joko sähkön, lämmön tai molempien yhtäaikaiseen tuotantoon. Tulistettua höyryä hyödynnetään myös nuohoimissa, joilla kattilalaitteiston lämpöpintoja pidetään puhtaana optimaalisen toimivuuden takaamiseksi.

### 2.3 Seinäjoen kaukolämpölaitos

Tämän opinnäytetyön rajapintana toimi Valmet Technologiesin toimittama lämpölaitos Seinäjoen Energialle Kapernaumiin.

Kapernaumiin rakennetun laitoksen ytimenä toimii Valmetin BFB-Kattila, jonka toimintaperiaatteena on kerrosleijuteknologia. Tämä mahdollistaa monenlaisten biomassojen käytön polttoaineena, joka edistää Seinäjoen Energian tavoitteita uusiutuvasta ja hiilineutraalista kaukolämmöstä. Rakennetun lämpökeskuksen polttoaineteho on 49,5 MW sekä täydellä kuormalla kaukolämpöteho maksimissaan 56,6 MWth. (Seinäjoen Energia 2021.)

## 3 Putkistosuunnittelu

### 3.1 Iteratiivinen suunnittelu

Iteratiivisella suunnittelulla käsitetään usein menetelmä, jossa samaa työvaihetta, esimerkiksi laitteiden tai putkien sijoittelua toistetaan ja uusitaan, kunnes toisto halutaan lopettaa. Suunnittelussa iterointi lopetetaan usein, kun päästään riittävän hyvään tulokseen, eikä iterointia ole kustannus- ja aikataulusyistä enää kannattavaa jatkaa.

Iterointi -termiä käytetään usein, kun kuvaillaan suunnittelua ja onkin yleisesti hyväksyttyä, että suunnittelutyö on luonteeltaan iteratiivista. Iterointi vaikuttaa aina suunnitteluprojektiin aika-, kustannus-, sekä laatuteknisesti. Iterointi määritetyllään jo valmiin työvaiheen uusintana tai modifiointina uuden informaation, kuten FEM-analyysin tai saadun revisiopalautteen integroimiseksi. Toinen lähestymistapa on päättelyyn tai arviointiin perustuva iterointi, jossa kerätään laaja otanta informaatiota, tunnistetaan mahdolliset suunnitteluvaiheet ja revisiot ja vasta sitten toteutetaan suunnitellut revisiot lopputuloksen saavuttamiseksi. (Costa & Sobek. 2003, 1–2.)

Iteratiivista kehitystä ajaa esimerkiksi uuden tiedon saanti ja kulku projektin aikana, suunnittelijan kognitiiviset rajoitteet jotka estävät suunnittelijaa huomioimasta kaikkia yksityiskohtia yhtäaikaaisesti tai suunnitteluvirheet jotka vaativat korjaavia toimenpiteitä. (Costa & Sobek. 2003, 4).

### 3.2 Lähtökohdat

Putkistosuunnittelua ohjaavat useat lähtötiedot ja vaatimukset, joita käsitellään seuraavissa kappaleissa. On huomioitavaa, että useat suunnitteluvaiheet ja prosessit menevät päällekkäin, ja ne liittyvät isoilta osin toisiinsa.

### 3.2.1 Esisuunnittelu

Ennen varsinaisen putkistosuunnittelun aloittamista tarvitaan laitokselle lähtökohtadataa, joka muodostetaan esisuunnitteluvaiheen aikana.

Pääpaino esisuunnitteluvaiheessa on prosessisuunnittelussa, jossa luonnostellaan ja hiotaan konseptia iteratiivisesti. Tämän vaiheen aikana laaditaan alustavat virtauskaaviot sekä laitelistat, jotta hankintojen tarjouskyselyt saadaan aloitettua hyvissä ajoin. (Pere 2016, 14–16.)

### 3.2.2 Layout-suunnittelu

Layout suunnittelu on osa mekaanista suunnittelua, joka sisältyy esisuunnitteluvaiheeseen. Layout on kattotermi, ja laitoksesta laaditaan usein esimerkiksi tehdaslayout, joka määrittää tehtaan osastojen sijainnin tontilla. Toinen laadittava layout on osastolayout, jossa määritetään laitoksen päämitat ja laitteiden sijoittelu. Tehdaslayout itsessään on esisuunnittelun päätteeksi melko lopullinen ja osastolayout suunnittelu voidaan aloittaa, kun päälaitteet on ostettu. Layout-suunnittelun arvellaan olevan tärkein yksittäinen osa-alue laitoksen toimivuuden kannalta, jääden toiseksi ainoastaan prosessisuunnittelulle. (Pere 2016, 14–18.)

### 3.2.3 Prosessisuunnittelu

Kaiken suunnittelun lähtökohtana toimii prosessisuunnittelu. Osa siitä suoritetaan jo esisuunnitteluvaiheessa, jotta hankittaville laitteille saadaan alkuparametrit, joiden perusteella aletaan kartoittaa hankintoja. Toteutusvaiheessa prosessisuunnittelu viimeistellään päälaitteiden ostojen jälkeen, sillä vasta kun laitteet on hankittu voidaan niiden todennukaisia käyttöarvoja hyödyntää virtauskaavioiden laadintaan. Virtauskaavioihin täydennetään putkikoko-, ja instrumentti-, ja yhdetietoja suurimmista putkista alkaen, sillä nämä ovat käytettävään tilaan nähden keskeisimmässä asemassa.

Tarvittavien pumppujen, sähkömoottorien ja säiliöiden koot ja tyypit lasketaan, ja tämän pohjalta laaditaan hankintasopimukselle raamit. Kun suunnittelu etenee, tarkastetaan pumppujen ja laitteiden koot ja tarkastellaan laitoksessa esiintyviä putkiston painehäviöitä. Tämän jälkeen pumppujen ja moottoreiden mitoituksessa voidaan kompensoida simulaatioissa ja laskennoissa havaitut painehäviöt. Kun mitoitettu virtauskaavio täydennetään instrumentoinnilla, muuttuu kaavio PI-kaavioksi. Prosessisuunnittelun tuloksena syntyvät PI-kaaviot toimivat layout-suunnittelun lisäksi putkistosuunnittelun tärkeimpänä lähtökohtana. (Pere 2016, 14–38.)

### 3.3 Putkistosuunnittelu

Vaikka jo esisuunnittelun aikana layoutsuunnittelussa tehdään alustavaa putkistosuunnittelua etenkin prosessin tärkeimpien putkien osalta, alkaa varsinainen putkistosuunnittelu usein vasta toteutussuunnitteluvaiheessa. Lähtötietoina käytetään virtauskaaviota, putkilinjaluetteloa ja layoutia, mutta kaikkia valintoja ohjaa projektiin ja prosessiin kohdistuvat putkistostandardit. Varsinaisen putkistosuunnittelun alkuvaiheena toteutetaan reitityssuunnittelu, jonka päämääränä on määrittää esimerkiksi putkisiltojen ja niihin liittyvän kannakoinnin sijainnit. Tätä seuraa suurimpien putkien alustava sijoittaminen malliin. Putkien sijoittamista voidaan pyrkiä tässä vaiheessa optimoimaan esimerkiksi suunnitteluohjelmistosta löytyvillä automaatio-ominaisuuksilla. Reitityksen tavoitteena on saada tuotettua koordinoitu putkistokokonaisuus sekä lähtötiedot materiaalmäärästä putkiston hankintaerittelyyn. Putkien reitityksiä laadittaessa tuotetaan usein myös ensimmäiset lujuuslaskelmat. Kun päälinjat on suunniteltu siirrytään detaljisuunnitteluun, jossa suunnitellaan pysyvät putkireitit virtauskaavion ja pohjatyönä tehdyn putkistoreitityksen avulla. Kun putkireititys on valmis, sijoitetaan putkistoon venttiilit ja instrumentit käyttäen prosessisuunnittelun laatimaa PI-kaaviota. Tämä johtaa usein tarpeeseen tehdä viimeisiä muutoksia itse putkistoon, jotta instrumentit sekä huolto- ja käyttötilat saadaan sijoitettua oikeaoppisesti. Detaljisuunnittelun

edetessä toteutetaan lopulliset luku- ja painolaskut, kun putkistokokonaisuus alkaa lähestyä sen lopullista muotoa. (Pere 2016, 14–26.)

Valmet Oy:n tärkeimpinä lähtötietoina putkistosuunnittelulle on itse prosessitekniikan toteutuminen, sekä tilankäyttö. Voima- lämpö- ja kattilalaitoksissa ei siirretä pelkästään materiaalia kahden pisteen välillä, vaan sen muotoa ja arvoja muutetaan esimerkiksi höyrystämällä ja tulistamalla. Näiden prosessien merkitys vaikuttaa putkisto- ja instrumenttisuunnitteluun huomattavasti.

Tilankäytöllisesti on huomioitavaa isot lämpöliikkeet putkistoissa, joka merkitsee tietyissä prosesseissa suorien linjojen välttämistä sekä jousikannakkeiden hyödyntämistä, jotta laitos ja putkisto kestää luku- ja painuteknisesti.

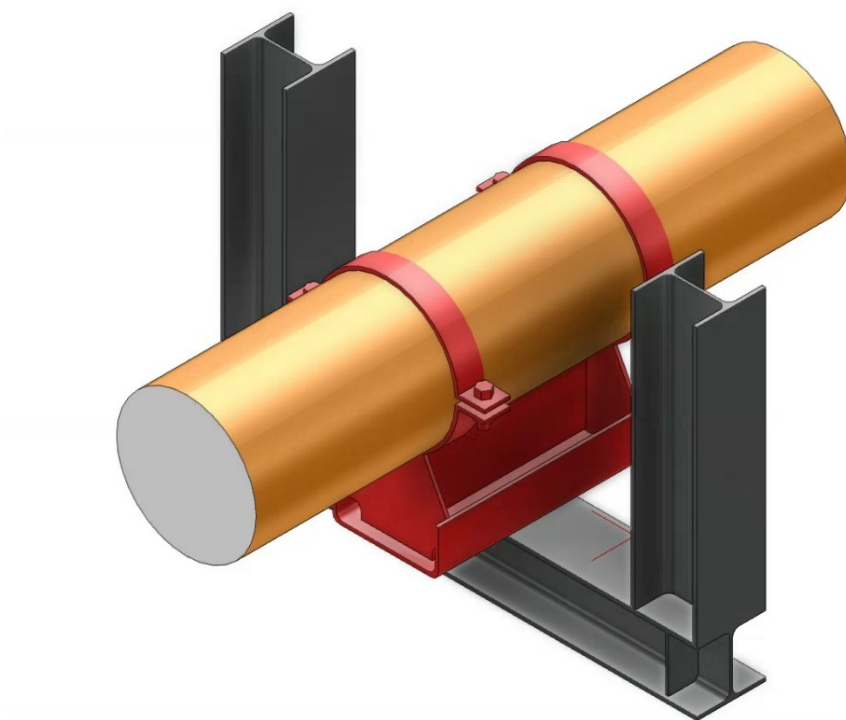
Instrumenttien määrittämisessä on huomioitavaa paitsi prosessin vaihe, myös putken ja instrumentin asento, huollettavuus sekä se, että esimerkiksi mittaristo ja muu operaattorille kriittinen on näkyville ja käytettävissä.

Laitokset pyritään rakentamaan mahdollisimman kompakteiksi, jotta vältetään turhilta tilankäytön kustannuksilta, materiaalikulutus saadaan minimoitua, eikä esimerkiksi erinäisille putkisilloille rakennusten välillä ole tarvetta.

### 3.3.1 Kannakesuunnittelu

Kannakkeiden suunnittelu ja asettaminen malliin on erittäin olennainen osa putkistosuunnittelua, sen vaikuttaessa esimerkiksi putkiston huollettavuuteen ja asennettavuuteen sekä lämpökuormien kesto- ja vaikutukseen. (Pere 2016, 14–27).





Kuva 5. E3D Kuvakaappaus, Primääri ja sekundäärikannakointi

Kannakointi muodostuu primääri- ja sekundäärikannakkeista. Primäärikannake on putkeen kiinnitettävää kannake, kun taas sekundäärikannake on rakenne, johon primäärikannake tukeutuu. Sekundäärikannake kiinnittyy esimerkiksi rakennuksen runkoon tai lattiaan. (Pere 2016, 14–27.)

Kuva 5, joka on osaleikkaus Seinäjoen kaukolämpölaitoksesta havainnollistaa oranssina putkilinjan, punaisena primäärikannakkeen ja harmaana sekundäärikannakkeen.

### 3.3.2 Detaljisuunnittelu

Detaljisuunnitteluvaiheessa putkisto saa usein lopullisen muotonsa, instrumentit ja liitännät, kannakoinnin sekä lujuus- ja joustavuustarkastelun.

Detaljisuunnitteluun kuuluu useita osa-alueita, ja huomioitavia yksityiskohtia on huomattavan paljon.

Detaljisuunnittelussa tulee huomioida esimerkiksi (Pere 2016, 14–28)

- Reitityksen ja putken pituuden välinen suhde. Lyhin reitti ei ole aina halvin
- Putkiston reititys esimerkiksi pilarien tai palkkien läheisyyteen, jotta kannakointi on luonnollista.
- Kannakoinnissa huomioidaan syntyvät kuormat sekä värähtely
- Huollettavuus, nostokiskot, ulos vedettävät osat, osien vaihto, aukeavat ovet sekä luukut
- Toimilaitteiden liike
- Lämpölaajaneminen ensisijaisesti reitittämällä asianmukaisesti
- Läpivienti seinistä ja tasoista

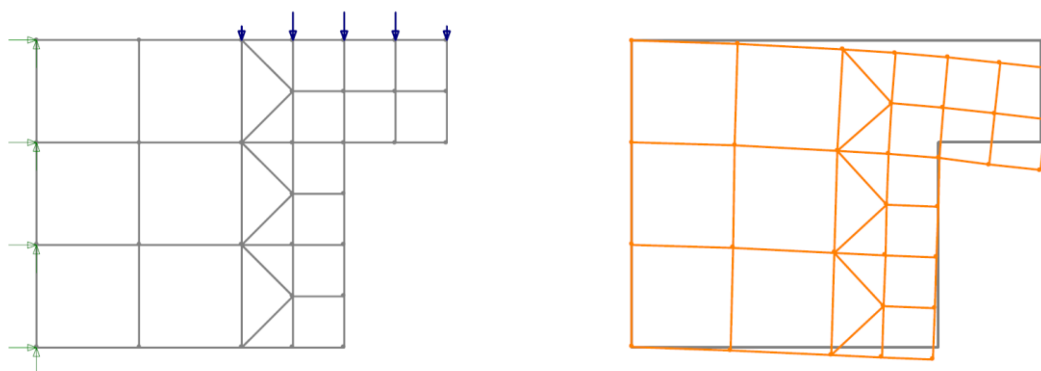
### 3.3.3 Joustavuustarkastelu

Joustavuustarkastelulla varmistetaan, että putkisto ja kannakointi kestää siihen kohdistettua painetta, lämpötilaa ja värähtelyä. Tarkastelua voidaan suorittaa monella tapaa, kuten esimerkiksi elementtimenetelmäpohjaisella simuloinnilla, joka on eräs lujuuslaskentaan perustuva metodi. Simulaation tai laskennan suorittamiseksi putkisto ja sen kannakointi tuodaan laskentaohjelmistoon kuten ROHR2, jossa sille määritetään siihen kohdistuvat kuormat. Kuorma- ja rasitetiedot pohjautuvat prosessitietoihin, joilla laitosta on tarkoitus ajaa ja kuormittaa.

### **Elementtimenetelmä ja FEM-laskenta**

Lujuuslaskennan tavoite on selvittää tuettuun rakenteeseen kohdistuvista kuormista aiheutuva siirtymätilakenttä, muodonmuutostilakenttä ja jännitystilakenttä. Alueita, joissa elementtimenetelmää hyödynnetään lujuuslaskennan lisäksi, on esimerkiksi lämmönsiirto, virtausoppi ja sähkötekniikka. (Lähteenmäki 2006, 1.1.)

Monimutkainen kappale jaetaan äärellisiin eli rajallisiin osiin, jotka ovat yksinkertaistettuja geometrian osalta. Kukin yksittäinen osa on yksittäinen elementti. Koko kappaletta kuvataan elementtijoukolla, jota puolestaan sanotaan elementtiverkoksi tai laskentamalliksi. Yhden kappaleen elementit voivat muodostua eri materiaaleista ja erilaisista geometrioista, joka on yhdistettyjen rakenteiden käsittelyssä joustava ja tehokas ominaisuus. (Lähteenmäki 2006, 1.2)



Kuva 6. Levyrakenteen siirtymäkuva. (Lähteenmäki 2006, 1.14)

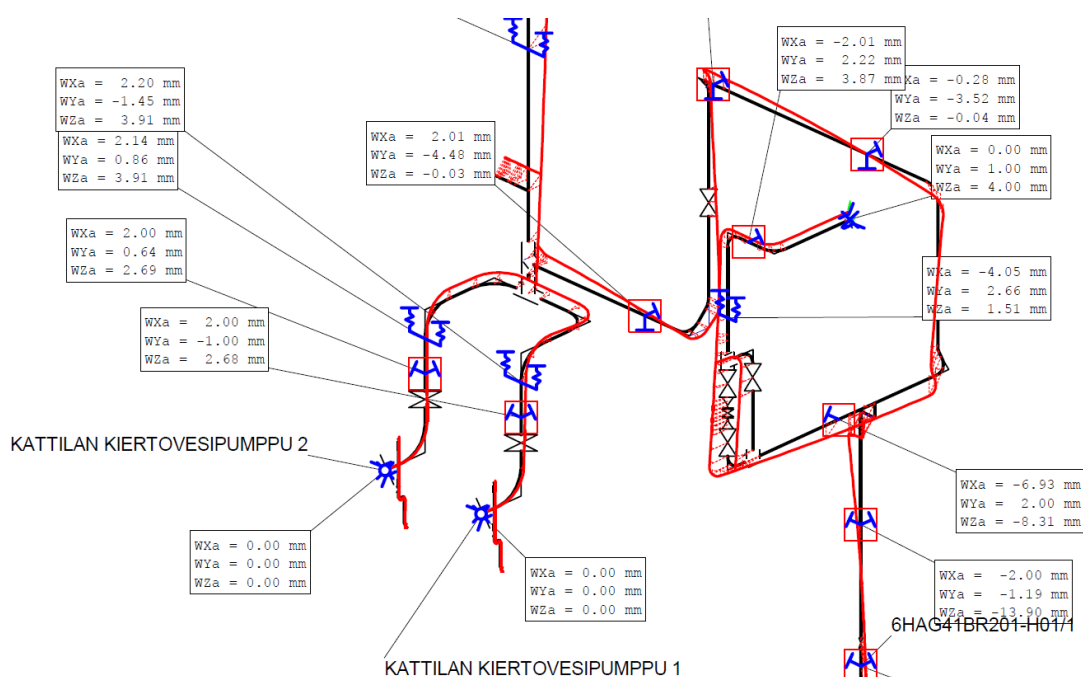
Kunkin elementtiverkon solmuihin, eli geometrioiden kulmakohtiin voi kohdistua voima- ja siirtymäsuureita, eli solmusuureita. Siirtymäsuureita ovat translaatio- ja rotaatiosiirtymä. Voimasuureita puolestaan ovat erilaiset jännityskomponentit, pintarakenteen leikkauksen rasitustiheydet ja kannattimen poikkileikkauksen rasitukset. Elementin tyyppi määrittää pääsääntöisesti sen, minkä tyyppisiä solmusuureita laskennassa käytetään. (Lähteenmäki 2006, 1.4.)

Kuva 6 havainnollistaa, kuinka tuenta ja voimat tuottavat siirtymäkuvan. Vasemmassa kuvassa on esitetty levyrakenteen elementtiverkko, joka on tuettu vasemmasta laidasta ja siihen kohdistuu ylhäältä voimia. Oikeanpuoleinen kuva havainnollistaa esitettyjen voimien aiheuttaman siirtymän elementtiverkossa.

Kokonaisuuteen saattaa kohdistua myös elementin alueella olevia kuormituksia, joita kutsutaan elementtikuormituksiksi. Näitä voi olla esimerkiksi palkkielementin tasainen kuormitus, tai levyelementin reunapaine.

(Lähteenmäki 2006, 1.6.)

FEM-laskentamalli voi olla joko keskiviiva- keskipinta- tai solidimalli. Sauva- ja palkkirakenteet ovat 1D-malleja. (Lähteenmäki 2006, 1.11.)



Kuva 7. Siirtymäkuva Seinäjoen lämpölaitoksen joustavuustarkastelusta

Kuva 7 esittää mittakaavaan nähden liioitellusti putkien siirtymän, kun laskennan arvoina on käytetty laserkeilauksen aikana toteutuneita prosessiarvoja. Tämä tarkoittaa, että siirtymien tulisi teoreettisesti olla mahdollisimman totuudenmukaiset ja vertailukelpoiset itse keilauksen tuloksena saatuun pistepilveen ja siitä tehtyyn vertailudokumenttiin.

### 3.3.4 As-built

Projektin lopputuotteena tuotetaan usein as-built dokumentaatio, jonka perimmäinen tarkoitus on olla todellisuutta vastaava kokoelma. Todellisuuden vastaavuudella tarkoitetaan, että mahdolliset suunnitteluvaiheen jälkeen tulleet muutokset ja poikkeamat on huomioitu ja korjattu dokumentaatioon.

Projektin toimituksen loppuvaiheessa kohteesta saatetaan toimittaa nk. ”punakynä” -dokumentteja, kuten piirustuksia. Näihin on merkattu tehdyt muutokset, jotka poikkeavat alkuperäisistä suunnitelmista. Poikkeamia voi aiheuttaa esimerkiksi muuttunut toimitusaikataulu, uudet spesifikaatiot projektiin tai sen laajuuteen, materiaaalipula, odottamattomat vastoinkäymiset kohteessa, tai suunnitteluvirhe. Punakynädokumentit kertovat suunnittelijalle muuttuneen aspektin, kuten esimerkiksi suunnitelmasta poikkeavan putkilinjan sijainnin, jonka suunnittelija päivittää ja korjaa 3D-tietomalliin.

Projektin toteutuksen ja rakentamisen edetessä tehdyt poikkeamat ja muutokset alkuperäisen suunnitelmaan löytyvät as-built dokumentaatiosta. Projektin toteutus saattaa vaatia esimerkiksi suunnittelupiirroksista poikkeavia ratkaisuja tai muutoksia koneisiin ja laitteisiin. Ajantasainen as-built dokumentaatio on kriittinen osa laitoksen toimitusta, jotta asiakkaalla ja toimittajalla on todellisuutta vastaavaa tietoa, jonka pohjalta toimia. (Etteplan 2023.)

## Laserkeilaus

Kappaleessa käsitellään LiDAR -pohjaisen keilaimen toimintaperiaatetta pintapuolisesti, esitetään näiden kaksi toimintaperiaatetta, keilauslaitteita ja alustoja, tavanomaisen projektin kulku ja toteutus työmaalla ja toimistossa, sekä keilauksen tuloksena saatavan pistepilven työvaiheita ja ominaisuuksia.

### 3.4 Toimintaperiaate

Laserkeilaimet on pääsääntöisesti jaettavissa kahteen toimintaperiaatteeseen sekä kolmeen kuvausmetodiin. Toimintaperiaatteena voi toimia valon kulkuaikaan perustuva pulssilaser, tai vaihe-eroperustainen jatkuva-aaltainen (Continuous Wave) laser. Kuvausmetodeina voi toimia maakeilaus (terrestiaalinen kuvantaminen), ilmakuvauks tai mobiilikuvauks esimerkiksi autoon kiinnitetyllä laitteistolla. Ilmakuvauks on perinteisesti suoritettu lentokoneella tai helikopterilla, mutta kaupallisten miehittämättömien lennokkien eli droonien yleistyttyä myös ilmakuvantaminen on yleistynyt.

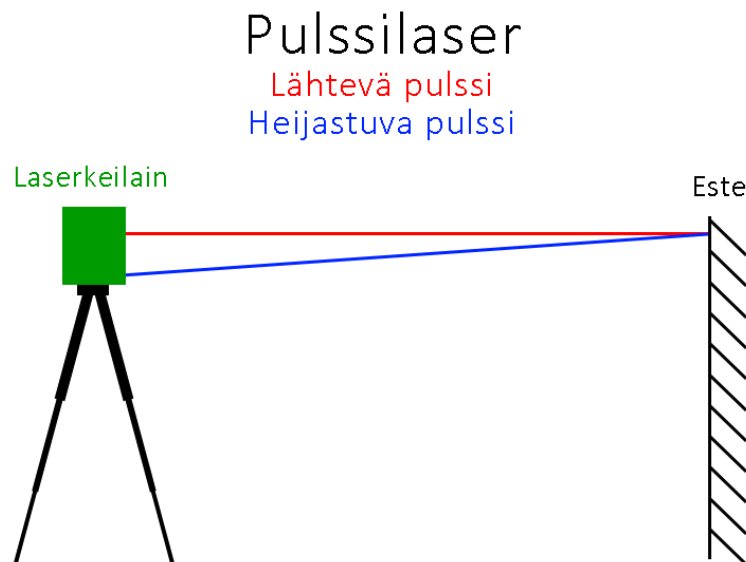
Kaikkia kuvantamistapoja yhdistää lopputulos; pistepilvi. Keilaimesta lähtevästä lasersäteestä on aina tiedossa lähtökulma vaaka- ja pystysuunnassa, jolloin vastaanottaessa data takaisin heijastuvasta lasersäteestä muodostuu sarja pisteitä. Kullakin pisteellä on koordinaattitieto sekä intensiteettiarvo, joka perustuu paluusignaalin voimakkuuteen. (Vahur 2006, 1.)

### Kulkuaikaperustaiset

Valon kulkuajan perusteella pulssilaserilla pisteen etäisyyden mittaavat keilaimet ovat vaihe-eroperustaisia versioita hitaampia, mutta näillä saadaan aikaan tiheä ja tarkka pistepilvi pidemmänkin matkan takaa (Vahur 2006, 2).

Valon kulkuaikaan perustuvassa metodissa keilain lähettää laserin pulssina, joka osuessaan esteeseen heijastuu takaisin keilaimeen. Sillä lasersäteen muodostavan valon kulkunopeus on vakio, lähetyksestä heijastukseen kuluva

aika kertoo piirtyneen pisteen etäisyyden ja sijainnin keilaimeen tallennetussa koordinaatistossa.

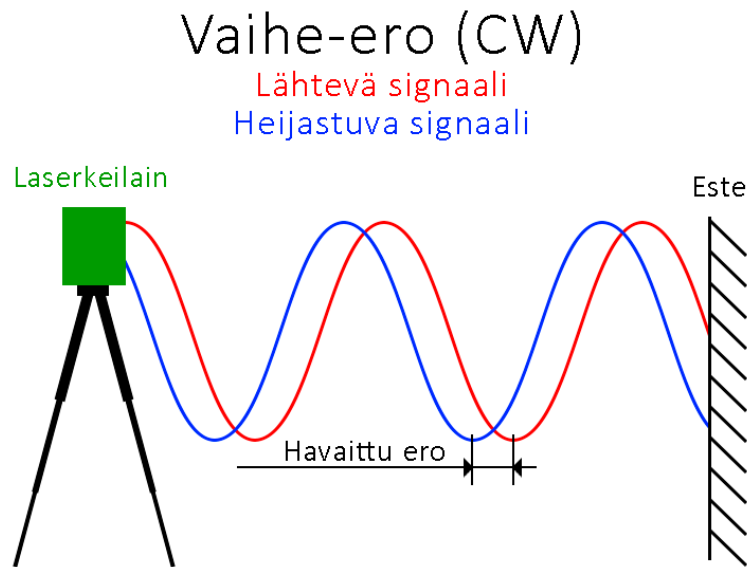


Kuva 8. Havainnekuva pulssilaserin toiminnasta.

Tämän opinnäytetyön mittauksessa käytettiin Leica Geosystems RTC360 keilainta, joka kykenee pulssilaserina mittaamaan enintään 2 000 000 pistettä sekunnissa. Mittausetäisyys kyseisellä laitteella on 0,5 m – 130 m (Leica Geosystems, 2018.)

### Vaihe-eroperustaiset

Vaihe-erolla etäisyyden mittaavat keilaimet ovat nopeampia, mutta mittaetäisyys jää kulkuaikaan perustuvaa varianttia lyhyemmäksi. Parametrien säädettävyys on rajallisempaa ja syntyvän pistepilven laatu saattaa olla reunoiltaan heikompaa pulssilaseriin verrattuna (Vahur 2006, 2.)



Kuva 9. Havainnekuva vaihe-erosta mittauksessa.

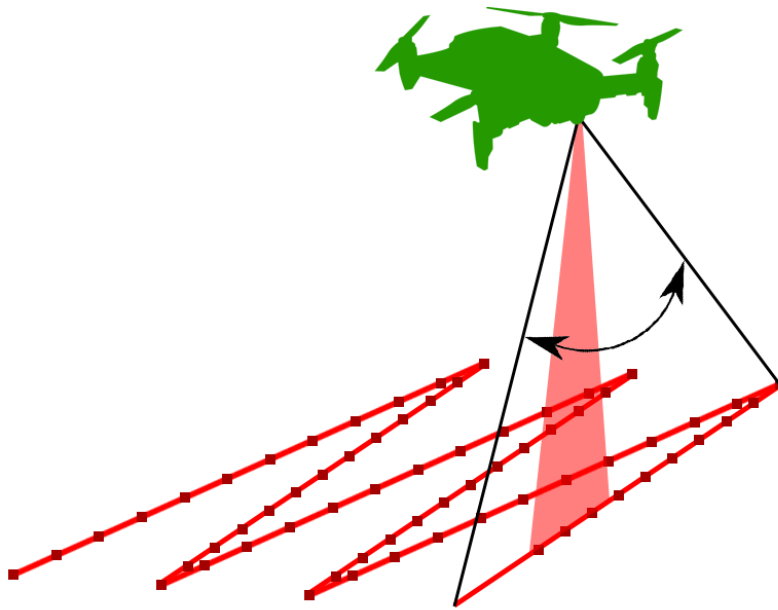
### 3.5 Laitteet

Laserkeilaus voidaan suorittaa käyttötarkoituksen mukaan monella eri tapaa. Valittuun metodiin ja laitteistoon vaikuttaa esimerkiksi tavoiteltava pistepilven tarkkuus, kuvattava kohde, vallitsevat sääolosuhteet sekä projektin koko. Laitteen vaatimukset muuttuvat huomattavasti, kun siirrytään esimerkiksi rakennuksen sisätilojen mittauksesta mittaamaan mantereita, pelloja tai vesistöjä.

#### **Kaukokartoitus–laserkeilaimet**

Kaukokartoituksella voidaan käsittää dronilla, lentokoneella, helikopterilla tai esimerkiksi satelliitilla suoritettavaa keilausprosessia. Skannauksen aikana ilma-alukseen kiinnitetty keilain lähettää sädettä viuhkamaisesti aluksen edetessä tasaisesti (Kuva 10).



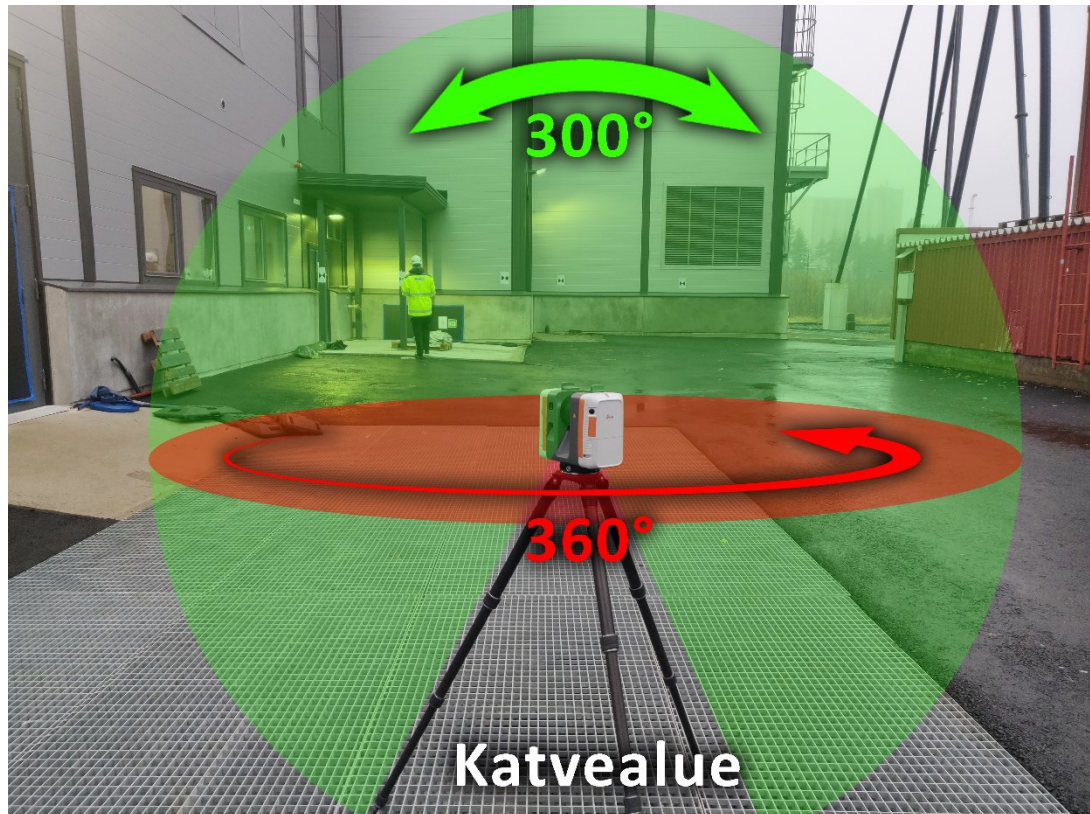


Kuva 10. Pistepilven muodostuma perinteisessä ilmakuvauksessa.

Nykyään on käytössä myös kupolimaisesti mallintavia droonipohjaisia keilausratkaisuja, joilla saadaan kuvattua tehokkaasti esimerkiksi sisäkohteita, joissa on korkea huonekorkeus ja paljon pintoja, joita ei saada kuvattua lattiatasoilta.

### **Maalaserkeilaimet**

Maalaserkeilaimet, eli terrestiaaliset keilaimet ovat kolmijalan päältä kuvauksen suorittavia kokonaisuuksia. Kokonaisuus muodostuu kolmijalasta, sekä itse laserkojeesta, joka sisältää hallintalaitteet keilauksen parametrien asettamiseksi ja itse prosessin käynnistämiseksi. Kun keilaus aloitetaan, alkaa itse laseria heijastava osuus pyörimään vertikaalisesti, pyyhkäisten viuhkan, jossa pisteet muodostuvat 300 asteen kaarella, jättäen alleen kolmijalan kohdalle 60 asteen katvealueen, josta pistepilvidataa ei saada. Tämän vuoksi keilaus on suoritettava useammasta pisteestä, jotta katvealueiden määrä jäisi pieneksi ja syntyvä pistepilvi olisi mahdollisimman täydellinen ja tarkka.



Kuva 11. Kupolimaisesti mittaavan maalaserkeilaimen kattavuus.

## Takymetri

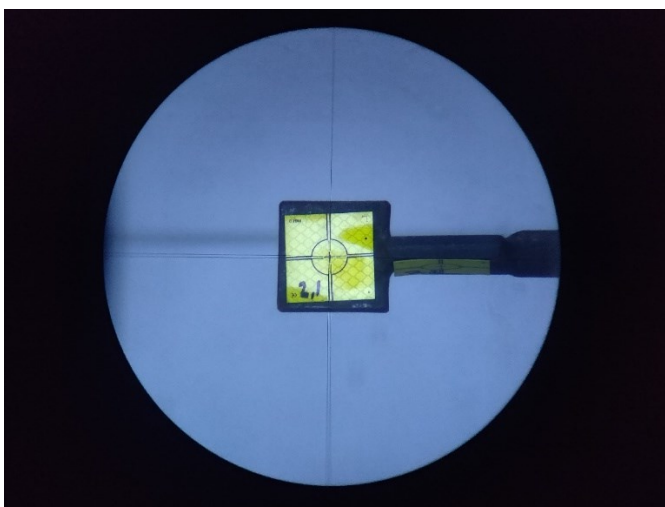
Takymetri (Kuva 12) on esimerkiksi maanmittauksessa geodataan, eli paikkatietoon perustuvissa projekteissa tarkan paikkatiedon määrittämiseen käytetty laite. Takymetri on ensisijaisesti kulman- ja etäisyydenmittauskoje, joka on nykyään satelliittimittauksen ohella mittaus- ja kartoitustekniikassa tärkein työmetodi. (Laurila, 2012, 237.)



Kuva 12. Takymetri, Leica PinPoint R400.

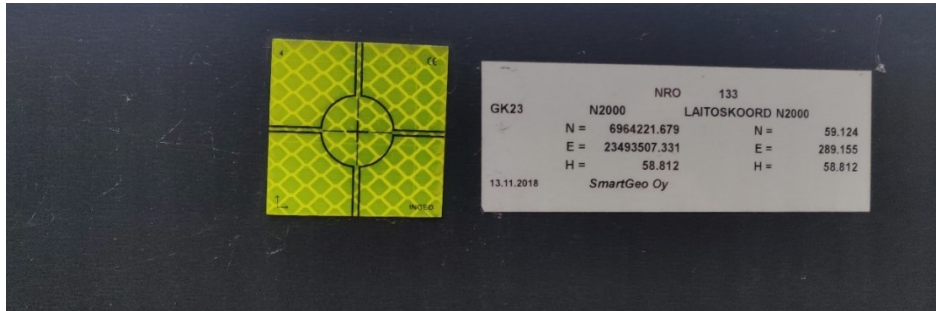
Tässä opinnäytetyössä takymetrillä saatua paikkatietoa käytettiin syntyneiden pistepilvien yhdistämiseen yhtenäisen mallin muodostamiseksi ja sen sijoittamiseksi kartalle.

Takymetri asetettiin siten, että sen hakijan (Kuva 13) läpi saatiin paikannettua vähintään kaksi, mutta optimitilanteessa useampi tähys samalta asemapisteeeltä.



Kuva 13. Tähystarra takymetrin optiikan läpi katsottuna.

Tähystarra (Kuva 14, vasen) on ennakkoon työmaalla asetettu tarra, jonka tarkka geodata on tiedossa. Kun näitä kuvataan samasta pisteestä useampi, saadaan takymetrin sijainnista tarkka tieto kolmiulotteisessa avaruudessa.



Kuva 14. Tähystarra paikka- ja laitostietoineen.

Tässä työssä hyödynnetyt tähystarrat on asetettu jo rakennusvaiheessa, jolloin näiden sijoittaminen ja paikantaminen ei kuulunut työnkuvaan. Potentiaalisia tulevia keilaustapahtumia ajatellen tulee huomioida, onko paikalla tarvittavat tähystarrat edelleen näkyvillä, vai onko näiden paikantamiseen varattava aikaa ja resursseja.

### 3.6 Keilaustapahtuma

Projekti kattaa usean vaiheen, joista usein nopein on itse mittaus kohteessa. Pisimmän ajan vie suunnittelu, pistepilven saattaminen hyödynnettävään muotoon sekä esikäsiteltyjen pistepilvien yhdistäminen. Pistepilvien yhdistäminen on tarpeen, kun kohteessa täytyy suorittaa useampi kuin yksi mittaus. Yhdellä mittauksella hyvin harvoin saavutetaan haluttua tulosta, jolloin lähes poikkeuksetta asemapistettä valitaan useampi.

### Esivalmistelu

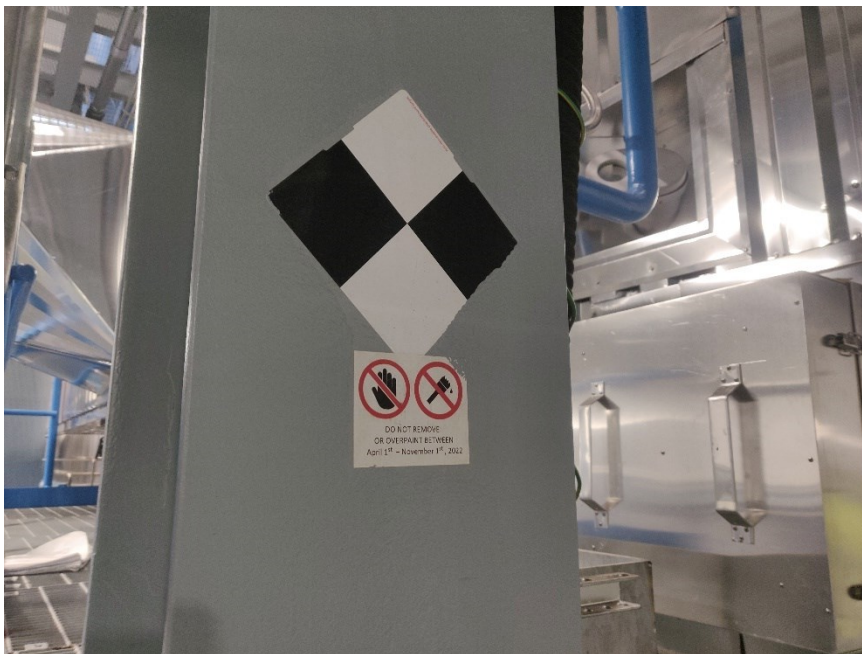
Ensimmäisenä työvaiheena suoritetaan spesifointi ja määrittely, jossa selvitetään tavoitteet mittaukselle. Määrittelyyn kuuluu esimerkiksi työn

tuloksena syntyvän mallin ja pistepilven formaatti ja sen siirtometodi, toteutuksen täydellisyytaso, sekä vaadittu tarkkuuden taso. (Vahur 2006, 5.)

Esivalmisteluvaihe määrittelyineen tulee suorittaa huolellisesti, sillä väärin määritetty toimeksianto keilauksen suorittavalle taholle saattaa johtaa toimeksiantajalle käyttökelvottomaan materiaaliin tai tarpeettoman kalliiseen toimenpiteeseen. Käyttökelvoton materiaali saattaa olla esimerkiksi liian harva pistepilvi, josta ei kyetä suorittamaan mittauksia luotettavasti. Hintaan vaikuttaa asemapisteen määrä ja täten työn kesto. Mitä useampi asemapiste toteutetaan, sitä kauemmin työmaalla menee aikaa ja sitä enemmän toimistolla kuluu aikaa pistepilvien puhdistamiseen ja yhdistämiseen (Vahur 2006, 5.)

### Kohteessa

Keilaustapahtuman kulku työmaalla alkoi laserkeilainta varten tulostettujen tähyslappujen (Kuva 15) teippauksella. Näitä käytetään pistepilvien yhdistämiseen.



Kuva 15. Laserkeilaimen tähys.

Osa tähyksistä oli valmiiksi paikoillaan aikaisemman laserkeilauksen ajalta, jonka johdosta tähyksiä piti ainoastaan täydentää edellisen keilauksen jälkeen valmistuneille pinnoille.

Tämän jälkeen mitattiin takymetrillä sijainti useammasta pisteestä, jotta pistepilvi saadaan sijoitettua vaaditulla tarkkuudella.

Viimeiseksi suoritettiin itse keilaus, joka oli kohteessa suoritettavista toimenpiteistä pisin. Laserkeilaimeen (Kuva 11) asetettiin halutut parametrit ja aloitettiin keilaus. Keilaimeen asetettiin lisäksi kuvaustila, jolloin muodostuva pistepilvi on värillinen ja kuvastaa toimistotarkastelussa paremmin todellisuutta. Värikuva on myös kriittinen, jotta tähyksien värit erottuvat ja syntyvät pilvet saadaan kohdistettua asianmukaisesti.

## **Pistepilvi**

Mittauksen tuloksena saadaan pistepilvi. Pistepilvessä kullekin yksittäiselle pisteelle määritetään kuvaushetkellä väri ja intensiteetti. Väriä voidaan hyödyntää totuudenmukaisen kuvan aikaansaamiseksi, jolloin yhdistetty pistepilvi näyttää samalta, kuin tila kuvaushetkellä. Intensiteetti puolestaan määräytyy heijastavan pinnan mukaan, jolloin myös ilman värikuvaa tai huonon valaistuksen kanssa syntyy tulos, jossa eri pinnat ovat selkeästi tulkittavissa toisistaan eriäväksi. Paluusignaalin intensiteettiin vaikuttaa isosti heijastava pinta, jolloin esimerkiksi ruostumaton teräs ja tiiliseinä näyttävät erilaiselta pistepilvessä.





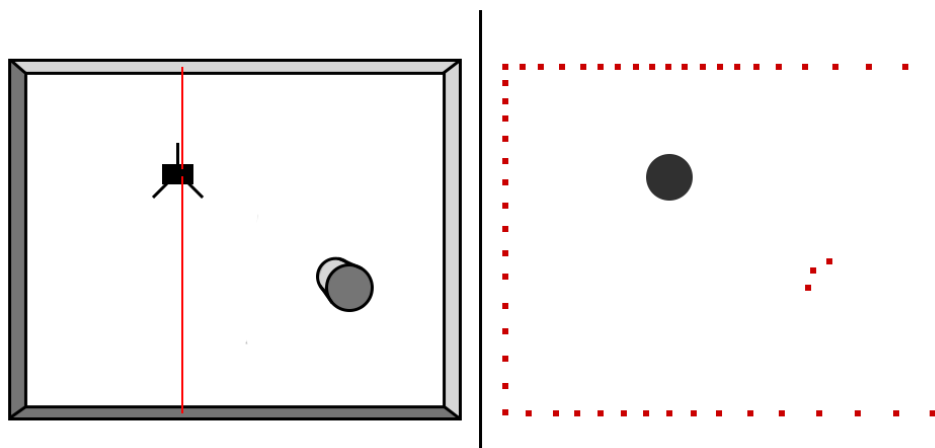
Kuva 16. Seinäjoen Energian kaukolämpölaitoksen pistepilvi, ulkoa.

Pistepilvien käsittelyyn, yhdistämiseen ja tarkasteluun on useita ohjelmia. Yksinkertaiseen tarkasteluun tässä työssä käytettiin Navis Typhoon -ohjelmistoa.

Ohjelmisto suurentaa pisteitä visuaalisesti, mitä kauempaa kuvaa katsotaan. Tämän ansiosta kaukaa tarkasteltu laitos näyttää lähes valokuvamaiselta, kun kunkin pisteen kuvaushetken valotus ja värimaailma vastaa todellisuutta. Kuva 16 osoittaa, kuinka varjostukset, auringon valo ja muut ympäristötekijät toistuvat mallissa todellisuutta vastaavalla tavalla.

## Pistepilven laatu

Useista kymmenistä asemapisteistä huolimatta pistepilveen jäi katvealueita ei-kriittisiin sijainteihin.



Kuva 17. Pistepilven ääripisteet sisätilassa.

Katvealue muodostuu, kun asemapisteen ja kuvattavan kohteen välillä on jokin laserpulssin kulun estävä objekti. Kuva 17 havainnollistaa tätä teoreettisesti pilarin taakse jäävällä katvealueella ja Kuva 18 todellisuudessa. Kuva 18 osoittaa, kuinka asemapisteen alle jää katvealue, kuten Kuva 11 graafisesti ilmaisee. Asemapiste on kuvassa vasemmassa alalaidassa, ja sen tunnistaa maassa olevasta reiästä. Tästä johtuen seinän ja asemapisteen välillä seisova henkilö aiheuttaa "reiän" pistepilveen seinän kohdalle. Punaiset nuolet havainnollistavat äärialueet, jotka lähtevät asemapisteeltä ja ohittavat henkilön. Henkilön siluetin ulkopuolella seinä piirtyy normaalisti, kun taas seinään muodostuva "varjo" on tyhjää.

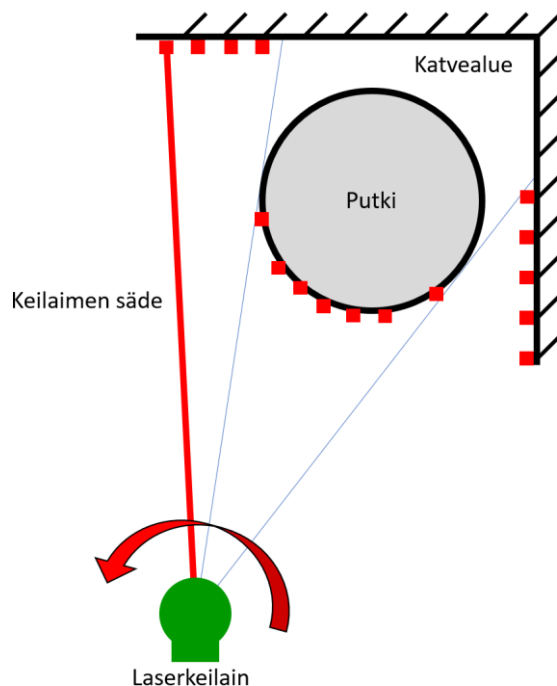




Kuva 18. Katvealueen muodostuma ulkotiloissa.

Tämänlaisen puutteen pistepilvessä voi aiheuttaa esimerkiksi kohteessa liikkuvat henkilöt, aukeavat tai sulkeutuvat ovet sekä sankka savu tai sumu.

Pistepilven laatuun vaikuttaa yksittäisen pisteen laatu, pistepilven tiheys sekä pistepilvien yhdistämisen laatu. Yksittäisen pisteen laatuun puolestaan vaikuttaa mittaussäteen osumakulma kohteeseen ja kohteen pinta. Palaavan singlaalin voimakkuus vaikuttaa myös laatuun ja tarkkuuteen. Etäisyyden kasvaessa asemapisteen ja kohteen välillä, heikkenee myös mittalaitteelle palaava signaali. Syntyvän pistepilven laatu, eli tiheys heikkenee etäisyyden funktiona. Kun käytössä on vaihe-ero perustainen keilain, arvioidaan laitteiden kykenevän keskimäärin 8 mm pisteruudukkoon 50 metrin matkalla. (Vahur 2006, 3.)



Kuva 19. Havainnekuva tangenttikulman vaikutuksesta.

Osumakulmassa huomioitavaa on, että esimerkiksi kaarevissa muodoissa kuten putkissa etäisyyden vaikutus korostuu nopeasti tangenttikulmaa lähestyttäessä. Tämän vuoksi etenkin putkistoja kuvattaessa on tärkeää huomioida asemapisteen sijainti, jotta saavutetaan mahdollisimman tarkka ja hyödyntämiskelpoinen pistepilvi. Kuva 19 osoittaa liioitellusti, kuinka säteen lähestyessä putken reunaa kasvaa pisteiden välinen etäisyys, joka johtaa epätarkkuuksiin mittatiedoissa. Tämän vuoksi on erittäin tärkeää, että asemapisteitä on useita, ja että näiltä löytyy yhteistä peittoa riittävän laajasti.

Pulssilaserin tarkkuus tässä työssä osoittautui kriittiseksi tekijäksi, eikä samaa työjälkeä olisi saatu vaihe-eroperustaisella keilaimella. Vaikka vaihe-eroperustainen laite olisi ollut nopeampi, ei se olisi kyennyt yhtä tarkan pistepilven tuottamiseen. Projektin tuloksena saaduissa pistepilvissä oli joitain epätarkkuuksia, jotka olisivat ainoastaan korostuneet vaihe-eropohjaisella keilaimella. Lisäksi pulssilaserin parempi kantama oli ominainen korkealla olevien putkien kannalta, sillä henkilönostimia tai muita ratkaisuja ei oltaisi saatu kaikkiin tiloihin.

## Pistepilvien yhdistäminen

Aina kun kuvataan useampi kuin yksi pistepilvi, tulee syntyvät pistepilvet yhdistää yhtenäisen aineiston saamiseksi, jotta kokonaiskuva on tarkka ja hyödyntämiskelpoinen.

Menetelmistä tarkin on tähyksien käyttö. Jokaisesta pistepilvestä tulee löytyä kolme yhteistä tähyistä, joilla pistepilvet yhdistetään samaan koordinaatistoon. Tähyksien sijainnit mitataan takymetrillä, jolloin pistepilvet saadaan siirrettyä vaadittuun koordinaattijärjestelmään. Tämä metodi on tarkin, ja sillä saavutetaan noin 1–3 mm tarkkuus. (Vahur 2006, 4.)

Edellisen tavan lisäksi voidaan käyttää yhteisiä erikseen mallinnettuja kohteita, kuten tasoja tai lieriöitä. Tämä on kuitenkin tähyksiin verrattuna huomattavasti epätarkempi metodi. (Vahur 2006, 4.)

Kun kuvataan samaa aluetta useasta asemapistestä, muodostuu usein huomattavan paljon alueellisia päällekkäisyyksiä, eli molemmista asemapististä kuvataan samaa aluetta, jolloin syntyy yhteistä peittoa. Myös tätä voidaan hyödyntää näiden kahden pilven yhdistämiseen.

Kun kahdessa erikseen mitatussa pilvessä on vähintään kolmasosa yhteistä peittoa ja osoitustarkkuus näissä molemmissa on alle 10 cm, voidaan suorittaa likiarvosovitus. Kun pilvet ovat likiarvosovitettu, voidaan jäännösvirheet minimoida ja sovittaa pistepilvet samaan koordinaatistoon. Tällä metodilla saavutetaan noin 5–10 mm tarkkuus. Kun kyseessä on iso projekti, käytetään usein kaikkia kolmea metodia pistepilvien yhdistämiseen. (Vahur 2006, 4.)

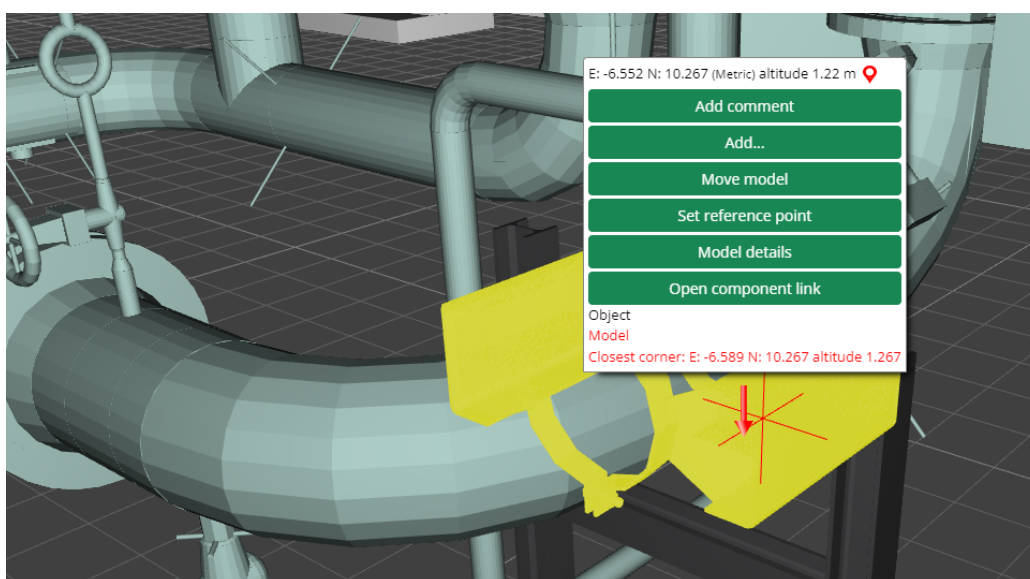
## 4 Mittaus ja tulokset

Mittauksen tuloksia käsitellään tarkemmin toimeksiantajalle erikseen laaditussa raportissa, joka toimii tämän opinnäytetyön lopputuotteena. Laadittu raportti ottaa kantaa siihen, onko laserkeilaus putkistosuunnittelun validoinnissa pätevä ja kustannustehokas työtap, ja mitä Seinäjoen laitoksen mallista ja todellisuudesta voidaan oppia käytännön toteutukseen liittyen.

### 4.1 Tulokset laserkeilauksista

Keilaustyön tuloksena saatiin paljon dataa eri formaateissa. SmartGeo Oy suoritti itse keilauksen sekä toimitti vertailuraportin, jossa on verrattu kylmä- ja kuumakeilauksissa tarkemittaukset. Tämä aineisto itsessään antaa jo vahvan kuvan tapahtuneista siirtymistä.

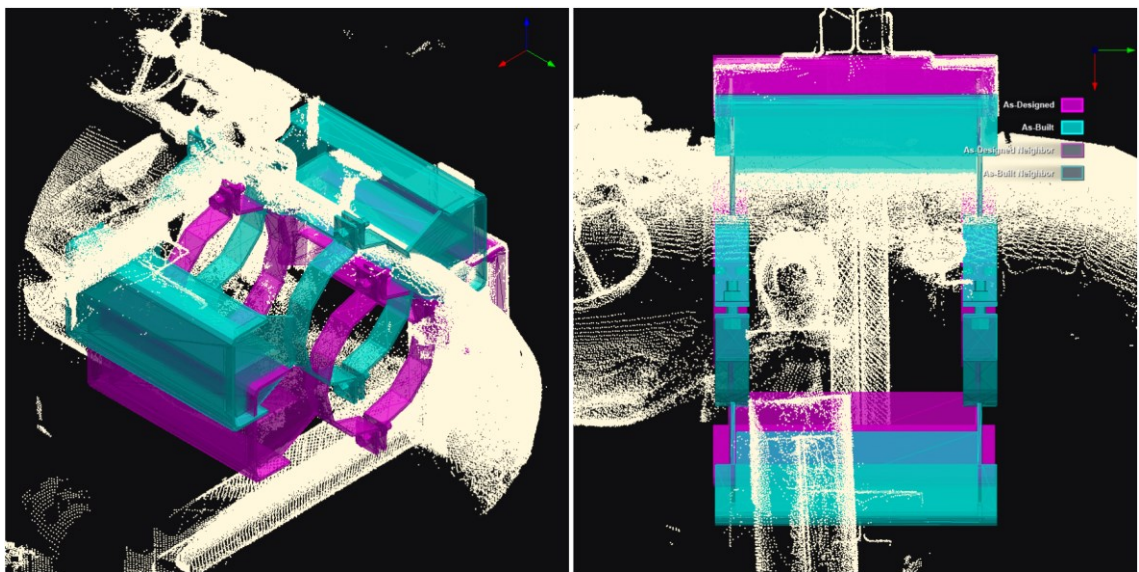
Lisäksi Profox Oy toimitti raportit kunkin määritetyn putkikannakkeen siirtymästä, jossa verrataan as-designed ja as-built toteumaa. Tätä dataa tarkasteltiin verkkopohjaisella Navis Typhoon -ohjelmistolla, joka antaa tarkastella pistepilveen tuodun tietomallin pohjata kuhunkin komponenttiin liitettyä raporttia. Seuraavissa kuvissa käsitellään samaa primäärikannaketta.



Kuva 20. Navis Typhoon -näkymä primäärikannakkeen tarkastelusta.

Kun tarkasteltava komponentti on valittu, voidaan siihen liitetty raportti avata valitsemalla ”Open component link”, joka avaa kyseisestä kohdasta laaditun raportin.

Raporttiin on koostettu tieto kaikista havaituista siirtymistä ja toleranssipoikkeamista, kun vertauskohteena on alkuperäinen suunnittelumalli. Raportissa on lisäksi myös graafinen vertaus, joka auttaa raportin tarkastelijaa havaitsemaan nopeasti poikkeaman sellaisin toteutuessa.



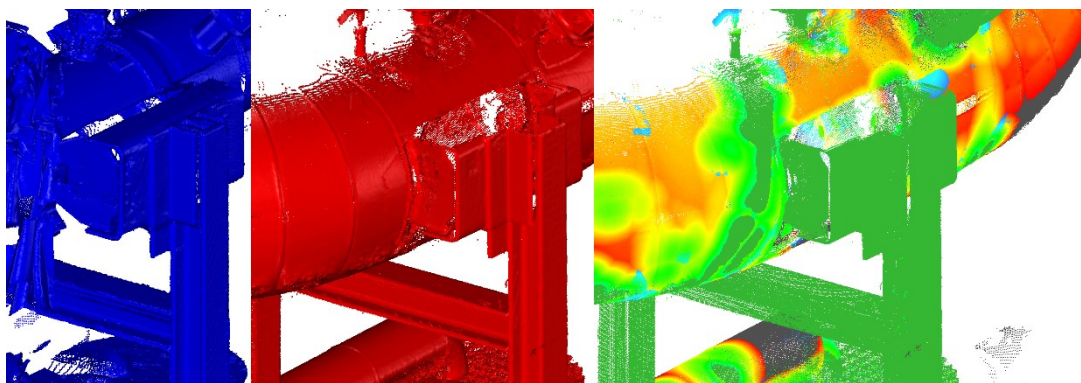
Kuva 21. As-designed verrattuna as-built malliin pistepilvessä.

Raportti esittää paitsi X, Y ja Z-akselin translaatiosiiirtymät, myös rotaatiosiiirtymät. Kaikki siirtymädata ei ole suoraan käyttökelpoista, sillä esimerkiksi rotaatioille ei löydy vertailukelpoista dataa ROHR2 -laskennasta.

Tuloksissa keskitytään siis puhtaasti X Y ja Z-akseleilla tapahtuneisiin siirtymiin, jotka on ilmaistu osassa raportteja N (north), E (east), ja Z (korko) siirtyminä. Negatiivinen E-luku esimerkiksi kertoo kappaleen siirtyneen laitoskoordinaatistossa länteen.

## 4.2 Tulosten vertaus

Tulosten vertailu suoritettiin alihankkijan raportteihin, 3D-vertailuaineistoon sekä joustavuustarkastelun huomioivaan taulukkolaskentaan perustuen. Kaikki 3D-aineisto perustuu samaan koordinaattijärjestelmään, jolloin kannakkeiden siirtymiä voidaan verrata suoraan laskentatietoihin.



Kuva 22. Cyclone 3DR vertaus primäärikannakkeesta.

Kuva 22 havainnollistaa kahta keilaustilannetta ja näiden vertailutulosta. Vasemmassa reunassa sinisellä on pistepilvi, kun laitos on keilattu sen ollessa kylmä, eli ei operatiivisessa käytössä. Punaisella esitetty on pistepilvi laitoksen ollessa käytössä sen normaalilla käyttöasteella, ja oikeassa reunassa on näiden kahden pistepilven päällekkäinen siirtymävertaus.

Suurin ero vertauskuvan putkessa aiheutuu siitä, että kylmänä keilattu putki on ollut eristämätön, ja laitoksen valmistuttua putkin on eristetty. Tämä ei haittaa tulosten tulkintaa, sillä tarkastelun kohteena on putkiston primäärikannakointi, ei itse putki. Kuvassa primäärikannake on yhtenävä tummanvihreä, joka merkitsee, ettei kannake ole siirtynyt asetetun  $\pm 0,02$  m toleranssiasteikon ulkopuolelle.

Huomioitavaa on, että osa putkesta näkyy silti vihreänä, vaikka eristeen puutteen kylmäkeilauksessa tulisi johtaa huomattavaan eroon pistepilvien vertauskuvassa. Tämän poikkeaman syytä opinnäytetyön laatija ei osaa

spekuloida tarkemmin, mutta esimerkiksi kylmäkeilauksessa on havaittavissa jokin peite kyseisen tarkastelupisteen kohdalla. Onkin mahdollista, että peitteen osittainen osuvuus kuumakeilauksen pistepilvessä aiheuttaa sen, että vertailuohjelma tulkitsee näiden pisteiden olevan samassa tasossa, ja täten toleranssialueen sisällä.

Profoxin Oy laati raportit kustakin keilauksesta, ja kussakin raportissa verrataan toteumaa suunnittelumalliin. Kun vähennetään kuumakeilauksen aikana toteutunut ero kylmäkeilauksen aikana toteutuneeseen, saadaan tuloksena todellinen siirtymä kylmän ja kuuman välillä.

Kun tätä siirtymää verrataan ROHR2 laskentamallin siirtymiin, saadaan validointimetodi, jolla voidaan havaita joustavuustarkastelun poikkeamia.

Osana työtapatutkimuksen selvitystä on myös harkita, onko kokeiltu tapa kustannustehokas ja saadaanko tehdyille työlle ja investoinnille vastinetta. Selvitystyö itsessään on luonnollisesti kalliimpi, sillä sen kustannukset sisältävät kahden vaiheen keilauksen ja työtapatutkimukseen kulutetut henkilöstökulut. Tässä vertailussa huomioitiin palveluntarjoajan tarjouksen optiot, niiden tarpeellisuus, pohjakustannukset sekä henkilöstökustannuksia.



## 5 Loppuraportti ja tulevaisuus

Työn aikana saatiin paljon dataa ja kokemusta laserkeilauksen suorittamiseen sekä siitä saatavan pistepilven hyödyntämiseen. Lisäksi laadittiin raportti tuloksista ja työmetodin sopivuudesta validointiprosessissa.

Työ oli mielenkiintoinen ja haastava, varsinkin sen ainutlaatuisuuden vuoksi. Laserkeilausta ei tiettävästi ole aikaisemmin pyritty hyödyntämään näin laajamittaisesti putkistojen lämpöliikkeiden tarkastelun.

Opinnäytetyön luonteen vuoksi raportti, joka tulkitsee tuloksia tarkemmin sekä muodostaa kannan työtavasta on luottamuksellinen, eikä sitä ole saatavilla julkisesti. Laaditun raportin laajuus on 23 sivua + 45 sivua liitteitä, kuten taulukoita, tulkintapöytäkirjoja sekä tarkemmittausraportteja.

### Tulevaisuus

Jatkotutkimusta voisi tehdä työn tuloksena saatua pistepilvidataa, osaamista ja verkostoja hyödyntäen, esimerkiksi as-built dokumenttien laatimista ja tarkastelua varten. Nykyisellään as-built prosessi usein vaatii suunnittelijan lähettämistä kohdelaitokseen sekä manuaalisia mittauksia. Tämän prosessin optimoinnissa voitaisiin hyödyntää pistepilvidataa esimerkiksi siten, että laitoksen valmistuttua toteutettaisiin keilaus koko laitoksesta ja sitä verrattaisiin osa-alueittain 3D-tietomalliin.

Laserkeilaus on kehittynyt, ja jatkaa kehitystään erittäin nopeasti. Eräs nopeasti yleistyvä tapa on erilaiset droonit, joita voidaan lentää sisällä ja ahtaissa tiloissa. Droonipohjainen keilaus ei enää rajoittuisi lattiatasoon tai vaatisi henkilönostimia, vaan operaattori voisi keilata kokonaisen laitoksen yksinkertaisesti lentämällä sen läpi, laatien peitteistöä kupolimaisen keilaimen avulla.



## Lähteet

Costa, R.; Sobek D. 2003. Iteration in engineering design: inherit and unavoidable or product of choices made? Montana State University. Viitattu 24.2.2023.

[https://www.researchgate.net/publication/240066660\\_Iteration\\_in\\_engineering\\_design\\_Inherent\\_and\\_unavoidable\\_or\\_product\\_of\\_choices\\_made](https://www.researchgate.net/publication/240066660_Iteration_in_engineering_design_Inherent_and_unavoidable_or_product_of_choices_made)

Energiateollisuus ry 2023. Miten kaukolämpö toimii? Viitattu 12.2.2023.

<https://kaukolampo.fi/miten-kaukolampo-toimii/>

Etteplan. 2023. Miksi tuotantolaitoksesi dokumentaatio ja käytännön todellisuus ovat aina ristiriidassa? Viitattu 28.2.2023.

<https://www.etteplan.com/fi/artikkelit/miksi-tuotantolaitoksesi-dokumentaatio-ja-kaytannon-todellisuus-ovat-aina-ristiriidass>

Gebwell 2023. Kaukolämmön toimintaperiaate. Viitattu 12.2.2023.

<https://gebwell.fi/kaukolampo/kaukolammon-toimintaperiaate/>

Helsingin seudun ympäristöpalvelut HSY. 2023. Viitattu 12.2.2023.

<https://koutsu.hsy.fi/courses/energiaekspertti/lessons/lammitys-2/topic/lammitysmuodot-3/>

Huhtinen, M.; Kettunen, A.; Nurminen, P. & Pakkanen, H. 1994.

Höyrykattilatekniikka. Helsinki: opetushallitus.

Laurila, P. 2012. Mittaus- ja kartoitustekniikan perusteet. 4., Uudistettu painos.

Rovaniemi: RAMK University of Applied Sciences.

Leica Geosystems 2018. Leica RTC360 Product Specifications. Viitattu

10.1.2023. <https://leica-geosystems.com/products/laser-scanners/scanners/leica-rtc360>

Lähteenmäki, M. 2006. Elementtimenetelmän perusteet. Viitattu 24.2.2023.

[https://mlahteen.fi/arkistot/elpe\\_pdf/](https://mlahteen.fi/arkistot/elpe_pdf/)

National Ocean Service. 2021. What is lidar? Viitattu 4.2.2023.

<https://oceanservice.noaa.gov/facts/lidar.html>

Pere, A. 2016. Koneenpiirustus 1 & 2. 12. Painos. Espoo: Kirpe Oy.

Seinäjoen Energia 2021. Merkittävällä investoinnilla kohti uusiutuvaa lämmöntuotantoa. Viitattu 13.2.2023. <https://seinajoenenergia.fi/merkittavalla-investoinnilla-kohti-uusiutuvaa-lammontuotantoa/>

Vahur, J. 2006. Laserkeilauksen perusteita ja mittauksen suunnittelu. Viitattu 10.1.2023. <https://docplayer.fi/7209674-Laserkeilauksen-perusteita-ja-mittauksen-suunnittelu.html>

Valmet. 2023. Valmet Yrityksenä. Viitattu 3.3.2023 <https://www.valmet.com/fi/valmet-yrityksena/>