

Juha-Matti Asikainen

Laserkeilaimen soveltuvuus varastosäiliön tilavuuskalibrointiin

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Insinööri (ylempi AMK)
Maanmittaus
Opinnäytetyö
6.10.2016

Tekijä Otsikko	Juha-Matti Asikainen Laserkeilaimen soveltuvuus varastosäiliön tilavuuskalibroitiin
Sivumäärä Aika	85 sivua + 2 liitettä 6.10.2016
Tutkinto	insinööri (ylempi AMK)
Koulutusohjelma	rakentaminen, maanmittaus
Ohjaajat	lehtori Jussi Laari asiantuntija Tuomas Hietanen
<p>Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, miten laserkeilausmittausjärjestelmää voitaisiin parhaimmillaan hyödyntää tilavuuskalibroinnissa. Tavoitteena oli lisäksi selvittää, kuinka markkinoilla oleva Trimblen kehittämä RealWorks Advanced Tank -ohjelma laskee säiliön tilavuuden sekä kuinka ohjelma poikkeaa nykyisestä Inspectan kehittämästä laskentaohjelmasta. Tutkimuksen tavoitteena oli luoda kokonaiskuva laserkeilauksen mahdollisuuksista tilavuuskalibroinnissa sekä tuottaa Inspectalle ohjeistus siitä, mitä kaikkea laserkeilausmittausmenetelmässä tulisi ottaa huomioon laitteiston, mittauksen ja laskennan kannalta.</p> <p>Tutkimuksen lähtöaineistona käytettiin aikaisemmin julkaistuja aineistoja, lähinnä verkosta löytyvästä materiaalista. Tutkimus suoritettiin vertailumittauksena, jossa verrattiin Trimblen TX8-laserkeilaimen ja takymetrien Leica TDRA 6000:n sekä Leica TCRA 1201:n mittausaineistoja keskenään. Vertailumittausaineisto kerättiin kevään 2015 aikana kolmenlaisesta, toisistaan poikkeavista säiliöistä. Laserkeilausmittausmenetelmälle laskettiin mittausepävarmuudet vertailumittauskohteiden 1 ja 2 mittausaineistojen perusteella.</p> <p>Tutkimustulokset osoittivat, että Trimblen RealWorks Advanced Tank -ohjelma on vielä kehitysasteella ja se eroaa joiltakin osin Inspectan kehittämästä laskentaohjelmasta. Tulokset osoittivat, että nykyisillään laserkeilausmittausmenetelmä ei sovellu ISO 7507-4 -standardin mukaiseen tilavuuden määrittämiseen mm. mittalaitteen tarkkuusvaatimuksien vuoksi, mutta mittausmenetelmä soveltuu hyvin standardin ulkopuolisiin tilavuuden määrittämiin. Tulokset toivat esille muutamia laserkeilauksen heikkouksia ja vahvuuksia esille. Mittausepävarmuudeksi laserkeilausmittausmenetelmälle laskettiin kohteissa 1 ja 2 olevan $\pm 0,3-0,5$ %:n kattavuuskertoimella $k = 2$. Mittausepävarmuudet osoittautuivat samansuuruisiksi kuin aiemmin Liettuassa ja Kiinassa tehdyissä tutkimuksissa. Tutkimuksen tuloksia voidaan käyttää myöhemmin Inspectan laitehankinnoissa ja mittausmenetelmien kehityksissä.</p>	
Avainsanat	tilavuuskalibrointi, laserkeilaus, mittausepävarmuus, TX8-laserkeilain, ISO 7507-4

Author Title Number of Pages Date	Juha-Matti Asikainen The suitability of laser scanner for calibration of the volume of a storage tank. 85 pages + 2 appendices 6 October 2016
Degree	Master of Engineering
Degree Programme	Civil Engineering, Land Surveying
Instructors	Jussi Laari, Lecturer Tuomas Hietanen, Measuring Specialist
<p>The aim of this final year project was to determine how to best use a laser scanning measurement system in volume calibration, as well as how the Trimble RealWorks Advanced Tank program calculates the volume of a tank, and how the program differs from the current one by Inspecta. The overall aim was to establish the potential of laser scanning in volume calibration and to create instructions about what should be taken into account when it comes to the equipment, measurements and calculation when using laser scanning.</p> <p>Measurement data of three types of divergent tanks by a Trimble TX8 laser scanner and Leica total stations TDRA 6000 and TCRA 1201 were compared. Measurement uncertainties of the measurements were calculated for the laser scanning method.</p> <p>The results showed that the Trimble RealWorks Advanced Tank program is still in a development stage. The results showed that laser scanning is not currently suitable for the determination of volume according to the ISO 7507-4 standard, but the method is suitable for other volume determinations. The calculated measurement uncertainty was of the same magnitude as those of previous studies made in Lithuania and China. The results can be used for equipment purchases and development of measurement methods.</p>	
Keywords	volume calibration, laser scanning, TX8- laser scanner, measurement uncertainty, ISO 7507-4

Sisällys

Lyhenteet ja termit

1	Johdanto	1
2	Teoriaa ja ohjeita	4
2.1	Mittauslaitelaki 707/2011	4
2.2	Inspecta	6
2.3	ISO 7507-standardi	6
2.3.1	Yleisesti standardista	6
2.3.2	ISO 7507-1:n merkitys tilavuuskalibroinnissa	8
2.4	Standardin ISO 7507-4 mukaisen menetelmän vaatimukset takymetrillä suoritettavaan tilavuuskalibrointiin (tämän luvun tiedot vain työn tilaajan käyttöön)	9
2.5	Laserkeilaus	9
2.5.1	Yleistä	9
2.5.2	Pistepilven mittaustarkkuuteen vaikuttavat tekijät	10
2.6	Aiheesta tutkittua	12
2.7	Öljysäiliön rakenteet	14
2.7.1	Yleisimmät rakennetyypit	15
2.7.2	Kelluvan katon rakenteet	24
2.7.3	Deadwoodiin positiivisesti ja negatiivisesti vaikuttavat rakenteet	26
3	Tutkimuskohteiden esittely	29
3.1	Kohde 1: Voiteluöljysäiliö 55 m ³	29
3.2	Kohde 2: Dieselsäiliö 16 000 m ³	29
3.3	Kohde 3: Bensiniä säiliö 16 000 m ³	30
3.4	Vertailumittauksen toteutus	31
3.5	Mittauskalusto	32
3.6	Laskentaohjelmat	34
3.6.1	Leica Axyz -mittausohjelma	34
3.6.2	Polyworks -mittausohjelma	35
3.6.3	Inspectan kehittämä laskentasovellus (tämän luvun tiedot vain työn tilaajan käyttöön)	36
3.6.4	Trimble Realworks 9.0 Advanced Tank -sovelluksella	36
4	Vertailumittauksen tulokset ja mittausepävarmuus	38
4.1	Vertailumittauksen tulokset	38
4.2	Muita havaittuja tuloksia	63

4.3	Mittausepävarmuudet	65
5	Johtopäätökset (tämän luvun tiedot vain työn tilaajan käyttöön)	68

Liitteet

Liite 1. TCS-excelin tulokset Capacity table kohteesta 1 neljään metriin asti.

Liite 2. Inspectan mittatarkastusraportin taulukko kohteesta 1 neljään metriin asti.

Lyhenteet ja termit

API	American Petroleum Institute. Yhdysvaltalainen öljy- ja kaasuteollisuuden yhdistys
CDM	Core Data Model. Leica Axyz – mittausohjelman ydin, joka hoitaa mittapisteiden laskennan ja tiedon tallennuksen
EDN	North German Legal Verification Authority. Pohjois-Saksan laillinen tarkastusviranomais
EODR	Electro-optical distance ranging. Elektro-optisessa etäisyydenmittauksessa mittalaite lähettää infrapuna-alueella mittausaaltoja, jotka heijastetaan takaisin prismapeilin avulla. Mittari rekisteröi mittausaaltojen edestakaisen määrän jaaaltojen vaihe-eron ja määrittää näistä vinoetäisyyden.
EPLA	Eteenpäinleikkaus avaruudessa. Eteenpäinleikkauksella määritetään uuden kohdepisteen avaruuskoordinaatit kahden eriasentoisen kuvan (asemapisteen) sädekimpun avulla. EPLA-mittausjärjestelmä koostuu vähintään kahdesta teodoliittimittalaitteesta.
IEC	International Electrotechnical Commission. Kansainvälinen sähköalan standardisointiorganisaatio.
ISO	The International Organization for Standardization. Kansainvälinen standardisointijärjestö.
LIDAR	Light Detecting and Ranging. Optinen kaukokartoituslaite, joka mittaa kohteen etäisyyden lähettämällä pulssin laservaloa ja rekisteröimällä ajan, joka kuluu heijastuneen pulssin palaamiseen.
MIKES	Mittatekniikan keskus. Oli Suomen kansallinen metrologialaitos, joka lakkautettiin ja liitettiin vuoden 2015 alussa Teknologian tutkimuskeskukseen VTT Oy:n.
MPE	Maximum Permissible Error. Suurin sallittu virhe.

NURBS	Non-uniform rational basis spline. Matemaattinen malli, jota käytetään käyrien ja pintojen luomiseen ja esittämiseen tietokonegraafikassa.
OIML	Organisation Internationale de Métrologie Légale. Kansainvälisen lakisääteiden mittaustoiminnan organisaatio
ppm	Parts per million. Suhdeyksikkö, joka ilmaisee, kuinka monta miljoonasosaa jokin on jostakin.
PTB	Physikalisch-Technischen Bundesanstalt. Saksan kansallinen metrologia instituutti.
TCS	Tank calibration sheet. Trimble RealWorks Advanced Tank -ohjelman mukana tuleva säiliön tilavuuden laskentaan tarkoitettu excel-taulukko.
TIC	Testing, Inspection, Certification. Testaus, tarkastus ja sertifiointi.
TRW	Trimble RealWorks, Trimblen kehittämä pistepilven käsittelyohjelma.
UV	Uivakatto, kelluvakatto, kelluva välikatto, floating cover. Säiliön sisäpuolella oleva kattorakenne, joka estää nesteen höyrystymistä ja likautumista.
deadwood	Kaikki säiliön sisäpuoliset rakenteet, jotka vaikuttavat säiliön tilavuuteen.
kalibrointi	Toimenpide, jonka avulla selvitetään tunnetuissa olosuhteissa mittanormaalien antamien suureiden ja niiden mittauserävarmuuksien sekä vastaavien mittalaitteiden näyttämien ja niihin liittyvien mittauserävarmuuksien välinen yhteys, jonka perusteella näyttämästä voidaan tämän jälkeen johtaa mittaustulos. Tässä tutkimuksessa kalibroinnilla ja tilavuuden määrittämisellä tarkoitetaan samaa asiaa.
raakadata	Tässä yhteydessä mitta-aineisto, joka on esikäsitelty Axyz- tai RealWorks- mittaushjelmalla. Raakadatan avulla suoritetaan varsinainen säiliön tilavuuden laskenta.

1 Johdanto

1.1. Tausta

Tilavuuskalibrointi on prosessi, jossa määritetään varastosäiliön tilavuus. Tilavuuden määrittäminen on erittäin tärkeää etenkin öljy-yhtiöiden kannalta, koska öljyn kaupallisessa mielessä oikean öljymäärän määrittäminen on välittömässä suhteessa yhtiön varallisuuteen. Tilavuuden määrittäminen on myös lainsäädännöllinen asia. Suomessa vuonna 2011 säädetty mittauslaitelaki määrittelee, miten usein ja milloin varastosäiliö tulee vakauttaa eli turvata mittauslaitteiden toiminnan, mittausmenetelmien ja mittaustulosten luotettavuus. Mittauslaitelaki koskee kaikkia kaupankäyntiin liittyviä tapahtumia, joissa mittauslaitetta tai – menetelmää käytetään:

- 1) elinkeinotoiminnassa tuotteen tai palvelun hinnan taikka muun taloudellisen edun määrittämiseen mittaustulosten perusteella;
- 2) kulutusmittauksessa hinnan taikka muun taloudellisen edun määrittämiseen mittaustulosten perusteella;
- 3) viranomaisen tai viranomaiseen rinnastettavan toimijan mittaustulokseen perustuvassa päätöksenteossa;
- 4) mittaustapahtumassa, jolla on merkitystä yleiseen etuun, yleiseen terveyteen ja turvallisuuteen, yleiseen järjestykseen tai ympäristönsuojeluun. [2]

Tilavuusmäärittäminen johdosta säiliöön osataan täyttää juuri oikea määrä nestettä eikä näin pääse syntymään ylivuotoja ja ympäristövahinkoja. Tilavuusmäärittämisellä pystytään myös osoittamaan kuinka paljon säiliö rakenteellisesti kestä mitään nestettä.

Tilavuusmäärittämismenetelmään on säädetty ohjeistus ISO 7507-standardi (International Standard), joka tarkasti ohjeistaa mm., kuinka tilavuus tulee määrittää, millaisia mittausmenetelmiä tulee käyttää, esittää vaatimuksia mittalaitteille ja mitä eri menetelmissä tulee mitata säiliöstä. Mittausmenetelmiä on useita erilaisia, standardi kattaa niistä neljä. Vielä maailmalla on käytössä vanhoja mittausmenetelmiä, joissa säiliö mitataan vaipan ulkopinnasta mittanauhan ja luotimitan avulla tai mittaamalla takymetrillä vaipan ulkopinnasta. Nykyisin suosituimmaksi mittausmenetelmäksi on kehitetty säiliön sisältä tapahtuva mittausmenetelmä, jossa takymetrin avulla säiliön sisältä mitataan pisteitä, joiden avulla säiliön tilavuus lasketaan. Tämä menetelmä on hyväksytty lailliseksi menetelmäksi ISO 7507-4 -standardiin vuonna 2010. [7]

Uusimpana trendinä etenkin maailmalla, mutta jonkin verran myös Suomessa, on alettu käyttää tilavuusmäärittämisessä laserkeilausmenetelmää. Latvian teknillisessä yliopistossa menetelmää on tutkittu useamman vuoden ajan, ja niistä saadut tulokset ovat osoittautuneet päteviksi. Ongelmia laserkeilausmenetelmän yleisempään käyttöön kaupallisissa tarkoituksissa aiheuttaa ISO 7507-standardi, joka ei vielä nykyisellään hyväksy menetelmää tilavuusmäärittämiseen. Maailmalla on ollut viitteitä siitä, että laserkeilausmittausmenetelmää yritettäisiin saada hyväksytyksi ISO-standardiin. [7]

Tämä YAMK-opinnäytetyö on selvitys nykyisestä tilavuuskalibrointiprosessista ja uusista mittausmenetelmistä laserkeilauslaitteistolla, jonka tietojen perusteella Inspecta Oy tulee kehittämään tulevaisuudessa laserkeilausmenetelmän käyttöönottoa tilavuuskalibrointiprosessissa.

1.2. Tutkimusongelma ja tavoitteet

Nykyisellään tilavuuskalibrointiprosessi on suhteellisen pitkäaikainen ja raskas prosessi. Itse säiliön mittaukseen kuluu useampi tunti riippuen säiliön koosta. Ongelmana mittauksessa ovat muuttuvat olosuhteet, jotka vaikuttavat teräsrunkoisen säiliön muotoon, teräksen lämpöpienenemisominaisuudesta johtuen. Ongelmana on myös mittauksessa saatava aineiston määrä, joka on suorassa yhteydessä standardin määrittämään pistemäärään. Säiliön koosta riippuen pistemäärä useimmiten jää alle 600 pisteen, jolloin säiliön todellista muotoa ei pystytä selvittämään. Kehiä mitattaessa ongelmana on myös saada pisteet samalle tasolle suhteessa ympyrän keskipisteeseen, jolloin kehämitan säteen saisi ihanteelliseksi. Näiden lisäksi mittauksessa ei pystytä kaikkea mittaamaan koneellisesti, jolloin osa mittauksista suoritetaan mittanauhaa ja vesivaa-kaa käyttäen, jolloin inhimillisiltä virheil- tä ei pystytä välttymään. Laskennan suurimpana ongelmana on se, että prosessissa joudutaan käyttämään useaa ohjelmaa eri henkilöiden toimesta ja osaksi laskennat joudutaan suorittamaan käsilaskentana, jolloin inhimillisiltä virheil- tä ei voida välttää. Yhden ongelman tilavuuskalibrointiin tuottaa myös siitä säädetyt standardit, jotka eivät nykyisellään ota huomioon laserkeilausmenetelmää sellaisenaan vaan ne ikään kuin niputtavat laserkeilausmenetelmän ja takymetrimittausmenetelmän samaan kategoriaan samoine tarkkuusvaatimuksineen.

Tämän tutkimuksen päätavoitteena oli selvittää miten laserkeilausmenetelmää voisi parhaimmillaan hyödyntää tilavuuskalibrointiprosessissa. Tutkimuksessa oli tavoitteena myös selvittää, kuinka olemassa oleva Trimble RealWorks (TRW) -ohjelma laskee säi-

liön tilavuuden ja kuinka se poikkeaa nykyisestä Inspectan kehittämästä laskentamenetelmästä. Tutkimuksessa oli tarkoitus luoda kokonaiskuva laserkeilausmenetelmän mahdollisuuksista tilavuuskalibroinnissa ja tuottaa ohjeistus Inspectalle siitä, mitä kaikkea mittausmenetelmässä tulisi ottaa huomioon niin laitteiston, mittauksen ja laskentaprosessin osalta.

1.3. Tutkimuksen rajaukset

Tutkimuksessa käsitellään yhtenä osa-alueena mittausmenetelmän luotettavuutta, joka osoitetaan mittausepävarmuudella. Tutkimuksessa ei kuitenkaan käsitellä mittausepävarmuuden määrittämiseen vaadittavia laskentamenetelmiä ja laskelmia, vaan näihin viitataan ainoastaan aikaisemmissa tutkimuksissa saatuihin mittausepävarmuusarvoihin.

Tutkimuksessa paneudutaan niin sanottuihin tavallisiin varastosäiliöihin, jotka ovat kokoluokaltaan noin 50–30 000 m³. Tutkimuksessa ei käsitellä sellaisia varastosäiliöitä, joiden ominaisuuksiin kuuluvat joko hiiliteräksestä tai alumiinista valmistetut kelluvat välikatot (uivakattoiset).

1.4. Tutkimuksen menetelmä ja tutkimusaineisto

Tutkimuksessa hyödynnetään kirjallisuustutkimuksia ja Inspecta Oy:n olemassa olevaa aineistoa. Kirjallisuustutkimukset koostuvat pääosin verkosta löytyvään materiaaliin, aiheesta kirjoitettuihin aikaisempiin tutkimuksiin ja teoksiin sekä tutkimukseen liittyvistä standardikokoelmista, koska varsinaista tietokirjallisuutta aiheesta ei ole kovin paljon.

Tutkimuksessa kerättiin vertailukelpoista mittausaineistoa vuoden 2015 aikana. Mittausaineistoa pyrittiin keräämään vähintään kolmesta eri kokoluokan ja ominaisuuksiltaan samanlaisista säiliöistä. Tutkimus toteutetaan empiirisenä kehitystutkimuksena perustuen edellä mainittuihin aineistoihin sekä tutkimuksessa havainnoitavaan aineistoon ja sen analysointiin.

2 Teoriaa ja ohjeita

2.1 Mittauslaitelaki 707/2011

Mittauslaitelaki astui voimaan heinäkuun 1. päivänä vuonna 2011, ja se kumosi vanhan vakauslain (219/1965). Mittauslaitelain tarkoituksena on varmistaa ja turvata mittalaitteiden toiminta, mittausmenetelmien sekä mittaustulosten luotettavuus. Mittauslaitelaki ohjaa monenlaisia mittausmenetelmiä ja mittaustapoja, mittauslaitteita ja niiden varmuuksia niin elinkeinoelämässä, viranomaisiin ja niiden toimintoihin sekä viranomaisiin rinnastettaviin toimijoihin sekä lähestulkoon kaikenlaiseen kaupankäyntiin aina mekaanisista vaaosta lähtien.

Tärkeimpiä säädöksiä, joilla on vaikutusta tilavuudenmääritykseen, ovat: Lain 5. pykälä, jossa vaaditaan, että mittausmenetelmän ja mittauslaitteiden tulosten tulee olla luotettavia, jäljitettävissä kansainvälisiin mittanormaaleihin ja perustua kansainväliseen mittayksikköjärjestelmään (SI-järjestelmään) kuten on säädetty mittayksiköistä ja mittanormaalijärjestelmästä annetussa laissa (1156/1993). Lisäksi pykälässä on vaadittu, että valitun menetelmän on sovelluttava aiottuun tekemiseen.

Lain 2. luvun 7.–12. pykälät, joissa määrätään uusien laitteiden käyttöönotosta ja siitä, mitä kaikkea vaaditaan itse mittalaitteelta ja kuinka mittalaite tulee varmentaa ja kenellä toimesta. 13. pykälä on ehkä yksi tärkeimmistä säädöksistä tilavuudenmäärityksen kannalta, sillä pykälässä muun muassa mainitaan kuka tai mikä on vastuussa mittalaitteen toiminnasta. 15. pykälä on jatkoa pykälälle 13, jolla varmistetaan, että käytönaikainen varmennus suoritetaan siitä säädetyin ohjein määrääjain ja että varmuuksen tulee suorittaa tarkastuslaitos. 16. pykälässä, jossa määrätään miten varmennus tulee merkitä mittalaitteeseen tai sen asiakirjoihin. 6. luvussa, jossa selvitetään tarkemmin, mikä on ja mikä määritellään tarkastuslaitokseksi. [1]

20. huhtikuuta 2016 eduskunta hyväksyi hallituksen esityksen mittauslaitelain muuttamisesta HE30/2016, jonka tavoitteena on panna käytäntöön kansallisesti mittauslaitedirektiivin 2014/32/EU ja vaakadirektiivin 2014/31/EU määräykset. Lakimuutos aiheuttaa vain pieniä muutoksia lain soveltamisalaan tilavuudenmäärityksen kannalta. [31]

2.1.1. Valtioneuvoston asetus mittauslaitteista (471/2014)

Valtioneuvoston asetus mittauslaitteista astui voimaan 1. heinäkuuta 2014 ja se asettaa tarkemmin vaatimukset sille, mitä kaikkea tarkastuslaitoksen tehtäviin kuuluu käytönaikaisessa varmennuksessa. Asetuksen 11. pykälän mukaan tarkastuslaitoksen tehtävänä on mittauslaitteiden varmentaminen käytön aikana sekä varmentaminen on suoritettava noudattaen tarkastuslaitoksen hyväksymispäätöksessä asetettuja ehtoja. Pykälässä myös kerrotaan, että tarkastuslaitoksen tulee antaa varmennuksesta todistus tilaajalle ja hylkäämistapauksissa sellainen todistus, josta ilmenee hylkäyksen perusteet. Hyväksytystä mittalaitteesta tulee antaa sellainen todistus, josta ilmenevät seuraavat asiat:

- 1) varmennetun mittauslaitteen yksilöinti;
- 2) tilaajan yhteystiedot ja yritys- ja yhteisötunnus, jos tilaajalla se on;
- 3) varmennuksen suorittanut tarkastuslaitos ja varmennuksesta vastannut henkilö;
- 4) varmentamispaikka;
- 5) varmentamisen ajankohta;
- 6) varmentamisessa käytetyt menetelmät ja laitteet;
- 7) varmennusolosuhteet;
- 8) seuraavan varmennuksen ajankohta. [2]

2.1.2 Mittauslaitelaki ja valtion asetus tilavuudenmäärityksen kannalta

Mittauslaitelaki siis ottaa kantaa tietyiltä osin tilavuudenmääritykseen, muun muassa varmistamalla, että tilavuudenmäärityksessä (varmennuksessa) käytettävän laitteiston tulee olla jäljitettävissä kansainvälisiin mittanormaalijärjestelmiin. Lisäksi laki vaatii, että mittausmenetelmän tulee olla luotettava ja soveltuva kyseiseen toimenpiteeseen. Laki ei sinällään ota kantaa siihen, mikä tuo valittu menetelmä on, vaan antaa mahdollisuuden käyttää erilaisia hyväksi todettuja menetelmiä. 2. luvun pykälät ovat sovellettavissa uusien säiliöiden kohdalla, vanhojen säiliöiden kohdalla taasen pätevät pykälät 13–16. Tilavuudenmäärityksen osalta 6. luku on mielenkiintoisin, sillä laki vaatii tarkastuslaitoksen tekevän laitteelle varmennuksen. Lain mukaan tarkastuslaitos on vain Turvallisuus- ja kemikaaliviraston hyväksymä tarkastuslaitos. Tämä varmasti pätee muiden varmennettavien mittalaitteiden osalta, mutta säiliö itsessään ei ole niin sanottu mitta-laitte, vaikka sitä käytetäänkin kaupallisiin tarkoituksiin. Tämän vuoksi säiliön tilavuuden määrittämiseksi ei voida vaatia mittauslaitelain mukaista tarkastuslaitosta varmenta-

maan säiliön tilavuutta, vaan tilavuuden saa määrittää kuka tahansa siihen kykenevää, jolla on käytössään lainmukainen mittausmenetelmä sekä jäljitettävissä oleva mittauslaitteisto.

2.2 Inspecta

Inspecta on Pohjois-Euroopan johtava tarkastus-, testaus-, sertifiointi-, koulutus- ja konsultointialan yritys, jolla on toimintaa kahdeksassa eri maassa. Toimintaa on Suomessa, Ruotsissa, Norjassa, Virossa, Latviassa, Liettuassa, Tanskassa ja Puolassa. Henkilökuntaa Inspectassa oli vuonna 2013 töissä yli 1600 henkilöä ja liikevaihto oli 176 M€.

Inspectan syntymävuotena pidetään vuotta 1975, kun Suomen valtio perusti Teknillisen tarkastuslaitoksen (TTL:n) varmistamaan painelaitteiden ja muiden turvallisuuskriittisten kohteiden turvallisuuden. Monet valtiot yksityistivät tarkastuslaitoksiaan 1990-luvulla. Näin tapahtui myös Suomessa, kun markkinat vapautettiin ja tammikuussa 1998 TTL muuttui Inspectaksi. Inspecta on kasvanut niin orgaanisesti kuin yritysostoin Suomessa ja muissa pohjoismaissa sekä Baltiassa ja Puolassa.

Kesäkuussa 2015 Inspectan omistus siirtyi hollantilaiselle ACTA*-ryhmälle, joka on testaus-, tarkastus-, ja sertifiointialan (TIC) yritys. ACTA* koostuu Kiwasta, Shield Groupista ja Inspectasta, jossa on Inspectan asiantuntijoiden lisäksi noin 2400 turvallisuusasiantuntijaa yli 20 eri maassa. [3]

2.3 ISO 7507-standardi

2.3.1 Yleisesti standardista

The International Organization for Standardization eli ISO on riippumaton kansainvälinen järjestö, johon kuuluu 162 kansallisen tason standardijärjestöä. Näiden järjestöjen asiantuntijoiden avulla ISO-järjestö tuottaa tietoa ja kehittää menetelmiä kansainvälisille markkinoille sekä tarjoaa apua maailmanlaajuisiin haasteisiin. ISO-järjestö tuottaa

standardeja lähes joka alalle, jotka varmistavat muun muassa tuotteiden laadun ja turvallisuuden sekä helpottavat kansainvälistä kaupankäyntiä yhteisillä pelisäännöillä. ISO 7507-standardi *Petroleum and liquid petroleum products – Calibration of vertical cylinder tanks* koostuu kuudesta eri vuosina laadituista osasta (taulukko 1), jotka käsittelevät pystylieriöisen sylinterimäisen säiliön kalibrointia eri mittausmenetelmin. ISO 7507-1 (*Strapping method*) ensimmäinen versio ilmestyi vuonna 1993, joka päivitettiin vuonna 2003, ja se perustui teknisen komitean ISO/TC 28 (*Petroleum products and lubricants*) alakomitean SC3 (*Static petroleum measurement*) julkaisemaan raporttiin.

Taulukko 1. Standardien osat julkaisuvuosineen ja selityksineen. [4; 5; 6; 7; 8]

Standardin ISO 7507 osa	Julkaisuvuosi/ päivitysvuosi	Kuvaus
<i>Part 1: Strapping method</i>	1993 / 2003	Menetelmä, jossa säiliön kehämitat mitataan mittanauhalla vaipalta sekä korkeus luotausmittanauhan avulla. Pohja mitataan joko vesitäyttökokeella, vaaitsemalla, teodoliitilla tai vesivaa'alla.
<i>Part 2: Optical-reference-line method</i>	1993 / 2005	Menetelmä perustuu osan 1 menetelmään, jonka lisäksi teodoliitin ja optisen luodin avulla mitataan vertikaalinsuuntaisesti havaintoja säiliön vaipasta (ulkopuolelta). Pohja mitataan joko vesitäyttökokeella, vaaitsemalla, teodoliitilla tai vesivaa'alla.
<i>Part 3: Optical-triangulation method</i>	1993 / 2006	Menetelmä perustuu eteenpäinleikkausavaruudessa (EPLA) -järjestelmään, jossa säiliön sisällä mitataan kulmahavaintoja eteenpäin leikkauksella avaruudessa. Pohja mitataan joko vesitäyttökokeella, vaaitsemalla, teodoliitilla tai vesivaa'alla. Tilavuus lasketaan havaintojen sekä luotausmittanauhan tuloksen perusteella.
<i>Part 4: Internal electro-optical distance-ranking method</i>	1995 / 2010	Menetelmä, jossa takymetrin laserilla mitataan säteittäisiä havaintoja (säiliön sisältä) vaipan levysarjoista sekä pohja kartoitetaan, voidaan käyttää myös osan 1 menetelmiä. Tilavuus lasketaan havaintojen sekä luotausmittanauhan tuloksen perusteella.
<i>Part 5: External electro-optical distance-ranking method</i>	2000 / -	Kuten osassa 4, mutta takymetri on säiliön ulkopuolella. Pohja mitataan joko vesitäyttökokeella, vaaitsemalla, teodoliitilla tai vesivaa'alla.
<i>Part 6: Recommendations for monitoring, checking and verification of tank calibration and capacity table</i>	1997 / -	Kumottu vuonna 2003, tilalle tullut vuoden 2003 ISO 7507-1.

Mittausmenetelmät 1–3 ovat useimmiten raskaita ja pitkäaikaisia mittausmenetelmiä. Säiliön koosta riippuen mittaukseen saattaa kulua useampikin päivä. Vaikka menetelmät ovat vaivalloisia työstää, siitä huolimatta menetelmät ovat yleisessä käytössä maailmalla, etenkin Aasiassa. Suomessakin aikoinaan käytettiin samoja menetelmiä, mutta tekniikan kehittyessä mittauksissa siirryttiin käyttämään ensin EPLA-järjestelmään ja sen jälkeen sisäpuolelta suoritettavaa takymetrimittausmenetelmää. EPLA-järjestelmään perustuva mittausmenetelmä saattoi olla hyvinkin tarkka, yksittäisten pisteiden mittausepävarmuus jopa 0,01 mm, mutta tarkkuus oli riippuvainen koneiden kulmanlukutarkkuuksista sekä optimaalisista kulmista. EPLAn, samoin kuin muidenkin aikaisemmin kehitettyjen mittausmenetelmien kohtaloksi koitui menetelmän raskaus ja hitaus. Menetelmän korvannut takymetrimittausmenetelmä on nykyisin yleisin mittausmenetelmä Suomessa. Menetelmän suosioon on vaikuttanut muun muassa menetelmän nopeus ja helppous muun muassa kehittyneiden takymetriensä ansiosta. Menetelmässä ei myöskään tarvita niin useaa henkilöä tekemään mittausta kuin aikaisemmin kehitetyissä menetelmissä. Viidennen osan mittausmenetelmää käytetään suurimmaksi osaksi maailmalla, Suomessa menetelmä ei ole suuressa käytössä. [4; 5; 6; 7; 8]

2.3.2 ISO 7507-1:n merkitys tilavuuskalibroinnissa

Pääosin standardi ISO 7507-1 sisältää mittanauhalla tehtävän kalibroinnin suorittamisen selvittämistä, mutta sen merkityksellisyys on suuri muissa tilavuuskalibroinneissa, sillä se on referenssinä standardin muille osille. Osa 1 määrittää pohjan kaikille menetelmille, toisin sanoen siinä kerrotaan, mitä kaikkea säiliöstä tulee mitata, tarkkuuksista, lämpötiloista ja säiliön osista, joista on kerrottu tarkemmin tämän tutkimuksen luvussa 3. Standardissa ISO 7507-1 on myös määritelty termit, joita tulee käyttää menetelmästä riippuen. Standardi ISO 7507-1:ssä on esitetty laskentakaavat, joilla säiliön tilavuus määritellään, lämpötilan ja ilmanpaineen sekä materiaalipaksuuksien korjauskertoimet huomioon ottaen. Osa 1 sisältää myös osan mittausepävarmuuslaskukaavoista, joihin myöhemmin julkaistut osat viittaavat.

ISO 7507-1:n liiteosat sisältävät erilaisia korjauskertoimia, taulukoita muun muassa lämpötilan muutoksen vaikutuksista säiliön tilavuuteen ja ympärysmittaan. Liitteessä C on tarkemmin kerrottu, millainen tilavuustaulukon tulisi olla ja mitä tietoja sen tulisi sisältää. Liite I ottaa kantaa tilavuuskalibroinnista tehtävään kalibroitodistuksen.

I-liitteessä on tarkasti selvitetty asioista, joita kalibrintodistuksen tulisi sisältää. [4; 5; 6; 7; 8]

2.4 Standardin ISO 7507-4 mukaisen menetelmän vaatimukset takymetrillä suoritettavaan tilavuuskalibrointiin (tämän luvun tiedot vain työn tilaajan käyttöön)

2.5 Laserkeilaus

2.5.1 Yleistä

Laserkeilaus on synonyymi Light Detecting and Rangingille (LIDAR), joka perustuu etäisyyden mittaukseen ja tarkkaan mittaussuuntien orientointiin. Teknisesti ottaen laserkeilaimessa oleva laserlähetin lähettää lasersäteitä pulssimaisesti kohteeseen, josta säde kimpoaa osuessaan ja palautuu kojeen ilmaisinosaan. Palautuvan säteen kulkuajan perusteella pystytään laskemaan kohteen etäisyys laserkeilaimesta. Palautuvasta säteestä voidaan etäisyyden lisäksi mitata säteen intensiteetti eli palautuvan signaalin voimakkuus, jonka avulla pystytään tuottamaan harmaasävyinen, mustavalkovalokuvan kaltainen näkemys kohteesta. Intensiteetin avulla pystytään kohteesta erottamaan muun muassa tekstuureita, kuvioita ja tekstejä. Mitattujen kulmien ja etäisyyksien perusteella saadaan mittauspisteille laskettua koordinaatit. Useampi mittauspiste muodostaa kolmiulotteisen pistepilven, jonka avulla voidaan tutkia ja mallintaa mitattua kohdetta. [9; 10]

Laserkeilaimet voidaan jakaa etäisyysmittaustavan mukaan kahteen toimintaperiaatteen päätyyppiin: aikaero- ja vaihe-erolasereihin. Aikaerolaserissa eli pulssilaserissa mittaus perustuu laserdiodin lähettämän pulssin edestakaiseen kulku-aikaan kohteen ja etäisyysmittarin välillä. Pulssilaser lähettää laserpulssin kahden suuntakulman määrittämään suuntaan avaruudessa. Aikaeron perusteella lasketaan kohteen etäisyysmittaustulos laserlaitteesta. Etäisyysmittaustulokseen vaikuttavat keilaimen ajanmäärittäytarkkuudesta, kohteesta, pulssin ominaisuudesta sekä valonnopeudesta ja aikaerosta. Pulsseja lähettämällä eri suuntiin saadaan muodostettua kolmiulotteinen pistepilvi mitattua kohteesta. Vaihe-erolaser eli jatkuva-aaltainen laser lähettää jatkuvaa signaalia, josta intensiteetti muodostetaan siniaaltoisesta tai monimuotoisemmilla aalloilla, joissa on useampi kantoaallonpituus. Vaihe-erolaserin mittaustapa perustuu, kuten aikaerolaserinkin kohteeseen lähetetyn ja vastaanotetun signaalin väliseen vaihe-eron mittaamiseen. Useamman aallonpituuden moduloinnilla saadaan kantoaallon kokonaisluku-

tuntematon selville, jonka avulla pystytään ratkaisemaan yhdessä vaihe-eron kanssa kohteen etäisyshavainto. Kolmiulotteinen näkemä kohteesta muodostetaan kuten pulssilasertekniikkakin. [9]

Laserkeilainten toimintatavat voidaan jakaa lisäksi peilijärjestelmien toteutustapojen mukaan joko pyöriviin tai oskilloiviin peilijärjestelmiin. Toteutustapoja ovat pyörivät peilijärjestelmät kuten polygoninen peili- tai vinopeilijärjestelmät. Polygonipeili koostuu useammasta peilipinnasta, joka pyörii akselinsa ympäri heijastaen säteitä rajoitettuun alle 90°:n keilauskulmaan. Säteet tulevat usein kohtisuorassa pyörähtämisakselia vasten. Vinopeilijärjestelmässä laser on suunnattu siihen pyörimisakselin suunnassa ja vinopeili on 45°:n kulmassa suhteessa pyörimisakseliin nähden. Näin ollen peilijärjestelmällä saadaan melkein 360°:n keilauskulma, mutta aluetta rajoittaa kojeen runko. Oskilloivassa peilijärjestelmässä peili liikkuu keuhvin liikkein kohtisuorassa säteeseen nähden tuottaen kapean, mutta riittävän tarkan keilauskulman pienten kohteiden mittaamiseen. [11]

2.5.2 Pistepilven mittaustarkkuuteen vaikuttavat tekijät

Laserkeilaimen tärkein ominaisuus on sen tuottaman pistepilven yksityiskohtaisuus ja yksityiskohtien tarkkuus. Tiheä pistepilvi sekä ne, kuinka tarkasti useat keilaukset (kojeasemat) saadaan yhdistettyä toisiinsa vaikuttavat keilaimen tuottamaan pistepilven tarkkuuteen. Yhdistämiseen on useita menetelmiä käytettävissä, joista tarkin tapa on yhdistää pistepilvet toisiinsa yhteisien tähyksien avulla. Pistepilvet sidotaan toisiinsa tähyksien keskipisteiden avulla toisiinsa. Laserkeilaimen pistepilven tarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat:

Kulmanerotuskyky ja kulmanlukutarkkuus

Kulmaresoluutio eli kulmanerotuskyvyn avulla määritetään kahden vierekkäisen lasersäteen välinen kulmanerotus. Kulmaresoluution tuottamalla erotuskyvyllä havainnollistetaan kuinka yksityiskohtaisesti kohde pystytään havaitsemaan eli kuinka tarkan kuvan mitattavasta kohteesta saadaan tuotettua. Kohteen yksityiskohtaisuuteen vaikuttavat kulmaresoluution lisäksi mittaussäteen hajoamiskulma, kohteen etäisyys sekä etäisyyden mittaustarkkuus. Kulmatarkkuus vaikuttaa etäisyysvirheen ohella pisteen sijain-
tinvirheeseen eli se ilmoittaa lasersäteen suunnanmäärityksen tarkkuuden.

Mittaustarkkuus

Mittaustarkkuudella tarkoitetaan yhden etäisyshavainnon tarkkuutta eli laserin etäisyysmittauksen tarkkuutta. Mittaustarkkuus määrää, kuinka yksityiskohtaisesti ja luontevasti kohteen pienet pinnan vaihteluita saadaan eroteltua, mallinnettua ja tehtyä loppuanalyysijä. Mitä lähempänä yksittäinen piste on, sitä tarkempi pistepilvestä saadaan.

Säteen hajoamiskulma eli divergenssi

Divergenssi on avaruuskulma, jonka sisällä laserin tuottama energia etenee ja vaimenee murto-osaan sen huippuintensiteetistä. Divergenssi ilmoitetaan tyypillisesti lukuna $1/e^2$, joka tarkoittaa säteen energian vaimenemista $1/e^2$ -osaan eli 0.135:een sen huippuenergiasta. Mitä leveämpi säteen hajoamiskulma on, sitä kauempaa pystytään säteen keskikohdasta kaikuja rekisteröimään, jolla on suora vaikutus mittaustarkkuuteen, ja joka lisää mittausepävarmuutta. Lasermittauksessa kaiut rekisteröidään säteen nimelliskulman suuntaan, jolloin voimakkaat etäisyysvaihtelut vaikuttavat kaikujen vastaanottoon lisäten mittausepävarmuutta. Mittausetäisyyden kasvaessa divergenssin vaikutus kasvaa suhteessa mitattuun matkaan, koska säteen pinta-ala pidemmän matkan päässä on suurempi, jolloin säde mittaa kohteen suuremmalta alueelta. Tämä lisää pinnan muotovaihteluita.

Mittausetäisyys

Jokaisella lasermittauslaitteistolla on määritelty nimellisetäisyys, joka perustuu lasermittauslaitteen lähetystehoon sekä mittaustapaan. Pulssilasereiden mittausetäisyyteen vaikuttavat toistotaajuuden määräämä enimmäisaika ja pulssin teho. Kantoaallon modulaatio ja lähetysteho ovat vaihe-erolaserin mittausetäisyyteen vaikuttavia tekijöitä.

Toistotaajuus

Toistotaajuus ilmaistaan mittaushavaintojen määrä/sekunti. Tavallisesti pulssilaserin toistotaajuus on alempi verrattuna vaihe-erolaseriin, koska vaihe-erolaserin mittaustapa perustuu suureen toistotaajuuteen. Näin ollen vaihe-erolaserin mittaukseen käyttämä aika on pienempi kuin vastaavalla kulmaresoluutiolla mittaavan pienellä toistotaajuudella toimivan laitteen.

Keilauskulma

Keilauskulma määrittää keilaimen näkemäalueen (tasokulma), jonka säteet muodostavat laserkeilaimen ollessa toiminnassa. Keilauskulman leveys on riippuvainen laitteen

toteutustavasta esimerkiksi pyörivä vinopeilikeilain muodostaa usein yli 300°:n keilauskulman, kun taas polygoni- tai oskilloivapeilijärjestelmän omaava keilain tuottaa kapean keilauskulman. Keilauskulman laajuudella on merkitystä käytännön työssä, sillä suuremmalla keilauskulmalla omaavalla keilaimella ei tarvitse tehdä niin useaa keilausta kohteen kokonaiskuvan saamiseksi.

Profiilinmittaus ja keilaustaajuus

Keilaimen kykyä mitata 2D-profiilia eli profiilimittauksella tarkoitetaan menetelmää, jossa pyritään pysäyttämään keilaimen horisontaaliliike. Leveä ja laaja keilauskulma ovat profiilimittauksessa eduksi. Yksinkertaisuudessaan keilaintaajuudella tarkoitetaan laserkeilaimen säteiden muodostaman 2D-viuhkan tai -keilan toistotaajuutta eli yhtä pyyhkäisyä keilauskulman yli. Keilaustaajuudella on merkitystä etenkin silloin, kun mitataan liikkeessä olevaa kohdetta tai paikallaan olevaa kohdetta, mutta keilaimen ollessa liikkeessä esimerkiksi ajettaessa autoa, jonka kattoon on keilain kiinnitetty. Tällaisilla menetelmillä tuotetaan profiilimittaukseen kolmas ulottuvuus. [11]

2.6 Aiheesta tutkittua

Tämän tutkimuksen aiheesta ei juuri ole aikaisemmin tehtyjä tutkimuksia Suomessa, vain joitakin insinööritöitä on, joilla on pieni kosketuspinta kyseiseen aiheeseen, mutta mitään vastaavanlaista tutkimusta ei ole löytynyt. Mikäli tällaisia tutkimuksia on tehty yritysten johdosta, ovat ne tarkoin varjeltuja, jotta kilpailevat yritykset eivät tietoja saisi käsiinsä. Onhan siinä tietynlainen kilpailuetu muihin yrityksiin nähden.

Muulla maailmassa etenkin Liettuassa, Kiinassa, USA:ssa ja Saksassa tutkimuksen aiheesta on useampia aiemmin tehtyjä tutkimuksia. Säiliöitä ja säiliöiden tilavuuden määrittämisestä tehtyjä tutkimuksia on tehty aina 1960-luvulta lähtien, mutta laserkeilaamalla tehdyistä määrittämisistä vasta vuoden 2010 jälkeen. Ehkä merkittävimpana julkaisuna tämän tutkimuksen kannalta on V. Knyva, M. Knyva ja J. Rainysin kirjoittama artikkeli *New Approach to Calibration of Vertical Fuel Tanks*, joka julkaistiin Kaunasin teknillisen yliopiston kuukausittain ilmestyneessä tieteellisessä tutkimusjulkaisussa ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA (vol. 19 no.8) vuonna 2013.

Artikkelissa nimenomaan on tutkittu säiliöiden kalibrointia laserkeilaamalla. Siinä esitellään kirjoittajien kehittämää laskentamenetelmää, joilla pystytään todentamaan säiliön

tilavuus riittävällä tarkkuudella. Artikkelin esimerkkinä on käytetty noin 25 metrin halkaisijalla olevaa säiliötä, joka on mitattu 4–5 eri kohdasta ympäri säiliötä ja eri korkeuksilta. Artikkelin tutkimuksessa havaittiin, että laserkeilausmenetelmä soveltuu säiliöiden kalibrointiin aikaisempiin menetelmiin verraten paremmin, koska muun muassa vesitäyttökokeeseen verrattuna uusi menetelmä säästää aikaa, ympäristöä, yksi ihminen voi suorittaa mittauksen ja kalibrointi voidaan suorittaa alhaisemmassa lämpötilassa kuin ennen. Tutkimuksessa oli myös arvioitu menetelmälle mittausepävarmuus, joka säiliön pohjan osalta laskennallisesti arvioitiin $\pm 0,5$ %:iin ja luotilevyn yläpuoliselle osuudelle $\pm 0,2$ %:iin. [12]

Kiinassa tehdyssä tutkimuksessa testattiin muodostamalla säiliönkalibroinnissa tarvittavat nestekorkeudet laserkeilaimen pistepilvestä kolmioimalla ja 0-tason määrittämisellä. Kiinassa tehdyn tutkimuksessa havaittiin samankaltaisia tuloksia kuin Liettuan teknillisen yliopiston tutkimuksessa. Siinä muun muassa havaittiin, että 3D-laserkeilausmenetelmä on tehostanut säiliön kalibrointia sekä OIML R71:n ja R80:n mukaisten julkaisujen perusteella tehtyjen laskelmien perusteella 60 m^3 :n ja 37 m^3 :n säiliöiden epävarmuudeksi saatiin $0,025$ %. Tutkimuksessa testattiin myös laserkeilaimen toistotarkkuus, joka jäi $0,4$ %:in tarkkuuteen. [13]

Korkeatarkkuusmittausvälineitä valmistava Trimble on tutkinut yhdessä Saksan kansallisen metrologiainstituutin (Germany National Metrology Institute, Physikalisch-Technischen Bundesanstalt PTB) kanssa laserkeilaimen käyttöä säiliön tilavuusmäärittämisessä. Tutkimuksen perusteella PTB ja Trimble kehittivät uuden mittausmenetelmän, josta Trimble loi kokonaisen kalibrointijärjestelmän (Trimble Tank Calibration Solution) säiliönkalibrointiin käyttäen apunaan CX-mallista teollisuuslaserkeilainta. Tämä mittausmenetelmä on ainoa laatuaan koko maailmassa, joka on sertifioitu PTB:n toimesta. Kehitetty menetelmä perustuu ISO 7507 -standardin sekä mittaus- ja laskentamenetelmiin, jossa muodostetaan mitatusta pistepilvestä ympyrän kehä säiliön vaipalta, joissa kehät rajaavat alueen muodostaen pinta-aloja eri korkeuksille. Pinta-alan ja korkeuden suhteen avulla lasketaan kullekin korkeudelle nestetilavuus suhteessa luotilevyyn. [14]

Tutkimuksessa niin ikään havaittiin samankaltaisia parannuksia vanhoihin mittausmenetelmiin verrattuna kuin Kiinassa ja Liettuassa tehdyt tutkimukset ovat osoittaneet. Tutkimuksessa havaittiin ja pystyttiin osoittamaan muun muassa Pohjois-Saksan lailliselle tarkastusviranomaiselle (North German Legal Verification Authority, EDN), että

uusi mittausmenetelmä minimoi säiliön tyhjillään olon aikaa ja on halvempi kuin aikaisemmin tehdyillä mittausmenetelmissä, koska mittaustyö pystytään tekemään yhden henkilön toimesta päivän aikana. Säästää ympäristöä, kun vettä ei tarvitse pumpata säiliöön ja saastunutta vettä puhdistaa. Se on tarkempi kuin aiemmat menetelmät, toistotarkkuus paranee ja menetelmällä pystytään mittaamaan enemmän erilaisia säiliötyyppejä esimerkiksi laivansäiliöitä, proomuja, maanalaisia säiliöitä. Tutkimuksessa saatiin uudelle mittausmenetelmälle standardien mukaisesti laskien alle 0,5 %:n mittausepävarmuus. Mittausepävarmuus noudattaa samaa linjaa kuin Kiinassa ja Liettuassa tehtyjen tutkimusten mittausepävarmuudet, vaikka laskenta ja mittausmenetelmät hieman eroavatkin toisistaan. [15]

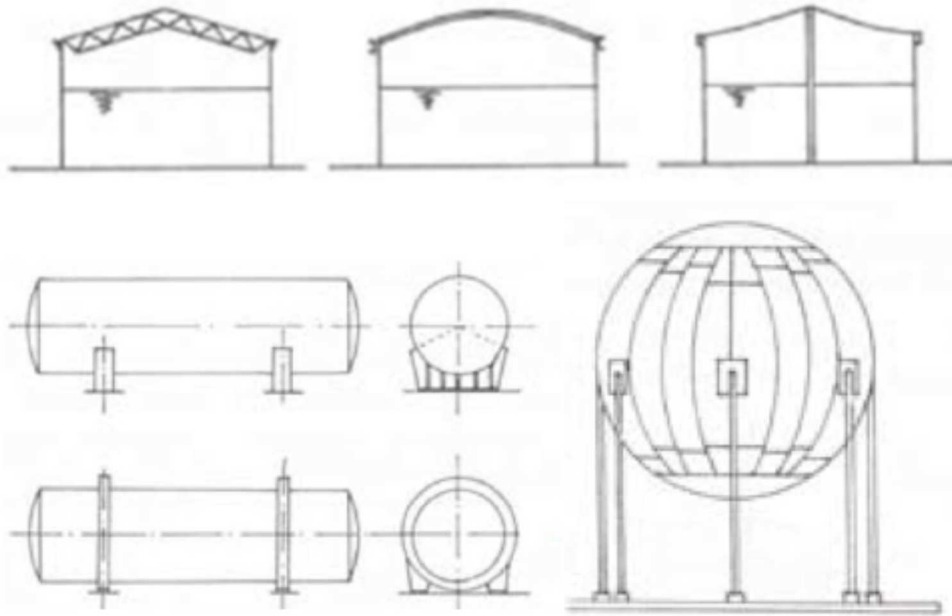
2.7 Öljysäiliön rakenteet

Öljyn varastointisäiliöitä on Suomessa niin kuin maailmallakin, käytössä hyvin monenlaisia säiliöitä. Pääsääntöisesti säiliöt tyypitetään kolmenlaisiin säiliötyyppeihin, joita ovat pystylieriösäiliöt, vaakalieriösäiliöt ja pallosäiliöt. Nämä säiliötyypit usein jaotellaan useammaksi katon muodon ja ominaisuuksien perusteella, esimerkiksi pystylieriösäiliö ulkoisella tai sisäisellä kelluvalla katolla. [16]

Yleisimmät säiliötyypit Suomessa ovat niin sanotut normaalit pystylieriösäiliöt, joiden pohjat ovat pienellä kallistuksella säiliön keskikohtaan nähden. Toiseksi yleisin säiliötyyppi ovat normaalit pystylieriösäiliöt kartiopohjalla olevat säiliöt. Tällaisia kartiopohjaisia säiliöitä ovat usein pienet säiliöt, jotka ovat muutamasta kuutiosta aina muutama sataan kuution. Nämä pienet kartiopohjaiset säiliöt usein myös lepäävät joidenkin tukijalkojen tai tukirakenteiden varassa. Yhtä yleisiä kartiopohjaisten säiliöiden kanssa ovat ensimmäisen säiliötyypin kaltaiset säiliöt, mutta näiden säiliöiden sisään on rakennettu nestettä suojaava kelluva katto. Tällaisen säiliön rakenteesta on kerrottu enemmän luvun 2.7.2.

Näiden kolmen säiliötyypin lisäksi Suomessa on käytössä maassa makaavia säiliöitä ja pallon muotoisia säiliöitä. Nämä kaksi säiliötyyppiä ovat pääsääntöisesti käytössä kaasuteollisuudessa, mutta niiden rakenteet ja tilavuusmääritykset ovat samanlaisia kuin edellä mainitut yleisimmät säiliötyypit.

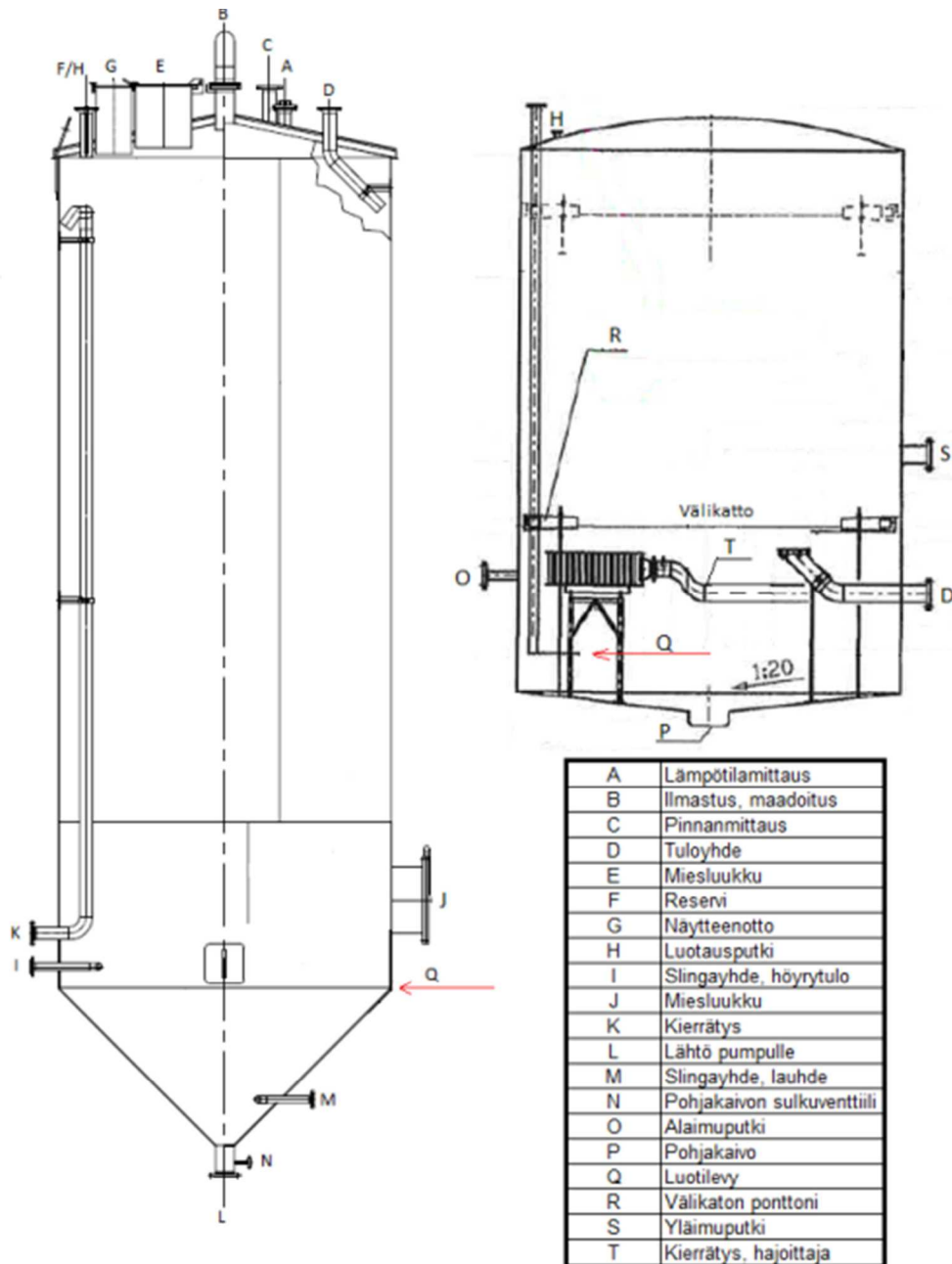
Neljäntenä säiliötyyppinä ovat pienet neliön tai suorakaiteen muotoiset teräsrunkoiset säiliöt, jotka lepäävät erillisten rakennelmien päällä ja ovat usein kartiopohjaisia. Nämä ovat kuitenkin varastokäytössä harvinaisempia kuin ensimmäisen kappaleen säiliöt. Tämän vuoksi luvussa 2.7.1 ei käsitellä tämäntyyppisiä säiliöitä. [17; 18]



Kuva 3. Kuvassa erilaisia säiliötyyppejä. Yllä eniten käytetyt säiliötyypit eri kattovaihtoehdoin. Alla vaaka- ja pallosäiliöt, joita kaasuteollisuus käyttää enimmäkseen. [16]

2.7.1 Yleisimmät rakennetyypit

Öljysäiliöt koostuvat monista eri elementeistä, joilla jokaisella on tietty tarkoitus säiliön toiminnassa. Ensimmäisissä otsikoissa on kerrottu rakenteista, joilla on erityinen merkitys tilavuusmäärittämisessä ja otsikoiden neljä viimeistä alajaksoa sisältävät sellaisia yleisiä rakenteita, joita lähestulkoon jokaisessa säiliössä on, mutta jotka eivät ole tärkeitä tilavuusmäärittäksen kannalta.



Kuva 4. Säiliön tyypillisimmät rakenteet kahdenlaisessa, pohjaltaan erilaisessa säiliössä. Punaisella nuolella merkitty Q, luotilevy, on kartiopohjaisessa määritetty alimman vaippalevysarjan alasaamaan.

Säiliön pohja (Tank bottom)

Isoissa ja niin sanotuissa normaalipohjaisissa säiliöissä pohja koostuu useasta yhteen hitsatuista levystä, jotka ovat aseteltu limittäin toisiinsa nähden. Pohja on usein muodoltaan joko aavistuksen kupera tai kovera riippuen siitä, miten nesteen poisto on säiliöstä järjestetty. Koverassa säiliössä pohja on lievästi kallellaan kohti keskustaivon, jossa imuputket sijaitsevat. Kuperassa säiliössä pohjan kallistus on asetettu keskustas-

ta kohti reunoja. Pohjalevyt ovat teräsrunkoisessa säiliössä joko ruostumatonta terästä tai terästä ylipäänsä. Vain betonirakenteisessa säiliössä pohjalevyt on saatettu korvata betonivalulla. Tällaisissa säiliöissä on kuitenkin mahdollista, että betonin päälle on rakennettu teräslevyistä erillinen pohja.

Niin sanotut säiliön perustukset ovat useimmiten maaperusteisia, jolloin säiliön pohjalevyt makaavat maata vasten. Suomessa routiminen, maa-aines ja muut maan liikkehdinnät vaikuttavat maamassojen liikkumiseen, mikä taas aiheuttaa säiliön perustusten muuttumiseen. Tämä on huomattavissa etenkin vanhoissa säiliöissä, joissa pohjalevyjen alapuolella on saattanut maa-ainesta kadota ja aiheuttanut näin tyhjän tilan levyjen alle. Tämä tyhjä tila ilmenee levysarjojen korkeustasojen muuttumisen, pohja on ikään kuin aalloilla. Koholla olevaan levyyn kohdistuessa painetta levy antaa periksi ja painuu kuperaksi täyttäen maa-aineksen poistumisesta aiheutuneen tyhjän tilan. Tällaisen aalloilla olevan säiliön pohjalevyjen liikehdintä on kova rasitus levyjen rakenteille ja materiaaleille. Levyihin pääsee näin syntymään myös tyhjän tilan ja ulkoilman lämpötilan muutoksista kondensaatiovettä, joka syövyttää teräslevyä iän myötä ja heikentää säiliön käyttöikä. [4]

Pohjakaivo

Pohjakaivon tarkoituksena on joko poistaa säiliön nesteet säiliöstä itsestään tai imuputken avulla, tai se voi toimia niin sanottuna vedenerotuskaivona kuten kuvassa 5. Säiliössä voi olla useampi pohjakaivo, ja niillä voi olla toisistaan riippumaton tehtävä. Vedenerotuskaivossa puhdasta nestettä imevä imuputki on ylempänä kuin vettä imevä imuputki. Tällaisia järjestelmiä on lähes kaikissa säiliöissä, jotka ovat ulkotiloissa riippuen säiliössä varastoitavasta nesteestä. Sisällä olevissa pienissä, usein kartiopohjaisissa säiliöissä ei ole ollenkaan vedenerotuskaivoja, vaan kartionpohjalla oleva kaivo toimii itsestään poistoaukkona nesteelle, kuten kuvassa 8 asia on esitetty rakenteena L. [4]



Kuva 5. Pohjakaivo ja imuputki.

Säiliön vaippa (shell, wall)

Säiliön vaipaksi kutsutaan säiliön seinärakenteita. Vaippa muodostuu yhteen hitsatuista toisiinsa limittäin olevista levysarjoista. Vaippaosan voi myös muodostaa betonirakenteisissa säiliöissä yhtenäinen valettu betoniseinä, joka on joko levytetty teräksisillä levyillä tai pelkästään raaka betonipinnalla. Raakabetonipinta on saatettu pinnoittaa jollakin pinnoitteella, jolla ehkäistään betonin eroosio.

Vaippa lepää perustusten päällä, jotka koostuvat betonisesta sokkelirakenteesta. Vaipan yhteen hitsatut levysarjat ja pohjan levysarjat yhdistyvät sokkelissa toisiinsa muodostaen taitekohdan. Tämä taitekohta on vaipan levysarjojen alin hitsaussauma, jolla on suuri merkitys säiliön tilavuuteen. Taitekohdan merkityksestä on kerrottu lisää jaksossa *Luotilevy*.

Vaipan levysarjat muodostuvat erikorkuisista sekä -pituisista levyistä ja levyjen paksuus vaihtelee levyasetelman korkeudesta. Lähellä pohjaa olevat levyasetelmat ovat paksumpia kuin katon lähellä olevat asetelmat. Tämä siksi, että mitä alempana levyasetelma on, sitä suurempi paine niihin kohdistuu. Paineen levyihin aiheuttaa niin nes-

teen massan aiheuttama paine kuin yläpuolella olevien levyasetelmien ja kattorakenteiden painosta muodostuva kohtisuorapaine. [4]



Kuva 6. Kuvassa esiintyy keskellä luotilevy sekä alapuolella hitsatut pohjalevyt ja taustalla ylöspäin kohoava vaippaosa.

Luotauslevy, luotilevy (Dip-plate)

ISO 7507-1 -standardi määrittelee luotauslevyn seuraavasti. Luotauslevy on suoraan luotausaukon alapuolella sijaitseva vaakasuorassa oleva taso. Luotauslevyyn ei tule kohdistua minkäänlaista liikettä, joka johtuu pohjan tai vaipan liikehdinnästä.

Luotauslevy on ehkä tärkein säiliön rakenteellinen osa. Se muodostaa perustan säiliön tilavuusmäärittämiselle, koska luotilevy on säiliön laskennallinen nollakohta (referenssipiste), johon verrataan säiliön muiden rakenteiden korkeuksia. Luotauslevy sijaitsee usein säiliön vaipan läheisyydessä ja se on kiinnitettynä vaippaan. Luotauslevyssä on kohta, johon luotausputkesta laskettu luotausmittanauhan (dip-tape) punnus (dip-weight) koskettaa. Tätä kohtaa kutsutaan luotauspisteeksi (dip-point), jonka avulla pystytään arvioimaan säiliön nesteen pinta.

Kaikissa säiliöissä ei kuitenkaan ole kuvan 6 mukaista luotauslevyä, johtuen säiliön tyypistä. Esimerkiksi kartiopohjaisista säiliöistä luotauslevy puuttuu kokonaan. Tällaisissa säiliötyypeissä nollakohdaksi muodostuu luotauslevyn sijasta vaipan ja pohjan muodostama taitekohta (ks. kuva 4). Tämän huonona puolena on se, että luotausmittanauhaa käytettäessä ei voida olla koskaan varmoja, milloin punnuksen alapinta on taitekohdassa, kun säiliö on nestettä täynnä. Tämän vuoksi tällaisten säiliötyyppien nestemäärän arvioimiseen käytetään erilaisia virtausmittareita ja vaakoja, jotka laskevat säiliössä olevan nesteen määrän. Tällaisissa säiliöissä käytetään myös luotausputkesta pudotettavaa luotausnauhaa, jonka päässä punnuksen sijasta onkin anturi, joka ilmoittaa, kun anturi koskettaa nestettä.

Luotausputki (Dip-hatch)

Standardi määrittelee luotausputken seuraavasti. Luotausputki on säiliön päällä oleva aukko, josta suoritetaan näytteenotto ja luotaus. Toisin sanoen luotausputki on suoraan luotilevyn yläpuolella oleva aukko, josta luotausmittanauha pudotetaan kohti luotilevyä. Luotausputki koostuu joko putkimaisesta rakenteesta tai aukosta ja käsipeilauksyhteestä tai putkesta ja käsipeilauksyhteestä. Luotausputken idea on se, että aukosta pudotettua luotausmittanauhan antaman tuloksen perusteella voidaan laskea säiliön nesteen nestepinnan korkeus tai säiliön sen hetkinen tilavuus suhteessa korkeuteen. Luotausmittanauhan mitta-asteikkoa verrataan joko luotausputken päähän tai käsipeilauksyhteen reunaan, josta lukema luetaan, kun luotausnauhan punnus koskettaa luotilevyn pintaa.

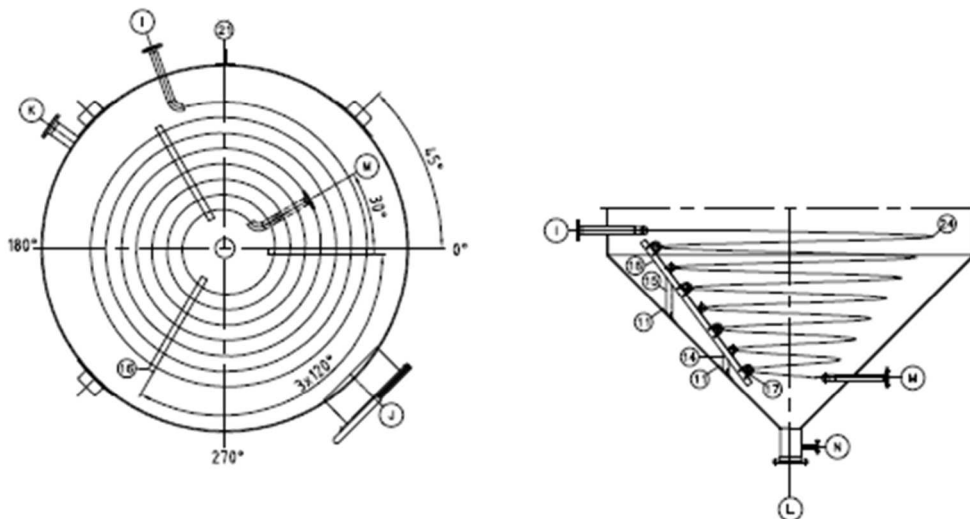
Miesluukut

Miesluukut ovat säiliön vaipalla sijaitsevia aukkoja, joista tapahtuu käynti säiliön sisälle. Miesluukkuja voi olla useampikin säiliössä ja eri korkeuksilla riippuen säiliön koosta ja tyypistä. Miesluukkujen rakenne koostuu säiliön tyypistä riippumatta seuraavasti: vaipassa on aukko, jonka ympärillä on putkimainen teräsrakenne, ja aukon sekä samalla vaipan ulkopuolella sijaitsevan putkimaisen teräsrakenteen päässä olevassa aukossa on aukon sulkeva levy. Tällainen miesluukku on esitetty kuvassa 7 rakenteena J tai kuvan 8 taustalla olevana suljettuna aukkona. Levy on tiivisteellä varustettu teräslevy, joka on kiinnitetty pulteilla aukon putkimaiseen osaan kiinni. Levy voi olla myös kiinnitetty joko saranalla vaippaan tai erillisellä luukkulevyn pidikkeellä, josta se roikkuu pulstin varassa.

Putkistot

Säiliöissä on lukuisia määriä erilaisia ja erikokoisia putkia ja putkistoja. Jokaisella putkistolla on oma tehtävänsä, esimerkiksi lämmittää säiliössä olevaa nestettä ja pitää sitä juoksevana. Säiliön sisällä olevia putkia ja putkistoja ovat muun muassa lämmitys-, imu- ja täyttöputket, huohotin sekä ylivuotoputket ja sekoittajaputket.

Lämmitysputkia usein kutsutaan myös nimellä slingaputkistot. Ne usein kiertävät säiliön ulkokehällä muutaman kummenen senttimetrin korkeudessa useampana lenkkinä tai ne voivat olla sijoitettu säiliön keskelle patterimaiseen muodostelmaan. Säiliössä varastoitavasta nesteestä riippuen slingaputkistot saattaa olla sijoitettu koko pohjan alueelle tai vain osaan pohjan alasta, tai niitä voi olla useammassa eri kerroksessa jakaen lämpönsä säiliöön tasaisemmin. Slingaputket ovat rakenteeltaan suljettuja, ja niiden sisällä kiertää kuuma höyry tai muu lämmitetty neste. [4]



Kuva 7. Kartiopohjaisen säiliön suunniteltu slingaputkisto, jonka läpiviennit näkyvät kohdissa J ja M.

Säiliön keskelle tai reunaan sijoitettu lattiasta katonläpi kulkeva huohotinputki nimensä mukaan tuo korvausilmaa säiliön sisälle ja poistaa ylimääräisiä muodostuneita kaasuja. Usein huohotinputken vieressä on lattiasta katon läpi kulkeva ylivuotoputki, jonka tehtävänä on ylitäytön tapahtuessa poistaa ylimääräinen neste säiliöstä. Ylivuotoputki on joissakin säiliöissä sijoitettu aivan katon tuntumaan. Tällöin ylivuotoputki on vain pienen putken käyräosa, josta neste pääsee poistumaan.

Imuputkia voi säiliössä olla joko yksi tai useampia sijoitettuna säiliön keskellä olevaan kaivoon. Imuputket voidaan sijoittaa myös muualle kuin keskellä sijoitettuun pohjakaivoon. Imuputkien ei nesteestä riippuen tarvitse sijaita ollenkaan kaivossa, vaan imuputkia voi olla sijoitettu ympäriinsä pohjan alalla. Imuputket ovat yleensä rakenteeltaan kiinteitä seinästä tulevia putkia, mutta varsinkin vanhemmissa säiliöissä imuputket voivat olla niin sanotusti kelluvia, jolloin ne nousevat ja laskevat nesteen pinnan mukaisesti. Tällaisia kelluvia imuputkia voidaan säiliön ulkopuolelta ohjata vaijerikiinnityksen avulla, jolloin on mahdollista poistaa nestettä korkeudesta riippumatta ja näin välttää veden sekoittuminen nesteen sekaan.

Täyttöputkia säiliössä voi olla imuputkien tavoin yksi tai useampi. Läheskään aina ne eivät ole rakenteeltaan suorita putkia, vaan putkien päissä on usein rakennettu jokin nestevirran rikkova, suuttimen kaltainen, rakenne. Täyttöputkien päissä voi olla myös putken pään sulkeva saranalla varustettu hattu, jolla estetään paineen kasvaessa takaisinvuoto putkeen. Joko täyttöputken yhteydessä tai erillisenä järjestelmänä toteutettu sekoittajaputkistot nimensä mukaisesti sekoittavat nestettä säiliössä. Täyttöputken yhteydessä sekoittajan toiminta vastaa nestevirran hajottajan tavoin. Erillisenä järjestelmänä sekoittaja imee toisaalta säiliöstä nestettä ja kierrättää sen pumpun tuottaman paineen avulla takaisin säiliöön, jolloin säiliöön tapahtuu kerrosten välistä sekoittumista.

Tuuletusaukot

Säiliön katossa olevat tuuletusaukkojen tarkoituksena on tuulettaa säiliössä muodostuvat haitalliset kaasut pois. Tuuletusaukot voi olla toteutettu joko huippumurityyppisesti, jossa kattokupolin keskellä on sähkömoottorilla pyörivä tuuletin, tai ilmanvaihto tapahtuu painovoimatyypisesti. Painovoimatyypisesti tapahtuvan ilmanvaihtoaukkojen päällä on usein suojakansi, jolla estetään, ettei säiliöön pääse haitta-aineita kuten likaa, pölyä, roskia tai sadevettä. Suojakansi avataan vain tarvittaessa.



Kuva 8. Säiliön kattoa tukevat massiiviset tukijalat. Taustalla vaipassa näkyvät myös suljetut putkiyhteet ja miesluukku.

Katon rakenteet

Säiliön katto on rakenteeltaan kupolimainen levysarjoista koostuva teräskatto, jossa levysarjat ovat hitsattuna toisiinsa kiinni. Levysarjojen alapuolella, säiliön sisällä, on usein kattoa tukevat kattoristikot. Pienimmissä säiliöissä nämä kattoristikot puuttuvat kokonaan, ja katto on rakennettu vain kupolimaisesta, yhdestä muotoon puristetusta levystä. Säiliön ollessa suuri, useiden kymmenientuhansien kuutioiden kokoinen, kattoristikoista lähtevät säiliön pohjaan ulottuvat kattoa tukevat tuet, jotka ovat rakenteeltaan I-palkista rakennettuja teräksisiä kappaleita. Säiliön katon päällä sijaitsee erinäinen määrä huoltotoimenpiteisiin tarvittavia aukkoja esimerkiksi venttiileitä, mittareita ja sammutus- ja paloturvallisuuslaitteita, kulkemisen tarkoitettuja telineitä ja tikkaita sekä luotausputki.

Olosuhteita mittaavat anturit

Olosuhteita mittaavat anturin sijaitsevat säiliön vaipalla läpivietyinä vaipparakenteesta tai laskettuna katossa olevista aukoista. Tällaisia antureita käytetään muun muassa mitattaessa nesteen lämpötilaa tai näytteitä otettaessa. Olosuhteantureita ovat tiettyllä

tapaa myös pohjan alla sijaitsevat vaa'at, jotka seuraavat muun muassa nesteen massaa täytön ja tyhjennyksen aikana tai nesteen painon muutoksia eri olosuhteissa. [4; 17; 18]

2.7.2 Kelluvan katon rakenteet

Kelluvakattoisen säiliön rakenteet ovat pääsääntöisesti samanlaisia kuin muidenkin säiliöiden rakenteet. Poikkeuksena niin sanottuun normaalisäiliöön verrattuna on kelluva katto, joka estää raakaöljyä tai bensiiniä sisältävässä säiliössä kosteuden ja muiden haitta-aineiden päätyminen nesteen sekaan, millä on varastoinnin jälkeisessä käytössä suuri merkitys. Kelluvaan kattoon kuuluvat rakenteet ovat kattolevyt, ponttonit, tukijalat, välikaton miesluukut ja erilaiset läpiviennit. Näistä rakenteista on kerrottu tarkemmin seuraavassa otsikoissa.

Kattolevyt

Kattolevyt ovat materiaaltaan teräksisiä, kevytmetallisia tai alumiinisia levyjä, jotka on joko hitsattu toisiinsa ja/tai katon tukirakenteisiin. Teräksisiä välikattoja on myös sellaisia, joissa ei ole ollenkaan levysarjoja tukevia kattorakenteita, vaan ne kelluvat hitsatun rakenteensa johdosta. Kevytmetalliset tai alumiiniset levyt ovat pääsääntöisesti niitattuja toisiinsa kiinni, ja levysarjat on ruuvein kiinnitetty tukirakenteisiin. Tukirakenteet koostuvat samankaltaisista kattoristikoidista kuin säiliön katossa olevat ristikot, mutta ne on usein sijoitettu vain vaakatasoon ristikkäin asetelmaan. Kattolevyjen tarkoitus on olla suojaava osa kelluvassa katossa.

Ponttonit

Ponttonien tarkoitus on nestepinnan noustessa nostaa välikatto kellumaan nesteen yläpinnalle. Ponttonit ovat materiaaltaan usein samaa materiaalia kuin muut katon rakenteetkin. Alumiinisessa välikatossa ponttonit ovat joko alumiinia tai kevyttä metallia, jotka ovat muotoiltu joko putken muotoon tai arkuiksi. Ponttonit ovat suljettuja molemmista päistä, jolloin ne muodostavat putken sisälle ilmataskun, joka kevyempänä aineena pysyy raskaamman aineen pinnalla. Ponttonit on usein sijoitettu ympäri kattoa siten, että ne muodostavat säiliön reunoille kehämäisen muodostelman ja keskelle tullessa ponttonit ovat rivimäisissä muodostelmissa. Teräksisessä välikatossa erillisiä ponttoneita ei välttämättä ole ollenkaan, vaan kelluntajärjestelmä on toteutettu niin, että säiliön kehällä kulkee yhtenäinen ponttoniarkku ympyrän muotoisena kokonaisuutena ja arkku on hitsattuna yhteen muiden kattolevysarjojen kanssa.

Tukijalat

Tukijalat kannattelevat välikattoa säiliön ollessa tyhjä tai nestepinnan ollessa matalalla. Tukijalat ovat kiinnitettynä kattorakenteisiin, ja tukijalkojen alaosat lepäävät pohjan päällä. Tukijalkojen on oltava kestävästä materiaalista, sillä ne kannattelevat koko välikaton painoa, joka saattaa olla useita tuhansia kilogrammoja. Tämän vuoksi tukijalat ovat hieman vahvempaa ainetta kuin muut katon rakenteet. Teräsrunkoisissa välikatoissa tukijalat on saatettu korvata säiliön vaippaan hitsatuilla korvakeilla, joihin välikatto laskeutuu lepäämään nestepinnan ollessa alhaalla.

Välikaton läpimenoaukot

Välikaton läpimenoaukkoihin kuuluva miesluukku on yksi läpimenoaukoista. Miesluukun (kutsutaan myös huoltoluukuksi, ks. kuva 9) tarkoituksena on se, että työntekijä pääsee sitä kautta tarkastelemaan välikaton yläpuolisia rakenteita ja suorittamaan tarvittavat huoltotoimenpiteet. Miesluukku on kannella suljettu aukko katossa, joka tarpeen tullen on myös lukittava pultein tai muilla keinoin. Joissakin säiliöissä välikatto on lepotilassaan jo itsestään niin korkealla, että käynti miesluukun kautta on hankalaa, ja näissä tapauksissa katon huolto on toteutettu katon yläpuolella vaipan läpitulevasta miesluukusta.

Välikatossa on myös läpivientiaukkoja kaikille säiliön putkistoille ja katon tukijaloille, jotka kulkevat pohjasta kattoon sekä kaikille antureille että luotinauhalle, jotta luotaus onnistuisi luotauslevylle. [4; 17; 18]



Kuva 9. Näkymä uivakattoisen säiliön pohjalta. Kuvassa näkyvät selkeästi teräksinen välikatto, tukijalat, välikaton miesluukku, pohjan levytykset sekä taustalla säiliön vaippaa.

2.7.3 Deadwoodiin positiivisesti ja negatiivisesti vaikuttavat rakenteet

ISO 7507 -standardi kertoo deadwoodiin vaikuttavista rakenteista seuraavaa:

Deadwood is referred to as 'positive deadwood' when the capacity of the fitting increases the effective capacity of the tank, or 'negative deadwood' when the volume of the fitting displaces liquid and reduces the effective capacity. [4]

Positiivisesti vaikuttavia rakenteita ovat siis sellaiset säiliön rakenteet, joilla on lisäävä vaikutus säiliön kokonaistilavuuteen ja negatiivinen vaikutus silloin kuin säiliön rakenne syrjäyttää nestettä ja sillä on vähentävä säiliön kokonaistilavuutta. Deadwoodiin vaikuttavat rakenteet jaetaan lisäävien ja vähentävien rakenteiden lisäksi myös luotilevyn yläpuolisiin ja alapuolisiin rakenteisiin, jolloin niiden vaikutus tilavuuteen riippuu siitä, millä korkeudella ne ovat luotilevyn nähden. Luotilevyn alapuolella sijaitsevat rakenteet vaikuttavat ainoastaan pohjan tilavuuteen. Luotilevyn yläpuolella olevat rakenteet vaikuttavat säiliön varsinaiseen tilavuuteen, joka on merkittävämpi osa tilavuuden mää-

rityksessä. Seuraavissa otsikoiden jaksoissa on hieman kerrottu tarkemmin, miten tällaiset rakenteet luokitella positiivisiksi tai negatiivisiksi.

Deadwoodiin positiivisesti vaikuttavat rakenteet

Positiivisesti vaikuttaviksi rakenteiksi standardin mukaan luetaan sellaiset rakenteet, joilla on lisäävä vaikutus säiliön tilavuuteen. Tällaisia rakenteita ovat erilaiset aukot säiliön vaipassa ja pohjassa kuten miesluukut ja pohjakaivot. Esimerkiksi miesluukujen rakenne lisää tilavuutta luukun halkaisijan ja syvyyden muodostaman sylinterin verran. Samalla laskentaperiaatteella toimivat myös pohjakaivot. Muita positiivisesti vaikuttavia rakenteita voivat olla syöttö- ja imuputkien tai muiden putkiyhteiden läpiviennit vaippaosassa. Näiden rakenteiden vaikutus muodostuu vaipan pinnasta ulottuvasta rakenteesta, joka pysähtyy säiliön ulkopuolelle olevaan rakenteeseen esimerkiksi putken sulkevaan venttiiliin. Tällaisissa tapauksissa tilavuutta lisäävä elementti muodostuu sylinterimäisestä osuudesta, jossa sylinterin toinen pää on vaipan pinnalla ja toinen venttiilin pinnalla. Sylinterin halkaisija on taas läpiviennin putken sisähalkaisija. Syöttö- ja imuputket sekä muut putkiyhteet ovat siitä erikoisia rakenteita, että ne ovat samalla kertaa positiivisesti että negatiivisesti vaikuttavia rakenteita. Negatiivisista vaikutuksista kerrotaan hieman myöhemmin.

Positiivisiin rakenteisiin ei kuitenkaan lasketa välikatossa olevia läpivientiaukkoja tai miesluukkuja, vaikka todellisuudessa ne hetkellisesti lisäävätkin tilavuutta. Tämä siksi, että tilavuutta laskiessa tulee ottaa huomioon välikaton painon aiheuttama tilavuuden syrjäyttämä vaikutus. Näin ollen positiivisesti vaikuttavan aukon merkitys on niin pieni verrattuna välikaton painon aiheuttamaan syrjäytyneeseen tilavuuteen, ettei sillä ole käytännön merkitystä tilavuutta laskiessa.

Deadwoodiin negatiivisesti vaikuttavat rakenteet

Säiliössä on huomattavasti enemmän sellaisia rakenteita, jotka vaikuttavat tilavuuteen negatiivisesti kuin positiivisesti. Edellä olevassa tekstissä, jossa käsiteltiin positiivisesti vaikuttavia rakenteita, mainittiin syöttö- ja imuputket sekä muut putkiyhteet. Nämä rakenteet vaikuttavat tilavuuteen negatiivisesti riippuen putkien tehtävistä ja ominaisuuksista. Esimerkiksi imuputki on ontto ja siitä virtaa nestettä pois säiliöstä. Tässä tapauksessa negatiivinen vaikutus muodostuu putken materiaalipaksuudesta, halkaisijasta sekä putken pituudesta. Tilavuus syrjäytyy siis putken vaipan paksuuden verran koko putken matkalta aina vaipan pintaan saakka. Esimerkiksi lämmityspotket eli slingaput-

ket, jotka ovat niin sanotussa suljetussa järjestelmässä, syrjäyttävät tilavuutta koko putken pituuden matkalta koko halkaisijan verran.

Muita negatiivisesti vaikuttavia rakenteita ovat myös säiliön kattoa tukevat rakenteet kuten tukijalat, jotka vaikuttavat tilavuuteen materiaalipaksuuden ja pituuden suhteen. Aikaisemmin mainittu säiliön välikatto vaikuttaa negatiivisesti tilavuuteen katon painon vuoksi. Välikatossa on myös sellaisia rakenteita, joilla on vähentävä vaikutus säiliön rakenteeseen. Näitä ovat tukijalat, ponttonit ja katon tukirakenteet. Tilavuuteen negatiivisesti vaikuttavia rakenteita säiliössä ovat myös kaikenlaiset kannakkeet, tukiraudat, sekoittajat, hajottajat, joiden vaikutus muodostuu materiaalipaksuuksista, pituuksista, määristä jne.

Yleisesti ottaen tuuletusaukot ja anturit eivät kuulu lisääviin eikä vähentäviin rakenteisiin, sillä niiden sijainti säiliöissä ovat yleensä niin korkealla, että nestepinnan korkeus ei yllä niin korkealle tai niiden merkitys on kokonaistilavuuteen merkityksettömän pieni.
[7; 18]

3 Tutkimuskohteiden esittely

3.1 Kohde 1: Voiteluöljysäiliö 55 m³

Tutkimuksen ensimmäinen kohde on pieni voiteluöljyn varastosäiliö, jonka nimellistilavuus on 55 m³, nimellishalkaisija 3 metriä ja korkeutta säiliöllä on noin 7,5 metriä. Säiliössä käytettävän nesteen nestetiheys on 850 kg/m³. Säiliö on malliltaan luvun 2.7.1 kuvan 5 vasemman puoleisen säiliön kaltainen. Säiliö on teräsrakenteinen ja vaipassa on kolme teräslevysarjaa, jotka ovat kiinnitetty hieman limittäin toisiinsa nähden. Levysarjat ovat ainevahvuudeltaan 5 mm vahvoja. Säiliö sijaitsee osaksi rakennuksen sisässä siten, että noin ensimmäisen levysarjan puolella välissä säiliö kohoaa rakennuksen katon yläpuolelle. Säiliö seisoo rakennuksessa erillisellä jalustalla siten, että pohjan alin kohta, pohjakaivon alapinta on noin 1260 mm:n korkeudessa.

Säiliö on pohjarakenteeltaan kartiopohjainen säiliö, jossa ei ole erillistä luotauslevyä, vaan luotimitan määrittämä luotauskorkeus on toteutettu vaipan ja pohjan muodostamaan taitekohdan hitsaussaumaan. Ongelman tällaisessa menettelyssä muodostaa se, että luotausmittanauhan paino osuu pohjan kartio-osuudelle eikä millekään tasaiselle kohdalle. Painon osumakohdan jäljestä luotausnauhan mittatulosta tulee korjata siten, että se vastaa alimman hitsaussauman korkeutta joko trigonometrisin laskentakeinoin tai muita menetelmiä käyttäen.

Kyseessä on vanha säiliö, jota kunnostetaan ja uudistetaan. Uudistuksen yhteydessä säiliöön lisätään uusia putkiyhteitä sekä uusi Pulsair-sekoitinlaitteisto, joka pitää sisällön notkeana. Sekoitinlaitteisto tulee sijaitsemaan pohjan ja vaipan taitekohdan korkeudella ja se on kiinnitetty hitsatuin kulmaraudoin pohjaan. Pohjan reunojen ympärillä kiertää lämmitysputkiverkosto eli slingaputkisto, joka kohoaa hieman alasauman yläpuolelle, kuten luvussa 2.7.1 kuvassa 7 on esitetty. Uusien laitteiden vuoksi säiliön tilavuus muuttuu, minkä vuoksi täytyy suorittaa uusi tilavuudenmääritys.

3.2 Kohde 2: Dieselsäiliö 16 000 m³

Tutkimuksen toiseksi kohteeksi valikoitui jo vuonna 1965 toiminnassa ollut dieselsäiliö, joka historiansa aikana on jo useamman kerran kalibroitu useammalla mittausselmällä. Säiliön nimellistilavuudeksi on ilmoitettu 16 000 m³ ja nimellishalkaisijaksi

38 metriä, korkeutta säiliöllä on 14,2 metriä. Säiliössä käytettävän nesteen nestetiheydeksi ilmoitetaan 820 kg/m^3 . Kyseessä on pystylieriöinen teräsrunkoinen säiliö, jossa on 7 levysarjaa. Ainevahvuuksiltaan teräslevyt ovat 7–20 millimetriä korkeudesta riippuen.

Säiliön katto on tuettu erillisillä raskailla tukijaloilla, jotka seisovat pohjaan kiinnitettyjen ”tassujen” varassa. Tällaisia tukijalkarakenteita säiliössä on yhteensä 16 kappaletta, joita on esitetty kuvassa 8. Pohja on rakenteeltaan niin sanottu normaali eli pienellä kallistuksella keskuskaivoa kohti kallistuva pohja, joka koostuu yhteen hitsatuista teräslevyistä. Säiliön katon tukirakenteiden lisäksi säiliössä on slingaputkipatteristo, joka on sijoitettu reunan tuntumaan. Patteristosta lähtee lisäksi neljän putken sarja, joka kiertää vaipan tuntumassa säiliön kehän ympäri ja läpäisevät vaipan slingapatteriston tuntumassa. Näiden lisäksi säiliö sisältää erinäisen määrän putkiyhteitä ja antureita, joilla mitataan nesteen ominaisuuksia sekä täytetään säiliötä. Säiliössä on erillinen luotauslevy, joka on kiinnitettynä vaippaan omalla jalustallaan, kuten kuvassa 6 asia on havainnollistettu. Vaipassa on lisäksi kolme erikokoista miesluukua. Säiliön edellisestä huollosta ja kalibroinnista oli kulunut jo useampi vuosi, tämän vuoksi säiliö kalibroitiin uudelleen.

3.3 Kohde 3: Bensiinisäiliö $16\,000 \text{ m}^3$

Tutkimuksen kolmanneksi tutkimuskohteeksi valikoitui vanha bensiinisäiliö, joka on vastaavanlainen säiliö kuin edellisen kohdan dieselsäiliö. Suurimpana poikkeuksena edelliseen, tämän säiliön tapauksessa säiliössä on uiva katto, joka on esteenä nesteen likaantumiselle sekä bensiinihöyryjen muodostumiselle. Uiva katto on materiaaliltaan pääosin alumiinia ja kevytterästä, joiden yhteenlaskettu paino on $4899,12 \text{ kg}$. Uivassa katossa on kaksi $600 \times 800 \text{ mm}$:n miesluukua, ja niiden kautta pääsee huoltamaan katon yläpuolisia osuuksia. Katto lepää huoltoasennossaan 52 tukijalkansa varassa, joiden yhteenlaskettu tilavuus on valmistajan ilmoittaman mukaan 66 litraa . Uivan katon alapuolella sijaitsevat ponttonit ovat kiinnitetty katon teräsrakenteisiin, ja ne ovat muodoltaan pyöreitä. Valmistaja on ilmoittanut katon sijaitsevan $2\,000 \text{ mm}$:n korkeudessa ja kelluvan nestepinnan $1\,750 \text{ mm}$:n korkeudessa.

Toisena poikkeuksena dieselsäiliöön verrattuna on, että säiliössä ei ole ollenkaan lämmitysputkistoja bensiinin herkän syttymisherkkyiden vuoksi. Bensiinin nestetihey-

deksi ilmoitettiin 750 kg/m^3 . Edellinen tilavuudenmääritys säiliölle on tehty vuonna 1995 huollon yhteydessä. Tämän vuoksi säiliölle oli ajankohtaista tehdä huoltotöitä ja uusi tilavuudenmääritys.

3.4 Vertailumittauksen toteutus

Vertailumittaus toteutettiin vuoden 2015 kevään aikana. Laserkeilaimella tehtävä vertailumittaus pyrittiin suorittamaan samana päivänä takymetrimittausten kanssa siten, että ensin säiliölle tehtiin ns. virallinen mittaus takymetrillä, jonka jälkeen säiliötä tutkittiin laserkeilaimella. Näin pystyttiin toimimaan kohteissa 1 ja 2, mutta kohteen 3 säiliö ei ollut vielä mittauspäivänä muista tutkimuksista valmis, jotta viralliset mittaukset olisi voitu suorittaa; laserkeilaus suoritettiin häiriöstä riippumatta. Kohteen 3 säiliö mitattiin takymetrillä myöhemmin saman kuun aikana. Takymetri- ja laserkeilausmittauksen suorittivat eri henkilöt.

Takymetrimittausten aikana säiliöön asetettiin laserkeilaimelle tarratähyksiä pistepilvien kohdistusta varten, ja ne mitattiin samaan koordinaatistoon takymetrimittausten kanssa. Ainoastaan kohteessa 3 tähyksien mittaamista ei voitu suorittaa keskeneräisyyden vuoksi. Mittauksissa pyrittiin ottamaan huomioon mittalaitteen sijainti suhteessa mitattavaan säiliöön siten, että mittalaite sijaitisi mahdollisimman lähellä säiliön keskipistettä. Sekä takymetrin että laserkeilaimen keskinäinen sijainti pyrittiin asettamaan mahdollisimman lähelle toisiaan ensimmäisessä asemapisteesä. Takymetrillä mitattaessa mittaukset tehtiin yhdeltä asemapisteesä, laserkeilaimella säiliöstä riippuen 2–4 asemapisteesä sekä kohteessa 2 lisäksi yksi erillinen asemapiste, josta mitattiin koko säiliön tilavuus. Mittauksissa huomioitiin olosuhdemuutokset, jotka kirjattiin muistiinpanoihin sekä mittausten alussa asetettiin mittalaitteiden säätökortteihin.

Kohteessa 1 ja 3 käytettiin Leican TDRA 6000 -teollisuustakymetriä ja kohteessa 2 Leican TCRA 1201 -takymetriä resurssipulan vuoksi. Jokaisesta säiliöstä mitattiin käsin mittanauhoja ja vesivaakaa käyttäen säiliöiden rakenteet sekä luotausmittausnauhalla säiliön luotimitta joko säiliössä sijaitsevaan luotauslevyyn tai vaipan ja pohjan väliseen hitsausaumaan. Takymetrillä suoritettujen mittausten mittaustapahtumasta laskettiin muutamien päivien kuluessa mittaustapahtumasta laskien, ja laserkeilausaineistot tutkittiin huhti- ja joulukuussa 2015.

3.5 Mittauskalusto

Tutkimuksessa käytettiin kahta erilaista takymetriä ja yhtä laserkeilainlaitteistoa, joista on alla esitetty tarkempaa tietoa. Näiden mittalaitteiden lisäksi tutkimuksessa käytettiin kalibroituja luotausmittanauhoja, vesivaakaa ja rullamittanauhoja, joita ei tutkimuksessa esitellä sen tarkemmin.

Takymetrikalusto

Leica TDRA6000 on Leica Geosystems:n valmistama teollisuuden käyttöön tarkoitettu takymetri, joka esiteltiin vuonna 2013. TDRA6000 kuuluu uuden sukupolven Laser Station -tuoteperheeseen, joka edustaa kannettavien, suuren mittakaavan koordinaattimittausten uutta tasoa. Tarkkuuden ja optiikkansa ansiosta TDRA6000 on arvostettu mitäväline kaikkialla teollisuuden mittaussovelluksissa.

Valmistaja ilmoittaa TDRA 6000:n 3D-pisteen tarkkuudeksi suurimmaksi sallituksi virheeksi (Maximum Permissible Error, MPE) tyypillisesti alle 30 metrissä $U_{xyz} = \pm 0.5$ mm ja yli 30 metrissä $U_{xyz} = \pm 0.3$ mm + $0.13 \mu\text{m}/\text{m}$ 1.5 tuuman Red Ring reflectoriin mitattuna MPE:n ollessa $\frac{1}{2}$ MPE (n. $1,5\sigma$). Kulmanlukutarkkuudeksi on ilmoitettu 0.5" eli noin 0.15 mgon. Etäisyysmittarin tarkkuudeksi prismattomassa mittauksessa on ilmoitettu 2.0 mm, joka on mitattu 2–60 metrin radalla. Prismattoman mittauksen maksimi mittausetäisyys on 600 metriä ja lyhin 2 metriä. [19; 20] Mikesin tekemässä mittalaitteen kalibroinnissa saatiin etäisyysmittarin ja kulmanluvun tarkkuudeksi paremmat tulokset kuin valmistajan ilmoittamat lukemat ovat. Etäisyysmittarin tarkkuudeksi prismattomassa mittauksessa kalibroitodistuksen mukaan 30 metrin matkalla alle 1,54 mm ja vaakakehän asteikkovirheen 1,8" (0,0556 mgon) sekä pystykehän asteikkovirheeksi 3,8" (0,117 mgon). [29]

Leica TCRA 1201 R300 on Leica Geosystems:n valmistama ensimmäisiä Leican GPS/TPS-järjestelmien takymetrejä, joita vuosikymmen sitten oli saatavilla. TCRA 1201 on tarkoitettu maanmittareiden ja insinöörialan perusmittauksiin rakentamisen alalle. Takymetria pystytään ohjaamaan etäyhteydellä siihen tarkoitettulla erillisellä etäyksiköllä (RX1220), jolloin siitä muodostui niin sanottu robottitakymetri. TCRA 1201:ssä on etäkäytön lisäksi automaattinen prismantunnistustekniikka sekä siihen on mahdollista liittää Smart Station -teknologian avulla GPS-antenni, jolloin on mahdollista mitata tunnettuun koordinaatistoon ilman kiinteitä kiintopisteitä.

Kulmanlukutarkkuudeksi valmistaja ilmoittaa TCRA 1201:lle 1" eli noin 0.3 mgon ja prismaan mitattuna standardi-asetuksella 1 mm + 1,5 ppm ja nopealla asetuksella 3 mm +1,5 mm. Prismattoman mittauksen tarkkuudeksi valmistaja ilmoittaa alle 500 metriin mitattuna 2 mm + 2 ppm ja yli 500 metriin mitattuna 4 mm + 2 ppm. Prismattoman mittauksen toimintasäde on aina 1.5 metristä 1200 metriin saakka. Pitkänkantaan mittauksissa 1000–12000 metrin matkalla valmistaja ilmoittaa tarkkuuden olevan 5 mm + 2 ppm:a. [21] Kuten myös TCRA 1201:n kohdalla valmistajan ilmoittamat tarkkuudet ovat suurempia kuin Mikesin kalibroinnissa saamat tulokset ovat. Mikes sai vuonna 2013 tehdyssä mittalaitteen kalibroinnissa 30 metrin matkalla etäisyysmittarin virheeksi alle 2,0 mm:ä ja vaakakehän virheeksi 2,8" (0,086 mgon) sekä pystykehän virheeksi 5,1" (0,157 mgon). [30]

Laserkeilainlaitteisto

Tutkimuksessa käytetään Trimblen TX8-laserkeilainta, joka esiteltiin ensimmäisen kerran Saksassa INTERGEO2013-messuilla vuonna 2013. TX8 edustaa uusinta 3D-keilauksen kehitystä, jossa on yhdistetty nopeampi tiedon keruu ja pidempi keilausmatka vähentävät näin käytettäviä resursseja ja keräävät entistä tarkempaa tietoa lyhyemmässä ajassa myös pidemmällä matkoilla. Trimble TX8-laserkeilain käyttää Trimblen patentoimaa Lightning™-teknologiaa, jossa tiedonkeruu nopeus voi olla jopa miljoona pistettä sekunnissa samalla, kun mittalaite kerää tarkkaa tietoa koko alueelta. Tekniikka perustuu erittäin nopeaan time-of-flight–teknologiaan (aikaerolaser), joka on vähemmän häiriöaltis mitattaessa eri pinnoilta, erilaisissa sääolosuhteissa ja se on suunniteltu kestäväksi vaativissakin olosuhteissa. TX8 on suunniteltu käytettäväksi erityisesti teollisuusmittauksissa, insinöörimittauksissa, rakentamisessa, rikostutkinnassa sekä monissa muissa korkeaa tarkkuutta vaativissa sovelluksissa. [23]

TX8-laserkeilain niin sanottu pyörivä vinopeilikeilain, jossa pystysuuntaan kääntyvä peili vaakatasossa kääntyvällä alustalla muodostaa keilaimelle 360°x317°:n näkemäalueen. Laserkeilaimessa on kolme erilaista mittaustasoa, joiden avulla säädetään mitattua pisteväliä, pisteiden lukumäärää, kantaman etäisyyttä sekä kuluva mittausaikaa. Tarkemmin valittavista tasoista on kerrottu taulukossa 3, jossa keilausparametrinä oleva taso jatkettu on saatavilla TX8:aan erillisenä päivityksenä, jolloin laserkeilaimella on mahdollista suorittaa pitkän kantamatkan keilauksia.

Taulukko 3. Laserkeilaimen keilausparametrien vaihtoehdot

Keilausparametrit	Taso 1	Taso 2	Taso 3	Jatkettu
<i>Max kantama</i>	120 m	120 m	120 m	340 m
<i>Keilauksen kesto</i>	2:00 min	3:00 min	10:00 min	20:00 min
<i>Pisteiden väli 30m</i>	22.6 mm	11.3 mm	5.7 mm	-
<i>Pisteiden väli 300m</i>	-	-	-	75.4 mm
<i>Peilin pyörimisnopeus</i>	60 r/s	60 r/s	30 r/s	16 r/s
<i>Pisteiden määrä</i>	34 milj. pistettä	138 milj. pistettä	555 milj. pistettä	312 milj. pistettä

Valmistaja ilmoittaa TX8-laserkeilaimelle kulmanlukutarkkuudeksi 8×10^{-5} rad (80 μ rad), joka vastaa noin 5 mgon:n kulmaa. Laserkeilain pystyy alimmillaan mittaamaan 0,6 metrin etäisyydeltä sijaitsevat kohteet ja maksimissaan aina 120 metriin (18–90 % heijastavalla pinnalla) ja 100 metriin vähän heijastavilla pinnoilla sekä 340 metriin saakka jatkettun kantaman toiminnolla. Kantaman kohinaksi valmistaja ilmoittaa useimmille pinnoille olevan alle 2 mm peruskeilaustoiminnolla (2–120 m /18–90 % heijastus) ja korkean tarkkuuden toiminnolla kohina jää alle 1 millimetriin (2–80m /18–90 % heijastus) sekä kantaman systemaattiseksi virheeksi jää alle 2 mm. TX8-laserkeilaimen divergenssiksi Trimble ilmoittaa säteen ulos tullessa 6 mm, 10 metrin päässä 6 mm, 30 metrissä 10 mm ja 100 metrissä 34 mm (mitattu $1/e^2$ kertoimella). [23]

3.6 Laskentaohjelmat

Tutkimuksen aineistoa käsiteltiin kolmella eri mittausohjelmalla mittaustavasta riippuen. Takymetrillä mitattua aineistoa tutkittiin jo Inspectalla olevilla mittaus- ja laskentaohjelmilla, Leica Axyz- ja Polyworks-ohjelmilla sekä Inspectan kehittämällä laskentasovelluksella. Laserkeilausaineistoa tutkittiin Trimblen tuottamalla RealWorks-ohjelmalla. Jokaisesta mittausohjelmasta on seuraavissa alajaksoissa lyhyt esittely.

3.6.1 Leica Axyz -mittausohjelma

Leica Axyz on teollisuuden mittauksien tarpeisiin kehitetty ohjelma, joka ilmestyi 1990-luvun lopulla. Ohjelma sisältää erilaisia ohjelmistomoduuleita takymetrille, teodoliitille sekä laserseuraimelle (lasertracker). Axyzin Core Data -moduulilla (CDM), joka on oh-

jelman ydin, voidaan hoitaa monenlaisia geometrisiäanalyysijä mittaustuloksista. CDM:ään tallentuu mitattu tieto, sieltä voidaan valita mitattava laite, määrittää parametrit, ja suoritetaan laskenta. Sillä muun muassa pystytään hoitamaan suoran, tason, ympyrän, pallon ja paraboloidien laskenta. Axyz-ohjelmisto perustuu numeerisen datan käsittelyyn ja sen esitysmuotona mittaustulokset on esitetty taulukkomuodossa. Jokaisesta pisteestä löytyy pisteen x, y, z koordinaattien lisäksi mitattu havaintoaika, sen hetkiset vallitsevat sääolosuhteet ja pistekohtaiset laatuparametrit. Välilehdiltä löytyvät analyysien tuottamia mittaustuloksia sekä niin sanottuja raakahavaintoja.

Axyzillä on helppo muokata mitattua aineisto, sillä voidaan esimerkiksi tilavuuslaskennassa asettaa origo-piste sijaitsemaan luotilevyn korkeudelle. Ohjelma automaattisesti muokkaa muiden pisteiden korkeudet vastaamaan todellista korkeutta suhteessa luotilevyn korkeuteen. Sillä lasketaan myös vaakahavaintojen muodostaman pistejonon mukaisesti kehämitta ja säde ja sillä sovitaan kaikkien vaipan pisteiden suhteen sylinteri. Axyz on päällisin puolin hyvä ja toimiva mittaustulosten ohjelmisto, mutta aika on tehnyt tehtävänsä ja se on jäänyt kehityksessään auttamattomasti jälkeen. Ohjelmaan ei ole enää saatavissa uusia päivityksiä, ja viimeiset päivitykset ovat päättyneet vuoteen 2008. [24]

3.6.2 Polyworks -mittaustulosten ohjelma

Vuonna 1994 perustettu kanadalainen InnovMetric Software Incin kehittämä Polyworks-ohjelmisto on suosittu mittaustulosten ohjelmisto auto- ja ilmailuteollisuudessa. Ensimmäinen ohjelmistoversio ilmestyi jo vuonna 1996. Jo tuolloin ohjelma tuki useiden mittausvälineiden valmistajien mittalaitteita. Nykyisellään Polyworks koostuu kolmesta eri ohjelmasta, joita ovat Inspector, Modeller ja Survey. Inspector on tarkoitettu erityisesti mittaamiseen ja graafiseen tarkasteluun, jossa mitattua kappaletta verrataan CAD-pohjaiseen lähtöaineistoon. Inspector koostuu koordinaattien mittaustulosten ja mittaustulosten analyysiohjelmista. Modeller on tarkoitettu reverse engineering- eli käännettyä suunnittelua varten, jossa IMAling-työkalulla voidaan kerätä, rekisteröidä sekä käsitellä 3D-pistepilveä. Modellerin työkaluista IMMerge on suunniteltu pistepilven kolmiointia varten ja IMedit taas kolmiopintamallien korjausta ja jälkikäsitteilyä varten, josta muun muassa pystytään luomaan NURBS-malleja ja 2D-leikkauksia CAD-mallintamista varten. Erilaisten maalaserkeilainten mittaustulosten analysointiin, tutkimiseen ja muuhun käsittelyyn on Survey-ohjelmiston kokoonpano suunniteltu.

Polyworks on toiminta-ajatukseltaan samantapainen kuin Axyz-ohjelmisto. Erona Axyziin Polyworksissä mittausaineiston esitystapa on toteutettu graafisena pistepilvenä sisältämättä kuitenkaan geometrista ominaisuustietoa. Varsinainen geometrinen ominaisuustieto tai geometrinen muoto, laskentojen tulokset, valitut pisteet ilmestyvät nykyisin useammassa ohjelmassa käytettävään puu-muotoiseen rakennelmaan.

[24]

Tässä tutkimuksessa Polyworks:llä ovat laskettu muun muassa luvun 3.1 säiliön takymetrimittausten mittaustulokset kokonaisuudessaan ja lukujen 3.2 ja 3.3 säiliöiden pohjien tilavuudet.

3.6.3 Inspectan kehittämä laskentasovellus (tämän luvun tiedot vain työn tilaajan käyttöön)

3.6.4 Trimble Realworks 9.0 Advanced Tank -sovelluksella

Trimble Realworks on tarkoitettu maanmittausammattilaisille ja insinööriyöskentelyyn, jotka käyttävät työssään hyödykseen 3D-pistepilven tuottamaa tietoa. Trimble RealWorks on monipuolinen ohjelma, jolla voi visualisoida, tutkia, rekisteröidä ja analysoida as built-näkymiä pistepilvestä. TRW sisältää joukon hyödyllisiä välineitä ja toimintoja, jotka ovat sopivat muun muassa rakennusten, yhteiskunnan ja kulttuuriperintökohteiden tutkimiseen ja tallentamiseen.

Ensimmäinen versio ohjelmasta ilmestyi vuoden 2005 toukokuussa, ja ohjelma kantoi tällöin nimeä Trimble RealWorks Survey Software 5.0. Ohjelma toimi Windows XP-, ja 2000-ympäristössä ja tietokoneelta vaadittiin Pentium 4 -tason tehoja. TRW on vuosien saatossa kehittynyt monipuolisemmaksi ohjelmistoksi ja vuosien saatossa ohjelmiston kehittäjä on seurannut tiiviisti käyttöjärjestelmien kehittymistä. Uusimmalle Windows 10 käyttöjärjestelmälle Trimble julkaisi syyskuussa 2015 uusimman versionsa ohjelmasta, joka kantoi nimeä Trimble RealWorks 10.0. RealWorks 10.0 -versio toimii ainoastaan 64-bittisenä versiona myös Windows 7- ja 8-järjestelmissä samoin kuin marraskuussa 2014 julkaistu versio 9.0. Versio 9.0 toimii Windows 7:n ja 8:n lisäksi myös 64-bittisessä Windows 8.1 käyttöjärjestelmässä. Uusimmat versiot ohjelmasta vaativat tietokoneilta kehittyneempää teknologiaa niin näytönohjaimien, muistien ja prosessorien osalta, joita ei useammassakaan nykyajan tietokoneessa välttämättä ole. Vähimmäisvaatimukset tietokoneelta ovat molemmissa uusimmissa versioissa seuraavia:

- Prosessori minimissään 2.8 Ghz (Quad-Core) tai nopeampi, suositellaan käytettäväksi Hyper-Threading-teknologiaa
- RAM minimissään 8Gb, suositellaan 16Gb tai enemmän
- Näytönohjaimessa oltava OpenGL 3.2 -sopivuus ja vähintään 1 Gb VRAM-muisti, suositellaan käytettäväksi 3 Gb:n muistia tai enemmän
- 3-näppäinen hiiri
- Lisäksi vahvasti suositellaan kovalevyksi vähintään 256 Gb SSD-levyä, joka takaa nopeamman tallennuksen

Trimble RealWorks 9.0 koostuu pohjaversiosta (Base) lisäksi neljästä eri versiosta, joita ovat Advanced, Advanced-Modeler, Advanced-Plant ja Advanced-Tank. Base-versioon kuuluu perusrekisteröinti ja muotoilutoimintoja, joita saadaan jaettua 2D- ja 3D-formaateissa ulos ohjelmasta. RealWorks Advanced -versio sisältää kehittyneempiä pisterekisteröintitoimintoja, 2D/3D tutkimustyökaluja, poikkileikkaus- ja ortoprojektiotyökaluja ja erilaisia profiloitintoimintoja. RealWorks Advanced-Modeler -versio sisältää intuitiivisen mallinnusominaisuuden, joka on erityisesti kehitetty vesirakentamisen, julkisivujen ja rakenteiden mallintamiseen ja tutkimuksiin. Advanced-Plant -versio sisältää kaikki mallintamisen toiminnot ja tehokkaita työkaluja, joita tarvitaan ympäristön, kasvilisuuden ja infrastruktuurin suunnitteluun. RealWorks Advanced-Tank -versio kattaa kaikki Advanced-Plant -version toiminnot, ja se on suunniteltu varastosäiliöiden tutkimiseen, mallintamiseen sekä tilavuuden mittaamiseen ja siinä on otettu huomioon varastosäiliöiden kalibroinnissa vaadittavat toiminnot. [25]

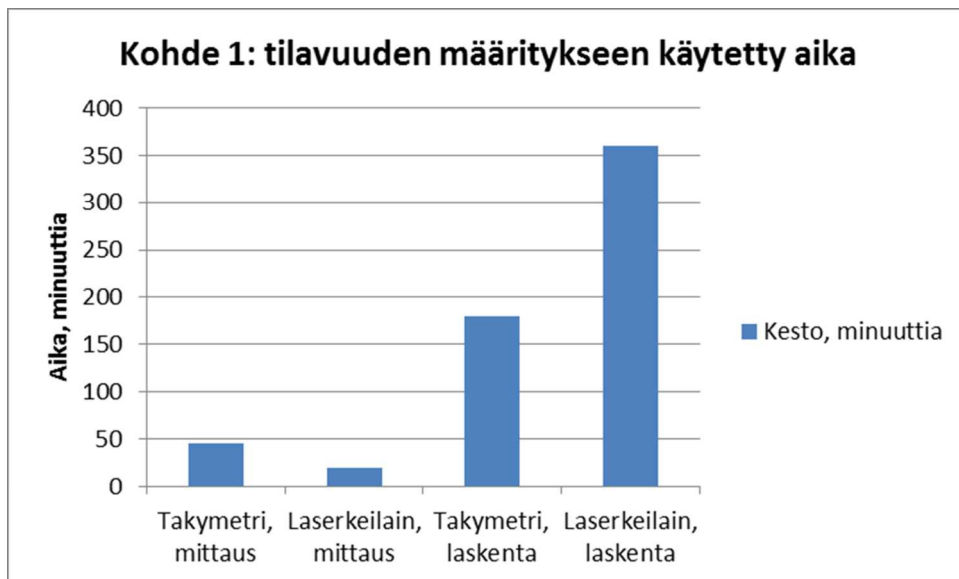
4 Vertailumittauksen tulokset ja mittausepävarmuus

Tässä luvussa käsitellään tutkimuksessa tehtyjen koemittausten mittaustuloksia. Mittaustuloksissa tarkastellaan säiliöstä kolmea tekijää, jotka ovat takymetrin ja laserkeilaimen tilavuuksien eroavuuksia, säteiden eroavuudet korkeuden suhteen sekä aikatekijää eli paljonko eri menetelmillä kului aikaa säiliön kalibrointiin. Mittaustuloksia tarkastellaan tarkasteltavien tekijöiden mukaisesti siten, että ensin tarkastellaan kohteen 1:n mittausta ja sen jälkeen heti kohteen 2 ja kohteen 3 mittauksia. Näiden jälkeen tarkastellaan mittausepävarmuustekijöitä ja muita tutkimuksessa havaittuja tuloksia.

4.1 Vertailumittauksen tulokset

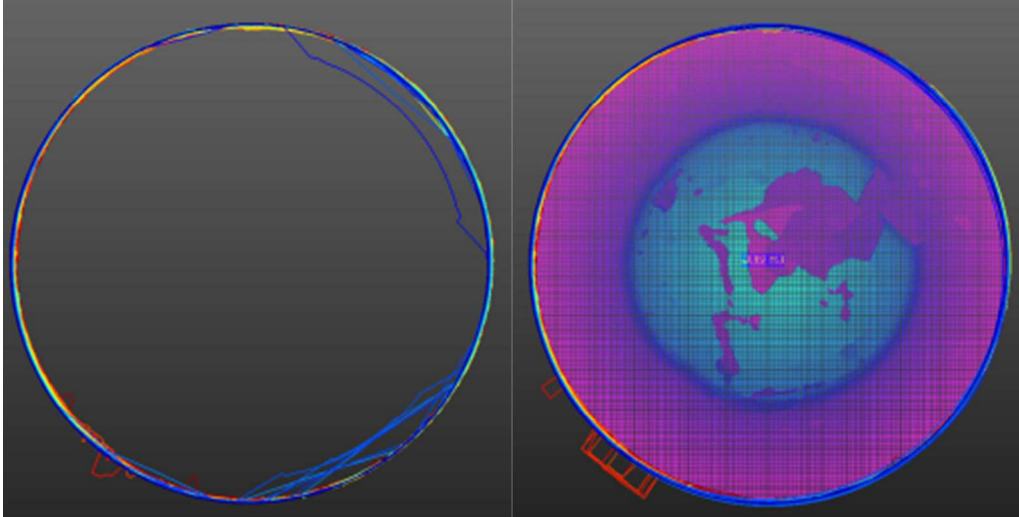
Aikatekijä

Kohteen 1 tapauksessa säiliö mitattiin samana päivänä molemmilla menetelmillä varmistuen olosuhteiden olevan samankaltaiset molemmissa mittaustilanteissa. Asemapistettä laserkeilauksessa tuli kaikestaan kaksi yhden sijaan ja takymetrillä vain yhdestä asemapistestä. Kahden asemapisteen menettelyllä haluttiin varmistaa, että säiliö tulisi mahdollisimman tarkasti havaittua myös yläosista, koska lasersäteen kulma osuessa vaipan pintaan yläosissa oli jo hyvin jyrkkä.



Kuva 10. Kohde 1: Eri menetelmiin kuluneet ajat.

Takymetrillä mitattaessa kellotettiin ajaksi 45 minuuttia, kuten kuvasta 10 on havaittavissa. Tämä aika sisälsi asemapisteen rakentamisen, olosuhteiden tasaantumisen, materiaalin lämpötilojen mittauksen, takymetrillä mittauksen ja luotausmittanauhalla luotimitan määrittämisen. Mikäli tarkastellaan ainoastaan itse mittaustapahtumaa, sille jäisi ajaksi noin 25–30 minuuttia. Laserkeilamella mitattaessa ei enää tarkasteltu olosuhteiden muuttumista eikä mitattu luotimittaa, jolloin itse mittaamiselle, asemapisteen rakentamiselle ja tasaantumiselle jäi aikaa 20 minuuttia. Mikäli olisi laserkeilattu vain yhdestä asemapisteestä, aikaa olisi kulunut vielä vähemmän arviolta noin 10 minuuttia. Näin ollen laserkeilausmenetelmä olisi ollut hieman nopeampi mittaussuunnitelma säiliön mittauksessa. Mittaus on vain osa koko suoritusta, laskenta on yleensä ollut työläämpi osa tilavuuskalibrointiprosessissa. Laskennan osuutta tarkastellessa laserkeilaimen laskentaan taas kului huomattavasti enemmän aikaa kuin takymetrimenetelmän laskentaan. Tämä osaksi johtui mitattujen pisteiden määrästä, takymetrillä aineisto sisälsi vaivaiset 100 pistettä, kun vastaavasti laserkeilausaineisto sisälsi reilut 200 000 pistettä. Suuren pistemäärän sisältämä aineisto vaati laskentatietokoneelta suurempaa laskentakapasiteettiä, tämä vaikutti kulutettuun aikaan negatiivisesti. Laserkeilausaineistoa jouduttiin myös muokkaamaan enemmän kuin takymetrillä mitattua aineistoa. Kahdesta asemapisteestä huolimatta säiliön yläosista jäi uupumaan laajoilta alueilta pisteitä, jotka vaikuttivat laskennassa käytettävien kehien pinta-alojen epämääräiseen muodostumiseen. Nämä epämääräiset kehät eivät olleetkaan ympyrän muotoisia, vaan ne korkeudesta riippuen saattoivat leikkaantua puoleessa välissä kuvan 11 mukaisesti suoraksi säiliön toiselta puolelta toiselle puolelle. Tämän vuoksi kehien muotoa jouduttiin korjaamaan manuaalisesti RealWorksissä olevien korjaustyökalujen avulla.



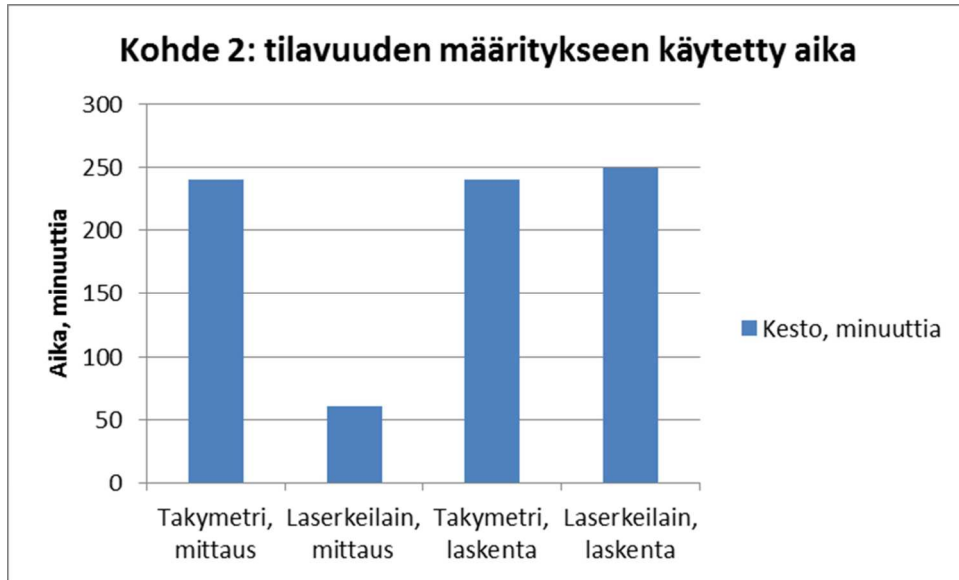
Kuva 11. Vasemmassa kuvassa kehät ovat ennen korjausta ja oikealla korjauksen jälkeen. Oikeassa kuvassa on korjattu myös miesluukun muodostama aukko sekä lähtevä putki.

Kaikestaan laserkeilausaineiston käsittelyyn kului aikaa kuusi tuntia, joka sisälsi asemapisteiden sovittamisen, aineiston pisteiden karsimisen, kehien ongelmakohtien muokkaamisen, pohjan laskennan, luotauslevyn yläpuolisen aineiston tuottamisen ja aineiston laskemisen Tank calibration sheet (TCS) - taulukkolaskentaohjelmalla. Etenkin kehien muokkaus oli erittäin hidasta ja työlästä työtä, johon suurin osa laskentaajasta kuluikin. Yhteenvetona laserkeilausmenetelmään kului tässä tapauksessa 6 tuntia 20 minuuttia ja jos mittaus olisi suoritettu kuten takymetrillä mitattaessa eli myös luotimitta ja materiaalilämpötilat olisi mitattu, aikaan tarvitsisi lisätä noin 10 minuuttia, jolloin kokonaisajaksi muodostuisi 6 tuntia 30 minuuttia.

Takymetrin aineiston laskentaan aikaan kului kolme tuntia, joka sisälsi kehien ja sylinterin muodostamisen, pohjan laskennan, tilavuuksien laskennan, deadwood:en vaikutusten laskemisen ja pöytäkirjan teon. Etenkin pohjanlaskenta oli nopeaa sen automatisoidun tekniikan vuoksi, deadwoodien laskentaan kului taasen enemmän aika, koska ne joudutaan pääsääntöisesti laskemaan lähestulkoon kokonaan käsinlaskentana. Takymetrillä tehtyyn määrittelyyn aikaan kului kaikestaan 3 tuntia 45 minuuttia, joka suurimmaksi osaksi koostui aineiston laskennasta.

Kuten aiemmin luvussa 3.2 kerrottiin, kohteen 2 tapauksessa käytettiin laserkeilauksessa neljää asemapistettä, jotka sijoituivat eri puolille säiliötä, joista ensimmäinen asemapiste sijaitsi samassa kohdassa kuin takymetrin asemapiste sijaitsi. Säiliö mitattiin neljästä kohtaa sen vuoksi, että säiliöstä saatiin tarpeeksi luotettava mittausaineis-

to, joka kattoi kaiken säiliön sisällön eri puolilta mitattuna. Aikaa kussakin asemapisteesä kului 15 minuuttia, johon sisältyi asemapisteen rakentamiseen, kojeen tasaantumiseen sekä itse mittaamiseen.



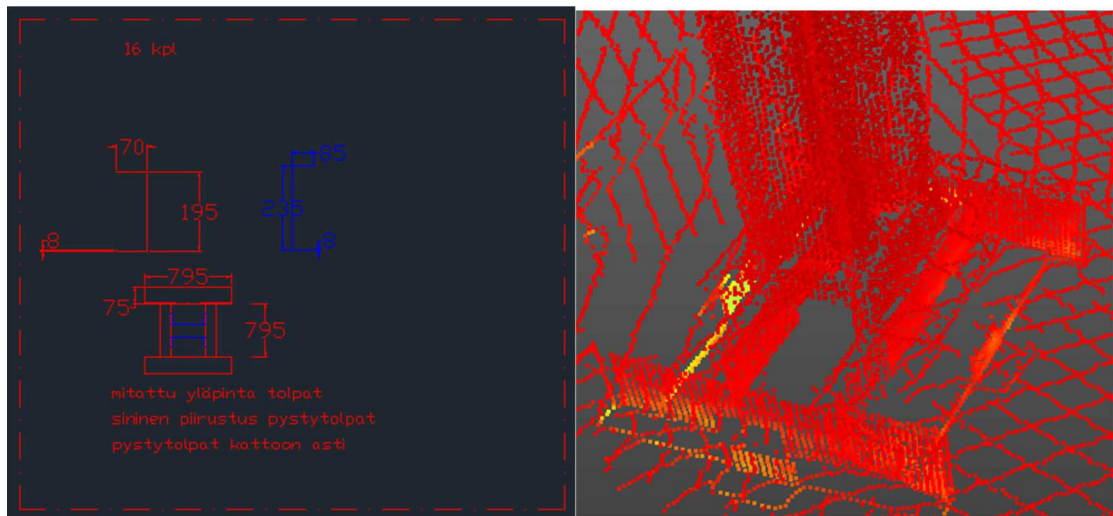
Kuva 12. Kohde 2: Kulutettu aika eri menetelmillä.

Kuten kuvasta 12 havaitaan, laserkeilaamalla tehtyyn mittaukseen kului huomattavasti vähemmän aikaa kuin takymetrillä tehtyyn mittaukseen. Ero on kutakuinkin kolmisen tuntia. On kuitenkin huomattava, että takymetrimittauksen keston kuuluu myös deadwoodien mittaus käsimitavälineiden avulla, luotimitan mittaus, materiaalin lämpötilan ja olosuhteiden mittaus, jotka puuttuvat laserkeilauksen mittausajasta. Näiden mainittujen mittausten kestoksi arvioidaan kestävän yhteensä puoli tuntia, jolloin laserkeilauksen mittaukseen olisi kaikestaan kulunut yhteensä 90 minuuttia.

Laskennan osalta takymetri- ja laserkeilausmenetelmien poikkeavuudet eivät ole niin huomattavan suuria kuin kohteessa 1 on havaittavissa. Tämä osaltaan johtuu siitä, että säiliö mitattiin useammasta kohdasta, mikä paransi muodostettujen kehien tarkkuutta suuremman pistetiheyden vuoksi. Lisäksi kohteen 2 säiliön laserkeilausaineistoa ei tarvinnut juurikaan muokata sen hyvän tarkkuuden ja laadukkaan aineiston vuoksi. Suurimman osan ajasta laserkeilauksen aineiston laskennassa vei asemapisteen aineistojen yhteensovittaminen sekä aineiston pisteistön karsiminen, joka alun perin sisälsi miljoonia pisteitä. Miljoonan pisteen käsitteleminen laskentatietokoneelle osoittautui haasteeksi, RealWorks-ohjelma mm. kaatui muutamaan otteeseen laskennan aikana ennen kuin laskenta saatiin päättymään. Pisteiden karsimisen vuoksi tiedosto

pieneni 240 MB:stä 99 Mbiin, ja tiedosto koostansa huolimatta sisälsi reilu 100 000 pistettä.

Takymetrin mittaaman aineiston käsittelyyn kulunut aika koostui lähinnä deadwoodien laskennasta, koska laskenta jouduttiin suorittamaan käsin deadwoodien monimuotoisuuksien vuoksi. Etenkin säiliön kattorakenteita tukevat tukijalat osoittautuivat melko työläiksi laskemisen osalta. Ne koostuivat kuvan 13 mukaisesti useista erikokoisista osista, lisäksi laskennassa oli eroteltava deadwoodin ylä- ja alapuoliselle osuudelle jäävät rakenteet.

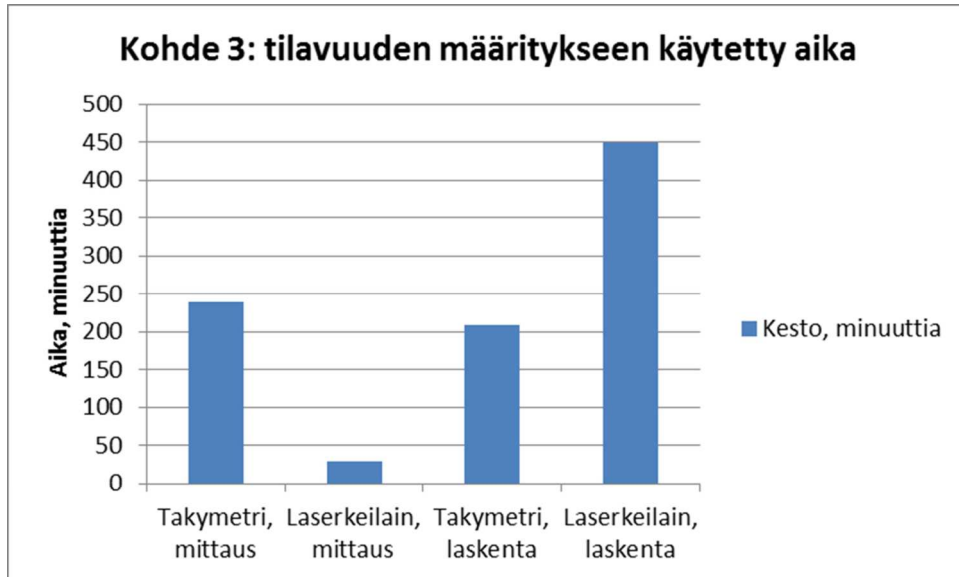


Kuva 13. Vasemmassa kuvassa on käsin mitatun tukijalan mittapiirustus. Oikeassa kuvassa on laserkeilamen näkemys tukijalasta intensiteettiväriyksellä.

Kohteen 3 säiliössä käytettiin neljän asemapisteen sijasta kahta asemapistettä. Tämän uskottiin riittävän tuottamaan tarpeeksi laadukasta aineistoa säiliöstä. Asemapistees sijaitivat uivan katon alapuolella, luotauslevyn välittömässä läheisyydessä uivan katon miesluukun kohdalla. Uivan katon yläpuolisen aineiston kerääminen tapahtui sijainniltaan samasta kohtaa kuin ensimmäinen asemapiste, mutta noin 2,6 metriä korkeammalta siten, että laserkeilain oli jalustan hissillä nostettu miesluukusta katon yläpuolelle. Takymetrimittauksessa käytettiin samanlaista menetelmää kuin laserkeilausmittauksessa, mutta takymetri asetoitiin uivan katon yläpuolella piilopistesauvojen avulla.

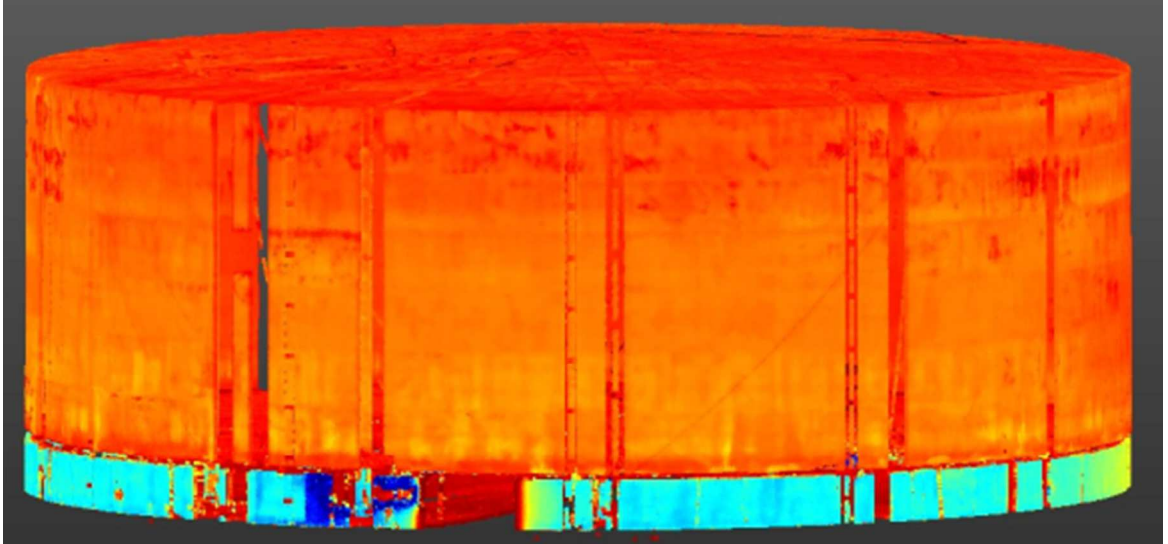
Kuvasta 14 havaitaan, että laserkeilaamalla säiliön mittaus nopeutuu huomattavasti takymetrimittaukseen verrattuna, vaikka laserkeilauspäivänä suoritettiin samalla materiaalin lämpötilojen mittaus. Laserkeilauksen mittausajasta puuttuu deadwoodien kä-

sinmittaus sekä luotimitan mittaamiseen kulutettu aika. Näiden on arvioitu kestävän yhteensä 30 minuuttia, jotka taas sisältyvät kuvassa osoitettuun takymetrin mittausaikaan.



Kuva 14. Kohde 3: Kulutettu aika eri menetelmin.

Vastaavasti takymetrin tuottaman pisteistön ja deadwoodien käsinlaskenta on taas huomattavasti nopeampi laskutoimitus kuin laserkeilauksen mittausaineistoon käytetty aika. Takymetrin aineiston laskentaan kuluneeseen aikaan sisältyy kehien ja sylinterin laskenta, pohjan laskenta, deadwoodien vaikutusten laskenta ja pöytäkirjan teko. Laserkeilaimen laskennan hidastuvuutta edisti mm. se, että kahden asemapisteen välillä ei ollut yhteisiä liittopisteitä, vaan ne koostuivat kahdesta erillisestä aineistosta. Näiden erillisten aineistojen yhteensovittaminen vei aikaa huomattavasti kauemmin kuin esimerkiksi kohteen 2 aineistojen käsittely, joka hoitui ohjelman automaattisen tulkinnan avulla. Lisähaastetta aineistojen yhteensovittamiseen toi myös se, että uivan katon yläpuolisessa mittauksessa laserkeilain oli päässyt hieman kallistumaan tasauksesta, mikä aiheutti aineistolle sen, että aineisto oli hieman kallellaan zenittiin nähden. Vaikeuksia laserkeilauksaineistoon aiheuttivat myös aukkokohdat pisteaineistossa (ks. kuva 15), jotka johtuivat katon ja uivan katon tukirakenteiden aiheuttamasta näkemäalueen esteistä. Pisteaineiston aukot vääristivät kehien muodostumista samoin kuin kohteen 1 tilanteessa, jolloin niitä oli muokattava käsin.

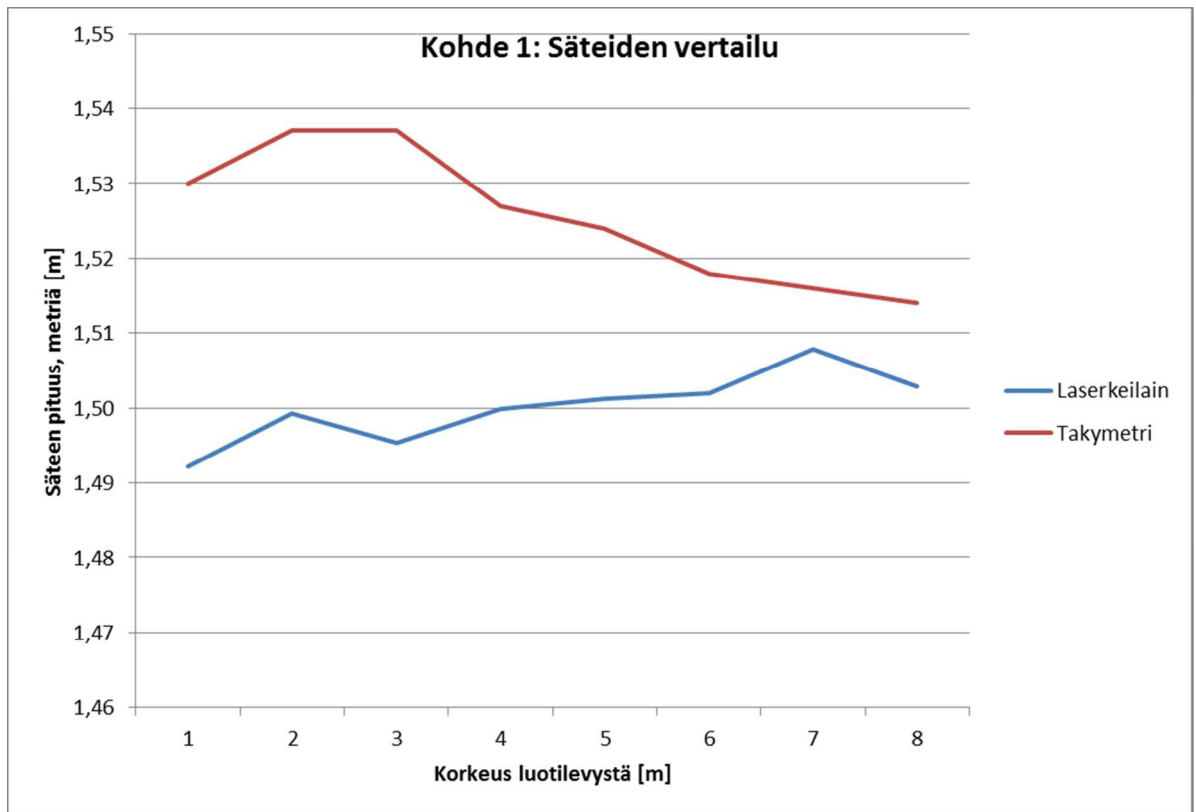


Kuva 15. Kuvassa on kohteen 3 intensiteettiväriyksellä oleva säiliö. Säiliön vaipassa ovat selkeästi havaittavissa tukirakenteiden aiheuttamat aukot säiliön vaipalla.

Säiliön kehien muodostamien säteiden eroavuudet

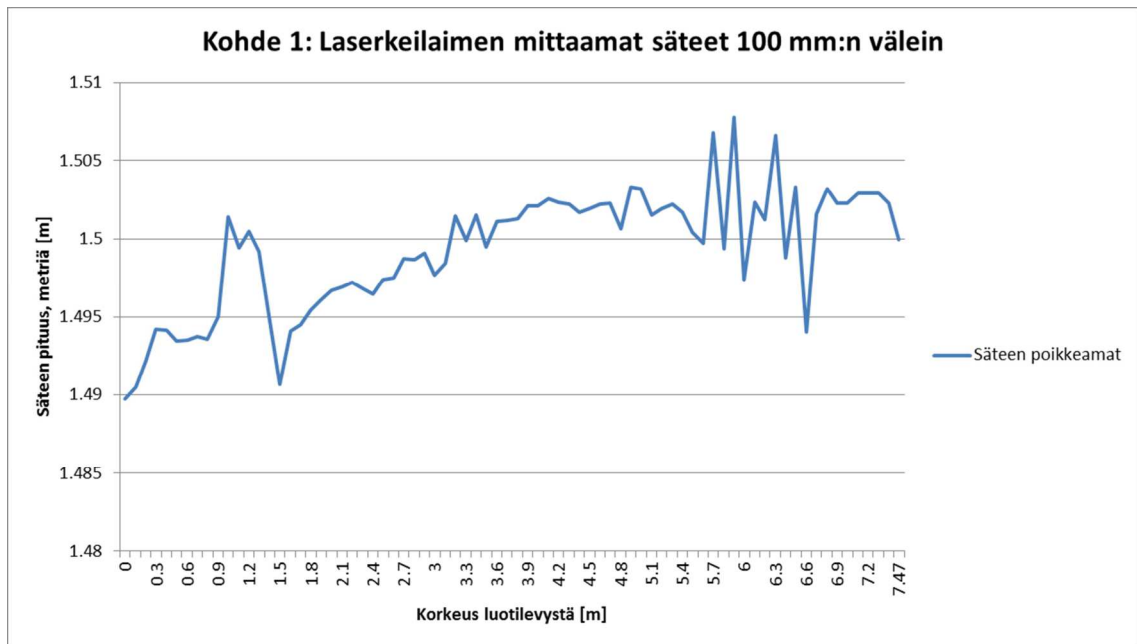
Toisena tarkastelutekijänä tutkittiin kunkin säiliön kohdalta takymetrin ja laserkeilaimen muodostamien säteiden suhdetta säiliön korkeuteen sekä toisiinsa nähden. Säteiden avulla pystytään piin avulla laskemaan kullekin korkeudelle pinta-ala, josta saadaan johdettua tilavuus. Laserkeilauksen aineistojen jokaisesta säiliöstä muodostettiin luotauslevystä ylöspäin 100 millimetrin välein vaipassa kulkeva kehä, josta johdettiin kyseiselle korkeudelle säde. Takymetrin aineistojen säteet saatiin suoraan Axyzin tuottamasta aineistosta niin sanottuna raakadatana, johon ei ollut tehty vielä olosuhdekorjauksia.

Kohteen 1 säiliössä havaittiin mielenkiintoinen eroavuus takymetrin antamassa säteessä suhteessa laserkeilaimen antamaan säteeseen. Takymetrin ja laserkeilaimen säteistä laskettaessa keskiarvojen ero havaittiin olevan takymetrissä 26 millimetriä suurempi kuin laserkeilaimen ilmoittama arvo. Poikkeama ei sinänsä vaikuta kovin suurelta ja merkittävältä, mutta 55 m³:n kokoisessa säiliössä muutaman kymmenen millimetrin vaikutus kokonaistilavuuteen on merkittävä ja näin lisää ilmoitettua tilavuuden mittauserävarmuutta usealla prosentilla. Kohteen 1 tapauksessa on kuitenkin kyseessä vanha säiliö, jossa muodonmuutokset ovat ilmeiset, mutta se ei ole tässä tapauksessa hyväksyttävä tekijä.



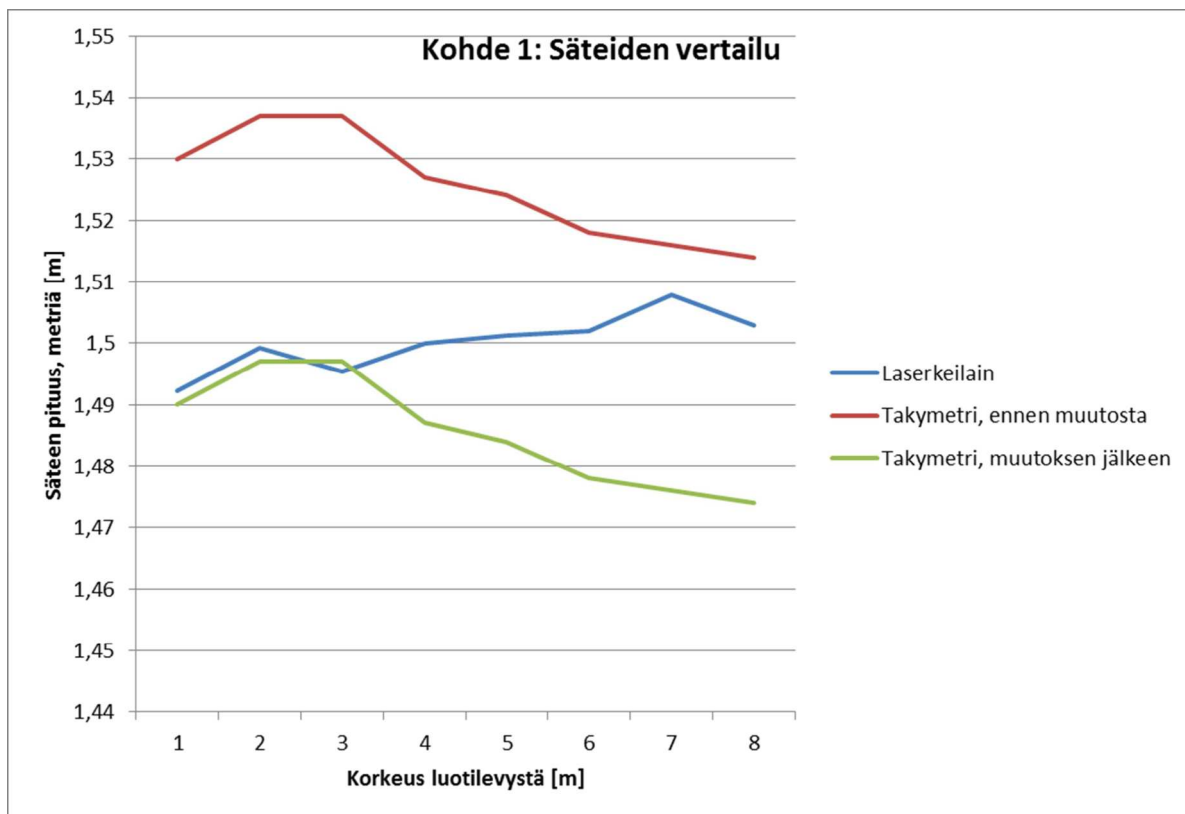
Kuva 16. Laserkeilaimen ja takymetrin ilmoittamien säteiden erot kohteessa 1.

Kuten kuvasta 16 havaitaan, säiliön säde normalisoituu säiliön yläpuolisilla osilla takymetrin osalta, oletuksena säiliön säteen ollessa koko säiliön mitalta vakio 1,5 metriä. Tämän oletetaan johtuvan kuorman aiheuttamasta pienemmästä paineesta yläpuolisiin rakenteisiin, jossa vaipan rakenteita pakottava massa ei saa aikaiseksi niin suurta deformaatiota kuin vaipan alapuolisiin rakenteisiin. Merkittävää on myös kuvasta havaittavat säteiden suuntien muutokset, jossa laserkeilaimen ilmoittama säde kasvaa ylöspäin mentäessä ja takymetrin päinvastaisesti. Eroavuus käyrän muodossa selittävänä tekijänä todennäköisesti johtuu laserkeilaimen kulmanlukutarkkuudesta ja havaittujen pisteiden vähäisyydestä, jota osakseen tukee kuvan 11 vasemmanpuolinen tilanne sekä kuva 17. Kuvassa 17 laserkeilaimen säde on kuvattu kulkevan 100 millimetrin välein luotilevystä ylöspäin. Kuvasta havaitaan noin 1,1 metrin korkeudessa ensimmäinen huippu, joka todennäköisesti johtuu miesluukun aiheuttamasta kehän kasvusta. 5,7–6,8 metrin korkeudessa olevat säteen vaihtelut todennäköisesti johtuvat vähäisestä pisteäärästä. Laserkeilaimen suuri kulmalukutarkkuus yhdistettynä säiliön vaipan kapeaan ja jyrkkään nousukulmaan selittäisi laitteen ilmoittaman nousujohteisen poikkeaman käyrään.



Kuva 17. Laserkeilaimen säteen nousukäyrä 100 mm:in välein mitattuna.

Takymetrin säteen negatiivista kulkusuuntaa ja huomattavaa poikkeamaa laserkeilaimen ilmoittamaan säteeseen ei tutkimuksen alussa osattu antaa selitystä. Myöhemässä vaiheessa havaittiin normaaleissa mittalaitteen päivätarkistuksissa laseretäisyysmittarissa olevan vikaa. Vika aiheutti etäisyysmittaukseen 39 millimetrin virheen mitattavasta etäisyydestä riippumatta. Etäisyysmittarin vika ei aiheuttanut muiden tähyhysten osalta virheellisiä mittauksia, vaan vika koski ainoastaan laseria eli tähyksetöntä mittausta. Takymetrillä suoritettujen mittausten historiasta selvisi, että vika todennäköisesti oli jo kohteen 1 säiliön mittauksessa ja näin olisi aiheuttanut virheellisiä mittaustuloksia säteeseen. Jos oletetaan, että laseretäisyysmittarin vika olisi ollut kohteen 1 mitauspäivänä olemassa ja manipuloisimme takymetrin mittaustietoja tuon vian aiheuttaman virheen verran vähentäen 39 mm mitatuista arvoista, saataisiin aikaiseksi kuvan 18 mukainen tilanne.

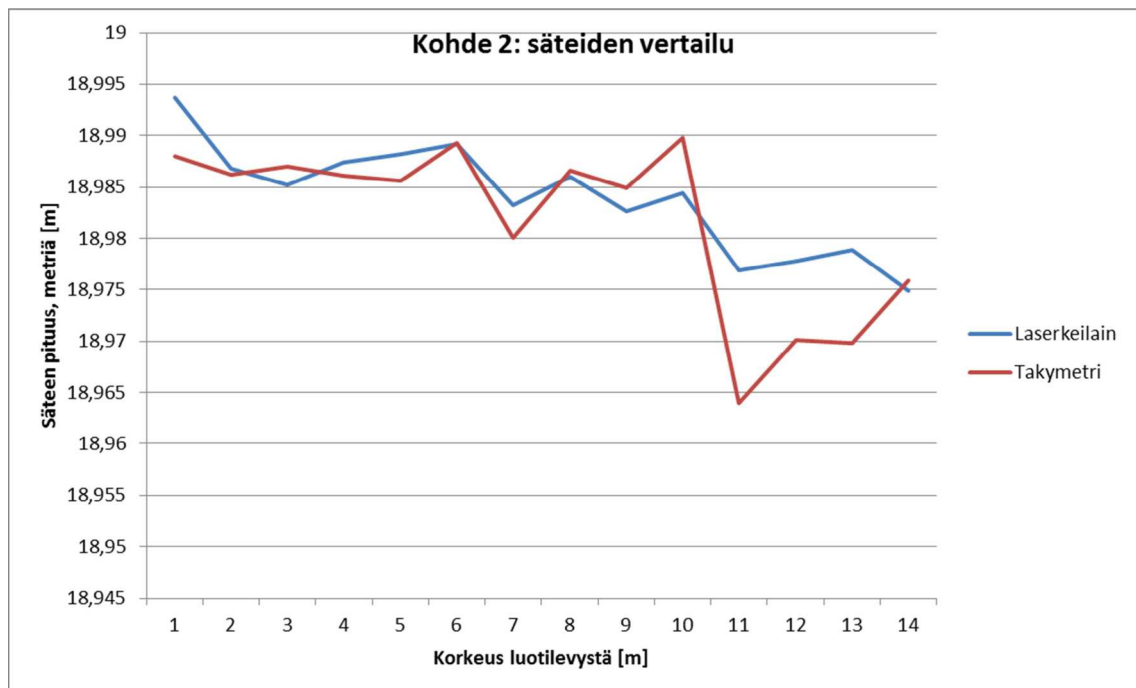


Kuva 18. Säteiden vertailu, kun laseretäisyysmittarin virhe on otettu huomioon.

Havaitaan, että mittalaitteiden ilmoittamat säteet yhtenäistyvät kolmen metrin korkeudelle saakka, mutta erkanevat siitä ylöspäin mentäessä. Mitään järkevää selitystä ilmiölle ei ole osattu antaa. Todennäköisesti säiliön vaipan pinta on ollut karstainen, öljyinen tai muuten huonosti heijastava, ja laserkeilain ei ole saanut siitä riittävästi luettua lasersäteiden heijastuksia yhdistettynä jyrkkään nousukulmaan. Toisaalta ei ole mitään syytä olettaa, että takymetrin manipuloitu tulos olisi yhtään sen oikeammassa kuin laserkeilaimen antama tulos. Mikäli tarkastelemme takymetrin alkuperäistä tulosta kuudesta metristä alkaen, havaitaan, että laserkeilain ja takymetri antavat lähestulkoon saman tuloksen. On kuitenkin muistettava, että aiemmin havaittiin 5,7–6,8 metrin korkeudelta laserkeilaimen saama vähäinen pistemäärä, joka aiheuttaa noin 10 millimetrin vaihtelun säteeseen. Näin ollen voidaan vain todeta, että mittausten perusteella on vaikeata todeta, kumpi mittalaitteista näyttää todenmukaisempaa tulosta säiliön säteestä kohteen 1 tilanteessa.

Kohteen 2 tilanteessa säteiden erot ovat siis yhtenäisemmät kuin kohteen 1 tapauksessa. Niin huomattavia poikkeamia ei ole havaittavissa säteen pituudessa korkeuden suhteen. Vain 10 metrin korkeudelta nousevalla osuudella takymetrin säteen pituus

muuttuu merkittävästi, kuten kuvassa 19 on nähtävissä. Tästä herääkin epäily, että tuossa korkeudessa olisi säiliön vaipalle kenties tapahtunut deformaatiota. Epäilystä siivittää myös mittauksen yhteydessä silmämääräisessä tarkastuksessa havaittu säiliön keskikaivoa kohti muodostunut painauma, toisin sanoen vaipan pinnalla ollut kupru, joka sijaitsi arviolta noin kolmanneksi ja toiseksi ylimmän levysarjan tietämillä. Kuprukohta oli iän myötä myös pahasti karstoittunut, mikä osakseen saattoi aiheuttaa silmälle optisen harhan yhdessä hämärän valaistuksen ja tumman pinnan kanssa. Muodonmuutoksen syntyperää ei varsinaisesti lähdetty selvittämään, vaan todettiin sellaisen säiliössä olevan.

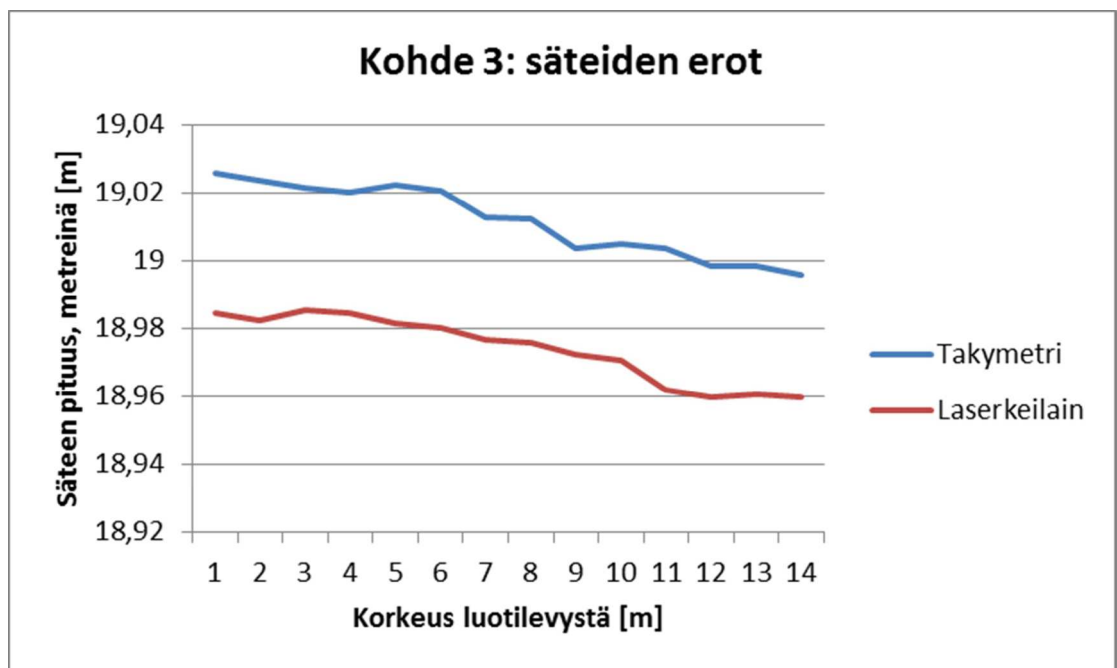


Kuva 19. Kohteen 2 mittalaitteiden ilmoittamien säteiden poikkeamat.

Takymetrin ja laserkeilaimen keskinäinen ero on suurimmillaan 10,7 metrin korkeudella 12,9 mm, joka aiheuttaa kehän muodostamaan pinta-alaan $1,539 \text{ m}^2$:n eron. 12,9 millimetriä ei tämän kokoisessa säiliössä aiheuta niin suurta virhettä kuin pienessä säiliössä, mutta virhe on kiinnostava tutkimuksen kannalta. Tarkasteltaessa nimenomaan takymetrin mittaamaa 10,7 metrin korkeudella sijaitsevaa kehää Axyzin aineistosta, havaitaan, että 16 laskennassa käytetyn pisteen keskinäisen poikkeaman keskihajonaksi muodostuu 34,3 mm ja keskiarvoksi 11,4 mm. Tulosten perusteella voidaan todeta, että kaikki mitatut pisteet eivät sijaitsekaan keskinäisesti samalla tasolla, mikä vääristää muodostetun kehän muotoa pienentäen sen sädettä. Voidaan siis todeta, että säteen suuri poikkeama johtuu mitattujen pisteiden keskinäisen korkeuden huonosta

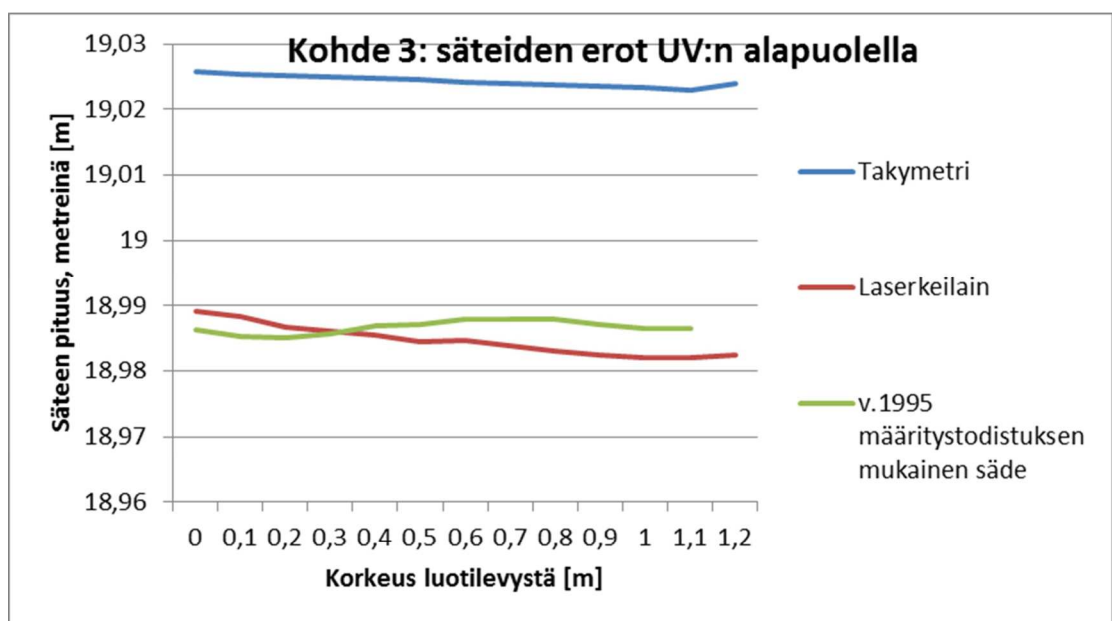
hierarkiasta. Tämä voisi selittää kuvassa 19 havaitun käyrän notkahduksen verraten laserkeilaimen käyrään. Toisaalta voidaan todeta, että laserkeilain myös havaitsi kupru kohdan, mutta sen ilmoittama säteen ero ei ollut niin suuri verrattuna oletettuun säiliön nimellissäteeseen 19,0 metriin. Näin ollen voidaan todeta laserkeilaimen pisteiden keskinäisen suhteen olleen parempi kuin takymetrin. On kuitenkin otettava huomioon myös laserkeilaimen kehän laskentaan käytettyjen pisteiden lukumäärä, joka tutkittavassa kohdassa on useita tuhansia pisteitä. Suurempi pistemäärä pienentää pisteiden välistä hierarkkista keskihajontaa ja keskiarvoa, mikä parantaa muodostuneen kehän muotoa näyttäen todellisemman kuvan kyseisestä kohdasta.

Säteiden mittaustuloksista on sen sijaan merkittävämpää havaita, mikä vaikutus säteen poikkeavuuteen on mittalaitteen sijainnilla vaipan suhteen. Tarkoiton tällä sitä, kuinka paljon tarkemmin mittalaitteet mittaavat loivemmassa kulmassa olevan vaipan seinämät, vaikka säiliö on melkein kaksinkertaisesti korkeampi kuin kohteen 1 säiliö. Loivempi näkemäalueen kulma ja vaipan etäisyys mittalaitteesta ei tuo suurtakaan eroa takymetrin ja laserkeilaimen mittalaitteiden välille, vaikka takymetrin kulmanlukutarkkuus on vielä tarkempi kuin laserkeilaimen. Tämän mittauksen perusteella voidaan todeta laserkeilaimen soveltuvan tämän kokoisten säiliöiden mittaamiseen.



Kuva 20. Säteiden vertailu kohteen 3 tilanteessa.

Merkittävää on havaita kohteessa 3, kuinka molempien mittalaitteiden poikkeamakäyrät ovat tasaisesti samansuuntaiset toisiinsa nähden, kuten kuvassa 20 havaittavissa. On kuitenkin merkillistä havaita, että mittalaitteiden ilmoittamien säteiden keskinäisten suhteiden erot ovat keskimäärin 40 millimetrin luokkaa. Jos oletettaisiin laserkeilaimen ilmoittamien säteiden olevan virheellisiä, ne voitaisiin selittää *Aikatekijä*-kohdassa ilmenneellä ongelmalla, jossa pistepilvien yhteen liittäminen koitui ongelmaksi. Aineistojen liittämisessä saattoi tapahtua jotakin, mikä vaikuttaa kehien säteiden muodostukseen. Toisaalta jos tarkastellaan ennen aineistojen liittoa olevaa mittausaineistoa säiliön uivan katon (UV) alapuoliselta osuudelta, niin voidaan havaita kuvan 21 mukaisesti, että ongelma ei johdu kyseisestä ongelmasta.

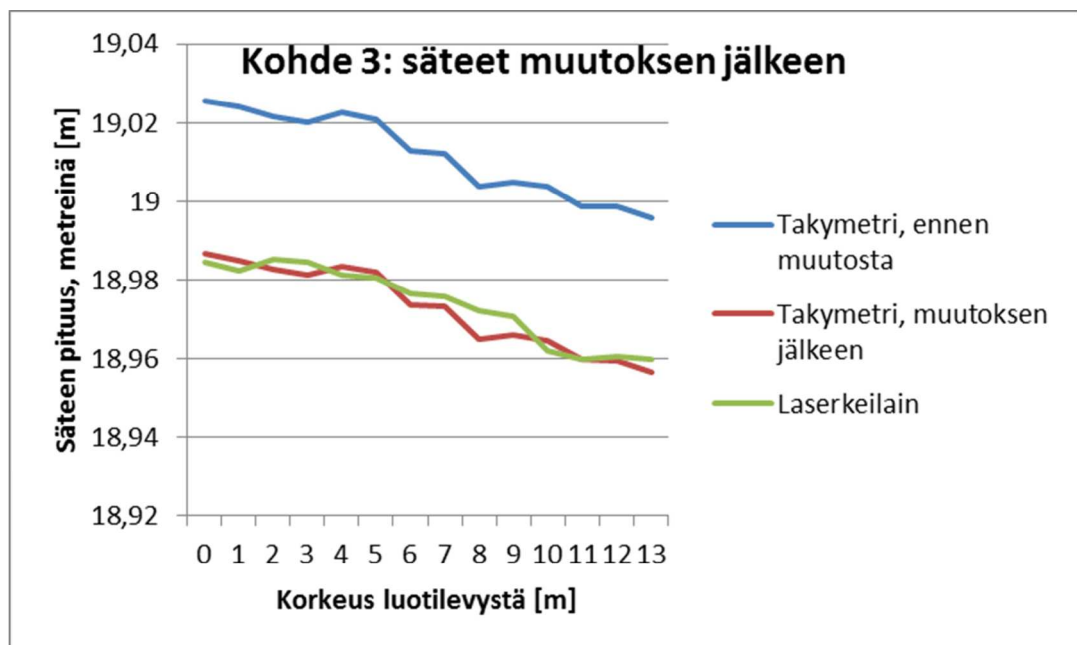


Kuva 21. Säteiden erot uivan katon alapuolisella osuudella, yhdistämättömästä pistepilvestä.

Jos taas oletetaan takymetrin tulosten olevan virheellisiä, tätä olettamusta tukisi vuonna 1995 tehdyn tilavuusmäärityksen tilavuustaulukoista johdetut säteiden pituuserot. Kuvassa 21 on havaittavissa, kuinka laserkeilaimen ja vuoden 1995 määrittystodistuksen mukaiset säteet ovat toisiaan tukevia. Täytyy kuitenkin huomata, että määrittystodistuksen johdetut säteet sisältävät olosuhdemuutosten korjaukset, vaikka niillä ei ole suurta vaikutusta tulosten muuttumiseen. Olosuhdemuutokset aiheuttavat säteessä muutaman sadasosamillimetrin muutoksen. Tämän v. 1995 määrittystodistuksen tiedon pohjalta voitaisiin todeta laserkeilaimen ilmoittamien säteiden oikeellisuus.

On kuitenkin huomioitava, että vanha määritystodistus on jo 20 vuotta vanha ja säiliö on ollut tuon ajan jatkuvassa käytössä. Säiliö on joutunut mukautumaan jatkuviin paineen vaihteluihin niin sisäisesti kuin ulkoisestikin, säätölojen muutoksiin, vaipan sisäpuoliset pinnat ovat joutuneet sietämään nesteen aiheuttamaa nesteenvaihdosta aiheutuvaa kitkaa, happojen ja kaasujen aiheuttamaa korroosiota ja niin edelleen. Näin ollen herääkin säiliön muodosta kysymys, onko säiliö pysynyt muuttumattomana koko 20-vuotisen historiansa ajan. Voidaanko olettaa, että säiliölle ei ole tapahtunut deformaatiota tuona aikana, ja mistä voidaan olla varmoja, etteivätkö takymetrin ilmoittamat säteet olisi yhtä lailla oikeassa. On kuitenkin mahdotonta olettaa, että säiliölle olisi kauttaaltaan aiheutunut sellainen deformaatio, että se muuttaisi säiliön muotoa koko korkeudeltaan aiheuttaen 40 mm:n muutokset.

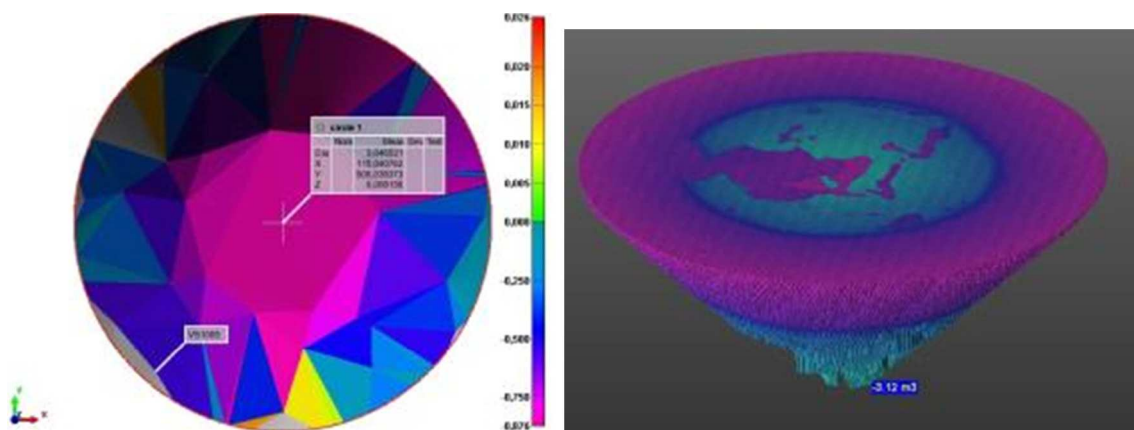
Kohteen 3 tilanne muistuttaa kauttaaltaan kohteen 1 tilannetta, jossa viallinen lasereitäisyysmittari aiheutti takymetrillä mitattaessa virheellisiä mittaustuloksia säteeseen. Ajallisesti virheen ilmaantuminen selittäisi myös tämän tapauksen virheellisyyden. Jos oletettaisiin virheen johtuvan viallisesta etäisyysmittarista ja virheen suuruinen arvo, 39 mm, vähennettäisiin mitatuista arvoista, saataisiin kuvan 22 mukainen havainto aikaiseksi. Kuva vahvistaisi olettamuksen takymetrin säteiden oikeellisuudesta vääräksi, ja näin voitaisiin todeta laserkeilaimen säteiden näyttävän totta.



Kuva 22. Takymetrin tuloksia on manipuloitu vähentämällä 39 mm alkuperäisistä mitatuista arvoista.

Laserkeilaimen ja takymetrin tilavuuksien eroavuudet

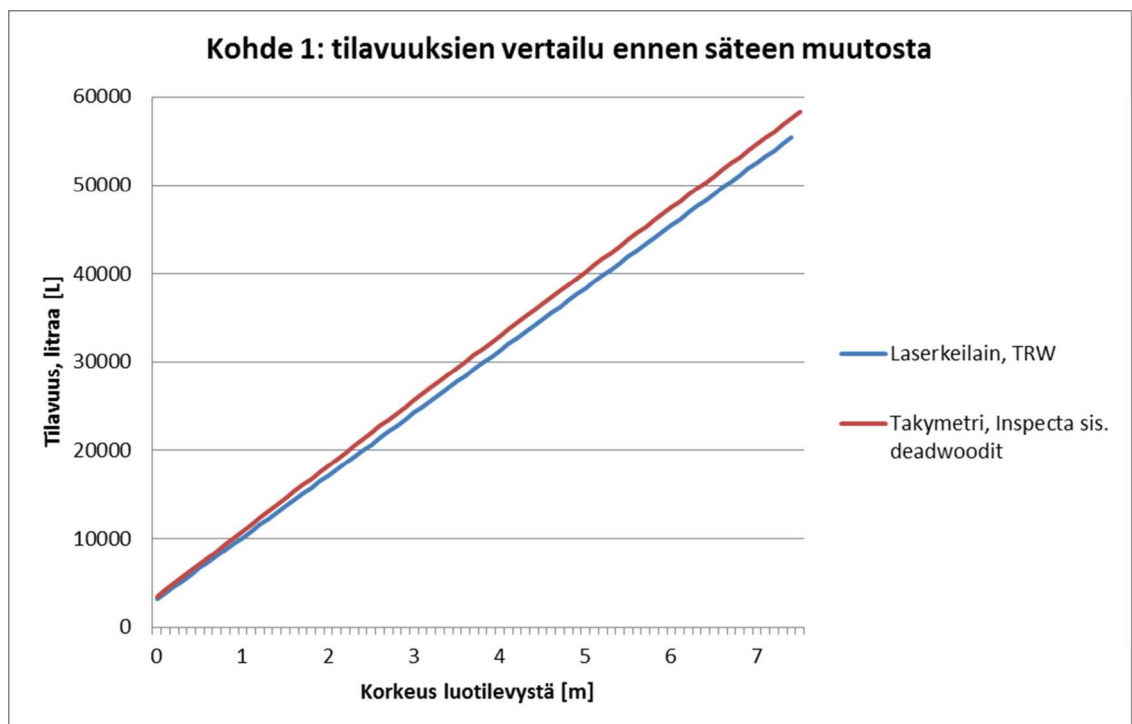
Laserkeilaimen ja takymetrin tilavuuksia tarkastellaan kolmella eri tavoin. Ensimmäisessä tavassa tarkastellaan tilavuuksien eroa siten, että laserkeilaimen aineisto on laskettu TRW:n TCS-taulukolla ja takymetrin aineisto Inspectan ohjelmalla, jossa aineisto sisältää deadwoodien vaikutuksen tilavuuteen. Seuraavaksi tarkastellaan tilannetta, jossa laserkeilausaineisto on laskettu samoin kuin ensimmäisessä mutta takymetrin aineistossa ei ole otettu huomioon deadwoodien vaikutusta. Kolmannessa tilanteessa tarkastellaan tilannetta, jossa molempien mittalaitteiden aineistoja tarkastellaan TCS-excelin laskemana siten, että takymetrin aineisto on syötetty ns. raakadatana ohjelmaan. Lisäksi kohteessa 3 tarkastellaan kolmen edellä mainitun tilanteen lisäksi tilannetta, jossa ei oteta huomioon uivan katon vaikutusta säiliön tilavuuteen ja sen tuottamaa tulosta verrataan laserkeilaimen ilmoittamaan tilavuuteen. Kohteessa 1 ja 3 tarkastellaan edellä mainittujen lisäksi mitattujen ja manipuloitujen arvojen eroja laserkeilaimen ilmoittamaan tilavuuteen.



Kuva 23. Vasemmalla on Polyworks-ohjelman tulokinta kohteen 1 pohjan muodosta ja oikealla on Trimble RealWorks-ohjelman tulokinta asiasta.

Ensimmäisenä tarkastelun kohteena on kohteen 1 pieni öljysäiliö. Tarkastelun ensimmäisessä vaiheessa verrataan laserkeilaimen aineistosta TCS-taulukon avulla laskettua aineistoa takymetrin aineistoon, joka on laskettu Inspectan kehittämällä ohjelmalla. Aloitetaan tilavuuksien tarkastelu pohjan tilavuuksista. Kuvassa 23 on havainnoitu pohjan muotoa Polyworks- ja TRW:n laskentamenetelmien keinoin. Takymetrin laskennassa selvisi luotauslevyn alapuolisen osuuden tilavuudeksi eli pohjan tilavuudeksi muodostui 3 368,345 litraa, kun laserkeilain havaitsi pohjan tilavuudeksi vain 3 122,74 litraa. Ero luotauslevyn kohdalla eri mittausmenetelmin oli jo 245,605 litraa.

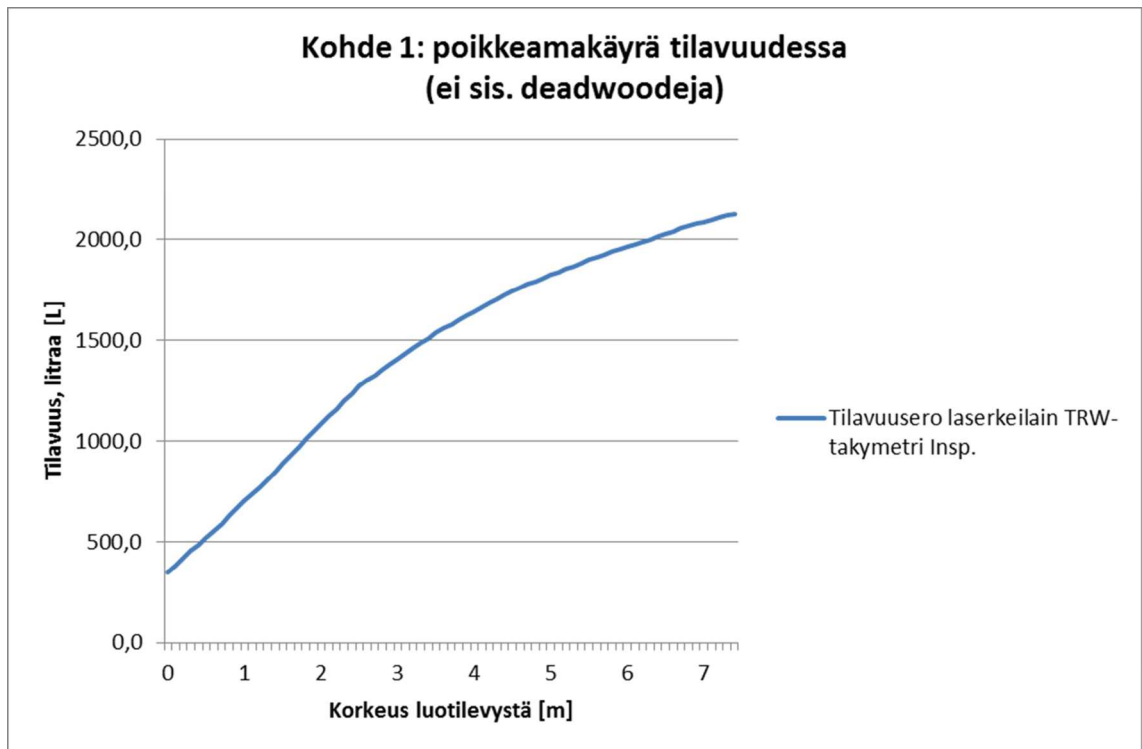
Eron pohjien väliseen tilavuuteen aiheuttaa todennäköisesti laserkeilaimen laskennassa ilmoitettu luotauslevyn korkeuden sijainti, jossa alin kohta (luotauslevyn pinnan korkeus) ilmoitetaan osoittamalla pisteistöstä luotauslevyn kohdalta sopivalta korkeudelta sijaitsevaa pistettä. Tutkimuksessa huomattiin, että tällä menetelmällä saattaa saada pohjien eroiksi useita satoja jopa tuhansien litrojen eroja säiliön koosta riippuen. Millimetrin virhe korkeuden määrittämisessä kohteeseen 1 tilanteessa aiheuttaa tilavuuteen noin 7,5 litran eroavuuden. Näin ollen, jos tarkastelemme pohjien välistä tilavuus eroa, saamme tulokseksi 32,6 millimetriä. Asia ei kuitenkaan ole niin yksiselitteinen. On huomioitava, että pelkkä luotauslevyn korkeusero ei yksistään aiheuta poikkeamaa pohjantilavuuteen. Tilavuuseroa aiheuttavat myös mitattujen pisteiden sijainti ja määrät, pohjalla olevien deadwoodiin aiheuttavien kappaleiden määrä, pohjakaivon tilavuus jne. Esimerkiksi pohjakaivon tilavuus aiheuttaa tässä tilanteessa pohjaan 100,53 litran tilavuuden lisäyksen, jota ei TRW:n aineistossa ole otettu huomioon ollenkaan. Mikäli vähentäisimme tilavuuksien erosta kaivon aiheuttaman tilavuuden lisäyksen, saisimme tulokseksi 145,075 litraa, jolloin korkeuseron osuudeksi jäisi 19,3 millimetriä. 145 litran eron aiheuttaa todennäköisimmin aikaisemmin havaittu takymetrin mittausvirhe yhdessä laserkeilaimen laskennassa osoitetun korkeusvirheen sekä deadwoodien, jotka aiheuttavat lisäystä tai vähennystä tilavuudessa, kanssa.



Kuva 24. Takymetrin ja laserkeilaimen aineisto verrattuna siten, että kummankin aineisto on tuotettu ns. omilla ohjelmilla.

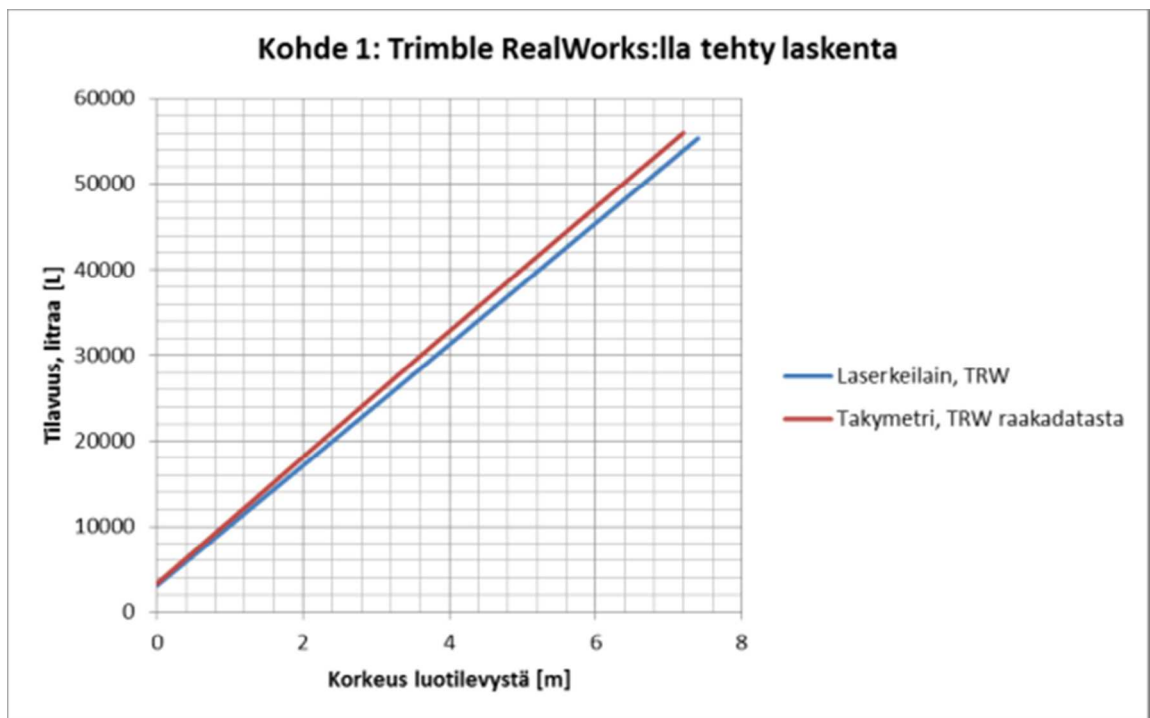
Luotauslevyn yläpuolisella osuudella mitatuista aineistoista seuraa kuvan 24 mukainen tilanne, jossa korkeuden kasvaessa myös tilavuusero kasvaa mittausten välillä. Kuvasta 24 havaitaan, että tilavuus pysyy lähes samoissa lukemissa aina metriin saakka, jonka jälkeen tilavuudet alkavat eroamaan toisistaan. Tutkimuksessa havaittiin, että tuolla korkeudella säiliössä sijaitsee miesluukku, joka aiheuttaa takymetrin aineistoon aukon kokoisen tilavuuden lisäyksen. TRW-ohjelma havaitsi kyllä aukon, mutta tilavuuteen se ei aiheuttanut muutosta. Tutkimuksessa havaittiin, että TRW ei ikään kuin noteeraa deadwoodeja ollenkaan aineistossa, vaan se määrittää säiliölle vaipalla kulkevan kehän, jonka mukaan laskee säiliön tilavuuden. Ensimmäisessä tarkastelutilanteessa takymetrin mittaamaksi säiliölle saatiin kokonaistilavuudeksi 7.4 metrin korkeudessa 57 524,57 litraa eli $57,527\text{m}^3$, joka on yli 2 500 litraa enemmän nimellistilavuuteen verrattuna. Laserkeilaimen tilavuudeksi samalla korkeudella saatiin 55 382,89 litraa ($55,382\text{m}^3$), joka on vastaavasti nimellistilavuuteen verrattuna vain 382,89 litraa suurempi. Mittalaitteiden keskinäiseksi tilavuuseroksi jäi 2 141,68 litraa eli yli 2 m^3 ero. Tilavuusero on huomattava, kun se suhteutetaan säiliön nimellistilavuuteen. Näin voidaan todeta, että tässä tilanteessa laserkeilain olisi tuottanut todennäköisemmän tilavuuden säiliöstä.

Mikäli ei oteta huomioon takymetrin mittaustilanteesta laskiessa deadwoodien aiheuttama vaikutusta tilavuuteen luotauslevyn yläpuolisilla osuuksilla, säiliön keskinäisen tilavuuksien ero johtaisi kuvan 25 mukaiseen tilanteeseen. Siinä tilavuusero hieman kutistuisi toisiinsa nähden, mutta siihen jäisi vieläkin suuri ero. Kokonaisuustilavuusero edelleenkin jäisi yli 2 100 litran yli, jolloin deadwoodilla tässä tilanteessa ei ole kuin vaivaisen muutaman kymmenen litran vaikutus.



Kuva 25. Tilavuuksien ero, kun takymetrin aineistosta ei oteta huomioon deadwoodien vaikutusta.

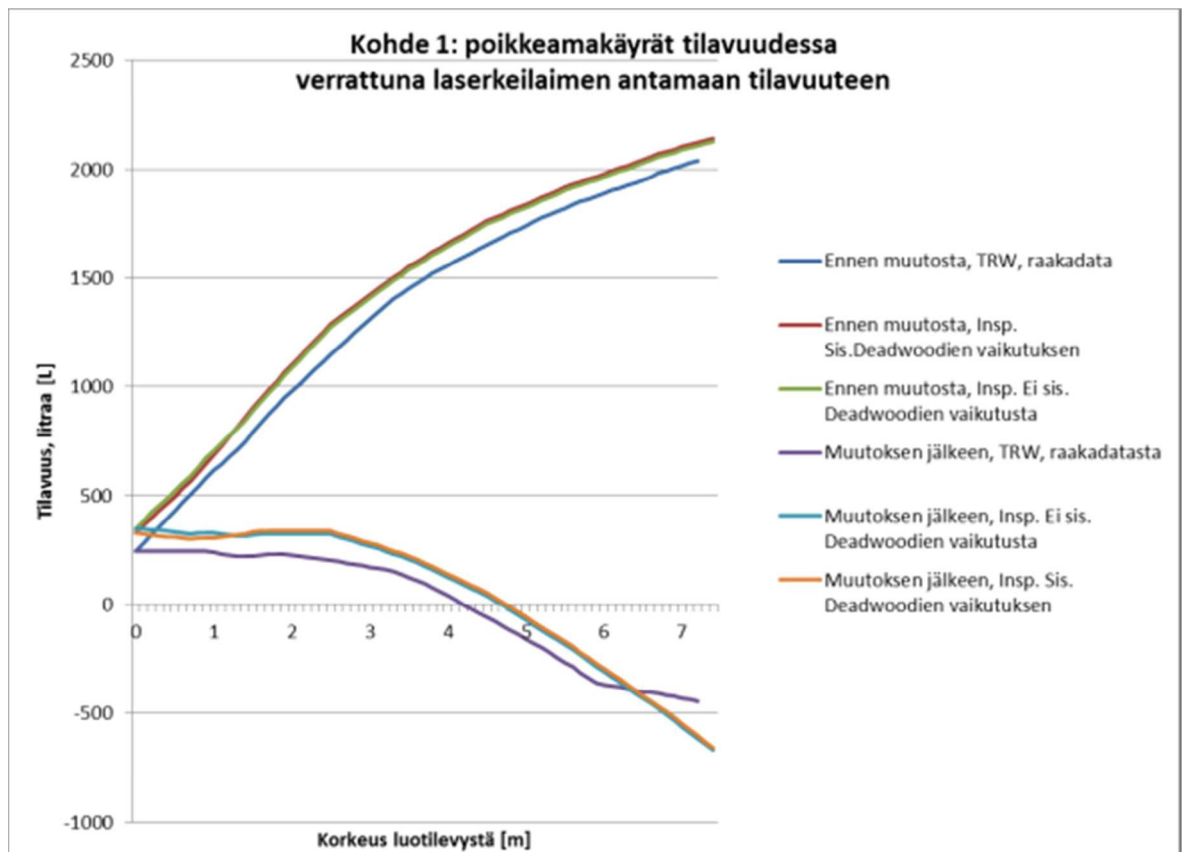
Jos takymetrin raakadata olisi syötetty Trimble RealWorksin mukana tulleeseen TCS-taulukkoon, olisi tuloksiksi saatu kuvan 26 mukainen tilanne, jossa säiliön kokonaistilavuudeksi 7,2 metrin korkeudella olisi jäänyt takymetrillä 56 003,5 litraksi ja laserkeilaimella 53 964,4 litraksi. Laskentaa ei voitu jatkaa 7,2 metriä korkeammaksi, koska takymetrin raakadata kattoi vain tuolle korkeudelle saakka. Keskinäiseksi eroksi muodostuisi vieläkin yli 2 000 litran ero. Tästä voidaan todeta, että laskentatavalla ei tässä tapauksessa tuntunut olevan vaikutusta. Suurin vaikutus kokonaistilavuuteen on takymetrin viallisella etäisyysmittarilla.



Kuva 26. Tank calibration sheet -ohjelmalla lasketut tilavuudet eri mittausmenetelmin.

Seuraavaksi tarkastellaan tilannetta, jossa manipuloimme takymetrin mittausaineistoa lyhentämällä sädettä viallisen etäisyysmittarin virheen verran. Havainnollistaaksemme manipuloinnista aiheutunutta muutosta tilavuuteen, esitetään kuvassa 27 samanaikaisesti myös tilanteet ennen säteen muutosta. Kuvassa 27 on esitetty aineistot suhteutettu laserkeilaimen tuottamaan tilavuusaineistoon. Kuvasta huomataan manipuloinnista aiheutuneen eron. Muutoksen aiheuttamat poikkeamakäyrät ovat lähentyneet huomattavasti lähemmäksi laserkeilaimen ilmoittamaa tilavuutta. Laskentatavasta riippuen tilavuuserot pysyttelevät noin +240... -670 litran vaihteluvälillä korkeudesta riippuen. Kuvasta havaitaan myös, että muutoksen jälkeisen raakadatan syöttö TCS-taulukkoon aiheuttaa pienimmän eron tilavuuteen. Tällaisella laskentamenetelmällä laskettuna laserkeilaimen ja takymetrin tilavuuseroksi jäisi 443,087 litraa, jolloin takymetrin tilavuudeksi muodostuisi 53 520,24 litraa. Etäisyysmittarin virheen vähennyksen johdosta Inspectan ohjelmalla säiliön tilavuudeksi saataisiin 7,4 metrin korkeudessa 54 725,94 litraa, ollen 656,944 litraa vähemmän kuin laserkeilaimen tulos. Inspectan ohjelma antaa säiliölle myös 7,5 metrin korkeudelle tilavuuden, joka on manipuloinnin jälkeen 55 407,99 litraa eli hyvin lähellä säiliön nimellistilavuutta. Molemmissa tilavuukissa on otettu huomioon deadwoodien vaikutus. Ilman deadwoodien vaikutusta kokonaistilavuuden erotukseksi jäisi 669.864 litraa vähemmäksi laserkeilaimeen verrattuna.

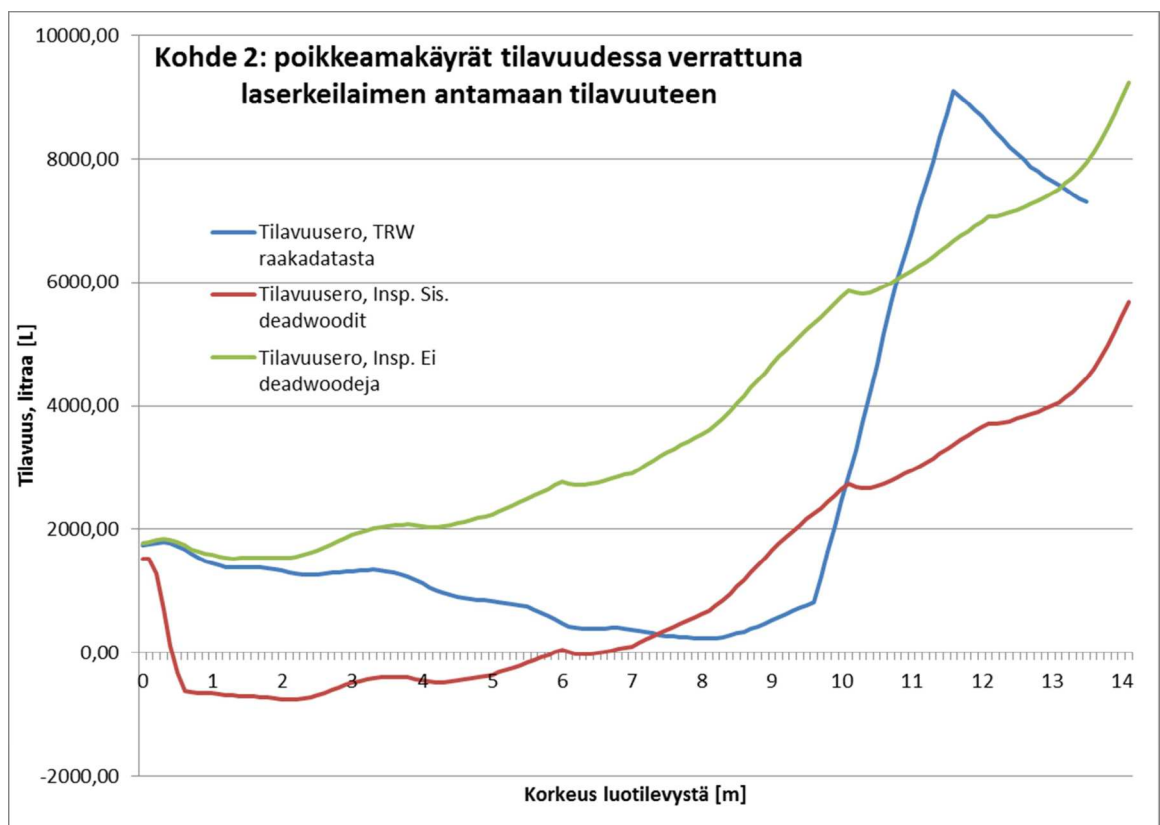
Voidaan siis todeta, että mikäli takymetri olisi ollut mittaushetkellä kunnossa, olisivat sen tuottamat arvot tuottaneet yhtä uskottavan tuloksen säiliön tilavuudesta kuin laserkeilainkin. Ilman manipulointia takymetrin tulokset ovat epäuskottavia, kun kokonaistilavuutta verrataan nimellistilavuuteen. On mahdotonta sisällyttää yli 2 500 litraa nestettä sellaiseen säiliöön, johon ei teoriassakaan mahdu yli 55 000 litraa nestettä ilman ylivuotoja.



Kuva 27. Poikkeamakäyrät suhteutettuna laserkeilaimen tilavuuteen eri laskentamenetelmin ennen ja jälkeen säteen muutoksen.

Seuraavaksi tutkittiin kohdetta 2, joka mitattiin resurssipulan vuoksi toisella takymetrillä kuin kohteiden 1 ja 3 säiliöt. Tutkimuksen aikana todettiin kyseisen takymetrin olevan kunnossa, jolloin olettamuksena on, että mittaustulokset pitävät paikkaansa. Ensiksi tarkastellaan tilannetta, jossa takymetrin laskennassa ovat olleet mukana deadwoodien vaikutukset. Kuvassa 28 havaitaan tilannetta vastaava poikkeamakäyrä (punainen), jossa 0,5–6 metrin vaiheilla tilavuudet ovat melko samantapaiset kuin laserkeilaimen arvot ovat. Aivan matalalla 0–0,5 metrin on huomattavat erot ja 6 metrin yläpuolella tilavuudet karkaavat aina vajaaseen 6 000 litraan saakka. Tarkasteltaessa tilannetta numeerisessa muodossa havaittiin säiliön pohjan tilavuuseroksi olevan vain

1 516,79 litraa, jossa laserkeilaimen arvo on 16 6412,4 litraa ja takymetrin 16 7928,9 litraa. Näin ollen voidaan todeta, että laserkeilaimen laskennassa osoitettu korkeus on osunut melko oikealle korkeudelle, vaikka ero tuntuu kovin suurelle. Suhteutettuna pohjan tilavuuseron korkeuteen tämä tarkoittaisi korkeudessa vain 1,3 millimetrin korkeuseroa. Kuten kohteen 1 tilanteessa, niin myös tässä on muistettava, että pohjan tilavuuteen vaikuttavat moni asia eikä pelkästään luotilevyksi osoitettu korkeus. Korkeusvälillä 0–0,2 metriä tilavuuserot ovat noin 1 400 litraa ja siitä ne vähenevät puoleen metriin saakka 300 litran eroon, jossa Inspectan ohjelma saa pienempää arvoa. Suurimmat deadwoodien vaikutukset sijoittuvat nimenomaan korkeudelle 0–1,5 metriä, jossa mm. on kolme miesluukkuja, slingoja, putkia ja kaivoja. Näillä kaikilla on suuri vaikutus tilavuuteen niin negatiivisesti kuin positiivisestikin. 6 metrin yläpuolisella osuudella takymetrillä mitatut arvot kasvavat tuntemattomasta syystä aina yli 5 600 litraan saakka. Näin takymetrillä mitatuksi kokonaistilavuudeksi muodostuu 14,1 metrin korkeudessa 16 139 294,48 litraa ja vastaavasti laserkeilaimen tilavuudeksi 16 133 608,55 litraa.



Kuva 28. Kohteen 2 tilavuudet eri laskentamenetelmin suhteutettuna laserkeilaimen aineistoon.

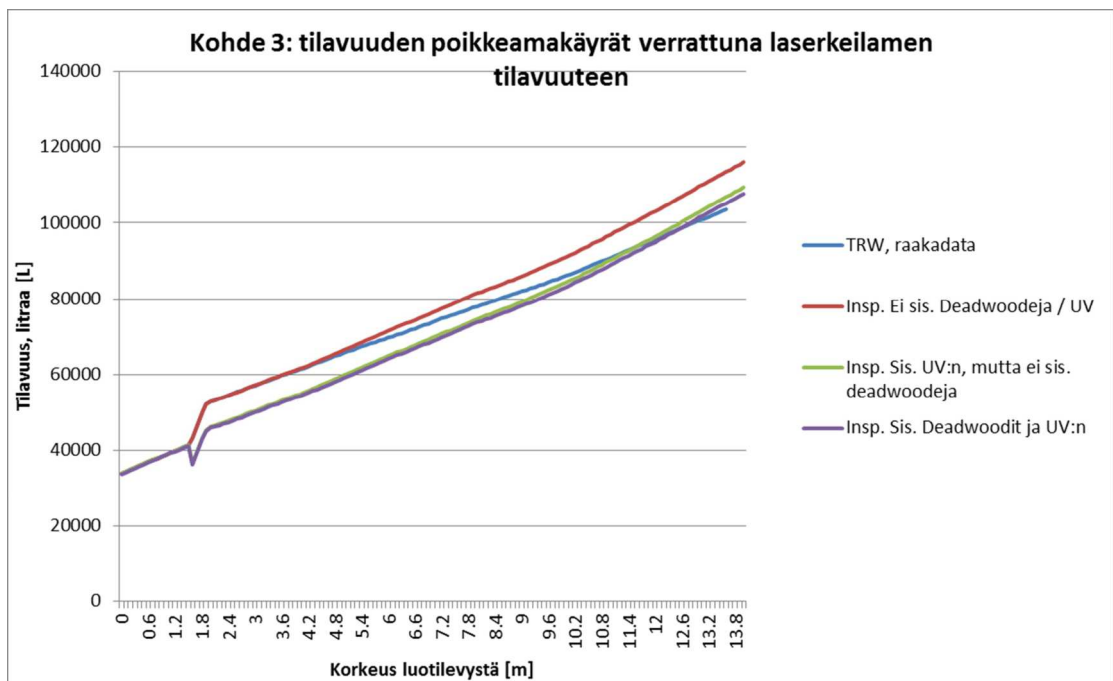
Tutkimuksessa todettiin yli 5 000 litran eroavuuden osaksi johtuvan säteiden muodostamista pinta-aloista, joissa havaittiin pieniä, neliömetrin osien eroavaisuuksia laserkeilaimen ja takymetrin pinta-alojen osilta. Pääosin koko säiliön korkeuden osalta takymetrin pinta-alat todettiin tutkimuksessa olevan keskiarvollisesti $0,50 \text{ m}^2$ ja keskihajonnallisesti $1,07 \text{ m}^2$ suurempia kuin vastaavat laserkeilaimen pinta-alat. Vastaavasti litramäärällisesti tämä tarkoittaisi $0,50 \text{ m}^2 = 0,50 \text{ L} / \text{mm}$ ja $1,07 \text{ m}^2 = 1,07 \text{ L} / \text{mm}$ eroja laserkeilaimen verrattuna. Ero voidaan todistaa mm. siten, että oletetaan 6 metrin kohdalla arvon oleva tasan 0 litraa verrattuna laserkeilaimen. Näin ollen korkeuseroista laskien tulee $14\ 000 - 6\ 000 \text{ mm} = 8\ 000 \text{ mm}$, josta keskiarvon suuruisella poikkeamalla saadaan tulokseksi 4 000 litraa. 0–0,2 metrin välillä keskiarvo määrä on noin 1 400 litraa ja 0,3–5900 mm kohdalla 460 litraa. Poikkeamakäyrän vaaka-akselin positiiviset arvot lasketaan yhteen ja negatiivinen vähennetään, jolloin tulokseksi saadaan noin 4 940 litraa, joka vastaa koko lailla 14 metrin kohdalla sijaitsevaa tilavuuseroa mittalaitteiden kesken.

Kuvassa 28 vihreällä poikkeamakäyrällä on osoitettu Inspectan ohjelmalla laskettu takymetrin tilavuusero ilman deadwoodien vaikutusta. Kuvan avulla voidaan todeta, kuinka paljon $16\ 000 \text{ m}^3$ kokoisessa säiliössä vastaavasti on taas deadwoodeilla merkityksellistä vaikutusta tilavuuteen. Käyrä, joka kuvaa arvoja, jotka eivät sisällä deadwoodien vaikutusta, sijaitsevat asteikolla merkittävästi korkeammalla kuin käyrä, joka sisältää deadwoodit. Erot 0–0,2 metrin korkeudessa ovat noin 500 litraa korkeammalla kuin punainen käyrä. Kuvasta voidaan todeta, että deadwoodeilla on säiliön tilavuuteen vaikutusta keskiarvollisesti 2 776,72 litran vaikutus korkeudesta riippumatta eli melkein 3 kuution verran. Ilman deadwoodeja laskiessa säiliön kokonaistilavuudeksi tulisi 14,1 metrin korkeudessa 16 142 849,55 litraa, joka on 9 241 litraa enemmän kuin laserkeilaimella saatu arvo.

Raakadatan avulla lasketun tilavuuden käyrä (sininen) poikkeaa edellisistä käyristä erikoisella tavalla. Tilavuudessa tapahtuu merkittävä muutos noin 9,6 metrin kohdalla, jossa tilavuusero ampaisee keskiarvollisesti 6 600 litran eroon sen ollessa siihen asti keskiarvollisesti vain vähän reilut 900 litraa suurempi kuin laserkeilaimen arvo. Tämä ei sinänsä ole merkillistä, kun asiaa tarkastelee säteiden kannalta. Säteiden ero 9,6 metrin kohdalla on 5,3 millimetriä suurempi takymetrillä, pinta-alallisesti tämä tarkoittaa $0,64 \text{ m}^2$:in eroa laserkeilaimen verrattuna. 100 millimetrin matkalla tilavuus nousee reilut 400 litraa ja metrin matkalla jo reilut 4 300 litraa. 10,7 metrin korkeudessa taasen tilavuus kääntyy laskuun, jossa laserkeilaimen säde on 12,9 mm suurempi kuin taky-

metrin. Tämä tarkoittaa pinta-alallisesti tarkasteltuna noin 1,05 m² suurempaa pinta-alaa laserkeilaimen hyväksi.

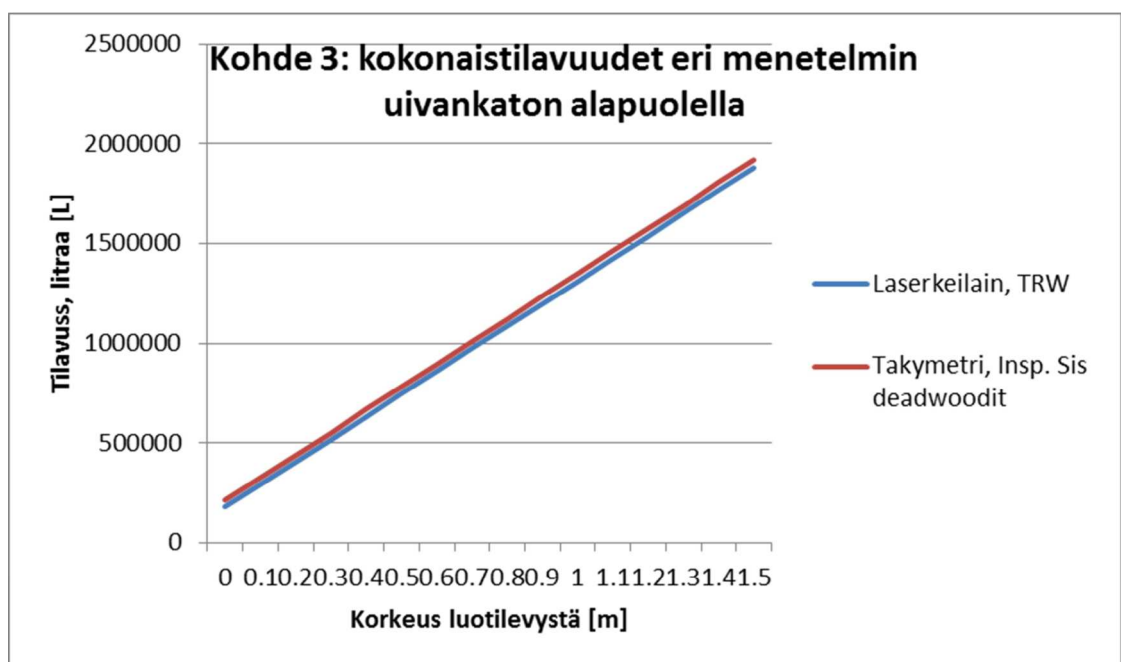
Säiliön kehien muodostamien säteiden eroavuudet-kohdassa tarkasteltiin säteiden vaihteluita eri korkeuksilla. Siellä havaittiin kyseisessä säiliössä olevan kupru sijainniltaan 9,5–10,5 metrin korkeudessa. Tämähän tarkoittaisi sitä, että takymetrin havaintojen perusteella tilavuuden pitäisi olla pienempi kuin laserkeilaimella lasketut tilavuudet, koska havaitut säteetkin olivat lyhyempiä ja näin ne pienentäisivät myös pinta-aloja. Toisin sanoen säteet ja tilavuudet ovat ristiriidassa toisiinsa nähden TCS-taulukolla laskiessa. On kuitenkin huomioitava, että takymetrin raakadatan sisältö on hieman harva, jolloin päästään siihen, että todellista kuvaa tilavuuden muutoksesta ei pääse tämän vuoksi syntymään. Tämän uskotaan selittävän tilavuuden poikkeamakäyrän epänormaalin käytöksen kuvassa 28. Trendi raakadatan poikkeamakäyrällä on kuitenkin samanlainen kuin Inspectan ohjelmalla laskiessa, vaikka tilavuuden nousu tapahtuu muita käyriä huomattavasti myöhemmin. Tämän vuoksi sen uskottavuus kuitenkin säilyy ja antaa hyvän tuen kahdelle muulle poikkeamakäyrälle niiden oikeellisuudesta.



Kuva 29. Kohteen 3 tilavuuserot eri laskentamenetelmin.

Tilavuuksien tutkimisen viimeisenä kohteena tarkastellaan kohteen 3 uivakattoista säiliötä. Aiemmin *Aikatekijä*-kohdassa mainittiin tämän tapauksen ongelmasta, jossa mm. pistepilvien yhdistäminen koitui hankaluudeksi. Tämän yhdistämisongelman todetaan

aiheuttaneen säiliön tilavuudelle huomattavan suuria poikkeamia tilavuudessa takymetrin ja laserkeilaimen keskinäisessä suhteessa, kuten on havaittavissa kuvassa 29. Kuvan perusteella voidaan myös todeta, että laserkeilausaineston luotilevyn korkeuden määrittäminenkään ei ole osunut täysin kohdilleen, koska jo alkuaan erot ovat yli 30 000 litran suuruusluokkaa. Tarkalleen ottaen takymetrillä mitatun pohjan tilavuudeksi saatiin 212 029,3 litraa ja laserkeilaimella 178 213,6 litraa, josta erotuksena tulee 33 813 litraa. Pohjan tilavuuksien ero on jo huomattavan suuri, jolla on jo vaikutusta säiliön koko tilavuuteen. Pohjan tilavuuden suuren eron selittää suurimmaksi osaksi luotilevyn korkeuden virheellinen asemointi sekä puutteellinen mittausaineisto (harva) säiliöstä.



Kuva 30. Uivan katon alapinnan ja luotilevyn yläpinnan välisen osuuden tilavuserot.

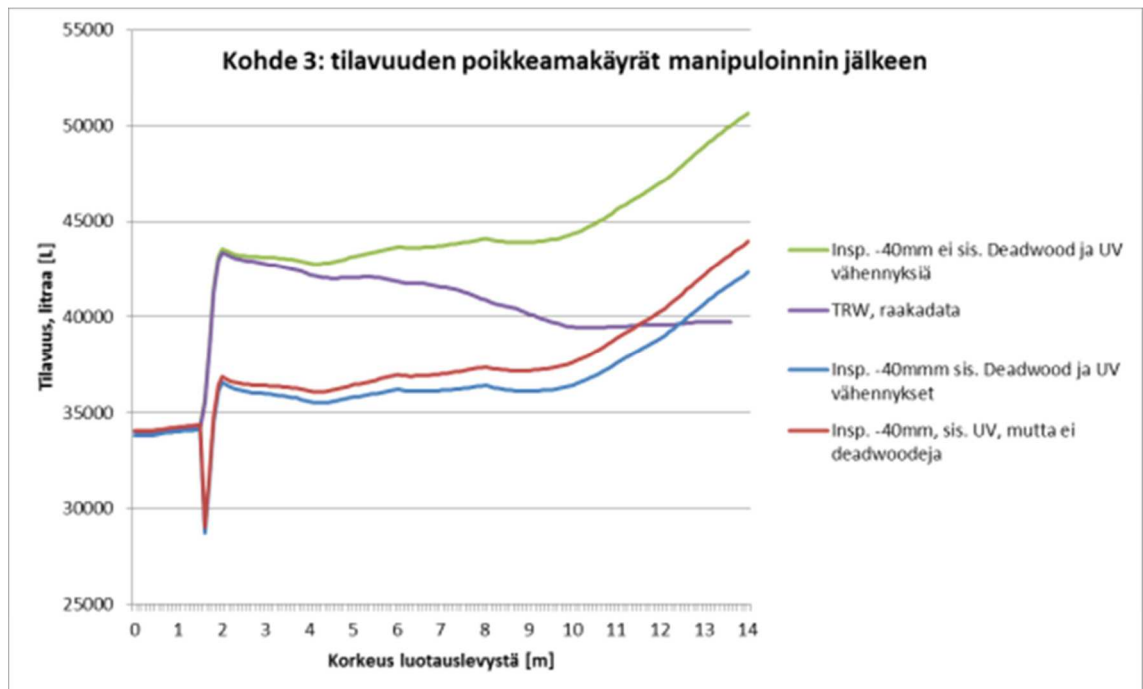
Mikäli tarkastelemme uivan katon alapuolista tilavuutta, kuten tilannetta on havainnoitu kuvassa 30, huomaamme, että takymetrillä mitattu tilavuus on deadwoodien vaikutuksesta huolimatta hieman korkeampi kuin laserkeilaamalla saatu tilavuus. Tämäkin uskotaan johtuvan virheellisestä korkeusasemoinnista. Tätä uskomusta todistaa kuvan 29 käyrien alkuosa, jossa kaikki käyrät kulkevat samaa linjaa myöten laskentatavasta riippumatta. Vasta uivan katon aiheuttaman käyrän heilahduksesta alkaen laskentatavasta riippuen erot alkavat kasvaa toisiinsa nähden huomattavalla tahdilla.

Raakadatan käytön TCS-taulukossa ei tuota sen ihmeellisempää lisäarvoa kuin aikaisempien tapausten raakadatan arvot. Erot ovat samansuuntaisia Inspectan ohjelman arvojen kanssa, ja se alkuaan noudattaa samaa linjaa Inspectan ohjelman tuottaman punaisen käyrän mukaista linjaa, jossa ei ole otettu huomioon deadwoodien ja uivan katon vaikutusta. Merkittävämpi muutos tapahtuu 5 metrin korkeudessa, jossa käyrä taittuu hieman alemmaksi painuen jopa sellaisen käyrän alle, johonka vaikuttavat deadwoodit sekä uivan katon massa. Päällisin puolin taulukolla laskettu tilavuus tuottaa korkeampaa tilavuutta kuin taulukon muut laskentamenetelmät. Syytä poikkeamakäyrän käyttäytymiseen ei tutkimuksen aikana katsottu tarpeelliseksi tutkia.

Kuten aiemmissa tapauksissa todettiin, deadwoodien vaikutukset tämän kokoisessa säiliössä ei ole merkittäviä. Sen sijaan uivan katon massalla on suurempi vaikutus säiliön tilavuuteen. Kuvasta 29 näemme selvän eron sellaisen käyrän, joka ei sisällä deadwoodien ja uivan katon massan vaikutusta (punainen), sekä poikkeamakäyrän, joka sisältää uivan katon massan vaikutuksen, mutta ei sisällä deadwoodien vaikutusta (vihreä), millaisella erolla ne kulkevat taulukossa. Pääosin punainen käyrä kulkee noin 10 000 litran tasoa korkeammalla kuin vihreäkäyrä. Tästä voimme päätellä, että uivan katon massa aiheuttaa tilavuudelle syrjäyttämistä, jolla on vaikutusta säiliön kokonaistilavuudelle. Uivan katon massa ikään kuin puristaa nestettä, jolloin neste ei pääse laajenemaan samalla tavoin kuin ilman katon vaikutusta. Kuvasta voidaan myös havainnoida kuinka vihreä käyrä kulkee samanlaista reittiä kuin violettikäyrä, jossa on otettu huomioon sekä uivan katon massa sekä deadwoodien vaikutus. Tämän todetaan johtuvan siitä, että molempiin käyriin kohdistuu uivan katon massa ja kuten aiemmin todettiin, deadwoodien merkitys säiliön tilavuudessa ei ole kovin merkityksellinen. Säiliön kokonaistilavuuksien erotukseksi 14 metrin korkeudella kuvan mukaan muodostuisi takymetrille (sis. deadwoodit ja UV:n) 16 114 233 litraa laserkeilaimen lukeman ollessa 16 006 525 litraa, jolloin mittalaitteiden erotukseksi muodostuu 107 708 litraa eli noin 107,8 m³.

Tämänkin säiliön osalta takymetrin aineisto on valitettavasti virheellinen viallisen etäisyysmittarin vuoksi. Näin ollen edellä esitettyihin kuviin tulee suhtautua varauksella, sillä tämän kokoluokan säiliössä muutaman millimetrin poikkeama säteessä aiheuttaa useamman tuhannen litran kasvun tilavuudessa. Pohjan tilavuutta käsiteltäessä todettiin, että virheellinen tilavuus mahdollisesti johtuisi väärästä korkeusasemoinnista, voi osaltaan pitää paikkaansa. Jos tarkastelemme tilannetta manipuloituilla arvoilla, saamme tehdyksi kuvan 31 mukaisen tilanteen. Kuvasta huomaamme pohjan tilavuus-

den pysyvän ennallaan, mutta muutoin tilavuuserot pienenevät reilulla 60 000 litralla, mikä prosentuaalisesti tarkoittaa noin 60 %:a. Kyseisessä manipuloinnissa ei muutettu pohjan tilavuuden tietoja. Mikäli pohjan tietoja olisi myös manipuloitu siten, että vähennettäisiin pohjan tilavuuksien eron takymetrillä mitattuun arvoon, jolloin pohjan arvoksi tulisi sama kuin laserkeilauksella saatu tulos on, takymetrillä mitatun säiliön kokonaistilavuuden tulos 14 metrin korkeudessa vähenisi 16 048 874 litrasta 16 014 858 litraan. Näin eroksi muodostuisi 34 016 litraa, joka vastaa lähestulkoon samaa suuruusluokkaa kuin manipuloimattoman pohjan tilavuuden erotusta. Tästä voidaankin päätellä, että jos takymetri olisi ollut kunnossa mittaushetkellä ja sen antamat tulokset olisivat manipuloinnin kaltaisia, voitaisiin todeta laserkeilaimen myös liitosongelmasta huolimatta näyttävän samankaltaisia tuloksia ja näin pitävän paikkansa.



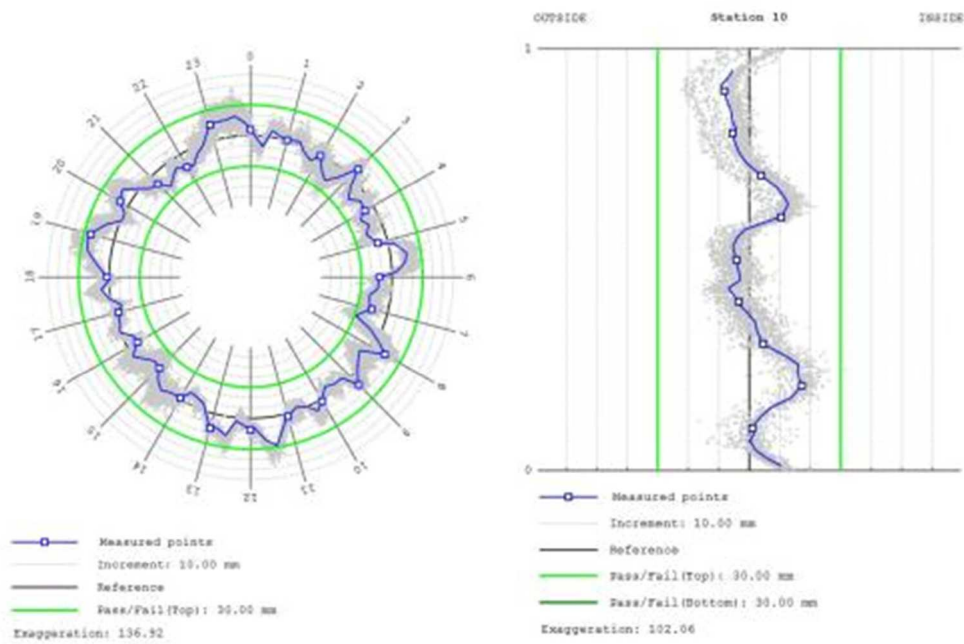
Kuva 31. Manipuloiduilla arvoilla tuotettujen tilavuuksien eroja verrattuna laserkeilaimen aineistoon.

4.2 Muita havaittuja tuloksia

Tutkimuksesta saatiin aikaiseksi myös muita mielenkiintoisia tuloksia aikaiseksi. Laserkeilausaineistosta saatiin työstettyä ilman merkittävää lisätyötä säiliön muotoa havainnollistavia selvityksiä, jotka käsittelivät säiliön pyöreyttä ja vaipan korkeussuuntaista muotoa.

Tutkimuksessa havaittiin laserkeilausaineistosta tuotettavan muodon esimerkiksi pyöreiden olevan huomattavasti havainnollistavampi kuin takymetrillä tuotetusta aineistosta saatava pyöreys. Pyöreiden havainnollistamiseen vaikuttaa hyvin paljon mitattujen pisteiden määrä, joka takymetrillä mitattaessa jää hyvin alhaiseksi. Takymetrimittausten perusteella tehtävä pyöreiden havainnollistaminen toteutetaan kehiä laskiessa, josta tietona saadaan mm. kehän muodon virhepoikkeama. Yksistään tällainen virhepoikkeaman ilmaisu ilmaisee vain mitattujen pisteiden keskinäisen eroavuuden toisiinsa nähden, joista minimi- ja maksimivirheiden perusteella voidaan päätellä, millainen vaipan muoto kyseisellä kehän alueella mahdollisesti on. Virhepoikkeamaan vaikuttaa huomattavan paljon pisteiden keskinäinen korkeusero, joka vääristää kehän pyöreyttä ja näin aiheuttaa epäluotettavan muodon vaipasta. Tällaista menetelmää käytetään hyvin harvoin ilmaisemaan vaipan muotoa.

Sen sijaan laserkeilaimen pistepilvestä muodostama pyöreys tuotetaan Trimble Real-Worksissä siihen erikseen suunnitellulla työkalulla, josta saadaan sekä vaaka- että pystysuuntaiset poikkeamat samalla kerralla. Pistepilvestä tuotettu selvitys on huomattavasti havainnollistavampi kuin takymetrillä aikaansaatu ilmaisu. Kuvassa 32 havainnollistetaan kyseistä tilannetta. Kuvan vasemmalla puolella on tuotettu kohteen 2 säiliöstä vaipan pyöreiden muotopoikkeama, joka asettuu yhden kymmenesosa korkeudelle säiliön korkeudesta. Kuvan oikealla puolella on taas havainnollistettu vaipan muotoa pystysuunnassa, jossa vihreät pystysuuntaiset viivat kuvaavat toleranssirajoja. Molemmissa muodoissa toleranssirajoiksi asetettiin 30 millimetriä.



Kuva 32. Laserkeilaimen pistepilvestä tuotetut muodot kohteen 2 säiliöstä. Vasemmalla on havainnollistettu vaipan pyöreyttä ja oikealla pysty akselin suhteen tuotettu muoto.

Kuvan kaltaiisiin viivaesityksiin vaikuttavat paljon pistepilven tiheys ts. se, ettei pistepilvessä ole paljoa aukko kohtia. Aukot aiheuttavat muototarkastelussa kuvan 32 molemmissa kuvissa esiintyvään siniseen viivaan joko terävän huipun, katkonaisen viivan, koko viivan puuttumisen tai näiden yhdistelmän riippuen pistepilven aukon koosta. Tämä havaittiin kohteen 3 säiliössä, jossa säiliö mitattiin vain kahdesta asemapistestä. Säiliön tukirakenteet aiheuttivat muototarkastelussa kaikkia edellä mainittuja tapauksia. Kohteen 3 tapauksessa muototarkastelussa voitiin hieman tulkintarajoja muuttamalla edesauttaa, ettei tulkintakohta osunut juuri aukon kohdalle. Uiva katto tai sen kohdalla vaipalla ollut aukko aiheutti pystysuuntaiseen tarkasteluun terävän piikin, joka johtui mm. siitä, että vaipassa sijaitseva uivankaton paksuinen havainto kohdistuikin uivankaton rakenteisiin, josta piikki aiheutui. Kaikissa tapauksissa miesluukut vaipalla aiheuttivat pystysuuntaiseen tarkasteluun kaikkia edellä mainittuja virheitä.

4.3 Mittausepävarmuudet

Mittaustulosten luotettavuuteen vaikuttaa merkittävästi mittausepävarmuus, joka on mittaustulokseen liittyvä parametri. Mittausepävarmuus kuvaa mittaussuurelle saatujen arvojen oletettua vaihtelua. Mikäli mittaustulokseen liittyvää mittausepävarmuutta ei tunneta, ei mittaustuloksesta voi tehdä minkäänlaisia johtopäätöksiä eikä mittaustulos

näin ollen ole luotettava. Mittausepävarmuuslaskelmat voidaan suorittaa joko tyypin A tai tyypin B epävarmuuslaskennoilla. Tyypin A mukaisella epävarmuusmäärittelyllä epävarmuus määritellään tilastollisin menetelmin, jossa epävarmuus muodostuu toistettavien mittaustulosten keskiarvon keskihajonnasta. Tyypin B epävarmuus määritellään laskemalla yhteen eri epävarmuuskomponentteja, joita saadaan esimerkiksi valistuneesta arvioista virhelähteestä, laitteen spesifikaatiosta, laitteen kalibrointitodistuksesta. Tyypin B mittausepävarmuuslaskennoille on tyypillistä, että epävarmuus ei piene mittauksia toistamalla.

Epävarmuuskomponenttien tyypillisimpiä epävarmuuslähteitä ovat mittalaitteesta johtuva epävarmuus, käyttöedellytykset ja ympäristötekijät, käyttäjästä aiheutuva epävarmuus, mittauskohteesta aiheutuva epävarmuus, näytteenotto (esim. näytteenoton heterogeenisyys) sekä mittaus- ja laskuvirheet. Epävarmuutta laskiessa on jokaisesta epävarmuuskomponentista tunnettava jakaumat, joissa normaalijakaumassa tulokset ovat jakautuneet siten, että jakauman keskikohta X on todennäköisin. Mittaustuloksen todennäköisyys pienenee sitä mukaa mitä kauemmaksi keskikohdasta siirrytään, jolloin kattavuuskertoimen $k = 1$ (1σ) vastaa 68 %:n todennäköisyyttä ja $k = 2$ (2σ) 95 %:n todennäköisyyttä. Mikäli epävarmuuskomponentin jakaumaa ei tunneta, se yleisimmin arvioidaan normaalijakautuneeksi lähtösuureesta riippumatta. [28]

Takymetrimittauksen mittausepävarmuus

Takymetrilla suoritettujen tilavuusmäärittelyjen tulostaulukon arvojen mittaus- ja laskentatarkkuudeksi on arvioitu $\pm 0,05$ %:n suuruisiksi. Tarkkuus täyttyy ainoastaan silloin, kun seuraavat ehdot ovat voimassa silloin 1) tarkastellaan suhteellisia tilavuuksia luotauslevyn yläpuolisella osuudella, 2) oletetaan, että pohjan tilavuus ei muutu sen yläpuolella olevan nestepatsaan vaikutuksesta missään vaiheessa. Tarkkuus tarkoittaa tässä samaa kuin mittausepävarmuus. Inspectan ohjelman antama mittausepävarmuus on saatu laskemalla eri epävarmuuskomponentteja yhteen standardissa ISO7507 määritettyjen yhtälöiden mukaisesti.

Tarkastellessa saatuja tuloksia mittausepävarmuudet huomioon ottaen saadaan kohteen 1 kokonaistilavuuden vaihteluväliksi manipuloimattomassa tapauksessa vaihteluvälin 57 495,81–57 553,33 litran, kun taas manipuloidussa vaihteluvälin 55 380,29–55 435,69 litraa. Kohteen 2 tapauksessa vaihteluväli olisi 16 131 224,83–16 147 364,13 litran vaihteluvälillä sekä kohteen 3 tapauksessa vaihteluvälit olisivat

manipuloimattomassa 16 106 175,88–16 122 290,12 litraa ja manipuloidussa 16 040 849,56–16 056 898,44 litraa.

Laserkeilaimen mittausepävarmuus

Kuten aiemmin luvussa 2.6 *Aiheesta tutkittua* kerrottiin, Trimble lupaa säiliön kalibrointisovellukselle alle 0,5 %:n mittausepävarmuuden, mikäli laserkeilaukset on suoritettu Trimble TX8 -laserkeilaimella. Trimblen ilmoittamassa epävarmuudessa on pieni tulkinnan vara. Tarkoitetaanko 0,5 %:n mittausepävarmuudella samaa kuin $\pm 0,25$ % vai $\pm 0,5$ %. Lisäksi ei ole tietoa siitä, millä kattavuuskertoimella mittausepävarmuus on ilmoitettu.

Tutkimuksen yhteydessä määriteltiin kohteille 1 ja 2 mittausepävarmuudet laskemalla epävarmuuskomponentteja yhteen. Laskennassa otettiin huomioon seuraavat epävarmuuskomponentit:

- Teoreettisen ja mitattujen säteiden keskiarvon pituusero
- Laserkeilaimen resoluutio
- Laserkeilaimen kalibroinnin mittausepävarmuus
- Mittauskohina
- Lasersäteen halkaisija sekä
- 3D-pisteen tarkkuus

Laskennasta saatiin kohteen 1 mittausepävarmuusarvioksi $\pm 0,50$ %, kun mitattua sädettä ja sen epävarmuutta verrattiin teoreettisen säteen kanssa. Vastaavasti kohteen 2 mittausepävarmuusarvioksi saatiin säteen suhteen arvioinnissa $\pm 0,40$ % ja pinta-alavertailussa noin $\pm 0,30$ %. Jokainen mittausepävarmuus on ilmoitettu kattavuuskertoimella $k = 2$. Mikäli mittausepävarmuudet olisi laskettu standardin ISO7507-4 mukaisesti, kohteelle 2 olisi saatu kattavuuskertoimella $k = 2$ epävarmuudeksi $\pm 0,40$ %.

5 **Johtopäätökset** (tämän luvun tiedot vain työn tilaajan käyttöön)

Lähteet

- 1 Mittauslaitelaki 707/2011. <<http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2011/20110707>> Luettu 19.10.2015.
- 2 Valtioneuvoston asetus mittauslaitteista 471/2014. <<http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2014/20140471>> Luettu 19.10.2015.
- 3 Inspecta Oy:n kotisivu. 2015. Verkkodokumentti. Inspecta Oy. <www.inspecta.com/fi> Luettu 19.10.2015.
- 4 Petroleum and liquid petroleum products – Calibration of vertical cylindrical tanks -Part 1: Strapping method, ISO 7507-1. 1993. Inspectan verkkomateriaali. International Standard. Tulostettu 19.10.2015.
- 5 Petroleum and liquid petroleum products – Calibration of vertical cylindrical tanks - Part 2: Optical-reference-line method, ISO 7507-2. 2005. Inspectan verkkomateriaali. International Standard. Tulostettu 19.10.2015.
- 6 Petroleum and liquid petroleum products – Calibration of vertical cylindrical tanks - Part 3: Optical-triangulation method, ISO 7507-3. 1993. Inspectan verkkomateriaali. International Standard. Tulostettu 19.10.2015.
- 7 Petroleum and liquid petroleum products – Calibration of vertical cylindrical tanks - Part 4: Internal electro-optical distance-ranking method, ISO 7507-4. 2010. Inspectan verkkomateriaali. International Standard. Tulostettu 19.10.2015.
- 8 Petroleum and liquid petroleum products – Calibration of vertical cylindrical tanks - Part 5: External electro-optical distance-ranking method, ISO 7507-5. 2000. Inspectan verkkomateriaali. International Standard. Tulostettu 19.10.2015.
- 9 Laurila Pasi. 2012. Mittaus- ja kartoitustekniikan perusteet. Verkkodokumentti. Rovaniemen amk. <<http://www.ramk.fi/loader.aspx?id=7fe99c68-3849-4fa8-a563-9327cf51ea79>> Luettu 24.11.2015.
- 10 Hakola Joni. 2015. CLT-koetalon taipumien mittaus laserkeilaimella. Opinnäyntyö. Lapin amk. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/92765/Joni_Hakola.pdf?sequence=1> Luettu 24.11.15.
- 11 Kukko Antero. 2005. Laserkeilaimen valinta lähifotogrammetrisiin mittauksiin. Fotogrammetrian erikoistyö. Otaniemen teknillinen korkeakoulu. <http://foto.hut.fi/opetus/290/julkaisut/Antero_Kukko/Laserkeilaimen_valinta_lahifotogrammetrisiin_mittauksiin.pdf> Luettu 24.11.2015.

- 12 Knyva V., Knyva M., Rainys J. 2013. New Approach to Calibration of Vertical Fuel Tanks. ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA vol. 19 no.8. Verkkodokumentti. Kaunas University of Technology.
<<http://www.eejournal.ktu.lt/index.php/elt/article/view/2816/1998>> Luettu 30.12.2015
- 13 Wang Jintao, Liu Ziyong, Zhang Long, Guo Ligong, Bao Xuesong, Tong Lin. 2010. Research on 3D laser scanning method for tank volume metrology and its comparison experiment analysis. Verkkodokumentti. Chinese Journal of Scientific Instrument, National Institute of Metrology, Beijing, China.
<http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-YQXB201002032.htm> Luettu 8.1.2016.
- 14 Trimble Tank Calibration Solution. 2011. Verkkodokumentti. Trimble.
<http://www.easyfairs.com/uploads/tx_ef/Trimble-Tank-Solutions-Brochure-272aa6.pdf> Luettu 8.1.2016.
- 15 Lemmon Tim. 2011. Business opportunities with 3D laser scanning for storage tank applications. Verkkodokumentti. Trimble.
<[http://www.sparpointgroup.com/images/uploadedFiles/News/PDF/SPAR_Trimble_2011\(1\).pdf](http://www.sparpointgroup.com/images/uploadedFiles/News/PDF/SPAR_Trimble_2011(1).pdf)> Luettu 15.10.2014.
- 16 Dinu Florea. 2014. Tanks and pipelines. Verkkodokumentti. European Erasmus Mundus Master Course. <http://www.ct.upt.ro/suscos/files/2013-2015/2C08/L19_Tanks%20and%20pipelines.pdf>. Luettu 19.10.2015.
- 17 Vaarallisten kemikaalien varastointi. 2015. Verkkodokumentti. Tukes.
<http://www.tukes.fi/Tiedostot/kemikaalit_kaasu/Vaarallisten_kemikaalien_varastointi.pdf> Luettu 19.10.2015.
- 18 Kuan Siew Yeng. 2009. Desing, Construction and Operation of the Floating Roof Tank. Verkkodokumentti. University of Southern Queensland.
<<http://www.wermac.org/pdf/tanks4.pdf>> Luettu 19.10.2015.
- 19 Leica TDRA6000-esite. 2013. Verkkodokumentti. Leica Geosystems.
<http://www.leica-geosystems.fi/downloads123/m1/metrology/Laser%20Stations/brochures/Leica%20TDRA6000%20brochure_en.pdf> Luettu 8.1.2016.
- 20 TDRA6000 User Manual. 2014. Inspectan verkkomateriaali. Leica Geosystems. Luettu 8.1.2016.
- 21 Leica TCRA 1201 käyttöopas. 2004. Inspectan verkkomateriaali. Leica Geosystems. Luettu 8.1.2016.
- 22 Trimble Introduces High-Speed Time-of-Flight 3D Laser Scanning Solution. 2013. Verkko uutinen. Trimble.
<<https://www.trimble.com/news/release.aspx?id=100813h>> Luettu 8.1.2016.

- 23 Trimble TX8-laserkeilain tekniset tiedot. 2015. Verkkodokumentti. Trimble.
<http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-691052/022516-014C-FIN_Trimble_TX8_DS_A4_0415_LR.pdf> Luettu 8.1.2016.
- 24 Savolainen Matti. 2014. Laserseurainjärjestelmän kalibrointimenetelmät ja tarkkuuden tarkastelut kenttäolosuhteissa. Opinnäytetyö. Metropolia amk.
<https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/81750/Laserseurainjarjestelman_kalibrointimenetelmat.pdf?sequence=1> Luettu 8.1.2016.
- 25 Trimble RealWorks 9.0 Release Notes. 2014. Verkkodokumentti. Trimble.
<http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-717717/Trimble_RealWorks_9.0_RELEASE-NOTES_ENG_20141118.pdf> Luettu 8.1.2016.
- 26 Method of Measurement and Calibration of Upright Cylinder Tanks, API Standard 2550. 1965. Verkkodokumentti. American Petroleum Institute.
<<http://www.scribd.com/doc/62246947/API-2550-Meas-and-Calib-R1992#scribd>> Luettu 24.2.2016.
- 27 Manual of Petroleum Standards. 2016. Verkkodokumentti. American Petroleum Institute.
<http://www.api.org/~media/Files/Publications/Catalog/05_Measurement.pdf> Luettu 24.2.2016.
- 28 Hiltunen E., Linko L., Hemminki S., Hägg M., Järvenpää E., Saarinen P., Simonen S., Kärhä P. 2011. Laadukkaan mittaamisen perusteet. Metrologian neuvottelukunta ja Mittatekniikan keskus. ISBN978-952-5610-75-8.
- 29 Leica TDRA 6000 kalibrointitodistus M-15L113. 2015. Inspectan verkkomateriaali, Mittatekniikan keskus. Tulostettu 29.3.2016.
- 30 Leica TCRA 1201 kalibrointitodistus M-15L168. 2015. Inspectan verkkomateriaali. Mittatekniikan keskus. Tulostettu 29.3.2016.
- 31 Asikainen Juha-Matti-Nyqvist Mauri -sähköpostikeskustelu. 24.6.2016. Tulostettu 29.6.2016.

TCS-excelin tulokset Capacity table kohteesta 1 neljään metriin asti.

Height [m]	Capacity [L]
0	3017,580
0,1	3714,509
0,2	4414,887
0,3	5116,000
0,4	5818,037
0,5	6520,262
0,6	7222,423
0,7	7924,256
0,8	8625,684
0,9	9326,477
1	10028,450
1,1	10732,703
1,2	11437,829
1,3	12142,452
1,4	12842,326
1,5	13538,691
1,6	14236,807
1,7	14937,427
1,8	15639,162
1,9	16341,420
2	17044,473
2,1	17748,767
2,2	18453,620
2,3	19157,175
2,4	19860,059
2,5	20563,673
2,6	21267,843
2,7	21972,100
2,8	22676,513
2,9	23381,484
3	24087,316
3,1	24793,471
3,2	25499,890
3,3	26206,889
3,4	26913,547
3,5	27619,664
3,6	28326,394
3,7	29034,247
3,8	29742,567
3,9	30451,111
4	31160,037

Inspectan mittatarkastusraportin taulukko kohteesta 1 neljään metriin asti.

Korkeus (mm)	Tilavuus (l)	Keskim. V (l / mm)
0	3453	7,31
100	4184	7,31
200	4914	7,31
300	5650	7,35
400	6385	7,35
500	7120	7,35
600	7855	7,35
700	8590	7,35
800	9331	7,41
900	10072	7,41
1000	10816	7,44
1100	11566	7,49
1200	12315	7,49
1300	13064	7,49
1400	13813	7,49
1500	14559	7,46
1600	15301	7,41
1700	16042	7,41
1800	16783	7,41
1900	17524	7,41
2000	18266	7,41
2100	19007	7,41
2200	19748	7,41
2300	20490	7,41
2400	21231	7,41
2500	21972	7,41
2600	22705	7,32
2700	23437	7,32
2800	24170	7,32
2900	24902	7,32
3000	25635	7,32
3100	26367	7,32
3200	27099	7,32
3300	27832	7,32
3400	28564	7,32
3500	29297	7,32
3600	30026	7,30
3700	30756	7,30
3800	31486	7,30
3900	32215	7,30
4000	32945	7,30