



# **VIISTOVALOKUVAUSLAITTEIS- TON SUUNNITTELU JA 3D- MALLINNUS**

Petri Nurminen

Opinnäytetyö  
Lokakuu 2014  
Kone- ja tuotantotekniikka  
Tuotekehitys

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU  
Tampere University of Applied Sciences

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Kone- ja tuotantotekniikka  
Tuotekehitys

Petri Nurminen:

Viistovalokuvauslaitteiston suunnittelu, 3D-mallinnus sekä testaus

Opinnäytetyö 32 sivua, joista liitteitä 4 sivua  
Lokakuu 2014

---

Työn tavoitteena oli suunnitella ja 3D-mallintaa viistovalokuvauslaitteisto, tilata siihen tarvittavat osat sekä aikataulujen salliessa myös testata valmista kokoonpantua laitteistoa. Tämän opinnäytetyön valmistumisen kannalta kokoonpano ja testaus ei ollut pakollista. Työ tehtiin yhteistyössä TAMK:n, TTY:n sekä Metso Oyj:n (ent. Metso Automation) kanssa. Työn tilaaja oli TAMK. TTY antoi asiantuntija-apua teknisissä sekä teoreettisissa asioissa, kun taas Metso osallistui komponenttikustannuksiin ja niiden tilaukseen. Projekti toteutettiin, jotta TAMK:lla olisi mahdollisuus tehdä erilaisia viistovalokuvaustutkimuksia omassa paperilaboratoriossaan sekä tarjota tutkimusapua esimerkiksi Metso Oyj:lle.

Projektin aikana järjestettiin useita tapaamisia, joissa suunnitteluprosessia ohjattiin haluttuun suuntaan ja tehtiin muutoksia ja lisäyksiä laitteen ominaisuuksiin, kuten fyysisten mittojen muuttamiseen ja käytön helppouden parantamiseen. Suunnitteluprosessi jatkui aina tapaamisten pohjalta käytyjen keskusteluiden mukaan.

Laitetta alettiin suunnitella jo olemassa olevan, TTY:n tutkimuskäytössä olevan laitteen pohjalta. Vaatimuksena oli, että laite näyttäisi esittelykelpoiselta ja olisi samalla helpokäyttöinen. Tämä tarkoitti sitä, että laite suunniteltiin niin, että se olisi tarpeen tullen helposti muokattavissa eri analysointitilanteita varten.

Suurin osa laitteen osista tilattiin Metson toimesta ja yksittäisiä komponentteja saatiin lainaksi TTY:lta. Laitteeseen myös suunniteltiin ja 3D-tulostettiin eräänlaiset led-telineet, joita yhteensä valmistettiin 12 kappaletta. Kasatulla laitteella saatiin otettua useita onnistuneita testikuvia.

## ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Mechanical Production and Engineering  
Option of Research & Development

Petri Nurminen:  
Designing and 3D-modelling of a photometric stereo equipment

Bachelor's thesis 32 pages, appendices 4 pages  
October 2014

---

Subject for this thesis was to design and 3D-model a photometric stereo equipment, then order the necessary parts and finally test the assembled equipment if possible. The assembly and testing weren't necessary for a successful thesis. The project was done in collaboration with TAMK, Metso Oyj (formerly known as Metso Automation) and TTY. The project was made for TAMK while TTY provided their expertise from the field of photometric stereo and Metso on the other hand contributed a great deal in the budget. The project was carried out so that TAMK would have the necessary capabilities to conduct different photometric stereo analyzes and provide analysis services for Metso for example.

During the project several meetings were held. In the meetings the project was managed and steered into the right direction when necessary. Changes were also made to the design of the equipment when and if necessary. For example the dimensions of the equipment had to be altered and some minor tweaks were made to make the equipment more easy to use. The planning process continued on the base of the decisions made in the meetings.

TTY had an existing photometric stereo equipment, and the new equipment were designed on the basis of that. One demand for the new equipment was that it needed to be presentable and easy to use. Thus it was designed so that it was easy to mod for different kind of testing.

Most of the parts were ordered by Metso, but few electric components were borrowed from TTY. Also a total of 12 different led holders were 3D printed with a 3D printer. The equipment was assembled and tested. Several successful pictures were taken with the equipment.

---

Key words: 3D-printing, 3D-modelling, photometric stereo

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
1.1	Viistovalokuvauksen pääperiaatteet.....	7
2	VIISTOVALOKUVAUKSESTA .....	8
2.1	Viistovalokuvauksen teoria.....	9
3	LAITTEEN SUUNNITTELU .....	14
3.1	Tekniset vaatimukset .....	14
3.2	Led-telineiden asemointi.....	16
3.3	Led-telineen suunnittelu ja 3D-tulostus .....	18
4	KOMPONENTTIEN VALINTA JA TILAUS .....	20
4.1	Rungon ja kasetin komponentit .....	20
4.2	Elektroniikkakomponentit .....	22
4.3	3D-mallinnus, 3D-tulostus ja työpiirustukset .....	23
5	TULOKSET .....	24
6	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	26
	LÄHTEET .....	28
	LIITTEET .....	29
	LIITE 1. Kasetin kokoonpanopiirustus .....	29
	LIITE 2. Led-telineiden korkeudet.....	29
	LIITE 3. Rungon kokoonpanopiirustus.....	30
	LIITE 4. Alumiinilevyjen asentaminen .....	30
	LIITE 5. Led-teline.....	31
	LIITE 5. Rungon osaluettelo .....	31
	LIITE 6. Kasetin osaluettelo.....	32

**LYHENTEET JA TERMIT**

Autodesk Inventor	3D-mallinnusohjelma
TAMK	Tampereen ammattikorkeakoulu
TTY	Tampereen teknillinen yliopisto
HAMK	Hämeen ammattikorkeakoulu
Scetch	Luonnostelutila Autodesk Inventorissa

## 1 JOHDANTO

Tämän projektin tavoitteena oli suunnitella ja luoda viistovalokuvauslaitteisto TAMK:lle yhteistyössä TTY:n sekä Metso Oyj:n (ent. Metso Automation) kanssa. Yhteistyö tapahtui käytännössä niin, että TTY antoi suurimmaksi osaksi asiantuntija-apua laitteen teknisissä asioissa sekä teoriapohjaisissa kysymyksissä, ja Metso puolestaan osallistui suurelta osin budjettiin ja tilasi suurimman osan tarvittavista komponenteista.

Projektin alussa järjestettiin tapaamiset TAMK:n ja TTY:n henkilökunnan kesken. Tapaamisissa käytiin läpi pääpiirteittäin viistovalokuvauksen periaatteet ja esiteltiin eräs TTY:lle tutkimuskäyttöön rakennettu viistovalokuvauslaitteisto. Tämän TTY:lla sijaitsevan laitteen pohjalta alettiin suunnitella TAMK:lle omaa laitetta, sillä laite oli kompaktin kokoinen ja sen uudelleensuunnittelun katsottiin olevan aikatauluihin nähden helposti toteutettavissa. Tapaamisen jälkeen voitiin pureutua viistovalokuvauksen teoriaan TTY:n antaessa hyvää teoriamateriaalia pdf-tiedostojen muodossa.

Projektin edetessä järjestettiin tapaaminen myös TAMK:n, TTY:n sekä Metso Oyj:n henkilökunnan kesken. Mukana tässä tapaamisessa oli myös opettaja HAMK:sta. Tapaamisissa työn tavoitteet tarkentuivat ja moniin eri suunnitteluteknisiin asioihin tuli hyviä ratkaisuehdotuksia. Tapaamisissa selvisi myös, mitkä seikat laitteen suunnittelussa olivat kaikkein oleellisimpia onnistuneen suunnitteluprosessin kannalta. Viimeksi mainitussa tapaamisessa saatiin myös linjattua lopullinen ulkomuoto laitteelle sekä päätettiin pääpiirteittäin laitteeseen liittyvät tekniset ratkaisut. Nämä ratkaisut esitellään tekstin kolmannessa ja neljännessä luvussa.

Viimeinen tapaaminen ennen osien tilaamista järjestettiin yhteistyökumppaneiden kesken HAMK:n tiloissa Valkeakoskella. Tässä tapaamisessa laitteen teknisiin ja fyysisiin ominaisuuksiin tehtiin viimeiset hienosäädöt ennen osien tilausta. Muun muassa rungon kokoa kasvatettiin ja kameran kiinnitystapaa pohdittiin tarkemmin. Keskustelussa nousi esiin kysymys, joka liittyi kameran tarkennuskentän vaatimaan tilaan laitteen sisällä. Tämä tarkoitti käytännössä sitä, kuinka kaukana ja toisaalta kuinka lähellä kuvattavaa kohdetta kameran tuli olla eri kuvakokoja ottaessa. Asia selvitettiin ja tarvittavat muutokset tehtiin laitteeseen.

Kun viimeisetkin muutokset oli tehty suunnitelmiin, osat laitettiin tilaukseen ja siirryttiin laitteen kokoonpano-ohjeiden laatimiseen.

## 1.1 Viistovalokuvauksen pääperiaatteet

Tutkija Marja Mettäsén (2014) mukaan viistovalokuvailaitteisto on yksinkertaisuudessaan ulkopuoliselta valolta suljettu laite, joka on esimerkiksi neliskulmaisen laatikon mallinen, kuten TTY:lla sijaitseva laite (Kuva 1). Laitteella voidaan analysoida esimerkiksi kartongin pintaan painetun pistekuvioinnin onnistumista ja vertailla painettujen pisteiden syvyyksiä sekä havaita kohtia, joissa painatuksia ei ole tullut (Hansson & Johansson, 2000, 2559).

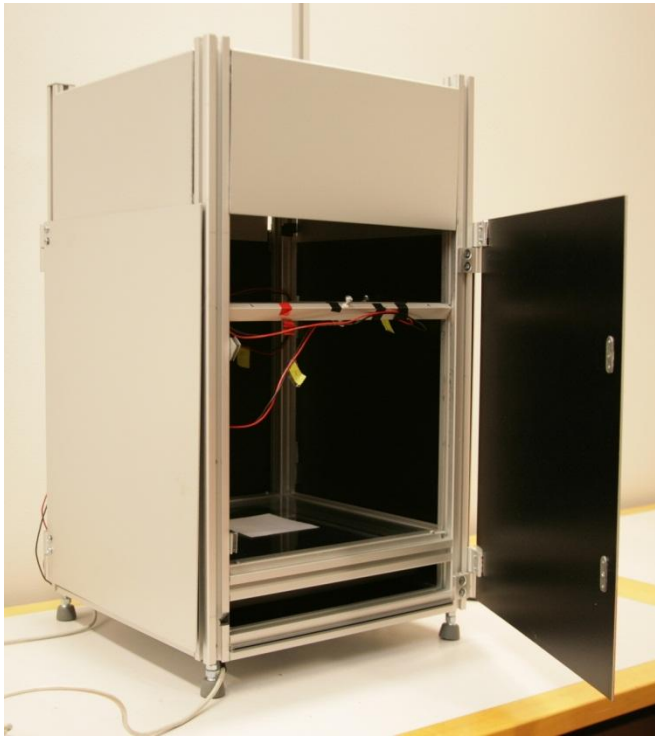
Laite toimii siten, että laatikon sisään asennetut valonlähteet, kuten led-valaisimet, valaisevat analysoitavan materiaalin pinnan ennalta määritetystä kulmasta ja tämän jälkeen laatikon sisään asennettu kamera ottaa kuvan valaistusta näytekappaleesta. Kuvat siirretään tämän jälkeen tietojenkäsittelyohjelmaan analysointia varten. Tässä projektissa käytettiin Matlab-ohjelmistoa. Teoriaosuudessa kerrotaan tarkemmin pinnankuvauksen muodostamisesta.

Viistovalokuvauksella pystytään analysoimaan valmistettavan tuotteen pinnan ominaisuuksia jo tuotantovaiheessa, jolloin viallisten tuotteiden määrää pystytään karsimaan ja mahdollisesti päättelemään, missä tuotannon vaiheessa tuotteeseen on tullut vikaa (Multi Pix Imaging, 2014) Erilaisten konenäköjen kehittyessä analysointiprosessista tulee nopeampaa ja vaivattomampaa verrattuna tavanomaiseen analyysiin, jossa mittausperiaatteena on mekaaninen kosketus analysoitavaan pintaan (Kuparinen, 2008, 13) tai hidas pisteen skannausmenetelmä (Hansson ja Johansson, 2000, 2555).

## 2 VIISTOVALOKUVAUKSESTA

Tähän opinnäytetyöhön kirjallisuutta kartoitettaessa löytyi runsaasti teoreettista tietoa viistovalokuvauksesta, jota pyrin soveltuvilta osin hyödyntämään opinnäytetyössäni. Lisäksi hyödynsin viistovalokuvaukseen erikoistuneiden yritysten Internet-sivuja, joissa yritykset tarjosivat selkeitä ja yksinkertaisia esityksiä muun muassa viistovalokuvauksen periaatteista ja sen käyttökohteista.

TTY antoi apua käytännönläheisissä asioissa, sillä heillä oli olemassa oleva viistovalokuvauslaitteisto, johon pääsi tutustumaan. TTY:n henkilökunta esitteli laitetta, jolloin teorian tueksi saatiin tietoa siitä, kuinka laite käytännössä toimii. Kuvassa 1 on esitetty TTY:n tiloissa sijaitseva, tutkimuskäyttöön rakennettu laitteisto.



Kuva 1. Viistovalokuvauslaitteisto TTY:lla

Vaikka tämä opinnäytetyö keskittyy pääasiassa laitteen suunnitteluun, tekstissä tuodaan esille hieman teoriaa viistovalokuvauksesta sekä muutamia käyttökohteita teollisuudessa.

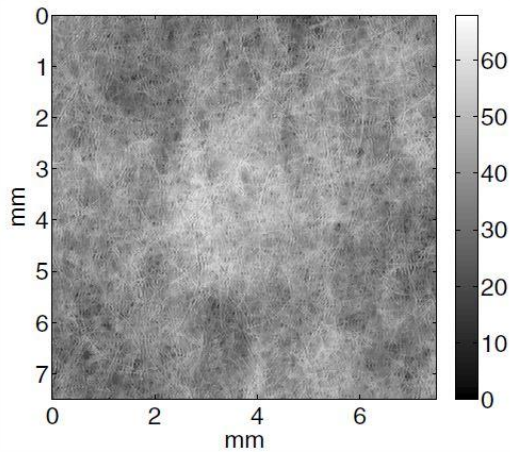


## 2.1 Viistovalokuvauksen teoria

Viistovalokuvauksessa (engl. photometric stereo) tarkasteltavan pinnan orientaatio voidaan analysoida kahden tai useamman kuvan avulla. Tarkasteltava kohde valaistaan määritellyistä kulmista pitäen kuvauskulma samana. (Woodham, 1980, 139–141.) Näin saadaan luotua 3D-kuvaus tasomaisesta pinnasta (Multiplix Imaging, 2014). Alun perin tavan määrittellä pinnan muotoja varjostuksesta keksi Berthold Horn 1970-luvulla. Tämä tapahtui kuitenkin vain yhden kuvan avulla. Myöhemmin 1980-luvulla Woodham kehitti tavan laskea tarkasteltavan pinnan gradientit ja heijastuvuuden käyttäen kolmea kuvaa yhden sijasta ja samalla hyödyntäen eri paikkoihin ja kulmiin sijoitettuja valonlähteitä. (Hansson & Johansson, 2000, 2555.) Myöhemmin pinnan mittausta on testattu useilla eri valonlähteillä (Kuparinen, 2008, 50).

Viistovalokuvaus tapahtuu seuraavanlaisesti: ensin eri valaisukulmista otetaan kuvat, jonka jälkeen kuvat lähetetään tietokoneohjelmistolle (Kuparinen, 2008, 48), kuten esimerkiksi Matlabille (tässä projektissa) analysoitavaksi. Tämän jälkeen pinnan gradientit arvioidaan kuvista, ja ne integroimalla saadaan pinnan muodon kuvaus eli pinnan topografia (Kuparinen, 2008, 13).

Saadusta pinnan topografiasta luodaan harmaasävykartta, jolla voidaan tarkastella pinnan korkeuden vaihteluita jokaisessa kuvan pisteessä (Kuparinen, 2008, 17). Kuvista voidaan myös suodattaa pieniä aallonpituuksia, kuten tässä projektissa; se auttaa havaitsemaan pienet pinnan eroavaisuudet (Mettänen, 2014). Kuvassa 2 on Kuparisen esitys kartongin harmaasävykartasta, jossa mitta-asteikko on millimetreinä. Pinnan tason eroavaisuudet voidaan havaita tummista ja vaaleista sävyistä.



(c) Cardboard 1

Kuva 2. Kartongin harmaasävykuva (Kuparinen 2008, 46)

Viistovalokuvauksessa kuvattavan pinnan oletetaan teoriassa omaavan Lambertin heijastusmallin, mikä tarkoittaa sitä, että pinta heijastaa valon tasaisesti jokaiseen suuntaan riippuen valon säteen ja pinnan normaalin välisestä kulmasta. Tässä tapauksessa kolme valonlähdettä riittää. Mikäli pinta ei ole Lambertin heijastusmallin mukainen heijastaen epäsäännöllisesti valoa, voidaan useampia valonlähteitä ja kuvia käyttää saavuttamaan onnistunut pinnan mallinnus. (Kuparinen, 2008, 50.)

Wu ym. (2006, 1830) sekä Kuparinen (2008, 50) mainitsevatkin, että todellisuudessa eri geometrioiden kuvaamisessa varjostukset ja heijastukset tuottavat ongelmia, sillä pinnasta saattaa löytyä satunnaisesti enemmän tai vähemmän heijastavia kohtia. Tällöin ne eivät täysin käyttäydy Lambertin heijastusmallin mukaisesti.

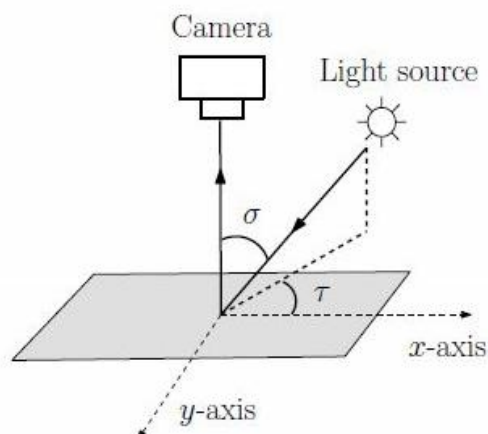
Analysoitava materiaali voi olla esimerkiksi kiiltopaperi, jolloin tutkitaan paperin kiiltoa (ISO 8254-1, 2009), ihmisen kasvot (Wu ym., 2006, 1842) tai jonkin purkin etiketti ja niissä esiintyvät pintavirheet (Multipix Imaging, 2014). Wu ym. (2006) testasivat myös onnistuneesti vaikeiden geometrysten muotojen mittausta, kuten teppannun ja monia varjoja luovan lelun.

Potentiaalisia käyttökohteita on teollisuudessa siis tasaisemmasta kiiltävästä pinnasta aina epätasaiseen ja geometrialta haastavampaan pintaan. Kuparinen (2008) käytti tutkimuksissaan muun muassa pinnoitettuja papereita sekä kartonkia pinnan karheuden tutkinnassaan. Ritala ja Raunio (2013) puolestaan tutkivat pehmopaperin kuituja paperin pinnassa.

Viistovalokuvauksessa voidaan käyttää eri valaisukulmia. Kuparinen (2008, 24) esittää väitöskirjassaan neljä eri kulmaa pinnan analysoinnissa:  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  sekä  $75^\circ$ . Kansainvälinen ISO -standardi ISO-8254-1 määrittää käytetyn kulman kiillon tarkastelun paperin ja laudan pinnassa  $75^\circ$  kulmassa käytettäessä TAPPI -menetelmää (8254-1, 2009). ISO-2813 standardi, joka käsittelee maaleja sekä lakkoja, ehdottaa analysointikulmiksi  $20^\circ$ ,  $60^\circ$  sekä  $80^\circ$  (8254-1, 2009). Tutkiessaan pehmopaperin vapaiden kuitujen esiintymistä paperin pinnasta, Raunio ja Ritala (2013, 2) käyttivät  $30^\circ$  valaisukulmaa.

Innoventia, joka on yksi maailman johtavista tutkimuskeskuksista Ruotsissa, luo innovaatioita kohteenaan metsäraaka-aineet. Keskus on kehittänyt viistovalokuvaukseen perustuvan OptiTopo-laitteiston, jolla voidaan nopeasti analysoida ja tutkia muun muassa painetun paperin pinnan profiilin syvyyksiä ja etsiä haitallisia painaumuksia paperin pinnasta (OptiTopo, 2014). OptiTopo-laitteistolla analysoitava kohde valaistetaan kahdella kiinteällä valonlähteellä  $75^\circ$  kulmasta. Kuvakoko maksimissaan tällä laitteistolla on  $30 \times 30$  mm (vrt. opinnäytetyön laitteistoon, jolla voidaan ottaa kuvia jopa A4-kokoisesta kappaleesta).

Kuparinen (2008) toteaa väitöskirjassaan, että kolme eri valonlähdettä riittävät pinnan muotojen selvittämiseksi, mutta haasteellisissa materiaaleissa, joissa esiintyy paljon varjostuksia ja heijastuksia, voidaan käyttää useampia valonlähteitä onnistuneen analysoinnin takaamiseksi. Alla olevassa kuvassa 3 on esitetty Kuparisen viistovalokuvaustapahtuma. Valonlähde voidaan asettaa haluttuun kohtaan  $\sigma$ -kulmaan ja  $\tau$ -kulmaan. Raunio ja Ritala (2013, 2) käyttivät  $\sigma$  arvoa  $30^\circ$  ja  $\tau$  arvoja "( $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ... $330^\circ$ )" pehmopaperitutkimuksissaan.



Kuva 3. Viistovalokuvaustapahtuma (Kuparinen 2008, 24)

Kuvassa 4 on Kuparisen havainnollistava esitys viistovalokuvaustilanteesta. Kappale valaistaan vuorotellen vasemmalta, oikealta, ylhäältä sekä alhaalta. Kamera ottaa kuvan jokaisesta valaisutilanteesta, jonka jälkeen niistä arvioidaan gradientit. Tämän jälkeen tulokset integroidaan ja saadaan kuvaus analysoitavasta pinnasta.

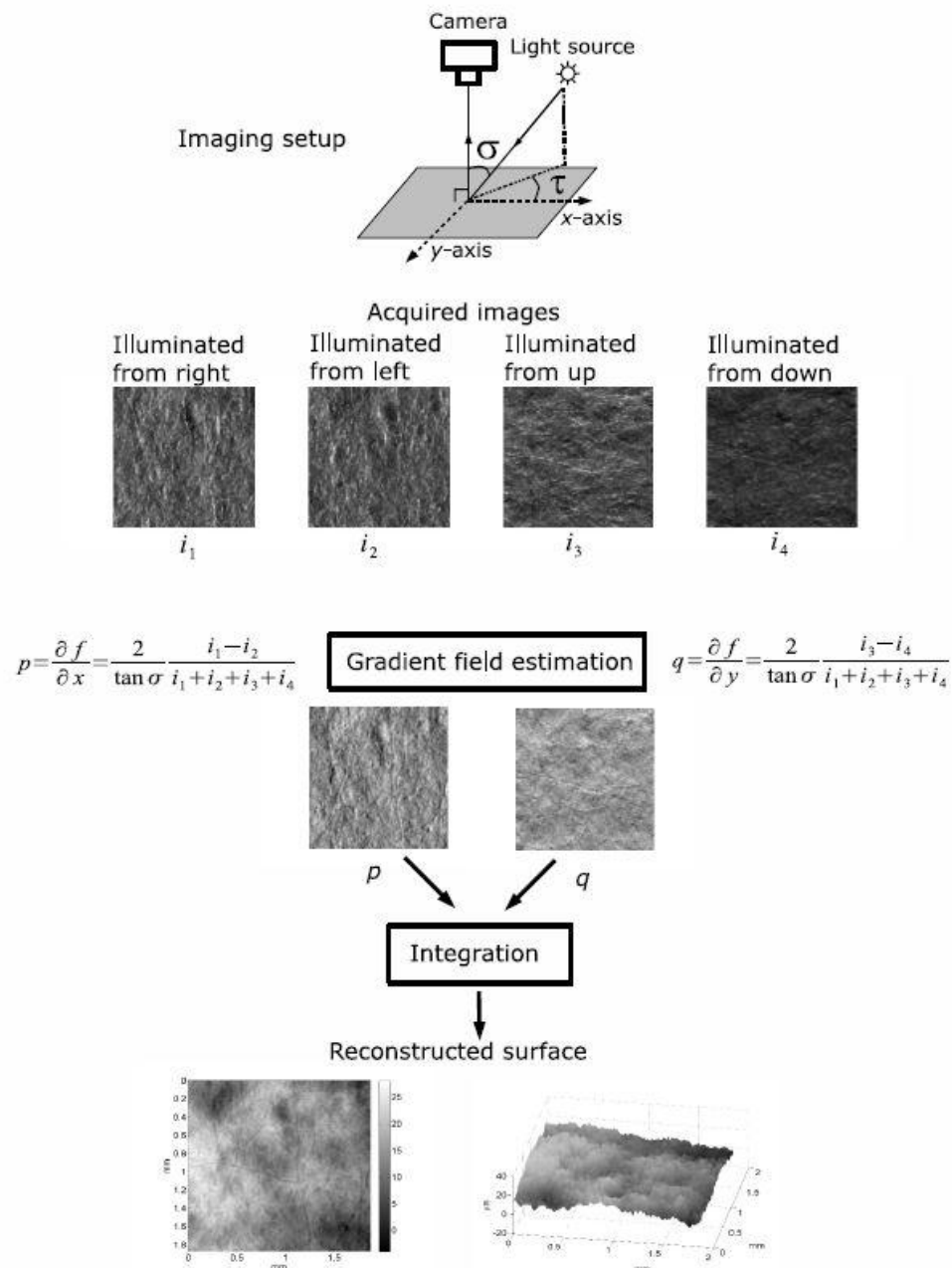


Figure 5.1: Surface reconstruction using photometric stereo.

Kuva 4. Viistovalokuvauksen periaate (Kuparinen 2008, 46)

Mainittakoon vielä, että tässä projektissa katsottiin olevan seuraavat valaisukulmat mahdollisimman käytännölliset:  $75^\circ$ ,  $60^\circ$  ja  $30^\circ$ , kulma laskettaessa pinnan normaalin suhteen. Näitä kulmia päädyttiin käyttämään TTY:n henkilökunnan kokemuspohjaisten suositusten johdosta. Heidän havaintojensa mukaan  $75^\circ$  ja  $60^\circ$  kulmat ovat hyväksi havaittuja käytännön kokeissa painopapereita ja kartonkeja tutkittaessa (Mettänen, 2014), kun taas  $30^\circ$  kulma on todettu hyväksi pehmopapereita tutkittaessa (Raunio & Ritala 2013, 2).

### 3 LAITTEEN SUUNNITTELU

Kuten tekstissä aiemmin jo mainittiin, oli toivomuksena toteutukselle, että laite olisi ulkonäöltään esittelykelpoinen ja että sitä olisi vaivatonta käyttää. Tämä lähtökohta tiedostettuna laitetta alettiin suunnitella pohtimalla rungon ulkonäölle sekä teknisille ominaisuuksille eri ratkaisumahdollisuuksia. Tekstissä mainittujen tapaamisten pohjalta päätettiin, että laite suunniteltaisiin niin, että se olisi helposti muokattavissa eri mittauksia varten. Muokattavuuden helpottamiseksi muun muassa profiilien kiinnitykset suunniteltiin toteutettaviksi materiaalitoimittaja Movetecin valikoimasta löytyvillä powerlock-pikakiinnittimillä. Lisäksi led-telineet suunniteltiin kiinnikkeineen niin, että niiden korkeutta valaistavasta pinnasta olisi helppo muuttaa tarpeen tullen.

Aluksi määritettiin, minkä kokoinen ja näköinen laite likimain tulisi olemaan. Laite päätettiin suunnitella neliömäiseksi jo melko varhaisessa vaiheessa, sillä sen muotoinen rakennelma olisi helppo ja edullinen koota. Neliön muoto palveli myös käytännöllisyyttä ja muokattavuutta parhaiten.

Ulkomuodon määrittämisen jälkeen tarkasteltiin led-valojen sekä kameran vaatimaa tilaa, jotta laitteen runkorakenne saatiin oikeisiin mittoihin. Runkorakenteen palkkien minimimitat oli helppo ratkaista käyttäen hyväksi Inventorin Sketch-ominaisuutta eli luonnostelutilaa, jossa kappaleelle annetaan äärimuodot ennen kuin siitä pursotetaan 3D-kappale. Tämän avulla pystyttiin rakentamaan rautalankamalli rungosta ja led-valojen sijainneista rungon sisällä sekä tarkastelemaan eri dimensioita. Myös led-valokeilojen kulku laitteen sisällä tutkittiin samalla tavalla Sketch-ominaisuuden avulla. Tämän menetelmän käyttö esitellään myöhemmin tarkemmin kuvien avulla.

#### 3.1 Tekniset vaatimukset

Laitteen suunnittelu alkoi vaatimusten asettamisesta sen teknisille ominaisuuksille, jolloin saatiin luotua reunaviivat suunnitteluprosessille. Laitteen koko määräytyi pitkälti sen mukaan, kuinka suuren tilan led-telineet sekä kamera vaativat laitteen sisältä. Kameran ja objektiivin viemää tilaa tutkittiin, jotta saatiin selville niiden vaatima tila erikokoisia kappaleita tutkittaessa. Kamera täytyy asettaa aina tietylle korkeudelle eri kuvakokoja ottaessa, jotta sen tarkennuskentästä saadaan selkeä. Tästä johtuen tarvittavaa

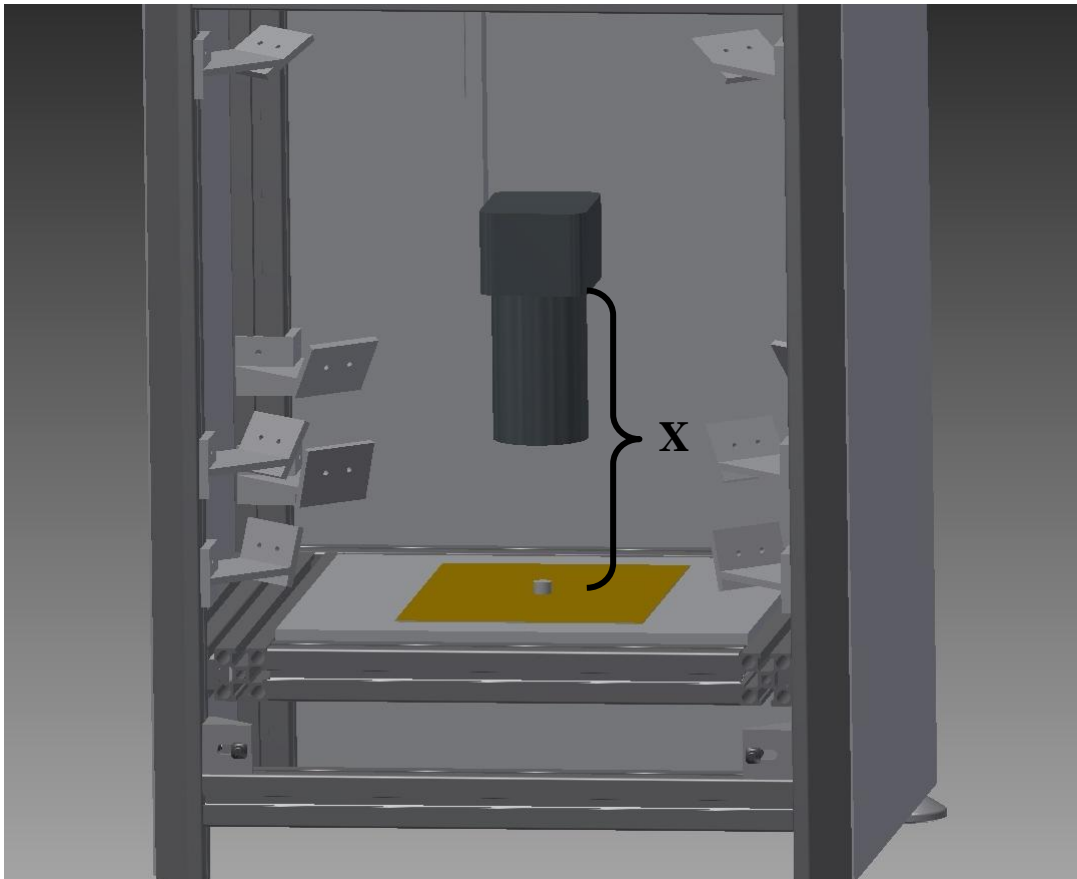
tilaa täytyi arvioida tarkemmin. Tarkastelun suoritti TTY:n tutkija Mettänen, joka myös laati oheisen taulukon kameran rungon etäisyyksistä.

Vertailun vuoksi tarvittavia etäisyyksiä tarkasteltiin kahdella eri kameralla sekä kahdella eri objektiivilla. Alla olevassa taulukossa 1 on esitetty havaitut tulokset.

Taulukko 1. Valokuvausetäisyydet (Mettänen, 2014)

Kamera	Objektiivi	Kuvakoko (mm x mm)	Etäisyys x (*) (cm)
Canon EOS 550D	Sigma 105 mm macro	15 x 23 (1:1)	27,5
"	"	70 x 105	60,5
"	"	110 x 165	86
"	"	140 x 210	107
"	"	180 x 270	148
Canon EOS 110D	Sigma 50 mm macro	100 x 150	40
"	"	137 x 205	51
"	"	200 x 300	72

Tähdellä (\*) merkitty etäisyys-sarake tarkoittaa kameran objektiivin juuresta eli kameran rungon päästä mitattua etäisyyttä kuvattavaan kappaleeseen. Harmaalla pohjalla puolestaan on esitetty etäisyydet, jotka laitteen suunnittelun kannalta kasvaisivat liian suuriksi ja jotka näin ollen hylättiin. Taulukon perusteella saatiin suunniteltua laitteelle fyysiset rajamitat. 72 cm kuvausetäisyys oli vielä toteuttamiskelpoinen siten, että laitteen korkeus ei kasvanut epäkäytännöllisen suureksi. Kuvassa 5 on havainnollistettu kuvausetäisyyden tarkastelu eli kameran objektin juuren ja näytetason välinen etäisyys. Seuraavassa osiossa on esitelty tarkemmin kuvausetäisyyksien sekä led-telineiden etäisyyksien hahmottaminen.



Kuva 5. Kameran etäisyys näytetasosta

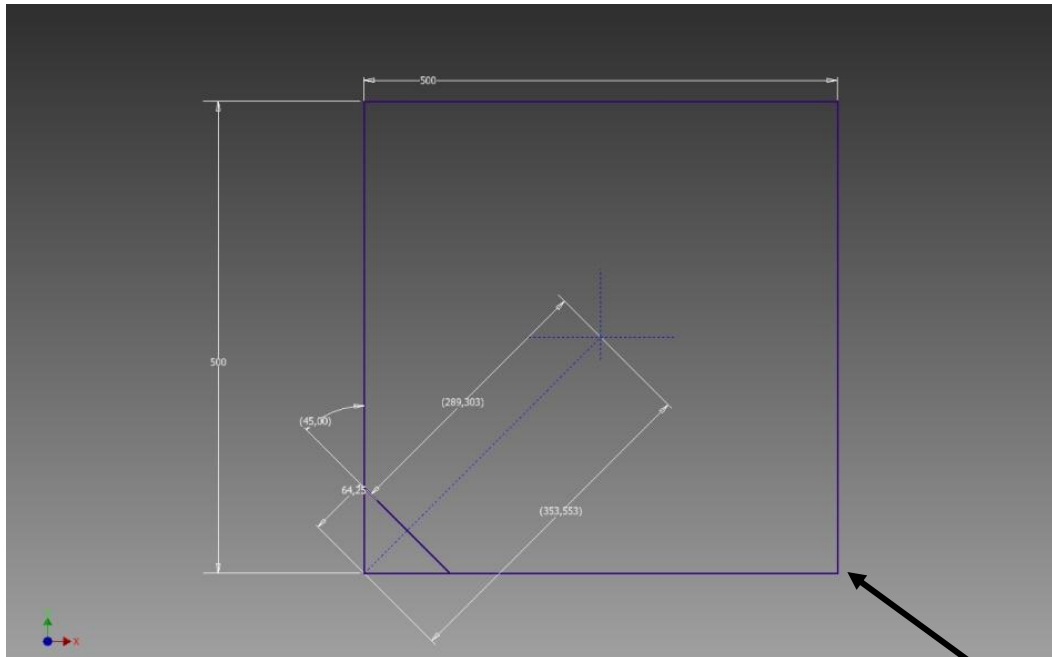
### 3.2 Led-telineiden asemointi

Kuvassa 6 on havainnollistettu, kuinka Sketch-ominaisuutta käytettiin hyväksi led-kulmien laskentaan. Kun led-valaisukulmat tiedettiin, oli helppoa laskea niiden x- ja y-etäisyydet valaistavasta kohteesta ja näin suunnitella rungolle oikeat mitat. Kuvauskulma on laitteen yläpuolelta, ja kuvasta voidaan havaita x-suunnassa tarvittava tila led-telineelle. Kuvassa on osoitettu *nuolella* led-telineen sijainti. Kuvassa esiintyvä suuri neliö kuvaa laitteen rungon sisäkehän ääri viivoja. Alhaalla vasemmassa kulmassa on  $45^\circ$  viiva, joka kuvaa led-telineen ulottuvuutta x-suunnassa.

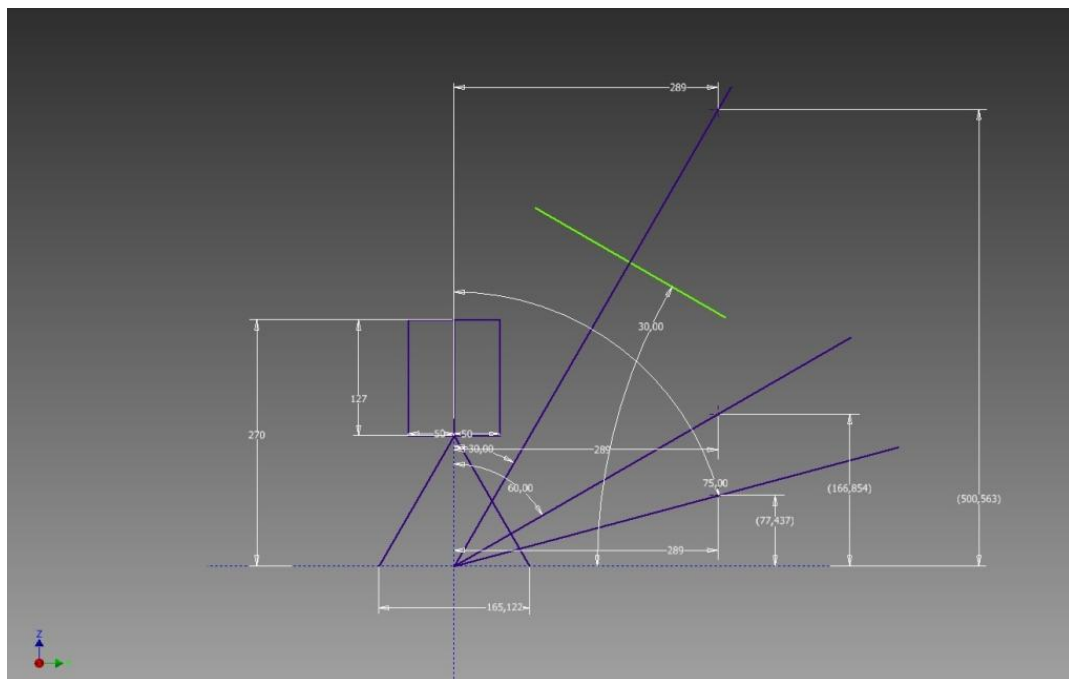
Kuvassa 7 on taas tutkittu rautalankamallin avulla led-valokeilojen kulkua laitteen sisällä silloin, kun kamera on sijoitettu alimmalle kuvausetäisyydelle. Suorakulmio kuvan keskellä kuvaa kameran objektiivia ja siitä alaspäin kulkevat kaksi viivaa kuvausalueita. Eri asteissa kallellaan olevat kolme pidempää viivaa kuvaavat led-valokeiloja. Kuvasta voidaan havainnoida muun muassa se, että kameran objektiivi ei osu ylimpään led-valokeilaan, joten tarvetta rungon muokkaukselle ei ole. Kuvasta näh-



dään myös tarvittu korkeus (y-akselin suunta) led-telineille, kun tiedetään led-telineen ulottuvuus (x-suunta) rungon reunasta.



Kuva 6. Rautalankamalli ylhäältä katsoen



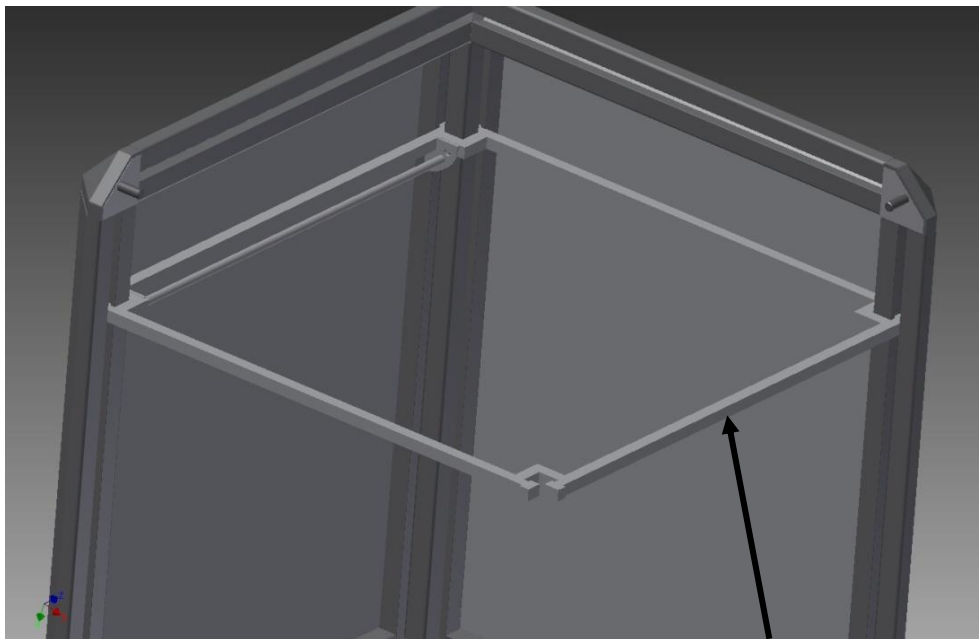
Kuva 7. Rautalankamalli kameran ala-asennossa

### 3.3 Led-telineen suunnittelu ja 3D-tulostus

Aluksi led-telineet suunniteltiin tankomaisiksi pidikkeiksi (Kuva 8), jotka kiinnittyivät pystyprofiileihin ja led-valot suunniteltiin kiinnitettävän vielä erillisen osan avulla tankoihin. Myöhemmässä vaiheessa tämä versio hylättiin ja telineet päätettiin sijoittaa laitteen neljään eri nurkkaan, jolloin niiden ulkonäkö muuttui radikaalisti (Kuva 9).

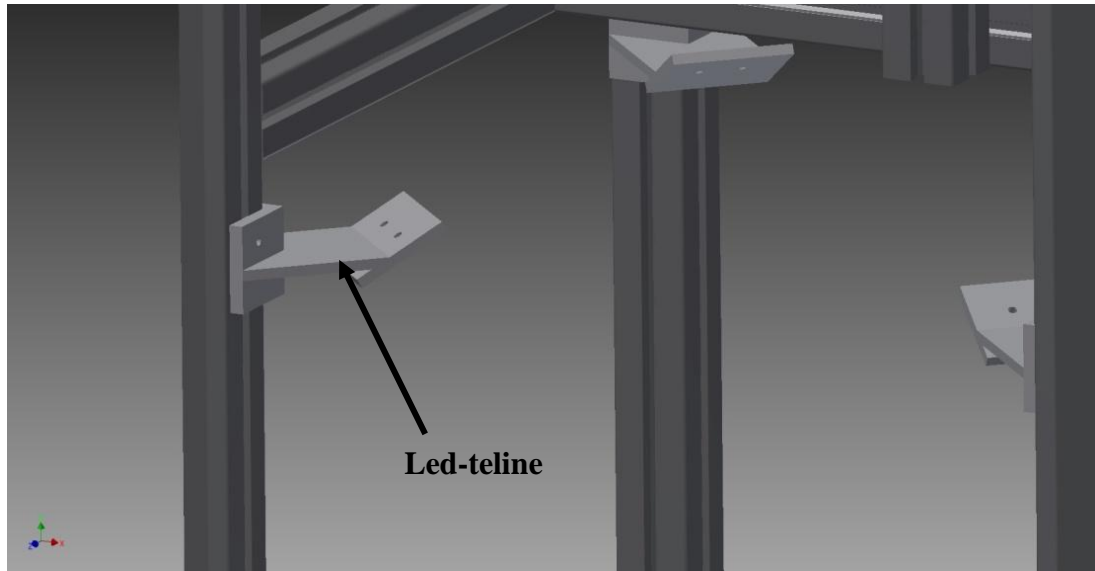
Telineet sijoitettiin nurkkiin niiden kiinnittämisen helppouden takia sekä sen takia, että etäisyyttä valaistavaan kohteeseen saatiin näin kasvatettua huomattavasti. Etäisyyttä kasvattamalla saatiin paljon enemmän pelivaraa sijoittaa led-telineet halutulle korkeudelle valaisupinnasta. Kun telineistä tuli kompaktin kokoisia, voitiin ne kätevästi 3D-printata, toisin kuin pitkät tankomaiset telineet, jotka olisi pitänyt mitä luultavimmin rakentaa pitkistä alumiinitangoista.

Kuvia tarkastelemalla voidaan huomata, että myös led-valojen johdotus ja niiden vienti rungon ulkopuolelle helpottuivat, kun led-telineet sijoitettiin lähelle pystyprofiilien uria. Johdot voidaan näin ollen viedä suoraan profiilien uria pitkin laitteen ulkopuolelle led-valojen ohjausyksikköön. Johdotukset suunniteltiin vielä piilotettaviksi profiiliuriin painettavilla paneeleilla.



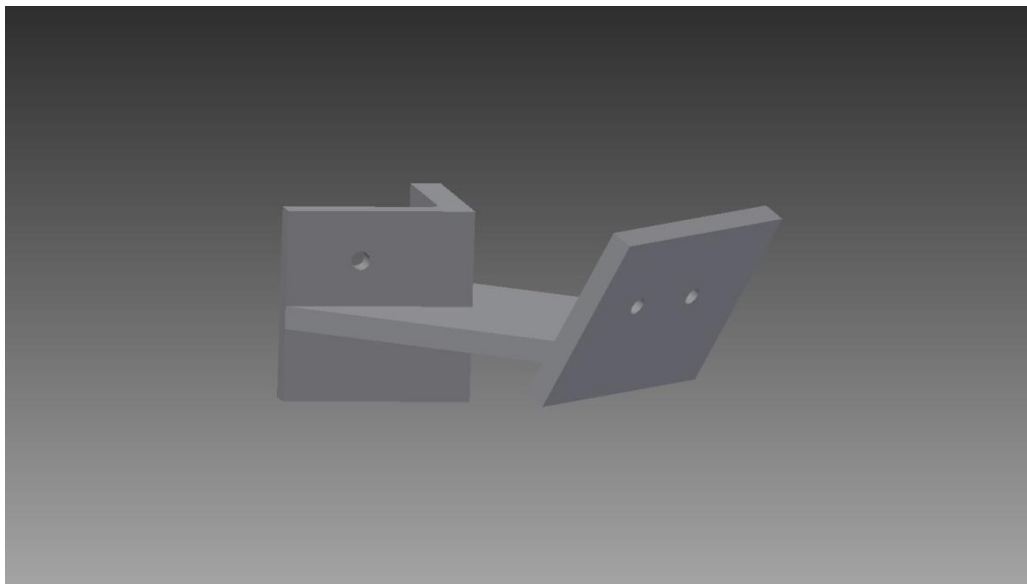
Kuva 8. Ensimmäinen versio led-telineestä

**Ledin kiinnityskohta varhaisessa konseptissa**



Kuva 9. Viimeinen versio led-telineestä

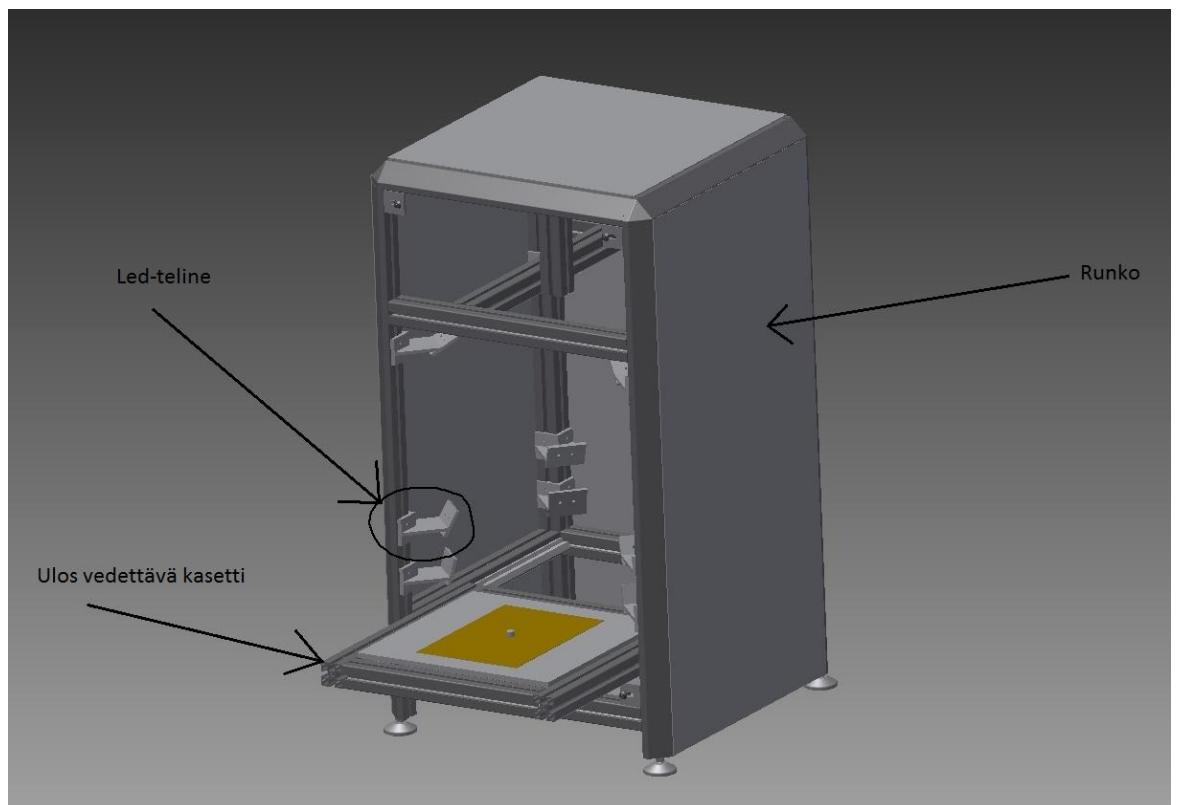
Led-telineiden fyysinen koko pyrittiin suunnittelemaan mahdollisimman pieneksi ajan säästämisen vuoksi, sillä käytössä olevalla 3D-tulostimella olisi mennyt kohtuuttoman paljon aikaa suuren kappaleen tekoon. Telineen maksimileveys on 69 mm, korkeus 50 mm sekä sen maksimiulottuvuus alumiiniprofiilin kulmasta kohti laitteen keskiötä 92 mm. Kuvassa 10 on esitetty mallinnettu led-teline 60° valaisukulmassa.



Kuva 10. Led-teline

## 4 KOMPONENTTIEN VALINTA JA TILAUS

Laitteistosta voidaan erotella neljä eri kokonaisuutta: runko, kasetti, led-telineet sekä elektroniikkakomponentit. Rungolla tarkoitetaan yksinkertaisesti alumiiniprofiileista kasattua kehikkoa, ja kasetti on puolestaan näytepinta, jolle analysoitavat materiaalit asetetaan kuvausta varten. Led-telineillä tarkoitetaan kahtatoista 3D-printattavaa telineitä, kun elektroniikkakomponenteilla puolestaan tarkoitetaan kaikkea led-valojen ohjausyksiköstä niiden johdotuksiin. Kuvassa 11 on vielä osoitettu runko, kasetti sekä led-telineet. Havainnollistuksen vuoksi kuvaan on mallinnettu kasetille A4-kokoinen paperi sekä halkaisijaltaan 10 mm:n sylinteri laitteen kokoluokan tarkastelun vuoksi.



Kuva 11. Runko, kasetti sekä led-telineet

### 4.1 Rungon ja kasetin komponentit

Runko- ja kasettimateriaalin toimittajaksi valittiin Movetec, sillä heiltä löytyi kattava valikoima eri alumiiniprofiileja ja niihin liittyviä komponentteja. Movetec oli lisäksi Metso Oyj:n materiaalitoimittajalistalla.

Alumiiniprofiilin mittoja suunnitellessa päädyttiin jo alussa käyttämään 45 x 45 mm:n profiilia. Myös muun kokoisia profiileja pohdittiin käytettäväksi, mutta kyseisestä suuremman koon profiilista oli tarjolla enemmän erilaisia vaihtoehtoja, jolloin myös oli enemmän varaa eri suunnitteluvaihtoehdoille. Tapaamisissa myös todettiin, että 45 x 45 mm:n profiili olisi tarpeeksi vahvaa tätä käyttötarkoitusta varten. Vertailukohde saatiin TTY:n vastaavasta laitteesta, jossa on käytetty 30 x 30 mm:n alumiiniprofiilia.

Seinäpaneeleiksi valittiin paksuudeltaan 2 mm olevat alumiinilevyt, sillä niiden oli käytännöllistä olla mahdollisimman ohuet, jotta laitteen kokonaispaino voitiin pitää mahdollisimman pienenä. Näytetasoksi valittiin lasilevy, jolloin voidaan tarvittaessa ottaa näytteestä läpivalaisukuvia. Kasetin kehykset mahdollistavat maksimissaan 8 mm näytelevyn asentamisen. Näytetason alapuolelle jätettiin 150 mm tyhjää tilaa läpivalaisumahdollisuuden vuoksi.

Koska laitteen tulee olla täysin paikallaan mittauseräilyä aikana, valittiin jaloiksi alumiiniprofiiliin ruuvattavat, halkaisijaltaan 60 mm olevat jalat, joissa oli pohjassa kumitassut. Kumitassujen avulla pyritään estämään laitteen liukuminen liukkailla pinnoilla.

## 4.2 Elektroniikkakomponentit

Projektin yhteistyökumppaneiden välisissä tapaamisissa selvisi, millaiset elektroniikkakomponentit laitteeseen tulisi hankkia. Kaiken kaikkiaan laitteen elektroniikkakomponentit koostuivat seuraavista osista:

- kamera ja objektiivi
- led-valaisimet
- valaisimien ohjausyksikkö
- virtalähde
- sähköjohdotukset
- ATK-ohjelma, jolla kuvia analysoidaan, (MatLab)

TTY:n henkilökunta vastasi sähkökomponentteihin liittyvistä kysymyksistä, sillä heillä oli kokemusta kokeellisen viistovalokuvauslaitteiston rakentamisesta sekä sen operoimisesta. Elektroniikkakomponentit valittiin siis TTY:n henkilökunnan suositusten mukaisesti.

Kameran rungoksi valittiin Canon EOS 100D järjestelmäkamera sekä sen objektiiviksi Sigma 105 mm F2.8 EX DG OS HSM Macro. Myös kamerasen ja objektiivin valinta tehtiin TTY:n suositusten mukaisesti.

Led-valo-ohjaimiksi valittiin Gardasoftin RT820F-20, jonka TTY pystyi tarjoamaan. Tämän ohessa TTY tarjosi myös 48 voltin tasavirtalähteen käyttöjännitettä varten. Laitteen ohjausjärjestelmänä toimii MatLab.

Led-valot päätettiin hankkia myös niin ikään TTY:n asiantuntijoiden suositusten mukaisesti. Malliksi valittiin Bridgeluxin tähtimallinen BXRAA-40E0810-A-00 ES STAR 800LM NEUT WHT ARRAY 4000K. Kyseinen led-valo on helppo kiinnittää pienillä ruuveilla led-telineeseen ja siinä on tähän käyttötarkoitukseen tarpeeksi valotehoa (800lm).

### 4.3 3D-mallinnus, 3D-tulostus ja työpiirustukset

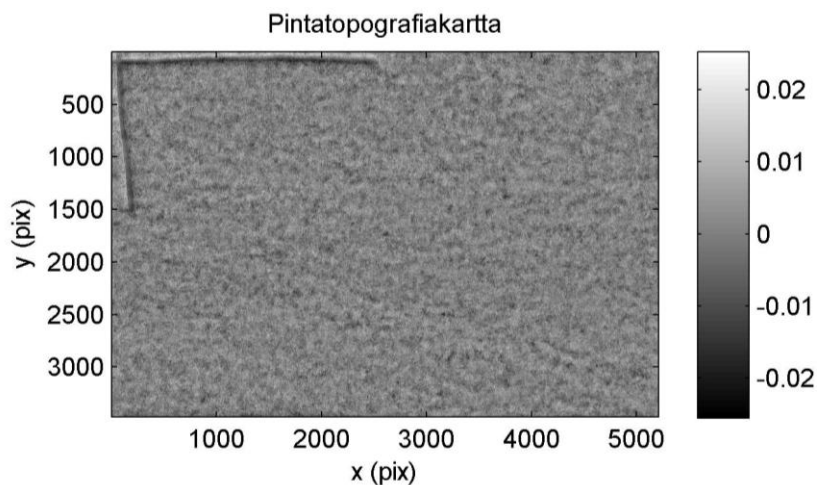
Laitteen 3D-mallinnus sekä työpiirustukset laadittiin Autodesk Inventor Pro 2013 versioilla, ja työpiirustusten laatimisessa hyödynnettiin Aimo Pereen Koneenpiirustus 1 & 2 -kirjan vuoden 2012 painosta. Suurin osa laitteen komponenttien 3D-malleista saatiin ladattua suoraan Movetecin Internet-sivuilta. Mallintaminen helpottui tätä myöten huomattavasti, kun kaikkia kappaleita ei ollut tarve mallintaa alusta alkaen.

Alusta alkaen mallinnettiin led-telineet, jotka myös 3D-tulostettiin laitetta varten. Muutakin komponentteja, muun muassa järjestelmäkamera ja objektiivit, mallinnettiin kokouksia varten havainnollistamaan niiden viemää tilaa laitteen sisällä. Led-telineet mallinnettiin Autodesk Inventorilla, jotka 3D-tulostettiin TAMK:n tiloista löytyvällä 3D-tulostimella.

Laitteen osista laadittiin kokoonpanopiirustukset sekä osaluettelot. Työpiirustukset led-telineistä sekä kokoonpano-ohjeet laitteistosta löytyvät kokonaisuudessaan liitteistä. Ne kattavat kokonaisuudessaan rungon, kasetin sekä 3D-tulostetut led-telineet.

## 5 TULOKSET

Lopuksi esitellään kasattu laitteisto (Kuvat 13 ja 14) sekä sillä otettu testikuva (Kuva 12). Kuvattavana materiaalina oli tavanomainen 80-grammainen kopiopaperi ja kuvan koko oli 47 mm x 31,2 mm. Valaistus tuli 60° asteen kulmassa pinnan normaaliin nähden. Kuvan oikeassa reunassa oleva harmaasävyasteikko on esitetty millimetreinä. Havainnollistuksen vuoksi paperiin on piirretty lyijykynällä suorakulmainen viiva, joka näkyy kuvan oikeassa ylänurkassa.

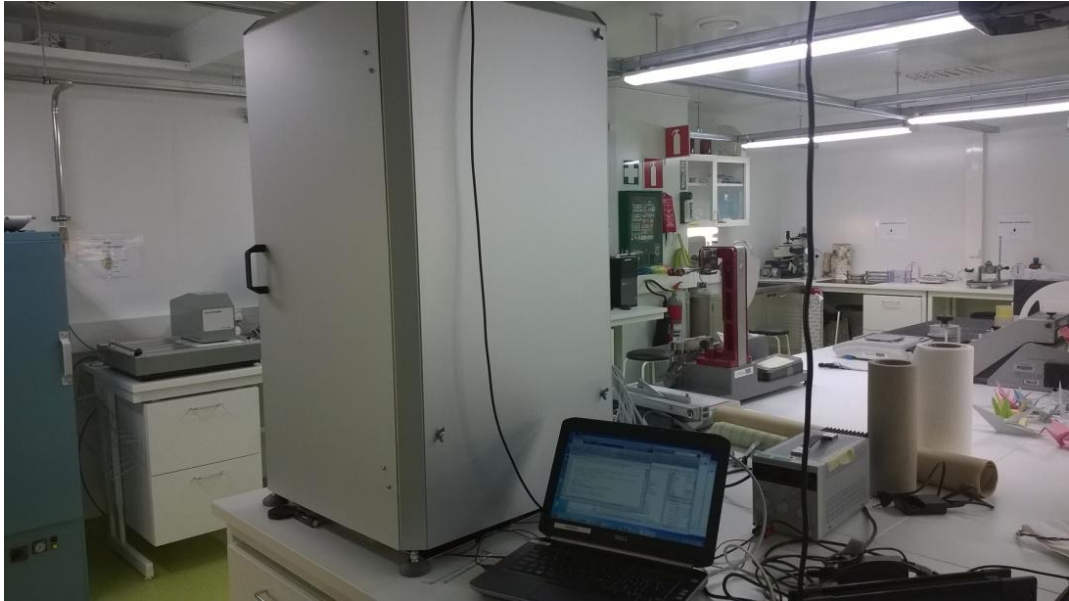


Kuva 12. Pintatopografiakartta (Mettänen, 2014)

Kuvissa 13 ja 14 on esitetty viistovalokuvauslaitteisto kokonaisuudessaan. Kuvasta 13 voidaan nähdä rakennettu laite sekä kannettava tietokone, jolla laitteistoa ohjataan. Kuvassa 14 taas on esitetty laitteisto sisältä. Huomion arvoisia asioita tässä kuvassa on 3D-printatut led-telineet alumiiniprofiileissa sekä laitteeseen kiinnitetty kamera. Näytetasolle on asetettu havainnollistuksen vuoksi tavanomainen A4-kopiopaperi.

Tutkija Mettäsän testien perusteella laite todettiin olevan testikäytössä hyvä ja toimiva, ja se oli tarpeeksi jäykkä rakenteeltaan. Paperinäytteitä saatiin kuvattua 150 kappaletta vakio-olosuhteissa kahden päivän sisällä.





Kuva 13. Viistovalokuvaalaitteisto (Mettänen, 2014)



Kuva 14. Viistovalokuvauslaite sisältä (Mettänen, 2014)

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tätä projektia aloitettaessa ei opinnäytetyön laatijalla ollut mitään taustatietoa viistovalokuvauksesta, joten kaikki teoria oli käytännössä uutta. Kirjallisuuskartoitusta lähdettiin tekemään TTY:ltä saatujen teoriamateriaalien pohjalta ja tarvittaessa teoriamateriaalia pyydettiin lisää tai sitä etsittiin Internetin kautta. Näin suuren laitteiston suunnittelu oli uutta, sillä koulun kursseilla ja kesän insinööriharjoitteluisissa mallinnettiin vain yksittäisiä kappaleita tai korkeintaan pieniä muutamasta osasta koostuvia kojeita. Laitteen koko toikin hieman haastetta, sillä eri dimensioiden kanssa piti olla erittäin tarkkana. Myös eri komponenttien paljous teki suunnittelusta omalta osaltaan haastavaa.

Kaikki tässä opinnäytetyössä käytetty kirjallisuus oli englanniksi kirjoitettua, sillä aiheesta ei löytynyt juurikaan suomeksi kirjoitettua tietoa kirjallisuutta kartoitettaessa. Suomalainen kirjallisuus painottui lähinnä ilmasta suoritettavaan maaston viistovalokuvaukseen, joka ei ollut tämän opinnäytetyön kannalta relevanttia. Toisaalta englanninkielinen kirjallisuus aiheesta oli sen verran kattavaa, että tarvetta suomalaiselle kirjallisuudelle ei oikeastaan ollut. TTY tarjosi loistavaa teoriamateriaalia viistovalokuvauksesta, ja Internet-sivustoilta löytynyt materiaali antoi sille lisätukea.

Vähimmäistavoitteena tässä projektissa opinnäytetyön kannalta oli se, että laite saataisiin suunniteltua tilausvalmiiksi, ja tässä tavoitteessa onnistuttiinkin. Tavoitteet jopa ylitettiin, kun laite saatiin kokoonpantua niin pitkälle, että sillä oli mahdollista ottaa ensimmäiset testikuvat tavallisesta kopiopaperista. Laite sijoitettiin TAMK:n tiloihin paperilaboratorioon.

3D-tulostuksesta tuli runsaasti tietoa ja ymmärrystä lisää. Tulostettaessa kolme mallikappaletta led-telineistä, huomattiin, että ne olivat mitoitettu väärin. Tulostettujen kappaleiden profiilin uriin asettuvat kiinnikepalat sekä kiinnitysreiät pulteille olivat muutamia millimetrejä sivussa oikeasta sijainnistaan. Näihin kolmeen testikappaleeseen porattiin uudet reiät pulteille, ja loput yhdeksän kappaletta tulostettiin korjatulla 3D-mallilla.

Kuten Johansson ja Hansson (2000, 1) toteavat, tämän tyyppistä viistovalokuvaukseen perustuvaa pinnan laadun arviointia ei juurikaan ole käytössä teollisuudessa, vaan käytössä olevat tekniikat perustuvat mekaaniseen kosketukseen tai hitaaseen määrittelyyn

pisteen skannaamiseen. Toisaalta on syytä pohtia Johanssonin ja Hanssonin (2000, 1) väitteen paikkansapitävyyttä tänä päivänä, sillä kirjoituksesta on kulunut yli vuosikymmen. Tämän projektin kaltainen viistovalokuvausanalyysi on saattanut yleistyä teollisuudessa, kuten Multiplix Imaging (2014) antaa ymmärtää esimerkeillään.

Opinnäytetyön avulla pyrittiin saamaan Tampereen ammattikorkeakoululle toimiva viistovalokuvалаitteisto laboratoriotiloihin, jossa sillä voidaan suorittaa erilaisia tutkimuksia, ei vain TAMK:n, mutta mahdollisesti myös muiden tilaamia tutkimuksia, kuten Metso Oyj:n. Työn kautta saatiin myös luotua yhteistyötä TAMK:n, Metso Oyj:n sekä TTY:n välille.

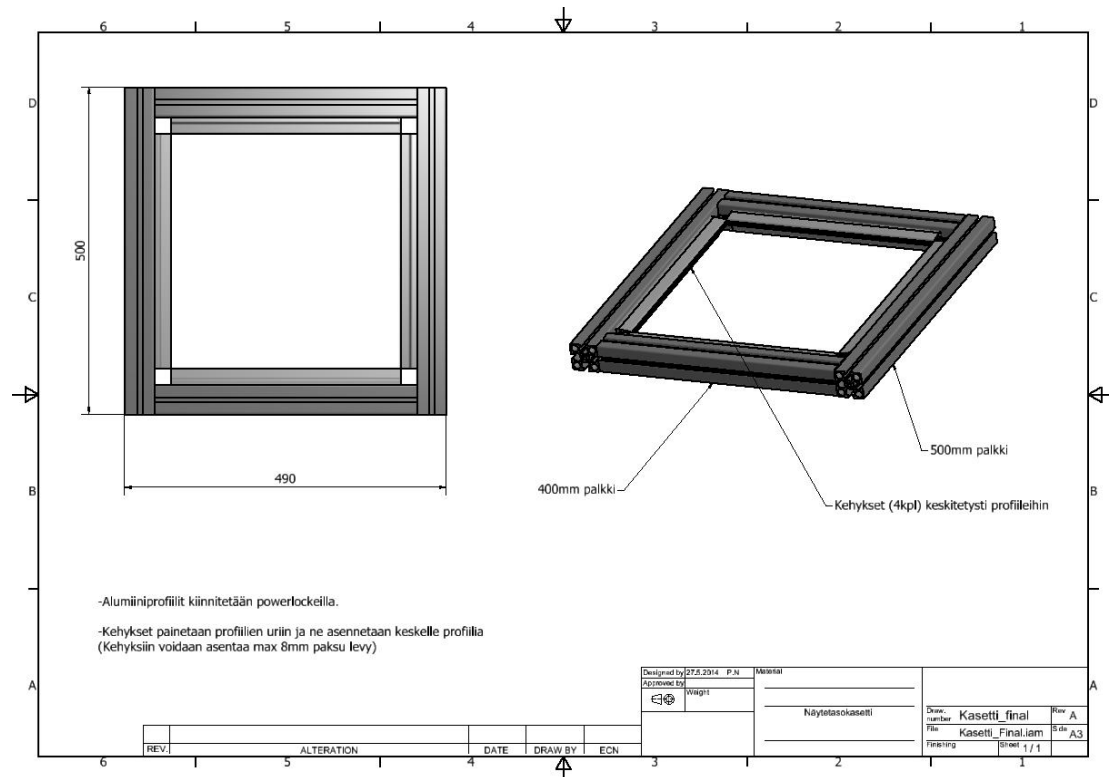
Laitteen modifioiminen parempaan käyttökuuntoon jatkunee opinnäytetyön jälkeen, kuten myös yhteistyötoiminta eri osapuolien kesken. Kuten tekstissä on tuotu esille, on viistovalokuvausta tutkittu jo 1970-luvulta lähtien laitteiden ja menetelmien kehittyessä tähän päivään saakka. Rakennettu laite on ensimmäinen laatuaan TAMK:ssa, joten projekti mahdollistaa tulevaisuudessa uusia jatkotutkimuksia ja kehitysprojekteja.

## LÄHTEET

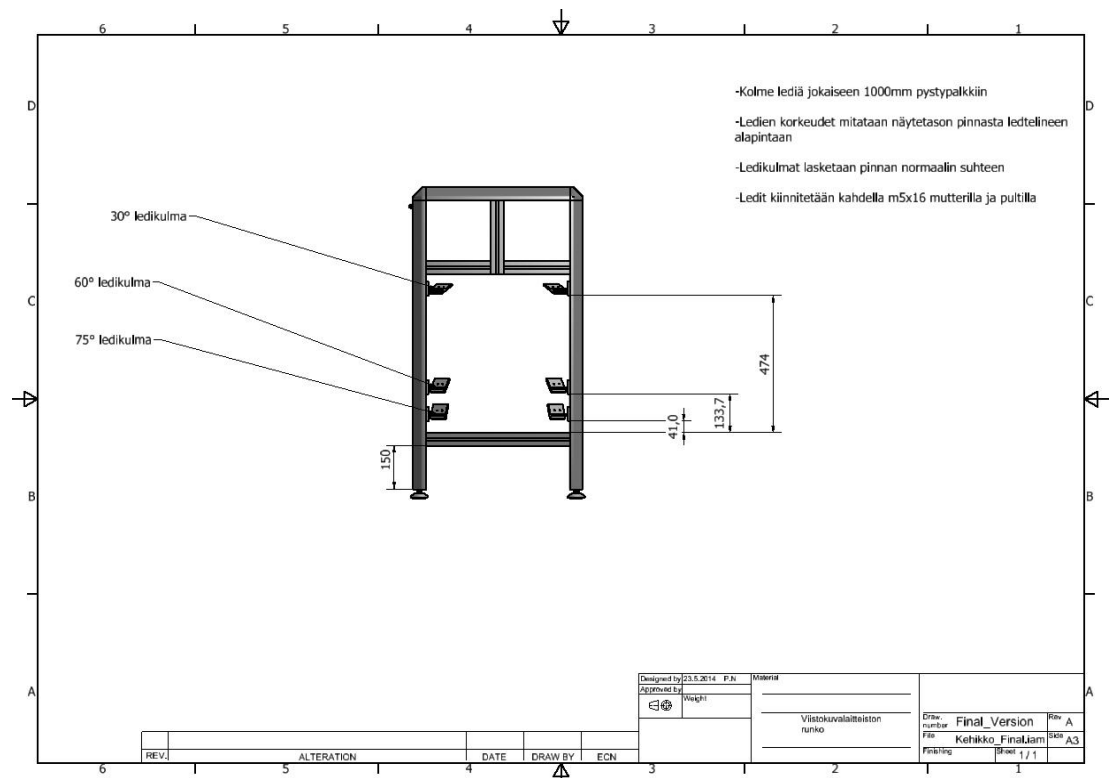
- Hansson, P. ja Johansson, P-Å. 2000. Topography and reflectance analysis of paper surfaces using a photometric stereo method. International Application Published Under the Patent Cooperation Treaty (PCT).
- Innventia AB. About Us. Luettu 26.08.2014. <http://www.innventia.com/en/About-us/>
- Innventia AB. Optitopo - the technique and fields of application. Luettu 27.08.2014. <http://www.innventia.com/Documents/Produktblad/Material%20processes/Pappersyta/OptiTopo%20-%20the%20technique%20and%20fields%20of%20application.pdf>
- International Standard. ISO 8254-1. 2009. Paper and board - Measurement of specular gloss, Part 1: 75° gloss with a converging beam, TAPPI method. 2.painos.
- Kuparinen, T. 2008. Reconstruction and analysis of surface variation using photometric stereo. PhD Thesis,. Lappeenranta University of Technology. Väitöskirja.
- Mettänen, M. tutkija. 2014. Selvitystä viistovalolaitetta varten. Sähköpostiviesti. Marja.Mettanen@tut.fi. Luettu 21.04.2014.
- Mettänen, M. tutkija. 2014. Kuvat. Sähköpostiviesti. Marja.Mettänen@tut.fi. Luettu 22.09.2014.
- Movetec. Tuotteet - mekaaninen. Luettu 01.06.2014. <http://www.movetec.fi/fin/tuotteet-mekaaninen/alumiiniprofiilit/alumiiniprofiilit-minitec>
- Multipix Imaging. HALCON's Imaging Software technique 'Photometric Stereo' explained. Viitattu 11.8.2014. <http://multipix.com/support-articles/imaging-software-technique-photometric-stereo-explained/>
- Pere, A. 2012. Koneenpiirustus 1&2. Espoo: Kirpe Oy.
- Woodham, R. J. 1980. Photometric method for determining surface orientation from multiple images. *Optical Engineering*, 19 (1), 139-144.
- Wu, T-P., Tang, K-L., Tang, C-K., Wong, T.T. 2006. Dense Photometric Stereo: A Markov Random Field Approach. *IEEE Transactions on Patterns Analysis and Machine Intelligence*, 28 (11), 1830-1846.

## LIITTEET

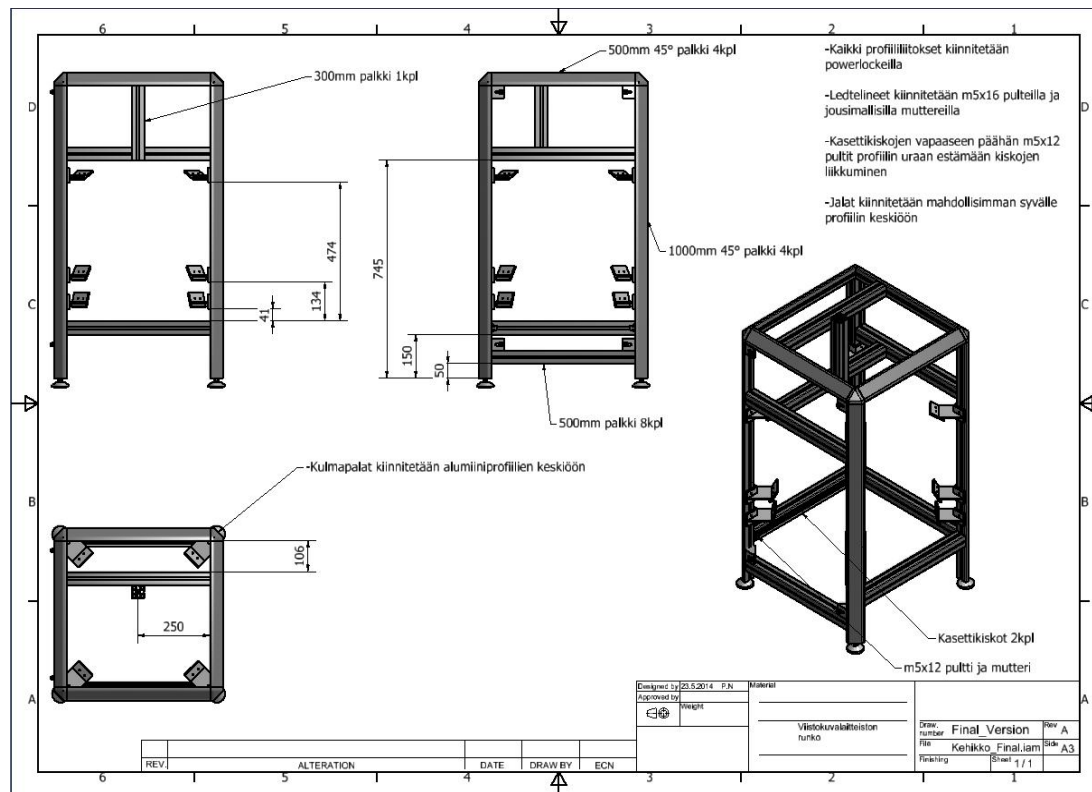
### LIITE 1. Kasetin kokoonpanopiirustus



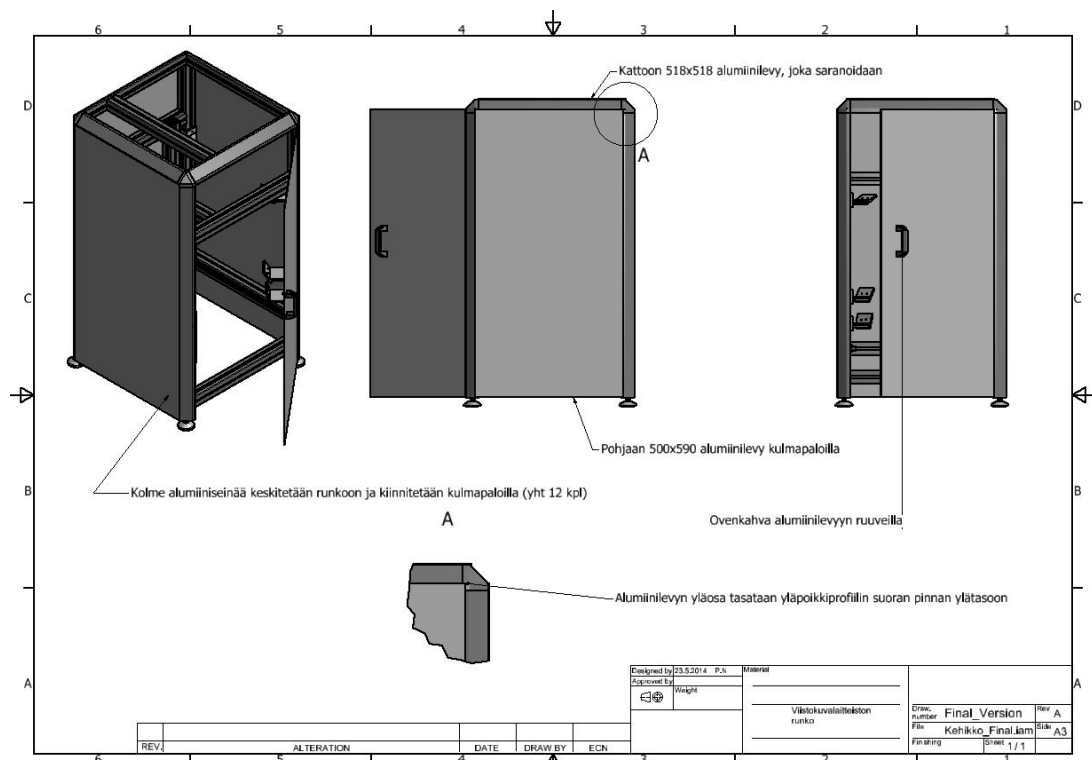
### LIITE 2. Led-telineiden korkeudet



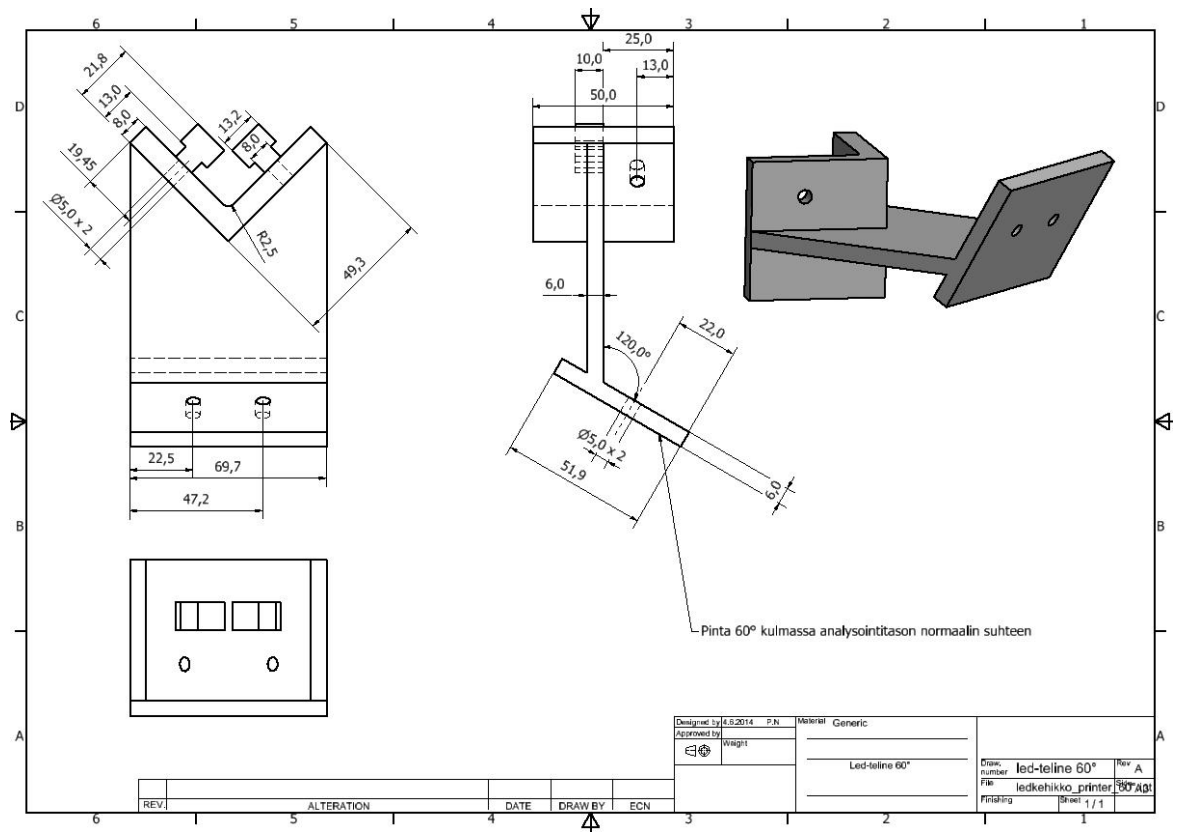
## LIITE 3. Rungon kokoonpanopiirustus



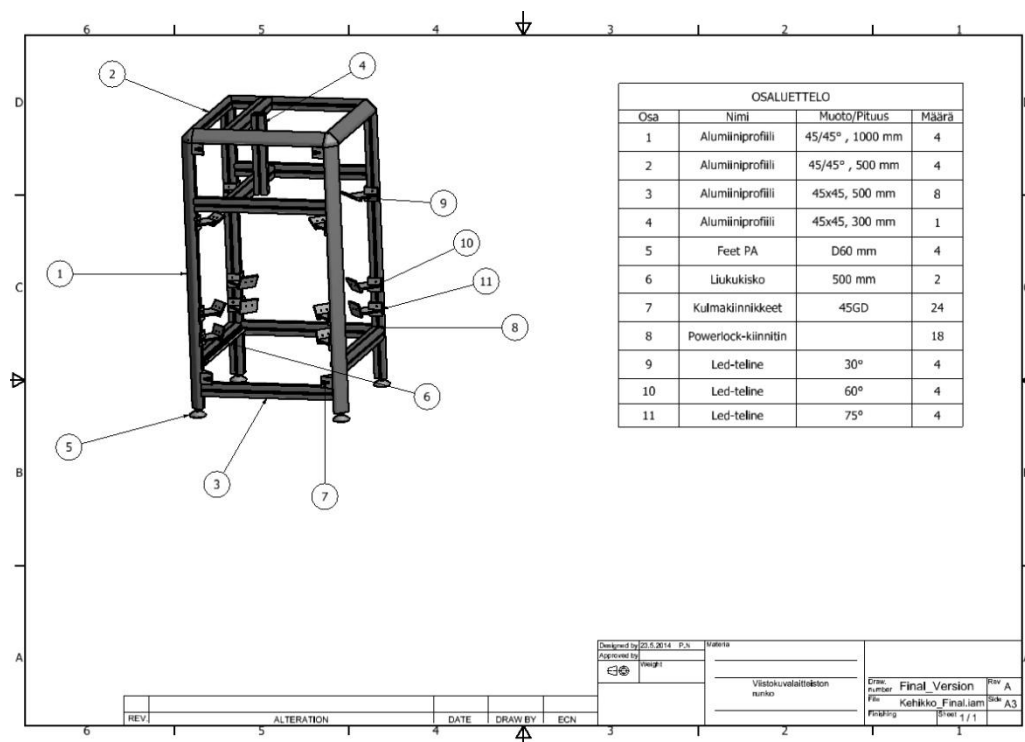
## LIITE 4. Alumiinilevyjen asentaminen



## LIITE 5. Led-teline



## LIITE 5. Rungon osaluettelo



## LIITE 6. Kasetin osaluettelo

OSALUETTELO			
Osa	Nimi	Muoto/Pituus	Määrä
1	Alumiiniprofiili	45x45, 500 mm	2
2	Alumiiniprofiili	45x45, 400 mm	2
3	Kehykset	350 mm & 360 mm	4
4	Powerlock-kiinnitin		4

DESIGNED BY	27.5.2014	P.N.	Material	
APPROVED BY			Näyttesokasetti	
REV	ALTERATION	DATE	DRAW BY	ECN

Draw number	Kasetti final	Rev	A
File	Kasetti FinalJam	Scale	A3
Finang		Sheet	1 / 1