

Ari Rajamäki

# Maalilennokin langaton tiedonkeruujärjestelmä

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Tietotekniikan koulutusohjelma

Insinöörityö

2.12.2015

Tekijä Otsikko	Ari Rajamäki Maalilennokin langaton tiedonkeruujärjestelmä
Sivumäärä Aika	46 sivua 2.12.2015
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Tietotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Sulautetut järjestelmät
Ohjaajat	Insinöörikapteeni Mika Nieminen Lehtori Keijo Länsikunnas
<p>Insinööriyössä suunniteltiin ja toteutettiin maalilennokin langaton tiedonkeruujärjestelmä Puolustusvoimien harjoitustarpeisiin. Järjestelmä koostuu lennokista, johon kiinnitetään videokamera ja muita lennätyksen seurantaa helpottavia antureita. Lennokista kerätyt tiedot välitetään radioteitse maa-asemalle, jossa analysoitu data esitetään lennättäjälle.</p> <p>Työssä tutustuttiin markkinoilla saatavilla oleviin kaupallisiin ratkaisuihin järjestelmän toteuttamiseksi. Hyvin pian kuitenkin todettiin, ettei juuri tähän projektiin sopivaa valmista elektroniikkaa ole saatavilla. Työssä päädyttiin rakentamaan itse piirilevy valmiiden ratkaisujen päälle. Piirilevysuunnittelu tarjosi joustavan tavan tuottaa laitteiston ominaisuuksia, joita juuri tähän käyttötarkoitukseen tarvittiin.</p> <p>Insinööriyössä tutkittiin erilaisia mahdollisuuksia maa-aseman ja lennokin välisen radiolin-kin toteutukseen. Selvitystyön tuloksena viiden kilometrin kantamavaatimus ratkaistiin käyttämällä kaupallista mobiilidatayhteyttä. Maa-aseman ja lennokin välisen datayhteyden tietoturva varmistettiin VPN-tunnelilla (Virtual Private Network), joka luo salatun virtuaalisen erillisverkon päätelaitteiden välille.</p> <p>3D-tulostusta käytettiin apuna rakennetun elektroniikan suojaamiseen. Koteloiden ja kiinnikkeiden valmistusta varten työssä tutkittiin yleisimpiä 3D-tulostustekniikoita ja käytetyimpiä 3D-tulostusmateriaaleja. Pikatulosteet osoittautuivat oivaksi menetelmäksi tässä kehitystyössä, sillä insinööriyön aikana koteloita ja kiinnikkeitä iteroitiin useita kertoja tyydyttävän lopputuloksen saavuttamiseksi.</p>	
Avainsanat	tiedonkeruujärjestelmä, VPN, 3D-tulostus

Author Title	Ari Rajamäki Wireless data gathering system for a drone
Number of Pages Date	46 pages 2 December 2015
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Information and Communications Technology
Specialisation option	Embedded Systems
Instructors	Mika Nieminen, Captain Engineer Keijo Länsikunnas, Senior Lecturer
<p>This thesis describes the process of designing and implementing a wireless data gathering system of a drone for the educational purposes of the Finnish Defence Forces. The system comprises a drone with an integrated camera and other flight tracking sensors. Captured data from the drone are transmitted via a radio link to a ground station where the data is displayed to the pilot after analysis.</p> <p>Commercially available solutions were explored to find an implementation for the system. However, it was soon discovered that the available commercial solutions were not applicable for this project. Thus, a printed circuit board (PCB) was independently designed by utilizing the existing commercial solutions as a template. The PCB design offered a flexible way to customize the hardware features that were specifically required for this purpose.</p> <p>Various options were considered for the implementation of the radio link connecting the ground station and the drone. A key requirement for the radio link was a 5-kilometre range that was finally achieved by using a commercial mobile data connection. Information security of the data connection between the ground station and the drone was secured with a VPN tunnel that creates an encrypted virtual private network between the clients.</p> <p>3D printing was utilized to protect the electronics of the system. In order to print plastic cases and clamps in 3D, various 3D-printing technologies and most widely used 3D printing materials were compared. Quick prints turned out to be an excellent method in this product development phase since during this process, the design of the cases and clamps has to be iterated multiple times in order to achieve a satisfying end result.</p>	
Keywords	data gathering system, VPN, 3D printing

## Sisällys

### Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Tiedonkeruujärjestelmän keskusyksikkö	2
3	Langaton tietoliikenneyhteys	5
3.1	Linkkibudjetti	5
3.2	WLAN-tiedonsiirtotekniikka	6
3.3	LTE-mobiiliverkkoteknologia	10
4	Piirilevysuunnittelu	13
4.1	Piirilevyn prototyyppi	13
4.2	Piirilevyn CAD-suunnittelu	16
4.3	Piirilevyn kokoonpano ja testaus	19
5	Videolinkki	21
6	Tietoturva	24
7	3D-tulostaminen	26
7.1	SLS-tulostustekniikka	27
7.2	FDM-tulostustekniikka	28
7.3	SLA-tulostustekniikka	30
7.4	LOM-tulostustekniikka	31
7.5	Koteloiden 3D-tulostus	32
8	Kokoonpano ja testaus	34
8.1	Maa-asema ja lennokki	34
8.2	Yhteistyö Puolustusvoimien kanssa	38
9	Yhteenveto	41
	Lähteet	43

## Lyhenteet

3G	Kolmannen sukupolven matkapuhelinverkkoteknologia.
4G	Neljännän sukupolven matkapuhelinverkkoteknologia.
Ad-Hoc	Kahden asiakkaan välinen langaton lähiverkkoyhteys, joka ei ole riippuvainen reitittimestä.
ADC	Analog-To-Digital-Converter. AD-muunnin, joka muuttaa analogisen signaalin digitaalseksi lukuarvoksi.
APN	Access Point Name. Yhdyskäytävän nimi mobiiliverkolle.
ARM	Mikroprosessoriarkkitehtuuri, jota käytetään yleisesti matkapuhelimissa ja sulautettujen järjestelmien suorittimissa.
AT	Eräänlainen komentokieli modeemin käskyttämiseen.
CMOS	Complementary metal-oxide-semiconductor. Yleinen mikropiirien valmistekniikka, jota käytetään muun muassa kuvakenttien valmistuksessa.
CSI	Camera Serial Interface. Kameran videovirran siirtämiseen tarkoitettu tiedonsiirtoväylä.
DC-HSDPA	Dual Carrier High-Speed Downlink Packet Access. Mobiiliverkkoteknologia, joka mahdollistaa nopean tiedonsiirron kolmannen sukupolven matkapuhelinverkossa.
DNS	Domain Name System. Internetin nimipalvelujärjestelmä.
ERP	Effective Radiated Power. Radioaallon säteilyteho, jossa on huomioitu vaimennukset ja vahvistukset.
EIRP	Equivalent Isotropically Radiated Power. Säteilyteho, joka säteilee ympärisäteilevästä antennista.

GPIO	General Purpose Input Output. Yleiskäyttöinen liitäntä mikroprosessoreissa.
H264	Videon pakkauskoodekki.
H265	Uudempi versio H264-pakkauskoodekista.
HD	High Definition. Näytön tai videon resoluutioon viittaava termi, Full HD = 1920 x 1080 pikseliä, HD Ready = 1280 x 720 pikseliä.
I2C	Yksinkertainen kaksisuuntainen tiedonsiirtoväylä.
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers. Tekniikan alan järjestö, joka määrittelee alan standardeja.
ISM-taajuus	Luvasta vapautettuun käyttöön tarkoitettu radiotaajuusalue. Yleisiä vapaita alueita Suomessa ovat 433 MHz, 868 MHz, 2,4 GHz ja 5,0 GHz.
LTE	Long Term Evolution. Mobiiliverkkoteknologia.
MJPEG	Motion JPEG. Sarja pysäytettyjä JPEG-kuvia, joista muodostuu videokuva.
NAT	Network Address Translation. Osoitteenmuunnos, jossa julkinen IP-osoite piilotetaan.
NUC	Next Unit of Computing. Intelin termi pienikokoiselle tietokoneelle.
PCB	Printed Circuit Board. Piirilevy.
RP-SMA	Yleinen liitintyyppi langattomissa antenneissa.
SD	Secure Digital. Muistikorttityyppi.
SPI	Serial Peripheral Interface. Synkronoitu sarjaliikenneprotokolla.

SSH	Secure Shell. Salattu tiedonsiirtoprotokolla, jota käytetään yleisesti Linux-pohjaisen käyttöjärjestelmän konsolipohjaiseen etähallintaan.
STL	Stereolithography. Tiedostomuoto, joka sisältää kolmiulotteisen mallin kappaleesta.
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter. Asynkroninen sarjaliikenneprotokolla.
UDP	User Datagram Protocol. Verkon tiedonsiirtoprotokolla, jossa datan eheyttä ei taata.
USB	Universal Serial Bus. Lisälaitteiden kommunikointiin kehitetty tiedonsiirtoprotokolla.
VLC	VideoLAN Client, videon toisto- ja välitysohjelma.
VPN	Virtual Private Network. Virtuaalinen erillisverkko, jonka avulla voidaan yhdistää kaksi suljettua verkkoa yhdeksi salatuksi virtuaaliseksi verkoksi.
TCP	Transmission Control Protocol. Verkon tiedonsiirtoprotokolla, jossa datan eheys varmistetaan.

## 1 Johdanto

Insinööriyössä perehdytään reaaliaikaisen videokuvan siirtämistekniikoihin lennokista maa-asemalle. Videokuvan lisäksi lennokka lähettää telemetriadataa, joka sisältää muun muassa tietoja lennokin asennosta ja akun jännitteestä. Itse lennokkia tai sen ohjausta ei tässä työssä toteuteta.

Insinööriyön työstäminen alkoi jo vuoden 2013 lopulla, kun pienryhmässä tuli esiin ajatus kehittää lentävä kopteri, joka lähettäisi reaaliaikaista videokuvaa virtuaalilaseihin. Alun perin ajatuksena oli kehittää eleohjaus, jossa yhdistettäisiin ihmisen pään ja käsien liikkeitä kopterin ohjaamiseen. Aihetta tutkittiin laajasti keväällä ja kesällä 2014, mutta yllättäen syksyllä 2014 minulle ja Pauli Korhoselle avautui mahdollisuus alkaa yhdessä kehittää vastaavanlaista tekniikkaa Puolustusvoimille. Alkuperäisistä suunnitelmista poiketen eleohjaus jätettiin pois, mutta reaaliaikaisen videon siirtämisen tutkimusta voitiin käyttää hyväksi.

Puolustusvoimien ilmasotakoulun henkilökunta lähestyi meitä lennätysharjoituksissa ilmenneellä ongelmalla. Lennätyksen aikana lennokka saattoi ajautua niin kauas lennättäjästä, ettei lennokin asennosta voida olla enää varmoja. Lisäksi lennokin näköperspektiiviä haluttiin hyödyntää maastoon naamioinnin onnistuvuuden arvioinnissa. Tämän ongelman ratkaisemiseksi projektin tavoitteeksi asetettiin tiedonkeruujärjestelmä, joka kerää tietoa lennon tapahtumista langattomasti reaaliajassa. Projektille ei määritellyä käytettäväksi mitään tiettyä teknologiaa, vaan sovittiin pelkästään yleiset tavoitteet: salattu datalinkki viiden kilometrin kantamalla sekä mahdollisimman reaaliaikainen ja hyvälaatuinen videovirta lennokista maa-asemalle.

Insinööriyöprojektin työnjako sovittiin siten, että tässä insinööriyössä perehdytään järjestelmän elektroniikkaan, langattomaan tietoliikenteeseen ja 3D-tulostukseen. Samaan projektiin osallistuva tietotekniikan opiskelija Pauli Korhonen keskittyy omassa insinööriyössään järjestelmän ohjelmistokehitykseen ja mekaniikkaratkaisuihin.



## 2 Tiedonkeruujärjestelmän keskusyksikkö

Keskusyksiköllä tarkoitetaan sulautettua järjestelmää, jonka päälle voidaan rakentaa ohjelmistot ja lisälaitteet. Alustavasti lähdettiin liikkeelle siitä, että sekä lennokissa että maa-asemassa käytettäisiin samaa alustaa, mutta kahden eri alustan käyttöä ei kuitenkaan poissuljettu. Valintakriteereitä käyttöön tulevalle alustalle oli useita: pieni koko, laaja tuki eri ohjelmointikielille, pieni virrankulutus, tuki antureille, näytön liittämismahdollisuus videokuvan näyttämistä varten, halpa hinta ja korkea tiedonsiirtokapasiteetti videokuvan siirtoon langattomasti. Myös käyttöympäristö tuo omat haasteensa, sillä järjestelmän tulisi kestää lämpötilavaihteluja, kosteutta ja tärinää.

Keskusyksikön valintaprosessi aloitettiin tutkimalla alan kaupallisia ratkaisuja. Pienoislennokkeihin on markkinoilla saatavilla pieniä langattomia kameroita, jotka kuitenkin soveltuvat heikosti tähän käyttöön. Valmiissa kaupallisissa ratkaisuisissa ongelmia ovat muun muassa videolinkin lyhyt kantama ja heikko tietoturva. Niihin on myös hankala itse kehittää omaa tekniikkaa, koska ratkaisut käyttävät usein suljettuja ohjelmistoja ja laitteistoja.

Valmiit kaupalliset toteutukset tuottivat siis umpikujan, ja muita vaihtoehtoja ryhdyttiin tutkimaan. Lähempään tarkasteluun otettiin pienikokoiset minitietokoneet, jotka nimensä mukaisesti pyrkivät tarjoamaan täysiverisen PC:n ominaisuudet mahdollisimman pienessä paketissa. Minitietokoneessa voidaan ajaa tavallista käyttöjärjestelmää (Windows/Linux), ja siihen voidaan kytkeä lisälaitteita USB-väylän kautta. (1.) Näitä ominaisuuksia hyödyntämällä voitaisiin kehittää oma ohjelmisto videokuvan ja anturidatan käsittelyyn sekä välittää kerätty data USB-väylään liitetyn erillisen radiolinkin kautta maa-asemalle.

Minitietokoneiden soveltuvuuden tutkimusta päätettiin jatkaa. Tutkimuksiin otettiin Intelin kehittämä NUC-minitietokonetuoterperhe, josta on saatavilla useita versioita eri käyttötarkoituksiin. NUC-minitietokoneet ovat kooltaan 115 mm x 111 mm x 50 mm:n luokkaa. Kaikki versiot ovat pituudeltaan ja leveydeltään lähes identtisiä, mutta korkeus vaihtelee eri versioiden välillä. (2.) Alustan käyttö tässä projektissa edellyttää lisälaitteena kameraa, kiihtyvyyssanturia, virransyöttöä ja radiolinkkiä. Tutkimuksessa havaittiin, että mainitut edellytykset täyttyvät. Ongelmaksi tässä alustassa muodostui minitietokoneen usean sadan euron hinta, ja tästä syystä alusta päätettiin hylätä.

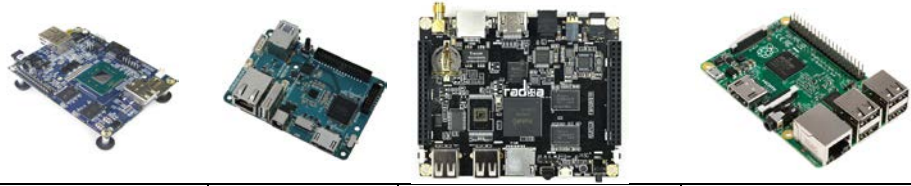
Keskusyksikön etsintää jatkettiin tutkimalla edullisempia minitietokoneita. Markkinoilla on myynnissä opetus- ja prototyypikäyttöön tarkoitettuja luottokortin kokoisia minitietokoneita, joiden kaikki komponentit on rakennettu yhdelle piirilevyille. Ne hyödyntävät matkapuhelimissa käytettyjä komponentteja, minkä ansiosta ne ovat vähävirtaisia ja hinnaltaan edullisempia. Isokokoisista PC:istä tuttujen USB-, Ethernet- ja HDMI-liitäntöjen lisäksi alustoissa on GPIO-liitäntöjä, jotka tarjoavat mahdollisuuden hyödyntää erilaisia tiedonsiirtoväyliä, kuten SPI:tä tai I2C:tä. Tämän tyyppiset kehitysalustat soveltuvat myös oman elektroniikan kehittämiseen, sillä ne eivät yleensä sisällä minikäänlaista kotelointia ja hyödyntävät usein avointa lähdekoodia. (3.)

Alkukevästä 2015 oli saatavilla useita tämän tyyppisiä minitietokoneita. Lähempään tarkasteluun otettiin kaikki tuona ajankohtana saatavilla olleet laitteet. Taulukossa 1 ovat listattuna tutkimuksissa löydetyt laitteet ja niiden ominaisuudet, joilla on merkitystä alustan valinnassa.

Taulukko 1. Minitietokoneiden vertailu (4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11).



Keskusyksikkö	HummingBoard Base	Beaglebone Black	Udo Quad	Banana Pi
Mitat	85 mm x 56 mm	86 mm x 53 mm	110 mm x 85m m	92 mm x 60 mm
Proessori	ARM Cortex-A9	ARM Cortex-A8	Freescale i.MX 6 Quad	ARM Cortex-A7
Liitännät näytölle	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä
Kameratuki (CSI)	kyllä	ei	kyllä	kyllä
Hinta	90 €	60 €	100 €	50 €
Saatavuus	heti	heti	heti	heikko
Muuta huomioitavaa	yhteensopivaa kameraa ei saatavilla	suuri määrä GPIO-liitäntöjä	yhteensopiva Arduino-laajennusten kanssa	yhteensopivaa kameraa ei saatavilla



Keskusyksikkö	MinnowBoard MAX	ODROID-XU4	Radxa Rock Lite	Raspberry Pi 2 model B
Mitat	99 mm x 74 mm	83 mm x 59 mm	100 mm x 80 mm	85 mm x 56 mm
Proessori	64-bit Intel® Atom™ E38xx Series SoC	ARM Cortex-A15 ja Cortex-A7	ARM Cortex-A9	ARM Cortex-A7
Liitännät ulkoiselle näytölle	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä
Kameratuki (CSI)	ei	ei	kyllä	kyllä
Hinta	125 €	65 €	50 €	30 €
Saatavuus	heti	heti	heti	heti
Muuta huomioitavaa		Useita eri malleja saatavilla		

Keskusyksiköksi valittiin lopulta Raspberry Pi 2:n B-malli, joka on Raspberry Pi -tuoteperheen uusin versio. Raspberry Pi -minitietokoneen takana on britannialainen Raspberry Pi -säätio, joka pyrkii edistämään tietotekniikan koulutusta. (12.)

Teknisiltä ominaisuuksiltaan alustat vastasivat hyvin pitkälti toisiaan; yleisin syy valintalistalta karsiutumiseen oli joko liian suuri koko tai alustan kanssa yhteensopivan kameran puuttuminen. Huomioitavaa kuitenkin on, että CSI-kameraväylää käyttävän kameran voi korvata USB-väylää käyttävällä web-kameralla, mutta videokuvan laadullisista syistä ja keskusyksikön heikon suoritintehon vuoksi tätä vaihtoehtoa haluttiin välttää. Valintapäätökseen vaikutti erityisesti Raspberry Pin saavuttama suuri suosio, mistä on merkittävää hyötyä sekä ohjelmisto- että laitteistokehityksessä. Suuri käyttäjäkunta auttaa ongelmien ratkaisussa, koska niihin löytyy usein ratkaisu esimerkiksi Raspberry Pin omilta keskustelupalstoilta. Valinta oli kuitenkin kompromissi, sillä esimerkiksi alustan suorituskyky on melko heikko, mikä aiheuttaa muun muassa viiveitä reaaliaikaisessa videossa. Lisälaitteiden virransyöttö on myös alustalla heikko, ja tähän täytyi kehittää ratkaisu piirilevy-suunnittelussa.

### 3 Langaton tietoliikenneyhteys

Keskusyksikön valinta on vahvasti sidoksissa langattoman tiedonsiirtolinkin valintaan. Ennen keskusyksikön valitsemista täytyy varmistaa, että suunnitellulle alustalle löytyy yhteensopivia radiolinkkejä. Vielä pitkään keskusyksikön valinnan jälkeen harkittiin paluuta suunnittelun ääreen, sillä vaatimuksia täyttävää langatonta linkkiä keskusyksikölle ei lukuisista yrityksistä huolimatta meinannut löytyä. Korkea bittivirta, pitkä kantama, liikkuva kohde ja rajoitettu lähetysteho eivät ole hyvä yhdistelmä hyvälaatuisen ja viiveettömän videovirran toteuttamiseen. Radiolinkin tutkimuksen lopputuloksena todettiin, että mahdollisia toteuttamiskelpoisia vaihtoehtoja oli neljä: WLAN-lähiverkkoyhteys, LTE-teknologia, täysin valmis kaupallinen videolinkki tai analogisen videolinkin ja telemetrialinkin yhdistelmä. Mainituista menetelmistä kaksi viimeistä päätettiin hylätä kuitenkin hyvin pian erittäin korkean hinnan vuoksi. LTE-teknologiaa ja WLAN-lähiverkkoyhteyttä lähdettiin tutkimaan tarkemmin.

#### 3.1 Linkkibudjetti

Radiolinkin validointia varten tehtiin laskelmia käyttäen alla esitettyjä laskukaavoja, joiden avulla voidaan laskea radiolinkin vastaanottama teho eli linkkibudjetti. Laskukaavan muuttujia ovat lähetys- ja vastaanottotehot, antennien vahvistukset ja linkin vaimennukset. (13, s. 15.) Kaava on muotoa

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} - (L_f + L_e) + G_{RX},$$

jossa

$P_{RX}$  on vastaanotettu teho desibelimilliwatteina

$P_{TX}$  on lähettimen lähetysteho desibelimilliwatteina

$G_{TX}$  on lähettimen antennin tuottama vahvistus desibeleinä

$L_f$  on vapaavälivaimennus desibeleinä

$L_e$  on esteiden aiheuttamat vaimennukset (rakennukset, vuoret, ilmakehä yms.)

$G_{RX}$  on vastaanottimen antennin tuottama vahvistus desibeleinä.

Linkkibudjetin laskukaavaa voitiin käyttää hyväksi oikean radiolinkin löytämiseksi. Antennien vahvistukset tai vaimennukset ja pienin mahdollinen vastaanottoteho, jolla radiolinkki toimii, saadaan selville komponenttivalmistajien datalehdistä. Vapaavälivaimennus voidaan ratkaista matemaattisesta kaavasta (13, s. 4), joka on muotoa

$$L_f = 10 \cdot \log \left[ \left( \frac{4\pi \cdot r}{\lambda} \right)^2 \right] \text{ dB} ,$$

jossa

r on radiolinkin kantama metreinä

$\lambda$  on signaalin aallonpituus metreinä.

Radiolinkin kattamalle välille, tässä tapauksessa maa-aseman ja lennokin välille, voidaan olettaa olevan suora esteetön näköyhteys. Tällöin vapaavälivaimennuksen lisäksi muuta radiosignaalin vaimennusta ei juurikaan ole. Vapaavälivaimennus laskettiin Suomessa vapaasti käytettäville ISM-taajuuksille, joita ovat 433 MHz ja 2,4 GHz (14, s. 87; 14 s. 122). Vastaavat lasketut vapaavälivaimennukset viiden kilometrin kantamalla ovat 99 dB ja 114 dB.

### 3.2 WLAN-tiedonsiirtotekniikka

WLAN (Wireless Local Area Network) on yleisesti käytössä oleva IEEE 802.11 -standardia noudattava langattoman lähiverkon tekniikka, josta on saatavilla useita eri versioita. Langattomat lähiverkot toimivat 2,4 GHz:n ja 5,0 GHz:n taajuudella. Yleisesti käytössä oleva 802.11n-versio ylittää teoriassa jopa 600 megabittiin sekunnissa (15, s. 247). Suomessa 2,4 GHz:n taajuudella toimivan laitteen maksimisäteilyteho on 100 mW EIRP (14, s. 122). 802.11-standardi tukee niin sanottua ad hoc -moodia, jossa yhteys muodostetaan suoraan kahden käyttäjän välille ilman erillistä reititintä (16, s. 69–70). Standardi tukee myös suoraan vahvaa salausta.

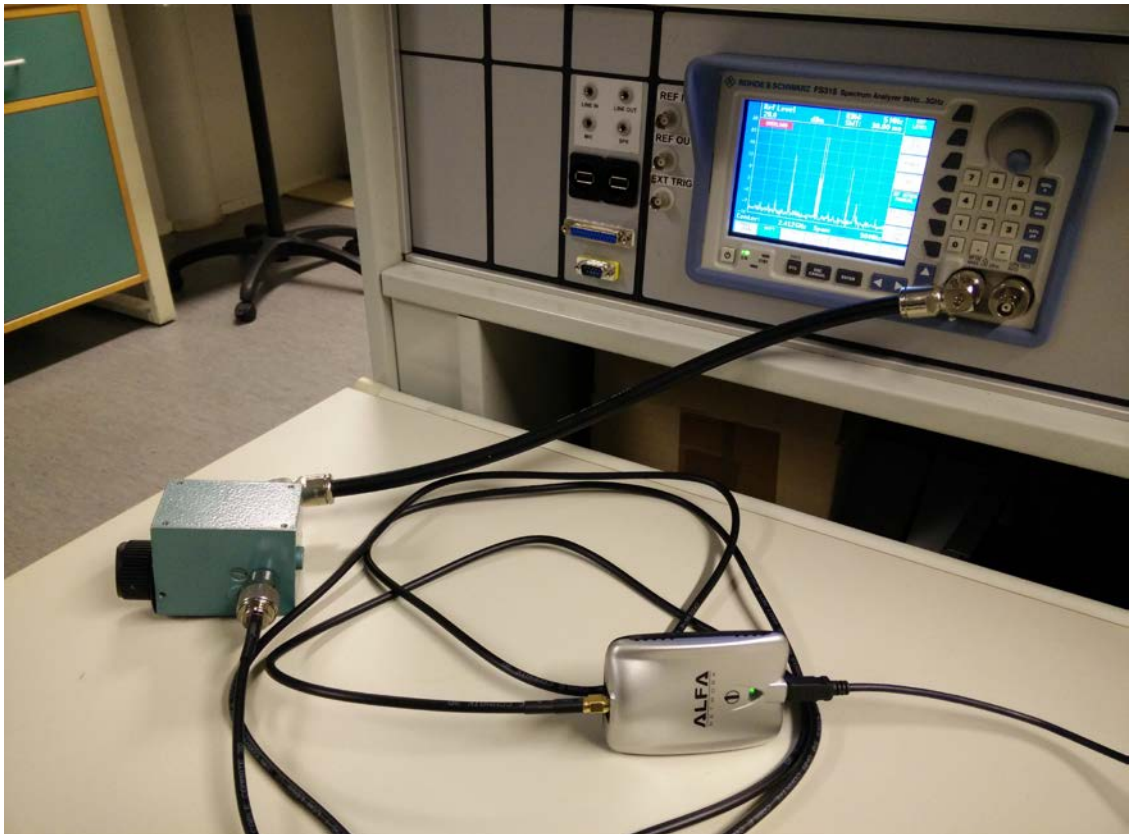
WLAN-standardin hyödyntämistä langattoman videolinkin toteuttamiseen päätettiin tutkia tarkemmin. Radiolinkin valintakriteerit täytyivät hyvän tietoturvan, sallitun taajuusalueen, hyvän yhteensopivuuden, korkean tiedonsiirtokapasiteetin ja edullisen hinnan osalta WLAN:ssa, mutta heikko signaalin kantama asetti haasteita. Heikkoa kantamaa voidaan kuitenkin parantaa nostamalla lähetystehoa ja antennin vahvistuksia, ja siksi WLAN:a päätettiin testata sekä teoriassa että käytännössä.

Aiempien lukuisten kokemusten perusteella voitiin päätellä, että WLAN:n toimintasäde integroiduin antennein varustetuilla laitteilla on alle 100 metriä. Täten tutkimus aloitettiin suoraan laitteilla, joiden lähetysteho on ilmoitettu huomattavasti suuremmaksi. Testipenkkiin otettiin Alfa AWUS036H (kuva 1), joka tukee 802.11b/g-standardia 1000 mW:n lähetysteholla (17). Testeihin otettiin myös Alfa AWUS036NHR V2, joka tukee nopeampaa 802.11n-standardia 2000 mW:n teholla (18). Molemmissa laitteissa on RP-SMA-liitin, johon voidaan liittää ulkoinen antenni kuuluvuuden parantamiseksi.



Kuva 1. Alfa AWUS036H-WLAN-moduuli.

Ennen laitteiden kenttätestausta ja teoreettisen kantaman laskemista haluttiin varmistua, että valmistajan ilmoittama lähetysteho pitää paikkaansa. Laitteen lähetysteho mitattiin spektrianalysaattorilla, joka piirtää näytölle kuvaajan mitatuista arvoista. Data esitetään näytöllä siten, että x-akselilla on taajuus ja y-akselilla on mitattu teho desibelimilliwatteina. Spektrianalysaattorille (kuva 2) valmistaja ilmoittaa laitteen mittaamaksi maksimisäteilytehoksi 33 dBm. Tästä syystä mittauksessa käytettiin vaimenninta, jonka avulla voitiin vaimentaa mitattavaa signaalia 1–10 dB.



Kuva 2. Lähetystehon mittaaminen spektrianalysointilaitteella.

Lähetystehon mittaaminen osoittautui haastavaksi, koska WLAN:n havaittiin käyttävän hajaspektriä erittäin lyhyillä pulseilla. Kaksikymmentä megahertsiä leveän taajuuskaistan harvointi spektrianalysointilaitteella on hidasta, mutta ajan kanssa nämä lyhyet pulssit saatiin mitattua. Näin mittaustulosten perusteella voitiin laskea vaimentamaton signaalivoimakkuus ja todeta, että valmistajan ilmoittamat lähetystehot todellakin pitävät paikkansa. Samaa mittausta yritettiin ensiksi Marconin tehomittarilla (kuva 3), mutta mittaus epäonnistui juuri mainitun hajaspektrin vuoksi.



Kuva 3. Lähetytshon mittaus Marconin tehomittarilla.

Aiemmin esitetyillä kaavoilla voidaan laskea radiolinkin vastaanottama teho. Valmistajan sivuilta löytyy tieto, että radiolinkki toimii, kun vastaanottava pää vastaanottaa vähintään  $-91$  dBm:n tehon (17). Kun käytössä on  $1000$  mW:n lähetysteho ja molemmat antennit ovat ympärisäteileviä, vastaanotettu teho  $P_{RX}$  viiden kilometrin päässä on  $-84$  dBm, eli teoriassa radiolinkin pitäisi toimia moitteettomasti. Todellisuudessa radiosignaalin etenemisessä kuitenkin esiintyy häiriöitä, ja tästä syystä radiolinkin etenemisalueelle kannattaa laskea ainakin  $10$  dB lisävaimennusta. Tällöin tulokseksi saadaan  $-94$  dB, eli radiolinkki ei enää toimi viiden kilometrin päähän, vaan reilun kolmen kilometrin päähän.

Samaa koeasetelmaa testattiin myös kentällä. Testaus suoritettiin siten, että kahden kannettavan tietokoneen välille luotiin ad hoc -verkko ja radiolinkkiä rasiitettiin välittämällä sen kautta videokuvaa. Testauksessa edettiin siten, että toinen yksikkö eteni peltoaukeata säilyttäen näköyhteyden niin kauan, kunnes radioyhteys katkesi ja sitä ei enää voitu muodostaa uudelleen. Lopputuloksena todettiin, että yhteys toimi tyydyttävästi kilometrin päähän, minkä jälkeen yhteydessä esiintyi satunnaisia häiriöitä suu-



remmilla etäisyyksillä. Havaittiin myös, että yhteyden uudelleenmuodostus vaikeutui yli kilometrin etäisyydellä, mutta yhteyden uudelleenmuodostuksen jälkeen voitiin saavuttaa pidempi toimintasäde.

Yhteyden teoreettinen toimintasäde oli siis noin kolme kilometriä, mutta käytännössä se toimi testausympäristössä vain hieman yli kilometrin säteellä. Käytetyt antennit olivat ympärisäteileviä piiska-antenneja, eli niitä kohdistamalla voitaisiin saavuttaa huomattavasti pidempi kantama. Kun ajatellaan radiolinkin tulevaa käyttöympäristöä, kohdistetut antennit eivät kuitenkaan ole hyvä ratkaisu liikkuvassa kohteessa. Automaattista antennin seuranta harkittiin ratkaisuksi, mutta siihen ei kuitenkaan ryhdytty, koska yhteyden katketessa antenni on mahdotonta kohdistaa oikeaan suuntaan.

Radiolinkin teoreettinen kantama laskettiin uudelleen tehokkaammalle 2000 mW:n WLAN-moduulille. Huomioiden 10 dB:n lisävaimennus ja käyttäen ympärisäteileviä antenneja linkin pitäisi laskelmien mukaan toimia noin viiteen kilometriin saakka. Kenttätestien vastaava tulos kuitenkin jäi noin 1,5 kilometriin. Myös radiolinkin luotettavuus muodostui ongelmaksi. Yhteys menetettiin edelleen usein ja yhteyden uudelleenmuodostus saattoi kestää useita kymmeniä sekunteja. Linkin laatua ja luotettavuutta voitaisiin parantaa nostamalla vahvistusta ja lähetystehoa, mutta tätä ei katsottu riittäväksi parannukseksi. Täytyy myös muistaa, että säteilytehon nostaminen yli 100 milliwattiin on Viestintäviraston säädösten vastaista. Pitkän harkinnan jälkeen todettiin, ettei radiolinkin kehitystyötä WLAN:n parissa kannata jatkaa.

### 3.3 LTE-mobiiliverkkoteknologia

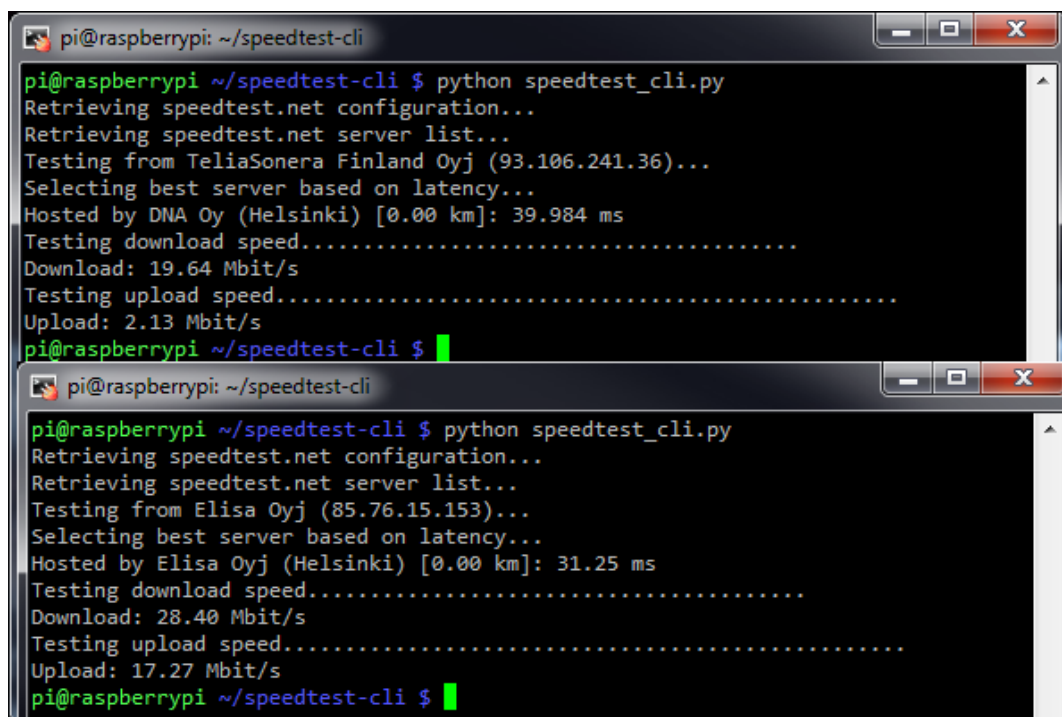
Koska WLAN-radiolinkki osoittautui lopulta toimimattomaksi ratkaisuksi, tilalle oli löydettävä vaihtoehtoinen radiotekniikka, joka palvelisi paremmin liikkuvien yksiköiden välistä käyttöympäristöä. 3G- ja 4G-verkot on suunniteltu nimenomaan tällaiseen käyttöön, ja tämän edun ansiosta verkkoteknologian hyödyntäminen tässä projektissa päätettiin ottaa lähempään tarkasteluun.

Tätä dokumenttia kirjoitettaessa oli saatavilla sekä kolmannen (3G) että neljännen sukupolven verkkoa (4G) hyödyntäviä päätelaitteita. Molempia verkkoja tutkittiin tarkemmin, sillä kirjoitushetkellä 3G-verkon kuuluvuus oli parempi kuin 4G-verkon, kun vertailtiin eri operaattoreiden kuuluvuuskarttoja (19; 20; 21). Kolmannen sukupolven verkkoteknologian uusin versio, DC-HSDPA, kykenee jopa 42 megabitin latausnopeuteen ja

jopa 11 megabitin lähetysnopeuteen (22). Vastaavasti 4G-verkon LTE-teknologian (Long Term Evolution) kahdeksas julkaisu kykenee vielä korkeampaan 300 megabitin vastaanottonopeuteen ja 75 megabitin lähetysnopeuteen (23).

Suomessa on saatavilla kolmen eri operaattorin tarjoamia 3G- ja 4G-liittymiä, jotka toimivat toisista riippumattomissa verkoissaan. Kaikki operaattorit kehuvat mainospuheissaan liittymäänsä nopeiksi ja verkkojaan laajoiksi, mutta tätä haluttiin testata käytännössä. Verkon tiedonsiirtokapasiteetti ja viiveet ovat reaaliaikaisen videon kannalta kaikista kriittisimpiä tekijöitä, ja niitä pidettiin erityisesti silmällä tutkimuksessa. Hyvälaatuisen ja välttävän laatuksen videokuvan bittivirran suuruus mitattiin ja vastaaviksi arvoiksi saatiin kuusi megabittiä sekunnissa ja yksi megabitti sekunnissa. Näitä arvoja verrattiin operaattorin verkon tuottamaan tiedonsiirtokapasiteettiin.

Kenttätestauksessa kokeiltiin sekä 3G- että 4G-verkkoja. Testaus tehtiin vaihtelevina kellonaikoina pääkaupunkiseudulla. Verkon kaistanleveyden mittaamiseen käytettiin speedtest.net-verkkopalvelua, joka kertoo nopeuden lisäksi verkon vaste-ajan. Kuvassa 4 näytetään tyypillinen nopeustestin tulos. Ylempi testi on suoritettu TeliaSoneran 3G-verkolla ja alempi Saunalahden 4G-verkolla. Merkittävin ero verkoilla on lähetysnopeudessa.



```

pi@raspberrypi: ~/speedtest-cli
pi@raspberrypi ~/speedtest-cli $ python speedtest_cli.py
Retrieving speedtest.net configuration...
Retrieving speedtest.net server list...
Testing from TeliaSonera Finland Oyj (93.106.241.36)...
Selecting best server based on latency...
Hosted by DNA Oy (Helsinki) [0.00 km]: 39.984 ms
Testing download speed.....
Download: 19.64 Mbit/s
Testing upload speed.....
Upload: 2.13 Mbit/s
pi@raspberrypi ~/speedtest-cli $

pi@raspberrypi: ~/speedtest-cli
pi@raspberrypi ~/speedtest-cli $ python speedtest_cli.py
Retrieving speedtest.net configuration...
Retrieving speedtest.net server list...
Testing from Elisa Oyj (85.76.15.153)...
Selecting best server based on latency...
Hosted by Elisa Oyj (Helsinki) [0.00 km]: 31.25 ms
Testing download speed.....
Download: 28.40 Mbit/s
Testing upload speed.....
Upload: 17.27 Mbit/s
pi@raspberrypi ~/speedtest-cli $

```

Kuva 4. Mobiilidatayhteyden tiedonsiirtokapasiteetin testaus speedtest.net-skriptillä.

WLAN- ja LTE-verkkojen testaukset suoritettiin myös projektia varten hankitulla kuusirotorisella kopterilla, jonka tarkoitus oli varmistaa radiolinkin toimivuus tulevaisuuden käyttöolosuhteissa. Kantaman osalta päädyttiin samaan lopputulokseen: WLAN:lla radiolinkin kantama jäi odotetusti alle kilometriin, ja operaattorin verkolla kantama on teoriassa operaattorin ilmoittaman kuuluvuuskartan mukainen. LTE-verkon testauksessa kuitenkin havaittiin ongelmia operaattorin verkon toimivuudessa, jos lentokorkeutta nostettiin satoihin metreihin. Tällöin verkon signaali heikkenee merkittävästi. Selityksenä tähän voi olla antennien suuntaus: tukiasemien antennit on yleensä asennettu muutamankymmenen metrin korkeuteen, mutta antennit on suunnattu alaspäin.

Operaattoriksi valittiin Elisan verkossa toimiva Saunalahti, kun eri operaattoreiden kuuluvuuskarttoja tutkittiin. Tiedettiin jo etukäteen, millä alueella järjestelmää enimmäkseen tulnaisiin käyttämään. Tällä alueella ainoastaan Elisan verkko kattaa koko alueen. Verkon nopeusmittauksissa todettiin, että verkon nopeus riittää yleensä reaaliaikaisen videokuvan välittämiseen, mutta ajoittain verkon ruuhkautuminen aiheuttaa viiveitä videokuvaan. LTE-teknologia osoittautui tähänastisissa testeissä parhaaksi vaihtoehdoksi, ja tästä syystä se valittiin radiolinkiksi.

4G-päätelaitteeksi valittiin Telewellin USB-väylää hyödyntävä 4G-modeemi. Valinta kohdistui Telewelliin, koska eri 4G-modeemien ja Raspberry Pin välisessä yhteensopivuustestauksessa se osoittautui luotettavimmaksi päätelaitteeksi. 4G-USB-modeemia ohjataan avoimen lähdekoodin wvdial-ohjelmistolla, joka käskyttää päätelaitetta suorilla AT-käskyillä sille määritetyn konfiguraatitiedoston mukaisesti. Konfiguraatitiedostossa määritellään muun muassa operaattorikohtaiset asetukset, kuten APN-osoite ja mahdolliset käyttäjätunnukset. Wvdial-ohjelmisto muodostaa 4G-päätelaitteen ja käyttöjärjestelmän välille rajapinnan, jonka kautta laite on yhteydessä internetiin.

## 4 Piirilevy-suunnittelu

PCB-suunnittelulla (Printed Circuit Board) tarkoitetaan oman piirilevyn suunnittelua ja jyrkimistä. Piirilevy-suunnittelun avulla voitiin tehdä oma piirilevy, jonka päälle voitiin rakentaa projektissa tarvittavat anturit ja niiden vaatimat lisäkomponentit. Ratkaisuun päädyttiin, koska tällä tavoin voitiin tarkasti valita halutut komponentit ja jättää tarpeettomat ominaisuudet pois. Ratkaisu säästää tilaa ja rahaa, ja sitä on myös helppo monistaa tarvittaessa. Koska molempiin yksiköihin (maa-asema ja lennokki) oli valittu samat keskusyksiköt, piirilevyä lähdettiin suunnittelemaan siltä pohjalta, että sama piirilevy voitaisiin räätälöidä eri komponenteilla sopivaksi molempiin yksiköihin.

### 4.1 Piirilevyn prototyyppi

Piirilevyn suunnitteluvaiheen alussa selvitettiin, mitä ominaisuuksia siihen halutaan. Raspberry Pi tarjoaa liitännät suoraan kameralle ja USB-lisälaitteille, mutta siitä puuttuu asentoanturi. Testauksissa myös havaittiin, että Raspberry Pin USB-virransyöttö on melko heikko, mikä aiheuttaa radiolinkin epävakautta. Säädeltyä sähkönsyöttöä puuttuu keskusyksiköstä kokonaan. Juuri näitä puutteita paikattiin oman piirilevyn avulla.

Ohjelmistokehityksen kannalta kriittisimmät komponentit valittiin ensin, jotta suunnittelutyö ei hidastaisi ohjelmiston kehitystä. Asentoanturiksi valittiin ADXL345-kiihtyvyyssanturi, joka käyttää digitaalista SPI-väylää anturidatan välittämiseen keskusyksikölle (24, s. 15). Samaan väylään kytkettiin myös MCP3004-AD-muunnin, jonka tarkoitus on mitata akulta tulevaa jännitettä. Molempien komponenttien datalehtiä tutkimalla voitiin selvittää, tarvitseeko komponentti joitakin lisäkomponentteja toimiakseen oikein. ADXL345-kiihtyvyyssanturin teknisessä dokumentissa suositellaan häiriöiden vähentämiseksi yhden mikrofaradin tantaalikondensaattoria ja 0,1 mikrofaradin keramiikkondensaattoria (24, s. 28). Nämä komponentit kytketään rinnan lähelle ADXL345-kiihtyvyyssanturin sähkönsyöttöä.

Akun jännitteen mittaaminen MCP3004-AD-muuntimella ei onnistu suoraan. Akulta tuleva jännite on jotakin 10–15 voltin väliltä riippuen akun varaustasosta, mutta datalehdessä AD-muuntimen jännitteen mittaustulos on 0,25–3,3 V (25, s. 2). Ongelman ratkaisemiseksi komponentin mittauspään ja akun plusnavan välille on laskettava vastusten arvot ja rakennettava niiden mukaisesti jännitteenjakaja. Vastusten arvot voidaan ratkaista johtamalla niille kaava käyttäen apuna Ohmin lakia:

$$V_{in} = (R_1 + R_2) * I$$

$$V_{out} = I * R_1$$

$$I = \frac{V_{in}}{R_1 + R_2}$$

$$V_{out} = V_{in} * \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

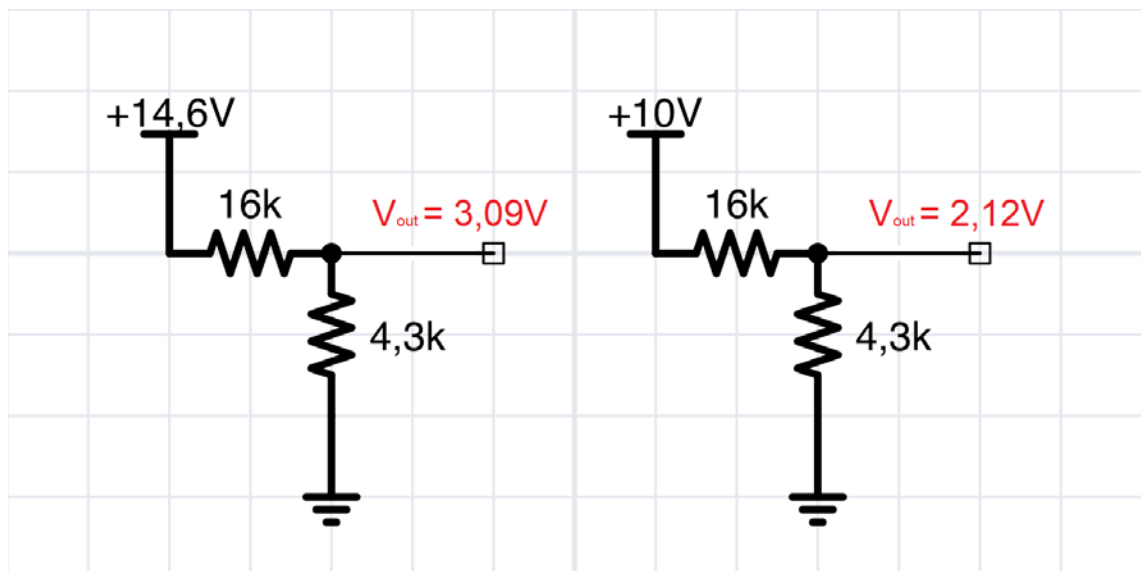
jossa

$V_{out}$  on AD-muuntimen mittapäähän tuleva jännite voltteina suhteessa maahan

$V_{in}$  on akulta tuleva jännite voltteina suhteessa maahan

$R_1$  ja  $R_2$  ovat vastusten arvot ohmeina.

Tiedetään, että akun jännite  $V_{in}$  on lähes tyhjänä vähintään 10 V ja täyteen ladattuna enintään 14,6 V.  $V_{out}$ :n tulisi asettua lähes tyhjällä akun jännitteellä yli 0,25 volttiin ja täydellä akun jännitteellä alle 3,3 volttiin. Vastukset  $R_1$  ja  $R_2$  voidaan ratkaista hyödyntämällä Excel-taulukkolaskentaohjelmaa. Tällöin vastuksen  $R_1$  arvoksi tulee 16 kilo-ohmia ja  $R_2$ :n arvoksi 4,3 kilo-ohmia (kuva 5).



Kuva 5. Jännitteenjakajan piirikaavio.

Akun noin 12 voltin jännite on liian korkea suoraan syötettäväksi keskusyksikölle. Jännitettä on alennettava viiteen volttiin, jotta sitä voidaan syöttää Raspberry Pille. Alun perin tarkoitus oli käyttää yksinkertaista ja hyvin yleistä 7805-regulaattoria, joka alentaa

jännitettä hukkaamalla ylijännitteen lämmöksi. Koska virrankulutus on noin yhden ampeerin luokkaa koko järjestelmällä, lämpöhukka olisi laskettavissa kaavalla

$$P = UI,$$

$$7V * 1A = 7W$$

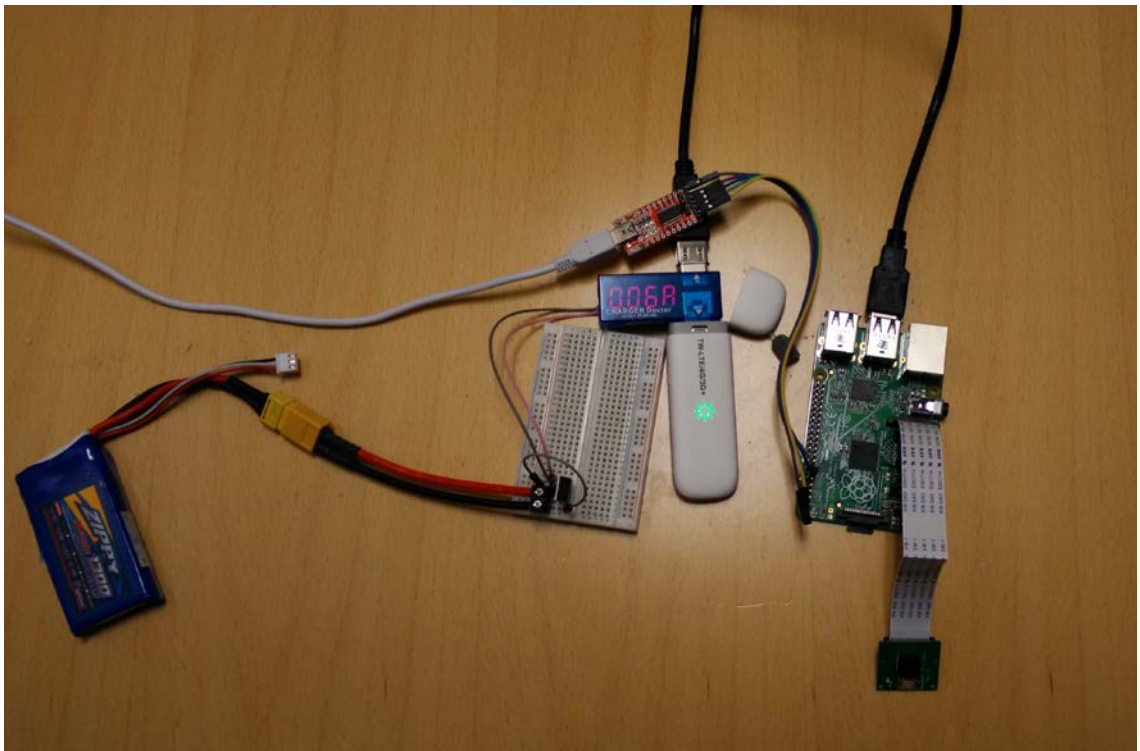
jossa

$P$  on teho watteina

$U$  on jännite voltteina

$I$  on virta ampeereina.

Komponentin hukkalämmöntuotto olisi siis noin 7 wattia. Suuresta lämpöhukasta huolimatta järjestelmää kuitenkin kokeiltiin (kuva 6). Regulaattori kuumentui odotetusti testauksen aikana ja sen todettiin vaativan niin suuren jäähdytyssiilen, ettei ratkaisua voida käyttää.



Kuva 6. Jänniteregulaattorin prototyyppi koekytentälevyllä.

Jänniteregulaattorin tilalle valittiin hakkurijännitteenmuunnin. Hakkurin etuna on tavanomaiseen jänniteregulaattoriin verrattuna parempi hyötysuhde, mutta haittana ovat lisäkomponentit. LM2696-5.0:n hakkurin teknisessä dokumentissa ilmoitetaan hyötysuhteeksi 80 % kolmen ampeerin kuormalla (26, s. 6). Yhden ampeerin kuormalla tietoa ei löydy, mutta 80 %:n hyötysuhteella laskettuna lämpöhukka on noin 2 wattia. Saavutettava hyöty suhteessa haittaan on merkittävä, ja tästä syystä hakkuri ja sen lisäkomponentit päätettiin sisällyttää piirilevylle.

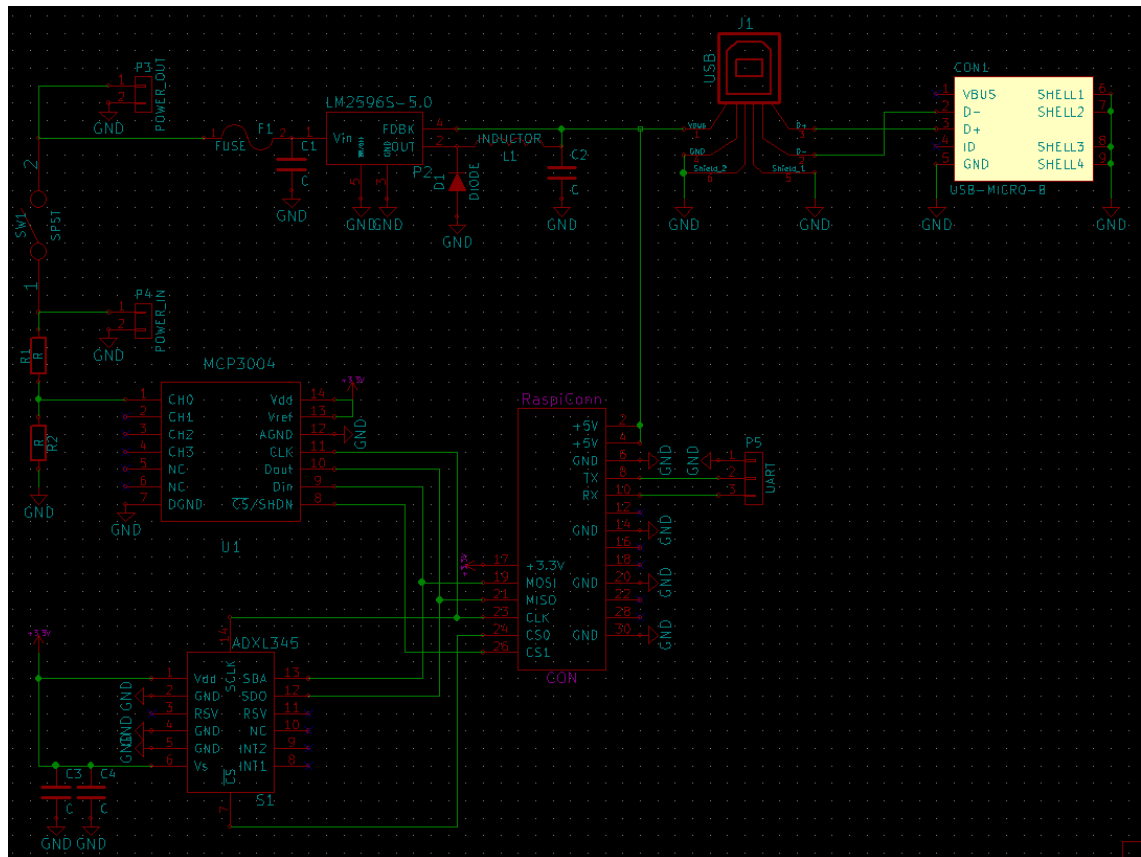
Hakkurin teknisen dokumentin mukaan komponentti vaatii toimiakseen kelan, kaksi elektrolyyttikondensaattoria ja diodin (26, s. 9). Lisäkomponenttien arvot tulee mitoittaa kuorman mukaan. Järjestelmän suurimmaksi mahdolliseksi kuormaksi arvioitiin 1,5 ampeeria, minkä mukaan komponentit mitoitettiin. Tekninen dokumentti sisältää tarkat taulukot, joiden mukaan oikeat komponentit voitiin valita (26, s. 11–12).

Radiolinkin testauksessa havaittiin, että radiolinkki saattaa yllättäen kaataa keskusyksikön. Kaatumisen syyksi osoittautui liian heikko virransyöttö, ja tämän vuoksi piirilevylle asennettiin mikro-USB:n tuloliitäntä ja USB-A-lähtöliitäntä. USB:n datapinnit ja maadoitus yhdistettiin suoraan toisiinsa, mutta jännitteensyöttö tuotiin suoraan hakkurilta. Lisäksi piirilevylle tuotiin ylimääräinen UART-liitäntä ohjelmiston testaamista varten.

## 4.2 Piirilevyn CAD-suunnittelu

Piirilevy suunniteltiin käyttäen avoimen lähdekoodin KiCad-ohjelmistopakettia, joka on saatavilla Windows-, Linux- ja OSX-käyttöjärjestelmille. KiCad on CAD-ohjelmistopaketti (CAD = Computer Aided Design), joka koostuu useasta ohjelmasta, joiden avulla piirilevyn suunnittelussa edetään. (27.)

Kun piirilevyn suunnittelu aloitettiin, aluksi suunniteltiin piirikaavio Eeschema-ohjelmalla (kuva 7). Piirikaaviossa määritellään tarkasti, miten komponentit ovat yhteydessä toisiinsa. Ohjelma sisältää erittäin laajan kirjaston valmiita komponentteja, mutta ohjelmasta puuttui muutamia tässä projektissa käytetyistä komponenteista. Ohjelma kuitenkin tarjoaa mahdollisuuden lisätä kirjastoon itse tehtyjä komponentteja. Kun piirikaavio on valmis, ohjelma luo piirikaaviosta tiedoston, jota voidaan käsitellä seuraavassa ohjelmassa. (28.)

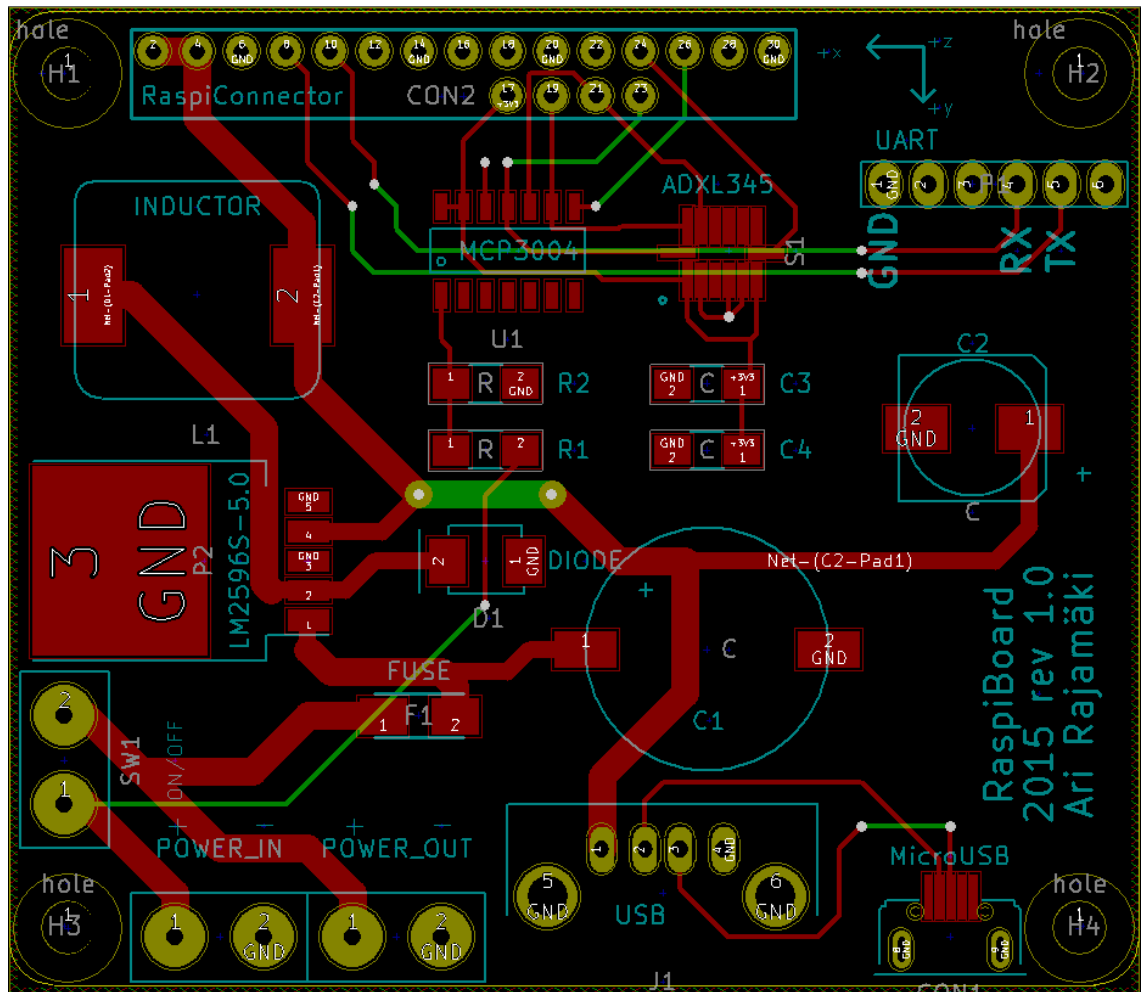


Kuva 7. Langattoman tiedonkeruujärjestelmän piirilevyn piirikaavio.

Aiemmin Eeschema-ohjelmassa luotu tiedosto avattiin seuraavaksi CvPcb-ohjelmassa. Ohjelma listaa piirikaaviossa käytössä olevat komponentit ja ehdottaa automaattisesti komponentteja vastaavia jalanjälkiä (engl. footprint). Kirjasto on varsin laaja, mutta sopivan jalanjäljen puuttuessa on mahdollista tehdä myös oma jalanjälki. (29.)

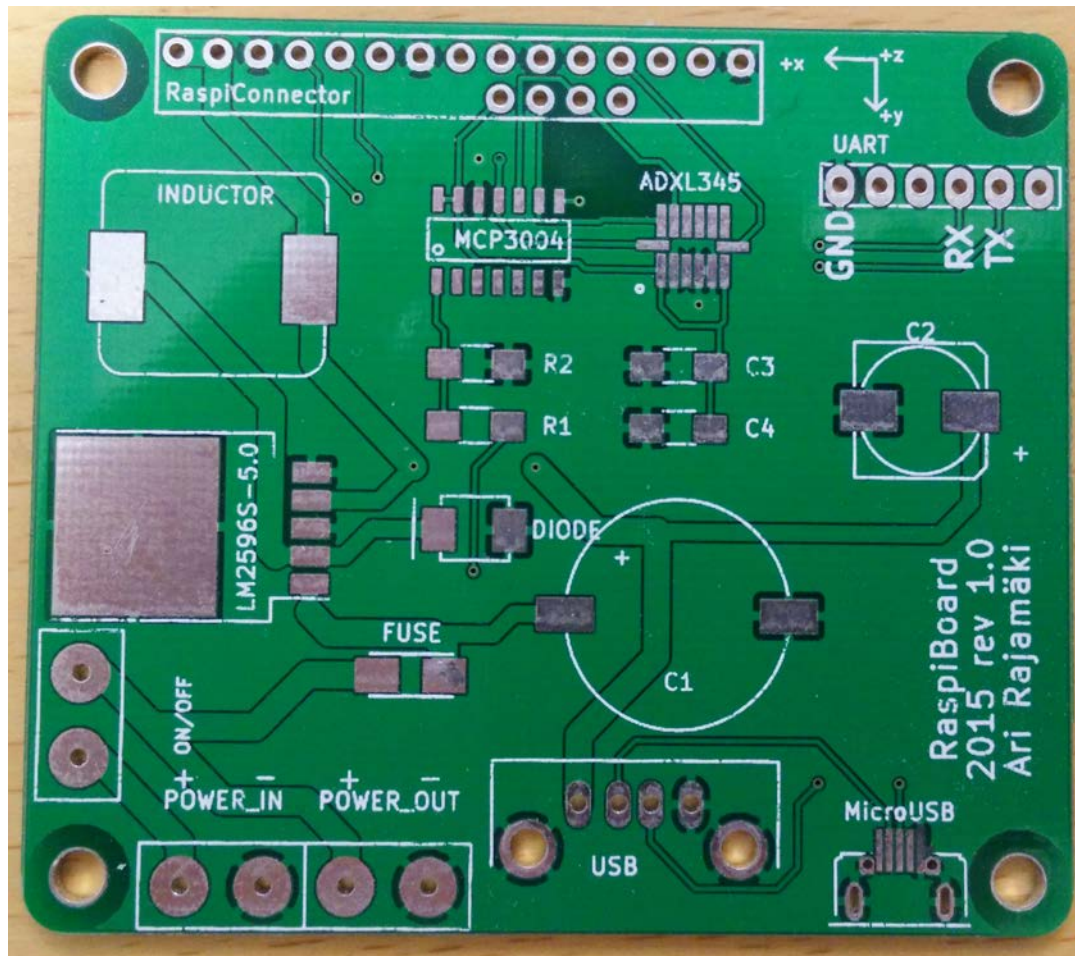
Kun komponentteja vastaavat jalanjäljet oli valittu, seuraavaksi piirilevysuunnitelmaa jalostettiin PcbNew-ohjelmalla (kuva 8). Ohjelmassa sommitellaan komponentit halutuille paikoilleen ja niiden välille piirretään juovat. Tässä vaiheessa tarkistettiin piirilevyvalmistajan antamat tekniset tiedot, joista selviävät muun muassa asetetut rajat piirilevyn koolle ja vähimmäismitat rei'ille ja juoville. Lopuksi piirilevyn pinnalle lisätään silkkipainokerros (engl. silkscreen), johon voidaan kirjoittaa ja piirtää kuvia. Silkkipainokerroksen avulla visualisoidaan käytettäviä komponentteja ja ilmoitetaan komponenttien arvoja. (30.)





Kuva 8. PcbNew-ohjelmalla piirretty piirilevy.

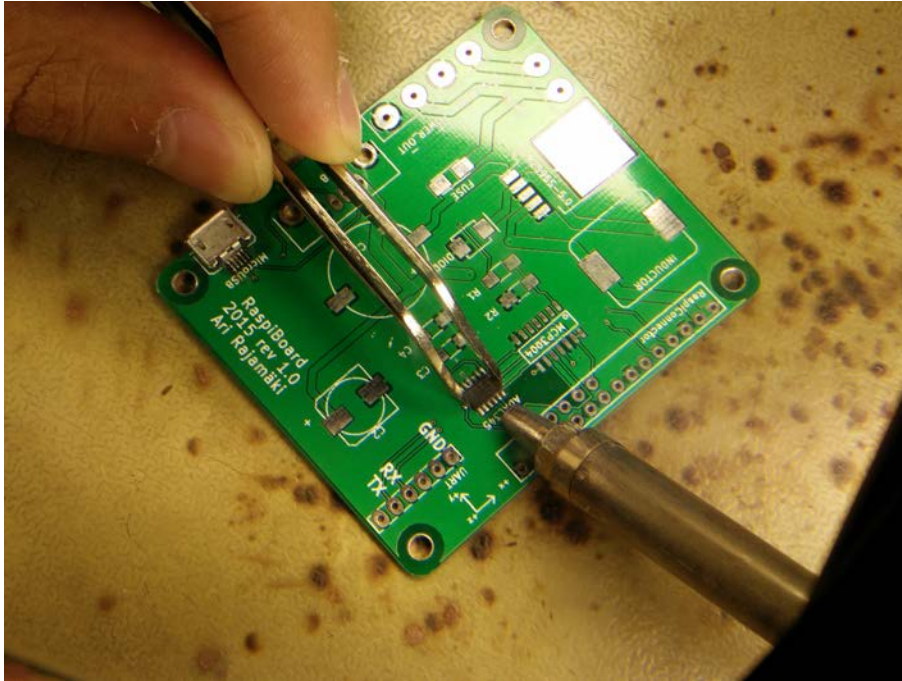
Lopuksi Pcbnew-ohjelmistossa luotiin lopulliset gerber-tiedostot, jotka ovat alan standardi piirilevyn valmistuksessa. Ohjelman luomat tiedostot tarkistettiin vielä GerbView-ohjelmalla, jossa arvioidaan suunnittelutyön lopputulosta. Tämän jälkeen tiedostot lähetettiin yhdessä paketissa piirilevyn valmistajalle, joka jynsi piirilevyt ja toimitti ne postitse muutamassa päivässä (kuva 9).



Kuva 9. Piirilevy ilman komponentteja.

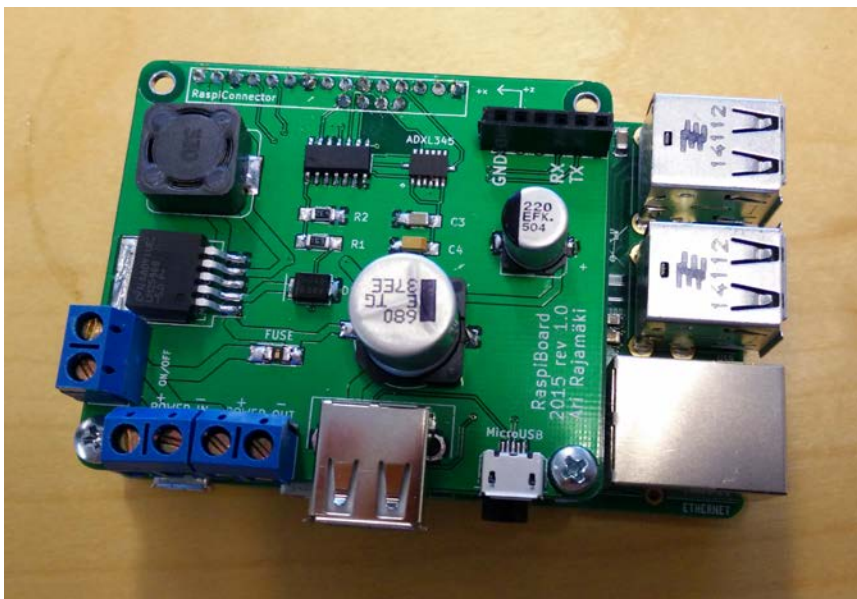
#### 4.3 Piirilevyn kokoonpano ja testaus

Seuraavaksi piirilevyvalmistajalta saapuneisiin piirilevyihin juotettiin komponentit. Suurin osa komponenteista on pintaliitoskomponentteja, ja yleinen ohje on, että juotostyö kannattaa aloittaa pienimmistä komponenteista. Mikropiireistä vaikein juottaa oli ADXL345-kiihtyvyyssanturi, jossa liitospinnit sijaitsevat piirin alla. Sen juottamiseksi sekä komponentin liitäntöihin että piirilevyn jalanjälkeen täytyi ensin esijuottaa hieman tinaa. Tämän jälkeen komponentti asetettiin piirilevylle, ja se altistettiin kuumalle ilmapirrille (kuva 10). Juotos suoritettiin käyttämällä kuumailmapuhallinta ja apuna juoksutetta, joka pidättelee komponenttia juotostyön ajan samalla helpottaen tinaa levittymistä ja kiinnittymistä.



Kuva 10. ADXL345-kihtyvyyssanturin juottaminen piirilevylle kuumailmapuhaltimella.

Juotustyön jälkeen oli piirilevyn testauksen aika. Testauksessa kokeiltiin antureita yksinkertaisella ohjelmistolla, joka kutsuu SPI-väylän orjalaitteita. Kaikki komponentit toimivat moitteetta lukuun ottamatta radiolinkin liittimen kylmäjuotosta, joka aiheutti häiriöitä radiolinkin toiminnassa. Kuvassa 11 on valmis piirilevy, keskusyksikkö Raspberry Pi on liitetty piirilevyn alapintaan.



Kuva 11. Valmis piirilevy komponentteineen.

## 5 Videolinkki

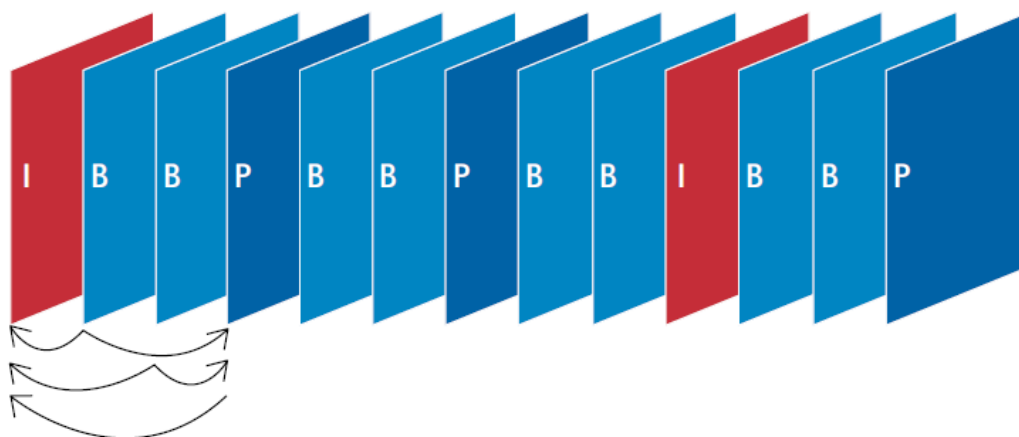
Tilaajan toivomuksena oli, että videovirta lennokilta maa-asemalle olisi mahdollisimman hyvälaatuinen ja vähäviiveinen. Tavoitteen saavuttamiseksi tutkittiin nopeita videon pakkaus- ja purkukoodekkeja ja vähäviiveisiä tiedonsiirtoprotokollia.

Ensiksi on hyvä ymmärtää, mistä kaikista tekijöistä viive muodostuu. Suurin osa viiveistä aiheutuu videovirran prosessoinnista, joka vaatii datan tallentamista väliaikaiseen muistiin (engl. buffer). Väliaikaista muistia tarvitaan vaihtelevan kaistanleveyden kompensointiin. Vaihteleva kaistanleveys puolestaan johtuu radiolinkin vaihtelevasta laadusta. (31.)

Kun kamera kuvaa jotakin tapahtumaa, se tallentuu CMOS-videokennon kautta jälkikäsiteltäväksi välimuistiin pakkausta varten. Kompressoinnin jälkeen videovirta lähetetään verkon yli. Video vastaanotetaan purkuvälimuistiin, joka on välimuisteista viiveen kannalta merkittävin, sillä sen pituus voi olla millisekunneista useisiin sekunteihin. Vastaanoton välimuistista pakattu videovirta siirtyy purettavaksi, minkä jälkeen videovirta on valmis esitettäväksi käyttäjän näytöllä. Tämä tapahtumaketju aiheuttaa suurimman osan viiveistä, joita voidaan kuitenkin kompensoida muuttamalla videovirran laatua ja päivitysnopeutta. (31.)

Viiveeseen, videon laatuun ja videovirran vaatimaan kaistanleveyteen voidaan vaikuttaa myös pakkaustekniikan valinnalla. Videovirran pakkaus on välttämätön, koska ilman sitä videovirran vaatima kaistanleveys olisi liian suuri radiolinkin välitettäväksi. Pakkaustekniikoita on saatavilla useita, mutta tähän järjestelmään soveltuvia niitä on kaksi, H264 ja MJPEG. (31.)

H264-pakkaustekniikka perustuu videovirrassa olevien yksittäisten kuvien vertailuun, jossa pakkausalgoritmi yhdistää kuvien välillä esiintyvät samat pikselit. H264-pakkauksessa on kolme erityyppistä kuvaa: I-kuva, P-kuva ja B-kuva (kuva 12). I-kuva on tavallinen pysäytetty kuva videovirrassa. P-kuva sisältää ainoastaan muutokset edelliseen I-kuvaan verrattuna. B-kuvassa yhdistyvät edellisen kuvan ja tulevan kuvan muutokset. Tekniikan avulla voidaan säästää huomattava määrä kaistaa, koska liikkuvassa kuvassa esiintyy vierekkäisten kuvien välillä runsaasti samankaltaisuuksia. (32, s. 5.)



Kuva 12. Videovirran I-, B- ja P-kuvien tyypillinen esiintyminen (32, s. 5).

Järjestelmän keskusyksikkö Raspberry Pi tukee videovirran H264-pakkauksen laitteistopurkua ja -pakkausta. Tuen avulla säästetään prosessorin laskentakapasiteetin kuluttamiselta. (33.) Videokuvaa verkon yli kokeiltiin H264-pakkauksella kolmella eri videon lähetysohjelmistolla. Videon vastaanottoon käytettiin OMXPlayer-nimistä ohjelmistoa, joka toimitetaan Raspbian-jakeluversion mukana.

VLC (VideoLAN Client) on avoimen lähdekoodin ohjelmisto, josta on saatavilla komentorivipohjainen VLC-server-versio videovirran lähetystä varten (34). Videokameralta tuleva videovirta ohjataan VLC-ohjelmistolle, joka tarjoilee videokuvaa verkon kautta asiakkaille. Videovirtaa voidaan katsoa usealta eri päätteeltä samanaikaisesti, koska VLC-ohjelmisto luo käynnistyessään keskusyksiköstä palvelimen, johon voidaan internetin kautta yhdistää. Testauksessa tämä videokuvan siirtomenetelmä todettiin jotenkuten toimivaksi, mutta ongelmaksi muodostui vaihteleva viive ja kuvan vääristymät. Nämä ongelmat johtuivat todennäköisesti radiolinkin vaihtelevasta laadusta. Videokuvassa esiintyi ajoittain vääristymiä ja virheitä, koska jokin videovirran kuvista korruptoitui tiedonsiirron aikana. Jos korruptoitunut kuva sattui olemaan I-kuva, myös kaikki sen jälkeen tulevat kuvat vääristyivät, koska kuten edellä mainittiin, pakkausalgoritmi vertaa P- ja B-kuvia tässä tapauksessa korruptoituneeseen I-kuvaan. Videokuva korjaantuu ennalleen vasta, kun seuraava ehjä I-kuva vastaanotetaan.

H264-pakkausta päätettiin testata käyttäen yksinkertaistettua ratkaisua, jossa käännettiin tarvittavat ohjelmistot itse. Menetelmässä käytettiin ainoastaan videon välityksen kannalta välttämättömiä ohjelmistokomponentteja, mikä mahdollisti paremman kontrollin videon välitysprosessissa. Raspbian-jakeluversion tarjoaa avoimen lähdekoodin, jon-

ka voi kääntää itse ohjelmaksi, jota hyödynnetään videovirran purkamisessa vastaanotopäässä. Kameralta tuleva videokuva ohjattiin suoraan TCP- tai UDP-putkeen käyttäen nc-nimistä ohjelmaa. Vastaanotopäässä nc-ohjelma ohjaa vastaanotetun datan suoraan juuri mainitulle itse käännetylle ohjelmistolle. Koska ylivoimaisesti suurin viiveen aiheuttaja on vastaanottajan purkuvälimuisti, tällä menetelmällä siihen voitiin vaikuttaa muuttamalla ohjelmiston parametreja suoraan lähdekoodista. Kenttätestauksissa viivettä saatiin vähennettyä merkittävästi, mutta saavutettu hyöty kaatui videovirran virheisiin. Videovirta ajoittain jäättyi paikalleen, ja kuvan laatu puuroutui toisinaan täysin.

H264-pakkausmenetelmä reaaliaikaisen videon välitykseen osoittautui epävarmaksi. Rinnakkain ryhdyttiin tutkimaan vaihtoehtoista pakkausmenetelmää, Motion-JPEG:ä. Pakkauksen haittapuolena on, että se on tehottomampi H264:een verrattuna. MJPEG on käytännössä videon välitysmuoto, joka koostuu peräkkäisistä jpeg-kuvista. Nämä kuvat eivät riipu toisistaan millään tavalla, minkä ansiosta videossa esiintyy vähemmän virheitä. Saman kuvanlaadun saavuttamiseksi MJPEG vaatii huomattavasti suuremman kaistanleveyden verrattuna H264:een. (35, s. 7.)

MJPEG-pakkausta testattiin GitHub-verkkopalvelusta vapaasti saatavilla olevalla mjpegstreamer-nimisellä ohjelmistolla. Tämä ohjelmisto asennetaan videovirran lähetyspäähän, jossa sille määritetään kameran lähde. (36.) Videovirta voidaan vastaanottaa suoraan OMXPlayerillä. Testauksessa mjpegstreamer-ohjelmiston havaittiin aiheuttavan merkittävää kuormitusta keskusyksikön prosessorilla, koska MJPEG-pakkaukselle ei ole laitteistoon integroitua purku- tai pakkausyksikköä. Rasituksesta huolimatta menetelmän avulla viive asettui tutkimuksissa alueelle 50–200 ms, joka osoittautui parhaaksi tulokseksi videovirran välitysmenetelmien vertailussa. Menetelmässä ongelmana on suuri kaistanleveyden tarve (noin 2–3 mbit/s), mutta valitun radiolinkin katsottiin olevan riittävä kapasiteetiltaan pakkausmenetelmän tarpeisiin.

## 6 Tietoturva

Radiolinkin valinnassa pyrittiin pitämään kiinni tietoturvasta. Paras ratkaisu tietoturvan kannalta olisi ollut suora salattu radiolinkki maa-aseman ja lennokin välillä, mutta yrityksistä huolimatta tämä ei onnistunut. Tietoturvan takaaminen mutkistuu valitun LTE-verkon takia, sillä videovirta kulkee julkisen internetin kautta. Videovirta on sellaisenaan kolmansien osapuolien katsottavissa. Maa-aseman ja lennokin välillä on käytettävä salausta urkkimisen estämiseksi.

Tietoturvaongelman lisäksi videovirran välittämisessä on toinen ongelma. Verkko-operaattoreiden havaittiin rajoittavan päätelaitteen sisään tulevia yhteyksiä käyttämällä NAT-osoitteenmuunnosta (Network Address Translation). Rajoituksen seurauksena usealla päätelaitteella on sama julkinen IP-osoite. Tämä käytännössä tarkoittaa sitä, että maa-aseman ja lennokin välille ei voida muodostaa suoraa yhteyttä internetin ylitse. Ongelma ratkeaisi operaattorin avustuksella käyttämällä päätelaittekohtaista julkista IP-osoitetta tai lisäämällä sisään tulevalle liikenteelle portinohjaus, mutta kumpaankaan ratkaisuun operaattorit eivät suostuneet. Ainut tapa rajoituksen kiertämiseksi on luoda julkisesti saatavilla oleva palvelin, joka reitittää maa-aseman ja lennokin välisen yhteyden. Kahden suljetun verkon välille on luotava oma virtuaalinen erillisverkko (VPN) yhteyden muodostamiseksi. VPN:n avulla maa-aseman ja lennokin välille rakennetaan näennäisesti yksityinen verkko julkisen verkon yli. Menetelmässä yhdistyy kätevästi operaattorin rajoitusten kierto ja vahva salaus.

OpenVPN on nimensä mukaisesti avoimen lähdekoodin VPN-ohjelmisto, jonka avulla voidaan luoda virtuaalinen erillisverkko. Ohjelmisto koostuu palvelin- ja asiakasosasta, joiden välille yhteys muodostetaan julkisen internetin yli. (37.)

Virtuaalisen erillisverkon pystyttämiseksi Metropolian helpdeskiltä pyydettiin verkkopalvelinta projektin käyttöön. Vastauksena helpdesk tarjoutui antamaan virtualisoitua palvelintilaa, jolle määritettiin oma julkinen kiinteä IP-osoite. Palvelinta varten palomuurista avattiin portit 22 ja 1194, jotta SSH:n ja OpenVPN:n pääsy verkkoon olisi mahdollista. Palvelin on käytössä joulukuuhun 2015 saakka.

Virtuaalista palvelinta hallinnoidaan VMware-käyttöympäristön kautta vSphere-nimisellä asiakasohjelmistolla. Palvelimelle yhdistettäessä vSphere-ohjelmistolle syötetään virtuaalipalvelimien hallintapalvelimen osoite, käyttäjätunnus ja salasana. Ensimmä-

mäisellä yhdistyskerralla projektin käyttöön varattu virtuaalipalvelin oli tyhjä. Palvelimelle asennettiin Ubuntun palvelinversio, minkä jälkeen itse VPN-palvelimen rakentaminen voitiin aloittaa.

OpenVPN-ohjelmisto voidaan asentaa suoraan Ubuntun tarjoaman pakettihallinnan kautta. Asennuksen mukana toimitetaan easy-rsa-ohjelmistopaketti, joka sisältää työkalut VPN-verkon avainten luontia varten. Verkon pystyttäminen aloitetaan palvelimen päässä, jossa luodaan pääsertifikaatti ja avain, joita käytetään muiden sertifikaattien ja avainten luomiseen. Toimenpide suoritetaan build-ca-ohjelmalla, johon syötetään ajon aikana täydentäviä tietoja. Pääsertifikaatin ja avaimen luomisen jälkeen voidaan allekirjoittaa palvelimen oma sertifikaatti ja avain build-key-server-ohjelmalla. Samalla tavalla seuraavaksi luodaan build-key-ohjelmalla palvelimeen yhteydessä olevat asiakkaat, joita ovat maa-asema, lennokki ja muutama väliaikainen avain varalle verkon ylläpitoa varten. Tässä yhteydessä avaimille voidaan asettaa salasana, mutta se ei ole välttämätöntä. Avaimille ei asetettu salasanaa, koska tämä helpottaa yhteyden automaattista muodostamista. Tietotuvan kannalta tämä ei kuitenkaan ole haitallista, koska luotettava yhteys muodostetaan allekirjoitettujen sertifikaattien ja avainten avulla. Menetelmä on turvallinen, jos laitteistoon ei ole fyysistä pääsyä. Lopuksi palvelimille luodaan Diffie-Hellman-parametrit build-dh-ohjelmalla. Valmiit sertifikaatit ja avaimet voitiin siirtää nyt tarkoitettuihin paikkoihinsa (taulukko 2). (38.)

Taulukko 2. Easy-rsa-ohjelmapaketin luomat tiedostot (38).

Tiedosto	Tiedoston tarvitsee	Tiedoston tarkoitus	Salainen
ca.crt	palvelin + asiakkaat	pääsertifikaatti	ei
ca.key	avainten allekirjoitus	pääavain	kyllä
dh.pem	vain palvelin	DH parametrit	ei
palvelin.crt	vain palvelin	palvelimen sertifikaatti	ei
palvelin.key	vain palvelin	palvelimen avain	kyllä
maa-asema.crt	vain maa-asema	maa-aseman sertifikaatti	ei
maa-asema.key	vain maa-asema	maa-aseman avain	kyllä
lennokki.crt	vain lennokki	lennokin sertifikaatti	ei
lennokki.key	vain lennokki	lennokin avain	kyllä
yllapito.crt	vain ylläpito	ylläpidon sertifikaatti	ei
yllapito.key	vain ylläpito	ylläpidon avain	kyllä

Seuraavaksi sama OpenVPN-ohjelmisto asennettiin maa-asemaan ja lennokkiin. Ohjelmistoon sisältyy valmis esimerkkikonfiguraatiotiedosto, jota käytettiin pohjana verkon konfigurointiin. Tiedostoon lisättiin palvelimen IP-osoite ja viittaukset juuri luotuihin



avaimiin ja sertifikaatteihin. Näiden toimenpiteiden jälkeen OpenVPN käynnistettiin taustaprosessina kaikissa päätelaitteissa ja palvelimessa.

Yhteyden toimivuutta testattiin tekemällä yhteyskokeiluja ping-komennolla. Alustavissa yhteyskokeiluissa kaikki vaikutti aluksi toimivan, mutta ajoittain yhteyden toimivuudessa esiintyi satunnaisia ongelmia. Kun yhteyskokeiluja suoritettiin ylläpitäjän ja jonkin muun verkon asiakkaan välillä, joskus yhteyskokeilu saattoi toimia vain toiseen suuntaan. Toisin sanoen jos esimerkiksi ylläpito testaa yhteyttä maa-asemalle, kokeilu onnistuu, mutta toisin päin yhteyden testaus ei onnistu. Muutaman minuutin kuluttua osat saattoivat vaihtua toisin päin: ylläpito ei enää saa yhteyttä maa-asemaan, mutta maa-asema saa yhteyden ylläpitoon. Vian aiheuttajaa etsittiin virhelokitiedostoja tutkimalla, mutta tutkimuksista huolimatta yhteyden osittaiselle menetykselle ei löytynyt varsinaista syytä. Lopulta vian syyksi osoittautui Windows-käyttöjärjestelmän oma palomuuuri, joka satunnaisesti häiritsi ylläpidon tietoliikennettä.

Virtuaalisen erillisverkon toimivuuden varmistamisen jälkeen konfiguraatitiedostot muovattiin vielä lopulliseen muotoonsa. Maa-asemalle ja lennokille asetettiin palvelimen asetuksissa kiinteä virtuaalinen IP-osoite, joka mahdollistaa yhteyden automaattisen muodostamisen päätelaitteiden välille. Ylläpidon väliaikaiset sertifikaatit ja avaimet tuhottiin tarpeettomana.

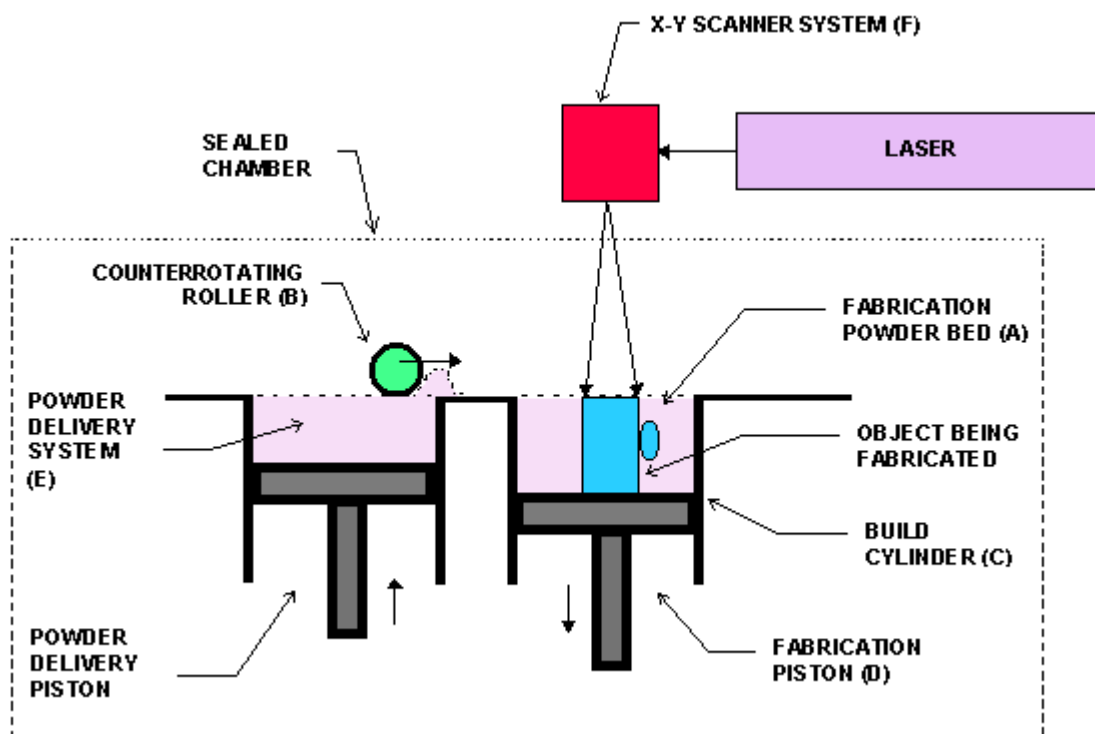
## **7 3D-tulostaminen**

3D-tulostuksella tarkoitetaan kolmiulotteisen kappaleen valmistamista virtuaalisen kolmiulotteisen mallin avulla. Kappaleen valmistuksessa käytetään yleisesti eri muovilaa- tuja ja metallia. 3D-tulostusta hyödynnetään erityisesti ketterässä tuotekehityksessä, koska sen avulla voidaan luoda ensimmäinen prototyyppi lopputuotteen näköiseksi ja kokoiseksi ilman vaativaa käsityötä. 3D-tulostimet voidaan jakaa neljään eri luokkaan tulostusmenetelmän mukaan: nestettä kovettaviin, sulasta materiaalista pursottaviin, pulverista sintraaviin ja levystä leikkaaviin tulostimiin. (39, s. 700.)

Kaikkia 3D-tulostimia yhdistää STL-tiedostoformaatti (stereolithography), joka sisältää tarkan tiedon tulostettavan kappaleen muodosta. STL-tiedoston avulla tulostimen oma ohjausohjelmisto jakaa tulostettavan kappaleen kerroksiin. (40.) STL-tiedoston luomi- seen on olemassa useita mallinnusohjelmistoja, joista kerrotaan tarkemmin Pauli Kor- hosen insinööriyössä (41).

## 7.1 SLS-tulostustekniikka

Selective Laser Sintering eli lasersintraus on tulostustekniikka, jossa ohut pulverikerros poltetaan laserilla tulostettavan mallin mukaisesti. Tulostusmekanismissa käytetään pulverin levitintä ja kahta mäntää, joiden avulla pulveria käsitellään tulostimen sisällä (kuva 13). Mäntiä liikutetaan samanaikaisesti siten, että syöttömäntä nousee ylös ja valmiin tulosteen mäntä laskee alas. Pulverin levitin tasoittaa muodostuneen eron, minkä jälkeen laser kuumentaa pulverikerroksen mallin mukaisesti. Prosessi toistetaan levittämällä käsitellyn kerroksen päälle uusi pulverikerros, ja sitä toistetaan niin kauan, kunnes koko malli on käyty läpi kerros kerrokselta. Tulostus tehdään suljetussa ja lämmitetyssä tilassa, mikä nopeuttaa tulostusta. Tulostustila lämmitetään lähelle pulverin sulamispistettä, koska tällöin laserilla ei tarvitse tuottaa suuria määriä lämpöä pulverin sulattamiseksi. (42.)



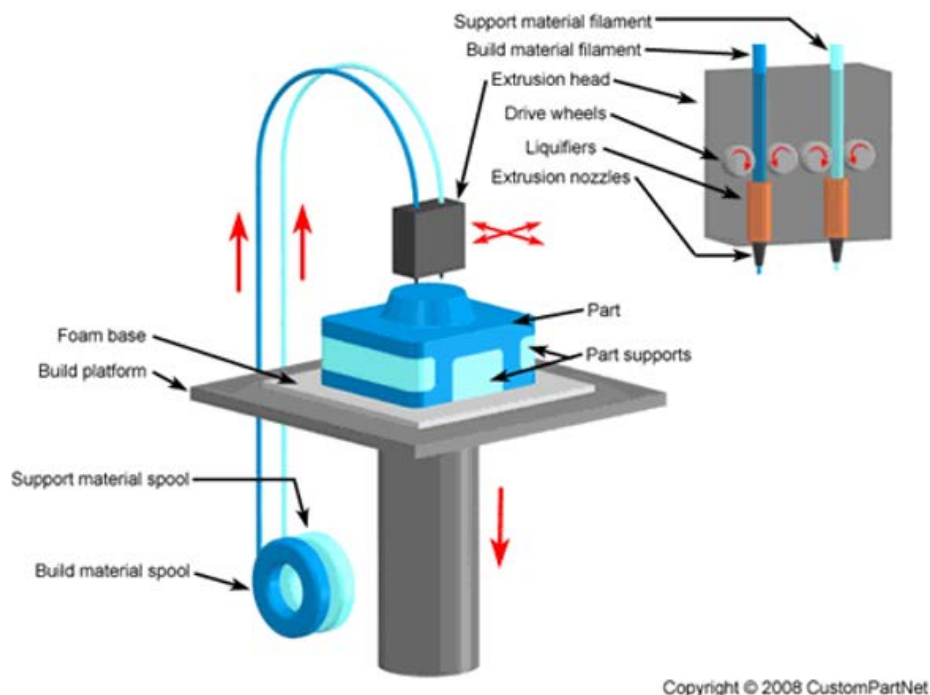
Kuva 13. SLS-menetelmän toimintaperiaate (42).

Tulostusmenetelmässä voidaan käyttää materiaalina useita eri muovilaatuja sekä myös metallia ja keramiikkaa. Yleisesti käytettyjä muovilaatuja ovat nylon, lasikuidulla vahvistettu nylon ja polystyreeni. Metallin ja keramiikan tulostuksessa menetelmä on sama, mutta laserin tehoa nostetaan materiaalien kuumemman sulamispisteen vuoksi. (42.)

Tulostustekniikan suurin etu on täysin toimivien kokonaisten kappaleiden tulostaminen yhdessä osassa. Menetelmän avulla voidaan tulostaa liikkuvia osia ilman hankalia ylimääräisiä tukirakenteita, koska tulostuksen aikana tulostuspulveri tukee valmista kappaletta. Haittapuolena tässä tulostustekniikassa on paitsi laitteiston yli 100 000 euron hinta, myös umpitulosteet, joiden takia materiaalia kuluu turhaan ja kappaleista tulee painavia. (42.)

## 7.2 FDM-tulostustekniikka

Fused Deposition Modeling -tulostustekniikan (FDM) toiminta perustuu muovilankaan, jota syötetään kuumennetun pursottimen lävitse sulattaen se lämmitetylle tulostusalustalle (kuva 14). Pursotettu muovilanka levitetään ohuina jopa 20 mikrometrin kerroksina 3D-mallin mukaisesti lämmitetylle alustalle, johon se jäähtyy ja jähmettyy. Tulostus tapahtuu totuttuun tapaan kerros kerrokselta, ja sitä toistetaan niin kauan, kunnes kappale on valmis. FDM-tulostimia on saatavilla markkinoilla yhdellä ja kahdella tulostuspursottimella. Yhdellä tulostuspursottimella voidaan tulostaa yhtäaikaisesti vain yhtä materiaalia, jolloin kappaletta tuetaan tulostuksen aikana samalla materiaalilla. Kahden tulostuspursottimen tulostimella voidaan tulostaa samanaikaisesti rakennusmateriaalin lisäksi erillistä tukimateriaalia. Tukimateriaalia käytetään kohdissa, joissa kappaleen rakenteessa esiintyy kaltevuudeltaan yli 40 asteen kulmassa pystyasennosta olevia pintoja. Tukimateriaalin sijasta voidaan käyttää myös toista eriväristä rakennusmateriaalia, jolloin kappaleesta saadaan kaksivärinen. (43.)



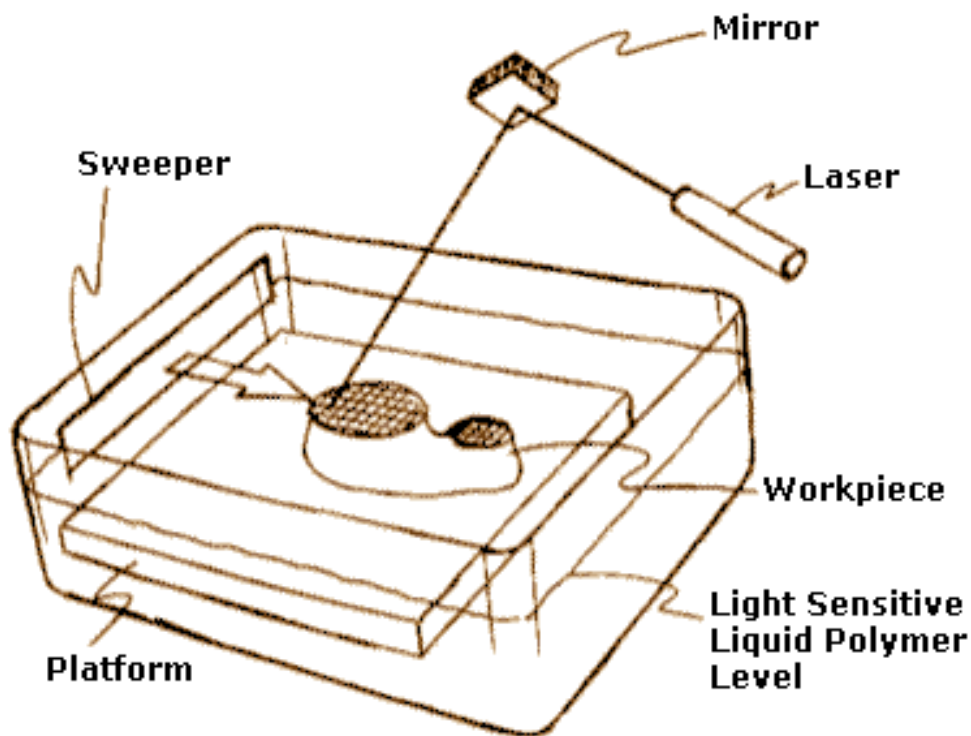
Kuva 14. FDM-menetelmän toimintaperiaate (45).

FDM-tulostimissa käytetään yleisesti kahta eri muovilaatua, PLA:ta ja ABS:ää. Muovilaaduista yleisempi polyaktidi (PLA) on biohajoava muovilaatu, jota voidaan valmistaa uusiutuvista luonnonvaroista. PLA-muovista on saatavilla useita eri variaatioita, joissa on muunneltu esimerkiksi muovin ulkonäköä tai ominaisuuksia. PLA-muovin sulamislämpötila on noin 210 astetta, ja se jähmettyy lämpötilan laskettua alle sataan asteeseen. (44.)

Akryylinitriilibutadieenistyreeni (ABS) on hieman haastavampi öljypohjainen muovimateriaali, jonka etuna PLA-muovilaatuun nähden on parempi kestävyys. ABS-muovilaatu vaatii korkeamman tulostuslämpötilan, ja sen tulostusta helpottaa suljettu ja lämmitetty tulostustila. ABS on materiaalina haastavaa, koska se irtoaa herkästi tulostusalustasta ja tulostettavan kappaleen muoto saattaa vääntyillä tulostuksen aikana. (44.) Projektin aikana tulostetut kotelot ja kiinnikkeet tulostettiin enimmäkseen PLA-muovista. Joitain satunnaisia osia tulostettiin myös valkoisesta ABS-muovista.

### 7.3 SLA-tulostustekniikka

Stereolitografiamenetelmä (SLA) perustuu nestemäiseen fotopolymeerihartsiin, jota kovetetaan kohdistamalla siihen ultraviolettivaloa (kuva 15). SLA-tulostusmenetelmässä fotopolymeerihartsia levitetään tulostusaltaaseen kovetettavaksi ohuina noin 0,1 mm:n kerroksina. Tulostusallasta siirretään kerroksen verran, minkä jälkeen tulostettavan kappaleen päälle levitetään uusi hartsikerros. Operaatiota toistetaan niin kauan, kunnes koko 3D-malli käyty läpi kerros kerrokselta. Valmis kappale on tulostuksen jälkeen vielä hauras, ja sitä voidaan kovettaa lisää laittamalla se jälkikäsiteltäväksi ultraviolettivalouuniin. (46; 47.)



Kuva 15. SLA-menetelmän toimintaperiaate (49).

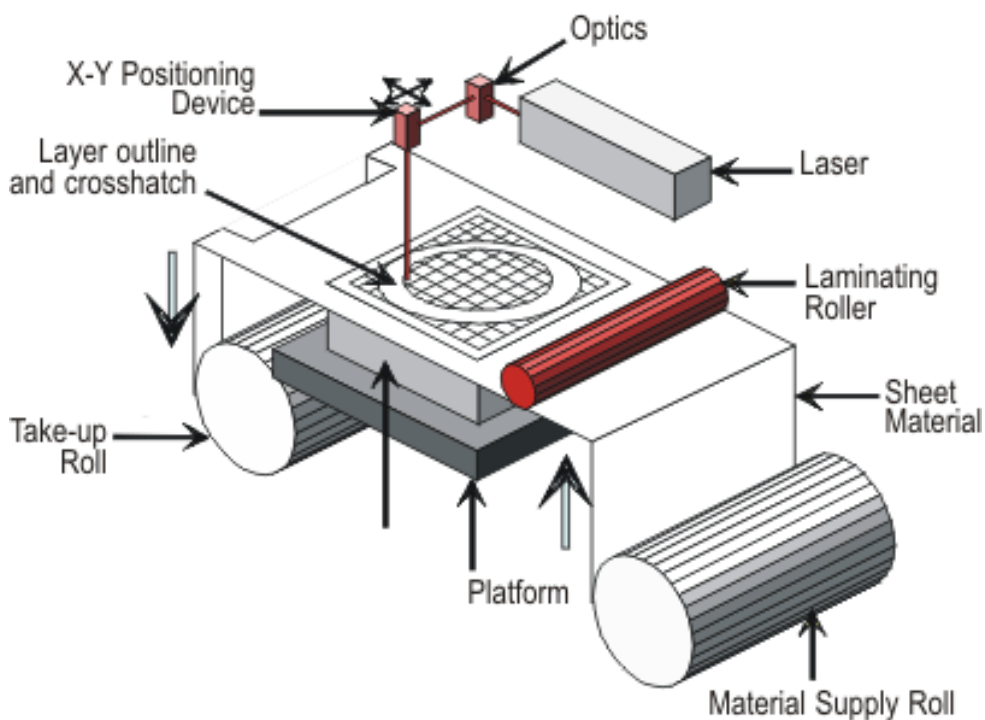
SLA-tulostimissa käytetään erityyppisiä fotopolymeerihartsilaatuja, joiden ominaisuudet vastaavat muissa tulostustekniikoissa käytettyjä materiaaleja, kuten ABS:ää. Tulostustekniikkaa käytetään yleisesti erittäin pienten mallien tulostuksessa, koska tekniikka kykenee muita tulostustekniikoita parempaan erottelutarkkuuteen. (48.)

Syksyllä 2015 SLA-menetelmää käyttävä pikatulostin tuli saataville Metropolian Tikkurilan-kampukselle. 3D Systemsin kehittämä ProJet 5500X -tulostin tarjoaa 550 mm x 393 mm x 300 mm:n kokoisen tulostusalueen parhaimmillaan 29 mikrometrin tarkkuudella.

Tulostimen erikoisuutena on MJP-tekniikka, jolla tarkoitetaan usean eri materiaalin tukea. Rakennusmateriaaleja on saatavilla kolme: valkoista muovimateriaalia, läpinäkyvää muovimateriaalia ja mustaa kumimateriaalia. Näitä materiaaleja voidaan tulostaa samanaikaisesti, jolloin niitä sekoittamalla voidaan luoda ominaisuuksiltaan ja ulkonäöltään erilaisia materiaaleja. Tulostin käyttää lisäksi erillistä tuentamateriaalia tulostettavan kappaleen tukemiseen tulostuksen aikana. (48.) Tulostinta oli alun perin tarkoitettu käyttää tässä projektissa, mutta valitettavasti sitä ei päästy käyttämään tulostimen toimitusvaikeuksien takia.

#### 7.4 LOM-tulostustekniikka

Laminated Object Manufacturing -tulostusmenetelmä (LOM) perustuu kerroksittaiseen laminointiin (kuva 16). Tulostuksen raaka-aineena käytetään rullalle kierrettyä liimapintaista materiaalia, joka voi olla esimerkiksi paperia, muovia tai metallia. Materiaalirullasta syötetään materiaalia lämmitetyn kaulimen lävitse tulostusalustalle, jossa se leikataan muotoonsa lasersäteen avulla. Leikattu alue liimautuu tulostusalustaan kiinni muodostaen uuden kerroksen, minkä jälkeen tulostusalustaa lasketaan alas uutta kerrosta varten. Käytetty tulostusmateriaali kiertyy uudelleen toiseen rullaan. Prosessia toistetaan, kunnes kappaleen 3D-malli on käyty lävitse kerros kerrokselta. (50.)



Kuva 16. LOM-menetelmän toimintaperiaate (51).

## 7.5 Koteloiden 3D-tulostus

Opinnäytetyön tilaajan antamien esitietojen perusteella tiedettiin, että tiedonkeruujärjestelmää tulotaisiin käyttämään ulkotiloissa. Rakennettava elektroniikka vaatii suojaukseen koteloinnin, ja sen rakentamiseen päätettiin käyttää apuna 3D-tulostusta. Koteloinnin työnjako sovittiin siten, että Pauli Korhonen suunnittelee koteloinnin 3D-mallit ja tämän työn tekijä suorittaa mallien tulostamisen.

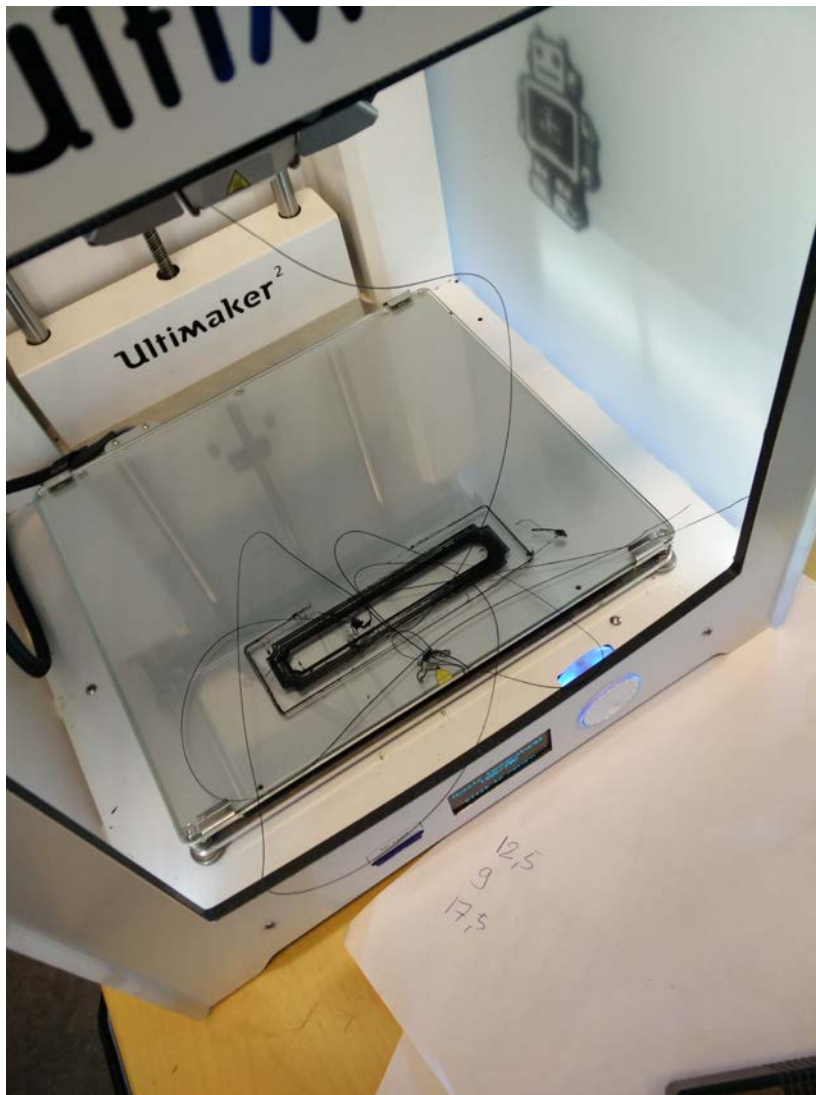
Keväällä 2015 ensimmäisten mallien valmistuessa tulostustyö aloitettiin Metropolian tarjoamilla 3D-tulostimilla. Tämän insinööryön tekijällä oli mahdollisuus tulostaa elektroniikan suojakotelot työharjoittelun yhteydessä Metropolian tutkimus- ja kehitysyksikkö Electriassa.

3D-tulostuksessa hyödynnettiin pääosin Ultimaker 2 -merkkistä tulostinta, joka perustuu FDM-tekniikkaan. Tulostimessa on yksi tulostussuutin, josta voidaan pursottaa ainoastaan yhtä materiaalia kerrallaan, mutta kuitenkin kahteen eri tarkoitukseen: itse kappaleen tulostamiseen ja tukimateriaalina. Tulostimen lämmitetty tulostusalusta mahdollistaa enintään 223 mm x 334 mm x 305 mm:n kokoisen kappaleen tulostamisen parhaimmillaan 20 mikrometrin kerrostarkkuudella. (52.)

Tulostinta ohjataan valmistajan tarjoamalla avoimen lähdekoodin Cura-ohjelmistolla, jolle syötetään 3D-mallin sisältävä STL-tiedosto. Ohjelmiston avulla mallia voidaan jatkojalostaa muun muassa lisäämällä siihen tulostusta helpottavia tukirakenteita. Ohjelmistossa voidaan määrittää tarkasti tulostuksen laatu ja tarkkuus, ja näiden asetusten avulla ohjelmisto laskee myös tarkan tulostusajan. Lopulta jalostettu malli voidaan muuntaa lopulliseen tulostimen ymmärtämään muotoon, ja se tallennetaan SD-kortille, josta tulostin lukee mallin.

Tulostustyö aloitettiin tulostamalla ensin nopeita, epätarkkoja kotelon hahmotelmia, joiden avulla voitiin hioa tarkat tekniset mitat sopiviksi. Malleja iteroitiin useaan otteeseen kehitystyön aikana, jotta voitiin varmistaa koteloiden yhteensopivuus asennusympäristön ja suojattavan elektroniikan kanssa. Säsuojaukselta varten kahta eri tulostusmateriaalia päätettiin kokeilla tulostuksessa siten, että kotelo pääosin tulostettiin PLA-muovista, mutta sen reunukset tulostettiin pehmeästä kumista muodostaen roiskeveden pitävän tiivisteiden. Rasiustesteissä kuitenkin havaittiin, ettei tulostettu tiiviste juurikaan paranna vesitiiviyyttä.

Tulostamisen aikana esiintyi ongelmia tulostimen materiaalin syöttömekanismeissa. Vakioasetuksilla tulostettaessa tulostimen materiaalin syöttömekanismi ei kyennyt pursottamaan materiaalia suuttimen läpi tarpeeksi nopeasti, mikä aiheutti puutteita tulosteen rakenteisiin (kuva 17). Ongelman aiheuttajaksi epäiltiin viallista suutinta ja syöttömekanismin moottoria. Moottorivian mahdollisuus pyrittiin poissulkemaan nostamalla moottorin tehonsyöttöä ja ottamalla yhteyttä tulostimen valmistajaan (tuloksetta). Ongelmaa voitiin kompensoida hidastamalla tulostusnopeutta, mutta tästä koitui ongelmia tulostimen käyttöajalle, koska tulostin ei ollut ainoastaan tämän projektin käytössä. Lopulta pursotusongelma äityi niin vakavaksi, ettei tulostaminen onnistunut enää lainkaan. Ongelman aiheuttajaksi osoittautui viallinen suutin, joka kuitenkin kyettiin vaihtamaan uuteen vasta tämän projektin valmistumisen jälkeen.



Kuva 17. Epäonnistunut kotelon tulostus Ultimaker 2 -tulostimella.



Tulostimen tukkeutumisen takia koko tulostustyö oli ongelmissa, sillä aika oli käymässä vähiin eikä korvaavaa tulostinta aluksi ollut saatavilla. Viime hetkellä kuitenkin avautui mahdollisuus tulostamiseen Metropolian Tikkurilan-kampuksella, jossa oli käytettävissä Stratasysin kehittämä Dimension-tulostin. Tulostimen ominaisuudet poikkeavat hieman Ultimakerista muun muassa tulostusmateriaalin osalta. Stratasys Dimension tukee kahden materiaalin samanaikaista tulostamista, jolloin toinen materiaaleista voi olla itse kappaleen tulostamista varten ja toinen tukimateriaalia monimutkaisten muotojen tulostamiseen. Haittapuolena Stratasys Dimension ei tue kennomaista tulostustekniikkaa, vaan kaikki mallit ovat umpinaisia. Tällöin kappaleen paino kasvaa.

Lopulliset kotelot tulostettiin 60 mikrometrin tarkkuudella siistin lopputuloksen saavuttamiseksi. Koteloita tulostettiin kaiken kaikkiaan yli 20, ja niihin kului aikaa tulostimen lokitietojen mukaan yli 800 tuntia. Tulostin oli siis projektin käytössä kaiken kaikkiaan yli kuukauden yhtäjaksoisen tulostusajan.

## **8 Kokoonpano ja testaus**

Testaus on oleellinen osa projektin kokonaisuutta. Testauksessa selvitetään, ovatko asiat edenneet suunnitelmien mukaan vai tarvitseeko niihin tehdä muutoksia. Koska projekti toteutettiin yhteistyössä Pauli Korhosen kanssa, haluttiin varmistaa eri komponenttien yhteensopivuus aloittamalla testaus jo kehitystyön varhaisessa vaiheessa. Kokoonpano ja testaus tehtiin vaiheittain niin, että aluksi nidottiin maa-asema kokonaisuudessaan yhteen, minkä jälkeen siirryttiin lennokin yhteensovittamiseen. Tähän päädyttiin, koska osa lennokin komponenteista oli saatavilla vasta projektin loppupuolella.

### **8.1 Maa-asema ja lennokki**

Maa-aseman rooli tässä projektissa oli esittää käyttäjälle lennokista suoraa videokuvaa ja lennättämistä helpottavia tietoja. Suunnitteluvaiheessa tuli ottaa erityisesti huomioon, että maa-asemaa käytetään mobilisoidusti ja mahdollisesti hankalissa sääolosuhteissa. Näiden ehtojen mukaisesti maa-aseman rungoksi päätettiin hankkia tukeva salkku, johon kaikki maa-aseman osat asennettiin (kuva 18). Salkun koko valittiin näytön koon asettamien ehtojen mukaan.



Kuva 18. Valmis maa-asema.

Keskusyksikön ohjaamista varten maa-asemaan hankittiin Logitechin langaton näppäimistö-hiiriyhdistelmä. Se kytkeytyy keskusyksikköön Raspberry Pi USB-väylän kautta. Samaan USB-väylään kytkeytyy myös Telewellin 4G-USB-modeemi, jonka kautta maa-asema on yhteydessä internetiin.

Maa-aseman näytöksi hankittiin ProCasterin 20 tuuman televisio, jota Raspberry Pi hyödyntää tavallisena näyttönä HDMI-liitännän kautta. Televisiota on mahdollista käyttää 12 voltin tasavirralla ja 230 voltin vaihtovirralla. 4G-USB-modeemi ja näppäimistö asennettiin maa-asemaan sellaisenaan salkun mukana toimitettuun vaahtomuoviin ilman rakenteellisia muutoksia, mutta näytön osalta jouduttiin tekemään joitakin raken-

teellisiä muutoksia. Näytön liittimiä muokattiin siten, että televisio voitiin asentaa mahdollisimman tiiviisti salkun kantta vasten.

Järjestelmän sähkönsyötöstä pyrittiin tekemään mahdollisimman joustava. Television mukana toimitettua jännitteen muuntajaa päätettiin käyttää hyödyksi muuttamalla sen rakennetta siten, että muuntaja syöttää 230 voltin vaihtovirrasta muunnettua 12 voltin tasavirtaa koko maa-asemaan. Hyvin pienellä muutoksella koko järjestelmään saatiin helposti syötettyä käyttöjännite suoraan 12 voltin lyijyakulta. Ratkaisu mahdollistaa sähkönsyötön monipuolisen käytön.

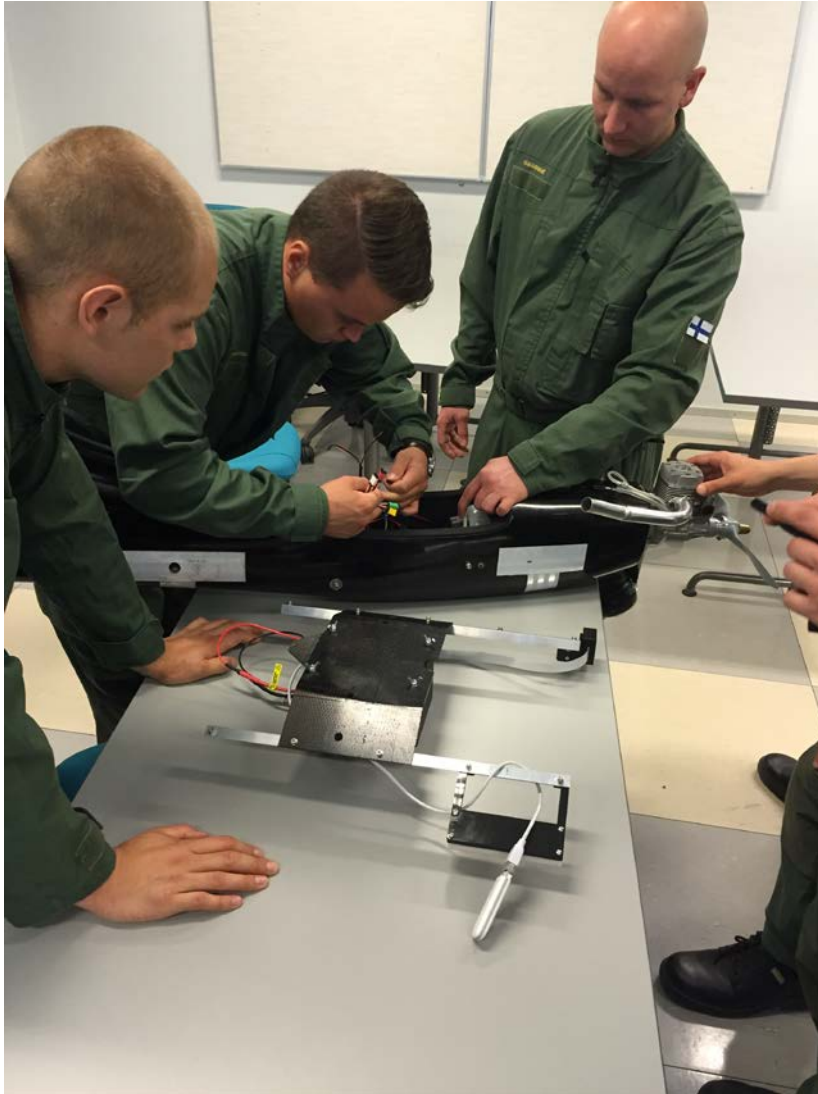
Itse maa-aseman salkun asennustyö sujui ongelmitta, mutta maa-aseman keskusyksikön koteloinnissa esiintyi yhteensopivuusongelmia. Kehitystyön aikana kotelosta jouduttiin tulostamaan useita versioita, jotta lopullinen kotelointi olisi samalla sekä pöly- ja roisketiivis että yhteensopiva mitoiltaan elektroniikan kanssa. Useaan otteeseen suunnittelussa oli tapahtunut pieni mittavirhe, joka selvisi vasta tulostetun kappaleen sovittelussa.

Ohjelmiston puolella hankaluuksia ilmeni Raspberry Pin ja näytön välillä. ProCasterin televisio kykenee parhaimmillaan 1600 x 900 pikselin erottelutarkkuuteen, mutta jostain tuntemattomasta syystä Raspberry Pi ei kyennyt käsittelemään resoluutiota oikealla tavalla. Kuvan laatu oli melko suttuinen, ja kuvasta rajautui osa pois reunojen ulkopuolelle. Ongelmaa yritettiin korjata muuttamalla Raspberry Pin käynnistyskonfiguraatiota siten, että resoluution automaattitunnistuksen sijaan näytölle pakotettiin 1600 x 900 pikselin erottelutarkkuus. Korjauksella kuva saatiin näkymään kokonaisuudessaan, mutta kuvan suttuisuudesta ei päästy eroon.

Aiempien lukuisten kokemusten perusteella tiedettiin, että erityisesti Raspberry Pin varhaisissa malleissa esiintyi yllättäviä käyttöjärjestelmän korruptoitumisongelmia. SD-kortin sisältämä käyttöjärjestelmä saattoi korruptoitua Raspberry Pin sammutuksen yhteydessä. Raspberry Pin uudemmilla versioilla tätä ei ole esiintynyt, mutta kaiken varalta maa-aseman ja lennokin keskusyksikölle tehtiin SD-korteista varakappaleet.

Lennokin komponentit asennettiin niille tarkoitetulle alustalle, joka on irrallinen osa lennokkia. Tälle alustalle varattiin tila lennokin keskiosan sisäpuolelta, ja alustaan liitettiin lennokin ulkopuolelle siipien alle ulottuvat siivekkeet (kuva 19). Lennokin tiedonkeruujärjestelmä koostuu keskusyksiköstä, akusta, kamerasta ja 4G-USB-modeemista. Osat

varustettiin erillisillä 3D-tulostetuilla koteloilla. Toiselle siivekkeelle asennettiin 4G-USB-modeemi ja toiselle siivekkeelle videokamera. Keskusyksikkö asennettiin lennokin sisäpuolelle. Roiskevedelle ja pölylle alttiimmat osat tiivistettiin lopuksi silikonilla.



Kuva 19. Lennokin elektroniikan yhteensovitusta.

Maa-aseman ja lennokin keskusyksiköihin luotiin automaattiset käynnistyskriptit, joiden tarkoitus on helpottaa koko tiedonkeruujärjestelmän yhtäaikaista käynnistystä, kun virta kytketään päälle molempiin laitteisiin. Käynnistyskriptien suorittamiseen käynnistykseen yhteydessä hyödynnettiin käyttöjärjestelmän omaa `/etc/rc.local`-tiedostoa, jonka sisältö suoritetaan automaattisesti joka käynnistyskerralla käyttöjärjestelmän konfiguraatioiden mukaisesti. Skriptiin sisällytettiin mobiilidatayhteyden ja videovirran käynnistämiskomennot.

Lennoxin ohjelmistossa esiintyi joitakin yhteensopivuusongelmia. Kun kehitystyö aloitettiin, kehitysalustana käytettiin vanhempaa Raspberry Pin mallia. Alustasta julkaistiin keväällä 2015 uusi malli, ja siihen siirtyminen projektin loppupuolella rikkoi joitakin ohjelmiston ominaisuuksia. Vanha keskusyksikkö haluttiin päivittää uuteen, koska valmistajan lupaama kuusinkertainen tehonlisäys oli tarpeen melko raskaiden sisäisten prosessien suorittamiseen. Eräs laitteiston päivityksestä johtunut ongelma liittyi kiihtyvyysanturin kirjastoon. Päivityksen jälkeen kiihtyvyysanturi ei enää vastannut lainkaan SPI-väylän käskyihin, minkä korjaamiseksi ohjelmistoon tehtiin muutoksia päivittämällä kiihtyvyysanturin ohjauskirjasto uusimpaan versioon ja lisäämällä SPI-moduuli laitepuuhun (device tree). Laittepuusta kerrotaan tarkemmin Pauli Korhosen insinööriyössä (41).

Keskusyksikön laitteiston päivityksen myötä mobiilidatayhteydessä ilmeni ongelmia. Aiemmin luotu käynnistyskripti ei enää toiminutkaan odotetulla tavalla. Tehonlisäyksen ansiosta laitteisto kykenee suorittamaan skriptitiedoston aiempaa lyhemmässä ajassa. Tämän seurauksena 4G-modeemin laitteisto ei ehdi suorittamaan yhteyden muodostuksen toimenpiteitä, mikä aiheuttaa yhteyden menetyksen. Ongelma korjattiin muuttamalla skriptitiedoston suoritusnopeutta.

## 8.2 Yhteistyö Puolustusvoimien kanssa

Tiedonkeruujärjestelmä suunniteltiin ja toteutettiin yhteistyössä Puolustusvoimien lentoteknisen opintosuunnan kadettien kanssa. Kehitysyhteistyön aikana kadetteihin pidettiin tiiviisti yhteyttä halutun lopputuloksen saavuttamiseksi. Järjestelmän testaus ja kehitys hajautettiin useaan eri sijaintiin siten, että Santahaminan varuskunnassa järjestelmän ominaisuuksia esiteltiin ja jatkojalostettiin, Tikkakosken varuskunnassa kehitettyjä komponentteja sovitettiin yhteen maalilennokin kanssa ja lopulta koko projektiyhteistyö huipentui Lohtajan harjoitusalueelle, jossa järjestelmää käytettiin päivän ajan maalilennokin lennätysharjoituksessa. Kehitysideoita jaettiin puolin ja toisin myös sähköpostitse.

Santahaminassa järjestettiin palavereita projektin tiimoilta. Palavereissa esiteltiin laitteiston ominaisuuksia ja vastaavasti kuunneltiin vastapuolen ideoita. Kehitystyön kulua ohjattiin saadun palautteen perusteella.

Tikkakosken varuskunnassa suoritettussa testauksessa ilmeni yllättäviä ongelmia. Maa-aseman näytön HDMI-liitäntä oli vaurioitunut ilmeisesti kuljetuksen aikana, mikä ilmeni testauksessa kuvasignaalin satunnaisena menetyksenä. Ongelman pystyi onneksi välttämään helposti vaihtamalla kuvasignaalin syöttö toiseen HDMI-liitäntään. Reistailevan näytön lisäksi mobiilidatayhteys ei toiminut lainkaan. Kehitystyössä oli tähän asti käytetty omaa SIM-korttia, mutta Tikkakosken vierailua varten ostetut prepaid-liittymät eivät toimineet samoilla operaattorikohtaisilla asetuksilla, vaikka operaattori oli edelleen sama. Kävi ilmi, että prepaid-liittymän apn-osoite on ”internet.saunalahti” sijaan pelkkä ”internet”. Uudelleenkonfiguroinnin jälkeen mobiilidatayhteys toimi jälleen moitteettomasti.

Tikkakoskella lennokkia varten kehitetty elektroniikka asennettiin ensimmäistä kertaa maalilennokkiin omassa kotelossaan. Kadettien avustuksella maalilennokkia muokattiin hieman poraamalla siipeen reiät, jotta installaatio mahtuisi kokonaisuudessaan siiven alle sille tarkoitettuun paikkaan. Videokuvan ja keinohorisontin toimivuutta testattiin siten, että maalilennokki asetettiin telineeseen ja lennokin polttomoottori käynnistettiin (kuva 20). Maalilennokkia pidäteltiin telineessä nostoen samalla moottorin kierroslukua. Lennokin välittämää videokuvaa ja keinohorisonttia seurattiin etäältä maa-asemalta. Testauksessa havaittiin rajua värinää videokuvassa sekä puutteita keinohorisontin värinän suodatuksessa. Videon värinäongelmaa yritettiin kompensoida muuttamalla kameran kiinnityskohtaa ja lisäämällä kiinnityspisteen välittömään läheisyyteen pehmuksia. Lopputuloksena videokuvan värinä saatiin vaimennettua tyydyttävälle tasolle, mutta keinohorisontin osalta oli tarpeen tehdä ohjelmistopohjaisia muutoksia värinän suodatuksessa. Muutoksista kerrotaan tarkemmin Pauli Korhosen insinööriyössä.



Kuva 20. Valmis maa-asema käyttökunnossa.

Tiedonkeruujärjestelmän otettiin käyttöön syyskuussa 2015 Lohtajan harjoitusalueella, jossa järjestettiin maalilennokin lennätysharjoitus. Kaksipäiväisen harjoituksen tavoitteena oli testata järjestelmää kokonaisuutena lennättämällä maalilennokkia sille varatussa ilmatilassa (kuva 21). Järjestelmän käyttöön annettiin samalla perehdytys. Lennätys tehtiin avoimella maalla, jonne tuotiin maalilennokin laukaisualusta ja aggregaatti. Videokuva ja keinohorisontti käynnistyivät moitteettomasti polttomoottorin käynnistyttyä yhteydessä, ja maalilennokki voitiin laukaista matkaan. Lennätyksen aikana videokuva välittyi lähestulkoon viiveettömästi maa-asemalle, mutta keinohorisontti kärsi edelleen lennokin aiheuttamasta värinästä suodatuksen parantamisesta huolimatta. Suodatuksen tehokkuus jäi valitettavasti puutteelliseksi, koska sitä oli hankala testata kotikonstein ilman maalilennokkia. Lennätys sujui kaiken kaikkiaan hienosti, vaikkakin videoyhteys kertaalleen menetettiin mobiilidatayhteyden katkeamisen takia.



Kuva 21. Maalilennokin langattoman tiedonkeruujärjestelmän testausta Lohtajalla.

## 9 Yhteenveto

Insinööriytyössä suunniteltiin ja valmistettiin maalilennokin langaton tiedonkeruujärjestelmä Puolustusvoimille yhteistyössä tietotekniikan opiskelija Pauli Korhosen kanssa. Tiedonkeruujärjestelmä koostuu lennokkiin asennettavasta kamerasta, radiolinkistä ja kiihtyvyy- ja jänniteanturista. Useista haasteista huolimatta projektin alussa asetetut tavoitteet saavutettiin, ja kaikki projektin osapuolet olivat tyytyväisiä lopputulokseen vastaanotetun palautteen perusteella. Toteutetun järjestelmän lisäksi insinööriytyöstä saatiin arvokasta kokemusta asiakkaan kanssa toimimisesta tuotekehitystyössä.

Projektin alkaessa kummallakaan osallistujalla ei ollut syvällistä tietämystä 3D-tulostuksen mahdollisuuksista. Kehitystyön aikana kartoitettiin useita eri tulostamistekniikoita, joista valittiin FDM-tulostusmenetelmä. 3D-tulostusta hyödynnettiin koteloiden ja kiinnikkeiden pikavalmistuksessa, ja tulosteita voitiin parantaa iteroimalla niitä useaan kertaan kehitystyön edetessä. Työn tuloksena voidaan todeta 3D-tulostuksen toimivan hyvin kehitystyön prototyyppivaiheessa. Tulevaisuudessa 3D-tulostus tarjoaa entistä kehittyneempiä ja monimuotoisempia tapoja pikavalmistukseen, jotka vähitellen tulevat saataville myös kuluttajamarkkinoille.



Kun tiedonkeruujärjestelmän laitteisto oli selvitystyön vaikeuksien jälkeen valittu, itse käytännön osuus toteutettiin onnistuneesti. Lennokin keräämä data esitetään lennättäjälle reaaliajassa maa-asemalla, joka sisältää kantosalkkuun integroidun näytön, mini-tietokoneen, radiolinkin ja näppäimistö-hiiriyhdistelmän. Radiolinkki hyödyntää LTE-mobiilidataverkkoa, joka reitittää kaiken maa-aseman ja lennokin välisen datan salatun virtuaalisen erillisverkon kautta.

Maalilennokin langatonta tiedonkeruujärjestelmää käytettiin yhteisvoimin lentoteknisen opintosuunnan kadettien kanssa lennätysharjoituksessa yhden päivän ajan (kuva 21). Lennätysharjoitus sujui moitteettomasti, ja päivän jälkeen koko järjestelmä luovutettiin kadettien harjoituskäyttöön. Järjestelmää käytetään myös tulevaisuudessa lennätysharjoituksissa lennättäjän aputyökaluna.

## Lähteet

- 1 Strickland, Jonathan. 2012. How Mini PCs Work. Verkkodokumentti. <<http://computer.howstuffworks.com/mini-pc.htm>>. Luettu 25.7.2015.
- 2 Mini PC: Intel NUC. 2015. Verkkodokumentti. Intel. <<http://www.intel.com/content/www/us/en/nuc/overview.html>>. Luettu 25.7.2015.
- 3 Raspberry Pi: How do you make a \$25 computer? Verkkodokumentti. CS4FN. <<http://www.cs4fn.org/memorymanagement/raspberrypi.php>>. Luettu 26.7.2015.
- 4 HummingBoard Specifications. Verkkodokumentti. SolidRun. <<http://solid-run.com/freescale-imx6-family/hummingboard/hummingboard-specifications/>>. Luettu 26.7.2015.
- 5 What is BeagleBone Black? Verkkodokumentti. BeagleBoard. <<http://beagleboard.org/BLACK>>. Luettu 26.7.2015.
- 6 UDOO Full Specs. Verkkodokumentti.UDOO. <<http://www.udoo.org/udoo-dual-and-quad/>>. Luettu 26.7.2015.
- 7 What is Banana Pi? Verkkodokumentti. Banana Pi. <<http://www.bananapi.org/p/product.html>>. Luettu 26.7.2015.
- 8 Technical Features - MinnowBoard MAX. Verkkodokumentti. MinnowBoard. <<http://www.minnowboard.org/meet-minnowboard-max/>>. Luettu 26.7.2015.
- 9 ODROID Products. Verkkodokumentti. Hardkernel. <[http://www.hardkernel.com/main/products/prdt\\_info.php](http://www.hardkernel.com/main/products/prdt_info.php)>. Luettu 26.7.2015.
- 10 Radxa Specifications - Details you want to know. Verkkodokumentti. Radxa. <<http://radxa.com/Rock/specifications>>. Luettu 26.7.2015.
- 11 Raspberry Pi documentation. Verkkodokumentti. Raspberry Pi. <<https://www.raspberrypi.org/documentation/>>. Luettu 26.7.2015.
- 12 What is a Raspberry Pi? Verkkodokumentti. Raspberry Pi. <<https://www.raspberrypi.org/help/what-is-a-raspberry-pi/>>. Luettu 26.7.2015.
- 13 Terré, Michel, Pischella, Myléne & Vivier, Emmanuelle. 2013. Wireless Telecommunication Systems. United Kingdom: John Wiley & Sons.

- 14 Taajuustaulukko. 2015. Verkkodokumentti. Viestintävirasto.  
<[https://www.viestintavirasto.fi/attachments/maaraykset/Taajuusjakotaulukko\\_06022015.PDF](https://www.viestintavirasto.fi/attachments/maaraykset/Taajuusjakotaulukko_06022015.PDF)>. Luettu 1.8.2015.
- 15 Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. 2009. United States: IEEE.
- 16 Basagni, Stefano, Conti, Marco & Giordano, Silvia. 2004. Mobile Ad Hoc Networking. United States: Wiley-IEEE.
- 17 AWUS036H Specifications. Verkkodokumentti. Alfa.  
<[http://www.alfa.com.tw/products\\_show.php?pc=34&ps=92](http://www.alfa.com.tw/products_show.php?pc=34&ps=92)>. Luettu 2.8.2015.
- 18 AWUS036NHR Specifications. Verkkodokumentti. Alfa.  
<[http://www.alfa.com.tw/products\\_show.php?pc=34&ps=8](http://www.alfa.com.tw/products_show.php?pc=34&ps=8)>. Luettu 2.8.2015.
- 19 Elisan mobiiliverkkojen kuuluvuuskartta. 2015. Verkkodokumentti. Elisa.  
<<http://elisa.fi/kuuluvuus/>>. Luettu 8.8.2015.
- 20 DNA:n matkapuhelinverkon peittoalueet. 2015. Verkkodokumentti. DNA.  
<<https://www.dna.fi/kuuluvuus-ja-peittoalueet>>. Luettu 8.8.2015.
- 21 Peittoaluekartta. 2015. Verkkodokumentti. Sonera.  
<<https://www.sonera.fi/asiakastuki/ohjeet/Peittoaluekartta?id=1398>>. Luettu 8.8.2015.
- 22 Wannstrom, Jeanette. HSPA. Verkkodokumentti. 3GPP.  
<<http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/99-hspa>>. Luettu 8.8.2015.
- 23 Nohrborg, Magdalena. LTE Overview. Verkkodokumentti. 3GPP.  
<<http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>>. Luettu 8.8.2015.
- 24 ADXL345 datalehti. 2015. Verkkodokumentti. Analog Devices.  
<<http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL345.PDF>>. Luettu 9.8.2015.
- 25 MCP3004/3008 datalehti. 2007. Verkkodokumentti. Microchip.  
<<http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL345.PDF>>. Luettu 9.8.2015.
- 26 LM2596 datalehti. 2013. Verkkodokumentti. Texas Instruments.  
<<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2596.pdf>>. Luettu 9.8.2015.
- 27 About KiCad. Verkkodokumentti. KiCad. <<http://kicad-pcb.org/about/kicad/>>. Luettu 9.8.2015.

- 28 Eeschema Features. Verkkodokumentti. KiCad. <<http://kicad-pcb.org/discover/eeschema/>>. Luettu 9.8.2015.
- 29 Introduction to CvPcb. 2015. Verkkodokumentti. KiCad. <<http://docs.kicad-pcb.org/en/cvpcb.html>>. Luettu 9.8.2015.
- 30 PcbNew Features. Verkkodokumentti. KiCad. <<http://kicad-pcb.org/discover/pcbnew/>>. Luettu 9.8.2015.
- 31 White Paper: Understanding—and Reducing—Latency in Video Compression Systems. 2013. Verkkodokumentti. Cast-inc. <<http://www.cast-inc.com/blog/white-paper-understanding-and-reducing-latency-in-video-compression-systems>>. Luettu 12.9.2015.
- 32 H.264 video compression standard. 2008. Verkkodokumentti. Axis Communications. <[http://www.axis.com/files/whitepaper/wp\\_h264\\_31669\\_en\\_0803\\_lo.pdf](http://www.axis.com/files/whitepaper/wp_h264_31669_en_0803_lo.pdf)>. Luettu 12.9.2015.
- 33 New video features! MPEG-2 and VC-1 decode, H.264 encode, CEC support. 2012. Verkkodokumentti. Raspberry Pi. <<https://www.raspberrypi.org/blog/new-video-features/>>. Luettu 12.9.2015.
- 34 VLC media player. 2015. Verkkodokumentti. VideoLAN. <<http://www.videolan.org/vlc/>>. Luettu 12.9.2015.
- 35 An explanation of video compression techniques. 2008. Verkkodokumentti. Axis. <[http://www.axis.com/files/whitepaper/wp\\_videocompression\\_33085\\_en\\_0809\\_lo.pdf](http://www.axis.com/files/whitepaper/wp_videocompression_33085_en_0809_lo.pdf)>. Luettu 12.9.2015.
- 36 mjpeg-streamer. 2015. Verkkodokumentti. GitHub. <<https://github.com/jacksonliam/mjpg-streamer>>. Luettu 12.9.2015.
- 37 What is OpenVPN? 2014. Verkkodokumentti. OpenVPN Technologies Inc. <<https://openvpn.net/index.php/open-source/333-what-is-openvpn.html>>. Luettu 26.9.2015.
- 38 Setting up your own Certificate Authority (CA) and generating certificates and keys for an OpenVPN server and multiple clients. 2014. Verkkodokumentti. OpenVPN Technologies Inc. <<https://openvpn.net/index.php/open-source/documentation/howto.html#pki>>. Luettu 26.9.2015.
- 39 Carryer, J. Edward, Ohline, R. Matthew & Kenny, Thomas W. 2011. Introduction to Mechatronic design. United States: Prentice Hall.
- 40 3D Printing Basics. Verkkodokumentti. 3ders. <<http://www.3ders.org/3d-printing-basics.html>>. Luettu 3.10.2015.

- 41 Korhonen, Pauli. 2015. Lennokin langaton tiedonkeruujärjestelmä. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 42 Laser Sintering. Verkkodokumentti. Additive3D. <<http://www.additive3d.com/sls.htm>>. Luettu 3.10.2015.
- 43 How FDM Works. Verkkodokumentti. Stratasys. <<http://www.stratasys.com/3d-printers/technologies/fdm-technology>>. Luettu 3.10.2015.
- 44 ABS VS PLA: 3D Printing Filament Explained. 2014. Verkkootikkeli. To Buy a 3D Printer. <<http://tobuya3dprinter.com/abs-vs-pla-3d-printing-filament/>>. Luettu 3.10.2015.
- 45 FDM and 3D printing support material explained. 2008. Verkkootikkeli. Shapeways. <<http://www.shapeways.com/blog/archives/89-fdm-and-3d-printing-support-material-explained.html>>. Luettu 3.10.2015.
- 46 The History of Stereolithography (SLA). 2014. Verkkodokumentti. Intechrp. <<http://www.intechrp.com/the-history-of-stereolithography-sla/>>. Luettu 3.10.2015.
- 47 Stereolithography. Verkkodokumentti. Custompartnet. <<http://www.custompartnet.com/wu/stereolithography>>. Luettu 4.10.2015.
- 48 ProJet 5500X. Verkkodokumentti. 3D Systems. <<http://www.3dsystems.com/files/projet-5500x-1113-usen-web.pdf>>. Luettu 4.10.2015.
- 49 Introduction to Stereolithography. Verkkodokumentti. Efunda. <[http://www.efunda.com/processes/rapid\\_prototyping/sla.cfm](http://www.efunda.com/processes/rapid_prototyping/sla.cfm)>. Luettu 4.10.2015.
- 50 Laminated Object Manufacturing (LOM). Verkkodokumentti. Custompartnet. <<http://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing>>. Luettu 4.10.2015.
- 51 Rapid Prototyping – Laminated Object Modelling and Computer Aided Manufacturing of Laminated Engineering Materials. Verkkodokumentti. Azom. <<http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1650>>. Luettu 4.10.2015.
- 52 Ultimaker 2 Specifications. Verkkodokumentti. 2015. Ultimaker. <<https://ultimaker.com/en/products/ultimaker-2>>. Luettu 4.10.2015.

