

Anna-Stina Lehtonen

Hakkuukoneen mittalaite

Opinnäytetyö

Syksy 2016

SeAMK Tekniikka

Tietotekniikan tutkinto-ohjelma



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU
SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

Opinnäytetyön tiivistelmä

Koulutusyksikkö: Tekniikka

Tutkinto-ohjelma: Tietotekniikka

Suuntautumisvaihtoehto: Sulautetut järjestelmät

Tekijä: Anna-Stina Lehtonen

Työn nimi: Hakkuukoneen mittalaite

Ohjaaja: Heikki Palomäki

Vuosi: 2016

Sivumäärä: 57

Liitteiden lukumäärä: 2

Opinnäytetyön aiheena on hakkuukoneen mittalaite. Opinnäytetyö tehtiin karstulalaiselle Mikrosys-yritykselle, joka kehittää hakkuukoneeseen uutta ohjaus- ja mittausjärjestelmää osana hakkuukoneen kunnostus- ja kehitysprojektia. Työssä tehtiin yrityksen omaan hakkuupään ohjaus- ja mittauslaitteistoon ohjelma.

Työssä käsitellään Maa- ja metsätalousministeriön hakkuukonemittausasetuksen mukaisia mittalaitteen ominaisuuksia, puun tilavuuden laskentaa, hakkuukonemittauksen mittausvirheitä ja mittaustarkkuutta. Työssä esitellään myös hakkuupään rakennetta sekä ohjaus- ja mittauslaitteiston rakennetta ja ominaisuuksia.

Esitietojen perusteella laitteistoon tehtiin ohjelma, joka mittaa puun pituuden ja läpimitan sekä kuutioi puun. Ohjelmaan tehtiin myös läpimitan ja pituuden viritys. Laitteiston ja ohjelman toimintaa testattiin hakkuutyömaalla, jossa mittalaitteen antamia mittauksia verrattiin mittasaksi- ja mittanauhmittaukseen.

Mittalaitetta testattiin harvennusmännikössä, josta valittiin ja mitattiin kolme runkoa. Testausmittausaineistosta laskettiin pituuden, läpimitan ja tilavuuden mittaustarkkuudet. Testituloksia verrattiin Metsäteho Oy:n ja ruotsalaisen Skogforskin tekemiin tutkimuksiin hakkuukoneen mittalaitteiden tarkkuuksista vuosilta 2003 ja 2006. Pituuden mittauksessa päästiin ± 2 cm:n ja läpimitan mittauksessa ± 6 mm:n tarkkuuteen $\frac{2}{3}$:ssa mittauksista. Pituuden tarkkuus on tutkimusten mukaan hyvä, mutta läpimitan tarkkuutta tulisi parantaa. Läpimitan mittauksen epätarkkuus johtui pääasiassa pulssianturin lukupiirin toimintahäiriöstä. Tilavuuden mittauksessa vain 33 % rungoista pääsi tavoiteltuun -1,4 %:n ja 1,5 %:n vaihteluväliin. Tilavuuden epätarkkuus johtui kuitenkin pituuden ja läpimitan epätarkkuuksista.

Avainsanat: Mittalaite, hakkuukonemittaus, hakkuukone, kuutiointi

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Thesis abstract

Faculty: School of Technology

Degree programme: Information technology

Specialisation: Embedded systems

Author: Anna-Stina Lehtonen

Title of thesis: Harvester's measuring device

Supervisor: Heikki Palomäki

Year: 2016

Number of pages: 57

Number of appendices: 2

This thesis is about a harvester's measuring device and developing a program for it. The thesis was made in co-operation with Mikrosys who is developing a new control and measuring system for a harvester.

The thesis reviewed the features of a measuring device which have been specified by the Finnish ministry of agriculture and forestry. The thesis also reviewed volume counting, measuring errors and measuring accuracy. Also the structures of a harvester head and the control and measuring device developed by Mikrosys were introduced.

During the thesis project a program was made for measuring the length and the diameter of a log and counting its volume. Also calibration for the length and diameter was programmed. The operation of the program and the hardware was tested in a work environment by measuring three pine trunks both with the device and by hand, and the results were compared.

The accuracy of the length and the diameter was ± 2 cm and ± 6 mm in two-thirds of the measurements. When compared to the studies of Metsäteho Oy and Skogforsk from Sweden, the accuracy of length was good enough but the accuracy of diameter should have been better. The inaccuracy of diameter was mainly caused by the operational malfunction of an encoder chip. The accuracy of the volume was sufficient only in 33% of the trunks but this could be expected because of the inaccuracies in the length and the diameter.

Keywords: Measuring device, harvester, timber measurement

SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä.....	2
Thesis abstract.....	3
SISÄLTÖ.....	4
Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo.....	6
Käytetyt termit ja lyhenteet.....	7
1 JOHDANTO.....	9
1.1 Työn taustat.....	9
1.2 Työn tavoitteet.....	9
1.3 Yritysesittely.....	9
1.4 Työn rakenne.....	9
1.5 Tutkimusmenetelmät.....	11
2 PROJEKTISUUNNITELMA.....	12
2.1 Aikataulu.....	12
2.2 Työsuunnitelma.....	12
3 ESITUTKIMUS.....	13
3.1 Lainsäädännön mukainen hakkuukonemittaus.....	13
3.1.1 Mittaukset.....	13
3.1.2 Tilavuuden laskenta.....	13
3.1.3 Läpimitan suodatus.....	14
3.1.4 Viritys.....	14
3.2 Rungon mallinnus.....	15
3.2.1 Runkokäyrä ja runkokäyrämallit.....	15
3.2.2 Tilavuusmalli.....	16
3.2.3 Tyviprofiilifunktio.....	17
3.3 Virhelähteet.....	19
3.4 Mittaustarkkuus.....	22
3.5 Satunnaisotanta.....	22
4 LAITTEISTO JA TYÖKALUT.....	24
4.1 Keto 100 -hakkuupään rakenne ja pulssianturit.....	24
4.2 Laitteisto.....	25

4.2.1	Ohjausyksikön TMS320F28035-mikrokontrolleri.....	25
4.2.2	Ohjausyksikön pulssianturin lukupiiri LS7366R.....	26
5	OHJELMA.....	27
5.1	Ohjausyksikkö.....	27
5.1.1	Pituuden mittaus.....	27
5.1.2	Läpimitan mittaus.....	28
5.1.3	Läpimitan mittausennakko ja pituuden sahaushukka.....	29
5.1.4	Pituuden ja läpimitan viritys ja muunnos millimetreiksi.....	30
5.2	Näyttöyksikkö.....	30
5.2.1	Mittausten tallennus runkokäyrään.....	31
5.2.2	Läpimitan suodatus.....	31
5.2.3	Kuutiointi.....	32
5.3	Muistit ja tietojen tallennus.....	32
6	TESTAUS.....	34
6.1	Ohjelman integrointi laitteeseen.....	34
6.2	Laitteiston integrointi hakkuukoneeseen.....	35
6.3	Mittaussuunnitelma.....	37
6.4	Testauksen kulku.....	37
7	TULOKSET JA TARKKUUS.....	39
7.1	Mittauserä.....	39
7.2	Pituuden ja läpimitan tarkkuus.....	39
7.3	Kuutiointi.....	40
7.4	Runkokäyrien suodatus.....	41
8	PÄÄTELMÄT.....	44
8.1	Testaus.....	44
8.2	Mittaukset.....	44
8.3	Laitteisto.....	45
8.4	Ohjelma.....	45
9	POHDINTAA.....	46
	LÄHTEET.....	48
	LIITTEET.....	51

Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo

Kuva 1. Keto-harvesterin eli hakkuupään pääosat: mittapyörä, karsintaterät, syöttölaite (syöttötelat) ja saha.....	24
Kuva 2. Mittalaitteen kokoonpano testauksessa: 1. PC:n sarjaporttiohjelma, 2. näyttöyksikkö, 3. ohjausyksikkö ja 4. pulssianturit	34
Kuva 3. Mittalaitteen testaus hakkuukoneessa työolosuhteissa. Hakkuupäätä ohjataan vanhan mittalaitteen ohjausyksiköllä	36
Kuvio 1. Laasasenahon runkokäyräyhtälöiden kuvaaja männylle	16
Kuvio 2. Rungon 1 suodattamaton ja suodatettu runkokäyrä.....	42
Kuvio 3. Rungon 2 suodattamaton ja suodatettu runkokäyrä	42
Kuvio 4. Rungon 1 suodattamaton ja suodatettu runkokäyrä.....	43
TAULUKKO 1. Puulajikohtaiset kertoimet.....	19
TAULUKKO 2. Mittauserän tiedot	39
TAULUKKO 3. Kaikkien läpimittojen tarkkuudet yhteensä.....	40
TAULUKKO 4. Runkojen tunnuksset ja kuutiot uuden mittalaitteen laskemana, tilavuusmalleista laskettuna ja korjattuna sekä tarkkuus.....	41

Käytetyt termit ja lyhenteet

ADC	Analog-to-digital converter, AD-muunnin
CAN-väylä	Controller Area Network -ajoneuvoväylä
CAN-transceiver	CAN-väylän fyysinen kerros, joka lähettää ja vastaanottaa signaaleja CAN-väylältä ja välittää ne CAN-kontrolleripiirille tai -rajapinnalle.
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
eQEP	Enhanced Quadrature Encoder Pulse, mikrokontrollerin pulssianturin lukurajapinta
FET	Field-effect transistor, kanavatransistori
GPIO	General-Purpose Input/Output, yleiskäyttöinen portti mikrokontrollerissa
Hankintakauppa	Myyjä toimittaa puutavaran metsäautotien varteen, jossa puutavara luovutetaan.
Leimikko	Rajattu hakkuualue
Puutavaramittataulukko	Taulukko, jossa on leimikosta tehtävät puutavaralajit ja niiden mitat.
PWM	Pulse-width modulation, pulssinleveysmodulaatio
Quadrature count -tila	Pulssianturin tila, jossa kahden pulssilinjan vaihe-ero on 90 astetta, ja jossa anturin pyörimissuunta päätellään siitä kumpi pulsseista tulee ensin.
Rinnankorkeus	1,3 metriä puun tyvestä
RS232	Sarjaliikennestandardi, jota käytetään tietokoneissa.
SPI-väylä	Serial peripheral interface

Viritys

Mittalaitteen näyttämän säätäminen vastaamaan todellista arvoa.

1 JOHDANTO

1.1 Työn taustat

Karstulassa sijaitseva Mikrosys-yritys kehittää hakkuukoneen mittalaitteen osana hakkuukoneen kunnostus- ja kehitysprojektia. Kunnostus- ja kehitystyön kohteena on kaivurikuormaaja-alustainen Valmet 845 -hakkuukone, jossa on Keto 100 -hakkuupää.

1.2 Työn tavoitteet

Opinnäytetyön tavoitteena on tehdä hakkuukoneen mittalaite, joka mittaa puun pituuden ja läpimitan ja laskee niiden avulla puutavarakappaleen tilavuuden. Työn aikana tehdään yrityksen kehittämään valmiiseen hakkuupään ohjaus- ja mittauslaitteistoon ohjelma. Tässä opinnäytetyössä keskitytään kehittämään ohjelmaan pituuden ja läpimitan anturimittaus sekä tilavuudenlaskenta. Työn lopuksi ohjelman toimintaa testataan työmaalla ja arvioidaan mittausten oikeellisuutta.

1.3 Yritysesittely

Mikrosys on vuonna 2006 Karstulaan perustettu pieni yritys, jonka alaa ovat elektroniset ohjaus- ja mittausjärjestelmät. Yrityksen päätuotteita ovat punnitusjärjestelmät kauhakuormaajiin ja kaivinkoneisiin. Yrityksessä työskentelee kaksi henkilöä. (Lehtonen 2015a.)

1.4 Työn rakenne

Johdannossa, luvussa 1, kerrotaan työn taustoista, tavoitteista, toimeksiantajasta ja tutkimusmenetelmistä. Luvussa 2 esitetään työn projektisuunnitelma eli aikataulu ja työsuunnitelma.

Varsinainen työ alkaa esitutkimuksella luvusta 3. Esitutkimuksessa selvitetään ensin, mitä vaatimuksia hakkuukonemittausasetus sisältää (luku 3.1). Sitten esitellään millaisia rungon mallinnusmenetelmiä käytetään mittalaitteessa ja sen kehitystyössä (luku 3.2). Luvussa käydään läpi myös hakkuukonemittauksessa esiintyviä virhelähteitä (luku 3.3) ja millaisiin mittaustarkkuuksiin mittalaitteet nykyään pääsevät läpimitan, pituuden ja tilavuuden mittauksessa (luku 3.4). Lopuksi luvussa kerrotaan tarkemmin, miten hakkuukonemittausasetuksen vaatima satunnaisotanta tehdään käytännössä (luku 3.5).

Luvussa 4 esitellään laitteisto. Luku 4.1 esittelee hakkuupään toiminnot ja miten pituus- ja läpimitta mitataan hakkuupäessä. Luku 4.2 käsittelee mittalaitteen kokoonpanoa ja tarkemmin hakkuupäyksikön piirilevyn mikrokontrolleria ja pulssianturin lukupiiriä.

Ohjelman toimintaa ohjausyksikössä ja näyttöyksikössä käsitellään luvussa 5. Ensin perehdytään ohjausyksikön toimintaan (luku 5.1) ja siihen miten ohjausyksikkö mittaa pituutta mikrokontrollerin pulssianturin lukurajapinnan avulla ja läpimittaa laskuripiirillä. Luvussa kerrotaan myös miten mittausennakko- ja sahaushukkaparametri on huomioitava puun mittauksessa. Luku 5.2 kertoo näyttöyksikön toiminnasta. Siinä käydään läpi näytön tärkeimmät tehtävät eli runkokäyrän tallennus, läpimittamittojen suodatus ja kuutiointi. Luvussa 5.3 kerrotaan tietojen tallennuksesta mittalaitteessa.

Mittalaitteen ohjelman testauksesta kerrotaan luvussa 6. Mittalaitetta testataan ensin pöydällä (luku 6.1) ja sitten hakkuukoneessa työolosuhteissa (luku 6.2). Luvussa 6.3 esitetään mittaussuunnitelma ja luvussa 6.4 kerrotaan testauksesta työmaalla.

Luvussa 7 esitellään mittauserä (luku 7.1), mittaustulokset ja saavutettu mittaustarkkuus. Mittalaitteen pituus- ja läpimittamittauksia (luku 7.2) sekä kuutiointia (luku 7.3) verrataan mittasaksimittaukseen. Lisäksi tarkastellaan runkokäyriä ja läpimittojen suodatusta luvussa 7.4.

Luvussa 8 esitetään päätelmiä testauksesta ja tuloksista. Luvussa 9 pohditaan parannusehdotuksia mittalaitteeseen sekä sen jatkokehitysmahdollisuuksia yrityksessä.

1.5 Tutkimusmenetelmät

Opinnäytetyöhön haetaan esitietoa puutavaramittauksen kirjallisuudesta ja puutavaramittauslaista. Hakkuukoneen ja mittalaitteen toiminnasta saadaan tietoa myös haastatteleamalla toimeksiantajaa, jolla on kokemusta hakkuukonetyöstä.

Esitietojen pohjalta suunnitellaan valmiille laitteistolle ohjelma, jonka toteuttamiseen haetaan tietoa mikropiirien datalehdistä. Lisäksi voidaan käyttää joitakin koodikirjastoja yritykseltä. Toisen mikrokontrollerin ohjelmointiin käytetään ohjelmointiympäristöä, johon perehdytään valmistajan internetsivuilla.

Kun ohjelma on valmis, sitä testataan ensin simuloimalla hakkuupään toimintaa pulssiantureilla. Mittalaitteen mittausten ja laskelmien oikeellisuus varmistetaan tulostamalla ne PC:lle ja analysoimalla niitä. Sitten mittalaite kytketään hakkuukoneeseen ja testataan sitä työolosuhteissa. Mittaustulokset ja laskelmat tulostetaan PC:lle. Lopuksi tuloksia analysoidaan vertailemalla niitä todellisiin mittoihin.

2 PROJEKTISUUNNITELMA

2.1 Aikataulu

Opinnäytetyön aihe on annettu kesäkuussa 2014. Työtä suunnitellaan syksyllä 2014 ja keväällä 2015, jolloin myös tutustutaan kirjallisuuteen. Opinnäytetyötä ja ohjelmaa kirjoitetaan syksyllä 2015 ja keväällä 2016. Ohjelma integroidaan laitteistoon ja testataan hakkuukoneessa kesällä 2016. Opinnäytetyö valmistuu syksyllä 2016.

2.2 Työsuunnitelma

Työn aikana

- tutustutaan valmiiseen laitteistoon, TMS320F28035-mikrokontrolleriin ja TI:n Code Composer Studio -ohjelmointiympäristöön
- tutustutaan hakkuukonemittaukseen, hakkuupään toimintaan, antureihin ja erilaisiin puutavaran kuutiointitapoihin
- perehdytään pituuden ja läpimitan mittaamiseen pulssiantureilla mikrokontrollerissa ja kehitellään kuutiointialgoritmia
- kirjoitetaan mittausten, kuutiointin ja käyttöliittymän ohjelmat
- integroidaan ohjelmat laitteistoon ja testataan pöydällä ja työolosuhteissa
- vertaillaan kuutiointia todellisiin mittoihin ja analysoidaan tuloksia
- pohditaan mittalaitteohjelman jatkokehittämistä.

3 ESITUTKIMUS

3.1 Lainsäädännön mukainen hakkuukonemittaus

Maa- ja metsätalousministeriö (MMM) on vuonna 2006 antanut asetuksen ”hakkuukoneella valmistettavan puutavaran tilavuuden mittaamisesta koneen mittalaitteella”. 1.5.2007 tai sen jälkeen käyttöön otetun hakkuukoneen mittalaitteen on mitattava puutavaraa tämän asetuksen mukaisesti. (A 18.4.2006/926.) Seuraavissa kappaleissa käydään läpi lainsäädännön mukainen hakkuukonemittaus.

3.1.1 Mittaukset

Mittalaitteessa tulee asetuksen mukaan olla puutavaran tai rungon osan pituuden ja läpimitan mittaus. Rungon läpimitta mitataan 1 mm:n tarkkuudella ja pituus 1 cm:n tarkkuudella kuoren päältä. (A 18.4.2006/926.)

3.1.2 Tilavuuden laskenta

Puutavaran tilavuus tulee laskea pätkittäin ja tilavuus tulee tallentaa 0,001 m³:n tarkkuudella. Pölkyn tilavuuden laskentaan käytetään lieriön tai katkaistun kartion kaavaa ja tilavuus lasketaan korkeintaan 10 cm:n pätkissä. (A 18.4.2006/926.)

Tyvipölkyn tyviosa tulee kuutioida erityisellä tyviprofiilifunktiolla tai sitä vastaavalla taulukolla, jotka on annettu asetuksen liitteissä. Tyviprofiilifunktio määrittelee tyviosalle laskennalliset läpimitat, joiden avulla se voidaan kuutioida kuten muukin runko. (A 18.4.2006/926.) Tyvipölkyn läpimitat joudutaan määrittämään laskennallisesti, koska hakkuupään rakenteesta ja läpimitan mittauskohdasta riippuen ensimmäiset tyvipölkyn läpimitat saadaan vasta 0,3–1,5 m:n korkeudelta kaatosahauksesta (Kivinen 2009, 115–116). Tyviprofiilifunktio on puulajikohtainen ja sitä käytetään kaatosahauksesta aina 1,3 m:iin asti (A 18.4.2006/926). Tyviprofiilifunktio on esitelty luvussa 3.2.3.

3.1.3 Lämpimitan suodatus

Tilavuuden laskennassa rungolle muodostetaan runkoprofiili eli runkokäyrä, joka kuvaa rungon muotoa (Kivinen 2009, 116). Runkokäyrästä kerrotaan luvussa 3.2.1 tarkemmin. Runkokäyrään voi tulla epäloogista vaihtelua rungon epätasaisuuksien tai mittausvirheiden takia. Siksi läpimitta-arvoja täytyy suodattaa ennen tilavuuden laskemista. (Kivinen 2009, 116.)

Suodatuksen peruseriaate on, että seuraava läpimitta-arvo hyväksytään, jos se on pienempi tai yhtä suuri kuin edellinen läpimitta. Jos läpimitta-arvo on suurempi kuin edellinen läpimitta, voidaan käyttää joko eteenpäin tai taaksepäin suodatusta läpimitta-arvoille. (Kivinen 2009, 116.)

Eteenpäin suodatuksessa mittalaitte hylkää suuremman läpimitta-arvon ja pitää oikeana läpimittana edellistä eli pienempää arvoa. Tässä suodatustavassa oletetaan, että runko kapenee kohti latvaa. Runko ei kuitenkaan välttämättä aina kapene koko matkaa tyveltä latvaa, jolloin voidaan tietojärjestelmään antaa parametrina kapenemattoman rungonosan suurin pituus, esimerkiksi 50 cm. (Kivinen 2009, 117.)

Jos kapenemattoman rungonosan pituus ylittyy, voidaan käyttää taaksepäin suodatusta. Tällöin pidetään vertailumittana sitä läpimitta-arvoa, jonka jälkeen läpimitta alkoi kasvaa, ja odotetaan kunnes läpimitta jälleen todella kapenee tästä vertailumitasta. Tämän jälkeen väliin jääneet mitat interpoloidaan vertailumitan ja uuden hyväksytyin mitan avulla. (Kivinen 2009, 117.)

Näitä kahta suodatusmenetelmää voidaan myös integroida muihin suodatusmenetelmiin (Kivinen 2009, 117).

3.1.4 Viritys

Hakkuukoneen mittalaitetta tulee voida säätää ja se on aina ennen mittauserän alkua säädettävä valmistajan ohjeiden mukaisesti. Nämä säätöarvot on tallennettava tarkastusta varten. (A 18.4.2006/926.)

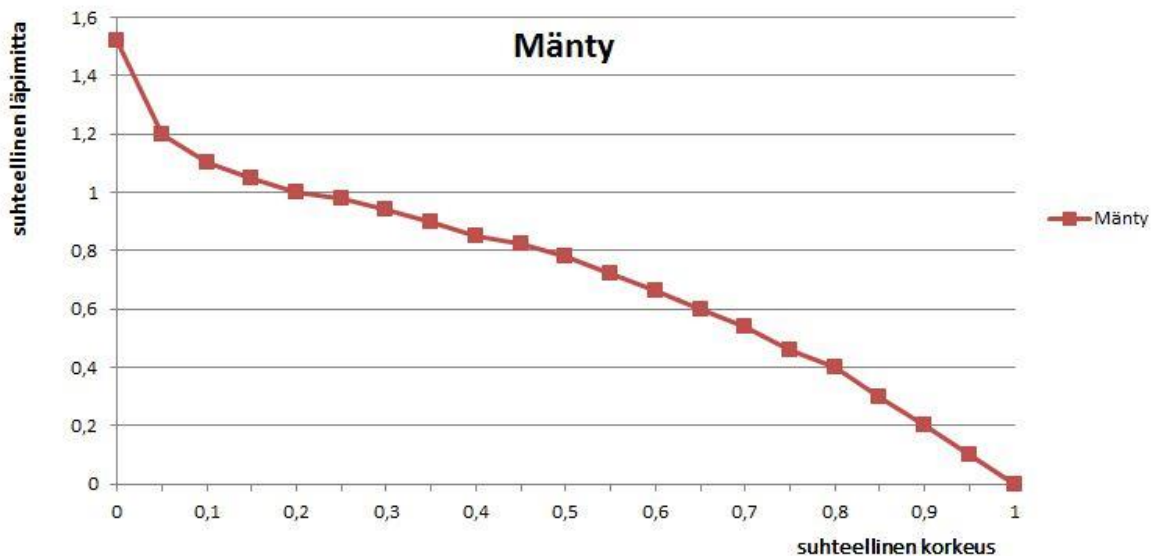
3.2 Rungon mallinnus

Tässä luvussa esitellään muutamia malleja, joita tarvitaan mittalaitteessa ja sen kehitystyössä. Tässä työssä runkokäyrämallin kuvaajia voidaan käyttää mitatun runkokäyrän kuvaajan muodon oikeellisuuden arviointiin. Tilavuusmallia taas käytetään kuutioiden oikeellisuuden vertailussa. Viimeisenä luvussa kerrotaan tyviprofiilifunktiosta, jota käytetään mittalaitteessa tyvipölkyn tyviosan kuutiointiin.

3.2.1 Runkokäyrä ja runkokäyrämallit

Rungot pyritään katkomaan jo metsässä eri puutavaralajeihin ja puutavaralajien sisällä eri pituus- ja latvaläpimittaluokkiin. Tähän pyritään siksi, että puutavara olisi mahdollisimman soveltuva erilaisten lopputuotteiden valmistukseen. Jotta runko voidaan katkoa optimaalisesti, on tiedettävä läpimitat koko rungon pituudelta. Läpimittoja ei voida kuitenkaan mitata ajamalla runko ensin kokonaisuudessaan hakkuupään läpi, koska hakkuuntyön tuottavuus laskisi merkittävästi, ja runkoon saattaisi tulla mekaanisia vaurioita, jotka aiheuttavat laadun huononemista. Ainoa keino on pyrkiä ennustamaan rungon läpimitat eli runkokäyrä. (Kivinen 2009, 111-112.)

Puun runkokäyrä on funktio, joka kertoo puun läpimitan eri korkeuksilla tyvestä alkaen. Runkokäyriä pyritään kuvaamaan erilaisilla malleilla. Eräitä malleja ovat Jouko Laasasenahon 1980-luvulla kehittämät polynomimuotoiset runkokäyrämallit. (Korhonen & Eerikäinen 2001, 92.) Kuviossa 1 on piirretty kuvaaja männylle Laasasenahon (2011) runkokäyrämallin kuvaajien mukaan. Runkokäyräyhtälöiden kuvaajat ovat suhteellisesti hyvin samanmuotoisia eri puulajeille (Laasasenaho 2011). Saman puulajin sisällä runkomuoto kuitenkin vaihtelee eri kokoisilla puilla (Korhonen & Eerikäinen 2001, 94). Laasasenaho korjaa perusmallin polynomia korjauspolynomilla, joka ottaa huomioon myös puun koon vaikutuksen (Korhonen & Eerikäinen 2001, 95).



Kuvio 1. Laasasenahon runkokäyräytälöiden kuvaaja männyllä (Laasasenaho 2011).

Laasasenahon malli tarvitsee läpimitan ennustamiseen puun rinnankorkeusläpimitan ja puun pituuden (Korhonen & Eerikäinen 2001, 94). Puun pituutta voi arvioida esimerkiksi leimikon ensimmäisten mitattujen runkojen perusteella tai aikaisemman mittaushistorian perusteella.

3.2.2 Tilavuusmalli

Jouko Laasasenaho on kehittänyt myös puulajikohtaiset mallit rungon tilavuuden laskemiselle, koska rungon tilavuuden mittaaminen suoraan on työlästä. Laasasenahon malleilla puun tilavuus voidaan laskea mitattavien muuttujien avulla. Malleista tarkin, ns. kolmen tunnuksen tilavuusmalli (kaavat (1), (2) ja (3)), käyttää tilavuuden laskemiseen puun rinnankorkeutta (d), puun pituutta (h) ja puun läpimittaa kuuden metrin korkeudelta (d_6). Mallissa oletetaan puun olevan lieriön muotoinen kannosta rinnankorkeudelle, katkaistun kartion rinnankorkeudelta kuuteen metriin ja kartion kuudesta metrissä latvaan. (Korhonen & Eerikäinen 2001, 84, 90.) Kolmen tunnuksen tilavuusmallin tilavuuden keskivirhe on männyllä 3,5 %, kuusella 3,4 % ja koivulla 4,9 % (Rikala 2009, 34-36).

Rungon tilavuus männylle (1), kuuselle (2) ja koivulle (3) lasketaan kaavoista

$$v = 0,268621d^2 - 0,0145543d^2h - 0,0000478628d^3h + 0,000334101d^2h^2 + 0,0973148(d^2 + dd_6 + d_6^2) + 0,0440716d_6^2(h-6) \quad (1)$$

$$v = 0,208043d^2 - 0,0149567d^2h - 0,000114406d^3h + 0,000436781d^2h^2 + 0,0973148(d^2 + dd_6 + d_6^2) + 0,0374599d_6^2(h-6) \quad (2)$$

$$v = 0,226547d^2 - 0,0104691d^2h - 0,000122258d^3h + 0,000438033d^2h^2 + 0,0991620(d^2 + dd_6 + d_6^2) + 0,0334836d_6^2(h-6) \quad (3)$$

joissa

d on puun rinnankorkeus

h on puun pituus

d₆ on puun läpimitta kuuden metrin korkeudelta

3.2.3 Tyviprofiilifunktio

Laasasenahon runkokäyrämalleja sekä Valtakunnan metsien inventoinnin (VMI) koepuuaineistoa on käytetty hyväksi laadittaessa MMM:n asetuksen tyviprofiilifunktiota ja -taulukoita (Lindblad, Antikainen & Wall 2014).

Rungon tyvipölkyn tyviosan läpimitat ensimmäiseltä 1,3 m:ltä kaatosahauksesta lasketaan tyviprofiilifunktiosta (4) (A 18.4.2006/926, LIITE 2).

Tyviprofiilifunktion kaava on

$$D_L = [1 + (a_0 * (1,3 - L) + a_1 * (1,3 - L)^2)/100] * D_{1,3} \quad (4)$$

jossa

D_L on läpimitta etäisyydellä L kaatosahauksesta (cm)

L on etäisyys rungon kaatosahauksesta (m)

D_{1,3} on läpimitta 1,3 m:n etäisyydellä kaatosahauksesta (cm)

a_0, a_1, a_2 ovat muotoparametreja

Muun muassa puulaji ja puun järeys vaikuttavat rungon tyven muotoon, joten pääpuulajeille on määritelty muotoparametrit a_0, a_1 ja a_2 (kaavat (5), (6) ja (7)), jotka kertovat miten tyven läpimitta muuttuu puulajikohtaisesti tyvestä 1,3 m:n korkeudelle. (A 18.4.2006/926, LIITE 2.)

Muotoparametrit lasketaan kaavoista

$$a_0 = a_{00} + a_{01}D_{1,3} + a_{02}D_{1,3}^2 + a_{03}D_{1,3}^3 + a_{04}D_{1,3}^4 \quad (5)$$

$$a_1 = a_{10} + a_{11}D_{1,3} + a_{12}D_{1,3}^2 + a_{13}D_{1,3}^3 \quad (6)$$

$$a_2 = a_{20} + a_{21}D_{1,3} + a_{22}D_{1,3}^2 \quad (7)$$

joissa

$D_{1,3}$ on läpimitta 1,3 m:n etäisyydellä kaatosahauksesta (cm)

$a_{00} \dots a_{22}$ ovat puulajikohtaisia kertoimia

Muotoparametrikaavoissa $D_{1,3}$ on korkeintaan 45 cm. Jos puun läpimitta 1,3 m:n korkeudelta on suurempi kuin 45 cm, sen tyven muoto oletetaan samaksi kuin 45 cm:n rungoissa. Tämä tehdään rajoittamalla funktioiden (5) ja (7) suurimmaksi arvoksi 45 (cm). (A 18.4.2006/926, LIITE 2.)

Kaavojen (5), (6) ja (7) puulajikohtaiset kertoimet $a_{00} \dots a_{22}$ saadaan taulukosta 1 (A 18.4.2006/926, LIITE 2; Luonnonvarakeskuksen määräys 23.10.2015/1654). Taulukossa 1 on männylle kaksi saraketta, joista ensimmäinen on voimassa vuoden 2016 loppuun ja toinen 1.1.2016 lähtien. Luonnonvarakeskus (Luke) on määrännyt männyn tyvifunktion korjattavaksi, koska funktio on tuottanut suurempia tilavuuksia tyviosalle kuin Luken tutkimuksissa on havaittu (Luke 28.10.2015).

TAULUKKO 1. Puulajikohtaiset kertoimet
(A 18.4.2006/926, LIITE 2; Luonnonvarakeskuksen määräys 23.10.2015/1654).

Kerroin	Mänty (31.12.2016 asti)	Mänty (1.1.2016 lähtien)	Kuusi	Koivu/Lehtipuut
a₀₀	24,30	5,50	30,46	27,04
a₀₁	-1,324	0	-3,399	-2,004
a₀₂	0,039372	0	0,181337	0,066531
a₀₃	-0,0003850	0	-0,0043459	-0,0007020
a₀₄	0	0	0,00003908	0
a₁₀	1,00	7,00	-0,35	0,41
a₁₁	0,381	0	0,143	0,440
a₁₂	-0,006291	0	0,016430	-0,006870
a₁₃	0	0	-0,0003800	0
a₂₀	7,70	3,6	12,65	8,85
a₂₁	-0,233	0	-0,556	-0,300
a₂₂	0,003056	0	0,008019	0,004027

Asetuksen liitteeseen 3 ja määräyksen liitteeseen 1 A on laskettu ja taulukoitu tyviprofiilifunktiosta valmiiksi suhteelliset läpimitat promilleina puulajeittain. Asetuksen ja määräyksen taulukot eroavat toisistaan vain männyn osalta. Läpimitat on taulukoitu jokaiselle rinnankorkeusläpimitaltaan 8–45 cm olevalle rungolle 10 cm:n välein. (A 18.4.2006/926, LIITE 3; Luonnonvarakeskuksen määräys 23.10.2015/1654.)

3.3 Virhelähteet

Pölkyn pituuden, läpimitan ja tilavuuden mittaukseen vaikuttaa mittauksen mekaaninen tarkkuus, mittausvirheet, suodatusmenetelmät sekä laskentakaavat. Tilavuus on kuitenkin johdettu suure, joka riippuu pituuden ja erityisesti läpimitan tarkkuudesta. (Kivinen 2009, 118-120.) Seuraavaksi tarkastellaan pituuden, läpimitan ja tilavuuden mittauksen tarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä.

Pölkyn pituutta mitataan hammastetulla mittapyörällä, joka seuraa puun pintaa. Jos mittapyörän uppoama puun pintaan poikkeaa oletetusta, muuttuu mittapyörän kierrosmäärä tietyllä matkalla, mikä vaikuttaa suoraan mitattuun pituuteen. Mittapyörän uppoumaan vaikuttaa sen painamisvoima, hammastusten muoto ja puun pinnan kovuus. (Kivinen 2009, 118.)

Pituuden mittaustarkkuuteen vaikuttavat myös rungon mutkat, lenkous eli rungon kaarevuus, oksakyhmyt, haarat ja tyvikaarevuus. Kaikissa näissä poikkeamissa mittapyörän kulkema matka ei ole lyhin etäisyys kahden katkaisukohtan välillä, ja tämän vuoksi pölkyt saatetaan katkaista liian lyhyiksi. Pituusvirhe on sitä suurempi, mitä pienempi mittapyörän halkaisija on. (Kivinen 2009, 119.)

Huonosti karsiutuvissa lehtipuissa tai tilanteessa, jossa runkokäyrän ennustaminen on epäonnistunut, voidaan runkoa joutua peruuttamaan tai syöttämään edestakaisin. Edestakainen syöttö tai peruuttaminen aiheuttaa helposti virhettä pituusmittaukseen, koska mittapyörä seuraa vanhaa jälkeä eikä puun kuoren pintaa. (Kivinen 2009, 119.)

Muita pituusmittaan vaikuttavia tekijöitä ovat mittapyörän luisto rungon pinnassa, rungon kiertyminen mittauksen aikana sekä keuliminen. Luistoa esiintyy, kun irronnut kuori varsinkin kasvukauden alussa saattaa kerääntyä mittapyörän eteen ja estää sen pyörimisen. Rungon kiertyessä mittapyörä taas mittaa kiertymän pituutta, ei lyhintä etäisyyttä. Keuliminen tapahtuu syötön alussa kun nopeutta lisätään. Tällöin mittapyörä ei kosketa puuta lainkaan. (Kivinen 2009, 119.)

Läpimitan mittaamisessa virhettä aiheuttavat samat tekijät kuin pituutta mitattaessa. Syöttörullat, joiden asennosta läpimita mitataan, seuraavat tarkasti rungon pintaa, jolloin pinnanmuodon vaihtelut, kuten oksakyhmyt tai kuoriutuneet osat, lisäävät tai vähentävät rungon todellista läpimittaa. Puun pinnan kovuuden vaihtelu tai rungon poikkeava asento syöttörullissa vaikuttaa myös läpimitaan. (Kivinen 2009, 119-120.)

Lisäksi mittalaitteiden laskentaohjelmat usein olettavat rungon läpileikkauksen pyöreäksi, vaikka tutkimusten mukaan yleisempää on epäpyöreys. Tämä aiheuttaa siis läpimitan mittausrvirhettä lähes kaikilla rungoilla. (Kivinen 2009, 120.)

Edellä käsiteltyjen mekaanisten virheiden lisäksi mittausvirhettä voivat aiheuttaa kone-elinten mekaaninen kuluminen, epälineaarinen anturin mitta-alue sekä antureiden erottelukyky ja lämpötilariippuvuus. Antureiden lämpötilariippuvuus ei ole kuitenkaan enää merkittävä ongelma uusimmissa hakkuukoneissa. (Kivinen 2009, 120.)

Pölkyn tilavuus johdetaan mitatuista pituus- ja läpimita-arvoista, jolloin niiden tarkkuus vaikuttaa tilavuuden mittaustarkkuuteen. Erityisesti läpimitan tarkkuudella on merkitystä, koska esimerkiksi 1 %:n systemaattinen virhe pituudessa aiheuttaa 1 %:n virheen tilavuudessa, mutta samansuuruinen virhe läpimitassa aiheuttaa noin 2 %:n virheen tilavuudessa. Usein kuitenkin virheet perusmittauksissa eivät ole systemaattisesti samansuuruisia, jolloin ne kompensoivat toisiaan, eivätkä aiheuta automaattisesti huonoa tilavuuden mittaustarkkuutta. Pituuden ja läpimitan virheet heikentävät kuitenkin aina katkontatarkkuutta ja pituus-läpimitajakauma ei vastaa puunjalostajan toivomaa jakaumaa. (Kivinen 2009, 120.)

Pituuden ja läpimitan tarkkuuden lisäksi tilavuuden tarkkuuteen vaikuttaa suodatusmenetelmä, jolla runkokäyrä muodostetaan. Suodatuksessa läpimittojen kasvua latvan suuntaan ei hyväksytä, jolloin suodatusmenetelmä pienentää rungon tilavuutta. Jos mittalaite mittaa läpimittaa systemaattisesti liian suureksi, kompensoi suodatusmenetelmä tämän virheen. Jos läpimita mitataan systemaattisesti liian pieneksi, pienentää suodatus läpimittaa entisestään ja lisää tilavuuden mittausvirhettä. Suodatusmenetelmien vaikutuksista tilavuuden mittaukseen ei ole tiettävästi julkaistu tutkimuksia. (Kivinen 2009, 120.)

Aikaisemmin myös se, minkä pituisissa pätkissä runkoa kuutioitiin ja millä kuutiointikaavalla (lieriö vai katkaistu lieriö), vaikutti tilavuuden tarkkuuteen. Nykyiset hakkuukoneet kuutioivat kuitenkin jo esimerkiksi 1 cm:n pituisissa pätkissä, jolloin kuutiointikaavalla ei ole kovin suurta merkitystä. (Kivinen 2009, 120.)

3.4 Mittaustarkkuus

Hakkuukonemittaus otettiin 1990-luvun alussa Suomessa viralliseksi työ- ja luovutusmittausmenetelmäksi, ja siitä lähtien sitä on säännelty ja tarkastettu. Osittain tämän takia Suomessa ei ole tutkittu hakkuukoneen mittaustarkkuutta yhtä paljon kuin Ruotsissa 1990-luvun jälkeen. (Kivinen 2009, 121.)

Suomessa Metsäteho Oy on tehnyt viimeisimmän laajan tutkimuksen hakkuukoneiden mittaustarkkuudesta vuonna 2003. Tutkimuksessa oli mukana noin kymmenen tunnetuimman valmistajan hakkuukonetta. Näistä tarkimmat mittasivat $\frac{2}{3}$ pölkkyjen pituuksista ± 1 cm:n ja epätarkimmat ± 4 cm:n tarkkuudella. Lämpimitoissa tarkimmat pääsivät ± 3 mm:iin ja epätarkimmat ± 6 mm:iin $\frac{2}{3}$:ssa pölkkyjä. Ruotsissa Skogforsk julkaisi vuonna 2006 tutkimuksen, jonka mukaan mittalaitteet mittasivat 84 % pölkyn pituuksista keskimäärin ± 2 cm:n vaihteluväliin oikeasta pituudesta ja 68 % (eli $\frac{2}{3}$) pölkyn läpimitoista ± 4 mm:n vaihteluväliin oikeasta läpimitasta. (Kivinen 2009, 121-122.)

Tilavuuden mittaustarkkuus on parantunut läpimitan ja pituuden mittausten tarkentuessa. Skogforskin viimeisimmässä tutkimuksessa vuodelta 2006 kokonaistilavuuden mittausvirhe vaihteli -1,4:stä +1,5:een prosenttiin. (Kivinen 2009, 122.)

Tutkimustuloksista on huomattu, että nykyisellä puuta koskeavalla mittaustekniikalla ei päästä parempiin tarkkuuksiin pituuden ja läpimitan mittauksessa. Tilavuuden mittaustarkkuus on kuitenkin hyväksyttävä. Tähän tarkkuuteen päästää kuitenkin vain, jos mittalaite toimii valmistajan tarkoittamalla tavalla ja se on viritetty kulloisiinkin työskentelyolosuhteisiin. (Kivinen 2009, 122.)

3.5 Satunnaisotanta

MMM:n asetuksen mukaan mittalaitteen toimivuutta on seurattava säännöllisesti. Seurannassa valitaan näyterunkoja satunnaisesti arpomalla vähintään 2–3 työpäivän välein. Näyterungoista katkottujen pölkkyjen pituuksia ja läpimittoja

verrataan mittalaitteen tallentamiin mittoihin. Näyterungot valitaan toteutunut mittaustarkkuus huomioiden. (A 18.4.2006/926.)

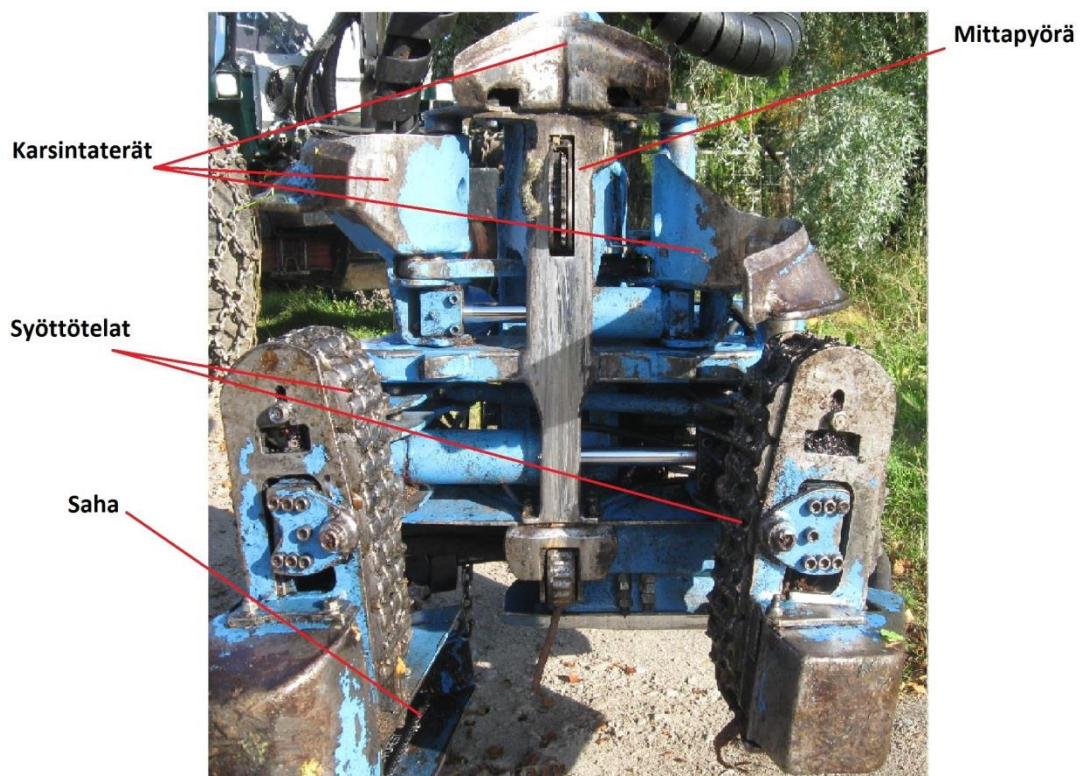
Näyterungot mitataan käyttämällä enintään yhden metrin pätkän pituutta. Lämpimitat mitataan mittasaksilla kuoren päältä yhden millimetrin tarkkuudella yhden metrin välein, alkaen 0,5 metriä pölkyn tyvipäästä. Tyvipölkyllä ensimmäinen mittaushohta on kuitenkin vasta 1,3 metriä tyvisahauksesta, koska tyvipölkyn tyviosa kuutioidaan tyviprofiilifunktiolla. Tyvipölkyn seuraava mittaushohta on 1,5 metriä tyvisahauksesta ja tämän jälkeen mittaushohdat ovat metrin välein. Kaikilla pölkkyillä läpimitta mitataan myös viimeisen pölkynosan puolivälistä. Pölkyn pituus mitataan yhden senttimetrin tarkkuudella. (A 18.4.2006/926.)

Pölkkyjen tilavuus lasketaan sylinterin kaavalla pätkien tilavuuksien summana. Tyvipölkyn tyviosan tilavuus katkaisukohdasta yhteen metriin lasketaan tyviprofiilifunktion tai siitä laskettujen taulukoiden avulla. (A 18.4.2006/926.)

4 LAITTEISTO JA TYÖKALUT

4.1 Keto 100 -hakkuupään rakenne ja pulssianturit

Keto 100 on Kone-Ketonen Ky:n valmistama hakkuukoneen hakkuupää (kuva 1), jolla kaadetaan, karsitaan, katkotaan ja kasataan puuta. Siinä on mm. patentoitu telasyöttö (Kone-Ketonen Ky, 7). Projektin hakkuupään valmistusvuosi on 1994.



Kuva 1. Keto-harvesterin eli hakkuupään pääosat: mittapyörä, karsintaterät, syöttölaite (syöttötelat) ja saha.

Keto 100 -hakkuupäässä puun pituutta mitataan mittapyörän ja kahden induktiivisen anturin eli induktiivisen lähestymiskytkimen avulla (Kone-Ketonen Ky, 59, 61; Lehtonen 2015a). Kun telat syöttävät puuta, mittapyörä pyörii puuta vasten. Mittapyörän hampaat kulkevat induktiivisen lähestymiskytkimen ohi aiheuttaen jännitepulsseja, joista voidaan laskea puun pituus.

Puun läpimittaa mitataan pulssianturilla, joka on asennettu mekanismin välityksellä hakkuupään syöttöteloihin (Kone-Ketonen Ky, 63). Pulssianturi mittaa siis telojen aukenemaa puuta syötettäessä.

4.2 Laitteisto

Mikrosysin mittalaitteen laitteisto koostuu pulssiantureista, hakkuupään ohjausyksiköstä, hakkuupään ohjaimista ja näyttöyksiköstä. Ohjausyksikkö asennetaan hakkuupäähän ja mittaustietojen siirto tehdään CAN-väylällä ohjaamossa olevalle näyttöyksikölle. Hakkuupään ohjaimet liitetään näyttöyksikköön digitaalituloilla.

Ohjausyksikössä on kolme pulssianturin tuloa, ADC-tuloja, PWM-ohjauslähtöjä sekä CAN-väyläliitäntä. Hakkuupäyksikössä on Texas Instrumentsin TMS320F28035-mikrokontrolleri, EEPROM-muisti, kaksi pulssianturin lukupiiriä LS7366R, CAN-transceiver ja yläpuoliset FET-kytkimet. Ohjausyksikkö on suunniteltu yleiseksi ohjausyksiköksi, joka voidaan asentaa moniin erilaisiin hydraulikkaohjaussovelluksiin. (Lehtonen 2015a.)

Näyttöyksikkö on useissa Mikrosysin tuotteissa käytetty näyttö, jossa on nestekidenäyttö, näppäimistö, CAN-väyläliitäntä, sarjaväylä tulostimelle ja USB-tikulle, digitaalituloja ja -lähtöjä sekä ADC-tuloja. Näyttöyksikössä on Atmelin at90can128-mikrokontrolleri. (Lehtonen 2015a.)

4.2.1 Ohjausyksikön TMS320F28035-mikrokontrolleri

TMS320F28035 kuuluu Texas Instrumentsin (TI) 32-bittisten C2000-mikrokontrollereiden Piccolo 2803x -sarjaan. C2000-kontrollerit on suunniteltu vaativiin reaaliaikaisiin ohjainsovelluksiin. (Texas Instruments Wiki 19.6.2014.)

Kontrollerissa on 12 PWM-kanavaa ja 14 12-bittistä ADC-tuloa, joita voidaan käyttää hakkuupään liikkeiden ohjaukseen ja mittaukseen. Kontrollerissa on myös eQEP-rajapinta, jolla voidaan lukea yhtä pulssianturia. Lisäksi kontrolleri tukee mm. ulkoista CAN-väylää sekä sisäistä SPI-väylää, joilla toteutetaan mittalaitteen tiedonsiirto. (Texas Instruments 10/2013.)

TMS320F28035-mikrokontrollerissa on myös rinnakkaisprossessori Control Law Accelerator (CLA), joka on arkkitehtuurisesti erotettu pääprossessorista eli sillä on oma muistiavaruus, osoite-, kirjoitus- ja lukuväylä. Sillä voidaan toteuttaa ajallisesti

kriittisiä PWM-ohjaustoimintoja tai ADC-mittauksia. CLA-rinnakkaisprosessoria voidaan käyttää myös matemaattisissa operaatioissa. (Texas Instruments 10/2013.)

TMS320F28035-mikrokontrolleria ohjelmoidaan Code Composer Studio v6 -ohjelmointiympäristöllä (CCSv6), joka on tarkoitettu TI:n sulautettujen prosessorien ohjelmointiin. CCSv6 pohjautuu alunperin Eclipse-ohjelmointiympäristön avoimen lähdekoodin kehitysalustalle. CCSv6-ympäristöllä voidaan mm. muokata ja kääntää koodia, etsiä virheitä ja simuloida ohjelmaa. (Texas Instruments Wiki 24.4.2014.)

4.2.2 Ohjausyksikön pulssianturin lukupiiri LS7366R

Ohjausyksikön toista pulssianturia luetaan LS7366R-laskuriin, jonka on valmistanut LSI Computer Systems. Tähän 32-bittiseen laskuriin voidaan kytkeä suoraan pulssianturilta kaksi vaihepulssia ja indeksipulssi, jolloin saadaan tieto nopeudesta, suunnasta ja paikasta. Piiri kommunikoi mikrokontrollerin kanssa SPI-väylän kautta. (LSI/CSI LS7366R 6/2014.)

5 OHJELMA

5.1 Ohjausyksikkö

Ohjausyksikköön toteutetaan tässä työssä kaksi pulssianturin lukua, SPI-väylätoiminnot pulssianturin lukupiirille LS7366R, parametritaulukot EEPROM-muistiin sekä mittausten lähetys CAN-väylälle. Yritykseltä saadaan valmiit kirjastot CAN-väylätoiminnoille, EEPROM-muistin lukuun ja kirjoitukseen SPI-väylän kautta.

5.1.1 Pituuden mittaus

Pituusmittauksessa pulssien taajuus on suurempi kuin läpimitan mittauksessa, joten pituuspulssien lukemisen on oltava nopeaa (Lehtonen 2015a). Puun pituutta mitataankin mikrokontrollerin eQEP-rajapinnalla, koska rajapinnan laskurin lukeminen on nopeampaa kuin SPI-väylän kautta luettavan LS7366R-piirin laskurin luku. Mikroprosessorissa laskurirekisterin lukeminen eli lukukäskyn suorittaminen vie aikaa 0,017 μ s, kun taas SPI-väylältä yhden bitin lukeminen vie aikaa jo 6,7 μ s (Texas Instruments 10/2013; Texas Instruments 5/2013; Texas Instruments 8/2001).

eQEP-rajapinnan alkuasetukset ovat tässä sovelluksessa yksinkertaiset. Ensin asetetaan pulssianturin lukurajapinnan pinnit haluttuun toimintatilaan. TMS320F28035-mikrokontrollerissa pinnien tiloja käsitellään GPIO-kontrollirekisterien kautta (Texas Instruments 5/2013). Koska mikrokontrollerissa on jopa kolme toimintoa yhtä pinniä kohden, on rajapinnat multipleksattu rekisterien avulla (Texas Instruments 5/2013). Pulssianturin pulssit tulevat pinneihin 62 ja 63 ja ne saadaan käyttöön GPIO Port A MUX 2 -rekisteristä asettamalla vastaavat bitit ylätilaan (Texas Instruments 5/2013).

eQEP:n dekooderin kontrollirekisteri on nimeltään QDECCTL. Dekooderin kontrollirekisterissä on oletuksena Quadrature count -tila, jolloin dekooderi tuottaa kahdesta tulopulssista sekä laskuri- että suuntatiedon. Suuntatieto saadaan

vertailemalla kumman pulssin nouseva reuna tulee ensin eli kumpaan suuntaan pulssianturi pyörii. Tämän mukaan laskurin arvo kasvaa tai vähenee. Muita asetuksia ei QDECCTL-rekisteristä tarvita. (Texas Instruments 5/2009.)

Laskurin arvon voi lukea 32-bittisestä QPOSCNT-rekisteristä. Laskurin toimintatapaa taas voi muuttaa rajapinnan kontrollirekisteristä QEPCTL. Kontrollirekisteristä sallitaan laskurin käyttö ja yli- tai alivuototapauksessa laskuri asetetaan hyppäämään maksimiluvusta nolnaan ja nollasta maksimilukuun. Laskurin koko lukualue otetaan käyttöön asettamalla rekisteriin QPOSMAX arvo $2^{32} - 1$ eli 4 294 967 295. (Texas Instruments 5/2009.) Jos pulssianturi antaa yhdellä kierroksella 2000 pulssia, ja jos mittapyörän kulkema matka (mittapyörän kehän pituus) on esimerkiksi 10 cm, voidaan 32-bittisellä laskurilla laskea yli 214 000 metriin asti.

Pituusmittauksen laskurirekisterin arvo luetaan muuttujaan yleisessä ajastinkeskeytyksessä, muunnetaan main-funktiossa millimetreiksi ja lähetetään CAN-väylälle.

5.1.2 Lämpimitan mittaus

Lämpimitan pulssianturin pulssit luetaan LS7366R-laskuripiirillä. Piiriin tuodaan anturin vaihepulssit A ja B ja piiri tuottaa näistä sekä laskuri- että suuntatiedon.

Piiri kommunikoi mikrokontrollerin kanssa SPI-väylän kautta. SPI-väylän alustukset ja rutiinit saadaan valmiina yritykseltä. Mikrokontrollerin SPI-väylällä voidaan lähettää yhdestä kuuteentoista bittiä kerralla (Texas Instruments 10/2013).

Ensin piiriin valitaan oikeat asetukset. Piirillä on kaksi 8-bittistä toimintatilarekisteriä MDR0 ja MDR1 (LSI/CSI LS7366R 6/2014), joista valitaan halutut ominaisuudet. Kuten mikrokontrollerissa, tässäkin piirissä käytetään Quadrature count -tilaa. Lisäksi laskuri saa juosta vapaasti. Laskuripiirille valitaan myös 32-bittinen lukualue.

Alkuasetusten jälkeen laskurin luku käynnistetään ajastinkeskeytyksessä lähettämällä 8-bittinen laskurinlukukäsky SPI-väylällä laskuripiirille. Laskurin arvo luetaan kahdessa seuraavassa SPI-keskeytyksessä 16-bittisinä lukuina piirin CNTR-rekisteristä (LSI/CSI LS7366R 6/2014).

Kun laskurin arvo on luettu muuttujaan, muunnetaan läpimittapulssit main-funktiossa millimetreiksi. Lopuksi läpimitta lähetetään CAN-väylälle.

5.1.3 Läpimitan mittausennakko ja pituuden sahaushukka

Puun läpimittaa mitataan hakkuupään syöttölaitteiden kohdalta, kuten luvussa 4.1 kerrotaan. Läpimitan mittauskohta eli syöttölaitteet sijaitsevat eri kohdassa kuin saha, kuten kuvasta 1 voidaan huomata. Puuta ei siis katkaista mittauskohdasta vaan sahan kohdalta, jolloin kuljettajan näkökulmasta läpimittalukema on pienempi kuin läpimitta sahauskohdassa (Epec Oy 1994, 15). Mittauskohdan etäisyyttä sahasta kutsutaan läpimitan mittausennakoksi, ja mittausennakkotietoa tarvitaan kuutioidinnissa (Epec Oy 1994, 15).

Ohjausyksikössä läpimitan mittausennakko huomioidaan niin, että mitatut läpimitat viivästetään suhteessa mitattuihin pituuksiin mittausennakon verran. Tämä tehdään tallentamalla mittausennakkomatkalta mitatut läpimitat muistiin ja lähettämällä ne CAN-väylälle vasta, kun hakkuupää on syöttänyt puuta mittausennakon verran.

Sahaushukka taas on nimensä mukaisesti sahauksessa hukkaan mennyt puun pituus. Sahaushukka riippuu teräketjun leveydestä (Epec Oy 1994, 10). Pituuden mittauksessa sahaushukka huomioidaan niin, että ohjausyksikössä mitatusta sahauspituudesta vähennetään teräketjun leveys ennen sen lähettämistä CAN-väylälle.

Mittausennakko ja sahaushukka tallennetaan parametreina ohjausyksikön EEPROM-muistiin.

5.1.4 Pituuden ja läpimitan viritys ja muunnos millimetreiksi

Mittalaite on viritettävä ennen puun käsittelyä, jotta pulssiantureilta mitatut pulssit voidaan muuttaa pituusyksiköiksi. Ohjausyksikön EEPROM-muistiin tallennetaan pituuden ja läpimitan viritystä varten läpimittakäyrä sekä pituuspulssien määrä tiettyä pituutta kohti (Lehtonen 2015b). Kuljettaja syöttää nämä arvot näyttöyksikköön, josta ne lähetetään CAN-väylää pitkin ohjausyksikköön.

Pituus viritetään työn alussa seuraavalla tavalla: Ensin tehdään puun sahaus, jolloin pituusmitta nollautuu. Sitten syötetään puuta hakkuupäässä pisimmän pölkyn pituuden verran, esimerkiksi kuusi metriä, ja tallennetaan tämän matkan pulssimäärä mittalaitteelle. Lopuksi mitataan millimetreissä syötetyn puun pituus esimerkiksi mittanauhalla ja syötetään arvo mittalaitteen muistiin. (Lehtonen 2015b.)

Läpimitan virittämiseen ei voida käyttää yhtä muuntolukua, koska pulssianturin pulssimäärän ja hakkuupään avauman suhde vaihtelee eri läpimitoissa. Läpimitta viritetään niin kutsutulla läpimittakäyrällä, joka saadaan tallentamalla eri avaumilla mitatut pulssit ja niitä vastaavat, käsin mitatut läpimitat. Läpimitan muunnos millimetreiksi tehdään interpoloimalla lineaarisesti läpimittakäyrää, jos mitattu läpimitta sattuu kahden pisteen välille. (Lehtonen 2015b.)

5.2 Näyttöyksikkö

Näyttöyksikkö vastaanottaa pituus- ja läpimittatietoa ohjausyksiköltä ja lähettää parametritietoja ohjausyksikölle CAN-väylää pitkin. Näyttöyksikkö tallentaa ohjausyksikön merkitsemät pituus-läpimittaparit ja suodattaa läpimittamittauksen. Lisäksi näyttöyksikkö laskee tyvipölkyn läpimitat tyviprofiilifunktion tai niitä vastaavien taulukoiden avulla. Mittauksista muodostetaan näyttöyksikössä runkokäyrä. Katkontasahauksen jälkeen näyttö laskee runkokäyrästä tilavuuden pätkittäin pölkylle, ja kokonaistilavuus sekä pölkyn tiedot tallennetaan muistiin. (Lehtonen 2015b.)

Näyttöyksikön tulee pitää muistissa viimeisen rungon runkokäyrä. Pysyvään muistiin tallennetaan lisäksi puutavaramittataulukot ja tyvikuutiointitaulukot eri puulajeille sekä tilavuusmittaustulokset. (Lehtonen 2015b.)

Näyttöyksikkö näyttää hakkuukoneen kuljettajalle suodattamatonta läpimittaa millimetreissä ja pituutta senttimetreissä jatkuvasti juoksevina numeroina (Lehtonen 2015b; A 18.4.2006/926). Kuljettaja antaa näyttöyksikölle painikkeiden avulla tietoa puulajista, katkonnasta ja ajotavasta (Lehtonen 2015b).

5.2.1 Mittausten tallennus runkokäyrään

Puun läpimitta tulee mitata vähintään 10 cm:n välein kuutiointia varten. Näyttöyksikön at90can128-mikrokontrollerissa on 4 kt RAM-muistia (Atmel 8/2008), johon tallennetaan mm. runkokäyrämittaukset. CAN-väylältä luetaan mittauspareja 140 krt/s ja nämä näytetään työnäytössä. Yksi mittauspari muunnettuna millimetreiksi vie muistia 32 bittiä eli 4 tavua. Jos pölkystä halutaan mittoja esimerkiksi noin 1 cm:n välein, tulee 5,5 metrin pölkystä 550 mittausparia, jotka vievät 2200 tavua RAM-muistia. 2200 tavua on yli puolet koko RAM-muistista, joten jokaista lähetettyä mittausparia ei voida tallentaa runkokäyrätaulukkoon. Ohjausyksikkö valvookin pituusmittauksen edistymistä ja merkitsee alitunnuksella ne mittauspariheykset, jotka tallennetaan näytön muistiin runkokäyrää varten. Näyttöön tallennetaan mittauksia noin kerran 5 cm:n matkalta.

5.2.2 Läpimitan suodatus

Läpimitan suodatukseen käytetään luvussa 3.1.3 esiteltyä eteenpäinsuodatusta. Läpimitta suodatetaan näytteenotossa siten, että runkokäyräntaulukossa seuraavan mittausparin läpimitta ei saa olla suurempi kuin edellisen mittausparin läpimitta. Jos uusi arvo on suurempi kuin edellinen arvo, se hylätään ja sen tilalle runkokäyrään tallennetaan edellinen pienempi arvo.

Taaksepäinsuodatusta kapenemattoman rungonosan osalta ei tässä mittalaitteen versiossa oteta vielä käyttöön lähinnä laskentatehollisista syistä.

5.2.3 Kuutiointi

Ennen kuutiointia tulee runkokäyrän olla kokonaisuudessaan näyttöyksikön muistissa. Runkokäyrä on taulukko pituus-läpimittapareista, jotka on saatu joko mittauksina ohjausyksiköltä tai tyvipölkyn tyviosan tapauksessa laskennallisesti puulajikohtaisesta tyviläpimittataulukosta.

Kun pölkky on katkottu sopivaan mittaan ja runkokäyrä laskettu ja tallennettu, alkaa pölkyn kuutiointi. Pölkky kuutioidaan katkaistun kartion kaavalla (8), jossa voidaan käyttää kartion alku- ja loppuläpimittaa d_0 ja d_1 (Sipi 2009, 33), jolloin ei tarvita mittoja pätkän päiden väliltä. Pätkän pituutena h käytetään korkeintaan 10 cm:n pituutta. Pätkät summataan pölkyn tilavuuteen, ja kokonaistilavuus tallennetaan muistiin sekä näytetään näytöllä kuljettajalle.

Pölkky kuutioidaan kaavalla

$$V = \pi h(d_0^2 + d_0 d_1 + d_1^2)/12 \quad (8)$$

jossa

V	on pätkän tilavuus
h	on pätkän korkeus
d_0	on pätkän alkuläpimitta
d_1	on pätkän loppuläpimitta

5.3 Muistit ja tietojen tallennus

Näyttöyksikön pysyvään muistiin tallennetaan edellinen runkokäyrä, tyviläpimittataulukot ja parametrit. Näyttöyksikössä on käytössä 128 kt sisäistä Flash-muistia (Atmel 8/2008), johon tallennetaan tyviläpimittataulukot jokaiselle puulajille. Ne vievät muistia noin 3 kt. Edellinen runkokäyrä tallennetaan ulkoiseen FRAM-muistiin, jota on 32 kt (Ramtron 7/2011). Yksi runkokäyrä vie muistia noin 2 kt. Parametrit tallennetaan sisäiseen 4 kt:n suuruiseen EEPROM-muistiin (Atmel 8/2008) ja ne vievät joitakin kymmeniä tavuja muistia.

Ohjausyksikön ulkoiseen EEPROM-muistiin tallennetaan parametrit ja runkokäyräpisteiden lähetyspuskuritaulukko. EEPROM-muistin koko on 16 kt (ON Semiconductor 2/2014).

6 TESTAUS

6.1 Ohjelman integrointi laitteeseen

Ohjausyksikön ja CAN-väylän toimintaa testattiin simuloimalla hakkuupään toimintaa pöydällä (kuva 2). Kahta pulssianturia pyöritettiin käsin, jolloin nähtiin pulssit ja muunnetut mitat mittalaitteen näytössä. Kuutionalgoritmia testattiin lähettämällä mittaukset ja kuutiot näyttöyksiköltä PC:lle RS232-väylän kautta omaan sarjaporttiohjelmaan. Tyvipölkky merkittiin ohjelmaan napin painalluksella, koska hakkuupään ohjausta ei ole vielä integroitu mittalaitteen kanssa. Tuloksia tarkastelemalla testattiin mittausten oikeellisuus ja tallennus runkokäyrään, läpimittojen suodatus, tyvipölkyn tyviosan läpimittojen laskenta sekä pätkien kuutiointi.



Kuva 2. Mittalaitteen kokoonpano testauksessa: 1. PC:n sarjaporttiohjelma, 2. näyttöyksikkö, 3. ohjausyksikkö ja 4. pulssianturit.

Testien perusteella ohjelmassa huomattiin joitakin ongelmia, joihin tehtiin korjauksia. Seuraavaksi tärkeimpiä huomioita testauksesta.

LS7366R-laskuripiirin toiminta SPI-väylällä ei ole täysin standardin mukainen. Laskuripiiri asettaa bitin väylälle SPI-väylän kellon laskevalla reunalla ja lukee kellon nousevalla reunalla, mutta valmiustilassa Slave Select (SS) -linja onkin alatilassa (LSI/CSI LS7366R 6/2014). TI:n mikrokontrollerin SPI-väylän kellon asetuksia piti muuttaa niin, että bitti asetetaan väylälle puoli jaksoa ennen kellon nousevaa reunaa, jolloin se on vastaanottajan luettavissa jo nousevalla reunalla (Texas Instruments 10/2009). Vastaanottava piiri lukee bitin kellon laskevalla reunalla ja Slave Select -linja (SS) on valmiustilassa alhaalla (Texas Instruments 10/2009).

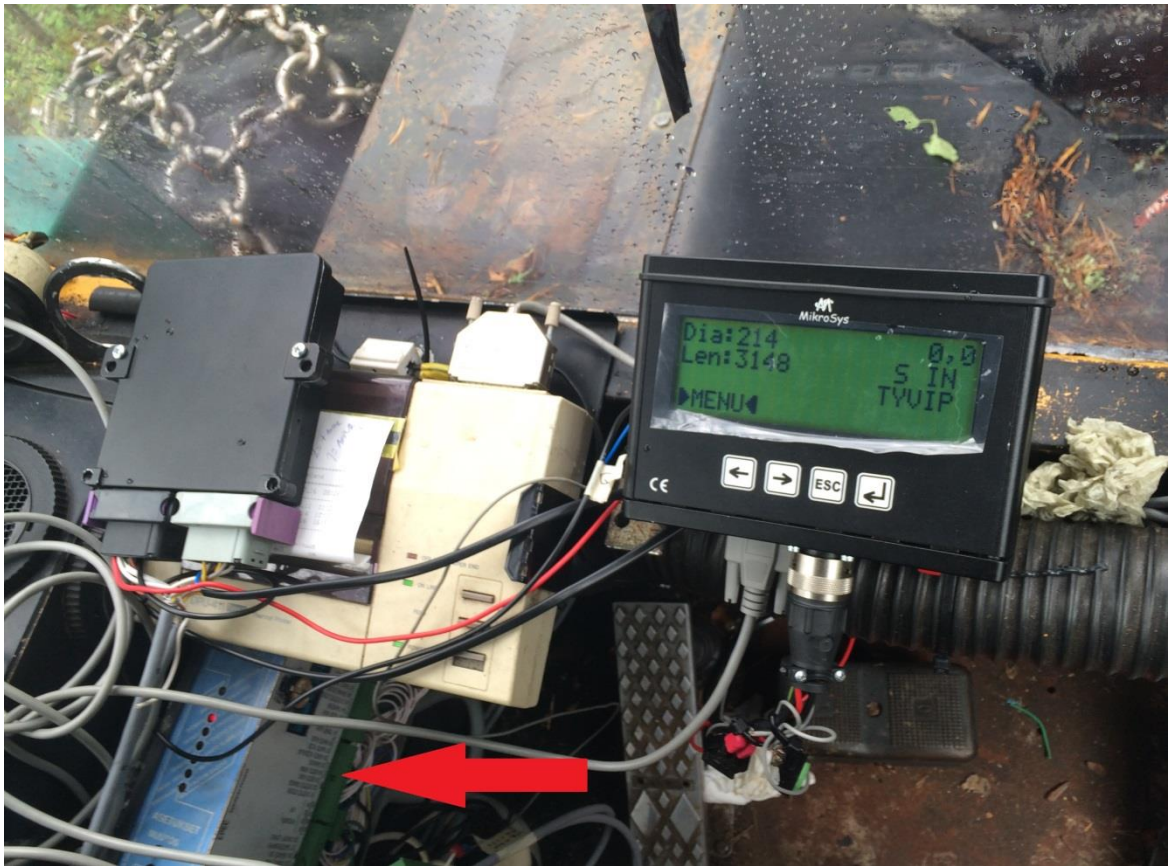
Ongelmaa aiheutti myös näytön RAM-työmuistin vähyys. Kuten kappaleessa 5.2.1 todettiin, jokaista runkokäyrän mittauseriä ei voida tallentaa näytön muistiin. Päätettiin läpimitat tallentaa noin 5 cm:n välein, mikä alittaa lain asettaman 10 cm:n ylärajan kuutiointipätkän pituudeksi.

at90can128-mikroprosessorilla ei voitu laskea tyviläpimittoja tyviprofiilifunktiosta, koska funktio on matemaattisesti monimutkainen, mikä olisi tehnyt algoritmista hitaan. Tyviosan läpimitat täytyi siis lukea luvun 3.2.3 mainituista suhteellisten läpimittojen taulukoista, jotka piti myös tallentaa näytön muistiin.

Pätkän kuutiointikaavaksi päätettiin valita katkaistun kartion kaava. Lieriön kaavalla pätkä olisi oletettu tasapaksuksi, jolloin pölkyn tilavuuden virhe voisi mahdollisesti kasvaa kuutiointipätkän ollessa pitkä.

6.2 Laitteiston integrointi hakkuukoneeseen

Mittalaitetta testattiin Keto 100 -hakkuupään vanhalla ohjauksella (Epec Oy:n Harvemeter 4000 punaisella nuolella kuvassa 3). Uusi mittalaite kytkettiin vanhan mittalaitteen rinnalle, jotta voitaisiin verrata kahden mittalaitteen tuloksia.



Kuva 3. Mittalaitteen testaus hakkuukoneessa työolosuhteissa. Hakkuupäätä ohjataan vanhan mittalaitteen ohjausyksiköllä.

Laitteisto asennettiin hakkuukoneeseen kytkemällä vanhan ohjauksen kautta pulssianturit ja sahan kotiasema-anturi ohjausyksikköön. Lisäksi näyttöyksikkö liitettiin CAN-väylällä ohjausyksikköön.

Uusi mittalaite viritettiin vanhan laitteiston arvoilla, koska pulssianturit ja hakkuupää ovat tietenkin samat. Uudessa mittalaitteessa pituuspulsseja luetaan oletuksena neljä jaksoa kohti, mutta vanhassa niitä luetaan taas yksi jaksoa kohti. Uuteen mittalaitteeseen tehtiin ohjelmamuutos, jossa luetut pulssit jaetaan neljällä, jotta pituuspulssimäärät olisivat vertailukelpoiset. Samat viritysarvot mahdollistavat mittaustuloksien luotettavamman vertailun.

Kuten ohjelman integroinnissa laitteeseen, tässäkin testauksessa tulokset lähetettiin sarjaportin kautta PC:lle. Lisäksi tehtiin Matlabilla ohjelma, jolla piirrettiin testauspölkkyjen runkokäyrien kuvaajat.

6.3 Mittaussuunnitelma

Testausmetsiköksi on valittu nuori ensiharvennusmännikkö, koska mänty on tasaista ja oksatonta ja sitä on myös helpompi mitata mittasaksilla. Mittaukset tehdään sekä vanhalla että uudella mittalaitteella ja mittasaksilla. Mittauksia vertaillaan taulukkomuodossa ja graafisesti. Lisäksi tarkastellaan pysyvätkö mittaukset asetuksen sallimissa rajoissa.

Mittaussuunnitelma on seuraava:

- Verrataan pituus- ja läpimittapareja uuden mittalaitteen ja mittasaksien välillä usealla pölkylä. Huomioidaan erikseen tyvipölkkyt.
- Verrataan runkokäyriä graafisesti kahden mittalaitteen välillä sekä laskennalliseen runkokäyrään, joka lasketaan rinnankorkeuden perusteella.
- Verrataan pölkkyjen ja runkojen laskettuja tilavuuksia kahden mittalaitteen välillä.

6.4 Testauksen kulku

Ensimmäisissä työmaatesteissä huomattiin, että uuden mittalaitteen mittaukset eivät seuranneet vanhan mittalaitteen pituus- ja läpimittalukemia. Koska pituus näytti liian vähän ja läpimitta taas liikaa, uusi mittalaite näytti hukkaavan pulsseja kummaltakin anturilta.

Kun asiaa selvitettiin tarkemmin, huomattiin että anturipulssien jännite oli 1,7–8,6 voltia 0–12 voltin sijaan. Pulssilinjojen ylösveto oli myös heikko, mikä vaikuttaa pulssien hukkumiseen.

Koska tarkempaa tietoa vanhan mittalaitteen pulssianturikytkennästä ei ole saatavilla, tehtiin korjaukset uuteen mittalaitteeseen. Pulssianturin tuloihin vaihdettiin mittavastukset ja linjaan lisättiin ylösveto. Lisäksi vanha mittalaite otettiin pois kytkennästä, jotta se ei kuormittaisi pulssilinjoja.

Korjausten jälkeen uuden mittalaitteen mittaukset alkoivat seurata puun todellisia mittoja paremmin. Mittausten oikeellisuus varmistettiin nyt pelkästään

mittasaksimittauksilla, koska vanhaa mittalaitetta ei voitu kytkeä uuden rinnalle. Puita ei myöskään voi ajaa kahta kertaa hakkuupään läpi, koska karsintaterät, telat ja mittapyörä vahingoittavat puun kuorta ensimmäisessä käsittelyssä.

Anturisignaaliongelmien lisäksi huomattiin, että testaus ilman uutta hakkuupäähjausta on hankalaa. Testauksessa mittaus ja hakkuupään ohjaus toimivat toisistaan erillään, jolloin on vaikeaa tietää, mille kohdalle runkokäyrää mittaukset sijoittuvat. Varsinkin poikkeustilanteet syötössä, kuten peruutus ja mittausennakko, saattavat aiheuttaa virheitä mittausten tallentamisessa runkokäyrätaulukoon.

7 TULOKSET JA TARKKUUS

7.1 Mittauserä

Mittauserä koostuu kolmesta mäntyrungosta. Taulukossa 2 on listattu mittauserän runkojen rinnankorkeusläpimitat, jotka kuvaavat puiden kokoa. Rinnankorkeus on mitattu jokaisesta rungosta mittasaksilla ja uudella mittalaitteella.

TAULUKKO 2. Mittauserän tiedot.

Rungot	Mittaustapa	Rinnankorkeus- läpimitta (mm)
1	Mittasakset	163
	Uusi ml.	166
2	Mittasakset	145
	Uusi ml.	134
3	Mittasakset	176
	Uusi ml.	176

7.2 Pituuden ja läpimitan tarkkuus

Liitteessä 1 on taulukoitu testirunkojen pölkkyjen pituudet mittanauhalla ja uudella mittalaitteella mitattuna. Lisäksi taulukkoon on laskettu pölkkyjen pituuksien tarkkuudet luvussa 3.4 mainittujen Metsätehon ja Skogforskin tutkimusten tarkkuuksien mukaan. Testissä 60 % pölkkyjen pituuksista on mitattu ± 1 cm:n tarkkuudella, 70 % ± 2 cm:n tarkkuudella ja 80 % ± 4 cm:n tarkkuudella oikeasta pituudesta. Pölkkyjen pituudet jäivät siis tarkimmasta mittaluokasta seitsemän prosenttiyksikköä. 7/10 eli 70 % pölkkyjen pituuksista ylitti todellisen pölkyn mitan.

Liitteessä 2 taas on taulukoitu runkojen läpimitat jokaiselle pölkylle erikseen noin 50 cm:n välein. Lisäksi taulukoihin on laskettu pölkkyjen läpimittojen tarkkuudet

luvussa 3.4 mainittujen Metsätehon ja Skogforskin tutkimusten tarkkuuksien mukaan. Kaikkien läpimittojen tarkkuudet yhteensä ovat taulukossa 3. Testipölkkyjen läpimittojen tarkkuus riittää ± 6 mm:n tarkkuusluokkaan ja ± 4 mm:n tarkkuusluokasta jäädään neljä prosenttiyksikköä. 21/77 eli 27 % läpimitoista on todellisia läpimittoja suurempia.

TAULUKKO 3. Kaikkien läpimittojen tarkkuudet yhteensä

Tarkkuus ± 3 mm	Tarkkuus ± 4 mm	Tarkkuus ± 6 mm
41/77 = 53 %	49/77 = 64 %	60/77 = 78 %

7.3 Kuutiointi

Koska vanhaa mittalaitetta ei saatu kytkettyä uuden mittalaitteen rinnalle, eikä näin ollen saatu vertailutilavuuksia pölkkyistä, täytyy runkojen kuutiot arvioida laskemalla Laasasenahon tilavuusyhtälöstä männylle. Tästä on kerrottu tarkemmin luvussa 3.2.2. Koska lasketusta yhtälöstä saadaan koko rungon tilavuus, ja latvaosaa ei kuutioitu uudella mittalaitteella, täytyy latvaosa vähentää tilavuudesta ennen vertailua. Latvaosan muoto arvioitiin kartioksi ja sen tilavuus laskettiin kartion tilavuuden kaavalla.

Uudessa mittalaitteessa on käytetty vuoden 2006 asetuksen tyviprofiilifunktion kertoimia, joista on kerrottu luvussa 3.2.3. Luke on arvioinut, että vuoden 2016 määräyksen uudet tyviprofiilifunktion kertoimet vähentävät rinnankorkeudeltaan 15 cm:n kokoisen männyn tilavuutta 1,4 % (Luke 28.10.2015). 15 cm:n rinnankorkeus on hyvin lähellä testirunkojen rinnankorkeuksia. Tällä prosenttiluvulla voidaan siis arvioida testirunkojen tyviosan tilavuudet 2016 määräyksien mukaiseksi. Korjatut tilavuudet ovat taulukossa 4 kohdissa tyvikorjaus ja latvakorjaus.

TAULUKKO 4. Runkojen tunnuksset ja kuutiot uuden mittalaitteen laskemana, tilavuusmalleista laskettuna ja korjattuna sekä tarkkuus.

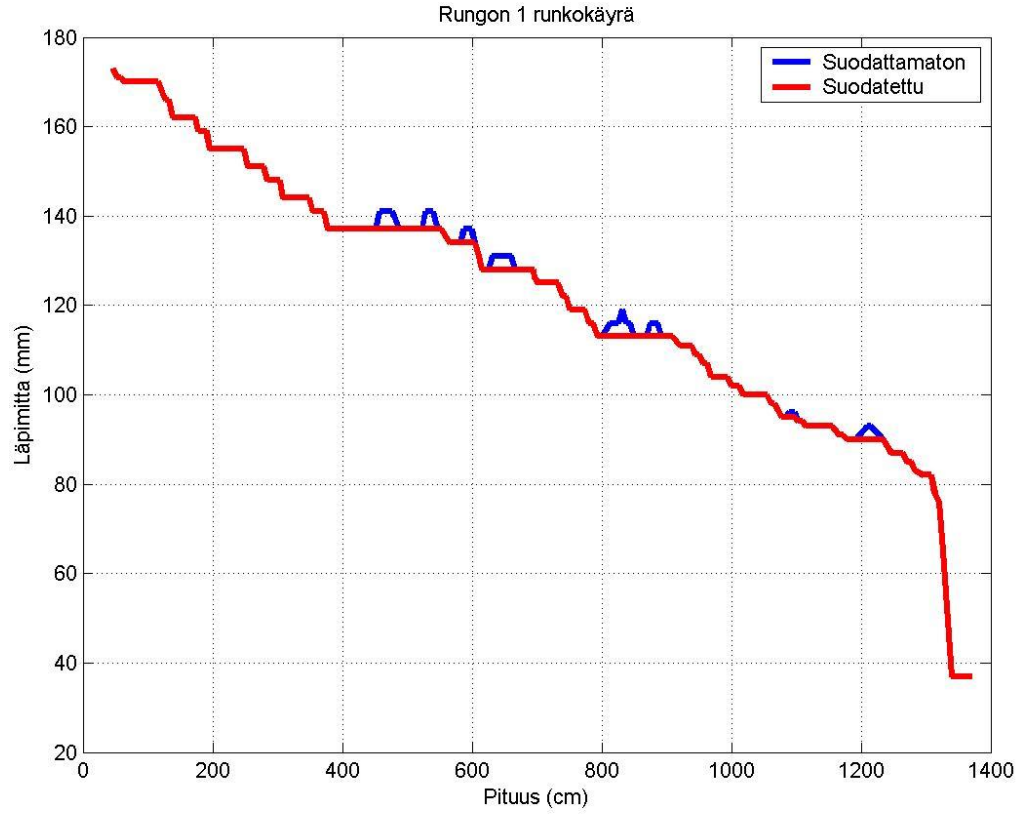
Rungon nro	1	2	3
d (cm)	16,3	14,5	17,6
h (m)	16,1	12,9	14,2
d₆ (cm)	13,0	9,9	13,4
Mitattu tilavuus (dm³)	176	95	173
Laskettu tilavuus (dm³)	167	101	172
Tyvikorjauksen jälkeen (dm³)	165	100	170
Latvatorjauksen jälkeen (dm³)	163	96	164
Tilavuusero (dm³)	+13	-1	+9
Tilavuuden tarkkuus (%)	+8	-1	+5

Taulukon 4 viimeiselle riville "Tilavuuden tarkkuus (%)" on laskettu, kuinka paljon pölkyn mittalaitteella mitattu tilavuus eroaa sen tilavuusmalleilla lasketusta tilavuudesta. Luvun 3.4 mukaan kokonaistilavuuden virhe saa vaihdella välillä -1,4–1,5 %. Rungolla 2 mitattu tilavuus on yhden prosentin pienempi kuin laskettu tilavuus, joten sen tilavuuden virhe on edellä mainituissa virherajoissa. Kahden muun pölkyn tilavuuksien virheet eivät olleet sallituissa virherajoissa.

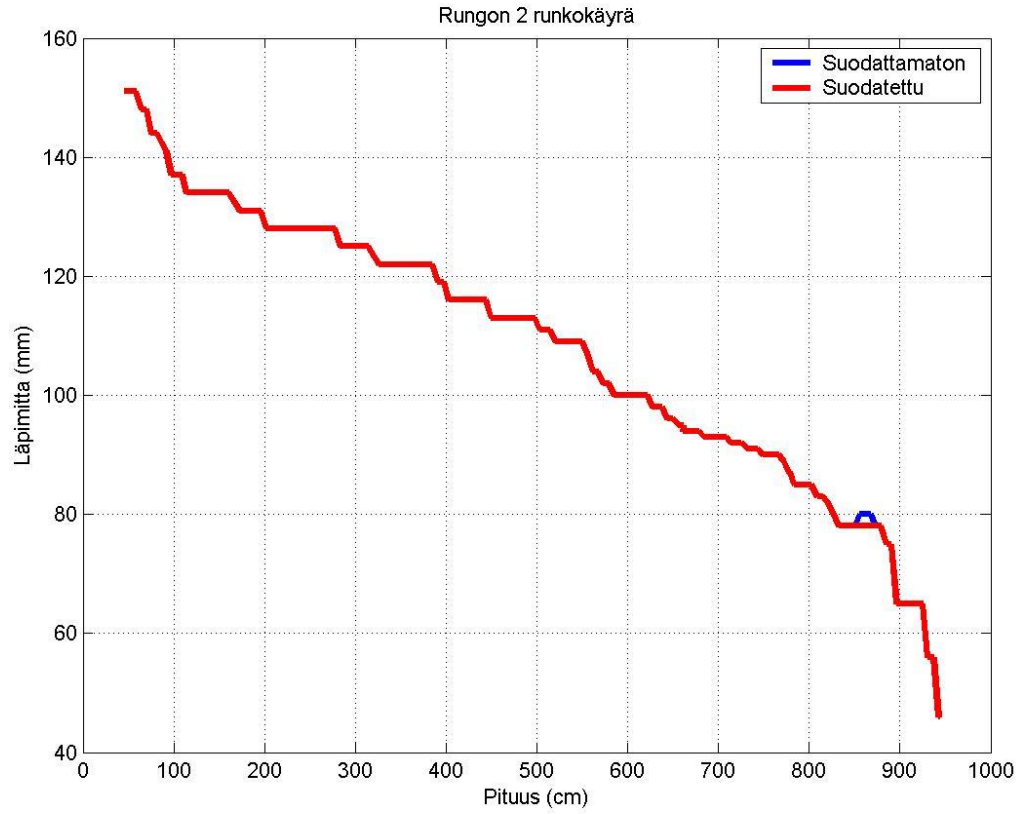
7.4 Runkokäyrien suodatus

Testirunkojen suodattamattomat ja suodatetut runkokäyrät näkyvät kuvioissa 2, 3 ja 4. Suodattamaton runkokäyrä on sinisellä ja suodatettu punaisella. Runkokäyrien tyviosien läpimitat eivät ole tyviprofiilifunktiosta laskettuja läpimittoja vaan mittaustuloksia. Suodatetut runkokäyräkuvaajat ovat jokaisella rungolla

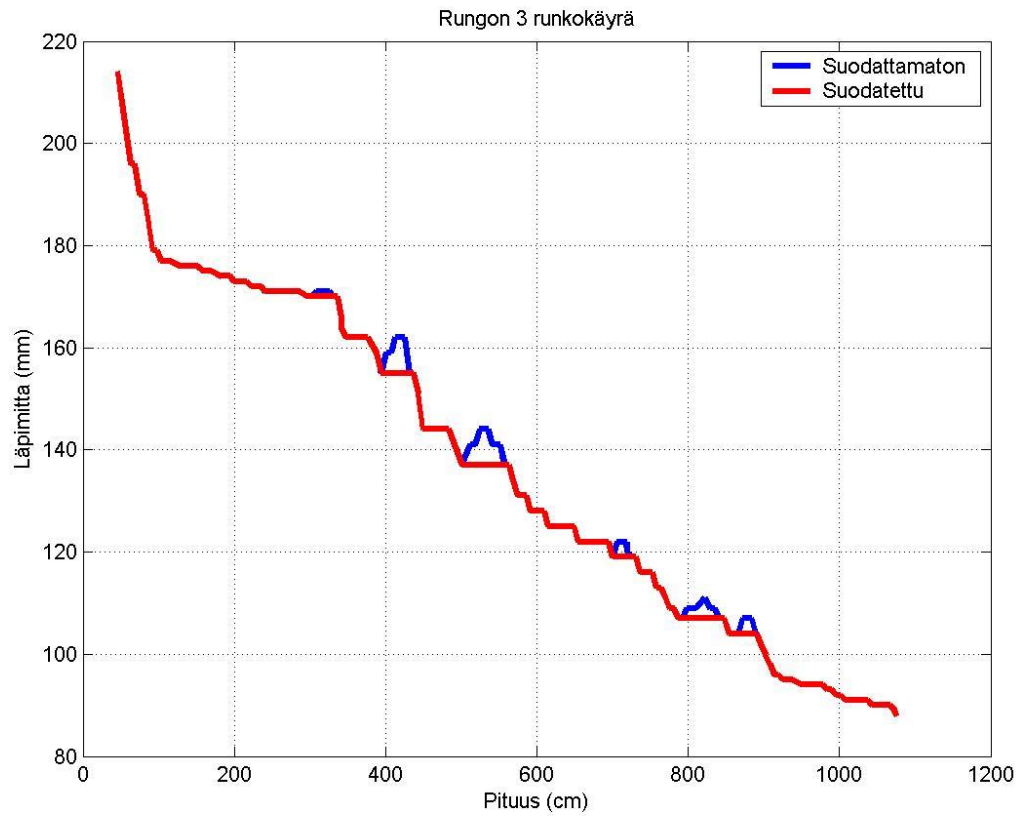
väheneviä ja runkokäyrät muistuttavat muodoltaan luvussa 3.2.1 esitettyä Laasasen runkokäyrämallia männylle.



Kuvio 2. Rungon 1 suodattamaton ja suodatettu runkokäyrä.



Kuvio 3. Rungon 2 suodattamaton ja suodatettu runkokäyrä.



Kuvio 4. Rungon 3 suodattamaton ja suodatettu runkokäyrä.

8 PÄÄTELMÄT

8.1 Testaus

Mittalaitetta on hankalaa testata työolosuhteissa, koska mittalaitteeseen ei ole toteutettu hakkuupään ohjausta, ja koska hakkuupään ohjaus- ja mittaustoiminnot toimivat toisistaan erillään. Jos esimerkiksi rungon mittaus jää kesken rungon pudotessa maahan, ei mittausta voida jatkaa, koska ei tiedetä missä kohtaa runkokäyrää mittausta keskeytyi.

8.2 Mittaukset

Pituuden mittaustarkkuus ylsi toiseksi korkeimpaan mittaustuokkaan $\frac{2}{3}$:ssa mittauksia. Pituuden mittausrirhe ja varsinkin todellisen mitan ylittävät pituudet johtuvat mittapyörän lievästä luistosta, sillä laitteisto- ja ohjelmavirheitä ei enää havaittu lopullisissa testeissä. Pituuspulsseja luetaan vain yksi jaksolta, joten jos pulssien luku muunnetaan takaisin nelinkertaiseksi (luku 6.2), voi pituuden tarkkuus parantua.

Läpimitan mittauksessa päästiin alimpaan tarkkuusluokkaan. Mittauksen aikana ongelmana oli pulssien häviäminen, mikä luvussa 6.4 selitettyjen toimenpiteiden jälkeen saatiin paranemaan jonkin verran. Läpimitoissa näkyy kuitenkin vielä joitakin satunnaisia häiriöitä, joita pituusmittauksessa ei enää näy. Häiriöt aiheutuvat ilmeisesti hakkuupään syötön isoista magneettiventtiileistä. Häiriöt eivät suodatu, vaikka pulssianturin lukupiiri LS7366R on asetettu Quadrature count -tilaan, jossa piirin pitäisi automaattisesti suodattaa signaalista häiriöt (LSI/CSI LS7366R 6/2014). Piiri ei oletuksena ole Quadrature count -tilassa, joten tila ei ilmeisesti mene päälle alkuasetuksessa.

Läpimitan mittasaksimittoihin tulee satunnaisia virheitä myös käsinmittauksen epätarkkuudesta, vaikka mittaukset tehtiinkin ristimittojen keskiarvoina. Lisäksi huomattiin, että mittalaitteen viritys ei ole kohdallaan hyvin pienillä läpimitoilla.

Tilavuuden laskennassa haluttuun tarkkuuteen päästiin vain 33 prosentissa rungoista. Pituuden ja läpimitan virheet vaikuttavat tilavuuden virheeseen, kuten luvussa 3.4 on todettu. Myös kuutiointipätkän pituus vaikuttaa tilavuuden tarkkuuteen.

8.3 Laitteisto

Mittalaitteessa on liian vähän muistia runkojen mittaushistorian tallentamiseen. Myös runkokäyrämittauksia pitäisi voida tallentaa enemmän, jolloin kuutiointipätkän pituutta saadaan lyhyemmäksi ja kuutiointitulosta tarkemmaksi. Laskentatehoa on myös liian vähän ja se ei riittänyt tyviläpimittojen laskemiseen suoraan tyviprofiilifunktiosta.

8.4 Ohjelma

Läpimittojen suodatuksena käytettiin eteenpäinsuodatusta, joka sallii läpimittojen pysyä samana tai pienetä latvaan päin. Luvun 7.4 runkokäyristä nähdään, että suodatus toimi halutusti.

Tässä mittalaitteversiossa käytettiin vielä männyn tyviprofiilifunktion vanhoja kertoimia. Ne muutetaan seuraavaan ohjelmaversioon Luken uusien määräysten mukaisiksi.

9 POHDINTAA

Opinnäytetyön tavoitteet saavutettiin hyvin, kun tarkastellaan mittalaitteen pituuden ja läpimitan testimittauksia luvun 3.4 tarkkuuksien pohjalta. Ainoastaan LS7366R-piirin toimintahäiriö aiheutti läpimitan epätarkkuutta. Kun piirin suodatus saadaan toimimaan ja läpimitan virityskäyrää tarkennetaan, parantuu läpimitan tarkkuus ja sen myötä tilavuuden tarkkuus. Jatkossa pyritään saamaan sekä pituus että läpimita korkeimpiin tarkkuusluokkiin. Myös tilavuuden mittausrvirhettä pyritään pienentämään -1,4:stä +1,5:een prosenttiin, kuten muilla mittalaitteilla Skogforskin tutkimuksessa.

Mittalaitteen testaus saadaan jatkossa sujuvammaksi, kun mittalaitteeseen toteutetaan hakkuupäänohjaus. Tällöin mittaus voidaan synkronoida ohjauksen kanssa yhteentoimivaksi, ja rungon ja mittaustulosten käsittely helpottuu.

Tässä mittalaitteversiossa oli liian vähän sekä työmuistia että pysyvää muistia. Mittaushistorian lisäksi muistiin pitäisi mahtua myös viritystiedot ja satunnaisotanta. Myös runkokäyrämittauksia pitäisi voida tallentaa enemmän, jolloin voidaan lyhentää kuutiointipätkän pituutta ja saada tarkempi kuutiointitulos. Muistia voidaan lisätä esimerkiksi niin, että näyttöyksiköksi valitaan PC tai single-board computer (SBC) LCD-näytöllä. Tehokkaammalla graafisella näyttöyksiköllä olisi muitakin etuja. Esimerkiksi mittalaitteen virityskäyriä voisi tarkastella graafisesti. Myös tyven läpimittojen laskeminen tyviprofiilifunktiota käyttäen, rungon muodon ennustaminen ja katkonnan optimointi onnistuvat PC:n tai SBC:n laskentateholla.

Runkokäyrän suodatusta voisi kehittää rajoittamalla kapenemattoman rungonosan pituutta ja lisäämällä taaksepäinsuodatuksen. Myös muunlaisia suodatusmenetelmiä ja niiden yhdistelmiä tulisi tutkia, jotta suodatettu runkokäyrä vastaa paremmin todellista puun muotoa.

Jotta mittalaite on lainsäädännön mukainen, on siihen toteutettava satunnaisotanta, josta kerrotaan luvussa 3.5. Lainsäädännössä vaaditaan myös mittausten ja säätöarvojen tulostusmahdollisuus (A 18.4.2006/926). Mittalaitteen

näyttöyksikölle on toteutettu tulostustoiminnot kahdelle eri tulostimelle, mutta jos näyttöyksikkö vaihdetaan, on myös tulostustoiminnot tehtävä uudestaan.

Nykyaikaisissa mittalaitteissa puutavaran kuutiointi on vain osa mittalaitteen toimintaa. Katkonnan optimoinnin lisäksi mittalaitteessa voi olla langaton yhteys esimerkiksi hankintaorganisaation tietojärjestelmään, josta saadaan hakkuuohjeet leimikoille ja jolle lähetetään tiedot puutavarasta. Mittalaitteessa voi olla myös karttaohjelma, josta kuljettaja näkee esimerkiksi leimikon rajat. (Kivinen 2009, 111-112.) Nämä ominaisuudet ovat tärkeitä apuväleineitä korjuuyrittäjille työn tuottavuuden lisäämiseksi. Kuitenkin esimerkiksi hankintakaupalla myyvät yksityiset metsänomistajat voisivat hyötyä tällaisesta yksinkertaisesta ja siten edullisesta mittalaitteesta, jossa on lainsäädännön vaatimat ominaisuudet.

Mikrosys-yritykselle omasta mittalaitteesta on hyötyä sekä kaupallisesti että myös hakkuukoneen kehitystyössä. Oma mittalaite mahdollistaa ohjelmiston ja laitteiston muuttamisen rajoituksetta, mitä kehitystyö yleensä edellyttää. Yrityksellä onkin tulevaisuudessa tarkoitus kehittää esimerkiksi uusia tapoja puun mittaukseen.

LÄHTEET

A 18.4.2006/926. Maa- ja metsätalousministeriön asetus hakkuukoneella valmistettavan puutavaran tilavuuden mittaamisesta koneen mittalaitteella.

Atmel. 8/2008. AT90CAN32 AT90CAN64 AT90CAN128. [WWW-lähde]. Atmel Corporation. [Viitattu 18.3.2016]. Saatavissa: <http://www.atmel.com/devices/AT90CAN128.aspx>

Epec Oy. 1994. KÄYTTÖOHJE HarveMeter 4000E MITTALAITE. Seinäjoki.

Kivinen, V. 2009. VI Hakkuukonemittaus. Teoksessa: Sipi, M. Puuraaka-aineen mittaus. Mittausmenetelmät ja niiden perusteet. Helsinki: Helsingin Yliopisto. 109-126.

Kone-Ketonen Ky. Ei päiväystä. Keto Harvesterit. ASENNUS KÄYTTÖ JA HUOLTO-OHJEET. Kristiinankaupunki.

Korhonen, K. & Eerikäinen, K. 2001. 3.3. Runkokäyrämallit. Teoksessa: Maltamo, M. & Laukkanen, S. Metsää kuvaavat mallit. Joensuu: Joensuun Yliopisto. 84, 90, 92, 94.

Laasasenaho, J. 2011. Kehittyvä puun mallinnus ja laskenta. [WWW-lähde]. Metsätieteenpäivät 2011. [Viitattu 4.10.2015]. Saatavissa: http://www.metsatieteellinenseura.fi/files/sms/metsatieteenpaiva2011/mp13_laasasenaho.pdf

Lehtonen, J. 2015a. Yrittäjä. Mikrosys. Haastattelu 9.9.2015.

Lehtonen, J. 2015b. Yrittäjä. Mikrosys. Haastattelu 23.9.2015.

Lindblad, J., Antikainen, J. & Wall, T. 2014. Mittausmenetelmien erot männyn tyviosan tilavuuden mittauksessa. [WWW-lähde]. Metla. [Viitattu 4.10.2015]. Saatavissa: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2014/mwp303.pdf>

LSI/CSI LS7366R. 6/2014. 32-BIT QUADRATURE COUNTER WITH SERIAL INTERFACE. [WWW-lähde]. LSI Computer Systems Inc. [Viitattu 8.9.2015]. Saatavissa: http://www.lscsi.com/pdfs/Data_Sheets/LS7366R.pdf

Luke. 28.10.2015. Männyn tyviosan kuutiointia hakkuukonemittauksessa muutetaan 1.1.2016 alkaen. [WWW-lähde]. Luonnonvarakeskus (Luke). [Viitattu 16.8.2016]. Saatavissa: <https://www.luke.fi/uutiset/mannyn-tyviosan-kuutiointia-hakkuukonemittauksessa-muutetaan-1-1-2016-alkaen/>

- Luonnonvarakeskuksen määräys 23.10.2015/1654. Luonnonvarakeskuksen määräys puutavaran mittaukseen liittyvistä yleisistä muuntoluvuista annetun metsäntutkimuslaitoksen määräyksen liitteen muuttamisesta.
- ON Semiconductor. 2/2014. CAT25128 128-Kb SPI Serial CMOS EEPROM. [WWW-lähde]. ON Semiconductor. [Viitattu 28.3.2016]. Saatavissa: http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/CAT25128-D.PDF
- Ramtron. 7/2011. FM24W256 256Kb Wide Voltage Serial F-RAM. [WWW-lähde]. Ramtron International Corporation. [Viitattu 28.3.2016]. Saatavissa: https://www.elfadistrelec.fi/Web/Downloads/6_/ds/FM24W256_ds.pdf?mime=application%2Fpdf
- Rikala, J. 2009. 3.2 Runkokäyrä- ja tilavuusyhtälöt. Teoksessa: Sipi, M. Puuraaka-aineen mittaus. Mittausmenetelmät ja niiden perusteet. Helsinki: Helsingin Yliopisto. 34-36.
- Sipi, M. 2009. III Puuraaka-aineen määrää kuvaavat suureet. Teoksessa: Sipi, M. Puuraaka-aineen mittaus. Mittausmenetelmät ja niiden perusteet. Helsinki: Helsingin Yliopisto. 27-58.
- Texas Instruments. 10/2013. Piccolo™ Microcontrollers. [WWW-lähde]. Texas Instruments. [Viitattu 8.9.2015]. Saatavissa: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tms320f28035.pdf>
- Texas Instruments. 5/2013. TMS320F2803x Piccolo System Control and Interrupts. [WWW-lähde]. Texas Instruments. [Viitattu 9.9.2015]. Saatavissa: <http://www.ti.com/lit/ug/sprugl8c/sprugl8c.pdf>
- Texas Instruments. 8/2001. TMS320C28x CPU and Instruction Set Reference Guide. [WWW-lähde]. Texas Instruments. [Viitattu 9.9.2015]. Saatavissa: <http://www.ti.com/lit/ug/spru430f/spru430f.pdf>
- Texas Instruments. 5/2009. TMS320x2803x Piccolo Enhanced Quadrature Encoder Pulse (eQEP) Module. [WWW-lähde]. Texas Instruments. [Viitattu 9.9.2015]. Saatavissa: <http://www.ti.com/cn/cn/lit/ug/sprufk8/sprufk8.pdf>
- Texas Instruments. 10/2009. TMS320x2803x, 2803x Piccolo Serial Peripheral Interface (SPI). [WWW-lähde]. Texas Instruments. [Viitattu 27.3.2016]. Saatavissa: <http://www.ti.com/general/docs/lit/getliterature.tsp?baseLiteratureNumber=SPRUG71&fileType=pdf>
- Texas Instruments Wiki. 24.4.2014. CCSv6 Getting Started Guide. [WWW-lähde]. Texas Instruments. [Viitattu 5.8.2015]. Saatavissa: http://processors.wiki.ti.com/index.php/CCSv6_Getting_Started_Guide

Texas Instruments Wiki. 19.6.2014. Category:C2000. Introduction to Texas Instruments C2000™ Microcontrollers. [WWW-lähde]. Texas Instruments. [Viitattu 5.8.2015]. Saatavissa:
<http://processors.wiki.ti.com/index.php/Category:C2000>

LIITTEET

Liite 1. Testipölkkyjen pituudet ja mittaustarkkuudet

Liite 2. Testipölkkyjen läpimitat ja mittaustarkkuudet

LIITE 1 Testipölkkyjen pituudet ja mittaustarkkuudet

Run- ko nro	Pölk- ky nro	Mittanau- hapituus (cm)	Uusi mittalaite, pituus (cm)	Pituuk- sien erotus (cm)	Tark- kuus ± 1 cm	Tark- kuus ± 2 cm	Tark- kuus ± 4 cm
1	1	322	327	5			
	2	365	370	5			
	3	351	353	2		x	x
	4	320	321	1	x	x	x
2	1	335	338	3			x
	2	325	324	-1	x	x	x
	3	281	282	1	x	x	x
3	1	341	341	0	x	x	x
	2	377	378	1	x	x	x
	3	356	356	0	x	x	x
					6/10 60 %	7/10 70 %	8/10 80 %

LIITE 2 Testipölkkyjen läpimitat ja mittaustarkkuudet

Runko 1						
Läpimita/ Pituus (cm)	Mittasakset (mm)	Uusi mitta- laite (mm)	Erotus (mm)	Tarkkuus ± 3 mm	Tarkkuus ± 4 mm	Tarkkuus ± 6 mm
Pölkky 1						
47	171	173	2	x	x	x
98	165	170	5			x
149	159	162	3	x	x	x
201	154	155	1	x	x	x
248	157	155	-2	x	x	x
303	153	148	-5			x
Pölkky 2						
5	150	144	-6			x
50	146	137	-9			
101	145	137	-8			
149	143	141	-2	x	x	x
202	143	141	-2	x	x	x
244	130	128	-2	x	x	x
351	130	128	-2	x	x	x
367	127	126	-1	x	x	x
Pölkky 3						
5	132	125	-7			
49	126	122	-4		x	x
97	122	113	-9			
147	118	116	-2	x	x	x

201	116	113	-3	x	x	x
248	112	109	-3	x	x	x
303	108	102	-6			
353	102	100	-2	x	x	x
Pölkky						
4						
5	102	100	-2	x	x	x
48	97	96	-1	x	x	x
101	92	93	1	x	x	x
148	94	91	-3	x	x	x
197	87	87	0	x	x	x
253	81	82	1	x	x	x
297	57	37	-20			
321	53	37	-16			
				19/30	20/30	23/30
				63 %	67 %	77 %

Runko 2						
Läpimit- ta/ Pituus (cm)	Mittasak- set (mm)	Uusi mitta- laite (mm)	Erotus (mm)	Tarkkuus ± 3 mm	Tarkkuus ± 4 mm	Tarkkuus ± 6 mm
Pölkky 1						
5	160	151	-9			
97	146	137	-9			
149	144	134	-10			
202	136	128	-8			
248	136	128	-8			
302	129	125	-4		x	x
338	125	122	-3	x	x	x
Pölkky 2						
6	125	122	-3	x	x	x
53	124	119	-5			x
100	120	116	-4		x	x
148	119	113	-6			x
195	113	109	-4		x	x
248	105	100	-5			x
300	100	98	-2	x	x	x
324	95	94	-1	x	x	x
Pölkky 3						
6	94	94	0	x	x	x
48	90	93	3	x	x	x
99	88	90	2	x	x	x
148	86	83	-3	x	x	x
200	83	80	-3	x	x	x
253	70	65	-5			x
282	65	46	-19			
				9/22 41 %	12/22 55 %	16/22 73 %

Runko 3						
Läpimit- ta/ Pituus (cm)	Mittasak- set (mm)	Uusi mitta- laite (mm)	Erotus (mm)	Tarkkuus ± 3 mm	Tarkkuus ± 4 mm	Tarkkuus ± 6 mm
Pölkky 1						
5	205	214	9			
98	183	179	-4		x	
151	179	176	-3	x		
199	170	173	3	x		
252	166	171	5			x
303	163	170	7			
341	157	164	7			
Pölkky 2						
6	157	162	5			x
53	155	155	0	x		
101	148	151	3	x		
142	141	144	3	x		
199	142	141	-1	x		
250	134	128	-6			x
301	125	125	0	x		
347	122	122	0	x		
378	120	120	0	x		
Pölkky 3						
5	122	119	-3	x		
50	113	111	-2	x		
103	109	111	2	x		
147	108	104	-4		x	
200	100	96	-4		x	
253	91	94	3	x		
300	87	91	4		x	
347	85	90	5			x

356	80	88	8			
				13/25 52 %	17/25 68 %	21/25 84 %