



Langan taipuman mittausjärjestelmä

Kirjoittajat: Klaus Känsälä, Kalle Määttä, Jari Rehu

Luottamuksellisuus: luottamuksellinen

Sisällysluettelo

1	Johdanto.....	3
2	Laskenta-algoritmit painuman mallintamiseen.....	3
	Katenaarisovitus	4
	Polynomisovitus	5
	Menetelmien vertailu	6
	Resoluutiotarkastelut	8
3	Mittausjärjestelmä	10
	Prototyypimittausjärjestelmänjärjestelmän komponentit	11
	Anturiyksikkö	12
	Keskusyksikkö	13
	Tietokanta ja www-käyttöliittymä.....	13
	Järjestelmän toimintakuvaus	17
	Järjestelmän virrankulutus	17
4	Kenttämittaukset	19
	Asennustoimenpiteet	19
	Mittausyksikköön liittyvät asennustoimenpiteet	19
	Mittausjärjestelmän asennus.....	20
	Mittaustaulukko.....	21
	Mittauskuvia.....	21
	Mittaustuloksia	24
5	Yhteenveto	28
	Lähdeviitteet.....	29
	Liitteet	29

1 Johdanto

VTT on kehittänyt langattoman mittausjärjestelmän sähkövoimalinjojen ennaltaehkäisevään kunnonvalvontaan. Tavoitteena oli kehittää teknologiakokonaisuus ja menetelmä, jolla voidaan tuottaa lisäinformaatiota ennaltaehkäisevän kunnonvalvonnan tarpeisiin, jotta kentällä tapahtuvan kunnonvalvonta- ja korjaustyön määrää saadaan vähennettyä. Yhtenä pääteemoista oli kehittää laskenta-algoritmit lumikuorman aiheuttaman absoluuttisen painuman mittaamiseen 3D-kiihtyvyyssanturilla. Tässä raportissa tarkastellaan järjestelmän toimintaa talven 2013-14 aikana

Kehitetyllä kunnonvalvontajärjestelmällä voidaan mitata, analysoida ja tallettaa lumikuormasta aiheutuvia absoluuttisia roikkumia mitatuilla voimalinjaväleillä. Prototyyppi mittausjärjestelmällä pystytään keräämään langattomasti voimalinjoille asennetuista mittausyksiköistä mittausdataa paikalliselle keskusyksikölle, josta mittaukset edelleen lähetetään halutulla intervallilla tietokantapalvelimelle internetiin. Konsepti sisältää myös www-käyttöliitymäsovelluksen mittausdatan visualisointiin ja mittauksien parametriseen. Näin ollen mittauksen etädiagnostiikka ja konfigurointi esim. huoltomiehen matkapuhelimella on mahdollista.

Mittausalgoritmissa voidaan soveltaa katenaarisovitus (ketjukäyrä) ja polynomisovitus langan painuman määrittämiseen. Laskentatulosten perusteella molempia algoritmeja voidaan hyödyntää, mutta koska algoritmien laskentatulosten erot ovat sovelluksen kannalta merkityksettömiä, mittausjärjestelmässä päädyttiin hyödyntämään laskennallisesti kevyempää algoritmia muistin, laskenta-ajan ja energiankulutuksen minimoimiseksi.

Mittausmenetelmässä 3D-kiihtyvyyssanturin lukemista voidaan laskea taipumakulma langan suuntaisen koordinaattiakselin suhteen. Anturin kalibroinnilla on suuri merkitys saavutettuun kulmaresoluutioon ja sitä kautta painumaresoluutioon. Raportissa kuvataan laskenta-algoritmit kiihtyvyyssanturin kalibrointiin, kulman laskentaan ja painuman määrittämiseen. Anturin kalibrointiin hyödynnettiin robottia kalibrointiasentojen tuottamiseen ja kalibrointialgoritmi toteutettiin PNS-menetelmällä. PNS-menetelmällä minimoidaan mittausyksikön bias-, herkkyys- ja eri akselien väliset asentovirheet suhteessa anturiin. Raportissa esitetään laskennallisesti kiihtyvyyssanturin resoluution ja kulmaresoluution vaikutukset painumaresoluutioon tietyillä jänneväleillä.

Tässä Raportissa kuvataan projektissa kehitetty prototyyppijärjestelmä, joka koostuu kuudesta lintupalloon asennetusta langattomasta anturiyksiköstä ja yhdestä keskusyksiköstä. Raportissa kuvataan kentällä asennustoimenpiteiden yhteydessä tehtävät geometriamittaukset ja esitellään mittaus tuloksia kenttämittausjärjestelmästä E.ON Kainuun Sähköverkko Oyj:n alueelta. Kenttämittauksen tavoitteena oli todentaa prototyyppijärjestelmän toimivuus todellisissa talviolosuhteissa.

2 Laskenta-algoritmit painuman mallintamiseen

Painuman määrittämiseen sovellettiin sekä katenaari- eli ketjukäyräsovitusta että perinteistä polynomisovitus. Molemmilla tavoilla saavutettiin sovelluksen kannalta riittävä tarkkuus

painumaresoluutiassa. Koska ketjukäyräalgoritmi on laskennallisesti huomattavasti kompleksisempi, päädyttiin sovelluksessa käyttämään polynomisovitusta laskentatehon, -ajan ja virrankulutuksen minimoimiseksi.

Katenaarisovitus

Vaijeri roikkuu kahden tolpan, joiden välimatka on L ja korkeus H , välissä. Vaijerin pituus on S ja $S > L$. Kuvan 4 koordinaatistovalinnalla riippuvan vaijerin y -koordinaatti x -koordinaatin funktiona saadaan funktiolla $y = f(x)$ seuraavasti [1].

$$f(x) = \frac{1}{A} \cosh(Ax) + C, \quad A > 0, \quad \cosh(x) = \frac{1}{2}(e^x + e^{-x})$$

$$f'(x) = \sinh(Ax), \quad \sinh(x) = \frac{1}{2}(e^x - e^{-x})$$

, missä \sinh ja \cosh ovat hyperbolisia \cos - ja \sin -funktioita.

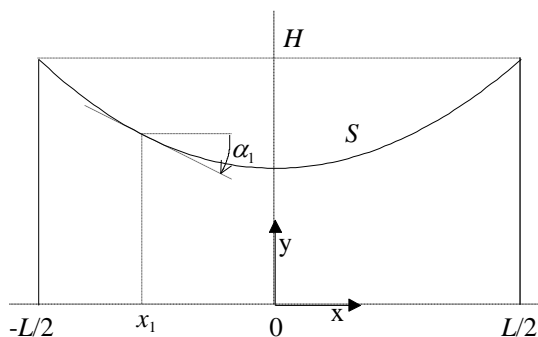
Reunaehdoilla

$$f(L/2) = H \quad \Rightarrow \quad C = H - \frac{1}{A} \cosh\left(A \frac{L}{2}\right),$$

$$\int_{-L/2}^{L/2} \sqrt{1 + f'(x)^2} dx = S \quad \Rightarrow \quad \frac{2}{A} \sinh\left(A \frac{L}{2}\right) = S.$$

Painauma vaijerin keskikohdassa $r = H - f(0)$ on

$$r = \frac{1}{A} \cosh\left(A \frac{L}{2}\right) - \frac{1}{A}.$$



Kuva 1. Riippuva vaijeri.

Kulma α riippuu paikasta x ja

$$f'(x) = \tan(\alpha(x)).$$

Jos kulma α_1 mitataan kohdassa x_1 , saadaan

$$\sinh(Ax_1) = \tan(\alpha_1),$$

josta

$$A = \frac{1}{x_1} \ln\left(\tan(\alpha_1) + \sqrt{\tan(\alpha_1)^2 + 1}\right) = \frac{1}{x_1} \ln\left(\frac{\sin(\alpha_1) + 1}{\cos(\alpha_1)}\right).$$

Koska A :n tulee olla suurempi kuin 0, on x_1 :n ja α_1 :n täytettävä ehdot $x_1 < 0$ ja $-90^\circ < \alpha < 0^\circ$ tai $x_1 > 0$ ja $0^\circ < \alpha < 90^\circ$.

Sijoittamalla

$$A = \frac{1}{x_1} \ln\left(\tan(\alpha_1) + \sqrt{\tan(\alpha_1)^2 + 1}\right) = \frac{1}{x_1} \ln\left(\frac{\sin(\alpha_1) + 1}{\cos(\alpha_1)}\right)$$

$$\text{Lausekkeeseen } r = \frac{1}{A} \cosh\left(A \frac{L}{2}\right) - \frac{1}{A},$$

saadaan painauma r määriteltyä kulman α funktiona.

Polynomisovitus

Vaijeri roikkuu kahden tolpan välissä kiinnityspisteistään (x_0, y_0) ja (x_1, y_1) . Olkoon x_2 jokin piste vaijerilla, jossa kulma α on pisteessä x_2 vaijerin tangentin ja horisontaalisen tason välinen kulma. Kuvan 4 koordinaatistovalinnalla riippuvan vaijerin y -koordinaatti x -koordinaatin funktiona saadaan funktiolla $y = f(x)$ seuraavasti

$$f(x) = ax^2 + bx + c,$$

$$f'(x) = 2ax + b,$$

Kulma α riippuu paikasta x ja funktion $f(x)$ derivaatta pisteessä x_2 on

$$f'(x_2) = \tan(\alpha_{x_2}).$$

Jos kulma α mitataan kohdassa x_2 , voidaan muodostaa polynomifunktio ratkaisemalla yhtälöistä

$$f(x_0) = ax_0^2 + bx_0 + c = y_0$$

$$f(x_1) = ax_1^2 + bx_1 + c = y_1$$

$$f'(x_2) = 2ax_2^2 + b = \tan(\alpha_{x_2})$$

kertoimet a,b,c pseudoinverssiä käyttämällä:

$$AX = B \Rightarrow X = (A^T A)^{-1} A^T B$$

missä,

$$A = \begin{bmatrix} x_0^2 & x_0 & 1 \\ x_1^2 & x_1 & 1 \\ 2x_2 & 1 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \\ \tan(\alpha_{x_2}) \end{bmatrix}$$

$$A^T = \text{transpoosi} \quad A^{-1} = \text{inversio}$$

$$X = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}$$

Ylimääritetylle joukolle voidaan laskea ratkaisu pseudoinverssimenetelmällä, jossa mittausvirheitä minimoidaan PNS-menetelmällä. (Esim. tapaus, jossa useita kulmamittauspisteitä langalla).

Painuma y saadaan määriteltyä sijoittamalla derivaatan nollakohta funktion f(x) lausekkeeseen:

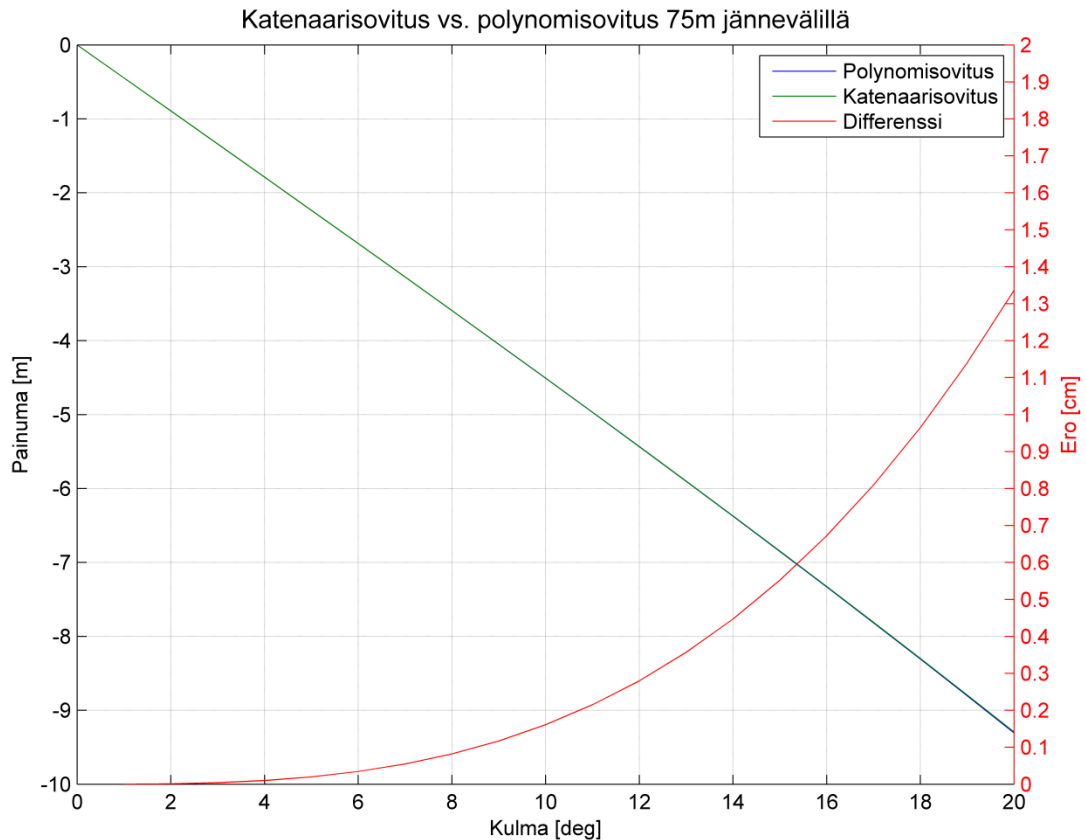
$$f'(x) = 2ax + b = 0 \Rightarrow x = -\frac{b}{2a}$$

$$f(x) = ax^2 + bx + c = y \Rightarrow y = \frac{b^2}{4a} - \frac{b^2}{2a} + c \Rightarrow y = -\frac{b^2}{4a} + c$$

Menetelmien vertailu

Katenaarisovituksen ja polynomisovituksen vertailua varten määriteltiin sekä matemaattisesti sovitusten välinen painumaero tietyillä geometriadatoilla että tehtiin koemittauksia useilla eri kulmilla VTT:n koemittauslangalla.

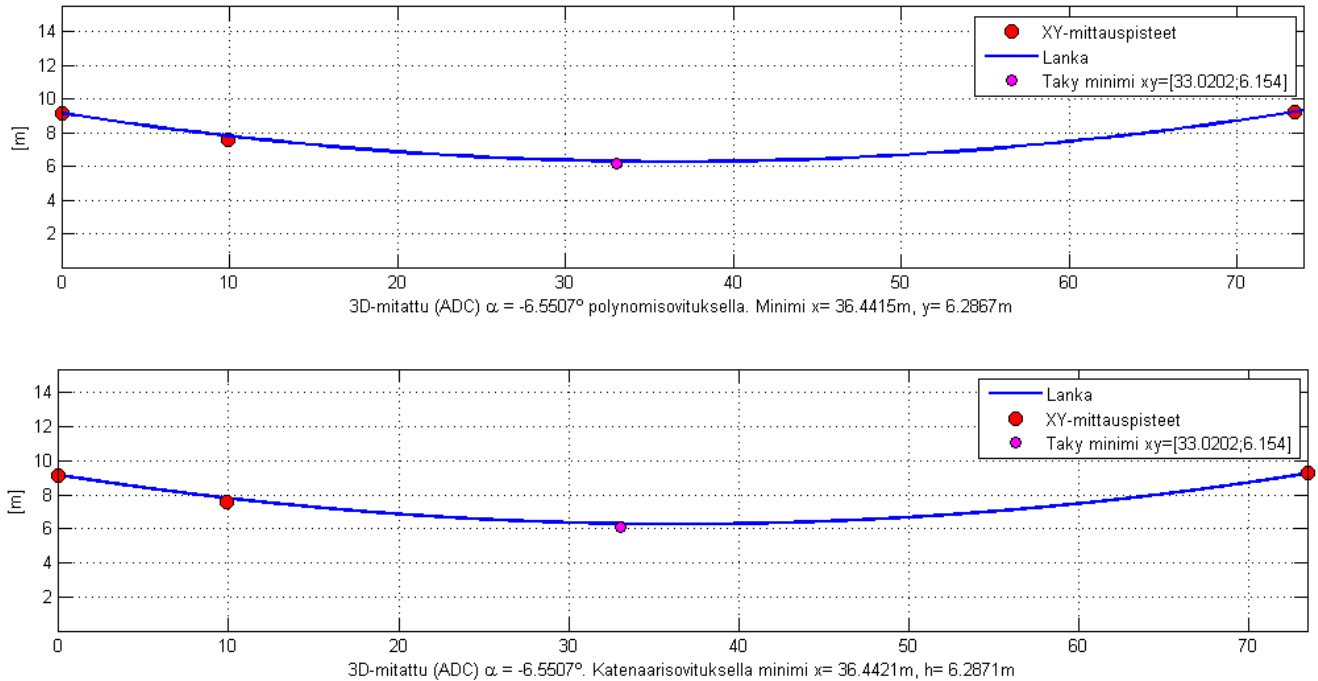
Kuvassa 5 on esitetty katenaarisovituksen ja polynomisovituksen painumat mittauskulman funktiona 75m jännevälillä. Lisäksi kuvaajaan punaisella käyrällä on piirretty sovitusten erot [cm] kulman funktiona. Kuvasta voidaan nähdä, että esim. kulmalla 17deg, jolloin painuma on jo 8m, menetelmien painumaero on vain 8mm. Tyypillisesti 20kV linjan jänneväleillä lumikuorman aiheuttamat painumat on luokkaa 0-5m, joka tarkastellussa tapauksessa tarkoittaisi maksimissaan 2.5mm eroa menetelmien välillä.



Kuva 2. Katenaarisovitus vs. polynomisovitus 75m jännevälillä (simulointi)

Koemittausjärjestelyssä 73m sähkölinja on kiinnitetty noin 9.2 m korkeuteen ja kulmamittausanturi noin 10 metrin etäisyydelle vaakatasossa ensimmäisestä langan kiinnityspisteestä. Kuvassa 5 on esitettyä koemittaus, jossa takymetrillä mitattu todellinen roikkuma on n. 3,05 metriä ja kulma-anturilla mitattu roikkuma on n. 2.91 metriä. Kuvasta 5 nähdään, että ero takymetrillä mitattuun minimiin katenaarisovituksella kulmalla -6.55 astetta on noin 13.31cm ja polynomisovituksella noin 13.27c (ero 0.4mm).

Sekä simulointitulosten että käytännön mittaustulosten perusteella yleisesti voidaan todeta että katenaarisovituksen ja polynomisovituksen erot ovat sovelluksen kannalta tavanomaisilla 20kV sähkölinjan jänneväleillä niin merkityksettömiä, että langan roikkuman estimoinnissa kannattaa käyttää laskennallisesti kevyempää polynomisovitusalgoritmia.



Kuva 3. Katenaarisovitus vs. polynomisovitus koemittauksista

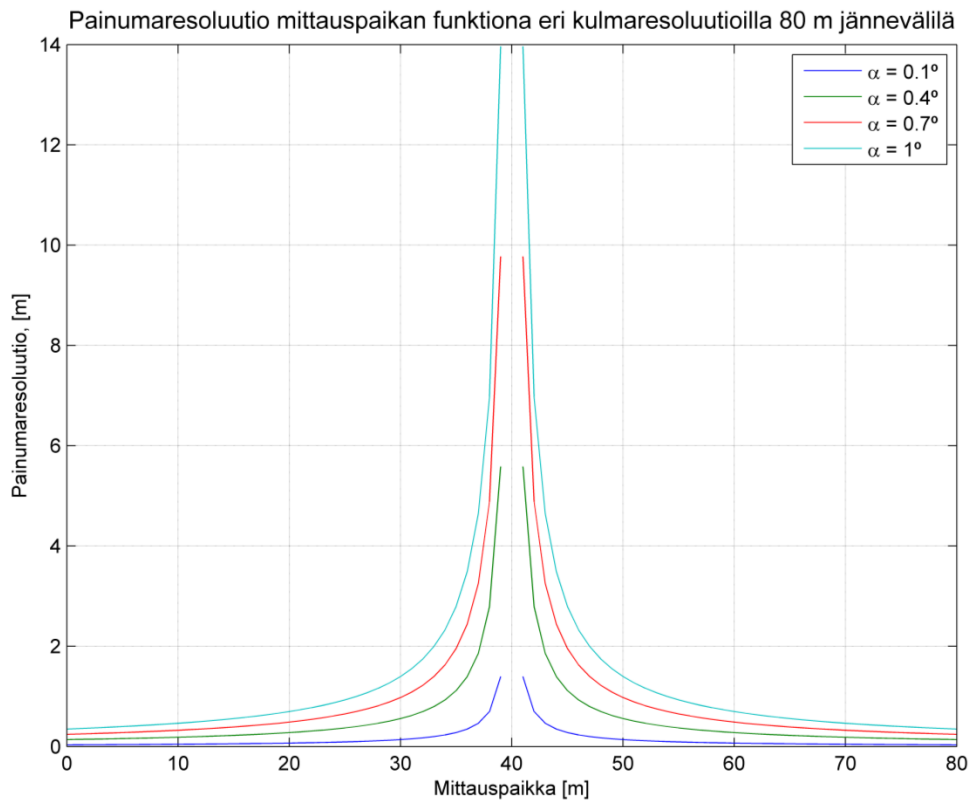
Resoluutiotarkastelut

Tässä kappaleessa esitetään kulma-anturin resoluution vaikutus painumaresoluutioon sekä painuma mitatun kulman funktiona 80 m jännevälillä. Lisäksi tarkastellaan mittauspaikkatiedon resoluution vaikutusta painumaresoluutioon 100m jännevälillä.

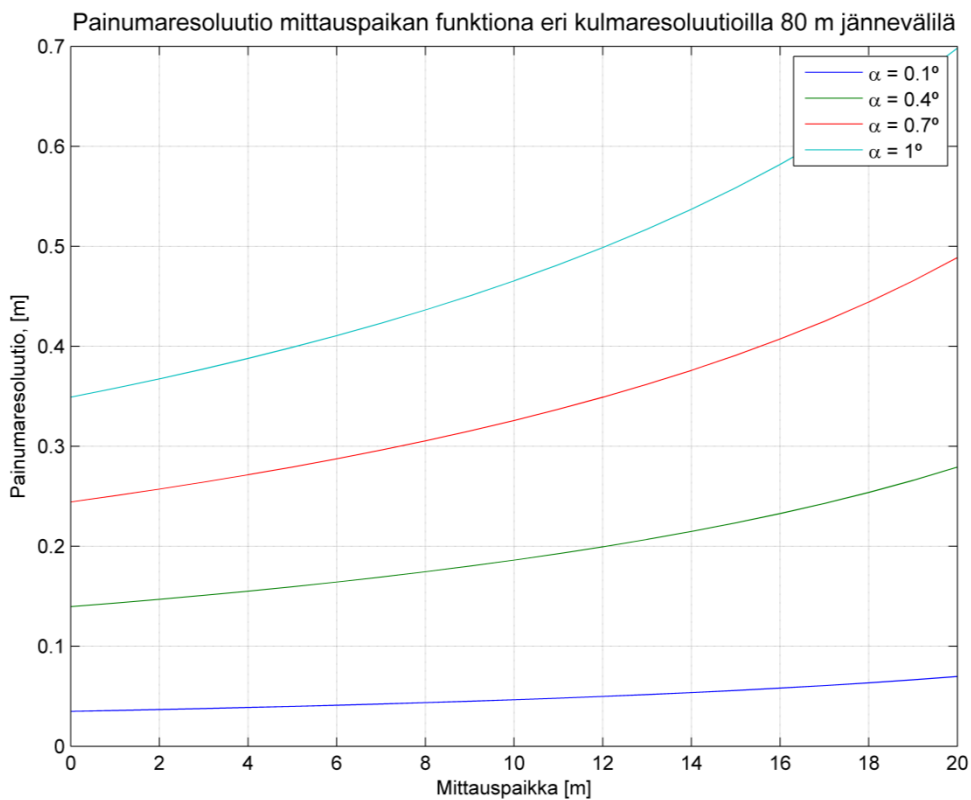
Kuvissa 7 ja 8 on esitettyä painuman laskennan resoluutio mittauspaikan ja kulmamittauksen resoluutiona. Kuvaan 7 on piirretty painuman laskennan resoluutio 80m jännevälillä ja kuvassa 8 on esitettyä kuvan 7 tulokset mittauspaikoilla 0-20m.

Kuvasta 8 nähdään, että esim. 1.0 asteen kulmaresoluutiolla päästään n. 40cm painumaresoluutioon 80 metrin jännevälillä mittauspaikasta, joka on 4 metrin etäisyydeltä toisesta tolpa olettaen, että mittauspaikka on tarkasti määritetty. Vastaavasti 0.7 asteen kulmamittausresoluutiolla päästään n. 25cm painumaresoluutioon, 0.4 asteen kulmaresoluutiolla 15cm painumaresoluutioon ja 0.1 asteen resoluutiolla 5cm painumaresoluutioon 80m jännevälillä.

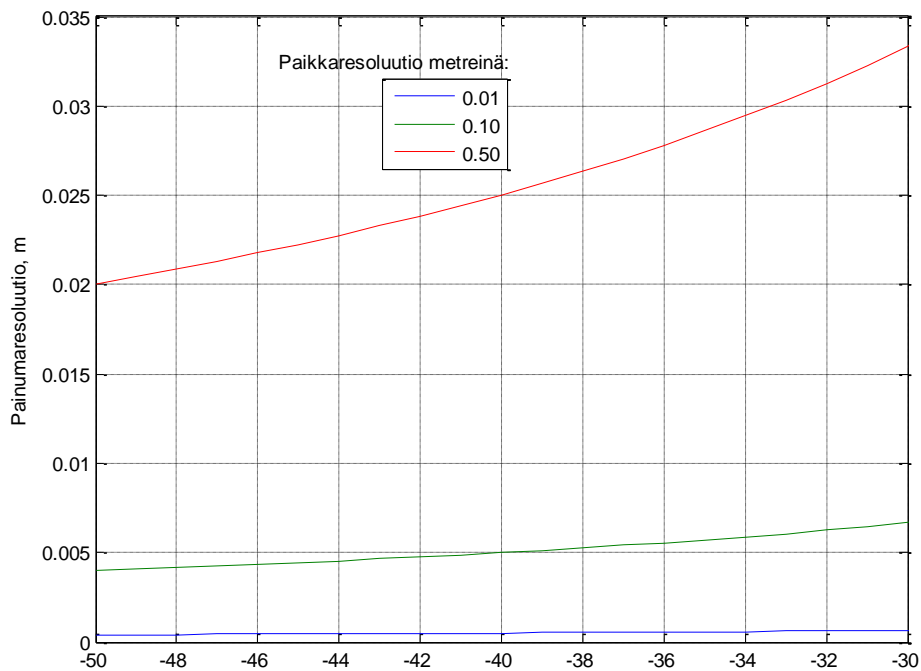
Kuvassa 9 on esitettyä painuman laskennan resoluutio mittauspaikan ja mittauspaikkatiedon resoluutiona, kun pylväiden väli on 100 m ja painuma on 1 m. Voidaan todeta, että 0.1 m mittauspaikkatiedon resoluutio on sovelluksen kannalta riittävä. Esimerkiksi kuvan 9 tapauksessa 0.1m paikkatietoresoluutiolla päästään noin 5mm painumaresoluutioon 100metrin jännevälillä 1m painumalla.



Kuva 4. Painuman laskennan resoluutio mittauspaikan ja kulmaresoluution funktiona



Kuva 5. Edellisen kuvan painuman resoluutio zoomattuna



Kuva 6. Painuman laskennan resoluutio mittausspaikan ja mittausspaikkatiedon resoluution funktiona kun pylväiden väli on 100 m ja painuma on 1 m.

3 Mittausjärjestelmä

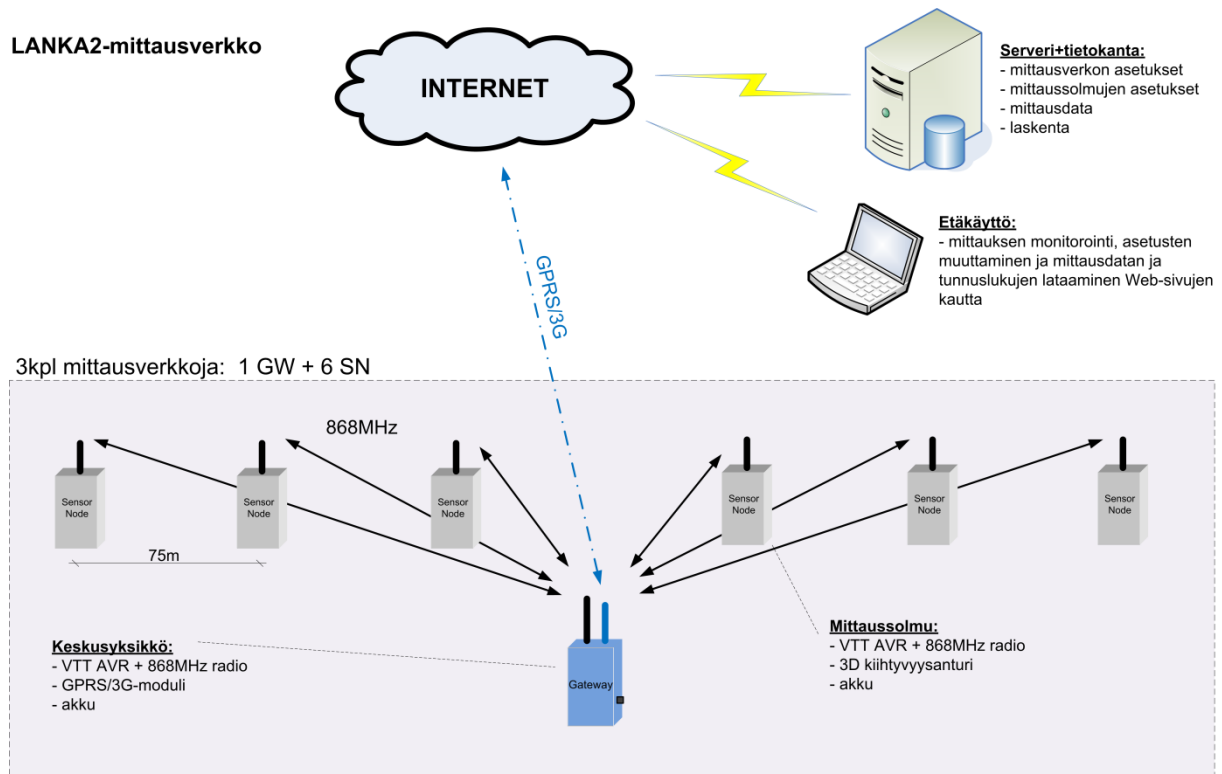
Tässä kappaleessa kuvataan projektissa kehitetty prototyypimittausjärjestelmä, sen arkkitehtuuri, toiminta ja pääkomponentit. Toteutetun langattoman prototyypimittausjärjestelmän tarkoituksena on tuottaa sähkövoimalinjojen ennaltaehkäisevään kunnonvalvontaan lisäinformaatiota, jotta kentällä tapahtuvan kunnonvalvonta- ja korjaustyön määrää saadaan vähennettyä.

Kehitetyllä kunnonvalvontajärjestelmällä voidaan mitata, analysoida ja tallettaa lumikuormasta aiheutuvia absoluuttisia roikkumia mitatuilla voimalinjaväleillä. Mittausjärjestelmän anturiyksiköillä mitataan 3D-kiihtyvyydestä ja lähetetään langattomasti mittausdata voimalinjoille asennetuista mittausyksiköistä paikalliselle keskusyksikölle. Kehitetty anturiyksikkö on integroitu olemassa oleviin lintupalloihin, jolloin asennus voidaan suorittaa jo käytössä olevilla asennusvälineillä.

Keskusyksiköistä anturisolmuilta vastaanotetut mittaukset lähetetään halutulla intervallilla edelleen tietokantapalvelimelle internetiin. Arkkitehtuuri sisältää www-käyttöliitymäsovelluksen mittausdatan visualisointiin ja mittaus tapahtumien parametrisointiin palvelimen kautta. Näin ollen mittauksen etädiagnostiikka ja järjestelmän mittausparametrien etähallinta myös huoltomiehen mobiilipäätelaitteella on mahdollista.

Prototyypimittausjärjestelmänjärjestelmän komponentit

Prototyypijärjestelmä koostuu kuudesta lintupalloon asennetusta omalla sisäisellä akulla varustetusta anturiyksiköstä ja yhdestä ulkoisella akulla varustetusta keskusyksiköstä. Projektissa toteutettiin kaiken kaikkiaan kaksi kuuden anturiyksikön järjestelmää ja yksi neljän anturiyksikön järjestelmä.



Kuva 7. Mittausjärjestelmän arkkitehtuurikuva

Mittausjärjestelmän arkkitehtuuri on esitetty kuvassa 10. Yhden keskusyksikön alla olevien anturiyksiköiden määrää voidaan helposti lisätä. Tällä hetkellä 8 bitin osoitekoodaus rajoittaa anturiyksiköiden maksimimäärän 256:een, mutta osoitevaruutta voidaan helposti laajentaa.

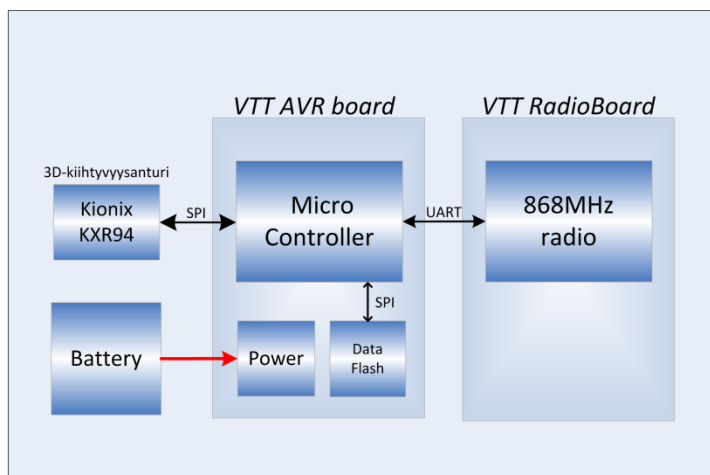
Prototyypimittausjärjestelmään toteutetun tiedonsiirtoverkon topologia on tähtiverkko, jossa jokainen anturiyksikkö kommunikoi suoraan keskusyksikön kanssa. Protokolla voidaan muuttaa myös releoivaksi, jolloin jokainen yksittäinen anturiyksikkö voi toimia tiedonsiirtoverkossa toistimena. Tällöin voidaan muodostaa hyvinkin pitkiä mittausketjuja yhden keskusyksikön alle.

Prototyypilaitteiston radioksi valittiin Radiocarfts:n 868MHz taajuusalueella toimiva radio, joka osoittautui hyvin luotettavaksi. Alustavissa testeissä kokeiltiin myös 2.4GHz radiota, mutta sen luotettavuus oli huomattavasti heikompi. Jännitteinen voimalinja muodostaa haasteellisen ympäristön koko elektroniikalle, mutta erityisesti radiolle ja antennille. Sähköisten häiriöiden lisäksi lintupalloon pakattu mittausyksikkö pyrkii kiertymään langan kireyden vaihdella. Kiertymisestä johtuen antennin polarisaatio on harvoin optimaalinen kiinteän keskusyksikön antenniin verrattuna.

Radion maksimikantomatkaa ei kokeiltu tässä projektissa, mutta aikaisemmissa projekteissa käytännön etäisyydet ovat olleet normaaleilla 1dB antenneilla n. 0.5km. Vahvistavilla suunta-antenneilla on mahdollista päästä huomattavasti pidempiin etäisyyksiin.

Anturiyksikkö

Anturiyksikkö koostuu kuvan 11 mukaisesti VTT AVR prosessorikortista, 868MHz:n radiokortista sekä 3D-kiihtyvyyssanturista ja akusta. Virrankulutuksen minimoimiseksi anturiyksikön prosessorikortit kalustettiin vain välttämättömillä osilla: kontrolleri, kide ja regulaattorit, DataFlash sekä muutama oheiskomponentti. Radiokortti sisältää *Radiocrafts RC1180HP* radion, joka toimii 868MHz:n taajuusalueella. 3D-kiihtyvyyssanturi *Kionix KXR94* on liitetty prosessorikorttiin SPI-liitynnän kautta. Kaikki oheislaitteet: kiihtyvyyssanturi, radio sekä dataflash kytketään ohjelmallisesti aktiiviseksi vain tarvittaessa.



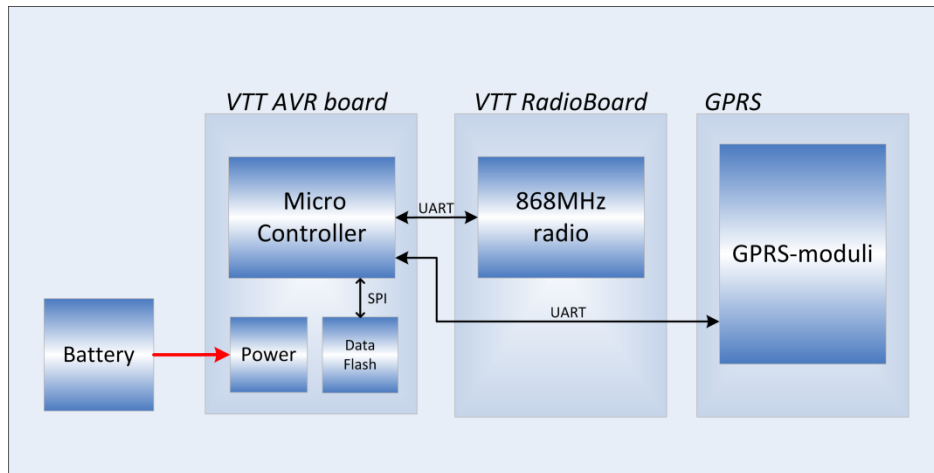
Kuva 8. Anturiyksikön lohkoavaio

Anturiyksikön ohjelmistokuvaus

Anturiyksikön ohjelmiston suunnittelun lähtökohtana oli pieni virrankulutus. Yhden keskusyksikön alueella olevien anturiyksiköiden tuli tehdä mittaukset keskenään täsmälleen samanaikaisesti. Tämän ja myös aikajakoisen tiedonsiirtoprotokollan takia anturiyksiköt täytyy pitää koko ajan hyvin tarkasti samassa ajassa. Synkronointi saadaan varmistettua riittävän usein tehtävällä statuskyselyllä. Statuskyselyssä anturiyksikkö lähettää heti herättyään radioviestin keskusyksikölle, johon keskusyksikkö vastaa välittömästi. Keskusyksikön paluuviesti sisältää kellonajan sekä seuraavan statuskyselyn ja mittauksen ajankohdan. Keskusyksikkö herää aktiivikuuntelutilaan hiukan ennen oletettua statuskyselyä. Statuskyselyssä on pyritty minimoimaan anturiyksikön aktiiviaika, jolloin tehonkulutus saadaan pysymään matalana.

Keskusyksikkö

Keskusyksikkö koostuu kuvan 12 mukaisesti VTT AVR prosessorikortista, 868MHz:n radiokortista, GPRS-modulista sekä ulkoisesta akusta. Kaikki oheislaitteet: radio, dataflash ja GPRS-moduli kytketään ohjelmallisesti aktiiviseksi vain tarvittaessa. Keskusyksikköön rakennettiin myös pieni kortti GPRS-modulin tehonsyötön ohjausta varten. Akkuna käytettiin 60Ah:n vapaa-ajan akkua.



Kuva 9. Keskusyksikön lohkoakaavio

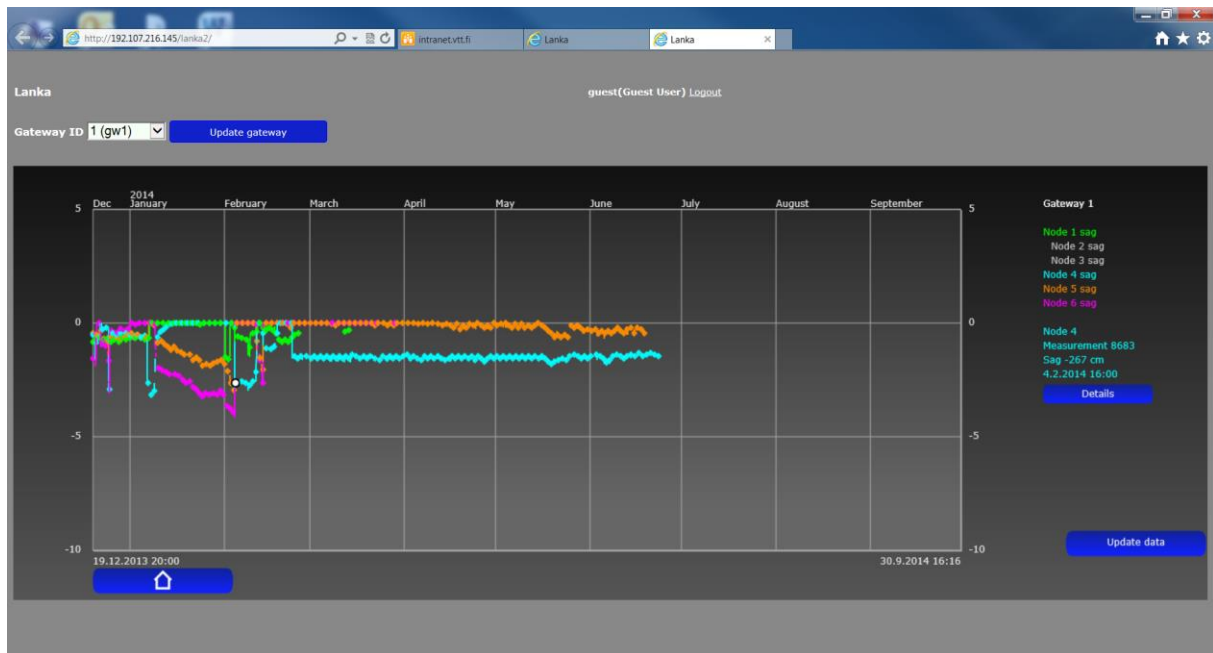
Keskusyksikön ohjelmistokuvaus

Keskusyksikön ohjelmiston tehtävänä on ylläpitää mittausyksiköiden kellonaikaa sekä statuskyselyyn ja mittaukseen liittyviä ajastimia. Keskusyksikkö lukee käyttäjän määrittelemät asetukset palvelimen tietokannasta ja välittää ne mittausyksiköille. Keskusyksikkö suorittaa mittausyksiköiden tarkan synkronoinnin juuri ennen mittausta, lukee mittauksen jälkeen mittausdatan ja siirtää sen GPRS-yhteydellä palvelimen tietokantaan. Keskusyksikön ohjelmistossa on myös painotettu virrankulutusominaisuuksia, eli aina kun mahdollista ollaan sleep-moodissa ja radio sekä GPRS-moduli aktivoidaan vain tarvittaessa.

Tietokanta ja www-käyttöliittymä

Anturiyksiköiden mitaama kiihtyvyydata lähetettiin keskusyksikölle, joka otti jokaisen mittausjakson jälkeen yhteyden serveriin ja siirsi datan MySql-tietokantaan. Tietokantaohjelmisto on kuvattuna liitteen 1 dokumentissa yksityiskohtaisesti.

Jokaisella yhteydenottokerralla tietokannasta luettiin mittausjärjestelmän uudet asetukset. Mittausdatan visualisointia ja järjestelmän parametrien muuttamista varten kehitettiin web-käyttöliittymä, jonka kautta järjestelmää voidaan käyttää selaimella eri päätelaitteilla mistä tahansa.



Kuva 10. Web-käyttöliittymän pääsivu, mittausdatan trendinäyttö.

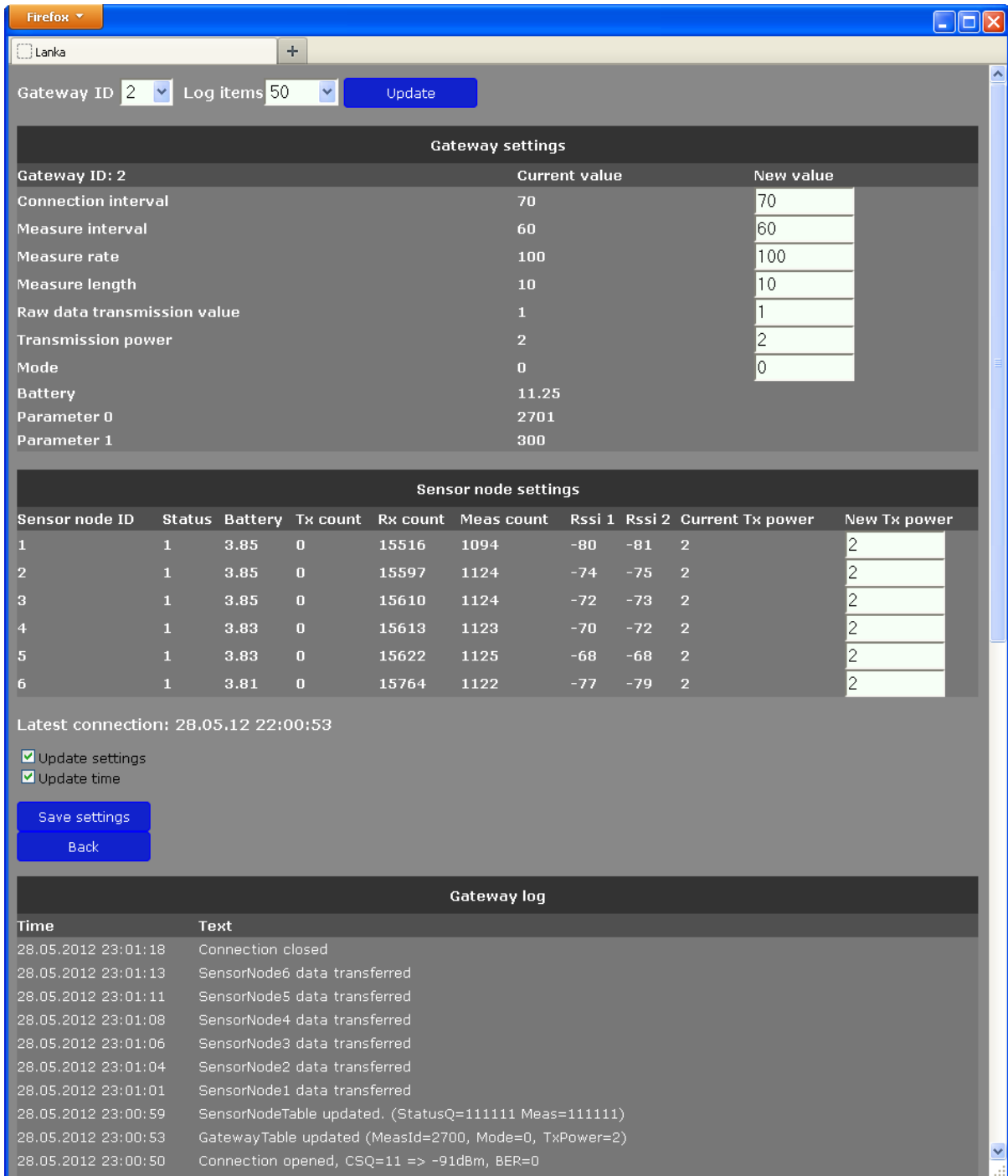
Web-sivut on toteutettu siten, että käyttäjän sisäänkirjautumisen jälkeen avautuu kuvan 13 mukainen näkymä mittausdataan. Päänäytöltä valitaan se Gateway (keskusyksikkö), jonka mittausdataa halutaan tarkastella. Mittausdata esitetään mittausyksiköittäin trendinäytöllä, jossa jokainen piste vastaa yksittäistä mittausjaksoa. Mittauspistettä klikkaamalla päästään tarkastelemaan yksittäistä mittausjaksoa.

Ptototyyppimittausjärjestelmässä tietokantapalvelimella laskettiin yksittäisten mittausyksiköiden asentokulmat, mutta varsinainen langan roikkuman laskettiin mittausdatasta jälkikäteen erillisellä sovelluksella. Jatkossa kaikki laskenta kannattaa sijoittaa palvelimelle, jolloin web-käyttöliittymän kautta nähdään suoraan todellinen langan roikkuma.



Kuva 11. Yksittäisen mittausjakson esitys

Yksittäistä mittausjaksoa voidaan tarkastella graafisessa tai tekstimuodossa kuvassa 14 esitetyllä näytöllä. Data voidaan halutessa myös ladata tiedostona omalle koneelle.



Firefox

Lanka

Gateway ID Log items

Gateway settings

Gateway ID: 2	Current value	New value
Connection interval	70	<input type="text" value="70"/>
Measure interval	60	<input type="text" value="60"/>
Measure rate	100	<input type="text" value="100"/>
Measure length	10	<input type="text" value="10"/>
Raw data transmission value	1	<input type="text" value="1"/>
Transmission power	2	<input type="text" value="2"/>
Mode	0	<input type="text" value="0"/>
Battery	11.25	
Parameter 0	2701	
Parameter 1	300	

Sensor node settings

Sensor node ID	Status	Battery	Tx count	Rx count	Meas count	Rssi 1	Rssi 2	Current Tx power	New Tx power
1	1	3.85	0	15516	1094	-80	-81	2	<input type="text" value="2"/>
2	1	3.85	0	15597	1124	-74	-75	2	<input type="text" value="2"/>
3	1	3.85	0	15610	1124	-72	-73	2	<input type="text" value="2"/>
4	1	3.83	0	15613	1123	-70	-72	2	<input type="text" value="2"/>
5	1	3.83	0	15622	1125	-68	-68	2	<input type="text" value="2"/>
6	1	3.81	0	15764	1122	-77	-79	2	<input type="text" value="2"/>

Latest connection: 28.05.12 22:00:53

Update settings
 Update time

Gateway log

Time	Text
28.05.2012 23:01:18	Connection closed
28.05.2012 23:01:13	SensorNode6 data transferred
28.05.2012 23:01:11	SensorNode5 data transferred
28.05.2012 23:01:08	SensorNode4 data transferred
28.05.2012 23:01:06	SensorNode3 data transferred
28.05.2012 23:01:04	SensorNode2 data transferred
28.05.2012 23:01:01	SensorNode1 data transferred
28.05.2012 23:00:59	SensorNodeTable updated. (StatusQ=111111 Meas=111111)
28.05.2012 23:00:53	GatewayTable updated (MeasId=2700, Mode=0, TxPower=2)
28.05.2012 23:00:50	Connection opened, CSQ=11 => -91dBm, BER=0

Kuva 12. Admin-sivu, mittausjärjestelmän parametrien asetus

Admin-käyttöoikeuksilla päästään kuvan 15 mukaisille sivulle, josta voidaan muuttaa mittausjärjestelmän parametreja. Parametri-sivun kautta muutetut parametrit tallennetaan tietokantaan, josta keskusyksikkö käy lukemassa ne seuraavalla yhteydenotokerralla. Käyttäjä voi määrittellä *mittausjaksojen välin*, *mittausjakson pituuden sekä mittausaajuuden*. Käyttäjä voi myös valita siirretäänkö raakadata vai pelkästään mittausjaksolta laskettu keskiarvo. Käyttäjän

aseteltavissa on myös radioiden lähetystehot mittausyksiköissä sekä keskusyksikössä. Muutettavissa on myös keskusyksikön yhteydenottoväli palvelimeen, jolla voidaan vaikuttaa mm. parametrimuutosten vasteaikaan. Admin-sivulla esitetään myös kaikkien mittausyksiköiden statustiedot: paristojännite, mittauslaskurit, lähetystehot, signaalivoimakkuudet yms.

Järjestelmän toimintakuvaus

Mittausjärjestelmän toimintaa hallitaan tietokannassa olevien parametrien avulla. Parametreilla määritellään mittausjaksojen väli, mittausjakson pituus sekä mittausaajuus. Keskusyksikkö noutaa viimeisimmät parametrit jokaisella yhteydenottokerralla. Keskusyksikkö välittää parametrit edelleen anturiyksiköille statuskyselyn mukana.

Anturiyksikön toimintaa ohjataan kahden ajastimen avulla: *mittausajastin* ja *statuskyselyajastin*.

Anturiyksikkö herää sleep-moodista viiden sekunnin välein ja käy päivittämässä kellonajan. Mikäli *statuskyselyajastin* on täyttynyt, aktivoidaan radio ja lähetetään viesti keskusyksikölle. Keskusyksikkö vastaa anturiyksikölle välittömästi viestillä, joka sisältää mm. päivitetyn kelloajan sekä uudet parametrit.

Jos taas *mittausajastin* täyttyy, niin jäädään odottamaan mittauksen käynnistystä, joka tapahtuu noin kolmen sekunnin kuluttua. Viimeisten sekuntien aikana ennen mittausta keskusyksikkö lähettää vielä kolme synkronointiviestiä, joilla varmistetaan kellon tarkkuus juuri ennen mittauksen suoritusta. Mittausjakson jälkeen keskusyksikkö pyytää mittausdatan eräajotyypisenä siirtona jokaiselta anturiyksiköltä vuorollaan. Mittausdatan siirron jälkeen mittausyksikkö menee sleep-moodiin.

Keskusyksikön toimintaa ohjataan myös ajastimien avulla. Keskusyksikkö siirtyy kuuntelutilaan sekunnin ennen kunkin mittasolmun oletettu statuskyselyä. Heti statuskysely-viestiin vastattuaan keskusyksikkö menee sleep-moodiin. Keskusyksikkö herää viisi sekuntia ennen mittausjakson alkua, lähettää synkronointiviestit sekä mittauskomennon ja pyytää datan mittausjakson jälkeen jokaiselta mittausyksiköltä. Datansiirron jälkeen keskusyksikkö aktivoi GPRS-modulin ja ottaa yhteyden serveriin. Keskusyksikkö siirtää datan tietokantaan sekä lukee uudet parametrit tietokannasta.

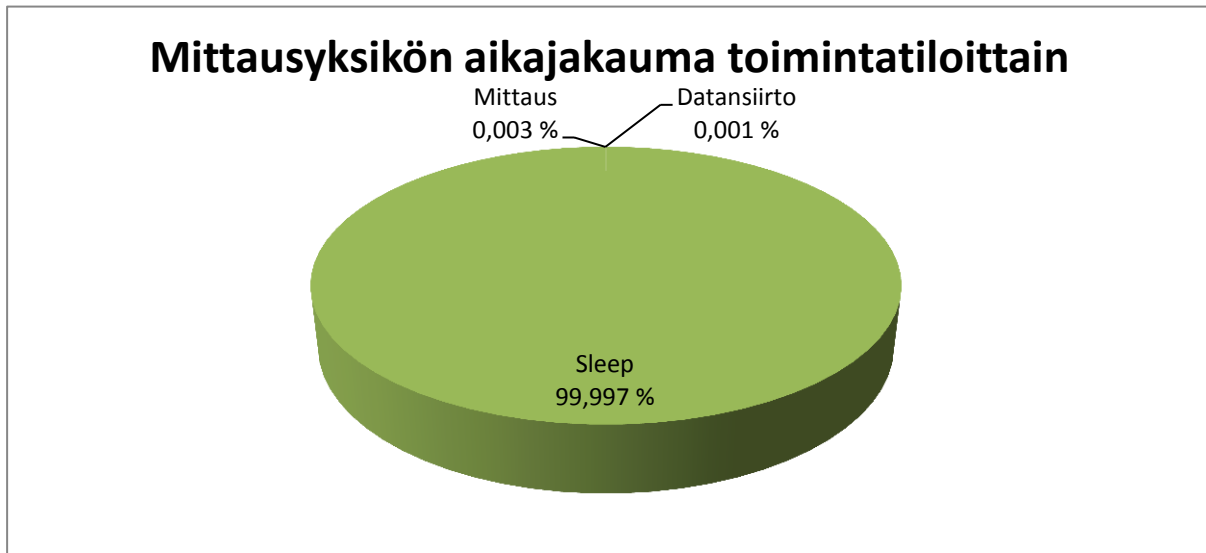
Mikäli jokin anturiyksikkö menettää aikasykronoinnin, toimitaan seuraavasti: keskusyksikkö jää aktiivitilaan kuuntelulle ja anturiyksikkö lähettää statuskyselyä satunnaisin väliajoin, kunnes yhteys ja synkronointi saadaan jälleen toimimaan.

Järjestelmän virrankulutus

Protomittauslaitteistossa käytettiin protoelektroniikkaa, jonka virrankulutusominaisuudet eivät olleet aivan huippuluokkaa. Mittausyksikön virrankulutus oli lepotilassa n. 500uA, joka on suhteellisen suuri virrankulutus. Tätä voidaan pienentää huomattavasti elektroniikan uudelleensuunnittelulla.

Protolaitteiston mittausyksikössä käytettiin 3.6V kennojännitteellä olevaa 7Ah:n Li-ion-akkaa. Suhteellisen suurella mittaustiheydellä (60 min) ja raakatansierrolla arvioituna laskennalliseksi toiminta-ajaksi saatiin n. 4kk. Tehdyissä maastotesteissä on järjestelmän akkujen kesto ollut yli 6 kuukautta. Keskusyksikössä käytettiin 60Ah:n vapaa-ajanakkua. Keskusyksikön kulutus oli

testimittauksissa suuri, koska data haluttiin lähetettäväksi tietokantaa heti jokaisen mittauksen jälkeen. Samoin haluttiin varmistaa useilla keskusyksikön tietokantayhteydenotoilla riittävä vasteaika mahdollisia mittausasetuksien muutoksi ajatellen.



Kuva 13. Mittausyksikön aikajakauma prosentteina eri tilojen välillä.



Kuva 14. Mittausyksikön virrankulutuksen jakauma prosentteina eri toimintatilojen välillä

Kuten kuvista 16 ja 17 nähdään, mittausyksikön lepotilan virrankulutus on määräävä, koska mittasolmu on lepotilassa suurimman osan ajasta. Seuraavaksi suurin merkitys on tiedonsiirron virrankulutuksella. Tiedonsiirron virrankulutus korostui testimittauksissa, koska järjestelmä lähetti mittausdatan raakana keskusyksikölle ja edelleen tietokantapalvelimelle. Jatkossa laskentaa voidaan tehdä mittausyksikössä, jolloin tiedonsiirtoketjun yli välitetään ainoastaan tunnuslukuja.

Keskusyksikössä suurimman virrankulutuksen muodostaa GPRS-yhteyden avaaminen tietokantapalvelimeen. Tämä korostui myös testimittauksissa suuren datamäärän lähetyksen takia.

Kokonaislaitteiston huollon kannalta mittausyksiköiden virrankulutuksella on suurin merkitys. Akkujen vaihto langalla oleviin lintupalloihin on hankalasti tehtävissä. Keskusyksikön akkua on jo huomattavasti helpompi vaihtaa. Jatkossa molempien tulisi olla tietysti energiaomavaraisia, jolloin kysymykseen tulee erityyppisiä energian harvestointimenetelmiä. Mittausyksikön energia voidaan ottaa voimalinjan sähkö/magneettikentästä, myös aurinkoenergia tulee kysymykseen. Keskusyksikön virransyöttö on helpointa rakentaa omavaraiseksi isolla akulla ja aurinkopaneelilla.

4 Kenttämittaukset

Kenttämittaukset suoritettiin E.ON Kainuun Sähköverkko Oy:n alueella. Jaksolla 2013-2014 käytössä oli yksi kuuden pallon ja yhden keskusyksikön järjestelmä. Asennuspaikat sijaitsivat Saukkovaaran alueella. Tässä kappaleessa esitetään kenttämittauksien asennustoimenpiteet ja tarvittavat maastossa suoritettavat geometriadata mittaukset. Kappaleen lopussa esitellään muutamia kuvia Saukkovaaran mittaustuloksista.

Asennustoimenpiteet

Asennettava mittausjärjestelmä koostuu kuudesta mittaavasta sensorisyksiköstä (lintupallot) ja keskusyksiköstä, josta mittausdata lähetetään GPRS-yhteydellä etäpalvelimella sijaitsevaan tietokantaan. Lisäksi www-käyttöliittymällä voidaan monitoroinnin lisäksi asettaa tietokantaan mittaukseen liittyviä parametreja, joita kentällä toimiva keskusyksikkö lukee GPRS-datayhteyden ylitse. Tästä syystä GPRS-yhteys on välttämätön mittausjärjestelmän toiminnan kannalta. Asennuksessa täytyy huomioida keskusyksikön sijainti siten, että mobiiliyhteyden linkin laatu on riittävä.

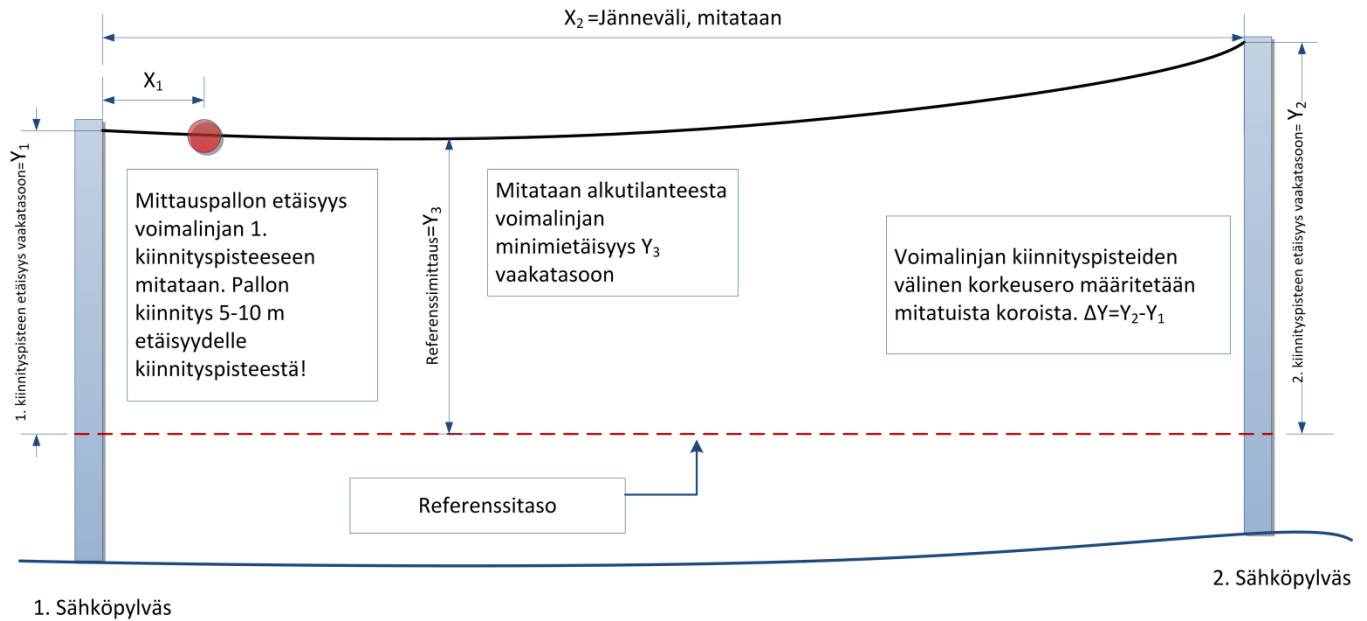
Mittausjärjestelmän asennus ja käyttöönotto on hyvin helppoa. Mittausyksiköihin ja keskusyksikköön kytketään käyttöjännitteet, jolloin yksiköiden välille muodostuu paikallisverkko automaattisesti. Seuraavaksi keskusyksikkö ottaa automaattisesti yhteyden tietokantapalvelimeen, josta luetaan mittausjärjestelmän asetukset ja mittausjärjestelmä on valmiina toiminnassa. Mittausjärjestelmän käyttöönoton helppous korostui kenttämittauksissa, joiden asennukset tehtiin hyvin haastavissa olosuhteissa.

Mittausyksikköön liittyvät asennustoimenpiteet

Kuvassa 18 on esitettyä tarvittavat mittausyksikön (lintupallo) asennuksen yhteydessä kentällä suoritettavat mittaustoimenpiteet. Mittausyksikkö asennettiin 5–10 metrin etäisyydelle 1. sähköpylvään kiinnityspisteestä pylväsvälikohtaisesti. Tämä etäisyys X_1 (kuva 18) täytyy mitata jokaisesta asennettavasta yksiköstä 0.5m tarkkuudella. Lisäksi kunkin pylväsvälin voimalinjan kiinnityspisteiden välinen etäisyys, jänneväli X_2 mitataan. Koska kiinnityspisteet eivät yleensä ole samassa tasossa, täytyy kiinnityspisteiden välinen korkeusero $Y_2 - Y_1$ määrittää mittaamalla pylväiden kiinnityspisteen pystysuuntainen etäisyys määrittelystä referenssitasosta (kuvassa 18 merkitty punaisella katkoviivalla). Lisäksi mitataan alkutilanteesta voimalinjan minimietäisyys referenssitason lopullisen mittauksen oikeellisuuden tarkistamista varten. Geometriadatan mittauksiin käytettiin RTK-GPS-mittalaitetta, joilla koordinaatit saatiin riittävällä tarkkuudella mitattua. Referenssitasona mittaauksissa oli merenpinnantaso.

Luettelo mitattavista parametreista:

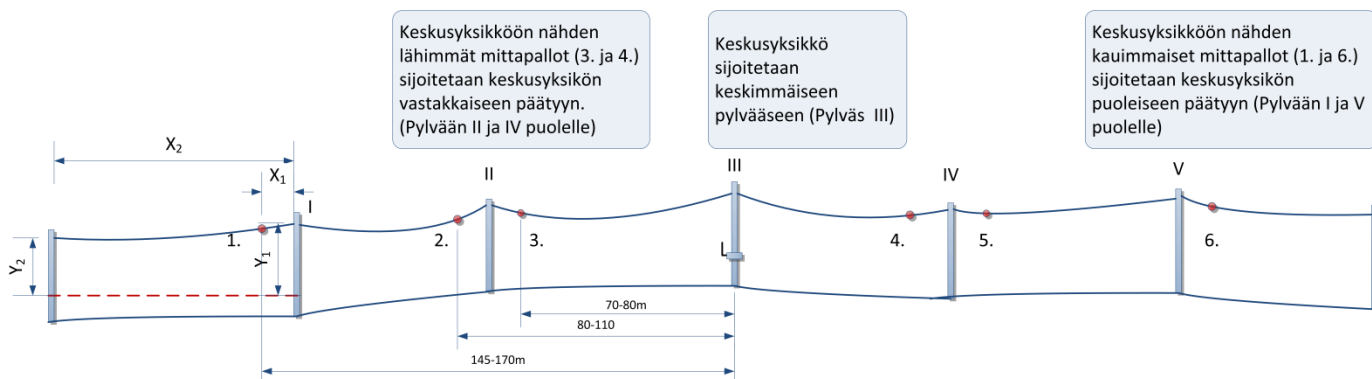
- X_1 , Mittausyksikön etäisyys 1. kiinnityspisteestä
- X_2 , Jänneväli
- Y_1 , 1. kiinnityspisteestä etäisyys referenssitason
- Y_2 , 2. kiinnityspisteestä etäisyys referenssitason
- Y_3 , Voimalinjan minimietäisyys referenssitason



Kuva 15. Mittausyksikön asennuskuva

Mittausjärjestelmän asennus

Kuva 19 havainnollistaa koko mittausjärjestelmän asennuskonfiguraatiota. Mittausyksiköt on numeroitu ja ne asennettiin numeroidussa järjestyksessä voimalinjalle peräkkäin. Keskusyksikkö asennettiin asennettavan linjaosuuden keskimmaiseen pylvääseen (kuvassa 19 pylväs III). Jotta kauimmaisten mittausyksiköiden etäisyys keskusyksikköön olisi minimissään, asennetaan kauimmat mittausyksiköt (yskiköt no 1. ja no. 6) pylväsvälin keskusyksikön puoleiseen laitaan. Lähimmät yksiköt 3. ja 4. taas sijoitetaan keskusyksiköstä katsottuna kauempaan laitaan (kuvassa 19 pylväiden II ja IV puoleisiin laitoihin). Yksiköt 2. ja 5 voidaan asentaa kumpaan laitaan tahansa.



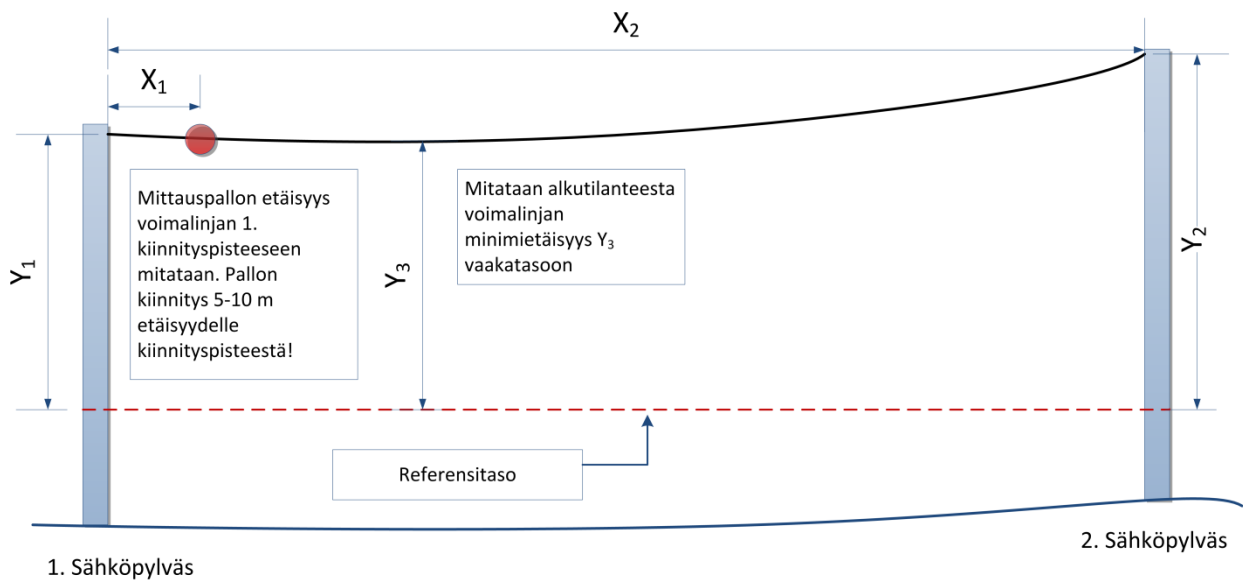
Kuva 16. Mittausjärjestelmän havainnekuva.

Mittaustaulukko

Seuraavaan on kerätty Saukkovaaran asennuksen yhteydessä mitatut parametri (ks. Kuva 20).

Taulu 1. Saukkovaara

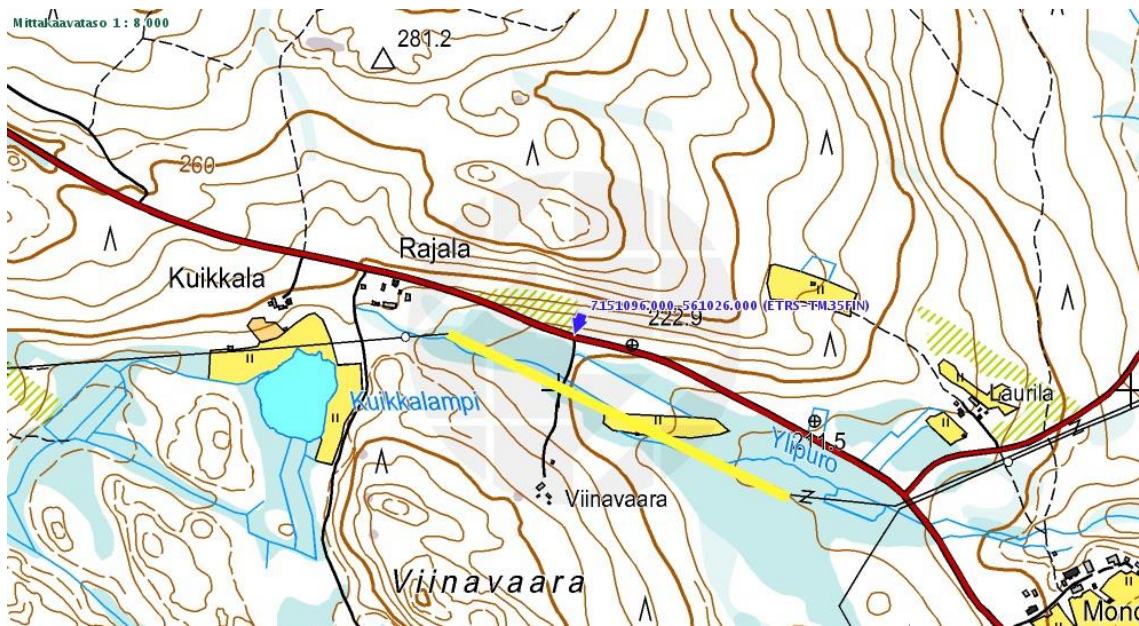
Mittausyksikkö	11_1	11_2	11_3	11_4	11_5	11_6
X_1	63.9 m	74.45 m	10.3 m	72.3 m	9.2 m	9.2 m
X_2	72.2 m	83.7 m	80.4 m	82.0 m	82.9 m	81.7 m
Y_1	223.0 m	224.45 m	226.75 m	229.07 m	233.15 m	235.05 m
Y_2	224.45 m	226.75 m	229.07 m	233.15 m	235.05 m	238.53 m
Y_3	223.1 m	224.8 m	227.15 m	230.44 m	233.12 m	236 m



Kuva 17. Saukkovaaran mittaukset

Mittauskuvia

Kuvaan 21 on merkitty keltainen voimalinjaosuus, johon Saukkovaaran mittausjärjestelmä asennettiin.



Kuva 18. Saukkovaaran asennuspaikka keltaisella vahvistettu

Kuvissa 22–23 on kenttäasennuksesta otettuja kuvia Saukkovaaran asennuksista. Kuvassa 22 (vasen kuva) on keskimmäiseen sähköpylväeseen asennettu keskusyksikkö, josta mittausdatat lähetetään palvelimelle. Mittausyksiköt asennettiin tavanomaisilla lintupallon asennustyökaluilla. Kuvan 22 oikeanpuoleisessa kuvassa on lintupallon asennustoimenpide ja kuvassa 23 näkyy kolme asennettua mittausyksikköä.



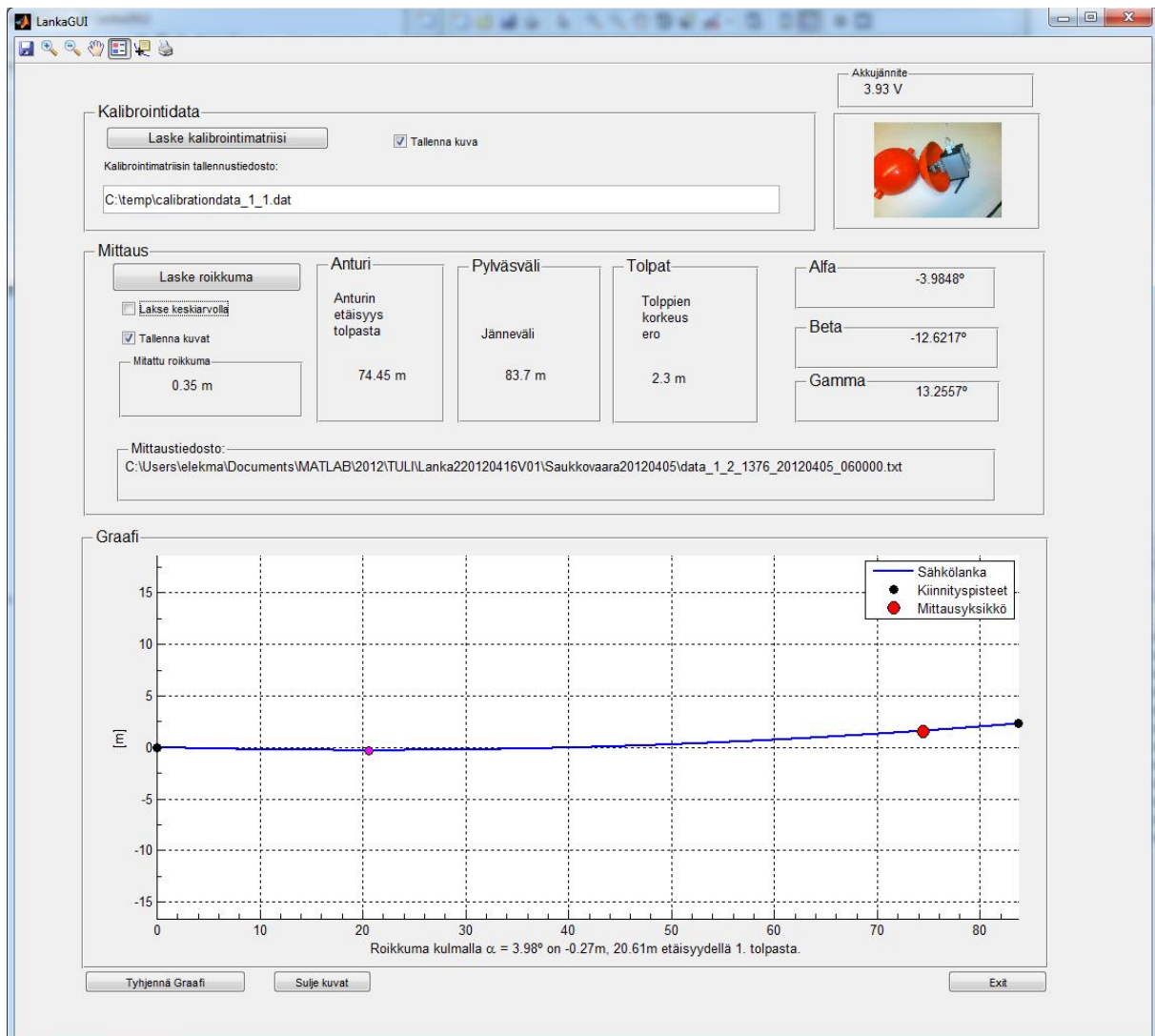
Kuva 19. Keskusyksikkö (vas.) ja lintupallon asennus (oik.)



Kuva 20. Mittausyksiköt voimalinjalla

Mittaustuloksia

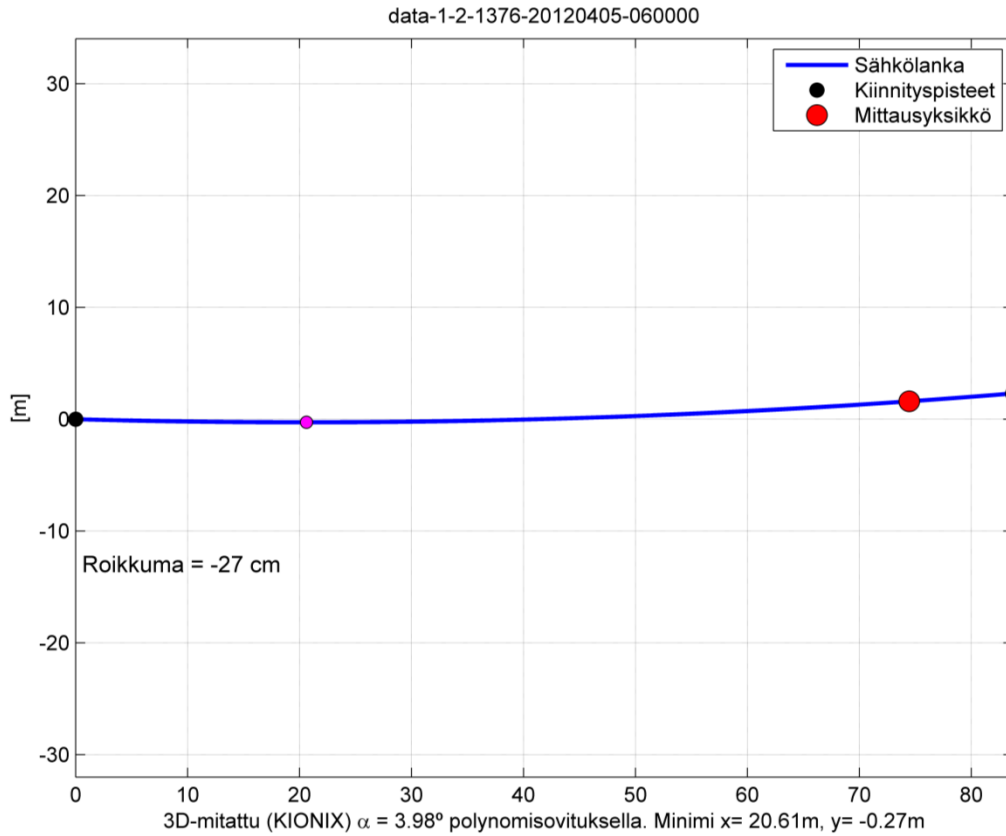
Tässä kappaleessa esitellään prototyyppijärjestelmällä mitatuista mittaustuloksista laskettuja sähkölangan roikkuman approksimaatioita Saukkovaaran voimalinjaosuudelta. Maastoon asennettu mittaussysteemi mittaa kiihtyvyyssmittausdataa langattomasti ja lähettää mitatun datan tietokantapalvelimelle, jossa varsinainen kulmanlaskenta tapahtuu. Laskettua kulmainformaatiota ja geometriadataa hyödyntäen voidaan kappaleessa 2 esitettyjen algoritmien perusteella aproksimoida langan painumaa ja sitä kautta vallitsevaa lumikuormaa. Prototyyppijärjestelmällä varsinainen laskenta tapahtuu jälkilaskentana Matlab-ympäristössä. Laskentaa varten kehitettiin Matlab-käyttöliittymä tulosten analysointia, tallennusta ja visualisointia varten (kuva 24).



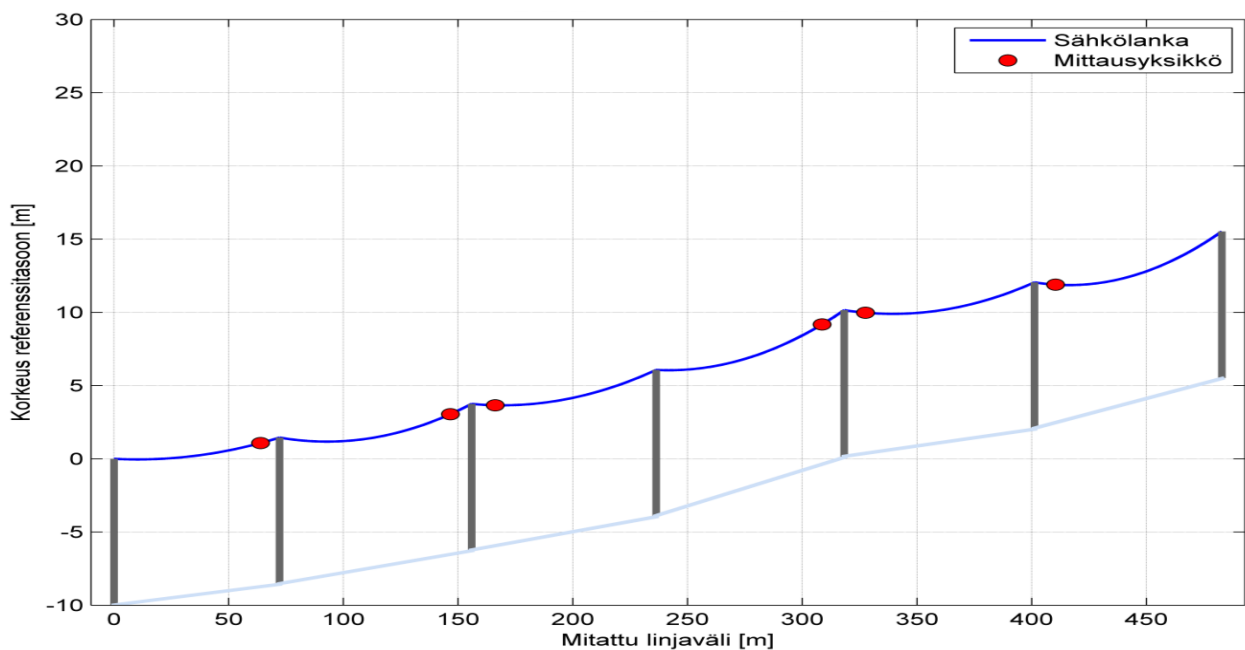
Kuva 21. Matlab-käyttöliittymä

Kuvassa 25 on esitettyä Matlabilla visualisoitu Saukkovaaran mittauspaikan 2. mittaussyksikön lankavälin roikkuma ja kuvaan 26 on koottuna koko mittaussjärjestelmän tulokset yhdestä mittauksesta. Kuvasta 25 nähdään, että approksimaatiolla laskettu painuma on 27cm

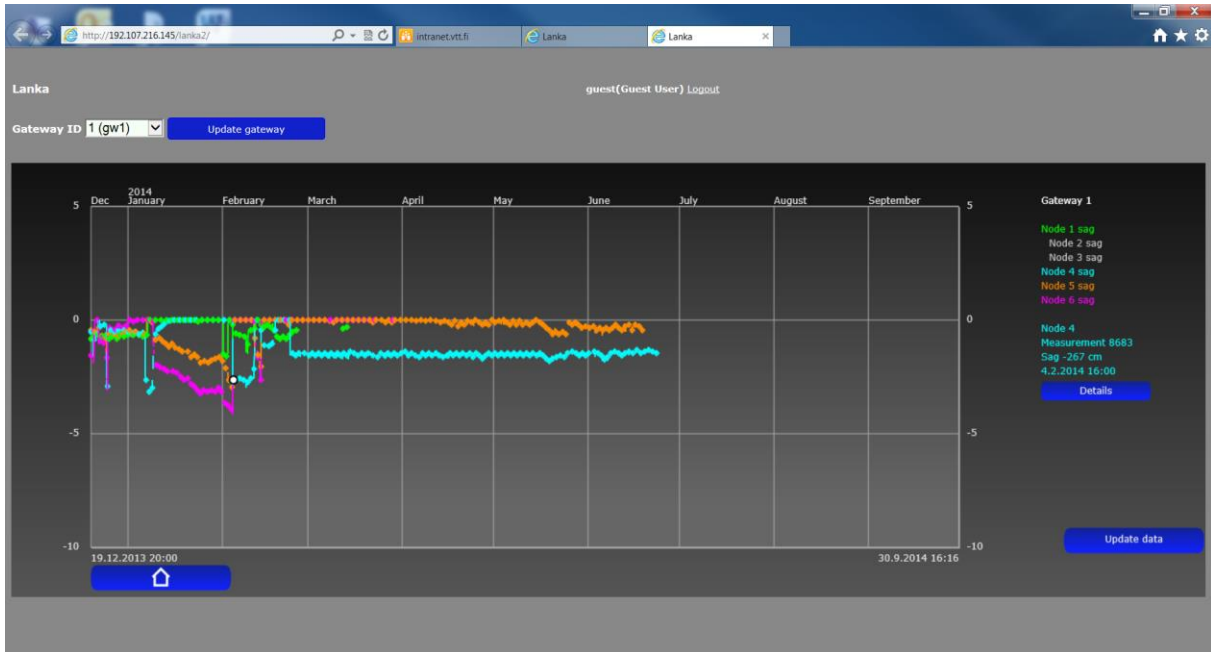
referenssitason (0m) n. 21m metrin päässä ensimmäisestä sähköpylvästä. Kuvan 26 visualisoinnissa sähköpylväät on oletettu kaikki 10m mittaisiksi, minkä mukaan maastoprofiili on piirretty.



Kuva 22. Sähkölangan roikkuman visualisointikuva



Kuva 23. Saukkovaaran kuuden mittausyksikön mittaustulos



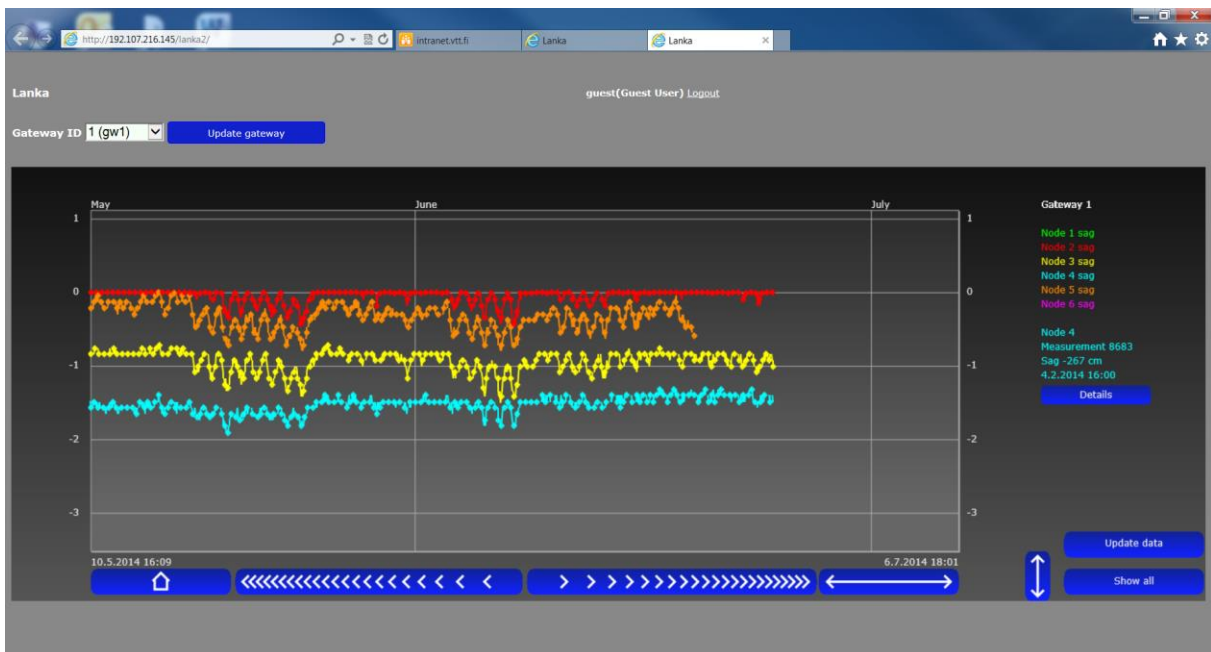
Kuva 24. Kuvankaappaus palvelimen sivusta, yleisnäkymä taipumanäytöstä



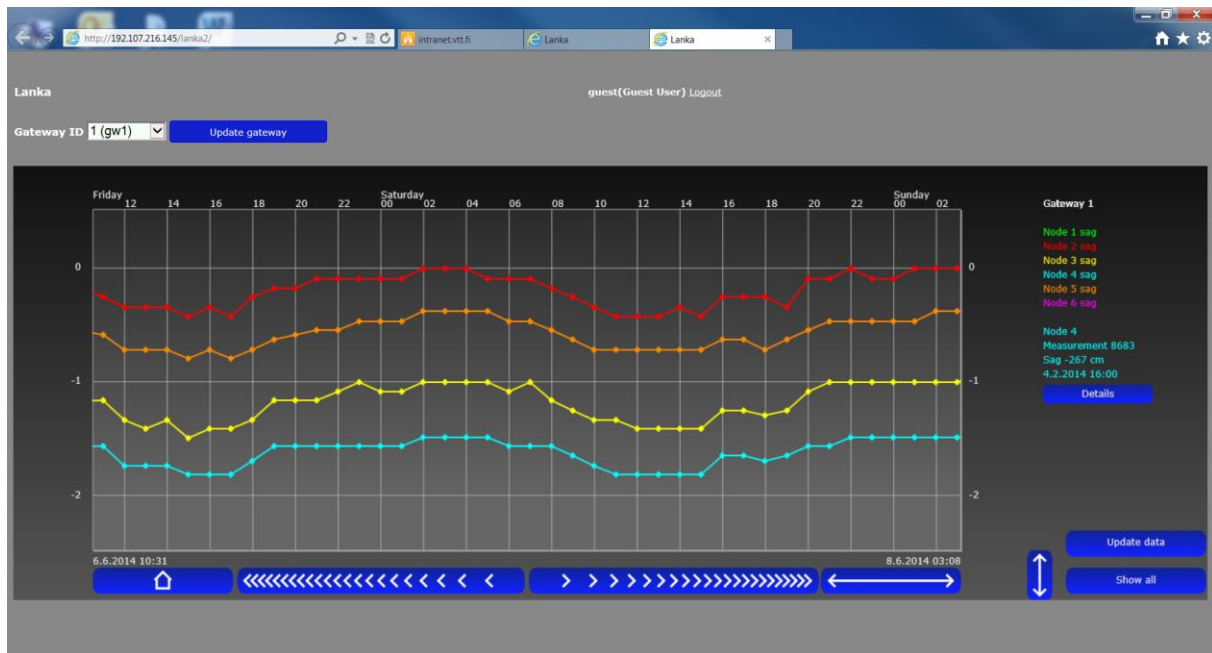
Kuva 25. Osasuurennos yleisnäkyästä (tammi-helmikuu)



Kuva 26. Osasuurennus Helmikuun kaksi ensimmäistä viikkoa



Kuva 27. Dataa kesän alkupuolelta: lämpötilavaihteluiden aiheuttamia taipuman muutoksia (n. 0.5m)



Kuva 28. Kuvasuurennos edellisestä, tässä näkyy maksimitaipuman sijoittuminen iltapäivän tunteihin jolloin lämpötila on ollut kuumimmillaan

5 Yhteenveto

Kehitetyllä kunnonvalvontajärjestelmällä voidaan mitata, analysoida ja tallettaa lumikuormasta aiheutuvia absoluuttisia roikkumia mitatuilla voimalinjaväleillä. Prototyyppi mittausjärjestelmällä pystytään keräämään langattomasti voimalinjoille asennetuista mittausyksiköistä mittausdataa paikalliselle keskusyksikölle, josta mittaukset edelleen lähetetään halutulla intervallilla tietokantapalvelimelle internetiin. Konsepti sisältää myös www-käyttöliitymäsovelluksen mittausdatan visualisointiin ja mittausjärjestelmän parametrisointiin. Näin ollen mittauksen etädiagnostiikka ja mittausjärjestelmän hallinta esim. huoltomiehen matkapuhelimella on mahdollista. Mielenkiintoisena lisämahdollisuutena ilmeni järjestelmän kyky mitata myös lämpölaajenemisen aiheuttamia taipumia linjoissa. Tämä ominaisuus voi olla hyödyllinen sellaisissa tapauksissa joissa langan kuormitus sekä ympäristön lämpötila yhdessä aiheuttavat taipuman joka voi aiheuttaa vaaratilanteita.

Prototyyppimittauslaitteisto asennettiin paikoilleen hyvin haastavissa olosuhteissa, jolloin laitteiston käyttöönoton helppous pääsi oikeuksiinsa. Laitteisto ajaa itsensä ylös automaattisesti kun mittausyksiköihin ja keskusyksikköön kytketään käyttöjännitteet. Keskusyksikkö ottaa automaattisesti yhteyttä tietokantapalvelimeen, jonka jälkeen järjestelmän käyttöönotto ja mittauksen parametrisointi voidaan tehdä joko matkapuhelimella tai etätoimistosta lämpimistä sisätiloista.

Prototyyppimittauslaitteisto osoittautui tekniikaltaan luotettavaksi. Testijaksolle saatiin sekä huippupakkasia, että tuulta ja nollan molemmin puolin vaihtelevia lämpötiloja. Mittausdata saatiin luotettavasti palvelimelle, joitakin yksittäisiä katkoksia lukuun ottamatta. Toiminta-aika valituilla

akuilla ja toteutetuilla virransäästöominaisuuksilla ylitti laskelmat. Projektissa keskityttiin kahteen eri algoritmiin langan roikkuman määrittämiseksi. Tulokset osoittivat, että laskennallisesti kevyempi polynomisovitus on ko. sovellukseen riittävän tarkka painumaresoluution kannalta.

Resoluutiotarkastelussa todettiin, että merkittävin vaikutus painumaresoluution on 3D-kiihtyvyyssanturin tarkkuudella. Tyypilliset voimalinjavälit 20kV voimalinjoilla, jossa mittaussysteemiä on testattu, ovat 40 -100 metriä. Laskentatuloksien perusteella anturin mittaustaikkaresoluution vaikutus on huomattavasti pienempi kuin kulma-anturin resoluution vaikutus painumaresoluutioon. Esimerkiksi 100 metrin jännevälillä 0.5m asemaresoluutiolla päästään 2 cm painumaresoluutioon, kun taas 0.5 asteen kulmaresoluutiolla päästään noin 20cm painumaresoluutioon. Prototyypimittausjärjestelmässä anturisolmussa hyödynnettiin edullista vähävirtaista 3D MEMS-kiihtyvyyssanturia kustannusten ja energiankulutuksen minimoimiseksi

Raportissa kuvattiin E.ON Kainuun Sähköverkon alueella tehdyt kenttäasennukset ja kentällä tehtävät mittaustoimenpiteet. Kenttämittausten tarkoituksena oli todentaa kokonaisjärjestelmän ja kehitetyn mittauskonseptin toimivuus realistissa olosuhteissa. Mittaussysteemin painumaresoluutiota ei voitu todentaa kenttämittausten perusteella referenssimittausten puuttuessa. Toisaalta teoreettisten tarkastelujen perusteella kaupallisesti saatavilla olevilla 0.1 asteen tarkkuuden kulma-anturilla voidaan saavuttaa jopa noin 5cm painumaresoluutio 100 metrin linjaväleillä kehitetyllä prototyypimittausjärjestelmällä. Kulmamittausanturin tarkkuudella on siis merkittävin vaikutus saavutettavaan painumaresoluutioon.

Lähdeviitteet

- [1] Alestalo, P. 2003. Mihin muotoon asettuu päistään kiinnitetty köysi? Solmu 3/2003. <http://solmu.math.helsinki.fi/2003/3/alestalo.pdf>.

Liitteet

- Liite 1 LANKA Server-Side Software Documentation