

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tietotekniikan koulutusohjelma  
Tietoliikennetekniikka  
Jani Lahtinen

Opinnäytetyö

## **ZigBee-sensoriverkko päiväkotien ilmanlaatututkimuksessa**

Työn valvoja  
Työn tilaaja  
Tampere 12/2010

Lehtori Erkki Hietalahti  
Tampereen ammattikorkeakoulu

Työn tekijä: Jani Petteri Lahtinen  
Työn nimi: ZigBee-sensoriverkko päiväkotien ilmanlaatatutkimuksessa  
Sivumäärä: 43 sivua  
Valmistumisaika: Joulukuu 2010  
Työn valvoja: Lehtori Erkki Hietalahti  
Työn tilaaja: Tampereen ammattikorkeakoulun (TAMK) fysiikan laboratorio, FM Pasi Arvela

---

## Tiivistelmä

Tämä opinnäytetyö on tehty Tampereen ammattikorkeakoulun fysiikan laboratoriolle osana valtakunnallista tutkimusprojektia päiväkotien ilmanlaadusta. Työn tavoitteena oli tutkia ja testata langattoman sensoriverkon soveltuvuutta sisäilmanlaadun mittaukseen perinteisten menetelmien rinnalla tai sijasta. Ilmanlaadulla tarkoitettiin tässä työssä ilman suhteellista kosteutta, lämpötilaa ja hiilidioksidipitoisuutta.

Työ aloitettiin tutustumalla ZigBee-verkkostandardiin sekä MeshWorks Wireless Oy:n tarjoaman sensoriverkon laitteistoon ja SeeMoto-palveluun. Tämän jälkeen mittaus-sensorien tarkkuus tutkittiin ja analysoitiin koulun laboratoriossa eri olosuhteissa. Lopuksi suunniteltiin ja rakennettiin kattava sensoriverkko valittuun päiväkotiin. Verkon mittaustulokset ja havainnot kirjattiin ylös ja analysoitiin huolellisesti.

Tutkimuksen tuloksista jäi positiivinen kuva. Sensorien tarkkuus osoittautui testeissä olevan suhteellisen hyvä ja riittävä projektin tarkoituksiin. Verkko tuntui toimivan ilman suurempia ongelmia päiväkodissa ja langattomuus teki siitä helpon rakentaa. Lisäksi mahdollisuus tulosten etävalvontaan www-selaimen avulla helpotti pitkien seurantajaksojen tekemistä. ZigBee-sensoriverkolla on varmasti tulevaisuutta tämän tapaisissa projekteissa.

Writer: Jani Petteri Lahtinen  
Thesis: ZigBee sensor network and air quality research in kindergartens  
Pages: 43  
Graduation time: December 2010  
Thesis supervisor: Lecturer Erkki Hietalahti  
Co-operating company: Tampere University of Applied Sciences (TAMK),  
Physics laboratory, MSc Pasi Arvela

---

## Abstract

This thesis was made for physics laboratory in Tampere University of Applied Sciences (TAMK). It is a part of national air quality research project for kindergartens in Finland. The goal was to research and test the suitability of sensor network in air quality measurements, and to see if they could be an alternative for traditional measuring.

The network standard used in this research was ZigBee and a part of the work was to familiarize oneself with it. Sensor network equipment and SeeMoto end-user service were provided by MeshWorks Wireless Ltd and were used in measurements. TAMK premises and a kindergarten were used for testing environment. Measurement data and observations were written down and carefully analyzed.

The outcome of the work was encouraging. The sensors that were used proved to be quite accurate and reliable. The wirelessness of sensor network made it easy to build into a new environment. Also, the possibility to monitor the results from web browser made the research work easy and flexible. Overall, ZigBee seemed to fit quite nicely in this kind of project.

## **Alkusanat**

Haluan kiittää TAMKIn puolelta Ari Rantalaa ja Pasi Arvelaa sekä MeshWorksiltä Henri Vuorelaa avusta opinnäytetyöni kanssa. Lisäksi kiitokset opiskelukavereilleni, vanhemmilleni sekä veljelleni Jounille avusta monivuotisten opintojeni aikana.

*Ad astra per aspera!*

Tampereella joulukuussa 2010

Jani Lahtinen

# Sisällysluettelo

1 Johdanto .....	8
2 Sensoriverkko .....	9
3 ZigBee-standardi.....	11
3.1 IEEE 802.15.4 ja ZigBee .....	11
3.2 ZigBee-allianssi ja tausta .....	12
3.3 Verkko.....	12
3.3.1 Koordinaattori (ZC).....	14
3.3.2 Reititin (ZR).....	15
3.3.3 Pääte-laite (ZED) .....	15
3.4 Tekniikka .....	16
3.5 Tietoturva .....	17
3.6 Sovelluskohteet.....	18
4 MeshWorks Wireless Oy .....	20
5 SeeMoto-käyttöliittymä .....	21
5.1 Alusta ja vaatimukset.....	21
5.2 Käyttöliittymän käyttö .....	21
5.2.1 Kirjautuminen .....	21
5.2.2 Näkymä.....	22
5.2.3 Verkon luonti .....	22
5.2.4 Tutkittavien sensorien ja suureiden valinta .....	24
5.2.5 Tulosten tallennus.....	25
6 Mittaukset.....	26
6.1 Asettumisaika- ja tarkkuusmittaus laboratoriotilassa .....	26
6.1.1 Mittausolosuhteet.....	26
6.1.2 Tarkkuusmittaus .....	26
6.1.3 Asettumisaika .....	27
6.1.4 Tulokset .....	27
6.1.5 Tulosten analysointi: tarkkuus.....	30
6.1.6 Tulosten analysointi: asettumisajat.....	30
6.2 Asettumisaika- ja tarkkuusmittaus olosuhdekaapissa.....	31
6.2.1 Mittausolosuhteet.....	31
6.2.2 Toteutus .....	32
6.2.3 Tulokset .....	32
6.2.4 Tulosten analysointi.....	34

6.3 Päiväkotimittaukset.....	36
6.3.1 Mittausolosuhteet.....	36
6.3.2 Toteutus .....	37
6.3.3 Tulokset .....	39
6.3.4 Tulosten analysointi.....	41
7 Yhteenveto .....	42
Lähteet.....	43

## Lyhenteiden ja termien selitykset

AES	advanced encryption standard
CLR	Carbon dioxide/Light intensity/Router -anturi
CSMA-CA	carrier sense multiple access with collision avoidance
DSSS	direct sequence spread spectrum
FFD	full-function device, täyden toiminnan laite
MAC	medium access control, siirtoyhteyskerros
OQPSK	offset quadrature phase-shift keying
PAN	personal area network, likiverkko
PHY	physical layer, fyysinen kerros
PPM	parts per million in volume (hiilidioksidin mittayksikkö)
RFD	reduced-function device, rajoitetun toiminnan laite
steady state	Funktio on ajan suhteen muuttumattomassa tilassa.
THB	Temperature/Humidity/Battery -anturi
THLR	Temperature/Humidity/Light intensity/Router -anturi
Wi-Fi	wireless fidelity
WPAN	wireless personal area network, langaton likiverkko
ZC	ZigBee coordinator, koordinaattori
ZED	ZigBee end device, päätelaite
ZR	ZigBee router, reititin

# 1 Johdanto

Opinnäytetyön aihe syntyi Tampereen ammattikorkeakoulun päiväkotiprojektin tarpeesta selvittää langattoman sensoriverkon käyttömahdollisuutta sisäilmatutkimuksessa.

Päiväkotiprojekti oli osana LVI-talotekniikkateollisuuden ja viiden Suomen ammattikorkeakoulun yhteishanketta, jossa tutkittiin päiväkotien sisäilmanlaatua 2010-2011 välisenä aikana eri puolella Suomea. Hankkeen tavoitteena oli varmistaa terveelliset sisäolosuhteet päiväkodeissa. Sisäilmasta mitattavia suureita olivat muun muassa lämpötila, hiilidioksidipitoisuus ja ilmankosteus.

Opinnäytetyön tavoite oli tutustua ZigBee-verkkotekniikkaan ja MeshWorks Wireless Oy:n tarjoamaan sensoriverkkoratkaisuun, suunnitella ja toteuttaa verkon mittausantureille kattavat tarkkuus- ja luotettavuusmittaukset sekä lopuksi suunnitella ja rakentaa kohdepäiväkotiin kattava sensoriverkko, josta tehtäisiin mittaushavaintoja. Tutkintotyön tuloksia hyödynnettäisiin päiväkotihankkeessa.

Luvuissa 2 ja 3 käsitellään sensoriverkkoja ja ZigBee-standardia sekä esitellään tutkimuksessa käytettävät laitteet. Luvussa 4 esitellään lyhyesti MeshWorks Wireless Oy, joka toimitti työssä käytetyn sensoriverkkoratkaisun. Luku 5 on tehty opastamaan tutkintotyössä käytetyn käyttöliittymän toimintaan ja käyttöön. Luku 6 sisältää kaikki työssä tehdyt mittaukset ja niiden tulosten analysoinnit. Luvussa 7 on yhteenveto työstä, jatkokehitysideat ja loppusanat.



## 2 Sensoriverkko

Langattoman tietoliikenteen kehittyessä ja komponenttien hintojen laskiessa sensoriverkoista on tullut mielenkiintoinen sekä nopeasti kasvava tutkimuksen ja kehityksen kohde (*Rantala 2006-07, 2*).

Sensoriverkolla tarkoitetaan yleensä tietylle alueelle hajautettua langatonta järjestelmää, jonka tehtävänä on tehdä mittauksia ja havaintoja ympäristöstään ja haluttaessa ohjata jotain toimielintä saadun informaation perusteella. Verkon peruselementit ovat päätelaite, reititin sekä koordinaattori. Päätelaitteet ovat itsenäisesti toimivia sensoreita, jotka mittaavat tietoa ja ovat yhteydessä koordinaattoriinsa. Päätelaitteita voi olla verkossa muutamista jopa tuhansiin, ja niiden koko voi vaihdella kenkälaatikosta vehnänjyvään riippuen verkon tarkoituksesta. Reitittimen tehtävänä on välittää informaatiota päätelaitteiden ja koordinaattorin välillä. Lisäksi se hoitaa myös päätelaitteen tehtäviä. Koordinaattori hallinnoi oman verkkonsa laitteita ja hoitaa yhdyskäytävän kautta liikennöinnin sensoriverkosta ulospäin langattomasti tai kiinteän verkon kautta (*Wikipedia(en). Wireless sensor network*).

Alunperin armeijan tarpeista lähtenyt sensoriverkkojen kehitys näkyy nykyisin runsaasti siviili- ja teollisuuspuolella. Sensoreilla voidaan mitata muun muassa lämpötilaa, kosteutta, liikettä, äänenvoimakkuutta tai valaistuksen voimakkuutta. Koska mahdollisuuksia on lukuisia, myös sovelluskohteet ovat lähes rajattomat. Verkkoa voidaan käyttää esimerkiksi kotona hälytysjärjestelmän osana, kuljetusyhtiöillä valvomaan lastin olosuhteita tai teollisuudessa prosessien ohjauksessa. Sensoriverkkojen yksinkertaisuuden ja *ad hoc* – luonteen takia ne ovat pitkäikäisiä, luotettavia sekä helppo tuoda olemassaolevaan infrastruktuuriin (*Wikipedia(en). Wireless sensor network*).

Sensoriverkkojen tärkeimmät ominaisuudet ja samalla haasteet sekä tavoitteet ovat edullisuus, sensorien koko ja pieni virrankulutus. Usein kaikkia tavoitteita ei voida saavuttaa joten joudutaan tekemään kompromisseja verkkoja suunniteltaessa. Mitä

vaativampaa tiedonkäsittelyä sensorilta vaaditaan sitä suuremmaksi sen virrankulutus ja koko todennäköisesti kasvaa (*Rantala 2006-07, 2-3*).

Sensoriverkoista on tehty useita eri standardeja. Niitä ovat muun muassa Bluetooth, ZigBee (IEEE 802.15.4), WiFi (IEEE 802.11 WLAN), IEEE 1451, Z-wave, EnOcean, ja WirelessHART. Taulukossa 1 on esitelty vertailuksi joitain verkkotekniikoita ja niiden ominaisuuksia. Tässä opinnäytetyössä keskitytään pelkästään tutkimaan ZigBee-standardin mukaista sensoriverkkoa (*Rantala 2006-07, 6-10*).

Taulukko 1: Eri verkkotekniikoita (*ZigBee Alliance*)

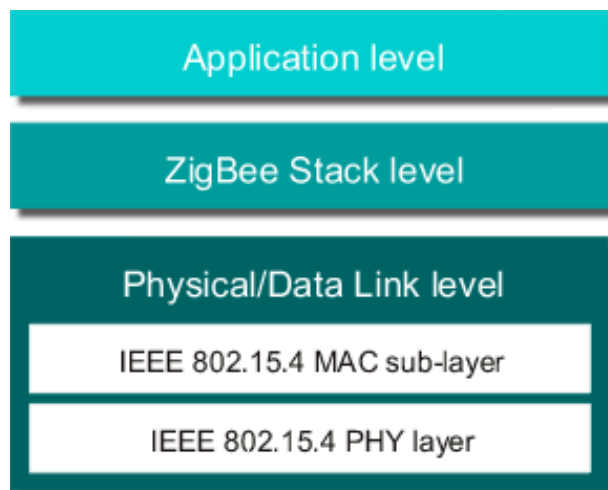
Market Name	ZigBee®	---	Wi-Fi™	Bluetooth™
Standard	802.15.4	GSM/GPRS CDMA/1x/RTT	802.11b	802.15.1
Application Focus	Monitoring & Control	Wide Area Voice & Data	Web, Email, Video	Cable Replacement
System Resources	4KB - 32KB	16MB+	1MB+	250KB+
Battery Life (days)	100 - 1,000+	1-7	.5 - 5	1 - 7
Network Size	Unlimited (2 <sup>54</sup> )	1	32	7
Maximum Data Rate (KB/s)	20 - 250	64 - 128+	11,000+	720
Transmission Range (meters)	1 - 100+	1,000+	1 - 100	1 - 10+
Success Metrics	Reliability, Power, Cost	Reach, Quality	Speed, Flexibility	Cost, Convenience

### 3 ZigBee-standardi

ZigBee nimi on peräisin mehiläisen lentoradasta. Mehiläisen lentäessä hunajankeruu-matkallaan se noudattaa kahdeksikon muotoista ”tanssikuviota”, jolla se välittää tietoa muulle yhdyskunnalle uusista ruokapaikoista. Menetelmä on äänetön ja tehokas. Tähän tiedonvälityspeeriaatteeseen perustuu myös ZigBee-verkko (*Wikipedia(en). Waggle dance*).

#### 3.1 IEEE 802.15.4 ja ZigBee

IEEE 802.15.4 –standardi määrittelee vähän tehoa vaativan lyhyen kantaman langattoman verkon. Tarkemmin sanottuna se määrittelee kaksi alinta OSI-mallin mukaista kerrosta, eli fyysisen ja siirtoyhteyserroksen. Näitä kutsutaan standardissa PHY- ja MAC-kerroksiksi. ZigBee taas on ZigBee-allianssin kehittämä standardi, joka määrittelee sovellusten ja kahden alimman kerroksen välisen yhteyden (kuva 1). Tämä ZigBee-pino määrittelee verkon rakenteen, reitityksen sekä turvallisuusasiat. OSI-mallin sovelluskerros jää kolmannen osapuolen vastuulle (*IEEE 802.15.4-2006, 1*)(*Jennic*).



Kuva 1: ZigBee-protokollapino (*Jennic*)

## 3.2 ZigBee-allianssi ja tausta

ZigBee-allianssi on yhteisö, joka vastaa ZigBee-standardin kehittamisestä. Allianssiin kuuluu monia suuria kansainvälisiä yrityksiä kuten esimerkiksi Philips, Intel ja Hewlett Packard. Allianssiin liittyminen antaa oikeuden käyttää standardia kaupallisissa tarkoituksissa (*Wikipedia. ZigBee*).

ZigBee-standardin kehitystyö alkoi kun huomattiin Bluetoothin ja WLAN:in sopimattomuus tiettyihin käyttötarkoituksiin. IEEE 802.15.4 –standardi valmistui 2003 ja vuosi sen jälkeen ratifioitiin ZigBee:n spesifikaatio. Vuonna 2006 ZigBee-allianssi julkisti parannetun version standardista nimeltään ZigBee 2006. Allianssin jäsenmäärä on tällä hetkellä yli 175 (*Wikipedia. ZigBee*).

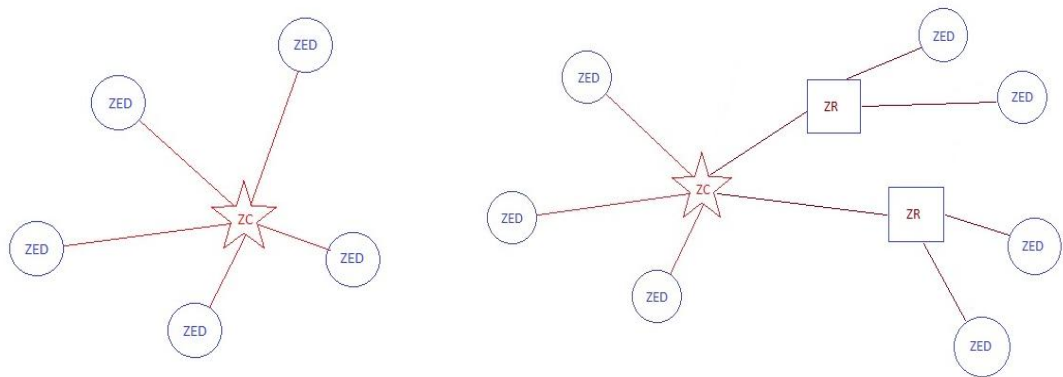
## 3.3 Verkko

IEEE 802.15.4 -standardi määrittelee kaksi erilaista verkossa toimivaa laitetyyppiä: FFD (Full Function Device) ja RFD (Reduced Function Device). FFD sisältää kaiken standardin määrittelemän toiminnallisuuden. Se voi toimia PAN-verkkokoordinaattorina, koordinaattorina tai päätelaitteena. RFD on ominaisuuksiltaan karsitumpi ja voi keskustella ainoastaan FFD-laitteen kanssa. Verkko vaatii aina yhden FFD:n toimimaan PAN-verkkokoordinaattorina. Tämän tehtävänä on aloittaa verkon muodostus laitteiden välille, antaa laitteille paikalliset verkko-osoitteet ja verkolle verkkotunnus. Verkko voi sisältää jopa 65536 laitetta (*IEEE 802.15.4-2006, 13*).

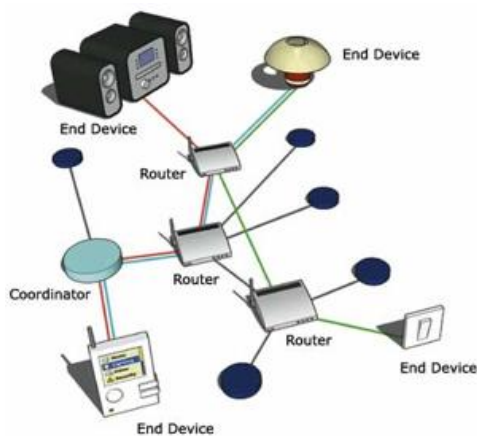
ZigBee:n laitteille on määritelty termit: ZC (ZigBee Coordinator), ZR (ZigBee Router) ja ZED (ZigBee End Device). ZC on FFD-laite ja muodostaa verkon ja säilyttää tietoja siitä. ZC-laitteita tarvitaan yksi ja vain yksi jokaista ZigBee-verkkoa kohden. ZR on reititin, joka reitittää tietoa eteenpäin verkossa. ZR on FFD-tyyppinen koordinaattori. ZED taas on RFD-tyyppinen yksinkertainen päätelaite, joka voi keskustella ainoastaan ZC:n tai ZR:n kanssa (*Wikipedia. ZigBee*).

ZigBee:lle on olemassa kolme eri verkkotopologiaa: *tähti-, puu- ja mesh-verkko*.

*Tähtimäisessä* topologiassa (kuva 2) yksi FFD-laite muodostaa verkon ja toimii PAN-koordinaattorina muille päätelaitteille. PAN-koordinaattori on verkon solmupiste, jonka kautta kaikki liikenne kulkee. *Puumallissa* (kuva 2) päätelaitteet on kytketty verkossa joko suoraan ZC:hen tai sitten ZR:ään. ZR:ää käytetään muodostamaan uusia tähtikytkentöjä päätelaitteille, jotka ovat kantomatkan ulkopuolella ZC:stä. Puumallia voi sanoa myös laajennetuksi tähtiverkoksi. Jos puuverkon ZR:t saavat kommunikoida suoraan keskenään, puhutaan *Mesh*-verkkotyypistä. Mesh-verkko on kehittyneempi versio puuverkosta itsekorjauksen ansiosta. Jos joku verkon komponenteista lakkaa toimimasta, verkko osaa korjata virheen ja uudelleenreitittää datan välityksen. Kuvassa 3 näkyy esimerkki Mesh-verkosta (Sassi 2009, 19-20) (Jennic).



Kuva 2: ZigBee-verkon tähtimalli vasemmalla ja puumalli oikealla



Kuva 3: Esimerkki mesh-verkosta (Jennic)

### 3.3.1 Koordinaattori (ZC)

Koordinaattori on verkon sydän, jonka ympärille verkko rakentuu. Kun koordinaattori kytketään virtalähteeseen, se aloittaa verkon muodostuksen määrittelemällä verkolle PAN-tunnuksen ja valitsee kanavat käytössä olevalle radiotaajuudelle. Tämän jälkeen se kuuluttaa muille verkon laitteille olemassaolostaan, ja käsittelee näiden pyynnöt verkkoon liittymisestä. Hyväksytyään liittymispyynnöt päätelaitteilta ja reitittimiltä koordinaattori tallentaa tiedot laitelistaan. Lisäksi koordinaattorissa on useita ennalta määriteltäviä verkon ominaisuuksia, jotka tulevat käyttöön verkon muodostusvaiheessa. ZC toimii usein myös verkon turvakeskuksena (Trust Center). Se hyväksyy uudet laitteet verkkoon sekä ylläpitää ja jakaa verkon salausavaimet (*Jennic*)(*Wikipedia(en)*). *ZigBee*).

Yhteys verkosta ulospäin voi tapahtua esimerkiksi GPRS-yhteydellä. Koordinaattorissa voi olla integroituna yhdyskäytävä eli gateway (kuva 4) tai sitten se on verkkoyhteydessä laitteeseen, josta sellainen löytyy. Yhdyskäytävän kautta tiedot kulkevat palvelimelle, josta loppukäyttäjät saa ne itselleen. Koordinaattorin yhteydessä voi olla myös GPS-paikannin, jotta voidaan paikantaa sensoriverkon sijainti kartalla.



Kuva 4: Gateway-koordinaattori, josta löytyy GPRS- ja GPS-yhteys

### 3.3.2 Reititin (ZR)

Reititin eli router toimii puu- ja mesh-verkossa solmupisteenä, kun päätelaitteiden etäisyys koordinaattoriin on kantomatkan ulkopuolella. Sen tehtäviin kuuluvat käsittely- ja kuittauspyynnöt uusien laitteiden liittymisestä verkkoon sekä viestien välitys. Sensoriverkon reititin voi toimia myös mittarina mitaten samoja suureita kuin päätelaitteetkin. Reititin on FFD-laite eikä ole koskaan unitilassa, joten se vaatii verkkovirtalähteen toimiakseen. Kuvassa 5 on mukana kaksi erilaista reititintä CLR ja THLR, jotka kykenevät mittaamaan hiilidioksidipitoisuutta (C), valaistusvoimakkuutta (L), lämpötilaa (T) sekä kosteutta (H) (*Jennic*) (*Savikoski 2010, 22*).



Kuva 5: Vasemmalta oikealle THL-reititin, THB-päätelaite, CLR-reititin

### 3.3.3 Päätelaite (ZED)

Päätelaitteen (kuva 5) tehtävä sensoriverkossa on mitata haluttuja suureita ja lähettää ne eteenpäin koordinaattorille. Laite on RFD-tyyppiä ja kuluttaakseen mahdollisimman vähän virtaa se on suurimman osan ajasta unessa. Näin ollen tälle riittää virtalähteeksi yksi tai kaksi kolmen voltin paristoa, jotka saattavat kestää jopa useita vuosia. Päätelaite yhdistää automaattisesti verkkokoordinaattoriin, kun paristo laitetaan kiinni. Jos yhteys katkeaa tai sitä ei saavuteta, laite kerää tietoa muistiin ja lähettää ne saadessaan seuraavan kerran

yhteyden. Yhteydenottoväli opinnäytetyössä käytetyissä sensoreissa oli viisi minuuttia, ja uusintayritysten väli noin 30 minuuttia. Tallennuskapasiteetti näissä oli maksimissaan kymmenen vuorokautta, mikäli yhteyttä ei ole saatu koordinaattoriin (*Wikipedia. ZigBee*) (*Vuorela 2010, 5*).

THB-anturi, joka on kuvassa 6 avattuna, mittasi lämpötilaa (T), kosteutta (H) ja lisäksi pariston tilaa (B).



Kuva 6: THB-päätelaite sisältä

### 3.4 Tekniikka

ZigBee on yksinkertainen, luotettava ja vähän tehoa vaativa langaton likiverkko (WPAN), joka perustuu IEEE 802.15.4 –standardissa määriteltyihin fyysiseen (PHY) ja siirtoyhteyskerrokseen (MAC). Yleisin käytettävä ja maailmanlaajuinen radiotaajuus on 2,4 GHz.

Muita käytettäviä taajuuksia ovat: 915 MHz (Pohjois-Amerikka) ja 868 MHz (Eurooppa).

Taulukossa 2 on tarkemmin tietoa eri taajuusalueista ja niiden ominaisuuksista.

Kantomatka tyypillisesti on ZigBee-laitteiden välillä sisätiloissa noin 30 m, mutta

vaihteluväli on iso (10-100 m) olosuhteista riippuen. Tiedonsiirto verkossa tapahtuu

CSMA-CA:ta käyttäen, eli laitteet kuuntelevat kanavaansa ja lähettävät sen ollessa vapaa.

Mikäli kanava on varattu, odotetaan satunnainen aika tai aikavälimäärä ja kuunnellaan



kanavaa uudestaan. Kanavointimenetelmänä käytetään suorasekvensointia (DSSS) (*Wikipedia. ZigBee*) (*Jennic*).

Taulukko 2: Taajuusalueet ja ominaisuudet ZigBee:ssä (*IEEE 802.15.4-2006; 28, 290-293*)

Taajuus	Siirtonopeus	Kanavia	Lähetysteho(Suomi)	Modulaatio
868 MHz	20 kbit/s	1	< 25 mW	BPSK
915 MHz	40 kbit/s	10	-	BPSK
2400 MHz	250 kbit/s	16	< 100 mW	OQPSK

ZigBee-laitteilla on kaksi eri kommunikointitapaa: *Beacon* ja *Non-beacon*. Jos verkossa on Beacon käytössä, reitittimet ja/tai koordinaattori lähettävät määrätyn ajanvälein superkehyksen, johon päätelaite synkronoituu ja saa oman kommunikointiaikavälinsä. Näin ollen laite voi nukkua muun ajan ja herätä vain lähettämään dataa. Tämä liikennöintitapa on käytössä muun muassa sensoriverkoissa. Non-beacon-verkossa laite voi lähettää dataa halutessaan käynnistyen näin esimerkiksi ulkoisesta ärsykkeestä. Tällainen laite voi olla vaikkapa valokatkaisin tai savunilmaisin (*Sassi 2009, 21*).

ZigBee-laitteille ominaista on nopea uudelleenkytkytyminen verkkoon. Heräävä päätelaite pystyy lähettämään ja vastaanottamaan dataa alle 30 millisekunnissa (*Wikipedia. ZigBee*).

### 3.5 Tietoturva

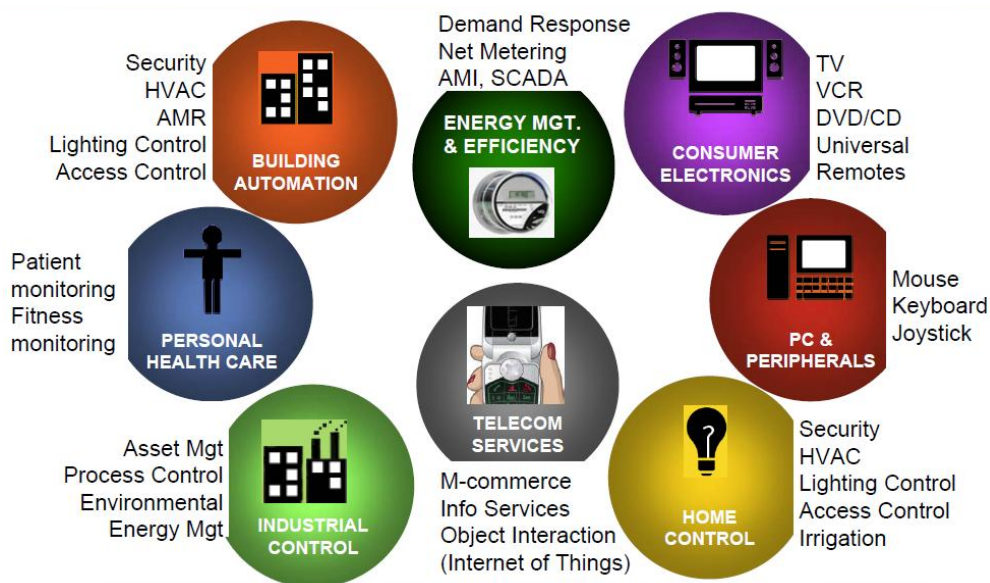
Tietoturvan kannalta ZigBee ei poikkea muista langattomista verkoista. Koska fyysistä yhteyttä ei tarvita, se on pohjimmiltaan haavoittuvainen salakuuntelulle ja tiedon vääristelylle. Koska laitteet ovat halpoja, pienikulutuksisia ja yksinkertaisia tekniikaltaan, tietoturvariskit luonnollisesti kasvavat, kun monimutkaisia salausalgoritmeja ei voida käyttää (*IEEE 802.15.4-2006, 24*).

ZigBee-standardi mahdollistaa kolme eri tietoturvakeinoa. Tiedon salaukseen on 128-bittinen AES-algoritmi: informaatio suojataan salausavaimella sen lähtöpisteessä ja

puretaan kohteessaan samalla avaimella. Kaikissa viesteissä on mukana kehyslaskuri, jonka perusteella voidaan vanhat tai kolmannen osapuolen viestit hylätä. Lisäksi verkon laitteilla on lista niistä laitteista, joiden kanssa se voi kommunikoida (ACL). Tällä pyritään estämään ulkopuolisen laitteen tunkeutuminen verkkoon. Kaikkia kolmea turvakeinoa käyttämällä ZigBee-verkkoa voidaan sanoa jo hyvin suojatuksi. Lisäksi tietoturvaa voidaan vielä parantaa sovellustasolla (Kinney 2003, 10-11) (Jennic).

### 3.6 Sovelluskohteet

Käyttökohteita ZigBee-pohjaiselle lyhyen kantaman lähiverkolle on lähes niin paljon kuin mielikuvitus antaa myöden. Suurin sovellusalue kuitenkin voisi olla automaatio. Kuvassa 7 on ZigBee-allianssin näkemys sovelluskohteista.



Kuva 7: ZigBee-verkon käyttökohteita (ZigBee Alliance)

Teollisuudessa tekniikkaa voidaan käyttää prosessinohjauksessa ja –seurauksessa sekä olosuhteiden ja resurssien mittauksessa. Langattomuus, tietoturva ja luotettavuus ovat siellä avainasemassa. ZigBee-tekniikan käyttö vähentäisi työvoiman tarvetta ja näin toisi kustannussäästöjä pitkällä aikavälillä.

Kiinteistöissä voidaan käyttää sensoriverkkoa mittaamaan ilmanlaatua ja säätämään lämpötilaa sekä ilmanvaihtoa sen mukaan. Valaistusta voidaan ohjata joko automaattisesti sen voimakkuuden mukaan tai käyttämällä langattomia kytkimiä, jolloin turhien johtojen määrä vähenee. Turvakamerat ja liikesensorit voivat myös käyttää ZigBee:tä.

Terveystieteissä ZigBee:tä voidaan käyttää potilaan kunnon seurantaan. Tässä varsinkin laitteiden luotettavuus ja pitkäikäisyys ovat suuria etuja.

Kodinelektronikassa ZigBee voisi korvata muun muassa vanhat infrapunalla toimivat kaukosäätimet, langalliset hiiret sekä näppäimistöt. Lasten kauko-ohjattavat laitteet, ikkunoiden kaihtimet, ovet sekä pelikonsolien ohjaimet voisivat myös toimia ZigBee:llä.

## 4 MeshWorks Wireless Oy

MeshWorks Wireless Oy (myöhemmin MeshWorks) on vuonna 2007 Tampereella perustettu kansainvälinen yritys. Se keskittyy tekemään langattomia verkkoratkaisuja (WSN) yritysmarkkinoille. Ratkaisuja, jotka liittyvät yritysten logistiikkaan, energiasektoriin sekä kaluston- ja kiinteistönhallintaan. Pyrkimyksenä tarjota asiakkaille parempaa tuotannon tehokkuutta sekä kustannusten pienennystä. MeshWorks on osa *e-Bros Corporation* –yhtiötä ja yksi ZigBee-allianssin jäsenistä (*MeshWorks Wireless Oy*).

MeshWorksin päätoiminta-alue on langattomat sensoriverkot ja niihin liittyvät sovellukset. Yrityksen tuotteita ovat SeeMoto, FeelPlace ja SensUrban. Tässä opinnäytetyössä tehdyissä mittauksissa käytettiin SeeMoton sensoriverkkolaitteita, palvelinta sekä käyttöliittymää. Järjestelmä on esitelty kuvassa 8.



Kuva 8: SeeMoto-järjestelmä (*SeeMoto*)

## 5 SeeMoto-käyttöliittymä

Tässä kappaleessa tutustutaan SeeMoton tarjoamaan selainpohjaiseen käyttöliittymään. Käyttöliittymä on tullut käyttöön kesän 2010 aikana, ja on vielä osittain keskeneräinen. Päivityksiä kuitenkin tulee MeshWorksiltä kuukausittain ja käytettävyys parantuu. Myös ulkoasu saattaa hieman muuttua tässä opinnäytetyössä esitetystä.

SeeMoto-palvelimen tallentamia mittaustietoja olisi mahdollista myös tutkia omalla sovelluksella XML- ja JSON-tiedonsiirto rajapintojen kautta. Näin anturien tietoja voisi seurata vaikkapa mobiilisovelluksen avulla langattomasti. Tämän vaihtoehdon tutkiminen ei kuitenkaan ollut olennaista tutkimuksen aiheen kannalta.

### 5.1 Alusta ja vaatimukset

SeeMoton tarjoama web-käyttöliittymä toimii Windows-käyttöjärjestelmän päällä kaikissa yleisimmissä selaimissa mukaan lukien Internet Explorer ja Mozilla Firefox.

### 5.2 Käyttöliittymän käyttö

Tässä kappaleessa opastetaan lyhyesti SeeMoton tärkeimpien ominaisuuksien käyttöön: miten luodaan verkko ja lisätään siihen sensoreita, sekä miten ja mistä mittaustietoja voidaan analysoida.

#### 5.2.1 Kirjautuminen

Palvelimelle kirjaututaan osoitteessa <http://www1.retailhosting.fi/wsn> syöttämällä käyttäjätunnus ja salasana (kuva 9).

SEEMOTO

Welcome to SeeMoto. Log in please.

Username:  
Nimi Tähän

Password:  
●●●●●●●●●●

LOGIN

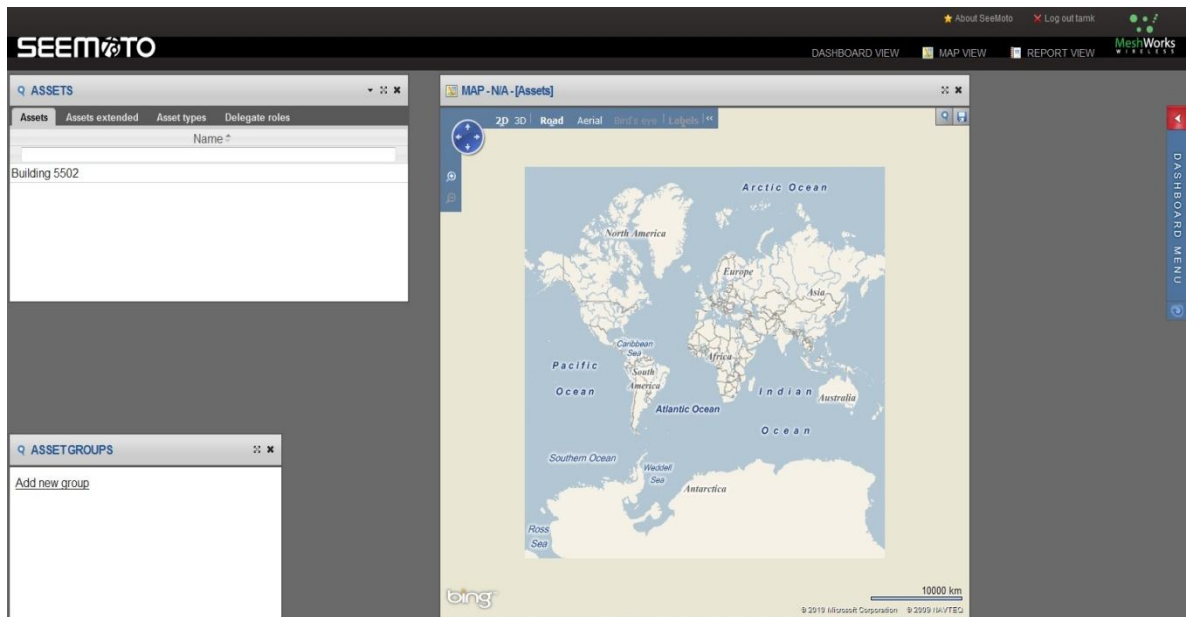
Kuva 9: Kirjautuminen palveluun

## 5.2.2 Näkymä

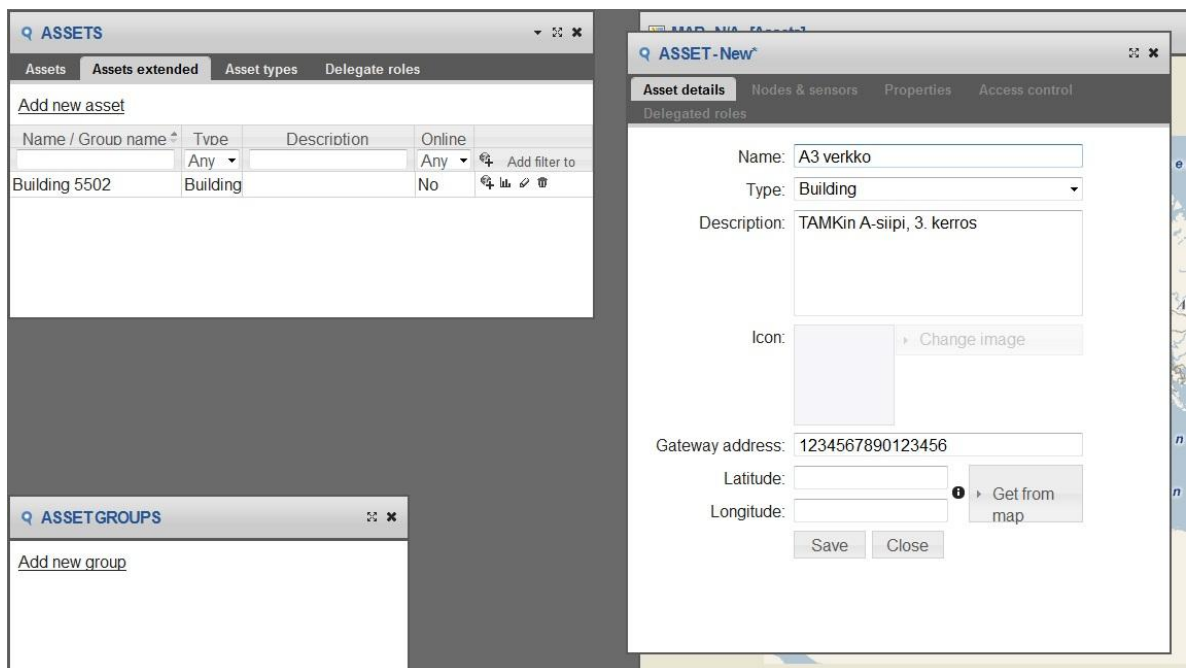
Kirjautumisen jälkeen käyttäjä näkee oletusnäkyssä (kuva 10) kolme ikkunaa. Keskeisimmänä ja suurimpana on maailman kartta, josta näkee yhdyskäytävän sijainnin sen GPS-paikantimen ansiosta. Vasemmalla ylhäällä on Assets-ikkuna, johon voidaan lisätä asetteja eli 'omaisuuksia'. Yksi asset tarkoittaa yhtä sensoriryhmää, joka muodostaa yleensä yhden loogisen osan verkosta. Vasemmalla alhaalla on Asset groups -ikkuna, johon voidaan kerätä asetteja yhdeksi kokonaisuudeksi. Esimerkiksi yhdessä kiinteistössä voi olla joka kerroksessa oma asset, ja jokainen niistä voidaan yhdistää yhdeksi koko rakennusta kuvaavaksi Asset groupiksi.

## 5.2.3 Verkon luonti

Kun halutaan luoda uusi sensoriverkko SeeMotoon, valitaan Assets-ikkunasta *Assets extended* ja *Add new asset*. Tästä aukeaa uusi ikkuna, johon syötetään verkon nimi, tyyppi sekä gatewayn IEEE-osoite (kuva 11). Kun samasta ikkunasta valitaan *Nodes & sensors* -lehti, saadaan lisättyä halutut anturit verkkoon.



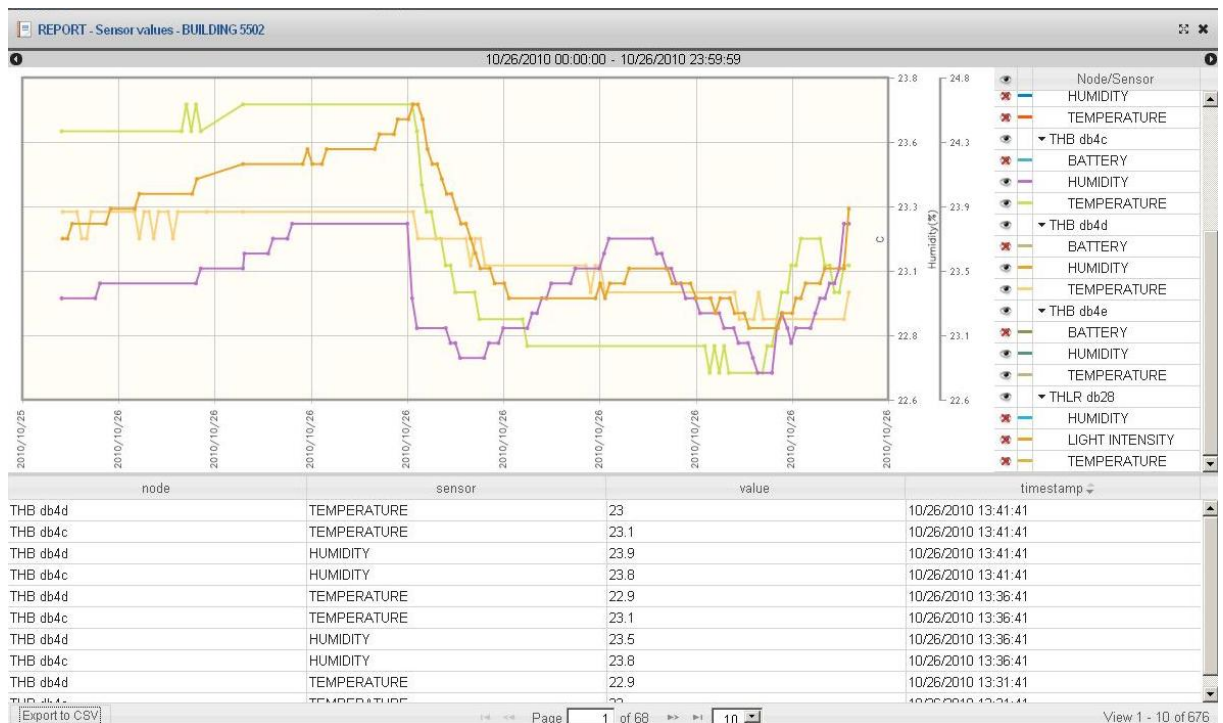
Kuva 10: SeeMoton oletusnäkö



Kuva 11: Assetin lisääminen SeeMotoon

## 5.2.4 Tutkittavien sensorien ja suureiden valinta

Alettaessa tutkimaan sensorien mittaustuloksia ja historiatietoja valitaan Assets-ikkunasta haluttu verkko, ja sen kohdalta painetaan pylväsdiagrammin ikonia (*reports*). Uusi *REPORT*-ikkuna aukeaa näkymään (kuva 12). Ikkunassa vasemmalla ylhäällä on kuvaajia, jotka kuvaavat mittaustuloksia ja niiden kehitystä valitun vuorokauden ajalta. Kuvaajien oikealla puolella ovat allekkain kaikki anturit ja niiden mittaamat suureet. Ikkunan alaosassa on lokitietoja kaikista mittauksista - viimeisimmät ylimpänä listassa. Lokista nähdään seuraavat tiedot: anturin nimi, mittaussuure, mittaustulos sekä aikaleima.



Kuva 12: Raporttinäkymä

Oletuksena *REPORT*-näkyvä näyttää kaikki asettiin kuuluvat anturit ja niiden mittaamat arvot. Mikäli halutaan rajata seuranta vain tiettyihin sensoreihin tai tiettyyn suureeseen, 'klikataan' hiirellä ikkunan oikeassa reunassa olevan suureen tai sensorin edessä olevaa silmäkikonia. Tällä poistetaan tai lisätään seurattavia suureita näkymään.



Palvelunäkymä mittaustiedoista päivittyy itsestään minuutin välein ja mittaustiedot tulevat sensoreilta käyttäjän selaimen ruudulle noin viidessä minuutissa.

### **5.2.5 Tulosten tallennus**

Tulokset voidaan halutessa tallentaa *comma separated values* –muodossa (.csv) valitsemalla hiirellä *Export to CSV* ruudun alavasemmalta. Tämä tallentaa tulokset erotellen sarakkeiden arvot pilkuilla ja lainausmerkeillä. Kun tuloksia halutaan käsitellä ja analysoida, CSV-tiedosto on kätevä avata taulukkolaskentaohjelmaan ja muuttaa sille ominaiseen formattiin. Tuloksista on sitten helppo luoda tarkemmat kuvaajat kuin mitä Seemotossa on. Näin on toimittu myös tässä opinnäytetyössä mittaustuloksia analysoitaessa.

## 6 Mittaukset

Mittausten suunnittelu lähti liikkeelle sensorien tarkkuuden ja luotettavuuden kyseenalaistamisesta. Epäiltiin sensorien mittaustarkkuutta niiden edullisuuden ja yksinkertaisuuden takia. Asian selvittämiseksi suunniteltiin hyvät vertailutestit, joilla tutkittaisiin hiilidioksidi-, kosteus- ja lämpötila-anturien tarkkuutta ja asettumisaikoja. Kun oli tietoa anturien mittaustarkkuudesta, voitiin mennä tekemään kohdepäiväkotiin käytännön mittaukset ja havainnot.

### 6.1 Asettumisaika- ja tarkkuusmittaus laboratoriotilassa

Mittausten motiivina oli tutkia sensorien mittaasanturien tarkkuutta ja asettumisaikaa. Tarkastelun kohteena olivat lämpötila/kosteusanturit (THB ja THLR) sekä hiilidioksidianturit (CLR).

#### 6.1.1 Mittausolosuhteet

Mittaus tapahtui kaksiosaisena Tampereen ammattikorkeakoulun huoneessa E0-08, joka on pieni (alle 5 m<sup>2</sup>) suljettu tutkimustila. Ensin suoritettiin tarkkuusmittaukset ja myöhemmin asettumisaikamittaukset. Vertailumittarina toimi lämpötilalle ja ilmankosteudelle Vaisala HMI-41 -mittari ja hiilidioksidille Vaisala HM70. Vaisalan mittarit oli vasta kalibroitu ja ne yleisesti mielletään laadukkaiksi ja luotettaviksi. Asettumisaikamittauksissa ulkolämpötila oli +2 °C ja ilman suhteellinen kosteus 86 %. Arvot mitattiin Vaisalan HMI-41 -mittarilla.

#### 6.1.2 Tarkkuusmittaus

Mittaukseen otettiin viisi THB- ja kolme CLR-sensoria sekä yksi THLR-sensori. Sensorit laitettiin tutkimuhuoneen pöydälle lähemmäksi ja niiden viereen Vaisalan vertailumittarin

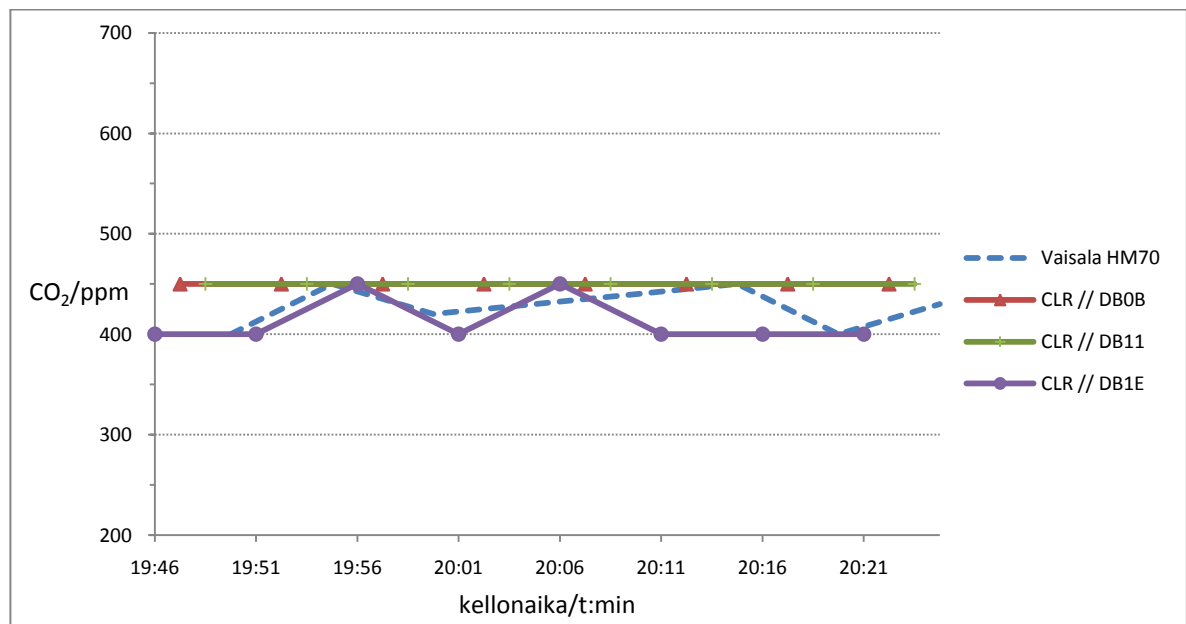
mittapää. Laitteiden annettiin asettua huoneessa noin kolme tuntia ennen mittausten aloittamista. Näytteenottoväli mittauksissa oli viisi minuuttia ja mittausten kesto 30-40 minuuttia. Tämä katsottiin riittäväksi tarkkuuden tutkimiseen lähes muuttumattomissa olosuhteissa.

### 6.1.3 Asettumisaika

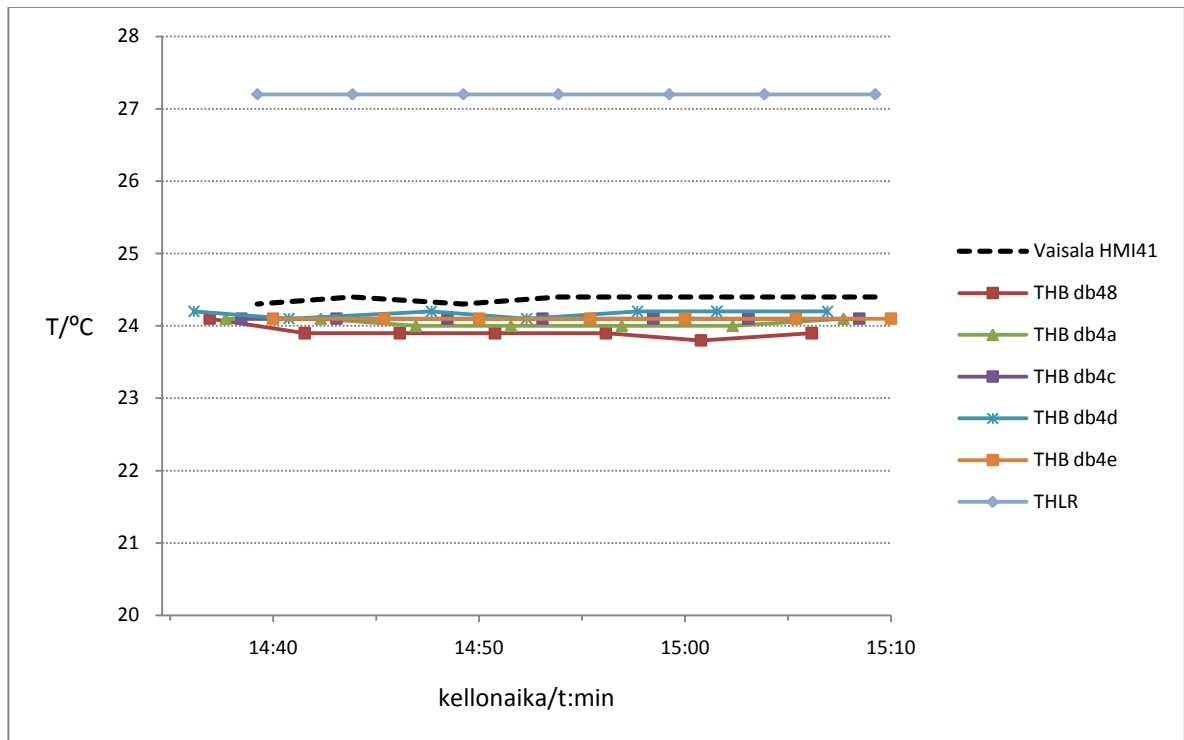
Asettumisaika tutkittiin viemällä kaksi THB-sensoria ulkoilmaan noin puoleksi tunniksi. Tämän jälkeen ne tuotiin nopeasti sisälle tutkimushuoneeseen ja alettiin seurata tulosten asettumista SeeMoto-palvelusta. Asettumisaika tässä työssä oli 95 % muutoksesta lähtöarvosta loppuarvoon (steady state –arvoon).

### 6.1.4 Tulokset

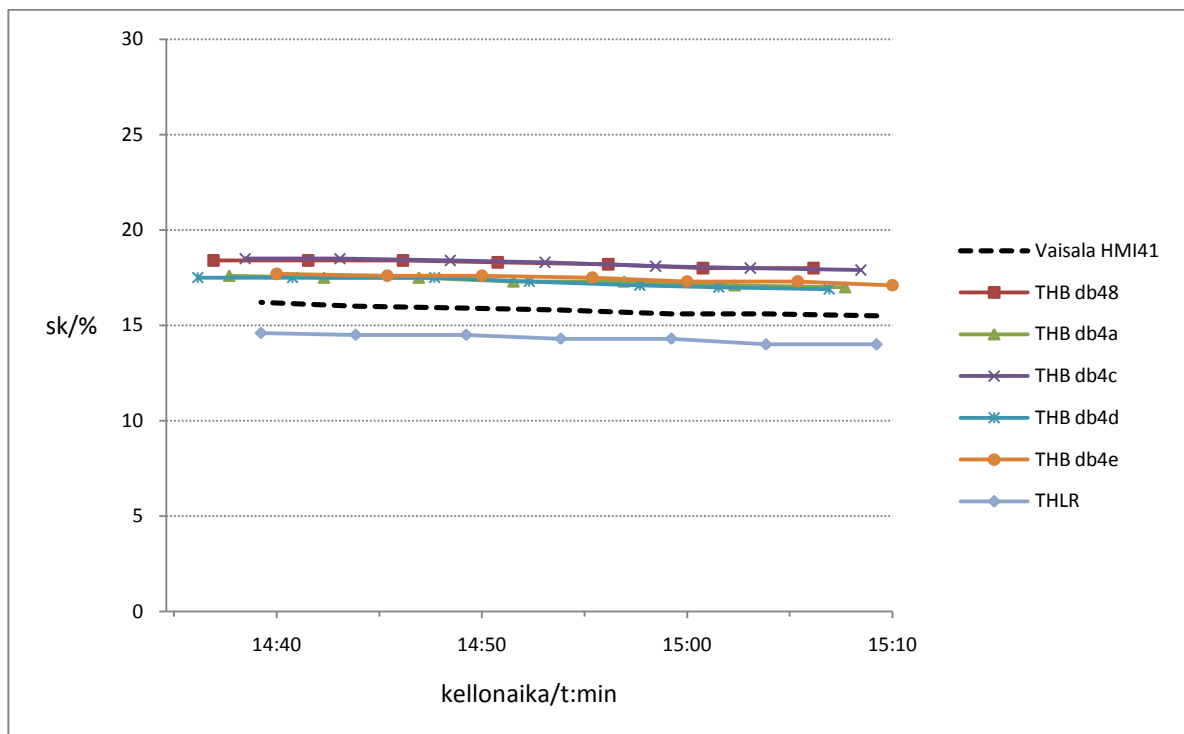
Hiilidioksidikuvaajat tarkkuudesta ovat kuvassa 13. Lämpötila- ja kosteuskuvaajat tarkkuusmittauksista näkyvät kuvissa 14 ja 15. Lämpötilan ja kosteuden asettumisajat ovat kuvissa 16 ja 17. Katkoviivalla kuvaajissa näkyy Vaisalan vertailumittarin antama tulos.



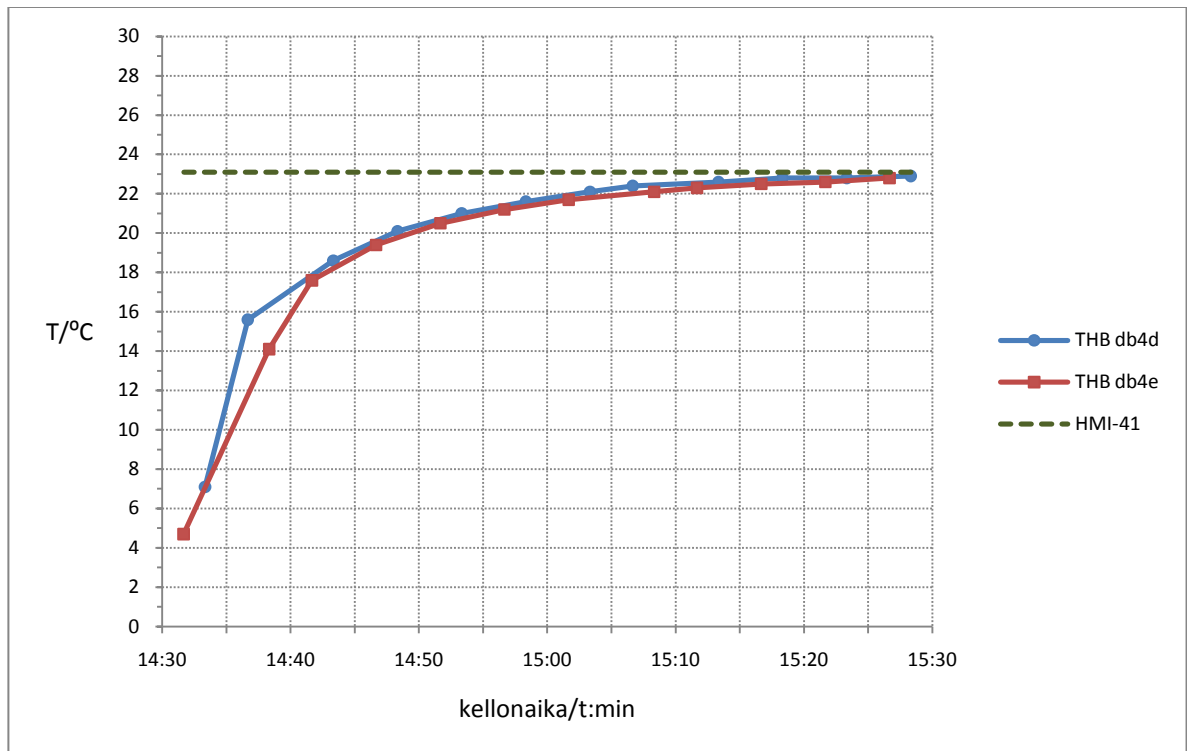
Kuva 13: Tarkkuusmittaukset, ilman hiilidioksidipitoisuus



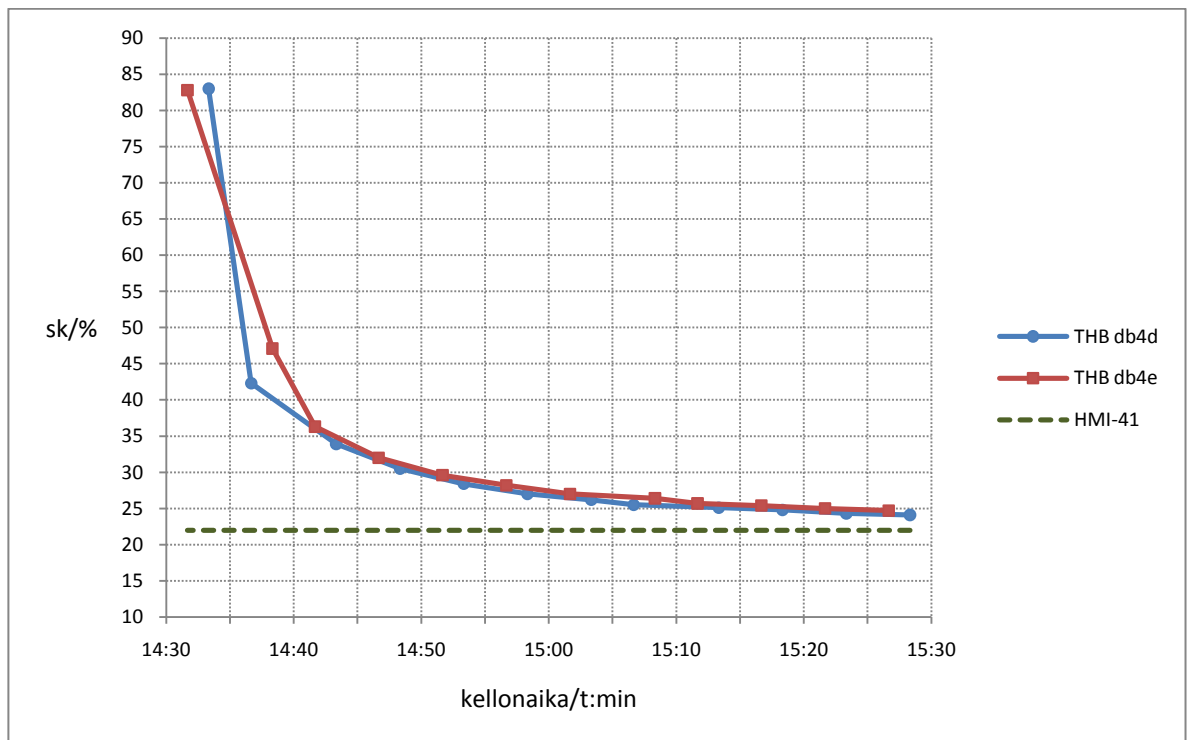
Kuva 14: Tarkkuusmittaukset, ilman lämpötila



Kuva 15: Tarkkuusmittaukset, ilman suhteellinen kosteus



Kuva 16: Lämpötilan asettumisaika, sisälämpötila (HMI-41) +23,1 °C



Kuva 17: Suhteellisen kosteuden asettumisaika, sisätilan s.k. (HMI-41) 22 %

### 6.1.5 Tulosten analysointi: tarkkuus

Tarkkuusmittauksissa merkittävin havainto oli, että THLR-anturin antamat tulokset poikkeavat selvästi sekä kosteuden että lämpötilan osalta THB-anturien antamista arvoista. Lisäksi THLR-lämpötilat olivat 2,5-3,0 °C Vaisalan vertailumittarin tuloksia korkeammat: virhe on sisälämpötiloista puhuttaessa merkittävä. Kosteusmittauksissa THLR:n tulokset poikkeavat Vaisalan arvoista noin 1,5 prosenttiyksikköä, joka on hyvä tarkkuus.

THB-anturien lämpötilan mittaustarkkuus oli hyvä. Tuloksissa oli korkeintaan 0,5 °C poikkeama vertailumittarin tuloksiin. Valmistajan ilmoittama virhemarginaali tässä lämpötilassa on  $\pm 0,4$  °C. Erot THB-anturien tulosten välillä ovat myös pienehköt: arvot ovat alle puolen asteen sisällä toisistaan.

THB-anturien tarkkuus kosteutta mitattaessa oli myös suhteellisen hyvä virheen ollessa korkeintaan +2,5 prosenttiyksikköä (valmistaja ilmoittaa virheeksi  $\pm 3,5$  yksikköä). THB-anturien tulosten väliset erot olivat alle prosenttiyksikön luokkaa, mikä on hyvä tulos.

Kuvasta 13 nähtiin, että CLR-hiilidioksidimittarien virhe oli alle  $\pm 50$  ppm, joka oli myös valmistajan niille lupaama tarkkuus. Kvantisointivirheen osuus tästä oli -24...+25 ppm. CLR-anturien tarkkuutta voi pitää hyvänä ja antureita luotettavina tämän opinnäytetyön tutkimustarkoituksiin.

### 6.1.6 Tulosten analysointi: asettumisajat

Asettumisajat (95 % askeleesta) THB-sensoreilla tuotaessa ne viileästä ja kosteasta ulkoilmasta sisälle olivat lämpötilalle noin 35 minuuttia ja kosteudelle noin 30 minuuttia. Asettumisaikakuvaajat käyttäytyivät samalla tavalla molemmilla testatutuilla sensoreilla, mikä oli hyvä asia. Asettumisajoista enemmän lisää seuraavassa kappaleessa.

## 6.2 Asettumisaika- ja tarkkuusmittaus olosuhdekaapissa

Mittausten tarkoitus oli selvittää lämpötila/kosteusanturien (THB ja THLR) tarkkuus ja asettumisajat suljetuissa ja kontrolloiduissa olosuhteissa. Tähän TAMK:n uusi 'sääkaappi' soveltui mainiosti.

### 6.2.1 Mittausolosuhteet

Mittaukset suoritettiin Especin corporationin valmistamassa PL-4KPH lämpö- ja kosteuskaapissa Tampereen ammattikorkeakoulussa. Kuvassa 18 näkyy kaappi ja sensorit aseteltuna sen sisälle. Kaapin ominaisarvot näkyvät taulukosta 3.



Kuva 18: Espec corp. PL-4KPH olosuhdekaappi

Taulukko 3: Olosuhdekaapin ominaisarvot

**PL-4KPH**

Lämpötila-alue	-40 ... +150 °C
Kosteusalue	20 ... 98 % s.k.
Lämpötilan virhemarginaali	± 0,3 °C (-40 ... +100 °C) ± 0,5 °C (> 100 °C)
Kosteuden virhemarginaali	± 2,5 % s.k.

**6.2.2 Toteutus**

Viisi THB-sensoria ja yksi THLR-reititinanturi laitettiin sisälle olosuhdekaappiin. Kalibroidun Vaisala HMI-41 -vertailumittarin mittauspää sekä THLR:n virtajohto työnnettiin kaapin sivusta olevasta syöttöaukosta sisälle. Raporttiin kirjattiin säännöllisin väliajoin mittauservot HMI-41:stä sekä sääkaapista. Sensorien antamat mittaustiedot tallennettiin SeeMoto-palvelimelta, kun mittaukset olivat ohi.

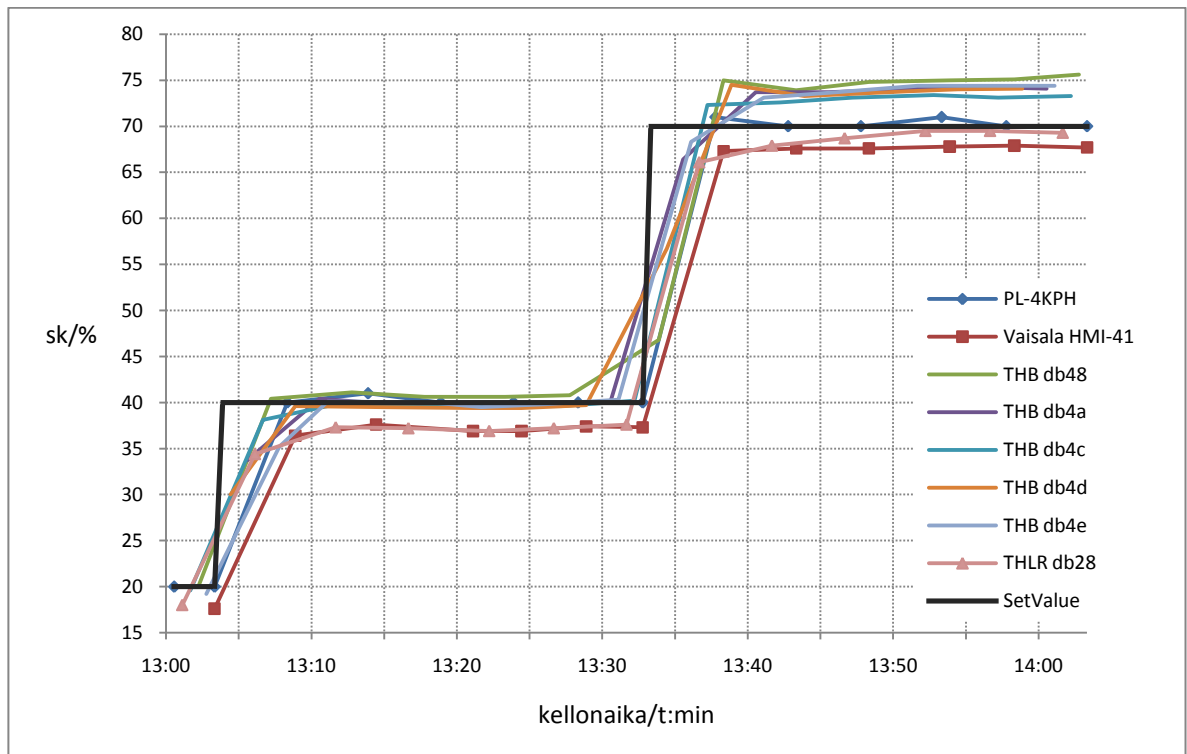
Kosteustesteissä kaapin lämpötila asetettiin vakioksi (+20 °C) ja suhteellisen kosteuden lähtöarvoksi 20 %. Sitten kaapin ilmankosteuden asetusarvoa (SetValue) muutettiin portaittain ensin 40 %:iin ja sitten 70 %:iin. Kun sensorit olivat saavuttaneet steady-state -tilan, siirryttiin seuraavalle 'portaalle' asetusarvossa.

Lämpötilatestissä kaapin suhteellinen ilmankosteus pidettiin vakiona (70 %) ja lämpötilan asetusarvo muutettiin +25 °C:een. Kun sensoreiden mittaamat arvot olivat vakiintuneet, testi lopetettiin.

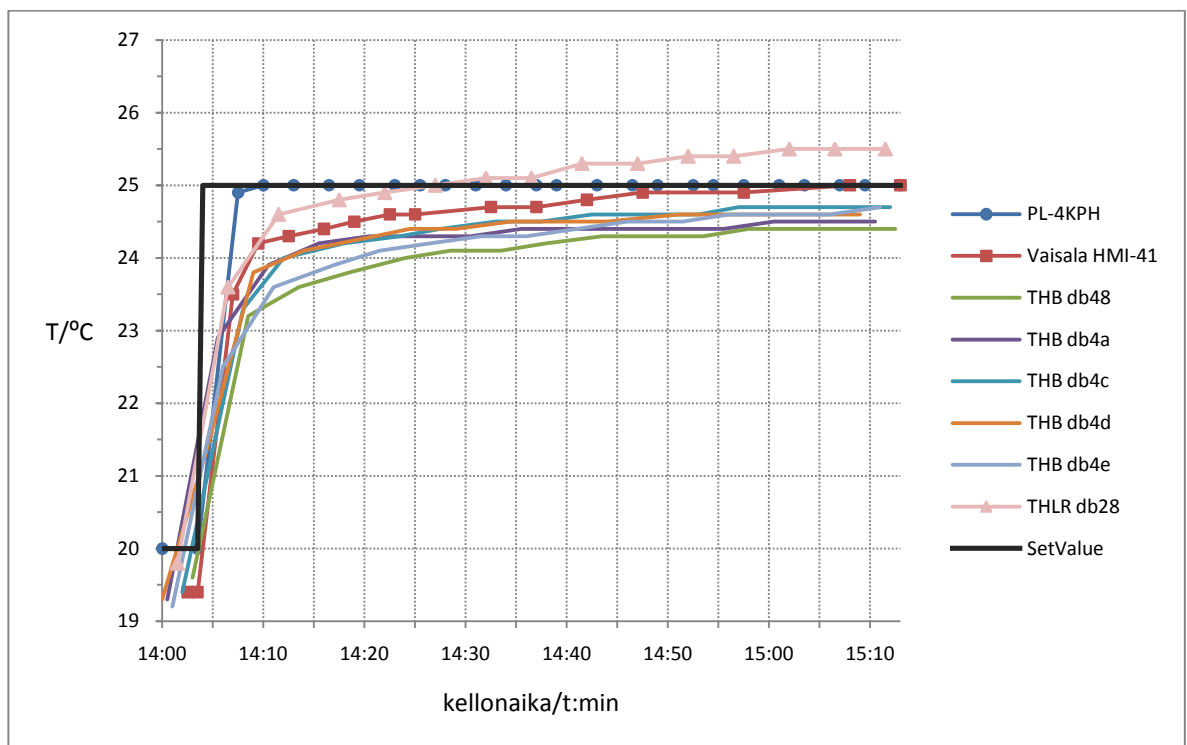
**6.2.3 Tulokset**

Kuvaajat kosteustestin asettumisajoista ovat kuvassa 19. Lämpötilatestin kuvaajat löytyvät kuvasta 20.





Kuva 19: Ilman suhteellisen kosteuden asettumisaika, kun lämpötila vakio (+20 °C)

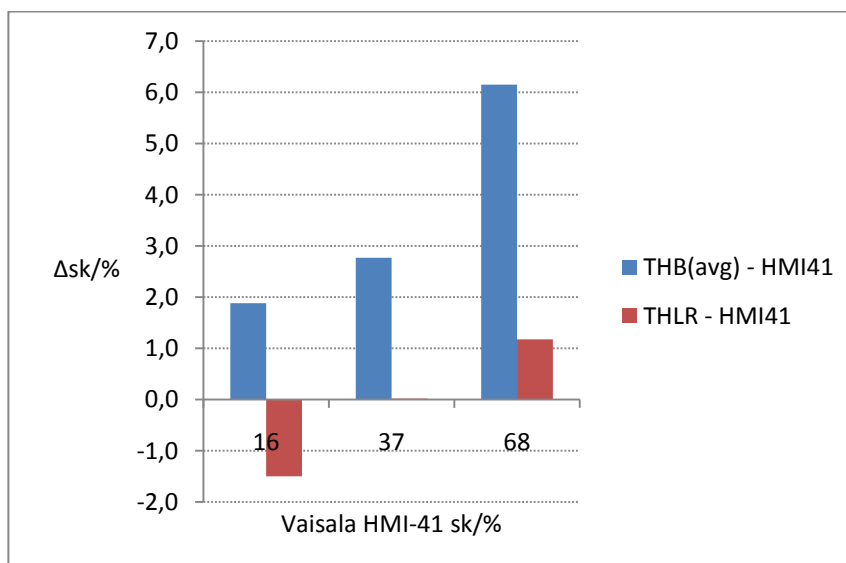


Kuva 20: Lämpötilan asettumisaika, kun suhteellinen ilmankosteus vakio (70 %)

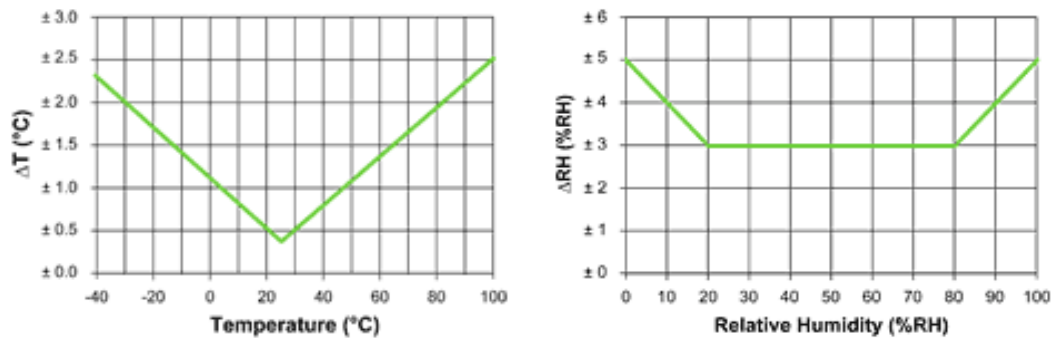
#### 6.2.4 Tulosten analysointi

Kuvasta 19 nähdään, että TH-sensorien kuvaajat ovat lähes yhdenmukaisia: kosteusanturien asettumissajat (95 % askeleesta) ovat lähes samoja ja hyvin samanlaisia kuin HMI-41 -mittarilla sekä olosuhdekaapilla. Ajat olivat kaikilla 5-10 minuutin luokkaa, ja THLR- sekä THB-sensorien kosteuden asettumisaikojen voidaan sanoa olevan hyvää tasoa,

Kosteuden steady-state -mittaustarkkuutta tarkastellessa huomattiin sama asia kuin laboratoriotilassa tehdyissä testeissä (kuva 15). THB-sensorien ilmoittama tulos oli korkeampi kuin vertailumittarin antama arvo. Lisäksi mittausvirhe kasvoi suhteellisen kosteuden kasvaessa. Se oli noin 2 prosenttiyksikköä 16 %:n kosteudessa ja 5-7 prosenttiyksikköä ilmankosteuden ollessa noin 68 %. THLR-anturi antoi tässäkin testissä THB-antureita pienempiä (3-5 prosenttiyksikköä) arvoja. Kuvassa 21 näkyvät kosteusanturien virheet eri kosteusolosuhteissa. Virheet laskettu kuvien 15 ja 19 tietojen pohjalta. Työssä tehtyjen tarkkuusmittausten perusteella valmistajan ilmoittama (kuva 22) kolmen prosenttiyksikön virhe kosteusantureille (20-80 % välillä) näyttää siis olevan yläpäästä hieman liian optimistinen.



Kuva 21: THB- ja THLR-kosteusantureille lasketut virheet eri kosteusolosuhteissa.



Kuva 22: Valmistajan ilmoittamat tarkkuudet sensoreille. Vasemmalla lämpötila ja oikealla suhteellinen ilmankosteus (*Sensirion AG*)

Lämpötilan asettumisaikoja (95 % askeleesta) tutkiessa nähdään, että lämpötila kesti huomattavasti kauemmin asettua kuin kosteus. Lähes kaikilta mittareilta tähän meni 25-30 minuuttia. Olosuhdekaapin mittari asettui selvästi nopeimmin (noin 10 minuuttia). Ajat olivat kaikilla testattavilla sensoreilla samaa tasoa HMI-41:n kanssa.

Lämpötilan mittaustarkkuudessa kaikki THB-sensorit olivat  $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ .n sisällä toisistaan ja suurin virhe oli  $-0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  vertailumittarin arvosta steady-state -tilassa. Virhe ei aivan pysy valmistajan ilmoittaman  $\pm 0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  (kuva 22) sisällä, mutta on kuitenkin pienekkö ja lähes identtinen aiemman alemmassa ilmankosteudessa tehdyn mittauksen kanssa (kuva 14). THLR-mittarin tulos näyttää selvästi paremmalta kuin aikaisemmassa E0-08 -laboratorion tarkkuustestissä, ja on nyt lähes valmistajan ilmoittamien rajojen sisällä. Suurempi kosteus näyttää vähentävän reititinanturin virhettä.

Eräs selitys THLR-anturin selvästi muista antureista poikkeaviin mittaustuloksiin saattaa olla, että laitteen kiinteän virtalähteen liitin lämmittää ja kuivattaa ilmaa mittaussanturin välittömästä läheisyydestä. Ratkaisu tähän voisi olla mittaussanturin parempi sijoittaminen tai virtaliittimen eristäminen. Virhe voitaisiin myös ottaa huomioon tehtaalla kalibroitaessa reititinantureita. Saattaa myös olla, että kyseinen anturi on väärin kalibroitu tai huono yksilö. Yhden THLR:n tulosten perusteella ei kuitenkaan vielä voi tehdä kovin suuria johtopäätöksiä ennen kuin testattaisiin suurempi otos TH-reititinantureita samoissa olosuhteissa.

Testeistä huomattiin myös, että olosuhdekaapin oma mittausanturi antoi kosteudesta hieman virheellisiä tuloksia. Ne olivat kuitenkin tehtaan ilmoittamien rajojen sisällä.

## **6.3 Päiväkotimittaukset**

Koska opinnäytetyö tehtiin TAMKIn päiväkotiprojektille, olennainen osa työstä oli suunnitella ja rakentaa verkko itse päiväkotiin. Tulosten ja havaintojen perusteella voitiin sitten arvioida sensoriverkon soveltuvuutta ilmanlaatumittauksiin päiväkodeissa ja vastaavissa sisätiloissa.

### **6.3.1 Mittausolosuhteet**

Tampereelta löytyi ilmanlaatuprojektin parista päiväkoti, joka oli hyvä testiympäristö sensoriverkolle. Päiväkoti oli suhteellisen suuri, huoneet matalia sekä pieniä ja niitä oli runsaasti. Lisäksi rakennuksessa oli runsaasti tiiliseiniä kantavina rakenteina (kuva 23), minkä oletettiin heikentävän sensorien kantomatkaa.

Mittaukset suoritettiin 5.11.2010 klo 10-16 välisenä aikana. Ulkoilman lämpötila oli noin +5 °C. Päiväkodissa oli normaali määrä lapsia ja työntekijöitä, joten hiilidioksidimittaukset antoivat realistisia lukuja.



Kuva 23: päiväkodin käytävä

### 6.3.2 Toteutus

Mittauksia aloitettaessa koordinaattorin (ZC) paikka valittiin suhteellisen keskeltä rakennusta ja kytkettiin verkkovirtaan. Tämän jälkeen viisi kappaletta THB-päätelaitteita vietiin ennalta suunniteltuihin pisteisiin ympäri päiväkotia, minkä jälkeen niihin asetettiin paristot paikoilleen nopeamman yhteyden saamiseksi. Mukana olleet THLR ja CLR – reitittimet jätettiin vielä toistaiseksi käyttämättä. Kuvasta 24 nähdään päätelaitteiden (vihreä kolmio), reitittimien (sininen ympyrä) sekä gateway-koordinaattorin (punainen tähti) lopulliset sijoituspaikat sekä etäisyydet. Mittaustiedon seuraamiseksi SeeMoto-palvelusta mukana oli kannettava tietokone, jossa oli langaton verkkoyhteys.



Kuva 24: päiväkodin sensoriverkon laitteiden sijainnit

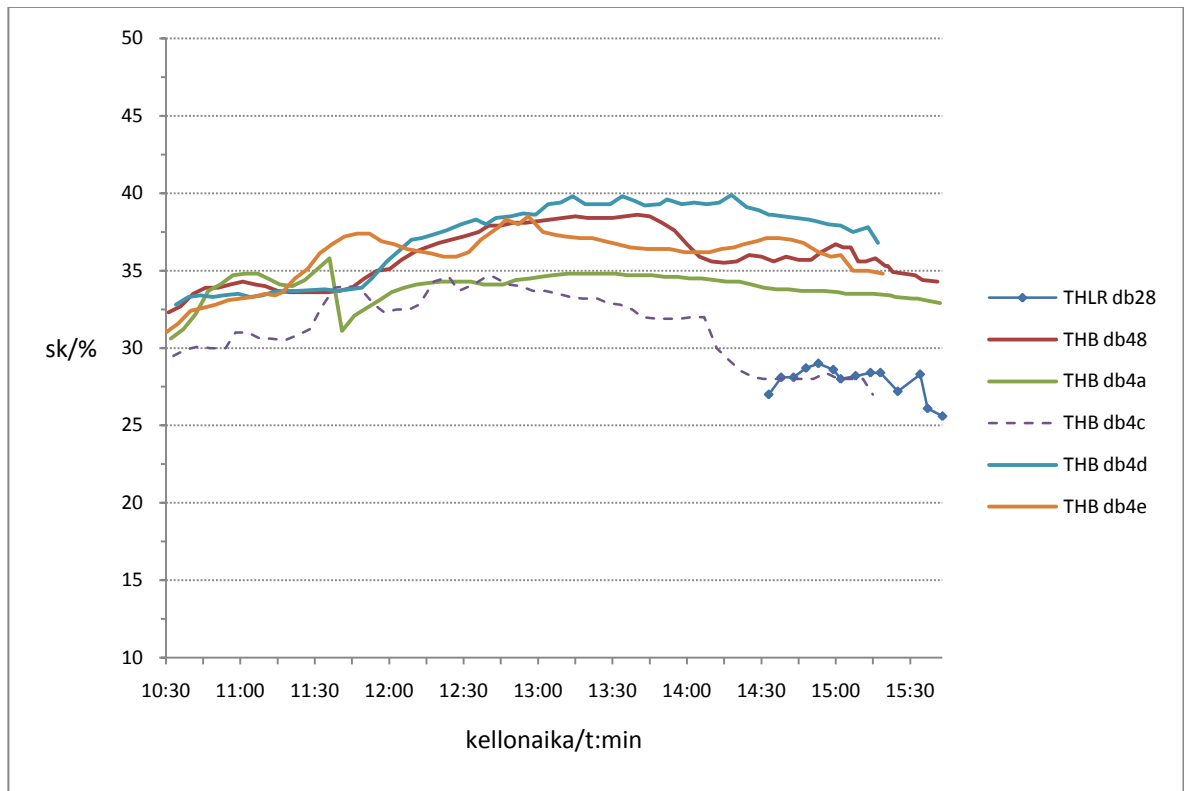
Reilun puolen tunnin kuluttua aloituksesta havaittiin, että kauimmat THB-sensorit db48, db4a ja db4e eivät ole saaneet yhteyttä koordinaattoriin. Lähimmät THB-anturit db4c sekä db4d toimivat hyvin. Niinpä alkuperäistä tähtiverkkoa laajennettiin puuverkoksi sijoittamalla CLR-reititinanturi kuvasta 24 nähtävälle paikalle. Tämän jälkeen db4e-anturin mittaustietoja alkoikin päivittyä SeeMoton palvelunäkymään.

Parin tunnin kuluttua aloituksesta THB db4a sai hetkeksi yhteyden ja lähetti dataa, mutta hävisi pian taas sleep-tilaan kuuluvuuden ollessa ilmeisesti liian heikko.

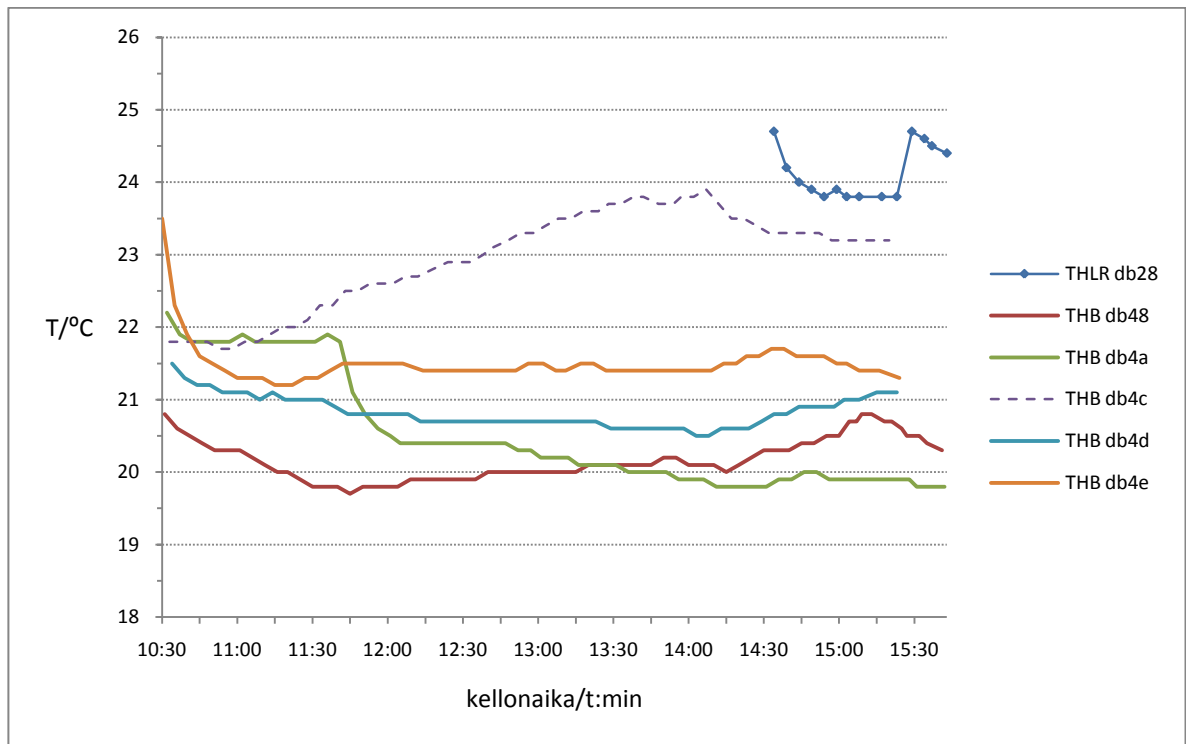
Neljän tunnin kuluttua oli käynyt selväksi, ettei THB db48- ja THB db4a -sensorien kuuluvuus riittänyt niissä olosuhteissa. Näin ollen lisättiin THLR-laite näille reitittimeksi, minkä jälkeen molemmat päätelaitteet saivatkin yhteyden koordinaattoriin ja alkoivat lähettää aikaisemmin tallentamaansa dataa palvelimelle. Näin ollen koko päiväkotiti saatiin katettua kahden reitittimen puuverkolla.

### 6.3.3 Tulokset

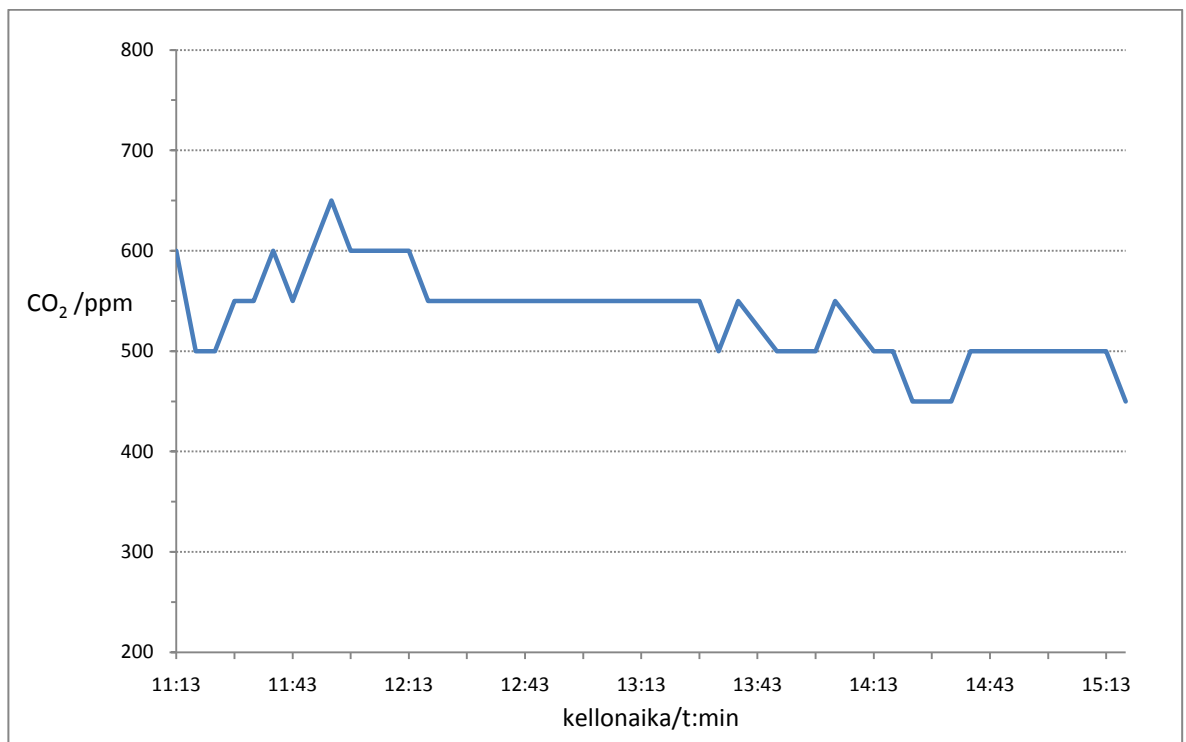
Kosteus-, lämpötila- ja hiilidioksidikuvaajat mittauksista ovat esitettyinä kuvissa 25-27.



Kuva 25: päiväkotimittaukset, suhteellinen ilmankosteus



Kuva 26: päiväkotimittaukset, lämpötila



Kuva 27: päiväkotimittaukset, hiilidioksidipitoisuus



#### 6.3.4 Tulosten analysointi

Kosteus- ja lämpötilakuvaajista erottui THB db4c (esitetty katkoviivalla), joka oli sijoitettu henkilökunnan taukotilaan. Lämpötilan nousu oli seurausta keskipäivän ruokatauosta sekä iltapäivän kokouksesta sekä kahvitausta, joiden aikana pienessä huoneessa oli runsaasti ihmisiä. Myös ilmankosteus laski selvästi iltapäivän aikana: 35 %:sta 28 %:iin.

Muut THB-sensorit oli sijoitettu lasten nukkuma- tai oleskelutiloihin. Näissä käyrissä ei ollut huomattavia eroja suuruuksissa tai isoja muutoksia päivän kuluessa. Ennen kello 11:tä kuvaajissa näkyy pientä asettumista, kun mittaukset oli juuri aloitettu.

THLR-sensori oli sijoitettu käytävälle katonrajaan. Sen hieman THB-sensoreita korkeampi lämpötila näytti johdonmukaiselta edellisiin testeihin nähden näissä olosuhteissa.

Vaikkakin sijoituspaikka oli eri kuin muilla sensoreilla, niin silti on todennäköistä olettaa parin Celsiusasteen virhe THLR-lämpötiloissa. Sijoituspaikan vieressä ei ollut tuuletusta, lämpöpatteria tai muuta ilmeistä syytä, joka olisi aiheuttanut muita korkeamman lämpötilan.

CLR-mittari sijaitsi käytävällä suhteellisen vilkkaalla kulkureitillä mittaamassa ilman hiilidioksidipitoisuutta. Keskimäärin ilman hiilidioksidipitoisuus oli 500-600 ppm. Kuvasta 27 näkyy selvästi laskeva trendi iltapäivällä, mikä johtunee vähentyneestä käytävällä liikkumisesta, kun lapset olivat päiväunilla ja henkilökunta taukotilassa. Puoli kolmen jälkeen lapsia ja henkilökuntaa lähti viikonlopun viettoon, mistä johtui laskun jatkuminen.

## 7 Yhteenveto

Opinnäytetyön tavoite oli tutustua ZigBee-sensoriverkkoon ja selvittää sen käyttökelpoisuus päiväkotien ilmanlaatututkimuksessa.

Työssä tehtyjen mittausten ja niistä saatujen kokemusten perusteella ZigBee:n voi sanoa sopivan sisäilmanlaatututkimukseen hyvin. Laitteet toimivat luotettavasti pitkiäkin seurantajaksoja ja niitä voi valvoa mistä käsin tahansa www-selaimen välityksellä. Ne ovat pienikokoisia, edullisia, ja niiden kantomatka sekä kuuluvuus on hyvä suurissa rakennuksissa. Lisäksi verkko on helppo rakentaa uuteen ympäristöön ja jättää sinne tekemään mittauksia ilman valvontaa.

Ennen kaikkea mittausanturien tarkkuus ja toiminta-alue osoittautui riittävän hyväksi projektiin. Yleisesti lämpötila-, kosteus- ja CO<sub>2</sub>-anturien antamat tulokset pysyivät hyvin Vaisalan vertailumittarin tulosten tasolla. Vasta ilmakehän kosteuden oltua todella korkea (yli 65 % s.k.), kosteusantureiden tarkkuus oli tippunut lähinnä suuntaa antavan tasolle.

Mahdollisia jatkotutkimuksia mietittäessä tutkimuksen kohteena voisi olla: tulosten vertailu eri valmistajan laitteilla tehtyihin testeihin sekä kattavampi TH-reititinanturien tarkkuuden testaus. Myös käyttöliittymän mobiilisovellus, jolla mittaustietoja voitaisiin seurata, olisi käytännöllinen verkkoa asennettaessa.

Opinnäytetyön aihe tuntui jo työn saantihetkestä asti mielenkiintoiselta tutkimuskohteelta ja osoittautui sellaiseksi työn edistyessä. Aihe oli käytännönläheinen, ajankohtainen, sisälsi uutta opittavaa sekä lähti konkreettisesta tarpeesta. Lisäksi se täytti hyvin opinnäytetöille asetetut tavoitteet. Vaikka työ oli suhteellisen työläs tiukan aikataulun vuoksi, eikä kaikki aina mennyt niin kuin toivoi, maaliin kuitenkin selvittiin voittajana.

## Lähteet

- IEEE Computer Society 2006. IEEE Std 802.15.4-2006: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs).* [pdf] ISBN 0-7381-4997-7.
- Jennic. ZigBee e-learning course.* [www] [viitattu 1.11.2010].  
<http://www.jennic.com/elearning/zigbee/index.htm>
- Kinney, Patrick 2003. ZigBee technology: Wireless control that simply works.* [online] [viitattu 1.11.2010]. <http://www.zigbee.org/LearnMore/WhitePapers.aspx>
- MeshWorks Wireless Oy.* [www] [viitattu 1.11.2010]. <http://www.meshworkswireless.com/>
- Rantala, Jyri 2006-07. Sensoriverkot älykkäissä ympäristöissä.* [pdf].  
[http://www.ele.tut.fi/teaching/ele-7100/vuosi06-07/harjoitustyot/Rantala\\_Sensoriverkot.pdf](http://www.ele.tut.fi/teaching/ele-7100/vuosi06-07/harjoitustyot/Rantala_Sensoriverkot.pdf)
- Sassi, Ari 2009. Diplomityö: ZigBee-teknologia ja sen oppilaitoskäyttöön tähtäävät sovellukset.* [pdf]. <http://lib.tkk.fi/Dipl/2009/urn100112.pdf>
- Savikoski, Teemu 2010. Opinnäytetyö: Etäisyyden mittaus signaalin kulkuuikaan perustuvalla menetelmällä WPAN-verkossa.* Oulu: Oulun seudun ammattikorkeakoulu.
- SeeMoto.* [www] [viitattu 1.11.2010]. <http://seemoto.com/fi/tutustu>
- Sensirion AG. Humidity sensor SHT11.* [www] [viitattu 1.11.2010].  
[http://www.sensirion.com/en/01\\_humidity\\_sensors/02\\_humidity\\_sensor\\_sht11.htm](http://www.sensirion.com/en/01_humidity_sensors/02_humidity_sensor_sht11.htm)
- Vuorela, Henri 2010. Opinnäytetyö: ZigBee-sensoriverkon käyttöliittymä.* Tampere: Tampereen ammattikorkeakoulu.
- Wikipedia. ZigBee.* [www] [viitattu 1.11.2010]. <http://fi.wikipedia.org/wiki/Zigbee>
- Wikipedia(en). Waggle dance.* [www] [viitattu 1.11.2010].  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Waggle\\_dance](http://en.wikipedia.org/wiki/Waggle_dance)
- Wikipedia(en). Wireless sensor network.* [www] [viitattu 1.11.2010].  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Wireless\\_sensor\\_network](http://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_sensor_network)
- Wikipedia(en). ZigBee.* [www] [viitattu 1.11.2010]. <http://en.wikipedia.org/wiki/ZigBee>
- ZigBee Alliance.* [www] [viitattu 1.11.2010]. <http://www.zigbee.org/>