

Eerik Meriö

Tuulimittausten epävarmuuskartoitus

Sähkötekniikan koulutusohjelma

2015

TUULIMITTAUSTEN EPÄVARMUUSKARTOITUS

Meriö Eerik
Satakunnan ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikan koulutusohjelma
huhtikuu 2015
Ohjaaja: Pulkkinen Petteri
Sivumäärä: 40
Liitteitä: -

Asiasanat: epävarmuus, tuulimittaus, epävarmuustekijä

Opinnäytetyö tehtiin Pori Energia Oy:lle. Työn tarkoituksena oli kartoittaa tuulimittauksiin vaikuttavat mittausepävarmuudet. Mittausten luotettavuutta tutkittiin niihin vaikuttavien ilmiöiden ja esimerkkitapausten kautta.

Työssä keskityttiin Pori Energia Oy:n käyttämiin mittausmenetelmiin, joita ovat kuppi- ja äänianemometrit. Mittalaitteistojen valinnassa ja asennuksissa noudatetaan standardia IEC 61400-12-1.

Työn tarkoituksena oli kehittää materiaali pohjaksi työkalulle, jonka avulla mittaukseen liittyvät epävarmuudet ja epävarmuustekijät voidaan helposti määrittää. Tuulimittausten tavoitteena on tuulivoimatuotannon kannattavuuden ennustaminen.

UNCERTAINTY SURVEY OF WIND SPEED MEASUREMENTS

Meriö Eerik

Satakunnan ammattikorkeakoulu, Satakunta University of Applied Sciences

Degree Programme in electrical engineering

April 2015

Supervisor: Pulkkinen Petteri

Number of pages: 40

Appendices: -

Keywords: uncertainties, wind speed measurement, uncertainty components

This thesis was made for Pori Energia Oy. The purpose of this work was to study wind speed measurements affected by measurement uncertainties. Reliability of the measurements was investigated by studying the phenomena affecting them and by using examples of the cases through.

The focus of the study were the wind speed measuring methods used by Pori Energia Oy. These methods are cup- and sound anemometres. The choosing and installation of the forementioned measuring devices is done according to standard IEC 61400-12-1.

The purpose of the study was to develop a tool that could easily specify the uncertainties and uncertainty components related to the measuring. The goal of wind speed measurements is to provide a reliable prediction of the cost effectiveness of wind power production.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	5
2	TEOREETTINEN PERUSTA	6
2.1	Yleistä	6
2.2	Epävarmuuksien kartoituksen teoreettinen perusta bin-metodilla.....	7
3	LAAJENNETTU EPÄVARMUUS	11
4	ESIMERKKITAPAUKSET	12
4.1	Teoreettinen esimerkki.....	12
4.2	Käytännön esimerkki	22
4.2.1	Virtalähteiden ja häiriöiden analysointi.....	22
4.2.2	Tuulenopeuden epävarmuustekijät.....	22
4.2.3	Tuulensuunnan epävarmuustekijät	23
4.2.4	SODAR-mittaukset.....	24
5	KATEGORIAN A EPÄVARMUUDET.....	26
5.1	Sähkötehon epävarmuudet.....	26
5.2	Ilmaston vaikutukset epävarmuuteen.....	28
6	KATEGORIAN B EPÄVARMUUDET	29
6.1	Yleistä	29
6.2	Tiedonkeruujärjestelmän epävarmuudet.....	29
6.3	Sähkötehon mittauksen epävarmuudet	30
6.4	Tuulen nopeuden mittauksesta johtuvat epävarmuudet.....	32
6.5	Ilman tiheyden mittauksesta johtuvat epävarmuudet.....	35
6.6	Kategorian B yhdistetyt epävarmuudet.....	37
6.7	Yhdistetty vakioepävarmuus – tehokäyrä.....	38
6.8	Yhdistetty vakioepävarmuus – energiantuotanto.....	38
7	YHTEENVETO	39
	LÄHTEET.....	40
	LIITTEET	

1 JOHDANTO

Ennen investointipäätöstä on tehtävä alueella vuoden - kahden vuoden mittaiset tuulimittaukset, joilla varmistetaan alueen tuuliolosuhteet, keskituulennopeus, turbulentsisuus, jne. Mittaus on tehtävä tuulivoimalan suunnitellulta napakorkeudelta tai vähintään $\frac{3}{4}$ suhteessa napakorkeuteen. Mittausjakson tuloksia on jakson pituudesta riippumatta aina syytä verrata lähimmillä sääasemilla samalla jaksolla mitattuihin tuulennopeuksiin ja kyseisen sääasemien pitkän aikavälin keskiarvoihin, jotta eri vuosien väliset erot saataisiin eliminoitua. (Tuulivoimayhdistyksen [www-sivut](#))

Tämä työ käsittelee vaatimuksia epävarmuuksien määrittämiseksi energiatuotannon tuulimittauksissa. Työn standardisidonnaisuudesta johtuen työ koostuu suurelta osalta käsitellyn standardin sisällöstä (kappaleet 2 – 6).

Pori Energian toiminta-ajatuksena on toimittaa energiaa ja energia-alan ratkaisuja yksilön ja yhteiskunnan kehittyviin tarpeisiin. Yritys panostaa erityisesti tulevaisuuden uusiin ja kestäviin energiaratkaisuihin. Se tarjoaa muun toimintansa lisäksi kokonaisvaltaisia tuulivoimapalveluita. Tuulivoiman palveluportfolio sisältää seuraavat osa-alueet (Pori Energian [www-sivut](#)):

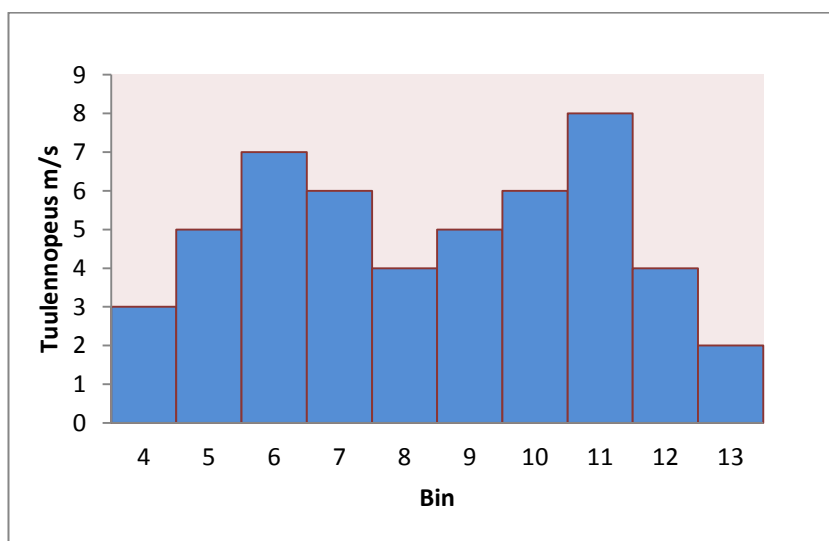
- tuulivoiman hankepalvelut
- tuulimittaukset ja tuulianalyysit
- tähköverkon suunnittelu ja rakentaminen
- tuulivoimalaitosten pystytykset
- käynnissäpito
- ennakkohuollot
- voimalaitosvalvonta.

2 TEOREETTINEN PERUSTA

2.1 Yleistä

Teoreettisena perustana epävarmuuksien määrittämisessä ja arvioinnissa käytetään bin-metodia. Tällä tarkoitetaan mittausdatan supistusmenetelmää, jossa tietyltä parametriltä saadut tulokset jaetaan tuulennopeusajanjaksoihin (bineihin). (IEC 61400-12-1:2005(E).)

Bin-metodin avulla mittausdata tietyltä ajanjaksolta voidaan esittää helpommin ymmärrettävän histogrammin muodossa:



Kuva 1. Histogrammi tuulennopeudesta tietyllä ajanjaksolla

Mittauksista saatu tehokäyrä tulisi täydentää mittauksen arvioidulla epävarmuudella. On olemassa kahden tyyppisiä epävarmuuksia: kategoria A ja B. Kategoria A on suure, joka voidaan päätellä mittauksista, ja kategoria B:ssä ovat suureet, jotka voidaan arvioida muilla tavoin. Molemmissa kategorioissa epävarmuutta ilmaistaan keskihajontana. (IEC 61400-12-1:2005(E).)

a) Mitattavat suureet:

Mitattava suure on mitattujen ja normalisoitujen bin-arvojen avulla määritetty tehokäyrä. Bin-arvot muodostuvat sähkötehosta ja tuulen nopeudesta sekä vuosittaisesta tuotantoarviosta (Annual Estimated Production, *AEP*). Mittausten epävarmuudet huomioidaan aiheuttava tekijä kerrallaan. (IEC 61400-12-1:2005(E).)

b) Epävarmuutta aiheuttavat tekijät:

Taulukossa 1 on lueteltu epävarmuustekijät, jotka tulee vähintään ottaa huomioon epävarmuusanalyysissä. (IEC 61400-12-1:2005(E).)

Taulukko 1. Epävarmuustekijäluettelo (IEC 61400-12-1:2005(E).)

Mitattu parametri	Epävarmuuskomponentti	Epävarmuuskategoria
Sähköteho	Virtamuuntajat	B
	Jännitemuuntajat	B
	Tehomuuntaja tai tehon mittausväline	B
	Tiedonkeruujärjestelmä	B
	Sähkötehon vaihtelevuus	A
Tuulenoisuus	Anemometrien kalibrointi	B
	Toiminnalliset ominaisuudet	B
	Asennuksen vaikutukset	B
	Tiedonkeruujärjestelmä	B
	Maastosta johtuva virtausvääristymä	B
Ilman lämpötila	Lämpötila-anturi	B
	Säteilysuojaus	B
	Asennuksen vaikutus	B
	Tiedonkeruujärjestelmä	B
Ilmanpaine	Ilmanpaineanturi	B
	Asennuksen vaikutukset	B
	Tiedonkeruujärjestelmä	B
Tiedonkeruujärjestelmä	Signaalin muuntaminen	B
	Järjestelmän tarkkuus	B
	Signaalin muokkaus	B

2.2 Epävarmuuksien kartoituksen teoreettinen perusta bin-metodilla

Tässä yleisimmässä muodossa yhdistetty tehon vakioepävarmuus binissä i, u voidaan ilmaista seuraavalla kaavalla (IEC 61400-12-1:2005(E).):

$$u_{C,i}^2 = \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^M c_{k,i} u_{k,i} c_{l,i} u_{l,i} \rho_{k,l,i,j}$$

Kuva 2. Kaava D.1 (IEC 61400-12-1:2005(E).)

missä:

$c_{k,i}$ on komponentin k herkkyystekijä binissä i .

$u_{k,i}$ on komponentin k vakioepävarmuus binissä i .

M on epävarmuuskomponenttien määrä jokaista biniä kohden.

$\rho_{k,l,i,j}$ on korrelaatiokerroin komponenttien k binissä i ja l binissä j välillä (lausekkeessa komponentit k ja l ovat molemmat binissä i).

Epävarmuuskomponentti on yksilöllinen vaikutus jokaiseen mitatun parametrin epävarmuuteen. Yhdistetty vakioepävarmuus arvioidussa vuotuisessa energian tuotannossa u_{AEP} voidaan ilmaista yleisimmässä muodossaan seuraavasti (IEC 61400-12-1:2005(E).):

$$u_{AEP}^2 = N_h^2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^M f_i c_{k,i} u_{k,i} f_j c_{l,j} u_{l,j} \rho_{k,l,i,j}$$

Kuva 3. Kaava D.2 (IEC 61400-12-1:2005(E).)

missä:

f_i suhteellinen tuulen nopeuden esiintyminen välillä V_{i-1} ja V_i : $F(V_i) - F(V_{i-1})$ binissä i

$F(V)$ Rayleigh'n todennäköisyysjakauman kertymäfunktio tuulen nopeudelle

N binien määrä

N_h tunteja vuodessa ≈ 8760

Harvoin on mahdollista päätellä arvoja kaikille korrelaatiokerroimille $\rho_{k,l,i,j}$. Yleensä myös merkittävät yksinkertaistukset ovat tarpeen. Jotta edellä mainitut yhdistetyn epävarmuuden periaatteet toteutuisivat, tulee ne yksinkertaistaa käytännön tasolle. Voidaan tehdä seuraavat oletukset:

Epävarmuuskomponentit ovat joko täysin korreloituja ($\rho = 1$, joka tarkoittaa lineaarista summausta yhdistetyn mittausepävarmuuden saamiseksi) tai itsenäisiä (ρ

= 0, joka tarkoittaa asteittaista summausta). Yhdistetty vakioepävarmuus saadaan sijoittamalla summatut epävarmuuskomponentit neliöjuureen.

Kaikki A-kategorian epävarmuustekijät ovat keskenään riippumattomia. Myös kategorioiden A ja B epävarmuustekijät ovat riippumattomia keskenään, kun kategorian B epävarmuustekijät ovat keskenään täysin korreloituja. Nämä säännöt pätevät, vaikka tekijät olisivat samasta binistä. (IEC 61400-12-1:2005(E).)

Käyttäen edellä mainittuja oletuksia, voidaan yhdistetty epävarmuus binin $u_{c,i}$ tehosta määrittää kaavalla:

$$u_{c,i}^2 = \sum_{k=1}^{M_A} c_{k,i}^2 s_{k,i}^2 + \sum_{k=1}^{M_B} c_{k,i}^2 u_{k,i}^2 = s_i^2 + u_i^2$$

Kuva 4. Kaava D.3 (IEC 61400-12-1:2005(E).)

missä:

M_A kategorian A epävarmuustekijöiden määrä

M_B kategorian B epävarmuustekijöiden määrä

$s_{k,i}$ kategorian A vakioepävarmuustekijä k binissä i

s_i kategorian A yhdistetyt epävarmuudet binissä i

u_i kategorian B yhdistetyt epävarmuudet binissä i

Pitää huomioida, että $u_{c,i}^2$ ei ole riippumaton binin koosta, koska $s_{\rho,i}$ on riippuvainen tietokokonaisuuksien määrästä binissä. (Katso kaava D.10) (IEC 61400-12-1:2005(E).)

Oletukset merkitsevät sitä, että yhdistetty vakioepävarmuus energian tuotannossa u_{AEP} saadaan seuraavalla kaavalla:

$$u_{AEP}^2 = N_h^2 \sum_{i=1}^N f_i^2 \sum_{k=1}^{M_A} c_{k,i}^2 s_{k,i}^2 + N_h^2 \sum_{k=1}^{M_B} \left(\sum_{i=1}^N f_i c_{k,i} u_{k,i} \right)^2$$

Kuva 5. Kaava D.4 (IEC 61400-12-1:2005(E).)

Toisen oletuksen merkitys tässä kaavassa on se, että jokaisen yksittäisen luokan B epävarmuustekijä etenee vastaavaksi AEP-epävarmuudeksi soveltamalla olettamusta täydellisestä korrelaatiosta binien välillä aina yksittäisiin tekijöihin. (IEC 61400-12-1:2005(E).)

Käytännössä ei ole välttämättä järkevää summata kategorian B epävarmuustekijöitä binien välillä, ennen kun ne ovat yksilöittäin yhdistetty. Sallimalla arvio kategorian B epävarmuustekijöiden yhdistäminen binien kanssa, ennen kun ne on yhdistetty binien välillä, syntyy käytännöllisempi ilmaisu:

$$u_{AEP}^2 = N_h^2 \sum_{i=1}^N f_i^2 \sum_{k=1}^{M_A} c_{k,i}^2 s_{k,i}^2 + N_h^2 \left(\sum_{i=1}^N f_i \sqrt{\sum_{k=1}^{M_B} c_{k,i}^2 u_{k,i}^2} \right)^2 =$$

$$N_h^2 \sum_{i=1}^N f_i^2 s_i^2 + N_h^2 \left(\sum_{i=1}^N f_i u_i \right)^2$$

Kuva 6. Kaava D.5 (IEC 61400-12-1:2005(E).)

Tällä kaavalla saatu u_{AEP} on aina yhtä suuri tai suurempi kuin kaavalla (E.4) saatu tulos. (IEC 61400-12-1:2005(E).)

3 LAAJENNETTU EPÄVARMUUS

Tehokäyrän ja *AEP*:n yhdistetyt vakioepävarmuudet voidaan lisäksi määrittää ns. laajennettuina epävarmuuksina. Olettamalla normaalijakaumat saadaan aikavälille luotettavuustasot taulukon 2 mukaan. Tasot voidaan määrittää kertomalla yhteen vakioepävarmuudet kattavuuskertoimilla. (IEC 61400-12-1:2005(E).)

Taulukko 2. Luotettavuustasotaulukko (IEC 61400-12-1:2005(E).)

Luotettavuustaso %	Kattavuuskerroin
68,27	1
90	1,645
95	1,960
95,45	2
99	2,576
99,73	3

4 ESIMERKKITAPAUKSET

4.1 Teoreettinen esimerkki

Seuraavassa esimerkissä arvioidaan kategorioiden A ja B epävarmuustekijöiden vaikutusta mitattuun tehokäyrään bin kerrallaan. Tehokäyrän epävarmuuden määrittelyksen jälkeen arvioidaan AEP:n epävarmuus.

Käyttämällä kategorian B epävarmuustekijöitä kaavan D.5 mukaan, kaikki epävarmuuskomponentit kustakin binistä voidaan yhdistää kuvaamaan kategorian B yhdistettyä epävarmuutta jokaiselle parametrille, esimerkiksi tuulen nopeudelle (IEC 61400-12-1:2005(E).):

$$u_{V,i}^2 = u_{V1,i}^2 + u_{V2,i}^2 + \dots$$

Kuva 7. Kaava D.6 (IEC 61400-12-1:2005(E).)

Epävarmuustekijät viittaavat seuraavassa kappaleessa käsiteltävään Taulukko 9:ään käyttäen symboleja ja indeksejä. Mittaussuureiden vakioepävarmuudet voidaan ilmaista mittausparametrien epävarmuuksina binissä i :

$$u_{C,i}^2 = s_{P,i}^2 + u_{P,i}^2 + c_{V,i}^2 u_{V,i}^2 + c_{T,i}^2 u_{T,i}^2 + c_{B,i}^2 u_{B,i}^2$$

Kuva 8. Kaava D.7 (IEC 61400-12-1:2005(E).)

$$u_{AEP}^2 = N_h^2 \left(\sum_{i=1}^N f_i^2 s_{P,i}^2 + s_w^2 + \left(\sum_{i=1}^N f_i \sqrt{u_{P,i}^2 + c_{V,i}^2 u_{V,i}^2 + c_{T,i}^2 u_{T,i}^2 + c_{B,i}^2 u_{B,i}^2 + c_{m,i}^2 u_{m,i}^2} \right)^2 \right)$$

Kuva 9. Kaava D.8 (IEC 61400-12-1:2005(E).)

Tiedonkeruujärjestelmästä johtuvat epävarmuudet aiheuttavat epävarmuutta jokaisessa mittausparametrissa ja virtauksen vääristymässä. Ilmastosta johtuvat epävarmuudet s_w arvioidaan erikseen.

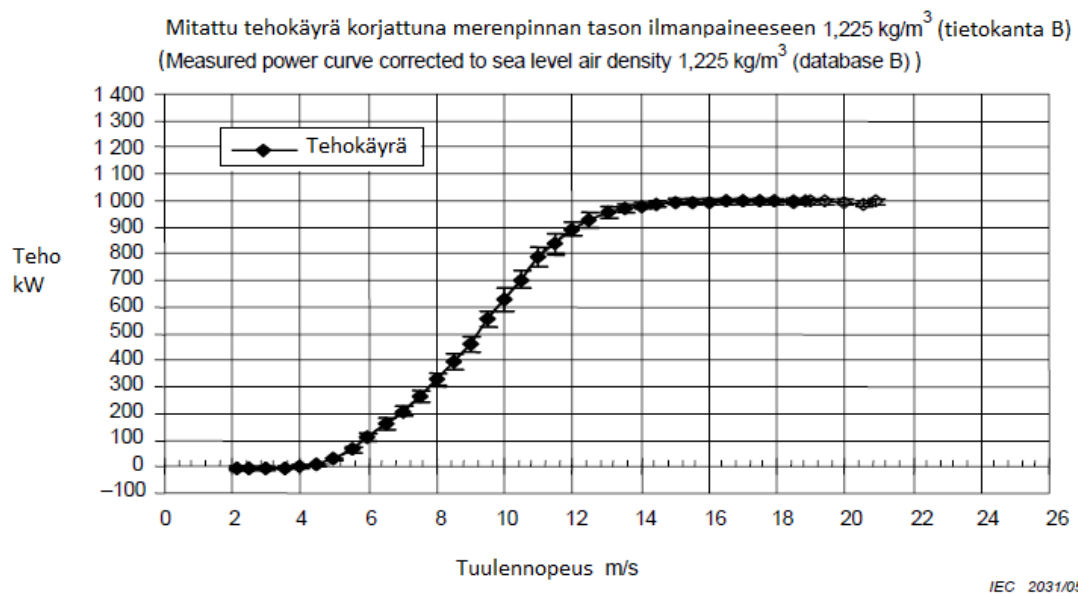
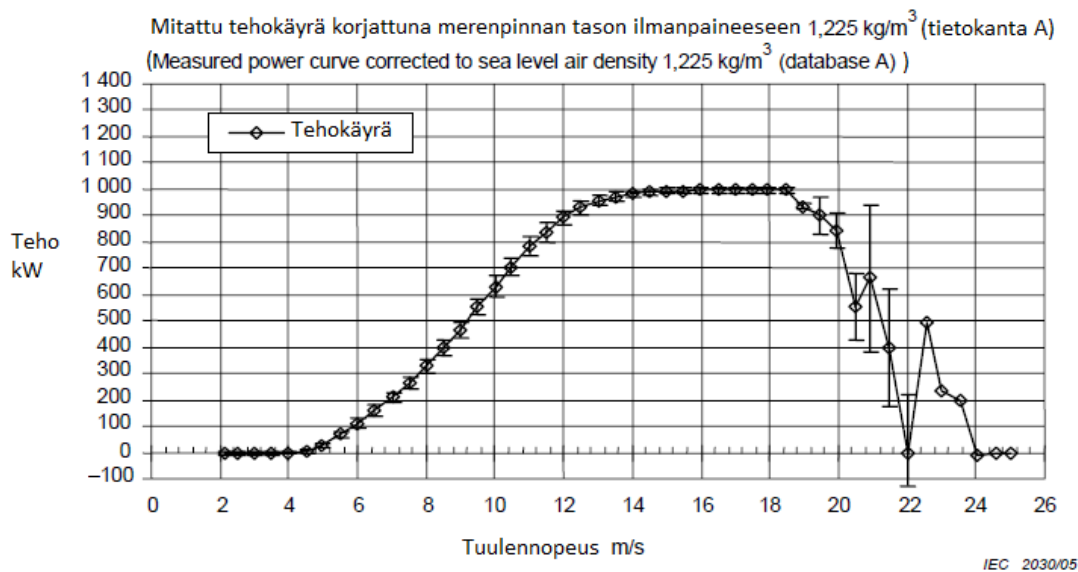
Esimerkki koskee ainoastaan epävarmuustekijöitä, jotka voidaan lisätä epävarmuusanalyysiin taulukon 2. mukaan. Esimerkissä käytetyt mitatut tehokäyrät ovat kuvissa 10 ja 11 sekä taulukossa 3. Tehokäyrä on ekstrapoloitu jatkuvalla teholla, joka on viimeisen binin teho 25 m/s nopeusrajalla. Epävarmuusanalyysin tulokset näkyvät kuvaajassa 11. ja taulukoissa 3 ja 4. Kaikki herkkyyskertoimet on listattu taulukoissa 5 ja 6. Kategorian B epävarmuustekijät on listattu taulukoissa 7 ja 8. (IEC 61400-12-1:2005(E).)

Taulukko 3. Esimerkkitapauksen mitattu tehokäyrä tietokannalle A (IEC 61400-12-1:2005(E).)

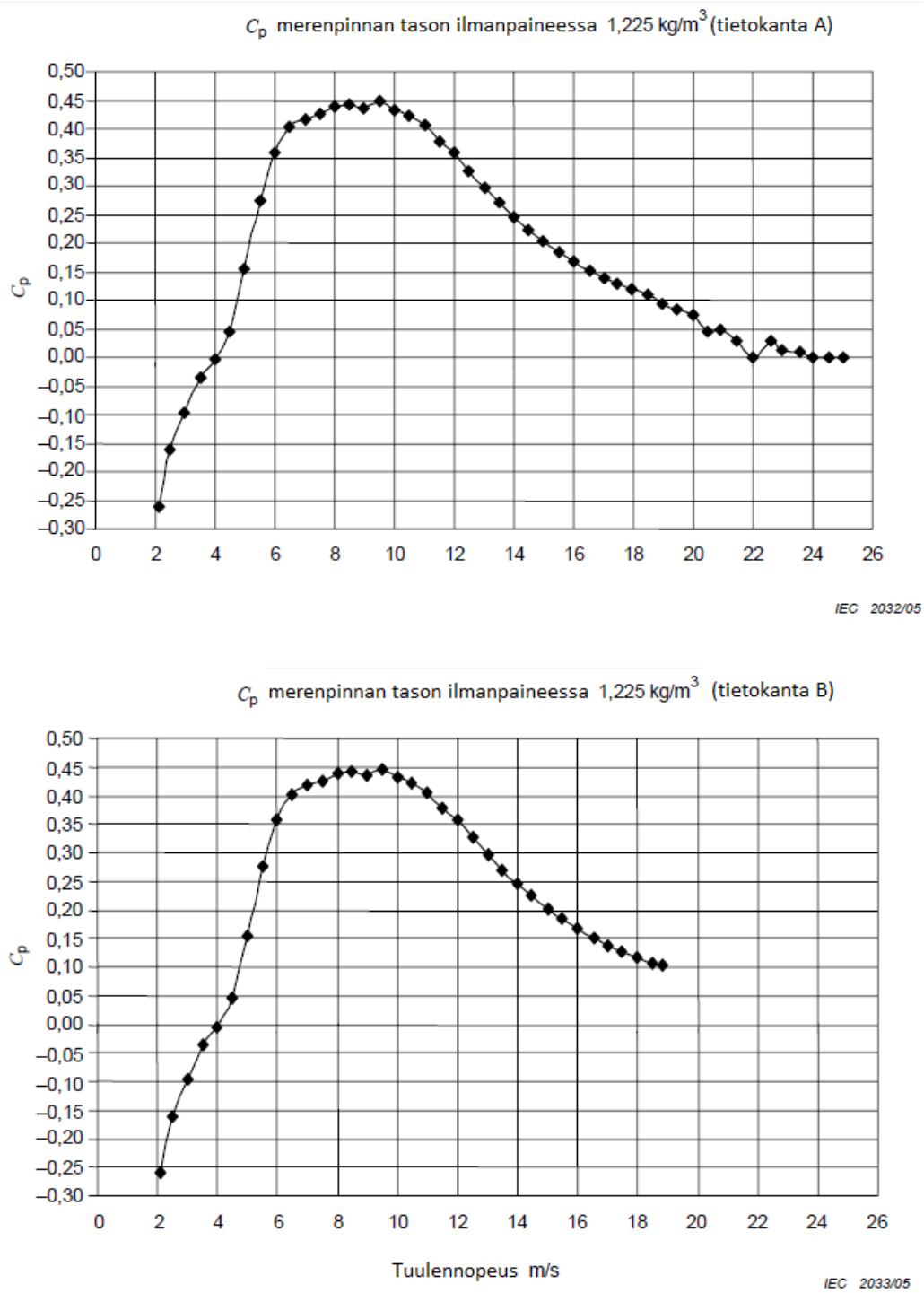
Mitattu tehokäyrä (tietokanta A)							
Ilman tiheys : 1,225 kg/m ³					Kategoria A	Kategoria B	Yhdistetty epävarmuus
Bin no.	Akselikorkeuden tuulennopeus m/s	Tehon tuotto kW	C _p	Tietopakettien määrä (10 min. avg.)	Normaali epävarmuus u_i kW	Normaali epävarmuus u_i kW	Normaali epävarmuus u_{ci} kW
4	2,1	-3,6	-0,26	138	0,05	6,3	6,3
5	2,5	-3,6	-0,16	275	0,04	6,3	6,3
6	3,0	-3,8	-0,10	270	0,13	6,3	6,3
7	3,5	-2,2	-0,03	320	0,56	6,3	6,3
8	4,0	-0,4	0,00	347	0,56	6,3	6,3
9	4,5	6,0	0,05	362	0,67	6,3	6,4
10	5,0	27,7	0,15	333	1,09	6,8	6,9
11	5,5	67,4	0,28	285	1,65	10,9	11,0
12	6,0	111,3	0,36	262	2,26	16,1	16,3
13	6,5	160,9	0,40	265	3,08	20,1	20,3
14	7,0	209,4	0,42	286	3,22	20,4	20,7
15	7,5	262,0	0,43	287	3,23	20,7	20,9
16	8,0	327,6	0,44	248	3,28	23,3	23,5
17	8,5	395,2	0,44	215	4,38	28,6	28,9
18	9,0	462,0	0,44	179	4,94	29,8	30,2
19	9,5	556,1	0,45	183	5,02	29,9	30,3
20	10,0	629,8	0,43	133	5,83	41,5	41,9
21	10,5	703,1	0,42	127	6,82	32,8	33,5
22	11,0	786,5	0,41	119	6,75	36,1	36,7
23	11,5	836,5	0,38	101	6,65	36,5	37,1
24	12,0	893,5	0,36	94	7,27	25,2	26,2
25	12,5	928,6	0,33	74	5,59	28,8	29,3
26	13,0	956,4	0,30	70	6,38	19,5	20,5
27	13,5	971,3	0,27	63	4,66	16,5	17,1
28	14,0	980,9	0,25	71	3,19	13,5	13,8
29	14,5	988,2	0,22	77	2,53	12,2	12,4
30	15,0	993,5	0,20	64	1,37	11,9	11,9
31	15,5	993,7	0,18	47	0,84	11,6	11,6
32	16,0	995,7	0,17	54	0,83	11,3	11,3
33	16,5	996,2	0,15	33	0,42	11,4	11,4
34	17,0	996,4	0,14	23	0,23	11,3	11,3
35	17,5	996,5	0,13	30	0,24	11,3	11,3
36	18,0	996,5	0,12	13	0,18	11,3	11,3
37	18,5	995,7	0,11	11	0,21	11,3	11,3
38	19,0	935,5	0,09	15	0,70	11,3	11,4
39	19,5	900,5	0,08	12	61,11	36,8	71,3
40	20,0	842,5	0,07	8	65,05	23,0	69,0
41	20,5	551,2	0,04	5	122,70	33,9	127,3
42	20,9	661,2	0,05	6	230,33	159,9	280,4
43	21,5	396,5	0,03	8	211,08	77,3	224,8
44	22,0	-6,3	0,00	6	176,06	144,4	227,7
45	22,6	494,3	0,03	4	0,03	224,5	224,5
49	24,6	-6,3	0,00	3	0,19	125,4	125,4
50	25,0	-6,3	0,00	3	0,04	6,3	6,3

Taulukko 4. Esimerkkitapauksen mitattu tehokäyrä tietokannalle B (IEC 61400-12-1:2005(E).)

Mitattu tehokäyrä (tietokanta B)							
Ilman tiheys : 1,225 kg/m ³					Kategoria A	Kategoria B	Yhdistetty epävarmuus
Bin no.	Akselikorkeuden tuulennopeus [m/s]	Tehon tuotto [kW]	C_p	Tietopakettien määrä (10 min. avg.)	Normaali epävarmuus s_j [kW]	Normaali epävarmuus u_j [kW]	Normaali epävarmuus u_{Ci} [kW]
4	2,1	-3,6	-0,26	138	0,05	6,3	6,3
5	2,5	-3,6	-0,16	275	0,04	6,3	6,3
6	3,0	-3,8	-0,10	270	0,13	6,3	6,3
7	3,5	-2,2	-0,03	320	0,56	6,3	6,3
8	4,0	-0,4	0,00	347	0,56	6,3	6,3
9	4,5	6,0	0,05	362	0,67	6,3	6,4
10	5,0	27,7	0,15	333	1,09	6,8	6,9
11	5,5	67,4	0,28	285	1,65	10,9	11,0
12	6,0	111,3	0,36	262	2,26	16,1	16,3
13	6,5	160,9	0,40	265	3,08	20,1	20,3
14	7,0	209,4	0,42	286	3,22	20,4	20,7
15	7,5	262,0	0,43	287	3,23	20,7	20,9
16	8,0	327,6	0,44	248	3,28	23,3	23,5
17	8,5	395,2	0,44	215	4,38	28,6	28,9
18	9,0	462,0	0,44	179	4,94	29,8	30,2
19	9,5	556,1	0,45	183	5,02	29,9	30,3
20	10,0	629,8	0,43	133	5,83	41,5	41,9
21	10,5	703,1	0,42	127	6,82	32,8	33,5
22	11,0	786,5	0,41	119	6,75	36,1	36,7
23	11,5	836,5	0,38	101	6,65	36,5	37,1
24	12,0	893,5	0,36	94	7,27	25,2	26,2
25	12,5	928,6	0,33	74	5,59	28,8	29,3
26	13,0	956,4	0,30	70	6,38	19,5	20,5
27	13,5	971,3	0,27	63	4,66	16,5	17,1
28	14,0	980,9	0,25	71	3,19	13,5	13,8
29	14,5	988,2	0,22	77	2,53	12,2	12,4
30	15,0	993,5	0,20	64	1,37	11,9	11,9
31	15,5	993,7	0,18	47	0,84	11,6	11,6
32	16,0	995,7	0,17	54	0,83	11,3	11,3
33	16,5	996,2	0,15	33	0,42	11,4	11,4
34	17,0	996,4	0,14	23	0,23	11,3	11,3
35	17,5	996,5	0,13	30	0,24	11,3	11,3
36	18,0	996,5	0,12	13	0,18	11,3	11,3
37	18,5	995,7	0,11	11	0,21	11,3	11,3
38	19,0	996,6	0,10	14	0,59	11,3	11,3
39	19,4	996,1	0,09	10	0,21	11,3	11,3
40	20,0	994,1	0,09	5	0,41	11,3	11,3
41	20,5	987,4	0,08	2	2,67	11,4	11,7
42	20,9	996,9	0,08	3	3,38	11,8	12,3



Kuva 10. Esimerkkimittauksen tehokäyrä tietokannoille A ja B (IEC 61400-12-1:2005(E).)



Kuva 11. Esimerkkimittauksen (C_p) hyötysuhdekäyrä tietokannoille A ja B (IEC 61400-12-1:2005(E).)

Taulukko 5. Herkkyystekijät tietokannalle A (IEC 61400-12-1:2005(E).)

Bin No. <i>i</i>	Tehokäyrä (tietokanta A)		Herkkyystekijät		
	Tuulennopeus V_i m/s	Sähköteho P_i kW	Tuulennopeus $c_{V,i}$ kW/ms	Ilman lämpötila $c_{T,i}$ kW/K	Ilmanpaine $c_{B,i}$ kW/hPa
4	2,13	-3,64	1,71	0,01	0,00
5	2,49	-3,65	0,01	0,01	0,00
6	2,99	-3,78	0,27	0,01	0,00
7	3,51	-2,19	3,06	0,01	0,00
8	3,99	-0,43	3,65	0,00	0,00
9	4,50	6,04	12,83	0,02	0,01
10	4,98	27,70	44,69	0,10	0,03
11	5,52	67,39	74,00	0,23	0,07
12	5,98	111,30	94,47	0,39	0,11
13	6,51	160,95	95,05	0,56	0,16
14	7,01	209,42	95,41	0,73	0,21
15	7,50	261,96	107,51	0,91	0,26
16	8,00	327,63	132,16	1,14	0,32
17	8,50	395,23	136,16	1,37	0,39
18	8,99	462,01	134,67	1,60	0,46
19	9,49	556,06	187,71	1,93	0,55
20	10,00	629,80	144,25	2,19	0,62
21	10,47	703,06	157,30	2,44	0,69
22	11,00	786,55	156,23	2,73	0,78
23	11,50	836,48	101,15	2,90	0,83
24	11,99	893,52	116,32	3,10	0,88
25	12,49	928,61	69,27	3,22	0,92
26	13,03	956,44	51,66	3,32	0,94
27	13,50	971,30	31,58	3,37	0,96
28	14,00	980,92	19,49	3,40	0,97
29	14,48	988,17	15,10	3,43	0,98
30	15,00	993,46	10,20	3,45	0,98
31	15,49	993,71	0,50	3,45	0,98
32	15,99	995,70	3,97	3,46	0,98
33	16,54	996,22	0,96	3,46	0,98
34	17,02	996,42	0,42	3,46	0,98
35	17,48	996,48	0,12	3,46	0,98
36	17,95	996,50	0,04	3,46	0,98
37	18,49	995,71	1,48	3,46	0,98
38	18,97	935,54	125,87	3,25	0,92
39	19,45	900,46	71,97	3,12	0,89
40	19,97	842,52	112,19	2,92	0,83
41	20,50	551,21	549,95	1,91	0,54
42	20,92	661,19	261,26	2,29	0,65
43	21,47	396,55	480,32	1,38	0,39
44	22,02	-6,30	738,89	0,02	0,01
45	22,60	494,34	861,43	1,72	0,49
46	23,00	231,88	656,95	0,80	0,23
47	23,56	193,49	67,81	0,67	0,19
48	24,02	-7,92	445,39	0,03	0,01
49	24,56	-6,34	2,89	0,02	0,01
50	25,03	-6,30	0,08	0,02	0,01

Taulukko 6. Herkkyystekijät tietokannalle B (IEC 61400-12-1:2005(E).)

Bin No. <i>i</i>	Tehokäyrä (tietokanta B)		Herkkyystekijät		
	Tuulennopeus V_i m/s	Sähköteho P_i kW	Tuulennopeus $c_{V,i}$ kW/ms	Ilman lämpötila $c_{T,i}$ kW/K	Ilmanpaine $c_{B,i}$ kW/hPa
4	2,13	-3,64	1,712	0,013	0,004
5	2,49	-3,65	0,014	0,013	0,004
6	2,99	-3,78	0,269	0,013	0,004
7	3,51	-2,19	3,062	0,008	0,002
8	3,99	-0,43	3,645	0,001	0,000
9	4,50	6,04	12,825	0,021	0,006
10	4,98	27,70	44,664	0,096	0,027
11	5,52	67,39	74,049	0,234	0,067
12	5,98	111,30	94,430	0,386	0,110
13	6,51	160,95	95,019	0,558	0,159
14	7,01	209,42	95,472	0,727	0,207
15	7,50	261,96	107,566	0,909	0,259
16	8,00	327,63	131,992	1,137	0,323
17	8,50	395,23	136,290	1,372	0,390
18	8,99	462,01	134,677	1,603	0,456
19	9,49	556,06	187,824	1,930	0,549
20	10,00	629,80	145,079	2,186	0,622
21	10,47	703,06	155,957	2,440	0,694
22	11,00	786,55	157,358	2,729	0,776
23	11,50	836,48	100,000	2,903	0,826
24	11,99	893,52	116,327	3,101	0,882
25	12,49	928,61	70,200	3,223	0,917
26	13,03	956,44	51,481	3,319	0,944
27	13,50	971,30	31,702	3,371	0,959
28	14,00	980,92	19,200	3,404	0,968
29	14,48	988,17	15,208	3,429	0,976
30	15,00	993,46	10,192	3,448	0,981
31	15,49	993,71	0,408	3,449	0,981
32	15,99	995,70	4,000	3,455	0,983
33	16,54	996,22	0,909	3,457	0,983
34	17,02	996,42	0,417	3,458	0,984
35	17,48	996,48	0,217	3,458	0,984
36	17,95	996,50	0,000	3,458	0,984
37	18,49	995,71	0,556	3,457	0,983
38	18,97	996,6	0,833	3,459	0,984
39	19,42	996,1	1,111	3,457	0,983
40	19,96	994,1	3,704	3,450	0,981
41	20,51	987,4	12,182	3,427	0,975
42	20,88	996,9	25,676	3,460	0,984

Taulukko 7. Kategorian B epävarmuudet (tietokanta A) (IEC 61400-12-1:2005(E).)

Bin No.	Sähköteho P_i kW	Tuulennopeus V_i m/s	Tuulennopeus $c_{V,i} \cdot V_i$ kW	Ilman lämpötila T_i K	Ilman lämpötila $c_{T,i} \cdot T_i$ kW	Ilmanpaine B_i hPa	Ilmanpaine $c_{B,i} \cdot B_i$ kW
4	6,29	0,19	0,33	2,09	0,03	3,18	0,01
5	6,29	0,19	0,00	2,09	0,03	3,18	0,01
6	6,29	0,19	0,05	2,09	0,03	3,18	0,01
7	6,29	0,19	0,60	2,09	0,02	3,18	0,01
8	6,29	0,20	0,71	2,09	0,00	3,18	0,00
9	6,29	0,20	2,53	2,09	0,04	3,18	0,02
10	6,29	0,20	8,86	2,09	0,20	3,18	0,09
11	6,30	0,20	14,81	2,09	0,49	3,18	0,21
12	6,32	0,20	19,05	2,09	0,81	3,18	0,35
13	6,35	0,20	19,35	2,09	1,17	3,18	0,51
14	6,39	0,21	19,57	2,09	1,52	3,18	0,66
15	6,44	0,21	22,27	2,09	1,90	3,18	0,82
16	6,52	0,21	27,70	2,09	2,37	3,18	1,03
17	6,62	0,21	28,85	2,09	2,86	3,18	1,24
18	6,74	0,21	28,86	2,09	3,35	3,18	1,45
19	6,93	0,22	40,68	2,09	4,03	3,18	1,75
20	7,09	0,22	31,64	2,09	4,57	3,18	1,98
21	7,28	0,22	34,91	2,09	5,10	3,18	2,21
22	7,51	0,22	35,13	2,09	5,70	3,18	2,47
23	7,65	0,23	23,03	2,09	6,06	3,18	2,63
24	7,82	0,23	26,81	2,09	6,48	3,18	2,81
25	7,93	0,23	16,19	2,09	6,73	3,18	2,92
26	8,02	0,24	12,24	2,09	6,93	3,18	3,00
27	8,07	0,24	7,58	2,09	7,04	3,18	3,05
28	8,10	0,24	4,74	2,09	7,11	3,18	3,08
29	8,13	0,25	3,72	2,09	7,16	3,18	3,10
30	8,14	0,25	2,55	2,09	7,20	3,18	3,12
31	8,14	0,25	0,13	2,09	7,20	3,18	3,12
32	8,15	0,26	1,02	2,09	7,22	3,18	3,13
33	8,15	0,26	0,25	2,09	7,22	3,18	3,13
34	8,15	0,26	0,11	2,09	7,22	3,18	3,13
35	8,15	0,27	0,03	2,09	7,22	3,18	3,13
36	8,15	0,27	0,01	2,09	7,22	3,18	3,13
37	8,15	0,28	0,41	2,09	7,22	3,18	3,13
38	7,96	0,28	35,16	2,09	6,78	3,18	2,94
39	7,84	0,28	20,44	2,09	6,53	3,18	2,83
40	7,67	0,29	32,32	2,09	6,11	3,18	2,65
41	6,91	0,29	159,68	2,09	4,00	3,18	1,73
42	7,17	0,29	76,82	2,09	4,79	3,18	2,08
43	6,62	0,30	144,22	2,09	2,87	3,18	1,25
44	6,29	0,30	224,40	2,09	0,05	3,18	0,02
45	6,80	0,31	265,85	2,09	3,58	3,18	1,55
46	6,41	0,31	205,65	2,09	1,68	3,18	0,73
47	6,37	0,32	21,58	2,09	1,40	3,18	0,61
48	6,29	0,28	125,27	2,09	0,06	3,18	0,02
49	6,29	0,29	0,83	2,09	0,05	3,18	0,73
50	6,29	0,29	0,02	2,09	0,05	3,18	0,61

Taulukko 8. Kategorian B epävarmuudet (tietokanta B) (IEC 61400-12-1:2005(E).)

Bin No. <i>i</i>	Sähköteho $\mu P, i$ kW	Tuulenoisuus $\mu V, i$ m/s	Tuulenoisuus $\sigma V, i : \mu V, i$ kW	Ilman lämpötila $\mu T, i$ K	Ilman lämpötila $\sigma T, i : \mu T, i$ kW	Ilmanpaine $\mu B, i$ hPa	Ilmanpaine $\sigma B, i : \mu B, i$ kW
4	6,29	0,19	0,33	2,09	0,03	3,18	0,01
5	6,29	0,19	0,00	2,09	0,03	3,18	0,01
6	6,29	0,19	0,05	2,09	0,03	3,18	0,01
7	6,29	0,19	0,60	2,09	0,02	3,18	0,01
8	6,29	0,20	0,71	2,09	0,00	3,18	0,00
9	6,29	0,20	2,53	2,09	0,04	3,18	0,02
10	6,29	0,20	8,85	2,09	0,20	3,18	0,09
11	6,30	0,20	14,82	2,09	0,49	3,18	0,21
12	6,32	0,20	19,04	2,09	0,81	3,18	0,35
13	6,35	0,20	19,34	2,09	1,17	3,18	0,51
14	6,39	0,21	19,58	2,09	1,52	3,18	0,66
15	6,44	0,21	22,28	2,09	1,90	3,18	0,82
16	6,52	0,21	27,66	2,09	2,37	3,18	1,03
17	6,62	0,21	28,87	2,09	2,86	3,18	1,24
18	6,74	0,21	28,86	2,09	3,35	3,18	1,45
19	6,93	0,22	40,71	2,09	4,03	3,18	1,75
20	7,09	0,22	31,82	2,09	4,57	3,18	1,98
21	7,28	0,22	34,61	2,09	5,10	3,18	2,21
22	7,51	0,22	35,38	2,09	5,70	3,18	2,47
23	7,65	0,23	22,77	2,09	6,06	3,18	2,63
24	7,82	0,23	26,81	2,09	6,48	3,18	2,81
25	7,93	0,23	16,41	2,09	6,73	3,18	2,92
26	8,02	0,24	12,20	2,09	6,93	3,18	3,00
27	8,07	0,24	7,61	2,09	7,04	3,18	3,05
28	8,10	0,24	4,67	2,09	7,11	3,18	3,08
29	8,13	0,25	3,75	2,09	7,16	3,18	3,10
30	8,14	0,25	2,55	2,09	7,20	3,18	3,12
31	8,14	0,25	0,10	2,09	7,20	3,18	3,12
32	8,15	0,26	1,03	2,09	7,22	3,18	3,13
33	8,15	0,26	0,24	2,09	7,22	3,18	3,13
34	8,15	0,26	0,11	2,09	7,22	3,18	3,13
35	8,15	0,27	0,06	2,09	7,22	3,18	3,13
36	8,15	0,27	0,00	2,09	7,22	3,18	3,13
37	8,15	0,28	0,15	2,09	7,22	3,18	3,13
38	8,15	0,28	0,23	2,09	7,22	3,18	3,13
39	8,15	0,28	0,32	2,09	7,22	3,18	3,13
40	8,15	0,29	1,07	2,09	7,21	3,18	3,12
41	8,12	0,29	3,54	2,09	7,16	3,18	3,10
42	8,15	0,29	7,54	2,09	7,23	3,18	3,13

4.2 Käytännön esimerkki

4.2.1 Virtalähteiden ja häiriöiden analysointi

Mittausjärjestelmän virhelähteet, epätarkkuudet ja luotettavuus on analysoitava, jotta mittaustuloksia voidaan pitää luotettavina ja käyttökelpoisina.

Mittausjärjestelmään kohdistuvia häiriötekijöitä ovat muun muassa antureiden sisäiset häiriöt. Näitä ovat mittaustarkkuus ja laakerointien laatu sekä anturin vaste mitattavan suureen muutokselle. Antureiden sijoittelusta johtuvia häiriöitä aiheuttavat liian vähäiset etäisyydet häiriönaiheuttajiin, joita ovat masto ja puomit sekä maaston muodot ja rakennelmat. Myös anturin asennuksessa saatetaan aiheuttaa epätarkkuutta, esimerkiksi anturin vinous mitattavaan suureen nähden. Epätarkkuutta aiheuttavat myös järjestelmän sisäiset virhelähteet, kuten kaapelit ja loggerin epätarkkuudet. (Pori Energian mittausarkisto)

Antureiden valinnalla voidaan vaikuttaa merkittävästi datan saatavuuteen ja laatuun sekä antureiden keskinäiseen vertailuun. Antureiden lämmityksellä voidaan vaikuttaa jäätyminen aiheuttamaan epätarkkuuteen kohtuullisesti, mutta mekaaniseen liikkeeseen perustuvilla antureilla sen vaikutusta on vaikea sulkea kokonaan pois. Käyttämällä liikkeeseen perustumatonta anturia referenssinä voidaan varmistaa muiden anturien tulosten laatu ja suodattaa tarvittaessa virheelliset tulokset tarkemmin pois. Vertailtaessa erilaisten antureiden tuloksia toisiinsa tulee ottaa huomioon niiden erilaiset vasteet mitattavan suureen muutokseen. Esimerkiksi eri anemometrien vaste tuulennopeuden muutokseen tapahtuu eri tavalla. Myös eri menetelmään perustuvan mittaustavan tuloksien vertaaminen toiseen tapaan pitää huomioita, esimerkiksi sodar verrattuna anemometriin. (Pori Energian mittausarkisto)

4.2.2 Tuulennopeuden epävarmuustekijät

- Mittaukseen valitun Thies First Class Advanced -anemetrin tarkkuudeksi on ilmoitettu 1 % mitatusta tai $< 0,2$ m/s.

- Anemometri 0,9 A luokituksesta syntyvä vakioepävarmuus on 0,02598 m/s + 0,002598 V.
- Maasto on melko tasaista, eikä mittauksia ennen ole tarvinnut tehdä standardissa mainittua maastokalibrointimenettelyä. Mastopaikan sijainti kaikkiin tuleviin voimalaitoksiin nähden on enemmän kuin standardissa mainittu 2 X roottorin halkaisija. Näiden asioiden takia käytetään maaston vaikutuksena 3 % epätarkkuutta.
- Anemometrin kalibroinnin epävarmuus on 1 %.
- Maston vaikutus mittaustulokseen on < 0,5 %, kun mittausta ei tehdä suoraan maston takana tuuleen nähden ja etäisyys mastosta on > 4 m.
- Puomin vaikutus anturin tulokseen on < 0,5 %, kun anturin etäisyys puomista on >15 X puomin halkaisija (tässä 70 X 15 = 1050 mm). Maston huipussa asennusputken epävarmuustekijänä 0,5 %. (Pori Energian mittausarkisto)

Kategoria B:n epävarmuustekijät mittauksessa huipun anemometrille (10 m/s).

$$\mu V = \sqrt{((0,1\text{m/s})^2 + (0,02598\text{m/s} + 0,002598\text{m/s})^2 + (0,05\text{m/s})^2 + (0,3\text{m/s})^2 + (0,01\text{m/s})^2)} = 0,3245\text{m/s} \text{ (Pori Energian mittausarkisto)}$$

Kategoria B:n epävarmuustekijät mittauksessa maston sivulla olevalle anemometrille (10m/s).

$$\mu V(10\text{m/s}) = \sqrt{((0,1\text{m/s})^2 + (0,02598\text{m/s} + 0,02598\text{m/s})^2 + (0,05\text{m/s})^2 + (0,05\text{m/s})^2 + (0,3\text{m/s})^2 + (0,01\text{m/s})^2)} = 0,324499\text{m/s} = 3,25\% \text{ (Pori Energian mittausarkisto)}$$

Anemometrien uudelleen kalibrointi suoritetaan mittausjakson jälkeen in situ -vertailun avulla IEC 61400-12-1 standardin Annex K:n mukaisesti. (Pori Energian mittausarkisto)

4.2.3 Tuulensuunnan epävarmuustekijät

Standardissa ei ole annettu erillistä ohjetta tuulensuunnalle eikä vaatimusta kalibroinnille. Epävarmuustekijöinä voidaan kuitenkin soveltaen käyttää samoja lähtötietoja kuin tuulennopeudenkin mittaamisessa. (Pori Energian mittausarkisto)

- Mittaustarkkuus 1 °, 0,1 ° resoluutiolla, josta epätarkkuudeksi 0,05 ° = 5 %.
- Maaston aiheuttama epätarkkuus 3 %.
- Anturin tarkkuus hyvän oskillaation vaimennuskyvyn ansiosta 5 %.
- Maston vaikutus 0,5 %.
- Puomin vaikutus 0,5 %. (Pori Energian mittausarkisto)

$\mu D = \sqrt{((0,05)^2 + (0,03)^2 + (0,01)^2 + (0,005)^2 + (0,005)^2)} = 7,7\% \Rightarrow \pm 0,1^\circ$ (Pori Energian mittausarkisto)

4.2.4 SODAR-mittaukset

Sodar-mittaukset suoritetaan AQSystemin AQ500C Wind Finder mittalaitteella käyttäen 250 W lähetystehoja. Mittauslaitteen asennuksen yhteydessä tulee sen suoruus tarkastaa ja aisan suunta asettaa 90° :seen, jotta aurinkopaneeleille tulevan valon määrä saadaan maksimoitua. Asennukset dokumentoidaan soveltaen standardin IEC 61400-12-1 vaatimuksia valokuvien ja asennusraporttien. Asennuksessa on huomioitava paikan soveltuvuus mittaukseen. Esimerkiksi mahdolliset mittaukseen vaikuttavat häiriöäännet tulee ottaa huomioon. Myös puuston ja muun maaston sekä rakenteiden aiheuttamat häiriölähteet on huomioitava. (Pori Energian mittausarkisto)

Mittalaite on kalibroitu tehtaalla hankittaessa, ja sen mittaustulos on validoitu ennen mittausjakson alkua MEASNET-ohjeen mukaista mittamastoa vasten vähintään kolmen viikon jakson ajan. (Pori Energian mittausarkisto)

- Mittausalue 50 – 200 m korkeuksilta, 5 m rasterilla.
- Data tallennetaan 10 min keskiarvona, keskihajontana sekä min. ja max. arvoina.
- Vaakasuoran tuulen mittausalue 0 - 50m/s, tarkkuus = $< 0,1$ m/s (10 m/s = 1%).
- Pystysuoran tuulen mittausalue ± 10 m/s, tarkkuus 0,05 m/s (5 m/s = 1%).
- Tuulen suunnan tarkkuus 2 - 3° .
- Maaston vaikutus mitatun tuulennopeuden epävarmuuteen voidaan olettaa olevan sama kuin mastomittauksessa, eli näissä olosuhteissa 3 %. (Pori Energian mittausarkisto)

$\mu V(10\text{m/s hor}) = \sqrt{((0,1\text{m/s})^2 + (0,1\text{m/s})^2 + (0,3\text{m/s})^2)} \Rightarrow 0,33166\text{m/s} = 3,32\%$

$\mu V(5\text{m/s ver}) = \sqrt{((0,05\text{m/s})^2 + (0,1\text{m/s})^2 + (0,3\text{m/s})^2)} \Rightarrow 0,33166\text{m/s} = 3,32\%$

(Pori Energian mittausarkisto)

Verrattaessa Sodar-mittauksen ja mastomittauksen tuloksia keskenään on otettava huomioon niiden erilainen mittaustapa. Anemometri mittaa tuulen nopeutta

skalaarisena ja Sodar vektorina. Vektorina mitattu tuulennopeus on aina heikompi kuin skalaarina mitattu tuulennopeus. (Pori Energian mittausarkisto)

5 KATEGORIAN A EPÄVARMUUDET

5.1 Sähkötehon epävarmuudet

Normalisoidun tehodatan jakauman keskihajonta lasketaan jokaiselle binille seuraavalla yhtälöllä. (IEC 61400-12-1:2005(E).) :

$$\sigma_{P,i} = \sqrt{\frac{1}{N_i - 1} \sum_{j=1}^{N_i} (P_i - P_{n,i,j})^2}$$

Kuva12. Kaava D.9 (IEC 61400-12-1:2005(E).)
missä:

$\sigma_{P,i}$ Normalisoidun tehodatan keskihajonta binissä i

N_i 10 min dataryhmien määrä binissä i

P_i Normalisoitu ja keskimääräinen tehotuotto binissä i

$P_{n,i,j}$ Dataryhmän j normalisoitu tehotuotto binissä i

Taulukko 9. Lista kategorioiden A ja B epävarmuuksista (IEC 61400-12-1:2005(E).)

Kategorian B tekijät	HUOM.	Standardi	Epävarmuus	Herkkyys
Tehon tuotto			$u_{P,i}$	$c_{P,i} = 1$
Virtamuuntajat *	a	IEC 60044-1	$u_{P1,i}$	
Jännitemuuntajat *	a	IEC 60044-2	$u_{P2,i}$	
Tehomuuntaja tai *	a	IEC 60688	$u_{P3,i}$	
Tehon mittaussväline *	c		$u_{P4,i}$	
Tuulennopeus			$u_{V,i}$	
Anemometrit *	b		$u_{V1,i}$	$c_{V,i} = \left \frac{P_i - P_{i-1}}{V_i - V_{i-1}} \right $
Toiminnalliset ominaisuudet *	cd		$u_{V2,i}$	
Asennuksen vaikutukset *	c		$u_{V3,i}$	
Ilman tiheys				
<u>Lämpötila</u>			$u_{T,i}$	$c_{T,i} = \frac{P_i}{288,15K}$
Lämpötila-anturi *	a		$u_{T1,i}$	$c_{B,i} = \frac{P_i}{1013hPa}$
Säteily suojaus *	cd		$u_{T2,i}$	
Asennuksen vaikutukset *			$u_{T3,i}$	
<u>Ilmanpaine</u>		ISO 2533	$u_{B,i}$	
Ilmanpaineanturi *	a		$u_{B1,i}$	
Asennuksen vaikutukset *	c		$u_{B2,i}$	
Tiedonkeruujärjestelmä			$u_{d,i}$	Herkkyystekijä on johdettu suoraan epävarmuusparametristä
Signaalin muuntaminen *	b		$u_{d1,i}$	
Järjestelmän tarkkuus *	cd		$u_{d2,i}$	
Signaalin muokkaus *			$u_{d3,i}$	
Kategoria B: Maasto				
Maastosta johtuva virtausvääristymä *	bc		$u_{V4,i}$	$c_{V,i}$
Kategoria B: Menetelmä				
Menetelmä			$u_{m,i}$	
Ilman tiheyden korjaus	cd		$u_{m1,i}$	$c_{T,i}$ ja $c_{B,i}$
Kategoria A: Tilastollinen				
Sähköteho *	e		$s_{P,i}$	$c_{P,i} = 1$
Ilmaston vaihtelut	e		s_w	---
* parametri tarvitaan epävarmuusanalysissä				
HUOM. Epävarmuuksien tunnukset: a = viittaus standardiin; b = kalibrointi; c = muu "tavoite" metodi; d = "arviokoko"; e = tilastollinen.				

Normalisoitu ja keskimääräinen tehon vakioepävarmuus binissä on arvioitu kaavalla:

$$s_i = s_{P,i} = \frac{\sigma_{P,i}}{\sqrt{N_i}}$$

Kuva 13. Kaava D.10 (IEC 61400-12-1:2005(E).)

missä:

$s_{P,i}$ Tehon kategorian A vakioepävarmuus binissä i

$\sigma_{P,i}$ Normalisoidun tehodatan keskihajonta binissä i

N_i 10 min dataryhmien määrä binissä i

5.2 Ilmaston vaikutukset epävarmuuteen

Tuulimittaustesti on voitu suorittaa ilmastollisesti haastavissa olosuhteissa, mikä vaikuttaa systemaattisesti testin tuloksiin. Tällaisia ovat esimerkiksi ilmakehän kerrostuneisuus tai suuret tuulensuunnan muutokset. Ilmaston aiheuttama epävarmuuden s_w suuruusluokka voidaan testata seuraavasti (IEC 61400-12-1:2005(E).):

- a) Jaetaan datatallenne yhtä pitkiin segmentteihin, joista saadaan teholle pieni tilastollinen epävarmuus.
- b) Arvioidaan vuotuinen energiantuotanto jokaiselle johdetulle tehokäyrälle.
- c) Lasketaan vuotuiselle energiantuotannon arviolle keskihajonta.

6 KATEGORIAN B EPÄVARMUUDET

6.1 Yleistä

Kategorian B epävarmuudet liittyvät mittausvälineisiin, tiedonkeräysjärjestelmään ja paikallisiin maastotekijöihin. Mikäli epävarmuudet ilmaistaan epävarmuusrajoina tai muina epäyhtenäisinä kattavuustekijöinä, tulisi vakioepävarmuus arvioida tai muuttaa nämä tekijät kokonaan vakioepävarmuuksiksi.

Jos kyseessä on suorakulmainen todennäköisyysjakauma ja epävarmuus on ilmaistu epävarmuusrajana, voidaan se muuttaa vakioepävarmuudeksi seuraavalla kaavalla (IEC 61400-12-1:2005(E).):

$$\sigma = \frac{U}{\sqrt{3}}$$

Kuva 14. Kaava D.11 (IEC 61400-12-1:2005(E).)

Vastaavasti jos kyseessä on kolmiomainen todennäköisyysjakauma, vakioepävarmuus saadaan kaavalla:

$$\sigma = \frac{U}{\sqrt{6}}$$

Kuva 15. Kaava D.12 (IEC 61400-12-1:2005(E).)

6.2 Tiedonkeruujärjestelmän epävarmuudet

Epävarmuuksia voi syntyä tiedonsiirrossa, signaalin käsittelyssä, analogisesta digitaaliseen muunnoksessa ja datan prosessoinnissa tiedonkeruujärjestelmässä. Epävarmuudet voivat vaihdella jokaisella mittauskanavalla. Tiedonkeruujärjestelmän vakioepävarmuus tietylle mittauskanavalle ($u_{d,i}$) saadaan seuraavalla kaavalla (IEC 61400-12-1:2005(E).):

$$u_{d,i} = \sqrt{u_{d1,i}^2 + u_{d2,i}^2 + u_{d3,i}^2}$$

Kuva 16. Kaava D.13 (IEC 61400-12-1:2005(E).)

missä:

$u_{d1,i}$ Signaalin lähetyksessä ja käsittelyssä syntyvät epävarmuudet binissä i

$u_{d2,i}$ Digitalisoinnissa syntyvä epävarmuus binissä i , esimerkiksi resoluution kvantisoinnissa

$u_{d3,i}$ Muista integroidun tiedonkeruujärjestelmän osista syntyvät epävarmuudet binissä i . Esimerkiksi ohjelmisto ja tallennusjärjestelmä.

Tässä laskuesimerkissä oletetaan, että tiedonkeruujärjestelmällä on vakioepävarmuus $u_{d,i}$, joka on 0,1 % jokaisesta täysimittaisesta mittauskanavasta. (IEC 61400-12-1:2005(E).)

6.3 Sähkötehon mittauksen epävarmuudet

Tehoanturin epävarmuuteen vaikuttavat virta-, jännite- ja tehomuuntajat. Näistä osakomponenteista syntyvät epävarmuudet esitetään luokituksensa perusteella.

Sähkötehon vakioepävarmuuden määrittäminen jokaiselle binille ($u_{P,i}$) lasketaan yhdistämällä edellä mainittujen muuntajien ja datankeräysjärjestelmän vakioepävarmuudet (IEC 61400-12-1:2005(E).):

$$u_{P,i} = \sqrt{u_{P1,i}^2 + u_{P2,i}^2 + u_{P3,i}^2 + u_{dP,i}^2}$$

Kuva 17. Kaava D.14 (IEC 61400-12-1:2005(E).)

$u_{P1,i}$ Virtamuuntajan epävarmuus binissä i

$u_{P2,i}$ Jännitemuuntajan epävarmuus binissä i

$u_{P3,i}$ Tehomuuntajan epävarmuus binissä i

$u_{dP,i}$ Tiedonkeruujärjestelmän vaihekohtainen epävarmuus binissä i

Tässä esimerkissä kaikkien muuntajien on oletettu olevan luokkaa 0,5.

Virtamuuntajan ollessa luokkaa 0,5, epävarmuusrajat ovat $\pm 0,5$ % virrasta 100 %:n käyttöasteella, 20 %:n ja 5 %:n käyttöasteella epävarmuusrajat nousevat rajoihin

$\pm 0,75$ % ja $\pm 1,5$ %. Tuuliturbiineilla tehdyissä tehomittauksissa merkittävin osa energiantuotannosta tuotetaan alennetulla teholla. Näin ollen voidaan 20 %:n käyttöasteen epävarmuusrajaa $\pm 0,75$ % pitää hyvänä keskiarvona. Kolmen virtamuuntajan aiheuttamaa epävarmuutta pidetään samanvertaisina, koska epävarmuuksien voidaan katsoa syntyvän ulkopuolisista tekijöistä. Tällaisia ovat esimerkiksi ilman lämpötila ja verkon taajuus. Tästä syystä virtamuuntajien epävarmuudet voidaan normaalista poiketen summata yhteen. Jokainen muuntaja vaikuttaa kolmanneksella tehon mittaukseen. Tästä seuraa, että virtamuuntajien epävarmuus on verrannollinen tehoon seuraavasti (IEC 61400-12-1:2005(E).):

$$u_{P1,i} = \frac{0,75 \% \cdot P_i [\text{kW}]}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{3} = 0,43 \% \cdot P_i [\text{kW}]$$

Kuva 18. Kaava D.15 (IEC 61400-12-1:2005(E).)

Luokan 0,5 jännitemuuntajilla on $\pm 0,5$ %:n epävarmuusrajat kaikilla käyttöasteilla viitaten standardiin IEC 60044-2. Tuuligeneraattoreiden verkkojännite on yleensä melko vakio ja riippumaton. Kuten virtamuuntajilla, kolmen jännitemuuntajan aiheuttamaa epävarmuutta pidetään samanvertaisina, koska epävarmuuksien voidaan katsoa syntyvän ulkopuolisista tekijöistä. Tällaisia ovat tässäkin tapauksessa esimerkiksi ilman lämpötila ja verkon taajuus. Tästä syystä voidaan normaalista poiketen summata jännitemuuntajien epävarmuudet yhteen. Jokainen muuntaja vaikuttaa kolmanneksella tehon mittaukseen. Tästä seuraa, että jännitemuuntajien epävarmuus on verrannollinen tehoon seuraavasti (IEC 61400-12-1:2005(E).):

$$u_{P2,i} = \frac{0,5 \% \cdot P_i [\text{kW}]}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{3} = 0,29 \% \cdot P_i [\text{kW}]$$

Kuva 19. Kaava D.16 (IEC 61400-12-1:2005(E).)

Jos virran ja jännitteen muuntajat eivät toimi niiden toisiosilmukan käyttöasteiden sisällä, täytyy epävarmuutta lisätä (IEC 61400-12-1:2005(E).).

Luokan 0,5 tehomuuntaja 2000 kW:n nimellisteholla on 10 kW:n epävarmuusraja, viitaten standardiin IEC 60044-2. Epävarmuutta voidaan tässäkin tapauksessa pitää muuntajien kesken vakiona. Tehomuuntajien epävarmuus saadaan seuraavalla kaavalla (IEC 61400-12-1:2005(E).):

$$u_{P3,i} = \frac{10 \text{ kW}}{\sqrt{3}} = 5,8 \text{ kW}$$

Kuva 20. Kaava D.17 (IEC 61400-12-1:2005(E).)

Tässä esimerkissä oletetaan, että mittauskanavan mittausalue sähkötehoissa on 2500 kW ja tiedonkeruujärjestelmän virheen osuus tällä alueella on 0,1 %. Sähkötehoanturin vakioepävarmuus jokaiselle binille saadaan seuraavalla kaavalla (IEC 61400-12-1:2005(E).):

$$\begin{aligned} u_{P,i} &= \sqrt{(0,43 \% \cdot P_i [\text{kW}])^2 + (0,29 \% \cdot P_i [\text{kW}])^2 + (5,8 \text{ kW})^2 + (0,1 \% \cdot 2500 \text{ kW})^2} \\ &= \sqrt{(0,52 \% \cdot P_i [\text{kW}])^2 + (6,3 \text{ kW})^2} \end{aligned}$$

Kuva 21. Kaava D.18 (IEC 61400-12-1:2005(E).)

6.4 Tuulen nopeuden mittauksesta johtuvat epävarmuudet

Tuulen nopeuden mittauksen epävarmuus syntyy yhdistelmästä useita epävarmuustekijöitä. Tavallisesti merkittävimpiä ovat ympäristöstä johtuva virtauksen vääristyminen, toiminnalliset tekijät kuppianemometrissä, anemometrin asennus ja sen kalibroinnin epävarmuus. Jos maasto on todettu tarpeeksi esteettömäksi ja maastokalibrointia ei tarvita, voidaan ympäristöstä johtuvaa vääristymää pitää 2 % tai 3 % sen mukaan, mikä on meteorologisen masto etäisyys tuuliturbiiniin. Jos mittausympäristö vaatii kalibroinnin, tulee käyttää siitä saatua vakioepävarmuutta. Anemometrin asennuksesta johtuva tuulen vääristymä tulee ottaa huomioon vain, jos anemometri ei ole asennettu putkeen maston huipulle. Anemometrin kalibroinnista ja toiminallisista ominaisuuksista syntyvät epävarmuudet ovat merkittävä osa mittauksen tarkkuutta. (IEC 61400-12-1:2005(E).)

Kategorian B epävarmuudet tuulen nopeuteen binissä i voidaan määrittää kaavalla:

$$u_{V,i} = \sqrt{u_{V1,i}^2 + u_{V2,i}^2 + u_{V3,i}^2 + u_{V4,i}^2 + u_{dV,i}^2}$$

Kuva 22. Kaava D.19 (IEC 61400-12-1:2005(E).)

$u_{V1,i}$ Anemometrin kalibroinnin epävarmuus binissä i

$u_{V2,i}$ Anemometrin toiminallisista ominaisuuksista aiheutuva epävarmuus binissä i

$u_{V3,i}$ Asennuksesta johtuvasta tuulen vääristymästä aiheutuva epävarmuus binissä i

$u_{V4,i}$ Maastosta johtuvasta tuulen vääristymästä aiheutuva epävarmuus binissä i

$u_{dv,i}$ Tuulen nopeuden tiedonkeruujärjestelmästä aiheutuva epävarmuus binissä i

Herkkyystekijä määritetään mitatun tehokäyrän jyrkkyydestä alla olevan kaavan mukaisesti:

$$c_{V,i} = \left| \frac{P_i - P_{i-1}}{V_i - V_{i-1}} \right|$$

Kuva 23. Kaava D.20 (IEC 61400-12-1:2005(E).)

Anemometrin kalibroinnin vakioepävarmuuden on arvioitu olevan 0,1 m/s. Anemometrin toiminnallisista ominaisuuksista johtuvan epävarmuuden on arvioitu olevan tässä tapauksessa luokkaa 1,2 A. Olettamalla epävarmuusjakauma suorakulmaiseksi, on vakioepävarmuus luokkaa 0,034 m/s + 0,0034 V_i . Asennuksesta johtuvaa virtausvääristymän vakioepävarmuuden voidaan arvioida olevan 1 % tuulen nopeudesta. Ottamalla huomioon mittauskanavan mittausalue 30 m/s ja tiedonkeruun epävarmuus 0,1 %, saadaan tiedonkeruujärjestelmän vakioepävarmuudeksi 0,03 m/s. Tässä esimerkissä maastokalibrointia ei ole käytetty ja maastosta johtuva virtausvääristymän on arvioitu olevan 3 % tuulen nopeudesta. Jokaisen tuulennopeus-binin epävarmuus voidaan määrittää seuraavalla kaavalla (IEC 61400-12-1:2005(E).):

$$u_{v,i} = \sqrt{\frac{(0,1 \text{ m/s})^2 + (0,034 \text{ m/s} + 0,0034 \cdot V_i [\text{m/s}])^2 + (0,01 \cdot V_i [\text{m/s}])^2 + (0,03 \cdot V_i [\text{m/s}])^2 + (0,001 \cdot 30 \text{ m/s})^2}{(0,104 \text{ m/s})^2 + (0,032 \cdot V_i [\text{m/s}])^2 + (0,034 \text{ m/s} + 0,0034 \cdot V_i [\text{m/s}])^2}}$$

Kuva 24. Kaava D.21 (IEC 61400-12-1:2005(E).)

Jos maastokalibrointi on tehty, tulee siitä saatu epävarmuus lisätä maastosta johtuvaan virtausvääristymään $u_{V4,i}$, vakioarvon sijasta. Kategorian A eri tuulensuuntien virtauksen korjauskertoimien epävarmuus on määritetty mitattujen virtauskorjauskertoimien jakaumasta (tuulen nopeuden suhde turbiinin ja meteorologiamaston välillä). Jakauman keskihajonta jokaiselle binille on $S_{a,j}$ ja kategorian A epävarmuus on keskiarvon $S_{a,j} / \sqrt{N_j}$ keskihajonta. Kalibroinnin epävarmuus on sama kuin tehokäyrämittauksissa. Jos maastokalibroinnissa käytetään vain samantyyppisiä anemometrejä, toiminnalliset epävarmuudet voidaan katsoa korreloiduksi ja voidaan siten jättää huomioimatta. Maastomittausepävarmuus saadaan seuraavalla kaavalla (IEC 61400-12-1:2005(E).):

$$u_{\alpha,j} = \sqrt{2u_{V1,j}^2 / V_i^2 + 2u_{dV,j}^2 / V_i^2 + s_{\alpha,j}^2 / N_j}$$

Kuva 25. Kaava D.22 (IEC 61400-12-1:2005(E).)

$u_{a,i,j}$ Maastokalibroinnin epävarmuus tuulen nopeus binissä i ja tuulen suunta binissä j

$u_{V1,i}$ Anemometrin kalibroinnin epävarmuus binissä i

$u_{dV,i}$ Tiedonkeruujärjestelmän epävarmuus tuulen nopeuden binissä i

$S_{a,j}$ Tuulen nopeuden suhdeluvun keskiarvo tuulen suunnan binissä j

N_j Tuulen suunnan suhdelukujen määrä tuulen suunnan binissä j

Maastokalibroinnin epävarmuus on riippuvainen tuulen nopeudesta. On suositeltavaa esittää kalibroinnin epävarmuus jollain tietyllä nopeudella, esimerkiksi 10 m/s. Epävarmuus tulisi laskea kolmelle tuulennopeudelle. (IEC 61400-12-1:2005(E).)

Maastokalibroinnin ollessa mukana tuulen nopeuden epävarmuuden määrittämisessä, sen epävarmuus kerrotaan herkkyystekijällä, joka on sama jokaisella binillä (IEC 61400-12-1:2005(E).):

$$u_{V4,j} = \sqrt{2u_{V1,j}^2 + 2u_{dV,j}^2 + s_{\alpha,j}^2 V_i^2 / N_j}$$

Kuva 26. Kaava D.23 (IEC 61400-12-1:2005(E).)

Tehokäyrällä olevilla binien tuulen nopeuksilla tulee ottaa huomioon tuulen suuntatiedot ja huomioida epävarmuus tehdyn maastokalibroinnin mukaan (IEC 61400-12-1:2005(E).):

$$u_{V4j} = \frac{\sum_j u_{V4j,j} N_{i,j}}{\sum_j N_{i,j}}$$

Kuva 27. Kaava D.24 (IEC 61400-12-1:2005(E).)

$N_{i,j}$ Aineiston lukumäärä tuulennopeus binistä i ja suunnasta binissä j

6.5 Ilman tiheyden mittauksesta johtuvat epävarmuudet

Ilman tiheys saadaan ilman lämpötila- ja painemittauksista.

Lämpötilamittaus saattaa sisältää seuraavia epävarmuustekijöitä:

- lämpötila-anturin kalibroinnista johtuva epävarmuus
- anturin epätäydellinen säteilysuojaus (huono suojaus nostaa lämpötilaa anturilla)
- anturin asennuksesta johtuva epävarmuus

Lämpötilamittauksessa vakioepävarmuus saadaan jokaiselle binille $u_{T,i}$ seuraavalla kaavalla (IEC 61400-12-1:2005(E).):

$$u_{T,i} = \sqrt{u_{T1,i}^2 + u_{T2,i}^2 + u_{T3,i}^2 + u_{dT,i}^2}$$

Kuva 28. Kaava D.25 (IEC 61400-12-1:2005(E).)
missä:

$u_{T1,i}$ Lämpötila-anturin kalibroinnin epävarmuus binissä i .

$u_{T2,i}$ Epätäydellisestä säteilysuojasta johtuva epävarmuus binissä i .

$u_{T3,i}$ Asennuksesta johtuva epävarmuus binissä i .

$u_{dT,i}$ Tiedonkeruujärjestelmästä johtuva epävarmuus ilman lämpötilassa binissä i .

Herkkyystekijä lämpötilan mittaukseen on arvioitu merenpinnan tasolla seuraavalla kaavalla:

$$c_{T,i} \approx \frac{P_i}{288,15} [\text{kW/K}]$$

Kuva 29. Kaava D.26 (IEC 61400-12-1:2005(E).)

Ilmanpainemittauksessa pitää ottaa huomioon, että tulokset täytyy ensin kertoa napakorkeuden korjauskertoimella, ellei anturi ole asennettu suunnitellun turbiinin napakorkeudelle. Korjauksesta syntyvä epävarmuus sekä anturin kalibroinnin epävarmuus tulee ottaa huomioon. Vakioepävarmuus ilmanpainemittauksessa saadaan jokaiselle binille $u_{B,i}$ seuraavan kaavan mukaisesti (IEC 61400-12-1:2005(E).):

$$u_{B,i} = \sqrt{u_{B1,i}^2 + u_{B2,i}^2 + u_{dB,i}^2}$$

Kuva 30. Kaava D.27 (IEC 61400-12-1:2005(E).)

$u_{B1,i}$ Ilmanpaineanturin kalibroinnin epävarmuus binissä i

$u_{B2,i}$ Ilmanpaineanturin asennuksesta johtuva epävarmuus binissä i

$u_{dB,i}$ Tiedonkeruujärjestelmästä johtuva epävarmuus ilmanpaineessa binissä i

Herkkyystekijä ilmanpaineen mittaukseen merenpinnan tasolla on arvioitu seuraavalla kaavalla:

$$c_{B,i} \approx \frac{P_i}{1013} [\text{kW/hPa}]$$

Kuva 31. Kaava D.28 (IEC 61400-12-1:2005(E).)

Ilman suhteellisesta kosteudesta johtuva epävarmuus voi olla merkittävä, jos keskimääräinen ilman lämpötila on korkea. Merenpinnan tasolla ilman lämpötilan ollessa 20 °C, ilman tiheys vaihtelee 1,2 % suhteellisen kosteuden välillä 0 % ja 100 %. Se vaikuttaa vastaavasti tiheyteen 2,0 % ja 4,0 % lämpötiloilla 30 °C ja 40 °C. Näin korkeissa lämpötiloissa on suositeltavaa, että suhteellinen kosteus mitataan ja otetaan huomioon. Tässä esimerkissä ei huomioida ilmankosteutta. (IEC 61400-12-1:2005(E).)

Lämpöanturin vakioepävarmuudeksi arvioidaan 0,5 °C. Anturin säteilysuojan epätäydellisyyden arvioidaan tuottavan 2 °C vakioepävarmuus. Asennuksesta johtuva vakioepävarmuus riippuu lämpöanturin korkeuserosta suunnitellun turbiinin akselikorkeudesta. Anturin korkeuden poiketessa 10 m akselikorkeudesta, arvioidaan

vakioepävarmuudeksi 1/3 °C. (IEC 61400-12-1:2005(E).)

Jos oletetaan tiedonkeruujärjestelmän vaihtelevuusalueeksi 40 °C ja epävarmuudeksi 0,1 %, ilman lämpötilan vakioepävarmuus voidaan määrittää seuraavalla kaavalla (IEC 61400-12-1:2005(E).):

$$u_{T,j} = \sqrt{(0,5 \text{ K})^2 + (2,0 \text{ K})^2 + (0,3 \text{ K})^2 + (0,1 \% \cdot 40 \text{ K})^2} = 2,1 \text{ K}$$

Kuva 32. Kaava D.29 (IEC 61400-12-1:2005(E).)

Ilmanpaineanturilla on arvioitu olevan 3,0 hPa:n vakioepävarmuus. Anturin korkeuden poiketessa 28 m napakorkeudesta, korjataan se ISO 2533 -standardin mukaisesti 3,4 hPa:iin. Korjauksesta johtuvaksi epävarmuudeksi arvioidaan 10 % korjatusta tuloksesta eli 0,34 hPa. Jos oletetaan painealueeksi 100 hPa mittauskanavasta ja tiedonkeruujärjestelmän epävarmuudeksi 0,1 % tästä alueesta, ilmanpaineen vakioepävarmuus voidaan määrittää seuraavalla kaavalla (IEC 61400-12-1:2005(E).):

$$u_{B,i} = \sqrt{(3,0 \text{ hPa})^2 + (0,34 \text{ hPa})^2 + (0,1 \% \cdot 100 \text{ hPa})^2} = 3,0 \text{ hPa}$$

Kuva 33. Kaava D.30 (IEC 61400-12-1:2005(E).)

6.6 Kategorian B yhdistetyt epävarmuudet

Kategorian B epävarmuudet jokaiselle binille yhdistettynä ovat:

$$\begin{aligned} u_i &= \sqrt{u_{P,i}^2 + c_{V,i}^2 u_{V,i}^2 + c_{T,i}^2 u_{T,i}^2 + c_{B,i}^2 u_{B,i}^2} \\ &= \sqrt{(0,52 \% \cdot P_i [\text{kW}])^2 + (6,3 \text{ kW})^2 +} \\ &\quad \sqrt{c_{V,i}^2 \left((0,104 \text{ m/s})^2 + (0,032 \cdot V_i [\text{m/s}])^2 + (0,034 \text{ m/s} + 0,0034 \cdot V_i [\text{m/s}])^2 \right) +} \\ &\quad \sqrt{c_{T,i}^2 \left((2,1 \text{ K})^2 + c_{B,i}^2 (3,0 \text{ hPa})^2 \right)} \end{aligned}$$

Kuva 34. Kaava D.31 (IEC 61400-12-1:2005(E).)

6.7 Yhdistetty vakioepävarmuus – tehokäyrä

Yhdistetyt vakioepävarmuudet tehokäyrän bineille saadaan yhdistämällä kategorian A ja B epävarmuudet:

$$\begin{aligned}
 u_{c,j} &= \sqrt{s_i^2 + u_i^2} = \sqrt{s_{P,j}^2 + u_{P,j}^2 + c_{V,j}^2 u_{V,j}^2 + c_{T,j}^2 u_{T,j}^2 + c_{B,j}^2 u_{B,j}^2} \\
 &= \sqrt{s_{P,j}^2 + (0,52 \% \cdot P_i [\text{kW}])^2 + (6,3 \text{ kW})^2 +} \\
 &\quad \sqrt{c_{V,j}^2 ((0,104 \text{ m/s})^2 + (0,032 \cdot V_i [\text{m/s}])^2 + (0,034 \text{ m/s} + 0,0034 \cdot V_i [\text{m/s}])^2) +} \\
 &\quad \sqrt{c_{T,j}^2 ((2,1 \text{ K})^2 + c_{B,j}^2 (3,0 \text{ hPa})^2)}
 \end{aligned}$$

Kuva 35. Kaava D.32 (IEC 61400-12-1:2005(E).)

6.8 Yhdistetty vakioepävarmuus – energiantuotanto

AEP:n yhdistetty vakioepävarmuus saadaan yhdistämällä yksilöllisesti kategorian A ja B epävarmuudet bineittäin (IEC 61400-12-1:2005(E).):

$$\begin{aligned}
 u_{AEP} &= N_h \sqrt{\sum_{i=1}^N f_i^2 s_i^2 + \left(\sum_{i=1}^N f_i u_i \right)^2} \\
 &= N_h \sqrt{\sum_{i=1}^N f_i^2 s_{P,j}^2 + \left(\sum_{i=1}^N f_i \sqrt{\begin{aligned} &(0,52 \% \cdot P_i [\text{kW}])^2 + (6,3 \text{ kW})^2 + \\ &c_{V,j}^2 ((0,104 \text{ m/s})^2 + (0,032 \cdot V_i [\text{m/s}])^2) + \\ &c_{V,j}^2 ((0,034 \text{ m/s} + 0,0034 \cdot V_i [\text{m/s}])^2) + \\ &c_{T,j}^2 ((2,1 \text{ K})^2 + c_{B,j}^2 (3,0 \text{ hPa})^2) \end{aligned}} \right)^2}
 \end{aligned}$$

Kuva 36. Kaava D.33 (IEC 61400-12-1:2005(E).)

7 YHTEENVETO

Työn työläimmäksi osuudeksi osoittautui lähdemateriaalin (standardin 61400-12-1) käsittely ja prosessointi. Teksti koostui koukeroisista ja pitkistä lauseista, joiden sisäistämiseen kului melko paljon aikaa.

Epävarmuuskartoitus oli minulle ennestään tuttua lähinnä koulussa tehtyjen laboraatiotöiden ja laskujen muodossa. Bin-metodinkäyttö tuli minulle kuitenkin uutena asiana. Työ toi minulle myös paljon tietoa tuulen mittaukseen vaikuttavista ilmiöistä, joista en aikaisemmin ollut tietoinen. Yllätyin siitä, miten uusi asia tuulimittausten standardointi on ja miten vähän internetistä löytyi luotettavaa materiaalia etenkin mittausten epävarmuuksista.

Työn tarkoituksena oli määrittää mittaukseen vaikuttavat epävarmuustekijät ja selvittää tarvittavat kaavat standardin mukaiseen epävarmuuteen. Tavoitteena oli myös, että työn perusteella olisi mahdollista tehdä työkalu, joka sijoittaa mittausarvot epävarmuuskaavoihin. Tämän materiaalin perusteella on mahdollista tehdä Excel-taulukko, joka laskee automaattisesti mittausarvojen epävarmuudet.

Työssä lähdemateriaalina käytetystä standardista 61400-12-1 on olemassa myös uudempi, mutta vielä hyväksymätön versio. Epävarmuuksien osalta uudessa versiossa oli vain muutamia lisäyksiä, jotka liittyivät lähinnä maastokalibrointiin, tuulen leikkaukseen ja tuulen suunta-anturiin. Muilta osin standardien sisältö oli epävarmuuksien osalta sama.

Pori Energia käyttää tuulimittauksissa myös SODAR (Sound Detection and Ranging) -laitteistoa, jolla voidaan parantaa mittausten luotettavuutta ja vähentää epävarmuuksia. SODAR ei ole ainakaan vielä standardin hyväksymä mittausten menetelmä, eli sen mittaustuloksia voidaan käyttää vain tukena perinteiselle mastomittaukselle.

LÄHTEET

IEC 61400-12-1:2005(E). Wind turbines –Part 12-1 : Power performance measurements of electricity producing wind turbines. 2005. International Electrotechnical Commission IEC. Viitattu 21.3.2015. <http://www.iec.ch>

Tuulivoimayhdistyksen www-sivut. Viitattu 23.3.2015.
<http://www.tuulivoimayhdistys.fi>

Pori Energian www-sivut. Viitattu 23.3.2015. <http://www.porienergia.fi>

Pori Energian mittausarkisto. Viitattu 29.4.2015.