

Vastaanottaja  
**Pahkavaaran Tuulipuisto Oy**

Asiakirjatyyppi  
**Raportti**

Päivämäärä  
**22.11.2017**

Viite  
**1510017196**

# PAHKAVAARAN TUULI- VOIMAHANKE, UTAJÄRVI TUULIVOIMALOIDEN VÄLKEMALLINNUS

# PAHKAVAARAN TUULIVOIMAHANKE, UTAJÄRVI TUULIVOIMALOIDEN VÄLKEMALLINNUS

Päivämäärä **22.11.2017**  
Laatija **Arttu Ruhanen**  
Tarkastaja **Pirjo Pellikka**

Sisältää Maanmittauslaitoksen Maastotietokannan 07/2015 aineistoa.

[http://www.maanmittauslaitos.fi/avoindata\\_lisenssi\\_versio1\\_20120501](http://www.maanmittauslaitos.fi/avoindata_lisenssi_versio1_20120501)

Viite 1510017196

## SISÄLTÖ

<b>1.</b>	<b>Johdanto</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>Suunnitteluohjeavot</b>	<b>1</b>
<b>3.</b>	<b>Vaikutusmekanismit</b>	<b>1</b>
<b>4.</b>	<b>Mallinnusmenetelmä ja lähtötiedot</b>	<b>2</b>
4.1	Mallinnusohjelma ja laskentamalli	2
4.2	Välkelaskenta	2
4.3	Laskentojen epävarmuus	4
4.4	Maastomalli	4
4.5	Tuulivoimalatiedot	4
<b>5.</b>	<b>Mallinnustulokset</b>	<b>4</b>
<b>6.</b>	<b>Välkevaikutusten huomioiminen jatkosuunnittelussa</b>	<b>5</b>
	<b>LÄHTEET</b>	<b>5</b>
	<b>LIITTEET</b>	<b>6</b>

## 1. JOHDANTO

Pahkavaaran Tuulipuisto Oy suunnittelee tuulivoimaloiden rakentamista Utajärven Pahkavaaran alueelle. Tämä selvitys liittyy tuulivoimahankkeen kaavoitustyöhön.

Työn tarkoituksena on ollut selvittää tuulivoimalaitosten aiheuttamat liikkuvan varjostuksen vaikutukset. Ympäristöministeriön Tuulivoimarakentamisen suunnittelu (Ympäristöhallinnon ohjeita 4/2012) oppaan mukaisesti liikkuvasta varjosta puhutaan välkkeenä.

Työ on tehty Pahkavaaran Tuulipuisto Oy:n toimeksiannosta ja yhteyshenkilönä on ollut Raino Kukkonen Tornator Oyj:stä. Välkemallinnuksen ja raportoinnin on Rambollissa tehnyt projekti-päällikkö ins. (AMK) Arttu Ruhanen.

## 2. SUUNNITTELUOHJEARVOT

Tuulivoimaloista aiheutuvalle välkkeelle ei ole määritelty Suomessa raja-arvoja tai suosituksia. Ympäristöministeriön julkistamassa Tuulivoimarakentamisen suunnittelu (Ympäristöhallinnon ohjeita 5/2016) oppaassa suositellaan käyttämään apuna muiden maiden suosituksia välkkeen rajoittamisesta. <sup>[1]</sup>

Eri maissa on annettu suunnitteluarvoja tai raja-arvoja välkkeen määrälle asutukselle tai muille altistuville kohteille. Saksassa on annettu ohjeistus (WEA-Schattenwurf-Hinweise) mallintamiseen sekä raja-arvot maksimivälketilanteessa sekä todellisessa tilanteessa <sup>[2]</sup>. Ruotsalaisessa suunnitteluohjeistuksessa viitataan saksalaiseen ohjeistukseen ja suositukset perustuvat pitkälti saksalaiseen ohjeistukseen <sup>[3]</sup>. Tanskassa on ohjeistuksena annettu, että vuotuinen todellinen välkemäärä tulee rajoittaa kymmeneen tuntiin vuodessa <sup>[4]</sup>.

**Taulukko 1. Esimerkkejä muiden maiden suosituksista ja raja-arvoista välkkeen esiintymisen osalta**

Maa	Real Case	Worst Case
Saksa	8 tuntia/vuosi	30 tuntia/vuosi 30 min/päivä
Ruotsi	8 tuntia/vuosi 30 min/päivä	-
Tanska	10 tuntia/vuosi	-

## 3. VAIKUTUSMEKANISMIT

Toiminnassa olevat tuulivoimalat voivat aiheuttaa liikkuvaa varjoa eli välkettä ympäristöönsä, kun auringon säteet suuntautuvat tuulivoimalan lapojen takaa tiettyyn katselupisteeseen. Tällöin roottorin lapojen pyöriminen aiheuttaa liikkuvan varjon ja varjojen liikkumisnopeus riippuu roottorin pyörimisnopeudesta.

Välkevaikutus syntyy sääolojen, vuodenajan ja vuorokauden ajan mukaan, joten välkettä on havaittavissa tietyssä katselupisteessä vain tiettyjen valaistusolosuhteiden täyttyessä ja tiettyinä aikoina vuorokaudesta ja vuodesta. Välkettä ei esiinny kun aurinko on pilvessä tai kun tuulivoimala ei ole käynnissä, tai auringon asema on välkkeen muodostumiselle epäedullinen. Myös tuulen suunnalla on vaikutusta varjon muodostukselle. Poikittain aurinkoon oleva voimala aiheuttaa erilaisen varjon kuin kohtisuoraan aurinkoon suuntautunut voimala.

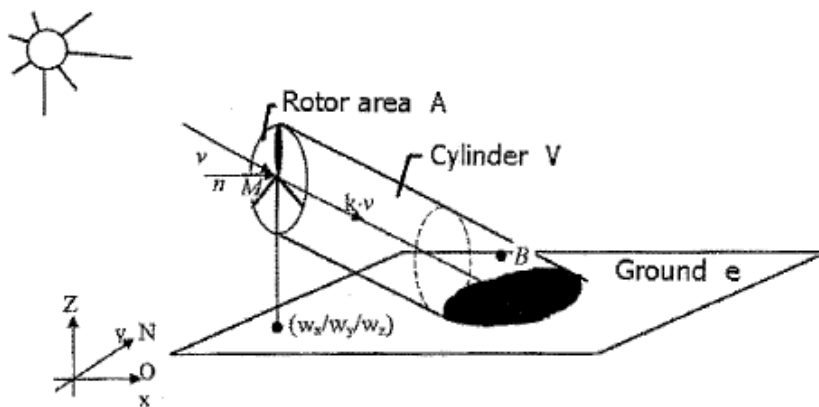
Varjo ulottuu laajimmalle, kun aurinko on matalalla. Toisaalta kun aurinko laskee riittävän matalalle, yhtenäistä varjoa ei enää muodostu. Tällöin valonsäteet joutuvat kulkemaan pitemmän matkan ilmakehän läpi, jolloin säteily hajaantuu. Vaikutusalueen koko riippuu tuulivoimalamallin dimensioista ja lavan muodosta sekä alueellisista sääolosuhteista sekä paikallisista maasto-olosuhteista (metsä, mäki jne.).

## 4. MALLINNUSMENETELMÄ JA LÄHTÖTIEDOT

### 4.1 Mallinnusohjelma ja laskentamalli

Tuulivoimaloiden aiheuttaman välkkeen esiintymisalue ja esiintymistiheys laskettiin EMD WindPRO 3.0 -ohjelman Shadow -moduulilla, joka laskee kuinka usein ja minkälaisina jaksoina tietty kohde on tuulivoimaloiden luoman liikkuvan varjon alaisena. Ohjelma on yleisesti käytössä tuulivoimaloiden aiheuttaman välkkeen mallinnuksessa. Lisätietoja ohjelmasta ja laskentamallin kuvauksen saa internet-osoitteesta <http://www.emd.dk/> löytyvästä ohjelman käyttöohjeesta [5].

Ohjelmalla voidaan tehdä kahdentyyppisiä laskentoja, ns. Pahin tilanne (*Worst Case*)- ja Todellinen tilanne (*Real Case*) -laskelmia. Välkekartan lisäksi voidaan laskea yksittäisiin reseptoripisteisiin kohdistuvaa välkevaikutusta.



Kuva 1. Tuulivoimalan aiheuttaman liikkuvan varjon alue [5]

### 4.2 Välkelaskenta

Laskentapisteiden väliseksi etäisyydeksi määritettiin 20 metriä. Laskennan tarkastelukorkeutena käytettiin 1,5 metriä, eli noin ihmisen silmäkorkeutta. Laskennassa käytetyn saksalaisen ohjeituksen (joka on yleisesti käytössä oleva laskentatapa) mukaan välkevaikutusta laskettaessa auringonpaistekulman raja horisontista on kolme astetta, jonka alle menevää auringon säteilyä ei oteta huomioon ja laskennassa roottorin lavan tulee peittää vähintään 20 % auringosta [2]. Mallinnuksissa ei huomioida puuston ja rakennusten aiheuttamaa peittovaikutusta, jotka rajoittavat merkittävästi välkkeen esiintyvyyttä maanpinnan tasolla.

Worst Case -laskenta antaa teoreettisen maksimivälkemäärän. Laskenta olettaa auringon paistavan koko ajan, kun aurinko on horisontin yläpuolella ja tuulivoimaloiden oletetaan käyvän koko ajan sekä tuulen suunnan seuraavan aurinkoa siten, että välkettä syntyy tarkastelupisteeseen aina maksimaalinen määrä. Worst Case -laskennan vuosiarvot eivät siten vastaa todellista vuositaitaista välkevaikutusta tuulivoimaloiden ympäristössä.

Real Case -laskennoissa huomioidaan alueen tuulisuus- ja auringonpaistetiedot. Real Case tulos saadaan, kun Worst case -tuloksista tehdään vähennykset auringonpaistetietoihin ja käyttötuntitietoihin (tuulensuunta sektoreittain) perustuen. Auringonpaisteisuustietoina käytettiin Ilmatieteen laitoksen Oulun lentoaseman sääaseman keskiarvoisia arvoja ilmastolliselta vertailukaudesta 1981–2010 [6]. Kyseinen sääasema on hankealuetta lähinnä oleva sääasema, jossa mitataan ja tilastoidaan auringonpaisteisuutta. Tuulivoimaloiden vuotuinen toiminta-aika 95 % perustuu Suomen Tuuliatlaksen tietoihin hankealueelta. Toiminta-aikaa laskettaessa on oletettu, että tuulivoimalat toimivat tuulen nopeuden ollessa napakorkeudella vähintään 3 m/s [7].

Taulukko 2. Real Case -laskennassa käytetyt keskimääräiset auringonpaisteisuustunnit päivässä eri kuukausina

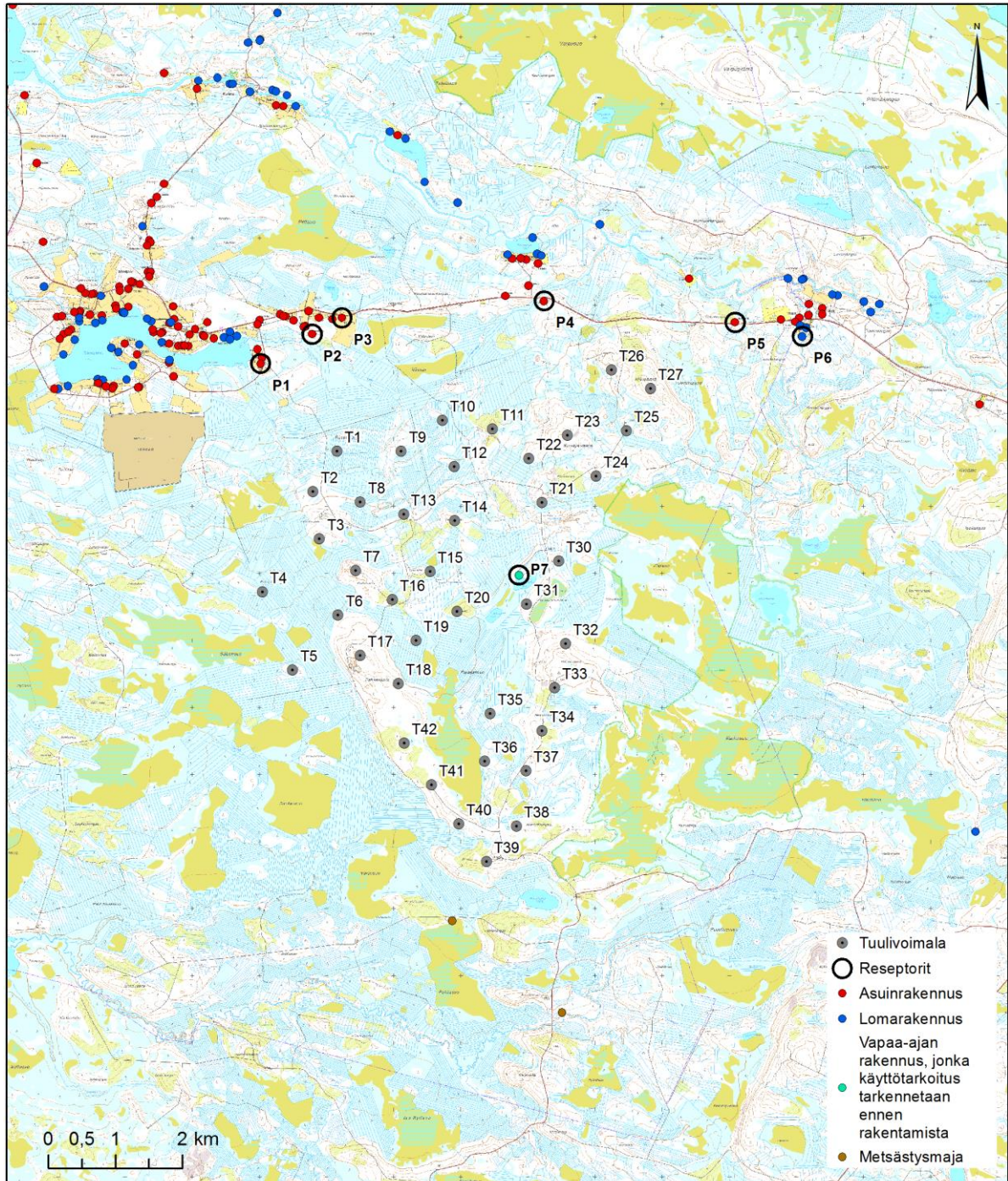
Tam	Hel	Maa	Huh	Tou	Kes	Hei	Elo	Syy	Lok	Mar	Jou
0,77	2,46	4,42	6,93	8,81	9,87	9,13	6,84	4,43	2,23	0,93	0,26



**Taulukko 3. Real Case -laskennassa käytetty vuotuinen toiminnallinen aika (tuntia vuodessa) tuulen-suuntasektoreittain**

N	NNE	ENE	E	ESE	SSE	S	SSW	WSW	W	WNW	NNW	Sum
521	367	358	471	588	692	1149	1244	979	873	567	502	8311

Välkevyöhykelaskentojen lisäksi laskentoja tehtiin yksittäisiin reseptoripisteisiin hankealueen ympäristössä kuvassa 2 esitettyihin reseptoripisteisiin. Reseptoripisteet sijoitettiin eri puolille hankealuetta kuvaamaan eri suuntiin kohdistuvia vaikutuksia.



**Kuva 2. Reseptoripisteiden sijainnit**

### 4.3 Laskentojen epävarmuus

Koska Worst Case -laskenta perustuu auringon asemaan suhteessa tuulivoimalaitokseen ja tarkastelupisteeseen, voidaan laskennan tarkkuutta pitää hyvinkin luotettavana, kun määritetään välkkeen mahdollisia esiintymisajankohtia. Kun tarkoituksena on ennustaa todellista välkkeen esiintyvyyttä alueella vuoden aikana, ei Worst Case -mallinnus vastaa todellisuutta kohdassa 4.2 esitettyjen seikkojen takia.

Real Case -mallinnuksessa käytetään keskimääräisiä auringonpaisteisuustietoja ja Tuuliatlaksen mukaan määritettyjä tuulen suuntien toiminnallisia aikoja. Mallinnuksen mukainen Real case -tulos kuvaa tavanomaisen vuoden tilannetta. Välkevaikutusten todellinen tilanne siis vaihtelee eri vuosina, koska välkkeen esiintyminen tietyssä katselupisteessä tietyllä hetkellä edellyttää, että

- aurinko paistaa tuulivoimalaitosten roottorin takaa tarkastelupisteeseen
- tuulivoimala pyörii ja tuulivoimalan roottorin asento mahdollistaa liikkuvan varjon synty-  
misen takana olevaan tarkastelupisteeseen
- ilman kirkkaus mahdollistaa varjon syntymisen

Real Case -mallinnuksessa tuotetaan paras mahdollinen ennuste tulevasta välketilanteesta alueella. Mallissa ei kuitenkaan huomioida rakennusten ja puuston peitevaikutusta. Jos tuulivoimalat eivät ole nähtävissä, eivät ne myöskään aiheuta välkevaikutuksia.

### 4.4 Maastomalli

Maastomalli on laadittu Maanmittauslaitoksen maastotietokannan korkeusaineistolla, jossa korkeuskäyrät ovat 2,5 metrin välein. Maastomallissa ei huomioitu puustoa tai rakennuksia. Välkekartassa esitetyt rakennustiedot perustuvat YYA-aineiston tietoihin.

### 4.5 Tuulivoimalatiedot

Mallinnuksessa käytettiin 18.9.2017 päivättyä layoutia, joka sisältää 40 tuulivoimalaa. Tuulivoimaloiden sijaintikoordinaatit on esitetty liitteessä 3. Mallinnus tehtiin tuulivoimamallilla, jonka napakorkeus on 167 metriä ja roottorin halkaisija 136 metriä (kokonaiskorkeus 235 m).

Roottorikoon ja napakorkeuden lisäksi myös lavan muoto ja paksuun vaikuttavat maksimivälke-  
etäisyyteen. Koska mallinnuksessa käytetystä laitosmallista ei ole käytössä lapatietoja, on maksimivälke-etäisyys mallinnusohjelman oletusarvon mukainen 2500 metriä.

## 5. MALLINNUSTULOKSET

Real Case -laskennan välkekartta on esitetty liitteessä 1. Välkevyöhykelaskennan lisäksi tehtiin laskentoja seitsemään reseptoripisteeseen, jotka ovat sijoitettu tuulivoimaloiden luoteis-, pohjois- ja koillispuolen lähimpien asuin-/lomarakennusten kohdalle sekä hankealueen keskellä olevan vapaa-ajan rakennuksen kohdalle. Reseptoripisteiden sijainnit on esitetty kuvassa 2 ja vuotuinen välkkeen kokonaismäärä on esitetty taulukossa 4, joka siis sisältää kaikkien tuulivoimaloiden aiheuttaman välkkeen. Idän, etelän ja lännen suunnilla tuulivoimaloiden välkevaikutusalueella ei ole altistuvia asuin- tai lomarakennuksia. Myös lähiympäristön metsästysmajat jäävät välkevaikutusalueen ulkopuolelle. Hankealueen keskellä sijaitsevan Havukkalammen rannalla olevan vapaa-ajan rakennuksen kohdalla välkemäärä on lähes 56 tuntia vuodessa.

**Taulukko 4. Reseptoripistelaskentojen tulokset**

Reseptoripiste	Rakennusten käyttöstatus	Real Case, tuntia vuodessa
P1	Asuinrakennus	1:59
P2	Asuinrakennus	2:24
P3	Asuinrakennus	1:56
P4	Asuinrakennus	4:53
P5	Asuinrakennus	2:29
P6	Loma-asunto	0:31
P7	Vapaa-ajan rakennus, käyttö-tarkoitus tarkennetaan tarvittaessa myöhemmässä vaiheessa	55:57

Teoreettiset välkkeen esiintymisajankohdat on esitetty liitteen 2 kalentereissa. Kuten kalenterista nähdään, painottuu luoteispuolen tarkastelupisteissä välkeajankohta auringonnousun jälkeiseen aikaan. Hankealueen koillispuolella mahdolliset välkeajankohdat painottuvat vastaavasti auringonlaskun aikaan. Hankealueen ulkopuolella sijaitsevissa reseptoripisteissä (P1-P6) pääasiallinen välkkeen esiintymisajankohta on alkuvuonna tammi-maaliskuussa ja loppuvuoden aikana syyskuun lopusta joulukuun alkuun välisellä ajalla ja missään kyseisistä reseptoreista välkettä ei aiheudu kesäaikaan. Hankealueella sijaitsevassa reseptorissa (P7) välkettä voi esiintyä kaikkina muina kuukausina, paitsi joulukuussa.

Liitteen 2 ajankohtakalentereista voi myös arvioida päivittäistä suurinta mahdollista välkevaikutusta. Tulkinnessa tulee kuitenkin muistaa kohdassa 4.3 esitetyt edellytykset välkkeen esiintymiselle tietyssä katselupisteessä ja tietyllä ajanhetkellä sekä myös altistuvan kohteen ympäristö (mm. maaston muodot, rakennukset, puusto).

## 6. VÄLKEVAIKUTUSTEN HUOMIOIMINEN JATKOSUUNNITTELUSSA

Tämän suunnitelman mukaisen hankkeen aiheuttama vuotuinen Real case välkemäärä ympäristön loma- ja asuinrakennuksilla jää mallinnuksen mukaan selvästi alle 8 tuntiin (raja Ruotsissa ja Saksassa) sekä luonnollisesti siten myös alle 10 tuntiin (raja Tanskassa).

Hankealueella sijaitsevan Havukkalammen rannalla olevan vapaa-ajan rakennuksen kohdalla välkemäärä on yli 10 tuntia vuodessa, mutta tilaajan mukaan ko. rakennuksen käyttötarkoitus tarkistetaan ennen tuulivoimaloiden rakentamista.

Mallinnuksen tulokset pätevät selvityksessä käytetyllä laitosmallilla sekä sijoittelusuunnitelmalla. Mikäli hankkeeseen tehdään merkittäviä muutoksia, esim. tuulivoimaloiden sijoittelun osalta tai harkitaan dimensioiltaan suurempaa laitosmallia, tulee välkevaikutusta arvioida uudelleen.

## LÄHTEET

1. Tuulivoimarakentamisen suunnittelu, Ympäristöhallinnon ohjeita 5/2016
2. Hinweise zur Ermittlung und Beurteilung der optischen Immissionen von Windenergieanlagen, WEA-Shattenwurf-Hinweise
3. Vindkraftshandboken - Planering och prövning av vindkraftverk på land och i kustnära vattenområden
4. Danish Wind Industry Association
5. WindPRO 3.0 User Manual
6. Ilmatieteen laitos, Tilastoja Suomen ilmastosta 1981–2010, Raportteja 2012:1
7. Suomen Tuuliatlas

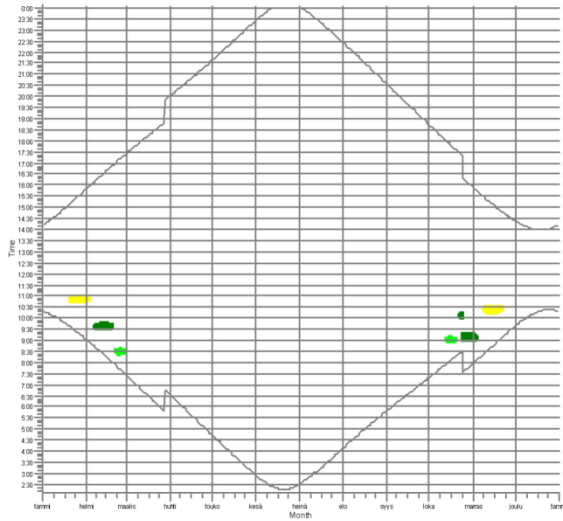


## LIITTEET

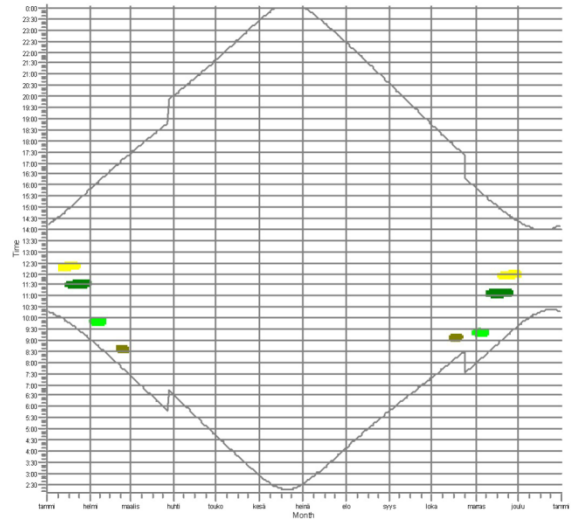
- Liite 1 Real Case -laskennan mukainen välkevyöhykekartta
- Liite 2 Kalenterit välkkeen mahdollisen esiintymisen ajankohdista reseptoripisteissä
- Liite 3 Tuulivoimaloiden koordinaattilistaus

## LIITE 2 (1/2), Ajankohtakaaviot: napakorkeus 167 m ja roottori 136 m

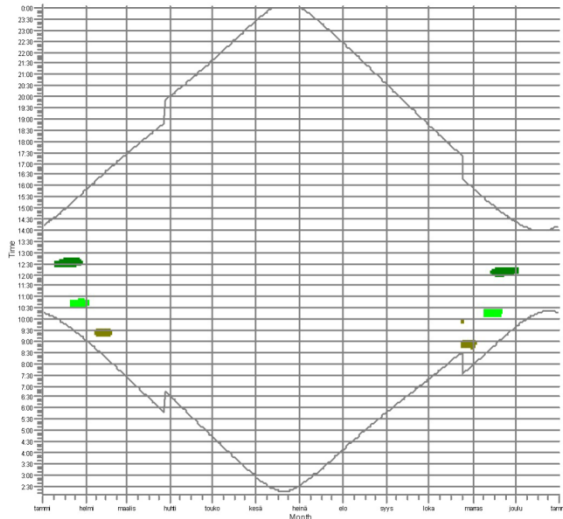
P1: Shadow Receptor:



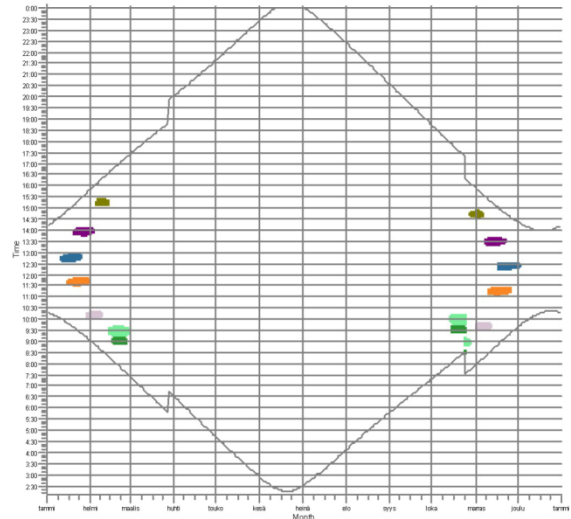
P2: Shadow Receptor:













P3: Shadow Receptor:



P4: Shadow Receptor:



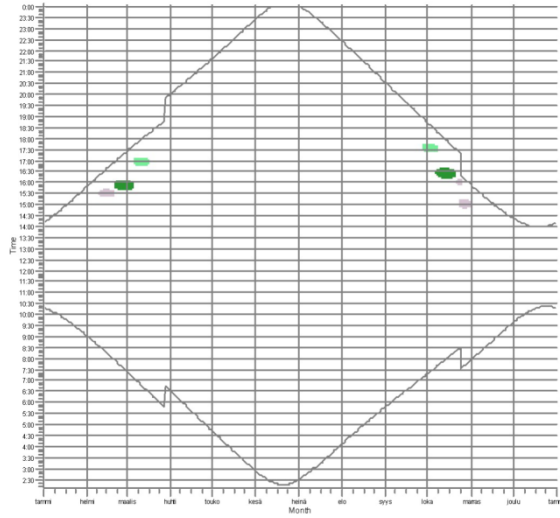
### WTGs

 T1:	136.0 IOI hub: 167,0 m (TOT: 235,0 m) (486)	 T11:	136.0 IOI hub: 167,0 m (TOT: 235,0 m) (496)	 T26:	136.0 IOI hub: 167,0 m (TOT: 235,0 m) (S11)
 T2:	136.0 IOI hub: 167,0 m (TOT: 235,0 m) (487)	 T22:	136.0 IOI hub: 167,0 m (TOT: 235,0 m) (507)	 T27:	136.0 IOI hub: 167,0 m (TOT: 235,0 m) (S12)
 T9:	136.0 IOI hub: 167,0 m (TOT: 235,0 m) (494)	 T23:	136.0 IOI hub: 167,0 m (TOT: 235,0 m) (508)		
 T10:	136.0 IOI hub: 167,0 m (TOT: 235,0 m) (495)	 T25:	136.0 IOI hub: 167,0 m (TOT: 235,0 m) (S10)		

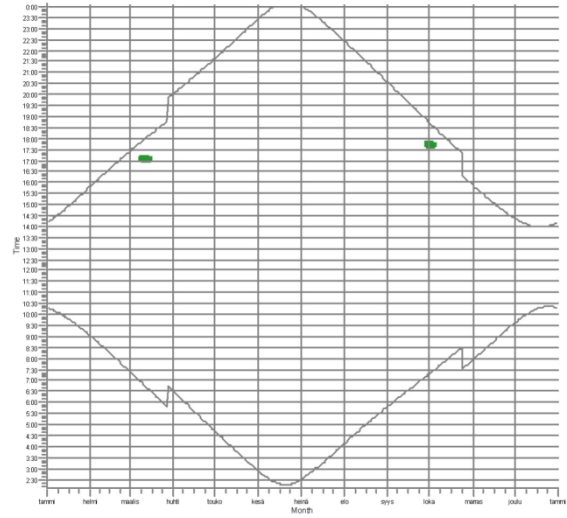
**Yliä on esitetty erikseen jokaiselle raportin kuvassa 2 esitetylle reseptoripisteelle vuoden - ja kellonajat, jolloin välkettä voi teoriassa esiintyä. Kaavioissa ei ole otettu huomioon tuulettomia tai pilvisiä päiviä. Välkettä aiheuttavat voimat on esitetty eri väreillä.**

## LIITE 2 (2/2), Ajankohtakaaviot: napakorkeus 167 m ja roottori 136 m

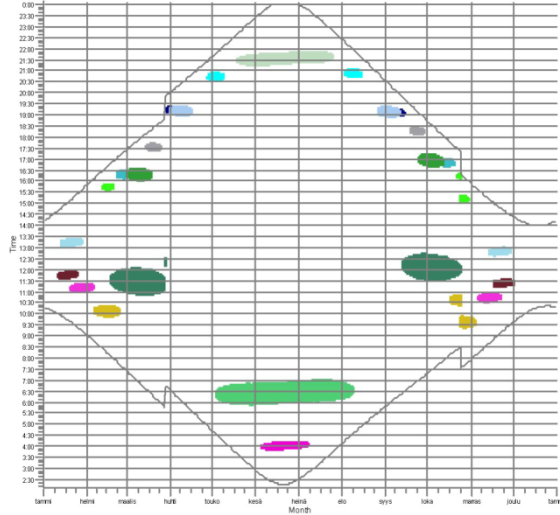
P5: Shadow Receptor:





















P6: Shadow Receptor:



P7: Shadow Receptor:



### WTGs

 T7:	136.0 IOI hub: 167,0 m (TOT: 235,0 m) (492)	 T19:	136.0 IOI hub: 167,0 m (TOT: 235,0 m) (504)	 T30:	136.0 IOI hub: 167,0 m (TOT: 235,0 m) (513)
 T13:	136.0 IOI hub: 167,0 m (TOT: 235,0 m) (498)	 T20:	136.0 IOI hub: 167,0 m (TOT: 235,0 m) (505)	 T31:	136.0 IOI hub: 167,0 m (TOT: 235,0 m) (514)
 T14:	136.0 IOI hub: 167,0 m (TOT: 235,0 m) (499)	 T24:	136.0 IOI hub: 167,0 m (TOT: 235,0 m) (509)	 T32:	136.0 IOI hub: 167,0 m (TOT: 235,0 m) (515)
 T15:	136.0 IOI hub: 167,0 m (TOT: 235,0 m) (500)	 T25:	136.0 IOI hub: 167,0 m (TOT: 235,0 m) (510)	 T33:	136.0 IOI hub: 167,0 m (TOT: 235,0 m) (516)
 T16:	136.0 IOI hub: 167,0 m (TOT: 235,0 m) (501)	 T26:	136.0 IOI hub: 167,0 m (TOT: 235,0 m) (511)	 T34:	136.0 IOI hub: 167,0 m (TOT: 235,0 m) (517)
 T18:	136.0 IOI hub: 167,0 m (TOT: 235,0 m) (503)	 T27:	136.0 IOI hub: 167,0 m (TOT: 235,0 m) (512)	 T35:	136.0 IOI hub: 167,0 m (TOT: 235,0 m) (518)

**Yllä on esitetty erikseen jokaiselle raportin kuvassa 2 esitetylle reseptoripisteelle vuoden – ja kellonajat, jolloin välkettä voi teoriassa esiintyä. Kaavioissa ei ole otettu huomioon tuulettomia tai pilvisiä päiviä. Välkettä aiheuttavat voimat on esitetty eri väreillä.**

### LIITE 3

Taulukossa esitetyissä tuulivoimalaitoksen koordinaateissa Z-koordinaatti kertoo maaston korkeuden metreissä merenpinnan yläpuolella tuulivoimalan sijaintipaikalla.

#### Tuulivoimalaitoksen koordinaatit (ETRS-TM35FIN). Layout 18.9.2017

Tunnus	X	Y	Z		Tunnus	X	Y	Z
T1	512155	7197824	135		T21	515214	7197056	158
T2	511801	7197217	137		T22	515017	7197715	153
T3	511896	7196517	148		T23	515594	7198061	165
T4	511046	7195719	150		T24	516019	7197450	167
T5	511496	7194555	154		T25	516471	7198129	165
T6	512174	7195375	156		T26	516248	7199030	160
T7	512434	7196041	160		T27	516831	7198752	175
T8	512503	7197065	140		T30	515461	7196182	163
T9	513113	7197823	134		T31	514984	7195540	163
T10	513728	7198284	134		T32	515566	7194951	178
T11	514475	7198154	140		T33	515400	7194291	180
T12	513905	7197591	141		T34	515213	7193650	178
T13	513150	7196883	143		T35	514438	7193906	165
T14	513912	7196783	153		T36	514358	7193195	165
T15	513546	7196029	155		T37	514977	7193052	174
T16	512986	7195604	156		T38	514834	7192229	173
T17	512505	7194772	170		T39	514388	7191700	173
T18	513072	7194352	165		T40	513971	7192265	165
T19	513339	7194999	158		T41	513564	7192847	165
T20	513944	7195429	160		T42	513161	7193469	163