

Vastaanottaja  
Element Power / Kangastuuli Oy

Asiakirjatyyppi  
Raportti

Päivämäärä  
25.8.2016

Viite  
1510014630-004

# KANGASTUULEN TUULI- VOIMAHANKE, SIIKAJOKI VÄLKEMALLINNUS

# KANGASTUULEN TUULIVOIMAHANKE, SIIKAJOKI VÄLKEMALLINNUS

Päivämäärä 25.8.2016  
Laatija Arttu Ruhanen, Dennis Söderholm  
Tarkastaja Erika Kylmänen

Tuulivoimahankkeiden välkemallinnus

Sisältää Maanmittauslaitoksen Maastotietokannan 06/2015 aineistoa.

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

Viite 1510014630-004

## SISÄLTÖ

|          |                                              |   |
|----------|----------------------------------------------|---|
| 1.       | Yleistä                                      | 1 |
| 2.       | Suunnitteluohjeavot                          | 1 |
| 3.       | Vaikutusmekanismit                           | 2 |
| 4.       | Mallinnusmenetelmä ja lähtötiedot            | 2 |
| 4.1      | Mallinnusohjelma ja laskentamalli            | 2 |
| 4.2      | Väkelaskenta                                 | 2 |
| 4.3      | Laskentojen epävarmuus                       | 4 |
| 4.4      | Maastomalli                                  | 4 |
| 4.5      | Kangastuulen tuulivoimalatiedot              | 4 |
| 4.6      | Yhteisvaikutusten voimalatiedot              | 4 |
| 5.       | Mallinnustulokset ja tulosten tulkinta       | 5 |
| 5.1      | Kangastuulen tulokset                        | 5 |
| 5.2      | Yhteismallinnuksen tulokset                  | 5 |
| 6.       | Välkevaikutuksien vähentämiskeinot ja -tarve | 6 |
| LIITTEET |                                              | 6 |
| LÄHTEET  |                                              | 6 |

## 1. YLEISTÄ

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

Hankkeesta on laadittu 3.11.2015 ympäristövaikutusten arviointiin ja kaavaluonnokseen liittynyt välkemallinnus. Tässä raportissa esitetään myös lokakuussa 2015 tehdyn yhteisvaikutusselvityksen päivitetty välkemallinnus. Aiempiin selvityksiin liittyen Kangastuulen tuulivoimapuiston voimalamäärä on supistunut kaavaluonnoksen 45 voimalasta 33 voimalaan.

Työ on tehty Element Power/Kangastuuli Oy:n toimeksiannosta, josta yhteyshenkilönä on toiminut Eeva-Maria Hatva. Välkemallinnuksen ja raportoinnin on tehnyt Ramboll Finland Oy:stä ins.(AMK) Arttu Ruhanen ja päivittänyt FM Dennis Söderholm.

## 2. SUUNNITTELUOHJEARVOT

Tuulivoimaloista aiheutuvalle liikkuvalla varjostukselle ei ole määritelty Suomessa raja- tai ohje-arvoja. Ympäristöministeriön julkistamassa Tuulivoimarakentamisen suunnittelu (Ympäristöhallinnon ohjeita 4/2012) 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 2.1. Esimerkkejä muiden maiden suosituksista ja raja-arvoista välkkeen esiintymisen osalta

| Maa    | Real Case                      | Worst Case                      |
|--------|--------------------------------|---------------------------------|
| Saksa  | 8 tuntia/vuosi                 | 30 tuntia/vuosi<br>30 min/päivä |
| Ruotsi | 8 tuntia/vuosi<br>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 eli roottorin asennolla on vaikutusta varjon muodostukselle. Poikittain aurinkoon oleva roottori aiheuttaa erilaisen varjon kuin kohtisuoraan aurinkoon suuntautunut voimala.

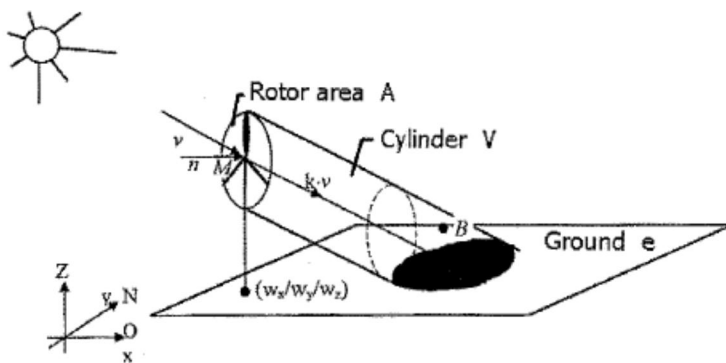
Laajimmalle varjo ulottuu, kun aurinko on matalalla. Toisaalta kun aurinko laskee riittävän matalalle, yhtenäistä varjoa ei enää muodostu. Tällöin valonsäteet joutuvat kulkemaan pitemmän matkan ilmakehän läpi, jolloin säteily hajaantuu. Vaikutusalueen koko riippuu tuulivoimalamallin dimensioista ja lavan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

### 4. MALLINNUSMENETELMÄ JA LÄHTÖTIEDOT

#### 4.1 Mallinnusohjelma ja laskentamalli

Tuulivoimaloiden aiheuttaman välkkeen esiintymisalue ja esiintymistiheys laskettiin EMD WindPRO 2.9 -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<sup>[5]</sup>.

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 4.1.1. Tuulivoimalan aiheuttaman liikkuvan varjon alue<sup>[5]</sup>

#### 4.2 Välkelaskenta

Laskentapisteen väliseksi etäisyydeksi määritettiin 10 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<sup>[2]</sup>. 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.

Real Case -laskennoissa huomioidaan alueen tuulisuus- ja auringonpaistetiedot. Worst case -tuloksista tehdään vähennykset auringonpaistetietoihin ja toiminta-aikoihin (tuulensuunta sektoreittain) perustuen, josta saadaan Real case -tulos. Auringonpaisteisuustietoina käytettiin Ilmatieteen laitoksen Oulun lentoaseman sääaseman keskiarvoisia arvoja ilmastolliselta vertailukaudelta 1981–2010 <sup>[6]</sup>. Tuulivoimaloiden vuotuinen toiminta-aika 94 % perustuu Suomen Tuuliatlaksen tietoihin hankealueelta. Toiminta-aikaa laskettaessa on oletettu, että tuulivoimalat toimivat tuulen nopeuden ollessa napakorkeudella vähintään 3 m/s<sup>[7]</sup>.

Taulukko 4.2.1. 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 4.2.2. Real Case -laskennassa käytetty vuotuinen toiminnallinen aika (tuntia vuodessa) tuulensuuntasektoreittain

| N   | NNE | ENE | E   | ESE | SSE | S   | SSW  | WSW  | W   | WNW | NNW | Sum  |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|-----|-----|-----|------|
| 566 | 435 | 339 | 385 | 629 | 692 | 801 | 1110 | 1671 | 635 | 469 | 516 | 8247 |

Real Case -välkevyöhykelaskennan lisäksi laskentoja tehtiin myös yksittäisiin reseptoripisteisiin hankealueen ympäristössä, joiden sijainnit on esitetty kuvassa 4.2.3.



Kuva 4.2.3. 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. Real Case -tuloksiin vaikuttavat mallinnuksessa käytetyt auringonpaisteisuustiedot ja tuulen suuntien toiminnalliset ajat. Mikäli voimalan roottori liikkuu tunteina vähemmän ja aurinko paistaa vähemmän, vähentää se välkeilmiön esiintymistä nyt lasketusta, ja mikäli enemmän, se vastaavasti lisää välkeilmiön esiintymismahdollisuuksia Real Case -tuloksissa.

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 syntymisen takana olevaan tarkastelupisteeseen
- ilman kirkkaus mahdollistaa varjon syntymisen

Real Case -mallinnuksessa tuotetaan paras mahdollinen ennuste tulevasta välketilanteesta alueella. Mallinnusperiaatteiden mukaan laskenta antaa suhteellisen konservatiivisia arvoja, koska mallinnuksessa ei huomioida esim. puuston ja rakennusten aiheuttamaa peittovaikutusta. 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.

#### 4.5 Kangastuulen tuulivoimalatiedot

Kangastuulen tuulivoimaloiden sijoittelu perustuu 2.6.2016 päivättyyn kaavaehdotusvaiheen mukaiseen sijoitussuunnitelmaan, joka käsittää 33 tuulivoimalaa. Mallinnus tehtiin tuulivoimamallilla, jonka napakorkeus on 160 metriä ja roottorin halkaisija 140 metriä, jolloin kokonaiskorkeus on 230 metriä. Maksimivälke-etäisyys on mallinnusohjelman oletusarvon mukainen 2500 metriä.

#### 4.6 Yhteisvaikutusten voimalatiedot

Kangastuulen mallinnuksen lisäksi tehtiin yhteismallinnus, jossa huomioitiin hankealueen läheisyydessä sijaitsevat muut hankkeet. Lähialueiden hankkeiden tiedot perustuvat 20.5.2016 mennessä saatuihin hanketietoihin sijoittelusta ja voimaloiden mittasuhteista. Kangastuulen hankkeen mallinnus perustuu 2.6.2016 päivättyyn suunnitelmaan.

- Karhukangas: HH 160 m / roottori 140 m (16 voimalaa)
- Isoneva I: HH 114 m / roottori 131 m (23 voimalaa)
- Isoneva II: HH 144 m / roottori 131 m (6 voimalaa)
- Hummastinvaara: HH 123 m / roottori 136 m (15 voimalaa)
- Navettakangas: HH 137 m / roottori 126 m (8 voimalaa)

## 5. MALLINNUSTULOKSET JA TULOSTEN TULKINTA

Mallinnuksen mukaisille välkevaikutusalueille jäävien altistuvien kohteiden kohdalla tulee arvioida kohdekohtaisesti onko ympäristö sellainen, että välkevaikutuksia voi esiintyä kyseisissä paikoissa. Tähän vaikuttavat mm. puusto ja rakennukset, joita mallinnuksessa ei ole huomioitu.

### 5.1 Kangastuulen tulokset

Kangastuulen hankkeen Real Case -laskennan mukainen välkekartta on esitetty liitteessä 1.

Mallinnuksen mukaan asuin- tai lomarakennusten kohdalla välkemäärä on selvästi alle 8 tuntia vuodessa.

Välkevyöhykelaskennan lisäksi tehtiin laskentoja kolmeen reseptoripisteeseen, jotka on sijoitettu tuulivoimaloiden eripuolilla altistuvien lähimpien kohteiden luo. Reseptoripisteiden vuotuinen välkkeen kokonaismäärä on esitetty taulukossa 5.1.1., joka siis sisältää kaikkien Kangastuulen tuulivoimaloiden aiheuttaman välkkeen. Worst Case ei kuvaa todellista välkevaikutusta, koska tulos on teoreettinen maksimi.

Taulukko 5.1.1. Reseptoripistelaskentojen tulokset, kun huomioidaan pelkkä Kangastuulen hanke

| Reseptori-piste | Real Case       | Worst Case      |                                |
|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------------------|
|                 | Tuntia vuodessa | Tuntia vuodessa | Tuntia päivässä (maksimissaan) |
| R1              | 2:20            | 8:24            | 0:15                           |
| R2              | 1:11            | 6:14            | 0:15                           |
| R3              | 1:25            | 9:41            | 0:16                           |

Välkkymisen mahdolliset ajankohdat reseptoripistekohtaisina kalentereina on esitetty liitteessä 3. Ajankohdat on esitetty kalentereissa teoreettisina maksimivälkeaikoina.

Kaavaehdotusvaiheen mukaisessa tilanteessa välkkeen esiintymisajankohta lounaispuolen lähimmän asuintalon kohdalla (R1) on aikaisin aamulla huhti–toukokuussa ja heinä–elokuussa noin klo 5–6. Hummastinjärvien eteläosassa (R2) välkettä voi aiheutua maaliskuun alussa klo 8 aikoihin, huhti–maaliskuun vaihteessa klo 7:30 aikoihin, syyskuun alussa klo 7–7:30 aikoihin ja loka–kuun alussa klo 8:30 aikoihin. Hummastinjärvien pohjoisosassa (R3) Kangastuulen hankkeen välkkeen esiintyminen on mahdollista aamulla helmikuussa ja maaliskuun alussa klo 8–10 välisenä aikana ja loka–marraskuussa 9:30–10:30 välisenä aikana. Kerralla kuitenkin enintään 15–16 minuuttia päivässä.

### 5.2 Yhteismallinnuksen tulokset

Yhteismallinnuksen Real Case -laskennan mukainen välkekartta on esitetty liitteessä 2.

Taulukko 5.2.1. Reseptoripistelaskentojen tulokset yhteismallinnuksen mukaisessa tilanteessa

| Reseptori-piste | Real Case       | Worst Case      |                                |
|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------------------|
|                 | Tuntia vuodessa | Tuntia vuodessa | Tuntia päivässä (maksimissaan) |
| R1              | 8:41            | 30:13           | 0:29                           |
| R2              | 4:09            | 19:09           | 0:25                           |
| R3              | 3:01            | 19:17           | 0:37                           |

Yhteisvaikutukset kasvattavat välkkeelle alttiiden kohteiden määrää ja välkemäärää ylipäättään. Kuten liitteiden 1 ja 2 kartoista nähdään, ulottuu Kangastuulen välkevaikutusalue kuitenkin vain yhden eteläpuolen asuintalon kohdalle ja kuuden Hummastinjärvien rannalla olevan loma-asunnon kohdalla. Kangastuulen vaikutusalueen ulkopuolella välke aiheutuu yksinomaan muista tuulivoimahankkeista. Etenkin reseptoripisteessä R1 välkevaikutukset kasvavat Navettakankaan tuulivoimaloiden vaikutuksesta. Myös Hummastinjärvien reseptoripisteissä R2 ja R3 välkemäärä kasvaa, koska Hummastinjärvien välkevaikutusta kasvattavat itäpuolella oleva Isonneva I ja länsipuolella oleva Hummastinvaaran hankealue.



## 6. VÄLKEVAIKUTUKSIEN VÄHENTÄMISKEINOT JA -TARVE

Jos vuotuisen todellisen välkemäärän rajana käytetään 8 tuntia tai 10 tuntia vuodessa, ei Kangastuulen hankkeella olisi mallinnuksen mukaan välkkeen rajoittamistarvetta.

Tuulivoimaloiden välkevaikutusta on tarvittaessa mahdollista vähentää teknisin keinoin siten, ettei välkettä esiinny tietyllä kohteella enemmän kuin ennalta määriteltä aika. Tämä tapahtuu ohjaamalla tuulivoimalaitokset pysähtymään tiettyinä ajankohtina ja tiettyjen olosuhteiden vallitessa. Välkkeen muodostumista tuulivoimalan ympäristöön voidaan tarvittaessa tarkkailla voimalan nasellin päälle tai runkoon asennettavilla valosensoreilla, jotka laskevat muodostumisen mahdollisuutta tietyssä suunnassa valoisuuden ja roottorin asennon mukaan.

Puustovyöhykkeet rajoittavat välkevaikutuksia, mutta puuston on kuitenkin oltava riittävän tiheää ja korkeata sekä suojata altistuvaa kohdetta kattavasti. Myös vuodenajan vaihtelut on huomioitava puuston kyvyssä rajoittaa tuulivoimaloiden näkyvyyttä. Jos tuulivoimalat eivät näy katse-lupisteeseen, ei myöskään välkettä aiheudu.

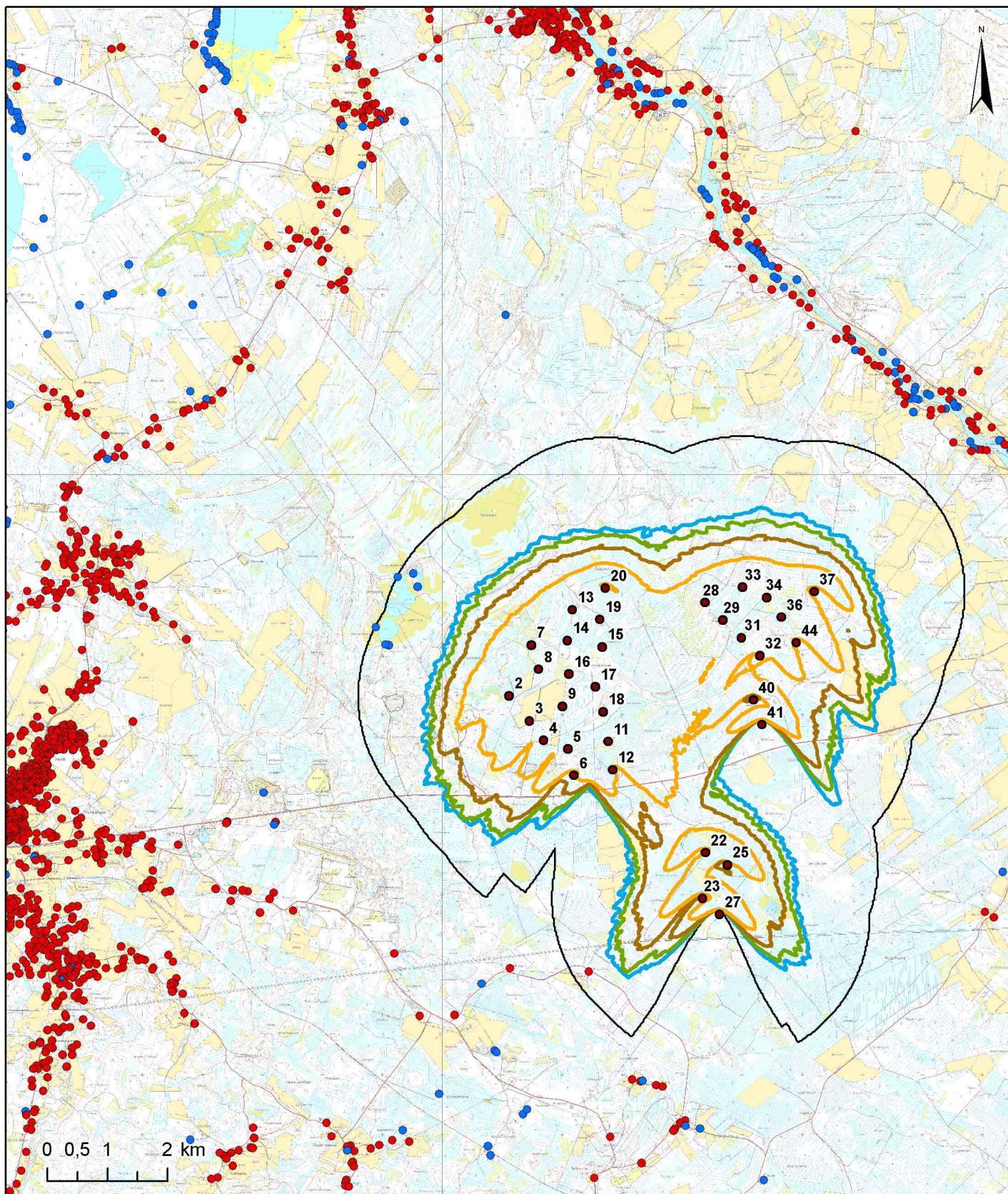
### LIITTEET

|         |                                                                                                 |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Liite 1 | Real Case -laskennalliset välkevyöhykkeet, Kangastuuli                                          |
| Liite 2 | Real Case -laskennalliset välkevyöhykkeet, yhteisvaikutukset                                    |
| Liite 3 | Kalenterit välkkeen mahdollisen esiintymisen ajankohdista reseptoripisteissä, Kangastuuli       |
| Liite 4 | Kalenterit välkkeen mahdollisen esiintymisen ajankohdista reseptoripisteissä, yhteisvaikutukset |

### LÄHTEET

1. Tuulivoimarakentamisen suunnittelu, Ympäristöhallinnon ohjeita 4/2012
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 2.9 User Manual
6. Ilmatieteen laitos, Tilastoja Suomen ilmastosta 1981–2010, Raportteja 2012:1
7. Suomen Tuuliatlas



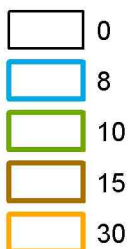


Element Power  
Kangastuuli, Siikajoki

Välkemallinnus (WindPro 2.9)

A.Ruhanen 16.8.2016

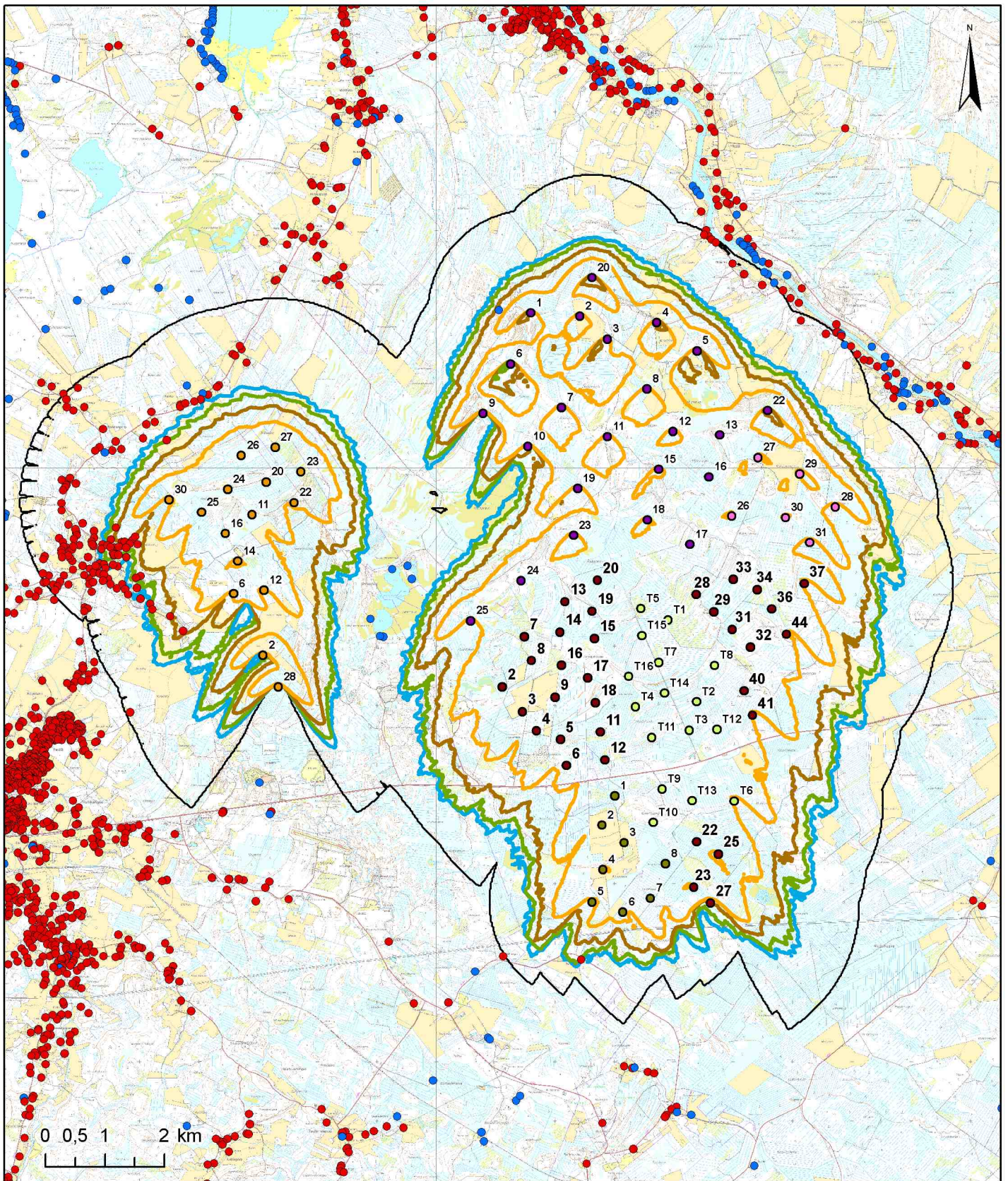
**Real Case -mallinnus**  
**Välketuntia vuodessa**



- Kangastuuli: 2.6.2016 / HH 160 m / roottori 140 m
- Asuinrakennus
- Lomarakennus

LIITE 1





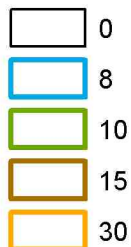
**RAMBOLL**

Element Power  
Kangastuuli, Siikajoki  
Yhteisvaikutukset

Välkemallinnus (WindPro 2.9)

D.Söderholm 16.8.2016

**Real Case -mallinnus  
Välketuntia vuodessa**

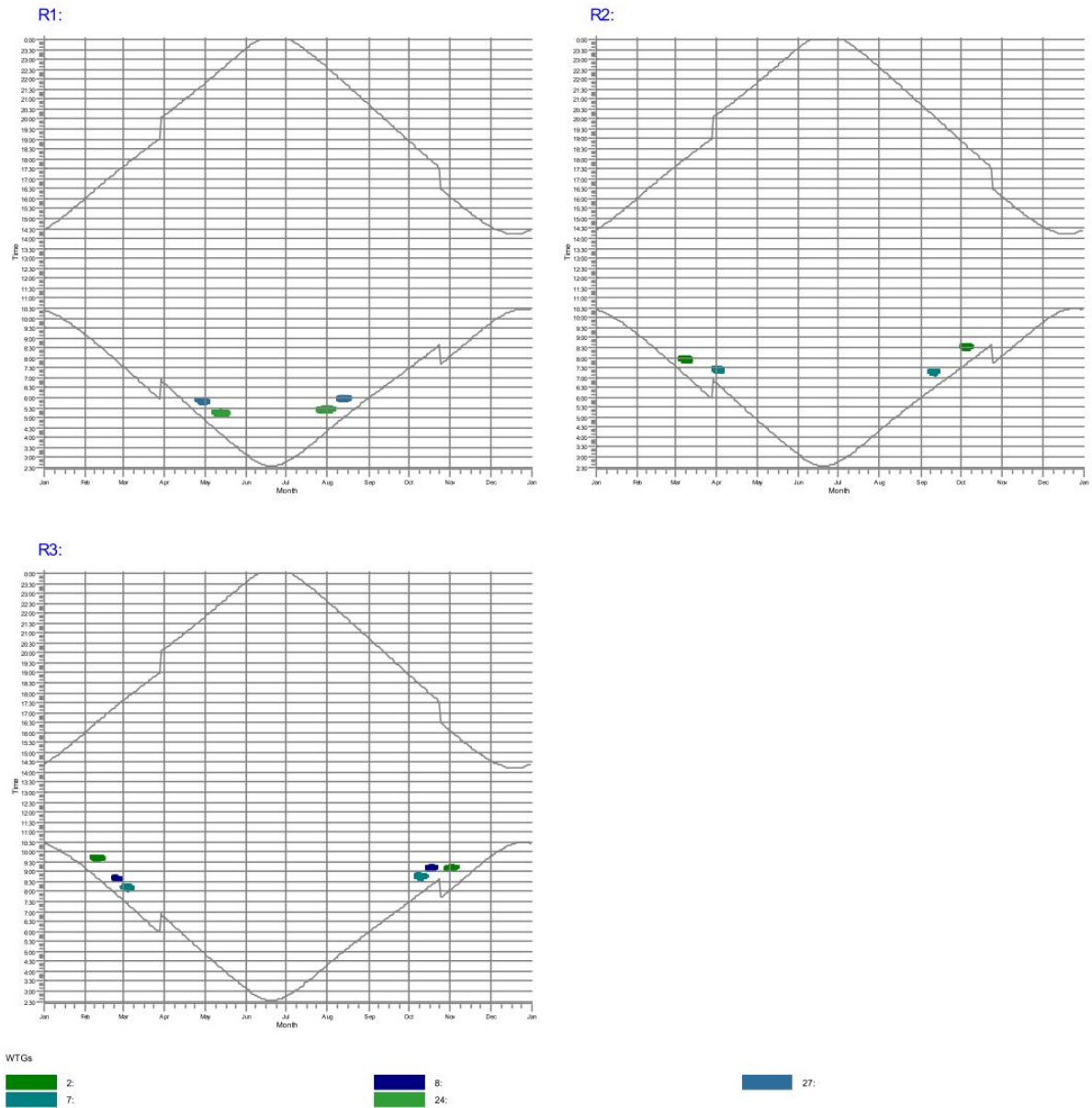


- Asuinrakennus
- Lomarakennus
- Kangastuuli: HH 160 m / roottori 140 m
- Karhukangas: HH 160 m / roottori 140 m
- Isoneva I: HH 114 m / roottori 131 m
- Isoneva II: HH 144 m / roottori 131 m
- Hummastinvaara: HH 123 m / roottori 136 m
- Navettakangas: HH 137 m / roottori 126 m

LIITE 2

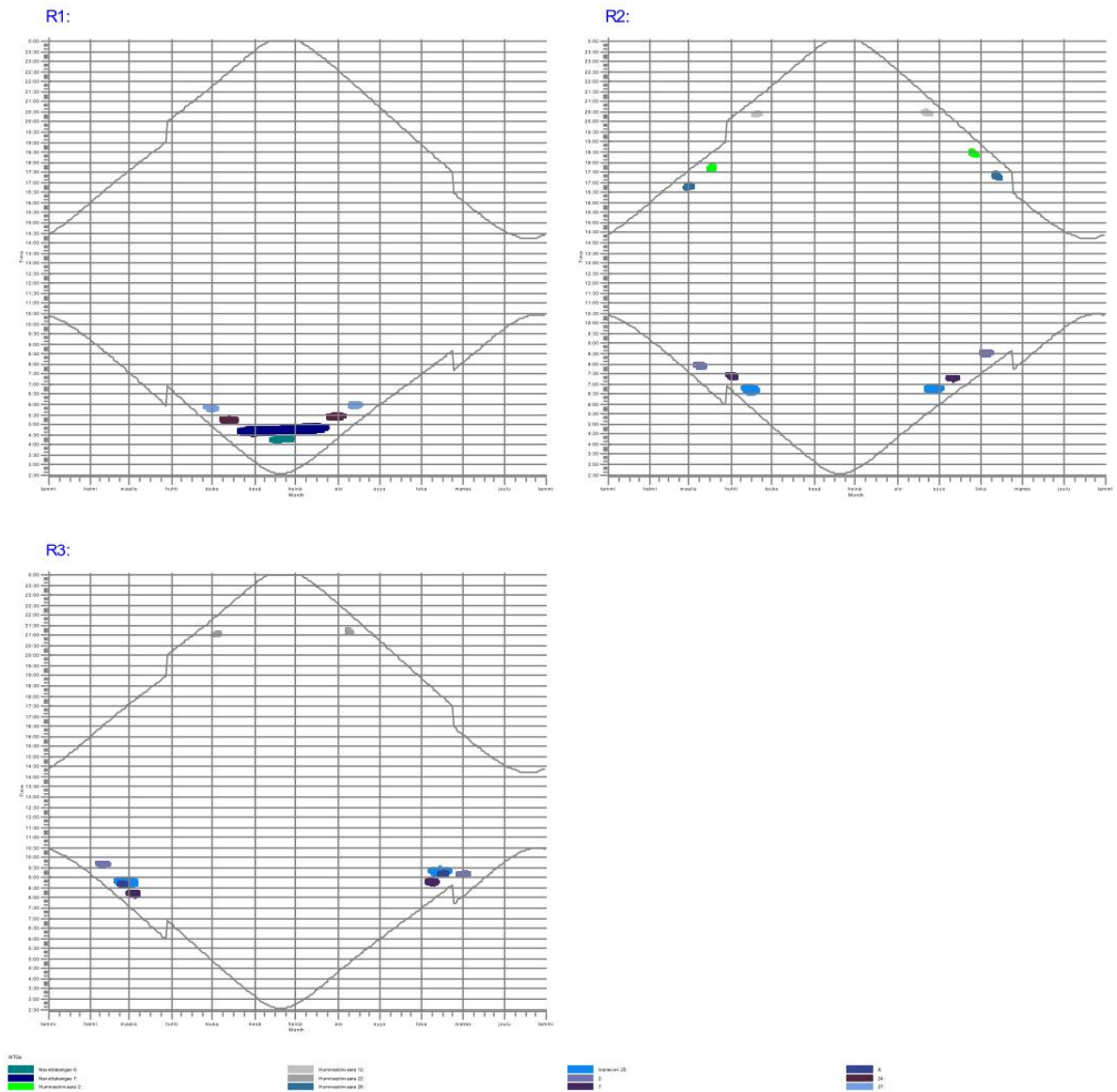


LIITE 3, AJANKOHTAKAAVIOT: KANGASTUULI



Vuoden- ja kellonajat, jolloin väkettä voi teoriassa esiintyä määritellyissä reseptoripisteissä. Kaavioissa ei ole otettu huomioon tuulettomia tai pilvisiä päiviä. Väkettä aiheuttavat voimat on esitetty eri väreillä.

#### LIITE 4, AJANKOHTAKAAVIOT: YHTEISMALLINNUS



Vuoden- ja kellonajat, jolloin väkettä voi teoriassa esiintyä määritellyissä reseptoripisteissä. Kaavioissa ei ole otettu huomioon tuulettomia tai pilvisiä päiviä. Väkettä aiheuttavat voimat on esitetty eri väreillä.