



# **Vindpark Ab Markjärv**

## Markjärven tuulivoimapuisto

Jäänheiton riskiarvio

15.09.2026

## YHTEYSTIEDOT

Asiakas:

**Vindpark Ab Markjärv**

Hannele Konsén

hannele.konsen@winda.fi

Laatija:

**AFRY Finland Oy**

Kalle Auvinen

kalle.auvinen@afry.com

Renewables & Energy Storage Development, Finland

[www.afry.com](http://www.afry.com)

Raportti:

Projektinumero: 101036955-001

Versio: 002

Raportin tila: VALMIS

Raporttihistoria:

| Versio | Pvm./Laatija                                          | Pvm./Tarkastaja                                   | Merkinnät/Muutokset             |
|--------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------|
| 001    | 10.09.2026/<br>Kalle Auvinen,<br>Technical Consultant | 10.09.2026/<br>Riku Suutari,<br>Senior Consultant | Alkuperäinen raportti           |
| 002    | 15.09.2026/<br>Kalle Auvinen,<br>Technical Consultant | 15.09.2026/<br>Riku Suutari,<br>Senior Consultant | Toimenpidesuositusten tarkennus |

### **Vastuuvapauslauseke**

Tämän dokumentin on tehnyt AFRY Finland Oy ("AFRY") ainoastaan Vindpark Ab Markjärven ("Asiakas") käyttöön. Hyväksymällä raportin toimituksen Asiakas hyväksyy nämä käyttöehdot.

Kaikki raportissa esitetyt tiedot ovat luottamuksellisia ja tarkoitettu yksinomaan Asiakkaan käyttöön. Tämän raportin käyttö muiden kuin Asiakkaan toimesta ja muuhun kuin Asiakkaan ja AFRYn välisessä sopimuksessa tarkoitettuun tarkoitukseen on kielletty ilman AFRYn ennalta kirjallisesti antamaa suostumusta. Raportti on laadittu noudattaen AFRYn ja Asiakkaan välisen sopimuksen ehtoja. AFRYn tähän raporttiin liittyvä tai siihen perustuva vastuu määräytyy yksinomaan kyseisten sopimusehtojen mukaisesti.

Raportin sisältämät tulkinnat ja johtopäätökset perustuvat osittain AFRYn kolmansielta osapuolilta tai ulkopuolisista lähteistä saamiin tietoihin. AFRY ei ole tarkistanut minkään kolmansielta osapuolilta tai ulkopuolisista lähteistä saadun ja raportin laatimiseen käytetyn tiedon oikeellisuutta tai täydellisyyttä, koska se ei ole kuulunut AFRYn toimeksiannon laajuuteen. AFRY ei anna raportin perusteella tai siihen liittyen mitään vakuutusta (nimenomaista tai konkludenttista) eikä vastaa sen mahdollisesti sisältävien kustannusarvioiden tai muiden arvioiden oikeellisuudesta.

AFRY ei vastaa kolmannelle osapuolelle tämän raportin käyttämisen tai siihen luottamisen perusteella aiheutuneesta haitasta taikka mistään välittömästä tai välillisestä vahingosta. AFRYn vastuu rajoittuu enintään raportista saatuihin palkkioihin.

## SISÄLTÖ

|                                                    |    |
|----------------------------------------------------|----|
| TIIVISTELMÄ.....                                   | 5  |
| 1 JOHDANTO.....                                    | 6  |
| 1.1 Taustaa .....                                  | 6  |
| 1.2 Hankealueen kuvaus .....                       | 6  |
| 1.3 Voimaloiden tekniset tiedot .....              | 7  |
| 1.4 Voimalasijoittelu .....                        | 7  |
| 1.5 Ilmasto-olosuhteet.....                        | 8  |
| 2 JÄÄTÄMINEN .....                                 | 9  |
| 2.1 Jäänheiton riski .....                         | 9  |
| 2.2 Jään muodostuminen .....                       | 9  |
| 2.3 Jäätämisen mallinnus .....                     | 10 |
| 3 RISKIARVIO .....                                 | 11 |
| 3.1 Riskitasot .....                               | 11 |
| 3.2 Todennäköisyyslaskennat .....                  | 12 |
| 4 JÄÄNHEITON RISKIN MALLINNUS .....                | 13 |
| 4.1 Lähtöoletukset .....                           | 13 |
| 4.1.1 Jäätämispäivien lukumäärä .....              | 13 |
| 4.1.2 Jäätämiskauden pituus .....                  | 13 |
| 4.1.3 Kohteiden pinta-ala .....                    | 13 |
| 4.1.4 Jääkappaleiden lukumäärä .....               | 13 |
| 4.1.5 Jäänpoistojärjestelmä .....                  | 13 |
| 4.2 Jään osumatodennäköisyys .....                 | 14 |
| 4.3 Tapausten todennäköisyydet .....               | 14 |
| 4.3.1 Yleiset riskit .....                         | 15 |
| 4.3.2 Liikkuvat kohteet .....                      | 16 |
| 4.3.3 Tieosuudet .....                             | 16 |
| 4.3.4 Pysyvät rakenteet .....                      | 17 |
| 4.4 Yhteenveto .....                               | 18 |
| 5 SUOSITUKSET .....                                | 19 |
| LIITTEET .....                                     | 20 |
| LIITE A1 SIJOITTELUKARTAT .....                    | 21 |
| LIITE A2 JÄÄN OSUMATODENNÄKÖISYYKSIEN KARTAT ..... | 22 |
| LIITE A3 ICETHROWER-TUTKIMUS .....                 | 25 |
| A3-1 Kuvaus.....                                   | 26 |
| A3-2 ICETHROWER-tutkimuksen tulokset .....         | 26 |

## TIIVISTELMÄ

AFRY on suorittanut tutkimuksen tuulivoimaloiden jäänheittoon liittyvästä riskistä Markjärven tuulivoimapuistolle. Tuulivoimapuiston hankealue sijaitsee Pohjanmaan maakunnassa, Suomessa. Alueen ilmasto on boreaalinen, ja kylmän jakson arvioidaan kestävän noin 182 päivää vuodessa. Jäätämispäivien vuotuiseksi lukumääräksi arvioitiin 26 päivää.

Tässä analyysissä käytetyn jäänheiton riskiarvion arviointimallin lähtöoletukset perustuvat Ruotsalaiseen ICETHROWER<sup>1</sup>-tutkimukseen, jossa kehitettiin työkalu jäänheiton todennäköisyyden arviointiin kolmen vuoden havaintoaineiston perusteella. Tässä arvioinnissa käytettyä työkalua on edelleen kehitetty ottamaan huomioon jäänheittoriskiin vaikuttavia tekijöitä, kuten turbiinien sijoittelu ja maaston korkeuserot.

Analyysissa lasketut kokonaisriskit ihmisille ja ajoneuvoille ovat vähäisiä. Mikäli alueella kuitenkin oleskelee ihmisryhmä pidemmän aikaa, vaarallisen jääiskun riskiä ei voida täysin sulkea pois. Erityisesti talviaikana turbiinin läheisyydessä työskentelevään henkilöstöön kohdistuu merkittävä riski. Riskiä voidaan pienentää ennakoivilla toimenpiteillä.

---

<sup>1</sup> ICETHROWER – mapping and tool for risk analysis, Swedish Energy Agency, 2017.

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Taustaa

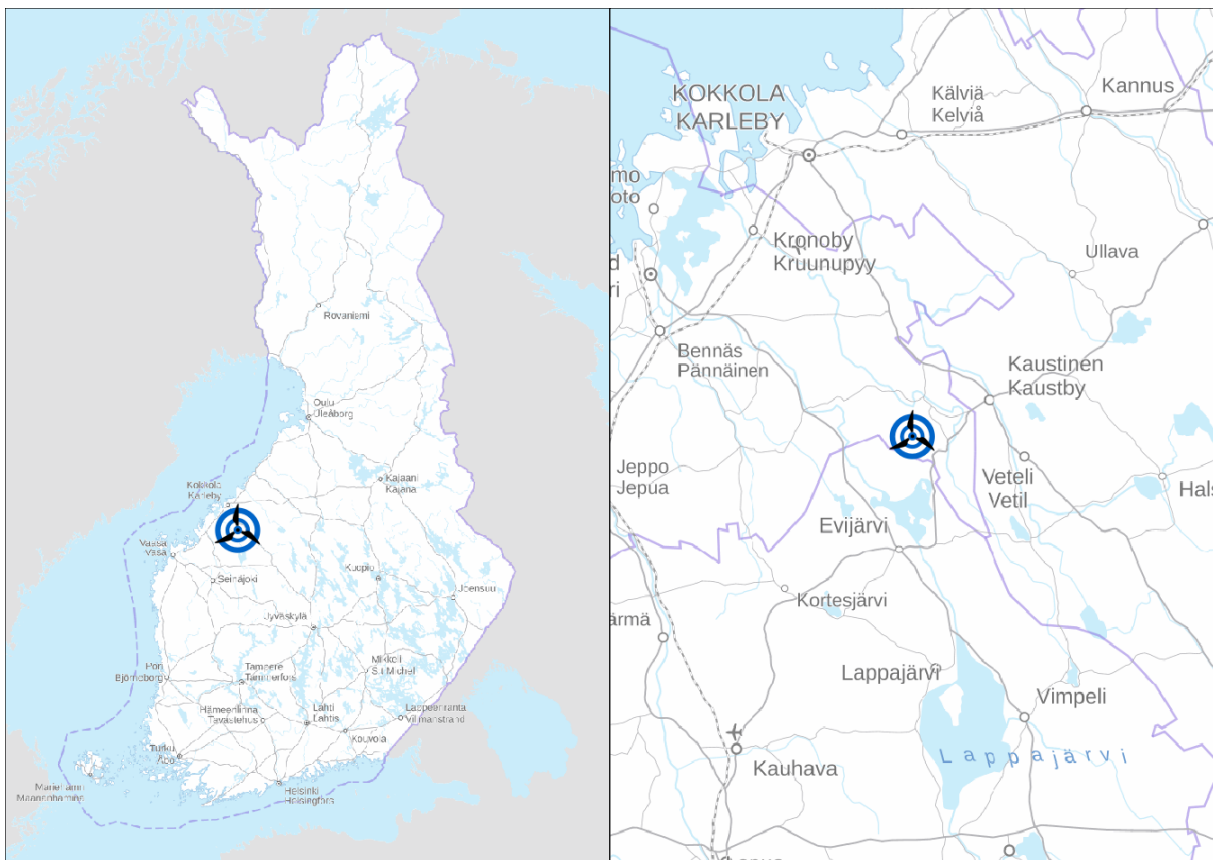
Vindpark Ab Markjärv ("Asiakas") suunnittelee Markjärven tuulivoimapuistoa Kruununpyynn kuntaan Pohjanmaan maakunnassa. Puistoon kuuluu kuusi voimalaa. Tuulivoimalat altistuvat todennäköisesti jäätävälle olosuhteille vuosittain, mikä aiheuttaa riskin henkilöstölle ja laitteille hankealueella.

AFRY on saanut tehtäväkseen laatia hankealueelle yksityiskohtaisen jäänheiton riskiarvion. Selvityksessä määritetään jään osumistodennäköisyyksiä ja jäänheiton vaaravyöhykkeitä voimaloiden ympäristössä erilaisilla skenaarioilla.

AFRYllä on laaja kokemus kylmien alueiden tuulivoimapaistojen jäänheiton riskiarvioista. Vuosina 2013–2016 AFRY (tuolloin Pöyry) johti ICETHROWER-kenttätutkimusta Ruotsissa. Tutkimusta kuvataan tarkemmin liitteessä A3. Tutkimuksen keskeisin tulos oli lähtöoletusten määrittäminen, joita käytetään jäänheiton todennäköisyyden laskentamallissa. Tutkimuksen tuloksia hyödynnetään tässä selvityksessä.

## 1.2 Hankealueen kuvaus

Tuulivoimapuisto sijaitsee Kruununpyyn kunnassa, noin 35 km Perämerestä sisämaahan. Maasto koostuu pääasiassa metsämaasta sekä ojitetusta suosta, ja sitä ympäröivät pienet järvet ja pellot. Voimaloiden perustamiskorkeudet ovat noin 63–73 m merenpinnan yläpuolella. Hankealueen sijainti kartalla on esitetty kuvassa (Kuva 1-1).



**Kuva 1-1: Markjärven tuulivoimapuiston sijainti kartalla.**

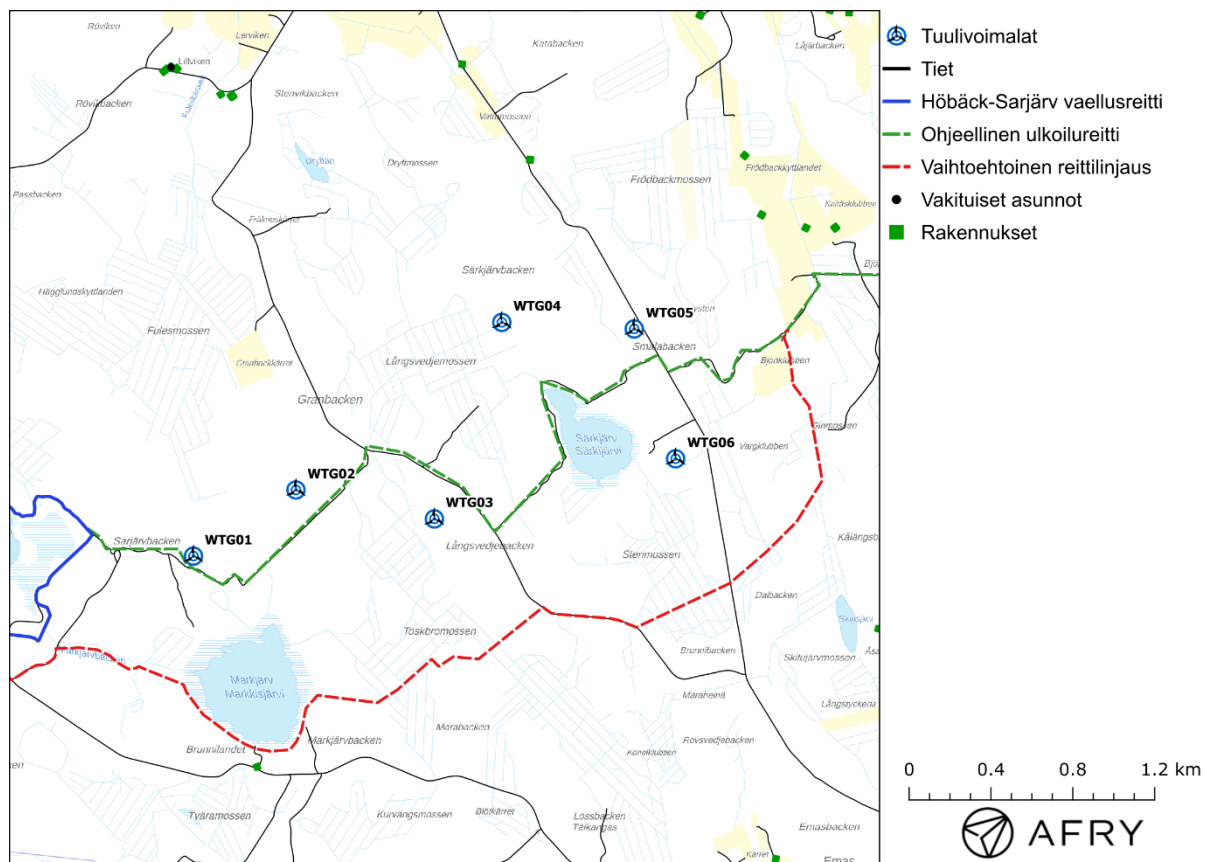
### 1.3 Voimaloiden tekniset tiedot

Laskennoissa voimaloille on käytetty roottorin halkaisijaa 200 m ja napakorkeutta 200 m. Voimaloiden väliset etäisyydet vaihtelevat 600 m ja 700 m välillä.

### 1.4 Voimalasijoittelu

Markjärven tuulivoimapuisto koostuu 6 tuulivoimalasta ja lähimmät asuinrakennukset sijaitsevat Maanmittauslaitoksen tietojen perusteella noin 1,8 km etäisyydellä lähimmistä voimaloista. Maanmittauslaitoksen maastotietokannan perusteella tuulivoimapuiston alueella ei sijaitse olemassa olevia asuinrakennuksia. Höbäck-Sarjärv vaellusreitti ohittaa tuulivoimapuiston sen länsipuolelta, käyden lähimmillään 500 m etäisyydellä voimalasta WTG01. Luontopolun lisäksi Pohjanmaan maakuntakaavaan merkitty ohjeellinen ulkoilureitti kulkee tuulivoimapuistoalueen läpi ja sivuaa kaikkia voimaloita etäisyyksien vaihdellessa noin 100 metristä 600 metriin. Asiakas on lisäksi toimittanut ohjeellisen ulkoilureitin vaihtoehtoisen reittilinjauksen, joka kulkee etäämpänä voimaloista. Edellä mainitut kohteet sekä maastotietokannassa esitetty olemassa oleva tieverkosto on esitetty karttapohjalla kuvassa (Kuva 1-2). Tuulivoimaloiden koordinaatit on annettu taulukossa (Taulukko 1-1).

Muita tunnettuja tuulivoimapuistoja, vaellusreittejä tai kulkuväyliä, jotka tulisi ottaa huomioon jäänheiton riskiarvion kannalta ei ole tiedossa. Markjärven tuulivoimaloiden sijoittelu maastokartalla ja ilmakuvassa on esitetty liitteessä A1.



**Kuva 1-2: Tuulivoimaloiden sijainnit Markjärven hankealueella. Karttapohjalla on esitetty myös Höbäck-Sarjärv vaellusreitti, ohjeellinen ulkoilureitti sekä maastotietokantaan pohjautuvat olemassa oleva tieverkosto, asuinrakennukset ja rakennukset.**

**Taulukko 1-1: Tuulivoimaloiden (6 kpl) sijaintikoordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja maaston korkeus tuulivoimalan paikalla**

| Tuulivoimalat | E      | N       | Maaston korkeus [m] |
|---------------|--------|---------|---------------------|
| WTG01         | 323615 | 7045416 | 68                  |
| WTG02         | 324117 | 7045739 | 67                  |
| WTG03         | 324794 | 7045597 | 71                  |
| WTG04         | 325123 | 7046558 | 69                  |
| WTG05         | 325771 | 7046526 | 73                  |
| WTG06         | 325973 | 7045891 | 63                  |

## 1.5 Ilmasto-olosuhteet

Tätä selvitystä varten ei ollut käytettävissä kohdealueella tehtyjä mittauksia, joten ilmasto-olosuhteet määritettiin EMD-WRF Europe+ (ERA5)<sup>2</sup> -referenssiaineiston perusteella 200 metrin korkeudelta. Alueen tuuliolosuhteiden määrittämiseen käytettiin tarkalleen 20 vuoden ajanjaksoa 1.1.2006–31.12.2025 kohdealueen keskipistettä lähimpänä sijaitsevasta hilapisteestä<sup>3</sup>. Tästä tuuliaineistosta määritettyjä tuulen suunta- ja nopeusjakaumia kylmän ajanjakson ajalta käytettiin jäänheiton riskiarvioiden laskennoissa.

AFRYn jäätämismalli tuottaa varovaisen arvion vuotuisesta keskimääräisestä jäätämispäivien lukumäärästä pitkällä aikavälillä. Jäätämismallin arvio perustuu kohdealueelta otettuun tuntikohtaiseen pitkäaikaiseen EMD-WRF Europe+ (ERA5) -referenssiaineistoon sekä tästä referenssiaineistosta johdettuihin jäätämismalliohjelmiin. Mallin kalibroinnissa on hyödynnetty useilta suomalaisilta tuulivoimapuistoilta mitattuja jäätämistapahtumia koskevia havaintoaineistoja. Voidaan olettaa, että jäätämisolosuhteet ovat keskimäärin samankaltaiset kaikilla tuulivoimapuiston voimaloilla ja että jäätämistä tapahtuu samanaikaisesti kaikilla voimaloilla.

AFRYn jäätämismallinnuksen mukaan hankealueelle on odotettavissa vuosittain keskimäärin 26 jäätämispäivää. Tämä tarkoittaa, että jäätä voi kertyä ja pudota voimaloista keskimäärin 26 päivänä vuoden aikana. Alue kuuluu boreaaliseen ilmastovyöhykkeeseen, ja referenssiaineiston perusteella jäätämistapahtumia havaitaan alueella pääasiassa loka-kuun ja maaliskuun välisenä aikana. Jäätämispäivien lukumäärä on alueelle tyypillinen.

<sup>2</sup> [https://help.emd.dk/mediawiki/index.php/EMD-WRF\\_Europe%2B\\_\(ERA5\)](https://help.emd.dk/mediawiki/index.php/EMD-WRF_Europe%2B_(ERA5)) (linkki otettu 2026-09-01)

<sup>3</sup> Hilapisteen koordinaatit WGS84-koordinaattijärjestelmässä: E 23.474, N 63.498

## 2 JÄÄTÄMINEN

### 2.1 Jäänheiton riski

Jäätäminen on tärkeä huomioitava tekijä, kun operoidaan tuulivoimaloita kylmän ilmaston alueilla, ja se voi aiheuttaa merkittäviä tuotantotappioita sekä turvallisuusriskejä henkilökunnalle ja laitteille tuulivoimaloiden läheisyydessä. Ilmassa olevat nestemäiset vesipisarat voivat aiheuttaa merkittävää jään kertymistä rakenteisiin<sup>4</sup>. Jäätäminen on yleisintä kylmissä ilmastoissa, mutta sitä voi tapahtua tietyissä olosuhteissa muuallakin esimerkiksi jäätävän sateen aikana. Jään kertyminen on voimakkainta lämpötilan ollessa -6 °C ja 0 °C välillä matalalla olevien pilvien ympäröidessä tuulivoimalan lapoja.

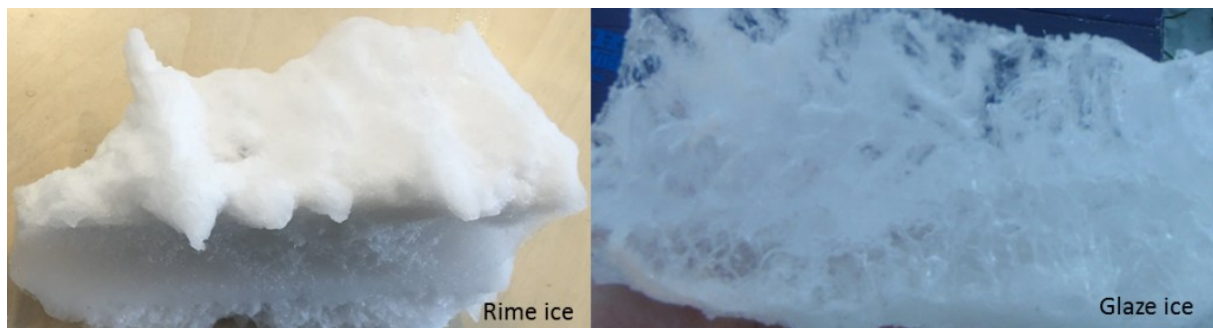
Lunta ja jäätä voi mahdollisuuksien mukaan kertyä minkä tahansa liikkuvan tai paikallaan olevan rakenteen pinnalle, jos lämpötila on riittävän matala ja ilmankosteus riittävän korkea. Tuulivoimalat ovat alttiita lumen ja jään kertymiselle kaikkiin rakenneosiin. Voimalan torniin ja naselliin kertyvä jää putoaa useimmiten lähelle voimalaa, mutta lapoihin kertyvä jää voi tietyissä olosuhteissa sinkoutua pyörivästä roottorista ja iskeytyä maahan kauempana voimalasta<sup>5</sup>. Jo 100 grammaa painava, kooltaan suunnilleen mandariinia vastaava tiivis jääkappale voi olla ihmiseen osuessaan hengenvaarallinen.

Suurimmat ongelmat jään kertymisessä tuulivoimaloihin ovat tuotantotappiot, jäänheitto, suuremmat huoltokustannukset sekä pienentynyt voimaloiden tekninen käyttöikä. Tässä arvioinnissa tarkastellaan erityisesti tuulipuistoalueella ihmisille ja laitteille aiheutuvia riskejä.

### 2.2 Jään muodostuminen

Jään muodostuminen tuulivoimaloihin tapahtuu eri tavoin riippuen meteorologisista olosuhteista ja siitä, onko voimala toiminnassa vai ei. Jään muodostumiseksi tarvitaan alijäähtyneitä vesipisaroita, joten lämpötilan on oltava nollan tuntumassa tai hieman sen alapuolella ja ilmassa on oltava kosteutta.

Tuulivoimaloiden kannalta merkityksellinen jäätäminen voidaan jakaa kahteen eri luokkaan: pilvijäätämiseen ja sateeseen perustuvaan jäätämiseen (esim. jäätävä sade, tiheys sade, lumi). Tuulivoimaloille tärkeimpiä jäätyyppejä on kolme: huurrejää, kirkas jää ja märkä lumi<sup>6</sup>. Kuvassa (Kuva 2-1) nähdään esimerkkejä eri jäätyyppien jääkappaleista ICETHROWER-projektista.



**Kuva 2-1: Esimerkit huurrejästä (vasemmalla) ja kirkkaasta jästä (oikealla).**

<sup>4</sup> L. Makkonen, "Models for the growth of rime, icicles and wet snow on structures," *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, p. 358, 2000.

<sup>5</sup> K. Ingvaldsen, "Atmospheric icing in a changing climate," *University of Oslo*, 2017.

<sup>6</sup> Ian Baring-Gould et al., "13. Wind energy projects in cold climates," International Energy Agency, 2011.

Huurrejää muodostuu alijäähtyneistä vesipisaroista, jotka ovat syntyneet sumussa tai pilvissä ja jotka jäätyvät heti osuessaan kiinteään materiaaliin. Voimakkainta huurrejäätämistä esiintyy paljailla harjanteilla, joihin nousee kosteaa ilmaa. Huurrejää on valkoista tai sameaa ja sitä kertyy epätasaisesti tuulivoimaloiden pyörivien lapojen etureunaan.

Kirkas jää muodostaa tasaisen, läpinäkyvän ja tasalaatuisen kovan jääkerroksen, tihku- tai vesisateen jäätyessä pinnoille. Sitä muodostuu usein nollassa asteessa tai hieman sen alapuolella<sup>7</sup>.

Märkää lunta kertyy rakenteisiin, kun kostea lumi tarrautuu kiinteille pinnoille lämpötilan ollessa juuri nollan yläpuolella. Jos lämpötila tämän jälkeen putoaa nollan alapuolelle, märkä lumi voi jäätymä materiaalin pintaan<sup>7</sup>.

Alueilla, joilla esiintyy tarpeeksi auringon säteilyä myös talvikuukausina, jää saattaa sulaa melko lyhyessä ajassa sen muodostumisen jälkeen. Toisaalta pohjoisilla alueilla, joilla auringon säteilyä on talvella vähän ja lämpötilat ovat alhaisia, jää saattaa pysyä materiaalien pinnoissa pitkän aikaa sen muodostumisen jälkeen.

Jää irtoaa paikallaan olevista rakenteista pääasiassa silloin, kun lämpötila kohoaa ja jää alkaa sulaa, mutta irtoamista voi myös tapahtua tuulen nopeuden kasvaessa tai sateen vaikutuksesta. Irtoamisen jälkeen jääkappale voi kulkeutua tuulen mukana kauemmas voimalasta ennen osumistaan maahan. Pyörivien rakenteiden kuten tuulivoimaloiden lapojen jäätäminen taas on monimutkaisempi ilmiö. Koska jään kertyminen riippuu ilmassa suhteellisesta nopeudesta verrattuna kiinteään pintaan, tuulivoimalan lapojen päihin kertyy jäätä enemmän kuin muihin osiin. Lisäksi lapojen pyöriminen voi antaa jääkappaleelle suuremman alkunopeuden, kun se irtoaa lavasta.

## 2.3 Jäätämisen mallinnus

Tässä selvityksessä käytetään AFRYn jäätämismallia tutkittavan tuulivoimapuiston keskimääräisen vuosittaisen jäätämispäivien lukumäärän arvioimiseksi. AFRYn jäätämismalli perustuu jään muodostumisen fysikaalisiin periaatteisiin, jotka riippuvat erilaisista sääolosuhteista sekä tuulivoimapuiston ominaisuuksista. Mallin toimivuutta on validoitu useiden suomalaisten tuulipuistojen historiallisilla SCADA-järjestelmän käyttötiedoilla.

Jäätämismallia voidaan hyödyntää vuotuisen jäätämistiheyden määrittämiseen käyttämällä jään muodostumisen kannalta olennaisia sääreferenssiaineistoja. Näin voidaan arvioida, kuinka usein jäätämistä keskimäärin esiintyy tarkasteltavalla alueella vuosittain.

---

<sup>7</sup> Ian Baring-Gould et al., "13. Wind energy projects in cold climates," International Energy Agency, 2011.

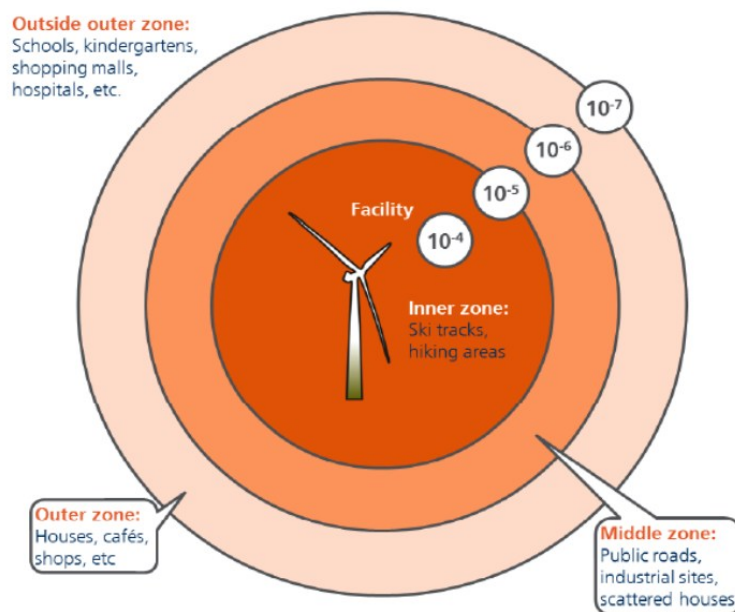
### 3 RISKIARVIO

#### 3.1 Riskitasot

Yleisesti ottaen yhteiskunnassa hyväksytään työhön, liikenteeseen tai muihin aktiviteetteihin liittyvät riskit, joiden seurauksena voi aiheutua vakavia vammoja tai jopa kuolema. Yleisellä tasolla voidaan olettaa, että jos tapahtuman riski ylittää tason  $10^{-5}$ , eli 1 tapauksen 100 000:ta kohden, riskiä ei voida pitää hyväksyttävänä, mikäli tapahtuma voi aiheuttaa vakavan vamman, kuoleman tai suurta vahinkoa omaisuudelle. Edellä mainittu riskitaso vastaa suuruusluokaltaan hengenvaarallisen liikenneonnettomuuden todennäköisyyttä. Kyseistä riskitasoa sovelletaan, jos henkilö tai omaisuus on itse aktiivisessa roolissa vaikuttamassa riskiin, kun taas passiivisen roolin tapauksessa hyväksyttävä riskitaso on huomattavasti alhaisempi.

Mandariinin kokoinen jääkappale voi osuessaan aiheuttaa yli 40 J:n energian, joka on hengenvaarallinen osuessaan ihmistä päähän. Yli 1 kg painavat jääkappaleet taas voivat aiheuttaa suurta vahinkoa esimerkiksi autoille tai vain kevyesti suojatuille omaisuudelle.

Kansainvälisen energijärjestön (IEA) suosituksissa<sup>8</sup> on esitetty kaavio, jossa ehdotetaan tuulivoimaloiden läheisyydessä hyväksyttäviä riskitasoja. Kyseinen kaavio on esitetty kuvassa (Kuva 3-1).



**Kuva 3-1: Ohjeistus hyväksyttävistä vakavan tai hengenvaarallisen vahingon riskitasoista tuulivoimalan läheisyydessä. Sisin taso: hiihtoladut, vaellusreitit; keskitaso: julkiset tiet, teollisuusalueet, haja-asutus; ulkotaso: talot, kahvilat, kaupat jne. ja ulkotason ulkopuoli: koulut, päiväkodit, kauppakeskukset, sairaalat jne.**

Kansainvälisiä riskitasosuosituksia voidaan käyttää ohjeellisena työkaluna arvioitaessa ihmisille, esineille tai rakenteille aiheutuvien riskien hyväksyttävyyttä tuulivoimapuiston alueella. AFRYn suositukset eri riskitasoihin liittyvistä toimenpiteistä on esitetty taulukossa (Taulukko 3-1).

<sup>8</sup> Andreas Krenn et al., "IEA Wind TCP Task 19, Technical Report - International Recommendations for Ice Fall and Ice Throw Risk Assessments," IEA Wind, 2022.

**Taulukko 3-1: AFRYn toimenpidesuosituksat eri riskitasoille kansainvälisten hyväksyttävää riskitasoa koskevien suositusten perusteella.**

| Riskitaso  | Toimintatapa                                                   |
|------------|----------------------------------------------------------------|
| $>10^{-4}$ | Alueelle pääsyä rajoitetaan tai sovelletaan suojatoimenpiteitä |
| $>10^{-5}$ | Alueelle pääsyä rajoitetaan                                    |
| $>10^{-6}$ | Riskitekijöistä tiedotetaan                                    |

### 3.2 Todennäköisyyslaskennat

Jäätämispäivien lukumäärää sekä jäätämiskauden pituutta koskevat oletukset johtavat erilaisiin todennäköisyyden arviointimenetelmiin riippuen altistuvan kohteen käyttäytymisestä. Tieto jäätämispäivästä vaikuttaa sen esiintymistodennäköisyyteen ja siten riskiin. Riski  $R$  lasketaan kaavalla:

$$R = p_i \cdot p_h \cdot A$$

missä:

- $p_i$  = jäätämispäivän todennäköisyys,
- $p_h$  = todennäköisyys, että jääkappale osuu kohteeseen, ja
- $A$  = altistuvan kohteen projisoitu pinta-ala.

Kohteen projisoitu pinta-ala riippuu jääkappaleen tulosuunnasta.

Jos on viitteitä, että jäätä on kertynyt voimaloihin, silloin  $p_i = 1$ . Tätä voidaan soveltaa esimerkiksi huoltohenkilökunnan saapuessa tuulivoimapuiston alueelle. Jos taas ei tiedetä, onko voimaloihin kertynyt jäätä:

$$p_i = \frac{n_i}{n_s}$$

missä:

- $n_i$  = jäätämispäivien lukumäärä, ja
- $n_s$  = jäätämiskauden pituus.

Jäätämiskauden ulkopuolella voidaan olettaa, ettei jäätämispäiviä esiinny.

Mikäli voimaloiden läheisyydessä on pysyviä rakenteita tai siellä oleskellaan pidemmän aikaa, todennäköisyys jääkappaleen osumalle kasvaa. Todennäköisyys jääkappaleen osumisesta pysyvään rakenteeseen jäätämiskauden aikana voidaan laskea kaavalla:

$$R = n_i \cdot n_e \cdot p_h \cdot A$$

missä:

- $n_i$  = jäätämispäivien vuotuinen lukumäärä,
- $n_e$  = jääkappaleiden lukumäärä jäätämispäivän aikana,
- $p_h$  = todennäköisyys, että jääkappale osuu kohteeseen, ja
- $A$  = altistuvan kohteen projisoitu pinta-ala.

Mikäli lasketaan jääkappaleen osuman todennäköisyyttä suurikokoiseen pysyvään rakenteeseen kuten esimerkiksi aurinkopaneeliin, edellä esitetty kaava voidaan kirjoittaa muotoon:

$$R = n_i \cdot n_e \cdot p_a \cdot r_1 \cdot r_2$$

missä:

- $p_a$  = todennäköisyys jääkappaleen osumiselle pysyvän rakenteen alueelle,
- $r_1$  = pysyvien kappaleiden osuus alueella, ja
- $r_2$  = pysyvien kappaleiden projisoidun pinta-alan osuus horisontaalista pinta-alasta.

## 4 JÄÄNHEITON RISKIN MALLINNUS

### 4.1 Lähtöoletukset

#### 4.1.1 Jäätämispäivien lukumäärä

Jäätämispäivien vuosittaista lukumäärää arvioitiin käyttäen AFRYn jäätämismallia. Jäätämismallinnuksen perusteella hankealueelle on odotettavissa vuosittain keskimäärin 26 jäätämispäivää, jotka vaikuttavat jäänheiton riskiin.

#### 4.1.2 Jäätämiskauden pituus

Kappaleessa 1.5 kerrottiin, että jäätämistapahtumia havaitaan alueella pääasiassa loka-kuun ja maaliskuun välisenä aikana. Näin ollen jäätämiskauden pituudeksi oletetaan 182 päivää, kattaen ajanjakson lokakuun alusta maaliskuun loppuun.

#### 4.1.3 Kohteiden pinta-ala

Yleisiä riskiarvioita varten oletetaan, että yksittäisen ihmisen projisoitu pinta-ala on  $0,2 \text{ m}^2$  ja ajoneuvon projisoitu pinta-ala on  $10 \text{ m}^2$ .

#### 4.1.4 Jääkappaleiden lukumäärä

Jääkappaleiden lukumäärää voidaan arvioida ICETHROWER-tutkimuksen tulosten sekä IEA:n kansainvälisten suositusten perusteella. ICETHROWER-tutkimuksen mukaan yksittäisestä tuulivoimalasta voi jäätämispäivän aikana pudota keskimäärin 50 jääkappaletta. Aiemmin arvioidun jäätämispäivien lukumäärän perusteella tämä vastaa noin 1300 jääkappaletta tuulivoimalaa kohden vuodessa.

AFRYn jäätämismallin mukaan kohdealue voidaan luokitella IEA:n jäätämisluokkaan 2 (Icing Class 2), mikä vastaa keskimäärin 1200 jääkappaletta tuulivoimalaa kohden vuodessa. Näin ollen arviota 1300 jääkappaleesta tuulivoimalaa kohden vuodessa voidaan pitää perusteltuna ja realistisena.

#### 4.1.5 Jäänpoistojärjestelmä

Tässä selvityksessä jäänpoistojärjestelmiä ei oteta huomioon vuotuisten jäätämispäivien lukumäärää arvioitaessa. Jäätämispäivien lukumäärä vaikuttaa suoraan jäätämistapahtuman todennäköisyyteen,  $p_i$ , kappaleessa 3.2 esitetyn yhtälön mukaisesti. Lapojen lämmitysjärjestelmien tarkoituksena on vähentää jäätämisen aiheuttamia tuotantotappioita, mutta ne eivät välttämättä vähennä jäätämispäivien lukumäärää samassa suhteessa. Jäänheiton riski on olemassa myös vähäisempien jäätämistapahtumien aikana, joten joidenkin jäätämistapahtumien osalta riskitaso voi säilyä ennallaan. Toisaalta jäänpoistojärjestelmät voivat nopeuttaa jään irtoamista voimaloista, mahdollisesti lyhentäen jäätämistapahtuman kestoa.

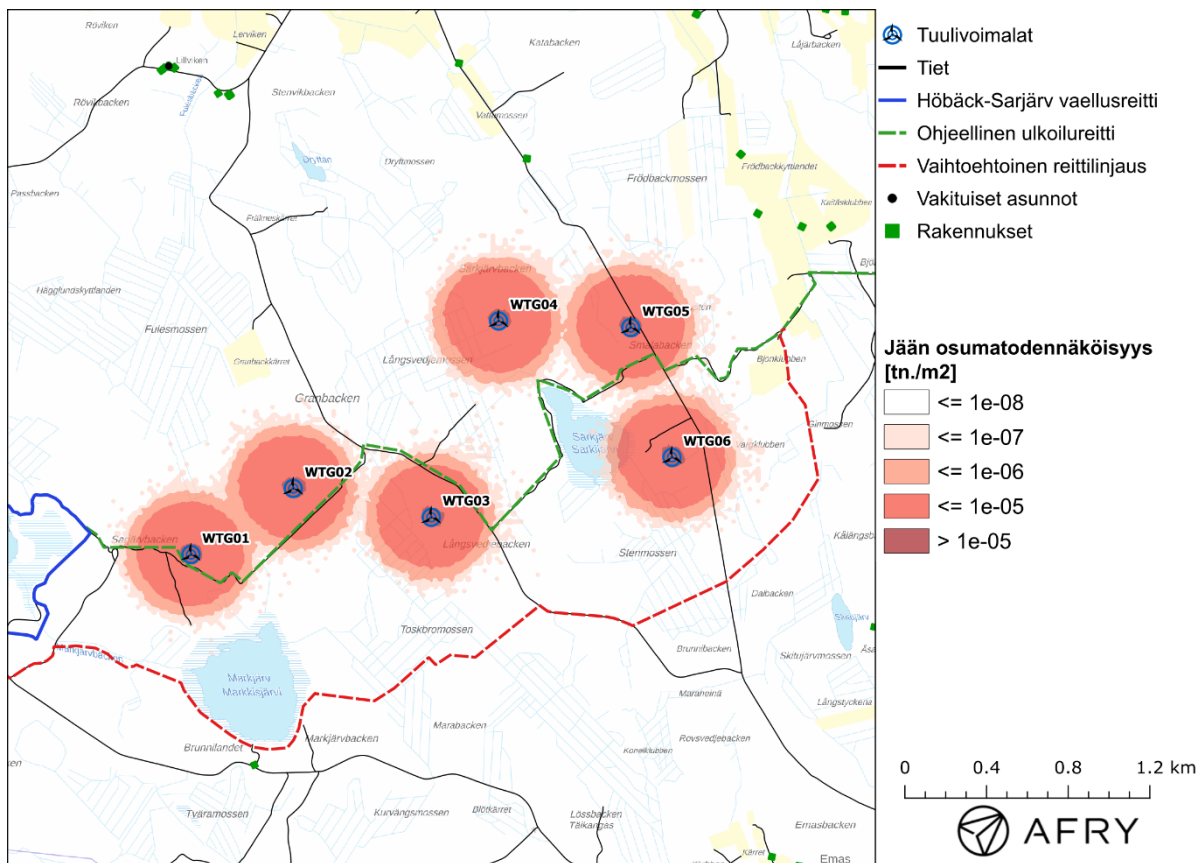
On huomioitavaa, että laipojen lämmitysjärjestelmät vähentävät jäätä ainoastaan voimaloiden lavoista, joten voimalan muihin osiin liittyvät riskit säilyvät ennallaan. Voidaan kuitenkin olettaa, että jäänpoistojärjestelmät saattavat estää osan jäätämistapahtumista kokonaan, mikä vähentää jäätämispäivään liittyviä riskejä. Jäänpoistojärjestelmät pienentävät riskejä erityisesti tilanteissa, joissa ei tiedetä, onko voimaloihin kertynyt jäätä.

Lisäksi laipojen lämmitysjärjestelmien voidaan olettaa pienentävän voimalan lavoista puotavien jääkappaleiden keskimääräistä kokoa. Tämä voi vähentää hengenvaarallisten jäänheittojen lukumäärää sekä lyhentää jääkappaleiden kulkeutumismatkaa, sillä kaikkein

pienimmät jääkappaleet putoavat yleensä lähelle voimalaa. IEA:n kansainvälisten suositusten mukaan jääkappaleiden vuotuinen lukumäärä voi olla hieman pienempi jäänestotai jäänpoistojärjestelmillä varustetuissa voimaloissa, mutta niiden kokonaisvaikutusta riskitasoon voidaan pitää vähäisenä.

## 4.2 Jään osumatodennäköisyys

Jäänheiton riskimallinnuksissa voimaloiden roottorin halkaisijana käytettiin 200 m ja napakorkeutena 200 m. Kuvassa (Kuva 4-1) esitetään tuulivoimaloiden sijainnit, kappaleessa 1.4 kuvatut hankealueella ja sen läheisyydessä sijaitsevat kohteet sekä jään osumatodennäköisyydet voimaloiden ympäristössä. Jään osumatodennäköisyyden eri vyöhykkeitä kutsutaan tässä selvityksessä myös riskivyöhykkeiksi. Jään osumatodennäköisyydet on esitetty neliometriä kohden. Se kuvaa todennäköisyyttä sille, että yksittäinen voimalasta irtaava jääkappale osuu kyseisen neliömetrin alueelle. Tarkemmat kuvat jään osumatodennäköisyyksille jokaisen voimalan ympärillä on annettu liitteessä A2.



**Kuva 4-1: Jään osumatodennäköisyydet hankealueella, kun mallinuksissa voimaloille on käytetty roottorin halkaisijaa 200 m ja napakorkeutta 200 m.**

## 4.3 Tapausten todennäköisyydet

Ihmiisiin ja liikkuviin kohteisiin kohdistuva riski riippuu siitä, tiedetäänkö, onko voimaloihin kertynyt jäätä voimaloita lähestyessä. Käyttäen oletusta 26 jäätämispäivästä vuoden aikana sekä jäätämiskauden pituutta 182 päivää, jäätämispäivän todennäköisyydeksi voidaan laskea:

$$p_i = \frac{26}{182} \approx 0.143$$

Kuvassa (Kuva 4-1) esitetyt todennäköisyysvyöhykkeet kuvaavat todennäköisyyttä, että yksittäinen voimalasta irtoava jääkappale osuu kyseisen neliömetrin alueelle. Siispä hyvin lyhyt oleskelu vaara-alueella pienentää jään osumatodennäköisyyttä verrattuna pitkään oleskeluun alueella. On kohtuullista olettaa, että jään kertyminen ja irtoaminen voi jatkua usean tunnin ajan, kunnes sääolosuhteet muuttuvat. Sisällyttämällä tarkasteluun aikaparametrin ja laskemalla tapauskohtaiset todennäköisyydet tarkastelujakson aikana tapahtuvien kaikkien jäänheittojen integraalina, voidaan arvioida riskitaso eripituisille oleskelujaksoille.

#### 4.3.1 Yleiset riskit

Jään osumisen riskitasoja tarkasteltiin seuraavissa tapauksissa:

1. Riski henkilöille, jotka oleskelevat hankealueella 1 tunnin ajan
2. Riski henkilöille, jotka oleskelevat hankealueella 12 tunnin ajan
3. Riski autoille, jotka oleskelevat hankealueella 1 tunnin ajan
4. Riski autoille, jotka oleskelevat hankealueella 12 tunnin ajan

Edellä kuvattujen tarkastelutapausten jään osumatodennäköisyydet on esitetty taulukoissa (Taulukko 4-2) ja (Taulukko 4-3). Eri riskitasoja vastaavat väriluokitukset on esitetty taulukossa (Taulukko 4-1).

**Taulukko 4-1: Eri riskitasoja kuvaavat väriluokitukset.**

|  |                                                                                  |
|--|----------------------------------------------------------------------------------|
|  | Hyväksyttävä taso ( $R < 10^{-6}$ )                                              |
|  | Riskitekijöistä tiedotetaan ( $10^{-6} < R < 10^{-5}$ )                          |
|  | Alueelle pääsyä rajoitetaan ( $10^{-5} < R < 10^{-4}$ )                          |
|  | Alueelle pääsyä rajoitetaan tai sovelletaan suojatoimenpiteitä ( $R > 10^{-4}$ ) |

**Taulukko 4-2: Jään osumatodennäköisyys ihmiseen oleskellessa eri riskivyöhykkeillä.**

| Ihminen, A = 0.2 m <sup>2</sup> |                           | Riskitaso (*10 <sup>-5</sup> ) |                    |                    |
|---------------------------------|---------------------------|--------------------------------|--------------------|--------------------|
| Riskivyöhyke                    |                           | < 10 <sup>-5</sup>             | < 10 <sup>-6</sup> | < 10 <sup>-7</sup> |
| 1 tunnin oleskelu               | Jäätämispäivä tiedossa    | < 0.417                        | < 0.042            | < 0.005            |
|                                 | Jäätämispäivä ei tiedossa | < 0.060                        | < 0.006            | < 0.001            |
| 12 tunnin oleskelu              | Jäätämispäivä tiedossa    | < 5.000                        | < 0.500            | < 0.050            |
|                                 | Jäätämispäivä ei tiedossa | < 0.715                        | < 0.072            | < 0.008            |

**Taulukko 4-3: Jään osumatodennäköisyys autoon oleskellessa eri riskivyöhykkeillä.**

| Auto, A = 10 m <sup>2</sup> |                           | Riskitaso (*10 <sup>-5</sup> ) |                    |                    |
|-----------------------------|---------------------------|--------------------------------|--------------------|--------------------|
| Riskivyöhyke                |                           | < 10 <sup>-5</sup>             | < 10 <sup>-6</sup> | < 10 <sup>-7</sup> |
| 1 tunnin oleskelu           | Jäätämispäivä tiedossa    | < 20.84                        | < 2.09             | < 0.21             |
|                             | Jäätämispäivä ei tiedossa | < 2.98                         | < 0.30             | < 0.03             |
| 12 tunnin oleskelu          | Jäätämispäivä tiedossa    | < 250.00                       | < 25.00            | < 2.50             |
|                             | Jäätämispäivä ei tiedossa | < 35.72                        | < 3.58             | < 0.36             |

#### 4.3.2 Liikkuvat kohteet

Jään osumisen riskitasoja liikkuvaan kohteeseen tarkasteltiin seuraavissa tapauksissa:

1. Riski henkilölle, joka kävelee voimalan ohi
2. Riski autolle, joka ajaa voimalan läheistä tietä

Olettaen, että henkilö kävelee tuulivoimalan läheisillä riskivyöhykkeillä 600 metrin matkan kävelynopeudella 5 km/h, hän viettää voimalan läheisyydessä hieman yli 7 minuuttia. Vastaavasti olettaen, että ajoneuvo ajaa tuulivoimalan ohi 600 metrin matkan nopeudella 30 km/h, ajoneuvon viipymä voimalan läheisyydessä on hieman yli 1 minuutti. Jään osumatodennäköisyydet edellä mainituissa tapauksissa on esitetty taulukossa (Taulukko 4-4). Eri riskitasoja vastaavat väriluokitukset on esitetty taulukossa (Taulukko 4-1).

**Taulukko 4-4: Jään osumatodennäköisyys liikkuvaan kohteeseen.**

| Liikkuva kohde                              |                           | Riskitaso (*10 <sup>-5</sup> ) |                    |                    |
|---------------------------------------------|---------------------------|--------------------------------|--------------------|--------------------|
| Riskivyöhyke                                |                           | < 10 <sup>-5</sup>             | < 10 <sup>-6</sup> | < 10 <sup>-7</sup> |
| Kävelevä henkilö,<br>A = 0.2 m <sup>2</sup> | Jäätämispäivä ei tiedossa | < 0.008                        | < 0.001            | < 0.001            |
| Ajava auto,<br>A = 10 m <sup>2</sup>        | Jäätämispäivä ei tiedossa | < 0.060                        | < 0.006            | < 0.001            |

#### 4.3.3 Tieosuudet

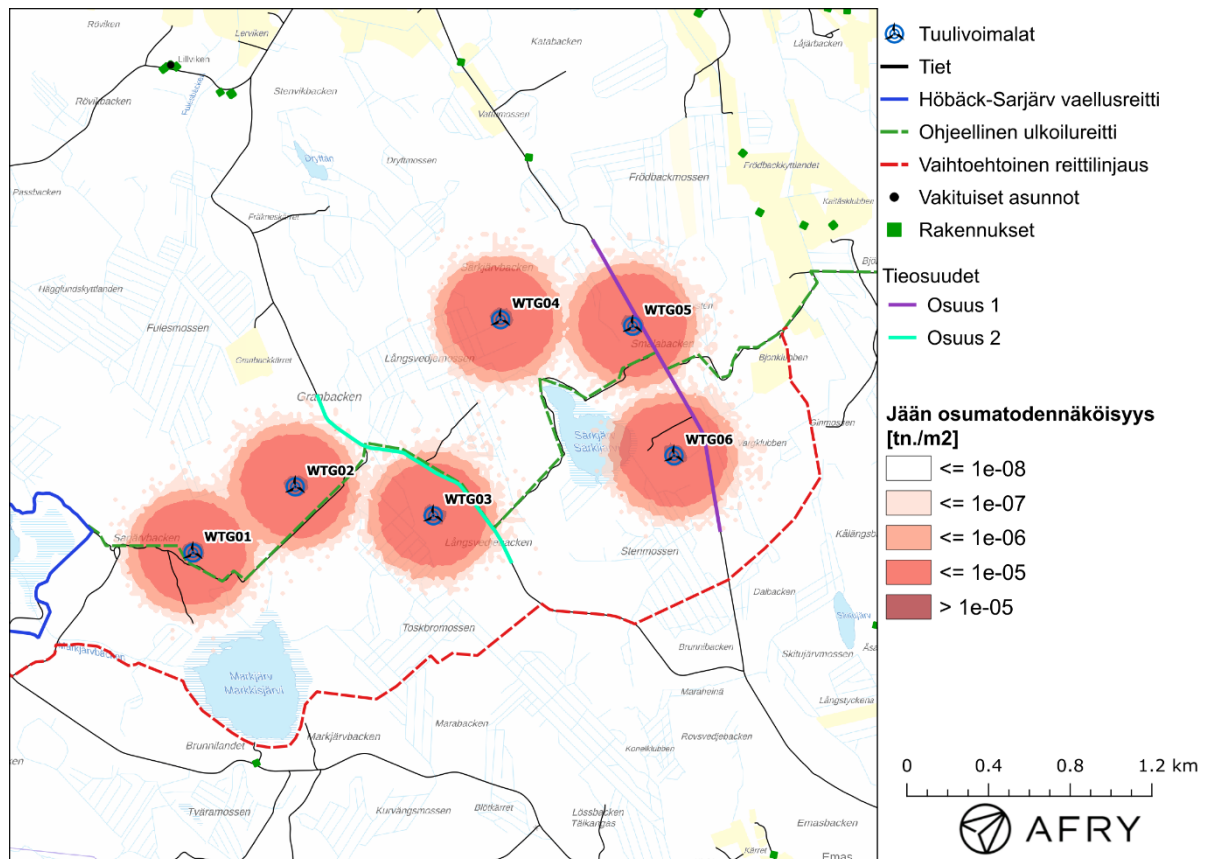
Hankealueella sijaitsee erityisesti kaksi tieosuutta, jotka kulkevat riskivyöhykkeiden alueella hankealeen läpi ajettaessa. Tarkasteltavat tieosuudet ovat esitetty kuvassa (Kuva 4-2). Jään osumatodennäköisyyttä tieosuuksien läpi ajettaessa on tarkasteltu seuraavissa tapauksissa:

1. Jään osumatodennäköisyys autolle ajettaessa kerran tieosuuden läpi, kun jäätämispäivä ei ole tiedossa.
2. Jään osumatodennäköisyys autolle yhden jäätämiskauden aikana, kun tieosuuden läpi ajetaan 10 kertaa päivässä.

Jään osumatodennäköisyyksien laskentaan käytetyt lähtötiedot on esitetty taulukossa (Taulukko 4-5) sekä lasketut jään osumatodennäköisyyden molemmissa tilanteissa on esitetty taulukossa (Taulukko 4-6). Eri riskitasoja vastaavat väriluokitukset on esitetty taulukossa (Taulukko 4-1).

**Taulukko 4-5: Käytetyt lähtötiedot tieosuuksien jään osumatodennäköisyyksien laskennassa.**

| Tieosuudet                                            | Osuus 1                | Osuus 2                |
|-------------------------------------------------------|------------------------|------------------------|
| Tieosuuden pituus                                     | 1570 m                 | 1320 m                 |
| Ajonopeus                                             | 30 km/h                | 30 km/h                |
| Tieosuudella vietetty aika                            | 3,1 min                | 2,6 min                |
| Keskimääräinen irtoavan jään osumisriski tieosuudella | 3,384*10 <sup>-6</sup> | 1,233*10 <sup>-6</sup> |
| Ajoneuvon pinta-ala                                   | 10 m <sup>2</sup>      | 10 m <sup>2</sup>      |



**Kuva 4-2: Jään osumatodennäköisyyksien tarkastelussa käytetyt tieosuudet.**

**Taulukko 4-6: Jään osumatodennäköisyys tieosuuksilla eri tarkastelutilanteissa.**

| Tieosuudet                                                    | Osuus 1               | Osuus 2               |
|---------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Riski kerran ajettaessa, jäätämispäivä ei tiedossa            | $0.053 \cdot 10^{-5}$ | $0.016 \cdot 10^{-5}$ |
| Riski ajettaessa 10 kertaa päivässä yhden jäätämiskauden ajan | $95.92 \cdot 10^{-5}$ | $29.39 \cdot 10^{-5}$ |

#### 4.3.4 Pysyvät rakenteet

Jäänheiton riskivyyhykkeet Markjärven tuulivoimapuistossa ulottuvat noin 450 metrin etäisyydelle tuulivoimaloista, ja etäisimmät yksittäiset osumapisteet sijaitsevat noin 600 metrin etäisyydellä voimaloista. Tätä kauempana jään osumatodennäköisyys neliometriä kohden on alle  $10^{-8}$ , jolloin aluetta voidaan jäänheittoriskin näkökulmasta pitää turvallisena tavanomaiselle käytölle. Vaikka osa Höbäck-Sarjärvi vaellusreitti sijaitsee jäänheittoriskialueella, jäänheittomallinnuksen tulosten perusteella jään osumatodennäköisyys on reitin kaikissa kohdissa alle  $10^{-8}$  neliometriä kohden. Tämän vuoksi reitille ei arvioida kohdistuvan merkittävää jään osumariskiä.

Asiakkaan toimittama vaihtoehtoinen reittilinjaus maakuntakaavassa esitetyille ohjeelliselle ulkoilureitille kulkee jäänheittoriskialueen ulkopuolella reitin kaikissa pisteissä, eikä vaihtoehtoiselle reittilinjaukselle siten arvioida kohdistuvan merkittävää jään osumariskiä.

#### 4.4 Yhteenveto

Tässä riskiarvioinnissa jäänheiton todennäköisyyksiä mallinnettiin eri tilanteissa AFRYn jäänheittomallin sekä luvussa 4.1 esitettyjen lähtöoletusten avulla.

Taulukoissa (Taulukko 4-2) ja (Taulukko 4-3) esitettyjen tulosten perusteella voimaloiden läheisyydessä pitkiä aikoja oleskelua ei suositella tietyissä tilanteissa. Mikäli alueella tiedetään olevan käynnissä jäätämistapahtuma, voimaloiden läheisyydessä tulisi liikkua vain lyhytaikaisesti ja ainoastaan tarpeen vaatiessa. Ajoneuvojen osalta jään osumatodennäköisyydet ovat suurempia niiden suuremman koon vuoksi. Voidaan kuitenkin olettaa, että voimaloiden läheisyydessä olevia teitä käyttävät pääasiassa voimaloille suuntavat huoltohenkilöt, kun taas muut tienkäyttäjät lähtökohtaisesti vain ohittavat alueen. Taulukossa (Taulukko 4-3) esitettyjen tulosten perusteella liikkuviin ajoneuvoihin kohdistuvat riskit ovat suhteellisen vähäisiä.

Tuulipuiston läpikulkevat kaakkois-luoteissuuntaiset tiet kulkevat paikoitellen suhteellisen läheltä suunniteltuja turbiinipaikkoja. Yksittäisessä alueen läpiajossa jään osumariski on suhteellisen pieni. Analyysin toteutusvaiheessa AFRYllä ei ollut tiedossa arviota tienkäytön aktiivisuudesta. Taulukossa (Taulukko 4-6) on esitetty riskiarvio, jos tieosuutta ajetaan 10 kertaa päivässä. Tällöin jäänosumisen riski on tasolla, jolla suositellaan riskiä pienentäviä toimenpiteitä, esimerkiksi aktiivista varoitusta meneillään olevasta jäätämistilanteesta.

Sellaisissa huolto- ja kunnossapitotöissä, joissa henkilöt tai ajoneuvot oleskelevat voimaloiden läheisyydessä pidempiä aikoja, putoavan jään aiheuttamat riskit tulee tunnistaa ja niistä tulee tiedottaa asianmukaisesti. Mikäli alueella liikkuu henkilöitä tai ryhmiä, jotka eivät kuulu huoltohenkilöstöön, on todennäköistä, etteivät he ole tietoisia käynnissä olevasta jäätämistapahtumasta. Jäätämistapahtuman aikana henkilöryhmään kohdistuva riski voi ylittää hyväksyttävän riskitason. Koska muiden kuin huoltohenkilöiden ei kuitenkaan ole todennäköistä oleskella alueella pitkiä aikoja, lyhytaikaiseen oleskeluun liittyvät riskit ovat vähäisiä. Tästä huolimatta suositellaan, että kaikkialle tuulivoimapuiston alueella liikkuville tiedotetaan mahdollisista jäänheittoriskeistä.

## 5 SUOSITUKSET

Yksittäisen alueella liikkuvan henkilön osalta tilannetta voidaan pitää lähtökohtaisesti turvallisenä, mikäli oleskelu voimaloiden läheisyydessä on lyhytaikaista. Tilanne voi kuitenkin tuntua uhkaavalta, jos jääkappale putoaa lähelle henkilöä. Yleisesti ottaen turvallisuus paranee etäisyyden kasvaessa voimaloista. Vaikka yksittäisiä jääkappaleita voi hyvin harvinaisissa tapauksissa lentää jopa yli 600 m etäisyydelle voimaloista, riskitaso yli 400 m etäisyydellä on yleisesti erittäin alhainen.

Tässä arvioinnissa pidetään epätodennäköisenä, että muut ajoneuvot kuin huoltohenkilöstön käyttämät ajoneuvot oleskelsivat voimaloiden läheisyydessä pitkiä aikoja. Voimaloiden läheisyydessä pidempään pysäköityihin huoltoajoneuvoihin kohdistuu kuitenkin kohonnut jäänheittoriski. Henkilöitä, jotka käyttävät voimaloiden läheisyydessä kulkevia reittejä tai oleskelevat alueella pidempiä aikoja, tulisi tiedottaa näistä riskeistä erityisesti talvikauden aikana.

Voimaloiden läheisyydessä liikkumiseen talviaikaan liittyy huoltohenkilöstön kannalta merkittävä jäänheiton riski. Riskin hallitsemiseksi ja henkilöstön suojelemiseksi suositellaan riskiä vähentäviä toimenpiteitä. Keskeisiä riskinhallintakeinoja ovat henkilöstön riskitietoisuuden varmistaminen, kattava ohjeistus vaaratilanteiden tunnistamiseen ja välttämiseen sekä aktiivinen tiedottaminen jäätämisolosuhteista.

## LIITTEET

Liite A1

Liite A2

Liite A3

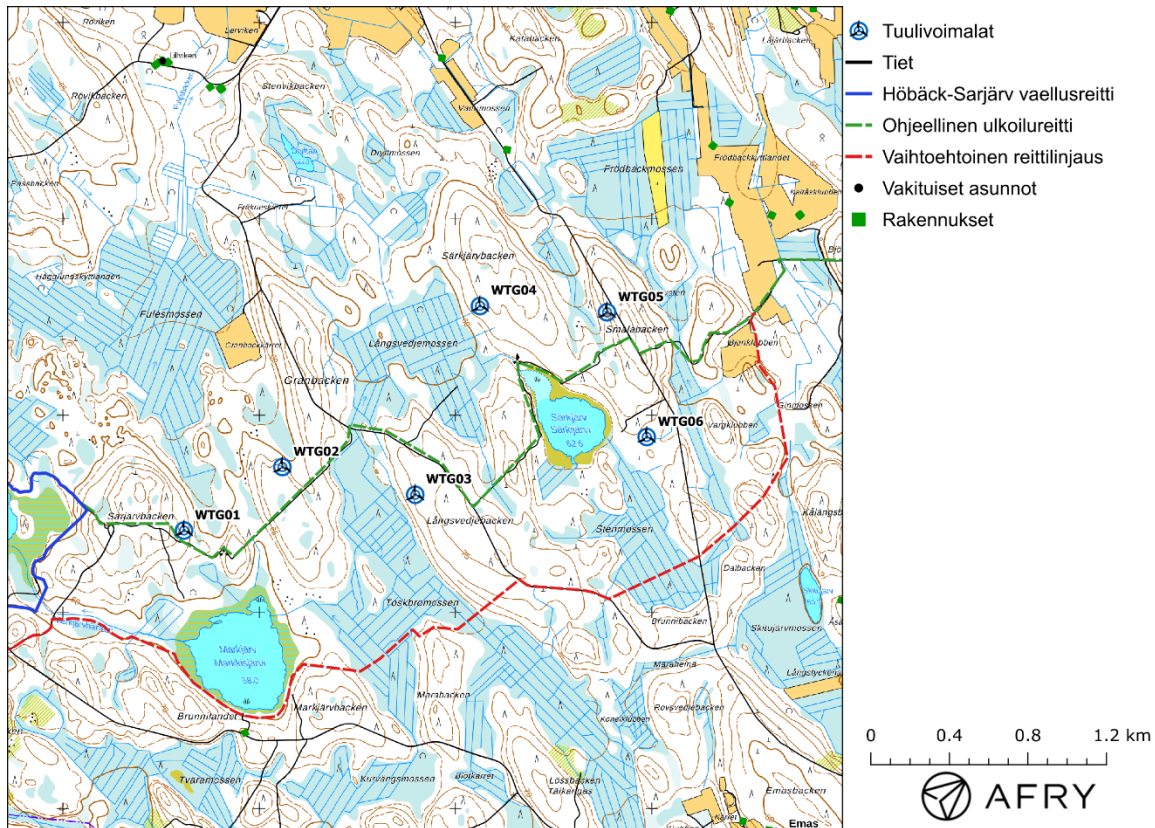
Sijoittelukartat

Jään osumatodennäköisyyksien kartat

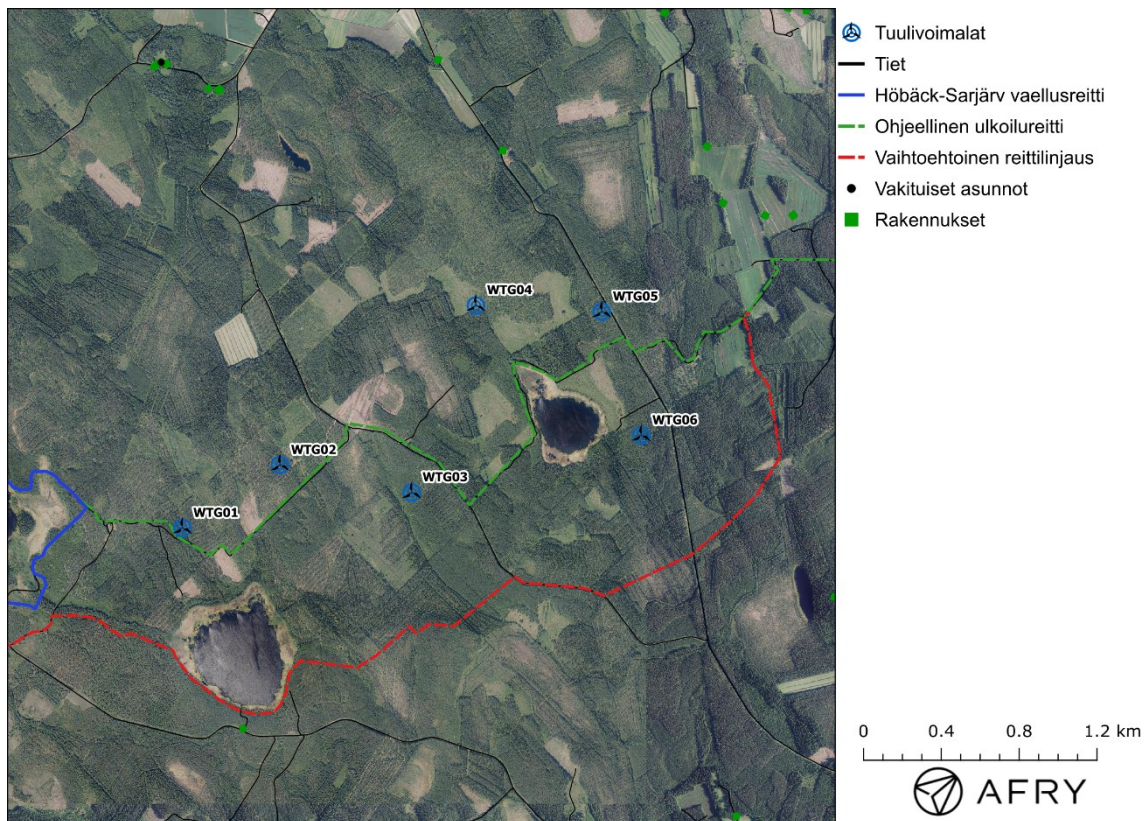
ICETHROWER-tutkimus

## LIITE A1

## SIJOITTELUKARTAT



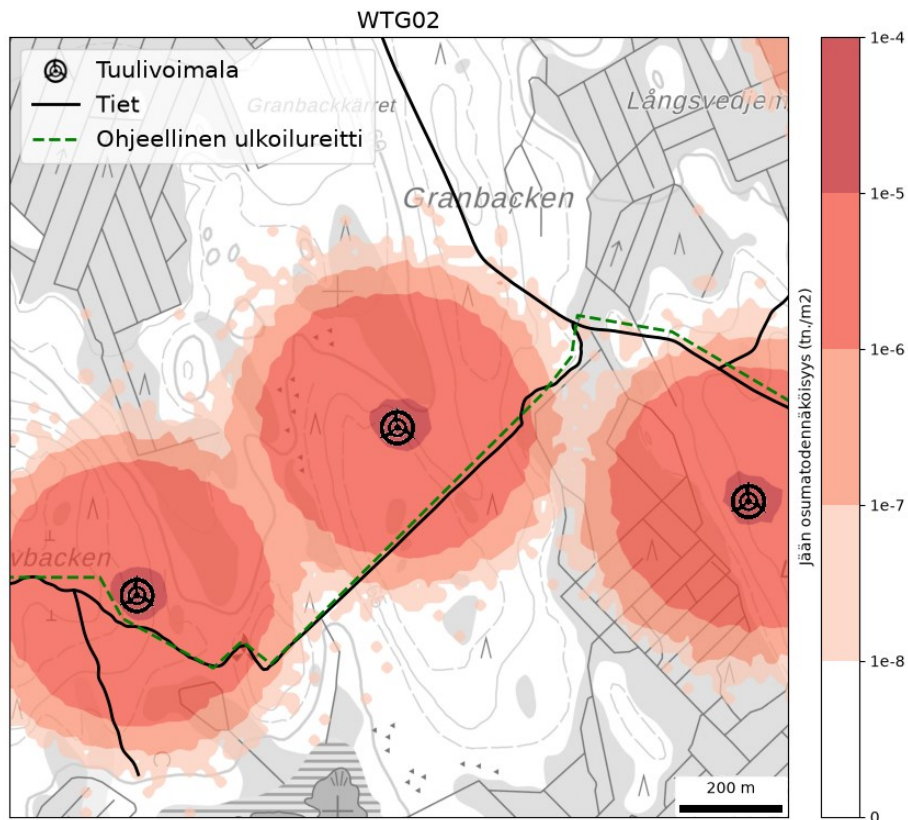
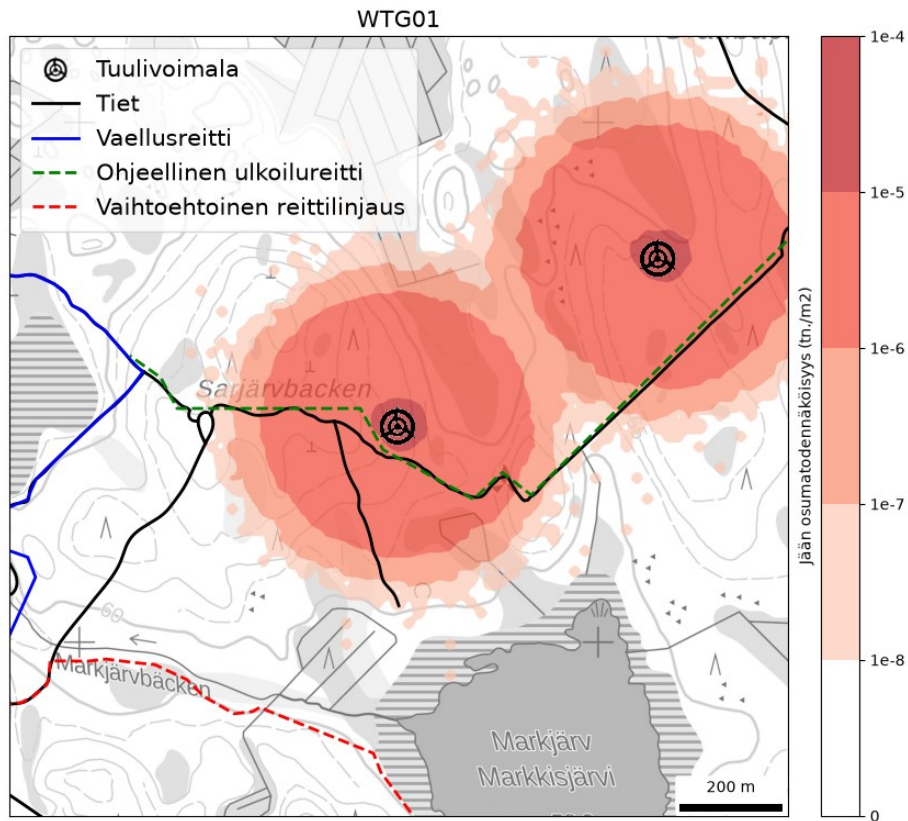
**Kuva A1-1: Markjärven tuulivoimapuiston suunniteltu voimalasijoittelu maastokartalla.**

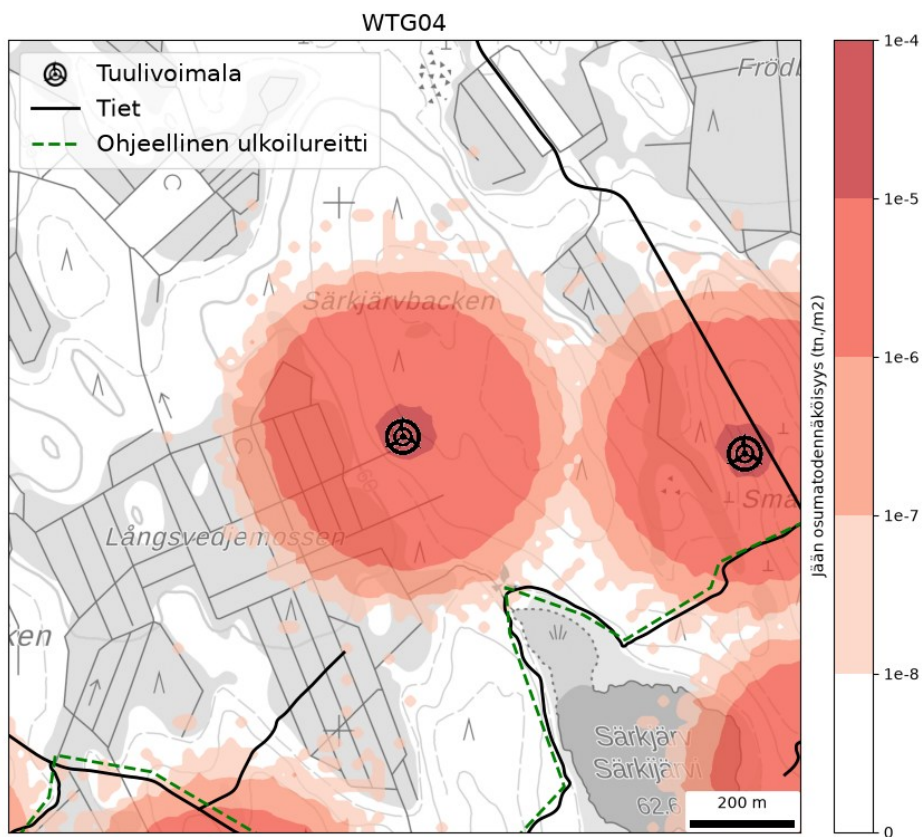
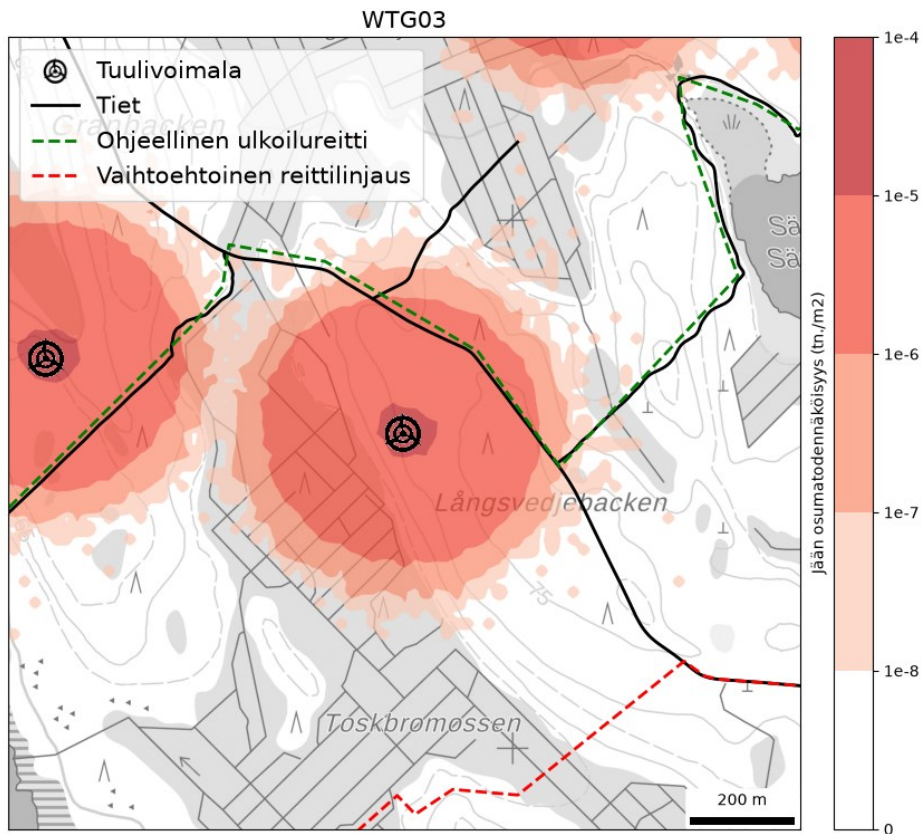


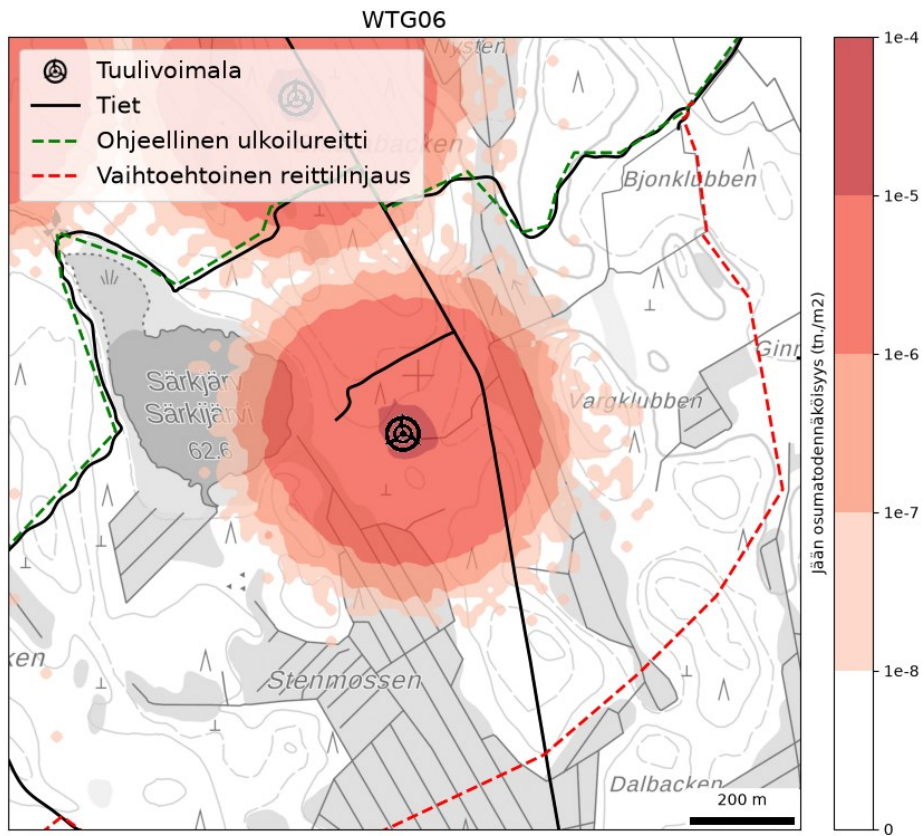
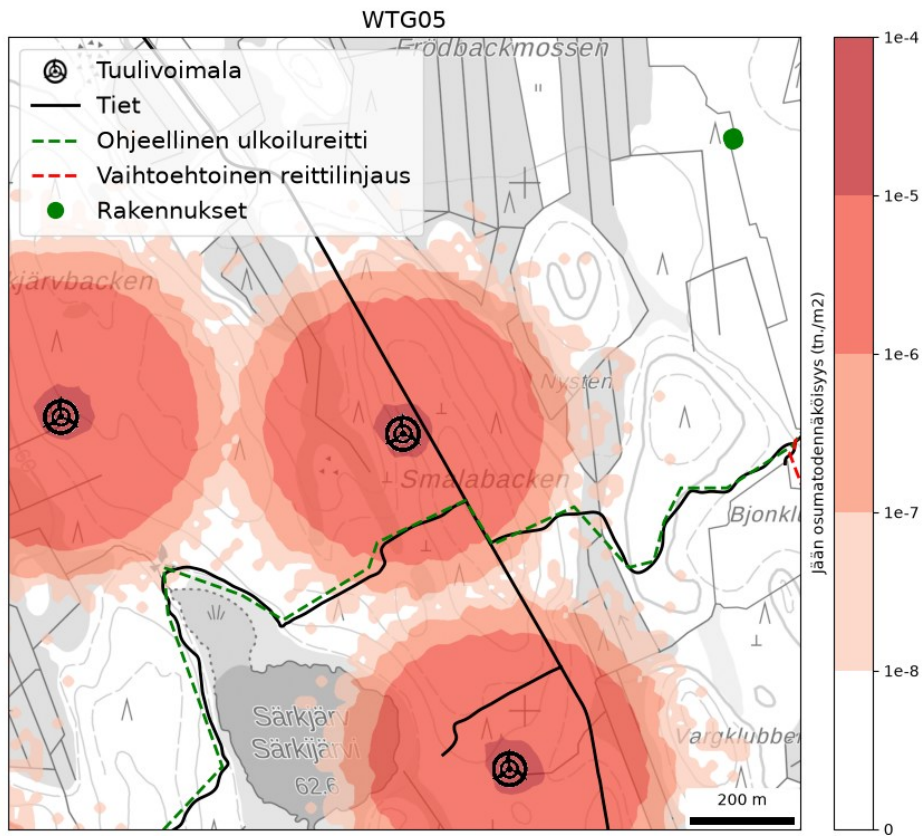
**Kuva A1-2: Markjärven tuulivoimapuiston suunniteltu voimalasijoittelu ilmakuvassa.**

## LIITE A2 KARTAT

## JÄÄN OSUMATODENNÄKÖISYYKSIEN







## LIITE A3 ICETHROWER-TUTKIMUS

A3-1

Kuvaus

A3-2

ICETHROWER-tutkimuksen tulokset

### A3-1 Kuvaus

ICETHROWER-projekti toteutettiin yhteisprojektina Pöyryn (nykyisin AFRY), Vattenfallin, Skellefteå Kraftin ja Dalavindin kesken, joista kaikki kolme viimeistä energiayhtiötä operoivat tuulivoimapuistoja kylmissä ilmasto-olosuhteissa Ruotsissa. Projekti toteutettiin vuosina 2013–2016 ja sen rahoitti Ruotsin energialautakunta. Kokonaisuudessaan projektissa kerättiin usean jäätapahtuman aikana yli 500 jääkappaletta Vestas V90 -voimaloista (napakorkeus 95 m), ja jääkappaleet mitattiin ja punnittiin. Lisäksi jääkappaleen puutoamiskohta merkittiin. Jääkappaleiden massat vaihtelivat välillä 0,1–5 kg. Jääkappaleita kerättiin 9–81 kappaletta jokaisena keräyspäivänä.

Projektin toisessa osassa kehitettiin malli jääkappaleiden leviämisen todennäköisyyden laskentaan tuulivoimaloiden läheisyydessä, jotta voitaisiin ymmärtää ihmisiin ja laitteisiin kohdistuva jäänheiton riski.

### A3-2 ICETHROWER-tutkimuksen tulokset

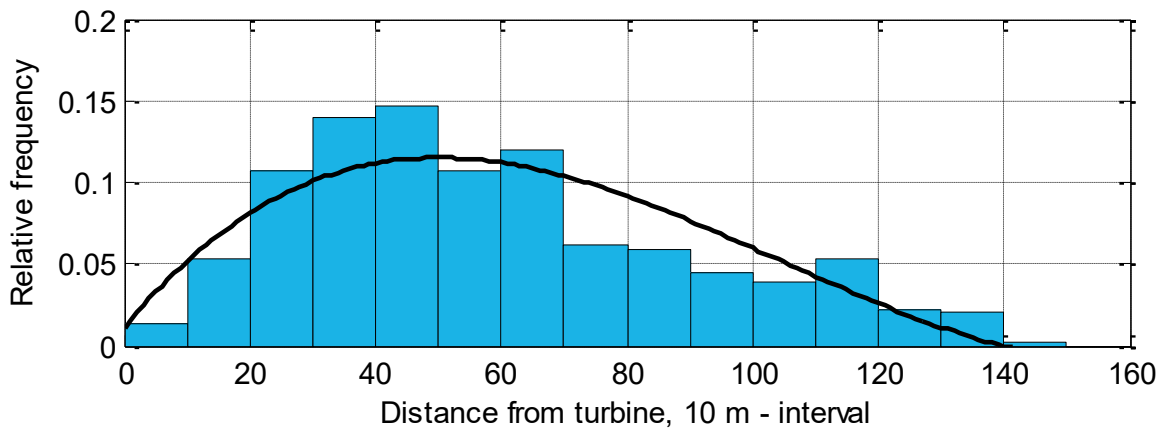
Tutkimuksen tulokset on esitetty raportissa ICETHROWER – *Mapping and Tool for Risk Analysis*. Tärkeimmät tulokset olivat:

- Tehtyjen havaintojen ja mallinnusten perusteella voidaan päätellä, että aiemmin käytettyä suositeltua turvaetäisyyttä voidaan pienentää. Samaa laskentakaavaa voidaan käyttää sekä pyöriville että paikallaan oleville voimaloille. Uudeksi kaavaehdotukseksi saatiin:

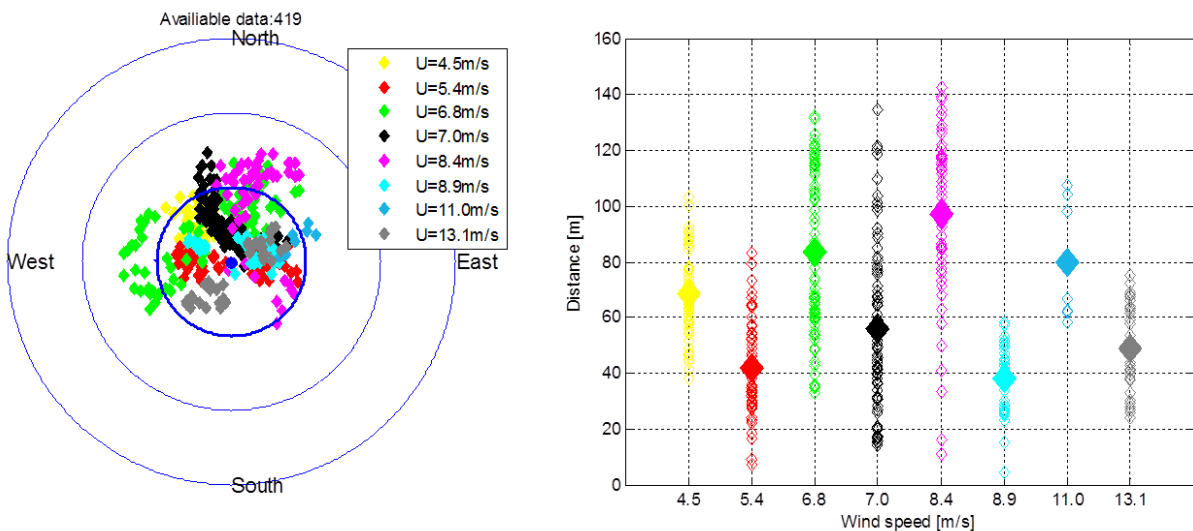
$$s = D + H$$

missä  $s$  on turvaetäisyys satunnaisille käynneille kohteessa,  $D$  on tuulivoimalan halkaisija ja  $H$  on napakorkeus. Myös turvaetäisyyttä kauemmas suuntautuneita heittoaetäisyyksiä mallinnettiin, mutta todennäköisyys jäänheiton tapahtumiselle turvaetäisyyden ulkopuolella on huomattavasti pienempi, kuin tyypilliset tapahtumariskit yhteiskunnassa. Kuvassa (Kuva A3-1) esitetään jäänheittojen suhteellinen esiintymistiheys etäisyyden funktiona tuulivoimalasta, ja jäänheiton suhteelliset pituudet ja tuulennopeus esitetään kuvassa (Kuva A3-2).

- Hyvin raskaita ja suurikokoisia jääkappaleita voi pudota lähelle voimalaa, mutta myös suhteellisen suuret jääkappaleet voivat kulkeutua kauemmas. Tällaiset kappaleet voivat olla peräisin tornista tai nasellin katolta irtoavasta jäästä. Näihin jään irtoamistapahtumiin liittyy erittäin suuri riski, sillä nasellin katolla oleva jää voi säilyä pitkään lapojen jäätymistapahtuman päättymisen jälkeen ja sisältää erittäin suuria jääkappaleita.
- Kun voimalaa operoidaan, on aina turvallisinta pysyä tuulen puolella voimalasta katsoen.
- Jos voimala ei ole toiminnassa, ei missään puolella voimalaa ole automaattisesti turvallista, sillä roottori voi olla kääntyneenä eri suuntaan tuuleen nähden.
- Yleisesti ottaen erittäin harvinaisia poikkeuksia lukuun ottamatta jään irtoamiskohdan vaikutus on vähäinen. Suurtenkin jääkappaleiden alkunopeudet vaimenevat nopeasti ilmanvastuksen vaikutuksesta. Suurin osa jäänheiton dynamiikasta määräytyy painovoiman ja tuulen avulla.



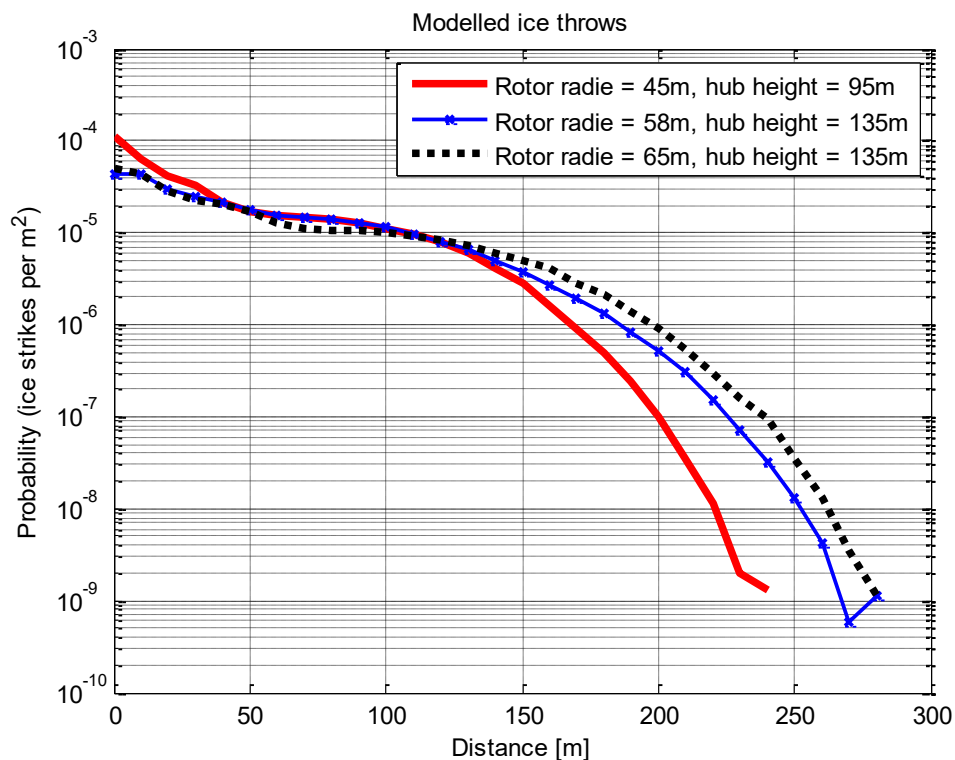
**Kuva A3-1: Jäänheittojen suhteellinen esiintymistiheys etäisyyden funktiona tuulivoimalasta**



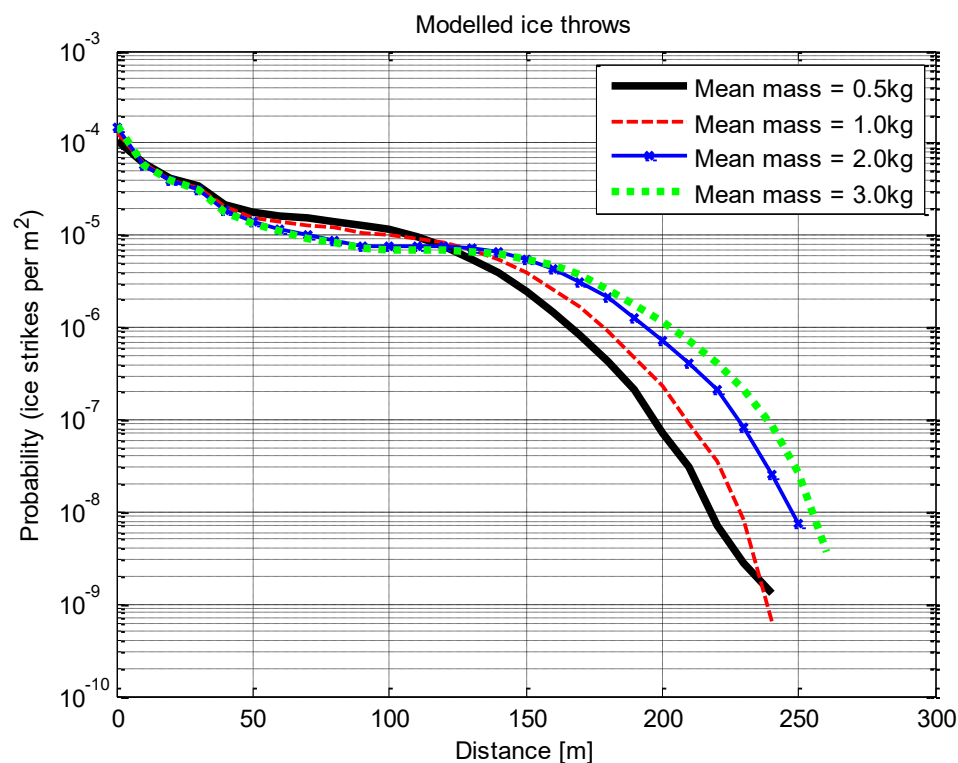
**Kuva A3-2: Vasemmalla: Jäänheittotapahtumien sijainti suhteessa tuulivoimalaan (sininen piste). Siniset ympyrät kuvaavat yhden, kahden ja kolmen roottorin halkaisijan etäisyyksiä. Väri ilmaisee tuulen nopeuden eri jäänheittotapahtumien aikana. Oikealla: Tuulen nopeuden ja heittoetäisyyden välinen yhteys kahdeksassa eri jäänheittotapahtumassa. Suuret vinoneliöt kuvaavat kunkin tapahtuman keskimääräistä heittoetäisyyttä.**

Kenttätutkimukseen pohjautuva mallinnustyökalu kehitettiin liikeyhtälön ja Monte Carlo -simulaation avulla. Esiintyvyydjakauma ja todennäköisyydet johdettiin suorittamalla sata-tuhatta satunnaista simulaatiota.

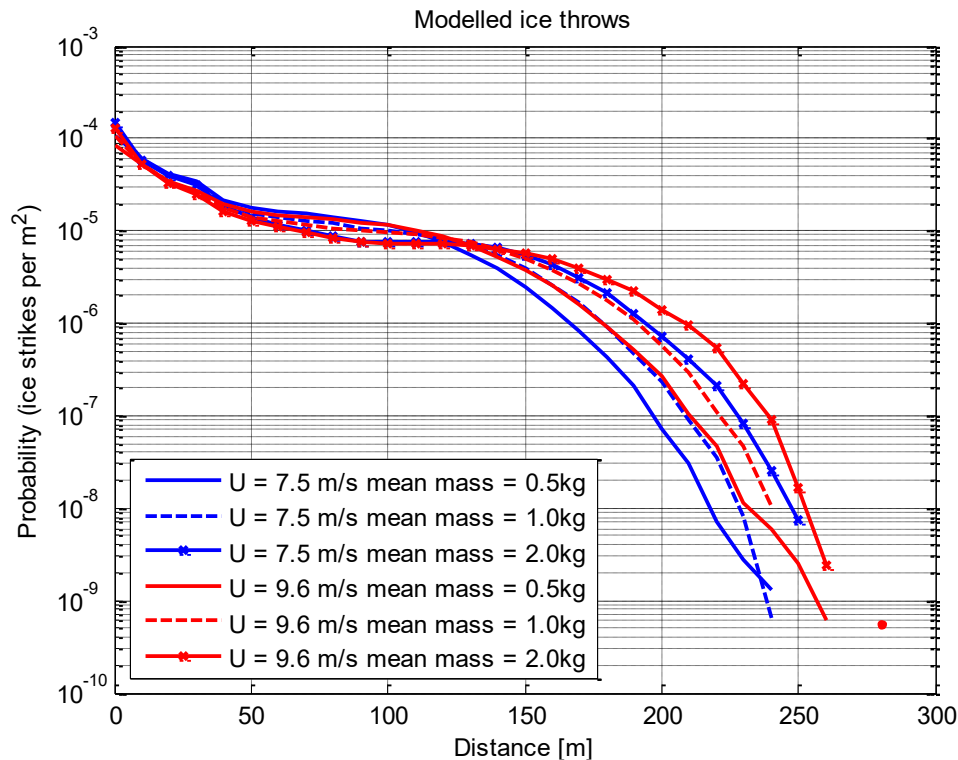
Kuvissa (Kuva A3-3), (Kuva A3-4) ja (Kuva A3-5) on esitetty kolme kaaviota, joissa tuulivoimalan kokoonpano, jääkappaleen massa ja tuulen nopeus toimivat parametreina ja jotka kuvaavat jään osumatodennäköisyyttä neliometriä kohden yksittäisen jäänheittotapahtuman aikana.



**Kuva A3-3. Jäänheiton todennäköisyys etäisyyden funktiona tuulivoimalasta eri roottorin säteillä ja napakorkeuksilla.**



**Kuva A3-4. Jäänheiton todennäköisyys etäisyyden funktiona tuulivoimalasta eri jääkappaleiden massoilla.**



**Kuva A3-5. Jäänheiton todennäköisyys etäisyyden funktiona tuulivoimalasta eri heittonopeuksilla ja jääkappaleen massoilla.**

Edellä esitetyt kaaviot johtavat seuraaviin johtopäätöksiin:

- Roottorin halkaisijalla on suurempi vaikutus jään heittoetäisyyteen kuin tornin korkeudella.
- Jääkappaleen massan kasvu ja suurempi tuulennopeus lisäävät heittoetäisyyttä vain hieman.
- Kaavioiden tuloksia voidaan ekstrapoloida vastaamaan tarkasteltavan hankkeen tuulivoimaloiden kokoa.