

Raportti

Kirjoittaja
Helmi Uusitalo
Puhelin
+358 40 560 8305
Sähköposti
helmi.uusitalo@afry.com

Päivämäärä
16/06/2023

Projekti
309_304-002

Asiakas
Suomen Hyötytuuli Oy

Raportin numero
309_304-002-001

Jäänheiton riskiarvio Kokkonevan tuulipuistolle



Vastuuvapauslauseke

Tämän dokumentin on tehnyt AFRY Finland Oy ("AFRY") Suomen Hyötytuuli Oy:n ("Asiakas") käyttöön. Hyväksymällä raportin toimituksen, Asiakas hyväksyy nämä käyttöehdot.

AFRY pidättää kaikki oikeudet tähän raporttiin. Tämä raportti on luottamuksellinen ja laadittu 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 kolmansilta osapuolilta tai ulkopuolisista lähteistä saamiin tietoihin. AFRY ei ole tarkistanut minkään kolmansilta 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.

Sisältö

Vastuuvapauslauseke.....	2
1 Johdanto	5
1.1 Taustaa.....	5
1.2 Analyysin lähtökohdat.....	5
1.2.1 Ilmasto-olosuhteet	5
1.2.2 Kohteen tiedot.....	6
2 Jäättäminen.....	7
2.1 Jäänheiton riski.....	7
2.2 Jään muodostuminen.....	8
3 ICETHROWER-tutkimus	9
3.1 Kuvaus	9
3.2 Projektin tulokset	9
4 Riskiarvio	11
5 Analyysi Kokkonevan tuulipuistosta	12
5.1 Oletukset	12
5.2 Hankealue.....	13
5.3 Todennäköisyydet	14
5.3.1 Mallinnuksen tulokset	14
5.3.2 Tapausten todennäköisyys	15
5.4 Riskianalyysin johtopäätökset	16
6 Suositukset.....	17
7 Lähteet	18

Raporttihistoria

Ver.		Laadittu	Tarkastettu
000	Raportti 2023-05-23	23/05/2023 Helmi Uusitalo, Technical Consultant	23/05/2023 Riku Suutari, Senior Consultant
001	Raportti 2023-06-16	16/06/2023 Helmi Uusitalo, Technical Consultant 	19/06/2023 Riku Suutari, Senior Consultant 

Tiivistelmä

AFRY on suorittanut tutkimuksen tuulivoimaloiden jäänheittoon liittyvästä riskistä Kokkonevan tuulipuistolle. Kokkonevan tuulipuiston hankealue sijaitsee Pohjois-Pohjanmaalla ja sen kehittäjänä toimii Suomen Hyötytuuli Oy.

Hankealueen ilmasto on Suomen manneralueen ilmastoa ja jäätävän ajanjakson voidaan olettaa olevan marraskuusta maaliskuuhun. Tällä aikavälillä voimaloissa voi esiintyä jäätämistä. Jäätämistapausten lukumääräarviona on käytetty 40 jäätämistapausta kauden aikana.

Analyysissä on hyödynnetty jäänheiton riskiarvion ennustemallia, joka pohjautuu ruotsalaiseen tutkimukseen ICETHROWER [1]. Tutkimuksessa tutkitun kohteen havaintodataa kolmen vuoden ajalta käytettiin kehittämään malli jäänheiton todennäköisyydelle.

Analyysi suoritettiin kahdelle turbiinityypille, joista toisessa käytettiin kahta eri napakorkeutta. Käytetyt turbiinit olivat V172-7.2MW HH 175 m, V172-7.2MW HH 214 m ja AFRYn estimaatti tulevaisuuden turbiineille D200 m, HH 200 m. Turvallisiksi etäisyyksiksi turbiineista saatiin ICETHROWER-mallin kaavaa $S = \text{turbiinin halkaisija } D + \text{napakorkeus } HH$ käyttäen 347 m, 386 m ja 400 m. Tätä kauempana turbiineista riski jään osumisesta ihmiseen on mitättömän pieni.

Analyysissä havaittiin, että 250 metriä lähempänä turbiineja oleskeltaessa on olemassa jään aiheuttama loukkaantumisriski, ja tätä riskiä tulisi minimoida tiedottamalla tuulipuiston ympäristön riskeistä ja varmistamalla, että tuulipuiston läheisyydessä vierailevat oleskelevat mahdollisimman vähän aikaa ilman suojaa.

1 Johdanto

1.1 Taustaa

Suomen Hyötytuuli suunnittelee tuulipuistoa Kokkonevan hankealueelle, joka sijaitsee Pohjois-Pohjanmaalla noin 6 km Perhon kunnasta luoteeseen. Tuulipuistoon on suunnitteilla 35 voimalaa.

Tuulipuistojen voimalat altistuvat talviolosuhteille ja jäätämislle, ja tämä aiheuttaa jäänheiton riskin alueella liikkuville henkilöille ja hankealueella sijaitseville laitteille sekä muille kohteille. Suomen Hyötytuuli on tilannut AFRY Finland Oy:ltä yksityiskohtaisen analyysin tuulivoimaloiden jäätämisestä ja jäänheiton riskistä ottaen huomioon alueen tiestön ja ihmisten liikkumisen alueella. Tässä selvityksessä AFRY tutkii tuulivoimaloiden jäänheiton todennäköisyyttä ja määrittää sille vaaravyöhykkeet.

AFRY on tehnyt lukuisia jäänheiton riskianalyyskejä pohjoisen ilmaston tuulipuistoille. Vuosina 2013–2016 AFRY (ent. Pöyry) johti jäänheiton kenttätutkimusta ruotsalaisille tuulipuistoille (ICETHROWER [1]). Tutkimuksesta kerrotaan tarkemmin kappaleessa 3. Tutkimuksen päätuloksena oli suositellun turvaetäisyyden kaava $S = D + HH$, jossa D on turbiinin halkaisija ja HH on turbiinin napakorkeus, sekä malli jäänheiton todennäköisyyden laskentaan. Tutkimuksen [1] tuloksia sovelletaan tässä analyysissä.

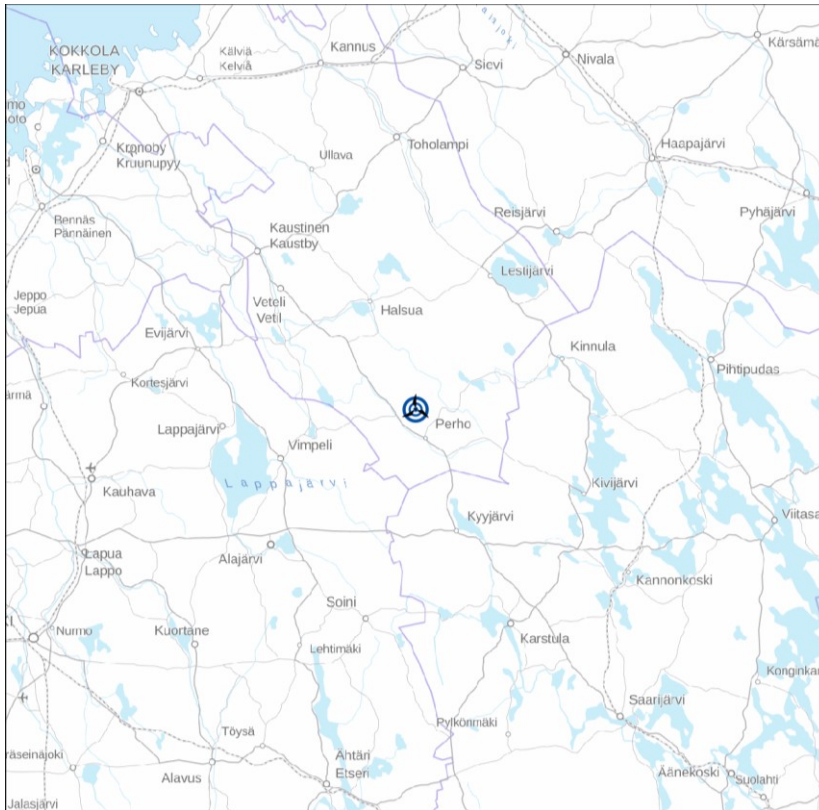
1.2 Analyysin lähtökohdat

1.2.1 Ilmasto-olosuhteet

Tuulipuisto sijaitsee Pohjois-Pohjanmaalla noin 6 kilometriä luoteeseen Perhon kunnasta. Tuulipuiston sijainti on esitetty kuvissa 1 ja 2.



Kuva 1. Tuulipuiston sijainti.



Kuva 2. Tuulipuiston sijainti.

Suomen Tuuliatlaksen [2] sekä alueen sääolosuhteista tehdyn jäätämisarvion perusteella voidaan arvioida, että hankealueella esiintyy noin 40 jäänheittoon vaikuttavaa jäätämispäivää talvikauden aikana. Voidaan olettaa, että jäätämisolosuhteet ovat samankaltaiset kaikilla voimaloilla ja että jäätäminen tapahtuu pääosin samanaikaisesti kaikissa voimaloissa. Tässä analyysissä käytetään 40 jäätämispäivää arviona jäätämistapahtumien lukumääräksi talvikauden aikana.

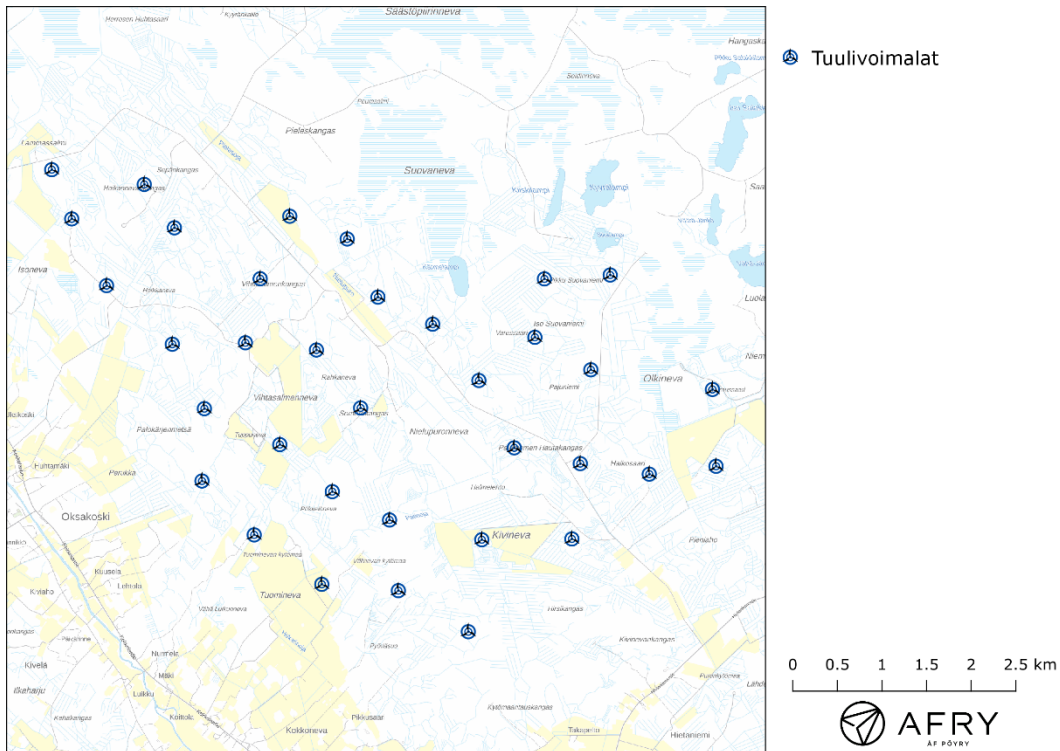
1.2.2 Kohteen tiedot

Kuvassa 3 nähdään voimaloiden asettelu hankealueelle. Analyysiin on valittu käytettäväksi kaksi eri turbiinityyppiä kolmella eri napakorkeudella. Turbiinityypit on esitetty taulukossa 1.

Turbiinityyppi	Napakorkeus	Roottorin halkaisija
V172-7.2MW	175 m	172 m
V172-7.2MW	214 m	172 m
NUM200-8.5MW	200 m	200 m

Taulukko 1. Voimaloiden tekniset tiedot.

Hankealueen sisällä lyhimmat etäisyydet voimaloiden välillä ovat 500–600 m.



Kuva 3. Tuulivoimaloiden asettelu hankealueella.

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. Jäätäminen on yleisintä kylmissä ilmastoissa, mutta sitä voi tapahtua tietyissä olosuhteissa muuallakin esimerkiksi jäätävän sateen aikana. Voimakkainta jään kertyminen on, kun lämpötila on nollan tuntumassa tai hieman sen alapuolella matalalla olevien pilvien ympäröidessä tuulivoimalan lapoja. Esimerkiksi voimalasta irtoavat noin mandariinin kokoiset, 0,1 kg painavat jääkappaleet voivat olla ihmiseen osuessaan hengenvaarallisia.

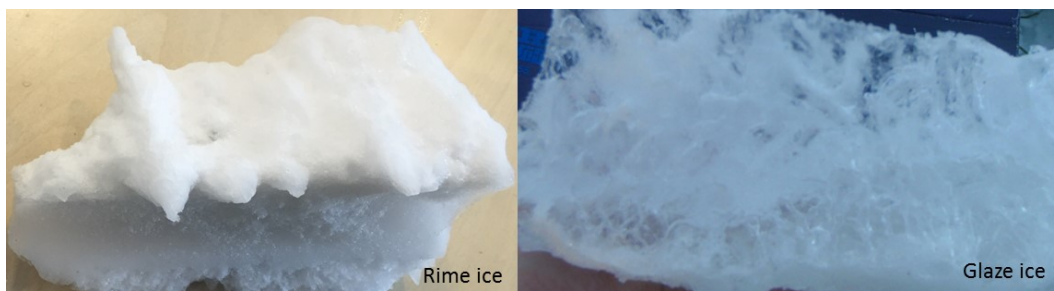
Lunta ja jäätä voi mahdollisuuksien mukaan kertyä minkä tahansa liikkuvan tai paikallaan olevan rakenteen pinnalle, jos lämpötila on riittävän matala ja ilmankosteus riittävän korkea. Lunta ja jäätä voi kertyä kaikkiin tuulivoimalan rakenneseisiin. Voimalan torniin ja naselliin kertyvä jää putoaa useimmiten lähelle voimalaa, mutta lapoihin kertyvä jää voi tietyissä olosuhteissa sinkoutua pyörivästä roottorista ja iskeytyä maahan kauempana voimalasta.

Suurimmat ongelmat jään kertymisessä tuulivoimaloihin ovat tuotantotappiot, jäänheitto, suuremmat huoltokustannukset sekä pienentynyt voimaloiden tekninen käyttöikä. Tässä Kokkonevan tuulipuiston riskianalyyssissä keskitytään jäänheiton riskeihin hankealueen sisällä ja sen läheisyydessä liikkuville ihmisille.

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: pilvijäättämiseen ja sateeseen perustuvaan jäätämiseen (esim. jäätävä sade, tihkusade, lumi). Tärkeimpiä jäätystyyppejä on kolme: huurrejää, kirkas jää ja märkä lumi. Kuvassa 4 nähdään esimerkkejä eri jäätystyyppien jääkappaleista ICETHROWER projektista.



Kuva 4. Esimerkit huurrejäädästä (vasemmalla) ja kirkkaasta jäädästä (oikealla).

Huurrejää muodostuu alijäähtyneistä vesipisaroista, jotka ovat syntyneet sumussa tai pilvissä ja jotka jäätyvät heti osuessaan kiinteään materiaaliin. Voimakkainta huurrejäätämistä esiintyy paljailla harjanteilla, joihin nousee kostea ilmaa. Huurrejää on valkoista ja läpinäkymätöntä ja sitä kertyy epätasaisesti tuulivoimaloiden pyörivien lapojen etureunaan. Kirkas jää muodostaa tasaisen, läpinäkyvän ja tasalaatuisen jääkerroksen ja sitä muodostuu usein juuri nollassa asteessa tai hieman sen alapuolella.

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 jäätyä materiaalin pintaan.

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 voi irrota turbiinien lavoista ja rakenteiden pinnoilta lämpötilan noustessa ja jään alkaessa sulaa, mutta myös tuulenoisuuden kasvaessa tai sateen vaikutuksesta. Jääkappale voi sinkoutua tuulen mukana kauemmas ennen osumistaan maahan. Pyörivien rakenteiden kuten tuulivoimaloiden lapojen jäätäminen taas on monimutkaisempi ilmiö, sillä koska jään kertyminen riippuu ilmassa suhteellisesta nopeudesta verrattuna kiinteään pintaan, lapojen päihin kertyy jäätä enemmän kuin muihin osiin. Lisäksi lapojen pyöriminen voi antaa jääkappaleelle suuremman alkunopeuden, kun se irtoaa lavasta.

3 ICETHROWER-tutkimus

3.1 Kuvaus

ICETHROWER-projekti toteutettiin yhteisprojektina Pöyryn, Vattenfallin, Skellefteå Kraftin ja Dalavindin kesken, joista kaikki kolme viimeistä energiayhtiötä omistavat tuulipuistoja kylmissä ilmasto-olosuhteissa Ruotsissa. Projekti toteutettiin vuosina 2013–2016 ja sen rahoitti Ruotsin energialautakunta. Kokonaisuudessaan projektissa kerättiin yli 500 jääkappaletta Vestas V90 -voimaloista (napakorkeus 95 m), ja jääkappaleet mitattiin ja punnittiin. Lisäksi jääkappaleen putoamiskohta merkittiin ylös sen osuessa maahan. Jääkappaleiden massat vaihtelivat välillä 0,1–5 kg.

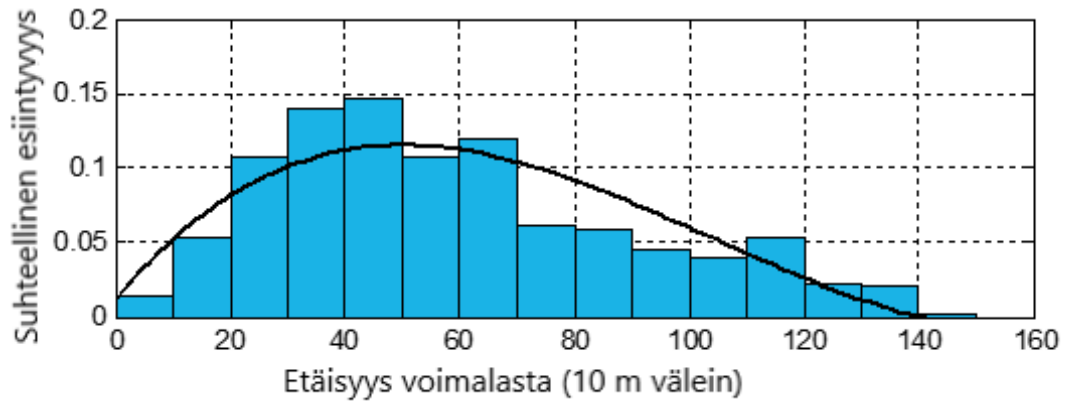
Projektin toisessa osassa kehitettiin malli jääkappaleiden leviämisen todennäköisyyden laskentaan tuulivoimaloiden läheisyydessä, jotta voitaisiin ymmärtää ihmisiin ja laitteisiin kohdistuva jäänheiton riski.

3.2 Projektin tulokset

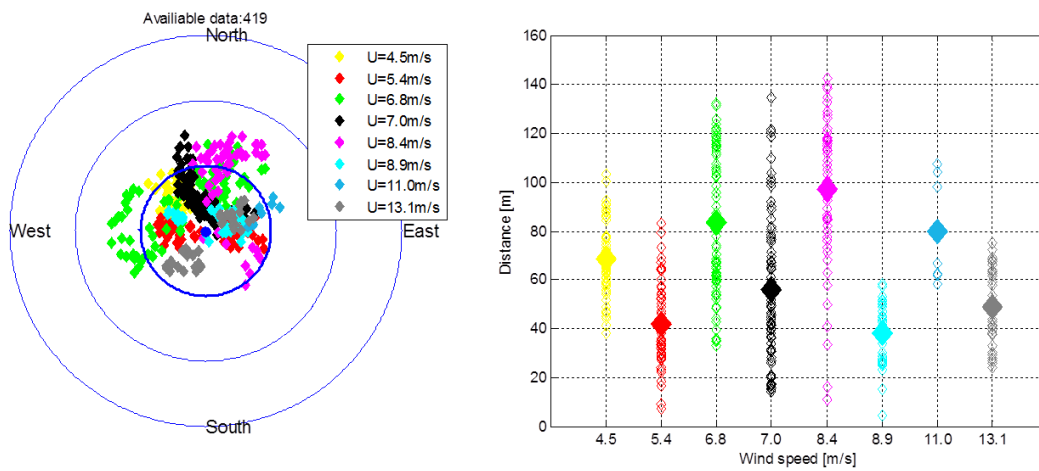
Tulokset on esitetty raportissa ICETHROWER – mapping and tool for risk analysis [1]. Projektin tuloksia sovelletaan riskin laskemiseen Kokkonevan hankkeessa.

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:
 $S = D + HH$, jossa S on turvaetäisyys satunnaisille käynneille kohteessa, D on turbiinin roottorin halkaisija ja HH on napakorkeus.
Myös turvaetäisyyttä kauemmas suuntautuneita heittoetäisyyksiä mallinnettiin, mutta todennäköisyys jäänheiton tapahtumiselle turvaetäisyyden ulkopuolella on huomattavasti pienempi, kuin tyypilliset tapaturmariskit yhteiskunnassa. Kuvissa 5 ja 6 nähdään tutkimuksen mukainen jääkappaleiden osumien esiintyvyydjakauma.
- Havaittavissa on heikko trendi, jonka mukaan painavimmat ja suuremmat jääkappaleet putoavat lähemmäs voimalaa. Nämä jääkappaleet ovat mahdollisesti muodostuneet voimalan tornin tai nasellin katon jääkerroksista. Nämä jääkappaleet muodostavat suuren riskin, sillä esimerkiksi nasellin katolle muodostuva jää voi säilyä paljon lapojen jäätämistä pidempään ja muodostua suurista jääkappaleista.
- 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. Näin ollen suuretkin jääkappaleiden alkunopeudet vaimenevat nopeasti ilmanvastuksen vaikutuksesta. Suurin osa jäänheiton dynamiikasta määräytyy painovoiman ja tuulen avulla.

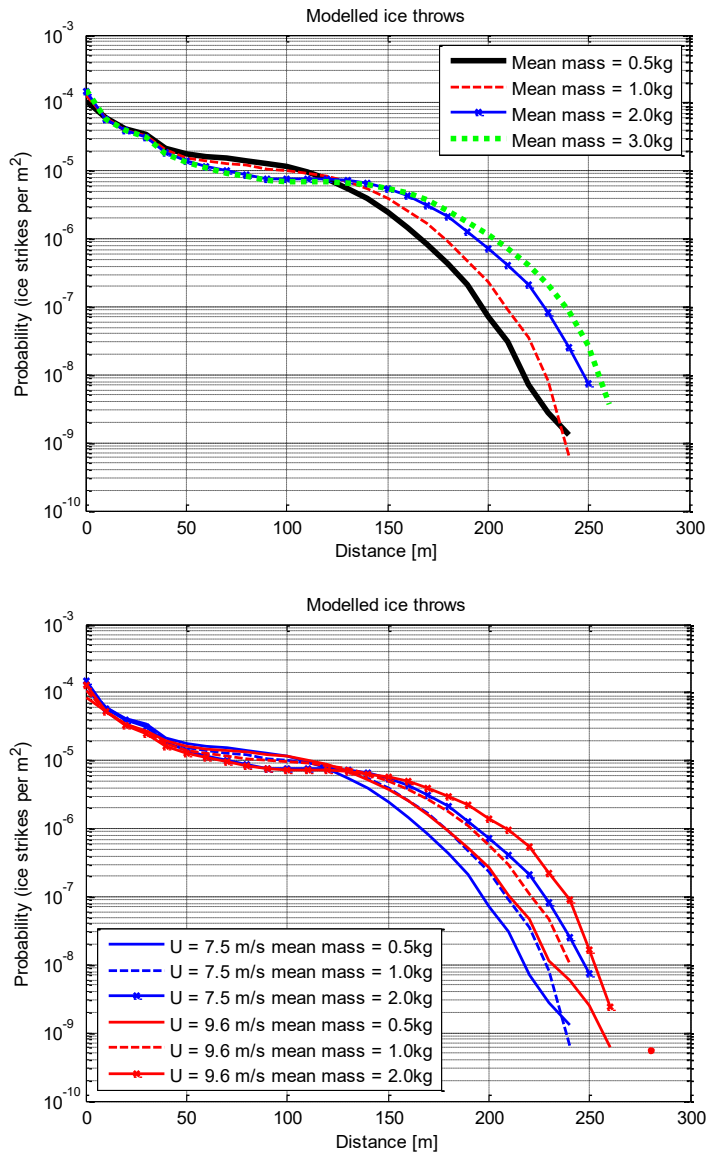


Kuva 5. Suhteellinen jäänheiton esiintyvyys suhteessa etäisyyteen voimalasta.



Kuva 6. Vasemmalla: Jäänheitot suhteessa tuulivoimalaan (joka on esitetty sinisellä pisteellä). Siniset kehät näyttävät kolme eri roottorin halkaisijaa (90, 180 ja 270 m). Tuulen nopeudet on esitetty eri väreillä. Oikealla: Tuulen nopeus (m/s) suhteessa heittoetäisyyteen (m) kahdeksassa eri jäänheittotapahtumassa. Keskimääräiset heittoetäisyydet on merkitty kuvaajaan suurimmilla datapisteillä.

Kenttätutkimukseen pohjautuva mallinnustyökalu kehitettiin liikeyhtälön ja Monte Carlo -simulaation avulla. Esiintyvyydjakauma ja todennäköisyydet johdettiin suorittamalla satatuhatta satunnaista simulaatiota. Kuvassa 7 on esitetty todennäköisyydet jääkappaleiden iskeytymiselle jokaista neliometriä ja tapahtumaa kohden jääkappaleen massan ja tuulen nopeuden funktiona.



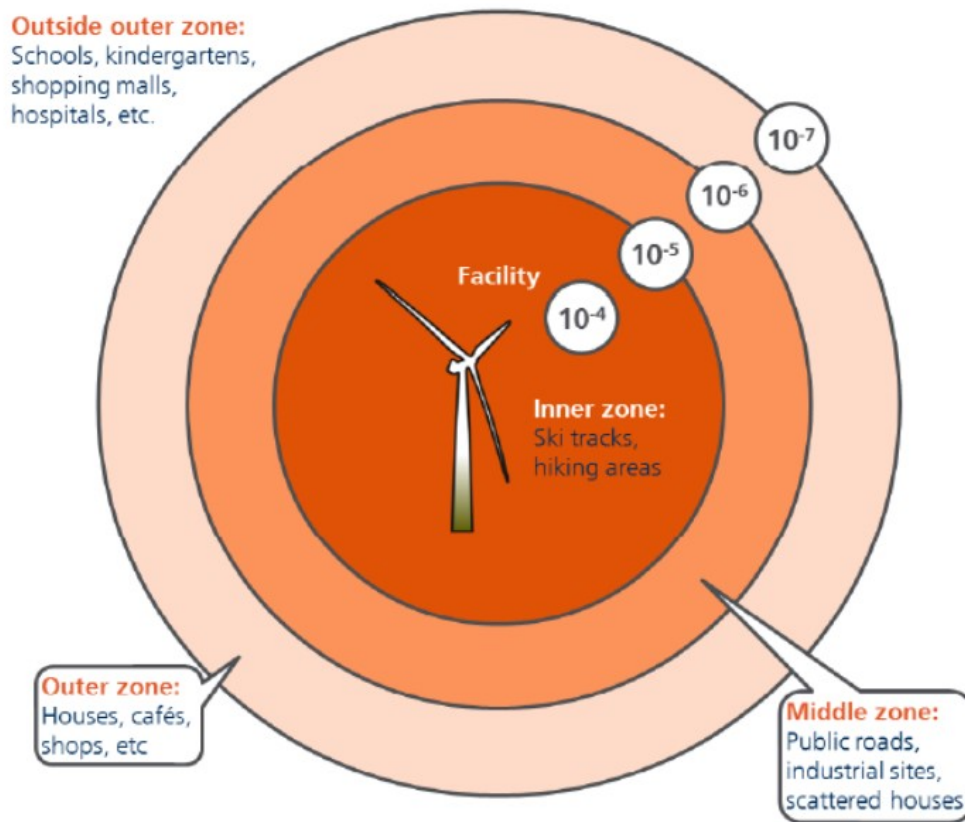
Kuva 7. Jäänheiton todennäköisyydet (osumia neliometriä kohden) etäisyyden (m) funktiona eri tuulen nopeuksilla ja kappaleiden massoilla.

4 Riskiarvio

Yleisesti ottaen yhteiskunnassa hyväksytään työhön, liikenteeseen tai muihin aktiviteetteihin liittyvät riskit, jotka voivat aiheuttaa vakavia vammoja tai jopa kuoleman. Yleisellä tasolla voidaan olettaa, että jos riski ylittää tason 10⁻⁵, eli riskin todennäköisyys on 1 tapahtuma 100 000 tapahtumaa kohden, riskiä ei voida pitää hyväksyttävänä, mikäli se 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 jääkappalet taas voivat aiheuttaa suurta vahinkoa esimerkiksi autoille, konteille tai vain kevyesti suojatuille varusteille.

Kuvassa 8 [3] esitetään kuvaaja hyväksyttävistä riskitasoista tuulivoimalan läheisyydessä. Kuvaajaa voidaan käyttää työkaluna riskitasoja määrittäessä.



Kuva 8. 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. [3]

AFRYn suositus on:

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

5 Analyysi Kokkonevan tuulipuistosta

5.1 Oletukset

Analyysissä käytetään seuraavia oletuksia:

- Jäätämispäivien lukumäärä on 40 päivää/kausi
- Oletettu talvikausi on marraskuusta maaliskuuhun (151 päivää)
- Yhden ihmisen pinta-ala on 0,2 m²
- Auton pinta-ala on 10 m²
- Turvaetäisyys $S = D + HH$

- Todennäköisyydet lasketaan 50, 150, ja 250 m etäisyydelle voimaloiden torneista.

5.2 Hankealue

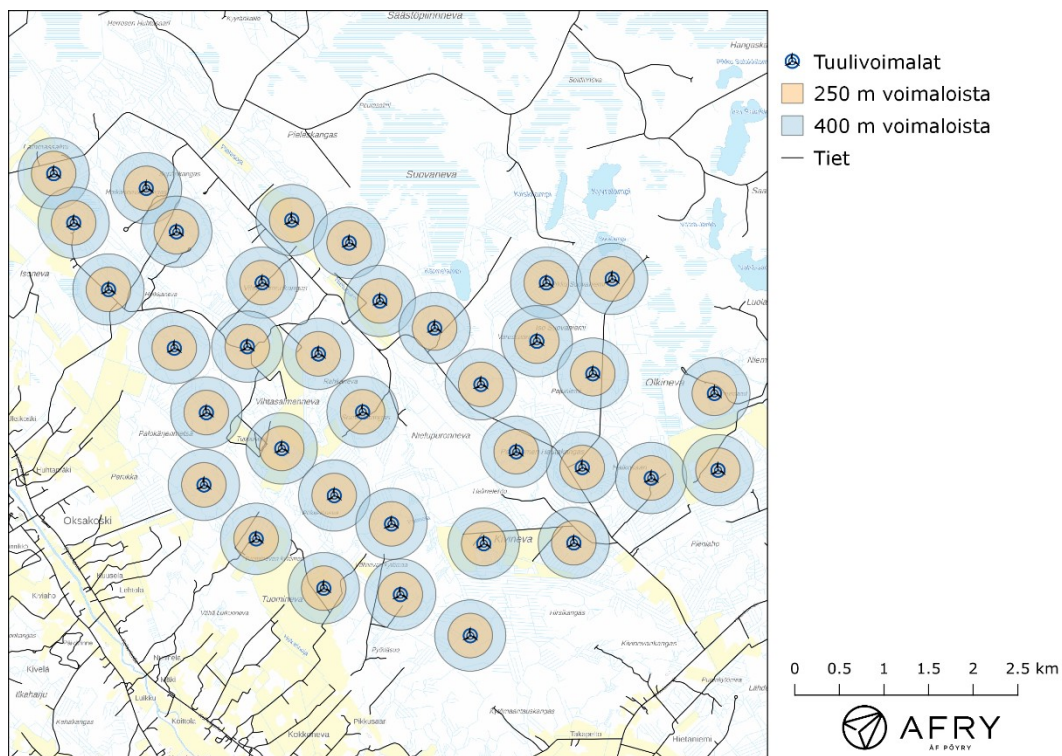
Tuulivoimaloiden turvaetäisyydet eri voimalatyypeille on esitetty taulukossa 2.

Turbiinityppi	Turvaetäisyys S
V172-7.2MW	347 m
V172-7.2MW	386 m
NUM200-8.5MW	400 m

Tutkitut tapaukset ovat:

1. Riski voimala-alueella liikkuville ihmisille ja ihmisryhmille
2. Riski läheisillä teillä kulkeville autoille
3. Riski huoltohenkilökunnalle voimaloiden läheisyydessä

Kuvassa 9 on esitetty hankealueen voimalat, läheiset tiet, sekä suurin turvaetäisyys 400 m voimaloista ja etäisyys 250 m voimaloista. Kuvasta nähdään, että alueen tiet ja reitit kulkevat paikoin lähempää kuin 400 m ja joissain tapauksissa lähempää kuin 250 m voimaloista.



Kuva 9. Hankealueen voimalat, läheiset tiet ja etäisyydet 400 m ja 250 m voimaloista.

5.3 Todennäköisyydet

5.3.1 Mallinnuksen tulokset

Todennäköisyyslaskennat jäänheiton riskistä tehtiin kaikkiin riskiarviossa käsiteltäviin kolmeen voimalatyyppiin ja laskennoista muodostettu kuvaaja on esitetty kuvassa 10. Kuvaajasta nähdään, että riskit kasvavat hieman napakorkeuden ja roottorin halkaisijan kasvaessa, mutta erot eivät ole merkittäviä.

Oletuksilla 40 jäätämistapahtumasta kauden aikana ja kauden ollessa 151 päivää, todennäköisyyden laskentaan voidaan soveltaa erilaisia lähestymistapoja altistuvan kohteen käyttäytymisestä riippuen. Ero syntyy siitä, tietääkö altistuva kohde, että tuulivoimaloissa on käynnissä jäätämistapahtuma vai ei. Riski R lasketaan kaavalla

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

missä

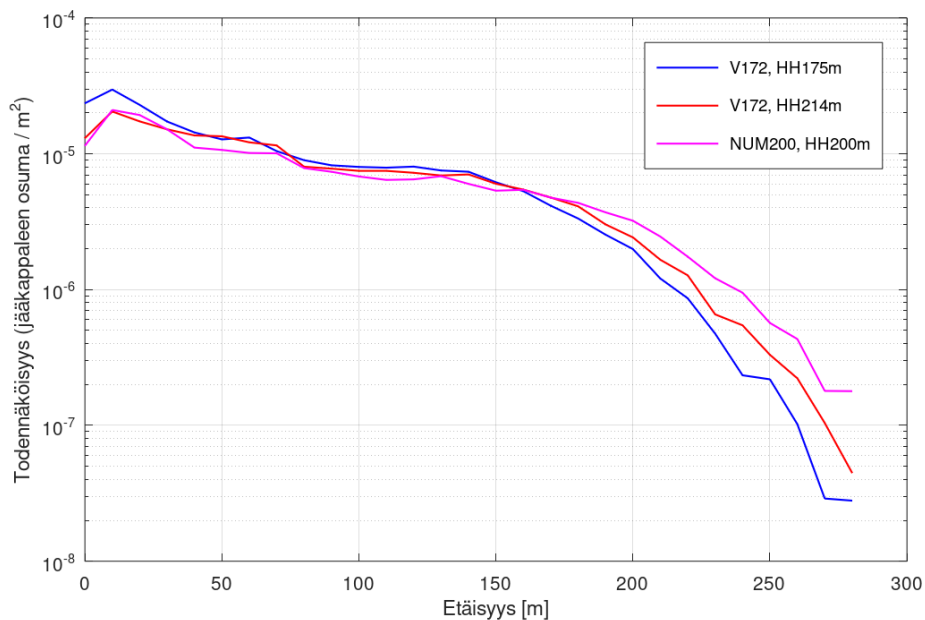
P_i = jäätämistapahtuman todennäköisyys

P_h = todennäköisyys, että jääkappale osuu kohteeseen

A = altistuvan kohteen projisoitu pinta-ala

Jos osoitetaan, että voimaloihin kertyy jäätä, jäätämistapahtuman todennäköisyys $p_i = 1$. Tämä voi tapahtua esimerkiksi huoltohenkilökunnan saapuessa voimala-alueelle.

Jos taas ei tiedetä, onko voimaloihin kertynyt jäätä, $p_i = \frac{40}{151} = 0,265$.



Kuva 10. Simuloidut todennäköisyyskäyrät Kokkonevan voimaloille. Todennäköisyys (osumia neliometriä kohden) on esitetty etäisyyden (m) funktiona eri turbiinityypeillä.

5.3.2 Tapausten todennäköisyys

Yllä esitettyjen tapausten todennäköisyydet jääkappaleen osumalle kaikkien turbiinityyppien tapauksissa on johdettu kuvasta 10 ja ne on esitetty taulukoissa 2, 3 ja 4.

	Turvallinen tilanne
	Lisätietoa tarvitaan
	Riskiä pienennettävä

Tapaus	Todennäköisyys		
	50 m	150 m	250 m
Etäisyys voimalan tornista			
Yleinen todennäköisyys /m ² /tapahtuma	1,28e-5	6,17e-6	2,19e-7
Ihminen, A = 0,2 m ² tapahtuma tiedossa	2,56e-06	1,23e-06	4,38e-08
Ihminen, A = 0,2 m ² , tapahtuma ei tiedossa	6,78e-07	3,27e-07	1,16e-08
Auto, A = 10 m ² , tapahtuma tiedossa	1,28e-04	6,17e-05	2,19e-06
Auto, A = 10 m ² , tapahtuma ei tiedossa	3,39e-05	1,64e-05	5,80e-07

Taulukko 2. Todennäköisyydet jääkappaleen osumalle eri tilanteissa turbiinityypillä V172-7.2MW, HH 175 m.

Tapaus	Todennäköisyys		
	50 m	150 m	250 m
Etäisyys voimalan tornista			
Yleinen todennäköisyys /m ² /tapahtuma	1,35e-5	6,02e-6	3,31e-7
Ihminen, A = 0,2 m ² tapahtuma tiedossa	2,70e-06	1,20e-06	6,62e-08
Ihminen, A = 0,2 m ² , tapahtuma ei tiedossa	7,16e-07	3,19e-07	1,75e-08
Auto, A = 10 m ² , tapahtuma tiedossa	1,35e-04	6,02e-05	3,31e-06
Auto, A = 10 m ² , tapahtuma ei tiedossa	3,58e-05	1,60e-05	8,77e-07

Taulukko 3. Todennäköisyydet jääkappaleen osumalle eri tilanteissa turbiinityypillä V172-7.2MW, HH 214 m.

Tapaus	Todennäköisyys		
	50 m	150 m	250 m
Etäisyys voimalan tornista			
Yleinen todennäköisyys /m ² /tapahtuma	1,07e-5	5,35e-6	5,68e-7
Ihminen, A = 0,2 m ² tapahtuma tiedossa	2,14e-06	1,07e-06	1,14e-07
Ihminen, A = 0,2 m ² , tapahtuma ei tiedossa	5,67e-07	2,84e-07	3,01e-08
Auto, A = 10 m ² , tapahtuma tiedossa	1,07e-04	5,35e-05	5,68e-06
Auto, A = 10 m ² , tapahtuma ei tiedossa	2,84e-05	1,42e-05	1,51e-06

Taulukko 4. Todennäköisyydet jääkappaleen osumalle eri tilanteissa turbiinityypillä NUM200, HH 200 m.

Analyysissä ei ole muuttujana aikaa, ja todennäköisyys neliometriä kohden on integroitu kaikista yhden jäätämistapahtuman jäänheitoista. Tämä tarkoittaa, että lyhytaikainen oleskelu vaara-alueella pienentää osuman todennäköisyyttä pitkäaikaiseen oleskeluun verrattuna. Jäänheiton esiintymistiheys yhden jäätämistapahtuman aikana ei ole tiedossa, mutta on järkevää olettaa, että jään kertyessä voimalaan ja irrotessa siitä, voi kulua useita tunteja, ennen kuin sääolosuhteet muuttuvat. Tällöin myös osuman todennäköisyys kasvaa.

5.4 Riskianalyysin johtopäätökset

Analyysissa laskettiin ICETHROVER-tutkimuksen mukaiset turvaetäisyydet voimaloille kaikilla turbiinityypeillä, mutta simulaatioita laskettaessa huomattiin, että myös tätä lähempänä voimaloita on turvallista liikkua.

Yksittäisten tapausten ja henkilöiden tapauksessa todennäköisyys jääkappaleen osumalle on aina pienempi kuin 10^{-5} , eli riskiä voidaan pitää hyväksyttävänä. Todennäköisyys jääkappaleen osumalle autoon on suurempi auton suuremman pinta-alan vuoksi, mikä on huomioitava analyysissa.

Taulukoissa 2–4 esitettyjen todennäköisyyksien perusteella yksittäisen auton on aina turvallista liikkua hankealueella etäisyyttä 250 m kauempana voimaloista. Osa hankealueen reiteistä kuitenkin kulkee tätä lähempää voimaloita. Huomattavaa on, että jääkappaleen osuminen autoon ei kuitenkaan aiheuta riskiä ihmisille autossa, vaikka se voikin vahingoittaa autoa. Jos huomioidaan myös, että kun autolla ajetaan voimalan ohi, oleskelu lähellä voimalaa on lyhytaikaista, joten riskiä voidaan pitää suhteellisen pienenä.

Tässä työssä ei ole huomioitu tuulipuiston turbiinien mahdollisia jäänestojärjestelmiä jäätämispäivien lukumäärää arvioitaessa. Jäätämispäivien lukumäärä vaikuttaa jäätämistapahtuman todennäköisyyteen p , suoraan sivulla 14 esitetyn kaavan mukaisesti. Jäänestojärjestelmät pyrkivät vähentämään jäätämisen aiheuttamaa tuotantotappiota, mutta jäätämistapahtumien lukumäärä ei välttämättä vähene samassa suhteessa. Jäänheiton riski aiheutuu myös vähäisemmästä jäätämistapahtumasta, jolloin riski saattaa osassa tilanteita säilyä samana, vaikka jäätämisen aiheuttama tuotantotappio vähenisikin. Toisaalta jäänestojärjestelmät saattavat irrottaa jään turbiinien lavoista nopeammin, jolloin jäätämistapahtuman kesto lyhenee, mikä pienentää myös riskejä.

On huomioitava, että jäänestojärjestelmät vähentävät vain lapoihin kertyvää jäätä, joten riskit liittyen voimaloiden muihin osiin säilyvät samana. Voidaan kuitenkin olettaa, että jäänestojärjestelmä poistaa ainakin osan pienimmistä jäätämistapahtumista kokonaan, jolloin riskit pienenevät samassa suhteessa. Joka tapauksessa jäänestojärjestelmä pienentää vain niiden tilanteiden riskiä, joissa jäätämistapahtuma ei ole tiedossa: jos tapahtuma on tiedossa, riskit säilyvät taulukoiden 2–4 mukaisina jäänestojärjestelmistä huolimatta.

Jäänestojärjestelmä todennäköisesti myös pienentää lavoista irtoavien jääkappaleiden tyyppillistä kokoa. Tämä paitsi todennäköisesti vähentää hengenvaarallisten jääkappaleiden esiintyvyyttä, myös pienentää kauas turbiineista sinkoutuvien jääkappaleiden lukumäärää, sillä kuvaajasta kuvassa 7 nähdään, että pienemmät jääkappaleet putoavat tyyppillisesti lähemmäs turbiineja.

Jos alueella liikkuu ihmisiä tai ihmisryhmiä, jotka eivät ole voimaloiden huoltohenkilökuntaa, ei todennäköisesti ole tiedossa, onko voimaloissa käynnissä jäätämistapahtumaa. Tällöin kaikilla turbiinityypeillä vasta 13 henkilön kokoinen ryhmä alkaa olla hyväksyttävän riskirajan tuntumassa ja tätä pienempien ryhmien on

turvallista liikkua alueella. Voidaan olettaa, että usein alueella liikkuvat vaellus-, metsästys- tai muut harrasteryhmät ovat tätä pienempiä. Mikäli huoltoteknikot liikkuvat alueella niin, että jäätämistapahtuma on tiedossa, voivat riskit nousta korkeammaksi kuin hyväksyttävänä pidettävä 10^{-5} suuruinen riski. Esimerkiksi turbiinityypillä 2 (V172-7.2MW, HH 214 m) 4 huoltohenkilön liikkussa neljän turbiinin läheisyydessä, kun voimaloissa on jäätä, riski osumaan on 4.3×10^{-5} .

6 Suositukset

Yksittäisten ihmisten liikkumista alueella voidaan pitää turvallisena, sillä jääkappaleen osuman todennäköisyys yksittäiseen ihmiseen on pieni kaikkialla hankealueella, vaikkakin jääkappaleen putoaminen lähelle voi aiheuttaa stressaavan kokemuksen. Yleisesti voidaan kuitenkin todeta, että mitä kauempana voimaloista pysytään, sitä turvallisempaa liikkuminen on. Muutaman sadan metrin etäisyydellä lähimmästä voimalasta on ehdottomasti turvallista liikkua.

Autot ovat turvassa jääkappaleiden osumilta kauempana kuin 250 m voimaloista. Tämä etäisyys on esitetty myös aiemmin kuvassa 9. Mikäli autolla ajetaan tietä, joka kulkee tätä lähempää voimaloita, riski osumalle on suurempi. Lähempänä kuin 250 m voimaloista olevien reittien suhteen olisi tärkeää harkita hankealueella liikkuvien tiedottamista jäänheiton riskistä erityisesti talvikaudella.

Turbiinien jäänestojärjestelmiä voi olla kannattavaa harkita tuotantotappioiden välttämisen ohella jäänheiton riskiä pienentävänä tekijänä. Jäänestojärjestelmät todennäköisesti pienentävät jonkin verran jäätämistapahtumien lukumäärää, tapahtumien kestoa ja jääkappaleiden tyypillistä kokoa sekä pienentävät turbiineista kauemmas sinkoutuvien jääkappaleiden lukumäärää. Jäänestojärjestelmien todellista vaikutusta riskeihin on kuitenkin vaikeaa arvioida, eikä riskienhallinnan tulisi perustua ainoastaan niihin.

Huoltoteknikkoryhmälle saattaa muodostua hyväksyttävää suurempi riski heidän liikkueessaan hankealueella jäätämistapahtuman ollessa tiedossa. Tämän vuoksi olisi suositeltavaa, että voimalan oven yläpuolelle rakennetaan suojakatos suojaamaan voimalalla vierailevia henkilöitä heidän kulkiessaan voimalan ovesta. Huoltoteknikkojen tulisi myös olla tietoisia, että mikäli jäätämistapahtuma on käynnissä, tulisi riskin minimoimiseksi oleskella voimaloiden läheisyydessä mahdollisimman vähän aikaa ilman suojaa.

Esimerkki tuulivoimalan oven yläpuolella olevasta katoksesta on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. Esimerkki tuulivoimalan suojakatoksesta Suomessa.

7 Lähteet

1. ICETHROWER – mapping and tool for risk analysis, Swedish Energy Agency, 2017.
2. Suomen Tuuliatlas, Ilmatieteen laitos, viitattu toukokuussa 2023.
3. IEA Wind TCP Task 19, International recommendations, IEA Wind, 2018.