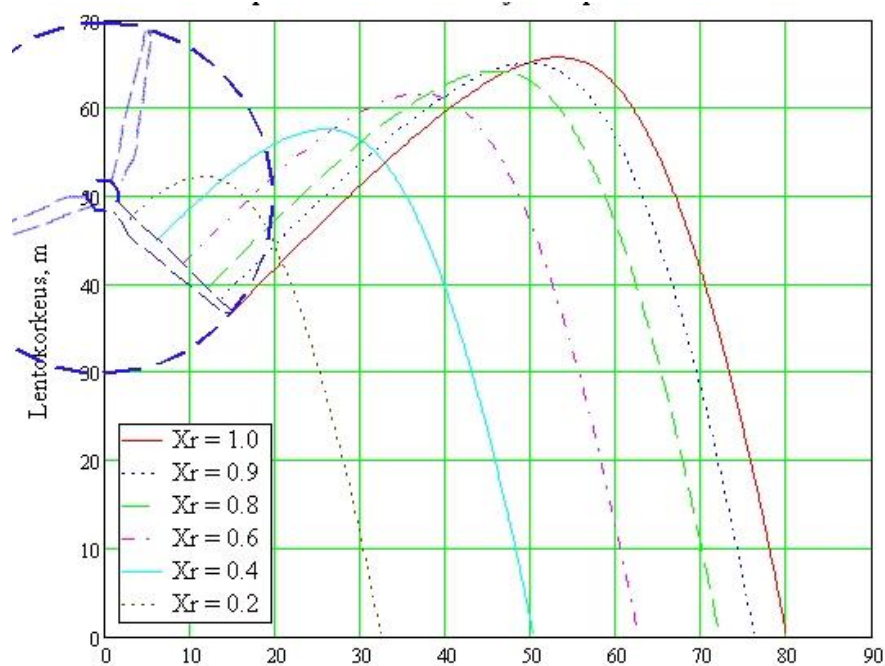


TUULIVOIMALAN JÄÄNHEITTOMATKA

Aiheen kuvaus ja riippuvuudet

Raportti: TT-2014-08-11EH

Laati Erkki Haapanen, DI
Tuulitaito

Sisällysluettelo:

Johdanto.....	3
Jäänheittomatkan arviointi laskemalla	3
Laskentamallin kehitys	4
Laskennan todentamiseen käytetyt mittaustulokset	5
Kokemuksia Saksassa.....	5
Kokemuksia Sveitsistä	5
Heittomatka ja niiden yleisyys	6
Heittopituuksien esiintymistaajuus	7
Laskentatulokset E-40 voimalalle	8
Kokemuksia Suomen jäätävistä olosuhteista	9
Jäätymisriskin arviointi tuulipuistoa suunniteltaessa.....	11
Jään irtoaminen ja siihen vaikuttavat tekijät	12
Tuulen nopeuden vaikutus jäiden irtoamiseen	12
Voimalan ohjaustavan vaikutus lapojen jäätymiseen	12
Ison voimalan jäänheittomatka kohtuullisissa oloissa.	13
Laskennan epävarmuustekijät	15
Turvallisen alueen määrittely	15
Riskitarkastelu.....	16
Toimenpiteitä, joilla estetään vahinkoja, kun lavat ovat jäässä.....	16
Lähteet:.....	17

Copyright: Tämä dokumentti on Tuulitaidon laatima eikä sitä saa kopioida tai julkaista ilman Tuulitaidon lupaa. Raportti on laadittu aiheen kuvaamiseksi sekä jäänheittomatkan riippuvuuksien ymmärtämiseksi. Esimerkit ovat tiettyyn alueeseen ja voimalatyyppiin kohdistuvia eivätkä sovellu sellaisenaan yleistettäväksi.

Johdanto

Tuulivoimalan lapoihin ja rakenteisiin voi kertyä lunta ja jäätä olosuhteista riippuen eri tavoin: Lumi- tai räntäsateella jäätä tai lunta kasaantuu lapoihin ja muihin rakenteisiin. Nollan tuntumassa kostea ilma härmistyy kuuraksi ja alijäähtyneet vesipisarat jäätyvät osuessaan voimalaan. Jäätävässä vesisateessa puolestaan syntyy kovaa ja kirkasta jäätä. Syntynyt kuura ympäröi lapaa tasaisesti, kun taas lumi kasaantuu lavan yläpuolisille pinnoille. Kuura ja lumi ovat vaarattomia, sillä lumi putoaa yleensä suoraan voimalan juurelle ja kuura häviää vähitellen voimalan käynnistyttyä.

Jäätyminen edellyttää jäätäviä olosuhteita, joita esiintyy joko jäätävinä sateina tai, kun pilvikorkeus on voimalan potkurin kehän korkeudella tai sen alapuolella. Suomessa jäätäviä sateita on erittäin harvoin, vain kaksi prosenttia kaikista sateista. Sitä saattaa esiintyä joinakin vuosina pari kertaa talvessa eikä kaikkina talvina ollenkaan. Jäätävällä sateella jään muodostus voi tapahtua muutamassa kymmenessä minuutissa niin voimakkaasti, että voimala pysähtyy irronneen jään aiheuttamaan epätasapainoon. Lämpötilan muutos, mikä on jäätävä sateen jälkeen yleistä, irrottaa sateen jälkeen jäät, koska lavan ja jään lämpölaajeneminen on erilainen.

Vaarallisinta jäätä on alijäähtyneistä vesipisaroista muodostunut tykkyjää tai jäätävästä sateesta syntynyt kirkas jääkerros. Ne ovat tiukasti kiinni lavan pinnassa ja muodostavat voimalan käydessä varsinaisen jäänheittoriskin. Käytön aikana jäätä kehittyy tiiviiksi tykyksi lavan etureunaan lähelle kärkeä. Mitä tiiviimpää jää on, sitä helpommin se irtoaa lavan taipuessa tuulen paineesta. Jään irtoaminen taipuisista lavoista rajoittaa automaattisesti jään paksuutta, mikä puolestaan lyhentää jäänheittomatkaa. Tämä mekanismi on merkittävästi vähentänyt jäänheiton riskejä.

Jään synty on yleensä hidasta ja kestää tunteja ennen kuin jään irtoamisen jälkeen syntyy uutta jäätä irtoamaan.

Jäänheittomatkan arviointi laskemalla

Ensimmäinen tällainen laskentamalli perustui Saksassa 1990 luvulla tehtyihin mittauksiin. Tämän ”Seifertin” /10/ mallin mukaan jäänheittomatka lasketaan yhtälöstä:

$$d = (D + H) \times 1.5, \text{ jossa}$$

d = maksimi heittomatka, m

D = potkurin halkaisija, m

H = voimalan napakorkeus

”Seifertin” mallin heikkoutena on, että se pätee vain samanlaisille voimaloille, jotka olivat

mukana mittauksissa eikä se perustu fysikaaliseen mallinnukseen, joka ottaisi riittävästi huomioon lentorataan vaikuttavia tekijöitä. Mallin laadinnassa käytetyt todelliset mittaustulokset ovat sen sijaan arvokkaita uusia ja parempia laskentamalleja kehitettäessä.

Tämän raportin yhteydessä kehitetyn laskentamallin tarkistuksessa ja kalibroinnissa käytäntöön on käytetty hyväksi Saksassa /2/ ja sekä Sveitsissä /1/ tehtyjen laajojen jäänheittotutkimuksien tuloksia. Lisäksi on tarkasteltu Suomessa saatuja kokemuksia.

Laskentamallin kehitys

Muodostetaan laskentakaavat jään lentoradalle, kun siihen vaikuttavat:

- alkunopeus, joka on sama kuin potkurin lavan kehänopeus irtoamishetkellä ja irtoamispaikassa.
- maan vetovoima
- tuulen nopeus
- ilman vastus ja kappaleen geometria eli massa ja pinta-ala
- laskentamenetelmän toimivuus tarkistetaan vertaamalla laskemalla saatuja tuloksia saksalaisten ja sveitsiläisten mittaamiin tuloksiin.

Ilmanvastus riippuu kappaleen muodosta, karheudesta, koosta ja Reynoldsin luvusta. Vastuskerroin on keskeisin kalibrointia vaativa suure, joka voidaan määrittää kokeellisten tulosten perusteella vertaamalla laskettuja tuloksia mitattuihin heittomatkoihin. Yleisesti on käytetty pallon vastuskerroin 1,0 on liian pieni epämääräisen muotoiselle jääkimpaleelle. Jäähän vaikuttavat voimat ohjaavat sen lentorataa seuraavan kaavan mukaan.

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= -\frac{1}{2}\rho AC_D W\dot{x} & \rho &= \text{ilman tiheys} \\ m\ddot{y} &= -mg - \frac{1}{2}\rho AC_D W\dot{y} & A &= \text{poikkipinta-ala} \\ m\ddot{z} &= -\frac{1}{2}\rho AC_D W(\dot{z} - V) & C_D &= \text{vastuskerroin} \\ & & V &= \text{tuulen nopeus} \\ & & W &= \text{jään nopeus} \\ & & g &= \text{maan vetovoiman kiihtyvyys} \\ & & m &= \text{jään massa} \end{aligned}$$

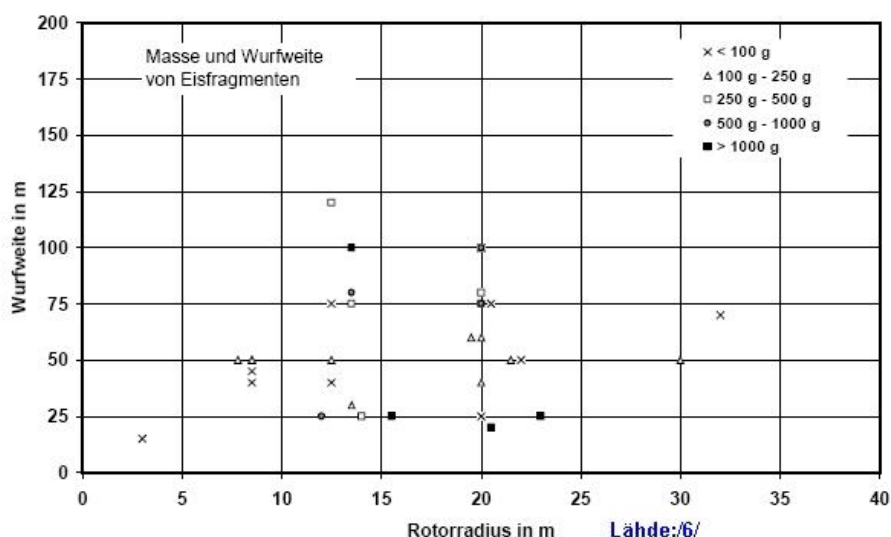
Kaava 1. Jään lentorataan vaikuttavat tekijät. Ilman tiheys, pinta-ala, vastuskerroin, tuulen nopeus, jään nopeus, jään massa ja maan vetovoima. Kaava kuvaa jään kiihtyvyyden eri komponentteja lennon aikana. Laskennan alkuarvona on jään irtoamishetken tilanne ja loppuarvona maahan törmäämishetken tilanne. Näistä kokollisesti mitattuja muuttujia ovat massa, poikkipinta-ala ja putoamiskohta. Vastuskerroin C_D voidaan määrittää sovittamalla sen arvot siten, että laskennan tulokset vastaavat todellisissa mittauksissa saatuja tuloksia eli käytännön kokemuksia.

Laskennan todentamiseen käytetyt mittaustulokset

Kokemuksia Saksassa

Saksan tuulivoiman tutkimuskeskus DEWI on tehnyt laajan tutkimuksen tuulivoimaloiden jäätymistapauksista. Tutkimusaineistoa kerättiin runsaasti Saksassa, jossa pellot ovat talvellakin yleensä lumesta paljaana ja voimaloista lentänyt jää helposti löydettävissä. Aineiston perusteella kehitettiin tuulivoimalan jäänheittomatkan laskentakaavat. /6/

Tutkimus tehtiin 1990-luvun alkupuolella, jolloin voimalat olivat kooltaan alle puolet nykyisistä. Siksi kehitetyt kaavat eivät vastaa nykypäivän tilannetta, koska voimalat ja niiden potkurit ovat yli kaksi kertaa suurempia kuin silloin. Silloin kehitetyt ja vieläkin paljon referoidut laskentakaavat vastaavat paraabelin approksimointia suoralla viivalla, mikä pitää paikkansa lyhyellä välillä, mutta virhe kasvaa välin kasvaessa voimakkaasti. Tässä artikkelissa käytetään jään ballistisia lento-ominaisuuksia, kun siihen vaikuttaa voimalan pyörimisliike sekä ilman vastus. Laskelmassa huomioidaan voimalan napakorkeus, potkurin halkaisija, tuulen nopeus, tuuliprofiili, pyörimisnopeus, jään irtoamiskohta lavasta, ilman vastus, jään paino, paksuus ja pinta-ala sekä tuulen ja massavoiman vaikutus lentorataan.



Kuva 1 Mitatut jäänheittomatkat DEWIn mukaan. Vaaka-akselilla on potkurin säde ja pystyakselilla heittomatka metreissä. Erilaiset merkinnät vastaavat eri painoisia jääkimpaleita.

Kokemuksia Sveitsistä

Sveitsissä tehtiin vuosien 2005-2007 talvella hyvin tarkkaa seuranta E-40 tuulivoimalan ympärillä ja kerättiin tietoa jäänheittotapauksista. Jään putoamispaikat ja painot merkittiin muistiin. Tärkeimmät havainnot olivat:

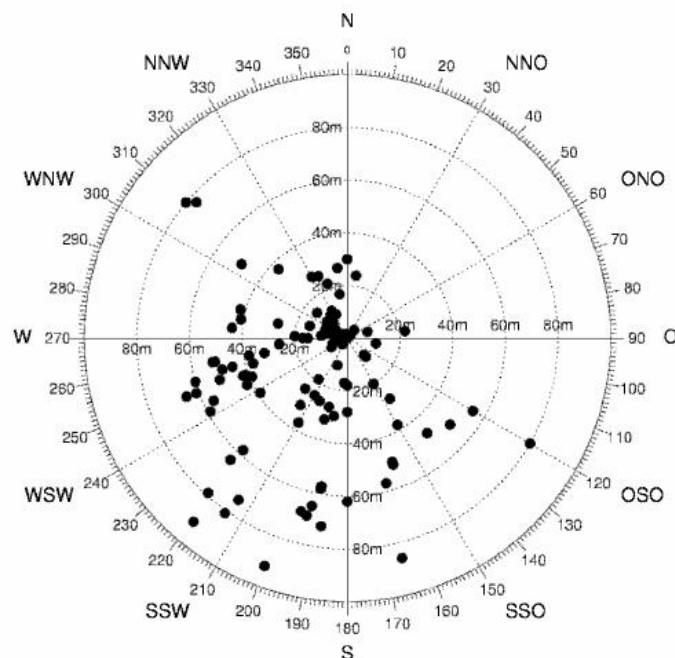
- Jäätävällä kelillä lavat jäätyvät
- Jäätä voi esiintyä Alpeilla kaikkina vuodenaikoina
- Jäät putosivat enimmäkseen suoraan voimalan lapojen alapuolelle
- Putoavat jäät muodostavat riskitekijän lähialueelle

Heittomatka ja niiden yleisyys

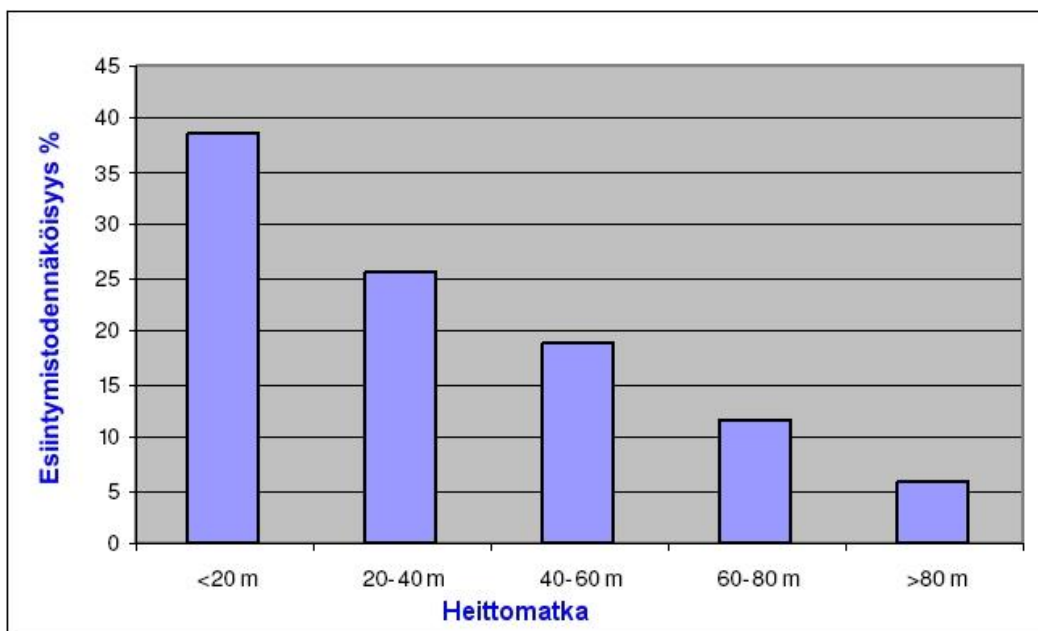
Pudonneiden jäiden sijainnista ja koosta tehtiin tarkat muistiinpanot. Seuraavissa kuvissa on niiden tuloksia.



Kuva 2. Jääkimpaleiden sijaintitieto talletettiin, ne punnittiin ja mitattiin. E-40 voimalan lavan pituus on 20 m ja napakorkeus 50 m. Lähde: /1/

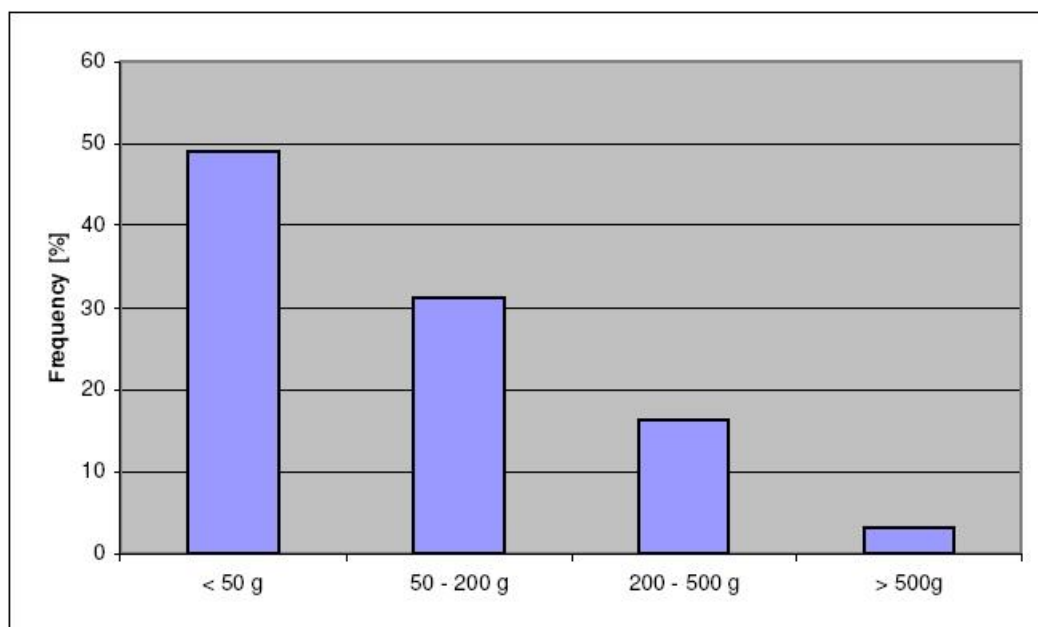


Kuva 3. E-40 voimalan heittämien jääpalojen sijainnit voimalan ympärillä. Pisin heittomatka on ollut 92 m. Suurin osa paloista oli alle 20 m etäisyydellä voimalasta.

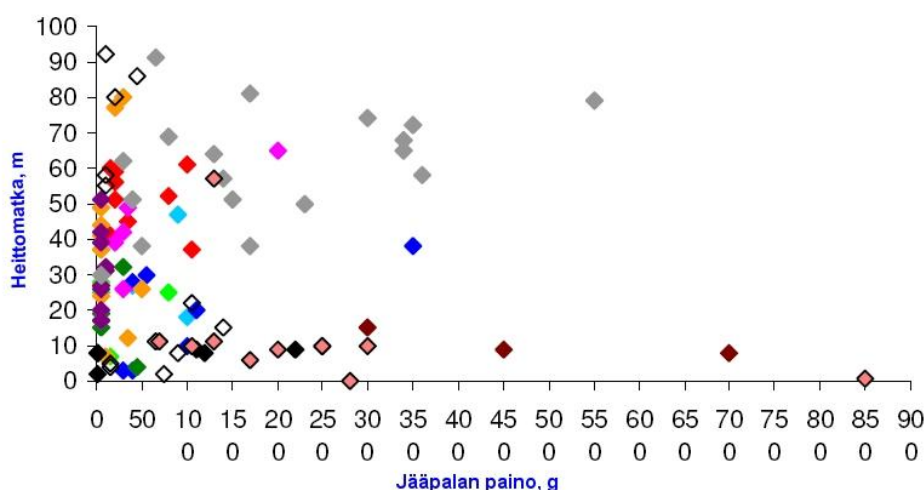
Heittopituuksien esiintymistaajuus

Kuva 4. Heittomatkan todennäköisyys. Noin 5 % jääpaloista ylitti 80 m etäisyyden.

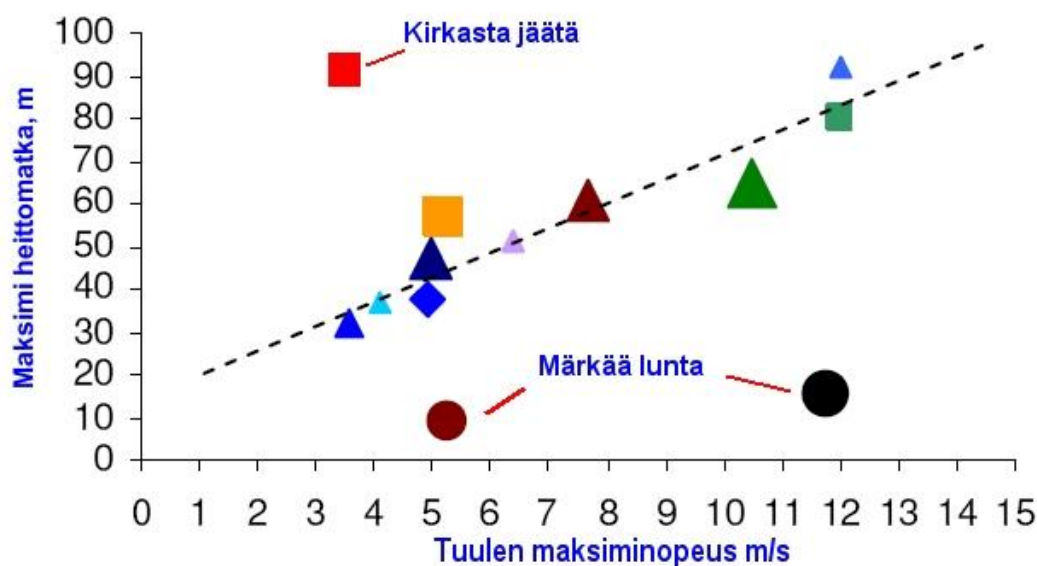
Talvella 06/07 esiintyi runsaasti jäätymistä. Silloin tavattiin 121 palasta, joista suurimpien pituus ylitti metrin ja painavin oli 1,8 kg. Pisin heittomatka oli 92 m voimalasta. Muina talvina löydettiin vain 13 ja 14 jääpalaa.



Kuva 5. Jääpalojen painojakauma. Noin puolet paloista oli alle 50 g. Jos jääpala oli rikkoutunut pudotessa, sen osat kerättiin yhteen ja punnittiin kaikki yhdessä. Puolta kiloa painavampia palasia esiintyi noin 3 %.



Kuva 6. Jäälalojen painon ja heittomatkan välinen riippuvuus. Painavin pala, 850 g on pudonnut suoraan alas. 550 gramman jäätävässä vesisateessa syntynyt kirkas jääpala on lentänyt 80 m. Muut painavahkot palaset ovat jääneet lähemmäksi voimalaa.



Kuva 7. Heittomatka riippuu kuvan katkoviivan mukaisesti tuulen nopeudesta. Tavanomaisen jäätämistapaukset ovat katkoviivan ympärillä. Jäätävässä vesisateessa syntynyt kirkas jää murtuu lähes heti voimalan käynnistyttyä ja saattaa tällöin lentää pitkälle vaikka tuulta ei juuri olisikaan. Heittomatka perustuu tällöin pyörivän potkurin linkovaikutukseen. Märkä lumi, jota syntyy räntäsateessa putoaa nopeasti ja lähelle voimalaa. Tuulen nopeus on suuri, koska märkä lumi heikentää aerodynamiikkaa ja voimalan käynnistymiseen tarvitaan kovaa tuulta.

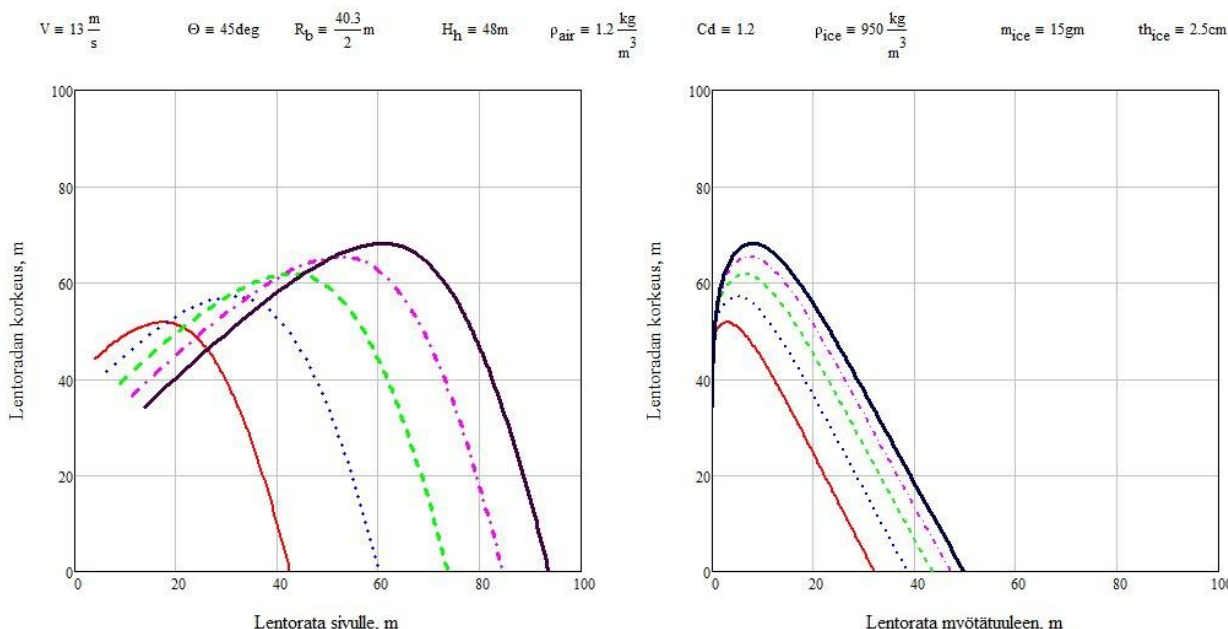
Laskentatulokset E-40 voimalalle

Käytetään kehitettyä laskentaohjelmaa E-40 voimalalle ja verrataan tuloksia toteutuneisiin jäänheittomatkoihin. Tuulen nopeuden on oletettu pysyvän

vakiona jään lentomatkan aikana. Lennon loppuosalla kevyet kappaleet kulkeutuvat tuulen mukana pidemmälle myötätuuleen kuin painavat.

Wind turbine E40-600

Pisimmät mitatut heittomatkat



Kuva 8 E-40 voimalan lavoista voimalan nousevan lavan puoleiselle sivulle lentävän kirkaan jään lentomatkat, jotka edustavat mittauksissa pisimmälle lentäneitä jäitä. Vasemmalla tuulen suunnasta katsottuna ja oikealla sivusta katsottuna tuulen vaikutus jään lentorataan. Käyrä kuvaavat lavan eri kohdista irronnutta jäätä. Laskentamalli vastaa hyvin mittaustuloksia.

Kokemuksia Suomen jäätävistä olosuhteista



Kuva 9. Jäätävien päivien lukumäärä Suomessa. Suomenlahden ja Pohjanlahden rannikot kuuluvat alueeseen 2 – 7 päivää vuodessa.

Lähde: http://www.fmi.fi/research_meteorology/meteorology_9.html#5

Suomessa on käytössä tuulivoimaloita, joiden toiminta-alueella liikkuu paljon ihmisiä. Esimerkki tällaisesta alueesta on Oulunsalon Ritunkari, jossa vanhin 1,3 MW:n voimala, on toiminut jo yli 10 vuotta ja kolme 1 MW voimalaa kesästä 2003 lähtien ja lisäksi kaksi 3 MW:n voimalaa talvesta 2008 alkaen. Voimala-alueen ohi kulkee Hailuodon lautalle vievä tie, jossa autoilijat odottelevat noin tunnin välein kulkevaa lauttaa. Lisäksi lauttarannassa on kiosk, jonka pitäjällä on mahdollisuudet päivittäin seurata voimaloiden toimintaa. Jäistä ei ole ollut merkittävää haittaa. Jäätymistä esiintyy erittäin harvoin ja esiintyy enimmäkseen ohuena kerroksena lapojen etureunassa.

Porin Tahkoluotoon vievän tien varressa on neljä 1 MW voimalaa, joihin on asennettu jäänpoistojärjestelmät. Ensimmäisestä voimalasta 75 metrin etäisyydellä on Hyötytuulen tuulivoiman esittelypaviljonki, jonka ikkunoihin on joskus ropissut jäitä aiheuttamatta minkäänlaista vahinkoa. Hyötytuuli on seurannut useita vuosia Tahkoluodon alueen voimaloita, joista suurin on 2 MW ja korkeus 80 m. Voimala-alueella työskennellään jatkuvasti eikä oman väen puolelta ole havaittu minkäänlaisia ongelmia lentävien jäiden vuoksi. Myöskään Tahkoluotoon vievän tien käyttäjät eivät ole tehneet ilmoituksia jäiden aiheuttamista ongelmista. Jos vahinkoja olisi tapahtunut, Hyötytuulelle olisi varmasti esitetty korvausvaatimuksia. Porissa voimalat ovat olleet pari kertaa jäässä jäätävän sateen jälkeen.

Kotkassa on toiminut vuodesta 1999 lähtien kaksi yhden megawatin voimalaa, joihin on asennettu jäänpoistolaitteet ja jääntunnistin. Voimaloiden jääntunnistin ei antanut yhtään hälytystä kahden ensimmäisen toimintavuoden aikana ja otettiin tarpeettomana pois käytöstä. Jäistä ei ole ollut ongelmia vaikka jäänestolaitteita ei ole käytetty. Lähde /8/

Kuivaniemessä on ollut käytössä useita voimaloita 1993 lähtien. Alueella on seitsemän sakkaussäätöistä voimalaa ja yksi 2 MW lapakulmasäädetty voimala. Sakkaussäätöisten voimaloiden jäätymisen tapahtuu lavan etureunasta alkaen ja vähitellen lavan tuulen puoleinen kylki peittyy jäähän. Lavan taakse jäätöreunan yläpuolelle saattaa kertyä myös jäätä. Voimala pysähtyy, kun jäätä on kertynyt tarpeeksi, koska se menettää aerodynaamisen tehonsa. Lapakulmasäätöisessä voimalassa, joita myös uudet voimalat edustavat, jää kertyy lavan etureunaan kapealle alalle. Ero on merkittävä sekä jään kertymän että poistettavuuden kannalta. Kapea jääsuikale etureunassa on heikosti kiinni lavan pinnassa ja irtoaa lavan taipuessa tai sysäyksestä, joka syntyy lavan ohittaessa tornin. Kaikilla voimalatyypeillä on todettu, että 2°C lämpötilan muutos irrottaa kirkkaan jään jäätävän sateen jälkeen. Voimala ei käynnisty ennen kuin jäät ovat lähteneet.

Lapista on runsaasti kokemuksia mutta se on oma lukunsa, koska olosuhteet poikkeavat merkittävästi rannikosta. Siellä jäätäminen on todellinen ongelma ennen kaikkea tuotantomenetysten vuoksi. Laskentamenetelmä soveltuu myös Lappiin, mutta siellä olosuhteet ovat haastavat.

Jäätymisriskin arviointi tuulipuistoa suunniteltaessa

Tuulivoimalaa tai tuulipuistoa suunniteltaessa on tarpeen selvittää sijoituspaikan jäätämisalttius ja mahdolliset riskit, joita jään irtoaminen pyörivistä lavoista voi aiheuttaa. Ilmatieteenlaitoksen julkaisemassa Suomen jäätämislakissa on arvioitu eri alueiden jäätämisalttiutta (www.tuuliatlas.fi). Atlaksen antamat arvot eivät kerro lapoihin kertyvän jään määrää, vaan kuvaavat ennemminkin jäätämisalttiutta 50 – 400 m korkeuksilla. Arvot ovat kuitenkin parasta saatavilla olevaa aineistoa vertailtaessa eri paikkojen jäätämisalttiutta keskenään.

Alla olevan taulukon *Aktiivisella jäätämisellä* tarkoitetaan niitä vuotuisia tunteja, jolloin uutta jäätä syntyy. *Passiivinen jäätäminen* puolestaan viittaa tunteihin, jolloin ilman lämpötila pysyy jäätämisen jälkeen nollan alapuolella eikä uutta jäätä synny mutta aiemmin syntynyt jää ei sula vaan pysyy kiinni, ellei se irtoa itsekseen tai sitä irroteta. *Tuotantotappio-%* ” on arvio jäätämisen aiheuttamasta vuosituotannon menetyksestä.

Kempele, Riutunkari						
HH, m	Aktiivinen jäätäminen, > 10 g/h/m (h/vuosi)	Aktiivinen jäätäminen, 10-50 g/h/m (h/vuosi)	Aktiivinen jäätäminen, 50-100 g/h/m (h/vuosi)	Aktiivinen jäätäminen, > 100 g/h/m (h/vuosi)	Passiivinen jäätäminen, > 10 g/m (h/vuosi)	Tuotantotappioa rvio (%)
50	47.25	23.25	4.5	19.5	1494.75	2.43
100	77.25	41.25	6	30	1714.5	2.75
200	255.75	103.5	50.25	102	2617.5	3.98

Kuva 10. Jään muodostuminen Kempeleen Riutunkarilla.

Esimerkki vertailtavan tuulipuiston jäätämisalttiudesta						
HH, m	Aktiivinen jäätäminen, > 10 g/h/m (h/vuosi)	Aktiivinen jäätäminen, 10-50 g/h/m (h/vuosi)	Aktiivinen jäätäminen, 50-100 g/h/m (h/vuosi)	Aktiivinen jäätäminen, > 100 g/h/m (h/vuosi)	Passiivinen jäätäminen, > 10 g/m (h/vuosi)	Tuotantotappioa rvio (%)
50	158.25	72.75	30	55.5	1833	3.79
100	276.75	110.25	33.75	132.75	2199.75	4.6
200	807	273.75	136.5	396.75	2850	5.44

Kuva 11. Jään muodostuminen vertailupaikassa.

Tämän taulukon perusteella voidaan verrata puiston jäätämisalttiutta Riutunkariin. Tässä tapauksessa aktiivista jäätämistä olisi noin kolminkertainen määrä verrattuna Riutunkariin ja lapojen jäätymisen aiheuttaisi noin 4 -5 % tuotantotappion ellei lavoissa ole jäänestojärjestelmää (anti-icing).

Jään irtoaminen ja siihen vaikuttavat tekijät

Jos jää ei tartu lavan pintaan tai irtoaa siitä helposti, niin siitä aiheutuvat riskit ovat pieniä. Tähän tarkoitukseen on Suomessa kehitetty superhydrofobinen pinnoite, Nordic AFR Coating, joka on edennyt jo tuulipuistossa tapahtuvaan testaukseen.

Jään irtoamiseen vaikuttavat monet tekijät, joista tarkemmin seuraavassa.

Tuulen nopeuden vaikutus jäiden irtoamiseen

Tuulen paine vaikuttaa potkurin lapoihin taivuttaen niitä taakse päin. Paine on suurimmillaan, kun tuulen nopeus on 12 m/s, jolloin lapojen taipuma on suurimmillaan ja pyörimisnopeus suurin. Tämä on tilanne, jossa jään irtoaminen on todennäköisintä, koska taivutus on tunnettu keino irrottaa jäätä. Esimerkiksi Vestas on käyttänyt taipuvalapaisia voimaloitteita ilman jäänpoistojärjestelmää erittäin jäätävissä olosuhteissa korkealla vuoristossa ja Ruotsin Lapissa, koska lapojen taipuminen on pitänyt lavat riittävän jäättöminä.

Voimalan ohjaustavan vaikutus lapojen jäätymiseen

Nykyaikaisen voimalan lapakulmia ohjataan siten, että tuuli kohtaa lavan lähes suoraan edestä. Tämän ansiosta jää syntyy lavan etureunaan, missä sen kasvu tapahtuu paksuussuunnassa kuten seuraavassa kuvassa on esitetty. Lavan taipuessa tällainen jää ei pysy kiinni vaan irtoaa. Tämä tarkoittaa, että kovin isoja jääpaloja ei pääse syntymään vaan jäät irtoavat ennen kuin niistä tulee vaarallisen kookkaita.



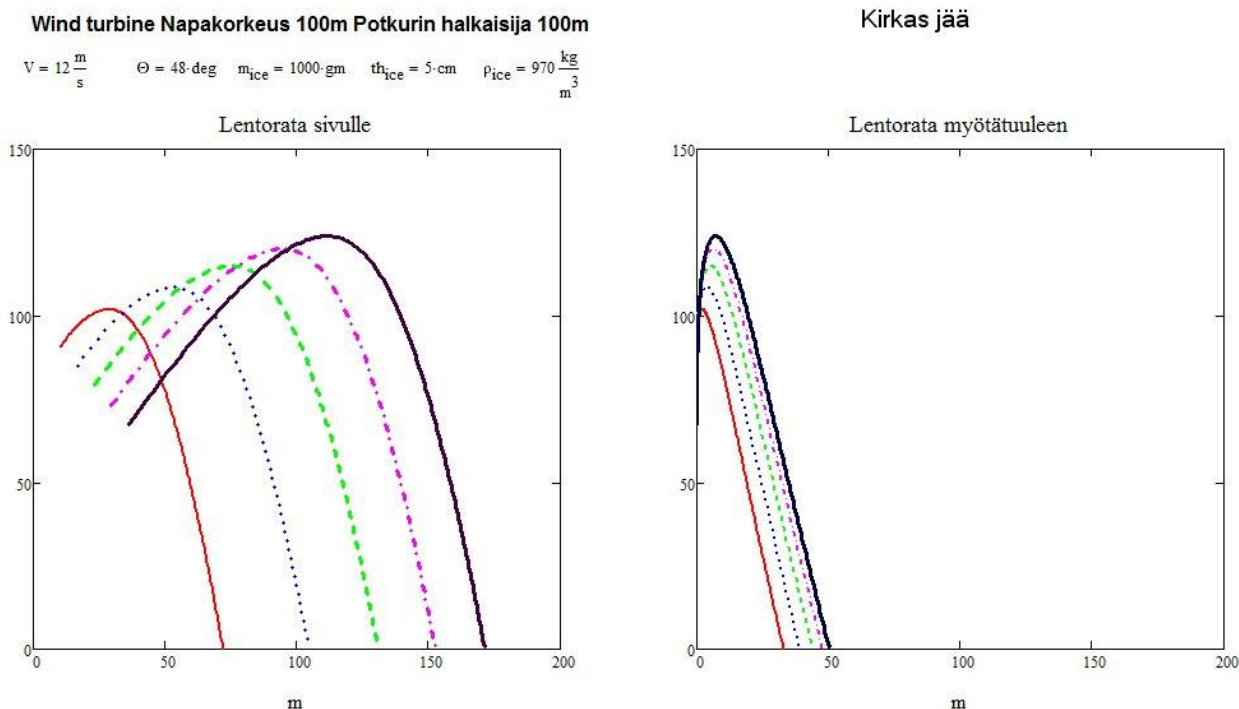
Kuva 12. Jäätymisen eteneminen lavan johtoreunassa. Kontaktipinta taipuisaan lapaan on pieni, mistä johtuen jää irtoaa helposti lavan taipuessa tuulen voimasta. Kontaktipinnan kapeudesta ja etureunan pyöreyydestä johtuen myös ”linkoutuminen”¹ on mahdotonta, koska jää ei pysy etureunassa irrottuaan pinnasta. Kuvan tapaukset ovat laskennallisia sillä paksu jää ei pysy kiinni taipuisassa lavassa. Lähde: www.tuuliatlas.fi

¹ Linkoutumisessa jää liukuu lavan johtoreunaa pitkin kohti kärkeä ja saa siitä lisänopeutta. Tämä edellyttää, että jää on niin leveä, että se pysyy liukuessaan lavan etureunassa vaikka tuuli pyrkii heittämään jään sivuun lavan alipainepuolelle.

Ison voimalan jäänheittomatka kohtuullisissa oloissa.

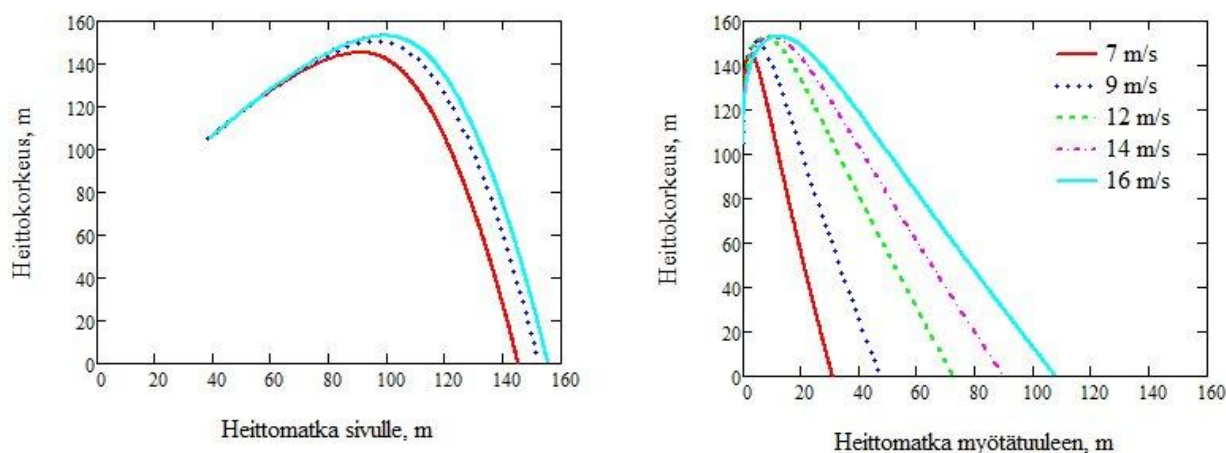
Kohtuullisissa jääoloissa esiintyy jäätä, joka syntyy normaalisti lavan etureunaan ohueksi kerrokseksi. Yleisin tilanne on sellainen, jossa jäätä on pari senttiä. Tällaisen jään irtoaminen ei ole ongelma. Pahin tilanne on silloin, kun jää on alijäähtyneiden vesipisaroiden muodostamaa tykkyä. Sen tiheys saattaa nousta pahimmilloleen 0,5 – 0,7 g/cm ja paksuus jopa kymmeniä senttejä ellei mitään valvontaa ole käytössä. Tällaisen paksun kerroksen irtoaminen on vaarallista, koska palaset saattavat painaa kiloja ja osuessaan henkilöön aiheuttavat vammoja, jopa kuoleman.

Edellä kerrottu on teoreettisesti mahdollista, mutta onneksi nykyaikaisen tuulivoimalan lapojen taipuisuuden ja tuulenpaineen vaikutuksesta jäät irtoavat ohuina kerroksina ja pieninä paloina, jolloin niiden aiheuttamat riskit vähenevät. Jos voimalassa on jään tunnistus, niin jäätymisvaarasta voidaan varoittaa lähialueella liikkuvia ja tarvittaessa pysäyttää voimala.

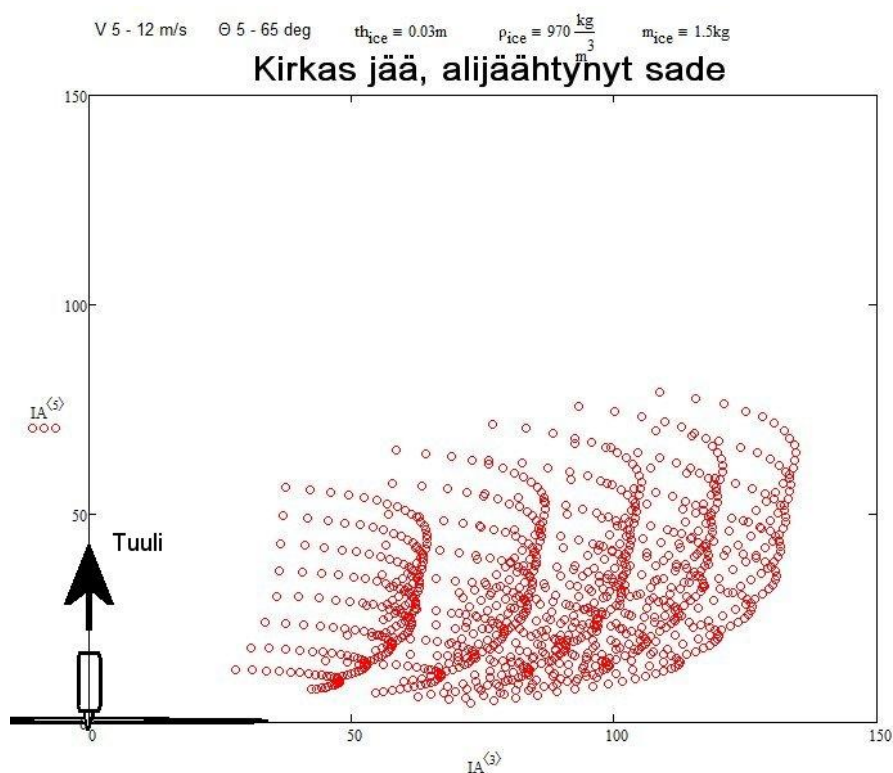
Esimerkkejä nykyvoimaloiden jäänheittomatkoista

Kuva 13. Alijäähtyneessä sateessa syntyneen kirkkaan jään lentomatka edellyttäen, että sitä on vielä jäljellä, kun tuulen nopeus on 12 m/s. Kirkas jää irtoaa normaalisti jo ennen kuin voimala käynnistyy tai hyvin nopeasti käynnistymisen jälkeen, jolloin se putoaa hyvin lähelle voimalaa.

Voimalan korkeus 135 m ja halkaisija 130 m. Lavan kärjestä irtoavan 5 cm paksun jään lentomatka. Irtoaminen 50° kulmassa. Tuulienopeus 5 - 16 m/s



Kuva 14. Kovan tykkyjään lentorata 135 m korkean voimalan 65 m pitkstä lavasta, kun tuulen nopeus vaihtelee välillä 7 – 16 m/s. Kasvava tuulen nopeus vie jäätä kauemmaksi voimalan taakse mutta ei juurikaan vaikuta sivulle suuntautuvaan matkaan. Referenssin vuoksi todettakoon, että Seifertin kaavalla saataisiin jäänheittomatoksi $(130+135)*1.5 = 397,5$ m (kts. sivu 3)



Kuva 15. Kirkkaan jään lentomatkoja eri tuulen nopeuksilla ja eri irtoamis kulmilla. Tuuli vaihtelee 5 – 12 m välillä, irtoamiskulmat ovat välillä 5 – 65° alakuolokohdasta laskettuna. Maksimi heittomatka osuu noin 48° irtoamiskulmaan. Pisimmät lasketut heittomatkat ovat hyvin teoreettisia, koska jää on todennäköisesti irronnut jo paljon aikaisemmin.

Laskennan epävarmuustekijät

Edellä tehdyt laskelmat on kalibroitu saksalaisten ja sveitsiläisten keräämien tulosten avulla. Koska useamman megawatin kokoisista voimaloista ei vielä ole kerättyä tietoa saatavilla, on käytettävä tarpeellista varovaisuutta, kunnes tutkittua tietoa on riittävästi. Tuulen nopeuden kasvu lisää lähinnä myötätuulimatkaa, mutta ei vaikuta sivulle lentämiseen, koska voimalan pyörimisnopeus pysyy vakiona, kun tuulen nopeus ylittää 12 m/s.

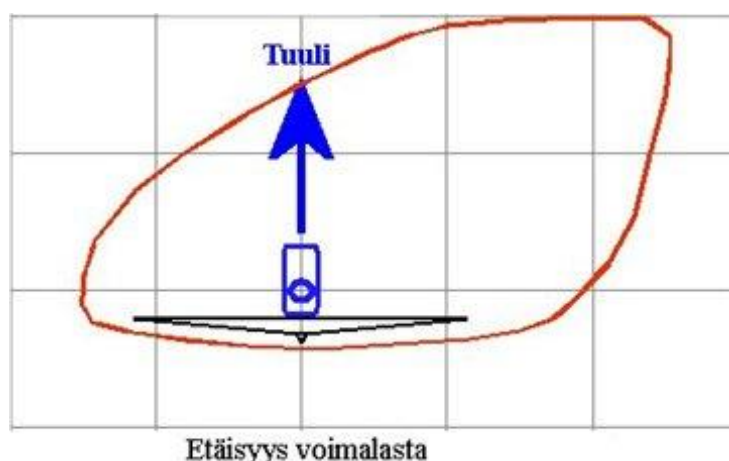
Tehdyissä seurannoissa keskimääräinen jääkappaleen paino on ollut alle 350 grammaa. Sveitsiläiset eivät havainneet riippuvuutta heittomatkan ja jään painon välillä, mikä tarkoittanee joko sitä, että isompien jääkappaleiden muoto aiheuttaa suhteessa enemmän ilmanvastusta tai, että isommat jääkappaleet irtoavat lähempää potkurin napaa, joten lähtönopeus on alhainen eivätkä ne siksi lennä pitkälle.

Laskelmissa on otettava huomioon paikallinen jäätämisalttius sekä tuulivoimalan ominaisuudet ja käyttötapa.

Turvallisen alueen määrittely

Jäiden lentomatkan voi arvioida laskennallisesti. Laskennan epävarmuudesta johtuen on aiheellista käyttää sopivaa turvamarginaalia, joka sovitetaan paikallisiin olosuhteisiin.

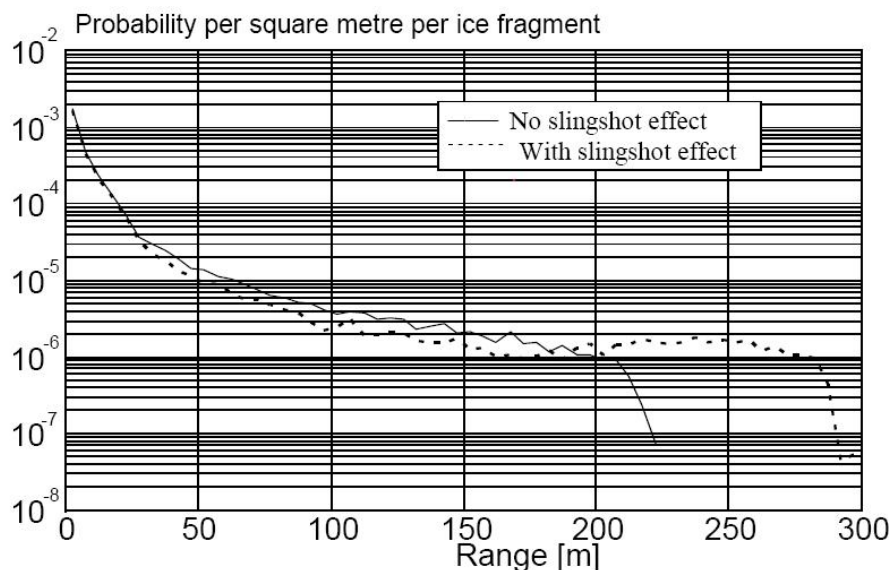
Turvallisinta on rajoittaa voimalan läheisyydessä liikkumista silloin, kun lavat ovat jäätyneet. Jos voimala-alueella on tarvetta liikkua siipien ollessa jäässä, on erityisesti varottava potkurin alla ja siitä myötätuuleen olevaa aluetta varsinkin ylös nousevan lavan puolella.



Kuva 16. Riskialueella liikkumista tulisi välttää, kun lavoissa havaitaan jäätä. Riskialue riippuu tuulen suunnasta ja on sitä suurempi mitä kovempi tuuli ja paksumpi jää.

Riskitarkastelu

Tutkimuslaitokset kuten VTT, DNV GL, DEWI ja Risö ovat arvioineet WECO-projektissa MonteCarlo simulaation avulla, että todennäköisyys jään osumiselle henkilöön on 10^{-6} osumaa vuodessa neliometriä kohti. Tämä täyttää DIN EN 50126 –standardin mukaiset vaatimukset. Jos 15 000 ihmistä ohittaa voimalat vuodessa, niin onnettomuus sattuu kerran 300 vuodessa.



Kuva 17 Lähteessä /3/ laskettu riskijakauma sille, että yhden neliometrin alueelle osuu jääpala. Tässä mainittua ”sling shot” eli linkoefektiä ei esiinny nykyaikaisilla voimaloilla. Riski jään osumiseen on erittäin pieni.

Toimenpiteitä, joilla estetään vahinkoja, kun lavat ovat jäässä

- Estetään asiattomien pääsy voimala-alueelle.
- Kypärän käyttö pakolliseksi talvisaikaan liikuttaessa voimala-alueella.
- Rajataan riskialueet ja opastetaan, miten alueella tulee toimia.
- Varustetaan voimala jään tunnistusautomaatiikalla, joka käynnistää varoitukset sekä tarvittaessa pysäyttää voimalan.
- Videovalvonta jään havainnointiin.
- Pysäytetään voimala, jos riskialueella on liikuttava silloin, kun lavoissa on paksusti jäätä.
- Varustetaan voimala jäänestojärjestemällä.
- Voimalan läheisille liikuntaväylille on syytä laittaa putoavista jäistä varoittavat kyltit ja voimalaan varoitusvalo, joka toimii silloin, kun voimalan siivet ovat jäässä.

Lähteet:

/1/ WIND TURBINE ICE THROW STUDIES IN THE SWISS ALPS

René Cattin¹, Stefan Kunz¹, Alain Heimo², Gabriela Russi¹, Markus Russi³, Michael Tiefgraber¹

(1) Meteotest, Fabrikstrasse 14, 3012 Bern, Switzerland, cattin@meteotest.ch, Tel. +41 31 307 26 26

(2) Federal Office of Meteorology and Climatology MeteoSwiss, Les Invuaries, 1530 Payerne, Switzerland

(3) Elektrizitätswerk Ursern, 6490 Andermatt, Switzerland

/2/ Seifert H., Westerhellweg A., Kröning J., 2003, Risk analysis of ice throw from wind turbines, Proceedings of BOREAS VI

/3/ WIND TURBINE ICING AND PUBLIC SAFETY - A QUANTIFIABLE RISK?

Colin Morgan and Ervin Bossanyi

Garrad Hassan and Partners Limited

Coach House, Folliegh Lane

Long Ashton

Bristol BS18 9JB

UK

/4/ http://www.fmi.fi/research_meteorology/meteorology_9.html#5

/5/ http://www.livinginnewyior.org/ice_throw_undated?size=_original

/6/ Betrieb von Windenergieanlagen unter Vereisungsbedingungen. Henry Seifert, 1999, Deutsches Windenergie – Institut GmbH, Wilhelmshaven, Deutschland.

<http://www.dewi.de/dewi/fileadmin/pdf/publications/Studies/Icing/stpoelten.pdf>

/7/ Heikki Pukkila, Porin Energia. Puhelinhaastattelu 26.11.2009

/8/ Vesa Pirttilä Kotkan Energia.

/9/ Suomen tuuliatlas www.tuuliatlas.fi sisältää myös jäätämislaksen.

/10/ RISK ANALYSIS OF ICE THROW FROM WIND TURBINES, Henry Seifert & Al. Boreas 6. Pyhäntä.