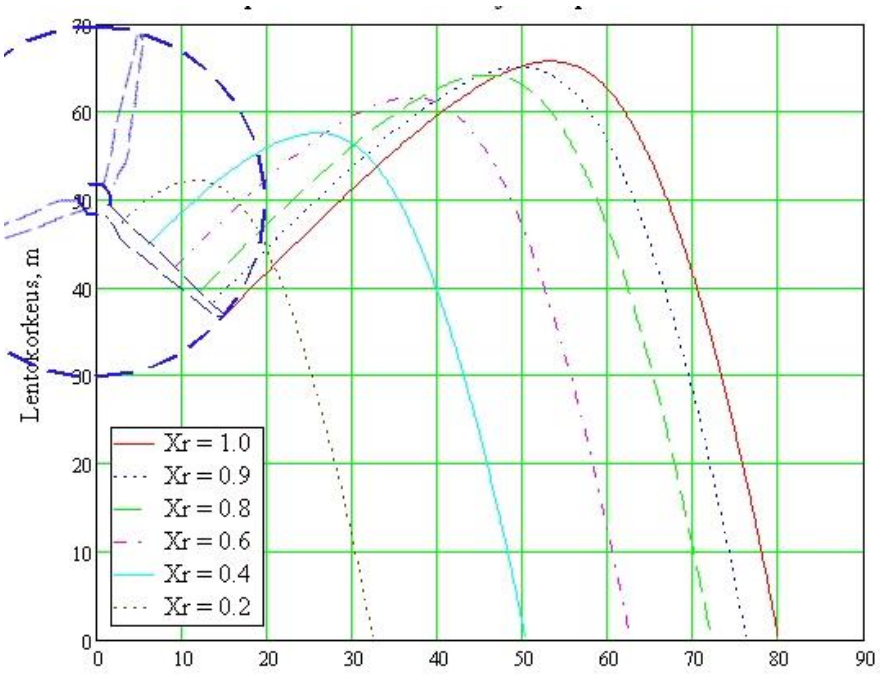
2-3 MW TUULIVOIMALAN JÄÄNHEITTOMATKA
Asiakas: Kaskisten tuulivoima Oy

Raportti:TT-2013-05-18EH



Laati Erkki Haapanen, DI
Tuulitaito

Sisällysluettelo:

Kokemuksia jäätävistä olosuhteista....3
Kokemuksia Suomessa....3
Kokemuksia Saksassa....4
Kokemuksia Sveitsistä....5
Heittomatka ja niiden yleisyys....5
Heittopituuksien esiintymistaajuus....7
Heittomatkan laskentamenetelmän kehitys....9
Laskentatulokset E-40 voimalalle....11
Jäätymisriskin arviointia Kauhajoella....12
Tuulen nopeuden vaikutus jäiden irtoamiseen....12
Potkurin taipuisuuden vaikutus jään irtoamiseen....13
Voimalan ohjaustavan vaikutus lapojen jäätymiseen....13
Ison 2,5 MW voimalan jäänheittomatka kohtuullisissa oloissa....14
Lagerwey L100 2,5 MW, napakorkeus 135 m voimalan jään heittomatkat....14
Laskennan epävarmuustekijät....17
Turvallisen alueen määrittely 135 m korkealle L100 2,5 MW voimalalle....18
Yhteenveto jäänheittomatkasta Kauhajoella....19
Riskitarkastelu....20
Toimenpiteitä, joilla estetään vahinkoja, kun lavat ovat jäässä....22
Lähteet:....23

Copyright: Tämä dokumentti on Tuulitaidon laatima eikä sitä saa kopioida tai julkaista ilman Tuulitaidon lupaa. Raportti on laadittu Kaskisten tuulivoima Oy:n tuulivoimapuistohankkeen olosuhteisiin Kauhajoen kunnassa. Kaskisten tuulivoima Oy on oikeutettu käyttämään raporttia tuulivoimala-hankkeidensa luvituksessa kaikissa niissä yhteyksissä, jotka liittyvät lupaprosesseihin.

Insinööritoimisto Erkki Haapanen Oy
Raininkaistentie 27
35600 Halli, Finland

GSM 050 517 0731
email: erkki.haapanen@tuulitaito.fi
www.tuulitaito.fi
Y-09537613

Johdanto

Tuulivoimalan lavat saattavat talvella jäätyä. Jään irrotessa pyörivistä lavoista se muodostaa vaaratekijän lähiympäristölle. Tämän raportin tarkoituksena on arvioida, miten laaja vaara-alue on, kun jäätä esiintyy. Raportti pohjautuu Saksassa /2/ ja Sveitsissä /1/ tehtyihin laajoihin jäänheittotutkimuksiin sekä Suomessa saatuihin kokemuksiin. Koska ensimmäiset tutkimukset ja niiden yhteydessä tehdyt ”nyrkkikaavat” on tehty 1990-luvulla ja siten merkittävästi pienemmillä voimaloilla, on tarpeen kehittää laskentamenetelmä, jonka avulla voidaan arvioida kaksi kertaa suuremman voimalan lavoista irtoavien jääpalojen mahdollista lentomatkaa. Laskentamenetelmän tarkistus ja kalibrointi on suoritettu soveltamalla sitä edellä mainituissa tutkimuksissa saatuihin koetuloksiin ja sen jälkeen sovellettu laskentaa isommille 2 - 3 MW-voimaloille, joiden napakorkeudet ovat 100 – 120 m ja potkurin halkaisija 93 - 120m.

Kokemuksia jäätävistä olosuhteista

Kokemuksia Suomessa

Kuva 1. 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 kioski, jonka pitäjällä on mahdollisuudet päivittäin seurata voimaloiden toimintaa. Jäistä ei ole ollut merkittävää haittaa. Jäätymistä esiintyy erittäin harvoin ja, kun sitä esiintyy, se on 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. Kun voimalat otettiin käyttöön jäätävän sateen jälkeen, ne käynnistettiin, kun lähellä ei ollut ihmisiä ja jäät irrotettiin pysäyttämällä voimala nopeasti. Nopea pysäytys irrottaa jäät lavoista, jonka jälkeen voimala voi jatkaa toimintaa puhtain siivin. Lähde /7/

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/

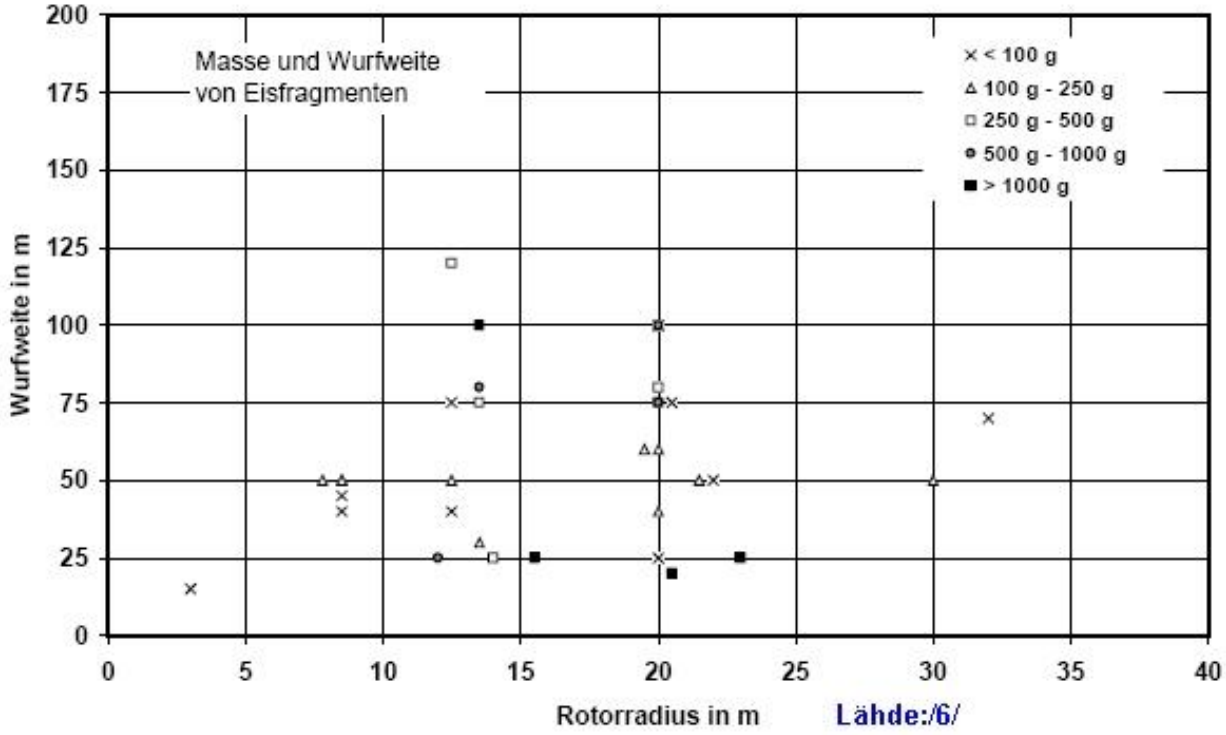
Kuivaniemessä on ollut käytössä useita voimaloita 1993 lähtien. Alueella on seitsemän sakkaussäätöistä voimalaa ja yksi 2 MW lapakulmasäädetty voimala. Sakkaussäätöisten voimaloiden jäätyminen tapahtuu lavan etureunasta alkaen ja vähitellen lavan tuulen puoleinen kylki peittyy jäähän. Lavan taakse jättöreunan 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 ja se on oma lukunsa, koska olosuhteet poikkeavat merkittävästi rannikosta. Siellä jäätäminen on todellinen ongelma ennen kaikkea tuotantomenetysten vuoksi. Tämä raportti ei koske Lappia eikä Lapin olosuhteita.

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.

Insinööritoimisto Erkki Haapanen Oy
Raininkaistentie 27
35600 Halli, Finland
GSM 050 517 0731
email: erkki.haapanen@tuulitaito.fi
www.tuulitaito.fi
Y-09537613



Kuva 2 Jäänheittomatkat DEWIn kyselyn 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 seurantaa Enercon E-40 tuulivoimalan ympärillä ja kerättiin tietoa jäänheittotapauksista. Jään putoamispaikat ja painot merkittiin muistiin. Tärkeimmät havainnot olivat:

- Jäätävällä kelillä lavat jäätyvät
- Jäätä voi esiintyä kaikkina vuodenaikoina (ei koske meitä, mutta on Alpeilla totta)
- Jäät putosivat enimmäkseen suoraan voimalan lapojen alapuolelle, mikä on vaarallisin alue.
- Putoavat jäät muodostavat riskitekijän

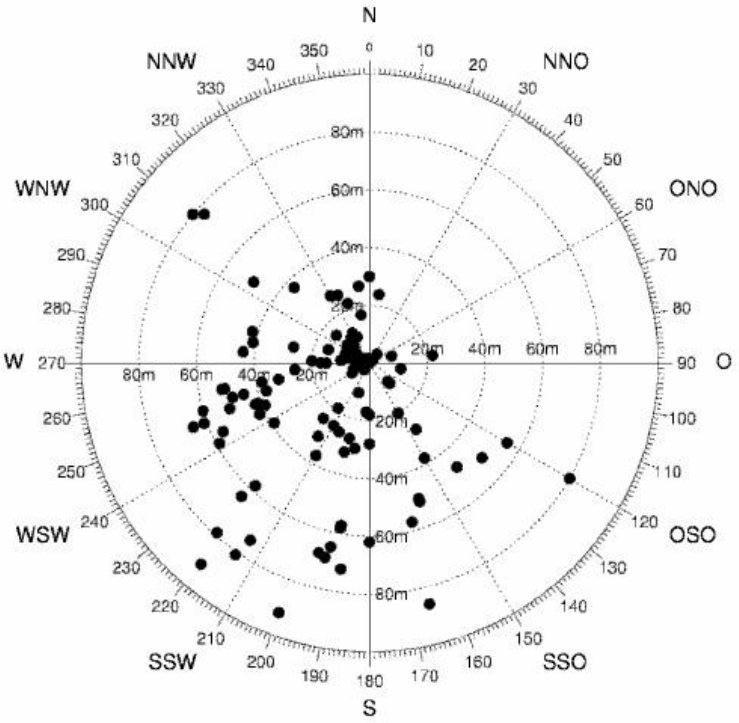
Heittomatka ja niiden yleisyys

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

Kuva 3. Jääkimpaleiden sijaintitieto talletettiin, ne punnittiin ja mitattiin. E-40 voimalan lavan pituus on 20 m ja napakorkeus 50 m. Lähde: /1/

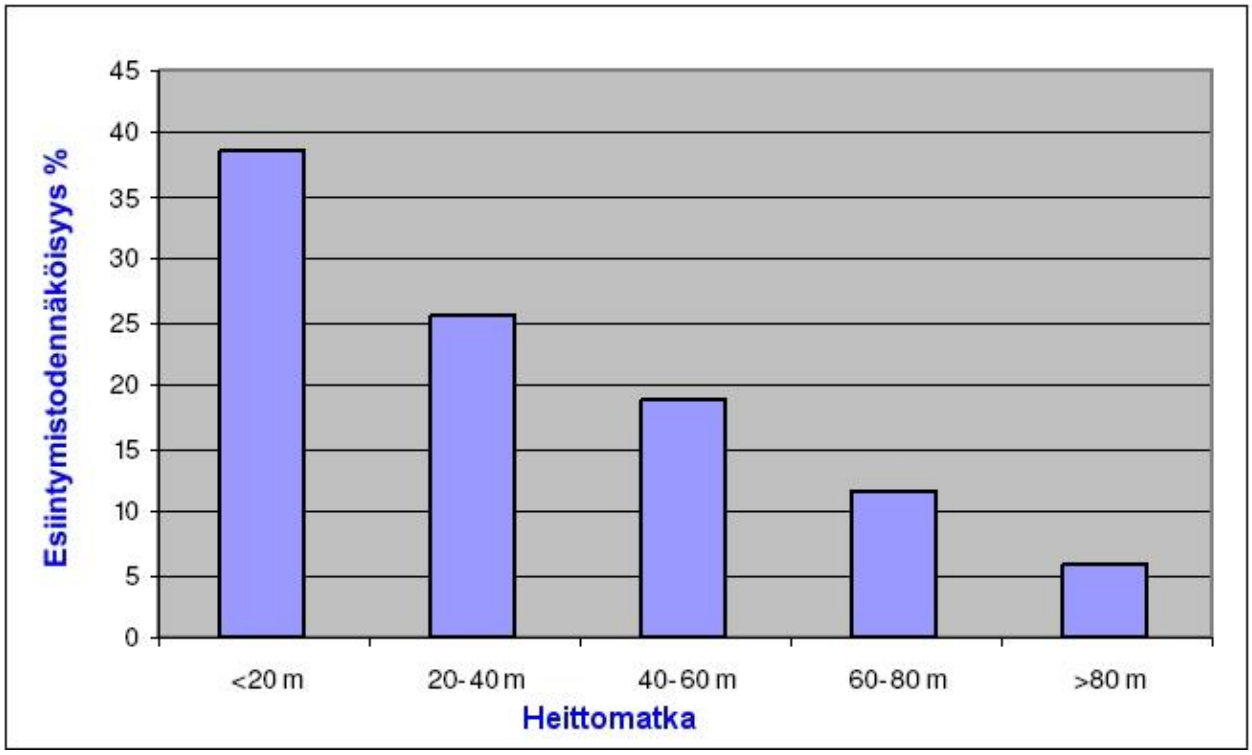
Insinööritoimisto Erkki Haapanen Oy
Raininkaistentie 27
35600 Halli, Finland

GSM 050 517 0731
email: erkki.haapanen@tuulitaito.fi
www.tuulitaito.fi
Y-09537613



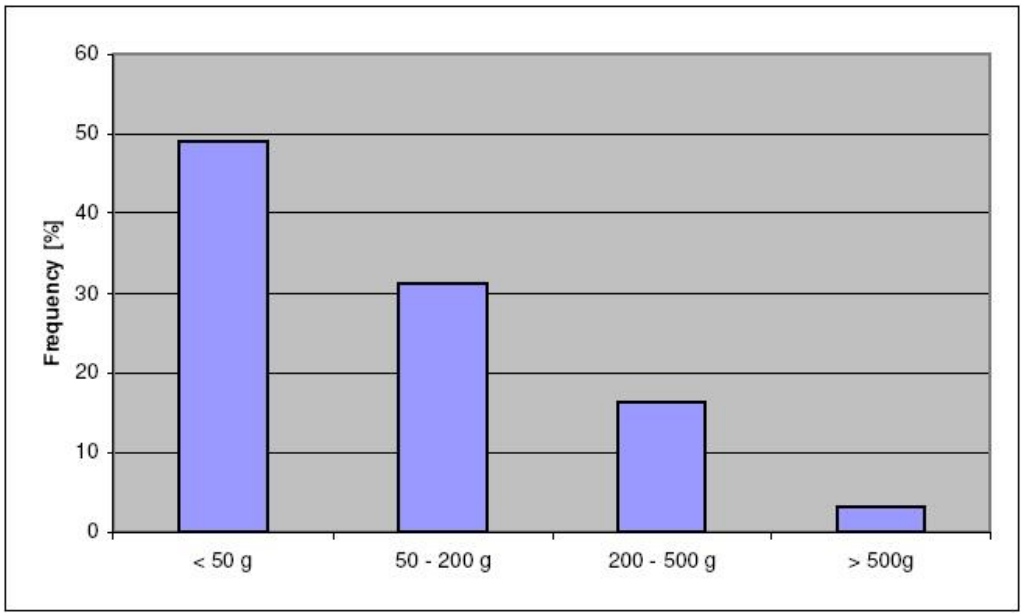
Kuva 4. E-40 voimalan heittämien jääpalojen sijainnit voimalan ympärillä. Pisin heittomatka on ollut 92 m. Suurin osa paloista oli alle 20 m etäisyydellä voimalasta.

Heittopituuksien esiintymistaajuus

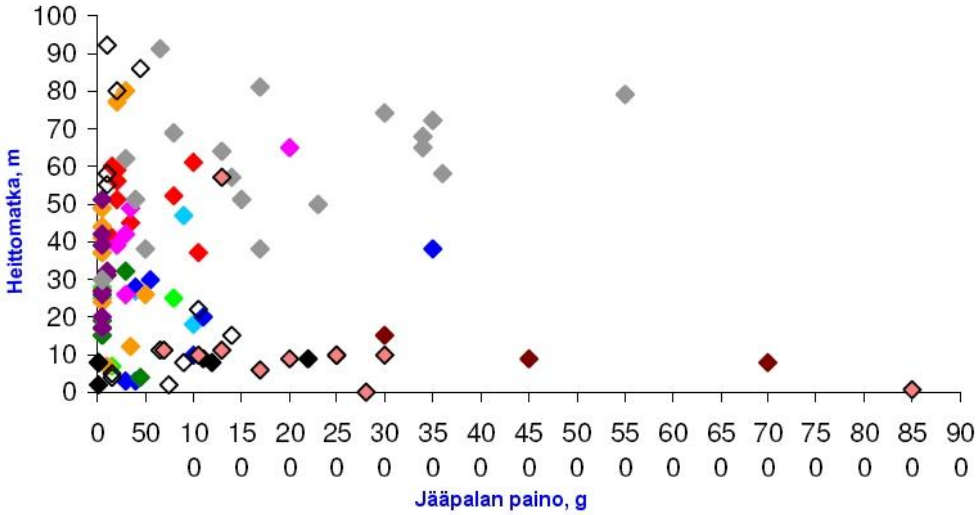


Kuva 5. Heittomatkan todennäköisyys. Noin 5 % jääpaloista ylitti 80 m etäisyyden.

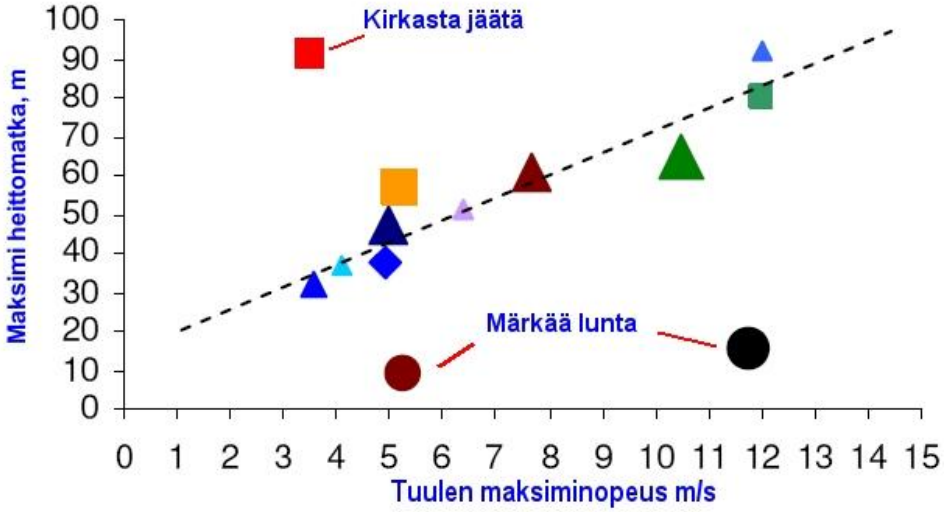
Talvella 06/07 esiintyi runsaasti jäätymistä. Silloin tavattiin 121 palasta, joista suurimpien pituus ylitti metrin ja painavin oli 1,8 kg. Pisin heittomatka oli 92 m voimalasta. Muina talvina löydettiin vain 13 ja 14 jääpalaa.



Kuva 6. 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 7. Jääpalojen 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 8. 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.

Heittomatkan laskentamenetelmän kehitys

Muodostetaan laskentakaavat, joiden avulla huomioidaan kappaleen lentorata, 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 toiminta tarkistetaan vertaamalla saatuja tuloksia Enercon E-40 voimalan seurannasta saatuihin tuloksiin.

Edellä mainituista viimeisimmässä kohdassa on eniten sovitettavaa. Ilmanvastus aiheutuu painevastuksesta, joka riippuu kappaleen tuulta vastaan olevasta poikkipinta-alasta sekä kitkavastuksesta, johon vaikuttaa kappaleen pinta-ala ja pinnan kitkakerroin. Lisäksi kappaleen pyöriessä autorotaation vaikutuksesta ilmavirrassa, syntyy sirkulaation aiheuttamaa vastusta, joka on kohtisuorassa lentorataa vastaan sekä indusoitua vastusta. Kokonaisuudessaan tämä on hyvin monimutkainen asia, mutta kalibrointi voidaan suorittaa vertaamalla laskettuja tuloksia kokeellisesti saatuihin heittomatkoihin, joista edellä on tehty selvitys. Kalibrointi tehdään käyttämällä

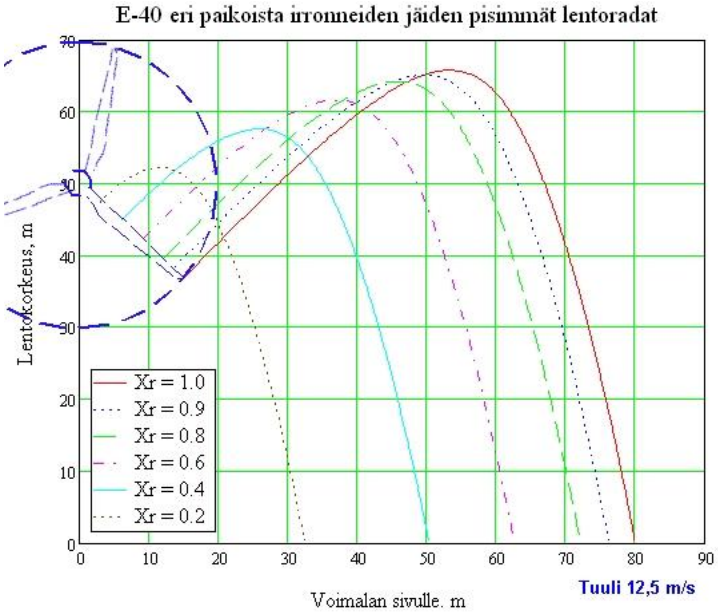
laskettuja kaavoja E-40 voimalalle ja valitsemalla muoto- ja vastusparametrit siten, että saadut laskentatulokset vastaavat mittaustuloksia.

Jään irtoaminen tapahtuu joko pieninä annoksina tai kertarysäyksellä. Kun se on irronnut mahdollinen vaarakin on ohi. Seuraavassa kuvassa on joku tuntematon onnistunut valokuvaamaan kertarysäyksellä irronnutta lentävää jäätä.

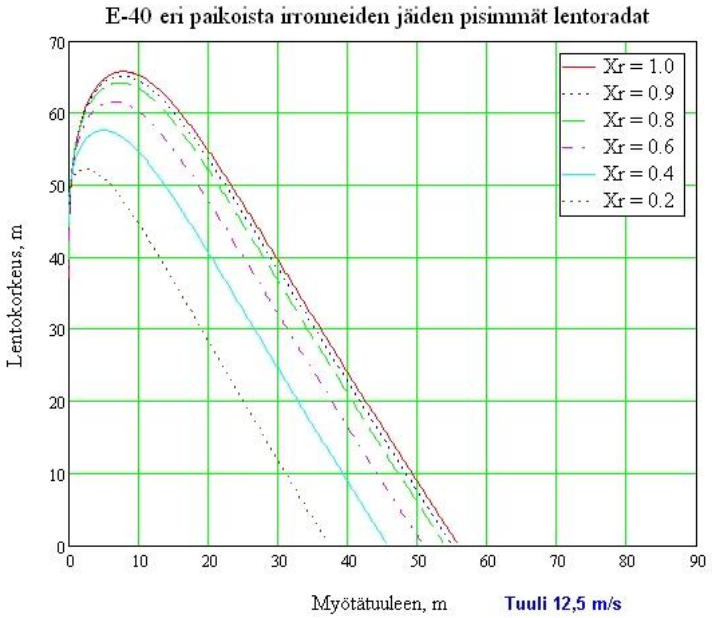
Kuva 9. Valokuva voimalan lavoista lentävistä jääpaloista. Jäät ovat pirstoutuneet kerralla pieniksi muruiksi. Kun irtoaminen on tapahtunut, vaaratilanne on ohi
Lähde: http://www.livinginnewyior.org/ice_throw_undated?size=_original

Laskentatulokset E-40 voimalalle

Seuraavassa on laskettu E-40 voimalalle jäänheittomatkat. Tuulen nopeuden on oletettu pysyvän vakiona jään lentomatkan aikana. Lennon loppuosalla kevyet kappaleet kulkeutuvat tuulen mukana pidemmälle kuin painavat.



Kuva 10 E-40 voimalan lavoista voimalan nousevan lavan puoleiselle sivulle irtoavien jäiden lentoradat 12,5 m/s tuulella.



Kuva11 E-40 voimalan lavoista voimalasta myötätuuleen lentävien jäiden radat 12,5 m/s tuulella. Mitä kevyempi pala, sitä paremmin tuuli siihen tarttuu. Laskelmassa on käytetty vakio tuulen nopeutta. Tosiasiassa tuulen nopeus laskee mitä matalammalle tullaan ja todelliset heittomatkat ovat lyhempiä.

Jäätymisriskin arviointia Kauhajoella

Ilmatieteenlaitoksen julkaisemassa Tuuliatlaksessa on arvioitu eri alueiden jäätämisalttiutta. (www.tuuliatlas.fi). Riutunkarilta on pitkäaikaiset kokemukset jäätävistä olosuhteista. Ne eivät ole aiheuttaneet vaaratilanteita eikä edes merkittäviä tuotannonmenetyksiä. Jääatlaksen mukaan Riutunkarilla ovat seuraavan taulukon mukaiset olosuhteet.

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)	Passiivienen jäätäminen, > 10 g/m (h/vuosi)	Tuotantotappioarvio (%)
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 12. Jään muodostuminen Kempeleen Riutunkarilla.

Kauhajoki, Mustaisneva						
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)	Passiivienen jäätäminen, > 10 g/m (h/vuosi)	Tuotantotappioarvio (%)
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 13. Jään muodostuminen Kauhajoen Mustaisnevalla.

Taulukossa:
”aktiivinen jäätäminen” tarkoittaa tunteja vuodessa, jolloin uutta jäätä syntyy
”passiivinen jäätäminen” tarkoittaa tunteja, jotka jää pysyy ellei sitä poisteta
Tuotantotappio on arvioitu voimalan vuosituotannon menetyksiä jäätämisen seurauksena prosenttia vuosituotannosta.

Tämän taulukon perusteella voidaan arvioida jäätämisen muodostavan Kauhajoella merkittävän ongelman verrattaessa Ritunkariin. Ongelmana on ensi sijassa jään vaikutus voimalan tuotantoon, ellei lavoissa ole jäänesto-järjestelmää (anti-icing).

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. Tästä syystä lentomatkan arvioinnissa tulee käyttää nopeutta 12 m/s, kun haetaan realistista tilannetta. Laskelmissa käytetyt suurimmat tuulen nopeudet ovat kaiken kaikkiaan erittäin harvinaisia ja kestoltaan hetkellisiä.

Potkurin taipuisuuden vaikutus jään irtoamiseen

Potkurin taipuisuus vaikuttaa merkittävästi jään irtoamiseen lavan pinnalta. Vestas, joka on käyttänyt yli 10 vuotta epoksilapoja, on todennut jäiden irtoavan, kun lavat taipuvat tuulessa. Siksi Vestas on voinut käyttää lapojaan ilman erillistä jäänpoistojärjestelmää myös korkealla vuoristossa ja Ruotsin Lapissa, jotka molemmat ovat erittäin voimakkaasti jäätäviä alueita. Aiemmin alalla käytettiin yleisesti jäykkiä polyesterilapoja, mutta nykyiset lavat ovat kaikissa voimaloissa taipuisia epoksilapoja.

Voimalan ohjaustavan vaikutus lapojen jäätymiseen

Voimalan lapakulmaa ohjataan siten, että sitä käännetään kohti tuulta, joten tuuli kohtaa lavan suoraan edestä. Tämän ansiosta jää syntyy aivan 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 14. Jäätymisen etenminen lavan johtoreunassa. Kontaktipinta taipuisaan lapaan on pieni, mistä johtuen jää irtoaa helposti lavan taipuessa tuulen voimasta. Kontaktipinnan kapeudesta ja etureunan pyöreydestä johtuen myös ”linkoutuminen[1]” on mahdotonta, koska jää ei pysy etureunassa irrottuaan pinnasta. Kuvan tapaukset ovat laskennallisia sillä jää ei pysy oikeasti kiinni taipuisassa lavassa, kun jää paksuus ylittää 50 mm. 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 siihen kohdistuu voimakas ilmavirta, joka pyrkii heittämään jään lavan alipainepuolelle.

Ison 2,5 MW voimalan jäänheittomatka kohtuullisissa oloissa.

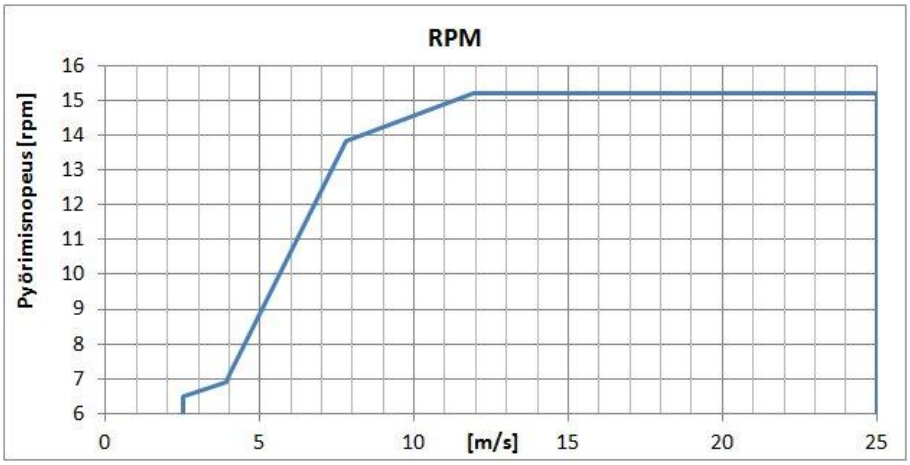
2,5 MW voimalan, jonka napakorkeus on 135 m ja potkurin halkaisija 100m jäänheittomatka lasketaan kohtuullisesti jäätävissä oloissa, jollaisena Kauhajoen aluetta voidaan pitää.
Kohtuullisissa jääoloissa esiintyy jäätä, joka syntyy normaalisti lavan etureunaan ohueksi kerrokseksi. Yleisin tilanne on sellainen, 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 pahimmoilleen 0,5 – 0,7 g/cm ja paksuus saattaa kasvaa jopa kymmeniin sentteihin 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 käytännössä nykyaikaisen tuulivoimalan lavat ovat varsin joustavia ja lavan taipuminen tuulenpaineen vaikutuksesta irrottaa tehokkaasti jäätä jo pienillä paksuuksilla, jolloin niiden aiheuttama riski on myös pieni. Jos voimalassa on jään tunnistus, niin se voi varottaa esimerkiksi merkkivalolla jäätymisvaarasta lähialueella liikkuvia.
Jään lentorata on helppo arvioida ja lentävää jäätä voi väistää samalla tavalla kuin pesä- tai jalkapalloa. Valppaana on silti oltava, kun liikkuu voimalan lähellä silloin, kun siivissä on paksulti jäätä. Onneksi tämä on helposti havaittavissa ja varsin harvinaista.

Lentoratalaskelmissa on etsitty pahimpia vaihtoehtoja, jotka tulevat Kauhajoen lähialueilla kysymykseen. **Lapissa tilanne on toinen eikä tätä raporttia tule käyttää Lapin voimaloille.**

Lagerwey L100 2,5 MW, napakorkeus 135 m voimalan jään heittomatkat

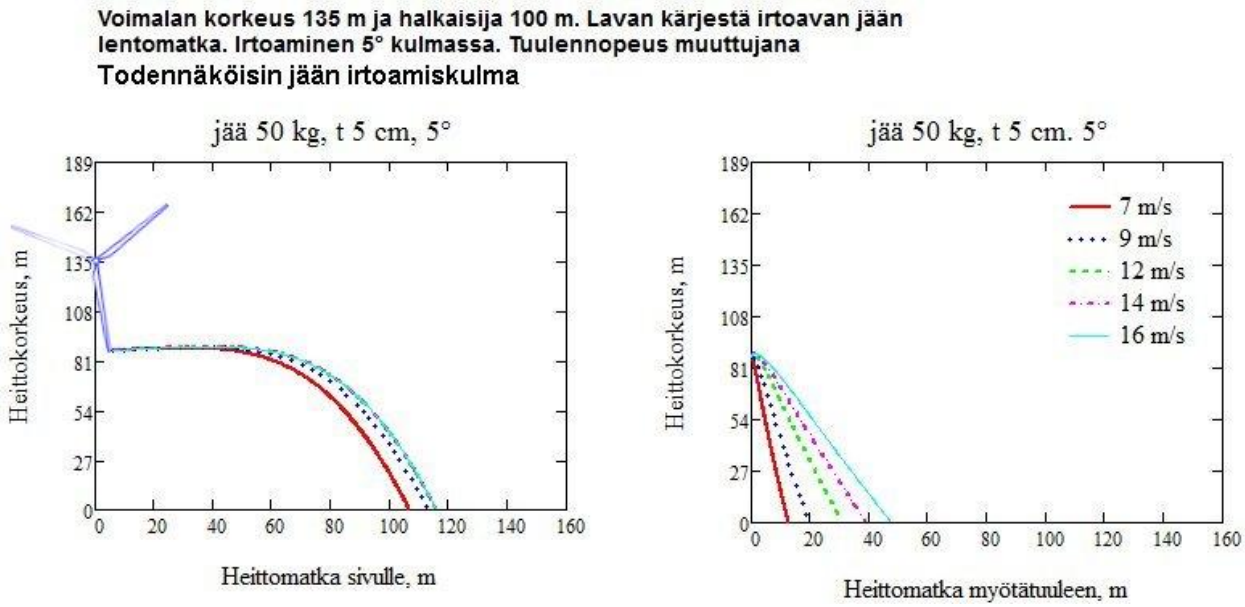
Sovelletaan edellä saatua menetelmää L100 voimalalle, jonka potkurin halkaisija on 100 m ja napakorkeus 135 m. Toimintaympäristö on sellainen, että voimalassa on jäätymisen seurantajärjestelmä, joka varoittaa, kun lavoissa havaitaan jäätä.

Laskennassa käytetyt parametrit:
Jään paksuus irrotessa = 50 mm
Jään paino 50 kg eli oletetaan, että jää irtoaa lavan etureunasta pitkänä soirona. ja tiheys 700 kg/m^3. Ilman tiheys 1,3 kg/m^3. Jään ilmanvastuskerroin Cd = 1,2

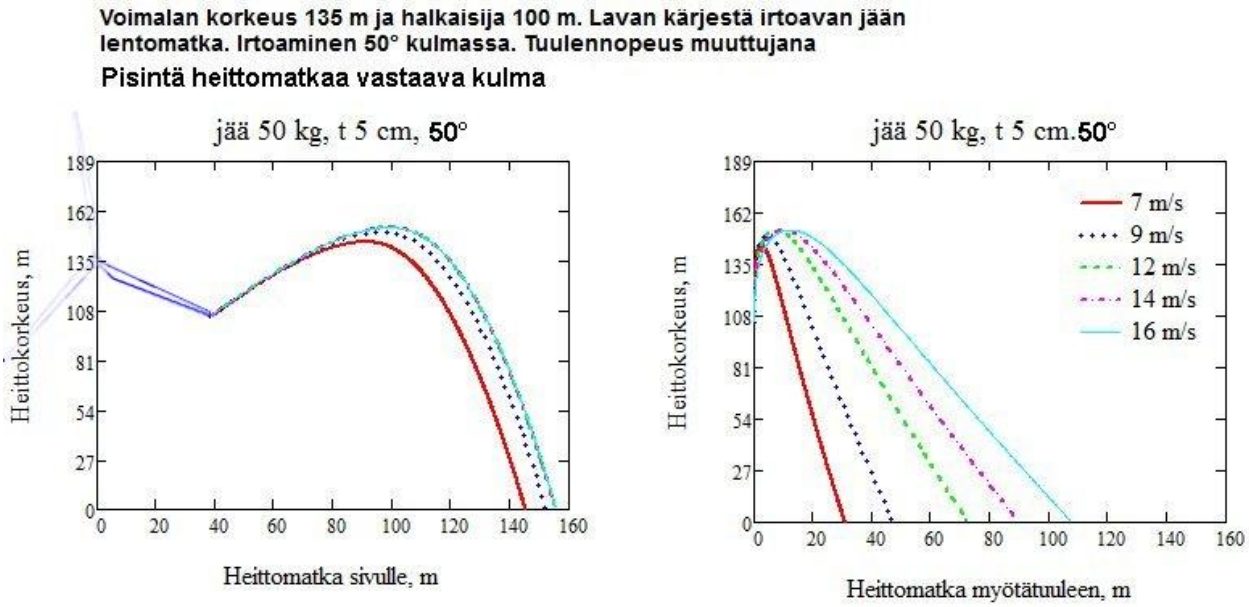


Kuva 15. Voimalan pyörimisnopeuden riippuvuus tuulen nopeudesta

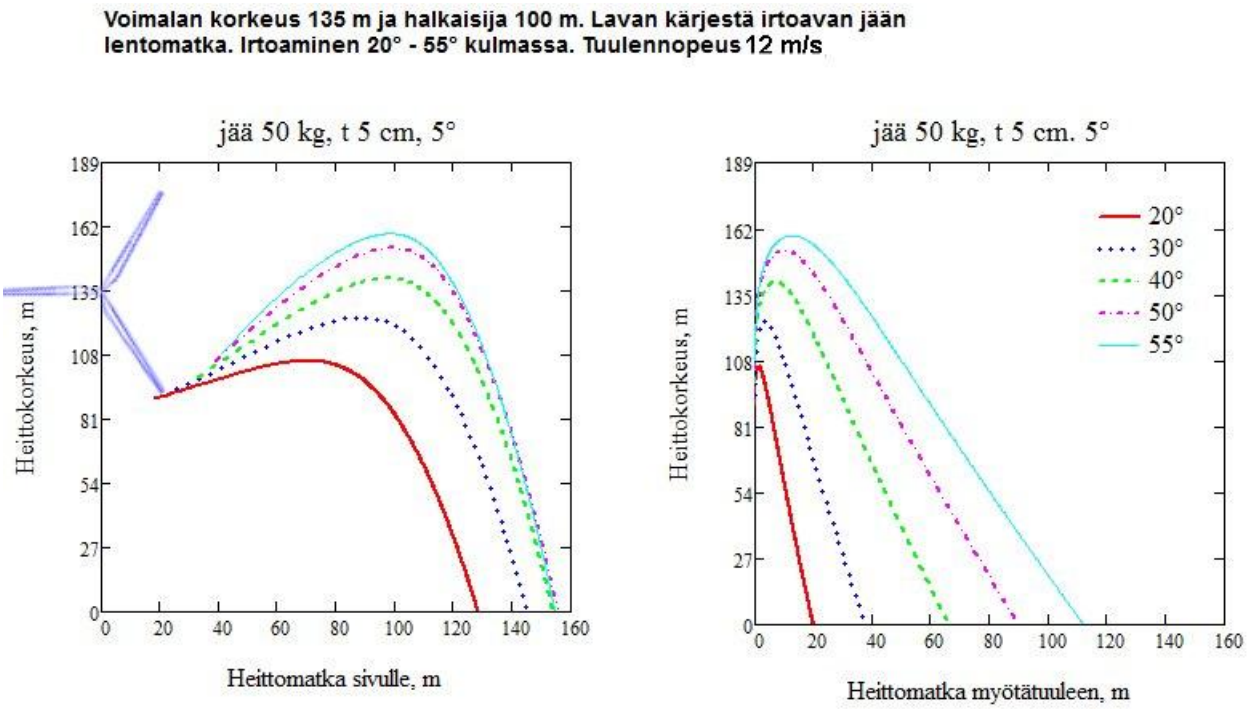
Pyörimisnopeus ja etäisyys pyörintäakselista vaikuttavat jään lähtönopeuteen ja lähtösuuntaan. Tuuli kuljettaa ilmassa olevaa jääkappaletta mukanaan myötätuuleen.
Seuraavissa kuvissa on tarkasteltu erilaisia lähtötilanteita, jotka ovat edes teoreettisesti mahdollisia.



Kuva 16. Jää irtoaa lavan kärjestä, kun lapa on ala-asennossa ohittanut tornin. Tämä tilanne on todennäköisin jään irtoamiskohta, koska torni aiheuttaa pienen paineiskun lapaan ja lisäksi keskipako- ja maan vetovoima ovat suurimmillaan. Tilanne vastaa samaa, kuin löisi puun runkoon pudottaakseen lunta alas. Pisimmillään jää lentää alle 120 m voimalasta sivulle ja alle 50 m myötätuuleen. Kuvassa ovat heittomatkat tuulen nopeuksille 7 – 16 m/s. Kuten huomataan, 12 m/s kovemmilla tuulilla ei sivulle heittomatka pitene, mutta tuulen nopeuden kasvu vie jäätä kauemmaksi myötätuuleen.



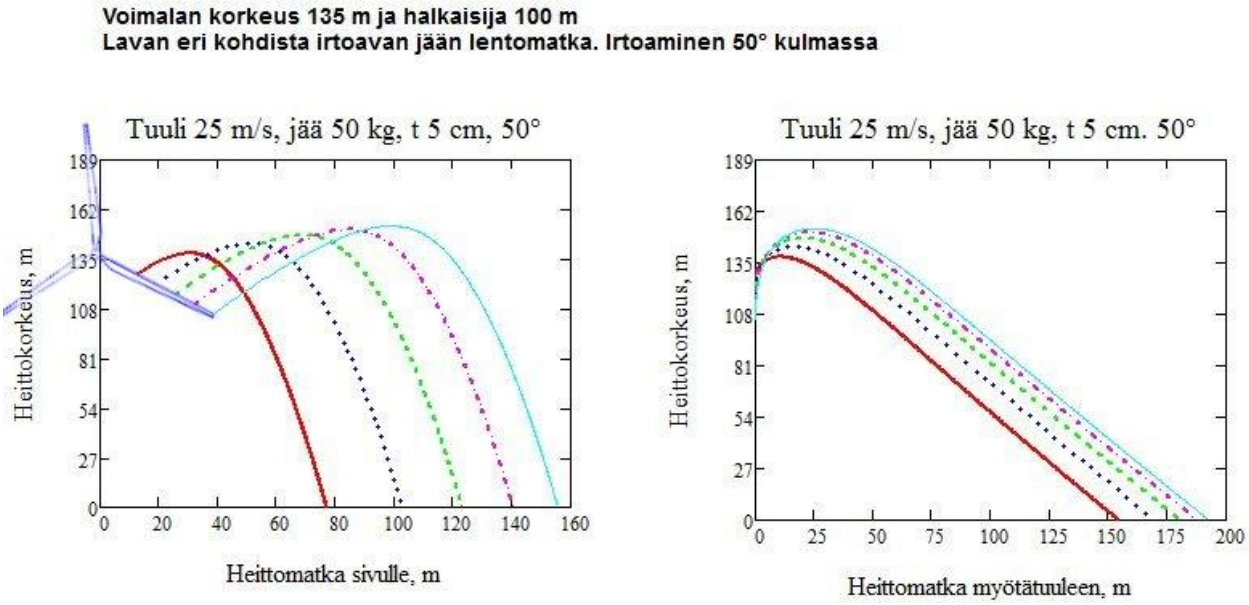
Kuva 17. Tässä on muuten sama tilanne kuin edellisessä kuvassa, mutta irtoamis-kohdaksi on valittu pisimmän heittomatkan antava kulma, 50° ala-asennon jälkeen. Heittomatka on sivulle alle 160 m ja taakse päin noin 110 m.



Kuva 18. Jäät irtoavat todennäköisimmin ennen kuin voimala saavuttaa täyden tehonsa. Nopeudella 12 m/s voimalan lavat taipuvat kaikista voimakkaimmin, joka taipuminen on omiaan irrottamaan jäätä. Käytännössä tämä on todennäköisin pisin jäänheittomatka sivulle. Voimalan pyörimisnopeus on tämän jälkeen vakio, mutta lapojen taipuma vähenee tuulen nopeuden kasvaessa tätä suuremmaksi. Tässä tilanteessa pisin jäänheittomatka sivulle on alle 160 m ja taakse alle 115 m.

Insinööritoimisto Erkki Haapanen Oy
Raininkaistentie 27
35600 Halli, Finland

GSM 050 517 0731
email: erkki.haapanen@tuulitaito.fi
www.tuulitaito.fi
Y-09537613



Kuva 19. Jään irtoaminen tapahtuu lavan eri kohdista kovalla 25 m/s myrskyllä. Heittomatkaan myrsky vaikuttaa ainoastaan pidentämällä myötätuuleen lentävien kappaleiden lentomatkaa. Tällaisella tuulella ilmassa kyllä lentää muutakin kuin jäätä ja lunta.

Laskennan epävarmuustekijät

Edellä tehdyt laskelmat on kalibroitu Sveitsiläisten keräämien tulosten avulla. Koska useamman megawatin kokoisista voimaloista ei vielä ole kerättyä tietoa saatavilla, on käytettävä tarpeellista varovaisuutta, kunnes tutkittua tietoa on riittävästi. Laskenta on tehty aina 25 m/s tuulelle, joka on varsin harvinainen, mutta ei suinkaan mahdoton. 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 g. Sveitsiläiset eivät havainneet riippuvuutta heittomatkan ja jään painon välillä, mikä tarkoittanee joko sitä, että isompien jääkappaleiden muoto aiheuttaa suhteessa enemmän ilmanvastusta kuin pienten tai, että isommat jääkappaleet irtoavat lähempää potkurin napaa, jonka johdosta niillä on pienempi lähtönopeus eivätkä siksi lennä pitkälle. Tältä osin tässä raportissa tehdyt laskelmat ovat erittäin varovaisia.

Laskelmissa on käytetty pahimpia mahdollisia tilanteita, joiden esiintymistodennäköisyydet ovat erittäin alhaisia. Saadut ääriarvot ovat siten erittäin harvinaisia.

Turvallisen alueen määrittely 135 m korkealle L100 2,5 MW voimalalle

Jäät voivat lentää voimalan sivulle lähes 160 m etäisyydelle. Ne kulkevat samalla myötätuuleen lähes saman matkan.

Turvallisinta on rajoittaa voimalan läheisyydessä liikkumista silloin, kun lavat ovat jäätyneet. **Suojaetäisyydeksi voisi tällöin suositella noin 200 m etäisyyttä voimalasta.** Jos voimala-alueella on tarvetta liikkua siipien ollessa jäässä, on erityisesti varottava potkurin alla ja siitä myötätuuleen olevaa aluetta varsinkin ylös nousevan lavan puolella.

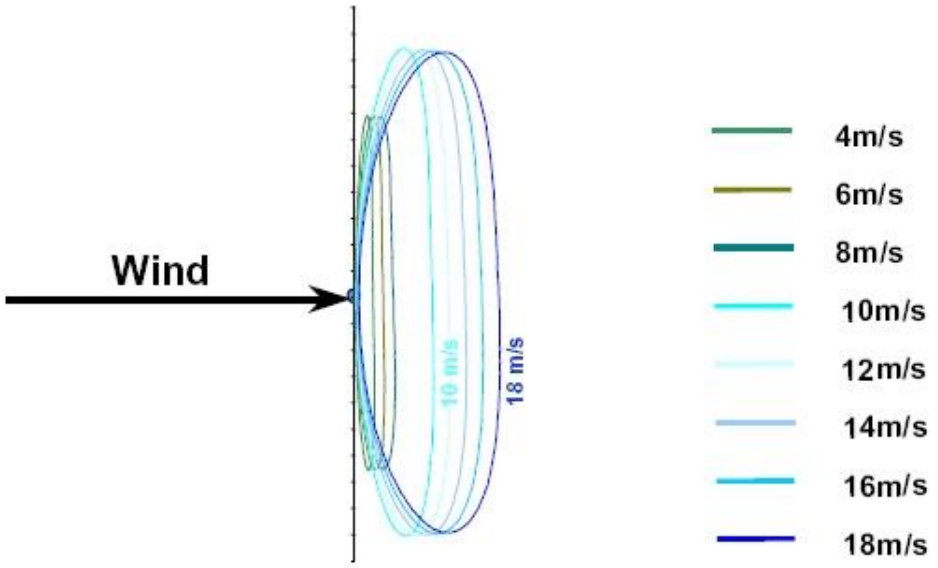
Insinööritoimisto Erkki Haapanen Oy
Raininkaistentie 27
35600 Halli, Finland

GSM 050 517 0731
email: erkki.haapanen@tuulitaito.fi
www.tuulitaito.fi
Y-09537613

Yhteenveto jäänheittomatkasta Kauhajoella

Laskenta on suoritettu 50 kg jäälohkareille, joiden irtoamiskohta ja hetki on valittu monella eri tavalla. Kaikissa tapauksissa pisin heittomatka on ollut alle 160 m m sekä sivulle että myötätuuleen alle 170 m. Todennäköisyys 160 m heitolle on hyvin pieni, koska se edellyttää, ettei lavan kärjestä jää ole irronnut ennen kuin tuulen nopeus on saavuttanut 12 m/s ja lisäksi, että jää irtoaa oikeassa kulmassa eikä välittömästi ohitettuaan tornin, joka ravistaa jäätä irti hetkellä, jolloin keskipakoisvoiman ja maan vetovoiman summa on suurimmillaan.

Seuraava kuva esittää aluetta, jolle jäät voivat pudota.



Kuva 20. Jään putoamisalueen koko määräytyy sekä tuulen nopeuden että jääkappaleen painon mukaan. kuvassa on esimerkki eri tuulen nopeuksilla olevista vaara-alueista. Turvallinen alue on potkurin pyörintäkehän tuulen yläpuolinen alue. Lähde /2/. Suoja-alueen säde voisi olla 210 m ja riskialueen muoto riippuu kulloinkin vallitsevan tuulen suunnasta kuvan esittämällä tavalla.

Riskitarkastelu

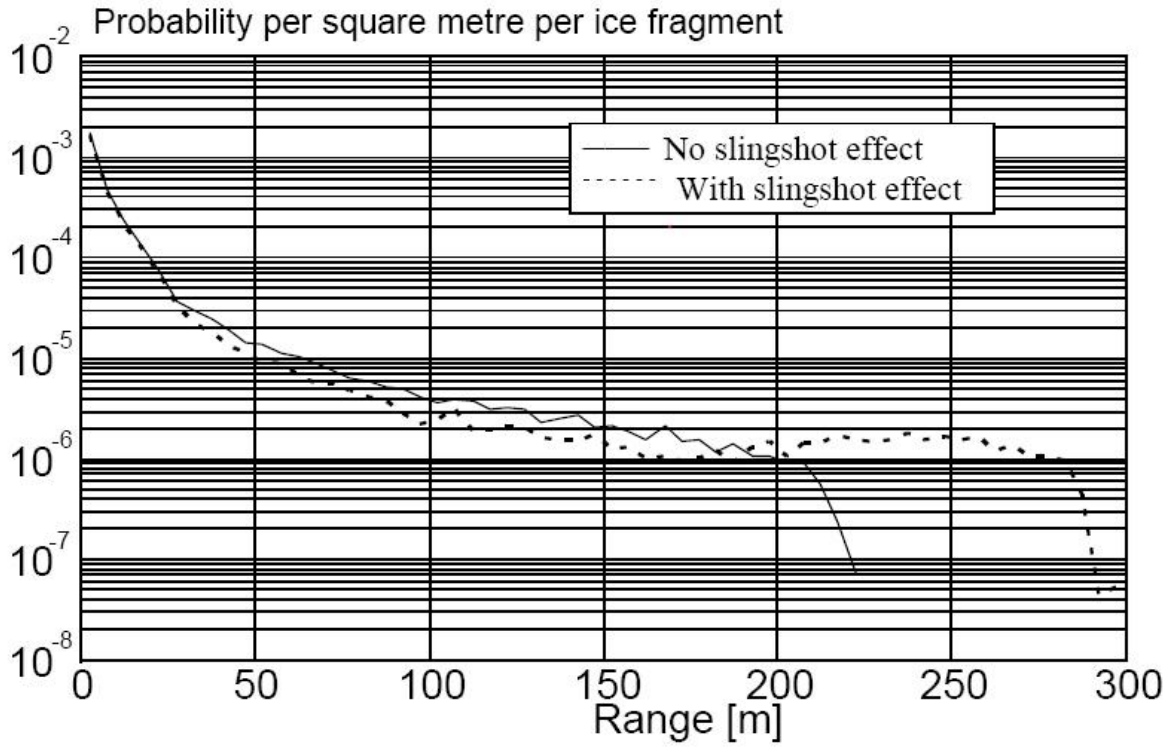
Jos talvella voidaan välttää asiattomien liikkumista tuulipuiston alueella, pienennetään jäävahinkojen riskiä.

Jäätyminen edellyttää jäätäviä olosuhteita, joita esiintyy joko jäätävinä sateina tai pilvikorkeuden ollessa voimalan potkurin kehän alapuolella. Sisämaassa jäätäviä sateita on erittäin harvoin, pari kertaa talven aikana eikä kaikkina talvina ollenkaan. Jäätävä sade peittää potkurin muutamassa minuutissa niin paksuun kirkkaaseen jäähän, että voimala pysähtyy. Jää irtoaa sadetta seuraavan parin asteen lämpötilan muutoksen jälkeen, mikä on hyvin yleistä jäätävän sateen yhteydessä, koska lämpötilan muutos laajentaa tai supistaa jäätä ja lapaa eri tavalla, jolloin jää irtoaa itsestään vaikka voimala ei pyörisi. Porissa on todettu, että jäätävän sateen jälkeen voidaan jää irroittaa, kun voimalan käynnistyttyä pysäytetään nopeasti. Äkillinen pysäytys irroittaa jäät kertaheitolla. Pysäytettäessä on luonnollisesti varmistuttava siitä, että jään putoamisalueella ei liiku kukaan. Tällaista menetelmää ei ole syytä suosia, koska sillä saattaa rikkoa voimalansa. Parempi ratkaisu on jäänpoisto tai jäänestojärjestelmä.

Jäätäviä olosuhteita on Kauhajoen alueella vuodessa runsaasti. Useimmiten jääkerros on hyvin ohut, pari senttiä ja vain aivan lavan etureunassa. Irrotessaan se pirstaloituu ja putoaan hileinä voimalan juurelle. Voimakkaasti jäätävissä oloissa jää saattaa kertyä useamman tuuman paksuksi kerrokseksi lavan etureunaan ja aiheuttaa heittoriskin.
Tilanteet ovat ensinnäkin erittäin harvinaisia ja riski saada lentävästä jäästä osuman vastaa lottovoittoa arvonnassa, joka suoritetaan korkeintaan muutaman kerran talvessa.
Jään synty on hidasta, useimmin se vie tunteja ja kun jää on kerran irronnut, vie taas tunteja ennen seuraavaa mahdollista tilannetta. Jäätävällä sateella jään muodostus voi kuitenkin tapahtua muutamassa kymmenessä minuutissa niin voimakkaasti, että voimala pysähtyy ellei se ole jo pysähtynyt sateen aikana.

Insinööritoimisto Erkki Haapanen Oy
Raininkaistentie 27
35600 Halli, Finland

GSM 050 517 0731
email: erkki.haapanen@tuulitaito.fi
www.tuulitaito.fi
Y-09537613



Kuva 21 Lähteessä /3/ laskettu riskijakauma sille, että yhden neliömetrin alueelle osuu jääpala. Tässä mainittu ”sling shot” eli linkoefekti tarkoittaa tilannetta, joita on esiintynyt sakkaussäätöisissä voimaloissa, joiden etureunaa ympäröi paksu jääkerros, joka irrottuaan liukuu lavan etureunaa pitkin kohti kärkeä, jolloin sillä on valmiiksi nopeutta keskustasta ulos päin. Tällaista tilannetta ei esiinny lapakulmasäädetyllä voimalalla, koska jää kertyy lavan johtoreunaan ja linkoefektin vaatimaa syvää kourua ei synny. Taipuisia lapakulmasäätöisiä potkureita on käytetty hyvällä menestyksellä ilman jäänpoistojärjestelmiä sekä korkealla vuoristossa että Ruotsin lapissa.

Insinööritoimisto Erkki Haapanen Oy
Raininkaistentie 27
35600 Halli, Finland

GSM 050 517 0731
email: erkki.haapanen@tuulitaito.fi
www.tuulitaito.fi
Y-09537613

Toimenpiteitä, joilla estetään vahinkoja, kun lavat ovat jäässä

- Estetään asiattomien pääsy voimala-alueelle.
- Kypärän käyttö pakolliseksi talvisaikaan liikuttaessa voimala-alueella.
- Opastetaan, missä ovat riskialueet ja miten tulee tarkkailla mahdollisesti lentäviä jäitä.
- Varustetaan voimala jään tunnistusautomatiikalla, joka käynnistää varoitukset sekä tarvittaessa pysäyttää voimalan.
- Videovalvonta, jonka avulla voimalaitoksen valvoja voi havaita jään.
- Pysäytetään voimala, jos alueella on liikuttava silloin, kun lavoissa on paksusti jäätä.
- Varustetaan voimala jäänestojärjestemällä.
- Poistetaan jäät hallitusti jäätävän vesisateen jälkeen tai odotetaan, kunnes ne putoavat itsestään.

Alueella on toimittava kuin pesäpallokentällä. Putoavaa jäätä on helppo väistää, kun näkee sen tulevan. Tarkkaavaisuutta tarvitaan.

Voimalan läheisille liikuntaväylille on syytä laittaa putoavista jäistä varoittavat kyltit ja voimalaan varoitusvalo, joka toimii silloin, kun voimalan siivet ovat jäässä. Kyltit tulisi asettaa n. 200 m etäisyydelle voimalasta.

Insinööritoimisto Erkki Haapanen Oy
Raininkaistentie 27
35600 Halli, Finland

GSM 050 517 0731
email: erkki.haapanen@tuulitaito.fi
www.tuulitaito.fi
Y-09537613

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 Invuardes, 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, Folleigh 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 jäätämisatlaksen.