

# **Jäätymisen vaikutuksia tuulivoimalan aerodynamiikkaan ja kuormitukseen**

Petteri Antikainen

VTT Energia



ISBN 951-38-5306-3 (nid.)

ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-5307-1 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 1998

#### JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT  
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 4374

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT  
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 4374

Technical Research Centre of Finland (VTT), Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland  
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4374

VTT Energia, Energijärjestelmät, Tekniikantie 4 C, PL 1606, 02044 VTT  
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 6538

VTT Energi, Energisystem, Teknikvägen 4 C, PB 1606, 02044 VTT  
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 6538

VTT Energy, Energy Systems, Tekniikantie 4 C, P.O.Box 1606, FIN-02044 VTT, Finland  
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 6538

Toimitus Kerttu Tirronen

LIBELLA PAINOPALVELU OY, ESPOO 1998

Antikainen, Petteri. Jäätymisen vaikutuksia tuulivoimalan aerodynamiikkaan ja kuormituksiin [The effects of icing on the aerodynamics and loads of a wind turbine]. Espoo 1998, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1909. 39 s.

**Avainsanat** wind power generation, low temperature, ice, windmills, turbine blades

## Tiivistelmä

Raportissa tarkasteltiin mittausten ja simulointien avulla jään vaikutusta tuulivoimalan aerodynamiikkaan ja kuormituksiin.

Jään kertyessä tuulivoimalan lapoihin voimalan tuotanto pienenee, koska noste- ja vastusvoimat muuttuvat. Jäätymisen edetessä noste pienenee ja vastus kasvaa. Lapa sakkaa pienemmällä tuulenopeudella kuin puhtaalla lavalla, mutta ei yhtä jyrkästi.

Pyhätunturin koevoimalan kuormitusmittauksissa käsiteltiin kahta tuulioloiltaan samanlaista jaksoa, joista toisessa voimala oli jäinen ja toisessa jäätön. Lavan kuormituksia tarkasteltiin kahteen suuntaan, jänteen suuntaan ja flap-suuntaan. Flap-suuntaisen momentin keskihajonta pieneni jään vaikutuksesta 50 % ja 1P-taajuuspiikki (kerran kierroksessa tapahtuva ilmiö) pieneni kertoimella 6. Jänteen suuntaisen momentin tehospektri osoitti 1P-piikin kasvaneen jäämassan vaikutuksesta. Lavan ominaistajuudella piikin kasvu oli viisinkertainen. Tämä viittaa siihen, että jään kertyminen lavan pinnalle pienentää vaimennusta. Tornin värähtelyt kasvoivat jäätäneessä tilanteessa sekä ominaistajuudella että 1P-taajuudella erittäin voimakkaiksi. 1P-muutos aiheutunee roottorin massaepätasapainosta, mutta värähtelyiden kasvua ominaistajuudella ei pystytä tois-  
taiseksi selittämään.

Sen vuorokauden aikana, jolloin jäätyneen tapauksen kuormituksia mitattiin, oli voimalan teho pienentynyt merkittävästi jään vaikutuksesta. Kun oletetaan tuulen olevan Weibull-jakautunut, pienenee energian tuotanto puoleen havaitun kaltaisella jäätymisellä. Tuotettu teho oli pienentynyt, mutta tehon keskihajonta pysyi ennallaan eikä pienentynyt kuten oli odotettu muiden mittausten perusteella.

Tuulivoimalan dynamiikan mallinnus- ja analyysiohjelmistoa ADAMS/WT:a kehitettiin VTT:ssä muutamalla lisäpiirteellä, joita ovat pääakselin kallistuskulma (tilt), kärkijarru ja simuloinnin transienttisen käynnistyksen vaimennin. Myös aerodynamiikan laskevaan ohjelmaan tehtiin lisäyksiä. Simuloinneissa saatiin samansuuntaisia tuloksia kuin mittaauksissa. Simulointitulosten tarkentaminen edellyttää lisätuntemusta jäätymisen aiheuttamista muutoksista voimalan toiminnassa. Jatkossa aiotaankin tehdä lisää mittauksia täydennetyllä mittausjärjestelmällä.

Antikainen, Petteri. Jääytymisen vaikutuksia tuulivoimalan aerodynamiikkaan ja kuormitukseen [The effects of icing on the aerodynamics and loads of a wind turbine]. Espoo 1998, Technical Research Centre of Finland, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1909. 39 p.

**Keywords** wind power generation, low temperature, ice, windmills, turbine blades

## Abstract

Ice induced loads and aerodynamical changes on a wind turbine were studied in this report by measurements and modeling.

Ice build-up decreases lift and increases drag which leads to power losses. An iced blade stalls earlier than clean blade but the stall effect is smoother.

In the load measurements from the Pyhätunturi test turbine two cases, one iced and one clean case, with similar wind conditions were found. In this report flapwise and edgewise blade-root bending-moments were analysed. Standard deviation of flap moment was reduced by 50 % due to icing. 1P frequency was reduced by factor 6. Ice mass caused a small increase in 1P frequency in the edge moment. Edge moment at eigenfrequency increased by factor 5, indicating reduced damping. Tower vibrations in the iced case increased at 1P and eigenfrequency. A rotor unbalance will result in 1P vibrations, but no explanation to increase at eigenfrequency was found.

On the day, when the iced load measurement carried out, power production had decreased significantly. Having Weibull distributed wind speed, that decrease corresponds to an energy loss of 50 %. Power had decreased but no decrease on standard deviation was observed, contrary to what was assumed based on other measurements.

The dynamical analysis program for wind turbines, ADAMS/WT, was further developed at VTT by adding a couple of features; tilt, tip brake and a damper for transient start-up. Some additions to the aerodynamic code were also made. The results from simulations and measurements were somewhat similar. Improvement of the simulations requires better knowledge of effects icing has on the wind turbine. Measurements with an improved measuring system are being planned.

# Alkusanat

Tämä raportti on tehty osana TEKES:n NEMO2-ohjelman Arktisen tuulivoiman kehittämisen-projektia. Työ on tehty VTT Energiassa. Valtaosan työstä on tehnyt dipl. ins. Petteri Antikainen. Kohdassa 3.4 kuvatus ohjelmointityön on tehnyt Mikko Pihlatie ja kapaleen 5.1 teksti perustuu Anders Dahlqvistin diplomityönään tekemään tutkimustyöhön Teknillisen korkeakoulun Aerodynamiikan laboratoriossa.

Arktisen tuulivoiman kenttätutkimukset suoritettiin Pyhätunturilla sijaitsevalla koetuulivoimalaitoksella, jonka yhdessä omistivat VTT Energia, Kemijoki Oy ja Ilmatieteen laitos. Käytännön asennuksista ja kunnossapidosta vastasi suurelta osin voimalaitoksen nykyinen omistaja, Kemijoki Oy sekä Jorma Järvelä, jolle kiitokset arktisen tuulivoiman edistämisestä. Ilmatieteen laitoksen Pyhätunturin sääaseman monipuoliset mittauksen mahdollistivat tarkkojen säähavaintojen teon projektin kuluessa.

Pyhätunturin monipuolisesti instrumentoidulla arktisella tuulivoimalaitoksella on arktisen tuulivoimaprojektin ohella ollut käynnissä useita muita projekteja. Tässä raportissa sivuttavista aiheista jäätunnistus, mittausteknologia ja jäätymisestä aiheutuvien lapa- ja tornirakenteiden kuormitusten tutkimus ovat osittain kuuluneet EU-projektiin “Wind Energy Production in Cold Climates” (WECO, JOR3-CT95-0014) jossa Ilmatieteen laitoksen lisäksi on projektissa ovat mukana olleet Tanskasta Risø:n tutkimuskeskus ja Saksasta DEWI (Deutsches Windenergie-Institut) ja Braunschweigin teknillinen korkeakoulu.

Erityisesti haluan kiittää Per Vølundia Risø:n tutkimuskeskuksesta antoisasta yhteistyöstä mittaustulosten analysoinnissa.

Petteri Antikainen

# Sisällysluettelo

Symboliluettelo	7
1. Johdanto	9
2. Mallinnus- ja analyysiohjelmisto ADAMS(/WT)	10
3. ADAMS/WT:n lisäpiirteet	16
3.1 Pääkselin kallistuskulma	16
3.2 Kärkijarru	16
3.3 Vaimennettu käynnistys	16
3.4 Aerodyn-ohjelman muutokset	17
4. Tuulivoimalan malli	18
5. Jäätymisen vaikutukset aerodynamiikkaan	19
5.1 Teoreettinen tarkastelu NACA 63-215 ja 63-217 profiileille	19
5.2 Tuulitunnelikokeet	23
5.3 Teoreettisen tarkastelun ja tuulitunnelikokeiden vertailu	24
6. Kuormitusmittaukset	25
6.1 Mittausjärjestelyt	25
6.2 Tuloksia	28
7. Simulointituloksia	34
8. Yhteenveto	38

# Symboliluettelo

a	aerodynaaminen induktiokerroin
a'	aerodynaaminen induktiokerroin
c	lavan jänteen pituus
CD	lavan vastuskerroin
CL	lavan nostekerroin
D	lavan vastusvoima
EA	venytysjäykkyys
EI	taivutusjäykkyys
GJ	kiertojäykkyys
I, I <sub>x</sub> , I <sub>y</sub> , I <sub>z</sub>	inertiat
L	lavan nostevoima
m	massa
r	säde
R	säde
v	tuulenoisuus
V	virtausnoisuus
X	flapsuunta eli voimalan roottoritason normaalin suunta (jos kiertymäkulma $\theta=0$ )
Y	lavan jänteen suunta
Z	lavan radiaalisuunta
$\alpha$	kohtauskulma
$\theta$	lavan kiertymäkulma
$\phi$	kiertämättömän lavan kohtauskulma
$\omega$	pyörimisnoisuus, kulmanoisuus





# 1. Johdanto

Suomessa tuulivoiman hyödyntämisen kannalta kiinnostavat alueet sijaitsevat merellä, rannikolla ja Lapin tuntureilla. Lapin tunturialueiden huomattavan suuren tuulivoimapotentiaalin hyödyntämisen esteenä ovat vaikeat olosuhteet. Suurimpana ja helposti havaittavana ongelmana on jään kerääntyminen tuulivoimalan lapoihin, mutta myös monien muiden komponenttien soveltavuuteen kylmiin olosuhteisiin on syytä kiinnittää huomiota.

Jään kertyminen lapoihin ei ole vain Suomen ja muiden pohjoisten alueiden erityispiirre, vaan lapoihin on havaittu kertyvän jäätä myös Keski-Euroopassa. Siellä kiinnostus jäätymisongelmiin koskee enemmänkin jään havaitsemista ja lavoista irtoavan jään aiheuttamaa vaaraa lähistöllä mahdollisesti oleville ihmisille. Sellaisissa olosuhteissa, joissa jäätymistä tapahtuu suhteellisen harvoin, ei lapojen lämmittäminen ole välttämätöntä, mutta niin niissä ja erityisesti erittäin jäätävissä oloissa on jäätymisestä aiheutuvien lisäkuormitusten tunteminen tarpeellista.

Jäätävien olojen tutkimista varten pystytettiin vuonna 1993 Pyhätunturille 220 kW:n kaupallinen tuulivoimala, joka instrumentoitiin kuormitusmittauksia varten. Kuormitusmittauksia on tehty lyhyinä ajanjaksoina vuosina 1994, 1995 ja 1996. Toiminnassa ovat olleet mukana VTT Energian lisäksi Ilmatieteen laitos ja Kemijoki Oy, jonka omistukseen voimala siirtyi vuonna 1997.

VTT:ssa on kehitetty valmiuksia voimalan dynaamista mallinnusta varten. Ohjelmiston valinnassa on päädytty kaupalliseen ADAMS-ohjelmistoon, joka on monipuolinen dynamiikan analyysiohjelmisto ja johon on olemassa erityinen tuulivoimalan mallintamiseen soveltuva lisäpaketti.

## 2. Mallinnus- ja analyysiohjelmisto ADAMS(/WT)

ADAMS-ohjelmisto (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems) on MSA-laskentamenetelmä. MSA (Multibody System Analysis) tutkii mekaanisten systeemien liikettä, johon ulkoiset voimat vaikuttavat. Systemi voi sisältää sekä jäykkiä että joustavia rakenteita, jotka voivat olla toisiinsa kytkettyjä esimerkiksi kappaleiden välisiä va-pausasteita rajoittamalla.

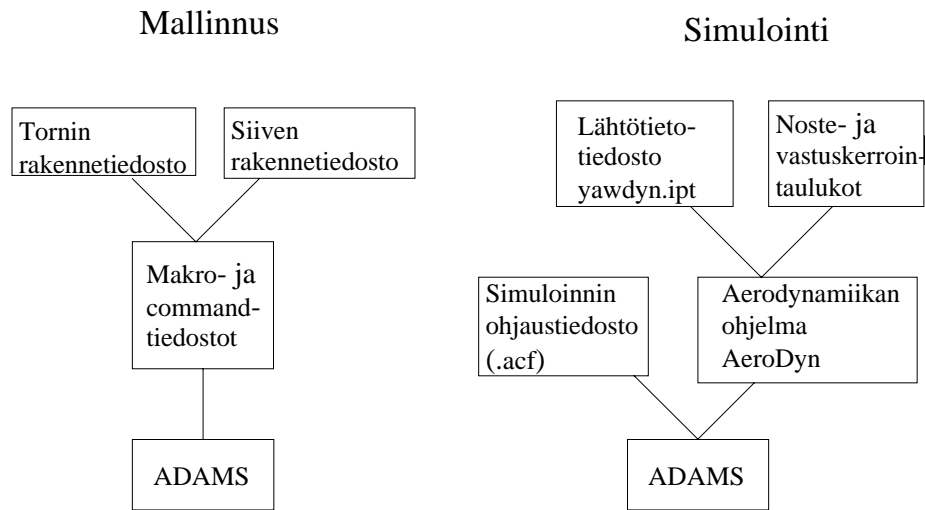
Kappaleiden paikat ja kiertymät on esitetty kuudella koordinaatilla, joista kolme on translaatio- ja kolme rotaatiokoordinaattia. Kullekin kappaleelle on oltava tarkasti määritellyt massa- ja inertiaominaisuudet, niiden väliset kytkennät ja ulkoiset voimat.

Laskentamenetelmä perustuu Newtonin mekaniikkaan. Lagrangen ja Hamiltonin formalismin liikeyhtälöt on koottu matriisimuodossa toisen asteen differentiaaliyhtälöiksi, jotka ratkaistaan numeerisesti aikadiskretisointia käyttäen.

ADAMS/WT on ADAMSiin liitettävä ohjelmapaketti, jolla mallinnetaan vaaka-akselisia tuuliturbiineita. ADAMS/WT koostuu makro- ja komentotiedostoista sekä FORTRAN-aliohjelmista. Makro- ja komentotiedostoilla helpotetaan mallin rakentamista. Malli voidaan rakentaa ilman niitäkin, mutta käytännössä se on vaikeaa. FORTRAN-aliohjelmilla lisätään aerodynaamiset kuormakomponentit lapoihin. Osa WT:stä liittyy mallin luomiseen ja osa simulointivaiheeseen. Tämä jako on esitetty kuvassa 1. ADAMS/WT:n tämän hetkiselä versiolle voidaan mallintaa kaksilapaisia keinuapaisia ja kolmi- tai nelilapaisia kiintonapaisia vaaka-akselisia voimaloita.

Mallin luomisessa käytetään useita kymmeniä makroja, komentotiedostoja (commandeli .cmd-tiedosto) sekä lavan ja tornin rakennetiedostoja. Niistä on ohjelmistoon koottu viisi selkeää komponenttikokonaisuutta: torni, konehuone, voimansiirto, roottorinapa ja lavat.

Rakennetiedostoissa lapa ja torni on jaettu noin kymmeneen eri pituussuuntaiseen (x-suunta) osaan ja kussakin kohdassa on lueteltuna osan massa, y- ja z-suuntaiset inertiat, massakeskipisteen poikkeama keskilinjasta, kiertojäykkyys (GJ), venytysjäykkyys (EA) sekä y- ja z-suuntaiset taivutusjäykkyydet (EI). Lisäksi lapatiedosto sisältää elastisen akselin poikkeaman x-akselista, jänteen pituuden, jänteen suuntaisen aerodynaamisen keskipisteen poikkeaman sekä aerodynaamisen ja rakenteellisen kiertymän. Esimerkit rakennetiedostoista on taulukoissa 1 ja 2.



Kuva 1. ADAMS/WT:n rakenne.

Taulukko 1. Tornin rakennetaulukko.

#1 THERE MUST BE EXACTLY TEN COMMENT LINES!					
#2 [ADAMS/WT Tower Data File]					
#3					
#4 Data is organized in sets of two lines					
#5 Line 1: height, mass, Iy, Iz, y_CG and z_CG					
#6 Line 2: GJ, EA, Ely, and Elz					
#7 x is axial (nominally vertical).					
#8 Use consistent SI units.					
#9					
#0 Created by VTT Energy, New Energy Systems					
0.0000E+00	0.8822E+03	0.1000E+01	0.1000E+01	0.0000E+00	0.0000E+00
	0.1229E+11	0.2262E+11	0.1629E+11	0.1629E+11	
0.1886E+01	0.8569E+03	0.1000E+01	0.1000E+01	0.0000E+00	0.0000E+00
	0.1126E+11	0.2197E+11	0.1493E+11	0.1493E+11	
0.5659E+00	0.8063E+03	0.1000E+01	0.1000E+01	0.0000E+00	0.0000E+00
	0.9373E+10	0.2068E+11	0.1244E+11	0.1244E+11	
0.9431E+01	0.7558E+03	0.1000E+01	0.1000E+01	0.0000E+00	0.0000E+00
	0.7708E+10	0.1938E+11	0.1024E+11	0.1024E+11	
0.1320E+02	0.7053E+03	0.1000E+01	0.1000E+01	0.0000E+00	0.0000E+00
	0.6253E+10	0.1808E+11	0.8322E+10	0.8322E+10	
0.1698E+02	0.1746E+03	0.1000E+01	0.1000E+01	0.0000E+00	0.0000E+00
	0.1357E+10	0.4477E+10	0.1776E+10	0.1776E+10	
0.2075E+00	0.1611E+03	0.1000E+01	0.1000E+01	0.0000E+00	0.0000E+00
	0.1065E+10	0.4131E+10	0.1395E+10	0.1395E+10	
0.2452E+02	0.1476E+03	0.1000E+01	0.1000E+01	0.0000E+00	0.0000E+00
	0.8193E+09	0.3786E+10	0.1074E+10	0.1074E+10	
0.2829E+02	0.1342E+03	0.1000E+01	0.1000E+01	0.0000E+00	0.0000E+00
	0.6143E+09	0.3440E+10	0.8056E+09	0.8056E+09	
0.3018E+02	0.1274E+03	0.1000E+01	0.1000E+01	0.0000E+00	0.0000E+00
	0.5260E+09	0.3267E+10	0.6902E+09	0.6902E+09	

*Taulukko 2. Lavan rakennetaulukko.*

```

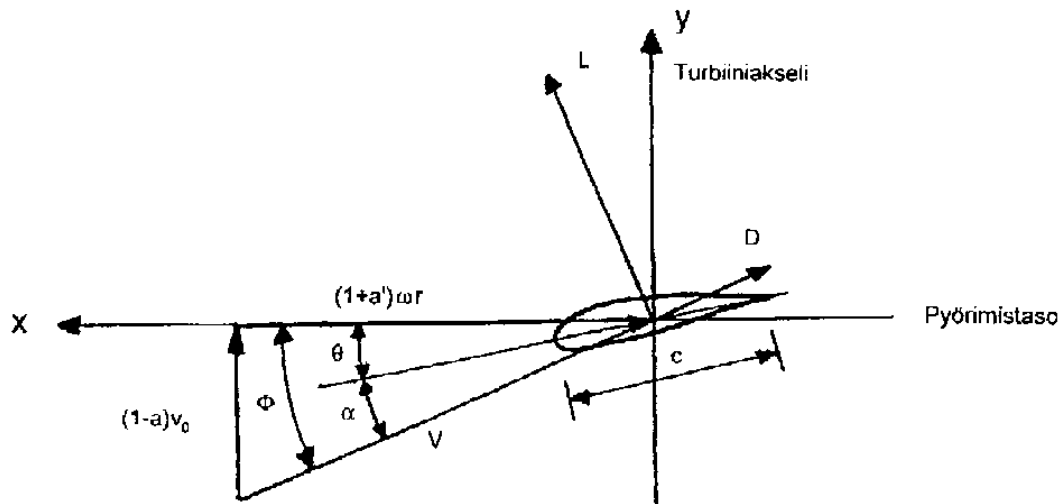
#1 THERE MUST BE EXACTLY TEN COMMENT LINES AT THE TOP OF THIS FILE!
#2 Data in this file is organized in sets of four lines.
#3 Line 1 is radius, mass, Iy, Iz
#4 Line 2 is y_CG_offset, z_CG_offset, y_ea_offset, z_ea_offset, twist.
#5 Line 3 is GJ, EA, EIy, EIz
#6 Line 4 is chord, z_ac_offset and aerodynamic twist.
#7 x is radial, y is to pressure, z is to leading edge. Twist is about
#8 +x Use consistent SI units. Twist is in degrees.
#9
#0
0.9700E+00  3.2300E+02  1.1120E+00  3.7180E-01
              0.0000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00  0.000E+01
              8.4710E+06  2.2959E+10  3.3000E+08  3.3000E+08
              6.7800E-01  3.6576E-02  0.0000E+00
1.7500E+00  3.2300E+02  8.1020E-01  2.4360E-01
              0.0000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00  -3.000E+01
              5.8310E+06  2.2959E+10  3.3000E+08  3.3000E+08
              6.8500E-01  4.5720E-02  0.0000E+00
2.0100E+00  9.6000E+01  4.5180E-01  6.3970E-02
              0.0000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00  -2.5000E+01
              3.3080E+06  0.7511E+10  6.0000E+07  6.7000E+07
              6.6000E-01  5.4864E-02  -2.5000E+01
3.1500E+00  9.5000E+01  4.2340E-01  4.0690E-02
              0.0000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00  -2.0500E+01
              2.1940E+06  0.9984E+10  8.8000E+07  4.4000E+07
              1.5000E+00  6.7056E-02  -2.0500E+01
4.2500E+00  7.9000E+01  3.0620E-01  2.3990E-02
              0.0000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00  -1.1600E+01
              1.4790E+06  0.5536E+10  5.6000E+07  2.7000E+07
              1.3900E+00  7.6200E-02  -1.1600E+01
5.3500E+00  5.1000E+01  1.9570E-01  1.3530E-02
              0.0000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00  -6.2000E+00
              9.9970E+05  0.2812E+10  3.4000E+07  8.8000E+06
              1.2800E+00  6.7056E-02  -6.2000E+00
6.4500E+00  4.6000E+01  1.1390E-01  7.2100E-03
              0.0000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00  -3.3000E+00
              6.3960E+05  0.2080E+10  2.6000E+07  4.7000E+06
              1.1700E+00  6.4008E-02  -3.3000E+00
7.5500E+00  4.3000E+01  5.9190E-02  3.5400E-03
              0.0000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00  -1.6000E+00
              3.7880E+05  0.1636E+10  2.0000E+07  2.8000E+06
              1.0600E+00  5.7912E-02  -1.6000E+00
8.6500E+00  3.9000E+01  3.2980E-02  1.5720E-03
              0.0000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00  -6.0000E-01
              2.1240E+05  0.1225E+10  1.4000E+07  1.5000E+06
              9.5000E-01  5.4864E-02  -6.0000E-01
9.7500E+00  3.3000E+01  1.3800E-02  5.3530E-04
              0.0000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00  -2.0000E-01
              9.8500E+04  0.0756E+10  8.5000E+06  6.5000E+05
              8.4000E-01  4.8768E-02  -2.0000E-01
1.0850E+01  5.9000E+01  2.5250E-03  9.1820E-05
              0.0000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00
              3.2540E+04  0.2165E+10  5.7000E+06  1.1000E+05
              7.3000E-01  3.3528E-02  0.0000E+00
1.2500E+01  3.8000E+01  2.5250E-03  9.1820E-05
              0.0000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00
              3.2540E+04  0.1216E+10  3.5000E+06  8.5293E+04
              5.6500E-01  3.0480E-02  0.0000E+00

```

Simuloitaessa tarvitaan lähtötietotiedosto yawdyn.ipt, lavan nosto- ja vastusvoimakertoimien tiedostot eli ClCd-tiedostot ja FORTRAN-kielinen aerodynamiikan ohjelma, joka käyttää em. tiedostoja. Tiedostoista on mallikappaleet taulukoissa 3 ja 4. VTT:ssä rakennettujen ohjelman osien käyttämät lisäparametrit on yawdyn.ipt-tiedostossa erotettu plus- ja huutomerkkein. FORTRAN-ohjelma laskee voimat lapaelementtiteoriaa käyttäen. Lapaprofiiliin liittyvät parametrit on määritelty kuvan 2 mukaisesti, jossa L on nostevoima, D on vastusvoima, c on jänteen (chord) pituus johtoreunasta jättöreunaan,  $\omega$  on kulmanopeus, r on säde,  $v_0$  on tuulenoisuus, a ja a' ovat induktiokertoimia,  $\theta$  on kiertymäkulma,  $\alpha$  on kohtauskulma ja V on ilmavirran nopeus, jonka lapa kokee. Parametrien tarkempi määrittely kaavojen johtoinen on esitetty useissa alan perusteoksissa, esimerkiksi viitteissä /1 ja 2/

*Taulukko 3. ClCd-taulukko.*

Blade X wind tunnel data		
15.24		Stall angle (deg)
1.0		Gormont dynamic stall parameter (upper loop)
0.7		Gormont dynamic stall parameter (lower loop)
0.12		Airfoil Thickness ratio, Thickness/Chord
-1.43526		zero lift angle of attack (deg)
5.5682		Zero lift Cn slope
1.031		Cn stall value for positive angle of attack
-.93		Cn stall value for negative angle of attack
0.		Alpha for CD min (deg)
0.0121		Zero lift drag
-180.0	0.137	0.0547 angle of attack (deg), Cl, Cd
-140.0	0.826	0.5823
-20.0	-0.934	0.2044
-10.0	-0.90	0.013
-8.0	-0.65	0.010
-6.0	-0.46	0.008
-4.0	-0.22	0.007
-2.0	0.0	0.006
0.0	0.20	0.005
2.0	0.43	0.005
4.0	0.62	0.007
14.0	1.52	0.030
16.0	1.40	0.073
30.0	1.00	0.470
116.8	-0.572	1.0665
180.0	0.137	0.0547



Kuva 2. Lapaprofiliin liittyvät parametrit.

Taulukko 4. Lähtötietotiedosto yawdyn.ipt.

VTT220	ADAMS model using University of Utah aerodynamics routines	
True	DSTALL, T= use dynamic stall, F= no dynamic stall	
True	Beddoes dynamic stall flag. True=Beddoes, False=Gormont	
True	WAKE: T=Normal iteration for induction factors, F=Ignore wake	
0.002	ATOLER: Tolerance (convergence criteria) for induction factor	
True	DYNINFL: T=Use dynamic inflow induction lag, F=Quasi-steady	
False	WINDFIL, Read wind data file?: T=YES, F=NO yawdyn.wnd	
False	TURBLNT, Read turbulence files for wind inputs?: T=yes, F=no	
aaaaa	Turbulence file name leader (30 chars)	
True	ELEMPRN, Write element data to element.plt file	
true	SIUNIT, select units, TRUE= SI, FALSE= English	
19.0	V, mean wind speed at hub height, (alusaa)	
False	HOMMA, Tuulen nopeuden portaittainen kasvu	+
1.0	WINKKU, Tuulen nopeuden kasvuinkrementti	+
2.0	TINKKU, Tuulen nopeuden aikainkrementti	+
False	JUTTU, Siiven kuormakomponentit pois	+
60	HHETKI, Aika jolloin kuormat pois	+
1	LAPA, Siivet joissa ei kuormia HHETKEN jälkeen	+
True	STOKAT, Tuulen nopeuden satunnaisvaihtelu	!
10.0	AIKA, Stokastisen aikasarjan pituus	!
0.1	ASKEL, Aikasarjan aika-askelen pituus	!
0.1	ROSO, Maan pinnan rosoisuusparametri	!
2.0	VIIVE, Turbulenssin alkamisaika	!
0.0	VZ, Vertical component of wind speed (positive up)	
0.0	HSHR, Horizontal wind shear coefficient	
0.177	VSHR, Vertical wind shear coefficient	
True	POWRLAW, F=Linear shear, T=Power Law vertical shear	
0.0	VELDEF, Tower shadow velocity deficit fraction	
2.74	SHADHWID, Tower shadow half width	
3	#Blades	
4.00	PITCH ANGLE of blade 1 (deg)	
4.00	PITCH ANGLE of blade 2	
4.00	PITCH ANGLE of blade 3	
1.2251	RHO=air density (kg/meter <sup>3</sup> )	
24.00	R, Rotor Radius (m) (8.504 to account for 4 degree precone)	
31.0	HH, Hub Height	
1.600	SL, distance from yaw axis to hub	
0.0	TILT, angle of rotor shaft	
0.0	PC, PreCone angle (deg)	
0.001	DTAERO, Time interval for ADAMS aero calculations (sec)	
4	NUMFOIL, NUMBER OF AIRFOIL TABLES THAT WILL BE READ	
naca6321.dat	AIRFOIL DATA FILENAME	
naca6318.dat		
naca6315.dat		
naca6312.dat		
12	Number of blade elements per blade	
0.8760	0.961 1.01 0.678 1 RELM, DR, TWIST, Chord, AIRFOIL ID NUMBER	
1.9860	0.961 1.01 1.500 1	
2.7980	0.961 1.01 1.475 1	
3.9070	0.961 1.01 1.365 1	
4.7190	0.961 1.01 1.300 1	
5.8290	0.961 1.01 1.190 1	
6.6410	0.961 1.01 1.090 2	
7.7520	0.961 1.01 0.990 2	
8.5630	0.961 1.01 0.905 3	
9.6720	0.961 1.01 0.800 3	
10.4840	0.961 1.01 0.720 4	
11.5940	0.961 1.01 0.610 4	
END of ADAMS input (the word END must appear in the first three col's)		

### **3. ADAMS/WT:n lisäpiirteet**

ADAMS/WT:a on VTT:ssä kehitetty edelleen rakentamalla muutama makro käyttöliittymineen. Lisättyjä piirteitä ovat pääakselin kallistuskulma (tilt), kärkijarru ja vaimennettu käynnistys. Edellä mainittujen makrojen lisäksi on aerodynamiikan laskevaan ohjelmaan tehty lisäyksiä /3/.

#### **3.1 Pääakselin kallistuskulma**

Usein vaaka-akselisen tuuliturbiinin pääakseli ei ole aivan vaakatasossa vaan sitä on hieman kallistettu. Näin lapa saadaan kulkemaan kauempana tornista, jolloin ne vaikuttavat vähemmän toisiinsa. Vaikka torni onkin lapaan nähden tuulen alapuolella, se vaikuttaa silti lavan näkemään tuuleen. Mitä lähempänä tornia lapa kulkee, sitä suuremmat ovat dynaamiset rasitukset. Muun voimansiirron ei ole välttämätöntä olla kallistettuna pääakselin tavoin. Tässä lisämakrossa koko voimansiirto on kallistettu, koska se vastaa todellisuutta useissa voimalaitoksissa, kuten Pyhätunturin koevoimalassa.

#### **3.2 Kärkijarru**

Useimmiten sakkaussäätöisen tuulivoimalan lavan kärki on mahdollista kääntää poikittain muuhun lapaan nähden. Tätä aerodynaamisena jarruna toimivaa kärjen osaa kutsutaan kärkijarruksi.

Jarru asetetaan mallinnuksessa lavan kahden viimeisen osan välille. Osien välillä oleva voimat välittävä matriisi korvataan nivelellä, johon on liitetty lavan kärkipalan avaava kiertovoima. On huomattava, että tällöin menetetään tässä lavan kohdassa olevat jousto-ominaisuudet ja lavan kärjestä tulee jäykkä.

#### **3.3 Vaimennettu käynnistys**

Kun simulointi käynnistetään ja tuulen nopeus muuttuu välittömästi nolosta poikkeavaksi, usein voimakkaaksikin, on sen aiheuttama tornin värähtely voimakasta. Samoin kun generaattori kytketään verkkoon, sen aiheuttama poikittainen värähtely on voimakasta. Tällä makrolla on on haluttu pienentää etenkin poikittaissuuntaista värähtelyä. Värähtely toki vaimenee muutoinkin ja rakenteet hakevat tasapainoasemansa, mutta se tapahtuu melko hitaasti, ja sen vuoksi on haluttu nopeuttaa näiden transienttien tapahtumien vaimenemista.



Makrolla luodaan nivel, joka sallii konehuoneelle ja samalla muullekin rakenteelle pyöriä osia lukuun ottamatta ainoastaan eteen-taakse suuntaisen liikkeen.

Käynnistyksen ajaksi generaattori korvataan hidasta akselia pyörittävällä voimalla, joka nostaa pyörimisnopeuden askelfunktiona nollassa nimellisyörimisnopeuteensa tyypillisesti vajaassa sekunnissa, jonka jälkeen tämä voima poistetaan ja generaattorin momenttikäyrää kuvaava funktio kytketään päälle.

Tavallaan generaattorin päällä pitäminen simuloinnin alussa vastaisi moottorikäynnistystä, joka on harvoin käytetty toimenpide. Normaalisti voimalan generaattori kytketään päälle vasta kun nimellinen pyörimisnopeus on saavutettu, joten tässä tehdyt toimenpiteet ainoastaan nopeuttavat aerodynamiikan aikaan saamaa pyörimistä. Moottorikäynnistys ei muutenkaan olisi todellisuuden mukainen, koska generaattorin määrittelyssä on käytetty likiarvoyhtälöä, joka on voimassa vasta, kun pyörimisnopeus on lähellä nimellisyörimisnopeutta.

### **3.4 Aerodyn-ohjelman muutokset**

ADAMS/WT:n aerodynaamiseen ohjelmaan AeroDyn on VTT:ssä tehty muutoksia kolmessa eri tarkoituksessa: haluttiin muuttaa tuulennopeutta askeleittain, jättää tarpeeton aerodynamiikka laskematta laskenta-ajan lyhentämiseksi ja kuvata tuulen turbulenssia. Näiden muutosten lähtötiedot on nähtävissä taulukossa 4. Muutokset on tehty suomeksi alkuperäisen englannin kielen sekaan ja eroteltu lisäksi plus- ja huutomerkein. Kussakin kolmesta muutoskokonaisuudessa on tosi-epätosi -muuttuja, jolla muutoskokonaisuus saadaan itsenäisesti päälle tai vastaavasti pois päältä.

Ensimmäisellä kokonaisuudella muutetaan tuulen nopeutta askeleittain. Sekä tuulennopeuden askel että aika-askel on määrättävissä. Näin on mahdollista aiheuttaa pieniä häiriöitä. Lisäksi tämä mahdollistaa sen, että koko tuulennopeusalue, jolla voimala toimii, käydään yhdellä simuloinnilla läpi, jolloin saadaan määritettyä mallin tehokäyrä kohtuullisella vaivalla.

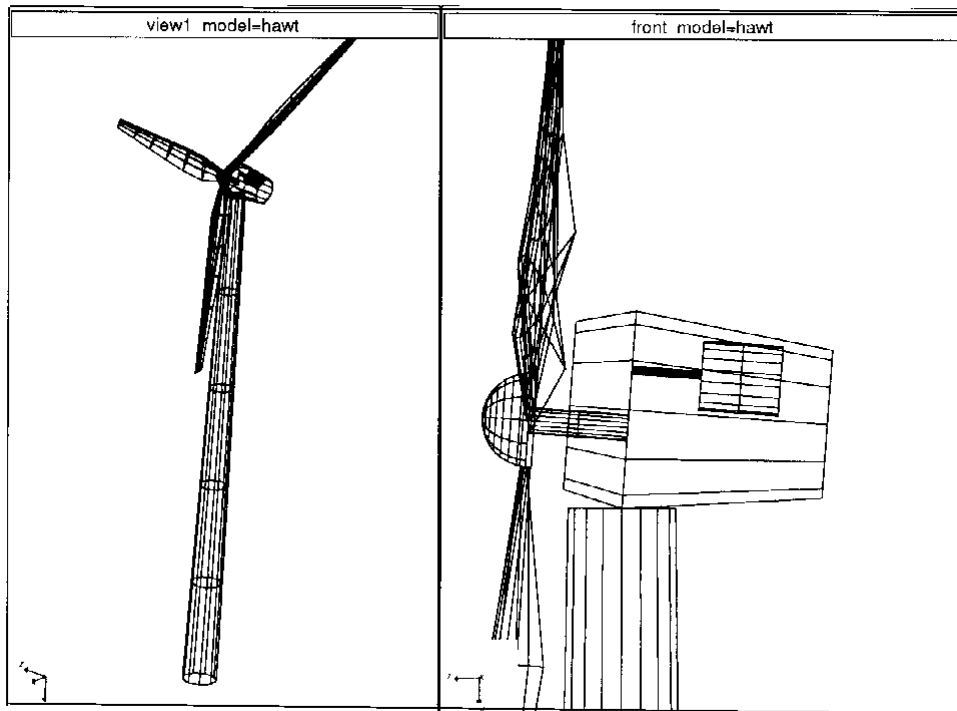
Toinen kokonaisuus kytkee halutulla hetkellä yhden lavan aerodynaamiset voimat pois päältä. Tämä ei ole kovinkaan monikäyttöinen. Se rakennettiin, kun eräessä simuloinnissa haluttiin irroittaa lapa kesken voimalan toiminnan ja holtittomasti pyörivän lavan aerodynamiikan laskenta vei liikaa resursseja.

Kolmas kokonaisuus kuvaa tuulen lyhyen ajan turbulenssia eli puuskaisuutta. Se laskee aikasarjat tuulennopeuden kolmelle suuntakomponentille käyttäen apuna tuulennopeuden vaihteluille määritetyjä spektritiheysfunktioita./4/

## 4. Tuulivoimalan malli

Tässä kappaleessa kuvataan mallinnettu tuulivoimala. Mallinnettava voimala on Pyhä-tunturilla sijaitseva koevoimala Wind World W-2500/220 kW. Voimalan päämitat ovat seuraavat: roottorin halkaisija on 25 metriä, nimellisteho 220 kW ja napakorkeus 31 metriä.

Malli koostuu tornista, konehuoneesta, ja roottorista (kuva 3). Tornia kuvataan viidellä yhtä pitkällä palalla. Konehuone sisältää hitaan akselin, nopean akselin, akselit yhdistävän ideaalisen vaihteen ja generaattorin. Roottori koostuu navasta ja siihen kiinnitetyistä kolmesta lavasta, joista kukin sisältää kuusi palaa ja 12 aerodynaamista voimakomponenttia.



Kuva 3. Mallinnettu voimala

## 5. Jäätymisen vaikutukset aerodynamiikkaan

Jää voi aiheuttaa monenlaisia muutoksia lapaprofiileille. Se kasautuu pääasiassa johtoreunaan ja huonontaa optimoidun profiilin ominaisuuksia. On mahdollista, että lapalämmitysjärjestelmällä sulatetun jään uudelleen jäätyminen jättöreunaan parantaa aerodynaamisia ominaisuuksia, mutta sekään ei ole toivottu ilmiö voimalan muun mitoituksen kannalta. TKK:n aerodynamiikan laboratoriossa on tehty teoreettinen tarkastelu jäätymisen vaikutuksesta noste- ja vastuskertoimille kasvattamalla ennallaan pysyvän profiilin pinnan karheutta.

EU:n JOULE/THERMIE -tutkimusohjelman WECO (Wind Energy Production in Cold Climates) -projektissa, jossa VTT Energia on mukana, on Saksassa kerätty lavoista tipuneita jääpaloja, joista tehdyt muotit on liitetty lapaprofiiliin ja siten mitattu tuulitunnelissa noste- ja vastuskertoimien muutoksia.

### 5.1 Teoreettinen tarkastelu NACA 63-215 ja 63-217 profiileille

Tarkastelussa on käytetty profiileina NACA 63-215 ja 63-217 -profiileita, koska Pyhäntunturin koevoimalan lavat ovat NACA 63-2xx -sarjaa. Tarkastellut paksuussuhteet 15 ja 17 (profiilikoodin kaksi viimeistä lukua) vastaavat lavan kärjen paksuussuhteita. Laskennassa on käytetty FINFLO-ohjelmistoa. Ohjelma on paljon laskenta-aikaa vaativa, ja tarkastelu on suoritettu kohtauskulmavälille 0..18. Suuremmilla kohtauskulmilla ohjelman rajoitukset tulevat vastaan. Pyhäntunturin koevoimalan tapauksessa tarkasteltu kohtauskulmaväli vastaa lavan kärjessä tuulennopeusalueetta 0..17 m/s. Paksuussuhteen 17 alkaessa on tyvestä katsoen säde 7,5 m, ja sillä alueella tarkasteltu kohtauskulma-alue vastaa tuulennopeusalueetta 0..11 m/s. Tuulennopeuden kasvaessa kasvaa myös kohtauskulma.

Ohuemmalla lapaprofiililla on käytetty kolmea karheutta ja paksummalla kahta. Karheutta on vaihdeltu 0.5 mm välein ekvivalenttihiiekanjyvä-kokoa kasvattamalla. Virtauksen Reynoldsin lukuna on käytetty  $2.5 \cdot 10^6$ .

Tulokset on esiteltyinä taulukoissa 5 ja 6 ja kuvissa 4, 5, 6 ja 7.

Jään kertyessä lavan pinnalle eli karheuden kasvaessa nostekertoimen arvot pienenevät: kuvaaja (kuvat 4 ja 5) siirtyy oikealle ja suoran osuuden kulmakerroin pienenee. Sakkaus, eli virtauksen irtoaminen lavan pinnasta, näkyy nostekertoimen nopeana laskuna kohtauskulman saavuttaessa ns. sakkauskulman arvon. Kun profiilin karheutta kasvataan, sakkauskulma pienenee, eli lapa sakkaa jo pienemmällä tuulennopeudella. Nostekertoimen kuvaajan muoto pysyy jotakuinkin samana. Suurimmillaan nostekerroin on pienentynyt 40% ja sakkauskulma pienentynyt 4 astetta. Vastuskertoimen arvot puoles-

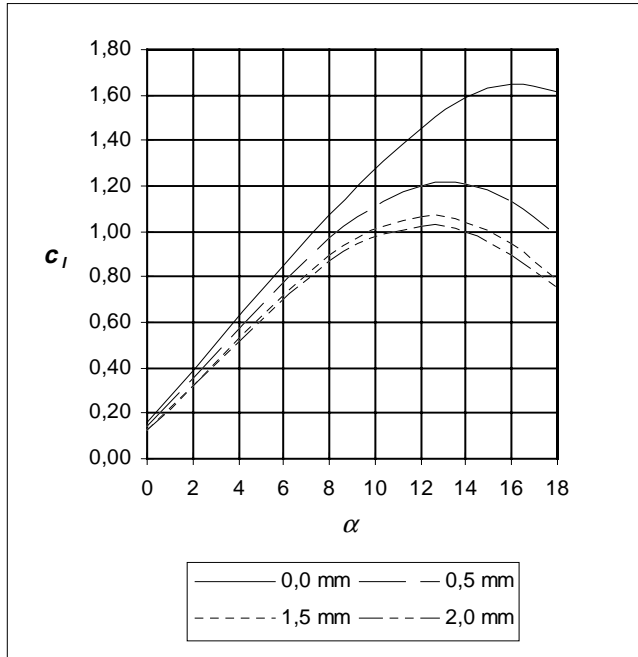
taan kasvavat: kuvaaja (kuvat 6 ja 7) siirtyy ylöspäin ja jyrkkenee kohtauskulman kasvassa. Hyvällä tarkkuudella voidaan vastuskertoimen kasvamista kuvata vakiokertoimella tarkastellulla kohtauskulma-alueella. Vastuserroin on karkeimmilla pinnoilla yli kaksinkertaistunut sileään verrattuna. Noste- ja vastuskertoimien muutos aiheuttaa voimalan tehon tuoton heikkenemisen. /5/

Taulukko 5. NACA 63-215 profiilin noste ja vastuskertoimet.

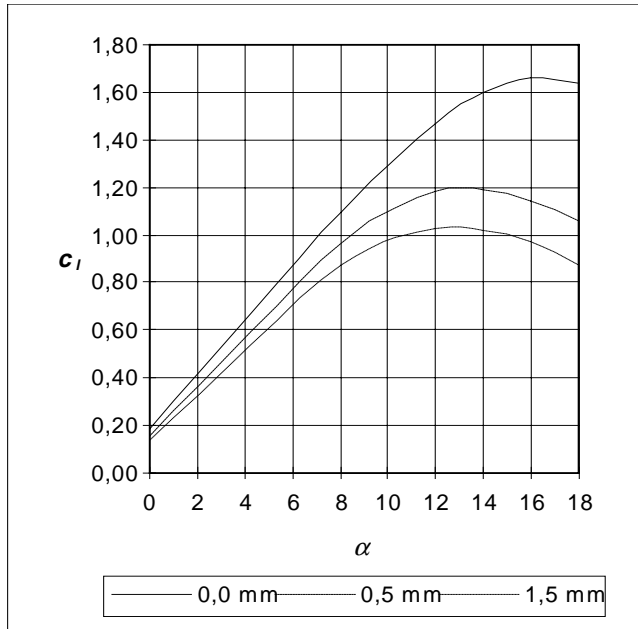
NACA 63-215								
	$k_R = 0.0$ mm		$k_R = 0.5$ mm		$k_R = 1.5$ mm		$k_R = 2.0$ mm	
$\alpha$	$C_l$	$C_d$	$C_l$	$C_d$	$C_l$	$C_d$	$C_l$	$C_d$
0.0	0.1625	0.0100	0.1423	0.0174	0.1274	0.0231	0.1228	0.0250
8.0	1.0736	0.0149	0.9702	0.0269	0.8946	0.0360	0.8706	0.0389
12.0	1.4519	0.0227	1.2033	0.0474	1.0654	0.0632	1.0266	0.0677
14.0	1.5856	0.0305	1.2078	0.0685	1.0387	0.0875	0.9959	0.0926
16.0	1.6471	0.0444	1.1307	0.0979	0.9454	0.1213	0.8991	0.1276
18.0	1.6128	0.0675	0.9829	0.1393	0.7866	0.1689	0.7479	0.1753

Taulukko 6. NACA 63-217 profiilin noste- ja vastuskertoimet.

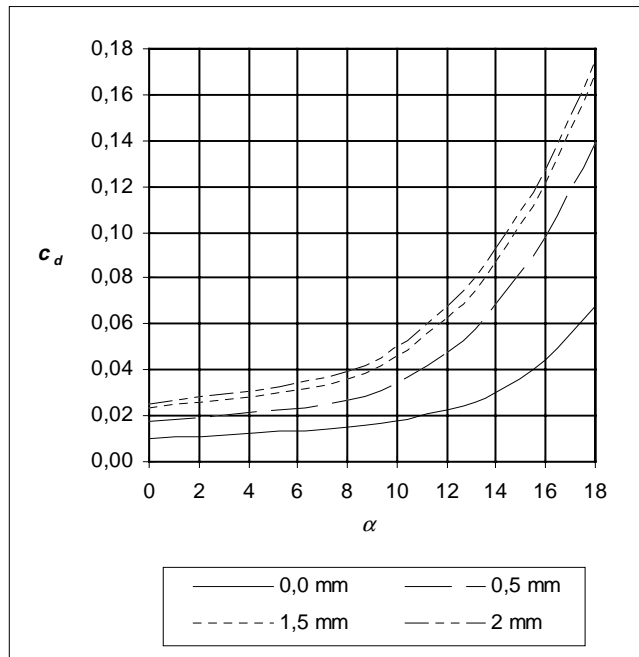
NACA 63-217						
	$k_R = 0.0$ mm		$k_R = 0.5$ mm		$k_R = 1.5$ mm	
$\alpha$	$C_l$	$C_d$	$C_l$	$C_d$	$C_l$	$C_d$
0.0	0.1822	0.0106	0.1560	0.0185	0.1366	0.0247
8.0	1.0937	0.0155	0.9652	0.0286	0.8716	0.0387
12.0	1.4668	0.0232	1.1817	0.0493	1.0289	0.0654
14.0	1.5964	0.0309	1.1924	0.0686	1.0210	0.0867
16.0	1.6576	0.0442	1.1465	0.0936	0.9715	0.1143
18.0	1.6359	0.0650	1.0567	0.1261	0.8708	0.1512



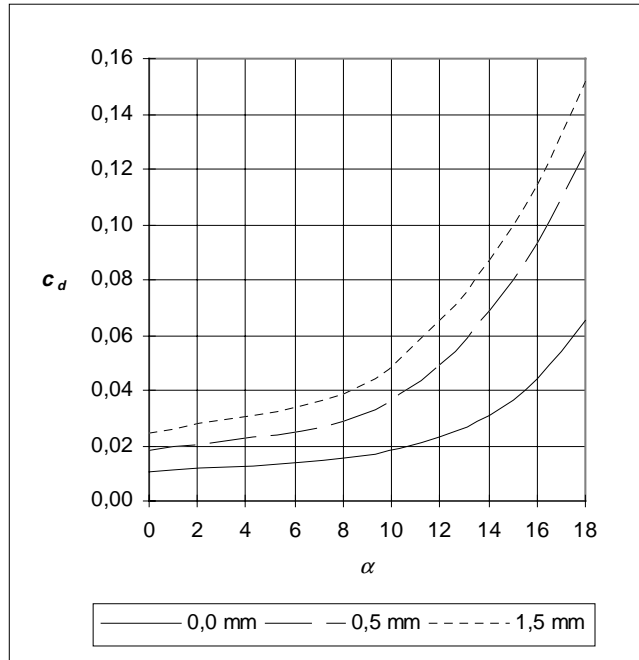
Kuva 4. NACA 63-215 profiilin nostekerroin karheuden kasvaessa.



Kuva 5. NACA 63-217 profiilin nostekerroin karheuden kasvaessa.



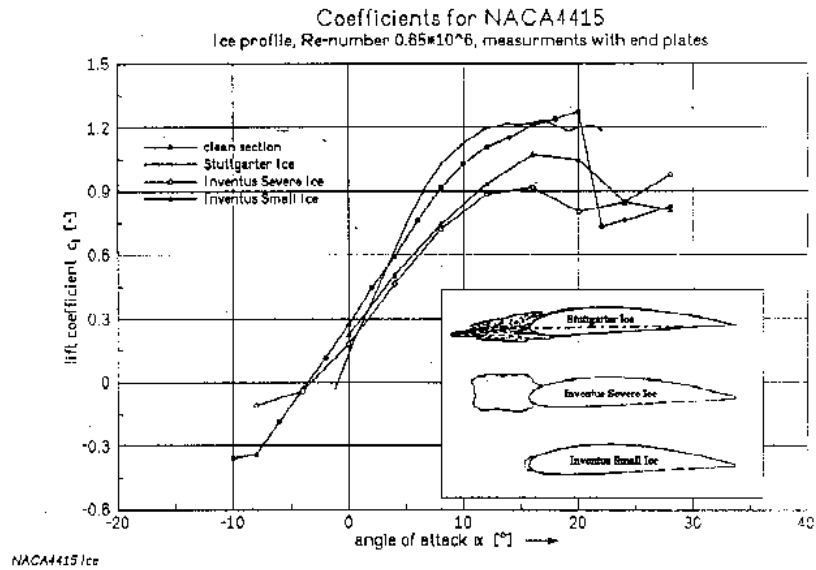
Kuva 6. NACA 63-215 profiilin vastuskerroin karheuden kasvaessa.



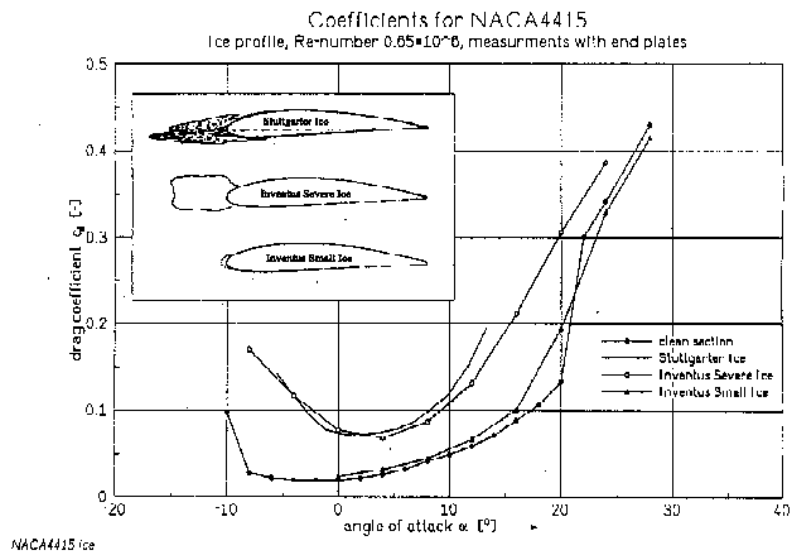
Kuva 7. NACA 63-217 profiilin vastuskerroin karheuden kasvaessa.

## 5.2 Tuulitunnelikokeet

Saksassa DEWI (Deutsches Windenergie-Institut) ja Braunschweigin teknillinen korkeakoulu tekivät tuulitunnelikokeita tutkiakseen jään aiheuttamia muutoksia lavan nos-te- ja vastuskertoimissa  $C_l$ - ja  $C_d$ . Eri puolilta Saksaa kerättiin voimaloista pudonneita jääpaloja, joista valmistetuista muoteista valittiin muutamia kokeita varten. Muotit kiinnitettiin Inventus-profiiliin, joka on NACA-4415 -profiilin kaltainen. Käytetty Reynoldsin luku oli  $0.65 \cdot 10^6$ . Tulokset on esitetty kuvissa 8 ja 9. /6/



Kuva 8.  $C_l$ -kuvaajat



Kuva 9.  $C_d$ -kuvaajat

### 5.3 Teoreettisen tarkastelun ja tuulitunnelikokeiden vertailu

Tuloksia vertaillessa on huomattava, että näissä kahdessa tarkastelussa kohtauskulma-alue ei ollut täsmälleen sama. Myös Reynoldsin luvut poikkeavat toisistaan, koska tarkastelujen taustalla on erilaiset voimat.

Teoreettisen ja kokeellisen tarkastelun tulokset ovat osittain yhteneviä. Nostekertoimen  $C_l$  kulmakerroin kasvavalla alueella pienenee ja sakkkaus aikaistuu. Kokeissa on tosin havaittu myös suurempia nostekertoimen arvoja kuin puhtaalla lavalla. Tuulitunnelitesien tuloksissa huomataan erittäin mielenkiintoinen ilmiö, sakkauksen tasoittuminen, jota teoreettisessa tarkastelussa ei havaita. Vastuskertoimien  $C_d$  tulokset näissä tarkasteluissa ovat melko yhteneviä.

Teoreettisen tarkastelun puutteena on jään aiheuttaman profiilin muutoksen huomiotta jääminen. Tuulitunnelikokeiden puutteena on, kuten aina, 3D vaikutusten puuttuminen.

Tulokset eivät ole lopullisia totuuksia, mutta erinomaisesti suuntaa antavia.

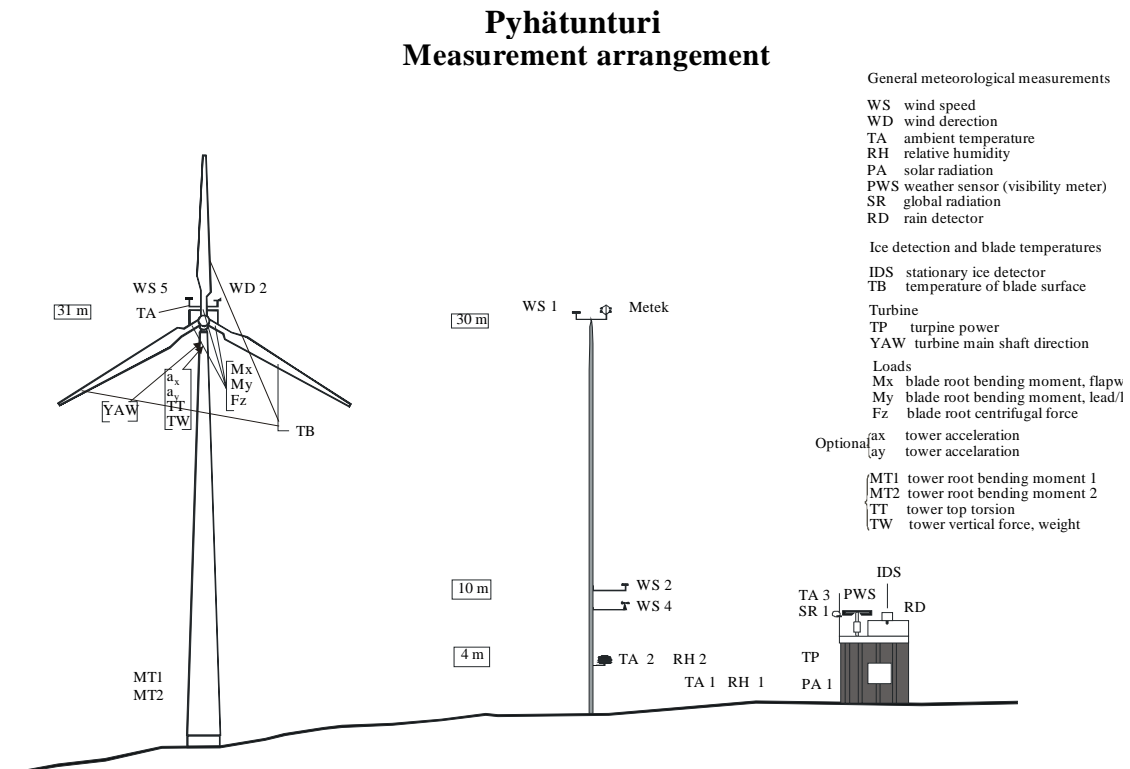


## 6. Kuormitusmittaukset

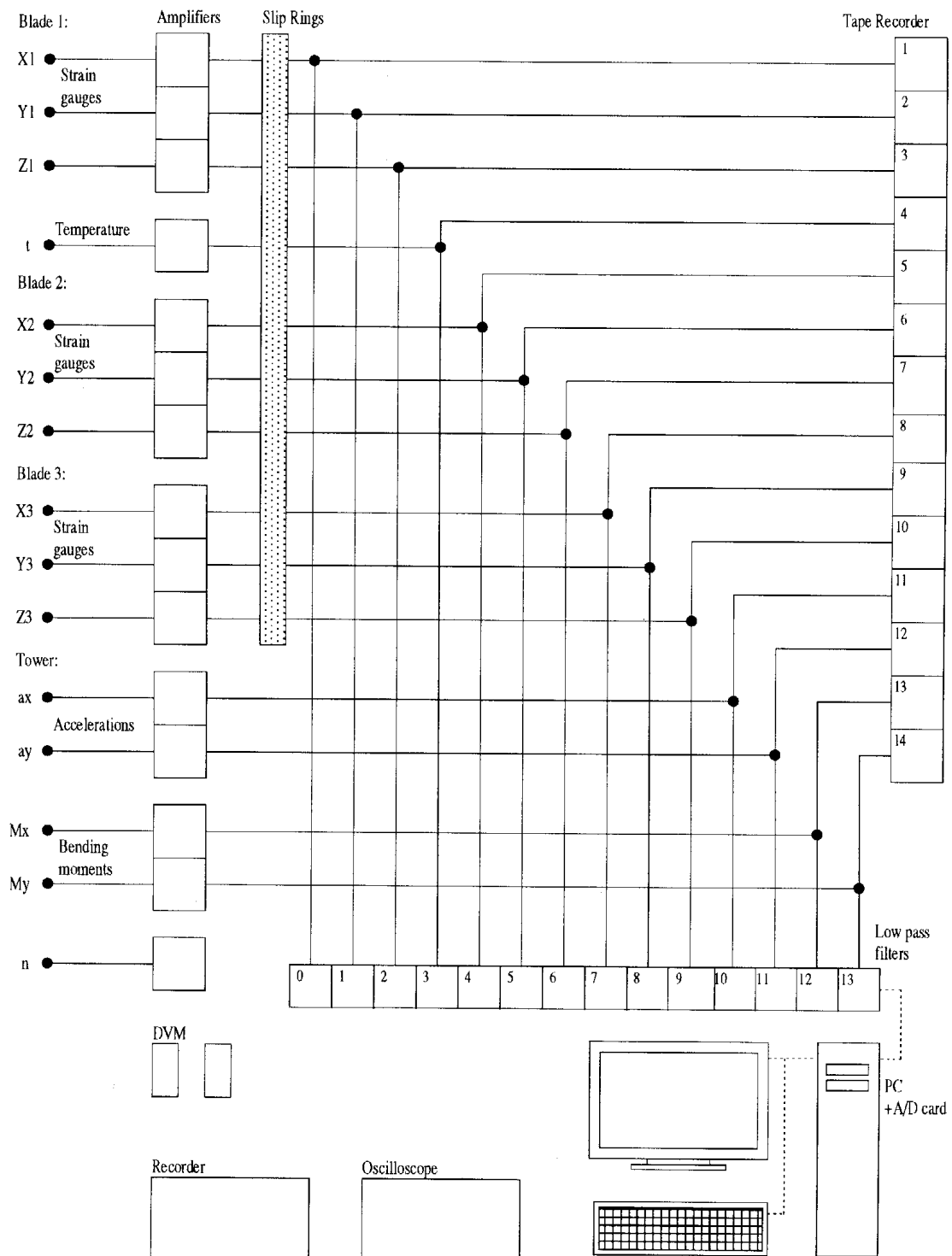
Pyhätunturilla on tehty mittauksia vuosina 1994, 1995 ja 1996. Kuormitusmittaukset on suoritettu mittaustaikalla vajaan viikon aikana kunakin vuonna, jolloin on suoritettu parikymmentä lyhytaikaista muutaman minuutin kestoista aikasarjamittausta (100 tai 500 Hz). Lisäksi Ilmatieteen laitokselta on saatu jatkuvista mittauksista tuulennopeus ja -suunta, lämpötila ja tehotiedot kymmenen minuutin keskiarvoina.

### 6.1 Mittausjärjestelyt

Voimalan kuormituksia on mitattu sekä tornista että lavoista. Tornin tyveen on asennettu 4,2 metrin korkeudelle venymäliuskat, joilla on mitattu taivutusmomenttia kahteen toisiinsa kohtisuorassa olevaan suuntaan ( $M_x$ ,  $M_y$ ). Lapoihin on asennettu venymäliuskat mittaamaan tyvestä jänteen (edge, Y) ja flap (X) -suuntaisia momentteja sekä radiaalisuuntaista voimaa (Z). Nämä kolme toisiinsa nähden kohtisuorassa olevaa suuntaa muodostavat lavan koordinaatiston (kuva 12). Kaikki kolme lapaa on instrumentoitu samalla tavalla. Osassa mittauksista on lisäksi konehuoneen kiihtyvyyttä ( $a_x, a_y$ ), lavan 1 lämpötilaa (t) sekä mukaan on myös liitetty kerran kierroksessa tuleva pulssi (n), josta saadaan lavan suunta pyörivällä roottorilla. Mittausjärjestelyt on esitetty kuvissa 10, 11 ja 12.

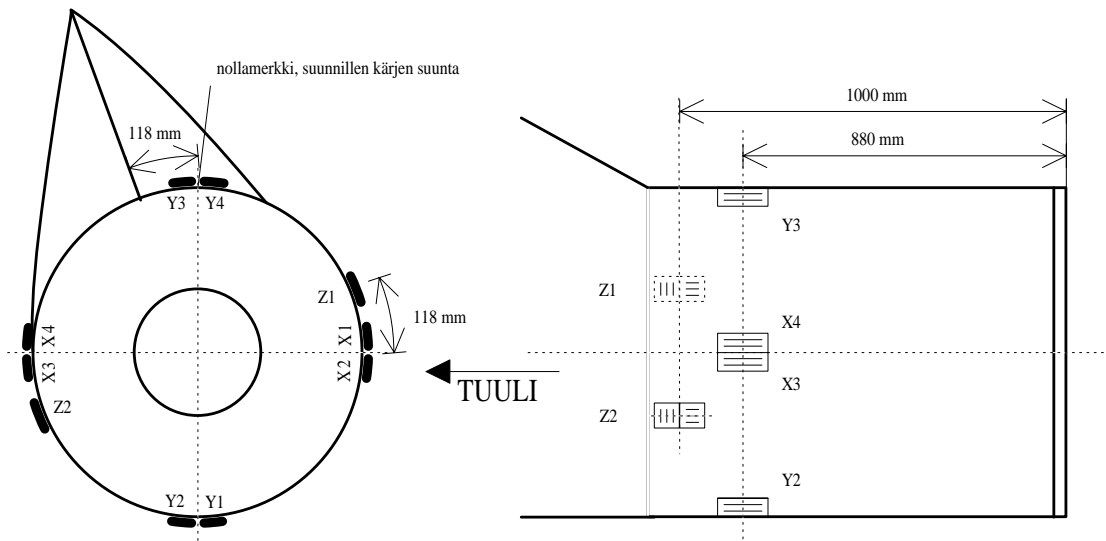


Kuva 10. Pyhätunturin mittausjärjestelmä.

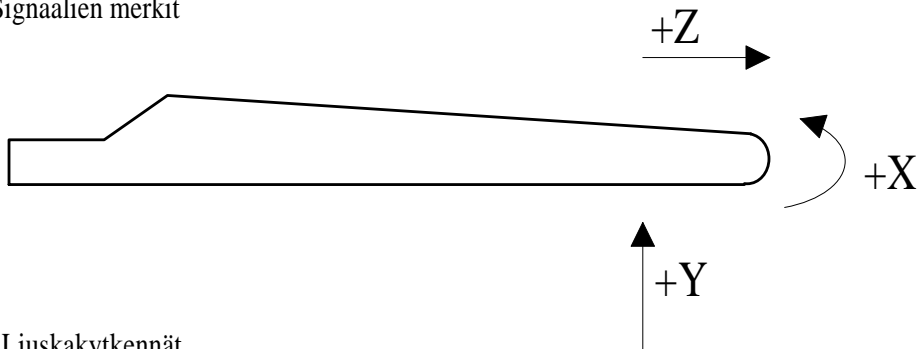


Kuva 11. Pyhätunturin mittausjärjestelyjen tiedonkeruu.

## Liuscojen sijoitus lapaan

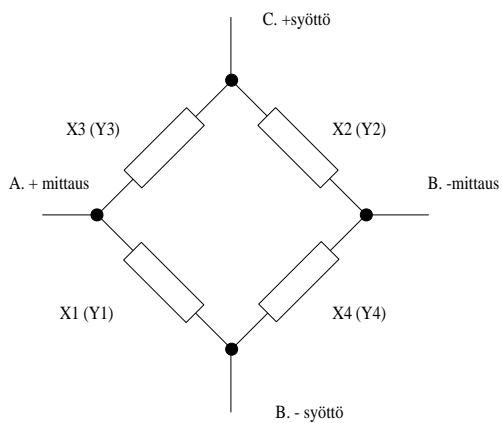


## Signaalien merkit

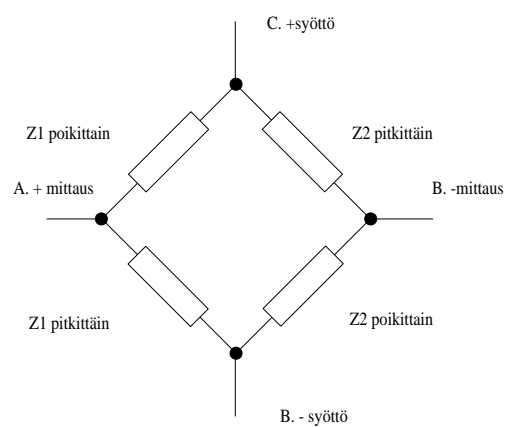


## Liuskakytkennät

Taivutusmomentti, suora tuplaliuska HBM 6/350DY11



Veto/puristus, XY-liuska HBM 6/350XY11



Kuva 12. Venymäliuskojen sijainti ja kytkennät

## 6.2 Tuloksia

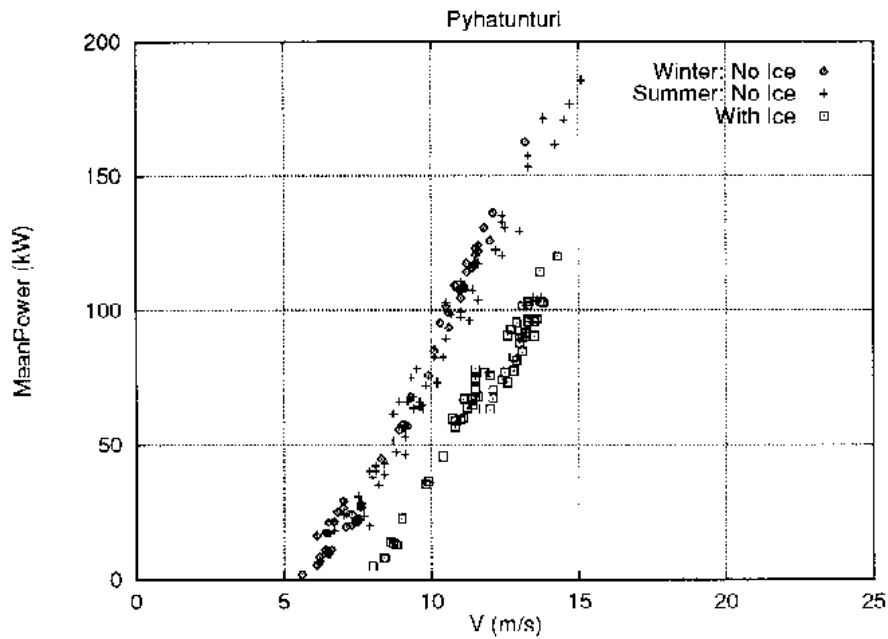
Jään vaikutusten kannalta kuormitusmittausten kiinnostavimmat tilanteet ovat ne, joissa tuulennopeus ja -suunta ovat samat, mutta toinen tilanne on jäätyneestä tilanteesta ja toinen puhtaasta. Nämä mittaukset suoritettiin 23.3.1994 ja 16.2.1995, molemmat aamulla kello 9.00. Tuulennopeus ja -suunta olivat 13 m/s ja 144° (kaakko).

Vuoden -94 tilannetta edeltävä vuorokausi oli selkeä ja koko aamupäivän paistoi aurinko. Lämpötila oli hieman alle -10 °C. Sää ei siis ollut jäätävä.

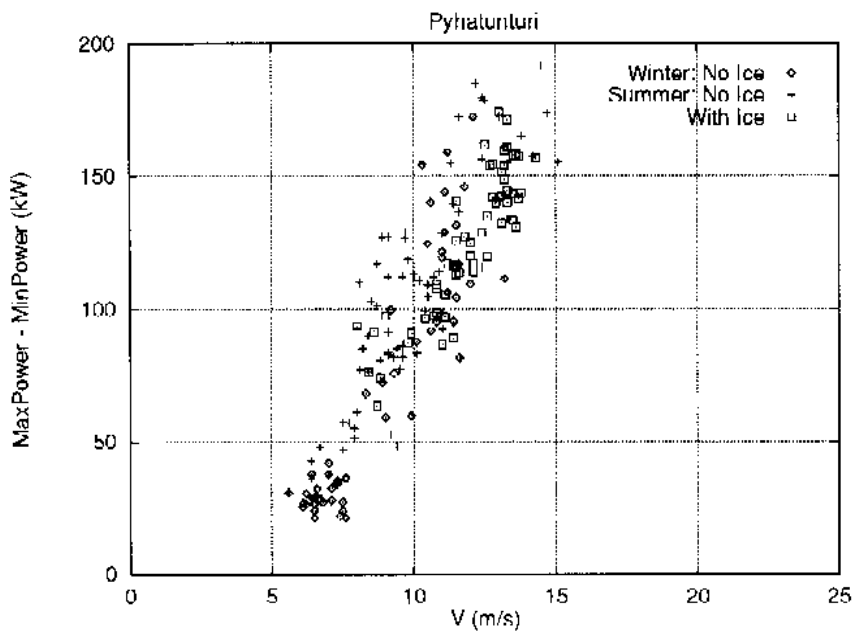
Vuoden -95 vastaavaa mittausta edeltävä vuorokausi oli pilvinen ja aika-ajoin satoi hieman lunta. Lämpötila oli noin -2 °C. Sää pysyi samanlaisena koko aamupäivän. Olosuhteet olivat jäätävät.

Kuvassa 13 on voimalan mitattu tehokäyrä ko. tilanteita ympäröivältä vuorokaudelta suuntasektorin ollessa 144 ± 20 astetta. Mukaan on myös liitetty tehokäyrä kesän tehomittauksista vuoden -94 tilanteen jäättömyyden varmentamiseksi. Tulokset on korkeus- ja lämpötilakorjattu vastaamaan standardiolosuhteita (ilman lämpötila on 15 C° ja paine 1.0133 bar, jolloin tiheys 1.225 kg/m<sup>3</sup>). Jään aiheuttama tehon muutos on selvä. Tällainen tehon pieneneminen aiheuttaa Weibull-jakautuneella tuulella helposti 50 %:n energiatuotannon menetyksen. Näin vähäisestä havaintoaineistosta on vaikea sanoa pieneekö suoran osuuden kulmakerroin kuten luvun 5 tarkastelut noste- ja vastuskertoimien muutoksista osoittavat.

Mittauksissa ei ollut käytettävissä tehon nopeaa aikasarjaa (1 Hz) tai 10 minuutin keskihajontaa vaan ainoastaan tehon keskiarvo, maksimi ja minimi. Maksimin ja minimin erotus on verrannollinen keskihajontaan, mutta mitään selvästi havaittavaa muutosta ei tässä havaittu (kuva 14). Tanskassa suoritettujen vastaavien mittausten perusteella odotettiin tehon hajonnan pienenevän selvästi, kun lapa jäätyy [7]. Odotettu keskihajonnan pienenemisen puuttuminen voi aiheutua massaepätasapainon aiheuttamasta voimakkaasta 1P värähtelystä, jota käsitellään myöhemmin tässä ja seuraavassa kappaleessa.



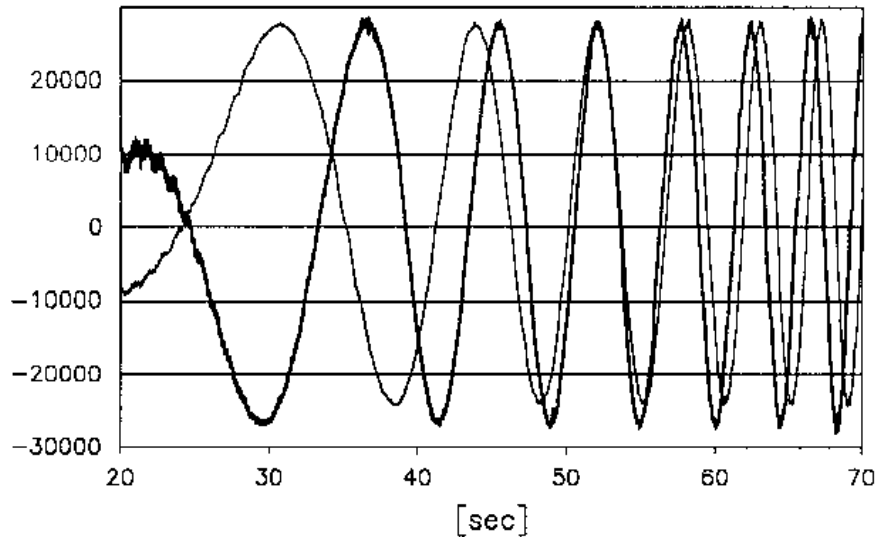
Kuva 13. Mitattu tehokäyrä jäätyneessä, puhtaassa ja kesätilanteessa.



Kuva 14. Tehon maksimin ja minimin erotus.

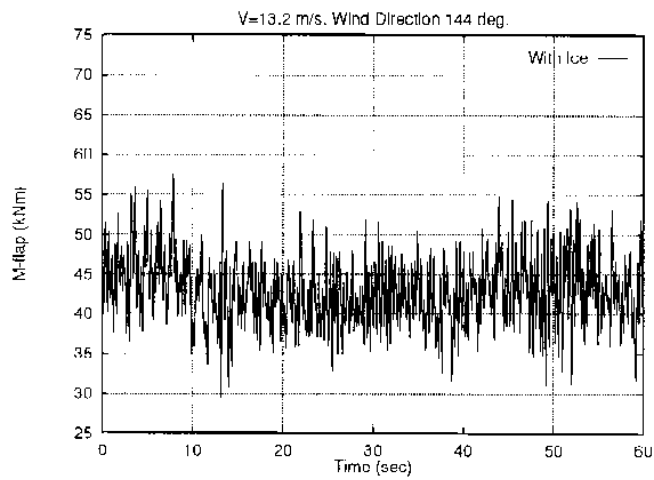
Noin tunti jäätyneen tapauksen mittauksen jälkeen voimala pysäytettiin ja käynnistettiin uudelleen. Käynnistyessään voimala pyörii hitaasti ja jänteen suuntaisesta momentista arvioitiin jään massa olettaen jääkertymän jakautuman olevan kolmion muotoinen kärkeä kohden kasvaen  $/6/$ . Jään kokonaismassa on tällöin ollut 10 kg siten, että kärjessä ollut jää (1.6 kg/m) aiheutti noin 5%:n eli 3 cm:n lisäyksen jänteen pituuteen. Jään mää-

rä ei siis ole ollut kovin suuri. Kuvassa 15 on jänteen suuntainen momentti jäätyneessä ja jäättömässä käynnistystilanteessa.

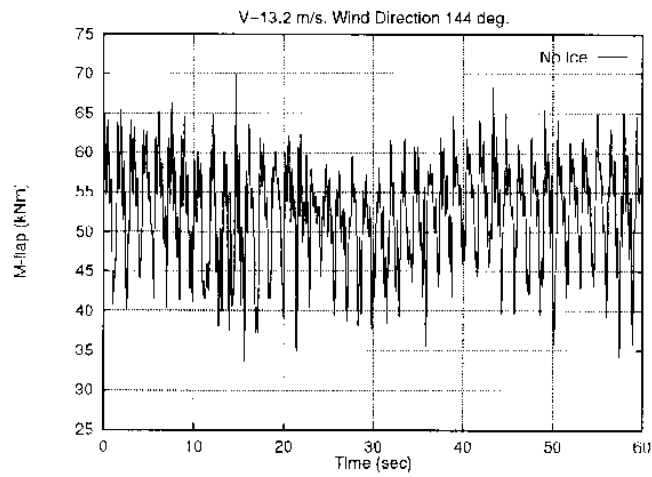


*Kuva 15. Käynnistyvän voimalan jänteen suuntainen signaali puhtaalla ja jäisellä (lihavoitu kuvaaja) tilanteella. Jään massan aiheuttama pieni amplitudin kasvu on havaittavissa.*

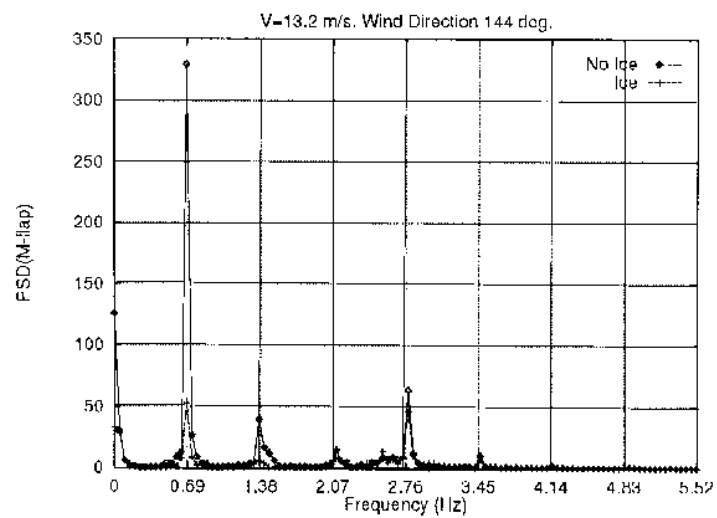
Lavan flap-suuntaisen momentin (kuvat 16 ja 17) keskihajonta pieneni jään vaikutuksesta 50 %. Kuva 18 osoittaa 1P eli kerran kierroksessa tapahtuvan ilmiön aiheuttaman taajuuspiikin pienenneen kertoimella 6. Tämä sopii hyvin yhteen kappaleen 5 tulosten kanssa, koska 1P (n. 0,69 Hz) aiheutuu merkittävästi tornin varjon aiheuttamasta kohtauskulmamuuutoksesta ja koska tässä toimitaan sakkausalueella, jolloin jäätyneen profiilin kohtauskulman muuttuminen ei vaikuta suuresti nostekertoimeen sakkausalueella tapahtuneen tasoittumisen vuoksi.



Kuva 16. Flap-momentit jäätyneessä tilanteessa.

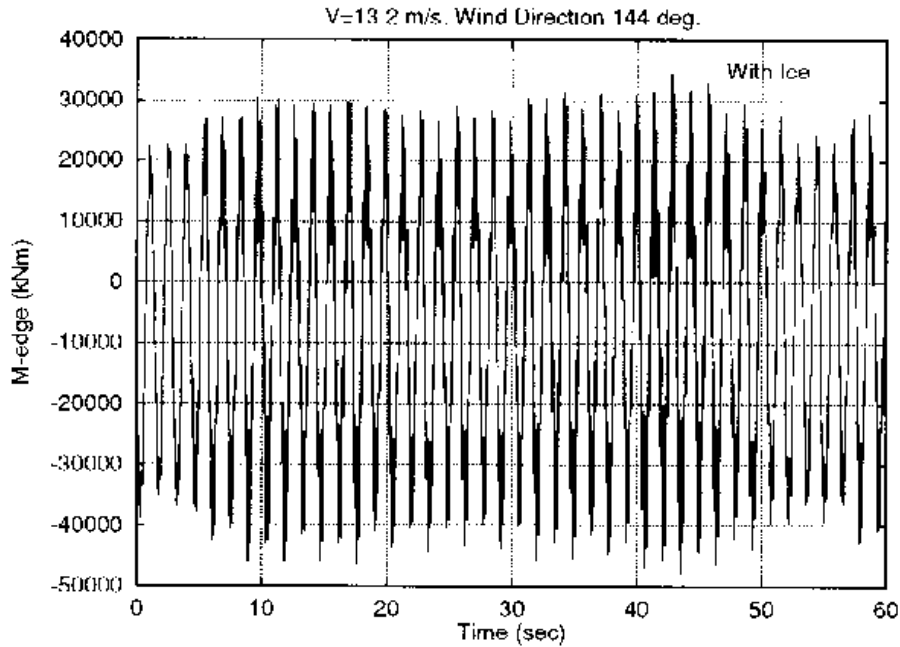


Kuva 17. Flap-momentti puhtaassa tilanteessa.

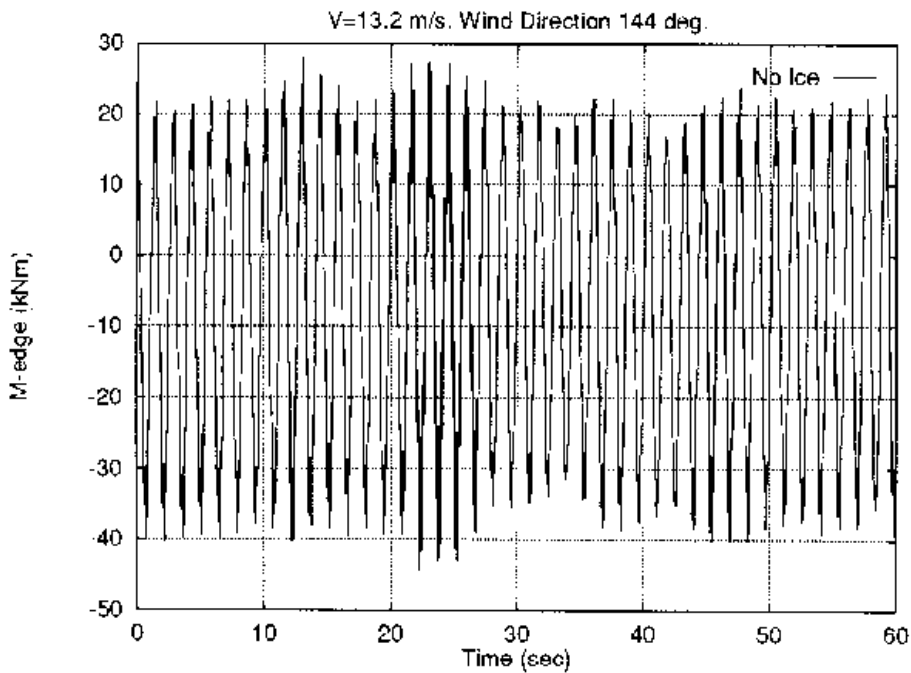


Kuva 18. Flap-momenttien tehospektrit.

Lavan jänteen suuntaisen momentin tehospektri (kuva 21) osoittaa 1P piikin kasvaneen lähinnä jään massan vaikutuksesta. Lavan ominaistajuudella noin 4.8 Hz kasvu on ollut viisinkertainen. Tämä viittaa vaimennuksen pienentymiseen./7/

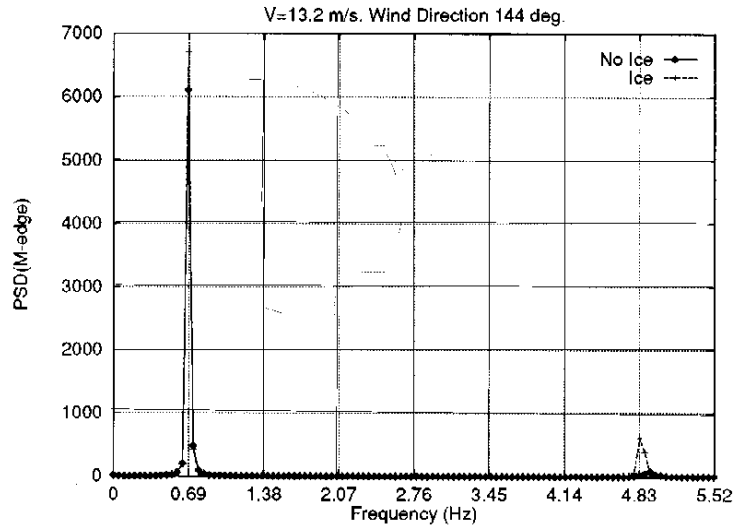


Kuva 19. Jänteen suuntainen momentti jäätyneessä tilanteessa.



Kuva 20. Jänteen suuntainen momentti puhtaassa tilanteessa.

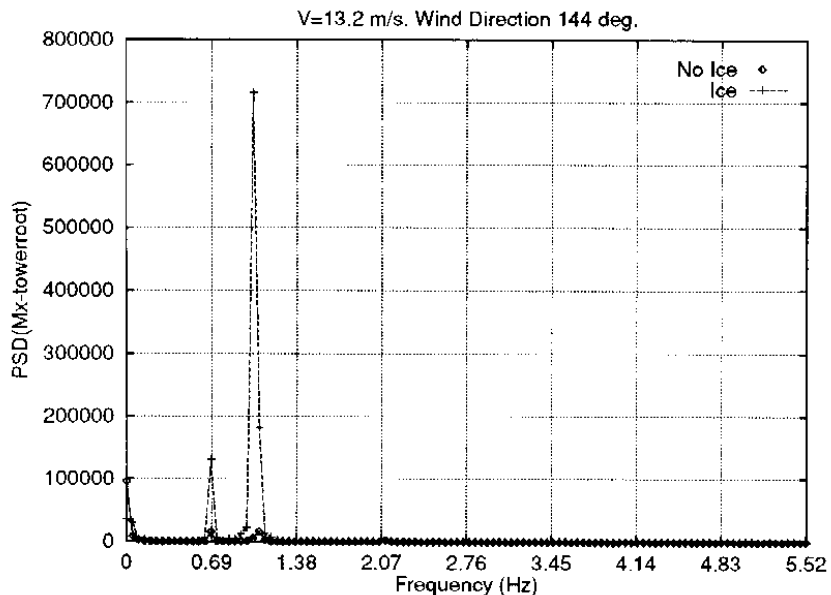




Kuva 21. Jänteen suuntaisten momenttien tehospektrit.

Tornin värähtelyt ovat kasvaneet jäätyneessä tilanteessa sekä ominaistajuudella (n. 1Hz) että 1P-taajuudella erittäin voimakkaiksi (kuva 22). 1P muutoksen voi selittää roottorin massaepätasapainolla. Värähtelyiden kasvuun ominaistajuudella ei löydy selitystä toistaiseksi.

Minkään lapojen tai tornin ominaistajuuden ei huomattu juurikaan siirtyneen.



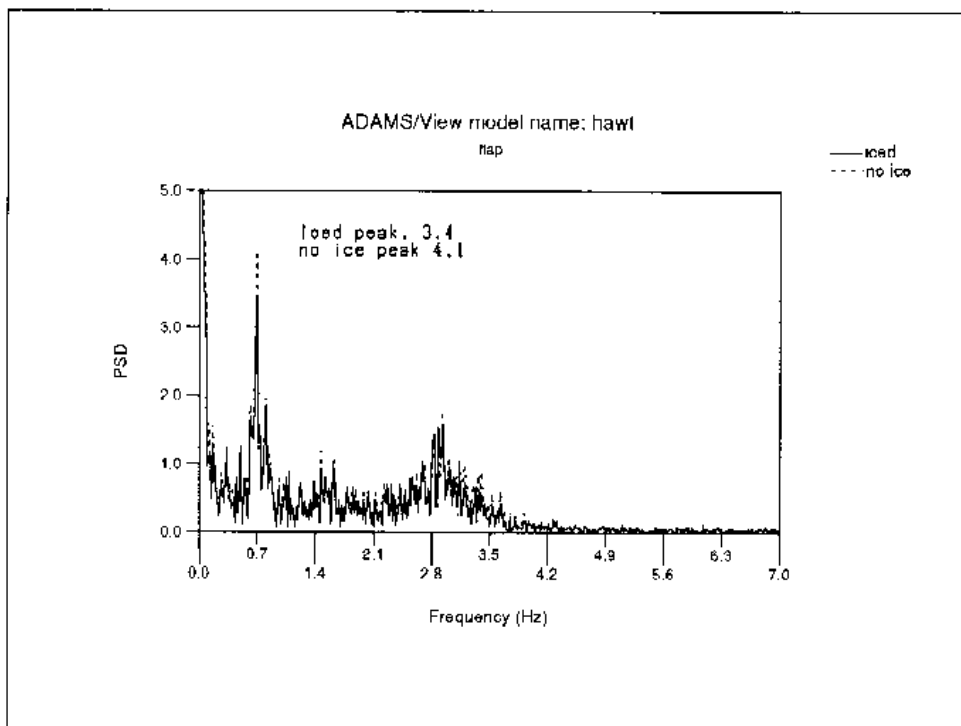
Kuva 22. Tornimomentin tehospektri jäätyneessä ja puhtaassa tilanteessa.

## 7. Simulointituloksia

ADAMS-mallilla (luvut 2, 3 ja 4) pyrittiin simuloimaan edellisessä kappaleessa esitetyjä mittauksia vastaavat tilanteet.

Simuloinneissa jäätynyttä tilannetta on mallinnettu lisäämällä yhteen yhteensä 10 kg:n massa lapaan kolmion muotoon /6/ sekä muuttamalla kaikkien lapojen aerodynamiikkaa kappaleen 5 tulosten mukaisiksi. Lapojen tyvessä aerodynamiikkaa ei muutettu jään oletetun vähäisyyden vuoksi. Simuloinnissa tuulen keskinopeus on vastannut mittaustilannetta, mutta koska mittaustilanteen turbulentsisuudesta ei ollut tietoa ja koska haluttiin saada voimakkaita heräitteitä niin valittiin melko voimakas turbulentsisuus.

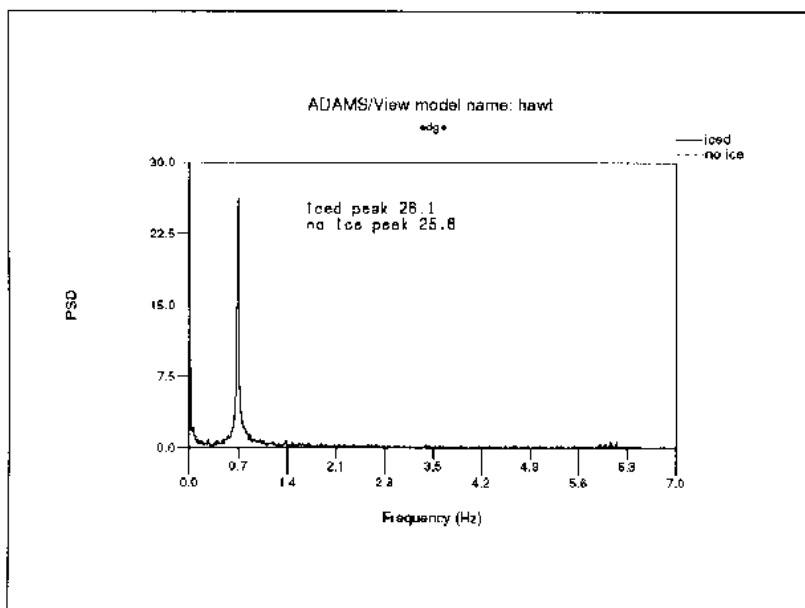
Kuvassa 23 on esitetty flap-momentin tehospektrit. 1P-taajuuden piikki on jäätyneessä tapauksessa alentunut hieman, noin 20 %, kun mittauksissa havaittu pieneneminen oli noin 80%. Simuloinnissa ei havaittu muita vaikutuksia jään vaikutuksesta, kun vastaavassa mittaustilanteessa havaittiin vähäinen piikkien pieneneminen koko alueella.



Kuva 23 Flap-momenttien tehospektrit.

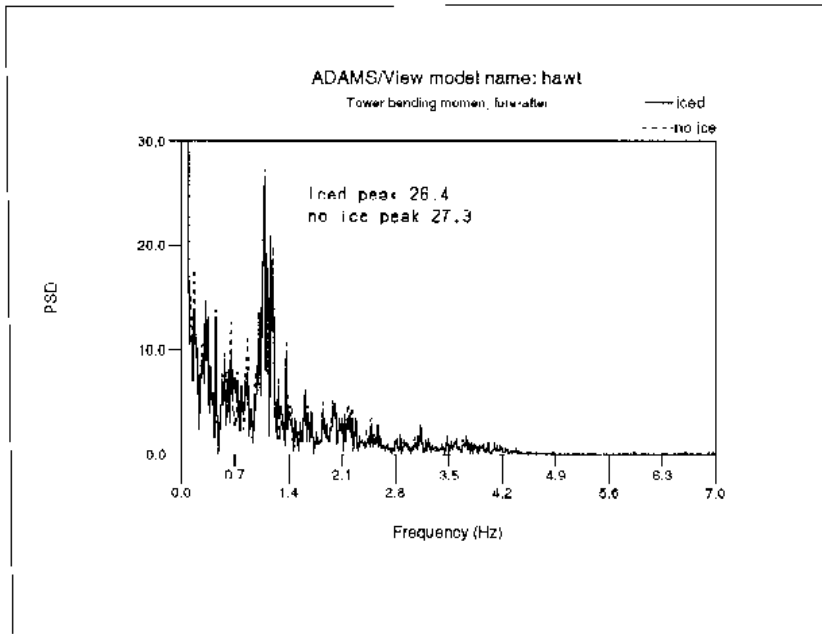
Jänteen suuntaisen momentin 1P-värähtely on voimistunut hieman massan lisäyksestä (kuva 24), mutta vähemmän kuin mittauksissa. Ilmeisesti jään muoto on mittauksissa ollut erilainen kuin mitä oli oletettu.

Simulointituloksen ominaistajuus ei ole mallilla aivan kohdallaan. Mallilla se on noin 6 Hz ja sijoittuu 8P- ja 9P-taajuuksien väliin. Mittauksissa se on noin 5 Hz ja asettuu lähelle 7P-taajuutta. Simuloinnissa ei havaittu vastaavaa ominaistajuuspiikin kasvua kuin mittauksissa. Mittauksissa kyse voi olla 7P:n aiheuttamasta herätteestä, jota vastaavaa ei simuloinnissa tapahdu, tai sitten olosuhteissa on ollut jokin tekijä, joka on saanut aikaan voimakkaan värähtelyn ominaistajuudella.

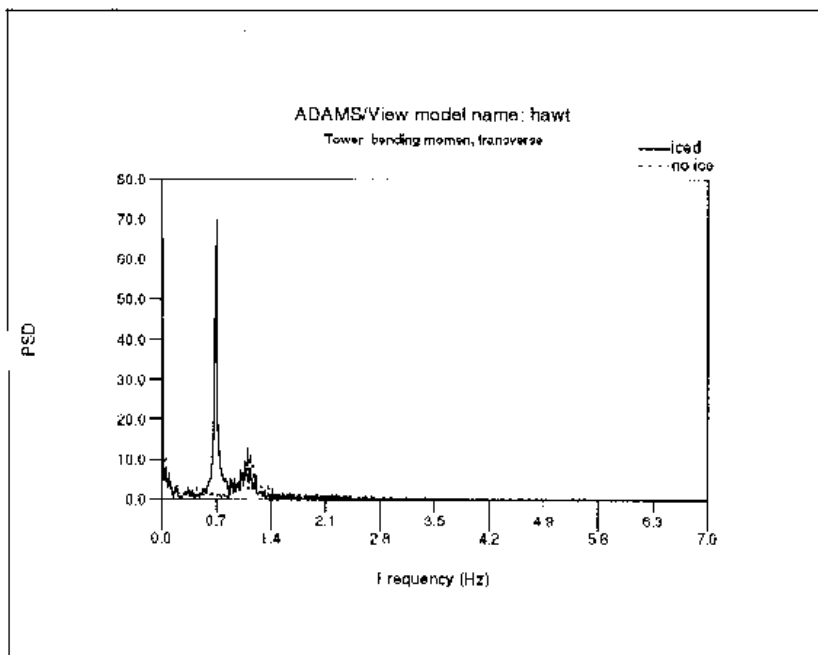


Kuva 24. Jänteen suuntaisen momentin tehospektrit.

Simulointituloksissa on tornin juuren momentti kuvattuna kahdella komponentilla, tuulen suuntaan eli eteen-taakse suuntaisena (kuva 25) ja roottorisuunnassa eli poikittaissuuntaan (kuva 26). Mittaustuloksissa oli tarkasteltu vain näiden yhteisvaikutusta. Massaepätasapainon aiheuttama 1P-värähtely havaitaan poikittaissuunnassa kuten myös mittaustuloksissa, mutta mittauksissa havaittua ominaistajuuden 1 Hz:n voimakasta värähtelyn kasvua ei simuloitaessa havaita, vaan päinvastoin värähtelyn väheneminen, vaikkakin hyvin vähäinen.



Kuva 25. Tornimomentin eteen-taakse -suuntaisen komponentin tehospektrit.



Kuva 26. Tornimomentin poikittaissuuntaisen komponentin tehospektrit.

Kaiken kaikkiaan simuloinnin tulokset ovat varsin vähäiset. Todellisiin avoimiin kysymyksiin ei löytynyt vastauksia, vaan havaitut tulokset ja yhteneväisyydet mittausten kanssa ovat odotettuja: massaepätasapainon aiheuttama 1P-värähtely tornilla ja jänteen suunnassa sekä 1P-värähtelyn vaimeneminen flap-suunnassa nostekertoimen Cl muutosten johdosta.

Mittaustilanteessa on lähes aina tekijöitä joita ei voi ottaa huomioon. Lisämittalaitteilla ja mittauksilla, sekä siten kattavammalla analyysillä voidaan näitä epävarmuustekijöitä vähentää, jolloin simuloinneissakin voidaan päästä lähemmäksi vastauksia tai saada tuloksiksi tutkimusta suuntaavia kysymyksiä. Tuulen turbulenssin mittaus ei anna koko totuutta tuulen herätteestä koska tuulella voi aiheuttaa hyvinkin erilaisen herätteen vaikka kahdella tapauksella olisikin sama keskinopeus ja turbulenssi. Vaikkei näillä kahdella parametrillä tuulta voikaan täydellisesti kuvata, vähentäisi näiden molempien tietäminen epävarmuutta.

Toinen selvä puute mittauksissa on ollut voimalan suuntatiedon puuttuminen. Mikäli tuuli ei tule täsmälleen samasta suunnasta kuin mihin voimala on suunnattu, kuten tilanne käytännöllisesti katsoen aina on, aiheutuu tästä poikkeamasta voimakas heräte.

Muita epävarmuustekijöitä ovat mm. jään massa ja muoto kaikissa kolmessa lavassa, lavan todelliset, käytössä muuttuneet, aerodynaamiset ja rakenteelliset ominaisuudet.

## 8. Yhteenveto

Jään kertyessä voimalan lapoihin voimalan tuotanto pienenee, koska noste pienenee ja vastus kasvaa. Jäätymisen edetessä nostekertoimen Cl kulmakerroin pääsääntöisesti pienenee, sakkauksulma pienenee ja sakkausalueella kuvaaja tasoittuu. Vastaavasti vastuskerroin kasvaa ja kohtauskulman kasvaessa jyrkkenee puhtaaseen tilanteeseen verrattuna.

Pyhätunturin koevoimalan kuormitusmittauksissa onnistuttiin mittaamaan kaksi tuulioloiltaan samanlaista tilannetta, jossa toisessa voimala on jäinen ja toisessa jäätön. Jäätä arvioitiin kertyneen lavan kärjessä noin 5 % (3 cm) lisää jänteen pituuteen ja kertymän vähenevän tyveä kohti. Yhteensä jäätä arvioitiin kertyneen 10 kg. Jo näinkin vähäinen jäätymisen voi aiheuttaa energian tuotannon puolittumisen. Tuotettu teho oli pienentynyt, mutta tehon keskihajonta pysyi ennallaan eikä pienentynyt kuten oli odotettu muiden mittausten perusteella.

Lavan flap-suuntaisen momentin keskihajonta pieneni jään vaikutuksesta 50 % ja 1P eli kerran kierroksessa tapahtuvan ilmiön aiheuttaman taajuuspiikki pieneni kertoimella 6.

Lavan jänteen suuntaisen momentin tehospektri osoittaa 1P piikin kasvaneen, joka johtuu lähinnä jäämassan vaikutuksesta. Lavan ominaistajuudella piikin kasvu on ollut viisinkertainen. Tämä viittaa vaimennuksen pienentymiseen

Tornin värähtelyt ovat kasvaneet jäätäneessä tilanteessa sekä ominaistajuudella että 1P-taajuudella erittäin voimakkaiksi 1P muutos aiheutuu roottorin massaepätasapainosta, mutta värähtelyiden kasvuun ominaistajuudella ei löydy selitystä toistaiseksi.

Mittaustilanteessa on lähes aina tekijöitä, joita ei voi ottaa huomioon. Lisämittalaitteilla ja mittauksilla, sekä siten kattavammalla analyysillä voidaan näitä epävarmuustekijöitä vähentää. Puutteina mittauksissa on ollut mm. tuulen turbulenssitiedon puuttuminen ja voimalan suuntatiedon (yaw) puuttuminen. Jatkossa mittausjärjestelyitä aiotaan täydentää ja suorittaa lisämittauksia.

Tuulivoimalan dynamiikan mallinnus- ja analyysiohjelmistoa ADAMS/WT:a on VTT:ssä kehitetty lisäämällä muutama lisäpiirre, joita ovat pääakselin kallistuskulma (tilt), kärkijarru ja simuloinnin transienttisen käynnistyksen vaimennin. Aerodynamiikan laskevaan ohjelmaan on myös tehty lisäyksiä.

Simuloinneissa saatiin samansuuntaisia tuloksia kuin mittauksissa. Kaikkia mittauksissa havaittuja ilmiöitä ei esiintynyt simulointituloksissa: tämä johtuu erilaisista epävarmuustekijöistä ja todellisten ilmiöiden puutteellisesta tuntemisesta. Lisämittauksin pyritään eteenpäin myös mallinnuksen kehittämisessä.

## Lähdeluettelo

- 1 Spera, D.(ed.): Wind Turbine Technology, Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering. New York: ASME Press, 1994. 638 p.
- 2 Södergård, B. Vindkraftboken. Stockholm: Ingenjörslaget, 1978. 176s
- 3 Antikainen, P. Tuulivoimalan dynamiikka epälineaarisissa kuormituksen muutostilanteissa. Teknillinen korkeakoulu, diplomityö, 1996. 58 s + liit. 3 s.
- 4 Pihlatie, M. Tuulen turbulenssimalli ADAMS/WT-ohjelmiston käyttöön. Teknillinen korkeakoulu, erikoistyö, 1995. 24.s + liit. 18 s.
- 5 Dahlqvist, A. The Effects of Ice on the Aerodynamics of the Rotor Blades of a Wind Turbine. Teknillinen korkeakoulu, diplomityö 1997. 90 s.
- 6 Richert, F. & Seifert, H. Eis im Kanal. Dewi Magazin. Helmikuu 1997. S. 4-13.
- 7 Vølund, P. & Antikainen, P. Ice Induced Loads on Wind Turbines. EWEC'97 Dublin. Paper IO.9.